

目 录

1. 概论 (责任编辑委员 宫川松男).....	1
1.1 压力加工 (宫川松男).....	1
1.1.1 定义和分类	1
1.1.2 特征	2
1.2 材料的加工条件 (宫川松男)	3
1.2.1 概述	3
1.2.2 材料的力学性质	4
1.2.3 加工中材料内部产生的应力和变形	14
1.2.4 变形温度	20
1.2.5 变形速度	24
1.2.6 各向异性	28
1.2.7 加工过程中产生的缺陷和破损	33
1.2.8 材料和工具的接触条件	39
1.3 生产管理	39
1.3.1 生产管理概述 (若井 清)	39
1.3.2 质量管理 (大岛泰毅)	54
1.3.3 成本管理 (太田正贞)	61
1.3.4 安全管理 (真利子诚)	67
1.3.5 模具管理 (太田正贞)	79
1.3.6 设备计划和设备管理 (杉村俊雄, 堀富孝史)	81
1.3.7 润滑管理 (堀富孝史).....	108
1.4 冲压作业 (桥本 明).....	115
1.4.1 冲压作业和冲压工人.....	115
1.4.2 坯件的排样和材料利用率.....	115
1.4.3 现场作业和效率.....	117
1.4.4 缩短准备时间的途径.....	118
1.4.5 现场作业中的注意事项和规则.....	123
引用文献	126
参考文献	126

2. 冲裁加工(责任编辑委员 前田禎三)	127
2.1 冲裁加工概述 (前田禎三)	127
2.2 冲裁加工理论	130
2.2.1 冲裁加工机理 (神馬 敬)	130
2.2.2 冲裁加工特性 (前田禎三)	139
2.2.3 冲裁模的磨损和寿命	157
2.3 冲裁模设计	163
2.3.1 冲裁模设计步骤 (長屋 稔)	163
2.3.2 凸模设计	171
2.3.3 凹模设计	174
2.3.4 间隙	175
2.3.5 排样 (長屋 稔, 桥本 明)	178
2.3.6 搭边宽度	186
2.3.7 模架的选择基准	187
2.3.8 硬质合金模设计	191
2.3.9 压力机用冲裁模的级别表	193
2.3.10 模具零件的材质和淬火硬度	195
2.3.11 凸模导向板	196
2.3.12 冲模工作部分的尺寸标注法	199
2.3.13 冲模图校核基准	200
2.4 精密冲裁 (中川威雄)	204
2.4.1 修整法	204
2.4.2 光洁冲裁法	212
2.4.3 精密冲裁法	217
2.4.4 其他精密冲裁法	226
2.5 冲裁件形状的选择方法 (長屋 稔)	231
2.6 非金属材料的冲裁 (前田禎三)	239
2.6.1 酚醛树脂层压板	239
2.6.2 热塑性塑料	249
2.7 棒料及管材的剪切 (中川威雄)	260
2.7.1 棒料的剪切	260
2.7.2 管材的剪切	268

引用文献	273
参考文献	275
· 弯曲加工(责任编辑委员 室田忠雄)	276
3.1 弯曲加工概述 (室田忠雄)	276
3.1.1 弯曲加工的分类	276
3.1.2 塑性弯曲的纯理论	277
3.1.3 弯曲时材料的变形	287
3.2 板料的压力机弯曲 (户泽康寿)	289
3.2.1 弯曲模	289
3.2.2 成形原理	299
3.2.3 加工极限	307
3.2.4 加工精度	314
3.2.5 弯曲件和弯曲模的设计	325
3.3 板料的滚弯 (曾田長一郎)	332
3.3.1 概述	332
3.3.2 辊式弯板机	333
3.3.3 三辊弯板机和四辊弯板机的弯曲成形	338
3.3.4 二辊弯曲	344
3.4 板料的滚压成形 (加藤健三)	345
3.4.1 特征	345
3.4.2 成形原理	346
3.4.3 滚压成形力和滚压成形扭矩	348
3.4.4 带料的塑性变形	352
3.4.5 滚压成形用材料	357
3.4.6 滚压成形设备	358
3.4.7 辊轮设计	359
3.4.8 成形辊轮孔型的实例	364
3.5 型材、管材的弯曲加工 (室田忠雄, 远藤顺一)	370
3.5.1 弯曲加工的方式	370
3.5.2 横断面形状和壁厚的变化	375
3.5.3 最小弯曲半径	385
3.6 多滑块压力机的弯曲加工	396

3.6.1	多滑块压力机的基本动作 (杉村俊雄).....	399
3.6.2	应用动作.....	400
3.6.3	实例 (杉村俊雄, 足立达也).....	404
	引用文献.....	409
4.	成形加工(责任编辑委员 吉田清太).....	413
4.1	冲压成形概述 (宫内邦雄, 吉田清太).....	413
4.1.1	冲模.....	413
4.1.2	基本成形的类型和冲压成形的分类.....	415
4.1.3	基本成形特征.....	419
4.1.4	冲压成形的缺陷.....	420
4.1.5	冲压成形性和材料特性.....	429
4.1.6	冲压成形技术.....	433
4.1.7	成形和变形状态.....	434
4.1.8	冲压成形条件和作业效果.....	438
4.2	冲压成形用薄板 (吉井康一, 西村 尚).....	439
4.2.1	一般的评定标准.....	439
4.2.2	材料的各种因素和成形性.....	441
4.2.3	薄钢板.....	443
4.2.4	不锈钢板.....	445
4.2.5	铝及铝合金板.....	447
4.2.6	铜及铜合金板.....	449
4.2.7	其它金属板.....	451
	附表 各种金属板料的成形性试验值.....	453
4.3	成形性试验 (吉井康一, 西村 尚).....	461
4.3.1	拉伸试验.....	462
4.3.2	液压胀形试验.....	465
4.3.3	爱利克辛 (Erichsen) 试验.....	467
4.3.4	凸模纯胀形试验.....	468
4.3.5	拉延杯形件试验.....	469
4.3.6	锥杯试验.....	472
4.3.7	扩孔试验.....	473
4.3.8	其他试验.....	474

4.4	小型零件基本形状的成形 (太田唯男, 宫内邦雄).....	476
4.4.1	圆筒形件的成形.....	477
4.4.2	盒形件的成形.....	498
4.4.3	椭圆筒形件的成形.....	506
4.4.4	带凸缘件的成形.....	510
4.5	连续模 (杉村俊雄).....	514
4.5.1	连续模的一般特征.....	514
4.5.2	连续模实例.....	517
4.6	中型零件的成形 (森田 稔).....	543
4.6.1	制件图的研究.....	543
4.6.2	工艺设计.....	544
4.6.3	模具设计.....	552
4.7	大型零件的工艺设计.....	559
4.7.1	工艺设计前的准备 (须贺原幸夫).....	560
4.7.2	工艺设计.....	561
4.7.3	应记入工艺卡的事项.....	571
4.7.4	大型零件的模具设计.....	572
4.7.5	模具的试验 (小林敏郎).....	578
4.7.6	大型零件的装置.....	590
4.7.7	冲压车间及其管理 (须贺原幸夫).....	600
4.8	张拉成形 (加贺 广).....	604
4.8.1	张拉成形的基础.....	604
4.8.2	复合曲面的张拉成形.....	610
4.8.3	型材和管材的张拉成形.....	615
4.8.4	张拉成形法 (设备).....	617
4.8.5	成形加工的张拉力.....	625
4.8.6	模具和润滑剂.....	626
4.9	回转成形 (叶山益次郎).....	627
4.9.1	概述.....	627
4.9.2	旋压加工.....	631
4.9.3	强力旋压加工.....	638
4.9.4	管坯变薄旋压加工.....	643

4.9.5	旋压、强力旋压和复合旋压的加工示例	647
4.9.6	其他回转成形	651
4.10	树脂成形和液压成形 (阿部邦雄)	655
4.10.1	树脂成形	655
4.10.2	液压成形	666
4.11	高能高速加工 (古川 浩)	669
4.11.1	概述	669
4.11.2	高能加工的特征	670
4.11.3	材料的变形行为	671
4.11.4	加工后制件 (试样) 的行为及其物理性能与机械性能的变化	676
4.11.5	冲击源	676
4.11.6	其他, 爆炸或放电后的能量转换机理	677
4.11.7	加工条件	677
4.11.8	成形设备及成形方法	678
	引用文献	694
5.	压缩加工 (责任编辑委员 工藤英明)	699
5.1	概论	699
5.1.1	概述 (工藤英明)	699
5.1.2	制件设计	703
5.1.3	材料和坯料	706
5.1.4	材料变形和缺陷	709
5.1.5	力和能量 (工藤英明、益田 亮)	725
5.1.6	制件质量	735
5.1.7	工具	743
5.1.8	工艺的选择和设计	747
5.2	冷锻	749
5.2.1	概述 (楠 兼敬)	749
5.2.2	原材料	751
5.2.3	制件设计 (工藤英明)	762
5.2.4	坯料准备 (楠 兼敬, 泽道 弘)	765
5.2.5	工艺和模具设计 (楠 兼敬, 工藤英明, 泽道 弘)	772

5.2.6	模具制造和管理 (海老正人).....	809
5.2.7	加工设备 (工藤英明, 泽道 弘).....	817
5.2.8	制件质量和后续工序 (楠 兼敬, 工藤英明).....	819
5.2.9	作业要点 (工藤英明).....	827
5.3	热锻 (中泽繁夫, 立松武雄).....	828
5.3.1	概述.....	828
5.3.2	原材料.....	830
5.3.3	锻件设计.....	837
5.3.4	坯料准备.....	846
5.3.5	工艺和模具设计.....	855
5.3.6	模具制造和管理.....	869
5.3.7	加工设备.....	874
5.3.8	锻件的后续工序及其质量.....	881
5.3.9	生产线、作业方法和要点.....	887
5.4	温锻 (山本博一).....	895
5.4.1	概述.....	895
5.4.2	工模具的问题.....	896
5.4.3	润滑.....	897
5.4.4	锻件质量.....	898
5.4.5	操作方法和实例.....	900
5.5	热挤压.....	900
5.5.1	概述 (工藤英明).....	900
5.5.2	制件设计.....	902
5.5.3	坯料准备和润滑 (山口正邦).....	906
5.5.4	挤压用工具.....	908
5.5.5	加工设备的选择和生产线的组成 (工藤英明).....	917
5.5.6	后续工序和制件质量.....	919
5.6	轧锻 (回转锻造).....	920
5.6.1	概述 (工藤英明).....	920
5.6.2	辊锻 (中泽繁夫).....	921
5.6.3	辗环.....	923
5.6.4	楔形模横轧 (楠 兼敬).....	923

5.6.5	径向锻造 (工藤英明).....	928
5.6.6	钢球轧制 (栗野泰吉).....	942
5.6.7	翅片管轧制 (中山邦博).....	945
5.6.8	麻花钻头坯料轧制 (武藤孝治).....	950
5.7	螺纹滚轧.....	950
5.7.1	概述 (益田 亮).....	950
5.7.2	原材料.....	953
5.7.3	制件设计 (工藤英明).....	954
5.7.4	坯料准备 (益田 亮).....	955
5.7.5	工具的设计和制造.....	959
5.7.6	加工设备.....	967
5.7.7	制件质量.....	973
5.7.8	滚轧作业.....	976
5.8	成形件滚轧.....	980
5.8.1	齿轮和花键滚轧 (植川武男).....	980
5.8.2	其他滚轧 (武藤孝治).....	996
	引用文献.....	999
6.	加工设备和模具 (责任编辑委员 山田嘉昭).....	1002
6.1	锻压设备的种类 (柳内善治郎).....	1002
6.1.1	锻压设备的定义.....	1002
6.1.2	锻压设备的形式的多样性.....	1002
6.1.3	锻压设备的特征.....	1004
6.1.4	机械压力机和液压机的比较.....	1004
6.1.5	机械压力机的分类.....	1006
6.1.6	液压机的分类.....	1013
6.2	压力机的能力 (柳内善治郎).....	1014
6.2.1	公称能力.....	1014
6.2.2	曲柄压力机的能力.....	1015
6.2.3	偏心载荷能力和集中载荷能力.....	1017
6.2.4	压力机能力的选择方法.....	1019
6.3	压力机的参数 (柳内善治郎).....	1020
6.3.1	压力机的基本参数.....	1020

6.3.2	特殊参数和性能	1024
6.4	压力机构成要素 (柳内善治郎)	1028
6.4.1	基本的构成要素	1028
6.4.2	附属装置	1034
6.5	压力机的精度和检查 (岩松真之)	1036
6.5.1	压力机精度的分类	1037
6.5.2	垫板 (或机身) 上平面的不平度	1038
6.5.3	滑块下平面和垫板上平面的不平行度	1038
6.5.4	滑块的上下运动和垫板上平面的不垂直度	1039
6.5.5	模柄安装孔和滑块下平面的不垂直度	1040
6.5.6	连接部分上下运动的综合间隙	1040
6.5.7	滑块下平面的不平度	1041
6.5.8	拉延垫上平面的不平度	1041
6.5.9	拉延垫上平面和垫板上平面的不平行度	1041
6.5.10	滑块和导轨的间隙	1041
6.5.11	静态精度和动态精度	1042
6.5.12	偏心载荷精度	1043
6.6	安全装置 (秋山英司)	1043
6.6.1	冲压事故与防止	1043
6.6.2	防护装置	1054
6.6.3	安全管理	1061
6.7	维修 (长谷部勉)	1064
6.7.1	维修与可靠性	1064
6.7.2	预防性检修	1065
6.7.3	故障	1066
6.7.4	机械压力机的维修	1068
6.8	锻压设备的自动化 (中村庸夫)	1072
6.8.1	由于实行自动化得到的利益	1072
6.8.2	自动化的种类	1073
6.8.3	自动化装置	1075
6.8.4	自动化生产线	1079
6.9	压力机的防振和消声	1086

6.9.1	振动缓冲 (大沢 匡)	1086
6.9.2	防振材料的种类	1088
6.9.3	噪声诊断 (中野有朋)	1090
6.9.4	噪声防止技术	1092
6.10	一般压力机 (柳内善治郎)	1093
6.10.1	曲柄压力机	1093
6.10.2	无曲柄压力机	1095
6.10.3	摩擦压力机	1096
6.10.4	肘杆压力机	1097
6.10.5	联杆压力机	1098
6.10.6	双动压力机	1098
6.10.7	特殊压力机和自动压力机	1100
6.10.8	液压机	1106
6.11	剪切机 (柳内善治郎)	1108
6.11.1	剪切机的分类	1108
6.11.2	龙门剪板机	1108
6.11.3	凹口剪板机	1109
6.11.4	圆盘刀剪板机和滚剪机	1109
6.11.5	多圆盘剪切机和条料生产线	1110
6.11.6	冲型剪切机	1110
6.12	锻造设备 (楠 兼敬, 長谷部勉)	1110
6.12.1	冷锻设备	1111
6.12.2	热锻设备	1120
6.13	矫直机 (德永春雄)	1125
6.13.1	矫直机的种类	1125
6.13.2	矫直压力机	1126
6.13.3	辊式矫直机和张力辊式矫直机	1128
6.13.4	张力矫平机	1136
6.14	模具材料和热处理 (佐藤忠雄)	1137
6.14.1	塑料	1137
6.14.2	锌合金	1139
6.14.3	铝青铜	1140

6.14.4	铸铁	1142
6.14.5	铸钢	1143
6.14.6	表面硬化钢.....	1144
6.14.7	碳素工具钢.....	1146
6.14.8	低合金工具钢.....	1148
6.14.9	高合金工具钢.....	1149
6.14.10	高速钢	1152
6.14.11	硬质合金	1152
6.14.12	模具钢的热处理	1153
6.15	模具的标准零部件 (桥本 明).....	1157
6.15.1	模具和标准化.....	1157
6.15.2	可标准化的通用件.....	1159
6.15.3	JIS 规定的模具通用零部件	1164
6.15.4	模架.....	1165
6.15.5	可标准化的局部结构.....	1168
6.16	小件冲裁模的加工和管理 (蜂谷金次郎).....	1171
6.16.1	工程计划.....	1171
6.16.2	坯料加工.....	1180
6.16.3	零件加工.....	1180
6.16.4	精加工和装配检查.....	1185
6.16.5	简易冲模的制造方法.....	1189
6.16.6	模具的维修和改进实例.....	1193
6.16.7	模具的管理.....	1195
6.17	大型成形模和冲裁模的设计和制造(齐藤雅之).....	1202
6.17.1	大型模具的设计.....	1202
6.17.2	大型模具的制造方法.....	1210
6.18	自动冲模的设计和制造 (岩松真之).....	1218
6.18.1	自动冲模的设计和制造.....	1218
6.18.2	加工工艺的考察.....	1219
6.18.3	多工位冲模设计和制造的注意事项.....	1221
6.19	锻模设计和制造 (楠 兼敬).....	1228
6.19.1	锻模设计的程序.....	1228

6.19.2 决定坯料形状时的注意事项.....	1229
6.19.3 锻模的制造.....	1237
引用文献.....	1240
参考文献.....	1241
常用符号 (参考)	1242
有关压力加工的图书	1248
索引	1256

1. 概 论

1.1 压力加工

1.1.1 定义和分类

压力加工是用往复加压为主的压力机等加工设备和工模具，使金属及其他材料在局部或整体上产生永久变形，实现成形、接合、分离和校正等的加工方法。

因为所用加工设备的大部分是压力机，所以我国（日本）就把上述各种加工统称为压力加工，但往往也把使用锤和轧机的加工方法包括在内。

凡利用永久变形（塑性或粘性）将固态坯料制成所需形状和尺寸的固态制件，其方法在广义上被称作压力成形或简称成形。狭义上的成形则指板料及条料的弯曲、胀形、翻边和深拉延等，它们是既保持作为板坯的板料形态，同时又改变其外观的加工方法。线材、棒材和管材通过成形加工也能得到各种制件。另一方面，如锻造、压印、镦粗、挤压等，往往被称作压缩加工，它们能使材料的大部分产生复杂的塑性变形，并且制件形状和外观都与原材不同。这里所述是一般分类，实际上多把它们组合起来应用于加工。

接合，包括卷折拼接、咬口、卷边敛缝和铆接等方式，它们是利用成形或压缩加工的所谓成形接合；除此之外还有压接，它是利用在适当温度和压力下所产生的固态扩散现象进行接合的。如果在压力加工中实施这些接合，其生产率要比焊接和钎焊的高，因此它们作为零件组装方法的应用范围正在扩大。

分离，一般是利用材料塑性变形到达最后阶段会产生断裂的性质，把材料分离为两部分以上而作成制件的加工方法。在使用

压力机的情况下，主要是进行切断、切槽、落料、冲孔等类的冲裁加工。但也有使斜刃形工具切入材料，利用材料与工具前端接触处产生的裂口（拉伸断裂）实行分离的；还有象精冲那样通过挤压材料来达到分离的；也有应用类似于切削那样切除多余金属的加工机理，通过压力机来获得优良切口的分离方法——精修及对向冲裁等。

校正，用于提高零件形状、尺寸精度或表面状态。它包括：分离加工中的精修和修边，板材成形中的模压校正，蠕变成形法与压缩成形法以及压缩加工中的精整、摔光等。利用张力校直机和辊式校平机矫正原材的作业，一般在压力加工之前或其后进行。不单独设立校正工序，把它组织到一般压力加工工序中制造高精度制件，其效率较高，所以今后这种倾向将会增加。

1.1.2 特征

压力加工的特征，就是能得到精度好、产量高且较为均一的制件。所以为了适应大量生产，常常用压力加工替代切削、铸造等其他加工以降低成本。

要进行压力加工，就必须选择动作特性能适应加工对象的压力机和其他设备，以及送料、运料和取料等配套设备和装置等。

压力机是作往复加压运动的机器，动作比较简单，但是通过使用模具却可以进行复杂的加工，所以模具结构和压力机驱动方式、压力-行程特性、行程次数、机身结构以及它和配套装置特性等的关系，都应看作是极重要的外部作业因素。

压力加工虽然是以大量生产为对象，利用塑性变形的加工方法，但作为它基本组成的工模具的制作，都离不开数量极少而精度要求甚高的切削、磨削、电火花加工等加工方法，这些也可说是压力加工的一个特征。为了提高生产效率，必须在生产安排中把这些互相矛盾又互相依存的因素合理地进行调整。

当然，对于大量生产的零件，要求压力加工的制件高精度化和压力机的高速化，因而相继开发了必要的新设备和新装置。各种多工位加工方式、连续模加工方式、多滑块方式等就是很好的例

子。但是现在一半以上的压力加工制件都属于多品种小批量生产，有些在经济上只能和其他生产手段勉强竞争，因此在这方面采取措施是非常重要的。比如简易模具的采用，生产线的合理化以及应用象数控冲孔机之类的数控锻压机和冲压中心等，就是在这方面采取的相应措施。另一方面，把成形、接合、攻丝和焊接等组织到压力加工中，还可以高效率地进行组装作业。

从作为压力加工基础的工模具来看，其制造工作的大部分过去主要靠熟练程度很高的钳工。但第二次世界大战后，随着连续模、多工位模的普及，模具制造的方向变为依靠高精度的模具加工机床。近年来，模具设计和制造则向着利用电子计算机的方向发展。特别是对于落料、冲孔等冲裁加工件，其模具设计和制造已经达到了相当高的水平。但对于要求多工序的复杂成形件，至今尚缺乏十分完整的最佳工艺设计数据和计划资料，所以很有必要弄清材料在多工序成形中的成形特性等问题，以使其模具设计和制造合理化。另外，这方面的经验和窍门也起着重要的作用。

压力加工还有一大特征，就是材料在加工过程中因发生加工硬化、析出硬化、各向异性、残余应力、表面缺陷等而引起材质变化。虽然它们对制件性能常常是有害的，但另一方面却又可作为利用加工来改善制件材质的一种办法得到灵活运用。

再之，还必须充分考虑以下几项与安全和卫生有广泛关系的措施：首先是预防操作者人身事故的措施、防止噪声和振动对作业环境的污染以及保护周围地区的社会环境等措施，当然也包括防止机械设备和模具的损坏等在内。

1.2 材料的加工条件

1.2.1 概述

材料通过模具承受来自压力机的加工力，产生永久变形，形成所需要的形状和尺寸。如果对变形过程中材料产生的应力和应变的分布状态以及它们在加工中的变化情况（履历）不清楚，就

不能确定压力加工的适宜条件，因此要分析各种压力加工过程中的应力和应变。但是，现代塑性力学是以材料拉伸试验结果得到的力学性质为基础，利用它能弄清的问题还是有限的，因此对于解析精度不够和不能解析的加工过程，必须通过试验来寻求其各种基本特性。

此外，材料的加工温度、加工速度、外部压力和表面状态等外部条件对材料的影响也是重要问题。而且加工过程中材质的变化，将关系到多工序加工时最佳工艺设计的编排以及工件的性能与形状。

1.2.2 材料的力学性质

拉伸试验是研究材料力学性质的最基本方法。当对直棒或细长的板状拉伸试样（拉伸试样的形状和尺寸等规定在 JIS 中）施加拉伸力 P 后，试样则伸长 δ 。根据这个拉力-伸长图可以计算公称应力-应变关系：

公称应力

$$\sigma_0 = P/A_0$$

公称应变

$$e_0 = \delta/l_0$$

式中 A_0 ——试样原始断面积；

l_0 ——试样原始长度（一般取标定点之间的距离并测取这段长度的变化）。

这样做有利于对不同几何形状和尺寸的拉伸情况作出同等评价。在一般的材料说明书中，画成如图 1.1 所示的应力-应变图，并标明屈服点（ σ_s 或 Y ）、抗拉强度 σ_b 和断裂前的延伸率 e_b 等值。但为使压力加工中的材料力学特性也能得到反映，除上述数值外还需要另外一些数据。

首先就图 1.1 而论，从图形 O 到 A 的应力与应变大体上遵循比例关系，如果中途去除外力，试样即回到原始长度，也就是说应变成为零。这种性质被称为弹性，这样的可逆变形则被称为弹性变形，而这种性质产生的应力上限（换言之，当应力超过此限

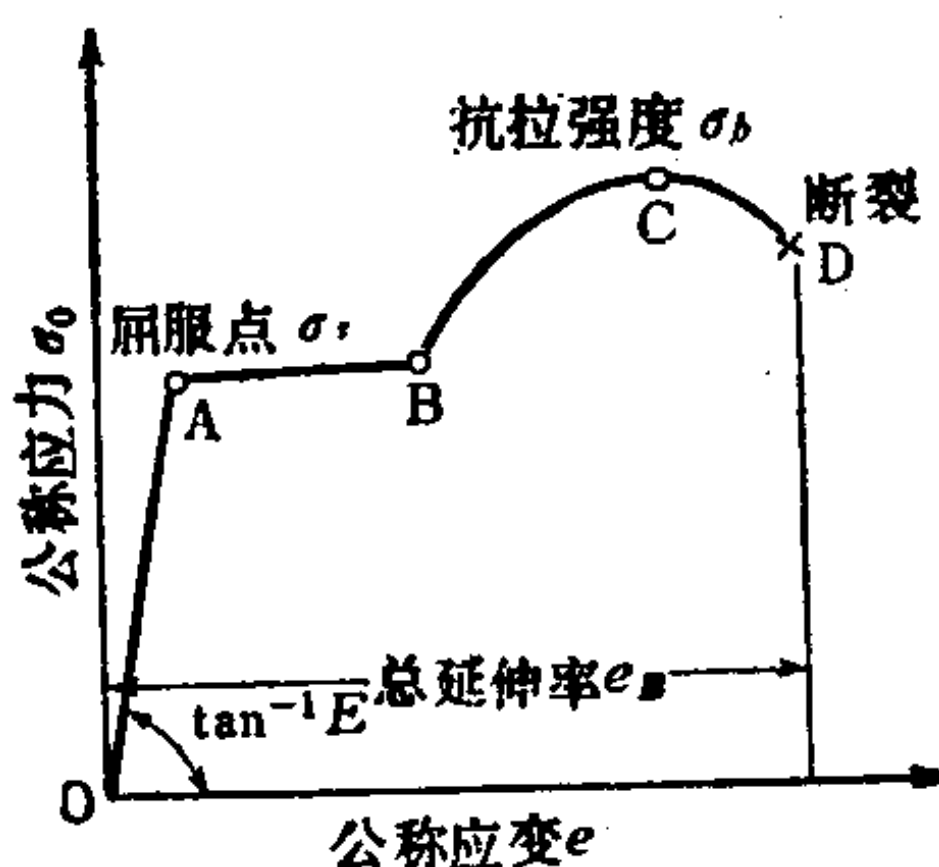


图1.1 低碳钢拉伸试

验得到的公称应力-应变关系典型曲线

时,即使去除外力仍会出现永久的残余变形)称为弹性极限。另外前面讲过的那种应力与应变呈比例关系的限度称比例极限。但是当应力超过弹性极限再继续增加到某一个值时,会出现应力几乎不变而应变迅速增加的现象(即应力-应变图线的斜率急剧减小)。这个分界点的应力称为屈服点。由于拉伸试验时力和伸长量的测量精度不同,比例极限、弹性极限和屈服点也不一样。实际上如果考虑到材料试验机的测力精度大约为 ± 0.5 ,那末在实用上可以不必特别区分这些极限值,而把它们处理成如图1.1上A点那样,认为在屈服点之前都呈比例关系,而且都属弹性变形。塑性力学上也采取了这样的处理,从而使理论单纯化了。

弹性变形对应于应力的增减,是沿应力-应变图的同一根线往复变化的,由于弹性变形消耗的外加功完全贮存在材料内部而成为弹性变形能,所以当去除外力之后,随着这个弹性变形能的释放而使材料恢复到原来的形状。

当然,以上是材料实验中的表面现象。如果从材料内部的晶粒来看,应当说应力尚未达到屈服点之前,各个晶粒内部都在各自

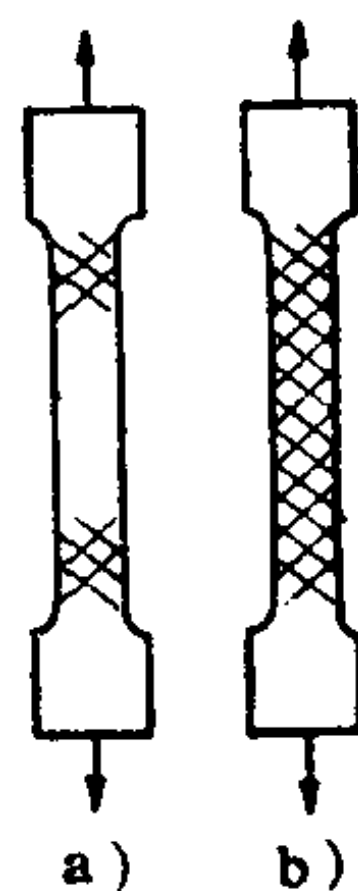
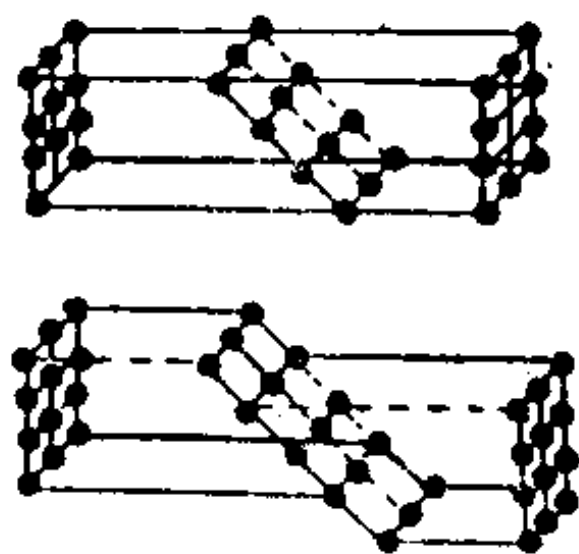


图1.2 宏观滑移线(变形外观,留特尔线的演化)

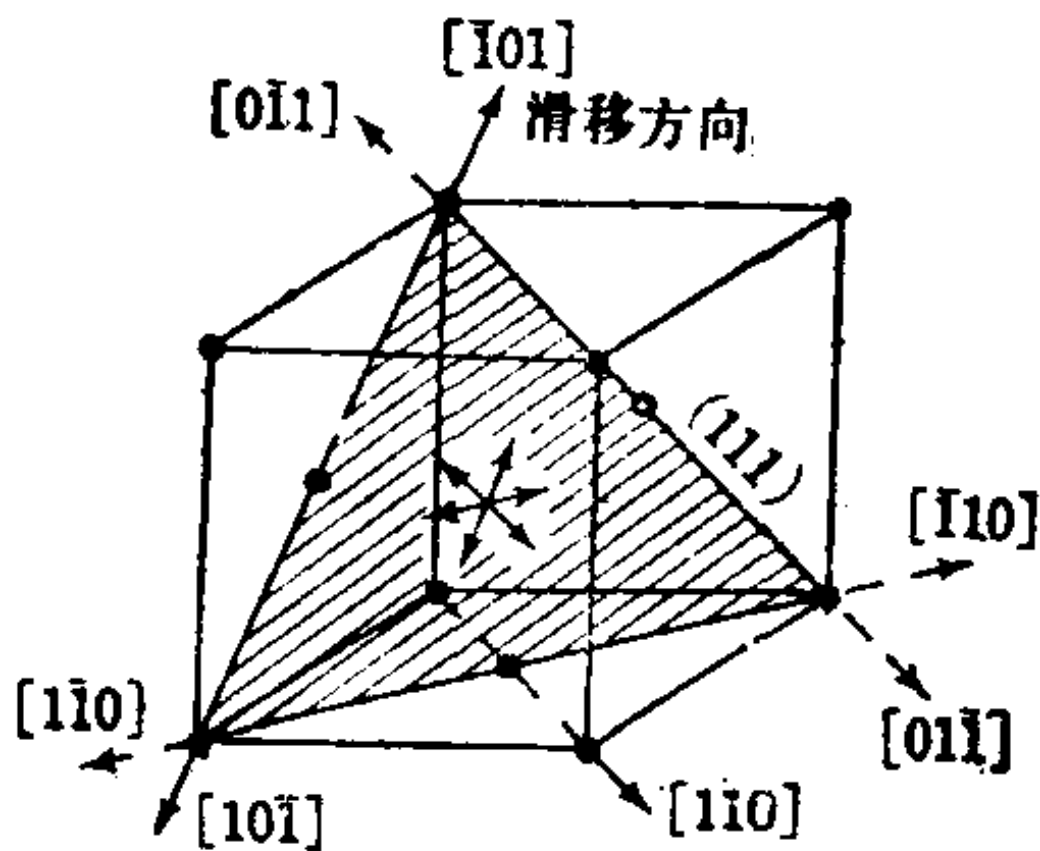
材料固有的易滑晶面和方向上进行细微的永久变形 \ominus 。但由于相邻晶粒间的互相制约，所以宏观上明显表现出来的整个试样的永久变形，也不过是这些晶粒内的滑移不断连通进而穿透晶界连成一体而已。当屈服点一出现，用肉眼也能看到滑移的情况。例如当拉伸表面磨光的钢板时，如图 1.2 所示，宏观滑移线就随着应力的增加而增加，当达到图 1.1 中的 B 点，则如图 b) 所示几乎扩大到整个表面。如果应用纹影法、宏观腐蚀法、加热表面氧化法、X 射线法、应力涂料法及其他各种应变仪等，还能进行定量测定。

用光学显微镜范围内的放大倍数来看宏观滑移线，它们分别是一根线；但是用电子显微镜那样的高放大倍数来观察，可知它们是由许多滑移线所组成。当应力增加时，最初产生的一根微观

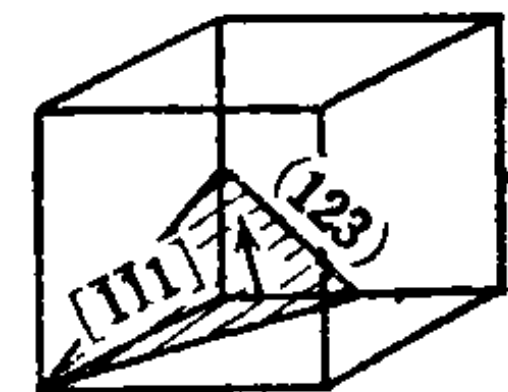
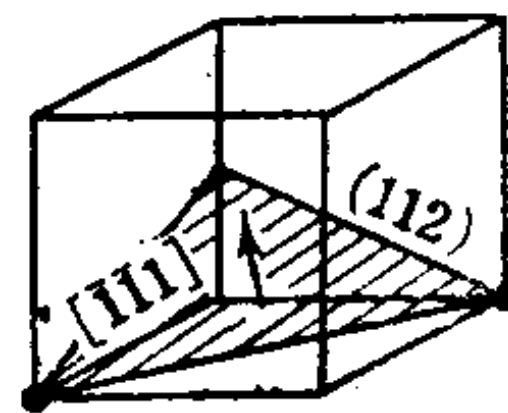
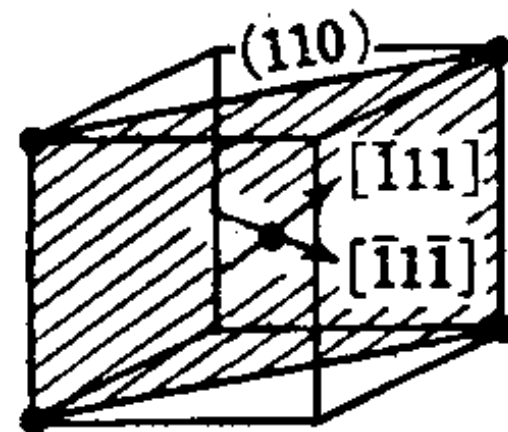
\ominus 发生滑移的面和其方向分别称之为滑移面和滑移方向，它们随结晶系的不同而异。面心立方晶格金属如铜、 α 黄铜、铝、 γ 铁（18-8 不锈钢）等的滑移面为 (111) 面，滑移方向为 [110]；体心立方晶格金属如 α 铁、钨等的滑移面为 (110)、(112)、(123) 面，滑移方向为 [111]；密排六方晶格金属如镁、锌等的滑移面为 (0001) 面，滑移方向为 [11 $\bar{2}$ 0]。



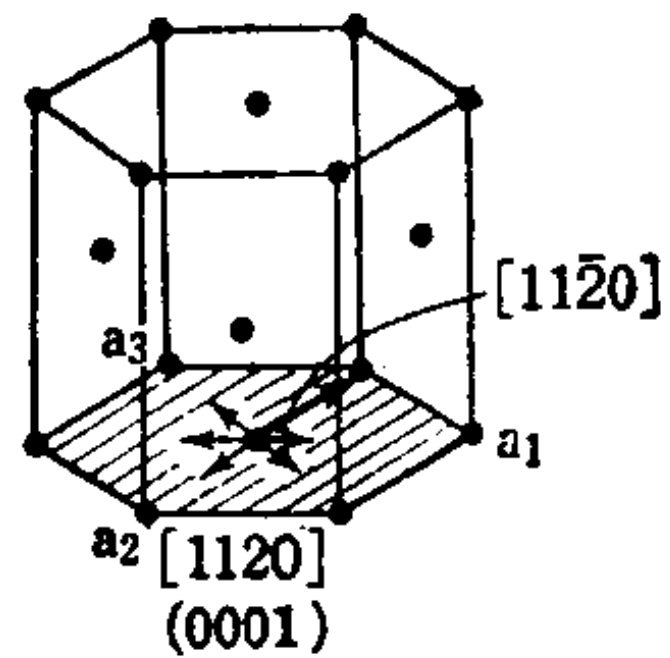
附图 1. A 沿结晶面的滑移面模型



附图 1. B 面心立方晶格的滑移面和滑移方向



附图 1. C 体心立方晶格的滑移面和滑移方向



附图 1. D 密排六方晶格的滑移面和滑移方向

滑移线就以几百 Å (10^{-10} M) 为间隔顺次增加而成为带状, 这就是宏观所看到的现象, 所以可把它称作滑移带。

且再回到图 1.1 的 A—B 段来看: 当滑移带成为在 A 点所看到的那种情况之后, 因为在用弹簧和配重等加载方式的拉伸试验中, 其拉伸速度追不上伸长的进展, 致使弹簧变松, 载荷或应力下降; 当两者在某处达到平衡时, 就会再次出现负荷增加而达到 B 点。因此一般从 A 到 B 的连线应稍呈凹凸形状, 但因其程度不太大, 故可把它看作如图所示那样, 即应力没有增加, 而变形却从 A 迅速增加到 B。在塑性力学中多把这部分予以理想化而按水平直线来处理。这样的塑性体被称为理想塑性体或非硬化塑性体。

永久变形增大的始点就是屈服点。对于加工用的金属材料, 它的屈服点一般在应变达到 0.1% 或其以下时就能看到。对于碳钢和 7/3 黄铜等含有杂质和添加元素的固溶体合金, 它的屈服点如图 1.1 所示能比较清楚地找到, 但其它金属、合金等的屈服点一般表现不明显, 所以为方便计, 就用产生 0.2% 永久变形时的应力作为代用屈服点。当必须把此点加以区别时, 就称它为屈服强度。

这样根据拉伸试验(只有单纯的一个轴向力产生应力和应变, 所以也叫单向应力状态, 是变形的基本试验) 可以从现象上获得屈服的开始, 但是就其本质而论, 如果根据晶体位错理论和热振动理论进行计算, 那末理论值比实测数值大, 取 10^3 左右。两者是不一致的。由此可知: 平时常用的材料是不完全的晶体, 而且还含有许多缺陷。

当试棒在弹性范围内伸长时横向出现收缩, 这个横向收缩应变和伸长应变的比值叫泊松比 ν 。常用的钢、铜、铝等高熔点材料在室温情况下的 ν 为 $1/3$ 。泊松比一般取 0 和 $1/2$ 之间的值。金属一达到屈服, 它在理想塑性状态时泊松比变为 $1/2$ 。 $\nu = 1/2$ 表示体积不随变形而改变, 即表示非压缩性变形。所以从弹性变形转变到塑性变形的过程就是泊松比从 $1/3$ 连续变化到 $1/2$ 的过

程。

在图 1.1 所示公称应力-应变关系中，如果把试样断面积的变化也加进去考虑，即成为图 1.3 的状态。设 A 为达到某种变形程度时的断面积，那末就可以用 A 与原始断面积 A_0 的比值 A/A_0 来表示断面积的变化。 A/A_0 与伸长应变的关系见图 1.3 b) 所示，它表示在 O-A-B 范围内没有很大变化，但在 B-C 段慢慢减小，在 C-D 段则急剧下降。

如前所述，通过以单位面积上的力即应力取代载荷，以单位长度上的伸长量即应变取代伸长量，虽然在材料的大小及形状发生了变更，仍然能够在量值上进行比较的应力-应变关系已经求得。但实际应力应以变形后的断面积 A 作为基础取作 $P/A = \sigma$ ，并称它为真实应力。将真实应力和公称应力

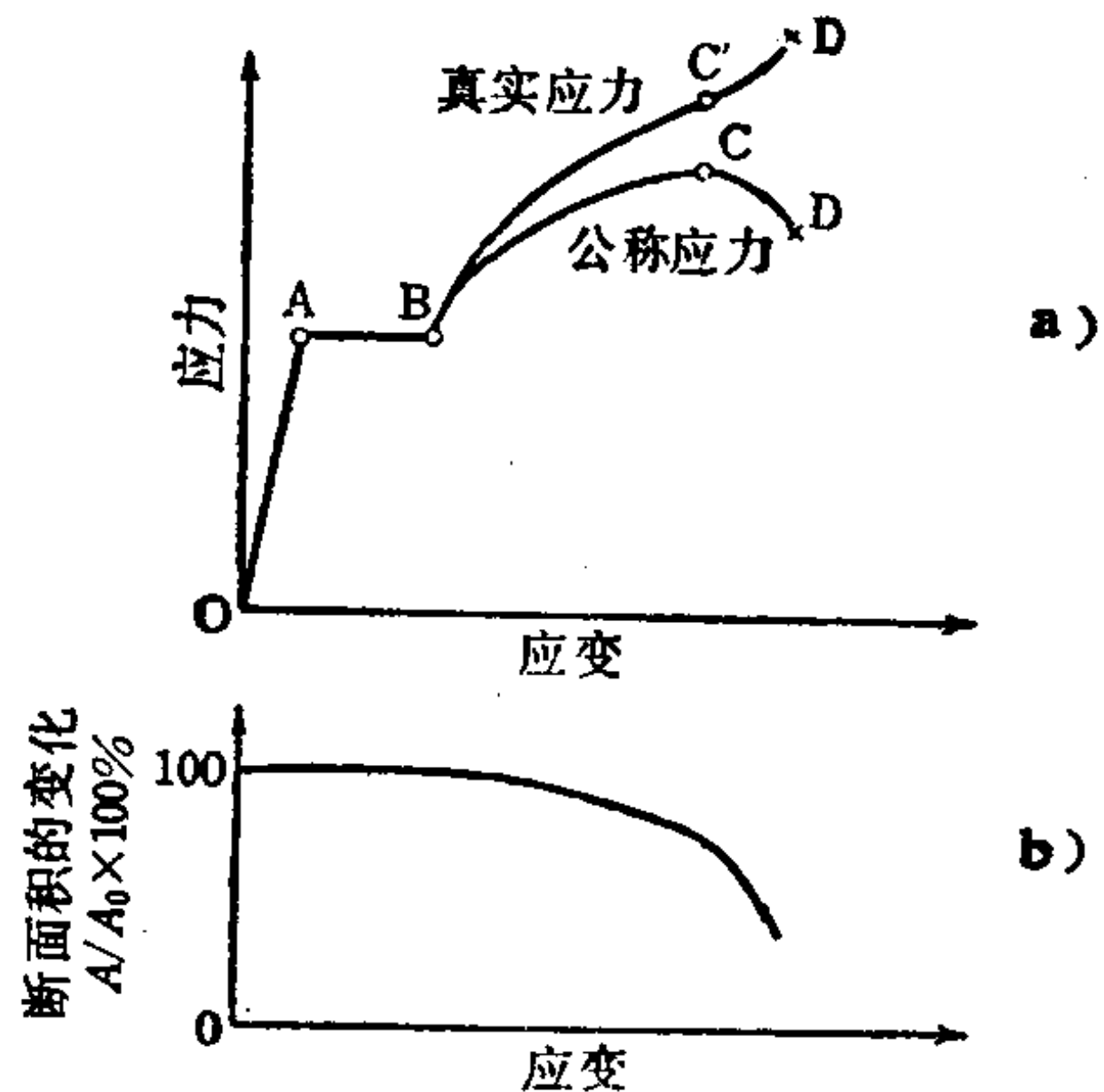


图1.3 应力应变关系
和断面积的变化

重叠画在一起如图 1.3 a) 所示。在 B-C 段若再增大伸长量，应力也随之增加（变形阻力增加），但其增加量与只有弹性变形时相比却是非常小的。这种现象称作加工硬化或变形硬化。

从图 1.4 a) 可知，如果在应力沿 O-A-a 增加之后又除去，图中曲线则由 a 回到 b，当再增加负荷，应力和应变关系就会从 b 开始沿着近乎一条直线增加。同理，如应力沿着 O-A-B-c 增加，那末在除去应力重又加上负荷时，它将循 d-e-C 路线变化。只要塑性变形一发生，如上所述，它的上升路径（加载路径）与下降路径（卸载路径）就不相同。由于塑性变形消耗的大部分功变成了热而被损失掉，因此塑性变形一旦发生，变形就成为不可逆。

虽然图 1.4 a) 显示了卸载和再加载时的路径不同，但相差

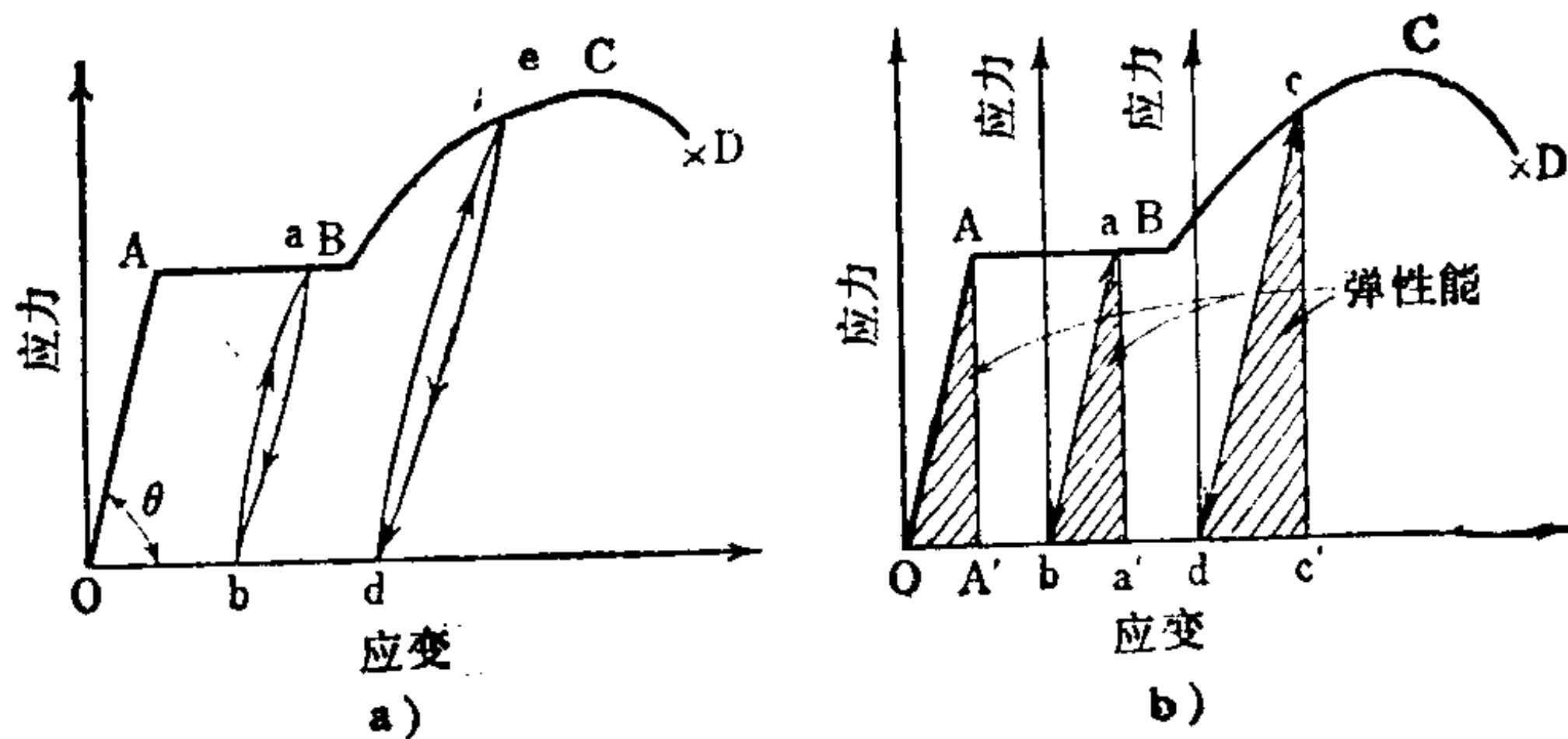


图1.4 加工硬化

很小,几乎和弹性变形时的O-A段倾斜角度 θ 一样(取 $\text{tg } \theta = E$,应力和应变关系就呈 $\sigma_0 = E\varepsilon_0$, E 称纵弹性模量或杨氏模量),所以理想化的画法即如图1.4 b)所示。如果看一下这幅图,那末在A-B范围内卸载时,材料把加载时得到的弹性能完全放出,并且只在a'-b段进行弹性回复。与此相反,在B-C范围内卸载时,不论弹性回复能还是应变c'-d都增大,换句话说在A-B范围内永久变形b-O等于A-a;但是在B-C范围内,d-O比c'-O与A'-O的差值小,永久变形占比率减小。

再来看重新加载时的情况:一种是沿b-a-B-C进行,与此相应的另一种则沿d-c-C进行。后者的屈服点提高了,弹性能也增加了。

当在B-C范围内给与一次塑性变形,则以后每加上同一种应力时就会出现:(1)屈服点上升;(2)弹性能增加;根据这个结果,当再次卸载时又导致出(3)弹性回复能增加;(4)回弹应变量增加;(5)与完全塑性状态比较,永久变形的百分比减少。

这种现象被称为加工硬化,所以凡呈现这种应力应变关系的材料就叫做加工硬化塑性体。对于碳钢,弹性变形、理想塑性变形(或非硬化塑性变形)及加工硬化塑性变形这些阶段都存在。铜和铝等在屈服强度后立即出现加工硬化,几乎没有非硬化塑性

变形阶段。

再看图 1.4 b)，若设 O 为原点的应力-应变图代表原材料，那末对于已经给过某种应力（以及应变）的材料而言，可以看成是在应力-应变图上原点移到 b 或 d，所表示的力学性能发生了变化。如果变换一种观察方式，那末原材料初始屈服点以后的 A-B-C 上的各点，可以看成是将应力应变图上坐标原点顺次错位时的屈服点的排列。

应力超过 C 点之后，载荷和断面积都迅速下降。在 C 点以前试样几乎都是均匀伸长，但当超过 C 点，它就在某一个地方发生缩颈，最后在它的最细处断裂。因此图 1.3 的 A/A_0 在 C-D 范围内就用缩颈处的最小断面积来表示。再则由于在这个范围内缩颈最小断面处产生的应力不一样，所以真实应力 σ 也取平均值来表示。

此时真实应力和公称应力之间存在如下关系：

$$\sigma_0 = \frac{P}{A_0} \quad \sigma_0 = \sigma \frac{A}{A_0}$$

它们的变化为

$$d\sigma_0 = d\sigma \frac{A}{A_0} + \sigma d\left(\frac{A}{A_0}\right)$$

右边第一项表示加工硬化引起的公称应力（或者载荷）的增量，第二项表示断面积减少引起的公称应力的减少量。当加工硬化超过断面减少的影响时公称应力增加，反之即产生缩颈并使 σ_0 急剧减小。所以缩颈开始使两者达到平衡的条件是：

$$d\sigma_0 = 0$$

这相当于图 1.3 的 C 点。因为它是从 O-A-B-C 稳定平衡转变到 C-D 不稳定平衡的转变点，所以称此点为拉伸的不稳定极限，并且在材料试验中它又表示抵抗外力的最大值，所以也称为抗拉强度。

若设 l_0 = 原始长度（标定点间距离）， l = 变形后长度， $\delta = l - l_0$ ，于是由拉伸试验（一般认为在保持单向应力状态的范围

内应用压缩试验也一样可行) 得到的公称伸长应变可用下式确定:

$$e = \frac{\delta}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0}$$

若将此值加以改写, 即与下式相同:

$$e = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l_0}$$

如果采用相对于变形后长度 l 的应变增量, 那末相应于上式的公式为

$$\epsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0}$$

罗特维克 (Ludwick) 命名该值为对数应变 (或真实应变)。它可根据 e 的定义改写为下式:

$$\epsilon = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + e)$$

拉伸时的公称应变范围为 $0 \sim \infty$, 而压缩时为 $0 \sim -1$, 比较拉伸和压缩引起的应变是困难的; 相反, 若用对数应变来比较, 对于拉伸和压缩, 其绝对值都在 $0 \sim \infty$ 之间并呈现对应关系。通过为获取基本数据的拉伸试验来获得拉力-伸长量的关系, 由它们而求得公称应力与应变关系或真实应力与公称应变关系, 进而应用对数应变来求出真实应力与对数应变关系。因为在较大的范围内对数应变比公称应变更适用, 所以真实应力与对数应变关系被广泛用作塑性范围内的应力与应变关系。

因为材料的真实应力与应变关系是塑性分析的基础, 所以把试验结果用适当形式的实验式表示更便于应用, 现在常使用的形式就是一般所说的 n 次硬化规则:

$$\sigma = F\epsilon^n$$

F 和 n 是材料常数。求 F 和 n 可以在常用对数 (\log_{10}) 坐标纸上将 σ 和 ϵ 的实验数据标点画成如图 1.5 所示的曲线, 其中

近乎直线部分的斜率即 n 值, $\varepsilon = 1$ 处纵坐标的截距 (单位与应力相同) 即 F 值。一般称 n 值为加工硬化指数 (或 n 值), 它根据应变范围而略有不同, 所以如果可能的话最好附上这个实验公式的适用范围。通常当某种材料用某一个 n 值表示时, 可以把它看作是从屈服点到缩颈开始 (不稳定界限) 这个应变范围内的平均值。图 1.5 和图 1.6 所示的三种材质, 它们化学成分相同, 由于分别经过轧制和调质处理, F 和 n 值也就不同了, 所以愈是容易成形的材料 (特别是胀形成形等) n 值就愈大。 n 值的范围在 $0 \leq n \leq 1$ 之间。它与材料的伸长即延性密切相关, 当 n 次硬化规则很近似于实际时, n 值即等于缩颈开始前的均匀延伸的应变量 ε_u 。

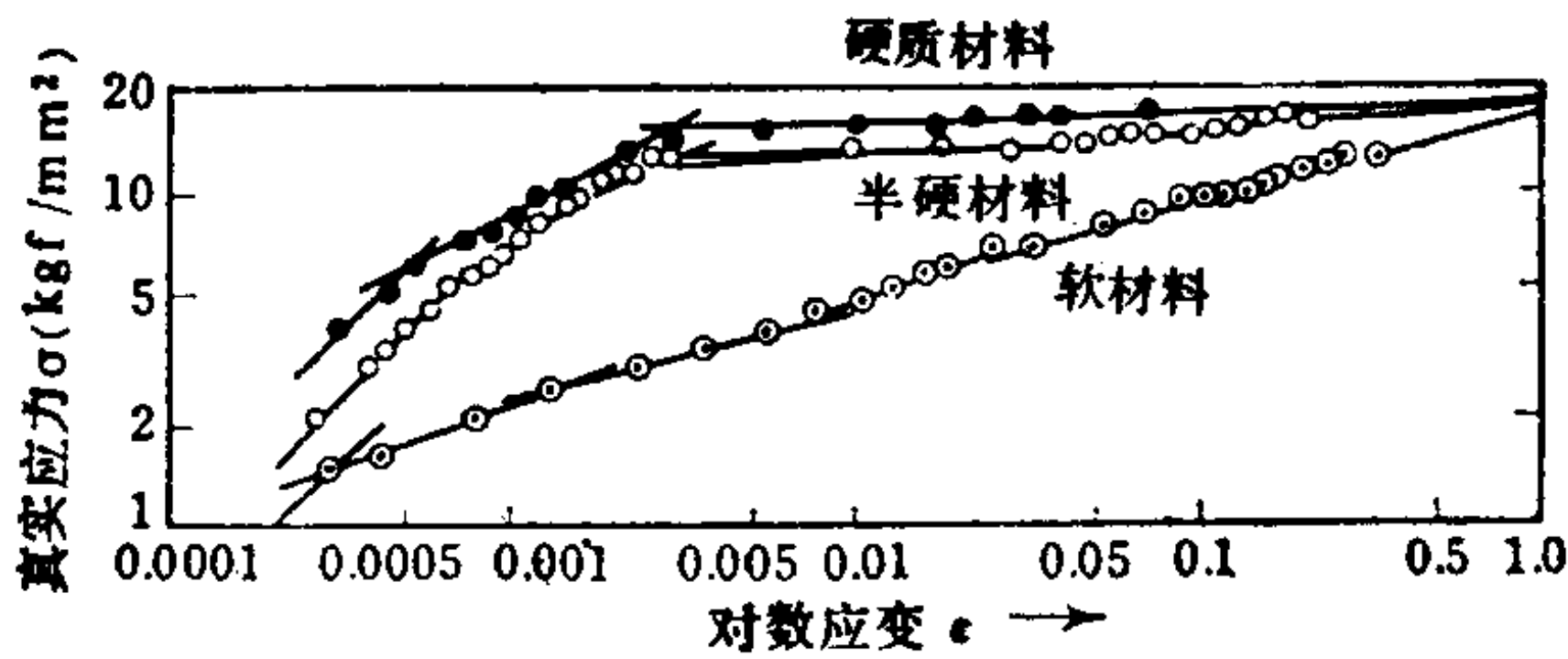


图1.5 铝的硬材料, 半硬材料和软材料的真实应力-应变 (对数值) 图例 (宫川、西村)

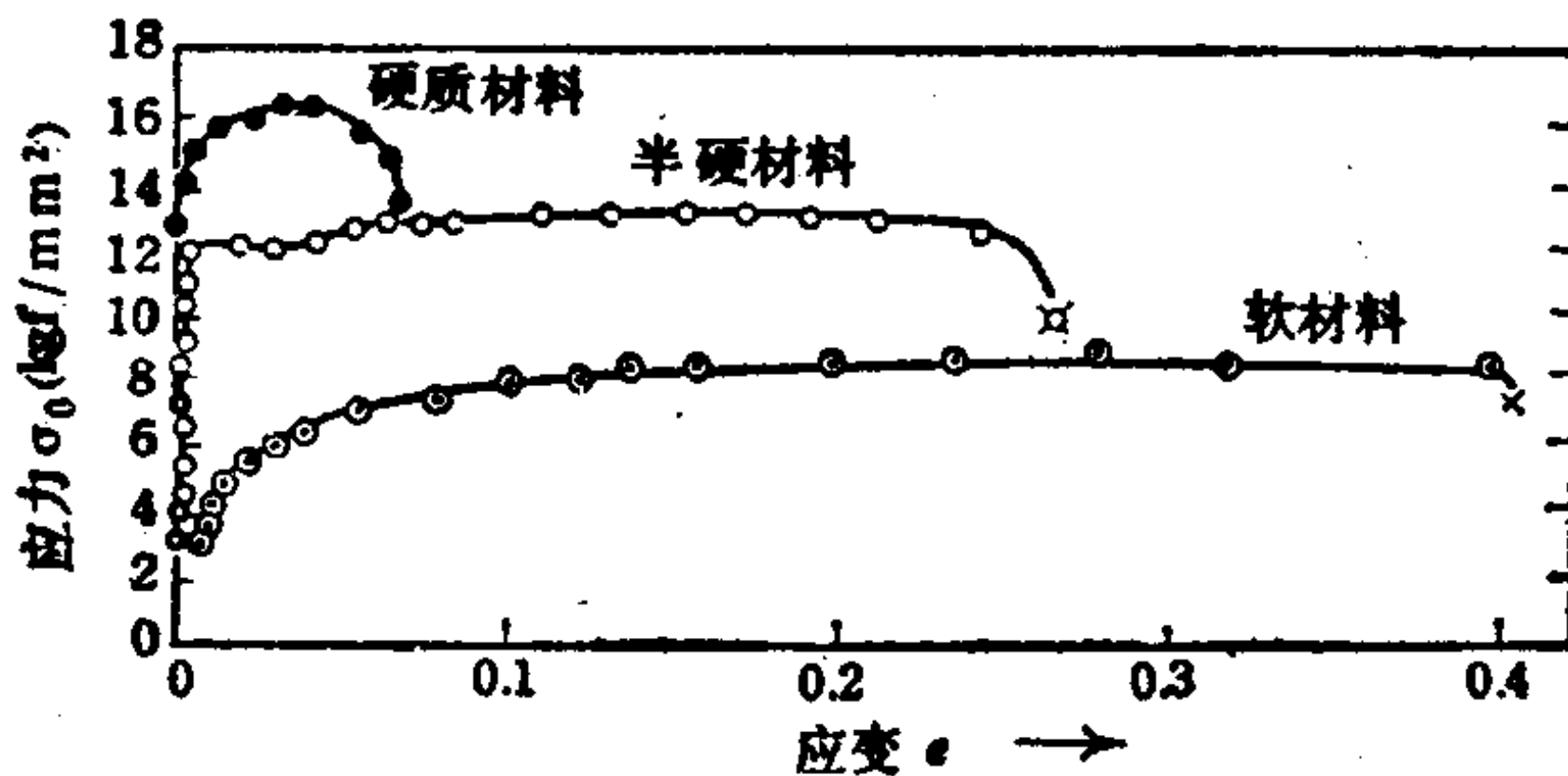


图1.6 铝的硬材料, 半硬材料和软材料的应力-应变图例 (宫川、西村)

图 1.7 表示在拉伸和压缩情况下, 对用于压力加工的典型材料所求得真实应力与对数应变关系。在均匀变形范围内, 不妨

表1.1 各种钢板的 n 值和均匀延伸极限应变量 ϵ_u 的关系 (田中, 池田)

材	料	n 值	ϵ_u	材	料	n 值	ϵ_u
沸腾钢	(0.027% C)	0.216	0.236	脱碳沸腾钢	(0.008% C)	0.212	0.228
沸腾钢	(0.136% C)	0.184	0.204	镇静钢	(0.045% C)	0.216	0.235
沸腾钢	(0.033% C)	0.216	0.226	镇静钢	(0.046% C)	0.206	0.225
沸腾钢	(0.029% C)	0.217	0.240	镇静钢	(0.088% C)	0.197	0.216
沸腾钢	(0.035% C)	0.220	0.245	镇静钢	(0.041% C)	0.212	0.230

把两者看作大体上相同。当分析塑性加工时，塑性应力就是对应于加工中抵抗变形的能力，一般称之为变形抗力 Y 。另外为简化计算，有时把加工硬化材料当作非硬化材料来处理，这时就象图1.8那样取平均值，使用平均变形抗力 Y_m 来计算。

作为判断材料成形性能的数据，往往要测定其屈服点处的伸长量、均匀延伸率、板宽应变、板厚应变等，并把在规定的应变值

时的板宽应变/板厚应变之比值(叫塑性应变比或 r 值)作为成形性能的比较值。此外，板材拉伸试验中还有若干必要的资料，详细请参照4.1节。

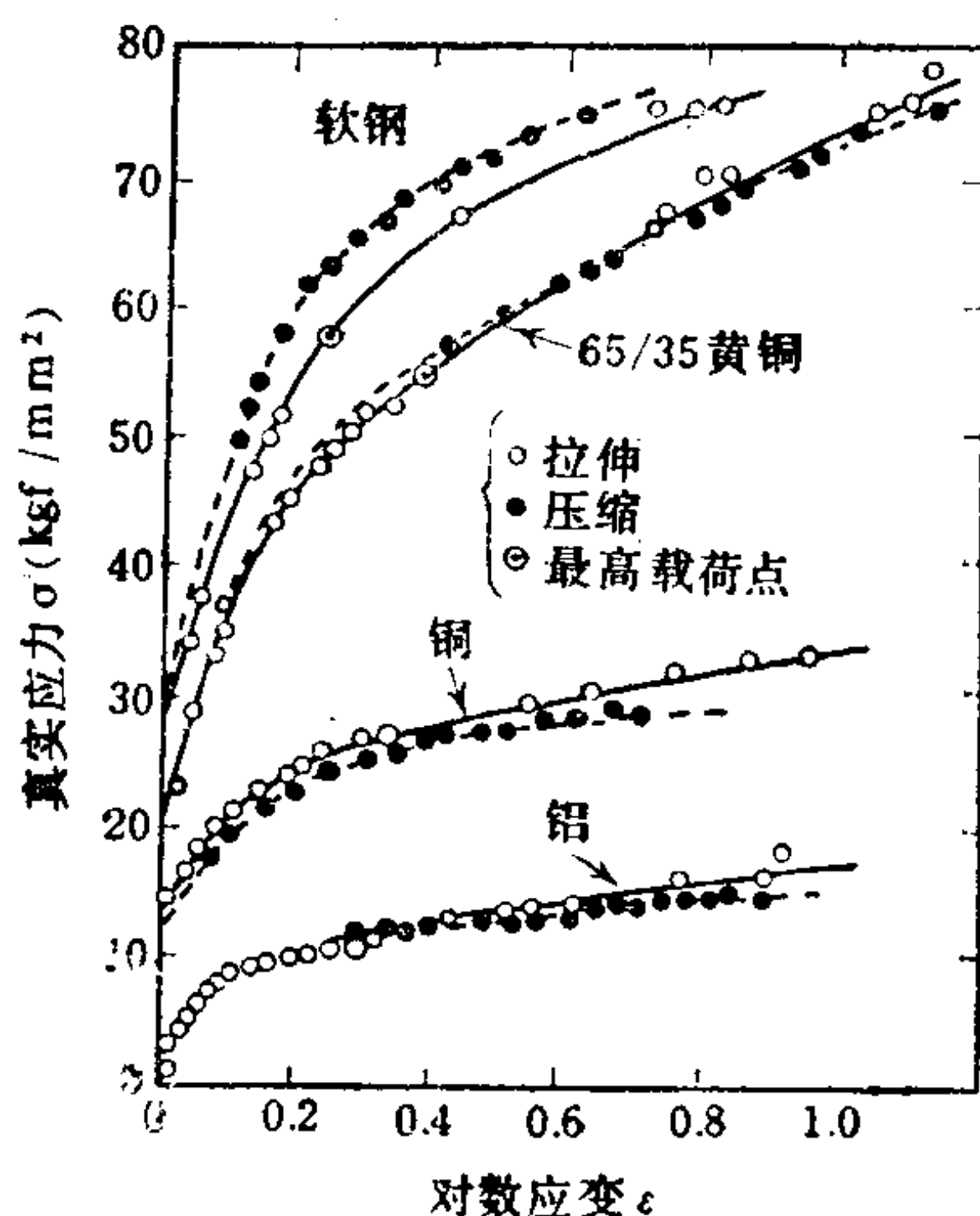


图1.7 各种退火金属材料在拉伸压缩试验时应力-塑性对数应变曲线 (福井, 工藤, 吉田, 阿部)

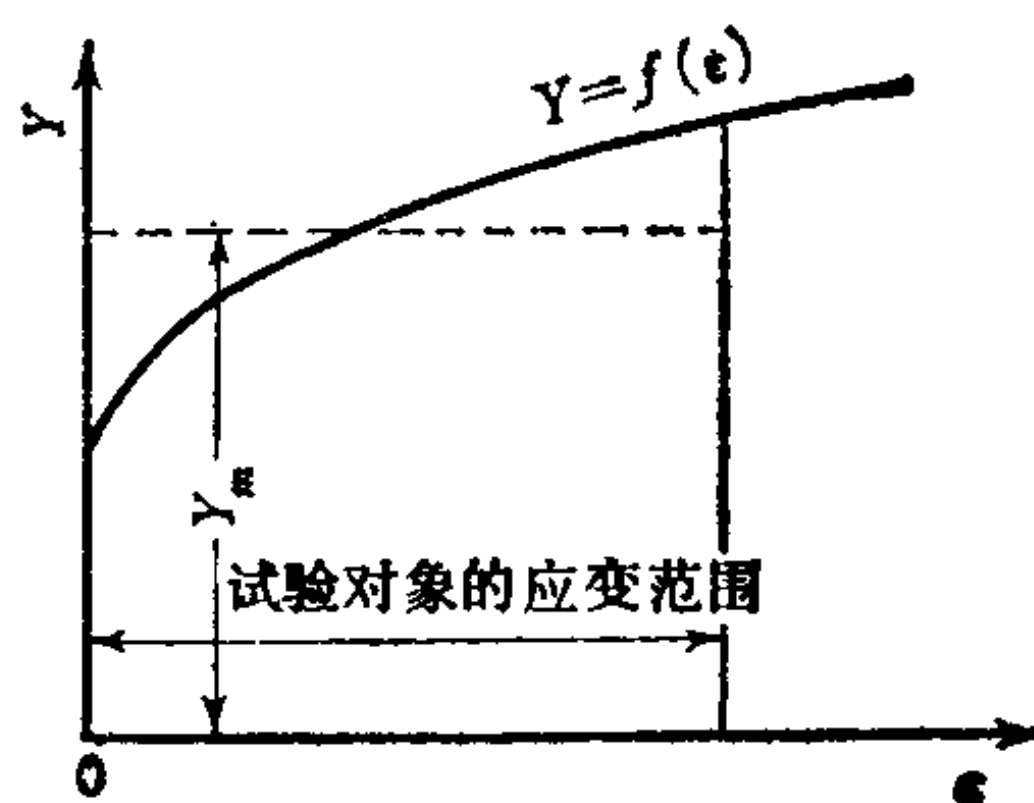


图1.8 平均变形抗力

1.2.3 加工中材料内部产生的应力和变形

压力加工时，通过模具巧妙地把单纯加压行程转化为弯曲、深拉延、胀形等不同的变形。压力机的加工力和加工能量就是这样通过模具加到材料上的，所以不管是材料内部产生的力即各部分应力还是对应于这些应力所引起的变形并不那么简单。

加工过程中材料内部产生的应力分布（应力状态）随压力机滑块行程的变化而随时变化着，并且其变形很大。这些都是它的特点。

如果研究一下这种应力状态和应变状态，可知它们分别由两部分组成，一个叫球分量，另一个叫偏分量。现以作为压力加工最基本的单向压缩为例来分析一下。图 1.9 是从承受单向压缩（单轴压缩或单纯压缩）的材料中取出的微元体，在它的的一个方向上仅作用压应力 $-\sigma^*$ ，这时的应力状态可用恒等式分解成右边图示那样，就是说把 $-\sigma^*$ 分为三等分，一份是在各个面上加以 $-\sigma^*/3$ ，另一份是在压缩方向的面上加以余下的 $-\sigma^*/3$ ，而和它垂直的面上则加以反向的 $+\sigma^*/3$ 。从整个来看，这和加上原来的单向压应力 $-\sigma^*$ 时的结果一样。右边第一项把 $-\sigma^*/3$ 加在各个面上的情况和用水或油等从四周均匀压缩的情况一样，所以它也可以叫做静水压力，这就是被称为应力的球分量部分。另外，留下的第二项、第三项，由于 σ_1 和 σ_2 ， σ_1 和 σ_3 之间的绝对值分别相等，只是符号不同，所以它是产生纯剪切应力状态的成分。只要看一下与 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 等成 45° 角的斜面即可明白这个道理，因为它上面只有剪应力。其意义是从一般应力状态中除去球分

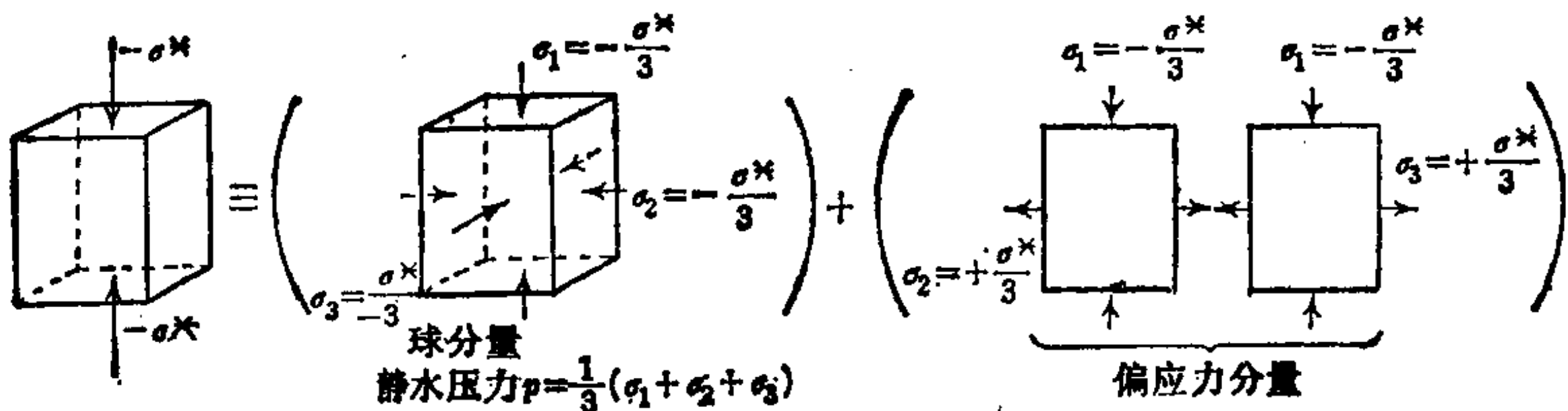


图1.9 受单向压缩的微元体的应力分量



量后留下的部分称为偏应力分量。

当在物体四周加以相同的压力（静水压力）时，该物体仍保持原来形状（从几何学的观点看，原是正方体的仍是正方体）只是体积缩小了。体积的变化量除以原来的体积所得的值称为体积应变 ϵ_v ，静水压力 p 和体积应变 ϵ_v 成正比，即

$$p = K \epsilon_v$$

K 称为体积弹性模量。物体（正确地说应叫连续体）加上不论多大的静水压力也不会破坏。当然严格地说在金属材料内部是存在着很小的空隙的，这部分体积被压扁后往往不会再复原；但如果从整体上看，而且设它是没有空隙缺陷的各向同性体，那末可以认为它是能复原的。换句话说由于静水压力的作用使体积发生变化，但能全部复原而没有塑性变形发生。

另外，偏应力分量只有剪应力，只产生切变形。如图 1.10 所示，单向剪应力 τ 使长方形变为平行四边形。这就是被称为纯剪切应力状态。此时的错移倾斜角 γ 就是切应变。在这种情况下由于剪应力 τ 不能平衡会使材料转动，所以根据图 1.11 所示的力矩平衡关系，在垂直方向就会产生同时作用的剪应力。

由这种应力状态所产生的变形如图 1.12 所示，它是将图 1.10 的单纯剪切变形沿纵向和横向两次作用而形成的。在图 1.10 中，最初是长方形变为平行四边形（换言之，几何形状改变了），可是体积没有改变。因此图 1.12 也同样是只有形状变化而没有体积变化。

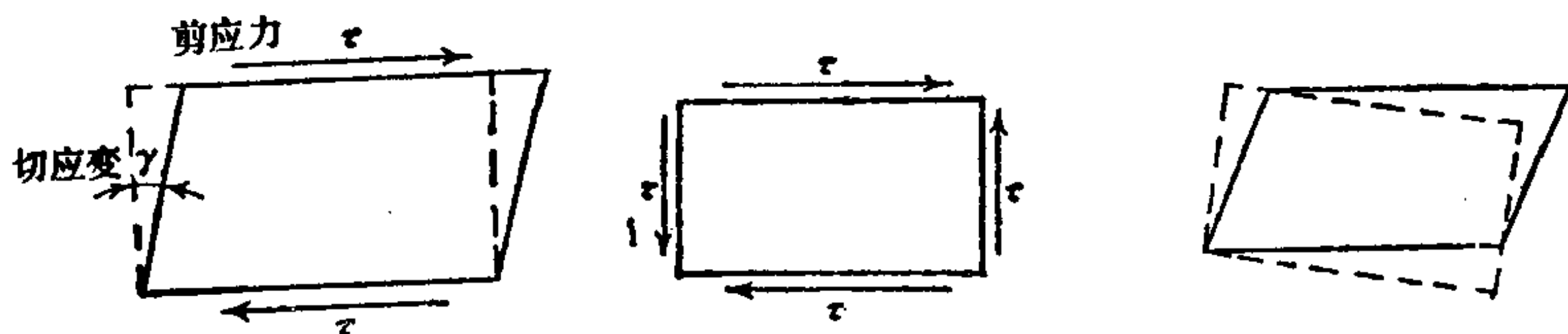


图1.10 单纯剪切 图1.11 纯剪切应力状态 图1.12 纯剪切变形

由此看来，在微小变形的范围内，一般的应力状态可分为球分量和偏分量，它们所对应的变形分量是：

球分量——体积变化，形状不变；
偏分量——形状变化，体积不变。

可是，塑性变形只有形状变化而无体积变化（也叫做非压缩性）。在各种应力组合起来的复杂应力状态作用下，开始产生塑性变形并继续产生的条件，至今虽已作过很多研究，但目前在数理上使用方便而且能很好解释实验结果的只有下述两种典型理论。

一是被称为屈雷斯加 (Trasca) 屈服条件的假说。它认为相互垂直的三个主轴方向为 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ，当它们具有

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

的顺序时，其最大剪应力 τ_{max} 可设定为

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

当 τ_{max} 值达到剪切屈服应力 τ_s 时，即开始产生塑性变形。若写成数学式，即

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau_s = k$$

若用图表示，即如图 1.13 所示。

现在如果用拉伸试验的观点来看，由于 $\sigma_1 = \sigma^*$ ， $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ，那末根据上式，便可知开始产生塑性变形的条件是

$$\frac{\sigma_1}{2} = \frac{\sigma^*}{2} = \tau_s = k$$

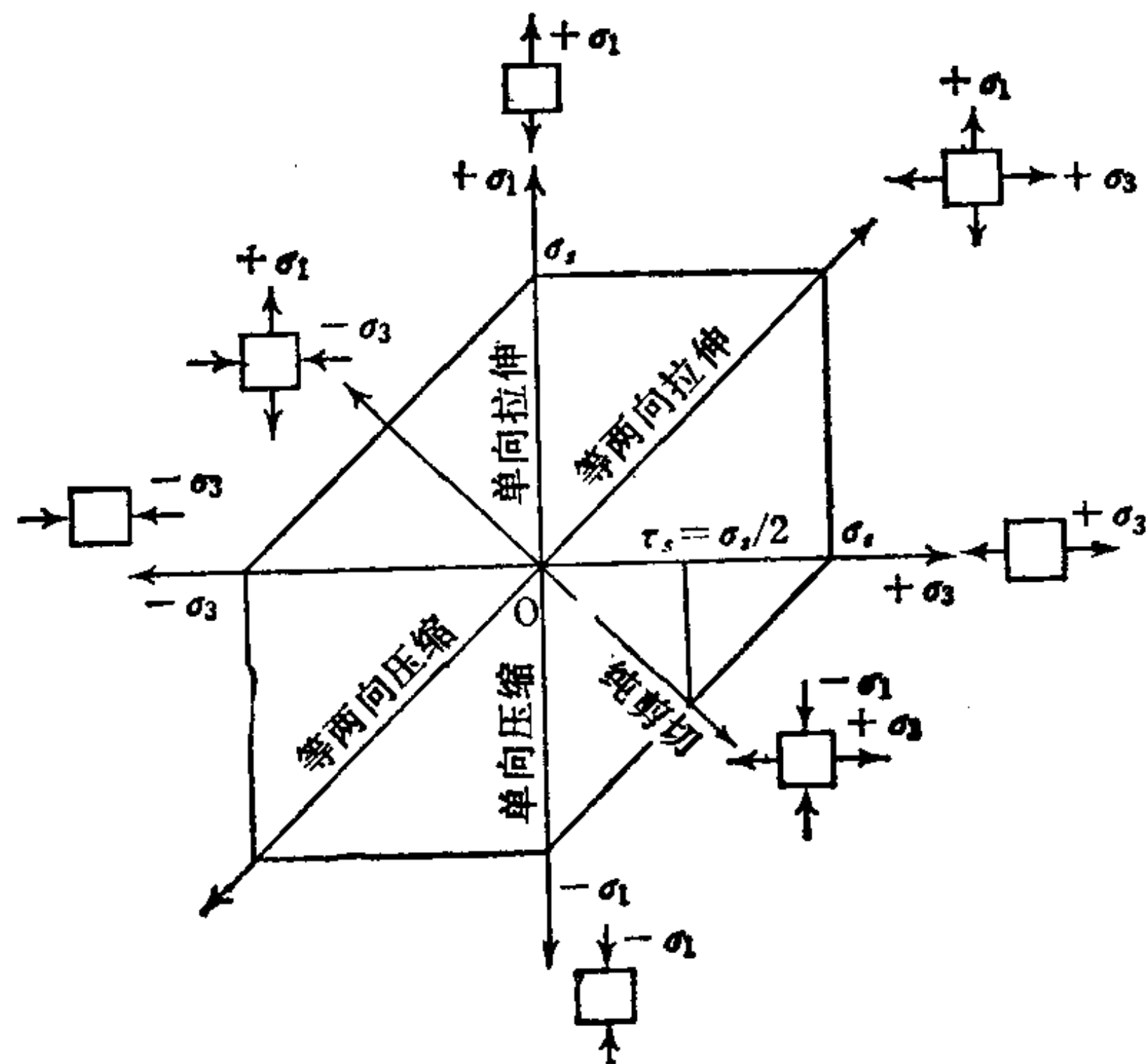


图1.13 屈雷斯加的屈服条件

另外因为拉伸试验中的塑性变形开始于屈服点 $Y (= \sigma_s)$ 所以上式又可改写为

$$\frac{\sigma^*}{2} = \frac{\sigma_s}{2} = \frac{Y}{2} = \tau_s = k$$

或 $\sigma_s = 2\tau_s$

此式表明剪切屈服应力是拉伸屈服应力的一半。再一个学说就是米塞斯 (Mises) 的屈服条件, 它认为在物体变形所需要的能量之中, 塑性变形能等于全部变形能减去体积变化所需能量的差值, 也就是说只考虑剪应变能, 并且认为当这个能量达到某一值时才开始产生塑性变形。

假设 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为三个主应力, 那末当

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_s = Y$$

时便开始产生塑性变形。

将此式按图 1.13 的式样进行处理, 当 $\sigma_2 = 0$ 时就画成图 1.14 那样。在纯剪切应力状态下 $\sigma_1 = -\sigma_3 = \tau_s$, $\sigma_2 = 0$, 因此由上式可得

$$\tau_s = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} = 0.577 \sigma_s$$

它和屈雷斯加条件下的 τ_s 相比, 其比值为 $2/\sqrt{3}$ 即大 15.5%, 根

据延性材料的试验结果来看, 它比屈雷斯加条件更接近实际。

米塞斯条件还通过普通拉伸试验所得到的应力-应变关系, 扩大到综合应力状态。在综合应力状态下用

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

的计算值代替单向拉伸应力记在纵坐标上, 为了读起来方便, 把这个值叫做应力强度, 用 σ_{eq} 表示。假如认为屈服点以后的塑性变形与拉伸试验时的应力-应变关系都遵循相同的规律, 那末一

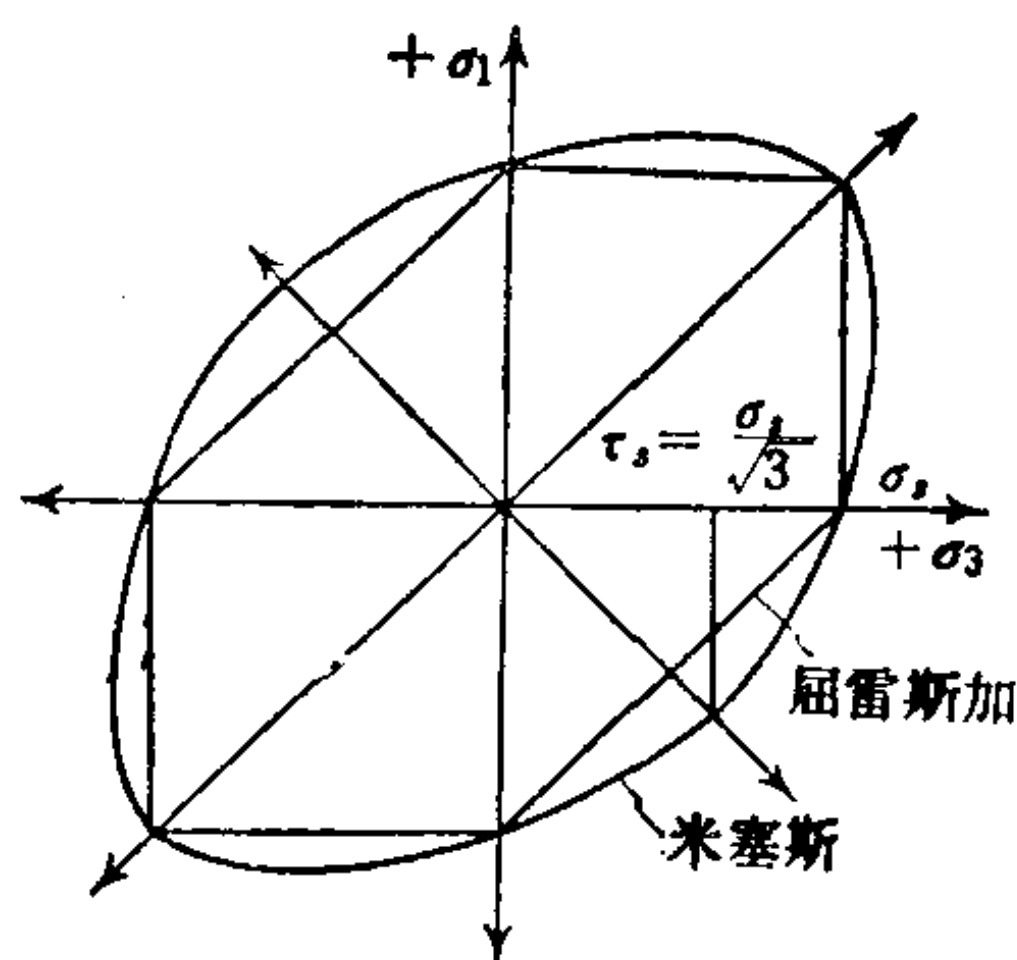


图 1.14 米塞斯的屈服条件

般的塑性变形问题也就容易处理了。虽然研究这方面问题的方法（塑性变形理论）还不统一，但现在最广泛使用的方法是把应变强度 ε_{eq} 值取为

$$\varepsilon_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}$$

也就是认为在单向应力状态和综合应力状态下的塑性范围内，它们的应力-应变关系皆相同。

关于在加工中产生的各种应力状态和相应的塑性变形，在以后各个加工章节中再详细介绍。

但是，这里只谈了适用于各向同性的、均匀的金属的处理方法，所以当必须考虑材料和晶体各向异性时，这样的考虑方法就不能原封不动地使用。

还有，从图 1.13 和图 1.14 可知塑性变形开始的条件是因应力状态的不同而异的，例如纯剪切时比等两向拉伸时用的力要小。

但是，材料在破坏以前的延性受应力状态的影响很大，如象吹橡皮气球那样，借助空气和油的压力把板材胀形时，板内部的任何方向都同样受拉伸（叫平面等两向拉伸应力状态）而使板材的厚度均匀变薄。从塑性理论可知，这样成形时板材的均匀伸长要比单向拉伸时大一倍，而且实际成形中能够利用的外表伸长量有时会高出好几倍。另一个优点就是成形后的制件容易成为没有方向性的（等向性）均匀体。

另外前面提到过在静水压力作用下，既不会引起塑性变形也不会引起破坏。但如果在非常高的静水压力作用下进行材料的拉伸、挤压、剪切时，就会出现延缓裂缝的发生及其传播、并使断裂前的延性增加等现象。

图 1.15 表示在静水压力高的情况下，拉伸圆棒状试样时缩颈最小断面处的断面收缩率（断面缩减率）和静水压力之间的关系。图中所示的应变表示最小断面处的局部伸长。由此可知，虽然随着材料的不同而数据各不相同，但是当加以超过某种程度的

静水压力，缩颈部分的延性就增高，几乎可以获得100%的断面收缩率。即使象锌那样的脆性材料，如果加以高的静水压力，它也能成为可满足塑性加工要求的延性材料。

把借助这种高的静水压力得到的延性增加和强制润滑的效果合在一起，就产生了静水挤压法、强制润滑深拉伸法等多种新的加工方法，从而改善了过去的加工方法。

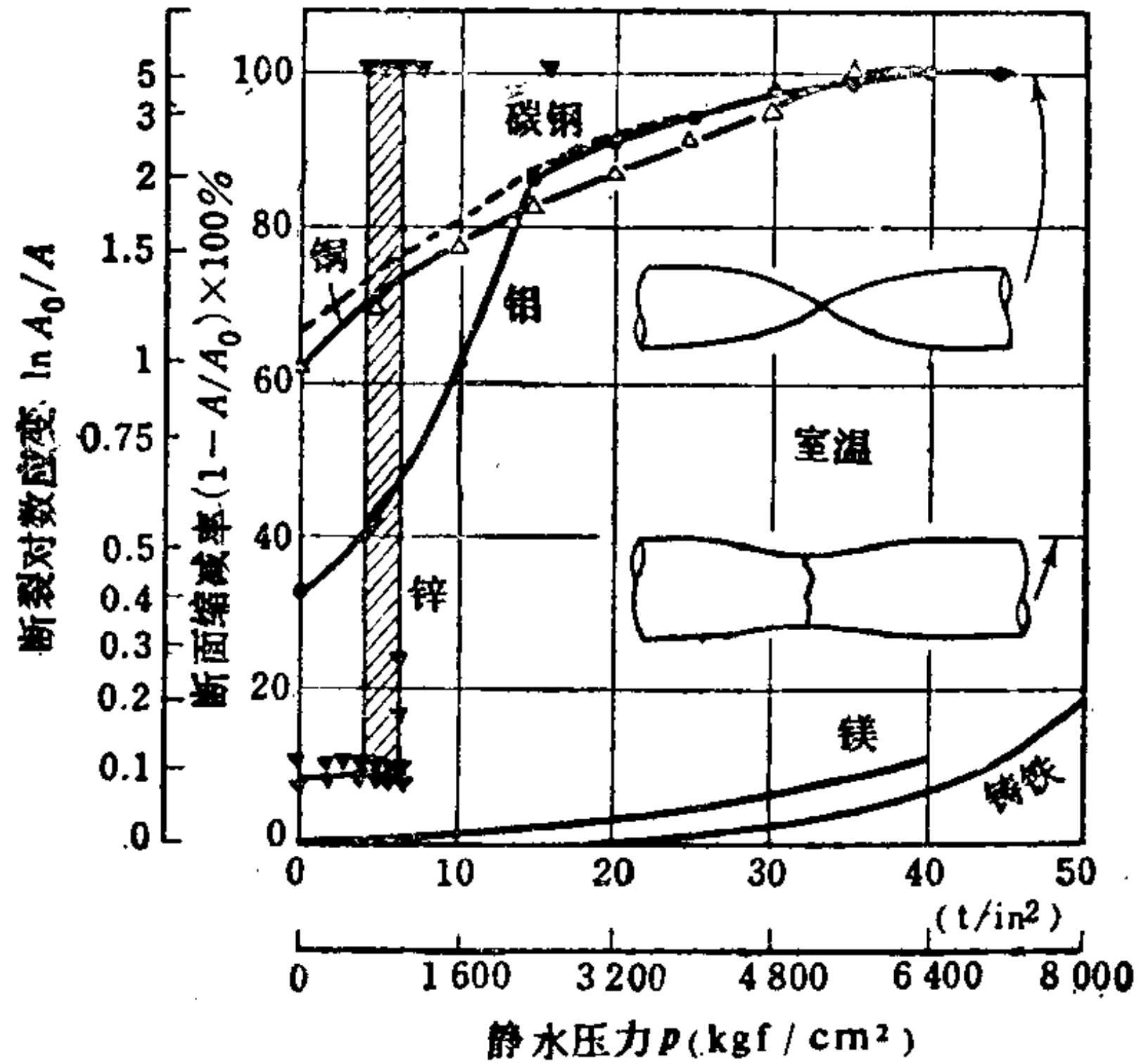


图1.15 用静水压下的拉伸增加延性(Pugh)

另外，如前面的图 1.9 所示，当在材料上施加能获得高的静水压力分量那样的适当应力，其效果则和用油等来加静水压力相同。所以这种考虑方法也可以用到加工方面。

现在，当在脆性材料的圆棒轴线方向施加高的压缩力并进行扭转，那末如图 1.9 所示，压力的 1/3 将起静水压力的作用，所以材料的延性增加。另外由于应力分布也起变化，致使断裂面的倾斜角度随着轴向压力的增加而向垂直于轴的平面转变，当超过某一轴向压力后就几乎成为延性状态。这种方法应用在棒料剪切方面就是轴向加压的坯料剪切法。由于它是在对棒材施加巨大压缩力的状态下进行切断的方法，所以切口的精度非常高，适用于挤压和冷锻用坯料及半成品的制造。另外，由于它能切出很薄的薄片，所以过去用板料冲裁法制造的非圆形薄片零件，也就可以用压缩剪切法来制造，即对具有所需外廓形状的棒材进行压缩剪切加工。这种方法没有冲裁废料，所以材料利用率比板料冲裁高，由

于它的这个优点，今后还会有所发展。

1.2.4 变形温度

金属材料的力学性质受温度影响很大，而承受塑性变形的部分会发热升温，再加上与工具的摩擦及绝热压缩，所以一般压力加工工件在加工过程中温度要上升。

目前作为表示材料变形能力的指标是取拉伸试验所得的总延伸率，如果根据实验结果将各种金属和合金予以分组，第一组即如图 1.16 所示。这是软钢、铜、铝等熔点高的金属，也是压力加工中应用很广的一组典型材料的示例。

而这些金属在室温附近的延伸率为 30~40%，当进一步把温度提高到再结晶温度以上，屈服点和抗拉强度便迅速下降，而延伸率增加。碳钢因这种温度作用所引起的力学性质变化的例子示于图 1.17。一般来说由于这类材料的加工很普遍，所以就把在室温附近的加工称为冷态加工，把再结晶温度以上的加工称为热态加工。

热态时的屈服点变得较低，延伸率增加，所以塑性变形的情况较好，加工后回弹也少，这是它的优点。但另一方面因为强度下降，加工中对于断裂的抵抗能力也降低了，表面还容易出现氧

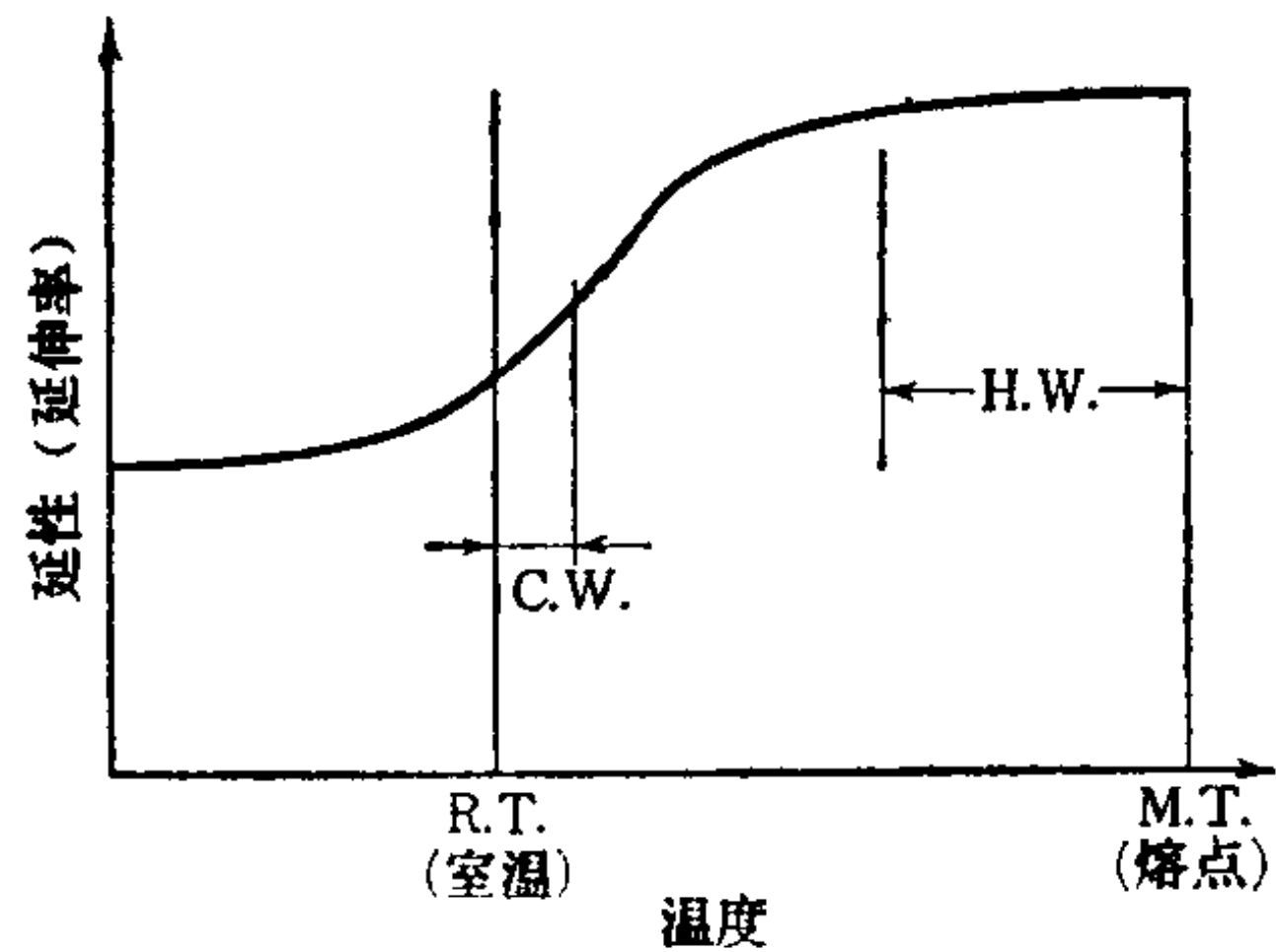


图1.16 高熔点金属材料的变形温度和延性的关系模式

C. W: 冷加工

H. W: 热加工

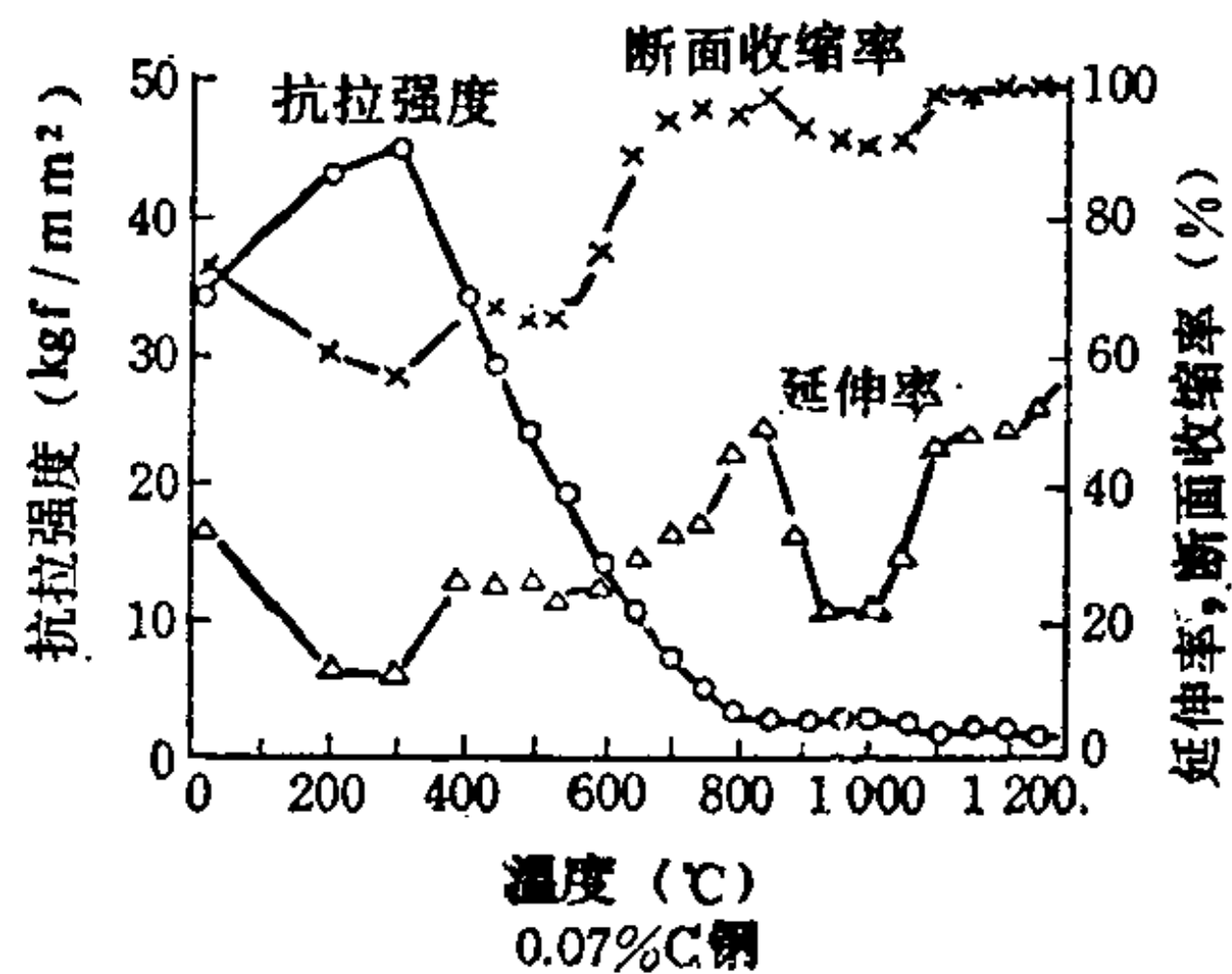


图1.17 碳钢拉伸特性随温度的变化（前田，吉川，太田）

化层，而且在加工之后的冷却过程中由于温度分布不均匀和受周围环境的制约，还会产生热应力和热变形。因此，制件表面粗糙而且形状及尺寸精度不能保证，这是其缺点。尤其在薄板和细丝的加工中，因为作业时很易冷却，所以必须特别注意保持它们的温度，根据上述理由，热态加工只有在特别必要时才采用，比如当特别要求降低变形抗力时（如压力机吨位不足时），或是要利用热应力进行加工时，以及要进行校正加工时。

图 1.17 说明低碳钢在 $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ 范围内的抗拉强度大、延伸率和断面收缩率最低。它有所谓的蓝脆性以及 950°C 附近产生的红脆性，还有在 1100°C 附近才能看到的高温脆性。这就不象图 1.16 所示的模式。蓝脆性的温度范围根据含碳量多少而稍有不同，另外当变形速度高时，它就向高温侧移动，但铝或调质后的非时效钢就没有这种现象。因此即使高熔点金属材料也具有图 1.16 所示模式性质，所以必须在充分考虑到每种金属合金所具有的特性后方可进行加工。

锡、铅等是低熔点金属材料，再结晶温度接近室温，它们从室温到接近熔点的广阔温度范围内具有很好的延性；退火效果超过了加工硬化。图 1.18 所表示的正是这些内容。因而常温以上的加工都可以看成是热加工，很难象高熔点材料那样把它们区别为热态和冷态。

铸铁和铋等是脆性材料（或状态），它们在室温下几乎没有延性，能在无缩颈的情况下分离断裂，当温度接近熔点时才能进行少量的热加工。图 1.19 表示的正是这些特性。这类材料一般不适合进行压力加工，但是在静水挤压等加工中，通过温度和高的静水压力使这种材料成为延性状态而进行加工的方法正处于研究

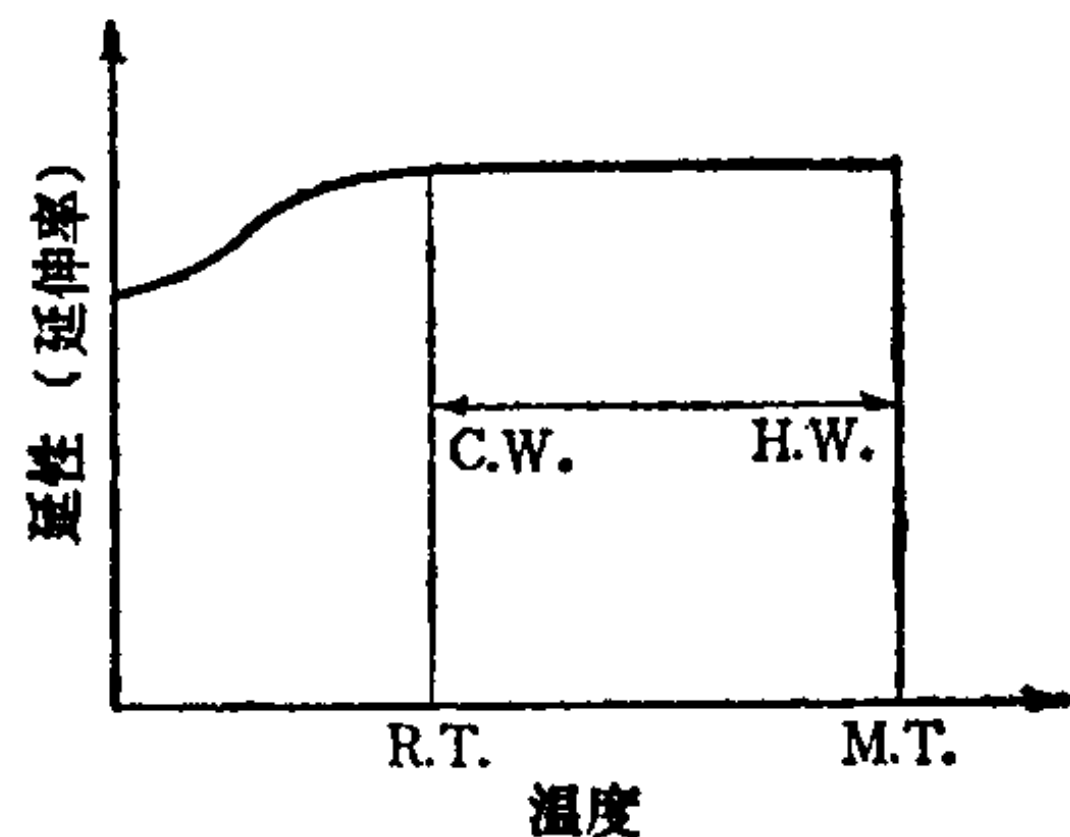


图 1.18 再结晶温度在室温附近的低熔点金属材料的变形温度和延性关系模式

中。

图 1.20 是镁和钛合金等材料的例子，它们在常温时延性很小，不能作为压力加工的对象，但在稍高于常温的温度下（比再结晶温度低）就成了能经受压力加工的延性材料。在这种温度范围内的加工叫做温态加工。这类金属板料与其合金板料的冲压实例示于表 1.2。

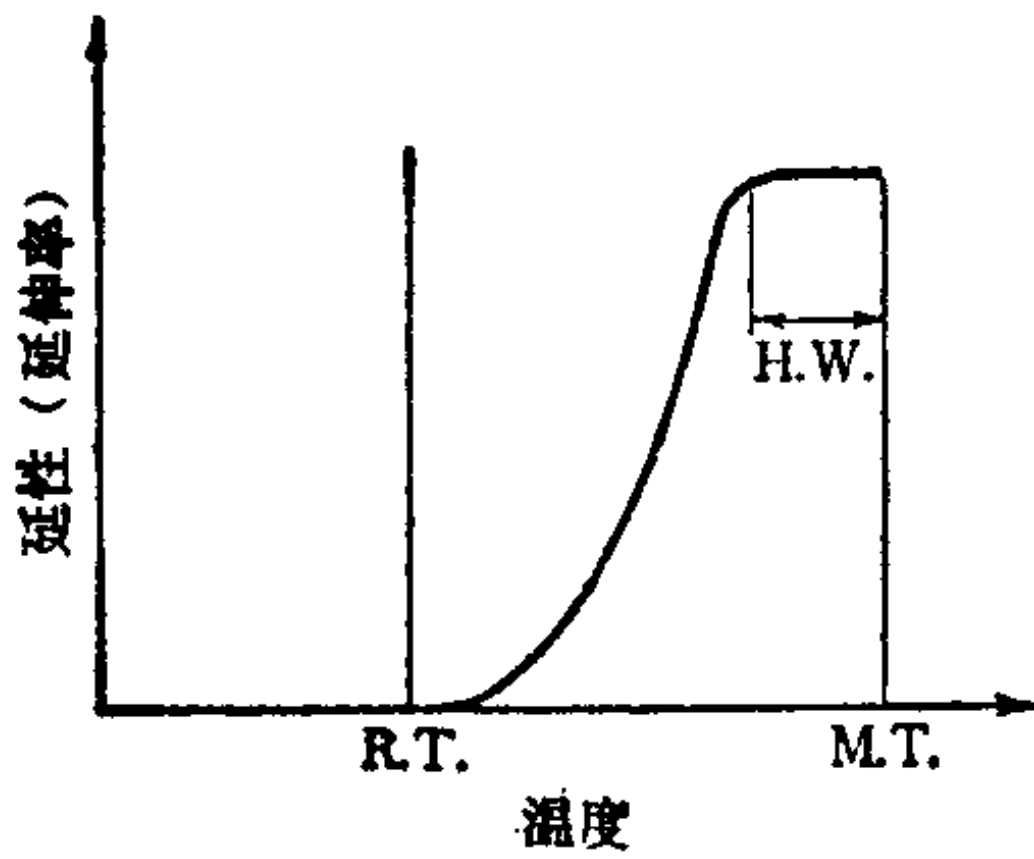


图1.19 脆性材料
在室温下的模式

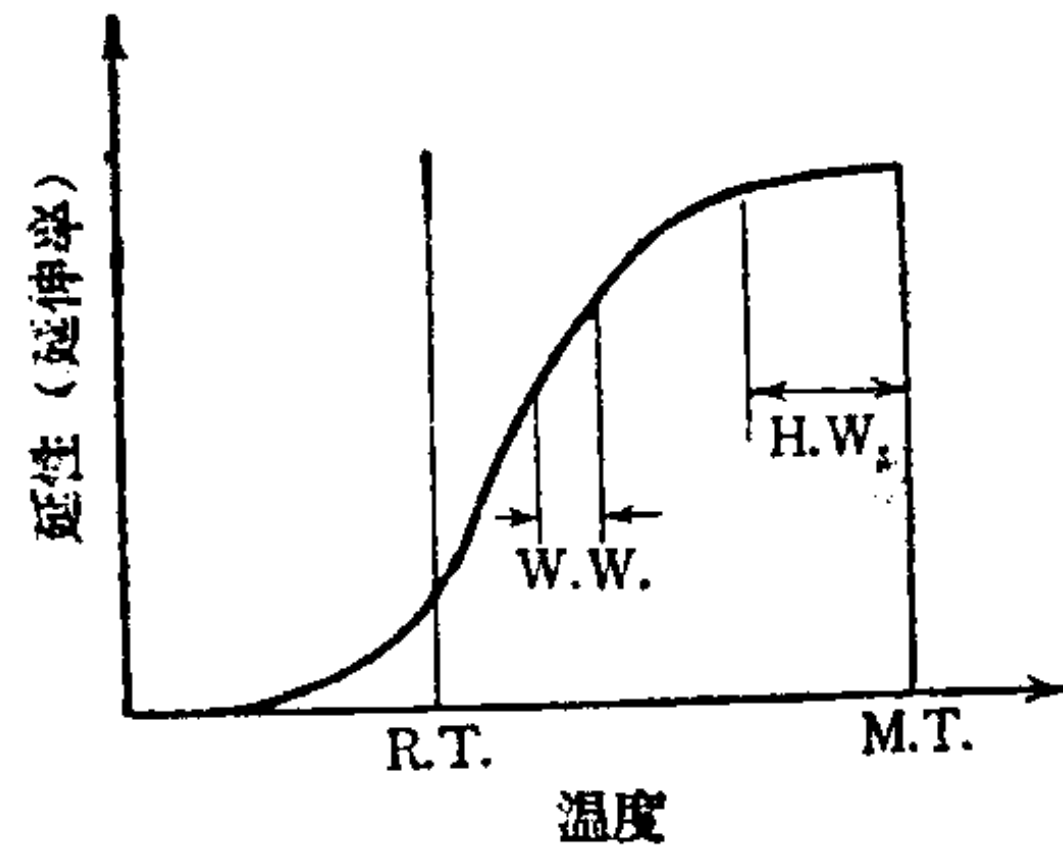


图1.20 适合温态加工材料的模式
W.W: 温态加工(warm working)

表1.2 温态易于冲压成形的金属、合金实例

材 料	变形温度范围	加 工 实 例
锌	25~50°C	拉延
铜	500~600° F	拉延, 旋压
镁	350° F	弯曲加工
镁	300~600° F	拉延
镁合金	600~650° F	拉延
MgMn合金	320~350° F	拉延
MgAl7合金	300~350° F	拉延
钛	1000° F	张拉成形 } 内外缘翻边 } 的校正
钛	950° F	拉延的最后校正
钛合金	950~1050° F	内外缘翻边的蠕变成形法校正
钛合金(6Al-4V)	1150~1200° F	内外缘翻边的蠕变成形法校正
奥氏体不锈钢(302)	650° F	拉延
铁素体不锈钢	} 200~300° F (浸在沸水中)	拉延, V形弯曲, 管子弯曲等
马氏体不锈钢		

从锌的例子可知，镀锌铁板预热到 50°C 左右后进行冲压加工可得到良好结果。另外奥氏体不锈钢只有在此表上的温度附近时，其强度才降低而延伸率增加，所以即使在常温下也完全可以进行压力加工，为了降低加工力也往往采用温态加工。对于时效性的高熔点材料也可以进行温态加工，这不仅是为了增加延性和降低加工力，而且还有另外的考虑。这些材料在室温下也能加工，但在某个温度范围中加工却可以促进时效。温态加工正是利用这一点，使它在加工过程中同时发生时效，于是加工后的制件强度通过加工硬化和时效硬化的叠加作用而得以提高，特别是疲劳强度改善尤为明显（形变热处理为其一例）。

除上述典型例子外，高温加工中还有在液相线转为固相线的温度范围内进行加工的例子；而低温加工中也有在摄氏零度以下进行加工的方法；对于纯铝，有利用它在 -10°C 左右恢复延性的特性，用冰作工具进行成形加工的方法。还有能提高制件强度的冷冻加工法——如用液氮使奥氏体不锈钢胀形而得到马氏体组织。材料在低温下会变脆，根据这种情况如果进行冷冻冲裁，那么就会提早产生裂纹，加快裂纹的传播速度，从而减少了工具磨损，它对于延长冲裁工具寿命来说是一种好的加工法，还有出于其他各种原因而采用低温加工的。

变形速度和变形温度之间的关系非常密切，不能够完全分别开来讨论。例如，在高速下进行闭式模锻和挤压加工时，由于塑性变形和绝热压缩，温度将激剧上升，所以即使在室温下把材料放进模具里，加工中温度也会从室温变至温态甚至热态；因而一旦选定了适当的速度范围，也就等于选定了和那种材料相适应的变形温度，特别在没有加热和均热装置时，实质上也有着能在温态或热态中加工的情况。这种温度变化不仅影响被加工材料的变形特性，而且还影响模具的强度、寿命、表面状态、润滑状态、润滑材料的选择方法等。特别是油质润滑剂对温度的微小的变化都是敏感的，所以，确定作业条件就成为重要问题。另外超过 250°C 的加工不能使用油质润滑剂，所以也应该考虑到使用石墨

等固体润滑剂。

除上所述还有下面一些加工方法。

(1) 对变形程度大的部位作局部加热以降低它的变形抗力，但就整个工件来说则是提高了变形程度。

例如：(a) 弯曲加工时只加热弯曲部分，使材料在降低弯曲加工力的同时也减小了最小弯曲半径，而且几乎没有回弹的方法。

(b) 在圆管和拉延成品的开口部分进行缩径或扩口加工时，仅仅对被成形部分作局部加热的方法。

(c) 拉延时仅仅对凸缘部分进行局部加热的方法。

(2) 在高温下进行校正。

例如：(a) 用于各种薄板成形方法中的热校正。

(b) 将预成形后的法兰盘毛坯等放入终成形模内，在适应于各自材料及加工变形程度的温度下加压并保持一定时间以实现热校正的方法（蠕变成形法）。

(3) 热塑性加工。

对坯料的一部分或加热或冷却，使它产生热应力、热应变，以获得所希望的形状和尺寸，这种方法被称为热塑性加工。有时只利用这种热应力、热应变，也有和一般压力加工合用的情况。

例如：(a) 用于船舶壳体成形的线状加热板料弯曲法。

(b) 用于校正成形后的船舶、车辆等外形板件的点加热校正法。

(c) 利用借助热应力产生和消除残余应力的方法。

(d) 加热凸缘部分，并对加工完毕时的凸模接触处予以冷却的加热——冷却拉延法。

1.2.5 变形速度

变形速度也和变形温度一样对塑性变形影响很大。

一般的压力加工总希望在室温下高效率地进行，至少目前是对特殊目的的加工才在室温以外温度下进行，但由于加工设备不同而加工速度差别很大，所以在室温下的压力加工也应充分考

虑速度问题。

用现有压力加工方法进行加工时，变形速度越快，生产效率就越高。而且在使用油质润滑时由于摩擦阻力有所减少，所以说是变形速度高了好。但是变形速度一高，变形抗力就增加而且加工力和加工能量也迅速增大。实际上即便是某一道工序采用了高速度，也会打乱工艺流程，这是因为整个加工工艺有通盘协调的生产速度。另外，还要考虑到与加工的种类和特性相适应的最佳变形速度以减少加工工序。

这里所说的变形速度是指压力机的滑块速度等，也就是用于使材料产生塑性变形的工具速度。因此严格地说，它和基础研究中使用的应力速度和应变速度不一样。所以必须注意基础研究结果所适用的条件。例如以挤压加工来看，与滑块速度一致的仅仅是和滑块接触的那一部分，其他部分则有快有慢，这要取决于工具的形状，取决于和工具表面接触的低速部分以及塑性流动方向。在称为死区的地方或者停止流动或者产生旋涡流动。这样，即使压力机的挤压速度提高，而被加工材料中的塑性流动方向或者流动速度多数都是复杂的。

图 1.21 是不同速度下材料应力-应变关系的模式。一般进入高速后所需的变形抗力就增高，其增高的比率是温度越高越显著。关于变形温度和变形速度的关系，如果以断裂前的延伸率或断面收缩率作延性指标进行比较，图 1.21 可以改画成图 1.22。

在 T_1 以下的低温范围和 T_3 以上的高温范围内，不管变形速

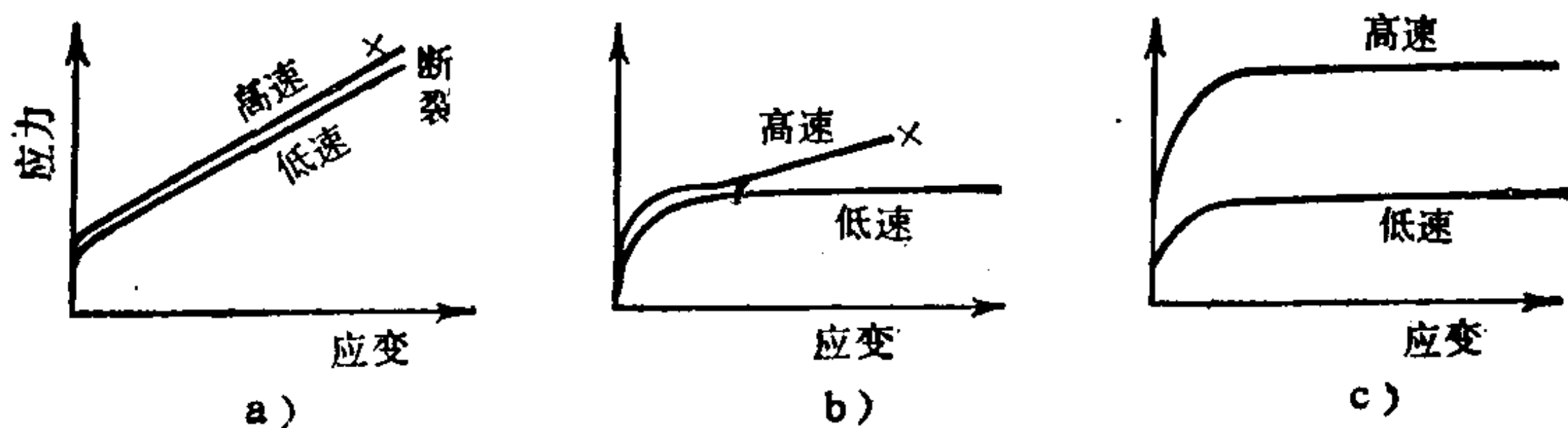


图 1.21 变形速度对材料应力-应变图影响的示意图

a) 冷加工 b) 冷加工和热加工的中间温度 c) 热加工

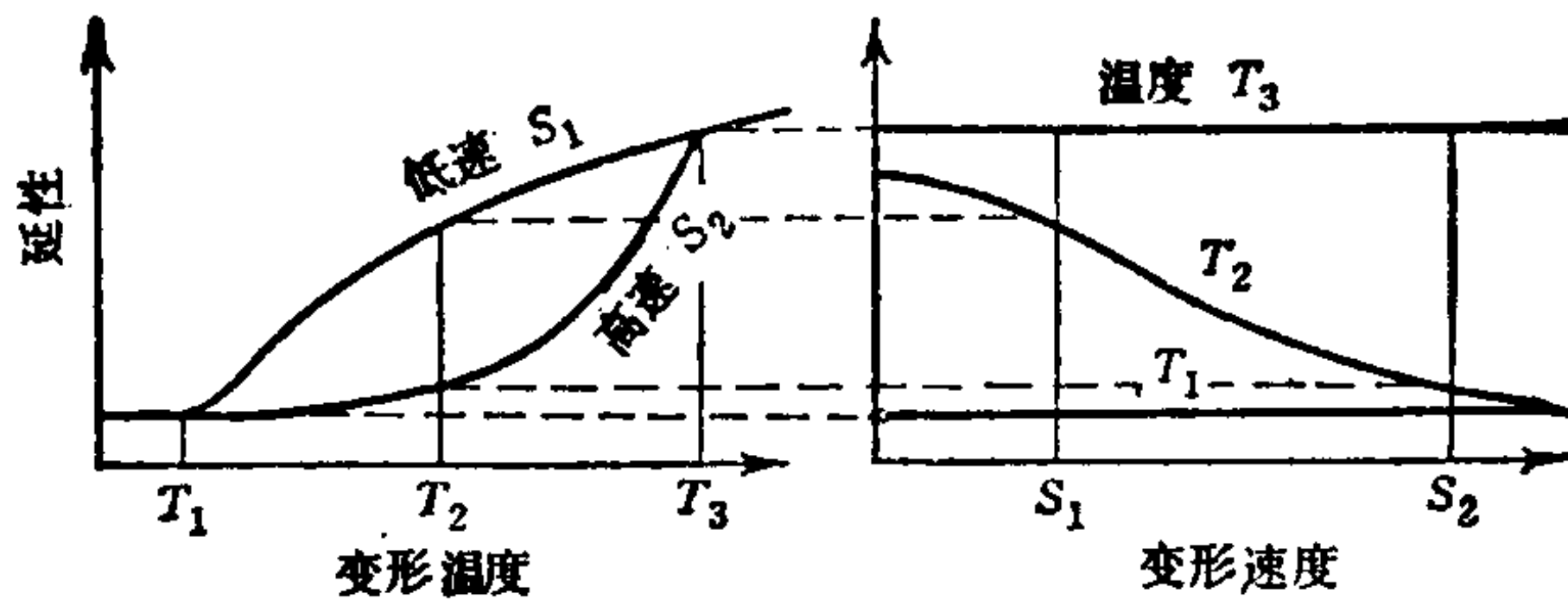


图1.22 变形温度和变形速度对延性的影响

度如何，延性几乎没有变化，但在中间温度范围却有很多材料的延性是随变形速度提高而下降的。温度 T_2 可以看作是表示高熔点材料在室温附近的性质的。

图 1.23 表示以锡的应变速度为参数所求出的相当于图 2.22 a) 特性的实验结果。这个例子显示了以延性急激下降时的温度（转变温度）为界限的脆化情况，并清楚地表示出这个转变温度在应变速度增高之后向温度高的一侧转移的趋势。

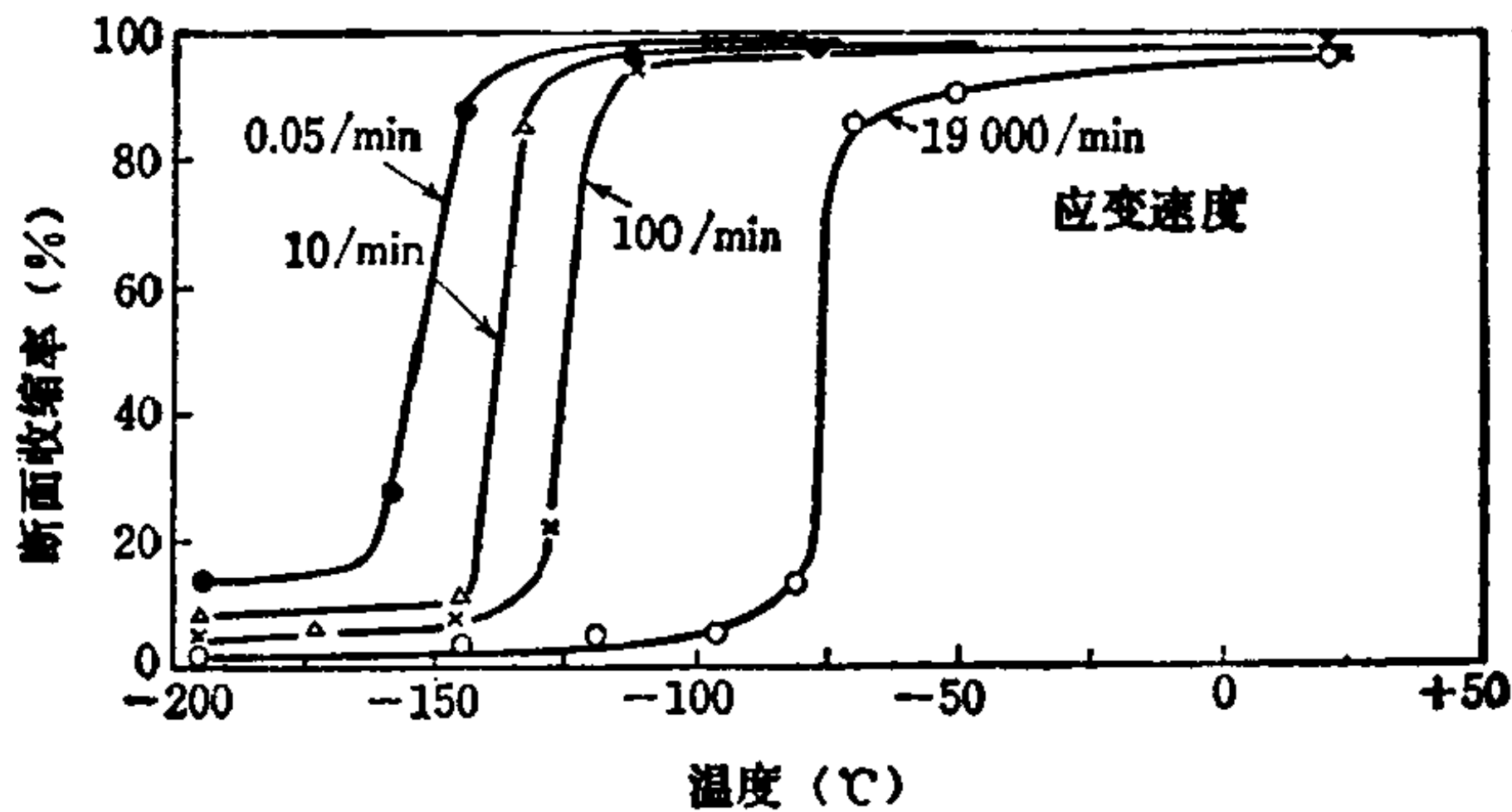


图1.23 温度和应变速度对锡 (b, c, t) 的延性的影响 (Magnusson, Baldwin)

软钢等体心立方金属 (b. c. c) 的应力等对应变速度是敏感的，而铜、铝等面心立方金属 (f. c. c) 却不那么敏感 (图 1.24~图 1.26)。例如：软钢的 n 值在高速时减小而铜的 n 值几乎没有变化，所以拉延加工时的拉延力和行程关系，如图 1.27 所示。另外在高速冲裁加工时因为变形集中在剪切部分，所以塌角

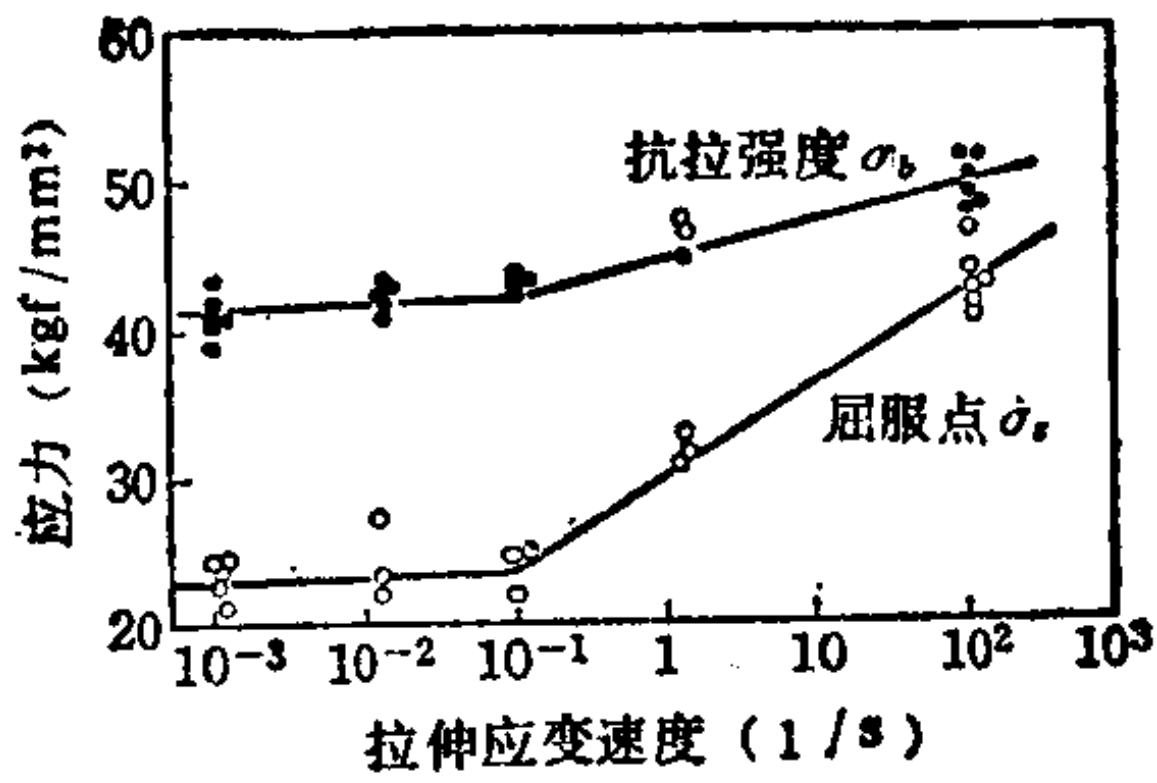


图1.24 软钢圆棒在室温下 σ_b , σ_s 和应变速度的关系 (大森、吉永)

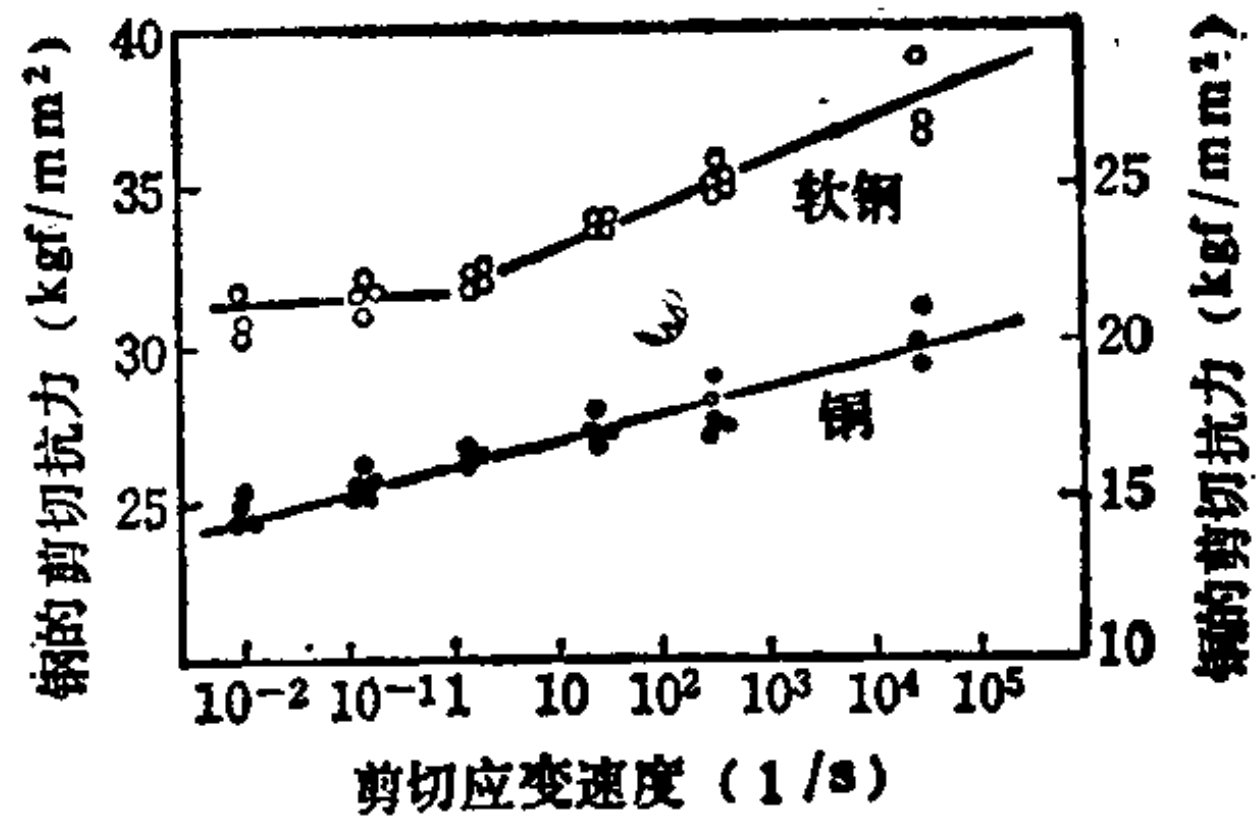


图1.25 软钢和铜 (0.6mm厚) 退火板材剪切抗力随应变速度的变化 (大森、吉永)

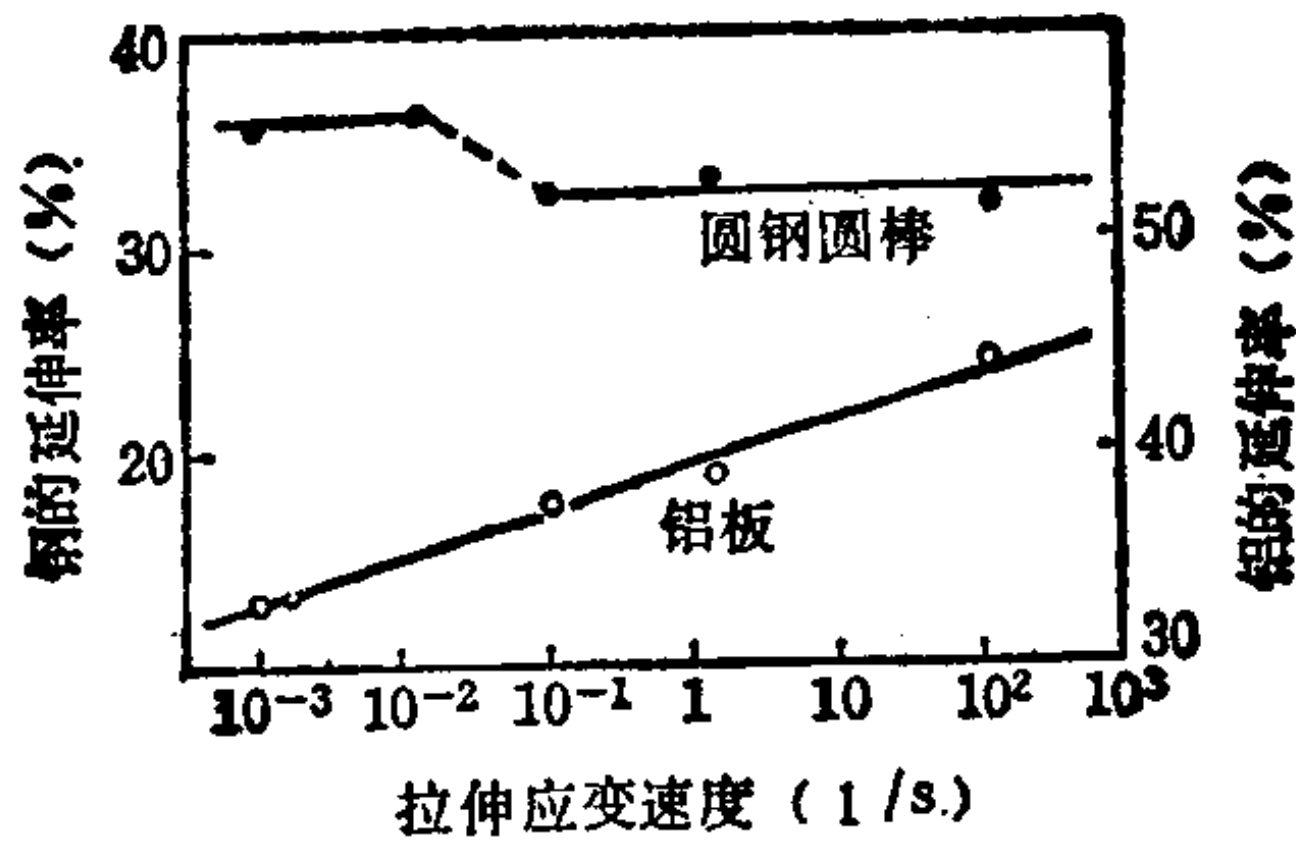


图1.26 拉伸时延伸率和应变速度的关系 (大森、吉永)

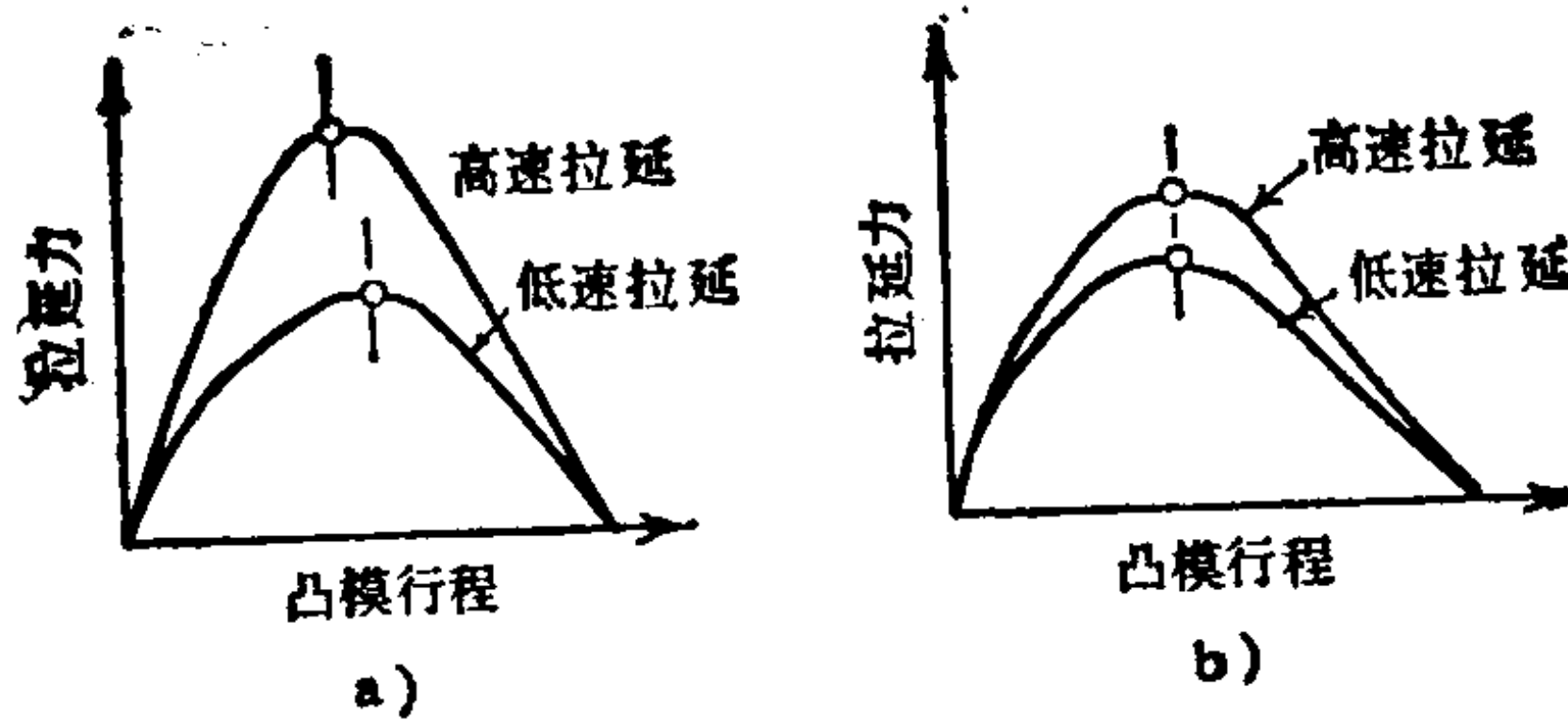


图1.27 拉延时变形速度的影响
a) 软钢板 b) 铜板

小，又由于剪切处发热，所以用比较小的能量就能完成分离，而且制件精度也好（图 1.28）。还有就是在一一般压力加工中从油压机（60mm/s 以下）转到使用机械压力机（30~1500 mm/s）时，不是连续出现损坏事故就是冬季制订的作业条件到夏季又出现了问题等，这样的事例屡见不鲜。虽然发现这些问题和变形温度及变形速度有关，但如果不能马上认识到变形抗力和延性会敏感地反映这些变化，往往是难以采取对策的。这类情况除和材料塑性变形特性有关以外，多数取决于工具和材料之间的摩擦阻力或润滑条件。

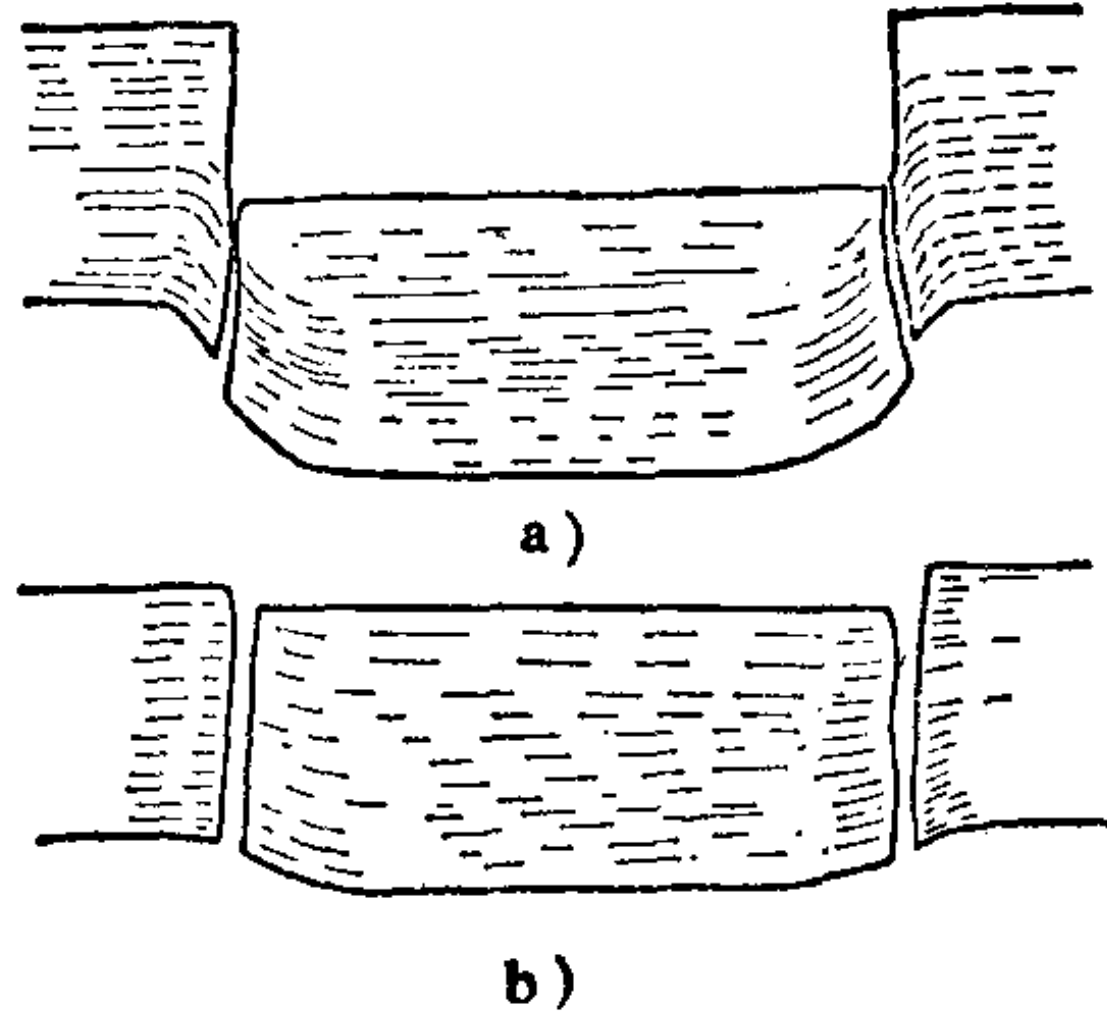


图1.28 冲裁时变形速度的影响 (Zener & Hollomon)
a) 低速冲裁 b) 高速冲裁

1.2.6 各向异性

晶体在冷态加工时受到滑移变形而成为纤维状组织。这是因为有方向性的变形不但改变了晶粒形状，而且也改变了它的方向。大部分晶粒成为从微观和结晶学上看是取向一致方向的。另一方面还因为随着塑性变形，夹杂物的排列和分布也具有了方向性。

多晶体金属中的夹杂物和不规则排列的原子集中在晶粒的晶界处，在受力后的材料内部往往存在着图 1.29 所示的晶界破坏和晶内破坏（亦称穿晶破坏）。

晶界夹杂物多数是脆性的，所以晶粒之间结合力弱，尽管晶粒本身延性很大，但在几乎不发生塑性变形的情况下就会出现晶界破坏。

一般认为，由黄铜拉延件的残余拉应力所造成的应力腐蚀裂纹是晶界破坏的结果。由于晶界物质熔点低，所以高温时易产生晶界破坏，

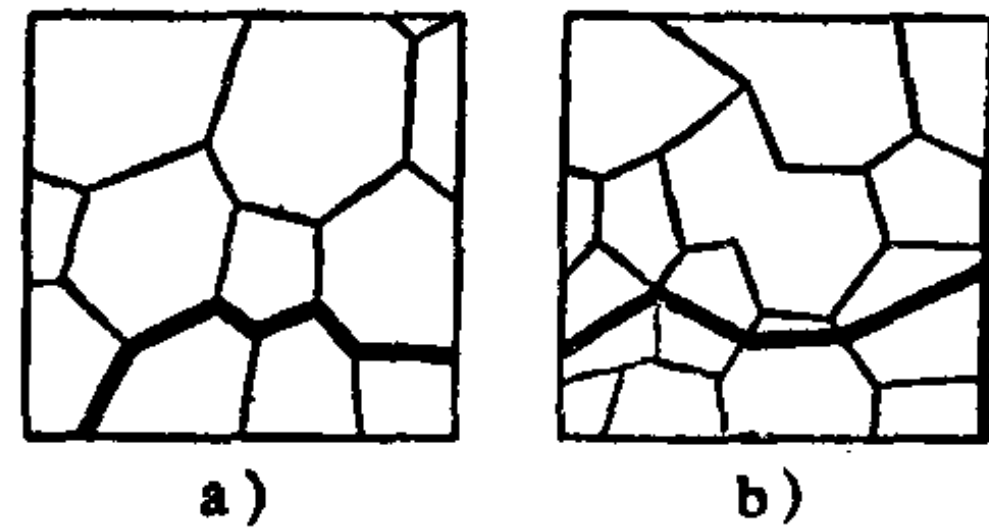


图1.29 结晶的破坏
a) 晶界破坏 b) 晶内破坏

但当低于某个温度（或叫转变温度）时，晶界上已发生的裂纹往往会穿过晶粒内部而导致穿晶或晶内破坏。此外，还有以下几种情况：材料内部的氧化物、硫化物、熔渣等非金属夹杂物和金属材料本身一样变形的情况（图 1.30 b）；脆性破裂的情况（图 1.30 c）；仅金属材料变形而夹杂物几乎不变形的情况。在塑性变形超过一定程度时，如果夹杂物同样也发生细化和重新分布，则对材料的力学性质影响不大。但是当夹杂物的大小和数量一旦增加，则延性迅速降低。这种组织的力学性质当然也就具有方向性了。特别是经过热锻和轧制的坯料，当以后二次加工时，其各向异性就成了问题。

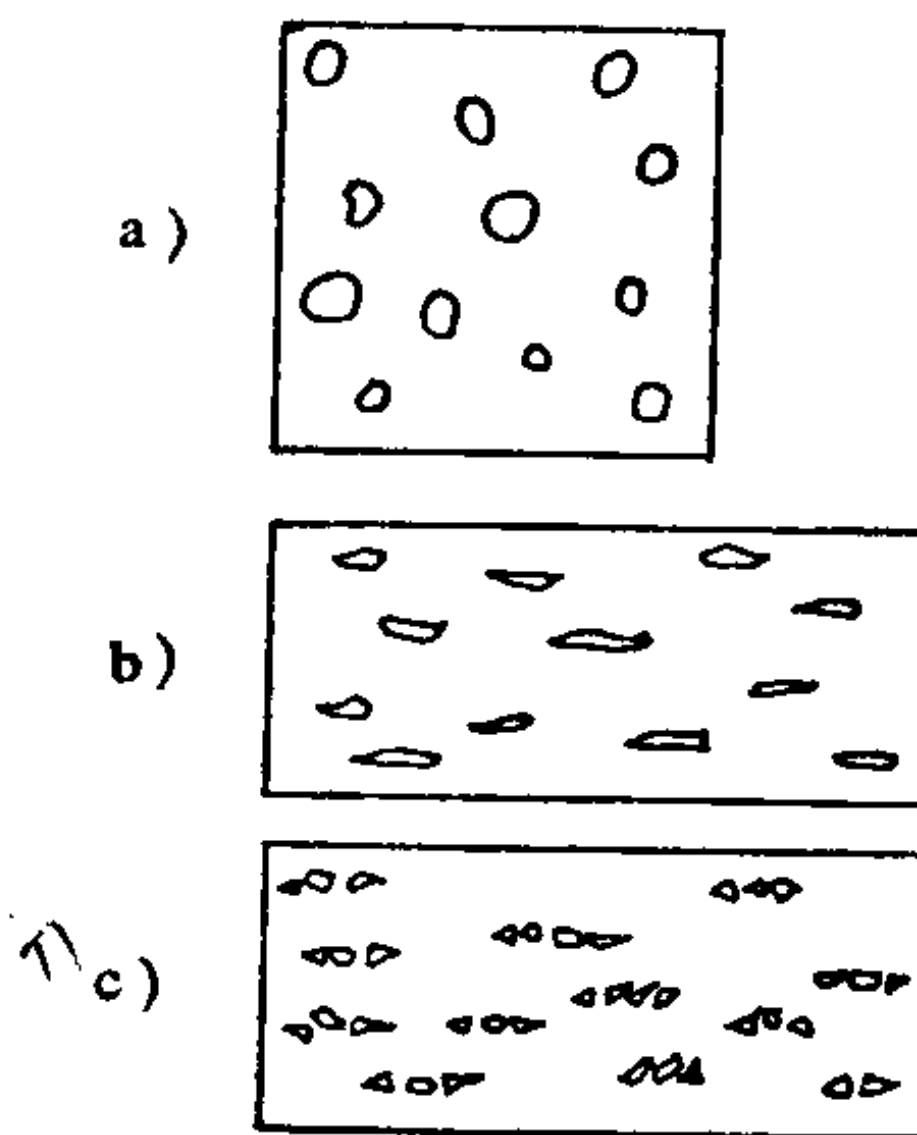


图1.30 夹杂物的变形

a) 加工前 b) 加工后
(夹杂物软韧时) c) 加工后
(夹杂物硬脆时)

材料的各向异性是多种多样的，首先在弹性变形范围内，杨氏弹性模量 E （纵弹性模量）、剪切弹性模量 G （横向弹性模量）和泊松比 ν 就随方向而不同。如果假定在三个互相垂直的轴线方向上它们各不相同，则弹性的各种模量就要有 36 个，其中独立的有 21 个。而沿一个方向轧制过的金属板，在它的平面内就能看到轧制方向和与其垂直的方向是不同的，而各向异性在它们的两个轴方向上则对称，板的厚度方向和板平面方向也有各向异性，这样的各向异性叫垂直各向异性（anisotropy），其独立弹性系数有 9 个。当有特殊必要时，可把前者叫板面各向异性，后者叫板厚各向异性，这种称呼不仅是对弹性变形的，即使是塑性变形也这样称呼。各向异性和板材的成形性能有密切关系。

对于弹性范围的垂直各向异性板，在杨氏弹性模量 E 和泊松比 ν 相互垂直的 X 、 Y 二方向上分别取不同的以下各值 E_x 、 E_y 、 ν_x 、 ν_y ，那末它们的关系就是：

$$\nu_x E_x = \nu_y E_y$$

因此，如果沿 x 轴或 y 轴方向弯曲板材时，因为它们的 E 值不同，其回弹也就不一样。另外，弯曲时的弯曲轴线方向也发生翘曲，其大小取决于 ν ，它也是按 ν_x 和 ν_y 来变化的。即使在落料等加工中，由于落料后板料的回弹不同，所以，例如把模具作成正圆孔，在落圆料或冲圆孔时获得的制件也会成为椭圆形。

原材料制造时引起的各向异性已经介绍过了，但影响弹性变形中的各向异性的因素除其内部组织外，还有制造或热处理时所产生的残余应力的影响。除了由塑性变形引起的宏观残余应力外，也有晶粒内部微观分布的内应力的影响。但微观内应力有降低 E 的倾向，所以当它们有方向性时即会产生前述的情况，因而对经过光轧的板材或退火不完全的材料必须予以注意。

各向异性会引起以下问题，即屈服点和塑性变形（就是产生塑性变形的开始点和进行塑性变形）将随方向而不同。塑性变形时的各向异性大部分是由宏观纤维组织即第二相的机械各向异性造成的。第二相如果不多，延伸率就增加，各向异性也减少。在进行薄钢板变形（埃里克森）试验时可以看到，裂缝沿轧制方向贯穿的情况几乎都是由塑性各向异性所造成。软钢薄板的变形试验值受基体间存在的非金属夹杂物和碳化物的形状和数量的影响很大，为了减少它们的第二相，现在正通过改进冶炼、锻造等方法来开发埃利克森值高、各向异性小的钢板。

另外，当板材弯曲加工时，若弯曲线和轧制方向一致，则最必要的延伸方向自然就和轧制方向垂直。由于容易出现颈缩和裂纹，所以当弯曲半径小时就加工不出来。这时，必须在板材排样时使弯曲线和轧制方向垂直。但是根据成形件的形状和尺寸可能会出现明显的浪费，制造成本也会受很大影响，所以要求有各向同性的板材。拉延件上产生突耳也是这种板面各向异性所造成。

在正四方筒的拉延中，如果在四边和轧制方向成 45° 倾角的方向上排样，其拉延性能变好也是这个道理。

拉延加工时凸缘处的所谓径向拉延变形，是径向承受拉伸，圆周方向承受压缩。这样的变形容容易进行，但要求底部强度大，

厚度减少要小。相反，在凸缘处的板平面内要求它有容易收缩的性质，而在易破裂的底部则要求板厚具有不易变薄的性能。具有板厚各向异性的材料就有这种特性，所以适用于拉延。

把板状拉伸试样拉伸到规定的伸长量时，测定其板宽和板厚的变化，并分别求出两者的应变值、其比值称为 r ：

$$r = \frac{\text{板宽应变值}}{\text{板厚应变值}}$$

兰克福特 (Lankford) 在薄钢板上使用延伸率为 20% (接近均匀延伸的值) 时的 r 值比较拉延性能，其结果很好，所以他建议用 r 值来评价成形性能。以后经过各方面研究，获得很有意义的结果，研制了很多成形性能优良的板材。由于 r 值也是表示板厚各向异性的参数，所以一般称它为塑性各向异性比。

在沿轧制方向和其他方向取试样进行试验时，所得 r 值各不相同。换言之， r 值也有板面各向异性。通常在把 r 值看作比较值时，要在与轧制方向呈 0° 、 45° 、 90° 的方向上取试样进行拉伸试验，求出 r_0 、 r_{45} 、 r_{90} 等值，并取它们的平均值为

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4}$$

取

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90}}{2} - r_{45}$$

作为表示 r 值的各向异性的参量。

等向性板的 $r = 1$ ， $\Delta r = 0$ 。例如经过 $\alpha \longleftrightarrow \gamma$ 相变的正火软钢板就接近这种状态。如果在 $\Delta r \neq 0$ 时存在着板面各向异性，则拉延制件上就出现突耳。在 r 值大的方向上其耳为峰，在 r 值小的方向上其耳为谷。

用于拉延的板料，其 r 值比 1 大得愈多愈好，而且在 $\Delta r = 0$ 时不出现突耳更理想。

对于软钢， r 值在退火前冷轧压延率达到某一值时最大，而且 Δr 也大体上在同样压延率下获最大值 (参照图 1.31，图 1.

32)。此外热轧的终了温度愈高 r 值亦变高。由于 r 值和 Δr 有矛盾，一般情况下往往牺牲 Δr 而提高 r 值，但是特别在需要不出现突耳的钢板时，对于图 1.32 的例子而言，冷轧压延率必须在 20% 或 90% 左右。 Δr 不仅影响出现突耳，一般认为在成形有涂复层的板料时它对涂复层的剥离也有影响，并且对分析成形中的典型事故也是重要的参考。

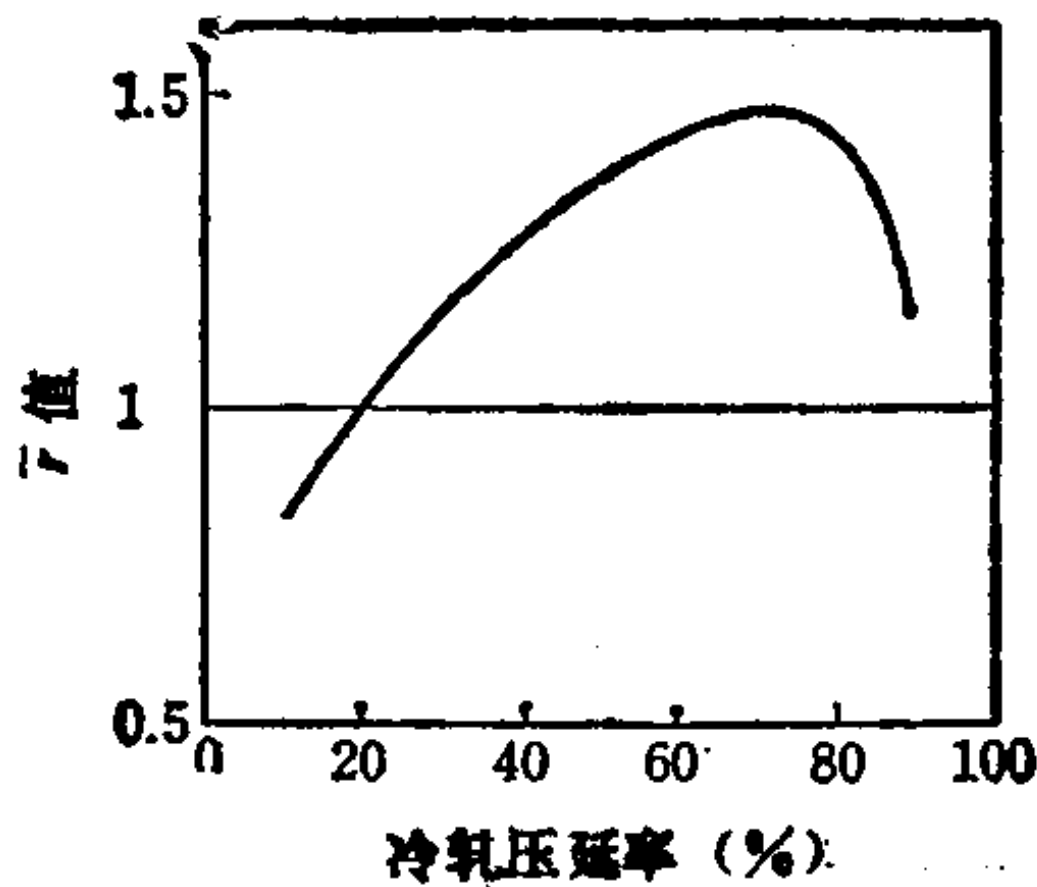


图1.31 r 值和冷轧压延率的关系模式

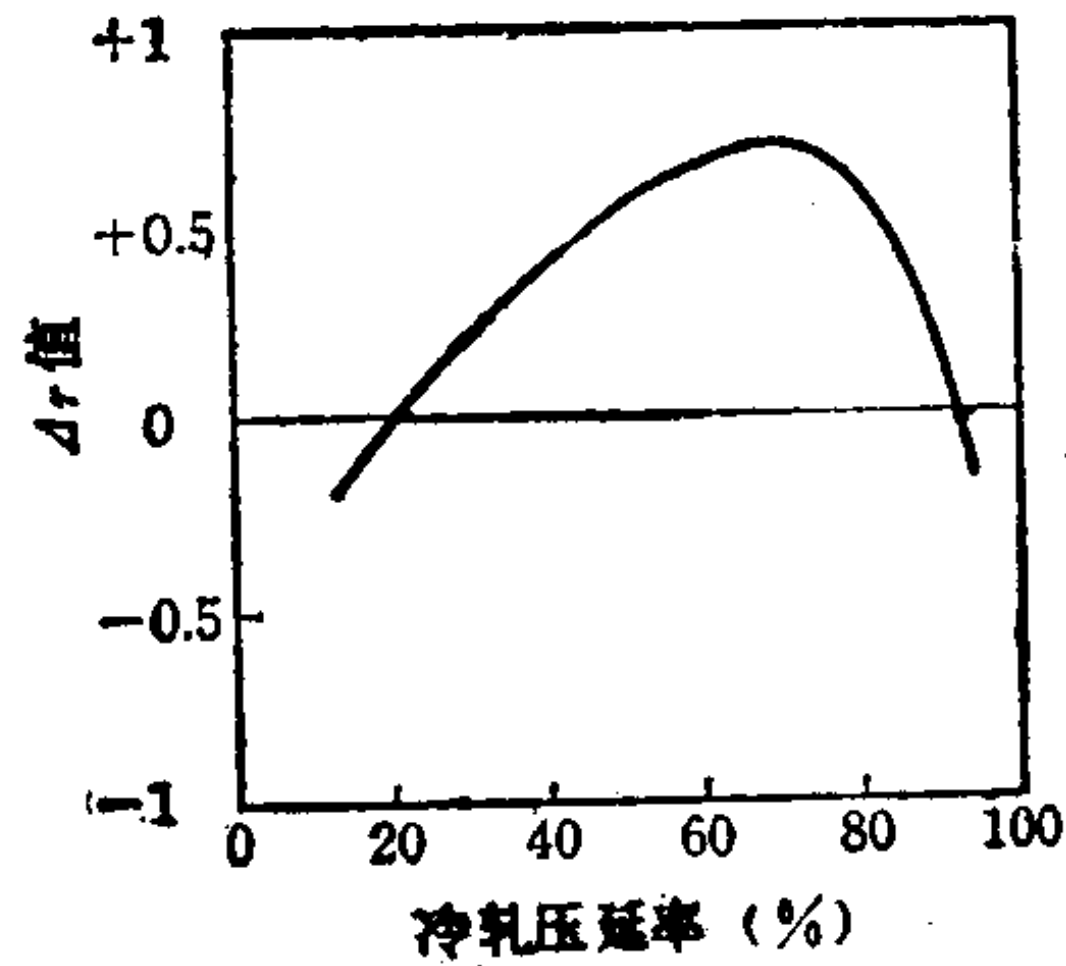


图1.32 Δr 和冷轧压延率的关系模式

具有板面各向异性的板材的屈服开始条件，按希尔 (Hill) 理论应是：

$$\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y \left(\frac{2r}{r+1} \right) = Y^2$$

式中的 σ_x 、 σ_y 即板面内两垂直轴 x 、 y 方向上的主应力，如图 1.33 所示。前面谈过的各向同性材料的屈服开始条件，相当于 $r = 1$ 时的情况。所以对于 $r > 1$ 的拉延性能良好的板材，对于剪切变形（拉延的凸缘部分）屈服变得稍微容易些，同时在出现破裂问题的凸模头部的拉伸成形区域，板面内的两向拉伸区的屈服点明显地提高了。如上所述，在拉延加工时，在与凸模接触有破裂危险的部位，其抗力有相当大的增加，因此可以明白 $r > 1$ 的板材适合于拉延；这种强化方法叫做结构强化 (texture hardening)。

拉延加工时，对于凸模头部的拉伸成形部分要求 n 值大，对于径向拉延变形的凸缘部分要求 n 值小，即要求 $r \geq 1$ 。从材料的特性来看拉延力-凸模行程的关系曲线，如图 1.34 所示。 n 值增大则最大拉延力就降低，其位置后移；当 r 值增大，最大拉延力随之减少。

除此之外，各向异性对于破裂时的强度及延伸率的影响也很重要。表 1.3 所示即其一例。它们和前述各种各向异性一样，当进行压力加工时，出现破裂事故必须考虑到材料强度及跟延伸方向之间的相互关系。

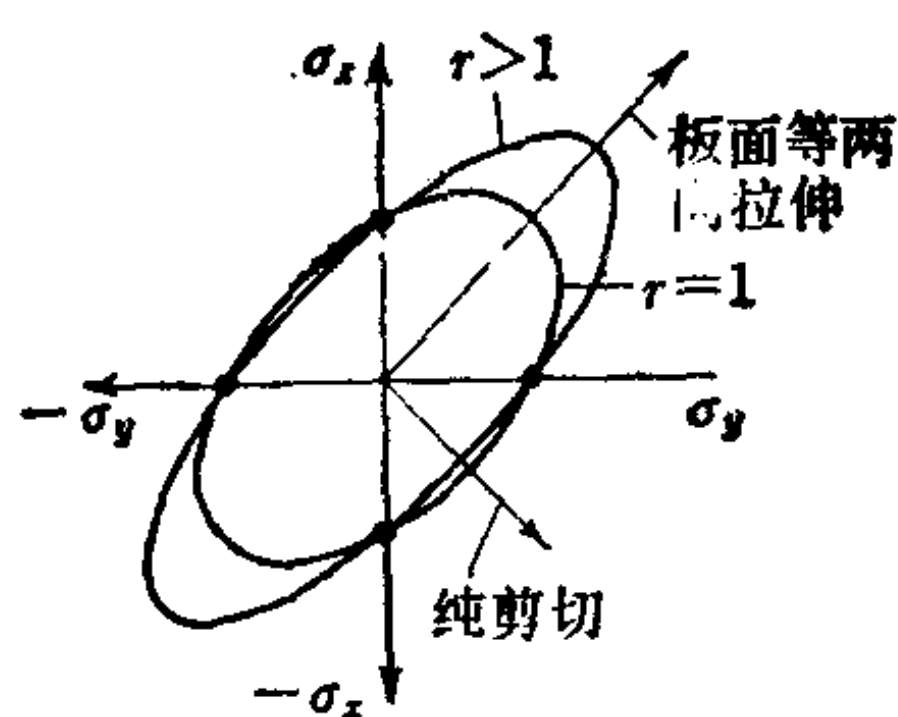


图1.33 具有旋转对称于板面法线的各向异性板材的屈服曲线

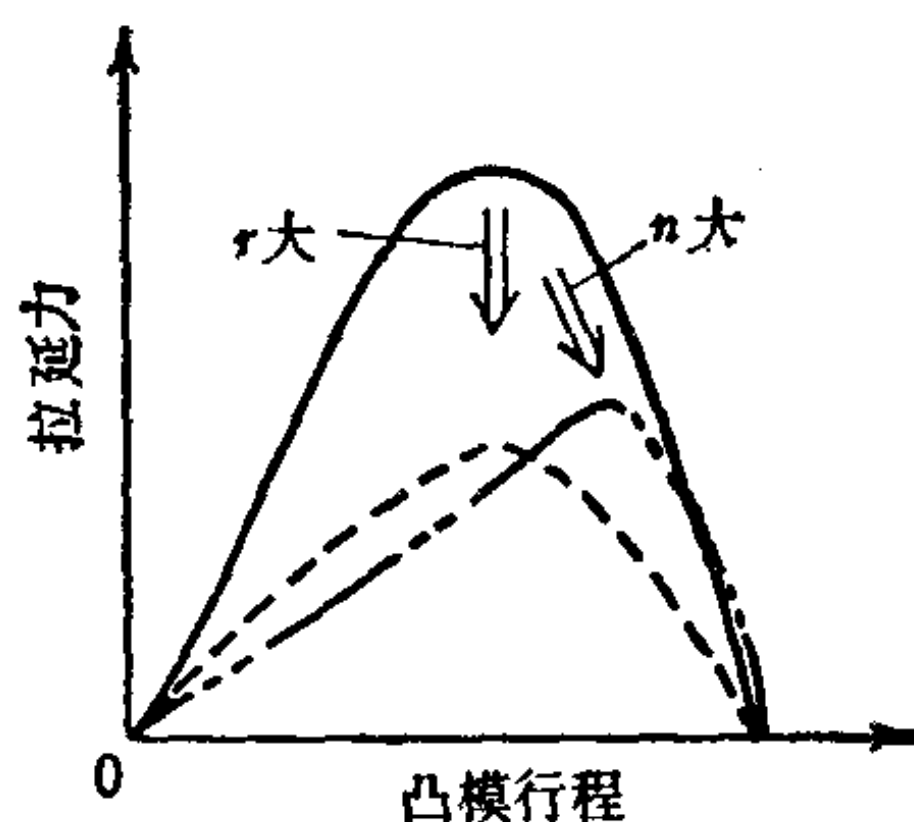


图1.34 n 值和 r 值影响拉延的模式图

表1.3 镇静钢板的各向异性示例（五弓等）

取样方向	抗拉强度 σ_b (kgf/mm ²)	断裂延伸率 δ_1 (%)	屈服点 σ_s (kgf/mm ²)	r 值
0°	31.2	46.0	20.1	1.75
45°	34.2	38.0	22.1	1.10
90°	32.5	44.0	21.3	1.93

1.2.7 加工过程中产生的缺陷和破损

材料晶粒变大延伸率增加，一般来说加工性能变好；但超过某一程度，则加工后的表面明显变粗，形成桔皮状表面。这种粗糙表面也叫桔皮面。一般认为它主要是由晶粒度引起的，所以通过轧制和调质可以防止。拉延用钢板的晶粒度等级多数是 6~8

级。

滑移线集合成的变形纹路，易发生在低碳钢一类的材料上。它们的屈服点延伸量都大。加工过程中，在产生延伸率为百分之几的局部表面上就会产生凹凸不平。在加工汽车车身外板和电气制件等具有使用美观问题的零件时，如果有这种凹凸不平的变形纹路（拉伸滑移），不仅不允许原原本本地留在制件上，而且也有碍于喷漆。

如图 1.35 所示，经退火的成形用低碳钢板因屈服点延伸量很大，所以在加工中会出现只有某一部分产生过大的局部变形的缺陷。当作业条件能满足材料各部分进行均匀塑性变形时，这种缺陷也就消除了。不过在一般作业中要经常做到均匀变形是困难的，因此必须要有能消除材料屈服点延伸的作业。

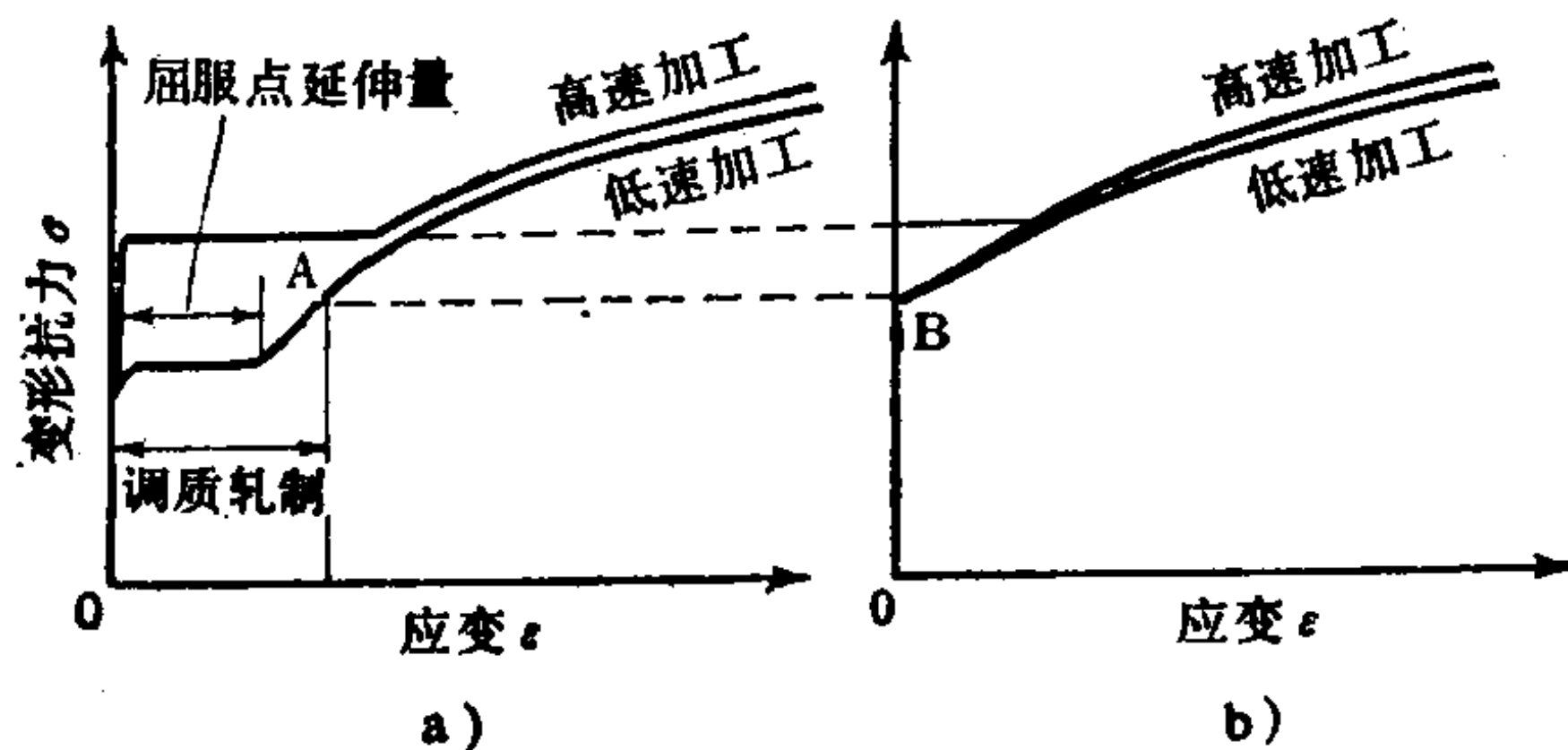


图1.35 拉伸滑移防止方法的说明

a) 软钢的 $\sigma-\epsilon$ 图 b) 调质轧制后的 $\sigma-\epsilon$ 图

其方法之一是用调质轧制 (skin pass)，即将板的表面层局部硬化，另外就是象施加相当于图 1.35 a) 中 A 点处的拉伸残余应力那样，采用小压延率（约 0.5~1.5%）进行轧制。在加工这种板材时采用这样的处理，其表面的应力-应变关系即遵循图 1.35 b) 中的 0—B 线变化，由于消除了屈服点的延伸，所以也就引不起拉伸滑移，而这种拉伸滑移易产生于高速加工。

用于校平板材的辊式校平方法也可以获得类似的表面轧制效果。但是对于任何时效性材料来说，因为应变的时效关系，经过

一定时间后屈服点的延伸再次出现，而使材料又能产生拉伸滑移。

如表 1.4 所示，高温能促进应变时效。一般说来，调质轧制的低碳沸腾钢板的时效时间为数周，辊式校平过的为数日。铝镇静钢和用钒、硼等使钢中氮稳定化的沸腾钢等非时效性钢，经过适当的调质轧制一旦消除了屈服点的延伸，它的机械性能几乎不会因时效而改变，也不产生拉伸滑移。据报告，对经过表面轧制的时效性钢板给以拉伸塑性变形会促进时效，所以必须注意预成形能促进时效但也会产生拉伸滑移。

表1.4 经调质轧制的低碳沸腾钢板在开始产生拉伸滑移应变之前的时效时间实例

冷轧压延率	室 温	100°C	204°C
1%	1月	10分	1分
2%	3月	30分	1分
3%	6月	3小时	1分
6%	16年	1天	5分
10%	在16年内不出现	3天	10分

板材弯曲加工时往往不形成平滑的曲面而出现折角，一般称它为“折痕”，这也是屈服点的延伸变大所引起的倾向，可用调质轧制予以防止。

压力加工中产生的材料破损现象种类繁多，从强度方面来看可分为两大类：

1) 拉缩破损 变薄、龟裂、裂纹和断裂

2) 纵弯破损 产生皱折和折叠

并且压力加工件的加工极限多数都取决于这些破损。因而板材的各种冲压成形性能、棒材

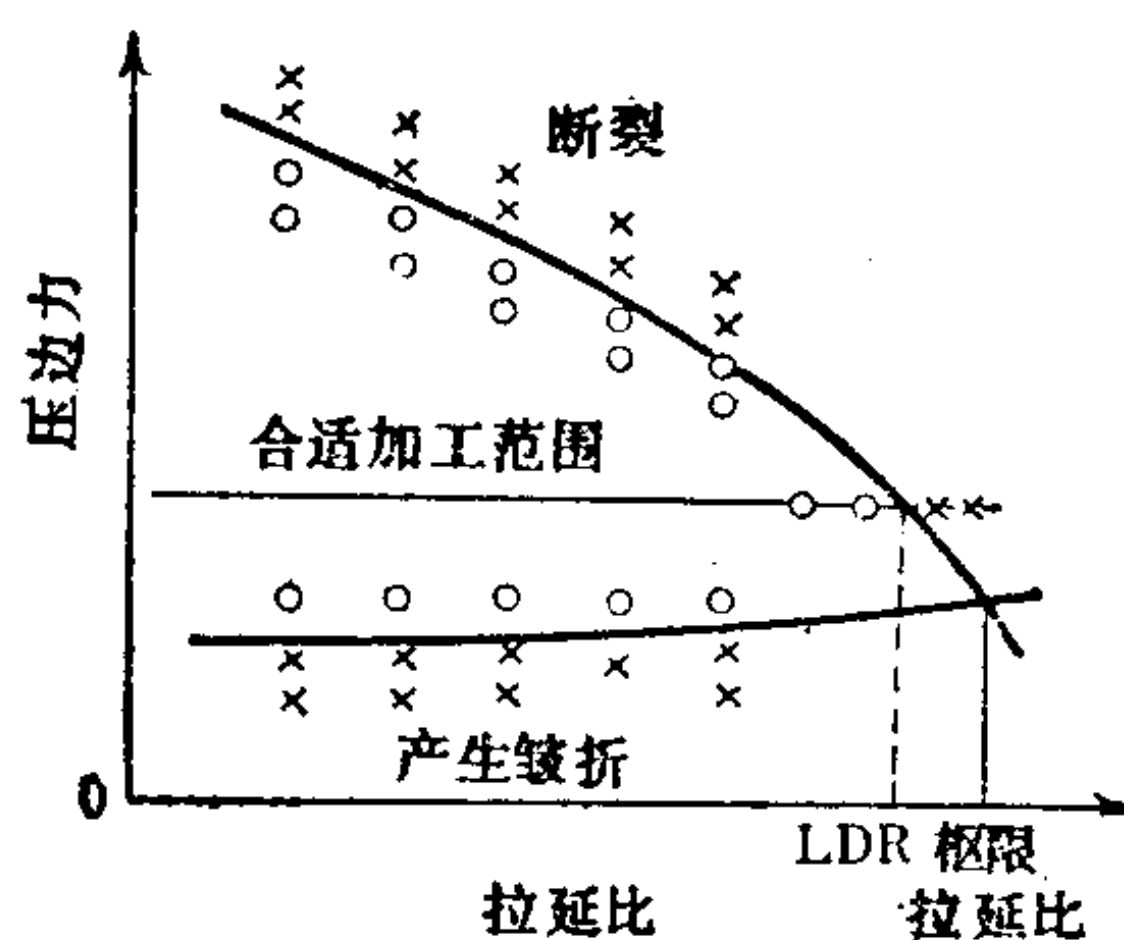


图1.36 圆筒拉延加工时断裂极限和产生皱折极限的典型例子 (LDR是拉延试验时作为比较值的临界拉延比)

的锻造和挤压性能、管材的成形性能等，要根据模拟试验方法，在各种加工条件下求出产生上述破损的极限，应用这些数据选择加工用材料，设计制造模具和确定作业条件。

图 1.36 是拉延时破裂和皱折两种加工极限的典型例子。

另外，加工后经过一定时间所发生的断裂（延迟裂纹，自生裂纹、应力腐蚀裂纹等）也是加工件产生缺陷的主要原因，而且会变成一次加工件在后续加工过程中产生事故的原因。加工件产生缺陷的典型例子，见图 1.37~图 1.41[⊖]。

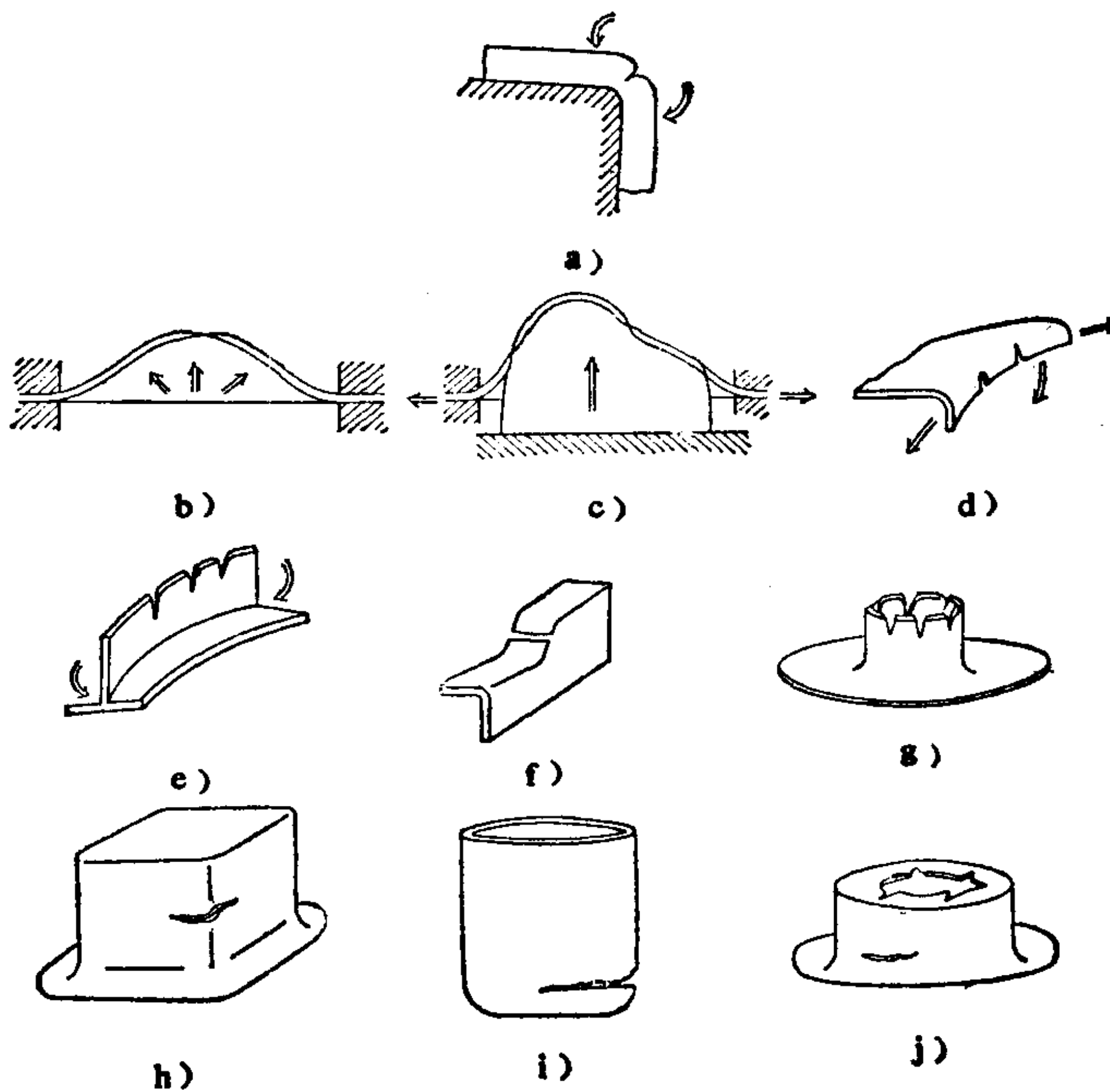


图1.37 拉伸与开裂的典型例子

a) 棒、线、板等弯曲拉伸开裂 b) 板材液压胀形拉伸开裂 c) 板材凸模胀形和拉张成形等的拉伸开裂 d) 板材拉伸弯边成形的拉伸开裂 e) 型材弯曲拉伸开裂 f) 带台凸缘弯曲的拉伸开裂 g) 内缘翻边成形的拉伸开裂 h) 拉伸和变薄拉伸时壁部的拉伸开裂 (wall break) i) 拉伸时底部的拉伸开裂 j) 胀孔成形的拉伸开裂 (弯曲部位和开口拉伸凸缘部分)

⊖ 原文漏——译者。

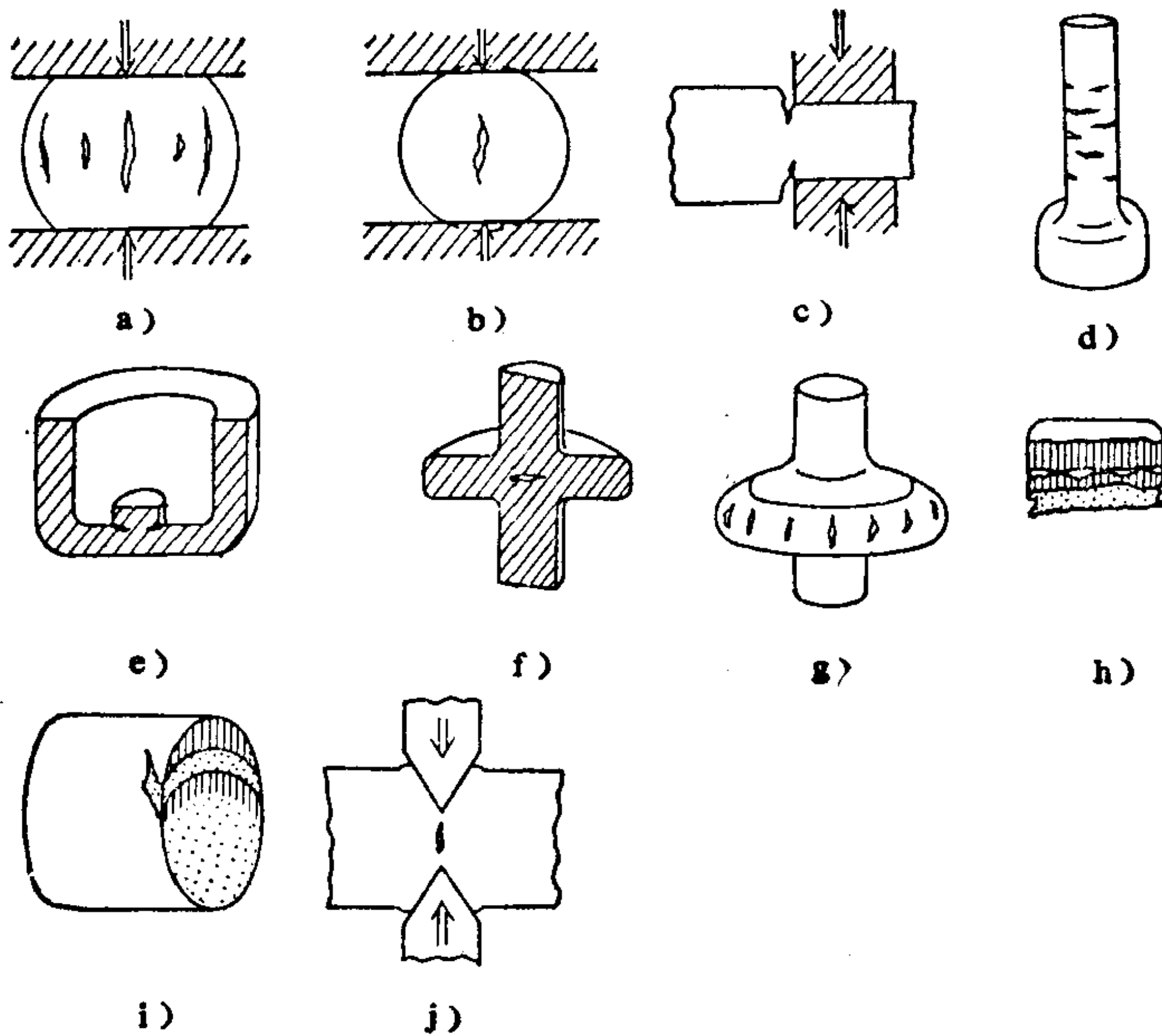


图1.38 裂纹破坏的典型例子

a) 棒料镦粗时两次拉伸裂纹 b) 圆棒横压时的两次拉伸裂纹 (曼乃斯曼穿孔轧制即利用这种现象穿孔) c) 棒料局部压缩时的两次裂纹 d) 棒料正挤压时壁部润滑不良引起的裂纹 (中心部分也产生裂纹) e) 罐形反挤锻造时由剪切造成的裂纹 (内壁和外壁表面也产生裂纹) f) 复合挤压时两次拉伸引起的中心裂纹 g) 镦出中间凸缘时两次拉伸引起的表面裂纹 h) 剪切面上产生的裂纹 i) 剪切面上产生的裂纹 j) 楔形挤入引起的裂纹 (V形刃剪切即利用此种现象)

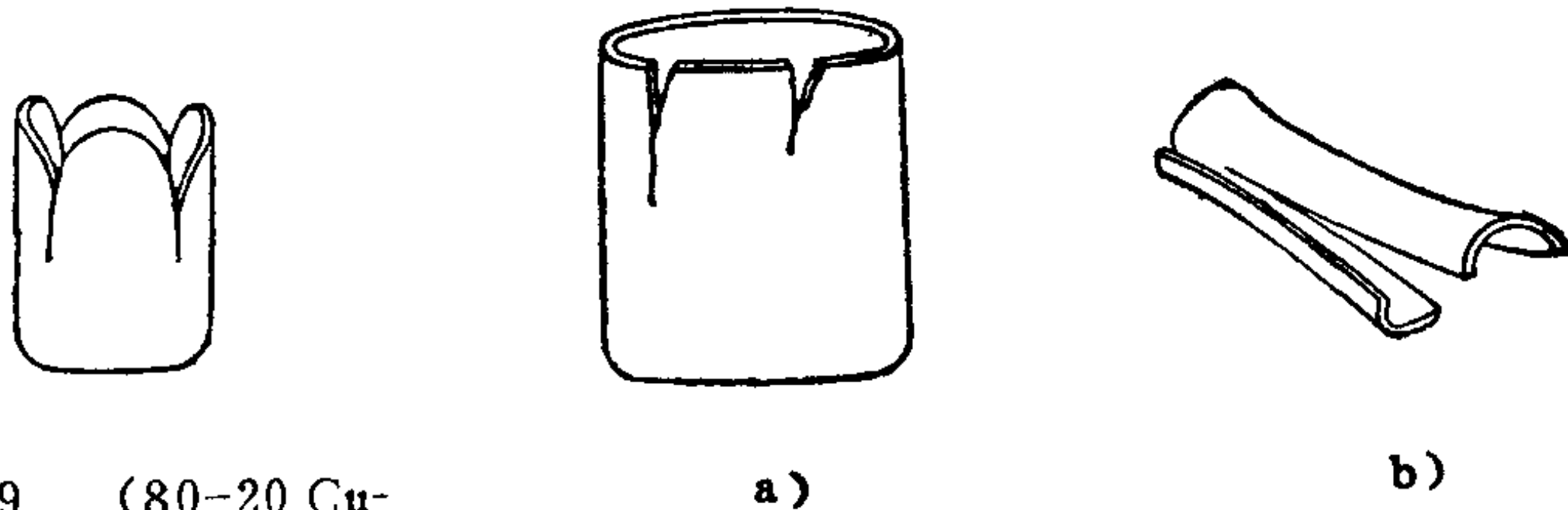


图1.39 (80-20 Cu-Ni合金的拉延件)

由于选择方向和明显的突耳造成的各向异性引起的裂纹

图1.40 延迟破坏的典型例子

a) 黄铜拉延件和管子等产生的延迟破坏 b) 在轧制成形薄壁型材上产生的延迟破坏

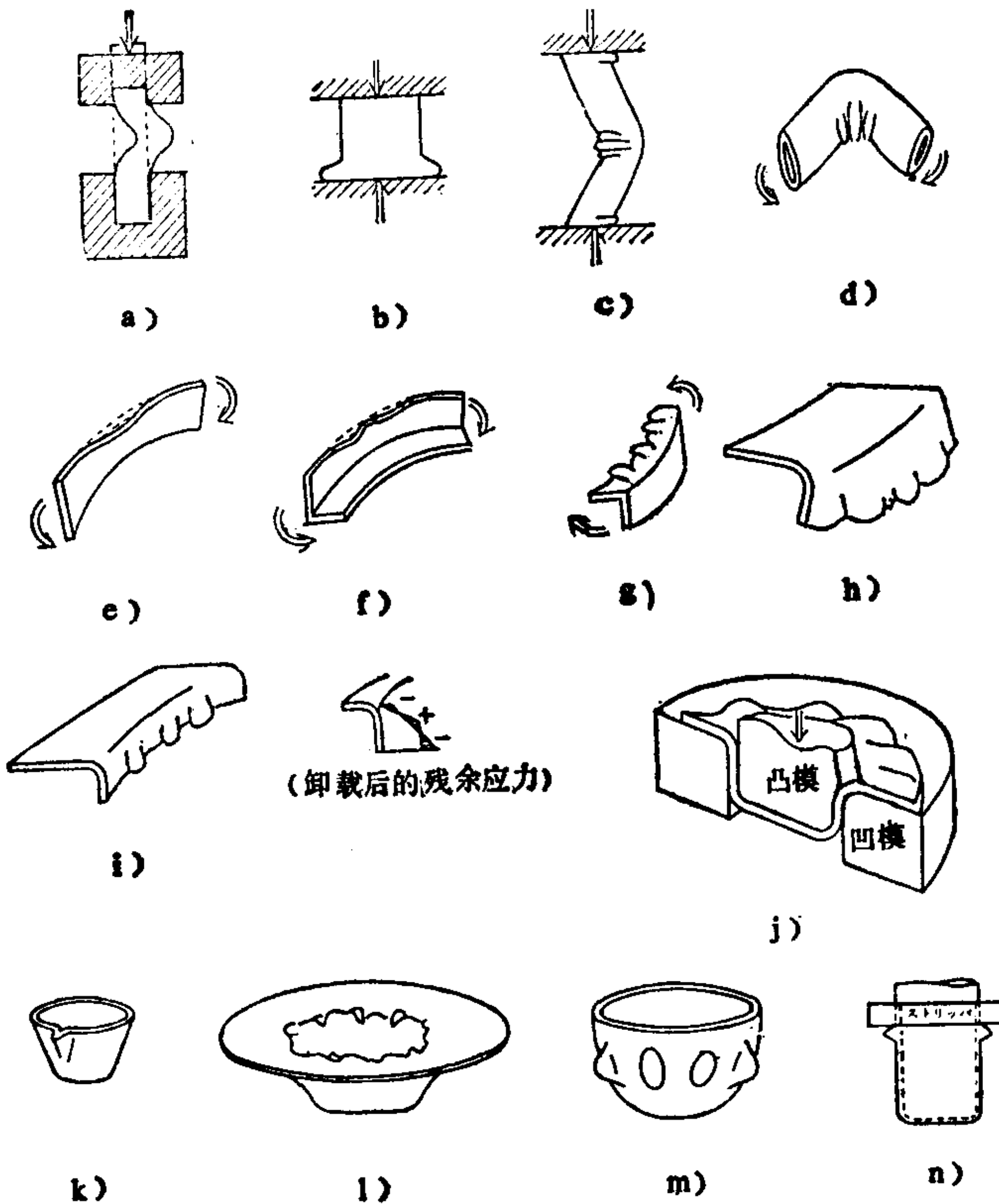


图1.41 纵弯曲破损的典型例子（在复杂曲面板的成形中，其破损有因应力不均造成的剪切纵弯曲变形、翘曲、错移、扭曲、缩孔等，由面外扭力引起的不稳定变形，还有小曲率曲面板成形时出现的“油壶效应”）

- a) 棒料镦粗（翘曲、扭曲、弯扭曲）
- b) 厚壁短管的镦粗（轴对称局部纵弯曲）
- c) 厚壁长管镦粗（整体翘曲塑性纵弯曲）
- d) 厚壁管的弯曲（局部塑性纵弯曲）
- e) 板面内弯曲（横向纵弯曲）
- f) 型材的弯曲（拉伸侧凸缘横向纵弯曲）
- g) 型材的弯曲（压缩侧凸缘局部翘曲）
- h) 板材收缩弯边成形（面内压缩造成局部翘曲）
- i) 板材拉伸弯边成形（卸载后由残余应力造成局部翘曲）
- j) 拉伸的凸缘皱折（圆环状板的翘曲）
- k) 拉伸的突起-皱折（开口端的局部纵弯曲）
- l) 拉伸的突起-皱折（凹模拐角部）
- m) 拉伸的突起-皱折（凸模拐角部）
- n) 拉伸后卸料造成的皱折（轴向压缩造成局部纵弯曲）

1.2.8 材料和工具的接触条件

对于压力加工，一般都是通过模具和材料的直接接触来进行塑性变形的，所以在任何加工过程中降低摩擦力，不仅能直接降低加工力和加工能量，而且对加工件的表面状态也有影响。如果加工力增大，拉丝和拉延时的拉应力就增加，从而降低了加工极限（断裂极限）；在锻造等加工中，由于工具的弹性变形，将导致产生制件精度降低等缺陷。另外，在摩擦面附近产生很大的塑性流动时，容易使加工件表面和内部性能不一致，也是造成死角（dead metal）和裂纹等的原因。如果摩擦增加，工具磨损就激烈，工具寿命会缩短，制件表面精度和尺寸精度也要下降。使用静水挤压、封闭润滑挤压、压力润滑拉延等方法可以保证流体润滑，并能大幅度降低加工力。

但是，另一方面也有不少没有摩擦就不能进行加工的情况。如拉延时凸模和材料之间的摩擦就分担了一部分拉延力而提高了极限拉延比，还防止了产生皱折。再如镦粗棒料时，端面摩擦一旦增加，就可以防止纵弯。挤压时可通过工具表面的摩擦来防止材料表皮向内部卷入；在压印加工时则通过材料和工具的摩擦使材料表层流动局部化，充填质量也变好。以上这些都是典型的例子。

当润滑过分充足而使油膜变厚时，会造成材料表面粗糙，而且在冲裁加工中，还会造成减少平滑挤光表面之类的缺陷。

1.3 生产管理

1.3.1 生产管理概述

a. 生产管理系统 近年来，在企业中计算机的应用已成为不可缺少的，即使在生产管理范畴内也能看到很大的变革。

生产管理系统，因每个企业的生产形态不同而各不相同，针对生产现场中发生的许多问题，必须在调整的同时制订合理的管理体系。

图 1.42 所示即其一例，它是以制造冲压件为中心的生产管

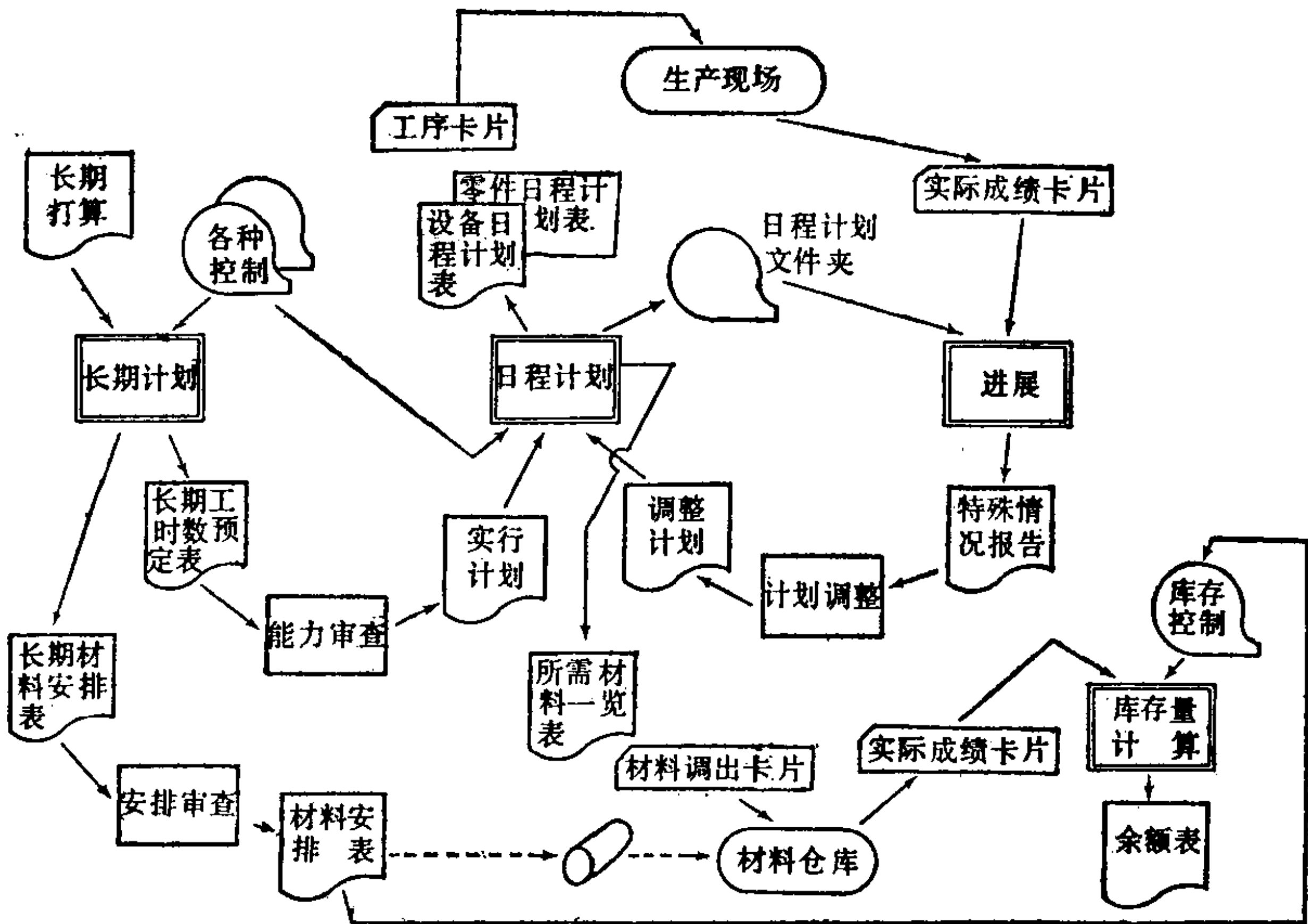


图1.42 生产管理系统之一例

理系统图。

b. 制造标准 在生产制件时，预先确定施工图、材料、机械设备、作业方法、作业时间等制造标准是生产管理的基本内容。

设计产品时，重要的是尽力推进使用标准件。再者对于尚未充分标准化、规格化的零件，通过选用标准件，就能减少零件的库存量，以及减少为制造这些零件所需的模具、夹具、工具的库存量。此外，对于材料的使用、工时的节省、加工性的难易、精度的保持、模具制造过程的缩短等，都必须按照冲压作业的观点作过充分研究并反映在工作图上。

(i) 制造说明书 它是规定与工厂制造有关的标准的技术文件，完成现场作业即以此为根据。因此制造说明书应尽可能详细，并且希望采用谁都能看得懂的图表化形式。

(1) 工艺卡片 工艺卡片是规定工序顺序、使用设备、标准作业时间、检查方法等的技术文件。图 1.43 所示就是一例。

1	工序冲孔膜	使用设备	35 t	标准时间	0.5 h	注意事项	符号	量具及测量方法	A 角度规	D 千分表	
									G 量规(样板)	M 测微器	
									N 卡尺	T 工具投影式比较测长仪	
									全数检查	初首件检查	
									1 h 每小时抽检一次	2 h 每2小时抽检一次	
									午 午前午后抽检一次	日 每天抽检一次	
							10				
						① 改	9				
						② 改	8				
						注意事项	7				
							6				
							5				
							4	初	N 班长	3 个	
							3	初	A 班长	3 个	
							2	2 h	N 班长	3 个	
							1	初	N 班长	3 个	
							检查位置	检查方法	检查工具	承担人	考备 (抽检个数)
						① 改	材	料	CuP2.0 t	剪切宽度	36.5
						② 改	产	品名称	DP-35		
							零	件名称	托座		
							图	号	08-286002-0		
							执	行	批	准	执行日期
											65.9.20
											零件工序工艺卡

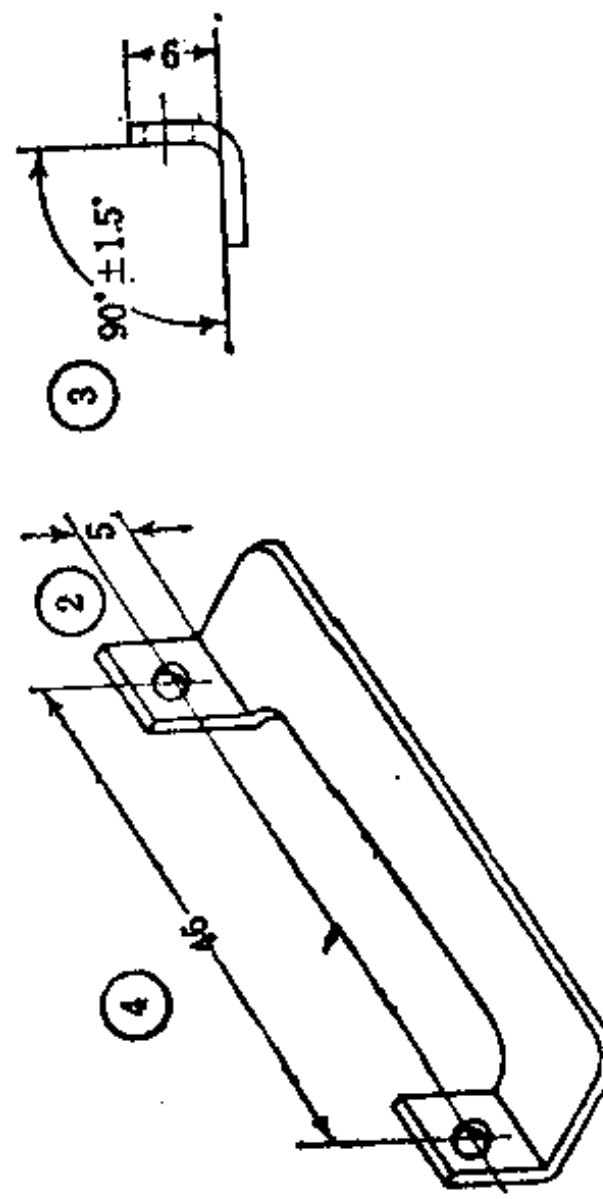
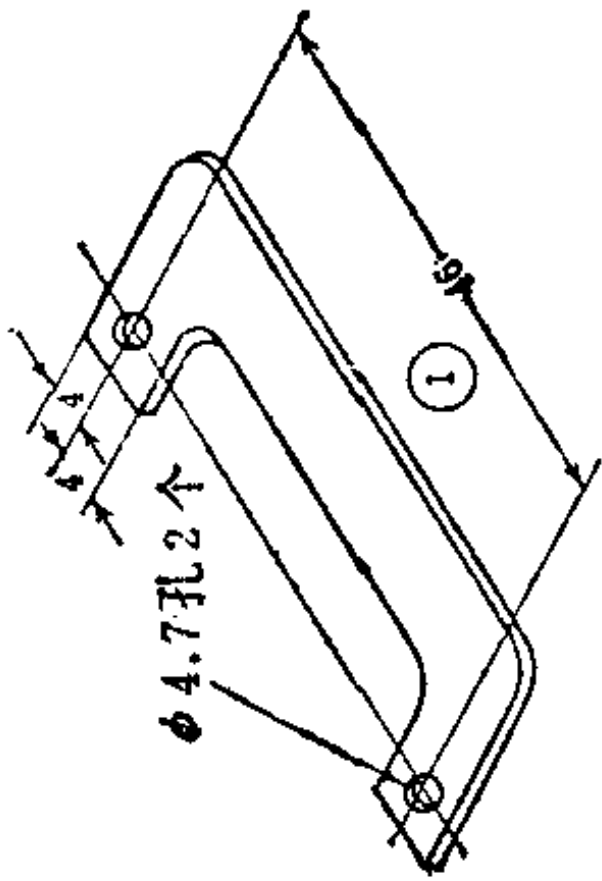


图1.43 工艺卡片例

(2) 材料卡片 通过它可从零件图计算坯件尺寸,并能确定剪切机和坯料排样所需要的材料数量。此卡片是材料管理的基础资料。图 1.44 所示即其一例。

(3) 材料说明书 材料说明书是对材料制造厂提出的购入说明,通常规定下列事项:

- 1) 材料名称、材料代号、用途。
- 2) 尺寸和公差、机械性能、电气性能、化学成分、外观加工质量。
- 3) 检查方法。
- 4) 包装及捆扎方式。
- 5) 制造或处理方法。


○ . .					科	批准	审图	起草
○ . .								
○ . .								
○ . .								
图号代号 36-910001-0		名 称	活 动 臂		要求数/台	1	设备类别	
产 品	材 料	SPCC1	料厚	1.6	件数/定尺料	2510	材料利用率	%
	净重/1000个		总重/1000个		不合格率		%	
	备注							
剪 切 机	定尺料尺寸	宽 914 × 长 1829		定尺料重量	21kg			
	裁切尺寸	宽 47 × 长 1829		模具导向方式				
	张数/定尺料	19张		材料利用率	%			
	备注							
材 料 排 样	 (往返送进)				件数/张	130	材料利用率	%
					形 式		节 距	
					送进搭边		侧 搭 边	

图1.44 材料卡片例

(ii) 标准作业时间的确定 制定作业计划时, 最要紧的是正确掌握各工序的能力。标准作业时间可以提供必要而适当的情报。也就是说, 通过确定标准作业时间, 生产计划、工序管理、成本管理、劳动力管理等也就自然确立下来了。

(1) 标准作业时间的计算方法 标准作业时间按(有效作业时间+辅助时间)计算, 准备时间往往采取另外的方法计算。

关于有效作业时间的计算, 可以用 WF 等的PTS (predetermined motion-time system) 预定动作时间法(按基本动作分析人所从事的作业, 用这种方法所得到的时间作为预定的时间)客观地计算所需时间。但是, 辅助时间因生产系统和考虑问题的方法的不同, 不一定明确。所以重要的是按作业现场的实际情况决定辅助时间。例如某电机制造厂的辅助时间定为标准作业时间的18%。表1.5、表1.6、表1.7所示为辅助时间率计算法的实例。

表1.5 辅助时间率计算表(1)

(1) 作业辅助时间分级表(0.1%/1点)

主要项目		辅助因素 (按项目划分)	工作中的衣着	作业中的商谈	材料 料的 及整 制理	图 纸 文 件 的 处 理	作 业 区 的 整 理	使 用 机 器 设 备	使 用 工 模 卡 具	其 他	适用范围
A. 标准 化的程度	1) 最少			8	5	8	1.5		0.5	1.5	全部作业的10%以下
	2) 少			6.5	4	5	1.5		1	1.5	全部作业的30以下
	3) 一般			5	2.5	3	1		1.5	1	全部作业的60以下
	4) 多			3	1	1.5	0.5		1.5	0.5	全部作业的60%以上
B. 实际 加工的批 量大小	1) 小于10个		3	5	6.5	3	1.5		3		根据不同作业的平均实际加工批量确定
	2) 10~ 100个		2.5	4	5	2.5	1.5		2.5		
	3) 100~ 1000个		1.5	2.5	3	1.5	1		1.5		
	4) 1000个以上		1	1	1.5	1	0.5		1		

(续)

(1) 作业辅助时间分级表 (0.1%/1点)

主要项目	辅助因素 (按项目划分)	工作中的衣着	作业中的商谈	材料 及整 理	图纸 文件 的处 理	作业 区的 整理	使用 机器 设备	使用 工模 卡具	其 他	适用范围
C. 制件 精度	1) 低		1		1	0.5			0.5	基本上无须测量检查
	2) 一般		2.5		2.5	1			1	一定程度的测量检查
	3) 高		4		4	1.5			1.5	经常测量、检查
	4) 精		5		5	1.5			1.5	反复测量、检查
D. 作业 的复杂性	1) 最简单		1.5		1.5			1.5	0.5	大体上不用看图纸、文件
	2) 一般		3		5			3	1	有时看
	3) 中等		5		8			5	1.5	常看
	4) 复杂		8		11			6.5	1.5	时常看
E. 工模 卡具的管 理状态	1) 最少		3		3			1		全部作业的10%以下
	2) 少		2.5		2.5			1.5		全部作业的30%以下
	3) 一般		1.5		1.5			2.5		全部作业的60%以下
	4) 多		1		1			3		全部作业的60%以上
F. 要不 要操作 的特殊 护身器 具	1) 最少	1.5								全部作业的10%以下
	2) 少	3								全部作业的30%以下
	3) 一般	5								全部作业的60%以下
	4) 多	6.5								全部作业的60%以上
G. 设备 机械的维 修	1) 最少						1			每月检查一次
	2) 少						2			每周检查一次
	3) 一般						3			每天检查一次
	4) 多						4			每天数次注意检查

注：对于作业单一、标准化好的，需要制作工、模、卡具少的作业类别，采用各项中的最小值。

表1.6 辅助时间率计算表(2)

(2) 工作场地辅助时间分级表 (0.1%/1点)

辅助因素 (按项目划分) 主要项目	材品 料的 及搬 备运	各 种 等 待	传 票 处 理	集 中 传 达	工 作 场 地 清 扫	其 他	适 用 范 围
A. 实际 加工批 量的大小	1) 100个以下	2	3	3		2	根据不同作业类别的平均实际 加工批量确定
	2) 100~ 1000个	1	2	2		2	
	3) 1000个以上	1	1	1		1	
B. 间接 人员配 置是否 适当	1) 少	4					基本无保证
	2) 一般	2					常由操作者代做
	3) 多	1					大体上有足够的间接人员
C. 生产 计划的 执行情 况	1) 差	3	5				突然加入的多
	2) 一般	2	3				常有突然加入的
	3) 好	1	1				大体按计划进行
D. 设备 使用次 数(起 重机)	1) 少		1				使用起重机的工作几乎没有
	2) 一般		4				经常使用起重机
	3) 多		8				使用起重机的工作多
E. 制作 精度	1) 低	1	1				大体上看看图就可以, 无须测 量检查
	2) 一般	2	2				根据鉴定程度, 边看图纸, 边 测量检查
	3) 高	3	3				时常看图, 测量检查
F. 图纸、 文件的 整理是 否适当	1) 差		3				图纸、文件经常不符
	2) 一般		2				图纸、文件不太相符
	3) 好		1				图纸、文件基本相符
G. 管理 方法	1) 差		3	3	25	5	
	2) 一般		2	2	15	3	
	3) 好		1	1	5	2	
H. 工作 场地的 清洁状 况	1) 差					3	切屑、废料容易飞散的工作场 地
	2) 一般					2	切屑、废料不大飞散的工作场 地
	3) 好					1	无切屑、废料飞散的工作场 地
I. 暖气 设备	1) ①						操作者不用动手, 且采暖良好
	2) ②					6	操作者要动手, 采暖良好

(3) 自然需要时间占 3%

表1.7 辅助时间

(4) 疲劳辅

①精神负担						根据判定之和确定的辅助时间率	
精神作用的判断基准							
分类		1	2	3	4	1~2点	0.5%
主要因素		一般	较少	中等	大	3~4点	1.0%
A	作业精密度	0点	1点	2点	3点	5~6点	1.5%
B	作业思考程度	0	1	2	3	7~8点	2.0%
C	作业危险性	0	1	2	3	特别恶劣的作业加1~3%	

②体力劳动			
重 量 (kg/h)			(%)
A	极 轻	~200	1.8
B	轻	~400	3.6
C	中	~600	5.4
D	重	~800	7.2
E	极 重	~1000	9.0
F	超极重	1000以上	10.8

③作业姿势		
	姿势分类	(%)
A	自 由	0
B	坐 着	0.5
C	站 着	1.0
D	不 正 常	2.5

疲劳辅助时间率	=
---------	---

辅助时间率 = (作业辅助时间率) + (工作场地辅助时间率)

率计算表 (3)

助时间计算表

④ 停机时间的恢复系数					
停机时间的% (b/a)		系数	停机时间的% (b/a)		系数
A	≤5	1.0	I	41~45	0.33
B	6~10	0.9	J	46~50	0.28
C	11~15	0.8	K	51~55	0.23
D	16~20	0.72	L	56~60	0.18
E	21~25	0.63	M	61~65	0.15
F	26~30	0.53	N	66~70	0.12
G	31~35	0.46	O	71~75	0.1
H	36~40	0.40	P	76~	0

注：循环时间 < 0.5 分钟的系数为 0.1。a 为手作业时间；b 为机械时间。

⑤ 环境						
对环境的判断基准					根据判断之和的辅助时间率	
主要因素	分类	1	2	3	4	
		好	一般	较差	差	
						1~3 点 0.3%
A	工作场地清洁度	0 点	1 点	2 点	3 点	4~6 点 0.7%
B	工作场地照明	0	1	2	3	7~10 点 1.1%
C	工作场地温度	0	1	2	3	11~15 点 1.7%
D	工作场地噪音	0	1	2	3	
E	工作场地地面	0	1	2	3	

⑥ 单调感					
循环时间(分)		(%)	循环时间(分)		(%)
A	≤0.25	4	E	8.01~12.00	0.6
B	0.26~1.00	3	F	12.01~16.00	0.3
C	1.01~4.00	2	G	16.01~	0
D	4.01~8.00	1			

$$\{(\text{①} + \text{②} + \text{③}) \times \text{④}\} + \text{⑤} + \text{⑥}$$

+ (自然需要时间率) + (疲劳辅助时间率)

准备时间，随工厂情况而异，但就一般情况而言，大多数是根据冲压车间过去的资料来作判断，按设备的种类来确定。表 1.8 所示为准备时间简易估计表的一例。

表1.8 准备时间简明速查表

(h)

使用设备 作业人员 作业种类	60 t 以下		100 t		100 t W. B		250 t		折弯压力机		
									4 英尺	8 英尺	
	1 人	1 人	2 人	1 人	2 人	1 人	2 人	1 人	1 人	2 人	
冲 孔	0.5	1.0	2.5	2.0	4.0	2.0	4.0	—	—	—	
落 料	0.5	1.0	2.0	—	—	1.5	3.0	—	—	—	
修 边	0.5	1.0	1.5	1.0	2.0	1.5	3.0	—	—	—	
V形弯曲	0.5	—	—	—	—	—	—	0.5	1.0	1.5	
U形弯曲	0.5	1.0	1.5	—	—	—	—	0.5	1.0	1.5	
成 形	1.0	1.0	2.0	1.5	3.0	2.0	3.0	—	—	—	
拉 延	1.0	1.5	3.0	—	—	2.0	4.0	—	—	—	
连 续(自动)	0.5	1.0	1.5	—	—	—	—	—	—	—	

(2) 标准时间速查表 在多品种小批量生产的冲压车间中，确定标准作业时间是一件特别繁杂的事情。如果根据作业种类、设备类别、送进节距、回转次数等因素制定出标准作业时间速查表，在使用上就方便了。表 1.9 所示即为标准时间速查表的一个例子。

c. 生产计划

(i) 生产计划表 根据计划销售量和适当库存量来确定现有生产设备、人员能力所能承担的生产量，并定出长期性的计划。图 1.45 所示就是生产计划表的一个例子。

(ii) 经济批量 在需要量受到限制或生产速度远大于要求速度时，可采用成批或分批生产方式以求得最佳生产批量（经济批量数）和生产周期。

经济批量的计算公式的一例为

$$L = \sqrt{\frac{12AN}{Ci}}$$

式中 L —— 批量的大小；

表1.9 标准作业时间速查表 (H/1000个)

			踩动一次踏板可能的行程数									
落料拉伸模			2	1	1	2	1	1	2	1	1	
切断弯曲模			2	1	1	2	1	1	2	1	1	
连续模	3步以上	吹件	2	1	1	2	1	1	1	1	1	
		漏件	4	1	1	4	1	1	4	1	1	
	2步	吹件	2	1	1	2	1	1	2	1	1	
		漏件	4	1	1	4	1	1	4	1	1	
多件冲裁模	吹件	2	1	1	2	1	1	1	1	1		
	漏件	4	1	1	4	1	1	4	1	1		
简单模	来回冲裁	2	1	1	2	1	1	1	1	1		
	吹件	4	1	1	4	1	1	4	1	1		
	漏件	4	2	1	4	2	1	4	2	1		
模具形式		送进节距	~20	~60	~100	~20	~60	~100	~20	~60	~100	
		条料长度	915			1200			1830			
		送进节距	~20	~60	~100	~20	~60	~100	~20	~60	~100	
每次4个零件	4	每分钟转数	90	0.40	0.44	0.50	0.39	0.43	0.48	0.39	0.42	0.46
		100	0.38	0.42	0.42	0.37	0.41	0.46	0.37	0.40	0.44	
		110	0.36	0.40	0.46	0.35	0.39	0.44	0.35	0.38	0.42	
		120	0.34	0.38	0.44	0.33	0.38	0.42	0.33	0.36	0.40	
		130	0.33	0.37	0.43	0.32	0.36	0.41	0.32	0.35	0.39	
每次2个零件	2	每分钟转数	90	0.51	0.56	0.62	0.49	0.52	0.58	0.48	0.51	0.55
		100	0.49	0.54	0.60	0.47	0.51	0.56	0.46	0.49	0.53	
		110	0.47	0.52	0.58	0.45	0.49	0.54	0.44	0.47	0.51	
		120	0.45	0.50	0.56	0.43	0.47	0.52	0.42	0.45	0.49	
		130	0.42	0.49	0.54	0.42	0.46	0.51	0.41	0.44	0.48	
每次1个零件	1	每分钟转数	90	0.68	0.73	0.78	0.68	0.72	0.77	0.67	0.70	0.74
		100	0.66	0.71	0.76	0.66	0.70	0.75	0.65	0.68	0.72	
		110	0.64	0.69	0.74	0.64	0.68	0.73	0.63	0.66	0.70	
		120	0.62	0.67	0.72	0.62	0.66	0.71	0.61	0.64	0.68	
		130	0.60	0.65	0.70	0.60	0.64	0.69	0.59	0.62	0.66	

C/H	制件代号	制造单位	S E Q A	S E Q B	产品形成	产品划分	安排对象	大科目	产品分类	入库预算						
										(N)月	(N+1)月	(N+2)月	(N+3)月	(N+4)月	(N+5)月	(N+6)月
SY	5254300000	3210	1	1	B.S-50	1		701A	H114	60	70	75	70	70	60	60
SY	5254300000	3210	1	1	B.S-50	1		701A	H114	230	400	650	600	600	460	350
SY	5254300000	3220	1	4	B.S-20	4		701C	H112	68	45	60	60	60	60	50
SY	5254300000	3220	1	4	D.S-20	4		701C	H112	63	82	81	70	71	71	75
SY	5254300000	3230	1	1	D.P-50	1		701C	H111	4	5	20	20	20	20	20
SY	5254300000	3150	1	1	D.P-50	1		701C	H111	0	0	5	5	5	5	5
SY	5254300000	3250	1	1	S.P-20	1		701C	H111	0	0	6	3	5	5	5

图1.45 生产计划表

工作序号	制件代号	制件略号	产品形式	单位	生产量	M/C类别	管理工序	工序	作业名称	作业工时	制造开始日期	制造完成日期	材料代号	材料略号	材料需要量	表面处理
03474	42244003199	FRAME-LEFT-ASM	TNH	P	1500	09	01	01	PP	11:31	10031003	10031003				
							02	02	INS	21	10041004	10041004				
03475	42244003210	FRAME-LEFT-ASM	TNH	P	1500	01	01	01	SHA	38	10031004	10031004	21365429	SPCG1.6×217×20	191.53	
							02	02	BL	1:60	10041004	10041004				
						04	03	03	P10	2:66	10041005	10041005				
						04	04	04	P12	3:20	10051006	10051006				

图1.46 按月划分的制件日程计划

N ——每月必需的制件数量；

A ——每投料一次的费用；

C ——零件单价；

i ——库存费用率。

(iii) 月产制件的日程计划 根据产品的装配日程计划、零部件的库存量、加工顺序、加工时间、生产车间的保有工时数等，制定制件的生产日程计划。图 1.46 所示为月产制件的日程计划表。

d. 工序管理

(i) 按设备编排的日程计划 对于以制件为主的日程计划，相应地也须有以设备为主的日程计划。长期坚持这个日程计划，既能使作业稳定，又能保证制件日程计划的进度。但是日常故障引起的事故常常发生，正因为有这种变化，所以即使采用电子计算机管理系统，数据的修正也赶不上现场情况的变化。所以就现状而言，可以看到有使用“挂板”的，也有用按设备或机群编排的日程计划。图 1.47 所示为按设备编排的日程计划表之一例。

(ii) 工序管理 用于工序管理中的传票有作业票。作业票通常和日程计划表，材料调拨单等同时发送。然而，作业票是作业命令书，同时也是为工序管理、效率管理、成本管理等提供资料的基础。此外，借助计算机系统对资料所作的迅速处理，又是很快改变生产管理意图和方法的重要手段，所以即使出现了工序紊乱须相应改变计划的情况，也能随之作出及时处理。图 1.48 所示即为作业票的一个例子。

在图 1.42 的生产管理系统中，每天收回作业票后要直接输入电子计算机处理，以此检查预定日程计划的执行情况。

e. 材料管理 以生产计划为基础，才能开展与产品零件有关的各项工作，并且在确定月产制件日程计划的同时还可算出材料消耗量。材料的分配、保管、供给等应与日程计划协调，这样首道工序才能圆满完成。

M/C 类别	设备略号	承担制件略号	月											
			1	2	3	4	5	6	⑦	8	9	10	11	12
TP1	TRP 125	BH-32CASE	76000个 (J 0143) →											
			29000个 (J 0152) →											
	BL-201FRAME	30000个 (J 0140) →												
	TRP 150 COVER	30000个 (J 146) →												
TRP 250	BL-201BASE	100000个 (J 0137) →												
	BL-211BASE	61000个 (J 0157)												
	ET-135FRAME	150000个 (J 0135) →												
BP1	CFR60		4500个 (J 0164) →											
			12000个 (J 0166) →											
			5100个 (J 0173) →											

图1.47 按设备编排的日程计划表

剪切宽度	材料耗量	个数/张	作 业 票				发行	年	月	日
36.0	3块 = 张71kg	700					69	7	29	
月	制件代号和略号	数 量	交付期	工时(H)	材料代号和略号	重 量(kg)				
8	4438264175	2400.00	9-9-10	14450	2002113460	576568				
操 作 者	月日	工序	工 时 (H/1000)	S 班	交付期	工时	E	生产总量		时 间
		01	0.80	01	9-01	0.92				
		02	2.10	02	9-02	3.85				
		03	2.30	02	9-05	4.29				
		04	2.30	02	9-08	4.29				
		05	0.20	19	9-09	0.44				
		06	0.20	20	9-05	0.44				
		外协	0.00		9-09	0.00				
		08	0.10	19	9-10	0.22				

图1.48 作业票的一例

材料的月消耗量一览表，是从月产制件日程计划表中将材料种类和尺寸相同的部分汇集分类而成的。根据所核实材料消耗量和库存量确定材料的订货量。图 1.49 就是月材料消耗量一览表的一例。

材料调拨单，随月产制件日程计划表，作业票等一同发出。向冲压车间调拨材料要交换材料调拨单，以使材料调拨的实际情况能记入材料库存单中。根据库存单上的各次数据就能定下基准库存量，可为确定订货量提供资料。图 1.50 为材料调拨单的一例。

材料代号	材 料 略 号	产品略号	制件代号	制 件 略 号	单 位	制件生 产数量
3140349720	BSP3 B 1×365×12	DC-9184	4321034511	O-KEY- STEM	P	8020.00
		BA4931	4321033511	S-KEY- STEM	P	85250.00
		RG4002	4451022312	S-LOCK- KEY	P	69020.00
		LC5101	4231022451	D-STOPPER	P	15280.00
		HJ1102	4334014315	LOCK-KEY- STEM	P	2940.00
3140348131	1P1B16×2	AM-1241	4334025134	REAR- PLATE	P	200.00

图1.49 月材

产 品 略 号	制件代号和略号	数 量	单 位
DC-9184	4321034511		套
	O-KEY-STEM	8020.00	P
材料代号	材料略号	需要量	单位
3140349720	BSP3 B 1×365×12	116.207	kg

摘要

科长	主任	承担人员

图1.50 材料调拨单

1.3.2 质量管理

a. 质量管理的实施 为了有效地实施质量管理，通常的做法是“确定影响产品质量的一切制造条件，即全面确定包括材料规格以及作业方法等在内的最佳作业标准”，并加以“严格遵守”，

形状	材料	使用坯料尺寸			使用坯料重量 (kg)	需 要 量			定尺 钢板 下料 个数	定尺 钢板 下料 条数	定尺 钢板 下料 所需 条数	定尺钢 板要 需量	
		划分	划分	尺寸 等级		宽	长度	张(条)				M	(kg)
P	S	10	365	1200	1.846	63.0	75.60	116.207	130	5	315	63	
P	S	10	365	1200	3.699	160.0	192.00	591.525	544	3	1280	160	
P	S	10	365	1200	3.699	129.5	155.40	478.910	544	8	1036	129	4
P	S	10	365	1200	1.839	123.8	148.56	227.638	126	6	743	123	5
P	S	10	365	1200	3.456	6.3	7.56	21.599	480	10	63	6	3
						482.6	579.12	1435.879					
S	O	16	2000	1000	9.856	3.8	3.80	37.052	56				
						3.8	3.80	37.052					

料消耗量一览表

以便最经济地生产出能满足标准要求的产品。因此，生产现场的首要任务自然就是贯彻这种意图。阐明道理之后就要按下面的程序进行实施。

- 1) 分析现状，合理地确定质量标准。
- 2) 制订满足质量标准的作业标准。
- 3) 按照作业标准进行作业。
- 4) 收集作业中的数据。在这方面可以采用众所周知的工程质量管理手段之一的管理图、巡回检查（管理检查）法等。
- 5) 如果发现工序异常，马上采取措施。
- 6) 一批产品加工完了时要抽样检查，以保证送至下道工序前的质量。

b. 材料的质量管理

- (i) 材料规格 规定必要而充分的材料要求及检查方法。
- (ii) 收料检查 只有合乎上述规格的材料才予以接收，因

此需对材料进行合理的检查。由于压力机使用的材料大都是板料、带料，所以与尺寸精度有关的项目必须全部检查。因此，在掌握了一批材料的质量特性分布状况后，还必须有计划地进行抽查。

(iii) 材料制造厂的质量管理 材料制造厂本身若把实施质量管理当作方向来对待，这对购买者的材料质量管理来说确是一件贤明的事情。近年来在材料交货时，一般都要附上制造厂家的检查结果或金相组织图等资料。

(iv) 材料的保管 明确材料的质量履历（批号），并要注意防止伤痕、锈蚀及其他可能出现的缺陷。

c. 模具的质量管理 模具对冲压件的质量有很大影响，管理好模具十分必要。

(i) 新模具完成时的检查

1) 结构及性能检查 在使用新模具加工试制品的同时，还要对照检查模具在使用上有无不妥之处。

2) 硬度试验 判定热处理合格与否，防止出现破损危险。

3) 尺寸检查 由于模具随着研磨而一点一点地改变着尺寸，所以测定尺寸公差要求严格的制件时，除测量试件外，同时还要测量模具本身的尺寸并留下记录。

(ii) 修理时的检查 除去模具重磨之后要进行检查，就是在可能会引起尺寸变化的拆卸组装或更换零件修理的情况下也需要检查，这时的检查与新模具完工时相同。

(iii) 使用中的精度检查

1) 作业开始时的检查 完成模具调整开始作业时，首先应检查几个初期制件，并与新模具完成时或修理时的检查测定值相比较，以检查模具安装是否正确。

2) 作业中的检查 此项是为了解模具在工作中的状况，主要内容是进行制件尺寸测量和为掌握模具磨损情况的“毛刺”测量。

3) 末件的检查 在末件检查中，应根据末件的状态和制件

数量来判断模具的磨损情况或模具有无修理的必要。从这些判断出发就可以避免过度使用模具并延长模具寿命。

d. 工程的质量管理

(i) 作业标准的确立 运用统计法进行工程质量管理时,首要条件是确定作业标准。确定作业标准时要做如下的准备工作:

1) 深入研究质量特性。

2) 定量地掌握影响质量特性的因素(材料、工模具、作业条件等)和质量的关系。

3) 掌握测量或试验误差。

为了分析研究上述1)~2)两项,可以运用i)工程能力分析(process capability study)[1];ii)作业精度分析(operational accuracy study)[1];iii)管理图法和频数分布法[2];iv)试验计划法等手段。

(ii) 制造工程的管理方法 对冲压加工的质量管理,常常采用以下方法。

(1) 管理图法 其主要目的是管理制造工序。确定每批制件质量良好与否,即所谓的检查,应按大致的分类来进行。表1.10所示为常用的管理图法[3]。

对于计量值的管理广泛使用 $\bar{x}-R$ 管理图,对于计数值的管理则广泛使用 p 管理图。

(2) 管理检查 使计划适合于冲压车间的特殊性,方便于实施管理检查,而且也可以收到预期的效果。

这一方法可分为三个阶段:

i) 首件检查。

ii) 中间检查(巡回检查)。

iii) 末件检查。

它们分别发挥着不同作用,其主要目的是管理制造工序。它的优点是:采用管理检查的结果,能够省去每批制件完成时所必须进行的质量检查。

表1.10 管理图一览表

特性值	管理图 (读数方法)	含 义	管 理 范 围	理 论	数 据 种 类	例	与实际使用情况相 关的日本工业规格
计量值 的质量特性值 作为连续量测得	\bar{x} 管理图	按照平均值 \bar{x} , 管理工序平均质量 的管理图	$\bar{x} \pm A_2 \bar{R}$	正 常 分 布	长度, 重量, 时间, 寿命长短等, 抗拉强 度, 延伸率, 硬度, 纯度, 收率, 强度, 分 温度, 化学成分, 分 析成分比, 压力, 原 单位, 产量, 热膨胀 率, 收缩率, 电流, 电压, 比电阻静电容 量 还有表示为%的	轴的加工直 径, 装进袋子的 硫酸铵重量, 线 的抗拉强度, 阿 斯匹林的纯度, 刀刃的淬火温 度 电灯泡的电力 消耗	$\bar{x}-R$ 管理图 JISZ9021 $\bar{x}-R$ 管理图 JISZ9022 x 管理图 JISZ 9023
	x 管理图	按照每一测量值 x , 管理工序平均 质量的管理图	$\bar{x} \pm E_2 \bar{R}$ $\bar{x} \pm 2.66 \bar{R}_s$				
	中间值管 理图, \bar{x} 管理图	按照中间值, 管 理工序平均质量的 管理图	$\bar{x} \pm m_2 A_2 \bar{R}$				
	R 管理图	按照一定范围, 管理工序质量波动 大小的管理图	$D_4 \bar{R}, D_3 \bar{R}$				
计数值	p 管理图	按照不合格率 p 管理工序质量的不 合格管理图(也可叫 做不合格率管理图)	$\bar{p} \pm 3 \sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}}$ $\left(= p \pm \frac{3}{\sqrt{n}} \sqrt{\bar{p}(1-\bar{p})} \right)$	二 项	制件不合格率	电灯泡接头的 不合格率, 小螺 丝长度不合格 率, 匙子的外观 不合格率, 电话 机外观不合格率	JISZ9021

不合格个数	不合格个数管理图	不合格个数	分布	按照不合格的部位, 管理工序质量的管理图 (也叫不合格个数管理图)	pn管理图	JISZ9021
单位面积或单位大小上的缺陷数	纺织品的纺织缺陷数、漆包线的气孔数	单位面积或单位大小上的缺陷数	泊松分布	按照出现缺陷的数量 c , 管理工序质量的管理图。用于调查缺陷数的样品大小相等的场合 (也叫缺陷数管理图)	$\bar{p}n \pm 3\sqrt{\bar{p}n(1-\bar{p})}$ $(\bar{p}n \pm 3\sqrt{\bar{p}n(1-\bar{p})})$	JISZ9021
单位不同时的缺陷数 (由此算出百分比)	纺织品单位面积中的疵点数, 漆包线一定长度上的汽包数, 收音机的焊点缺陷个数	单位不同时的缺陷数 (由此算出百分比)	正态分布	按照每单位大小的缺陷数 u , 管理工序质量的管理图, 在调查缺陷数 c 的样品大小 n 不相等的场合取 $u = c/n$, 用此 u 值进行管理 (也叫每单位缺陷数管理图)	$\bar{u} \pm 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}}$ $\left(= \bar{u} + 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}} \right)$	JISZ9021

以用数量大小去度量的质量特性值
象不合格件的数量、缺陷数那样可

表1.11 主要抽样检查方式一览表

计数量	类型	形式	抽样检查的名称和标准	保证质量	备注
计数抽样	标准型	一次	计数标准型一次抽检 JIS Z9002	p_0, p_1	不合格个数的情况
		逐次	计数标准型逐次抽检 JIS Z9009	p_0, p_1	
	分选型	一次	计数分选型一次抽检 JIS Z9006	AOQL, p_1	不合格个数的情况
		二次	多吉米克抽检表	AOQL LTPD	
计数抽样	调整型	一次、二次、多次	计数调整型抽检 MIL-STD-105	AQL p_0 (极限不合格率)	不合格个数的情况
		1次	计数调整型一次抽检 JIS Z9011		
	连续生产型		计数连续生产抽检 JIS Z9008	AOQL	不合格个数的情况
	标准型	一次	计量标准型一次抽检 JIS Z9003	p_0, p_1 或 m_0, m_1	标准偏差已知, 保证一批制 品平均不合格率的情况 标准偏差未知, 仅仅规定上 限或下限的情况 标准偏差已知, 保证一批制 品的不合格率的情况
一次		计量标准型一次抽检 JIS Z9004	p_0, p_1		
逐次		计量标准型逐次抽检 JIS Z9010	p_0, p_1		
调整型	一次	计量调整型抽检 MIL-STD-414	AQL		

注: 符号 p_0, p_1 表示一批中的不合格率。AOQL表示平均检查质量极限。LTPD表示一批中允许的不合格率。

e. 通过抽样检查鉴定制件的最后质量 完成冲压加工后的成批制件, 在向下道工序或使用者手中转移时, 通常是按照抽样检查来鉴定制件的质量, 所以必须确定合理的抽检方式。

表 1.11 是我国 (日本) 使用的主要抽样检查方式一览表。

检查规程通常是以所谓检查指导书的形式提供给检查员的, 但是对有关尺寸、外观等的检查标准、检查方法, 如果有其他必要时还应对抽样检查方式以及成批不合格件的处理原则作出规定。

1.3.3 成本管理

a. 成本构成要素

(i) 成本计算方式和成本要素 成本的计算方式可按照产品订货情况和生产方式分为个别计算和综合计算两大类。个别计算用于制件设计各不相同的订购件的生产中, 综合计算用于制件设计相同的商品的大量重复生产中。在冲压加工企业中, 由于所生产的制件设计相同, 所以采用综合计算。成本由下列要素构成: 决定制造成本的直接材料费用、直接加工费用、间接制造费用、销售部门的费用、一般管理费用和销售费等, 这些费用的总和叫做总成本。所谓成本计算, 就是要算出单位制件的价格, 但是, 每次生产都搞一回这项工作是非常繁杂的, 既费劳力又费时间。

为此, 就应先算出一件产品的预计价格或标准成本, 而每个月的计算就是算出每个车间或每一组的成本, 然后只要研究一下总成本和预计价格或标准价格间有什么出入就可以了。

(ii) 制造成本的内容

(1) 直接材料费 是指完成制件前所必须的制件材料费, 但须扣除以下各项材料费用: 下料工序的料头、首道工序的废料、以后各工序直到最终工序所产生的废料以及作为废品被卖掉的材料等费用。

(2) 直接工费 是指直接参加制造制件的操作工人的工资。

(3) 制造间接费 它是间接材料费、间接工费 (支付给监

督、技术人员、办事人员等的工资)、间接经费和管理部门赋税的总合。间接材料费包括补充工具器具消耗所需的备品费、模具费、零杂品消耗费、燃料费等;间接经费包括动力费、修理费、运输费、减价赔偿费、研究试制费及其他费用。

根据某冲压车间的阶段累计,直接材料费是66%、直接工费是10%、制造间接费是24%。其中,模具费占制造间接费的11%,占间接材料费的54%。直接材料费和模具费是需要管理上予以注意的问题。直接材料费的比例随着产品的种类、生产数量、工序的改进程度而有显著的不同,其变化范围在35~90%之间。越是推进合理化缩短工序,直接材料费的比例就越上升;反之,加工工艺性很不好时,直接材料费的比例也是高的。所以即使是数字相同,而评价的结果往往完全相反,千万不可误解。

b. 影响材料成本的因素

(i) 材料费 一般认为构成冲压制件制造成本的比率是:

i) 直接材料费75% (随制件种类、生产数量的不同,在35~90%之间变化); ii) 直接工费10%; iii) 经营费15%。总计为100%,可见材料费所占的比例占压倒优势。在这个问题上,就意味着考虑制件的形状、加工工序的多少、加工方法等因素去选择适当材料的重要性。

(ii) 材料排样和冲压废料的利用 冲压作业就其工艺特性来说大体会产生10~40%的料头和冲裁废料。设计零件时要考虑在一定材料上尽可能多排些零件,在工具设计中要考虑合理排列以及与其他零件组合排样等问题,另外还必须想到不得已而出现的废料的利用方法。

废料有两种利用方法: 1) 有效地作为其他零件的材料使用; 2) 有效地出售。在第一种情况下,要把利用废料所花的工时和不加利用而卖掉废料能得到的价值进行比较,哪个方案更为有利就选哪一个。

(iii) 冲裁圆形件时的排样 在带料上冲裁圆形制件时,如将单列排样改为多列排样,材料的利用率就会提高。

当取冲裁直径为 d ，送进搭边宽度为 w ，侧搭边宽度为 w' ，包括送进搭边宽度的直径为 D ，坯料宽度为 W' ，与直径 D 圆周外切的理论材料宽度为 W ，冲裁的列数为 N ，则：

$$W = D + (N - 1) \sqrt{D^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}$$

当 $D = d + w$ ，且 w 和 w' 无显著差别时，则可认为 $W \approx W'$ 。将此式画成曲线即如图 1.51。

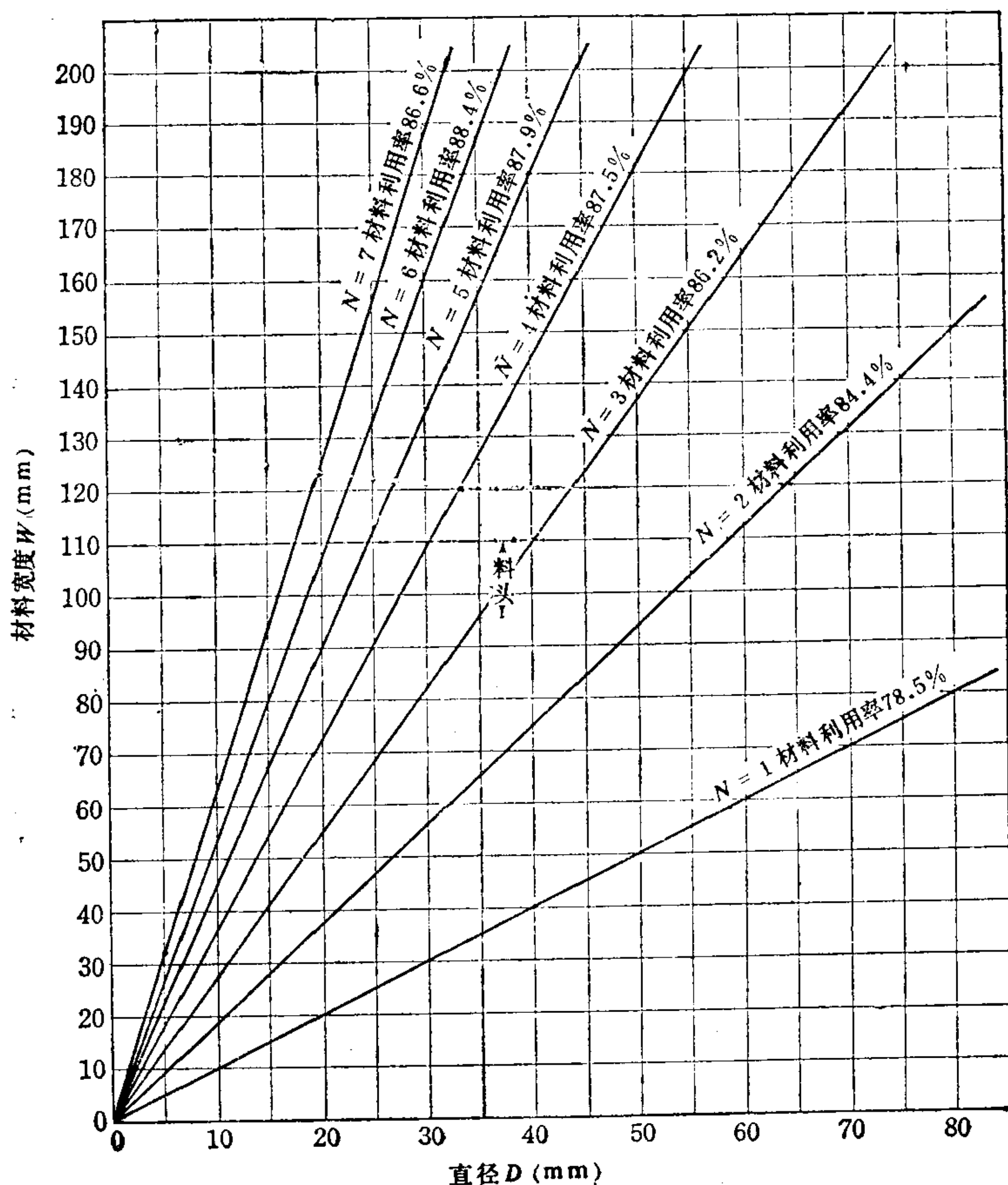


图1.51 从理论材料宽度可能获得的不同冲裁列数和料头大小的关系

例如：在宽度 110mm 的卷料上冲裁 $D = 35\text{mm}$ 的圆形制件时，排成 3 列就会出现 14.5mm 的卷料料头，其有效宽度即为 99.5mm。

(iv) 交错排样 当卷料宽度略小于图 1.51 所示尺寸时，要么减少一列排样，要么就须加大卷料长度方向的节距。将此时的宽度和节距关系用它们与 D 的比值来表示，如图 1.52 所示。

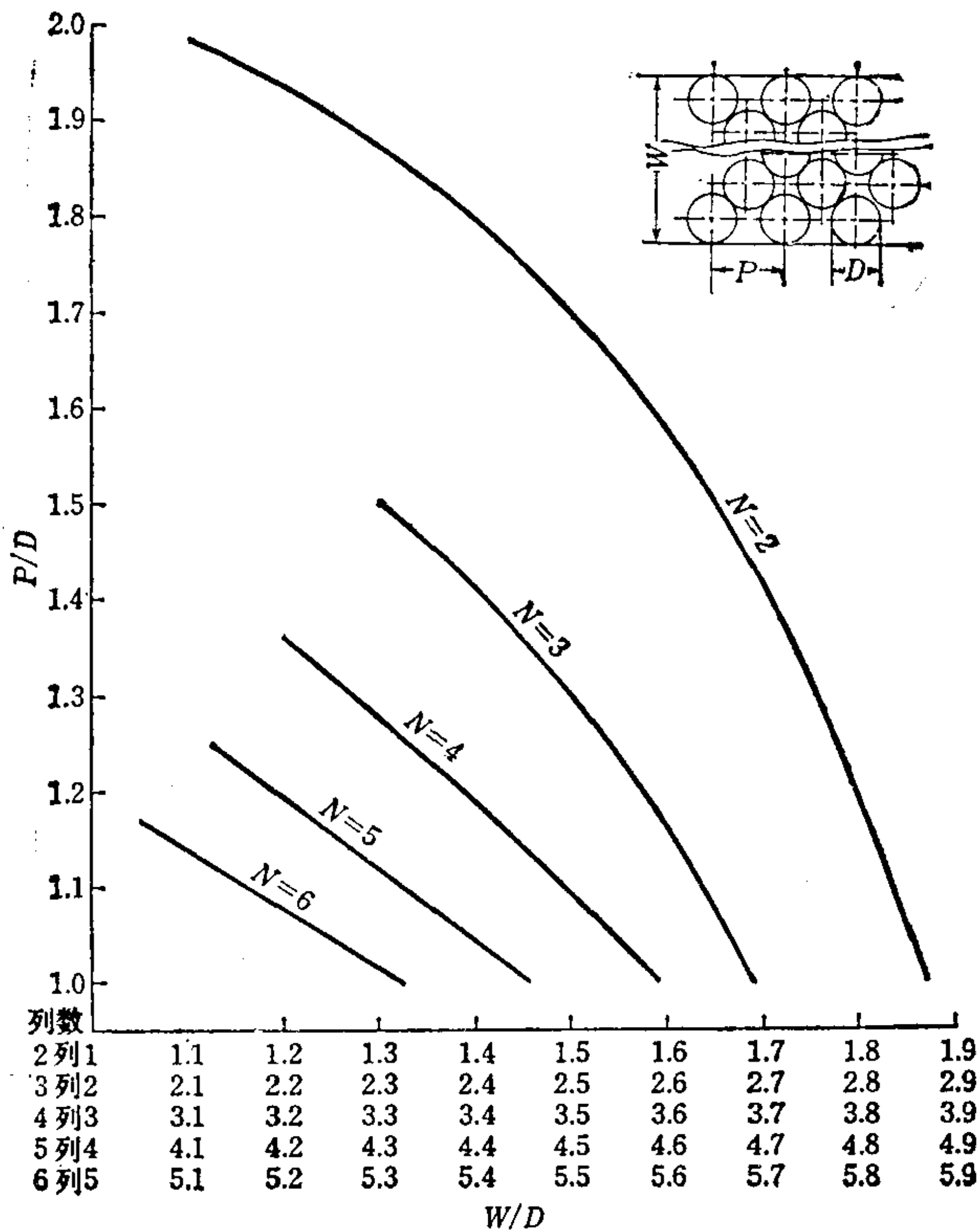


图1.52 交错排样时的冲裁节距

也就是：

$$P = 2 \sqrt{D^2 - \left\{ (W - D) / N - 1 \right\}^2}$$

由此式即得：

$$P/D = 2 \sqrt{1 - \{(W/D - 1)/N - 1\}^2}$$

(v) 材料重量的确定 图1.53所示为估算时求取所需材料重量的曲线关系。此图适用于冲裁圆形件的情况，是以下面的公式绘制而成的。

$$W = (\pi/4)d^2t\rho/\eta/1000$$

式中 W ——重量 (g);
 d ——圆形冲裁件直径 (mm);
 t ——板料厚度 (mm);
 ρ ——密度 (g/cm³);
 η ——材料的总利用率 (%)。

c. 影响模具成本的因素 在冲压加工件的成本中，模具费所占的比例因生产批量不同而变化很大。因此，制作与生产批量相适应的模具是降低产品成本的重要条件。

(i) 模具材料经济性的选择

$$\text{模具费} = \text{材料费} + \text{直接工费} + \text{经营费}$$

其中，材料费的比例只不过占模具费的15% (5~30%)。因此选择模具材料时，只要考虑加工性能、耐磨性、热变形性、使用寿命等因素即可确定。

表1.12 按耐磨性和韧性关系分类的JIS工具钢

基本用途	允许有淬火变形时	不允许淬火变形时	不允许热态下有软化现象时 (高速工具钢和热态加工用钢)
	(水淬)	(油淬)	
耐 磨 用	SK1, SKS1, SKS11, SKS8	SKD1, SKD11, SKD2	SKH3, SKH4A, 4B, SKH5, SKH8
切 削 用	SK2, SKS21	SKS2, SKS7	SKH2, SKH6, SKH9
一般模具用	SK3, SK4, SKS43	SKS3, SKS31, SKD12	SKD4, SKD5
耐 冲 击 用	SK5, SK6, SK7, SKS44, SKT1, SKT2, SKT3	SKS4, SKS41, SKS42, SKS50, SKT4	SKD6, SKD61, SKT5, SKT6

(ii) 连续模和简单模的比较 图1.54表示用连续模和简单模生产同一零件时，它们的总产量和模具工时费之间的差额关

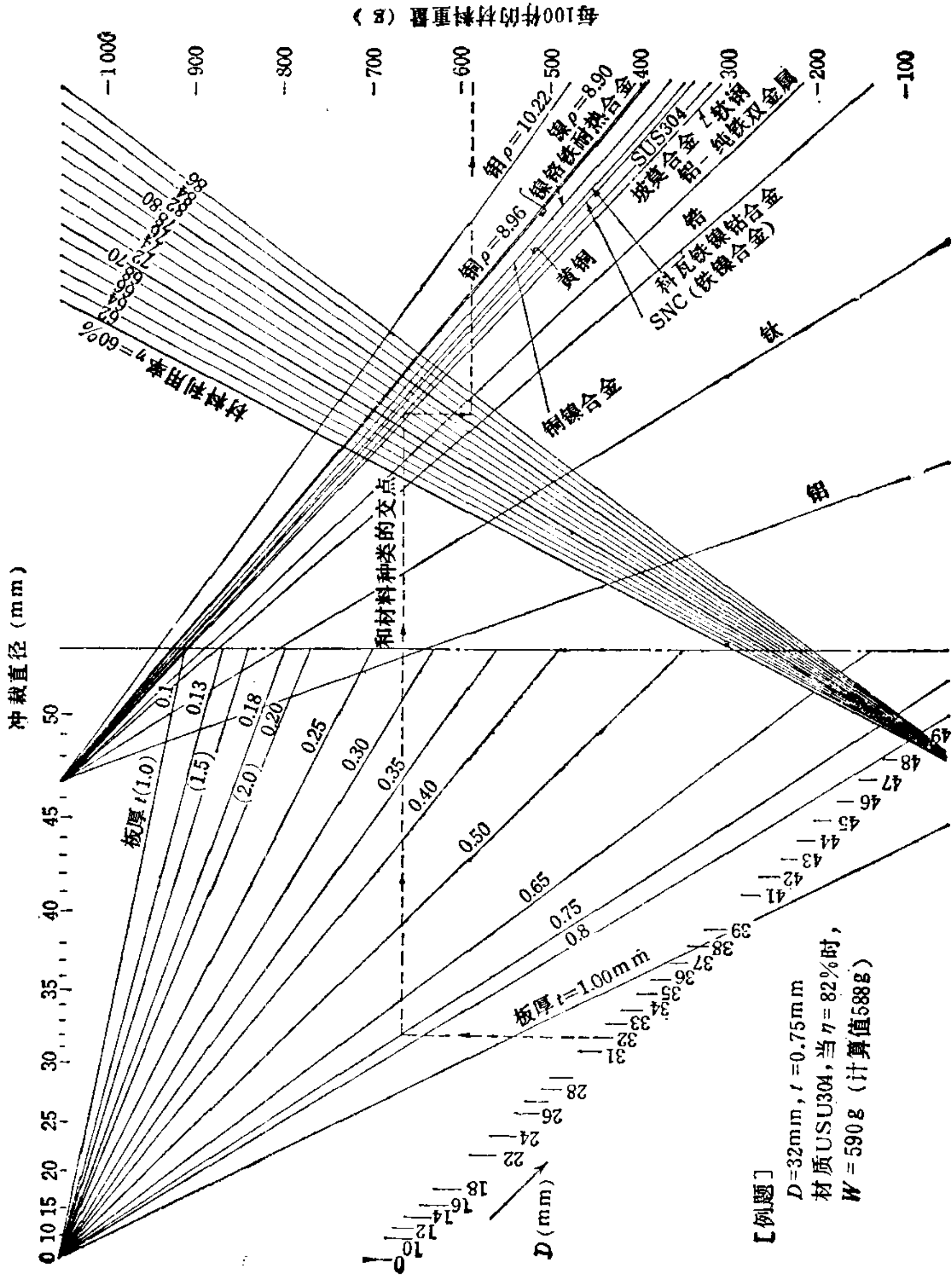


图1.53 材料重量计算图

系。假定它是冲压车间和工具厂费用率相等的某公司的实例综合，那么该图即表示产量分别位于斜线以下时以简单模为有利，如果产量超过此线则以连续模为好。

表1.13 取碳素工具钢的原材料单价为1时，各种工具钢的价格

钢 号	价格系数	钢 号	价格系数	钢 号	价格系数
SK1~7	1.0	SKS14	2.1	SKD4	6.7
SKS1	5.3	SKS42	2.1	SKD5	8.5
SKS11	5.3	SKS43	1.6	SKD6	3.2
SKS2	2.1	SKS44	1.6	SKD61	3.2
SKS21	2.1	SKS3	2.1	SKT1	2.0
SKS5	2.1	SKS31	2.1	SKT2	2.0
SKS51	2.1	SKD1	4.0	SKT3	2.0
SKS7	2.1	SKD11	4.1	SKT4	2.1
SKS8	1.6	SKD12	3.2	SKT5	2.1
SKS4	2.1	SKD2	4.4	SKT6	2.1

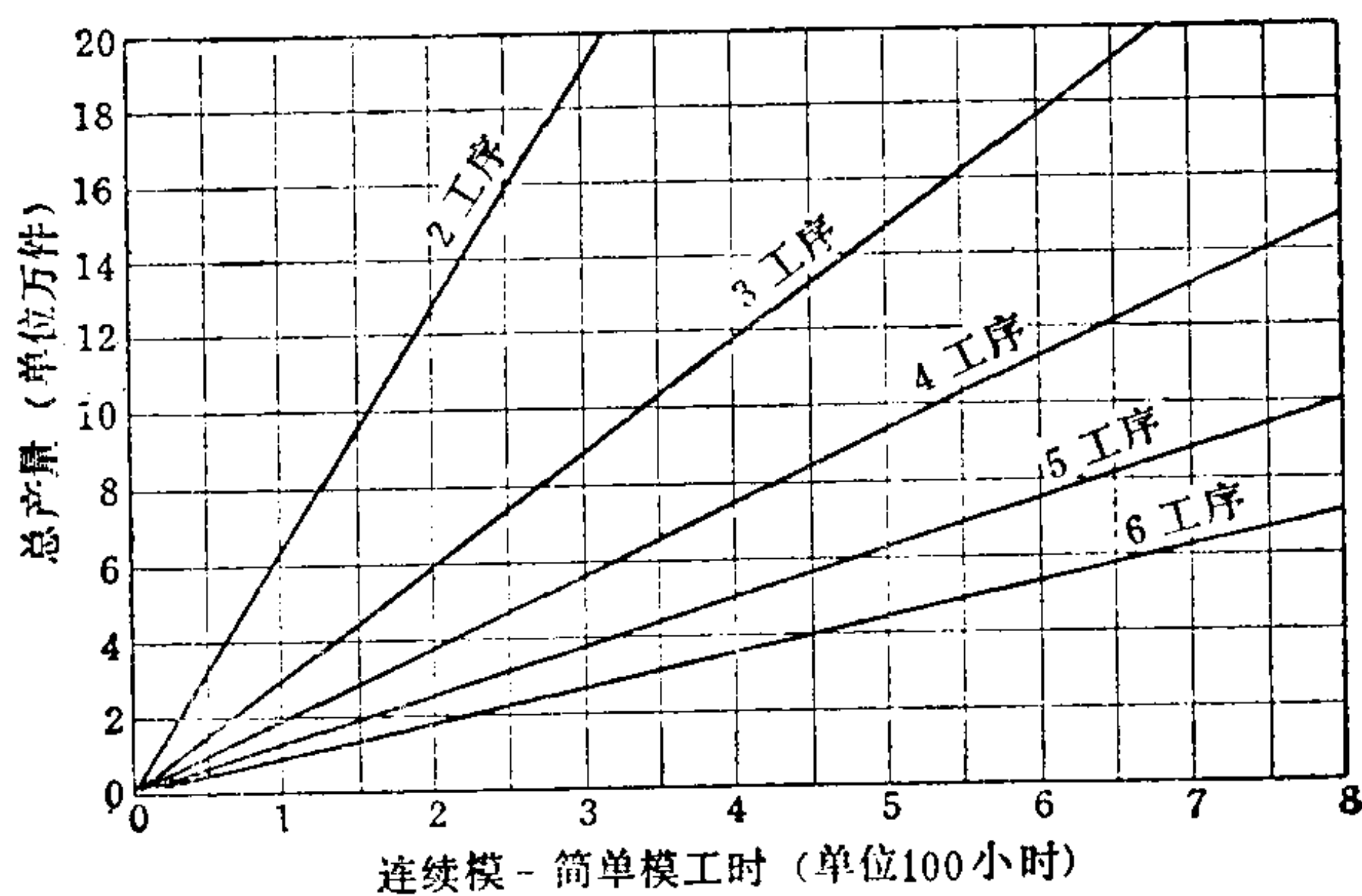


图1.54 总产量与连续模、简单模工时之间的差额关系

1.3.4 安全管理

压力机的动作极其简单而且极少变化，使用压力机的作业就是用危险程度很高的机械在长时间内连续重复那种简单动作的加工。因此在冲压加工的安全管理上，除完善安全用具、安全装置、

改进材料和半成品的送进方式及模具设计以外，还须对生产现场的整理和操作者的安全教育以及健康管理等方面予以特殊考虑。

a. 冲压作业的事故 近年来，发生冲压事故的次数有逐渐减少的趋势。一般认为这是由于安全卫生规则日臻完善、自动化装置不断发展的结果，但是在1972年的日本工业界，由机动压力机所造成的事故总计达7715件，有18人死亡，停工8天以上的事故有7697起。如果根据事故的统计情况来看，在按规模大小划分发生事故的状况中，不满50人的工厂要占半数以上。若以压力机的类型来分类，则以曲柄压力机所发生的事故占压倒多数，约占总数的80%。若以压力机的吨位大小来划分事故，那么大约70%的事故发生在50吨以下的小型压力机上。作为压力机事故特征的频率比整个工业界的平均值小，但强度高、死亡事件少、可是永久残废率和局部残废率高（表1.14~表1.18）。

根据某公司1965~1969年五年间的事故统计来看，就受伤部位而言，多数发生在手部：右手47.4%，左手37.0%；其次是面部和颈部，占6.9%；其他：右脚占3.8%，左脚占2.5%，头部占1.6%，前躯占0.5%，后躯占0.3%。由此可见，除了手部、面部、颈部外，脚部的防护也是必要的。

如果按发生事故的原因来划分，取送制件引起的占31.5%，发生在设备操作中的占25.6%，模具安装调整中的占20.4%，材料运输中的占13.9%，安全装置不完备的占4.0%，模具不好用的占2.0%，离合器故障引起的占1.4%，压力机起动踏板故障引起的占0.6%，其他占0.6%。这表明工件在进出模具和调整设备等场合下，由于疏忽大意和不细心而产生的事故是很多的。

依靠教育和训练操作者以促使他们精力集中，用这种方法消除事故是有限的，所以必须要有弥补上述不足之处安全装置和安全用具，以避免由于安全装置不完备而发生事故。希望安全措施能搞成双重的。

b. 生产现场的整顿 冲压作业是在操作动作变化少而简单且危险性很大的场合下进行的，生产现场环境的良好与否对发生

表1.14 全国机动压力机发生事故的次数

	1966年					
	工业界合计			制造业小计		
	死亡	停工8 天以上	计	死亡	停工8 天以上	计
合计	4600	278788	282788	736	101525	102261
机动压力机	4	7441	7445	3	7265	7268
	1967年					
合计	4457	272592	277049	704	101558	102262
机动压力机	8	7543	7551	5	7397	7402
	1968年					
合计	5722	355603	361325	1266	143482	144748
机动压力机	13	9034	9047	13	9883	8896
	1969年					
合计	5922	359936	359858	1348	143794	145142
机动压力机	15	9813	8828	14	9618	9632
	1970年					
合计	5791	340014	345805	1400	141486	142886
机动压力机	18	9176	9194	15	9017	9032

(根据工业安全年鉴)

事故的影响很大,因此必须注意整顿环境,以使操作者能心情愉快地劳动。

(i) 机械设备的布置 在冲压车间,由于原材料、坯料、半成品、废料等经常堆集在机械设备的周围致使生产环境杂乱不堪,所以为了安全生产和防止运输事故,机械设备之间必须保持足够的距离。

(ii) 噪声 在劳动安全卫生法中规定,企业有义务配备耳塞及其他保护用具,以供在产生强烈噪声环境中从事工作的操作者使用。给人的耳朵造成听觉失灵不能继续听到声音的音响密度

表1.15 1970年工人死伤事故发生率 (摘录)

	1969年		1970年								
	频率 合计	强度 合计	频 率						工 伤 停 工		强度 合计
			死伤 合计	死亡	残废	局部 残废	工 伤 停 工				
							停 8天以上	停 4~7天	停 1~3天		
全工业界	10.37	0.90	9.20	0.07	0.00	0.50	5.47	1.48	1.68	0.88	
制造业	6.32	0.64	0.07	0.04	0.00	0.50	3.42	0.93	1.18	0.66	
金属制品业 制造业	10.62	0.95	9.81	0.06	—	1.03	5.69	1.37	1.66	1.13	
金属冲裁涂 镀雕刻业	9.64	1.06	9.52	0.02	—	1.48	4.98	1.29	1.75	1.40	

注：1. 调查 100人以上单位的约8500起事故的结果。(1973年版工业安全年鉴)

$$2. \text{频率} = \frac{\text{由于工作事故致残致伤人数}}{\text{延续工作小时数}} \times 1000000$$

$$3. \text{强度} = \frac{\text{工作损失日数}}{\text{延续工作小时数}} \times 1000$$

表1.16 按企业规模划分的发生事故状况

人员	1~9人	10~29人	30~49人	50~99人	100~499人	500人以上	不详	合计
件数	128	207	83	130	153	35	7	743
%	17.2	27.9	11.2	17.5	20.6	4.7	0.9	100

(从1967年度统计中分析而得)

表1.17 按压力机吨位划分的发生事故状况

压力机吨位	<10 t 以下	10~20 t	20~50 t	50~100 t	>100 t	不详	合计
件数	160	141	225	91	62	64	743
%	21.5	19.0	30.4	12.2	8.3	8.6	100

(从1967年度统计中分析而得)

表1.18 按作业方法和工艺方法来划分的冲压加工事故示例〔4〕

工艺方法		落料	剪切	[4] 冲孔	切口	弯曲	拉延	敛缝	其他	合计
作业方法										
在模具安装或调整准备中,或是离合器误结合,或是模具掉下来,或是误踩了起动踏板		6	7	3	3	7	11	2	11	50
在送料取料中,误踩起动踏板,或手未拿出来		11	6	15	2	36	20	4	13	107
脚一直放在起动踏板上		1				2	5	1	1	10
二次踩下起动踏板		1	1	4		4	8		3	21
尚未移动材料的位置,就踩起动踏板		7	3	5	1	22	13	2	4	57
手还放在模具上就踩起动踏板				4		2	1		2	9
操作中误将手伸出或乱放		2		2		1	3		2	10
想去拿作业中的废料		2	4	1		2			1	10
想扶正操作中的材料以防损坏		3		1		8	4	1	2	19
想拿模具上的材料		1				1	4			6
身体失去稳定而冲了手或脚踩着起动踏板		1	1	1			5	1	1	10
材料掉在压力机起动踏板上		1	1			1				3
作业中手套挂着材料			1				1			2
其它人的误操作(几个人同时作业)			1	2		1	2			6
设备故障	离合器, 凸轮, 销子等	3	2	6	1	9	9	2	2	34
	制动器等			1					1	2
安全装置	使用中的安全装置被卡住	5	4	3		22	15	1		50
	安全装置的检修不充分, 有故障	1	2	3		9	9		2	26
	安全装置的误操作			1			3		1	5
	卸下, 去掉安全装置, 不再使用	18	7	22	4	34	25	6	24	140
其他		1		1			2		11	16
合计		64	40	76	11	161	140	20	81	

注: 此调查资料汇集了 354 个工作场所的情况, 同时有两个以上的原因时分别列进表中, 其他一栏是指操纵运输中的问题和与压力机滑块无直接关系的加工事故。

(1974年版全国冲压工业年鉴)

极限，通常认为是100方。而冲压车间就有产生100方左右噪声的危险。当噪声超过80方，不但要研究噪声源和采取消除措施，同时还须给操作者戴上耳塞以防听觉衰退，并且要对天花板、墙壁等加以处理，以减弱它们的反射音响。

图1.55是某工厂的多工位自动压力机厂房在使用吸音材料前后的噪声对比情况，由此可知通过使用吸音材料，音响反射没有了，不是来自加工的噪声也有相当程度的下降。

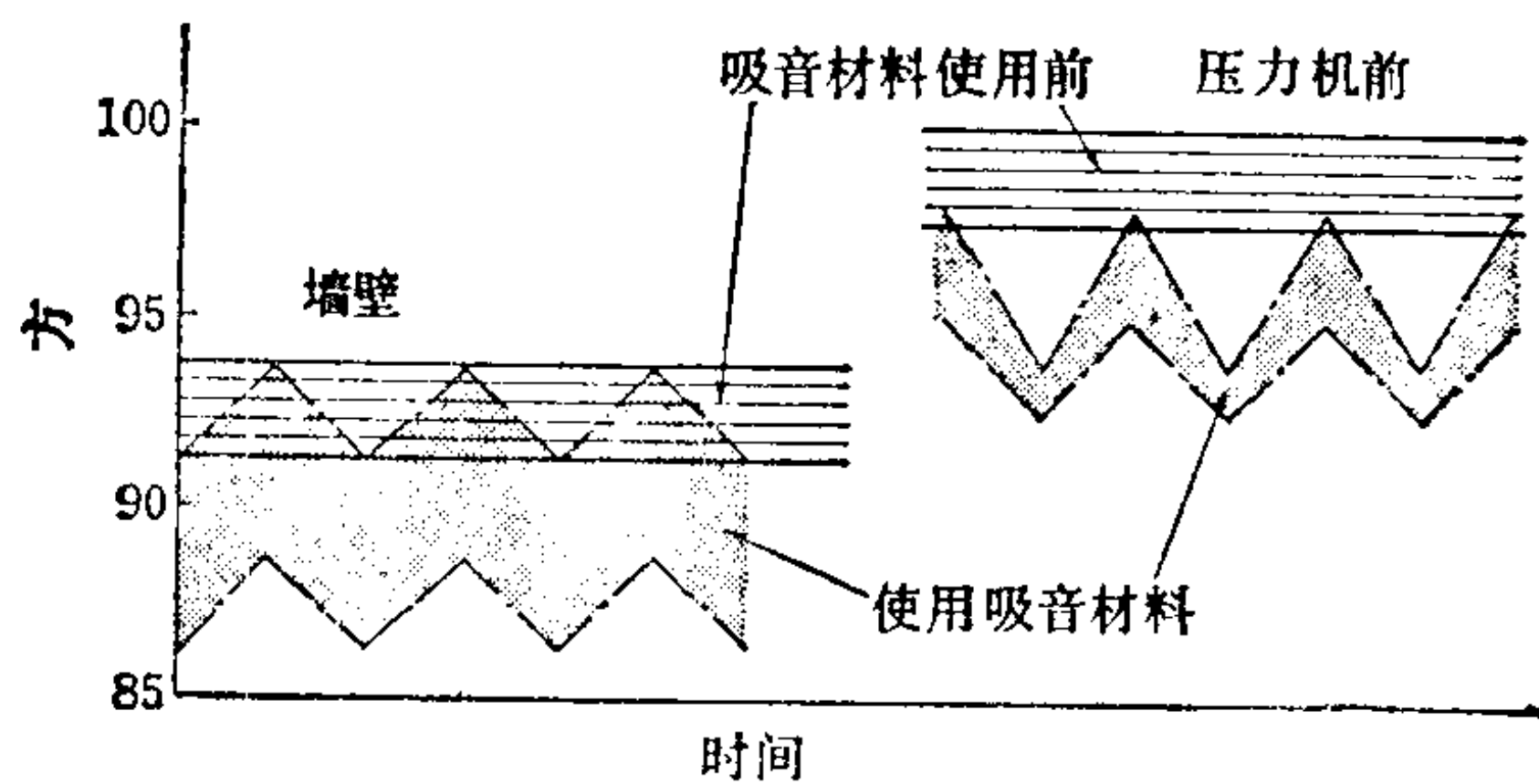


图1.55 吸音材料的效果

(iii) 通风 关于在室内进行正常操作的空气容积和通风，安全卫生规则第600条，第601条规定：1) 除了设备占有的容积和离地面4米以上的空间外，每个工人还应有10立方米以上的空气容积；2) 设置可作自然通风的窗户，窗户面积应大于正常情况下机床所占面积的二十分之一。但是，当设有性能良好的通风设备时，则不受此限制；3) 当气温在 10°C 以下通风时，工人不能处于每秒1米以上的气流之中。鉴于冲压车间常常堆放着半成品及仓库等的妨碍，通风条件往往是很恶劣的，因而必须注意下列各点：1) 充分设置窗户；2) 安排仓库和物件存放场地等的位置，以不使作业场地通风条件变坏为原则；3) 屋顶上开设通风孔；4) 大设备尽可能不布置在窗户旁边。

(iv) 照明及颜色调配 适当的照明和颜色调配有助于减轻操作者的疲劳并增进清爽感、有条不紊感，促使动作灵活轻快，因而具有防止发生事故、提高生产效率的作用。

颜色调配如果处理得不够完美，是不会收到多大效果的。此外，在颜色的调配上，必须注意使用安定色，以不使操作者有疲劳的感觉，表1.19所示为安全颜色的例子。

良好的照明和安全卫生相结合还会收到以下效果（表1.20）：
1）提高质量； 2）提高效率； 3）提高合格率； 4）检查准确；
5）能有效地使用地面； 6）便于监督管理； 7）便于改进工艺；
8）能提高操作者的工作积极性。

一般情况下的整体照明是：屋顶在7米以上时，使用高瓦数的白炽灯泡、荧光水银灯、金属卤化物灯；屋顶达到5米，则使用具有反光灯罩的荧光灯；对于特殊作业要求高照度的场合，只要把使用反射聚光灯、柱形灯，低瓦数的荧光灯的局部照明加以并用就可以。对于照明，除了要求照度（即照明亮度）外，还应当注意以下几点：1）在操作位置上尽可能使灯光均匀地照亮视野范围（设法使灯的安装位置不晃眼，在作业对象上不产生浓黑的影子）；2）按照作业内容，选取光源要注意到灯的颜色；3）按照作业现场的状况，分别使用耐酸、耐碱、防潮和防尘等器具。

c. 安全装置和安全器具 冲压加工的事故可分为两类：1）因指头或手被模具夹住而引起的；2）由工具以外的机械部分所造成的。其中，大部分重大事故是由于第一类原因所致，因此防止这类事故则是安全管理的第一步。

(i) 安全器具 安全器具有镊子、夹钳、电磁工具、手持真空吸盘等，但是，必须根据制件的大小、形状、操作方法等选用最合适的安全器具（图1.56）。

(ii) 安全装置 安全装置大致有如下几种形式（图1.57）。

(1) 光电式 通常以受光器接收从模具靠人手一侧横穿通过的光束。只有当手或者身驱未遮住光束时踩下起动踏板，离合器才能结合。由于要在操作者的前面完全无障碍物时才能顺利操作，所以这种方式原则上只能用于滑块可作急停的压力机上。

(2) 电磁按钮式 当按下装在机身正面的1~2个按钮，电磁回路才进行工作而使离合器结合。在双手按钮装置设置恰当

表1.19 安全颜色

颜色	表示内容	使用范围	使用事例	备注
红	防火 停止	表示防火, 停止的物件或场所	防火标志、灭火器、灭火栓、报警器、禁止通行标志、紧急停止按钮	1. 用白色相衬, 使红色显眼 2. 应把灭火器、报警器的放置场地或悬挂柱子涂上红色
橙	危险	出现触电、割断、焚烧等会立刻引起具有危险性的物品或场所	危险标志、裸线开关、开关柜的盖子里面、机械设备的安全罩里面、露出的齿轮侧面、剪切机的尖刃部分	用黑色相衬, 使橙色显眼
黄	注意	担心会发生碰撞、脱钩、绊倒、掉下等危险的物品或场所, 以及必须引起注意的其他场所	注意标志, 低的横梁、起重机、吊钩、有碰撞危险的柱子、坑槽的边缘、地板上的凸出物、阶梯的踏步步高、内部的交通标志	1. 用黑色相衬, 使黄色显眼 2. 为增加特别注意的程度与黑色相间配合组成条纹状图案
绿	安全 急救	无危险, 以及与防止危险或急救有关的物品或场所	退避场所和方向的标志、太平门标志、安全卫生标志、急救箱、保护器具箱、担架等的位置	用白色相衬, 使绿色显眼
蓝	留心 禁止	不能随便操作的物品或不能随意进入的场所	留心标志、表示修理中或运转暂停时的场所标志、开关箱的外部、禁止标志(用于超越道路之外, 禁止的地方)	用白色相衬, 使蓝色显眼
白	通路 整顿	表示道路、指示方向以及必须整顿和清洁的物品或场所	道路区划线和方向线标志、整顿标志、废品存放器具、作为辅助方向标志的箭头, 防火安全, 小心标志的文字	机动车通路的区划线用黄线
黑		方向标志	其他方向标志的箭头, 注意标志的条纹图案和标志牌的文字(用白色文字写的标志除外)	为了显眼用橙、黄、白色作为辅助色彩

表1.20 照度标准

照度勒克斯 lx	工厂中通用部分	机械器械工业					汽车工业	
		焊接作业		机械加工	油漆作业	装配作业		电气作业
		板金作业	特别精密的作业	特别精密的加工	—	特别精密的作业		—
3000~1500	○检查 a ○设计 ○控制室等的计量仪器盘, 控制盘	○特别精密的作业	○特别精密	—	○特别精密	—		
1500~700	○检查 b 设计室 制图室	○作业 a	○划线 ○加工 a	○油漆 a ○调色	○作业 a	○绕线 a ○嵌线		
700~300	○检查 c ○试验 a ○试验 b ○试验 c ○选择 a ○选择 b ○选择 c	作业 b	加工 b	油漆 b	作业 b	配线 a 绕线 b		
300~150	包装 a 包装 b 包装 c	—	加工 c (粗加工等)	油漆前处理 (去锈、抛光、衬底)	作业 c	绝缘处理 配线 b		
150~70	特殊阶梯、室外动力设施	—	—	干燥 烘烤	—	—		
70~30	室外 (原材料堆放场地、通道等)	—	—	—	—	—		
30~15	—	—	—	—	—	—		

注: 1.表中 a 表示细小的物件, 颜色暗淡的物件, 相对不显眼的物件, 易碎, 易出毛病的物件, 特别昂贵的物件, 特别鲜明的物件, 颜色鲜明的物件, 相对显眼的物件, 坚固精度高的, 作业时间长的等等情况。b 表示介于 a 和 c 之间情况。c 表示粗大的物件, 颜色鲜明的物件, 颜色鲜明的物件, 相对显眼的物件, 坚固结实的物件, 不是那么太贵的物件等等。

2.符号○表示可以并用局部照明, 但周围的照明应大于总照明的10%。

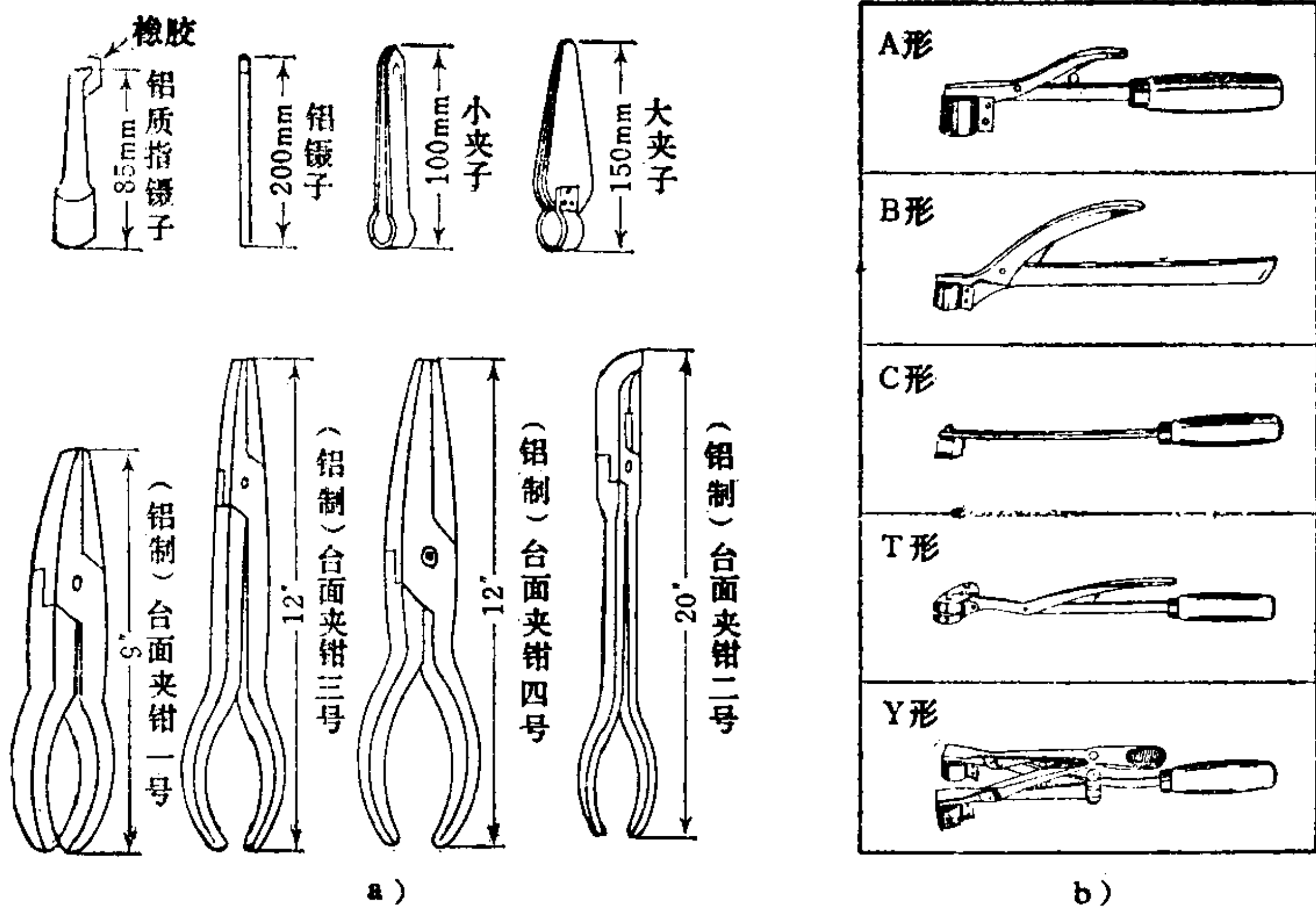


图1.56 冲压加工中使用的各种安全器具〔5〕

的情况下，能确保操作者的两手在压力机滑块下行时离开危险区。

(3) 控制杆式 它用控制杆限止离合器拉杆的运动，即使误踩了起动踏板也不会动作。作业时先扳开控制杆再踩起动踏板。在二次以上的操作中，对于较大的工件是方便的。

(4) 固定栅栏式 将栅栏固定在模具或压力机上，以使手在操作中不能进到模具之间。必须易于观察其中情景，必须在更换调整模具时易于拆装。

(5) 闸门式 压力机停止时，栅栏、防护杆等处于开启状态，但当它们先于滑块下降到规定位置后，压力机才开始动作。当栅栏或防护杆碰到手及手指等障碍物时，离合器即脱离结合同时制动器刹住滑块运动。闸门式安全装置用于中小型压力机的冲裁、弯曲、成形等作业。

(6) 推拨式（推出式） 与滑块、曲轴联动的安全杆在滑块向下运动的同时，横扫作业区间的前面而将手或指头强制推开。它适用于低速压力机。结构简单，安装容易。但是，由于安

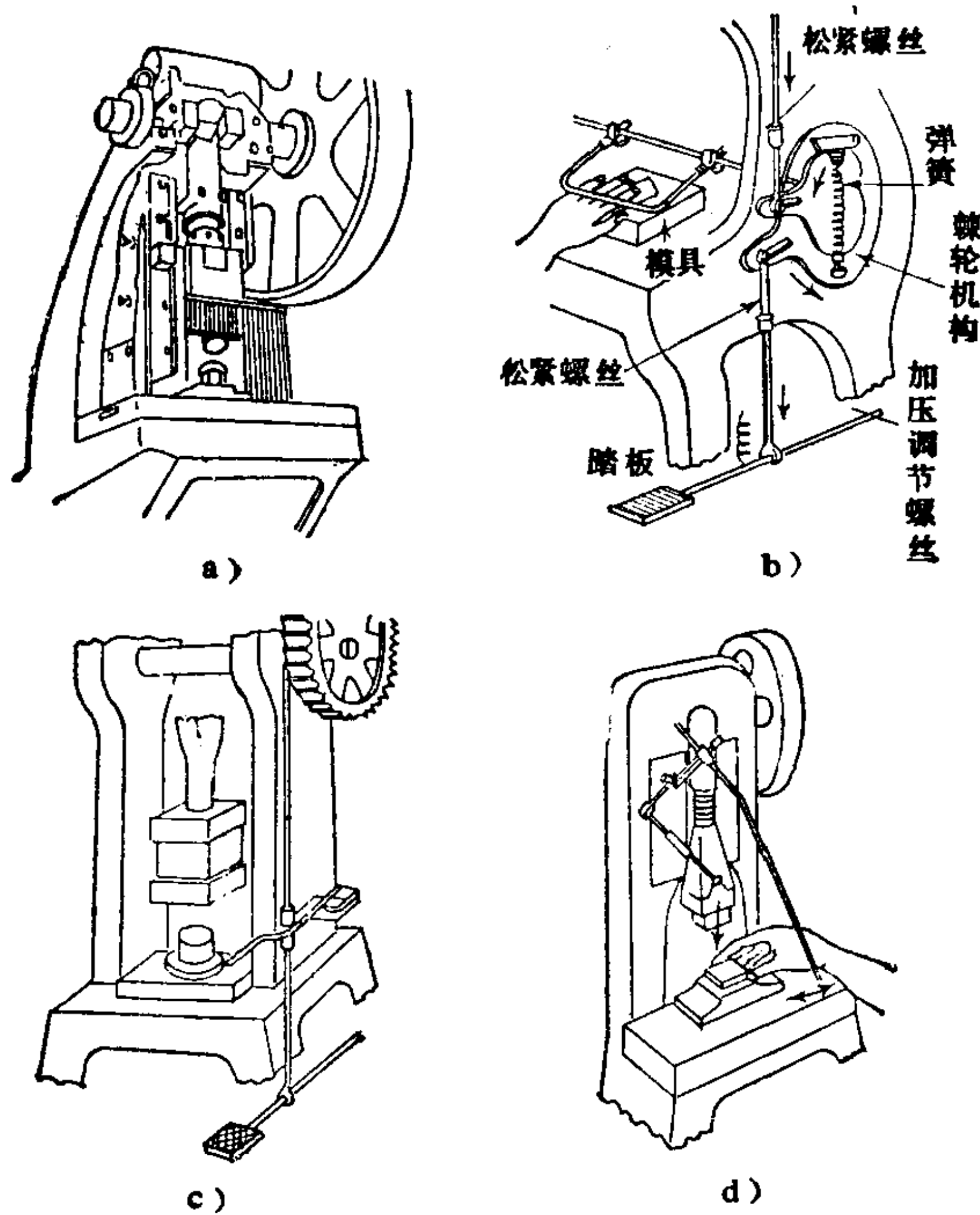


图1.57 安全装置〔5〕

全杆是在操作者的眼前横扫，因而会给人的精神和心理造成不舒服的感觉。

(7) 拉引式（拉曳式） 把与滑块连接的软绳的一端拴在操作者的手上，随着滑块向下运动，手就从模具上被拉出来。这种结构安装容易，适合于两次操作，但是必须经常很好地保养和调整。

(iii) 自动送进装置 冲压加工的大部分事故是在送料或取料中在作业点发生的，因而采用作业中勿须把手伸进危险区的自动送料装置或采用自动压力机，都可说是最理想的安全装置。过去考虑自动化都着眼于提高生产效率，不过从安全角度上看，更应该推进自动化。

(iv) 模具的安全化 模具是冲压加工的关键，模具的良好

与否对生产效率和安全性都有极大的影响。在模具的设计制造中必须充分注意下列各点：1) 避免滑块下移时需用手去压加工件的结构；2) 模具上应能使用安全装置；3) 尽力使模具不致大于必要的限度；4) 尽可能作成连续模，无两次操作；5) 务必对已加工成的模具的安全性和生产效率如何进行研究。

d. 安全教育训练 寻求即使操作者发出错误动作而不致引起事故的措施，或者寻求不产生误动作和不安全行为的方法无疑都是理想的。但与此同时必须使操作者本身充分认识安全生产的重要性。为了预防事故，要对每个操作者进行安全教育，实施训练，使他们熟悉安全知识，并通过全体人员的共同努力来实现。

(i) 安全教育 在进行安全教育时，至关重要的是不要让操作者无益地陷入恐惧之中而忘了安全教育的出发点。特别是对于新操作者，应多把各种规则、工作程序、手续等教给他们。但必须确立一个方针，也就是安全教育的步骤要合理而且要易于掌握。

安全教育的要点是：1) 要告诉大家应持深切关心的态度来对待防止事故；2) 要很好地说明事故是完全可以防止的，并且要树立起防止事故的信念；3) 说明安全器具、安全装置的性能状况给操作者以安全感；4) 工作要待了解之后方可着手操作，认为是不妥当的操作决不要去干，并且还要指出当发现了不妥当的操作后应该报告；5) 对工作服要有正确的认识，要维护它。还要使操作者明白工作服对自身的健康是如何的重要。

除上述的基本教育之外，现场教育也是重要的。它不只是对新操作者特别重要，就是对有经验的人也有必要反复训练，引起他们不断注意。现场教育的要点是：1) 材料及其使用方法；2) 有关设备的结构和操作方法；3) 有关作业的准备和最后处理；4) 标准操作法；5) 安全器具和安全装置的结构、操作及检查方法；6) 模具的使用方法的等。

(ii) 冲压加工的安全知识 1) 衣着要正确，鞋履要能适应重物落下（穿安全靴）；2) 按正确程序沉着操作；3) 在车间

内通过不要在设备间穿行；4) 把整理、整顿工作时常记在心里。5) 注意健康，状况不佳时要接受诊断；6) 操作之前必须检查设备；7) 正确使用安全装置；8) 两人以上的操作要确定负责人，要切实执行配合信号；9) 设备运转时，不许把手伸向模具之间；10) 离开工作岗位时必须停车；11) 不动与己无关的设备。

(iii) 安全卫生特殊教育 对从事调整机动压力机用的模具等业务的人员，应进行理论和实际技能的教育，其内容有关于安全装置、冲压作业、模具或剪切机刃口的检查、调整安装等方面的知识和规定。进行这些教育是企业者应尽的义务〔6〕。此外，在有关规定中还标明了冲压车间所要求的一些规则，如主要操作人选的确定、设备等的限制、安全规程等，因此必须对这些进行充分的研究〔7〕。

1.3.5 模具管理

a. 模具的安装调整 模具的安装调整在生产现场进行得最为频繁，而且模具的安装调整良好与否对模具寿命和零件精度有很大影响，所以必须使安装程序严格标准化。下面的示例，就是在小型压力机上安装调整导柱模的标准操作程序。

(1) 模具的安装调整要由组长、班长或班长指定的人员进行。

(2) 整理工作台，准备工具、材料、图纸、模具。带导柱的那一扇模子必须用作下模。

(3) 切断开关。

(4) 用注油器注油。

(5) 合上开关让压力机空转，观察设备的运行状况，观察离合器、制动器、弹簧以及安全装置的状况。如有异常要进行修理。

(6) 把滑块的下表面和工作台垫板、模板的上下表面吹干净。

(7) 取出模柄压盖。在不能卸下的情况下则插入模柄。

(8) 卸下弹簧，取出顶件杆。

(9) 拿起模具，放到模柄孔的跟前，有导柱的那扇模子必须用作下模。

(10) 将滑块调到下死点，上下调节连杆螺丝使上模柄与模柄孔合在一起。

(11) 装上模柄压盖，使其无间隙地轻轻固紧模柄。

(12) 模具定位后拧动螺丝，并在滑块升起之后再牢牢地紧固好上模。

(13) 边转动连接螺丝边检查上下模的配合情况。

(14) 把螺栓放进 T 形槽，用压板紧固下模。

科		凹模硬度	
工厂		各种模具履历卡片	
人员		4080 8×6英寸 39-1 3000	
凸模硬度			

指 示 图	修 理 内 容	交 付 修 理 日 期	承 担 者		接 受		实 际 生 产 效 果	重 磨 次 数				凸 模 硬 度	凸 模 更 换 次 数	备 注
			使 用 者	制 造 修 理 者	完 成 、 接 收 日 期	检 查 鉴 定		H		M				
								上	下	上	下			

产 品 型 号	零 件 号	零 件 名 称	工 序 名 称	模 具 号	新 规 定 及 重 新 发 行 年 月 日	卡 片 号
产 品 名 称						

图1.58 模具履历卡片

- (15) 从工作台下面装上弹簧。
- (16) 再次检查上下模的配合状况。安装调整顶件杆。
- (17) 检查手动加工的制件。
- (18) 检查机动加工的制件。
- (19) 安装调整自动送料装置、制件退出装置。
- (20) 安装安全装置。

b. 模具的保管 新完工的模具应对照检验卡核实；用完而返回仓库的模具要弄清其磨损情况，如有必要应予修理；必须使模具经常处于可供使用的状态。其具体事项为：

- 1) 把模具编号、零件名称、零件代号要明确地标记在模具上；
- 2) 建立模具台帐，记录模具编号、零件名称、制造年月日、订货传票编号。还要记上制造人员和设计人员姓名，以供修理模具时参考；
- 3) 存放模具的场地，要考虑到模具的利用系数和外形尺寸的大小，尽可能靠近冲压生产的现场；
- 4) 模具的领走送回，原则上应由压力机调整工承担，以便通过模具履历卡掌握模具的情况。模具履历卡能在补充模具、提供设计资料、制定冲压件生产计划等方面发挥作用（图1.58）。

1.3.6 设备计划和设备管理

由于冲压件的最终制品所占体积较大，所以在制定新计划时，必须注意考虑总体系统。此外，预先考虑今后的发展计划也是至关重要的。

a. 冲压车间和工具车间的关系 两者的关系愈密切愈好，最好设置在同一个建筑物内。但当不得已而分开的时候，也要在运输方法上作特别的考虑。

当冲压车间靠近工具车间时，由此而引起的问题就是振动带来的影响，所以必须采用防振基础以适应精度要求。

对振动敏感的设备是：1) 万能测长仪，光学比较仪等精密测量仪器；2) 坐标镗床、坐标磨床；3) 部分磨床；4) 镜面加工车床等。作为产生振动的设备有压力机，特别是大型压力机、龙门剪切机、锤类等设备，除此之外，还有牛头刨床、强力龙门

铣床等设备的额外影响, 所以对于这类设备双方都必须有防振基础。振动的传播是通过凝土地坪, 建筑物的构架和地壳进行的。因此隔断其通路或加入防振材料都可防止振动传播。除了注意这些方面之外, 还应使对振动敏感的设备与振源之间保持 5 ~ 15 m 的距离。

b. 工具车间的标准设备 工具车间的机床设备正随着工业的发展在急速变化, 但是作为目前见到的标准设备, 可列举出如下:

(1) 材料切断用 带锯机、高速剪切机、轮廓带锯机 (数控车床)。

(2) 切削用 车床、万能铣床、立式铣床、牛头刨床、数控立式铣床、立式钻床、坐标镗床。

(3) 磨削用 平面磨床、万能磨床、万能工具磨床、内圆磨床、车刀磨床、坐标磨床、仿形磨床、工具磨床、数控仿形磨床。

(4) 其它 电火花加工机床、数控线切割机床、淬火炉、盐浴炉、退火炉、电解加工机床、电解成形磨床、放电电解磨床。

(5) 修整加工用 台式钻床、镗床、砂轮机、移动式电动 (风动) 工具。

(6) 测量设备 工具显微镜、万能投影仪、块规、成套的内径测定仪、成套的外径测定仪、显微硬度计、洛氏硬度计、电动测微器、万能测长仪。

实用数控设备的机型正迎着数控时代在急剧增加。

与冲压车间相应的工具车间的规模很难描述, 也无定论。这是因为每个冲压车间的生产状况都有着明显的差别。如果把相当数量的车间平均起来看, 那末在实现自动化、高效率化时, 大体上每一个冲压工人就需要 0.6 个以上的工具工人相配合, 否则就不可能得到有效的服务。此外, 作为工具车间的通例是规模越大, 特殊机床的利用率就越高, 这样就有利于减少扩增面积和增加设备的比例。

c. 冲压车间的布置 机械设备的布置有以下几种, 并且可以混合使用。

(1) 按机械设备性能布置 把类似的设备或类似的工作分别集中在一起。

(2) 按流水作业方式布置 按某一品种的加工过程配置机械设备。

(3) 全部工序的通用自动化或专用机化。

(4) 通过机械设备的任意移动来变更其组合而构成生产线。

(5) 将作业分类, 按工序把机械设备分组排列。此外, 还可区分为中间无储存的连续流水作业方式和中间有储存的断续作业, 即在加工完某一批制件后暂作储存, 待更换设备使别的零件或工序流过。由于中间储存占用场地, 还会发生零件变形或损伤, 所以如有可能的话, 最好是废除中间存放。但是象如下情况, 不得取消最小限度的存放地, 其大小可按不同的情况计算。

1) 当第一工序的加工速度快, 第二工序的加工速度慢, 采用同步作业导致生产效率降低时; 2) 当冲压作业和装配作业之间不可能在流水线上平衡时; 3) 当在一条生产线上或一台设备上, 不能达到连续作业所要求的产量时; 4) 当模具损坏而该作业又需继续进行时; 5) 流水线上的服务状态不协调时; 6) 热处理、清洗等中间工序要求成批生产时; 7) 不希望零敲碎打地更换产品时等。

现在正在系统地归纳上述问题, 并对确定车间布置的程序进行种种研究, 这里引用的“系统布置计划”〔8〕法就是一个例子。

(i) 系统布置设计的程序见图1.59。

(ii) $P-Q$ 分析 即以曲线图将制件种类和产量的关系模式化(图1.60)。

图1.60 c) 中的M部分, 适合于流水作业方式乃至按产品类别划分, J部分适合于按工序划分的批量生产, 它要求操作具有共同性, 设备为万能标准型。属于两者之间的是流水作业方式的

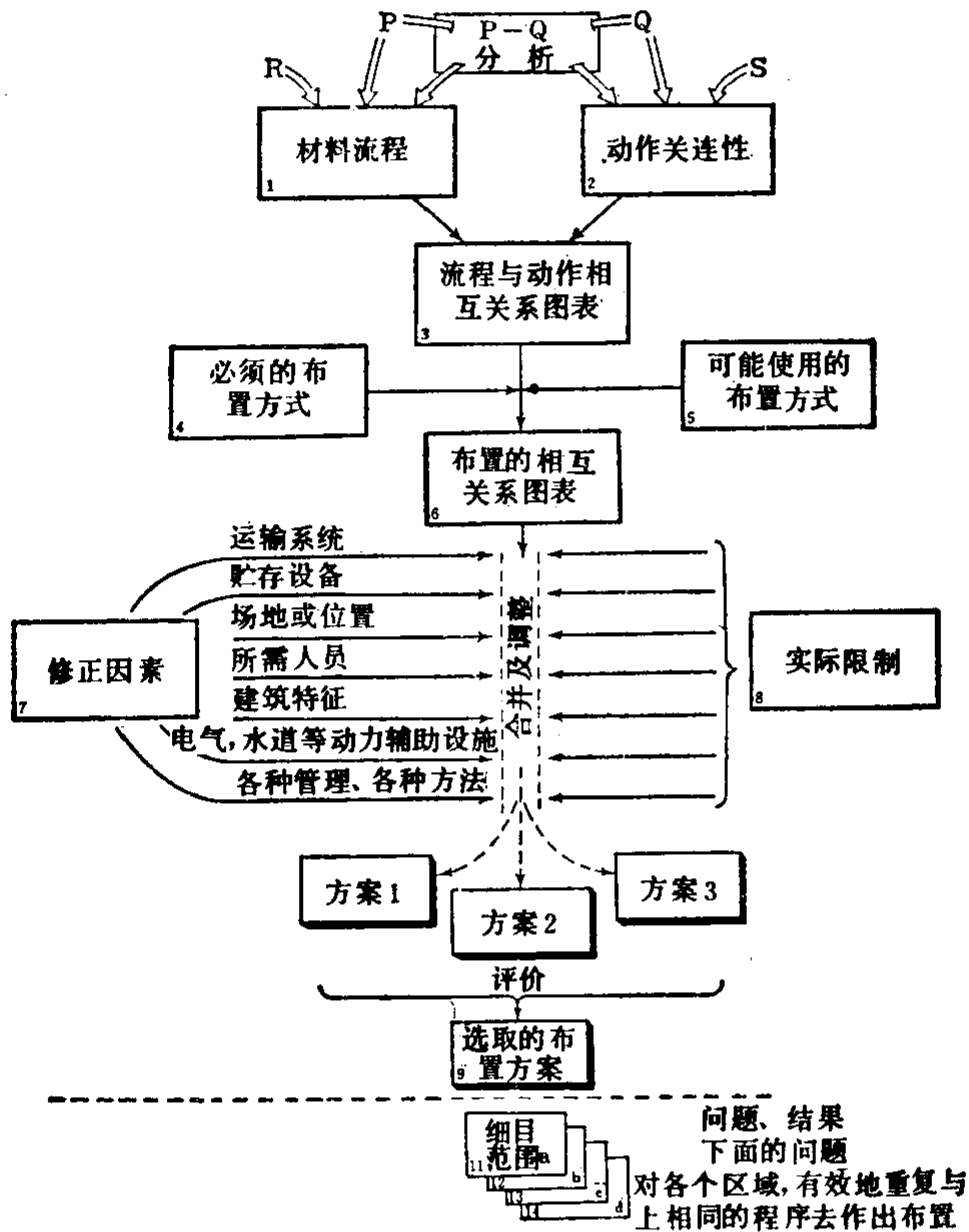


图1.59 系统布置设计的程序和模式

变型，即部分工序同时加工和把成组生产等加以组合的布置方式。图1.60 b) 的情况，是一切品种都采用共同的操作方式和单一的布置。

(iii) 物料流程分析 在工序图表(图1.61)或品种非常多的情况下使用起止流程图表(图1.62)。后者如果是按作业顺序排列，则从左上角至右下角的对角线上的数字表示向着完成方向运动；而对角线下面的数字表示反方向的回流。

(iv) 作业相关性线图(图1.63, 图1.64) 作业相关性线图是记载必须联系的理由及其评定值(图1.64)。而这些内容也可用

图1.65所示的封闭图表来表示。

理由栏中的编号是表示与之相应的情况。而无须考虑全部理由。下表即其一例。

号码	理由	号码	理由
1	使用相同装置或动力	9	噪声、振动、粉尘等
2	公用同一人员	10	人员的干扰
3	使用共同的记录	11	联系的密切性
4	公用同一场地（相互间有必要）	12	材料的动向
5	直接接触的场合	13	安全因素
6	用文件接触的情形	14	监督管理因素
7	作业流程顺序	15	同类建筑维护
8	进行类似（或相同）的作业	⋮	⋮

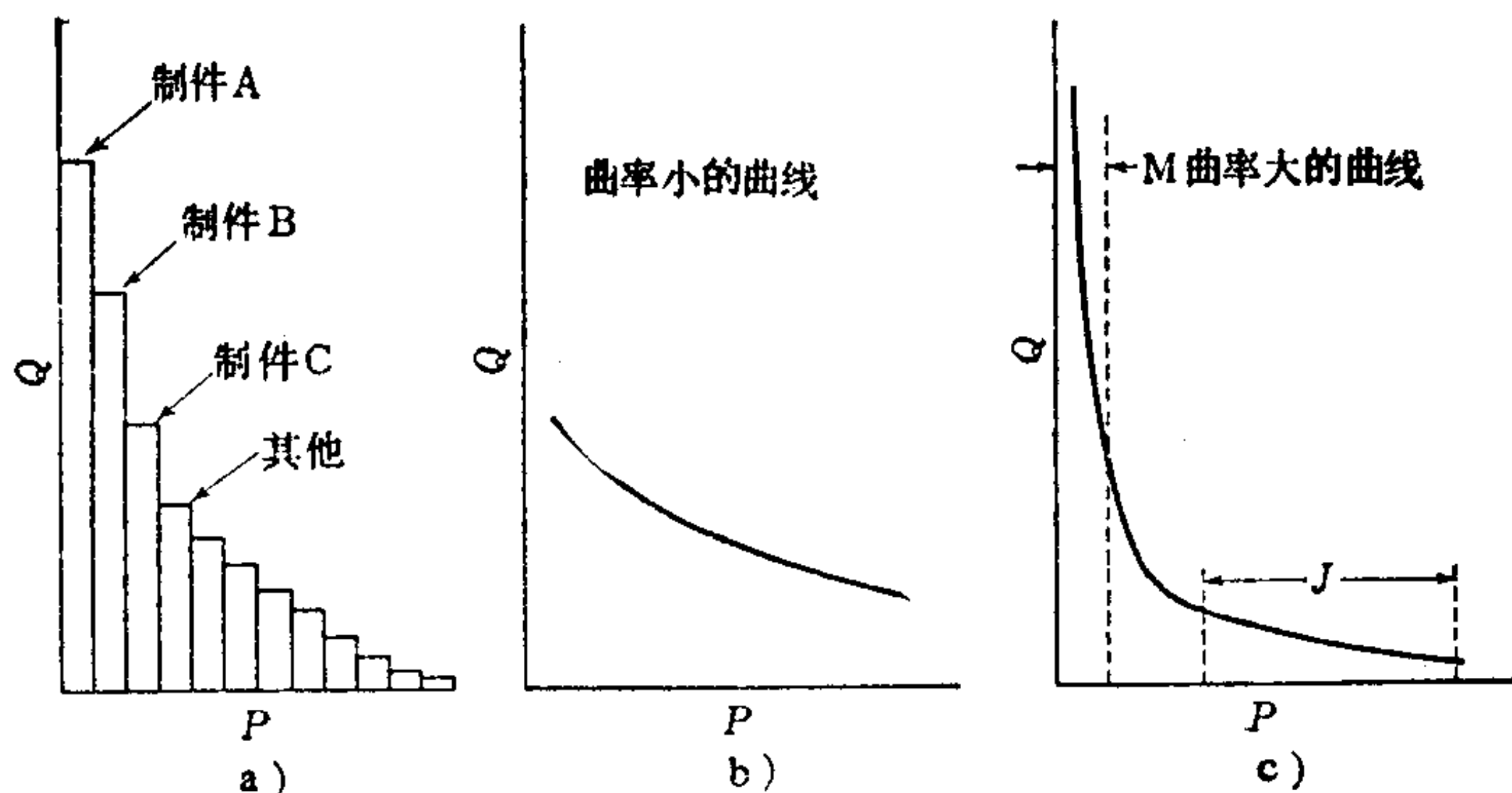
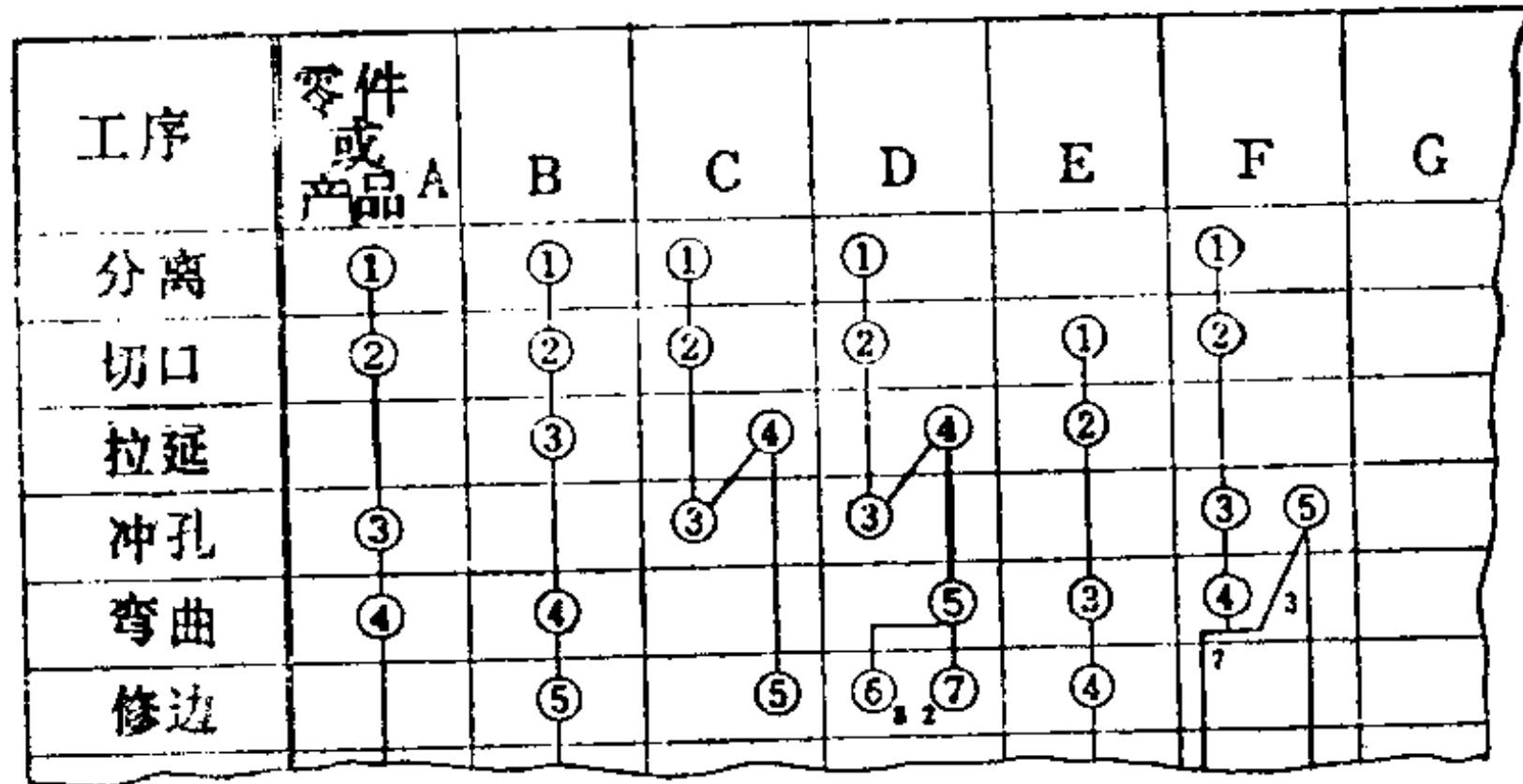


图1.60 P-Q 图表〔8〕

(v) 动作相关性线图 动作相关性线图是按照动作的分析进而将判断所得的相互之间的相关性作成图线。根据接近性的重要程度来布置。重要程度用线条的数量表示。图1.64所示为动作相关性线图。

(vi) 平面布置设计 平面布置设计是将平面区划予以综合配置。表1.21是冲压车间面积区划计算的例子；图1.65所示为相关图表 (cross chart) 和部门区划布置；图1.66为车间平面布置的例子。



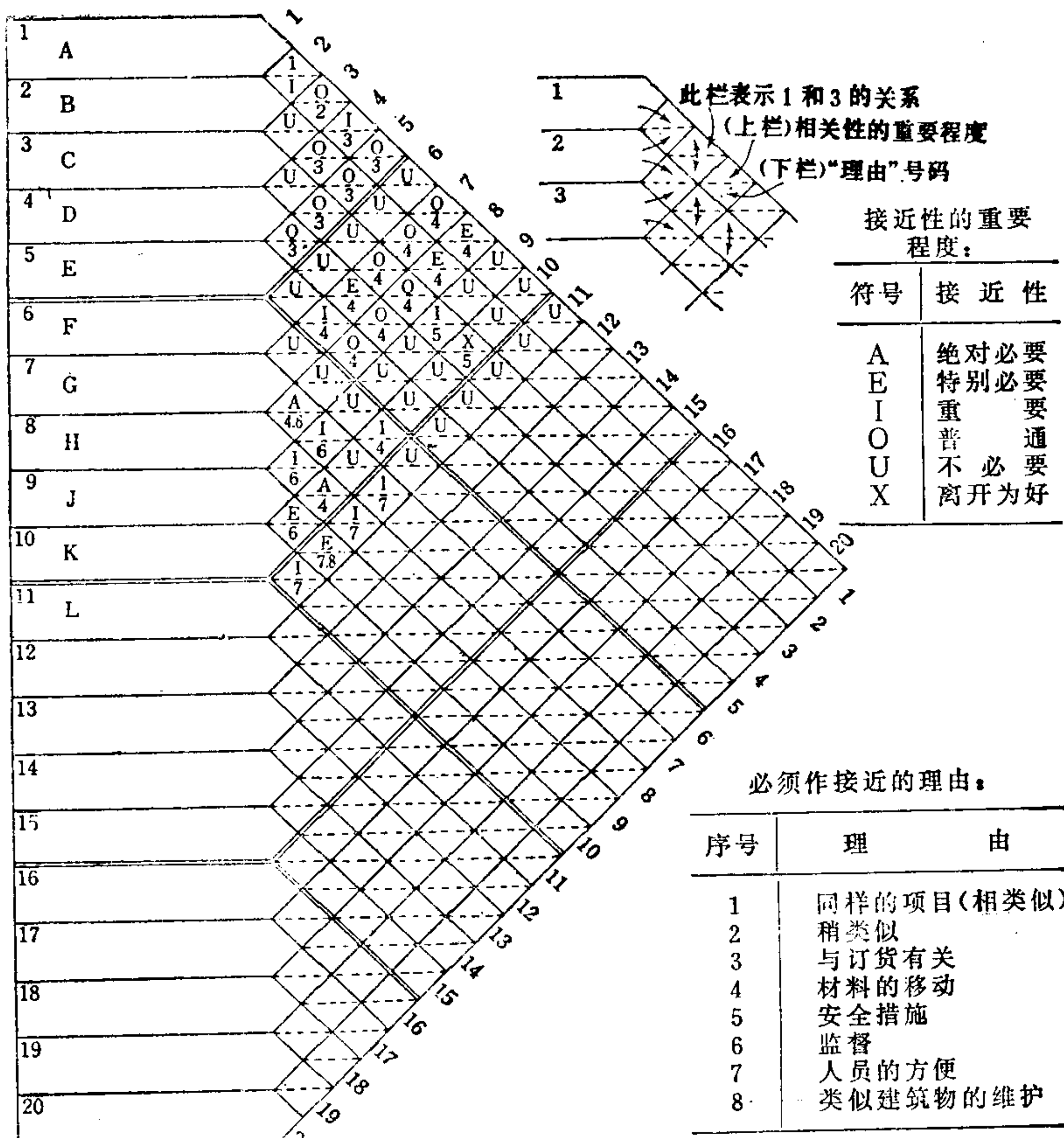
机械设备区	D-1 Q = 19000/年	D-2 Q = 5700/年	D-3 Q = 4900/年	D-4 Q = 4700/年	E-1 Q = 11600/年	G-1 Q = 9000/年
钢材条料储存				1		
原材料储存	1	1	1		1	
挤压材储存						1
工序中储存	3			3		
校直	2	2				
冲压				2 4		
钻	4	3	2		2	
铆		5				
攻丝					2	
磨, 钻						
抛光, 砂带	5	4				5
螺纹	6					
溶剂清洗	7					
供装配用的储存	8	6	3	5	3	
装配	9	7	4	6	4	3/4 6

图1.61 多品种工序图表〔8〕

起	止	剪 切 1	切 口 2	拉 延① 3	冲 孔 4	弯 曲 5	加 工 6
剪 切 1			ABCD 5				
切 口 2				BE 2	ACDF 4		
拉 延① 3						BE 2	
冲 孔 4				CD 2		AF 2	
弯 曲 5					F 1		BDE 3
加 工 6							

① 原文误为“拉拔”。——译注

图1.62 起止流程图表〔8〕



RICHARD MUTHER & ASSOC. 130

图1.63 作业相关性线图

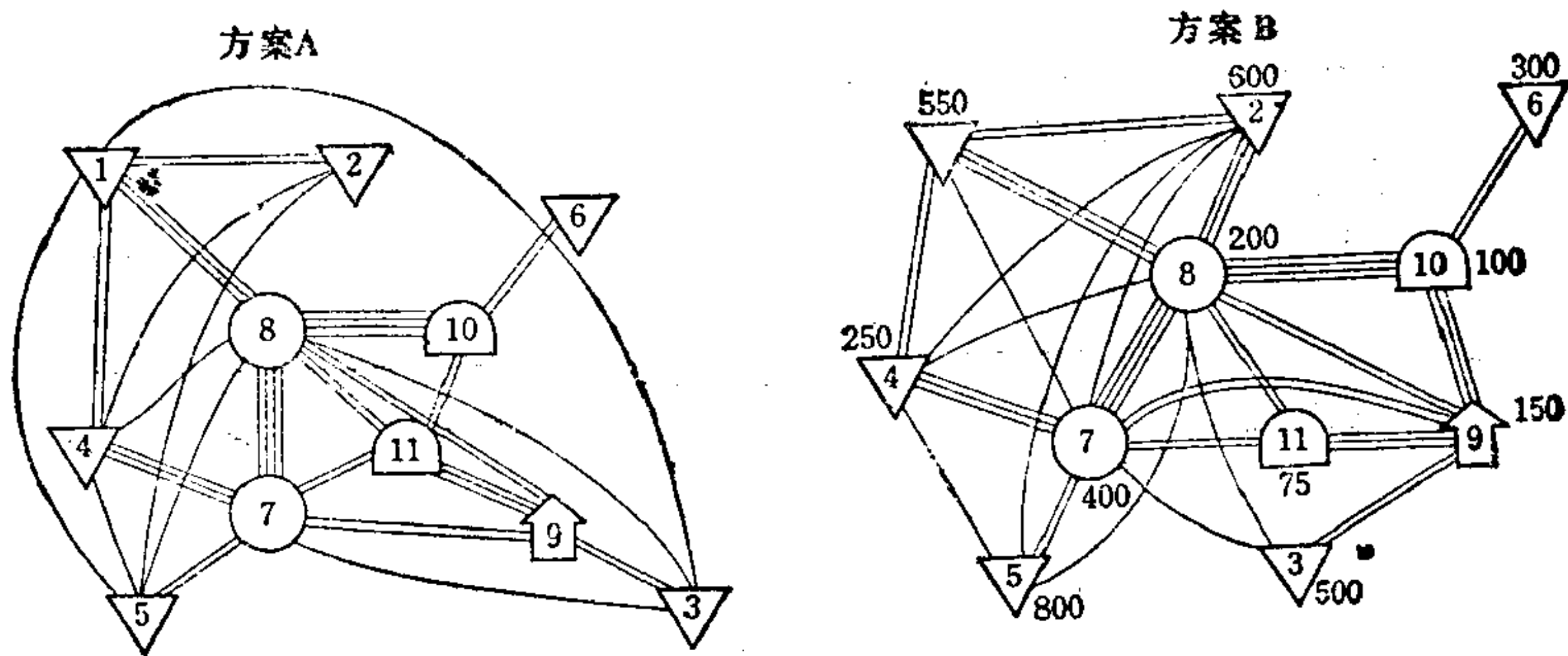


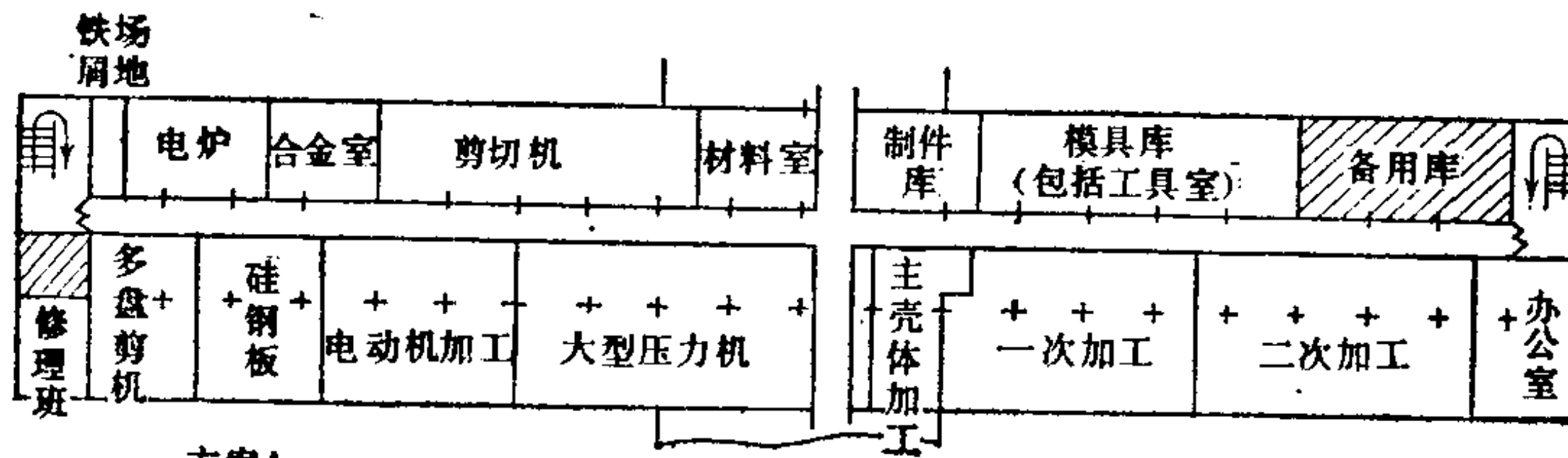
图1.64 动作相关性线图

冲压车间布置的有关图表

	一次加工	一次加工 (中型)	大型压力机	主壳体加工	剪切机	多盘剪机	坯料钢板	电炉	电动机加工	材料室	材料棚	模具库	制件存放处 (计量、检查)	铁屑场地	修理班
一次加工	◎														
一次加工 (中型)		◎			○						◎	○		○	
大型压力机			◎		○						◎	◎	◎		
主壳体加工				◎							◎	○	◎		
剪切机					◎					◎	◎			◎	
多盘剪机						◎	◎	○							
坯料钢板							◎					○			
电炉							◎								
电动机加工								◎				○			
材料室										◎					
材料棚											◎				
模具库												◎			
制件存放处 (计量、检查)													◎		
铁屑场地														◎	
修理班															◎

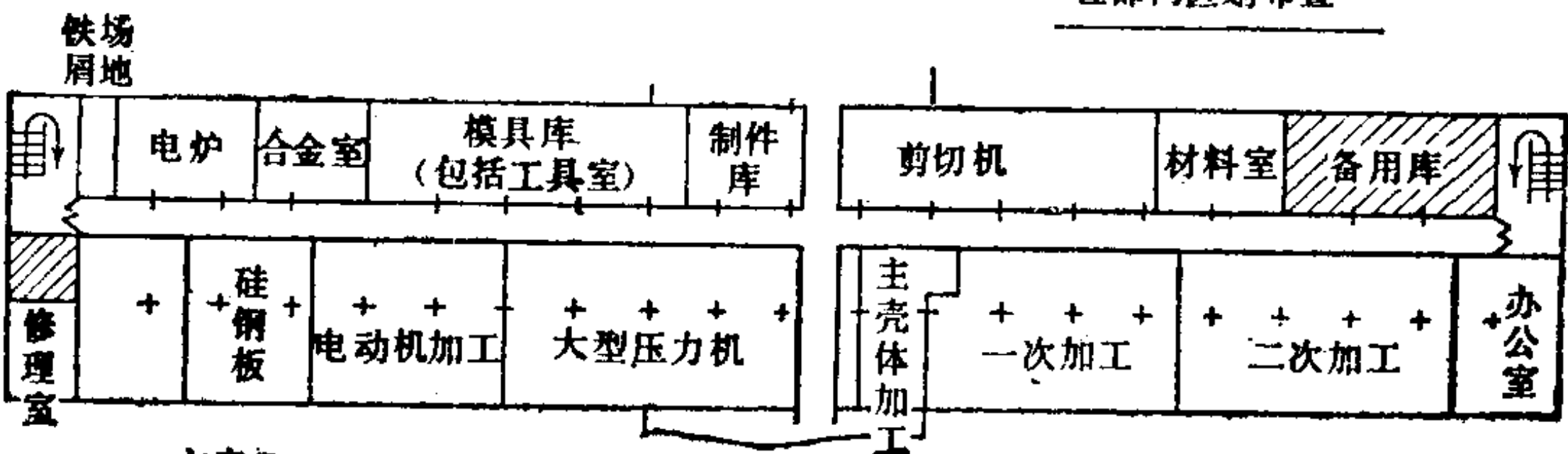
注：
◎ 务必使位置靠近部门
○ 位置如能近些更好

a)



方案A

冲压、车间平面布置部门区划布置



方案B

b)

图1.65 相关图表和冲压车间的部门区划布置示例[8]

表1.21 冲压车间面积区划计算的例子

部门名称	总平面面积 (m ²)	机械设备 占地面积 (m ²)	机 台 数	满负荷时 的人 员	操作送料 占地 面积 (m ²)	作业通 道面积 (m ²)	原材料占 地 面积 (m ²)	工序中零件 的占地 面积 (m ²)	实 业 面 积 (m ²)	作 业 面 积 (m ²)	每台机械 占地 面积 (m ²)	每个操作者 占地 面积 (m ²)
二次加工	243.8	33.9	32	37	20.4	84.1						
一次加工	231.3	23.0	19	19	24.5	65.8						
主壳体加工	70.6	9.5	8	9	3.5	20.9						
大型压力机	247.7	29.6	22	23	21.5	72.2						
硅钢板	84.2	16.5	5	8	5.2	21.0						
电动机加工	220.3	30.6	12	16	10.7	25.0						
小计	1097.9	143.9	98	112	85.8	289.0	30.0	98.1	451.9	4.61	4.03	
比例(%)		100							316			
剪切机	175.0	20.2	6	9	7.9	29.6						
多盘剪机	109.3	14.4	4	7	4.6	22.0						
小计	284.3	34.6	10	16	12.5	51.6	35.2	0	150.4	15.0	9.0	
比例(%)									435			
合计	1382.2	177.7	108	128	98.3	340.6	65.2	98.1	602.3	5.57	4.70	
比例(%)		100							339			

d. 锻压设备的选择 随着工业的发展, 压力机逐渐按不同用途进行分化而形成许许多多的品种。如果将其最简单的概况加以汇集即如表1.22所示。由于首次加工和二次加工的送进对象、方法以及作业速度大小的不同, 并不影响实质, 所以为避免繁杂就不作区分。

表1.22 从生产率的角度来看压力加工设备的选择

加工种类	条 件	产量	要求精度	相适应的机型	送 料
切 断	板料的直线切断	小量	c, d	龙门剪切机, 多盘剪机	手工送进或特殊送进
	板料和卷料的切断	大量	b, c	多盘剪机	手工送进或自动送进
	卷料和定尺料的组合切断	大量	b, c	剪切生产线	自动送进
	含有曲线的切断	小量	c, d	滚剪机	手工送进
	卷料的波形切断	大量	c, d	多盘剪机	自动送进
	含有曲线板料的切断和成形切断	小量	d	高速振动剪切机(冲型剪切机)	手工送进
	圆形切断	小量	d	圆盘剪机	手工送进
冲裁, 修边 修 整	小型零件, 一般加工	大量	b, c	框架式台式压力机, 偏心式台式压力机	手工送进或自动送进
	薄板冲裁		a, b, c	可倾式或固定台式机动压力机	手工送进或自动送进
	稍厚板的冲裁		a, b, c	固定台式机动压力机	手工送进或自动送进
	厚板冲裁		a, b	单点单动压力机	手工送进或自动送进
	薄板和大型零件的冲裁	大量	a, b, c	宽台面压力机, 门式压力机	手工送进
	要求中等压力、大压力的中型、大型制件的一般加工 大型制件, 要求高精度的制件		a, b, c a, b	闭式双动压力机 双点单动压力机	手工送进 手工送进

(续)

加工种类	条 件	产量	要求精度	相适应的机型	送 料
冲裁, 修边 修 整	精密冲裁		a	精密冲裁压力机	手工送进或自动送进
	修整		a, b	修整压力机	手工送进
	修整		b, c	在一般压力机上使用修整模具	手工送进
	高度高的零件的一般加工		b, c	升降工作台压力机	手工送进
	筒形零件的侧壁冲孔		b, c	开式压力机	手工送进
	中小型零件的一般加工	大量	a, b	高速自动精密压力机, 闭式高速自动压力机	专用自动送进
	大压力或者大型零件的多工序加工			冲裁压力机生产线	半自动或自动送进
	包括纵横两向的大件精密加工		a, b	四点齿轮偏心压力机	手工送进
	长尺寸零件的冲孔		b, c, d	弯板机, 压力机型弯板机	自动送进或手工送进
	电动机铁心的切槽加工		b, c, d	局部冲裁(切口)压力机	自动分度换位送进
	多列冲孔		b, c	带往复装置乙字形送进的自动压力机	自动送进
	拉延后修边		b, c, d	修边机, 普通压力机+专用模具	手工送进
	多品种大量冲孔	小量 中批 小量 中批	b, c	冲模回转头压力机, 冲孔压力机	手工送进或自动送进
		b, c	数控冲模回转头压力机	半自动	
弯曲, 成形	板料的圆形或圆筒形弯曲		c, d	辊式弯板机	手工送进或特殊的自动送进
	长尺寸材料的折弯	小量	b, c, d	折弯机	手工送进
	长尺寸材料的弯曲	小量 中批	b, c, d	弯板机	手工送进

(续)

加工种类	条 件	产量	要求精度	相适应的机型	送 料
弯曲, 成形	小件的一般加工		b, c	C形机架台式压力机, 偏心台式压力机	手工送进或自动送进
	中小件的一般加工		b, c	可倾式或固定工作台式C形机架机动压力机	手工送进或自动送进
	稍厚板料的加工		b, c	固定工作台式C形机架机动压力机, 高速油压机	手工送进或自动送进
	厚板的一般加工		b, c	闭式单点曲柄压力机	手工送进或自动送进
	较上面板料更厚的一般加工		a, b, c	单点单动压力机	手工送进或自动送进
	在长度方向上要求高精度的小面积加工		a, b	偏心轴压力机	
	薄板大型零件的一般加工		b, c	宽台面压力机, 门式压力机	手工送进
	中等面积或大面积零件的一般加工		b, c	闭式双曲柄压力机	手工送进
	要求压力大的大件的一般加工		a, b	双点单动压力机, 油压机	手工送进
	包括纵横两向的大件精密加工		a, b	四点曲柄压力机	手工送进
	成形、矫正		a, b, c	四柱单动油压机	手工送进
	冷态成形的一般加工		a, b	肘杆式压力机	手工送进或自动送进
	凸缘的弯曲加工		b, c, d	切线弯板机	手工送进或特殊的自动送进
	边缘弯曲		c, d	卷边机	手工送进
管子弯曲	小量	c, d	弯管机	手工送进	
筒形件的侧壁加工		b, c	悬臂工作台式压力机(筒形件卷边结合压力机)	手工送进或特殊的自动送进	

(续)

加工种类	条 件	产量	要求精度	相适应的机型	送 料
弯曲, 成形	管子端部的成形加工		c	管端成形机	手工送进
	薄壁圆筒的滚丝	大量	b, c	滚丝机	自动送进
	卷绕		b, c	卷簧机	自动送进
	圆筒形或杆状长件的连续加工	大量	b, c	冷轧机	
	大型件的特种张拉成形			张拉成形压力机	
拉延, 落料-拉延, 变薄拉延	小型零件的浅拉延		b, c	C形机架台式压力机, 偏心台式压力机	手工送进或自动送进
	薄板, 小型零件拉延的一般作业		b, c	C形机架机动压力机	手工送进或自动送进
	薄板、中小型零件拉延的一般作业		b, c	单臂式齿轮传动单动柄压力机, 双动凸轮式压力机, 双动曲柄压力机, 单动油压机	手工送进或自动送进
	中型零件的拉延		b, c	单臂式单动双曲柄压力机, 双动肘杆压力机	手工送进或自动送进
	要求中等压力的较深的拉延或复杂形状的拉延		b, c	双动油压机	手工送进或自动送进
	要求大压力件的一般加工		b, c	双动油压机, 双动肘杆压力机, 双动齿轮偏心压力机	手工送进或自动送进
	深拉延		b, c	活动工作台式双动压力机, 双动油压机	手工送进
	要求中、小压力的中小零件的一般加工	大量	b, c	冲孔机, 多工位自动压力机	排入式自动送进

(续)

加工种类	条 件	产量	要求精度	相适应的机型	送 料
拉延, 落料 -拉延, 变 薄 拉 延	要求中、小压力, 稍大型零件的一般 加工	大量	b, c	多工位自动压力 机生产线 (用C形 机架机动压力机)	带自动传送装 置
	要求大的压力的 大型零件的一般加 工	大量	b, c	多工位自动压力 机生产线 (用闭式 压力机)	带自动传送装 置
	大型零件的拉延		a, b, c	双点齿轮偏心式 压力机, 四点齿轮 偏心压力机	
	以拉延成形为主 的特殊方式加工			橡皮模成形压力 机, 液压成形压力 机, 双动成形压力 机, 张拉成形压力 机	
	旋压			旋压车床, 旋压 机, 旋压成形机	
剪切、冲 裁、弯曲、 拉延、成 形等的复 合加工	小型零件的一般 加工		b, c	C形机架机动压 力机	手工送进或自 动送进
	小型零件稍稍重 一些的作业		a, b, c	闭式压力机	手工送进或自 动送进
	要求小压力的大 型件的一般加工		b, c	宽台面压力机	手工送进或自 动送进
	要求中小压力的 中大型零件		a, b, c	闭式压力机, 油 压机	手工送进或自 动送进
	要求小压力的小 型零件	大量	b, c	C形机 架 压 力 机, 偏心压力机	自动送进
	要求小压力的小 型零件	大量	a, b	闭式压力机	自动送进
	要求中小压力的 中小型零件	大量	a, b	高速自动压力 机, 多工位自动压 力机, 高速自动精 密压力机	排入式自动送 进
	要求中小压力的 中小型零件	大量	b, c	机动压力机, 多 工位自动压力机生 产线	自动传送装置

(续)

加工种类	条 件	产量	要求精度	相适应的机型	送 料
剪切、冲裁、弯曲、拉延、成形等的复合加工	大型零件	大量	b, c	闭式压力机, 多工位自动压力机生产线	自动传送装置
	以弯曲为主的小型零件卷边接缝, 断续卷边接缝(咬口)	大量	a, b	多滑块压力机	排入式自动送进
	以拉延为主的小型零件加工	大量	a, b	多工位自动压力机	排入式自动送进
	以冲裁为主的小型零件加工	大量	a, b	高速自动精密压力机	排入式自动送进
	含有结合, 攻丝的小型零件	大量	a, b	多工位自动压力机, 多滑块压力机	排入式自动送进
压缩加工, 模锻	要求小压力的极小件的冷锻加工		b, c	闭式单曲柄压力机, 高速油压机	手工送进或自动送进
	要求中小压力的中小件的冷锻加工		b, c	冷锻压力机(加强机架)	
	短工作行程的制件加工		a, b, c	肘杆压力机	手工送进或自动送进
	中型零件的模锻		b, c	锻造机械压力机	手工送进或自动送进
	要求大压力的大型件加工		b, c	锻造液压机	手工送进
	无精度要求的各种加工	小量	d	摩擦压力机	
	冷态成形, 一般作业		a, b	肘杆压力机, 张拉肘杆压力机	手工送进或自动送进
	锻造, 热挤有底盒形件等		b, c, d	单动油压机	手工送进
	锻造坯料的制坯		c, d	成形辊锻机	
	棒料管子等的径向锻造		c, d	径向锻机	
棒料的镦粗	大量	b, c, d	镦锻机, 冷锻机	排入式自动送进	

(续)

加工种类	条 件	产量	要求精度	相适应的机型	送 料
压缩加工, 模 锻	软金属的冲击挤压加工		b, c, d	冲击挤压机	手工送进或排入式自动送进
	挤压加工		b, c	挤压油压机	
	挤入加工	小量	a, b, c	冷挤压制模压力机	手工送进或自动送进
	体积变形起伏成形加工	中批 小量	c, d	落锤, 高速螺旋压力机	
	压印	大量	a, b	肘杆压力机, 高速油压机	
	压印	小量	c, d	水压机, 螺旋压力机, 落锤	
其 他	板料的校正加工		a, b, c	辊式板料校平机 张力校直机	手工送进或自动送进
	粉末压实成形		b, c, d	粉末成形压力机, 橡皮成形压力机, 压实机	
	高速高能加工	小量	b, c, d	高速锤①, 爆炸成形机, 电磁成形机	
	模具调整, 试压	试制		修模压力机	

① 原文可能有误。——译注

当选择设备时, 多少有着一些原则。一般所用的原则是: 1) 设备台数少的车间可选用通用型; 2) 随着机台的增加, 就要配置与用途相适应的设备以形成专业化生产; 3) 高效率的专用设备有其独特性而缺乏通用性; 4) 对于一般的大量生产, 可在通用设备上实现自动化或选用通用自动压力机; 5) 在生产对象被限定了的专业厂, 使用特殊设计的高效率专用自动机或单能机是有利的。

在设备与模具的关系上: 1) 工序越是划分得细, 模具就越简单, 压力机也就可以简单; 2) 在一个工序中加工复杂形状

时，集中于一个工位的复合模最复杂，连续模次之，而象连续自动压力机和多滑块压力机所用的自动多工位模具最为简单。这是由于机械设备分担了模具的一些功能的缘故。

e. 设备的安装

(i) 设备所需的占地面积 安装设备时，必须知道各种有关设备所需的占地面积。它由下列几项组成：1) 设备本体的占地面积；2) 保证操作者正常工作或进行维修工作所需占地面积；3) 辅助设备和主机间的相关距离；4) 放置作业中所必须的工具及备品的面积；5) 放置材料和制件的面积以及将这些运出而无碍操作的面积；6) 对于大型设备等，还需要考虑为将规格最大的模具放进并安装到设备上所用的起重机及其他活动所需的面积。但是，上列各项不是完全独立的，而是相互结合构成所需的占地面积。因此，应对该设备的作业状况进行充分研究，或者通过研究同类设备的作业实况来确定。

(ii) 设备作业面的高度 现在的设备作业面的高度（包括垫板厚度）多数为

小型可倾式压力机 (10~30 t) 750~850mm

小型可倾式压力机 (50~70 t) 900~1000mm

至于闭式压力机的工作台面高度，100~300 t 压力机为815~910 mm，当设备在结构上需要大于这一高度或使用较大型的压力机时，就挖地坑来安装设备，以使工作台面与地面相距815mm。但是，由于在815mm的高度上还要加上垫板厚度（对于100~1000 t 的为115~305mm）而使实际作业面变高，成为930~1120mm。这些尺寸是设备制造厂的标准尺寸，在各工厂的适应情况，必须由它与自动化设备相关的方面或设备的操作性等方面来确定。

将设备的作业面安排在距离地面多大的高度才合适是一个重要的问题，它对生产效率的影响非常大。为此，必须通过事先对各种机械设备所作的动作研究或者时间研究来确定它们的安装高度。

(iii) 设备的方向 安装设备时，是让它的正面面对车间通

道还是垂直于通路?这要视设备的类型和大小等因素而有所不同。近来,随着品种的更换以及自动化的发展,变更设备的布置方式的情况也多起来了,加之对防振的要求,而使基础的结构得到了改进。因此,在车间的平面布置上也就有了可作灵活考虑的余地。

(iv) 与车间厂房的关系 对于设置在没有吊车的厂房内的机械设备,要根据下列一些因素来确定它与厂房的位置关系:与可供架设搬运重物和维修机器所需的起重机与悬臂吊机的梁柱间的位置关系;与防振、隔音效果差的墙或窗之间的距离;与影响操作的柱子凸起部分和窗户光线的关系等,同时还要考虑到其它一些影响作业环境的因素。

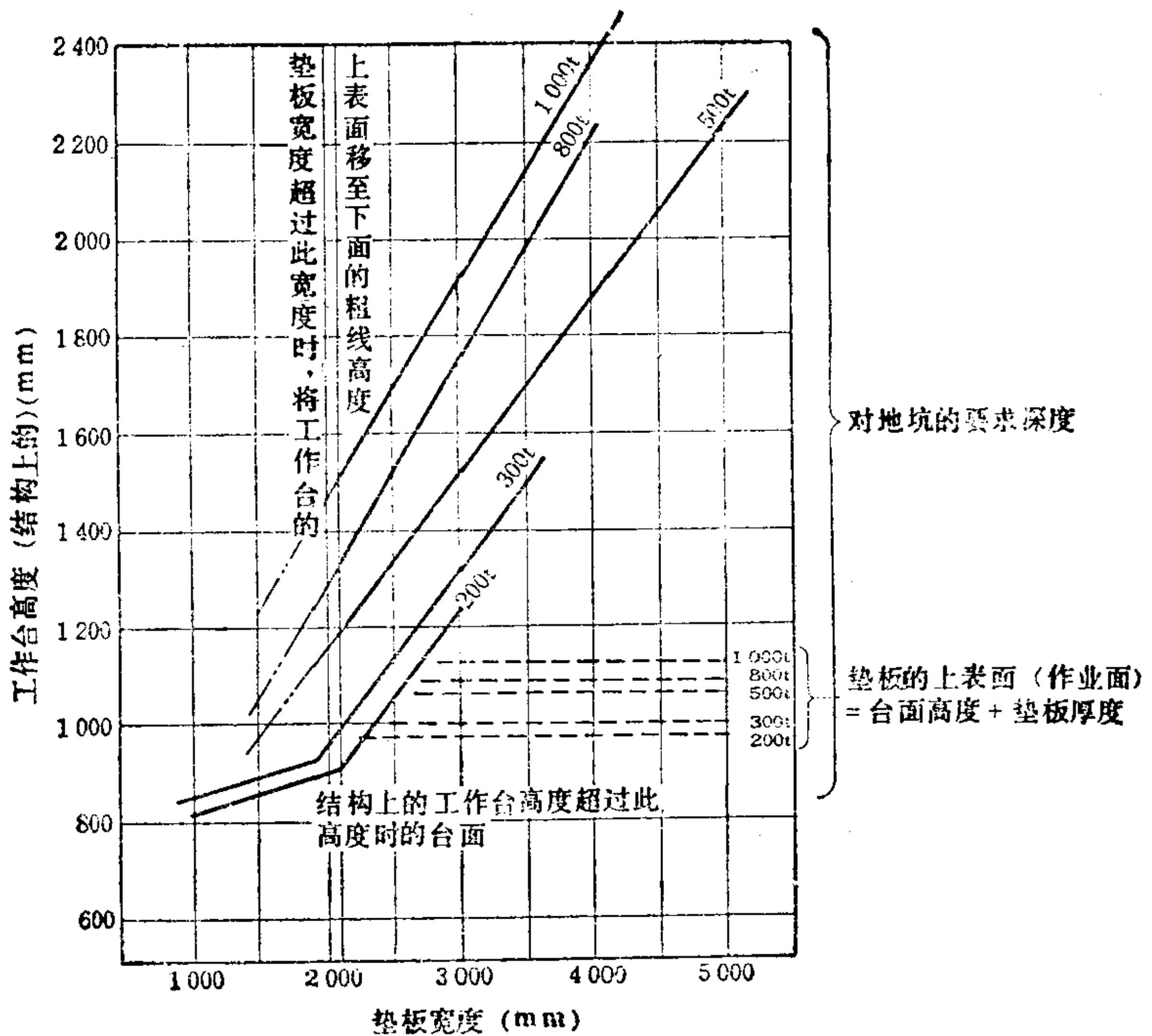


图1.67 闭式压力机的作业面高度

(v) 辅助设施的布置 辅助设施有模具库、材料库、切断场地、成品库、检查站、废料处理场地等。必须准确而有效地确定它们的区域。

f. 机械设备的基础 机械设备的基础随其种类、型号、吨位大小而异，但是，作为必不可少的因素有如下几点：

(i) 机械设备基础的必要条件

(1) 机械设备和基础不能下沉 也就是说，波及基础底面的全部载荷，必须在地基的土壤耐压强度（承载能力）之内。土壤耐压强度因构成地基的土壤种类、致密度和干湿度等的不同而异。因此，在设计基础时，必须认真调查土质，掌握其安全耐压强度。所谓土壤耐压强度是指在某一支承面积上，每隔一定时间有效地加上一定比例的均布载荷，测量地基被压缩以致出现局部下沉那一时刻的载荷，将这一载荷除以支承面积所得出的值叫做屈服点。设计中使用的安全（许用）土壤耐压强度，就是将上面所测得的数值（屈服值）除以安全系数而得出的结果。作为设计上的一般标准有表 1.23 等。

(2) 机械设备和基础要稳定 作用在基础底面的力是极大的，所以要尽可能使设备载荷与基础重量的合力中心靠近基础底面的重心。当设备基础上作用着倾斜力或极不均匀的力时，载荷的合力不通过基础底面的重心，载荷大的那一边基础加在地层上的压力要比载荷小的那一边的大，从而使基础发生倾斜失去稳定性。在这种情况下，作用在基础地层上的最大和最小单位压力可用下式〔9〕来表示：

$$P_{\max} = W/A + M_{y1}/I$$

$$P_{\min} = W/A + M_{y2}/I$$

式中 P_{\max} ——作用在基础地层单位面积上的最大压力；

P_{\min} ——作用在基础地层单位面积上的最小压力；

W ——总重量（设备和基础的重量及其由机械作用而产生的力等的总合）；

I ——通过重心线位置的基础的断面惯性矩；

表1.23 长期许用土壤耐压强度②

地 层	长期许用土壤耐压强度 (tf/m ²)
岩 石	100
砂 石	50
硬土层 硬质地层	30
砾石层 密实的	60
不够密实的	30
砂质地层 密实的	30
中等程度的	20~10
软的	5
非常软的①	0
粘土质地层 非常坚硬的	20
坚硬的	10
中等的	5
松软的①	2
非常松软的①	0
关东土壤(亚粘土、亚砂土) 坚硬的	15
较坚硬的	10
松软的	5

① 作为支承地层不合适。

② 表中值取自建筑基础结构设计标准及说明，日本建筑学会。

y_1 ——从基础底面的重心线至载荷大的那一侧基础底面端部的距离；

y_2 ——从基础底面的重心线至载荷小的那一侧基础底面端部的距离；

M ——使基础转动的弯矩， $M = W \times b$ ；

A ——基础的底面积；

b ——从基础底面的重心线至总重量作用线之间的距离。

为了增加基础的稳定性，一般取 $P_{\max} < 2P_{\min}$ 。 P_{\max} 必须小于地层的安全地耐力。万一 P_{\max} 接近安全土壤耐压强度，其差

为 10% 左右时, 就必须使 $P_{\max} < 1.2P_{\min}$ 。

(3) 设备和基础不能有滑动性、回转性、浮动性 当设备总重量的合力不通过基础底面的重心时, 相对于基础底面作用有推力, 相对于重心则作用有回转力并产生出浮动性。因此设计基础时, 必须计算这些作用力并要对基础的形状予以充分研究。

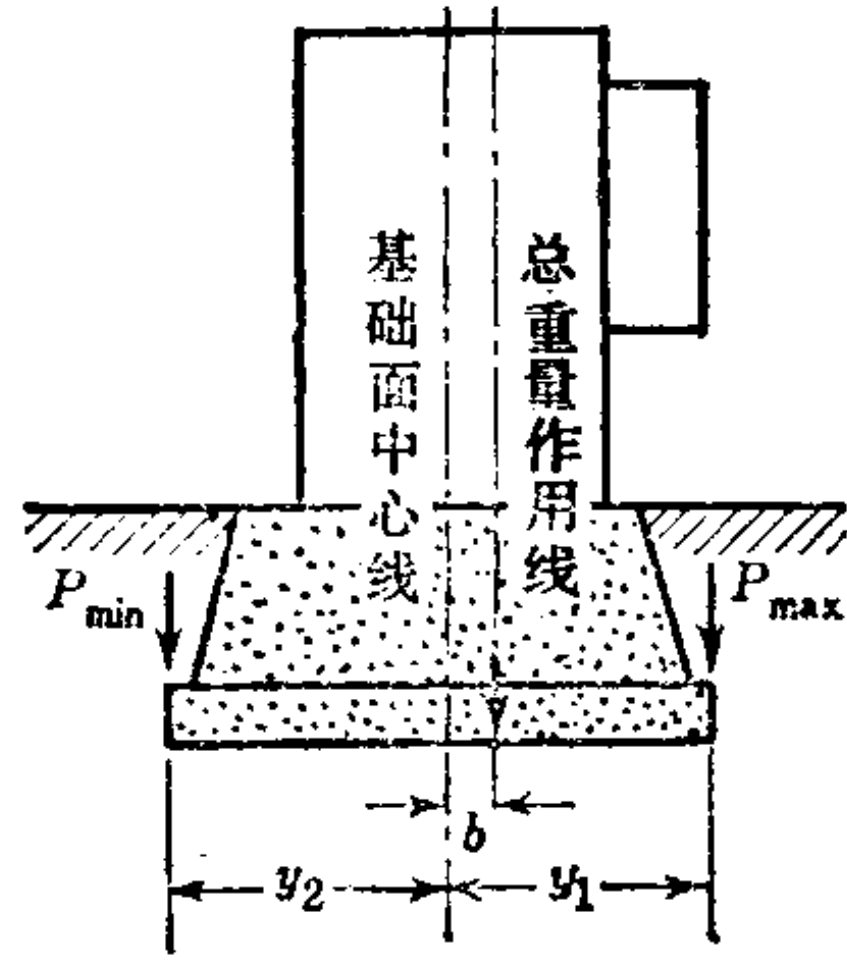


图 1.68

(4) 设备与四周要隔振 即要求基础结构不把设备产生的振动传到四周去, 当然也不能把来自周围的振动传给设备。设备产生的振动必然引起基础振动, 而与基础相连的地层和建筑物也就和基础一起作同样程度的振动。减小基础的振幅, 也是许多场合下最重要的问题。一般所说的防振就意味着采取减小基础振幅的措施。作为以减小振动为目的的基础设计, 过去唯一的方法是相对于振动能量尽可能地增加基础的重量以抑制振动, 然而, 现在基础设计的基本想法, 是把重点放在基础自身的固有振动频率上, 通过它和激振力振动频率的比值来控制振动倍率以减少基础的振幅^[10], 这种防振方法已逐渐为人们所重视。

为了减小振动一般采用:

- (1) 在机械设备底部和基础之间加入防振材料的方法;
- (2) 在机械设备基础和支承基础的地层之间加入防振材料的方法。

这些方法大体上都能获得实用效果。但是用于此目的的防振材料也应根据理论设计来使用。由于基本措施想法中的 (1) 与 (2) 都相同, 而方法 (1) 能使防振材料承受的总重量小, 所以使用得更为广泛。图 1.69 所示为防振材料的减振效果。

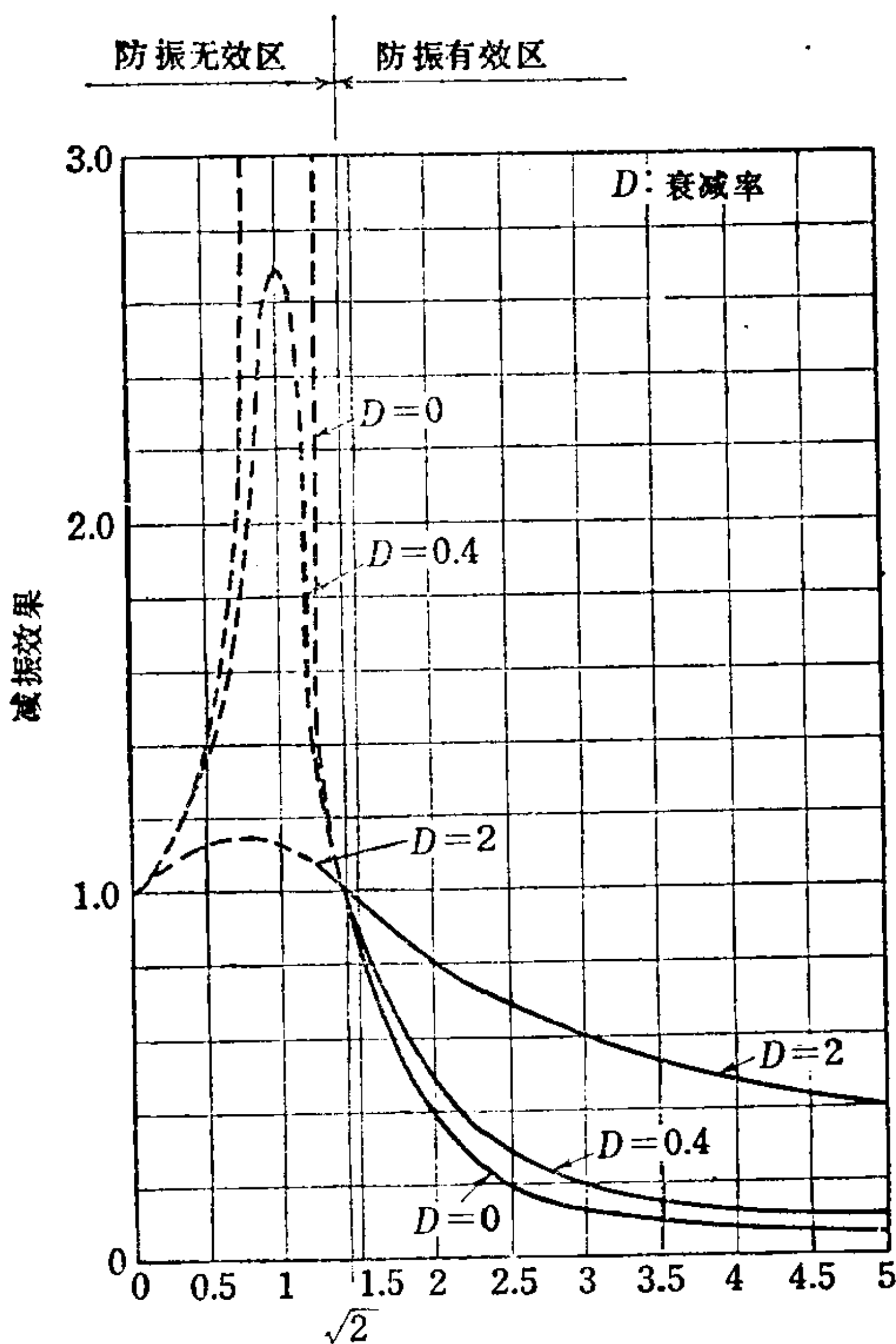
如图 1.69 所示, 当机械设备振动频率和防振材料固有振动频率的比值到达 3.5 左右时, 传递到基础上的力仅为刚性连接时

的十分之一，但当比值小于 $\sqrt{2}$ 时反而有害。

图1.70表示当知道机械设备振动频率和冲击载荷时选择防振材料的方法。图中 K_d/K_s 是静弹性常数和动弹性常数的比值。钢材的这个比值为1，而橡胶则随硬度等因素而变化。

近来随着生产体系的变化，已经出现了采用流动方式布置压力机的方案，但选择防振器材的方案基本上也应如此。从使用以橡胶为主体的防振材料的例子上看，通过它传给基础的冲击力可减少到 $1/2 \sim 1/10$ ，机械设备的滑动性也由 $1/5$ 降至 $1/20$ 。根据使用这种材料的实际效果，设备吨位与基础混凝土厚度的大致关系如表1.24所示。

g. 辅助机械设备 冲压车间通过压力机及其相关的各种机



设备振动和防振材料的固有振动频率的比 ω / ω_0

图1.69 防振材料的减振效果

表1.24 设备吨位与混凝土厚度的关系①

设备吨位(t)	100	150	200	250	300
混凝土厚度(mm)	150	200	250	300	350

① 原文无——译者。

械设备所形成的体系才能发挥它作为车间的机能。现将这些有关的机械设备划分为运输类、机械类、计量类、材料试验及动力类等来介绍它们的特性。

(i) 运输类 材料及制件等的运输对冲压加工效率有很大的影响。合理的运输是合理作业的前提,所以要充分调研各种运输机械的特性,另一方面必须分析运输作业以便采用适当的机械(表 1.25)。

运输机械可按其形式、动力、可动性等类别进行分类。

(ii) 机械类 冲压件除用压力机直接生产外,还必须经过各种各样的前处理和后处理。一般来说,这些作业隶属于冲压车间,所以,还应有完成这些作业所需的各种设备以及机械的计划(表 1.26)。

(iii) 计量类 由于冲压件在单位时间内的产量多,为了计量,所以要采用各种类型的计量仪器。

(1) 累积回转计数器 设置在操作者容易看见的位置上,使其与滑块联动以读取制件数量。

(2) 尺码仪 装在送料器正前方的带料上,它是测量材料长度的带有滚轮的累积回转计数器。

(3) 天秤 用于称量材料及制件的重量。高精度天秤的精度有在 $1/2000$ 以上的。称量的大小为 $0.2\text{g}\sim 600\text{kg}$ 。

(4) 磅秤 精度 $1/2000$, 称量范围多在 $20\text{kg}\sim 20\text{t}$ 左右。大容量的磅秤要注意安装方法。

(iv) 试验类 为了知道冲模材料的热处理状况和冲压材料的加工性能,必须有各种类型的试验装备。

(1) 硬度计 使用各种硬度计主要是为测量模具用工具钢的硬度。其中洛氏硬度计用得较多,因为它简便。当需简单测量使用中的模具硬度时可应用肖式硬度计;当测量微小范围内的硬度分布或薄板硬度时,可使用显微维氏硬度计;

(2) 拉伸试验机 为获得冲压材料工艺性能的基础数据,可用拉伸试验机测量材料的屈服点、抗拉强度、延伸率等,并绘

表1.25 运输机械一览表

机 械 名 称		形 式		动 力		可 动 性		用 途		使 用 对 象		
		平 面 运 输	立 体 运 输	人 力	机 动	固 定	可 动	坯 料	零 件 和 成 品	小 车 间	中 等 车 间	大 车 间
运货车	手推车	○		○			○	○	○	○	○	○
	提升台	○		○			○	○	○	○	○	○
	拖车	○		○	○		○	○	○	○	○	○
	电瓶车	○			○		○	○	○	○	○	○
提升机	托架车	○	○	○			○	○	○	○	○	○
	提升车	○	○	○			○	○	○	○	○	○
	油压杠杆提升车	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○
	电动液压提升机	○	○		○		○	○	○	○	○	○
	链条提升机		○	○			○	○	○	○	○	○
	油压(液压)提升机		○		○	○		○	○	○	○	○
升降叉车	升降叉车	○	○		○		○	○	○	○	○	○
起重机	链滑车		○	○				○	○	○	○	○
	电动起重机		○		○	○					○	○
吊 车	手动有轨吊车		○	○	○	○		○	○		○	○
	墙式摇臂吊车		○	○		○		○	○		○	○
	摇臂吊车		○	○		○		○	○		○	○
	桥式吊车		○		○	○		○	○			○
输送机	链式输送机	○	○		○	○		○	○		○	○
	皮带输送机	○			○	○		○	○	○	○	○
	辊式输送机	○	○		○	○		○	○		○	○
	板式输送机	○			○	○		○	○		○	○
	鳞板输送机	○			○	○		○	○		○	○
滑 槽	滑槽	○	○		○	○		○	○	○	○	○
	螺旋滑槽	○	○		○	○		○	○	○	○	○
升降机	升降机		○		○	○		○	○		○	○
	斗式提升机		○		○	○		○	○		○	○
	杠杆式提升机		○		○	○		○	○		○	○

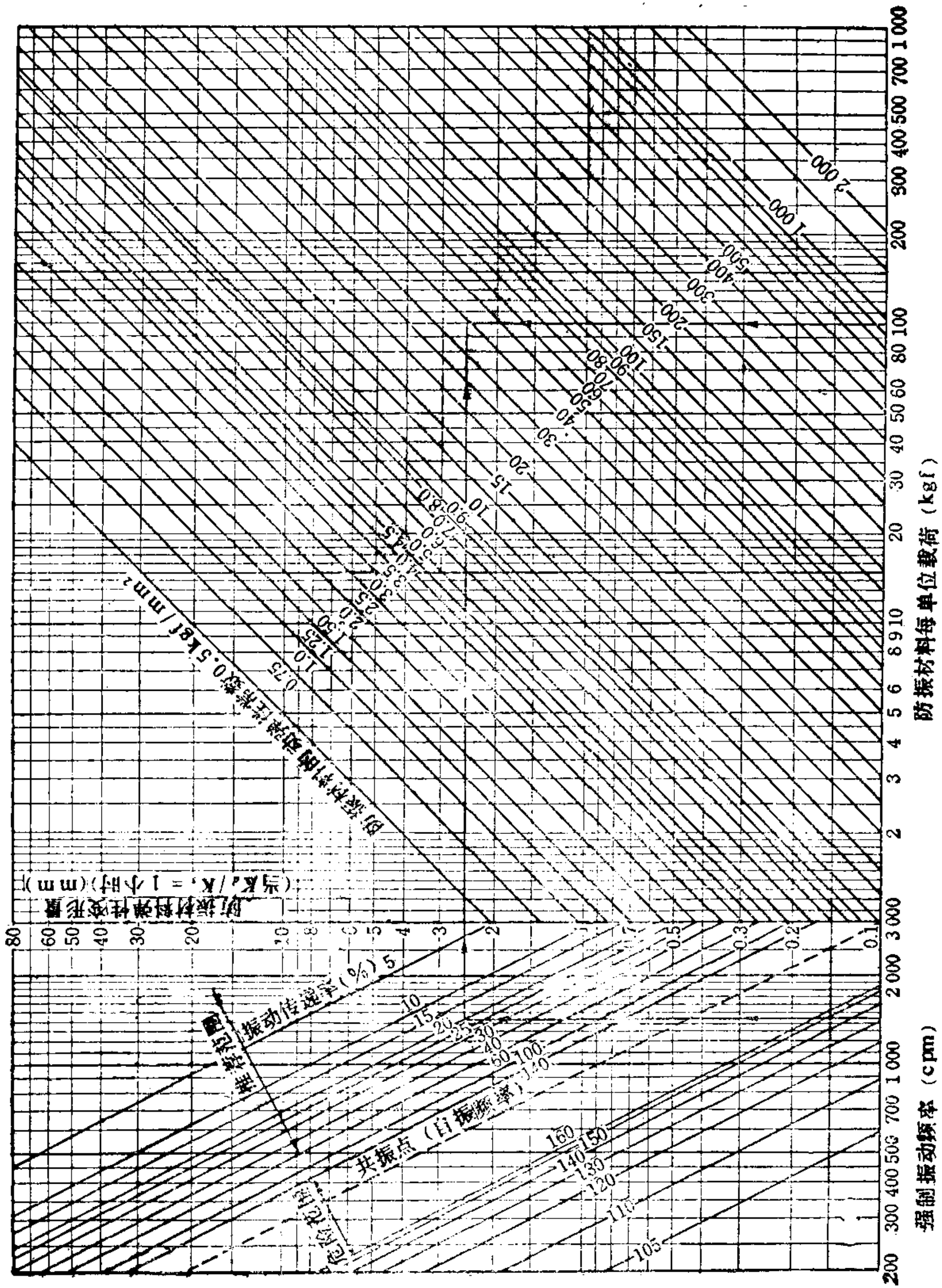


图1.70 防振材料选择图

防振材料每单位载荷 (kgf)

强制振动频率 (cpm)

表1.26 辅助机械一览表

机械名称	性能或用途	备注
辊式钢板校平机	1) 将带料开卷, 校平供给冲压主机使用 2) 不希望出现拉伸滑移的制件, 拉延时为防止拉伸滑移现象就在拉延之前作轻微的塑性加工	近来为了第2)条所要求的目的, 也有使用尿烷橡胶辊轮滚压以获得更大效果的机械
滚剪机	1) 较大冲压件小批生产时, 进行适当形状的坯件剪切	—
去毛刺机	1) 用高速回转的砂轮磨除由橡胶辊轮送进机构导入的钢板上面的毛刺	0.3mm 左右的毛刺用1~2个工序去除
喷砂机	1) 除去冲压件的油脂、锈、杂物、伤痕并作表面加工 2) 材料的表面硬化, 并提高疲劳极限 3) 为提高冲压时保存润滑油的性能的前处理	—
给油器	1) 在冲压件的原材料上均匀地涂上一层防锈油或润滑油	有的利用静电效应喷涂
滚光机	1) 将冲压加工后的零件与研磨剂相混合作滚光清理, 除去制件上的锈、黑皮、毛刺等并进行表面加工 2) 也有与固态润滑剂混合使用的时候	—
液压喷磨装置	1) 将各种磨粒和水的悬浊液高速吹喷到工件的表面上, 除去焊接热处理等的氧化皮、伤痕等等, 进行表面加工或油漆基底的加工等等	—
超声波清洗装置	1) 把冲压件放入三氯乙烯等清洗剂中, 用超声波发生器给以振动, 将污物, 油脂等除去	—
热处理炉	1) 锻造用炉: 焦炭炉、重油炉 2) 淬火、退火用炉: 电炉(箱形、圆筒形) 高频电炉、煤气炉	—

出应力-应变曲线, 求出 n 值、 r 值等。

(3) 爱利克辛试验机 用以了解冲压材料的胀出成形性能的一种试验设备。

(4) 锥杯试验机 用以了解冲压加工用钢板的复合成形性能。

(5) 显微镜 用于研究冲模工具钢的热处理效果和检查冲压材料的组织。

(v) 动力类

(1) 空气压缩机 作为冲压设备的附属装置使用。主要用途是: 在大型压力机上, 作为离合器、制动器、气垫、空气平衡器的动力源; 在小型压力机上, 使它与滑块联动, 作为吹出制件的动力源。压缩空气的压力必须达到 7 kgf/cm^2 。

(2) 真空泵 按用途或设备情况有干式泵和湿式泵之分。要尽力减少管路、阀门等的阻力, 要设法防止容积效率降低和动力增大。

(3) 风机 各种风机被用作加热炉和抛光机吸尘装置等设备的辅助装置, 也作为机器的附属装置使用。风机的种类、形式、容量因其用途不同而异, 风机的效率则随风量、风压、转速的变化而有显著差别, 所以在选择风机时必须注意。

1.3.7 润滑管理

a. 压力机的润滑 合理的润滑管理是要求供油可靠、供油操作省力等, 从这种观点出发, 向压力机各部分供给润滑油应尽力统一, 并把整个供油周期作为管理目标。另一方面, 压力机的性能也要求机械本身更加高速和高精度, 因此为了保持其精度, 必须在改善机构的同时改进润滑系统。对于大多数的压力机, 现在已经实现了自动润滑, 它们所采用的供油方式有: 1) 强制循环供油 (见图 1.71); 2) 集中强制供给; 3) 前两种方式并用的供油。

至于要求这种供油系统的原因是由于对压力机各部分提出了下述更高的要求。

(i) 滑块导轨 在高速自动压力机上，滑块的运动速度非常高且作垂直运动，并要求滑块下面与工作台面平行。因此，要求在几个滑动面上（6~8个）保持均匀且极小的间隙（0.04~0.02mm）。在最近生产的压力机上，为了防止滑动面的磨损和减小摩擦力，采用了由滚珠或滚针组成的滚动导轨等，并且也对结构面进行了改善。但是，也必然要求这种滑动面能够散发摩擦热及能够形成所规定的连续油膜等，并且还应具有能采用后面所叙述的强制循环供油的特性。

(ii) 曲轴轴承和连杆轴承 在压力机上，这种轴承承受的压力最大，而且也是高速滑动部分。但是在冲裁等压力机上，为减小冲裁时的冲击力，常把间隙设计得非常小。

(iii) 滑块联接支承部分 这部分的面压最高，要求它的间隙很小，须采用循环供油。

(iv) 驱动齿轮 驱动齿轮特别是与曲轴直接接合的齿轮，其局部承受很高的冲击载荷。最近多数都把齿轮箱作成油密封的形式，以进行齿面注油润滑或油浴润滑。

另外，滑块调整蜗杆、气垫、平衡缸、制动器结合盘等部位现已采用了集中供油方式进行润滑。

强制循环供油法用于要求高速度、高载荷、高精度的滑动面

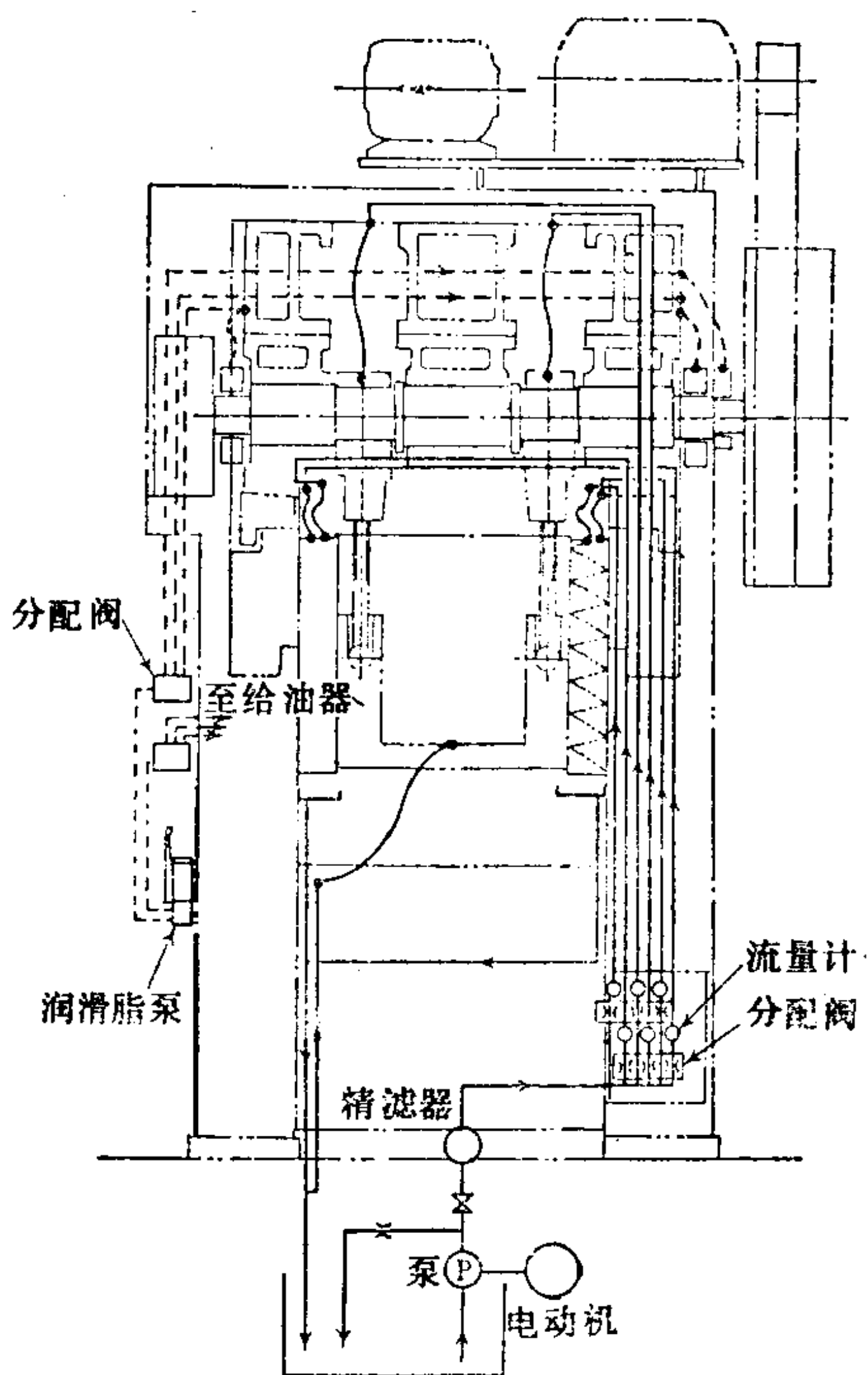


图1.71 强制循环供油示例

及轴承部位上。它具有如下的特点：1) 冷却作用；2) 连续定量供油；3) 供油压力及供油量可调；4) 确保粘度的适应性(油的粘度变化不大)；5) 供油量大等。

因此采用这种供油方式，就能在滑动部位和轴承部分实现完全油膜润滑，能耐高速重载，并且滑动部分及轴心的位移也小，还可以减少磨损以及进行精确的连续运转。在这种方式的基本供油循环回路中恰当地安排了下列内容：1) 温度调节；2) 压力调节；3) 油量调节；4) 油料净化；5) 在机械设备启动和停止时与其他机构联动；6) 防火措施等，从而构成自动供油系统。

b. 压力加工中的润滑 压力加工中的润滑特性与其他领域的润滑不同，其相异点可归纳如下：

- 1) 多数加工面的润滑都接近临界润滑状态。
- 2) 除了特别高速加工外，一般加工面上的相对滑动速度都远低于润滑上所期望的速度。
- 3) 加工中存在温升问题，而且局部温升相当高。
- 4) 多数加工面上都承受很高的面压。
- 5) 在变形过程中，加工面与工具的接触面变宽，而在极端情况下有时会增宽数百倍，因此在加工中必然要暴露出母材的新加工面。
- 6) 多数的变形无规则，因此加工面的接触状态也无规则。
- 7) 摩擦面间的间隙不能任意得到，它在加工过程中的差异很大。

压力加工是通过工具与材料的接触来传递加工力的，而材料的变形和接触状态的变化同时进行，所以不能够抛开摩擦阻力对材料变形特性的影响来分析压力加工问题。特别是由开裂破坏和起皱破坏所确定的加工极限，要由摩擦情况来确定。另外，摩擦对制件精度及加工状态、工具磨损及寿命等的影响也是很大的。

压力加工的内容涉及范围很广，它包括：弯曲、胀形、深拉伸等方式的成形加工；挤压、穿孔、锻造等方式的体积成形加工；冲裁等方式的分离加工；以及成形接合、锻接、压接等。在选择

适合每种加工的工件材料、工具材料、工具状态的同时，也要选择润滑方法和润滑剂等，这也是个重要问题。

对压力加工使用的润滑材料种类要求很广泛，一般使用的润滑剂的成分也非常多，且成分比例的变化亦很复杂。此外，各制造厂家都用润滑剂的固有商品名称来表示它，所以对润滑剂进行

表1.27 拉延用润滑剂的特性

润滑剂种类	特 性
氧化物润滑剂	氧化被覆膜在高压下能获得适宜的润滑特性，用作高压润滑剂是有效的。为使覆膜具有所必须的厚度和粘附性，覆膜的方法有：或在空气中暴露，或用碱水洗，或其他方法
无机添加剂	<p>这些添加剂起固体润滑剂的作用。作为非解理型的添加剂有白垩、锌钡白、铅白等，它们能隔开因凸模压力作用而碎裂的金属间的接触</p> <p>作为弱解理型的添加剂，有石墨，滑石，云母等，它们呈粒状，摩擦力小且易于滑动</p> <p>其他作为加入油基的添加剂有锌的氧化物、小麦粉、酵母、滑石等</p>
低熔固体润滑剂	固态牛脂肥皂膜 固态蜡膜
高熔固体润滑剂	金属磷酸盐、硫化物、氧化物与液体润滑剂混合后用于拉延加工，显示出良好的润滑性能
金属润滑剂	在铁系金属上镀覆（热浸镀或电镀）铜、铅、锌或锡等异种轻金属膜，即显示出润滑特性。以铝粉，铜粉、黄铜粉或铅等的微粉作添加剂加入皂化水或油基润滑剂中
肥皂水	使酸性肥皂的不溶性粉末在水中分散开来，就成为有效的润滑剂
肥皂水(溶剂) + 脂肪酸 + 脂肪油	通过适当的配比，可作各种用途使用
含有脂肪的皂化溶剂	可与水混合制成适当浓度的悬浊液。在多数情况下，硬脂酸系比油酸系更为理想
肥皂水 + 矿物油	这种浮化液在浅拉延中主要利用它起冷却作用
肥皂水 + 矿物油 + 脂肪酸	使用目的同上

表1.28 拉延加工用的润滑剂

材 料	加工程度	适 合 的 润 滑 剂	备 注
钢	轻	中粘性~高粘性的矿物油 肥皂溶液 (0.03~2%的牛脂肥皂) 在肥皂乳剂中加入脂肪、脂肪油、脂肪乳化剂或矿物油乳化剂所形成的润滑剂 猪油和其他脂肪油的混合物	
	中	在皂基乳化剂中加入脂肪或油, 再加入白垩或锌钡白等添加剂所形成的润滑剂 在含硫化油的皂基乳化剂中加入脂肪或油所形成的润滑剂 在含硫化油的皂基乳化剂中加入添加剂和脂肪或油所形成的润滑剂 在表面镀以异种金属, 并涂以乳化剂或肥皂溶液 在锈斑或磷酸盐生成物上加乳化剂或肥皂溶液 固态肥皂膜 (在肥皂溶液中浸渍并干燥)	
	重	使钢表面轻度锈蚀, 也可将磷酸盐或异种金属包覆其上, 然后在锈或包覆层上涂以肥皂或蜡 在硫化物或磷酸盐包覆层上涂以有添加剂的乳化剂, 而添加剂须含有硫酸盐处理油 含有硫的乳化剂 (硫充当添加剂或氯化物生成剂) 含有添加剂的硫化物乳化剂	
不锈钢	轻	谷类油、蓖麻油 蓖麻油+乳化皂 石蜡纸或油纸	
	中	涂上粉末石墨悬浊液并使之干燥 混有添加剂的高浓缩乳剂 固态石蜡膜	于退火前除去
	重	锌钡白+沸腾亚麻仁油 铅白+高浓缩亚麻仁油	
黄 铜	轻	肥皂溶液 (0.03~2%的牛脂肥皂) 脂肪+肥皂乳化剂, 或油乳剂+肥皂乳化剂 在矿物油中加入10~20%的猪油	

(续)

材 料	加工程度	适 合 的 润 滑 剂	备 注
黄 铜	中	肥皂溶液 (39~42%的牛脂肥皂)。规定脂肪酸和游离碱在0.07%以下 高浓缩脂肪乳化剂+肥皂乳化剂。规定脂肪乳化剂中的游离脂肪酸在 2%以上 在矿物油中加入25~50%的猪油。规定游离脂肪酸为1.5~5%	接触30秒以上
	重	在 1~2%的肥皂溶液中加入 1~2% 的牛脂或加入 0.25%的硬脂酸, 或者将两样都加入 浓缩猪油 (50~100%) 在肥皂溶液中浸渍后干燥	拉延深度越深接触时间越长
铝	轻	矿物油。粘度须随加工程度的增加而增加 在矿物油中混入脂肪 (10~20%的脂肪) 或冻石油	
	中	牛脂+石蜡 10~15%的硫化脂肪。浓缩至10%的脂肪	
	重	固态肥皂膜或石蜡膜 矿物油+脂肪, 或硫化油+添加剂 肥皂+脂肪乳化剂+添加剂	
镁	轻 (150°C以下的拉延)	中性肥皂 密蜡 含有20%胶体石墨的牛脂	
	重 (150~400°C的拉延)	在 260°C以下拉延时用二硫化钼 低沸点石脑油+胶体石墨	加工中不可擦去附在凹模表面上的石墨
锌	轻	中性肥皂溶液 固态肥皂膜 低游离性脂肪酸溶液 轻中性油	
	重	石墨 硬脂酸系金属皂	
钛和锆		在磷酸盐包覆层上附以固态肥皂膜、石蜡膜或二硫化钼膜	
钽和铌		硫化牛脂	

分类是困难的。如果按其具有代表性的成分进行分类以表示典型润滑剂的特性和适宜于每种金属的润滑剂，那末其结果见表1.27和表1.28。

c. 考虑了润滑因素的新加工方法 现在正通过基本分析和试验，一面改进过去的加工方法，一面开发新的加工方法——考虑了下述润滑和摩擦因素的加工方法。它们是：

1) 通过对材料施以静水压力谋求增加其塑性和产生流体润滑的静液挤压法〔11〕。

2) 能显著减小凹模面上的摩擦阻力，并能借助摩擦支承效应使材料紧贴在凸模面上而不易引起破裂的压力润滑拉延

表1.29 冷挤压用润滑剂

金 属	使 用 方 法
钢	(前作业) 经脱脂→酸洗→冲洗后，放入大约80~90℃的酸性磷酸盐溶液中浸渍，或用喷雾器喷上溶液 (后续作业) 在稀释后的热润滑溶剂（硫化油脂、猪油、氯化石蜡、硬脂酸钠、脂肪酸肥皂溶液）中浸渍之后再使其干燥，由此即在磷酸盐衬底的上表面获得均匀的附着薄膜
铝	牛脂和石蜡，脂肪酸，肥皂的混合剂
铜和黄铜	固态肥皂膜，在肥皂溶液中混入脂肪，密蜡，石蜡，猪油
锡和铅	加氢的棉籽油，硬脂酸锌，石蜡，石蜡和脂肪的混合物

注：固态膜（干膜）润滑剂 近来固态膜润滑剂被迅速使用的原因是：1) 作业性好；2) 经济；3) 不污染压力机；4) 清除简单等。

固态肥皂膜 坯料经脱脂处理后放入70~80℃的水中清洗，用80~90℃的水溶性皂剂。小批生产时用浸渍法，对于薄板和带料用滚轮涂敷。

石蜡或石蜡+脂肪 在轻度或中等变形程度的拉延时（特别是非铁金属）在大约50~65℃的溶剂中浸渍或者将同温度的溶液喷涂上去。还有使用可燃性溶剂作冷态涂敷用明火燃烧形成薄膜等方法。

石墨膜 用于高温加工等水基、油基润滑剂不适用的场合。将石墨和干燥的原材料一起放在滚筒中滚转以作涂敷，或者在水基乳化剂或石脑油等挥发性溶剂中作溶化涂敷并干燥。

法〔12~16〕。

3) 施加超声波振动使加工力大幅度降低的超声振动拉延法〔17, 18〕。

减小摩擦阻力的措施有:

1) 在挤压和穿孔加工中试验封入润滑剂的方法, 借助动水压或静水压润滑状态使摩擦系数显著降低, 而且可使局部破坏的润滑膜立即得到修复〔11〕。

2) 磷酸盐被膜或进行硝酸盐被覆处理等以及将表面作成多孔状, 都是保持润滑剂的好方法〔19〕。

3) 通过喷丸处理使表面变粗以形成油窝, 从而很好地保存住润滑剂。

4) 利用能以干膜和叠片形态产生润滑效果的材料来作表面被膜的方法〔20〕。

5) 通电润滑法〔21, 22〕。

1.4 冲压作业

1.4.1 冲压作业和冲压工人

在现代的冲压工厂中, 即使是人数相当少的工厂, 也都把模具制造和冲压作业分开来进行。

冲压工人的作业内容, 一般是在表 1.30 中所示的范围内。

在表列的项目当中, 第一项是材料切断, 通常都是按照工厂规模大小, 分别配备专门的切断工人, 但是对于人数少的冲压工厂, 多数都由冲压工人来进行切断。再之, 第二项是坯件排样, 这是在模具设计阶段由模具设计者所考虑的问题, 但在小型企业中, 大部分都不制订坯件的排样工艺文件, 即使有, 但在现场能贯彻到底的却也不多, 通常的排样都是在生产现场重新考虑之后才予以实施的。

1.4.2 坯件的排样和材料利用率

a. 坯件的排样和材料利用率 所谓排样是表示在被加工材料上布排所需形状和尺寸的冲裁坯件的方法的一个术语。材料利

表1.30 冲压工人担负的作业范围

序号	作业项目	内 容
1	材料切断	通过作业达到要求的尺寸，通过定尺将板料或卷料切断并使 之与要求的数量相一致
2	坯件排样	确定坯件的排样，冲裁列数。另外，是采用一次冲裁还是采 用往复冲裁等作出安排
3	模具安装	从固定的存放位置运来模具，放在压力板上，正确地安装在 滑块和压力机的工作台上
4	模具调整	调整挡料销的位置，使之与排样计划相符合，进行试冲作业
5	冲压加工	把材料送到模具里面进行冲压加工，取出冲压件及废料
6	拆卸模具	作业完毕后，将模具卸下，鉴定模具的损耗程度，然后存放 到固定位置或者送到模具修理部门
7	设备的维 修和检查	首先是作注油等日常保养工作，再是设备的保养维修以及定 期检查等设备管理业务

用率，则是材料有效利用部分的比例，它用坯件所占面积与原材料面积的百分比来表示，即

$$\text{材料利用率} = \frac{a_2}{a_1} \times 100(\%)$$

式中 a_1 ——原材料的面积；

a_2 ——坯件的面积。

现在的冲压件的成本构成，如图 1.72 所示，材料费所占比例非常大，颇为可观地超过了加工费用。因此，提高材料利用率就成了降低冲压件成本的直接手段。

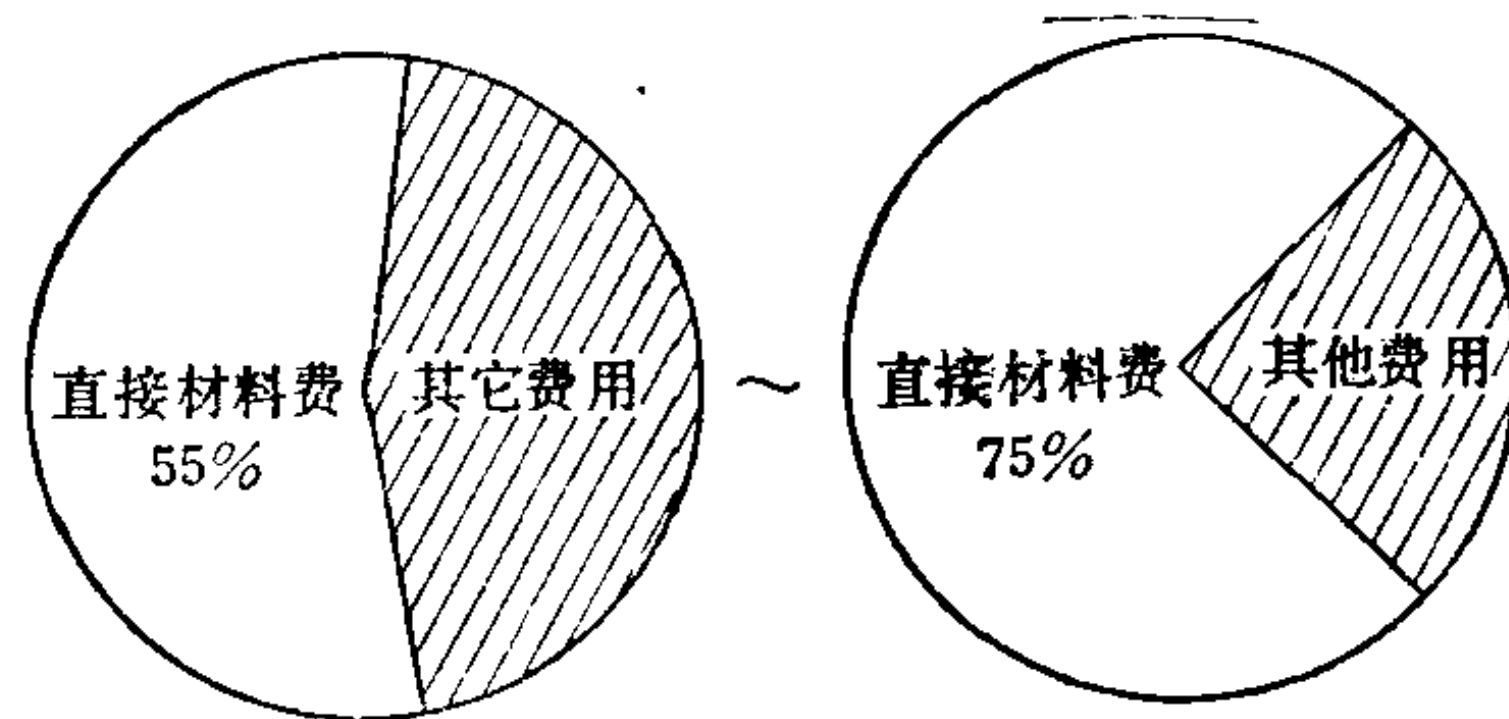


图1.72 在成本构成中直接材料费所占的比例

为了提高材料利用率，卷料的利

用、购入量的标准、落料生产线的设置情况、标准使用量的确定、VA·VE 的研究、废料的处理等问题虽说都会直接间接地发挥作用，但是最直接的因素还是坯件的排样，现场作业人员对此必须

深切关注（有关这方面的问题请参照 1.3.3 和 2.3.5 等）。

1.4.3 现场作业和效率

a. 压力机的负荷率 所谓提高冲压车间的效率，不外乎是用最小限度的工时，使压力机发挥最大限度的负荷率。如果压力机的负荷率低，则必须追究其原因，以便采取改进措施。

还有，必须确立负荷率指标，此项指标又必须随时间的推移而逐渐提高。

压力机的负荷率是压力机的日总有效行程次数与其固有行程次数的比，而日有效行程次数则由安装在压力机上的计数器来记录。其负荷率用下式计算：

$$\text{设备的负荷率(\%)} = \frac{\text{日有效行程次数}^{\ominus}}{\text{每分钟额定行程次数} \times \text{日作业时间}(\text{min})} \times 100$$

b. 作业的动作分析 压力机是由操作者开动的，因此掌握以机械为中心的操作者的动作，对于提高压力机的负荷率是非常有用的。

为了掌握操作者的动作内容，最好是操作者能知道自己的时间用在了什么地方。而使用广泛的测定动作时间的方法，则是在工作中进行抽查的调查分析法。至于如何确定测定项目，应根据人员的情况加以考虑，多少有所不同，不过一般把它们划分为如表 1.31 那样的三个大类七个细目也就可以了。

c. 压力机负荷率的指标 表 1.32 是 H 公司采用抽查法对压力机操作人员一个月内的动作进行调查所得结果的一部分。其基本作业占 34.4~37.2%，而基本作业中的主体作业仅占 13.6%。相反，准备终结作业、辅助作业、现场管理一类的事务却占用了相当惊人的大部分时间。

不言而喻，在分析操作者的工作中所呈现出来的基本作业率

[⊖] 原文分子直译是“日产制件数”，这是不确切的。因为对于单工序制件，“日产制件数 = 日有效行程次数”，而对于多工序制件则并非如此，故译为“日有效行程次数”。——译注

表1.31 用于冲压作业的动作分析项目和内容

大 类	细 目	内 容
准备终结 作 业		在加工一批产品的开始和终了阶段只出现一次的作业：如运送模具，安装模具，调整和拆卸模具及其他
基本作业	1) 主体作业	模具上放着坯料或半成品，滑块动作时的作业
	2) 附属作业	上述作业之外的重复作业：如从料箱中取出坯料，把制件放入箱中，踩动踏板，掀动按钮，加油及其他
辅助作业 及 其 他	1) 自然需要	基于生理要求的自然需要时间：如擦汗，大小便，更衣，洗手，饮水及其他
	2) 辅助作业	基本作业以外的辅助作业时间，一般与工作的进展成比例地出现：如由操作者搬运坯料或辅料，辅料及消耗品的出库，清除切屑，清扫和搬运废屑，作业中的分送、检测称量及其他
	3) 现场管理	由管理制度、设备准备、集体活动等制约条件而发生的作业延误：如作业前的清扫及礼仪活动，记录作业日报，作业指示，要领的说明，机械设备的维修、检查，材料标志，停电、停水等作业故障及其他
	4) 疲 劳	由上述以外的疲劳所产生的时间消耗

(或主体作业率)和机械设备的负荷率不是完全的数字比例关系。由于基本作业率甚至大于机械设备的负荷率，所以，不得不认为实际的有效行程比这个值还要低一些。

压力机的负荷率取决于以下因素：生产方式——多品种的小批量生产和少品种的大量生产、模具更换次数的多少、由机械设备大小确定的固有行程次数以及加工方式（如冲裁、弯曲、拉延）等，它随这些因素而相异。所以，各工厂应当制定负荷率指标，并尽力使其逐步提高。

1.4.4 缩短准备时间的途径

所谓工序准备，就操作分析而言，是指模具的准备和用后处理等作业。一般说来，造成压力机负荷率不高的最大原因就是工序准备时间长。这是使用模具的压力加工的根本弱点，模具的安

装拆卸时间增加，则工序准备时间的比例亦增加；另外如果制件和压力机一大，模具确实也要变大，而且模具的安装拆卸时间也随之相应地增长。即使以表 1.32 所示为例，其工序准备所占时间的比例，实际上也达到了 15~30%；而当压力机的吨位进一步增加则换模时间也相应增加，对于 800t 机械压力机来说，换模时间甚至有占到 47% 的例子。

表 1.33 为缩短工序准备时间的实际方法的汇集。

a. 模具模架化
将模具模架化，就不需要前后左右对模了，所以对缩短工序准备时间是非常有效的。

b. 在模具上安装闭合高度控制块
闭合高度控制块是确

表 1.32 冲压作业分析表

设备分类	作业内容	准备 终结 作业	基本作业		辅助作业及其他			
			主体 作业	附属 作业	辅助 作业	现场 管理	疲劳 影响	自然 需要
300t·CLP	主操作者	29.7	13.6	23.6	15.2	13.6	2.9	1.4
	助手	28.7	0.0	37.8	18.4	11.9	2.5	0.7
200t·CLP	主操作者	20.4	13.2	21.2	19.4	18.3	5.7	1.8
	助手	14.9	0.0	30.7	28.2	16.9	8.1	1.2
150t·CLP	主操作者	15.0	9.7	26.8	21.8	20.4	4.6	1.7
	助手	12.3	0.0	32.7	25.0	24.4	3.7	1.9

注：CLP——齿轮偏心压力机（无曲柄压力机）；
W——双曲柄压力机。

表 1.33 缩短准备时间(换模时间)的方法

方 法	项 目
模 具	模具模架化 在模具上安装闭合高度控制块 模具标准化 采用快换式的模具结构
设 备	采用活动工作台压力机 采用气动夹紧机构 采用箱式压力机
工具器具	使用推送模具台车 使用模具定位台车

定模具闭合高度的垫块。图 1.73 中用断面线表示的零件即为闭合高度控制块。其作用是把上模限制在完成加工的最佳位置而不使它再下降。由于把闭合高度控制块安装在上模和下模之间，所以模具上下位置的调整就变得非常简单。也就是说，一旦上模触及到闭合高度控制块即可停止向下运动，上下方向的对模过程自然也就结束了。这种状态下的模具高度即为适宜的模具闭合高度，如果按此闭合高度调整压力机滑块下死点到工作台面的距离（闭合高度），那么剩下的工作就仅仅是固定模具了。

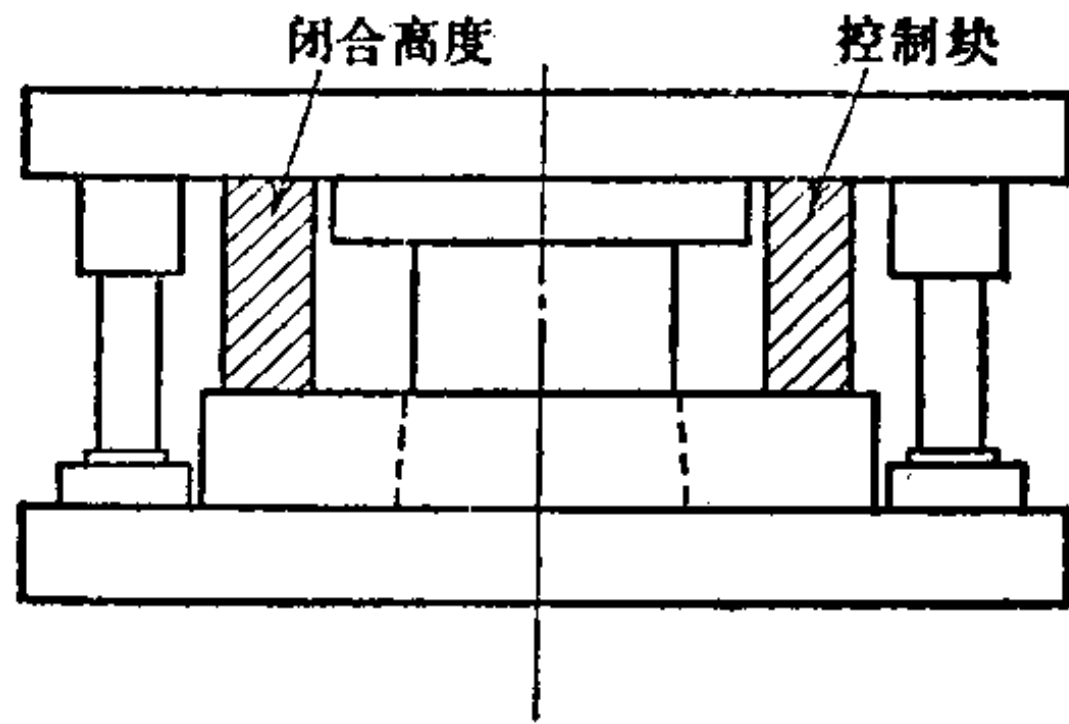


图1.73 模具闭合高度控制块

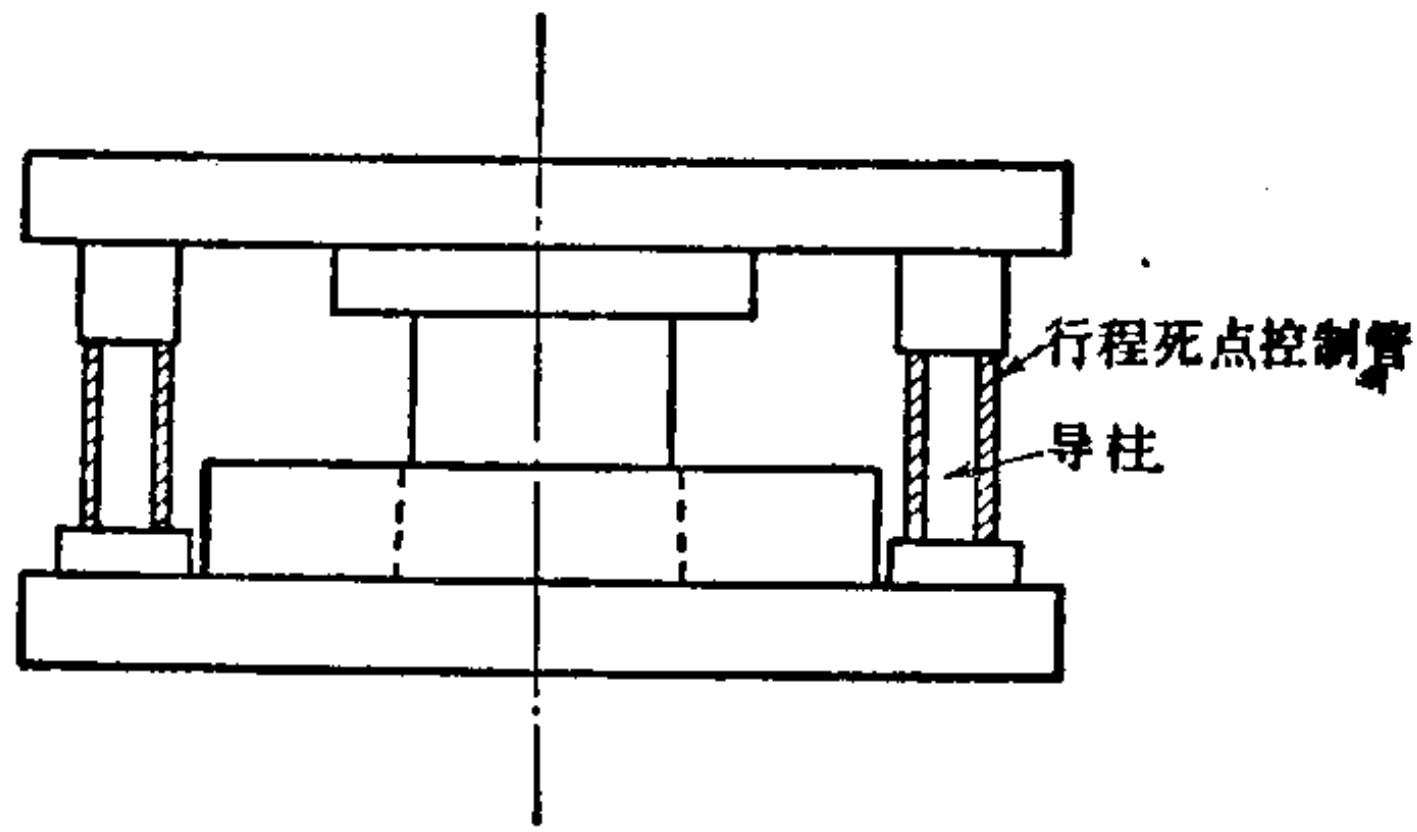


图1.74 简化模具闭合高度控制块的方法

此外，在模具的导柱上安放闭合高度控制管是一种简化模具闭合高度控制块的方法，如图 1.74 所示。这种管件称为行程死点控制管。

c. 模具标准化 模具的标准化也对缩短工序准备时间有很大影响。特别是如图 1.75 所示那样，如果能将模板紧固部分的

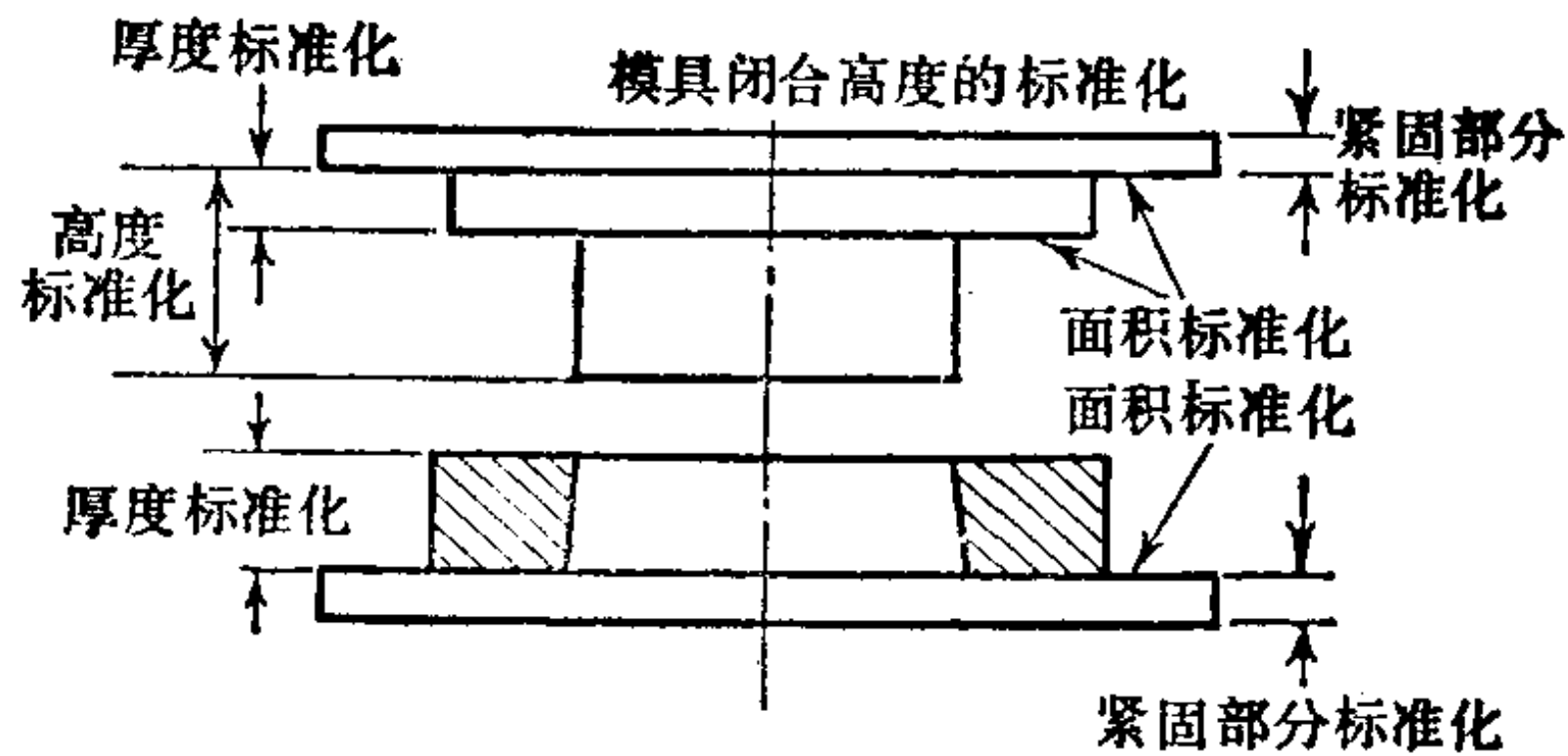


图1.75 模板紧固部分的标准化

厚度按规格化制作，将模具闭合高度按规格化设计以及使用规格化的压板、垫块等类工具，那么，就可使工序准备时间大幅度缩

减。

d. 采用快换式模具结构 可作快速安装和拆卸结构的模具，称为快换式模具。图 1.76 即其一个典型的例子。这种形式的模具，今后可能还会有更大的发展。

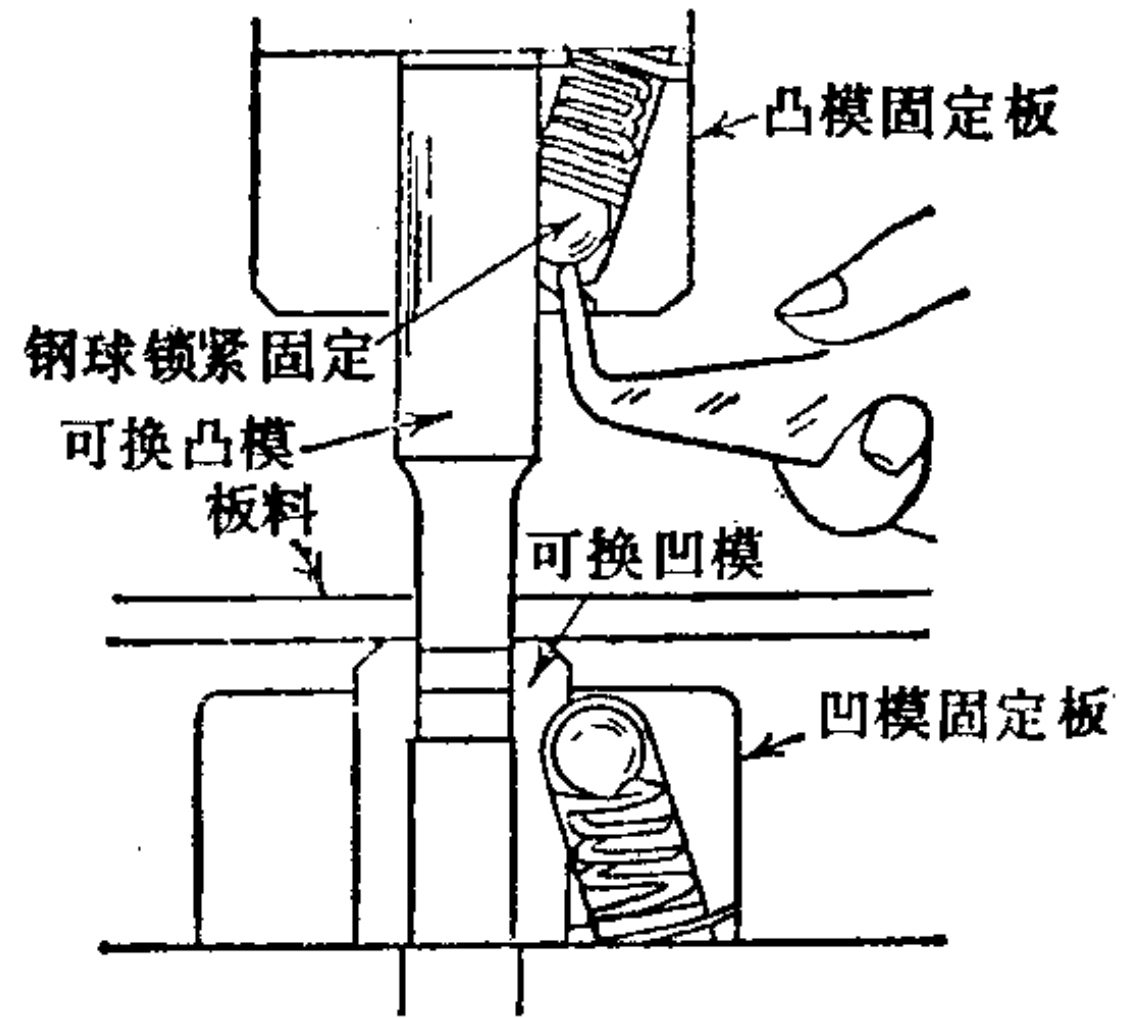


图1.76 快换式冲模

e. 采用有活动工作台的压力机 根据压力机应有的状态可以想出多种缩短工序准备时间的办法。但一般认为其中能直接获得很大效果的办法，就是在压力机上采用活动工作台结构（见图 1.77）。这种压力机的结构形式，正如它的名称所知，即工作台通过液压等动力可沿水平方向运动，并可移出压力机之外。其目的：

一是把工作台拉到机架外面，并在该位置安装模具；二是在作业过程中安装模具。这种形式的压力机通常具有两个工作台，以便作业结束后，在推出一个的同时，把另一侧的工作台拉入工作位置。

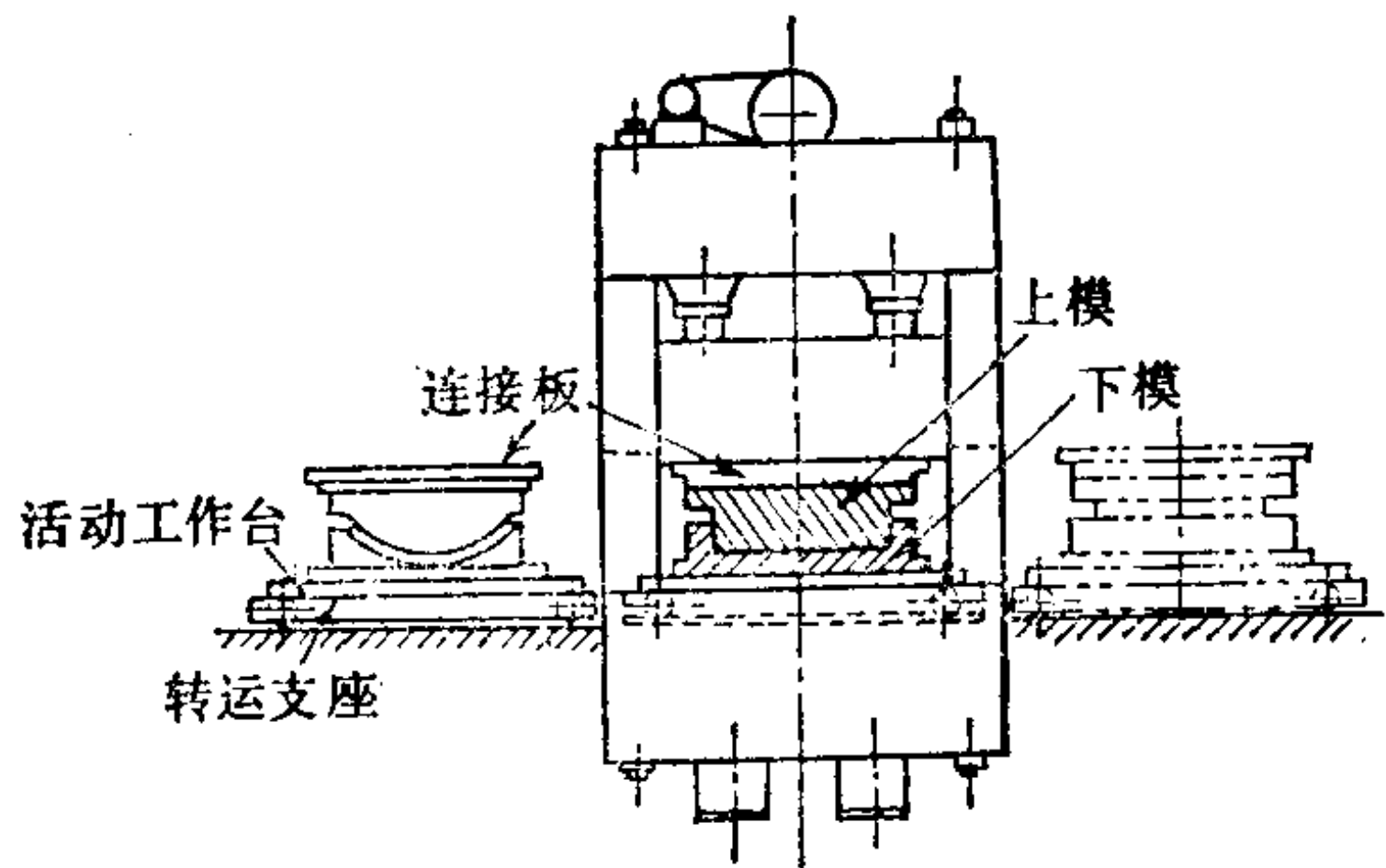


图1.77 活动工作台

费时的模具安装作业，大多数在压力机外面完成，然后把工作台拉到工作位置，接着用气动夹紧机构同时将上模紧固，这样便可开始作业。因此，采用了活动工作台对缩短工序准备时间是非常有效的。在这种场合下缩短的工序准备时间，也就是缩短在设备负荷率中的时间，而工序准备时间本身的绝对值并无改变。

f. 采用气动夹紧机构 如果是大型模具，则紧固部位就不

只两个，而需要多个，并且夹紧力也要足够大。在这种情况下，就需要很长的工序准备时间。若采用气动夹紧机构，易于进行紧固作业，并使其作业时间缩短。

图 1.78 是气动夹紧机构安装在滑块凸缘上的情况。该装置是通过压缩空气把上模板紧固在滑块上面的一种工具。由于整个部分是一齐动作，并可在瞬间紧固各个地方，所以与原先通过螺栓紧固的方法相比，可以缩短相当多的时间。

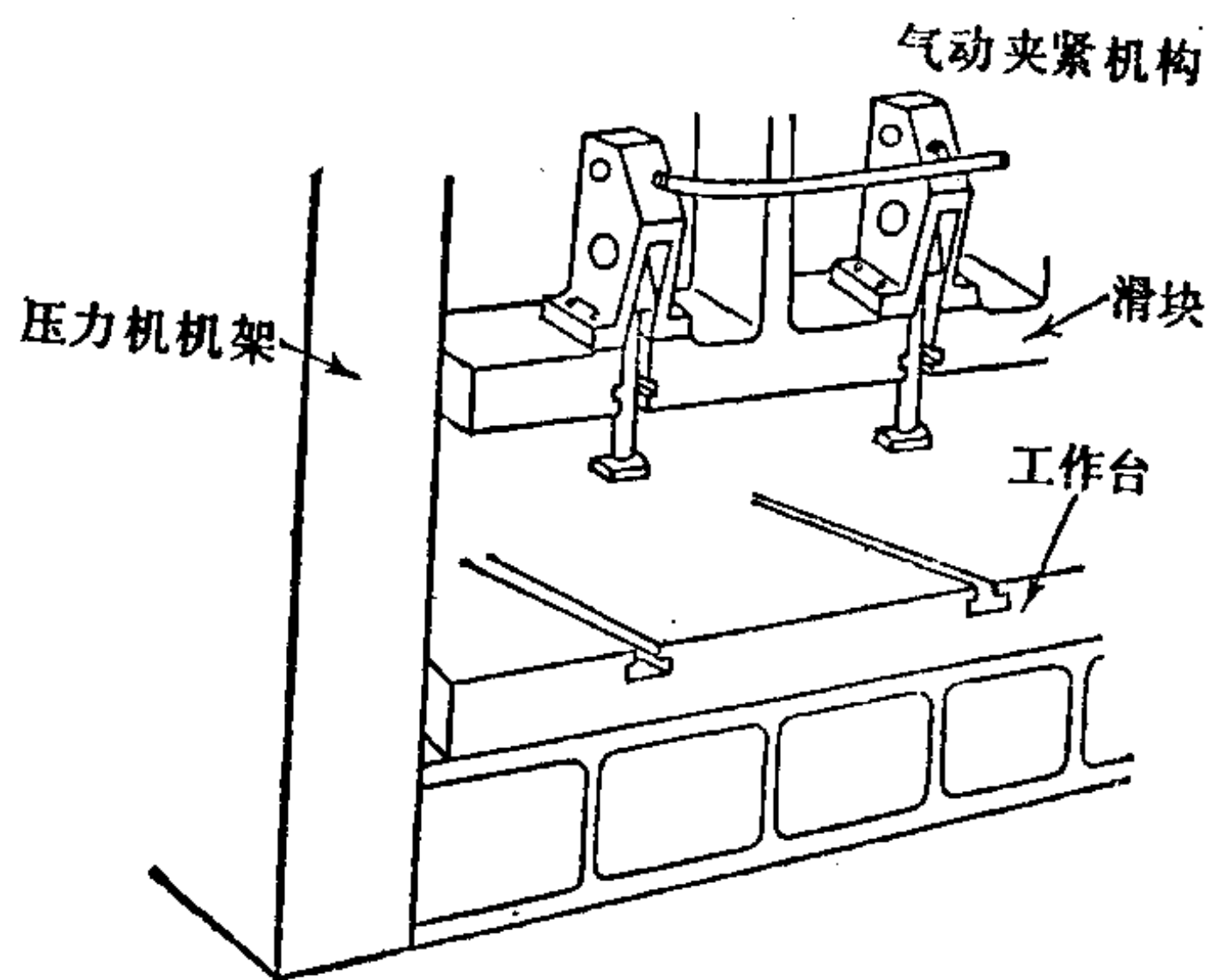


图1.78 气动夹紧机构

g. 采用箱式压力机 在没有活动工作台和普通大型压力机上，如果压力机的头部向外突出，那末用起重机吊起的模具就不能靠近工作台。反之，若压力机的头部形状不是向外突出的，那么就可以使模具靠得很近。在某些情况下，如有可能将起吊状态下的模具的一端架到压力机的工作台上，则模具的安放也就容易了。选用这类模具接近性良好的压力机，虽说是缩短工序准备时间的间接手段，却也是行之有效的方法之一。

h. 使用模具推送台车 如图 1.79 所示，将能安放模具的台车停在压力机的前面，把模具平稳地卸于其上，或是把台车拉

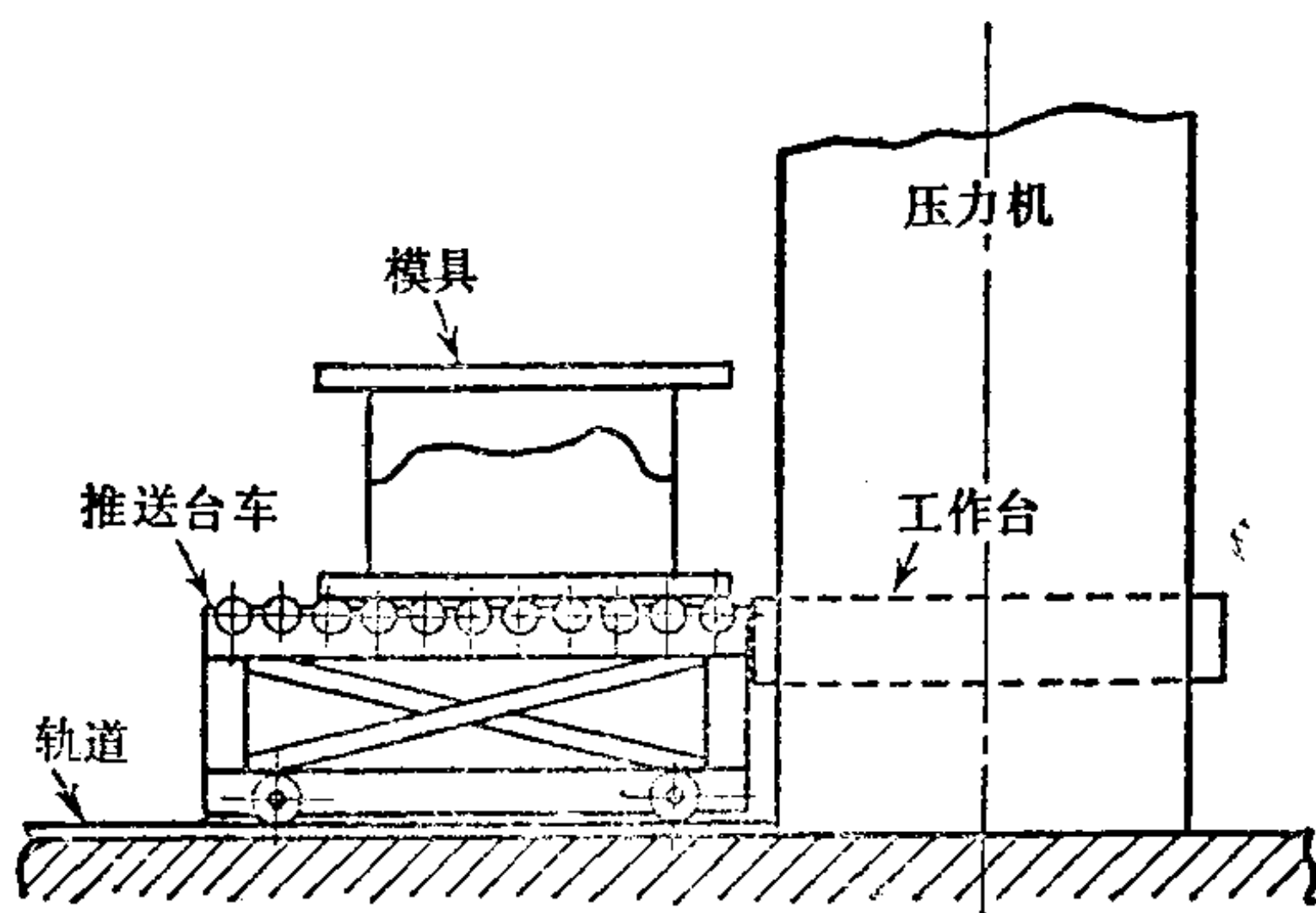


图1.79 模具推送台车

到压力机工作台的正前方，然后将模具推到工作台上。这样操作既安全又便于进行准备工作。

(i) 使用模具定位台车 用推送台车把模具送到压力机工作台的前面后，如何放置送上工作台后的模具？使用模具定位台车，就是解决这类问题的措施之一。

也就是说，使用在工作台上能自由运动的台车，将模具放置其上，并让它正确地停在所要求的位置。然后使压力机滑块下降，当滑块底面接触到模具时即行停止，并把模具紧固地安装在滑块的凸缘上。这时，将滑块微微升起（利用调节螺杆），退出台车。重新使模具下降，当其底面与工作台面接触后，就把模具固定在这个位置上。采用这种方法是不会有意外的，即使是重型模具，也可以简单地定位和安装。拆卸模具时也与此相同，把模具卸在台车上就可以很方便地将其取出。

1.4.5 现场作业中的注意事项和规则

a. 压力机的使用和运转中的规则 压力机如果不是处于正常状态，就不能满足工作要求。特别是冲压作业往往伴随有很大的危险性，所以，决不允许在不安全的机械设备上作业。此外，还必须进行日常保养和检查。现将压力机的使用和运转上的规则阐述如下：

- (1) 接通运转开关之前，一定不能疏忽加油检查。
- (2) 绝对不允许用湿手操作开关。
- (3) 在没有丫—△启动装置的情况下，要一边注意电流表一边缓缓接通开关。
- (4) 接合开关时，如出现不正常的电火花要查明原因，予以消除。
- (5) 合上开关后，判明各通电指示灯是否亮了。
- (6) 开动停顿状态的设备时，须在充分加注润滑油后再慎重启动。
- (7) 在寒冷气候条件下启动设备，须慎重操作，同时要进
行数分钟空运转。

(8) 在使用压缩空气的机械设备上, 要确认压力上升至要求气压方能使用。

(9) 对于制动器的效果和离合器的动作要经常予以充分注意, 如有故障, 一定要排除。

(10) 注意运转中的杂音, 感觉异常时, 要停止运转、查明情况。

b. 工序准备作业中的注意事项和规则 在冲压作业中, 对于生产中已用过的某些模具若再次进行生产时, 即使模具安装良好, 也不要立即合上开关投入大量生产。一般都是反复进行象下面那样的谨慎操作, 来判断生产出来的制件质量合格与否。操作过程是: 运送模具→安装模具→手动试运转(在大型压力机上为机动试运转)→机动运转→试冲→检查试冲件→调整模具→开始大量生产。

当确认制件没有问题后, 就可以按已确定的程序或标准送进原材料。因此, 冲压作业的重要工作是准备工作(工序准备工作)。如果完成了准备工作, 就可认为冲压作业的高潮已过。现将有关准备工作的注意事项列举如下:

(1) 进行模具安装和调整时, 要切断电源, 待确实判明压力机停车之后再行操作。

(2) 切断电源时, 须先将滑块降至下死点停住。

(3) 紧固螺栓应设置在靠近模具的地方作紧固, 如图1.80所示。

(4) 安装模具用的垫块和模具的紧固面应当平行, 如图1.81所示。

(5) 为了不使模具滑动, 要使用具有一定刚性的压板将其压紧。

(6) 为避免模具滑动时, 要垫上报纸或砂纸再作紧固。

(7) 不要使滑块的调节螺杆探出过多。

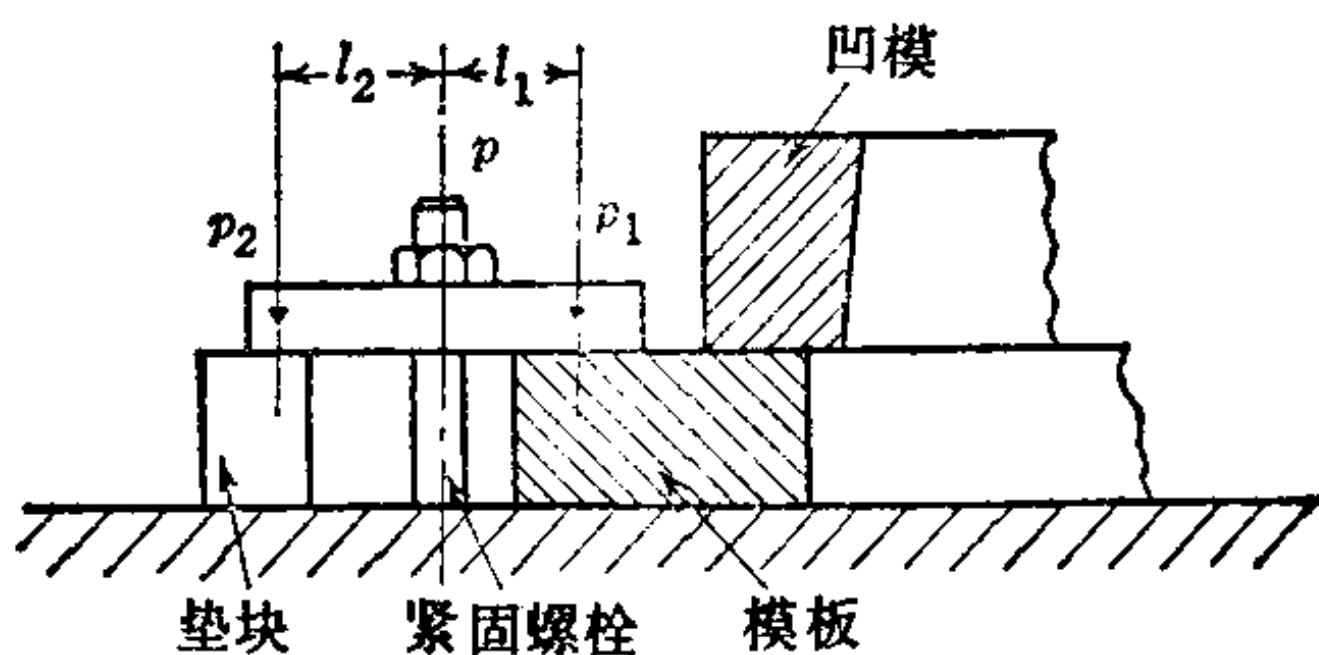


图1.80 模具的安装和紧固螺栓的位置

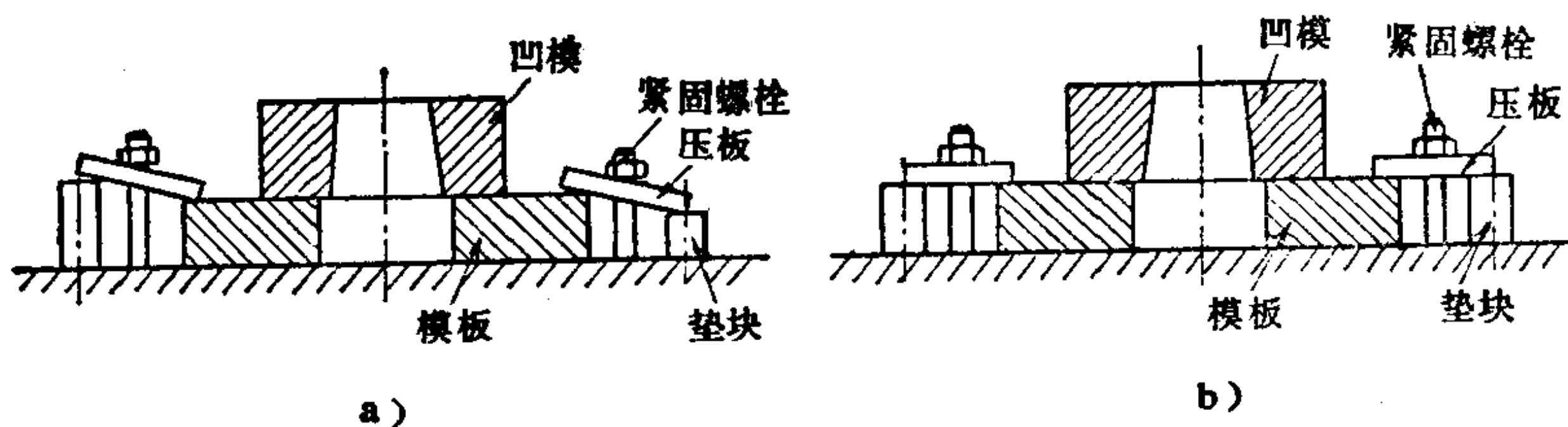


图1.81 安装模具用的垫块高度

a) 不正确 b) 正确

- (8) 调节螺杆的配合长度至少要达到螺纹直径的 1.5 倍。
- (9) 滑块调节完成之后，要准确可靠地把螺杆锁紧。
- (10) 拆卸模具时，要在确实判明压力机停止运转后才能动手。

c. 直接操作上的注意事项和规则 冲压作业比其他任何一种金属加工方法都要危险，绝对不许发生人身事故。因此，所谓直接操作中的规则和注意事项，就必须以安全生产为中心。虽说制件的精度、生产效率等方面也是重要的，但是生产管理人员还必须把杜绝危险作业作为自己分内的工作，而且操作人员本身也必须深刻地理解。从上述考虑出发，将操作上的规则和注意事项列举如下：

(1) 不管是运转还是停车中，不论在什么情况下，都不许把手或者身驱伸进模具中间。

(2) 在共同作业中，要把启动按钮和停止按钮串联连接，必须保证各自的专用性。

(3) 除绝对安全的作业外，必须使用安全装置或手工工具。

(4) 除了连续作业外，不允许把脚一直放在压力机离合器踏板上进行操作。应每踩一下就把脚挪开。

(5) 当机械设备处于运转状态时操作者不能离开操作岗位。

(6) 在运转中要注意润滑是否正常。

(7) 操作中止時，一定要切斷電源使機械設備停止運轉。

(8) 無關人員，不許用手觸動設備和控制裝置。

(9) 不許揷動停車狀態下的壓力機開關，不許踏動壓力機離合器踏板。

(10) 嚴格遵守已被確定下來的安全規程和操作規程。

引用文獻

- 1) J.M. Juran, Quality Control Handbook (1950).
- 2) JIS Z 9002~9021.
- 3) 佐々木, 品質管理の實際, 工業調査會.
- 4) 秋山, エンジニア, プレス作業の安全, 2 (1968).
- 5) 日本塑性加工學會プレス便覽編集委員會編, プレス便覽, 丸善.
- 6) 労働安全衛生法, 第 59 卷; 労働安全衛生規則, 第 36 條, 昭和 47 年労働省告示, 第 92 号, 第 3 條.
- 7) 労働安全衛生法 (昭和 47 年, 法律第 59 号); 労働安全衛生法施行會 (昭和 47 年政令第 318 号); 労働安全衛生法, 規則 (昭和 47 年労働省令第 325 号).
- 8) Richard Muther, Simplified Systematic dayout Planning.
- 9) 澤瀉, 京谷, 新版, 機械基礎の設計と据付, 丸善.
- 10) 大築, すぐ使える防振基礎の設計法.
- 11) 工藤, 日本機械學會誌, 69-568 (1966), 601.
- 12) 春日, 野崎, 日本機械學會論文集, 24-146 (1958), 720, 728.
- 13) 春日, 近藤, 日本機械學會論文集, 26-169 (1960), 1290.
- 14) 春日, 堤, 日本機械學會論文集, 30-214 (1964), 711.
- 15) 春日, 堤, 日本機械學會論文集, 30-214 (1964), 720.
- 16) 堤, プレス技術, 2-2 (1964), 69.
- 17) 隈部ほか, 日本機械學會, 第 41 期全國大會前刷集, No. 81 (1962), 61.
- 18) 隈部ほか, 日本機械學會, 第 42 期全國大會前刷集, No. 97 (1963), 91.
- 19) 久能木, 日本機械學會論文集, 23-134 (1957), 749.
- 20) Coupland and Holyman, 西村訳, プレス技術, 3-11 (1965), 56.
- 21) 中村, 青野, 潤滑, 9-1 (1964), 31.
- 22) 中村, 青野, 機械試驗所報, 18-1 (1964), 27.

参考文献

- (1) 「簡易抜き型」塑性と加工, 15-157 (1974).
- (2) 「騒音・振動」塑性と加工, 15-160 (1974).
- (3) 「プレス工場の作業環境を考える」プレス技術, 10-1~10-13 (1972).
- (4) 「プレスシステムの安全をめざして」プレス技術, 12-9 (1974).
- (5) 「図解・プレス安全対策実例集」プレス技術, 10-7 (1972).
- (6) 「プレス工場の振動と騒音」プレス技術, 12-3 (1974).
- (7) 「多種小量生産における高能率化への管理手法」プレス技術, 11-8 (1973).
- (8) 「プレス作業改善実例集」プレス技術, 13-5 (1975).
- (9) 「プレス機械・工具ガイドブック」プレス技術, 8-6 (1960).
- (10) 「経済的な材料取りの實際」プレス技術, 9-2 (1971).

2. 冲裁加工

2.1 冲裁加工概述

塑性加工一般是指在不引起被加工材料破坏的情况下使其产生塑性变形，以得到所需形状尺寸的制件的加工方法，而冲裁加工则是通过破坏被加工材料，把制件从原材料中分离出来的加工方法。虽然与切削加工时切屑从被加工材料上由于破坏而分离出来的现象有相似之处，而冲裁加工大多数是在压力机上进行的，同时因为它往往和弯曲、拉延等成形加工组合在一起进行，所以把它列在塑性加工领域内比列在切削加工领域内更为合适。冲裁加工用称为落料和冲孔的方法进行大量钣金件的制造，并为其它冲压加工制备坯件。它在冲压加工中占有很重要的地位。冲裁加工本身非常单纯，完全能成为简单地精密加工方法，可是如果其模具的设计和制造不适当，就得不到满意的结果。

这里所说的冲裁加工是以适当的工具，在板料、线材或棒料的所要求断面上产生以剪切应力为主的应力，将材料剪切、分离成所需尺寸和形状的加工方法之总称，根据其使用目的将其分类如下：

a. 落料 如图 2.1 a) 所示，从板料上冲切出所需形状的制件的加工，称为落料。在落料时采用如图 2.2 所示的模具，将凹模孔精确加工成所需的形状和尺寸，凸模和凹模之间保持一个小的缝隙，称为间隙。

为减小冲裁力，可象剪刀那样把模具的刃口面作成相互倾斜的。在落料时，如图 2.3 a) 所示，把凹模面作成斜的而凸模面必须和模具轴线垂直。把这样的模具面相互倾斜的剪切，称为斜剪。由于剪切刃口制成斜的则材料将承受板面方向的推力，为避免材料的滑动，如图 2.3 b) 所示可使模具面的倾斜呈左右对称以

抵消水平推力，或者采用适当的压料装置。

b. 冲孔 冲孔和落料相反，如图2.1 b)所示，是在制件上

冲出所需孔的加工。这时凸模的尺寸和形状将根据孔的尺寸和形状来作。同样，凸模可作成如图2.3 c)或 d)所示的斜刃，而凹模面必须作成和模具轴线垂直。一般不冲直径小于板厚的孔，在冲网孔板或摄影胶片上多个同样的孔（称为冲多孔）时，其本质不变。

c. 剪切(狭义)

落料和冲孔的剪切轮廓都是封闭曲线，而所谓狭义的剪切是指用剪切机剪切板料的加工，如图2.1 c)所示。其剪切轮廓一般由线段和曲线所组成，从材料的一端到另一端将材料剪开。当在剪切机上剪切大型板料时，往往需要较大的剪切力，为了降低剪切力，可将剪切机的刀刃作成互呈倾斜的，其倾斜角称为斜角。在用斜剪剪切时，被剪材料

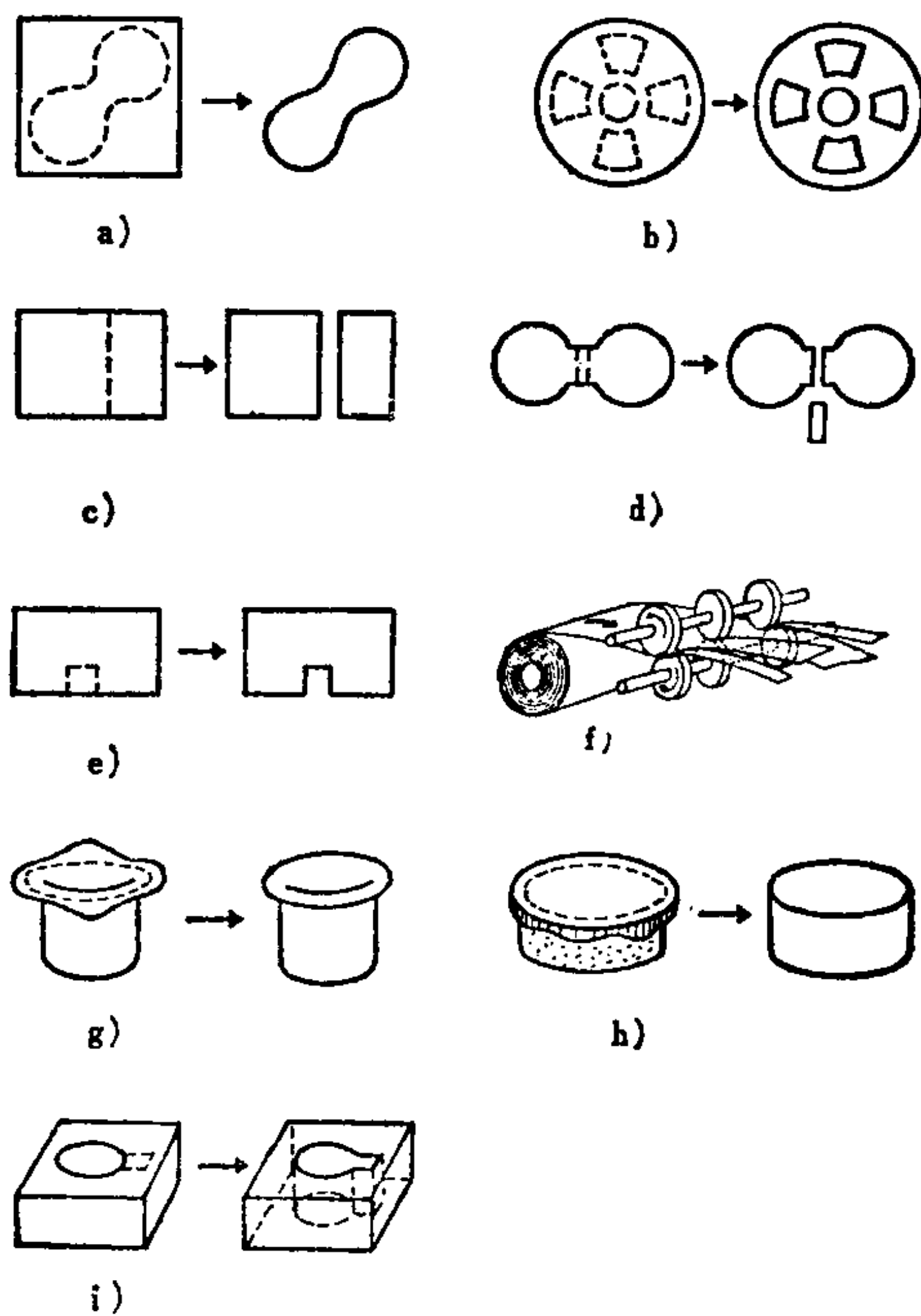


图2.1 各种冲裁加工

- a) 落料 b) 冲孔 c) 剪切(狭义)
 d) 分离 e) 切口 f) 纵切 g) 切边
 h) 修整 i) 拉削

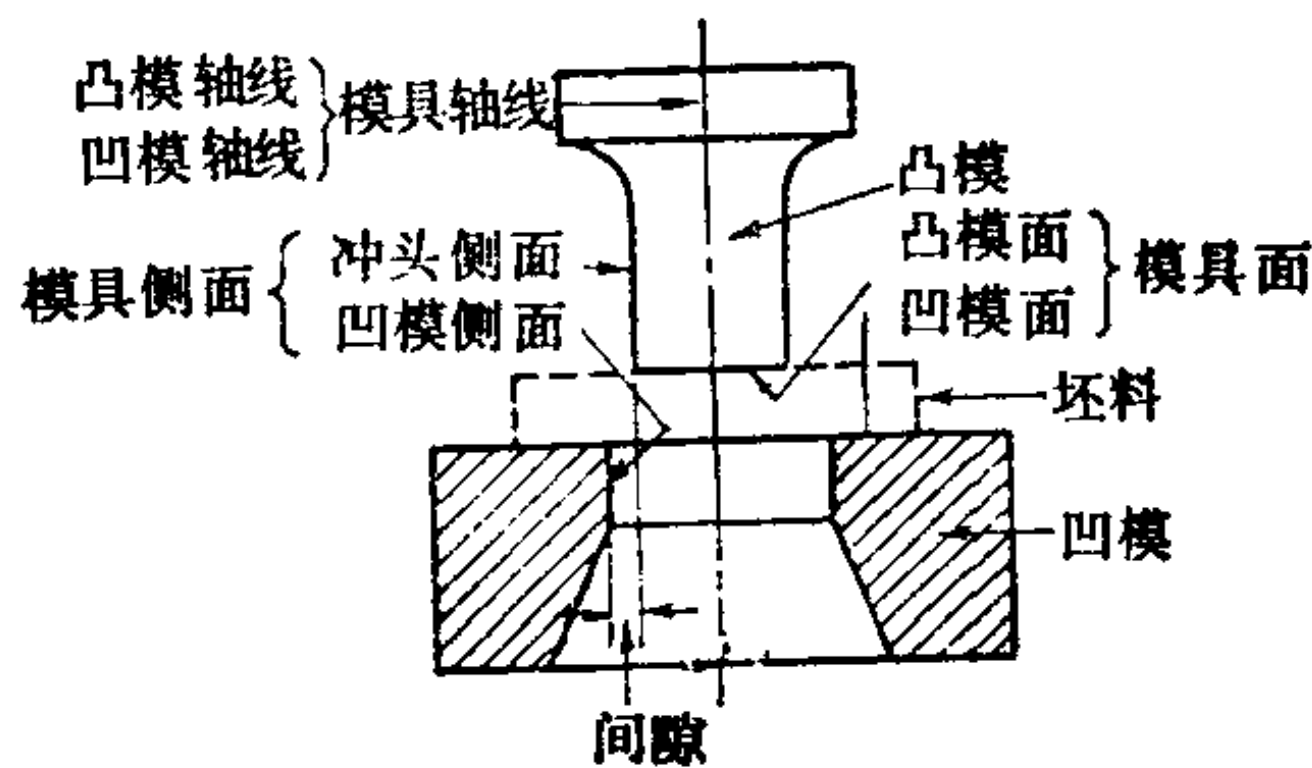


图2.2 冲裁模各部分的名称

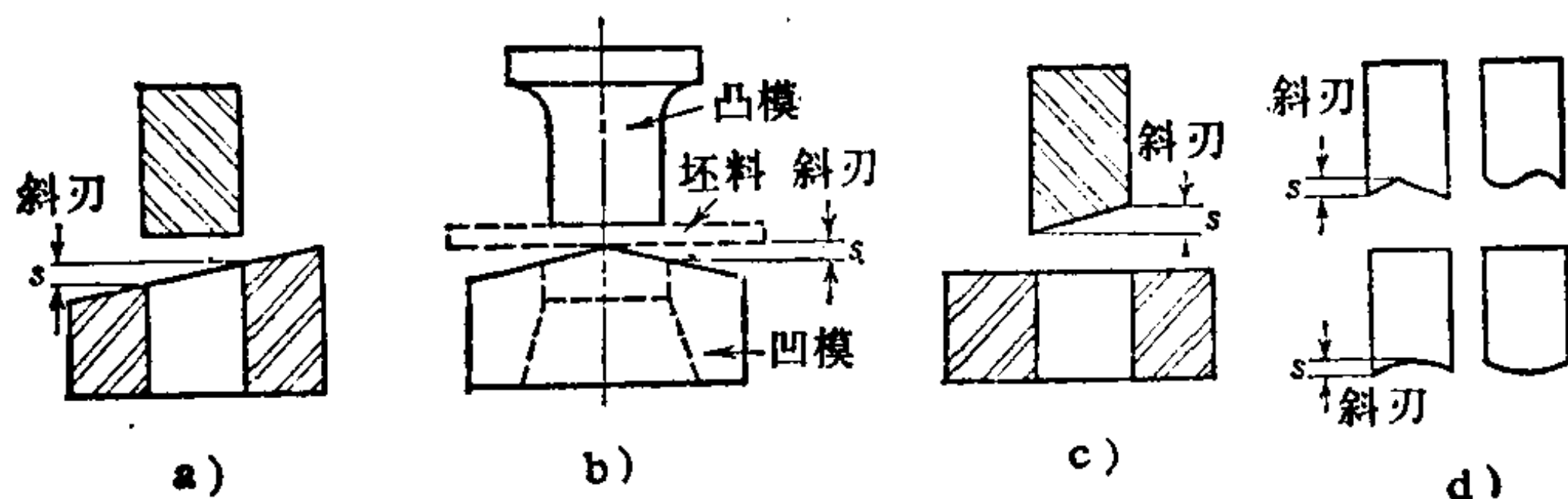


图2.3 带斜刃的冲裁模示例

a)、b)落料 c)冲孔 d)冲孔时用的斜刃凸模

将沿刃口多少有些弯曲，并沿板面的平行方向推动，当斜角大时由于材料在下模（固定刀刃）上滑移而会出现剪不断的情况。为了防止这种滑移，往往可减小斜角或采用压料板来解决。同时，在这种狭义剪切中还包括分离、切口和纵切加工。分离加工是指将制品由两面剪切成两件的加工，如图2.1 d)所示。切口加工是指在半成品或条料的周边切出缺口，如图2.1 e)所示。如图2.1 f)所示，纵切是用圆盘切刀沿长度方向剪切卷料，使之成为所需宽度条料的加工方法。

d. 切边 如图2.1 g)所示，切边是用来剪切拉伸件的凸缘边或模锻件飞边的加工，它和落料加工是完全相似的，其不同点只是在于每次加工必须是一个制件。圆筒形件的切边，可以采用车削加工，而盒形件的垂直边的切边加工，则需采用特殊的切边机进行更为方便。

e. 修整（修边）一般落料冲孔的制件其剪切面不够平滑，则可用和落料相似的模具，对剪切面处的材料再进行少量的切削，如图2.1 h)所示。这种使剪切面光洁度提高的加工方法称为修整。这时，凸模和凹模间的间隙尽可能取小些。

f. 拉削 它是用台阶凸模或凹模的刃口去精切制件的侧面，如图2.1 i)所示。它有时可用于加工沟槽，有时亦用于扩大孔的轮廓尺寸。这种加工方法是属于切削加工领域的，但亦和修整加工一样，因为它也大量用于冲压加工板金制件，所以也是一种很好的剪切加工方法。

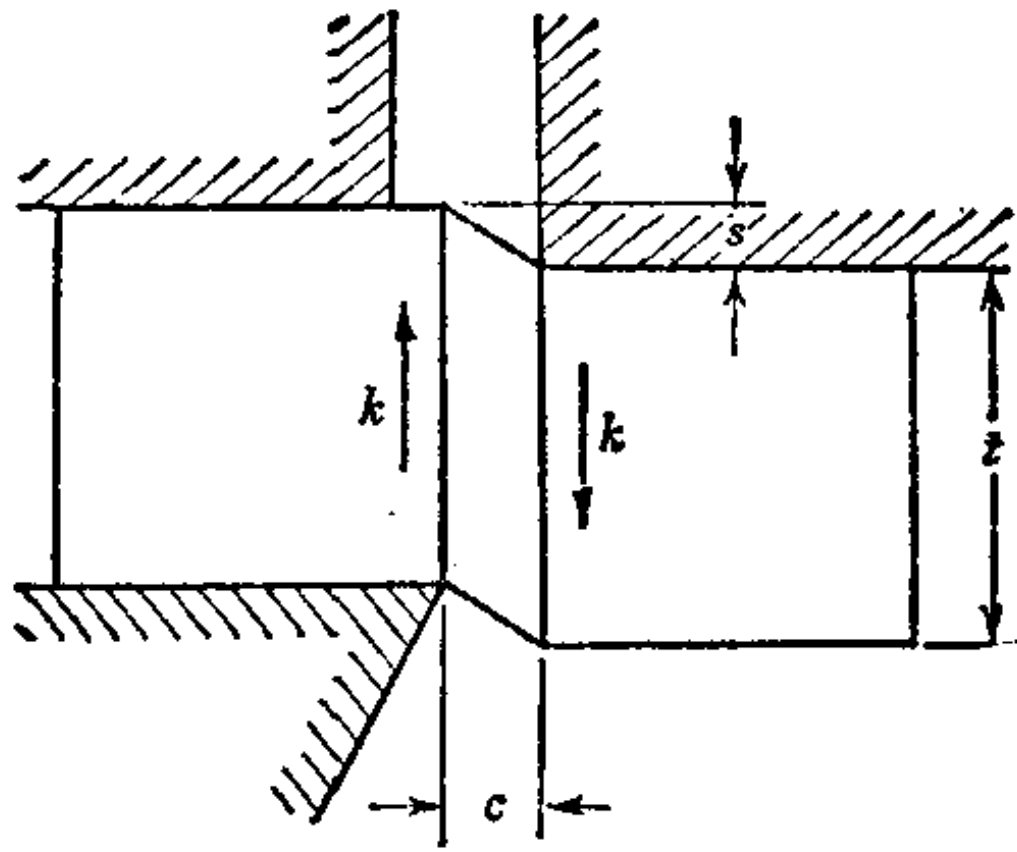


图2.6 单纯剪切期

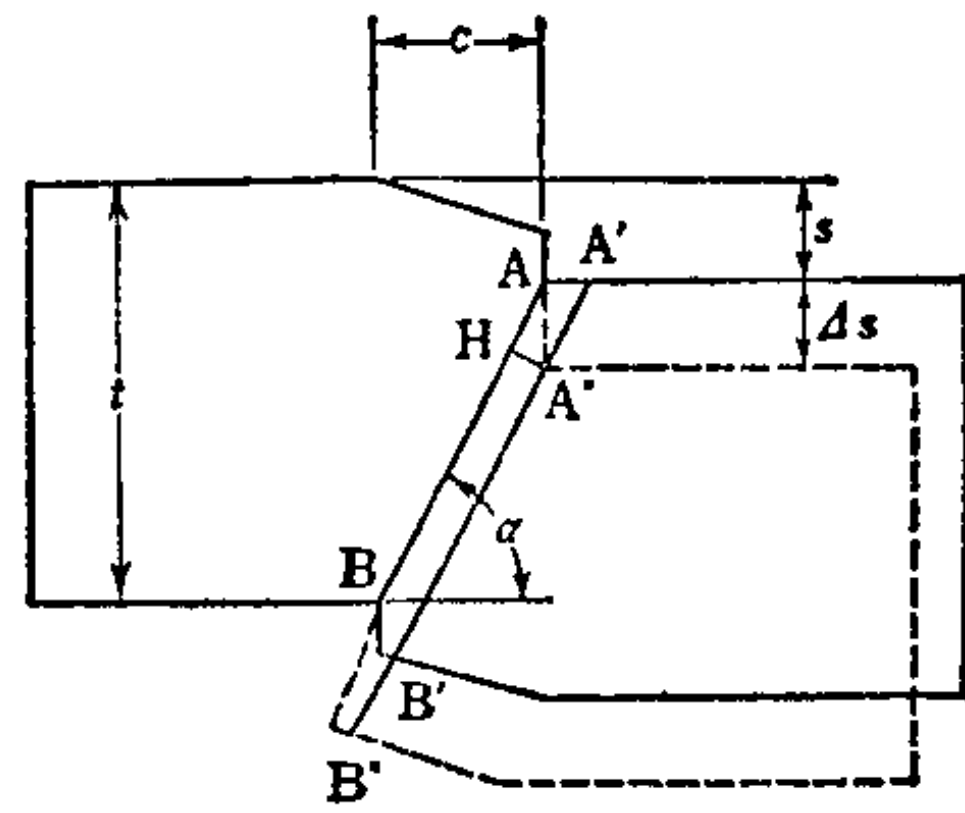


图2.7 薄层剪切期

处产生剪切变形。如图 2.7 所示，当凸模的行程 s 增加 Δs 时，与两刃口相连的薄层 $ABB'A'$ 剪切变形到 $ABB''A''$ ，凸模下面的材料仅作平行于 AB 的距离为 $\Delta s \csc \alpha$ 的刚体运动。如忽略剪刀面的摩擦，由于外力和内力做功（功率）相等，则

$$P' \Delta s = k \overline{AB} \Delta s \csc \alpha$$

$$\therefore P' = 2kc / \sin 2\alpha \quad (2.3)$$

同时所产生的切应变 γ 为：

$$\gamma = \frac{A'A''}{A''H} = \frac{2}{\sin 2\alpha} = \frac{c^2 + (t - s)^2}{c(t - s)} \quad (2.4)$$

由公式 (2.3)、公式 (2.4) 和 $k = f(\gamma)$ 的关系，可以算出凸模行程为 s 时的剪切力 P' ，由公式 (2.1)、公式 (2.3) 计算的剪切力如图 2.8 所示，由图可知在剪切的初期因 $F < P'$ ，所以产生单纯剪切变形，随着凸模切入深度增加变为 $P' < F$ ，则转为薄层剪切期。而在两个变形阶段的交接点处剪切力为最大。实际上在剪切金属时由于会发生加工硬化，而且剪切变形会象图 2.4 那样波及到间隙部分以外的材料，所以用等价间隙 $c_e = c + 0.5t$ 来计算各种材料的剪切抗力，可得到和实测值相差不到 10% 的一致结果。更重要的是图 2.8 从理论上证明了剪切抗力随间隙的增加而减少。

另外，用图 2.6 和图 2.8 的变形模型在坯料的侧面画以正方形的格子计算其变形，如图 2.9 所示。在此应注意到，虽产生这样大的变形而板的表面纤维并没有被切断。在通常的被剪切材料

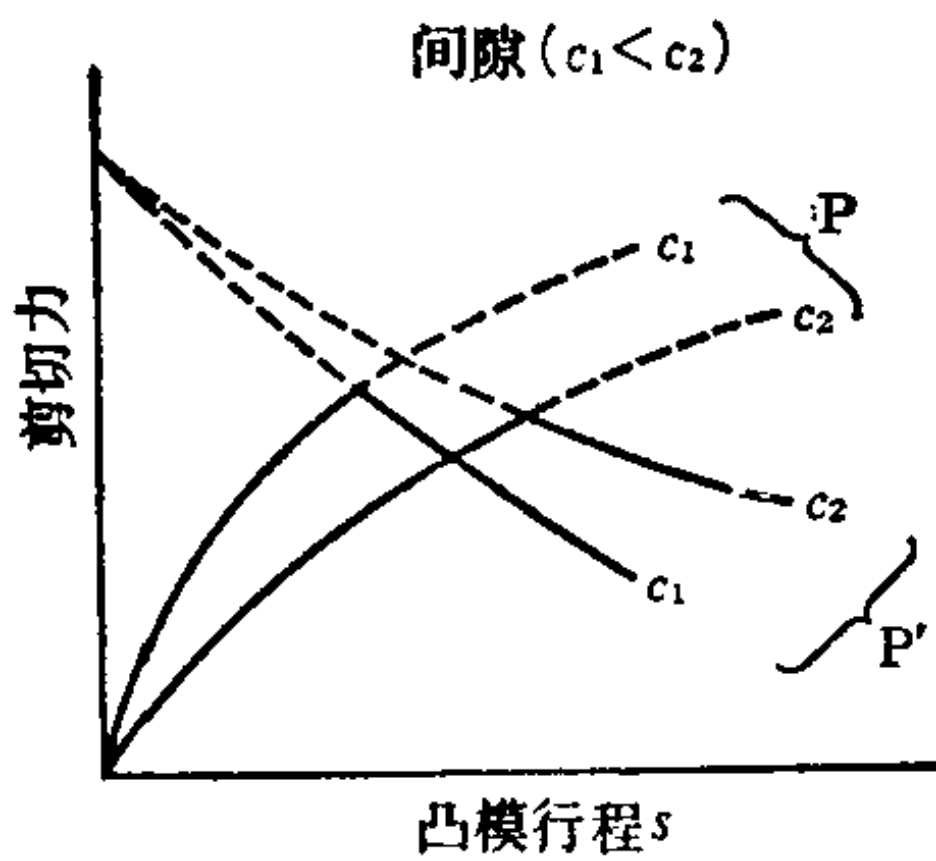


图2.8 剪切力曲线图
(理论)

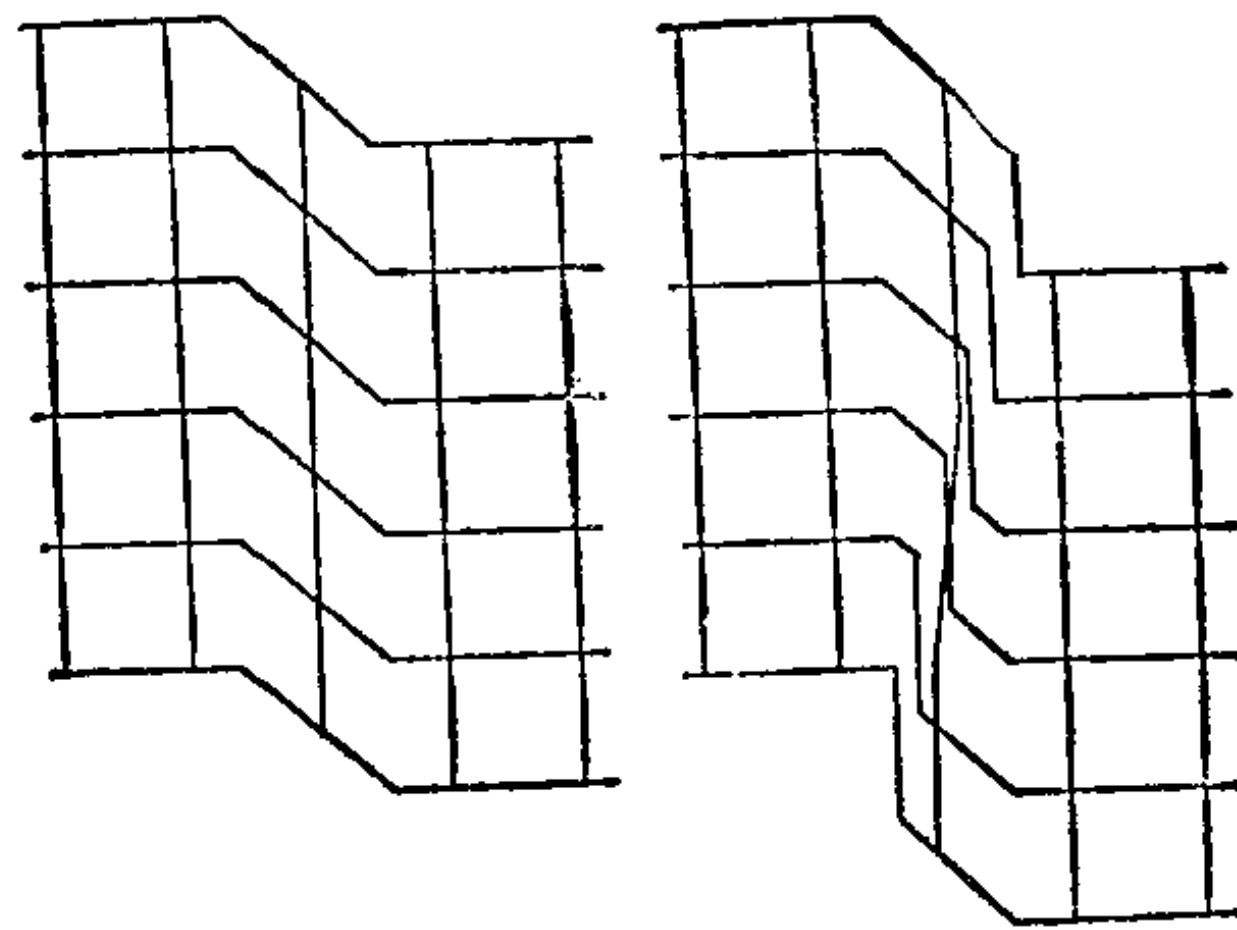


图2.9 单纯剪切期 (左)
和薄层剪切期 (右) 的变形

上可以看到，当变形进行一定程度后，在剪刀继续切入材料的同时切断板料的表面纤维，但由图 2.7 的变形机理可见，这时材料表面 AA' 扩展为新的表面 AA'' ，在这种情况下材料内部并未引起破坏仍能进行剪切加工。对照图 2.4 和 2.9 可知上述剪切模型能很好地表达实际金属板材的剪切机理。

除上述以外还有各种剪切模型〔4〕。图 2.10 表示了图 2.4 所示铅板的缩颈变形机理，因为三角形 OAB 及 $O'A'B'$ 内的材料由于拉伸引起 OA 和 $O'A'$ 方向的平面变形，并沿图中的箭头方向流动，所以产生了缩颈。

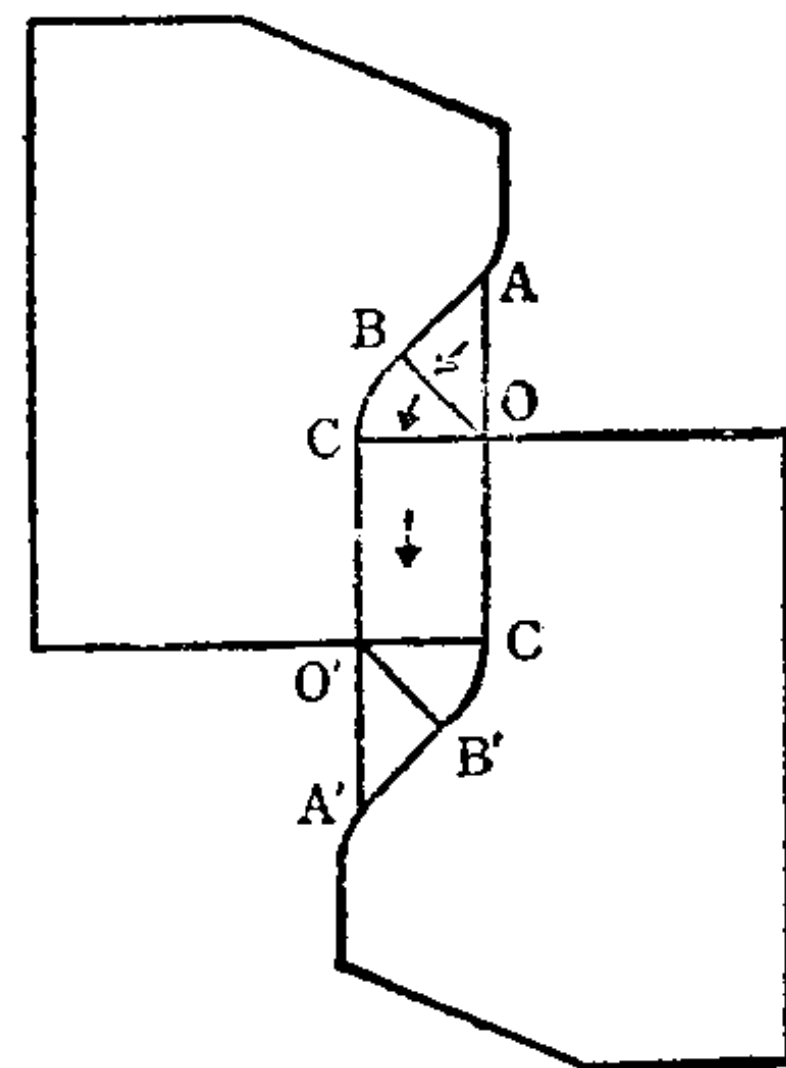


图2.10 缩颈变形期的滑移线场

图 2.11 是把剪切过程中的塑性变形区域仅限于两角形区（斜线部分）内的剪切模型。变形区内的速度分布是在满足所谓材料体积不变的条件下确定的，并以变形区内的塑性变形能和由凸模提供的外部机械功相等为前提来计算剪切力〔5〕。这个模型仅限于间隙为零的

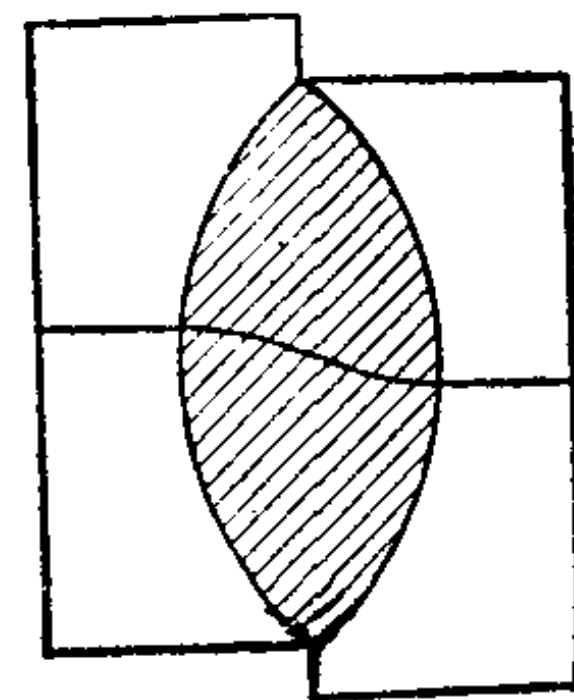


图2.11 Krämer
的剪切模型

场合，但是从剪切软钢板等材料中观察到椭圆形的加工硬化区〔6〕，得到深刻的启发。

c. 尖刀刃剪切板料的剪切机理〔7, 8, 80〕 由对称形的尖刀刃剪切板料，因为是对称变形，所以其剪切机理同通常的剪切加工比较是易于分析的，用滑移线理论进行了详细地研究。如图2.12所示，板料的剪切可以分为压入、切入和缩颈变形三个阶段。对于各个阶段，求得如图2.12下半部所示的滑移线场并计算出剪切

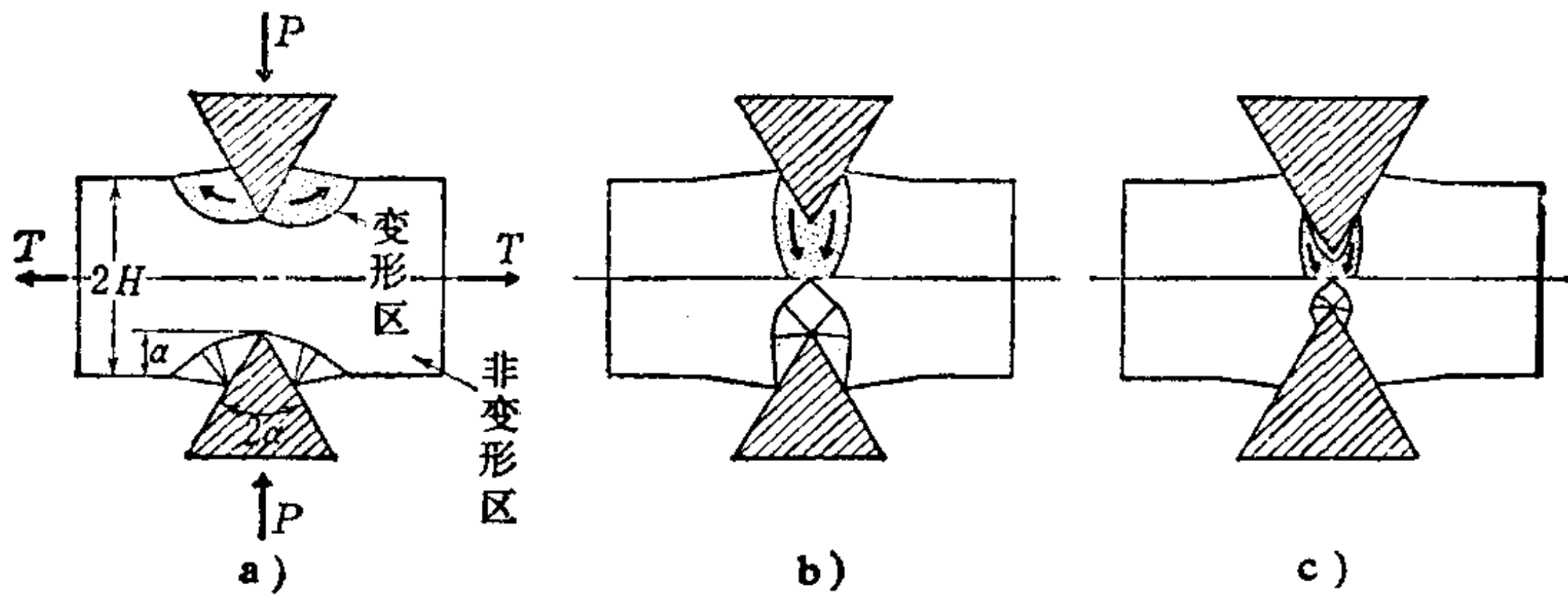


图2.12 尖刀刃剪切的变形过程和滑移线场

a) 压入阶段 b) 切入阶段 c) 缩颈变形阶段
(变形区内的箭头表示材料的流动方向)

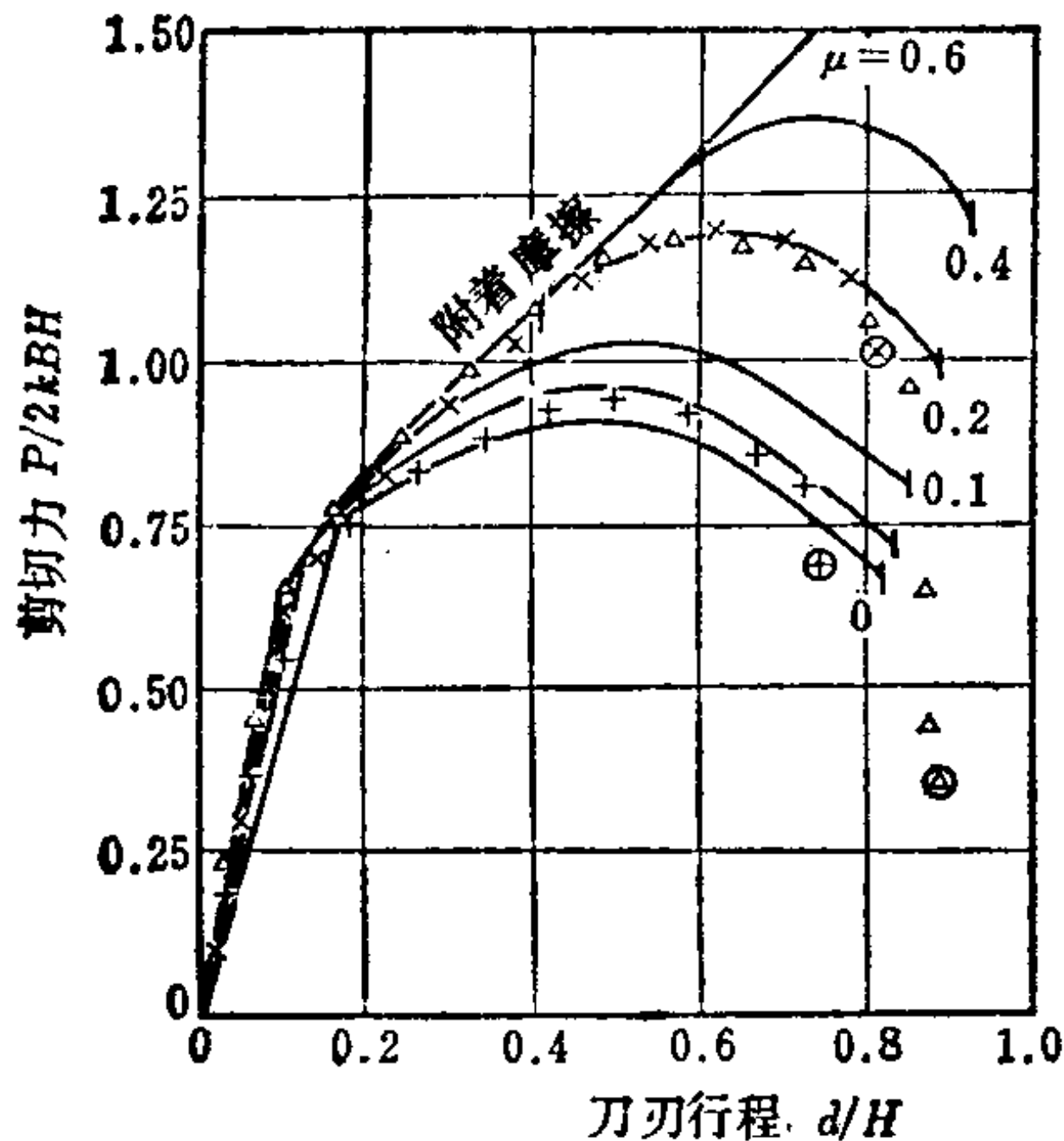


图2.13 剪切力曲线图 (剪切

摩擦系数的影响)

刃尖半角 $\alpha = 45^\circ$

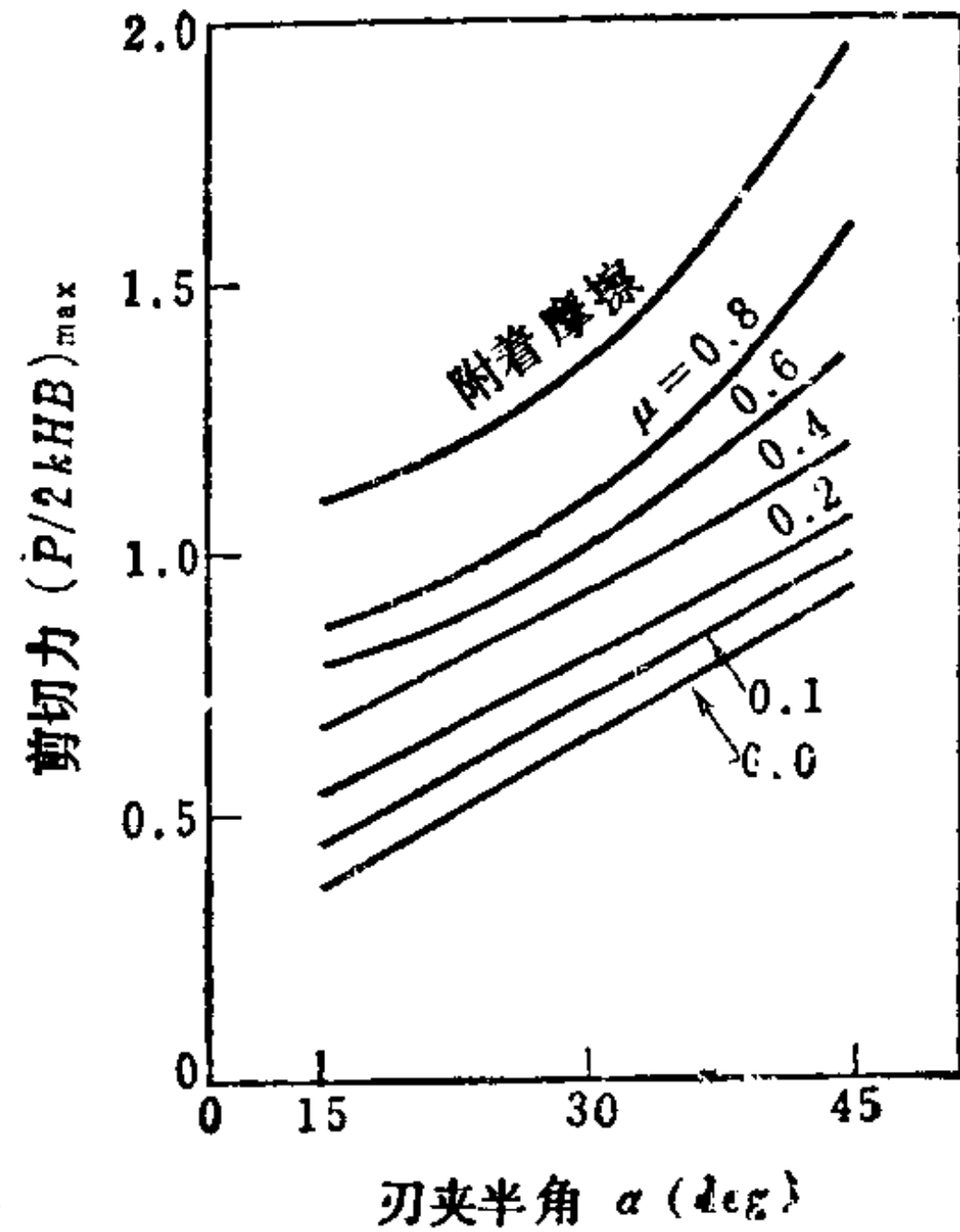


图2.14 最大剪切力和刃尖

半角 α 、摩擦系数 μ 的关系

力（板宽为 B ），得图 2.13~图 2.15。图 2.13 所示为刃尖半角为定值时考察剪切摩擦系数 μ 对剪切力的影响。计算到开始出现缩颈时的情况。如果除去附着摩擦时，剪切力一般具有极大值，该值的出现是不随刃尖半角变化而变化的，如图 2.14 所示的最大剪切力，是随 μ 和 α 值的减小而减小，而缩颈开始期是随 μ 的减小和 α 的增大而提早出现。

在剪切时若对材料施加和板面平行的水平力 T （图 2.12），则在 T 为强大的压缩力作用下剪切力将增加而缩颈变形的开始期将推迟出现，如图 2.15 所示。若水平方向的压应力超过 k 值时则缩颈变形阶段将不出现。因此，减小剪刀的 α ，增大 μ ，同时在剪切时沿水平方向加以强大的压缩力，就能得到不出现缩颈变形的良好剪切断面。

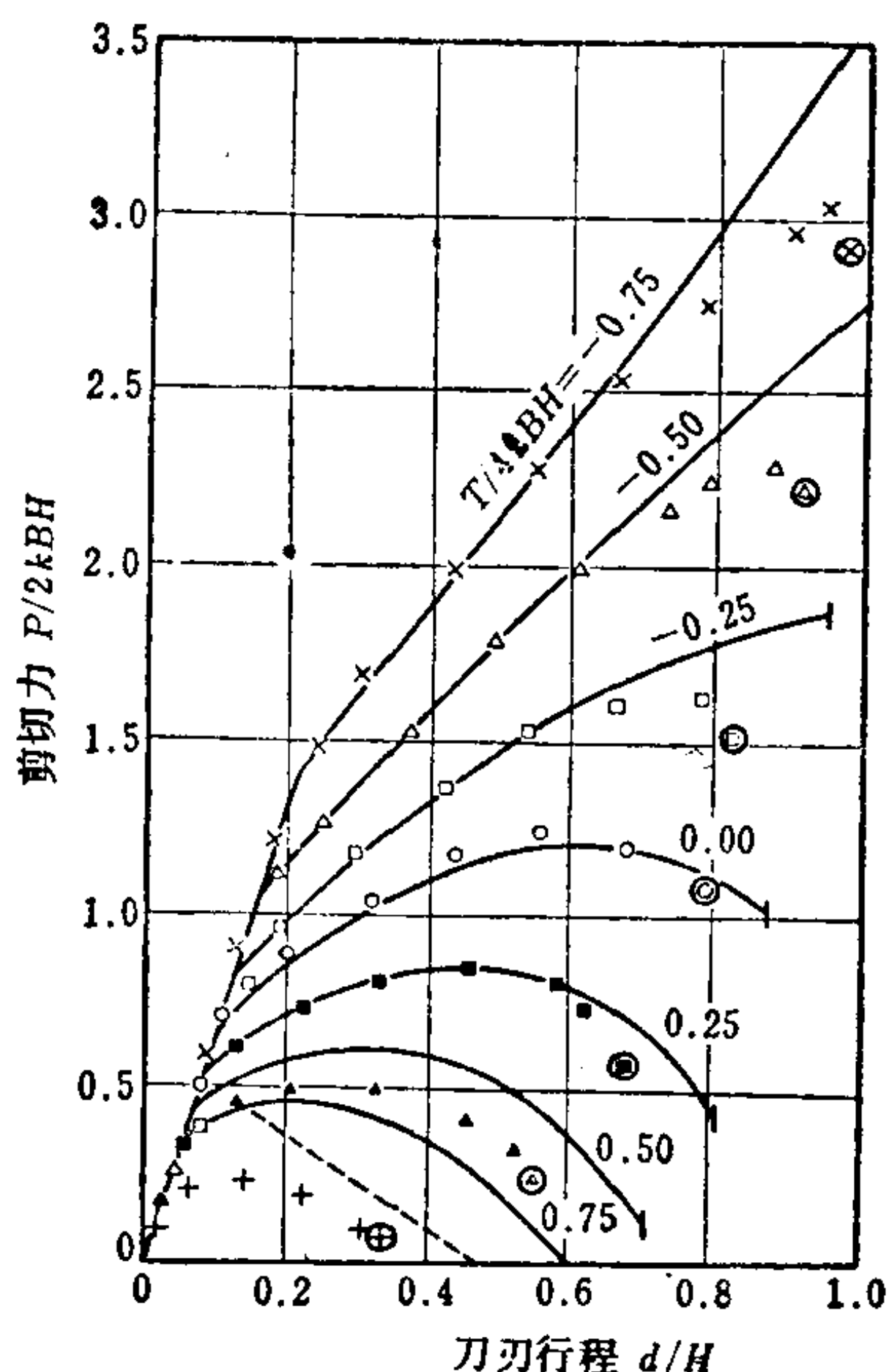


图 2.15 剪切力曲线图（水平力 T 的影响）

d. 修整（修边）加工理论〔9〕 为了得到光洁的剪切面，修整加工一般至少需要二道工序，因此正在研究由一个工序进行精密剪切的各种加工方法，但是由于在模具寿命和材料利用率等方面还存在问题，对于剪切加工性能差的材料，有时仍然要采用剪切加工和修整加工组合的方法。

在进行修整加工时，特别重要的是正确地选取修边余量（切削余量） h 。影响切削余量的因素是：（1）前道工序落料时的间隙；（2）被加工材料的延性；（3）板厚；（4）修边刃口的形状；（5）刃口的振动等。本节就切削出平滑的表面时的变

形机理加以讨论，以指导实际的修整加工。

刃口的前角为零时，如图 2.16 所示的修整过程可分为三个阶段：开始产生三角形切屑，接着产生流动形切屑的切削期，还有类似间隙为零时的剪切加工的剪切分离期。

当刃口切入深度为 s 时，产生三角形切屑状态，应用切削理论如图 2.17 所示其塑性变形区仅限于 AB 面（单一剪切面）上，在三角形 ABC 内，假定是均匀的平面应变，压应力 $2k$ 作用在平行于 BC 的方向上，可根据主应力面 BC 和主剪应力面 AB 相交成 45° 的条件及凸起部分的体积和被排除的体积相等的条件来确定外形线 DBC。

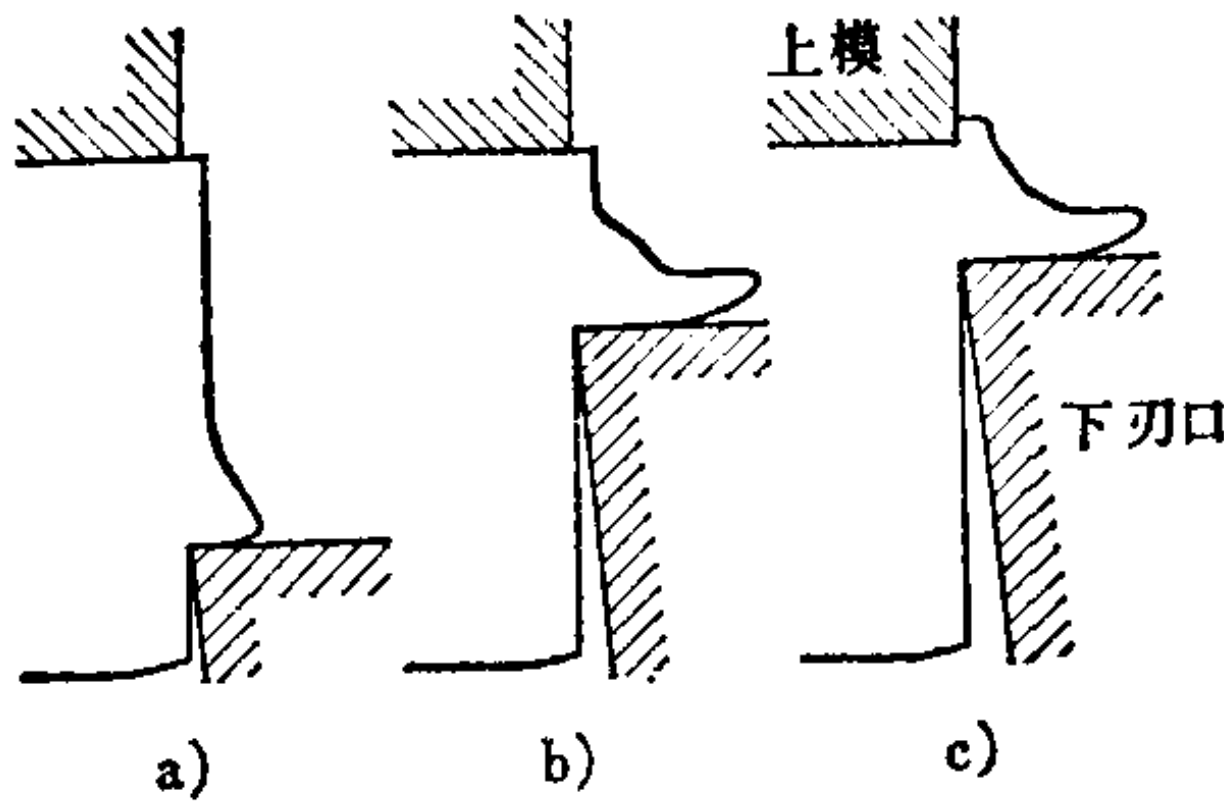


图 2.16

a) 切削期（三角形的切屑） b) 切削期（流动形的切屑） c) 剪切分离期（修边的变形过程）

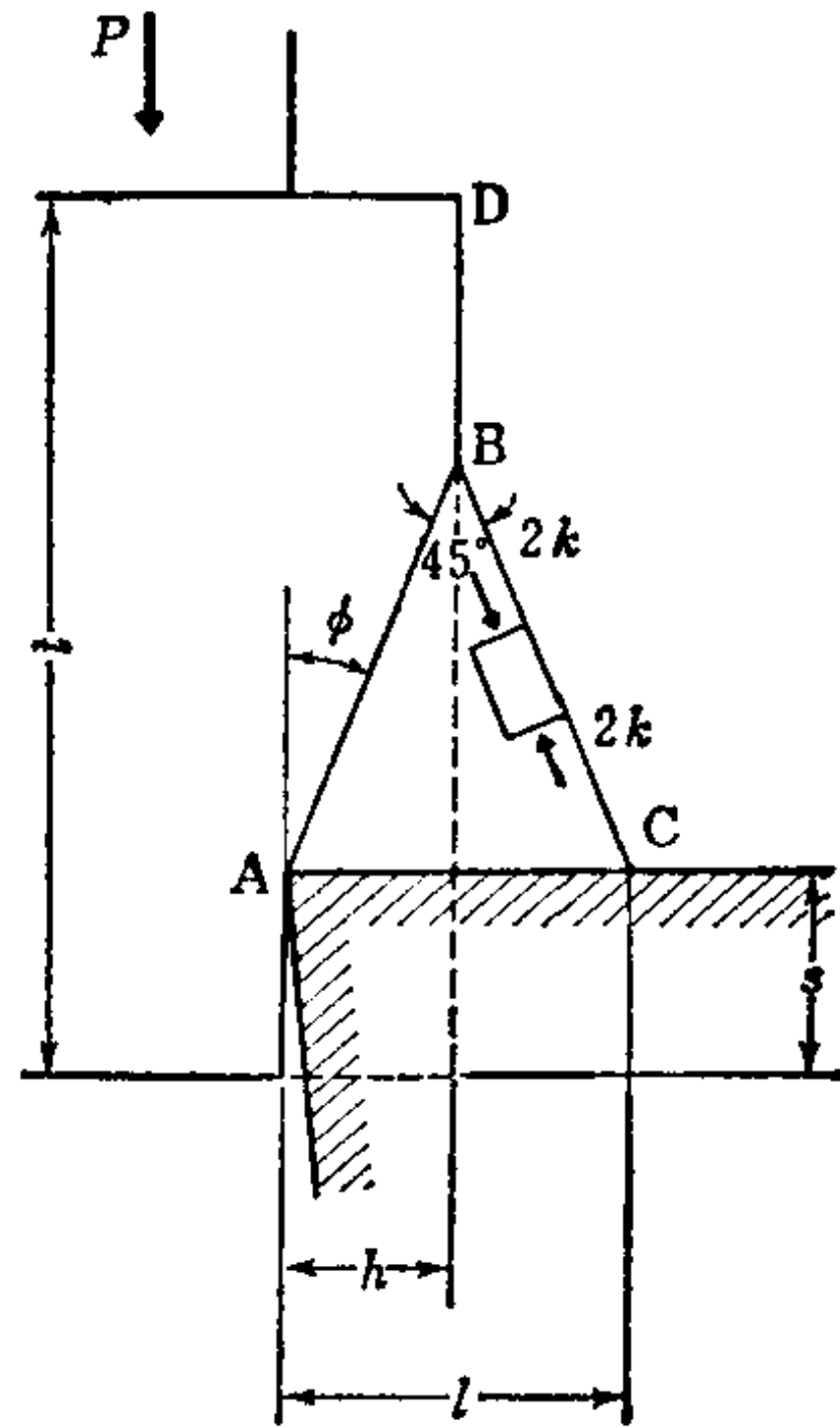


图2.17 修整过程（切削期）

修边力根据力的平衡条件为

$$P = kBl(1 + \sin 2\phi) \tag{2.5}$$

式中 B ——板宽；

l ——前角面上的接触长度。

由几何关系确立下式：

$$\left. \begin{aligned} l &= 2h(1 + \sin 2\phi - \cos 2\phi) \\ s &= l^2 \cos 2\phi(1 + \cos 2\phi)/4h \end{aligned} \right\} \tag{2.6}$$

在单一剪切面 AB 上产生的切应变和图 2.7 一样考虑，则

$$\gamma = 2/\sin 2\phi \quad (2.7)$$

如 $k = f(\gamma)$ 的函数关系为已知, 则由公式 (2.5) 公式 (2.6) 和公式 (2.7) 以剪切角 ϕ 作为参变量, 可以计算出修边力。

ϕ 是在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 的范围内变化, 如图 2.18 所示, 对于硬质材料几乎可取为常数而使之产生流动形 (平移形式) 切屑。从理论上还不能确定 ϕ 的常数值。关于正常切削的 ϕ 值, 请参照精密加工手册等确定。

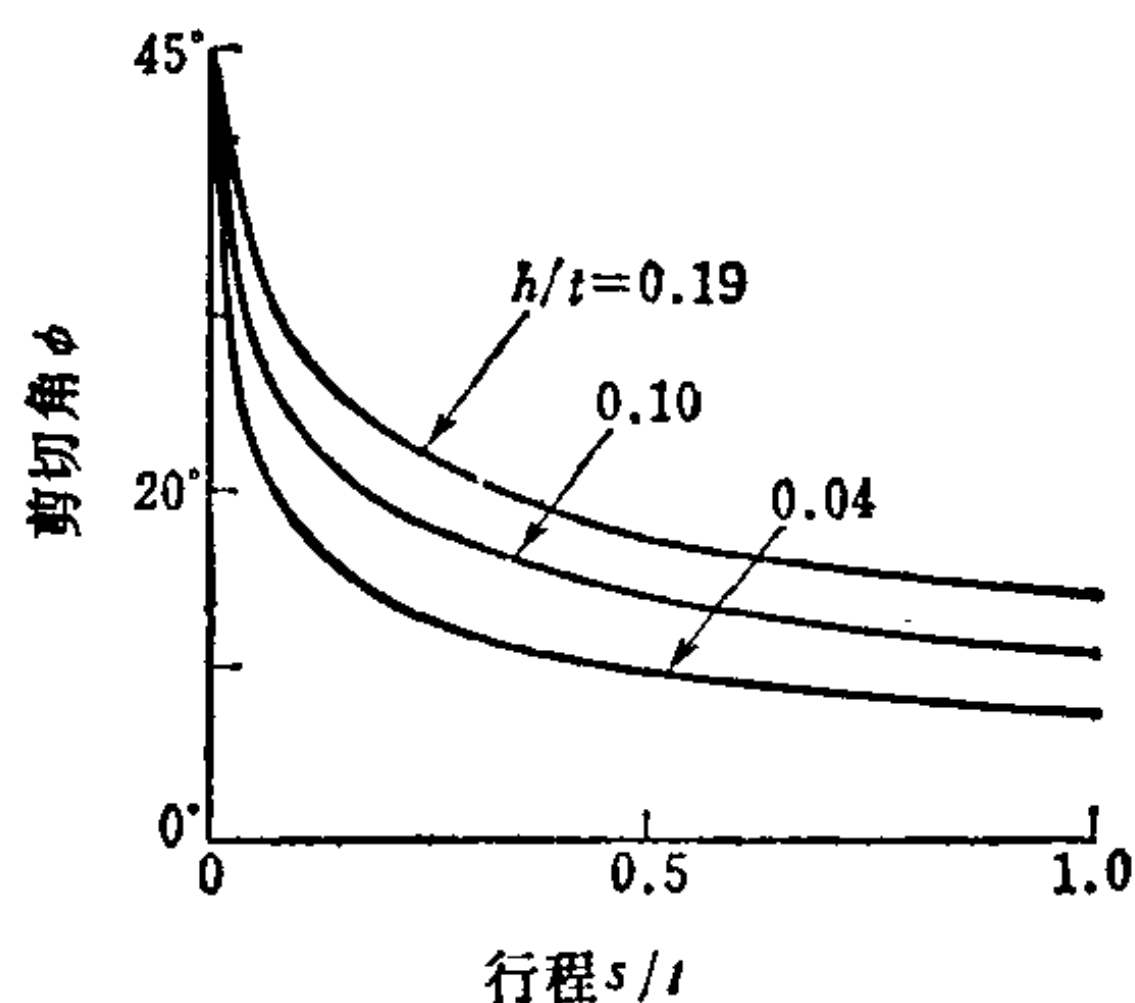


图2.18 剪切角 ϕ 和行程 s 的关系

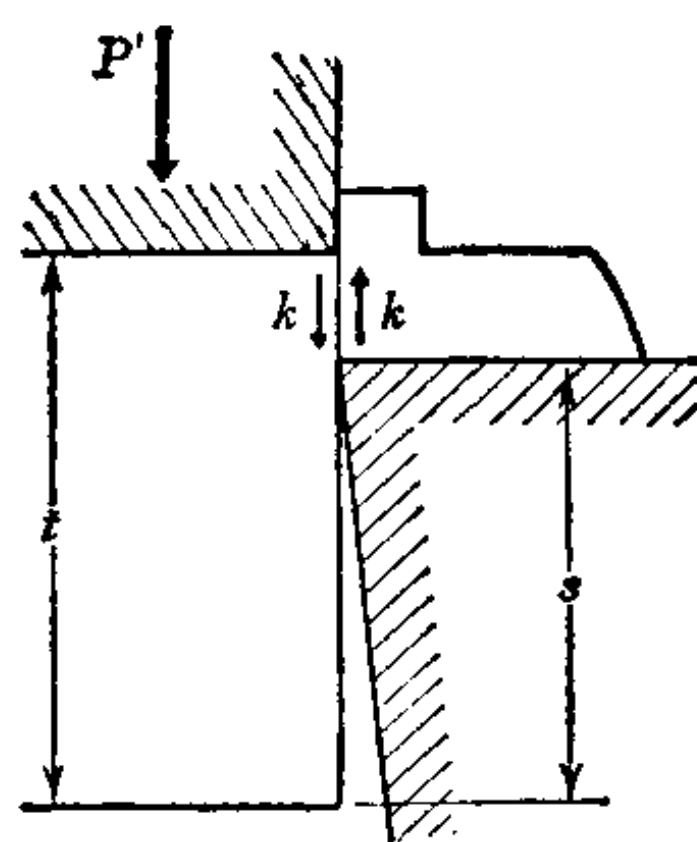


图2.19 修整过程
(剪切分离期)

变形到一定程度后, 如图 2.19 所示, 则进入剪切分离期。此阶段的修边力可由下式给出:

$$P' = kB(t - s) \quad (2.8)$$

由公式 (2.5)、公式 (2.8) 可计算修边力, 其结果如图 2.20 所示, 切削余量 (板厚比) h/t 越大则切削期越短。特别是当 $h/t > 0.5$ 时,

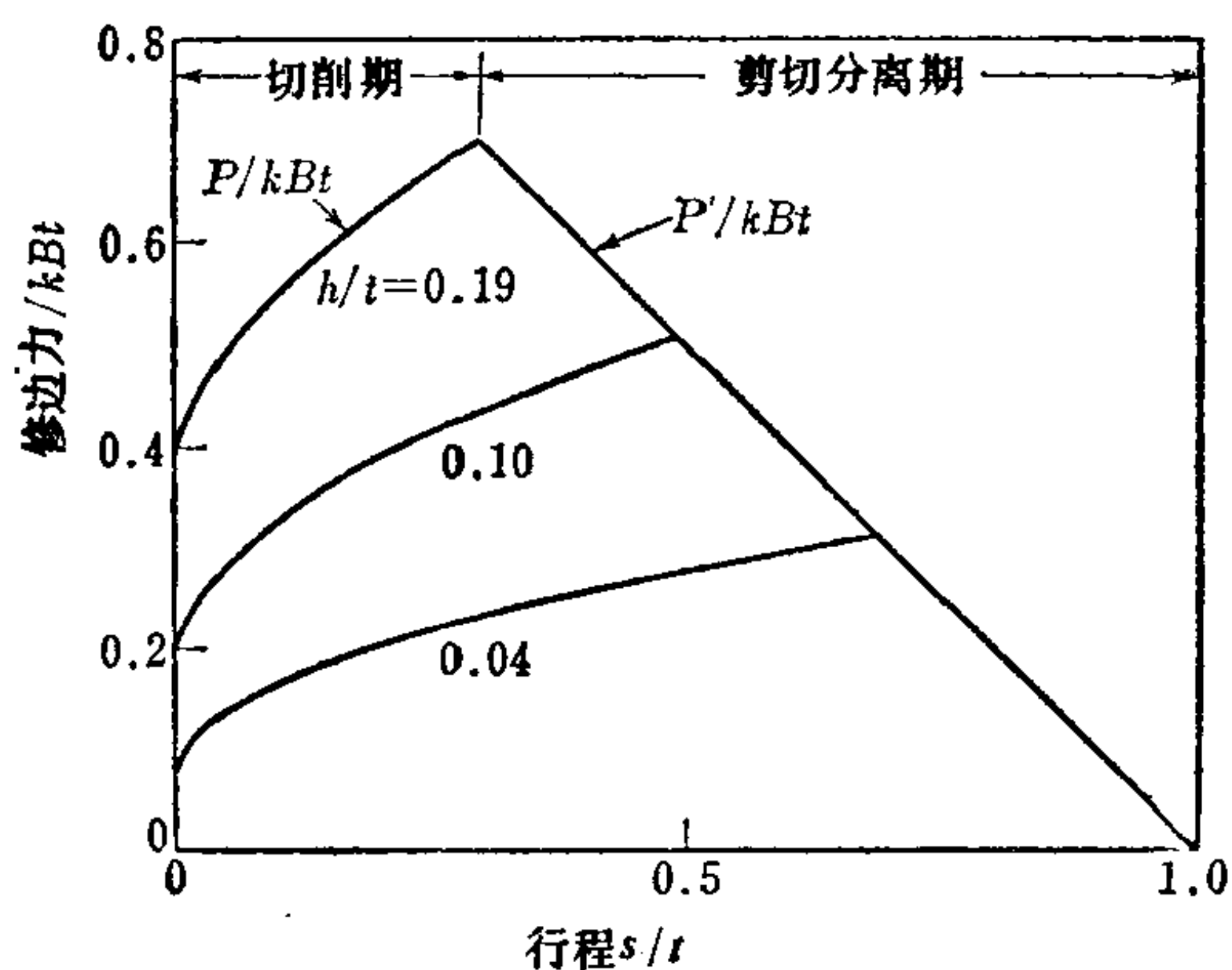


图2.20 修边力曲线 (理论)

$P' < P$, 则不出现切削期。因此, $h \geq 0.5t$, 可视为剪切加工, $h < 0.5t$ 则可视为修整加工。

图2.21所示为材料A1PO的修整加工面形状和修整余量的关系。加工面由变形初期产生的塌角 b_1 、切削期形成的平滑面 b_2 和在进入剪切分离期后材料内部发生裂纹而破断所产生的粗糙面 b_3 构成。图中的实线是剪切分离期开始点的计算值(图2.20), 该值与平滑面和粗糙面的境界线(实验点)大体一致。因此, 如果认为从切削期一进入剪切分离期材料就立即破断, 则可预测修边加工面上粗糙面所占的比例, 由此亦可以决定适当的修边余量。

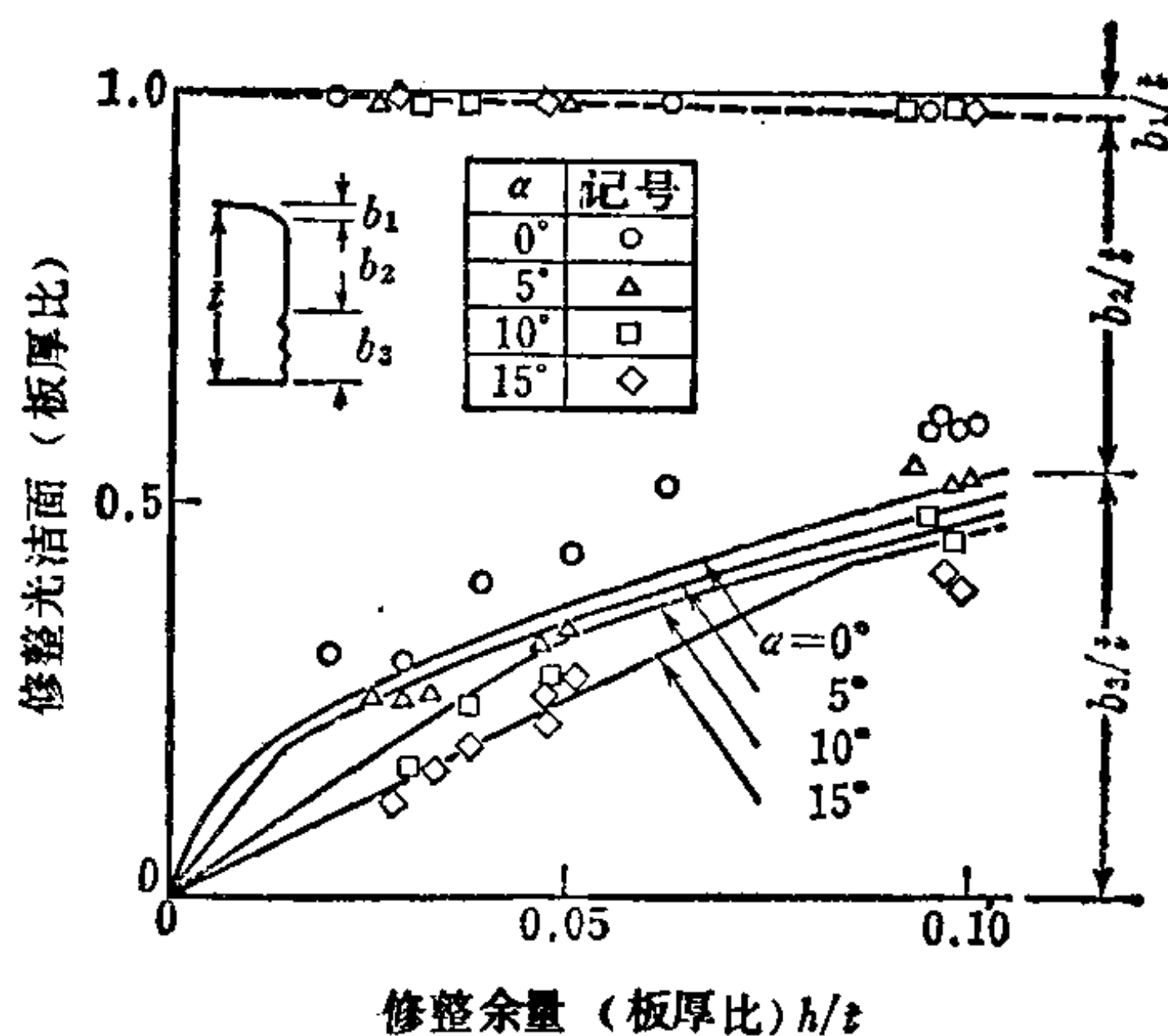


图2.21 修整加工面形状和修整余量的关系(材料A1PO前角: α)

以上说明了关于切刃前角为零时的情况。由于在制件轮廓复杂时剪刃作出前角是困难的, 所以一般是不可行的, 但是作出前角则能减少修边力同时使剪切分离期开始较晚, 特别是修边余量 $h/t < 0.1$ 时, 对于减少加工面的粗糙部分是有效的, 这一点在理论和实验上均被证实(图2.21)。另外如将坯料重叠起来进行修整加工, 可以看为减少 h/t 值, 因而使剪裂面减少〔11〕, 这能由图2.20和图2.21说明。此外, 采取和前工序的剪切方向相同的方向进行切削, 可推迟转入剪切分离期, 则减少加工面上的粗糙面。

以上说明了关于切刃前角为零时的情况。由于在制件轮廓复杂时剪刃作出前角是困难的, 所以一般是不可行的, 但是作出前角则能减少修边力同时使剪切分离期开始较晚, 特别是修边余量 $h/t < 0.1$ 时, 对于减少加工面的粗糙部分是有效的, 这一点在理论和实验上均被证实(图2.21)。另外如将坯料重叠起来进行修整加工, 可以看为减少 h/t 值, 因而使剪裂面减少〔11〕, 这能由图2.20和图2.21说明。此外, 采取和前工序的剪切方向相同的方向进行切削, 可推迟转入剪切分离期, 则减少加工面上的粗糙面。

e. 对向凹模冲裁法的理论 此方法利用切削的机理作为精密冲裁法而被提倡〔12〕, 在理论上和通常的剪切加工时的薄层剪切期(图2.7)或修整加工时的切削期(图2.17)相同, 能由单一

的剪切断面的变形机理来说明。图 2.22 中上模固定, 当下模刃口以速度 V 上升时, 塑性变形限于在 AB 面上滑移, 在 AB 面左侧的材料固定, 右侧的材料则平行 AB 以 $V \csc \alpha$ 的速度运动。图中用虚线表示为在下剪刀作微小距离移动后的材料状态, 此时产生塑性变形仅限于三角形 ABA' 内的材料。关于 step by step 法(对向冲裁法)是在坯料的侧面划以正方形的格子为变形模型, 见图 2.23。这时, 和图 2.9 不同的是材料的纤维表面上被切断。但是这并不意味着材料内部产生了破坏, 在理论上仍视为由完全的塑性变形而排除废料。对向凹模冲裁法所需的力仍可用图 2.7 一样的方法来计算。

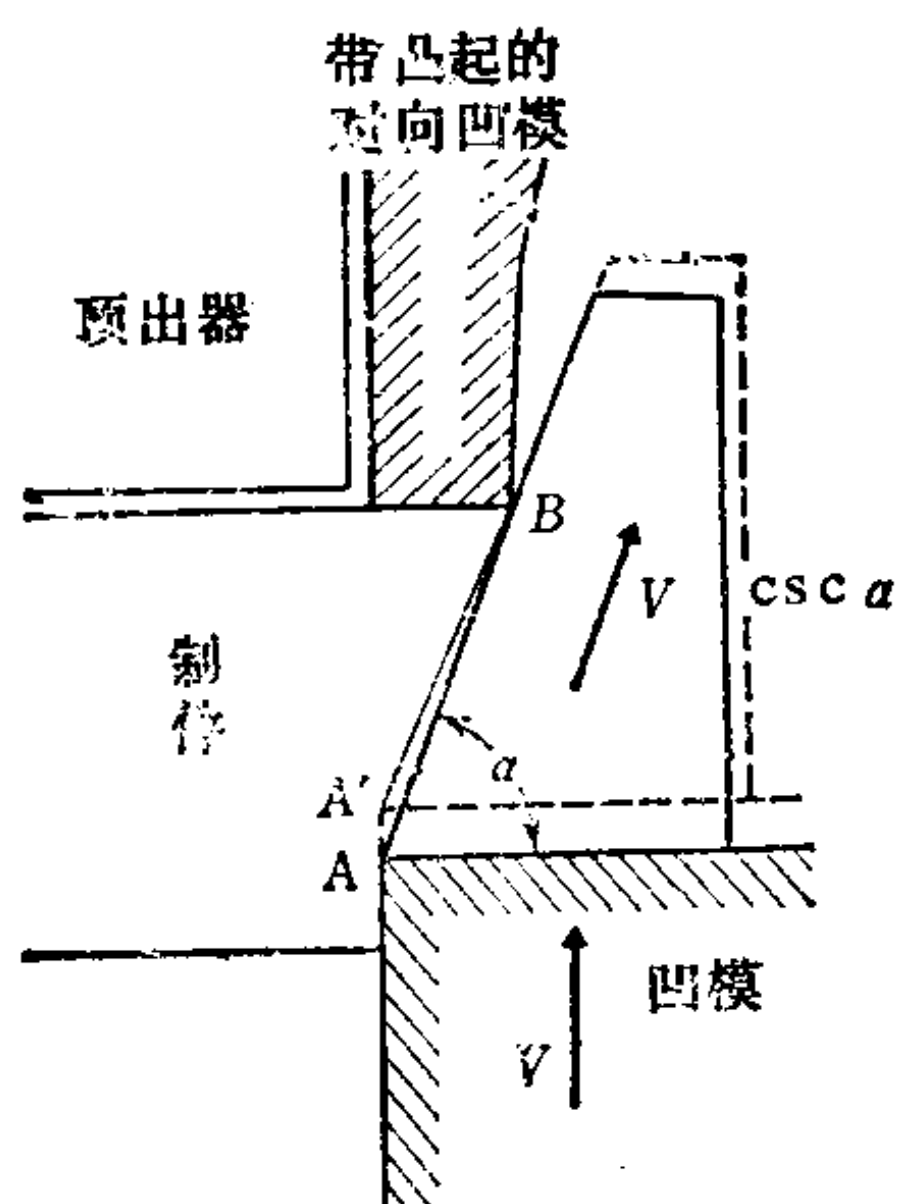


图2.22 对向凹模冲裁法的变形机理

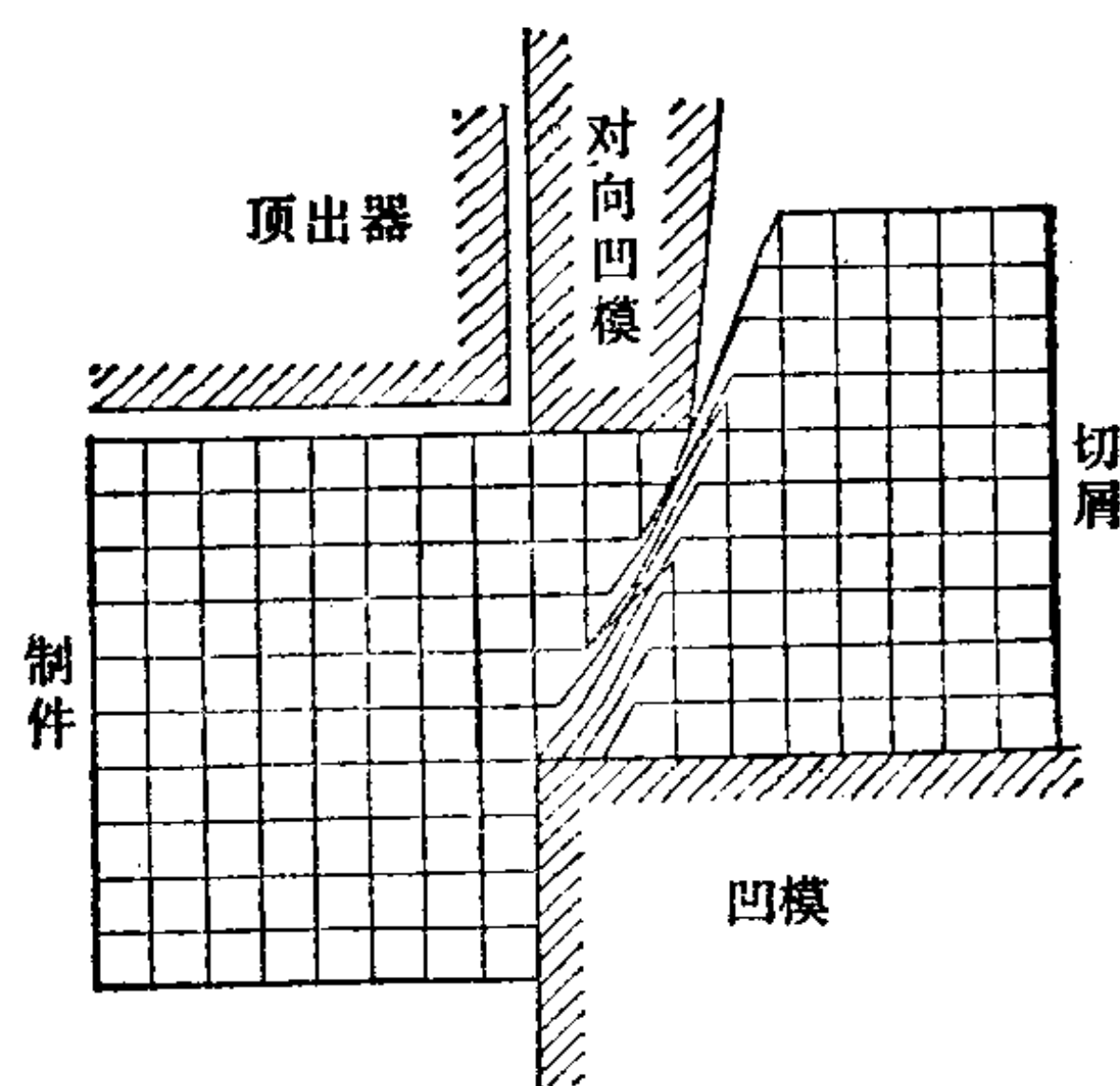


图2.23 对向凹模冲裁法的变形模型

2.2.2 冲裁加工特性

在冲裁加工中, 影响加工力、断面形状和尺寸精度的因素是很多的, 以下叙述主要的因素及其伴随出现的现象。

a. 间隙 冲裁加工时, 间隙是决定加工成败的重要因素之一。一般加大间隙则使剪切抗力下降。图 2.24 所示为各种材料在圆形落料时的间隙对剪切抗力 k_{sm} 的影响〔13〕。多数情况下, 最大冲裁力、材料的剪切抗力的大小与冲裁过程中由刃口处向材料内部扩展的裂纹有密切的关系。一般, 间隙增大则剪切部分材

料的静水压力下降, 如图 2.25 所示, 凸模侧作用有冲裁力 $P = P_p + \mu_2 F_p$ 和侧向力 $F' = F_p + \mu_1 P_p$, 凹模侧作用有冲裁力 $P = P_d + \mu_4 F_d$ 和侧向力 $F = F_d + \mu_3 P_d$, 由此产生尖楔作用, 使易于产生裂纹, 因而可以推论出剪切抗力减小。

关于冲裁所需的冲裁功 w , 同样如图 2.24 所示, 在某一间隙值时有极小值。冲裁功和冲裁力是和凸模冲断材料的真实(全)行程有关。合适的间隙可使自上下两刃尖处出现的裂纹正好吻合, 则冲断的真实(全)行程为最小, 另外考虑到冲裁力是随间隙加大而逐渐减小的, 所以取比裂纹吻合的最佳间隙略大的间隙将得到最小的冲裁功。冲裁普通的金属薄板材时间隙值取其厚度的 10~15% 左右, 冲裁功最小。

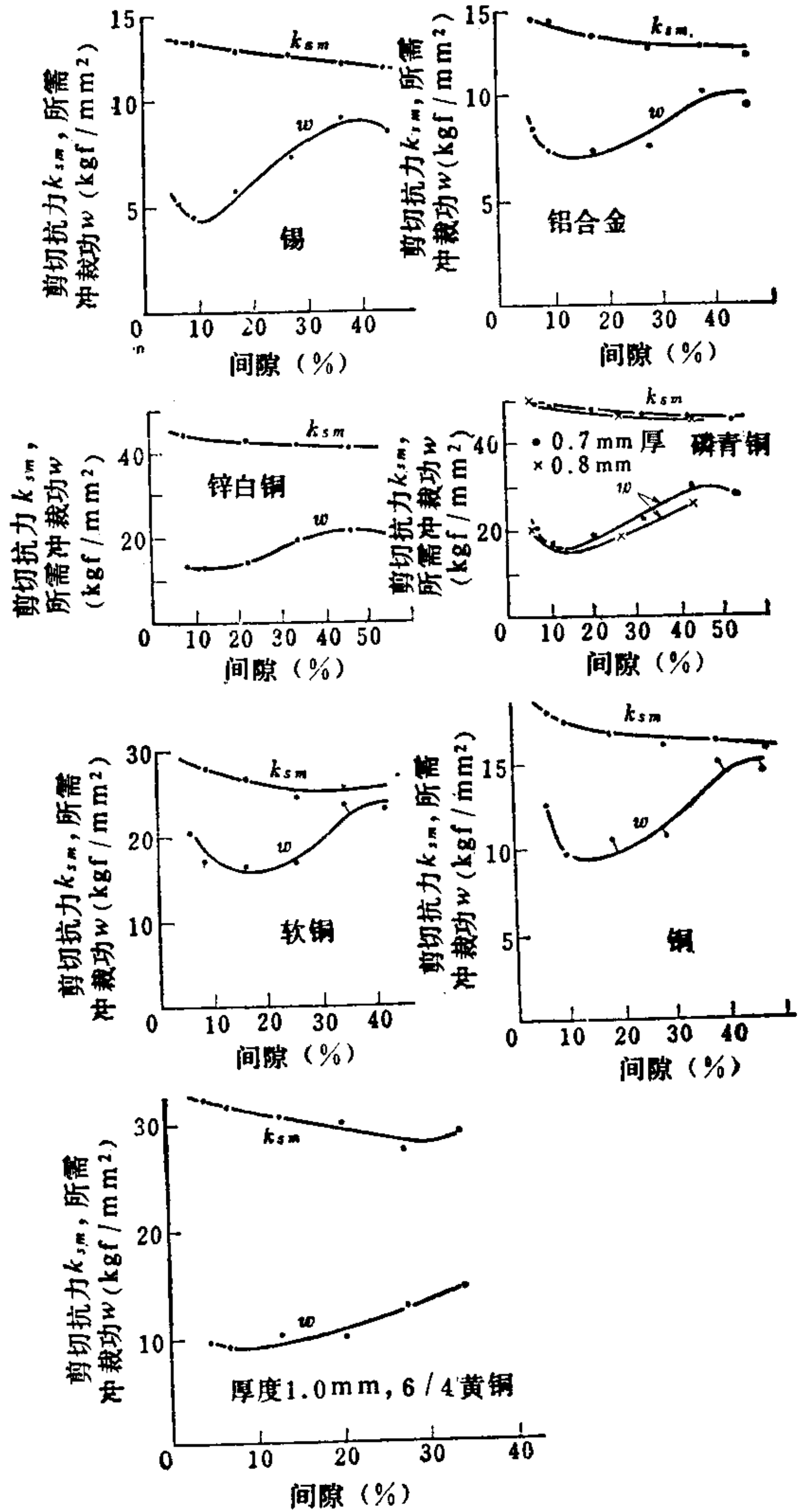


图 2.24 各种材料的静态剪切抗力和所需冲裁功

在斜刃冲裁中斜刃角不变时，冲裁力(在冲裁过程中是常值)亦在某一间隙值时为极小值，并且此间隙值和平刃冲裁(对同一材料)时出现最小冲裁功的间隙大体是一致的。

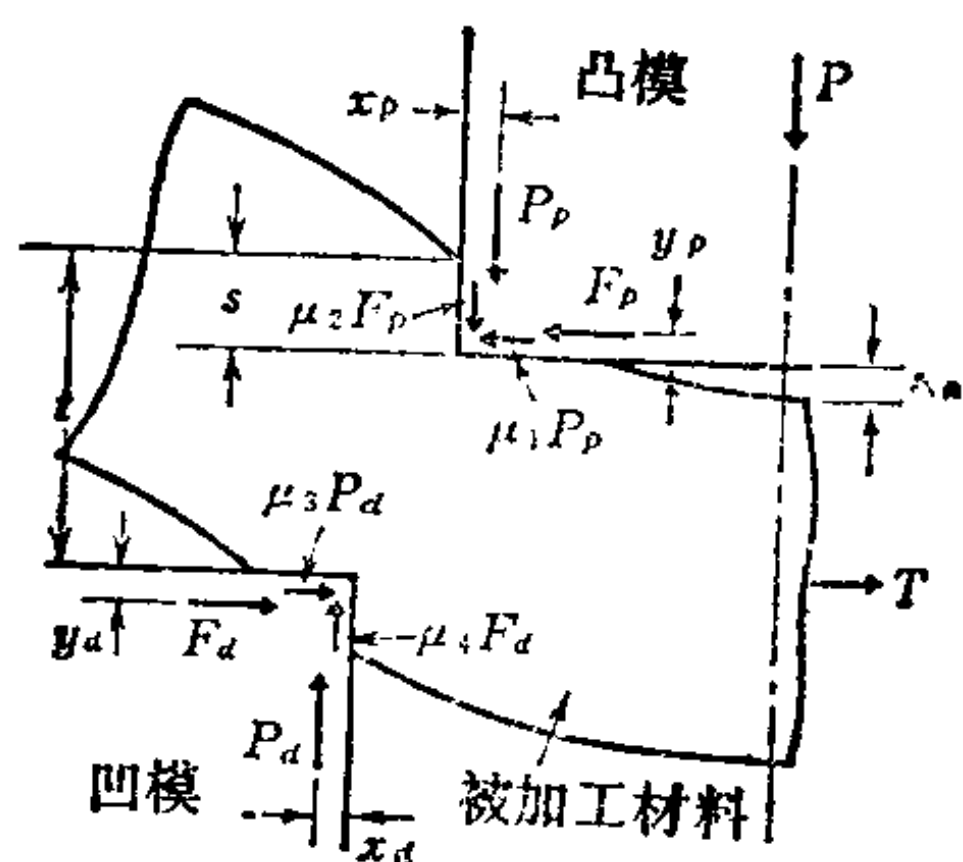


图2.25 模具刃口的作用力

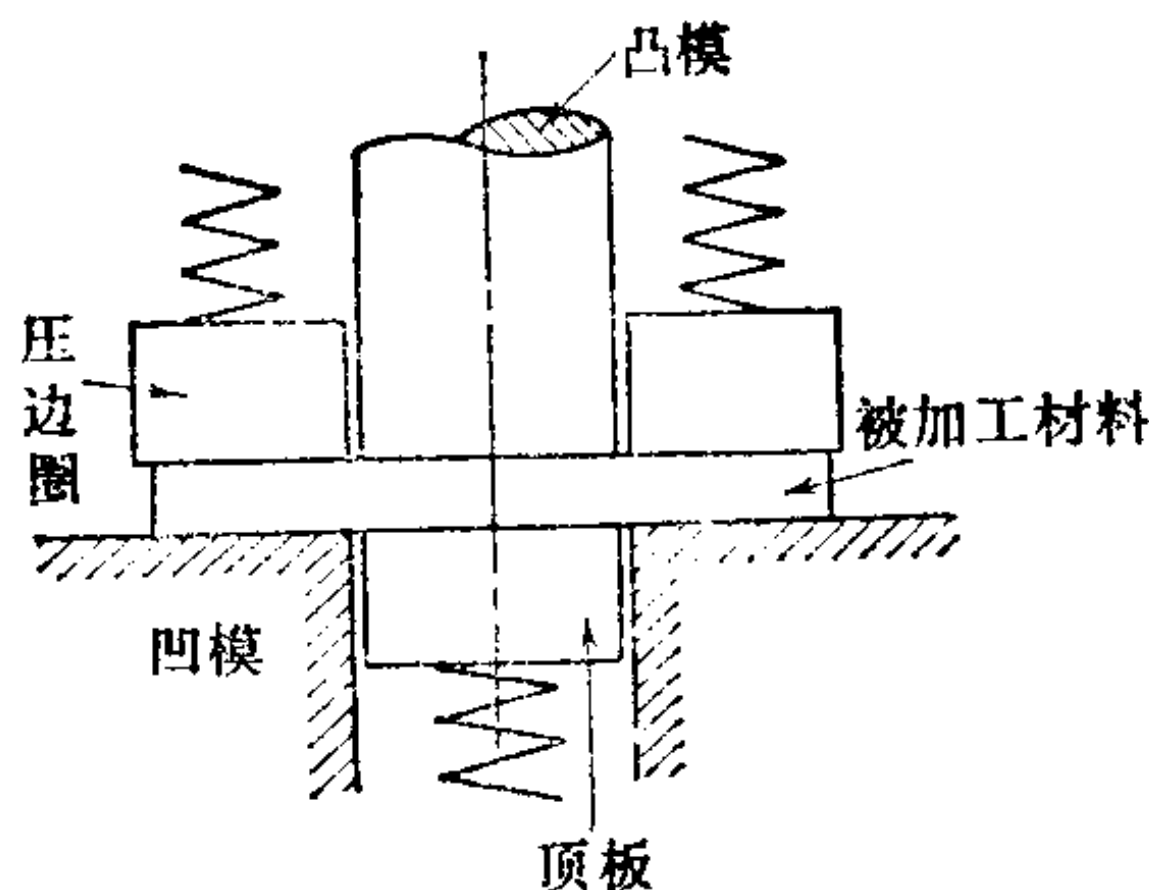


图2.26 冲裁时材料的约束

b. 材料约束的影响 如图 2.26 所示，在凹模上用压边圈，在凸模冲裁时有反向顶板时，使材料在冲裁时完全处于受约束的情况下。通常这样的约束程度越高则材料在冲裁时的剪切抗力越高。图 2.27 表示了用平行直线刃在进行两面冲裁时压边圈对材料变形剪切抗力 k_{sm} 的影响。在凹模上采用压边圈的冲裁时则材料两端的上翘被压住，可认为材料两端是固定的，其剪切抗力比无压边圈时材料两端是支承状态的剪切抗力略大〔14〕。采用压边圈和顶板时，由于增大了作用力则提高了冲裁时材料所受的静水压力（这将提高材料在剪切过程中的塑性变形的能力），能得到无剪裂面的冲裁件，是一种精密冲裁法。

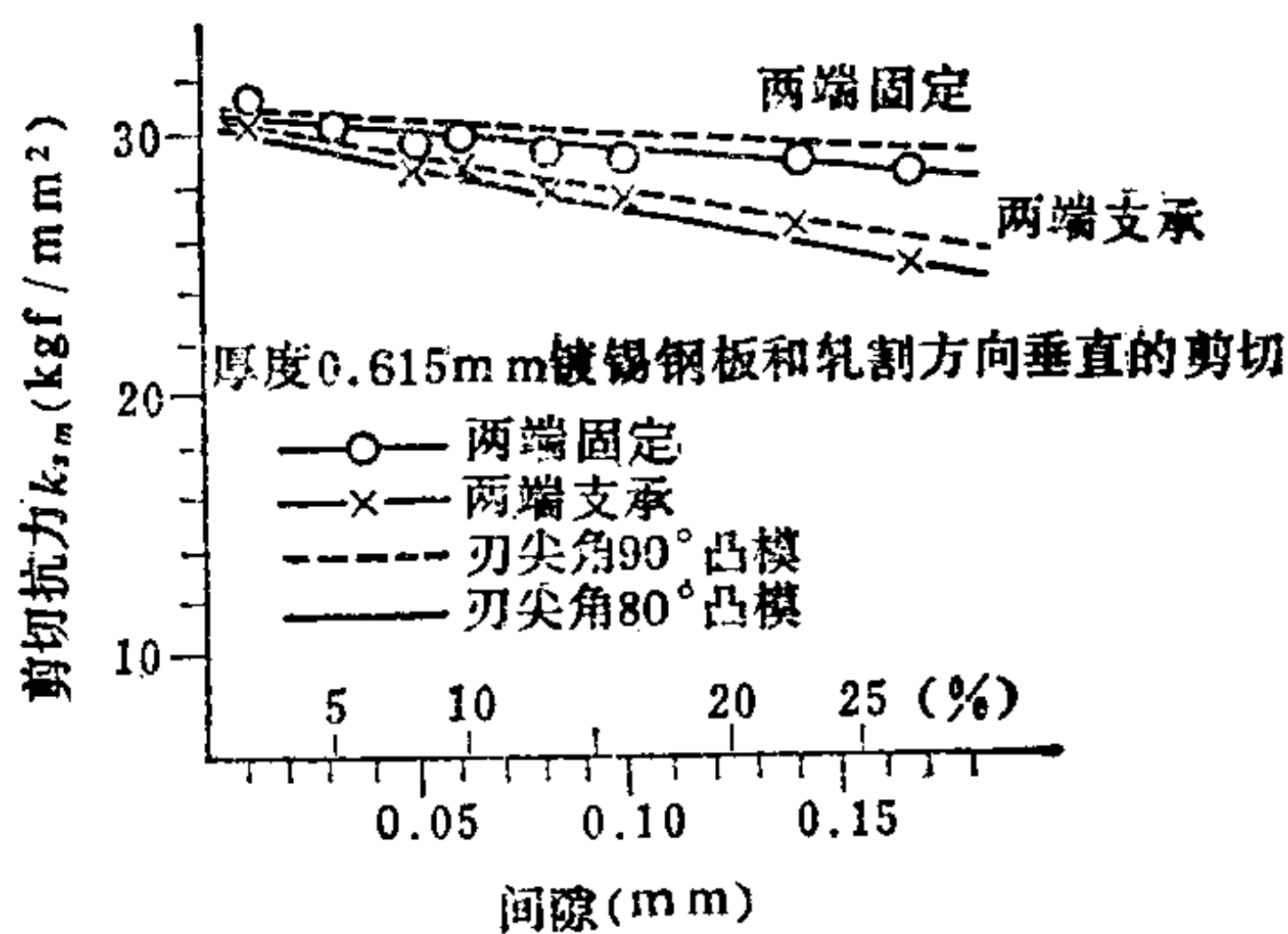


图2.27 在两面剪切时剪切条件对剪切抗力的影响（福井，前田）

c. 模具的刃口形状 冲裁模刃口的一般形状如图 2.28 所

示，在模具面上给予前倾角 δ ，模具的刃尖角 θ 成锐角，同时在模具侧面给予后角 φ ，使模具侧面避开材料。有时为了加强挤光的效果，相反，给模具以很小的负后角。

若使用具有锐角的尖刃角的冲裁模，则材料的变形限于比较窄的区域内，由于刃口产生的压缩力既集中也较大。如图 2.27 所示，剪切抗力 k_{sm} 要比使用直角刃尖角的模具时为小。

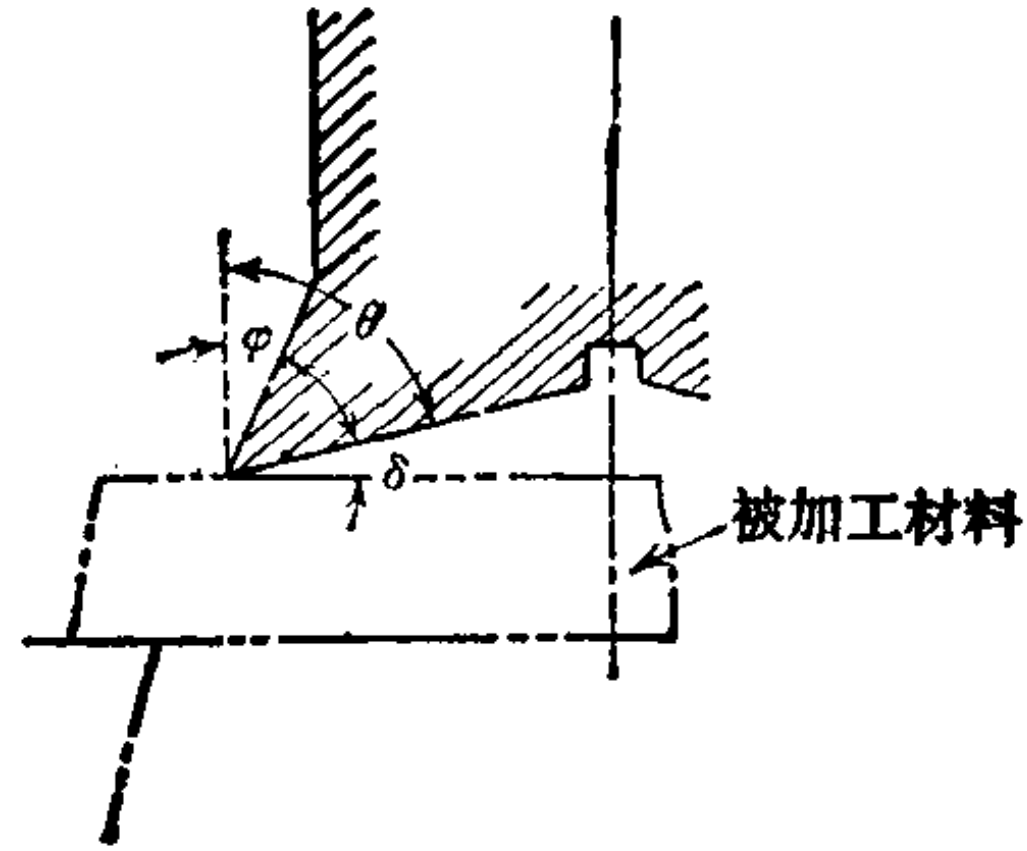


图2.28 模具刃口的一般形状
 φ —后角 δ —前角 θ —刃角

其次，在用有后角 φ 的模具时，如图 2.25 所示，其侧压力 F_p 、 F_d 将减小些，使冲裁中的摩擦阻力 μF_p 、 μF_d 变小，虽然减小得很少，亦使剪切抗力变小。

然而，模具刃口一般作成锐角，给予后角，这不仅使模具的刃口强度变弱，也使模具的制造费用增高，由于和冲裁力略有降低所得的好处相比是得不偿失的，所以作成大前角和后角并非良策。

同时，如果一对刃口作成大后角 φ ，则易使剪切面和板面不垂直而是倾斜的，在模具刃口磨损后重磨时将使模具的轮廓和尺寸发生变形，因此后角 φ 应取在 3° 以下为好。但是为了使落料件容易从凹模孔中落下，在凹模刃口处保留少量的垂直部分，在其以下部分则可作成较大的后角，但亦以 3° 以下为好。

在光洁冲裁和精密冲裁时，为了提高材料在刃口部分的静水压力，抑制剪裂面的产生，往往在刃口部分作成适当的圆角。

d. 侧向力〔15〕 用剪板机剪切板料时，移动刃（上刃）有后让的倾向，这是因为有图 2.25 所示的侧向力 F_p 的作用之故。作用在模具面上的压力 P_p 、 P_d 形成一个力矩，使材料外部上翘中部弯曲，切入部分的材料挤压模具侧面，这是产生侧压力 F_p 、 F_d 的一个原因。这个力相当大，特别是在组合凹模设计时，以及

在分析剪切机理时，是不能忽略此力的。这侧向力单独测量是困难的，但比较容易测得的是侧向力 $F = F_d + \mu P_d$ (凹模侧) 和 $F' = F_p + \mu P_p$ (凸模侧) 从其中扣除摩擦力 μP_d 或 μP_p 后则得凹模侧向力 F_d 和凸模侧向力 F_p 。这种侧向力随凸模行程而变化 (见图 2.29)，一般和冲裁力成比例地增加，但在间隙大时最大侧向力 F_{max} 早于最大冲裁力 P_k 在行程中出现，在间隙小时则相反。

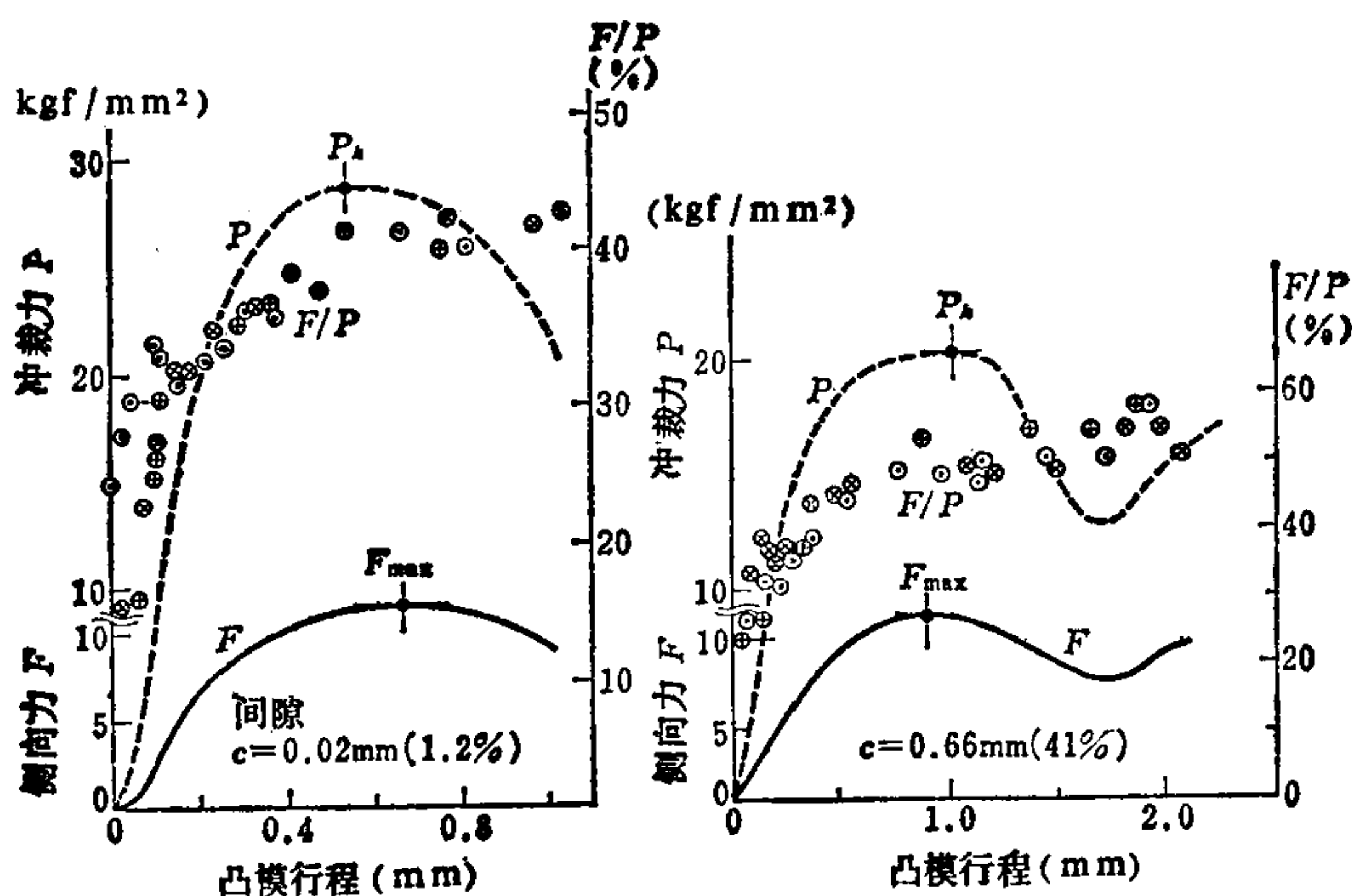


图2.29 剪切曲线和凹模侧向力(被加工材料:厚1.6mm软钢板,由平行直线刃口在两端支承时的两面剪切)

$F_{max}/P_k = \lambda_m$ 的值,因加工条件不同而多少有差异,关于间隙为3%时的凹模侧向力的 λ_m 值举例于表2.1中。特别是对于大量应用的钢板类,其 λ_m 值比较大则必须注意。

e. 卸料力 是指用卸料装置从凸模上卸料所需的力,卸料力因材料的种类和冲裁加工条件的不同而在冲裁力的2.5~20%之间变化。图2.30所示为关于软钢、不锈钢、黄铜和铝合金的卸料力和间隙之间的关系^[16],在间隙值为20%左右时,卸料力最小。间隙取10~30%时,卸料力为冲裁力的3%以下,而间隙小于10%则卸料力急剧增加。在一般的冲裁条件下,卸料力

表2.1 各种材料的 λ_m 值(间隙3%)

材 料	$\lambda_m = F_{max}/P_k$
钢板	0.28~0.38
硅钢板	0.17
黄铜板	0.24
铜板	0.14~0.17
纯铝板	0.08
合成树脂板、硬纸板	0.08

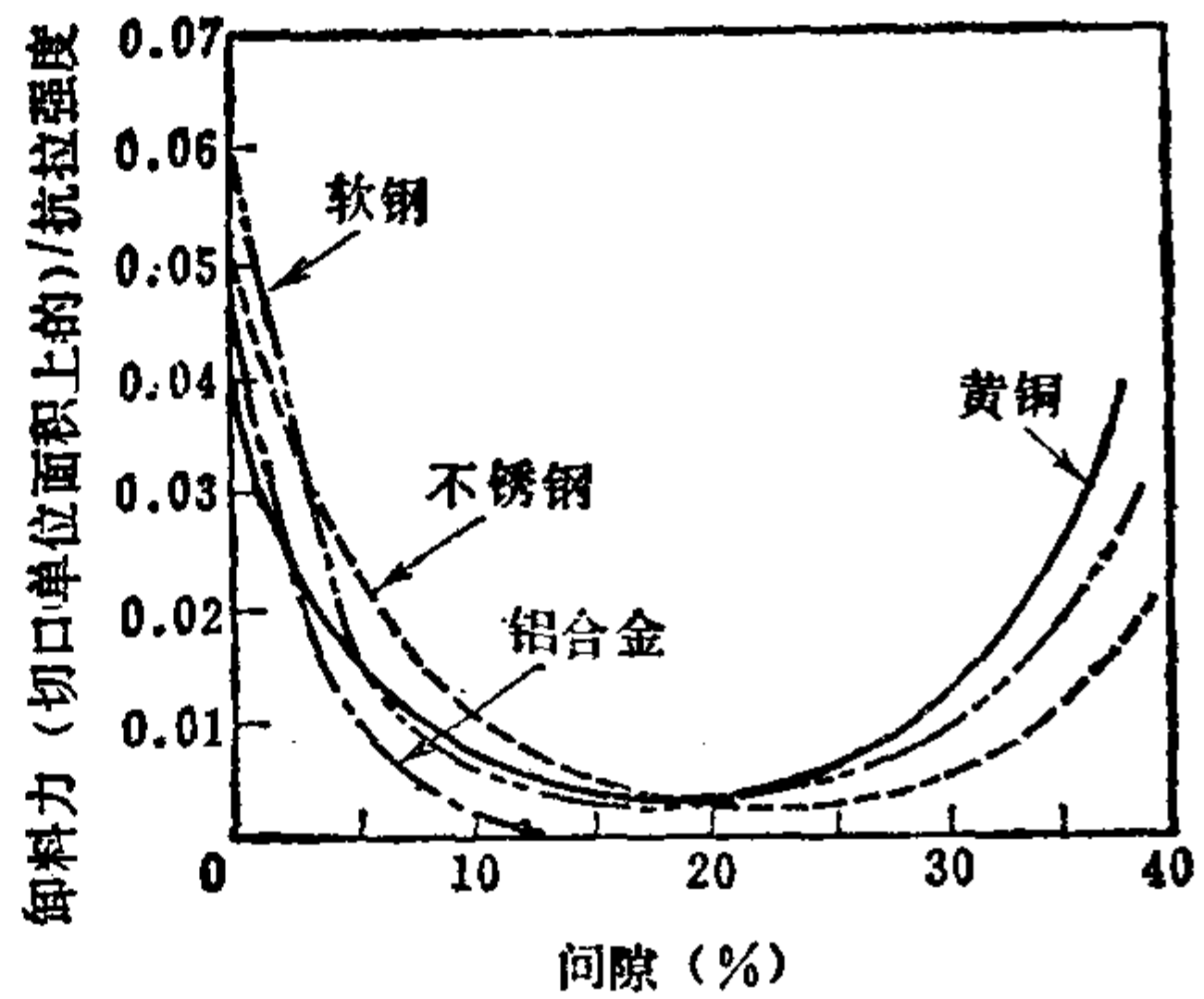


图2.30 卸料力和间隙的关系

P_s (kgf)可由下式方便地估算[17]。材料厚度为 t (mm), 冲裁轮廓长度为 l (mm)。则

$$P_s = 2.5lt \quad (2.9)$$

f. 剪切断面的形状 剪切断面的形状如图 2.31 所示, 大体由以下四个部分组成, 即 i) 剪切面, 这是承受大的剪切变形的表面, 是由模具侧面挤压而得到的有光泽的光洁部分。ii) 塌角部分, 它是模具切入时被压下的自由表面部分。iii) 剪裂面, 是由于产生裂纹而破断的部分, 在该处出现晶粒状表面, 是呈微小凹凸的较大的一个表面。iv) 毛刺。这些部分在整个断面上各占的比例, 将随材料的种类和冲裁条件、孔的内表面或外形等的不同而异, 一般, 延性较好的材料, 断面的大部分是剪切面, 塌角和毛刺也比较大。反之, 延性较小的材料, 塌角和剪切面均较小, 断面的大部分由剪裂面构成。即使同一材料, 由于间隙的大小不同, 使剪切断面的形状亦有变化。

图 2.32 所示为关于冲裁件剪切断面各组成部分 a 、 b 、 d 、 α 、 γ (参看图 2.31) 随间隙变化的示例[18]。图 2.33 所示为间隙的大小不同使剪切断面外观

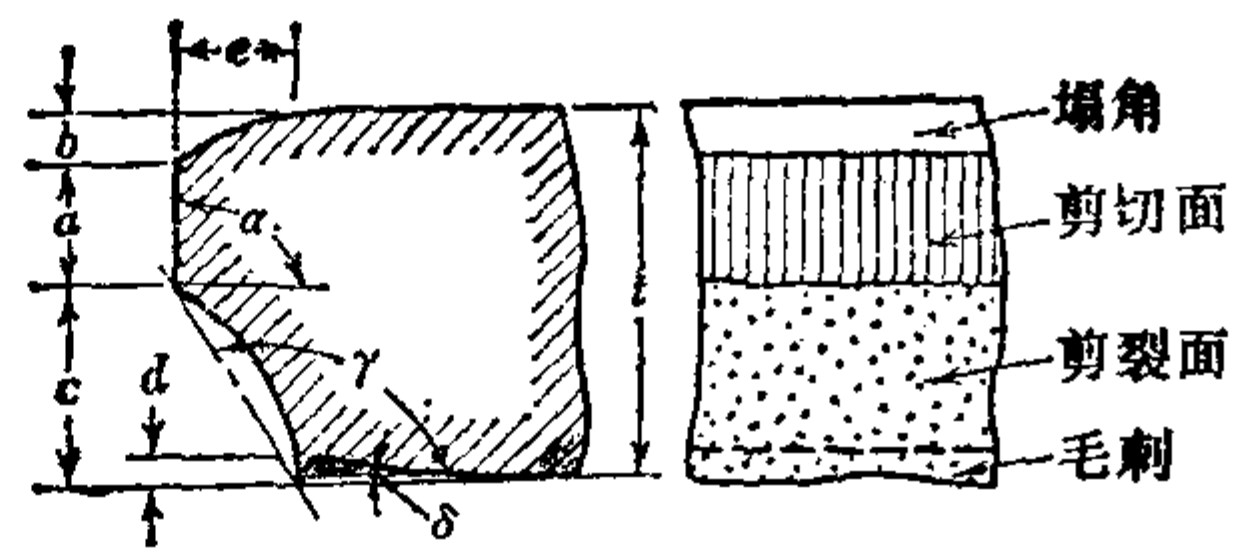


图2.31 剪切断面的形状

变化的模型示例〔19〕。

在不使用压边圈冲裁时，由于凹模上的材料在剪切时上翘，所以凹模上材料的剪切面或多或少对板面呈倾斜、剪切面的倾斜角 α 成为锐角。因此，为得到和板面垂直的剪切面，在冲孔时最好用压边圈，希望在剪切过程中材料在不上翘的情况下进行冲裁。

g. 冲裁轮廓的拐角半径问题 冲裁轮廓的拐角和凹挡的圆角半径 r_0 和 r'_0 （参照图2.34）的大小，对制件的精度和模具的寿命有很大的影响。对于凹挡的圆角半径 r'_0 ，

在凸模的凹挡半径和凹模轮廓的拐角半径都取零时，即 $r'_0 = 0$ ，大致是可能的。对于拐角的圆角半径 r_0 ，即使对应的凹模和凸模的拐角半径都取为零，而冲裁件的拐角处仍会有一定的圆角半径。这时冲裁件上所出现的圆角半径 r_0 和模具的间隙 c 有对应的关系，大体上是 $r_0 = 2.5c$ 〔18〕。因此，在板材较厚时，因按比例取较大的间隙 c ，则必然出现一定的圆角半径 r_0 ，所以制件的拐角处圆角半径设计成 $r_0 = 0$ 是无意义的。

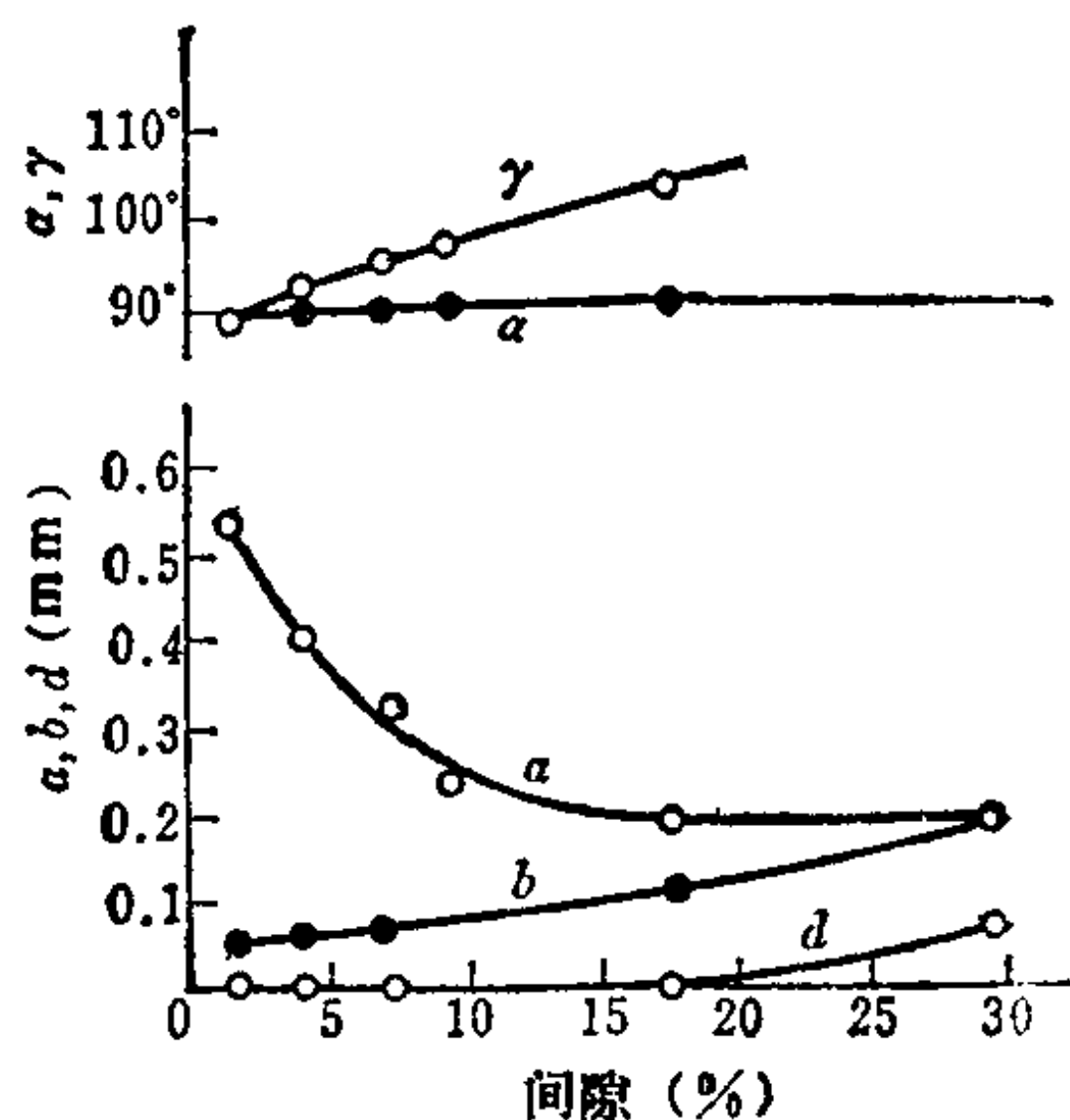


图2.32 方形冲裁件（0.61mm厚铜板）的直线部的剪切断面形状和间隙的关系

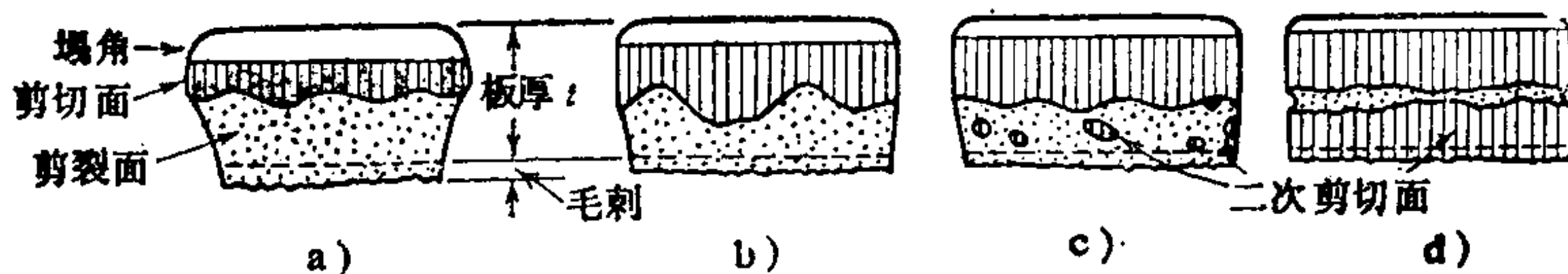


图2.33 间隙对冲裁件断面形状的影响

a) 大间隙 b) 中等间隙 c) 小间隙 d) 极小间隙

同冲裁轮廓的拐角和凹挡相对应的模具的圆角半径 R ，也与

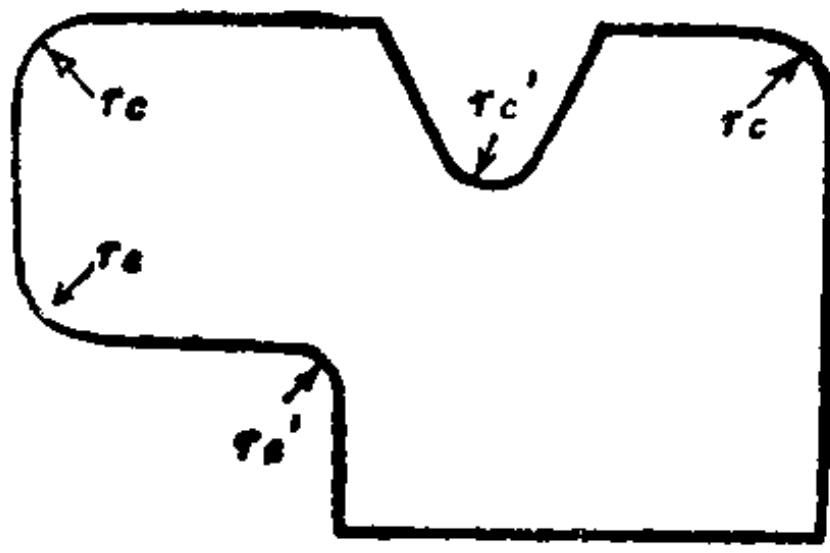


图2.34 冲裁件的拐角和凹挡处圆角半径 r_c, r'_c

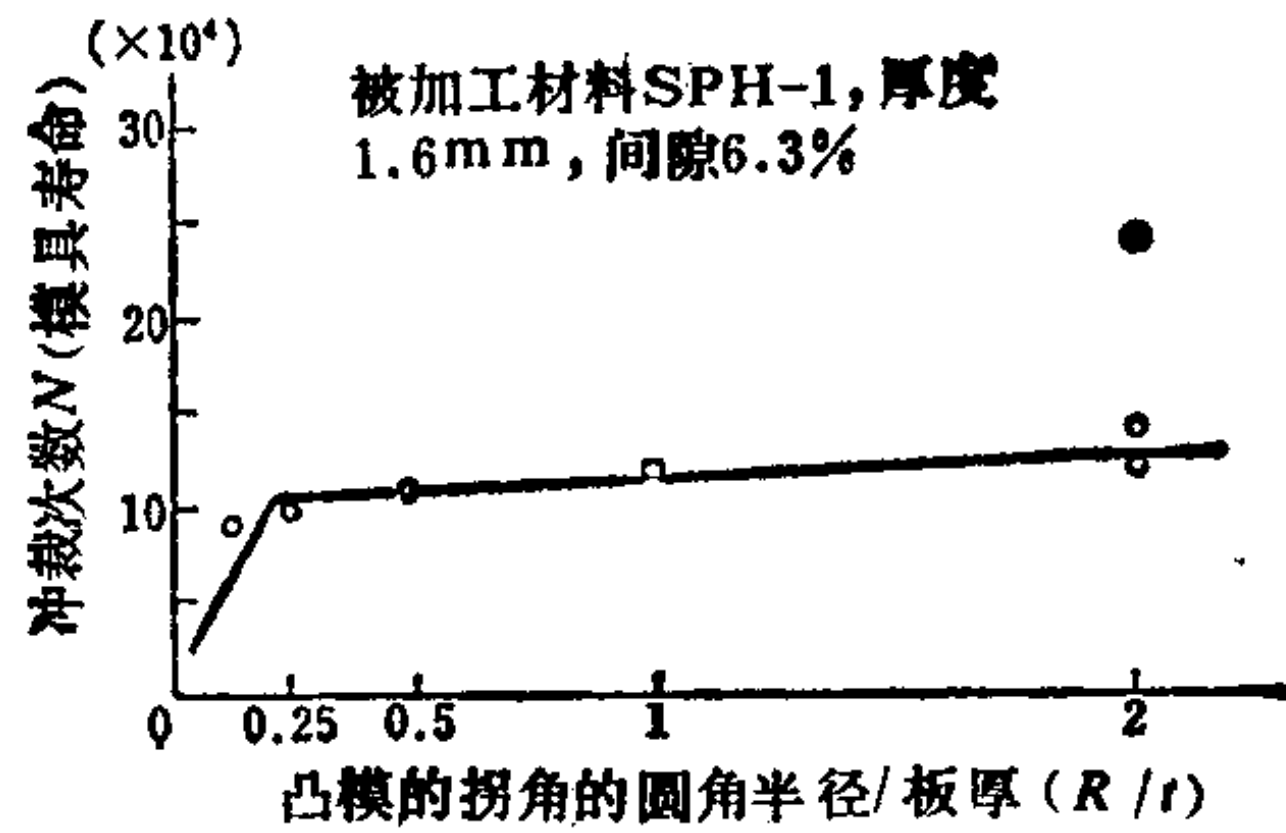


图2.35 冲裁件外轮廓的拐角处圆角半径和模具寿命的关系 (制件出现0.1mm高度的毛刺时模具的寿命)

模具的寿命有很大的关系, 根据日比野等的试验结果, 如图2.35所示, 当 R/t 小于 0.25 时, 模具的寿命急剧降低〔20〕。因此, 在大量生产时, 冲裁件轮廓的拐角和凹挡处圆角半径 r_c 和 r'_c 最好不要设计得过小。

h. 冲裁速度 众所周知, 在一般情况下, 金属材料的变形速度增高, 其变形抗力也增大。因而, 冲裁速度越高, 剪切抗力越大。图 2.36 是在低于实用的冲压速度范围内, 所求得的关于软钢和铝的冲裁速度对剪切抗力 k_{sm} 和所需冲裁功 w 的关系。由图可知, 随着冲裁速度 \dot{x} ($\dot{x} = \dot{s}/t$, 其中 \dot{s} 为凸模速度, t 为材料的厚度) 的增加剪切抗力 k_{sm} 和冲裁功 w 亦随之稍有增加。其关系可用下式表示:

$$k_{sm} = K(\dot{x})^n, \quad w = K'(\dot{x})^{n'} \quad (2.10)$$

用材料试验机进行冲裁试验时, 例如用很慢的冲裁速度 $\dot{x} = 0.004$ (1/s) 进行冲裁, 这时的 k_{sm} 和 w 分别以 $(k_{sm})_{stat}$, w_{stat} 表示; 以压力机滑块的速度达 190s.p.m 的较高的冲裁速度为例, $\dot{x} = 120$ (1/s), 此时的 k_{sm} 和 w 分别以 $(k_{sm})_{dyn}$, w_{dyn} 表示, 动态和静态冲裁力和所需冲裁功之比分别用下式表示:

$$K_1 = (k_{sm})_{dyn}/(k_{sm})_{stat}, \quad K'_1 = w_{dyn}/w_{stat} \quad (2.11)$$

公式 (2.10) 和公式 (2.11) 中的指数 n , n' 和 K_1 , K'_1 , 对于各种材料所求得的数值, 见表 2.2〔21〕。

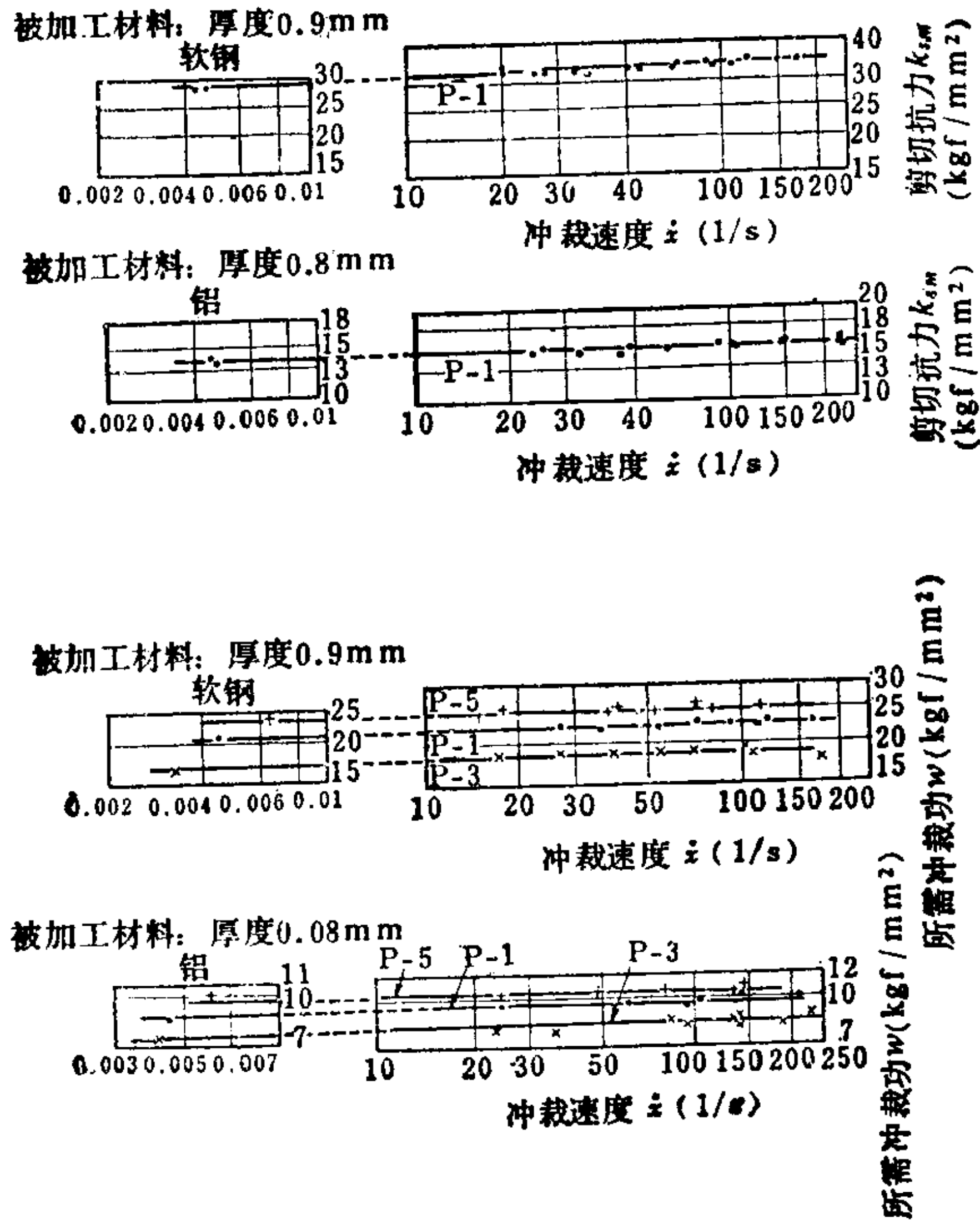


图2.36 在冲裁 $\phi 11.8\text{mm}$ 的圆形工件时冲裁速度对剪切抗力和所需冲裁功的影响

间隙: P-1.....0.05mm P-3.....0.14mm P-5.....0.30mm

表2.2 冲裁速度对剪切抗力和所需冲裁功的影响

材 名 称	料				n	K_1	n'	K'_1
	厚度 (mm)	抗拉强度 (kgf/mm ²)	延伸率 (%)	硬度 HV				
锡	0.8	23.3	30.6	99	0.056	1.78	0.044	1.57
软钢	0.9	33.6	29.4	91	0.016	1.18	0.011	1.12
铜	0.8	24.7	19.1	59	0.016	1.17	0.012	1.13
铝	0.8	19.9	2.9	45	0.008	1.086	0.008	1.086
锌白铜	0.65	74.4	4.7	178	0.004	1.042	0.000	1.00
6/4黄铜	0.5	41.2	18.8	99	0.003	1.031	0.000	1.00
磷青铜	0.7	79.4	14.5	177	0.000	1.00	0.000	1.00

T ——作用在凸模下材料上的轴向力（图 2.25 中以拉力表示）。

在冲裁过程中，凸模下面的材料上作用有由公式 (2.12) 表示的弯曲力矩 G_m ，引起相当大的弯曲，直到冲裁終了。此弯曲力矩 G_m 是相当大的，大体上达到塑性弯曲的领域，所以在冲裁结束后由于回弹，使制件虽有一定程度的展平，但制件仍残留有一些弯曲。公式 (2.12) 表明：间隙 c 越大，弯曲力矩亦越大，所以制件的弯曲亦大。

图 2.39 所示为冲裁件的弯曲和间隙的关系的实测例。在制件不允许有弯曲时，可减小间隙，若有可能采用凸模下的顶板，并作用以接近于冲裁力的顶料力，则可使材料在不弯曲的情况下冲裁。

此外，对凹模上的材料采用压料板，并不能减小弯曲力矩，多数情况反而使冲裁件的弯曲增大。

若间隙过小，则落料件的尺寸将大于凹模孔的尺寸，因为落料件在通过凹模孔落下时，剪切表面挤压着凹模孔的侧面向下移动，制件仍将产生较大的弯曲，对此必须注意。图 2.40 所示即为一例〔23〕。

j. 冲裁件的尺寸精度〔74〕，在冲裁加工时，刃口部分因作用有加工力（见图 2.25）凹模孔轮廓不可能严格维持无载荷时的形状和尺寸。同时，对于材料来说，除了在工作中产生弯曲外，在板面的方向还作用有相当大的轴向力 T ，从而产生变形。因此在加工结束时，则产生回弹，使制件的尺寸不同于凹模孔和凸模的尺寸。

以上诸因素的效果，有的使制件的尺寸增大，有的使之减小，

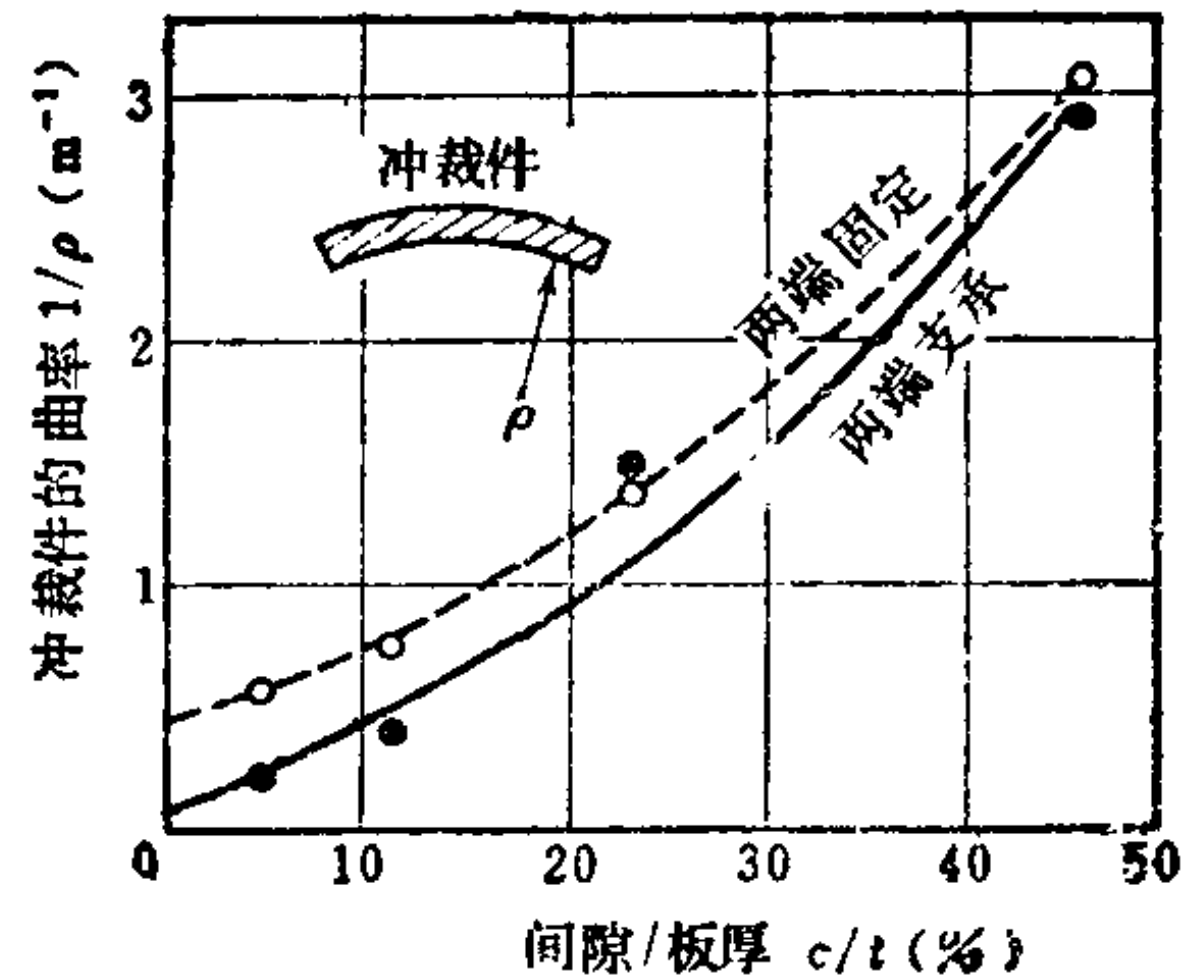


图2.39 间隙对冲裁件弯曲的影响（厚度1.6mm软钢板，由平行直线刃口两面剪切的情况）

同时，这些影响不随间隙的不同而异。关于冲裁间隙对制件尺寸的影响一般的倾向是：当间隙小于5%时，制件尺寸随间隙增大而减小；当间隙为5~25%

时则其尺寸变化不太大；当间隙大于25%时其尺寸再次变小。然而间隙极小（小于2%时），制件的尺寸比凹模孔的尺寸大。

图2.41为间隙对圆形冲裁件外径尺寸的影响的示例〔24〕。同时，在一般情况下，间隙越小，制件尺寸的偏差 δ 亦越小，如图2.42所示，可得到精度高的制件。

其次，凹模孔直径 d_d 对材料厚度 t 之比值 d_d/t 变化时，冲裁件的尺寸（见图2.43）出现复

杂的变化。这里，可以认为造成其尺寸变化的各种因素的效果是随 d_d/t 的改变而变化的。图2.44所示为 $\Delta D/d_d$ 和 d_d/t 的关系的实测例。这里

$$\Delta D = \text{冲裁件外径} - \text{凹模孔的直径}$$

图2.45所示是冲孔的尺寸和间隙的关系〔24〕。

k. 高速冲裁在2.2.2节h中叙述了由于冲裁速度提高使制件剪切断面的质量提高的情况。另外，C. Zener的报告指出：凸模和凹模以3m/s以上的高速度冲裁时比在慢速冲裁时可得到剪切变形区小、塌角小和整体变形都小的良好的制件〔25〕。由此证实了由于加大冲裁速度，使用仅有凸模和凹模的简单模具即能得到和精密冲裁相比美的制件。最近，高速冲裁加工已引起各方面

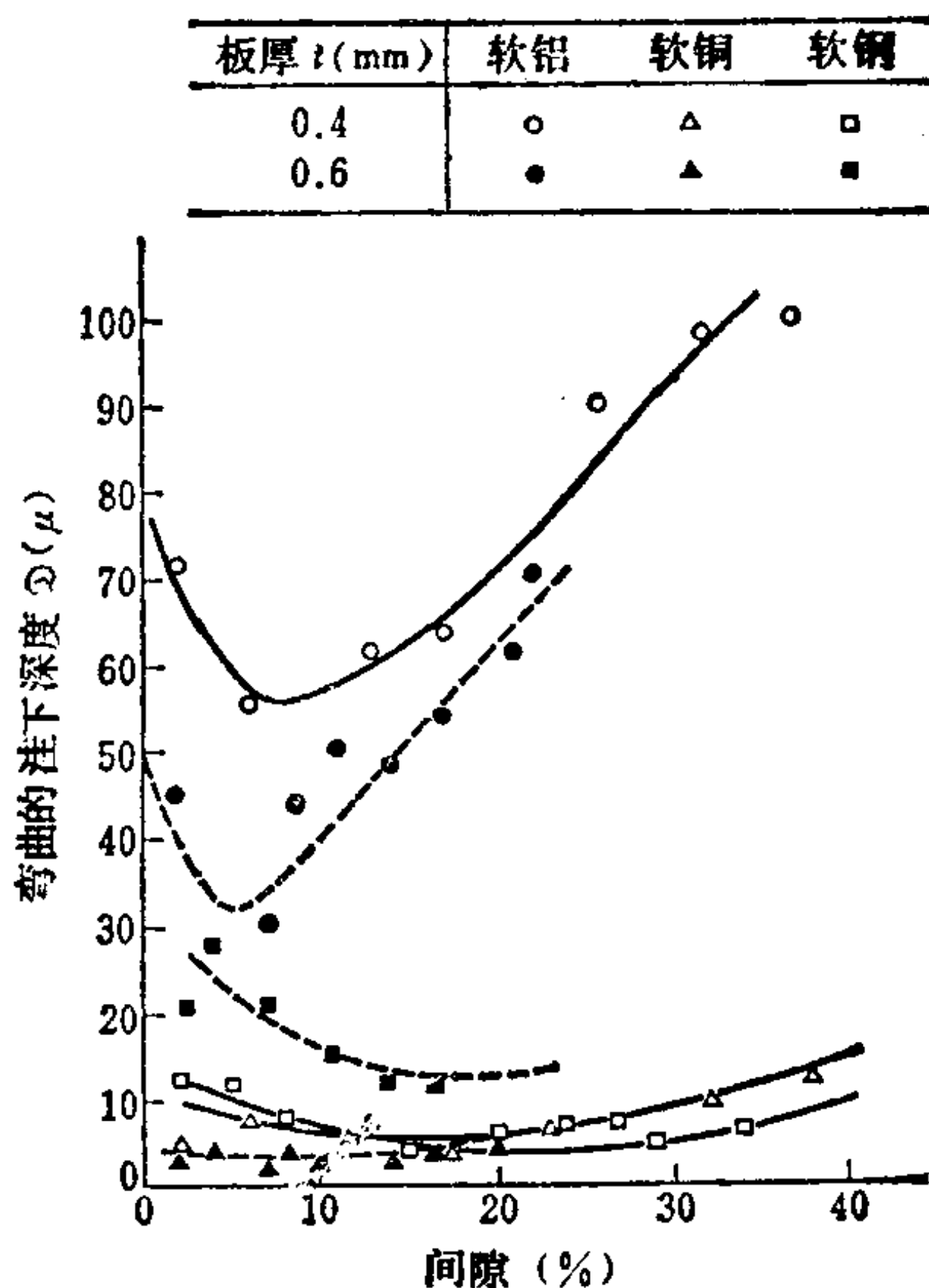


图2.40 间隙对直径5 mm冲裁件的弯曲的影响（前田、田村）

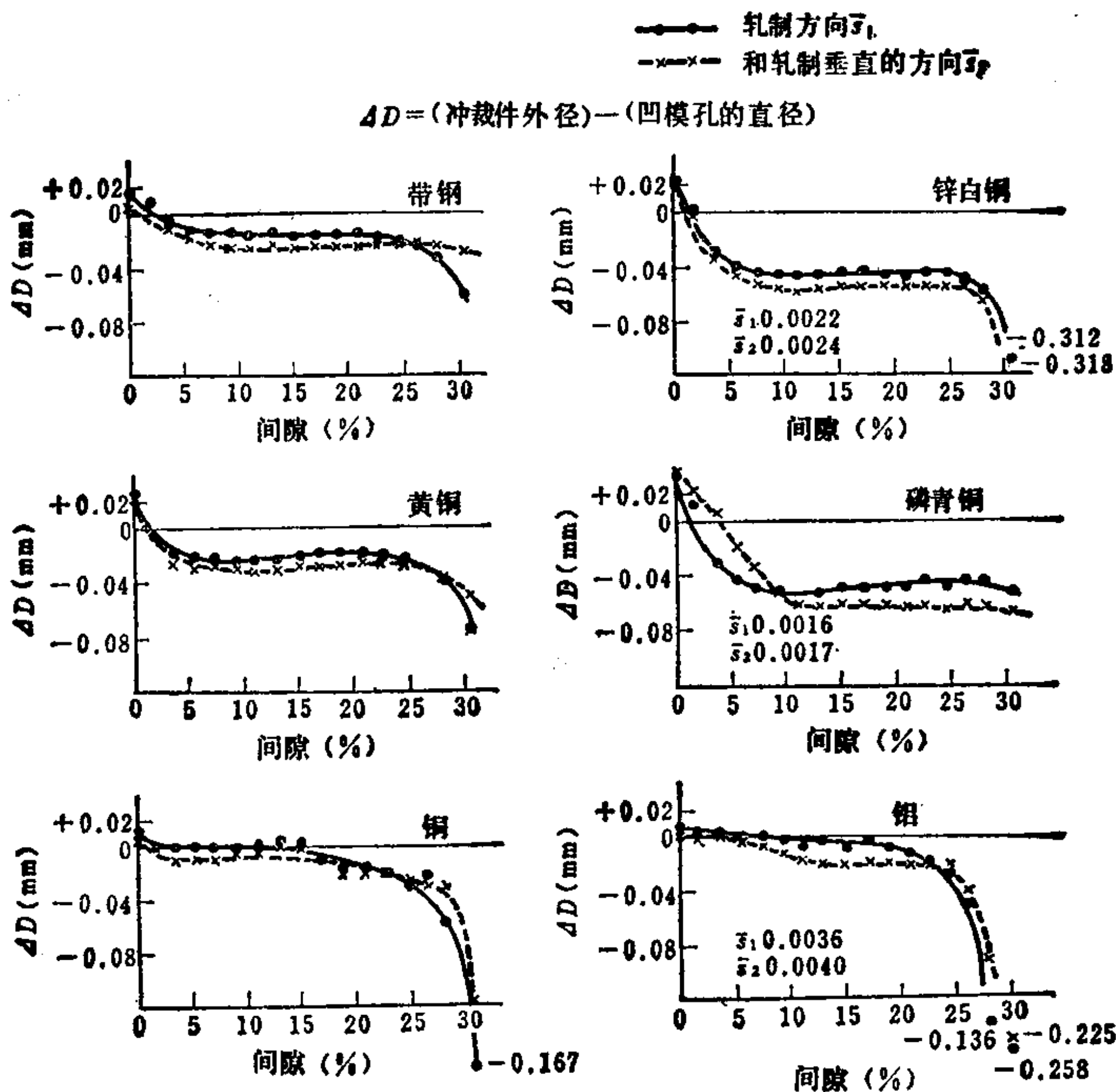


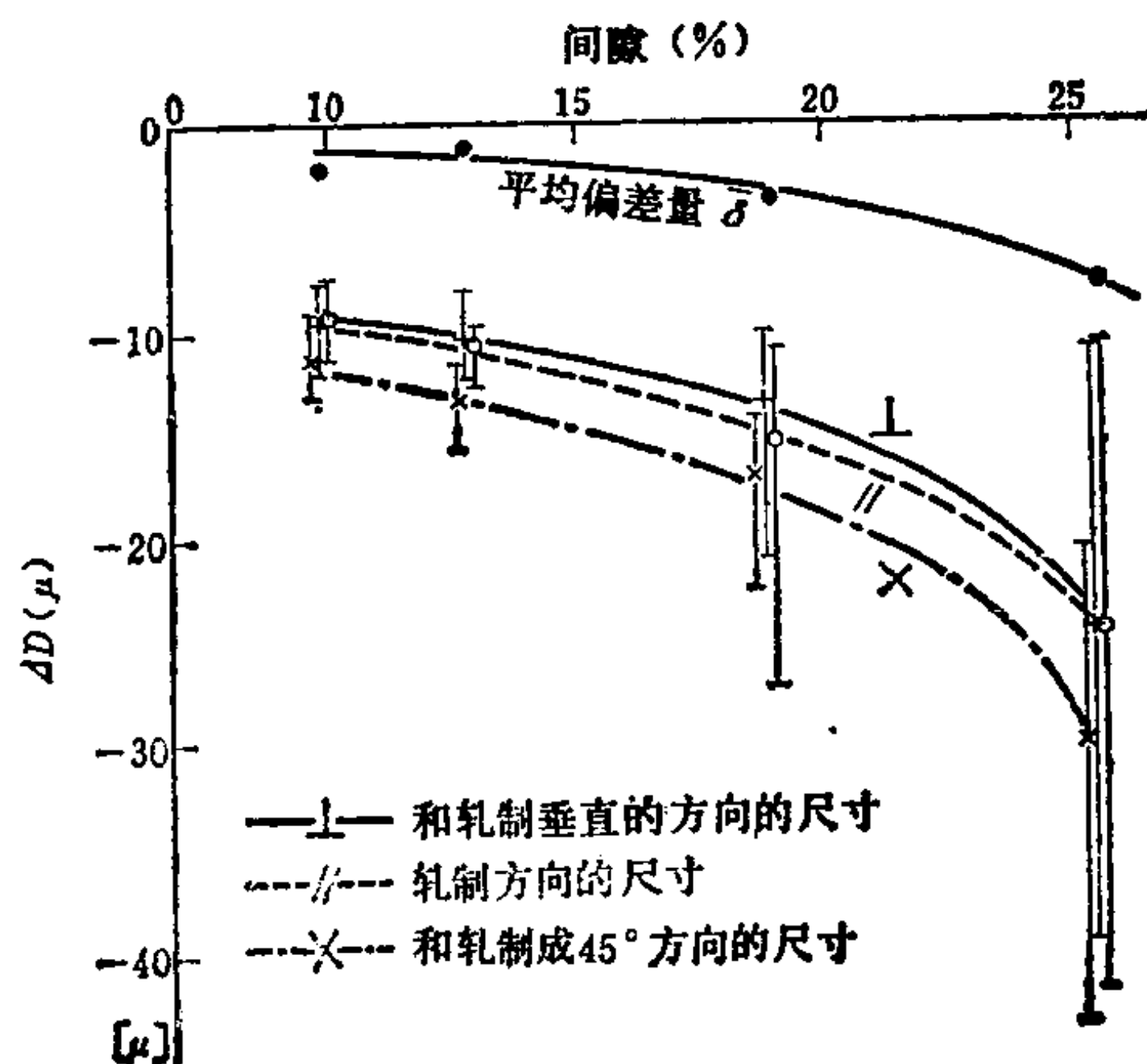
图2.41 冲裁圆形件时制件的外径尺寸

图2.42 用厚度0.59mm镀锡钢板冲裁直径 $\phi 20\text{mm}$ 制件 (无压料板) 时, 间隙对制件尺寸精度的影响

$\Delta D = \text{冲裁件的直径 } D - \text{凹模孔的直径 } d_d$

$$\bar{\delta} = \sqrt{\sum(D - D_m)^2 / n}$$

式中 D_m —— 制件尺寸 D 的平均值;
 n —— 试件数。



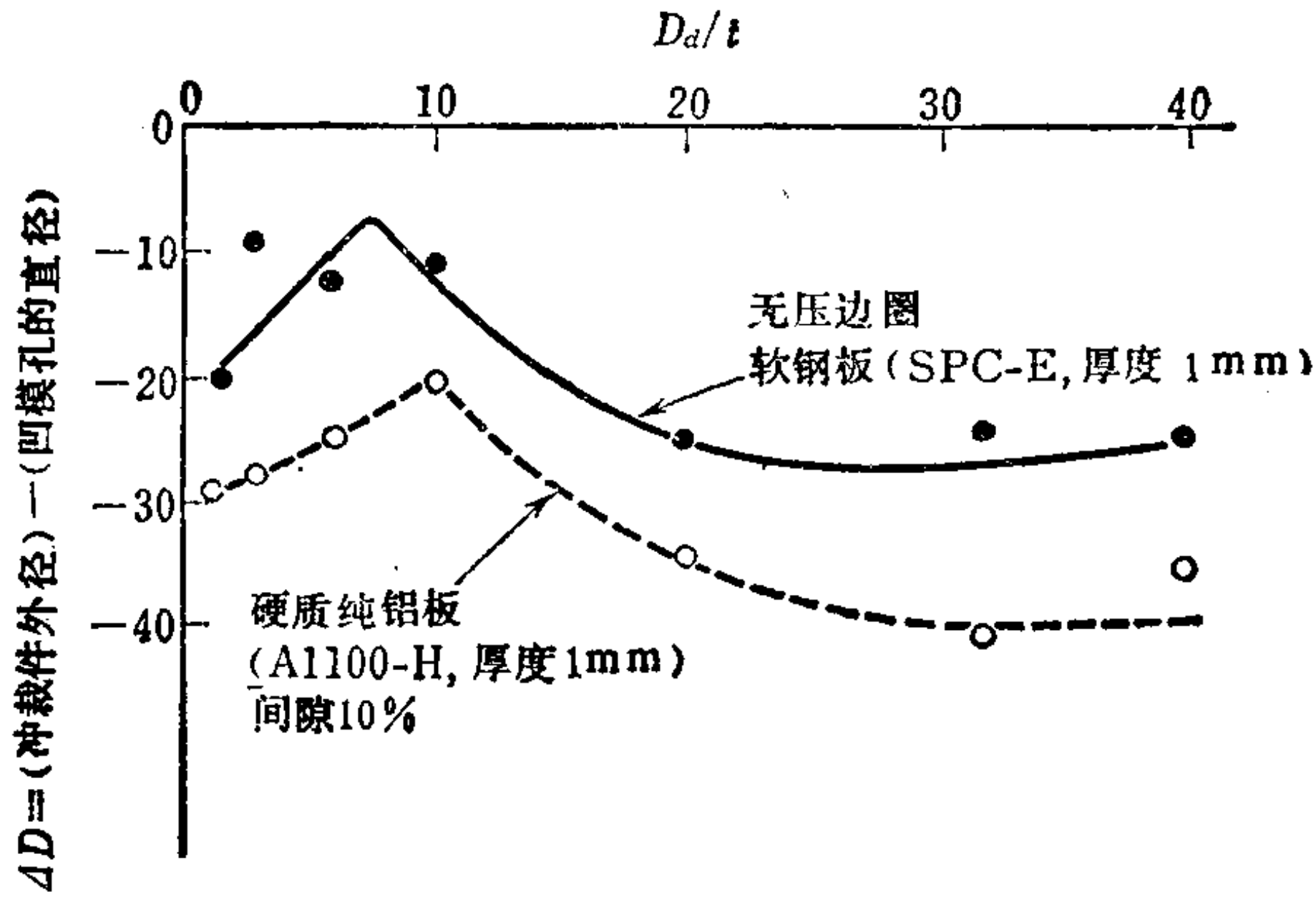


图2.43 冲裁直径对制件尺寸 (ΔD) 的影响 (前田、中川)

的注意。

在高速和低速下冲裁件的质量不同，是由于冲裁时材料变形的差异而造成的。由 J. C. Mikkers 对厚度 8mm 软钢板用 $\phi 15\text{mm}$ 的凸模以 45m/s 的高速进行冲裁的试验表明，间隙取 5% 时，因为冲裁初期（凸模切入量仅 2mm 左右）产生的裂纹大致和冲裁方向平行，就这样一直发展到终了，故其剪切面没有粘连现象，剪切断面比较平直而光洁。而在低速冲裁时，则产生二次剪切，在剪切面上可看到有粘连和二次剪切面，必然得不到光洁的剪切断面。对于相同的材料，由于间隙的变化，在高速和低速冲裁时制件的剪切断面质

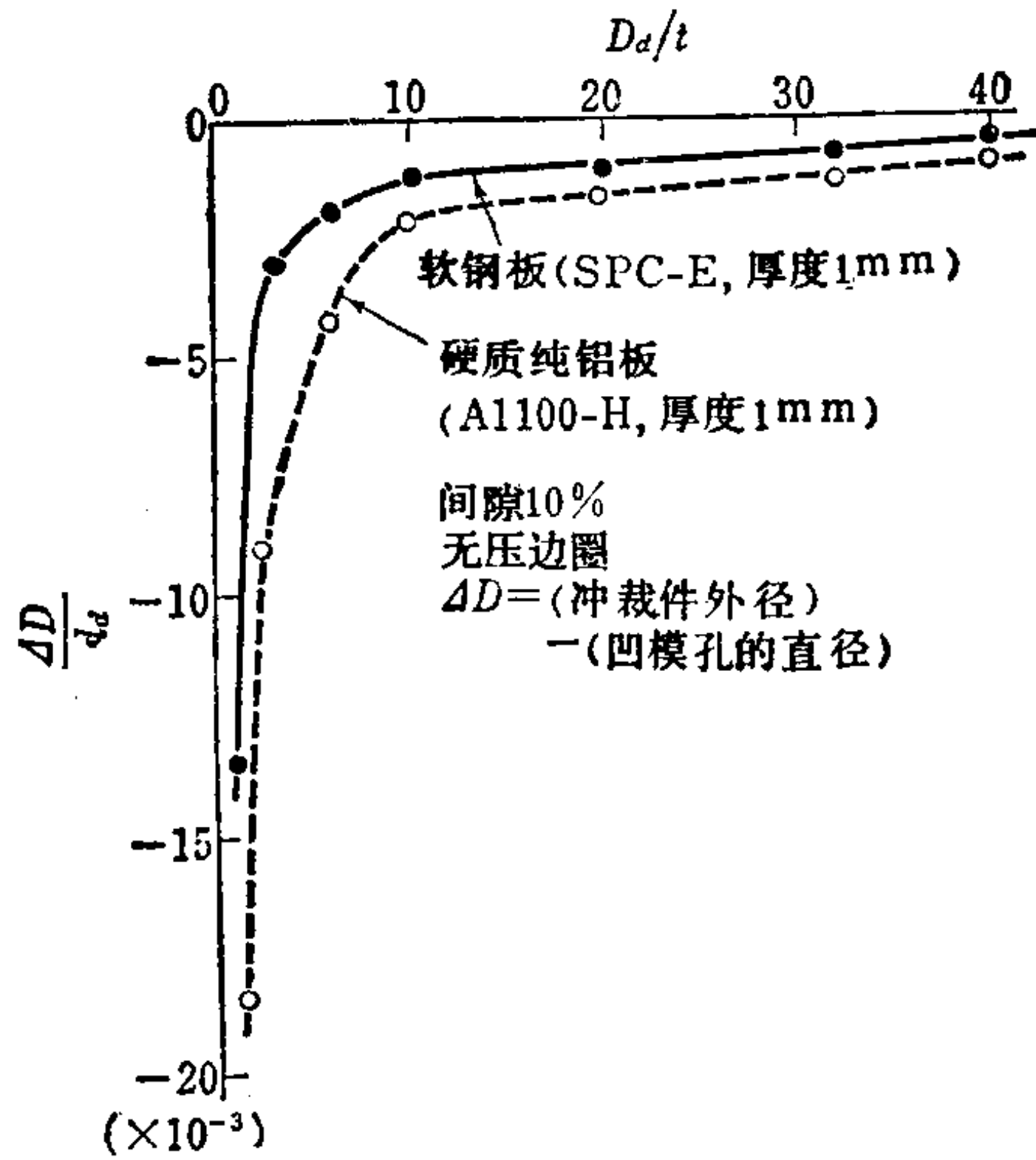


图2.44 冲裁直径对制件尺寸 $\Delta D/d_s$ 的影响 (前田、中川)

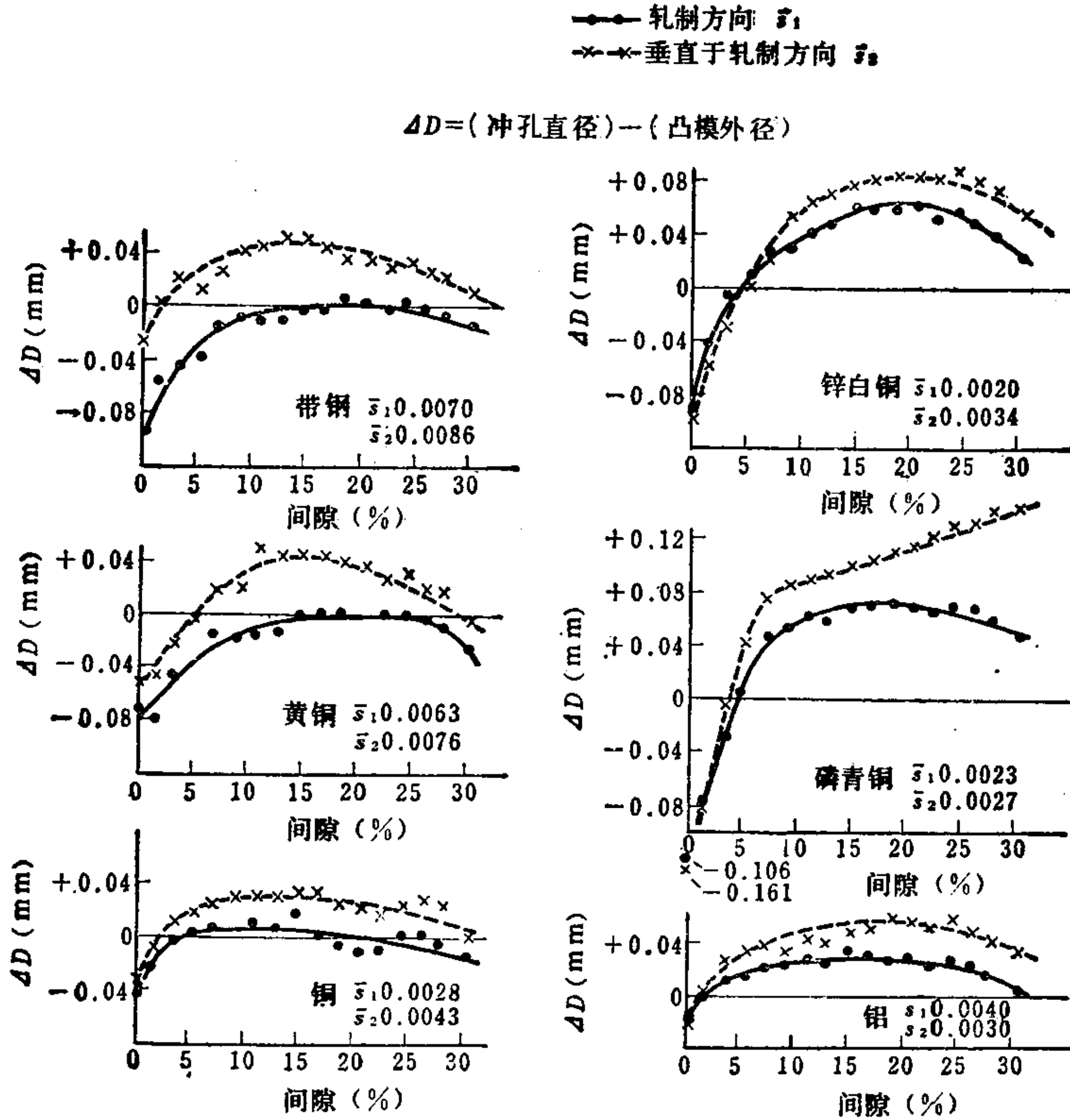


图2.45 冲裁圆形件时冲孔的尺寸

量有所差异，如图 2.46 所示，在低速时间隙在 5% 以下，可见到粘连和二次剪切面，而在高速冲裁时不论间隙大小，其剪切断面都比较平整〔26〕。并且，冲裁造成的变形层的厚度，高速时要比低速时薄。这一点可由剪切断面附近材料的硬度分布上看出，如图 2.47 所示，在低速冲裁时的加工硬化层比较厚〔27〕。

在高速冲裁时，材料由于塑性变形而生热，在变形区温度显著上升。以 Zener 和 Hollomon 的试验为例〔28〕，在剪切钢时出现了局部温度达 700°C 的高温，由于这样高的温度，使材料局部软化，在表面层可认为有再结晶。这种温度上升，对热传导性差的钢比热传导性好的铝和铜等更为显著，剪切部分的表面会出现黄

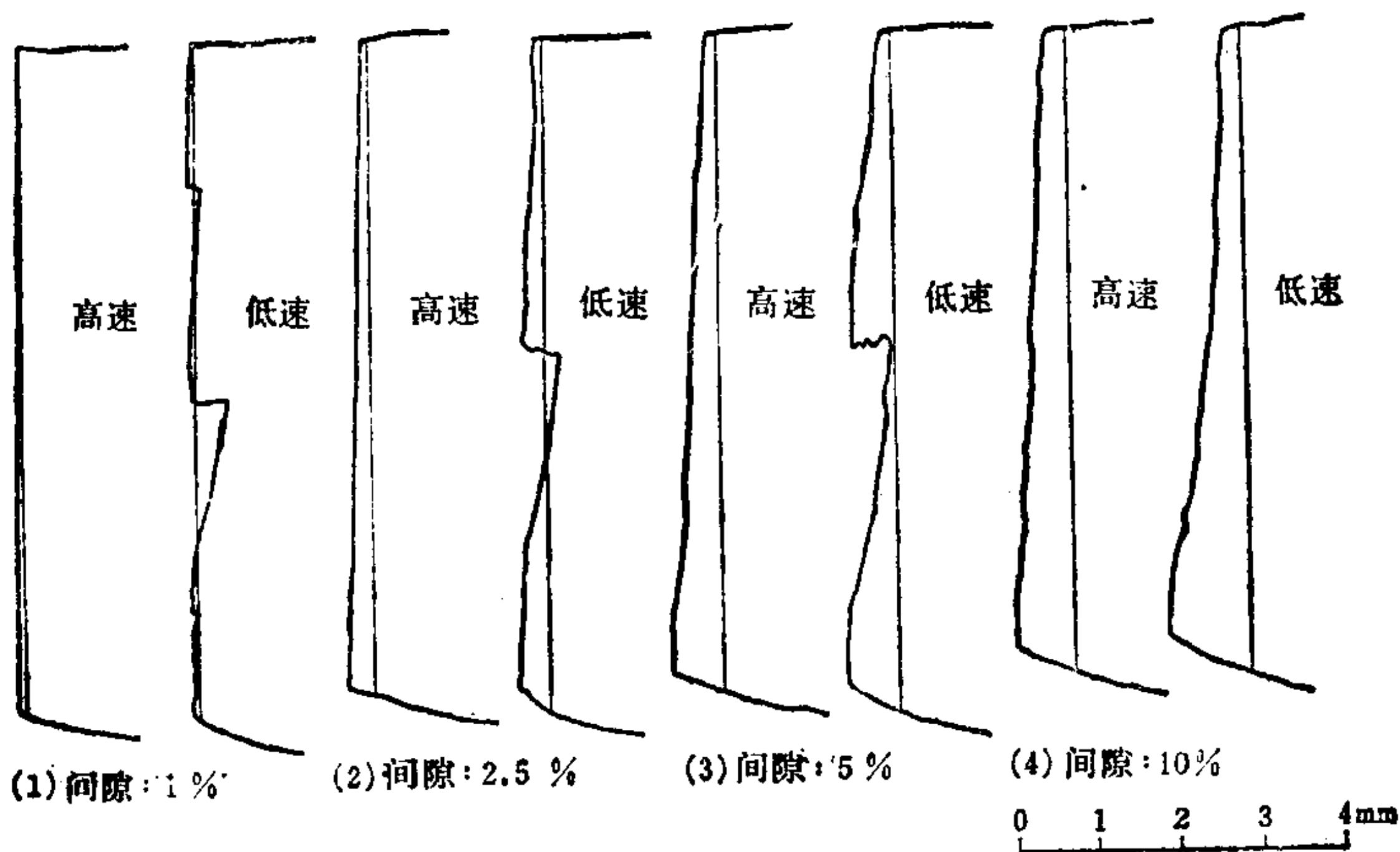


图2.46 高速和低速冲裁时制件的剪切断面形状的比较 (J. C. Mikkers)

被加工材料：厚度 8 mm 软钢板；凸模直径 $\phi 15\text{mm}$

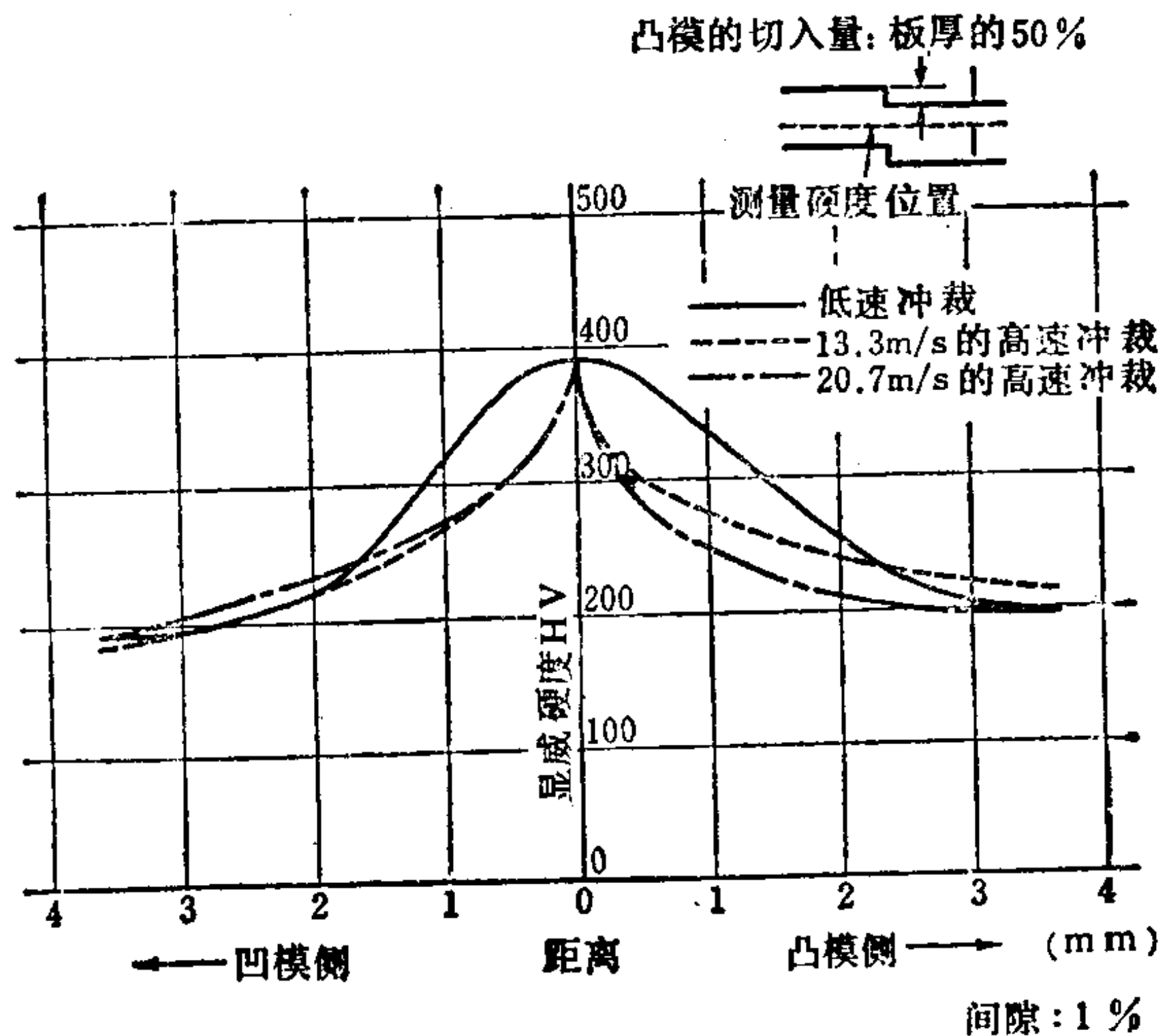


图2.47 高速和低速冲裁时冲裁变形部分的加工硬化的比较 (R. Davies)

被加工材料：厚度 12.7 mm 的 C0.8% 钢板；间隙：1%；
凸模切入量：测量到板厚的 50% 为止

色或蓝色的回火颜色。对于上面所讲的,可以认为对于钢的冲裁,高速的效果表现得更为突出。可以说,这种温升是低速和高速冲裁时材料变形不同的一个原因。但是,冲裁速度增大到约 40m/s 以上时,对于不同材料的剪切面有时会恶化〔29〕。

在冲裁过程中,材料变形的差别也表现在冲裁行程和力的关系曲线图上,图 2.48 是关于软钢和铝的示例〔30〕。延性大的材料,随着冲裁速度的上升最大的冲裁力亦增大。反之,材料达到冲断时凸模的切入行程却减小。为此,在高强度钢和硬质黄铜冲裁时,最大冲裁力的提高并不显著。对于高强度钢,只有冲裁速度达到 4.8m/s 以上时冲裁力的上升才开始显著。其冲断行程值亦显示出和上述延性大的金属冲裁时同样的倾向。

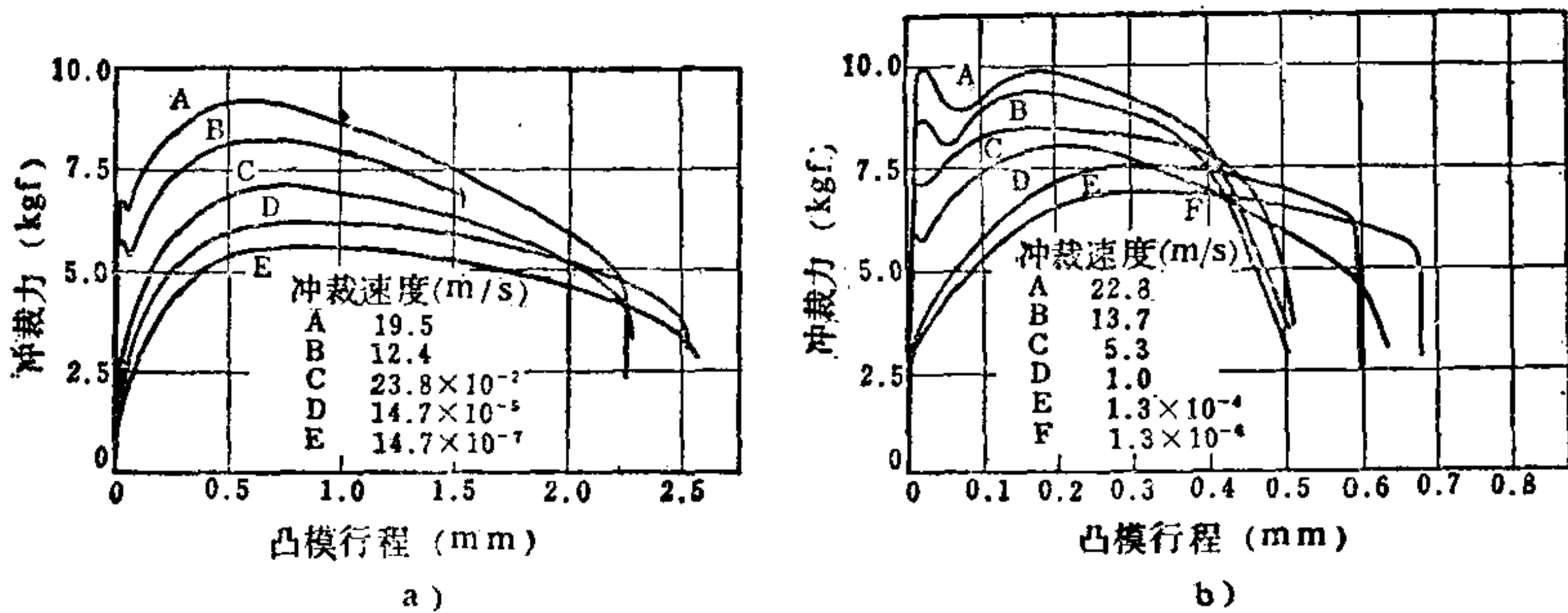


图 2.48 高速和低速冲裁时的冲裁力曲线 (A. R. Dowling 等)

凸模直径 $d_p = \phi 9.53\text{mm}$, 凹模孔直径 $d_d = \phi 9.58\text{mm}$, 间隙 $0.025 \pm 0.005\text{mm}$

a) 铝 (板厚 3.18mm) b) 软钢 (含碳量 0.045%, 板厚 0.794mm)

高速冲裁的最大优点是剪切断面的性质和形状的改善,图 2.49 所示为冲裁速度对软钢和黄铜制件的塌角和弯曲的影响。由图可知,高速冲裁时塌角和弯曲均较小,可得到剪切断面良好的制件〔26〕。一般情况下,间隙的大小影响不大。然而,在间隙很小 ($<1\%$) 时当冲裁速度超过 10~12m/s,则塌角和弯曲将变大。

关于剪切断面的锥度,一般随着冲裁速度的提高而减小。在冲裁软钢时如速度超过 9m/s 时,则切面锥度又将随速度的增加

而略有增加。若间隙选定在 1.5% 左右、冲裁速度在 9.5m/s 时, 可得到几乎没有锥度的剪切断面〔31〕。

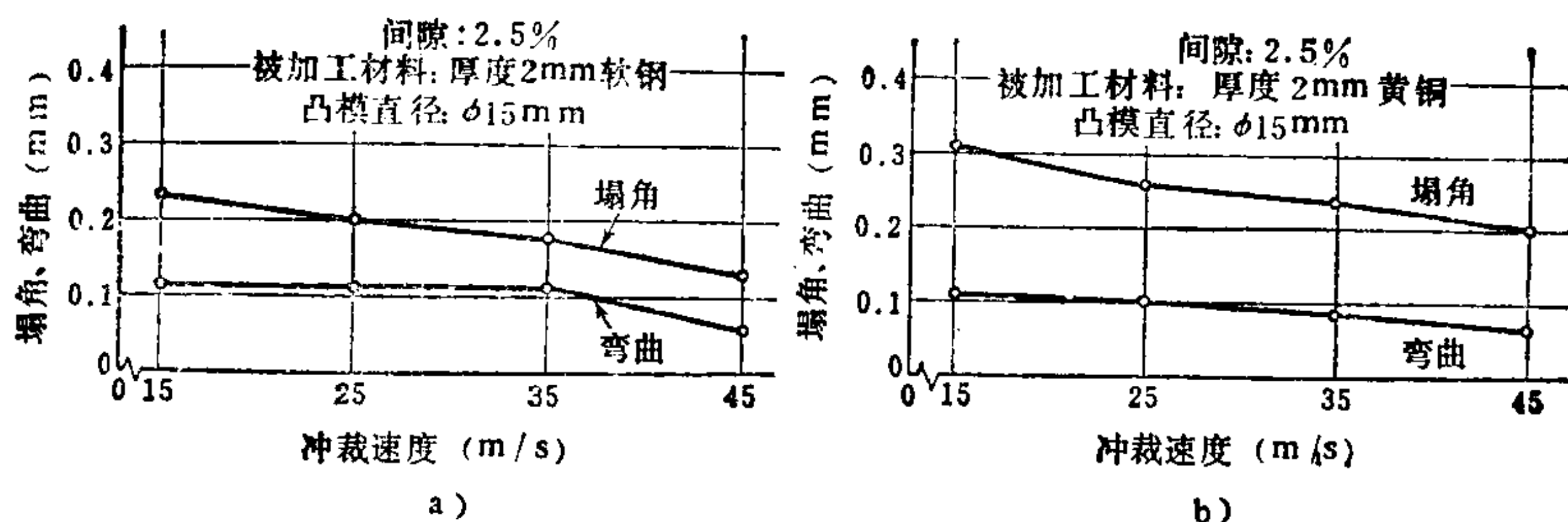


图2.49 冲裁速度对冲裁件的塌角和弯曲的影响 (J. C. Mikkers)

a) 软钢 b) 黄铜

2.2.3 冲裁模的磨损和寿命〔84〕

在大量生产中, 冲裁模的磨损对制件的精度和模具费用方面的影响非常大。冲裁模的磨损这个重要的问题作为研究的对象, 是从 1960 年正式开始的。

a. 刃口的磨损 冲裁加工时材料上作用着如图 2.25 所示的各种力, 同时因为在模具表面和材料之间或多或少有相对的滑动, 所以在模具的接触部分当然产生磨损。即是说在每次冲裁时模具的刃口部分在接触面上都会有微量的磨损。

所谓磨损, 是包含了很多复杂的因素, 决不是单纯的现象。通常, 从磨损原因来看, 有如下 4 种不同的类型:

(i) 粘着磨损; (ii) 刮痕磨损; (iii) 腐蚀磨损; (iv) 点蚀磨损。对于冲裁模来说一般认为主要是由粘着磨损和刮痕磨损引起刃口磨损的。

在两种金属的接触面产生相对移动 (滑动) 时, 接触面将产生粘着现象, 在粘着部分发生剪切, 则较软的金属被粘着而产生磨损。这种磨损称为粘着磨损。

关于粘着磨损有著名的 Molm 法则, 即设软质材料的磨损体积为 V ($=$ 磨损深度 $h \times$ 表面积 A), 则 V 可由下式确定:

$$V = Z(PL/H) \quad (2.13)$$

式中 P ——作用在两个面之间的总压力；
 L ——摩擦距离；
 H ——软质材料的硬度；
 Z ——机率系数。

公式(2.13)为表示软质材料方面磨损的公式，磨损的大部分当然是产生在软质材料一方，而在相对应的硬质材料一方亦将产生微量的磨损，其磨损体积 V' 由下式给定：

$$V' = (\sigma_y/\sigma'_y)^2 V \quad (2.14)$$

式中 σ_y, σ'_y ——分别为软质材料和硬质材料的屈服应力。

冲裁模的刃口磨损，当然是指硬质材料的磨损。根据以上的法则，冲裁力 P 越大，板材越厚（相对摩擦距离 L 越大），同时模具刃口的硬度及其屈服应力越小，而被冲裁材料的硬度和屈服应力越大，则刃口的磨损越大。如果接触表面之间有润滑剂存在，则由于机率系数 Z 减小，所以刃口的磨损减少。

还有，在材料表面附有硬的氧化皮时，例如，在冲裁发蓝的贝氏体钢或附有绝缘层的硅钢板时，不易引起粘着现象，但由于硬的氧化皮的存在，接触面之间相对移动时，刮痕磨损成为主要的形式，各种影响因素的效果，可按粘着磨损作相似的定性分析。

b. 刃口的磨损形状 在各种条件下进行冲裁加工，观察刃口的磨损形状有如下的三类情况：倾斜磨损、凹坑磨损以及两者混合的凹坑倾斜磨损。图 2.50 所示为 Buchmann 测定的磨损形状。图 2.50 a)、f) 为凹坑磨损，图 2.50 e) 为倾斜磨损，图 2.50 c)、d) 为凹坑倾斜磨损^[33]。这种磨损形状，不一定是在每个冲模刃口上都是固定不变的，多半是伴随冲裁次数而有所变化。如图 2.50 j) 所示，冲裁开始是凹坑磨损（左图），随着冲裁次数的增加转变为倾斜磨损（右图）。那样由于刃口的磨损，使凸模的侧面和凹模侧面之间的距离增加，所以冲裁的实际间隙增加，同时由于凸模面和凹模面的磨损，使加工力和压力分布发生变化，当

然刃口磨损形状也发生变化，这是应考虑。

此外，相对应的凸模和凹模的刃口磨损形状亦不尽相同。在一般冲裁的大多数情况下，因为材料在冲裁轮廓线外侧，即在凹模面上的滑动量，比在轮廓线内侧，即在凸模面上的滑动量要大一些，因此，公式(2.13)中的L值凹模侧的大，所以通常凹模面的磨损比凸模面的磨损大。因而，采用强力压边圈，如果能抑制凹模面上的材料的滑动，则凹模面上的磨损可减少。根据 Buchmann 的试验，采用压边圈时，如图 2.51 所示，冲裁开始以后，起初磨损急增，随冲裁次数的增加，磨损进展变慢，在冲裁 10 万件以后，与没有压边圈的冲裁相比，有压边圈的凹模磨损仅为无压边圈的 2/3~3/4 [34]。但是在冲裁过程中，由于材料在压边圈的作用下外侧部分被压紧在凹模面上，材料在凸模面上的滑动增大，因而凸模面上的磨损反而增大。

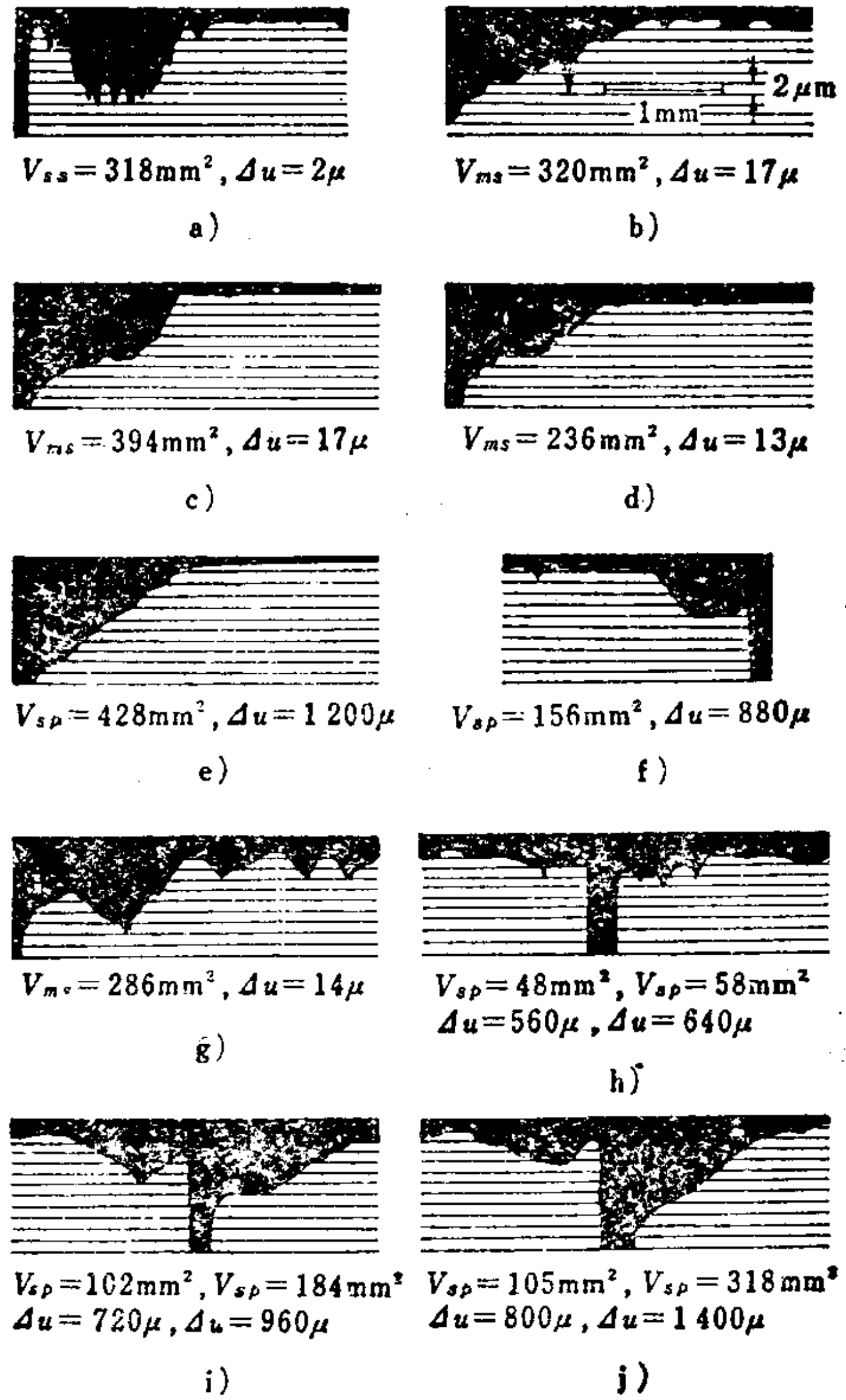


图 2.50 模具的磨损形状(K. Buchmann)

V_{ss} : 凸模面磨损 V_{sp} : 凹模面磨损
 V_{ms} : 凸模侧面磨损 Δu : 间隙的变化图
 中磨损量 V_{ss} 、 V_{sp} 的断面积 1 mm^2 相当于实际尺寸 $40 \mu\text{m}^2$

即使在这种情况下，凸模侧面的磨损也较小。为防止由于压

边而使凸模的磨损增大，应在凹模孔中采用顶板来抑制材料在凸模面上的滑动，这样也可实现制件毛刺小，切面光洁的近乎理想的冲裁。

材料在模具面上的滑动量，即摩擦距离 L 和材料的搭边宽度有关。如搭边宽度小，则因冲裁时的约束较小，搭边部分的材料则比较容易移动，搭边宽度大的部分 L 增大，因此，这部分的模具侧面的磨损增大。

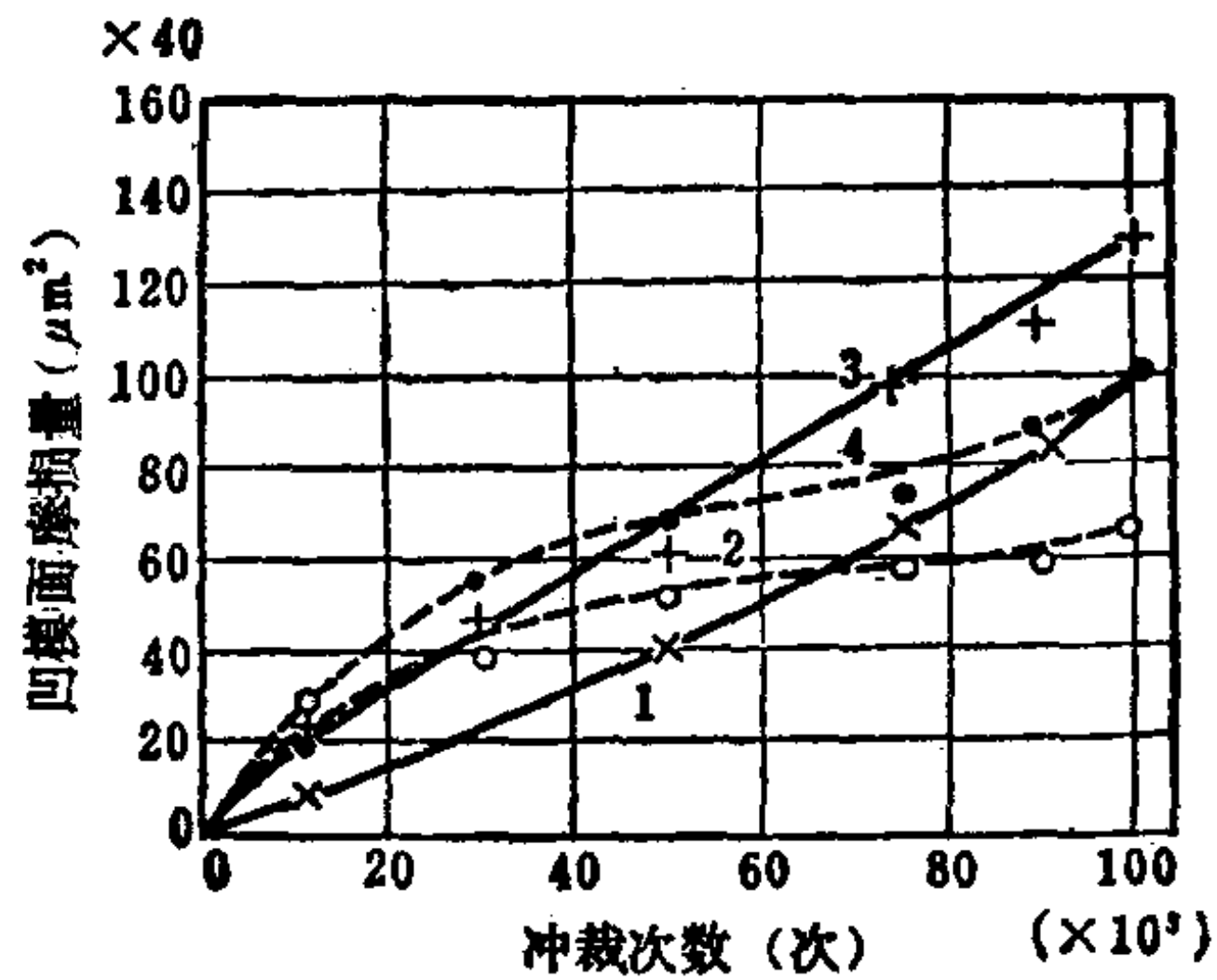
图 2.52 所示为用 $\phi 10\text{mm}$ 圆形凸模冲带有氧化皮的发蓝的贝氏体钢板（厚度 1mm ）时模具刃口磨损状况的电子显微镜照片。由照片可知，刃口的磨损不是呈单纯的形状〔35〕。

图 2.53 是用厚度 0.5mm 硅钢板冲 $12 \times 12\text{mm}$ 的方孔冲裁时刃口磨损形状变化过程的示例〔36〕。

c. 刃口磨损而出现的各种现象〔32、36、31〕 由于刃口的磨损实质上使间隙增加了，同时由于刃口端部逐渐变钝使刃口的断面形状改变，加工时材料内的应力分布也发生变化，这对加工力和制件的形状等产生了各种影响。

(i) 冲裁力 冲模刃口随冲裁次数的增加而钝化，因而冲裁力增加，但同时因实际间隙也增大，所以抑制了冲裁力的增加，一般在重磨刃口之前只增加 10% 左右。另外，因为到冲裁完毕凸模的切入量增加很多，所以一般在重磨刃口之前冲裁功增加 50% 或更多。

(ii) 剪切面形状和制件尺寸 由于刃口的钝化和实际间隙



No.	材料厚度 (mm)	压边圈
1	0.5	无
2	0.5	有
3	0.35	无
4	0.35	有

图2.51 压边圈对凹模面磨损的影响 (K. Buchmann)

(ii) 模具材料和硬度 必须考虑材料及其组织成分, 如果不考虑刃口的崩损现象, 硬度越高的模具因其粘着磨损和刮痕磨损越小, 则刃口的磨损当然亦就少。但是, 冲裁模的寿命往往不仅取决于这样正常的磨损, 多数是因产生崩损而必须进行重磨, 所以只是过分地增加模具的硬度不是延长寿命的唯一办法。根据所用的材料种类, 合理地选择刃口的韧性和硬度是必要的。利用电火花加工在模具刃口表面镀覆硬质合金大多是有用的。

(iii) 冲裁件轮廓拐角的圆角半径 由经验得知, 冲裁件轮廓的锐角部分比其他平直和角度大的部分刃口的磨损量要大得多。如在2.2.2. g中所述, 当拐角的圆角半径小于材料厚度的 $1/4$ 时, 模具的寿命急剧恶化。即希望冲裁轮廓的拐角和凹挡的圆角半径尽可能加大, 至少要大于材料厚度的 $1/4$ 。

(iv) 润滑 为了防止出现粘着现象, 使接触面之间存在润滑剂具有很大意义。当然, 使用适当的润滑剂进行冲裁, 是减少刃口磨损的有效手段。因为冲裁时在材料和模具表面的接触面上有很大的压力, 为了在这样的高压下保持润滑效果, 采用含有适当抗压添加剂的润滑剂是很有效的。

(v) 压力机的精度和刚度 冲裁加工大多使用C形机架的

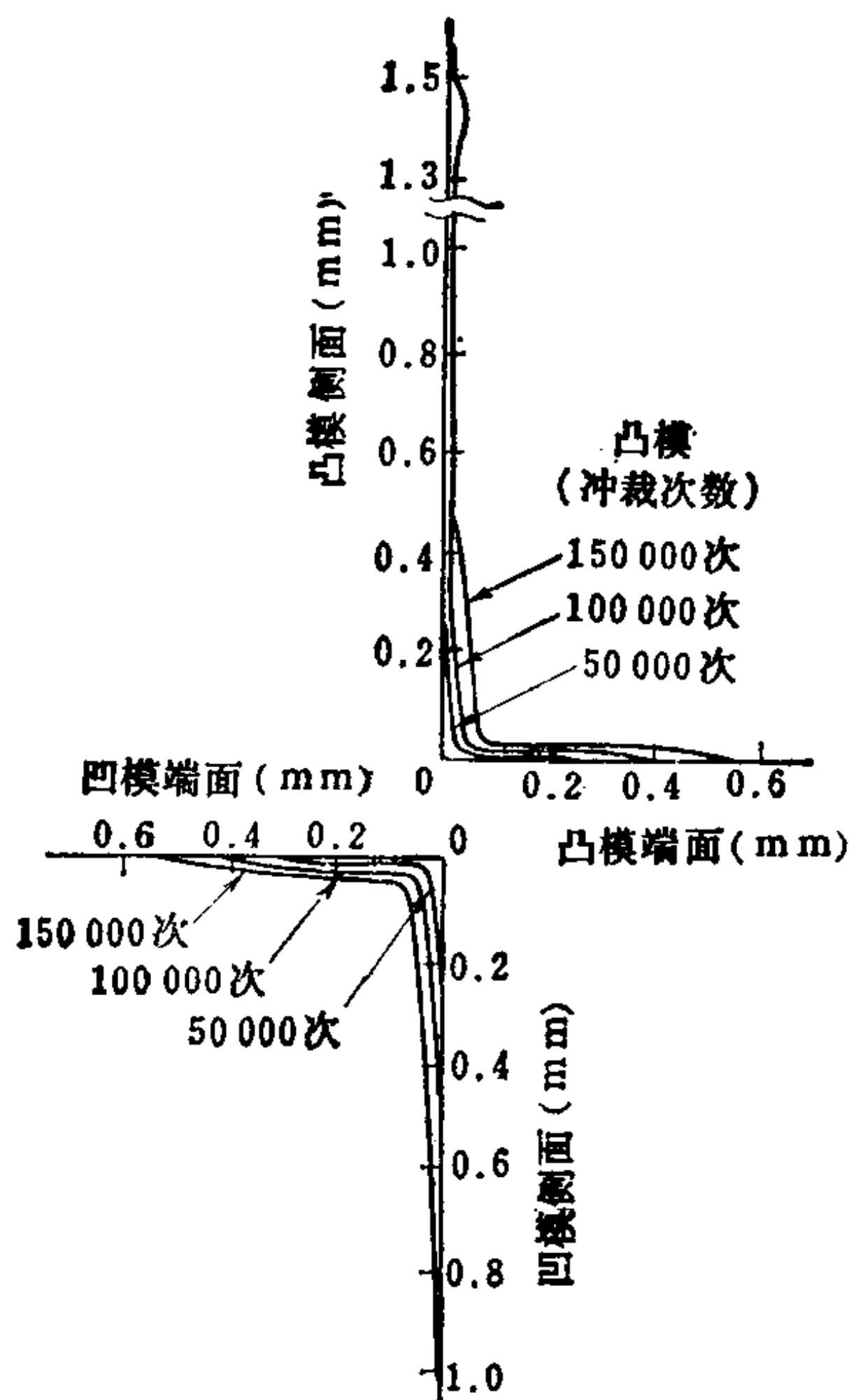


图2.53 模具刃口磨损的进展情况 (前田、松野)

被加工材料: 厚度0.5mm 硅钢板 模具间隙: $<6\%$ (冲裁开始时) 冲压速度: 30 s. p. m 无润滑

机械压力机。这种形式的压力机，由于冲裁力的作用，引起机架弹性变形，台面和滑块的间隔增大，同时产生角变形。对于刚性差的压力机，因出现上述的变形，所以在冲裁时，有时凸模和凹模的刃口发生冲突，有时是凸模和凹模孔侧壁咬死，由此则有时产生崩刃，有时刃口被刮削。根据 Buchmann 的实验结果，在 3.6 t/mm 这样刚性小的压力机上，进行最大冲裁力为 2.4 t 的冲裁加工时，如机架上附加拉紧杆则刚性将增加 64%，即达到 5.9 t/mm，在冲裁 10 万次后凸模端面磨损减少 20%，凹模端面磨损减少约 14%，凸模侧面磨损减少约 65%〔34〕。同时，刚性小的压力机，制件剪切断面的剪裂面将增大，因此模具侧面的磨损增大。考虑到这一点，用下传动压力机是有利的。用双柱闭式压力机使冲裁力的中心和滑块中心一致，在冲裁时几乎没有变形，因此刃口不会咬死，这是很有利的。综合上述，用双柱闭式机架下传动的刚性大的高精度压力机，从模具寿命的观点来看是有利的。

(vi) 冲裁速度 凸模切入材料的速度大，则材料和模具表面的相对滑动速度也增大，其摩擦系数减小。这当然意味着刃口的磨损减少，实测结果亦证实了这一点〔38〕。但是，如果把压力机的运转速度提高，则由于振动等影响使滑块的运动精度变坏，这对刃口磨损会造成不良影响，因此必须注意。

2.3 冲裁模设计

2.3.1 冲裁模设计步骤

关于如何设计冲裁模，将其步骤和考虑方法叙述如下。下例是冲孔和落料模的设计，关于别的形式模具，大致可以作同样考虑。

(i) 排样(图2.54) 要考虑把零件排在什么样尺寸的材料上，如何排列最为有效。材料需要量的大小，不仅直接影响成本，且排样的不同对模具设计和制造有很大的影响，这是非常重要的事项。

(ii) 凹模(图2.55) 对于凹模强度，制造工艺性、固定亦

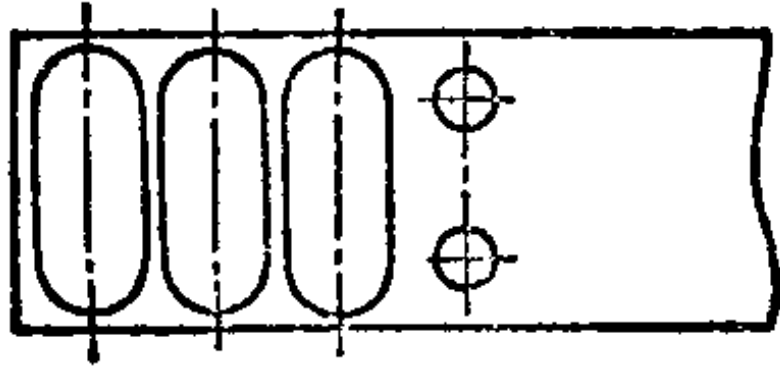


图2.54 排样

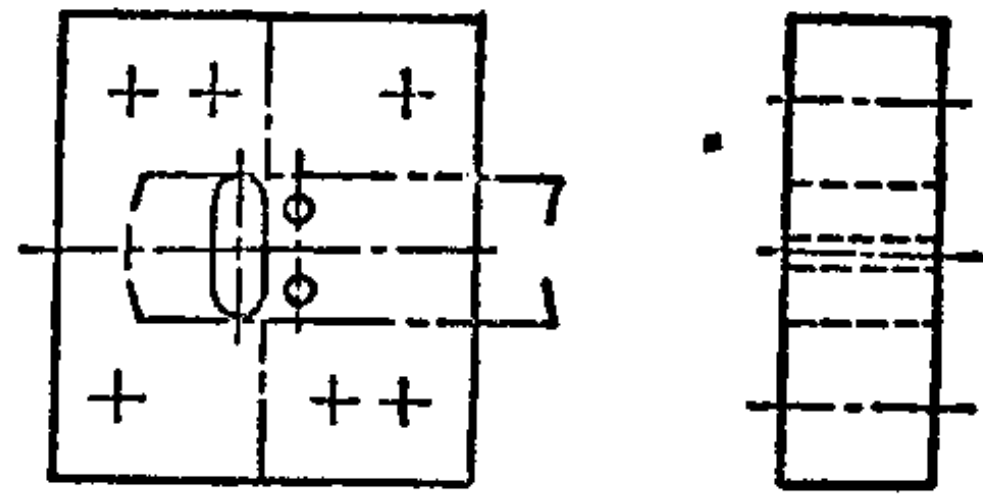


图2.55 凹模

法、自动定位器及操作上的问题应加以分析。

(iii) 落料凸模(图2.56) 应对凸模强度、磨损后的更换以及重磨的极限和制造方法等进行分析, 导向的问题也要一起考虑。

(iv) 冲孔凸模(图2.57) 关于冲孔凸模特别要注意强度、磨损及更换的问题。关于最小冲孔直径, 应结合实际情况很好地加以考虑, 这对下一工序的工时有很大的影响。

(v) 凸模固定板(图2.58) 应考虑使落料凸模或冲孔凸模的位置能正确地固定, 同时要考虑凸模更换时便于定位。

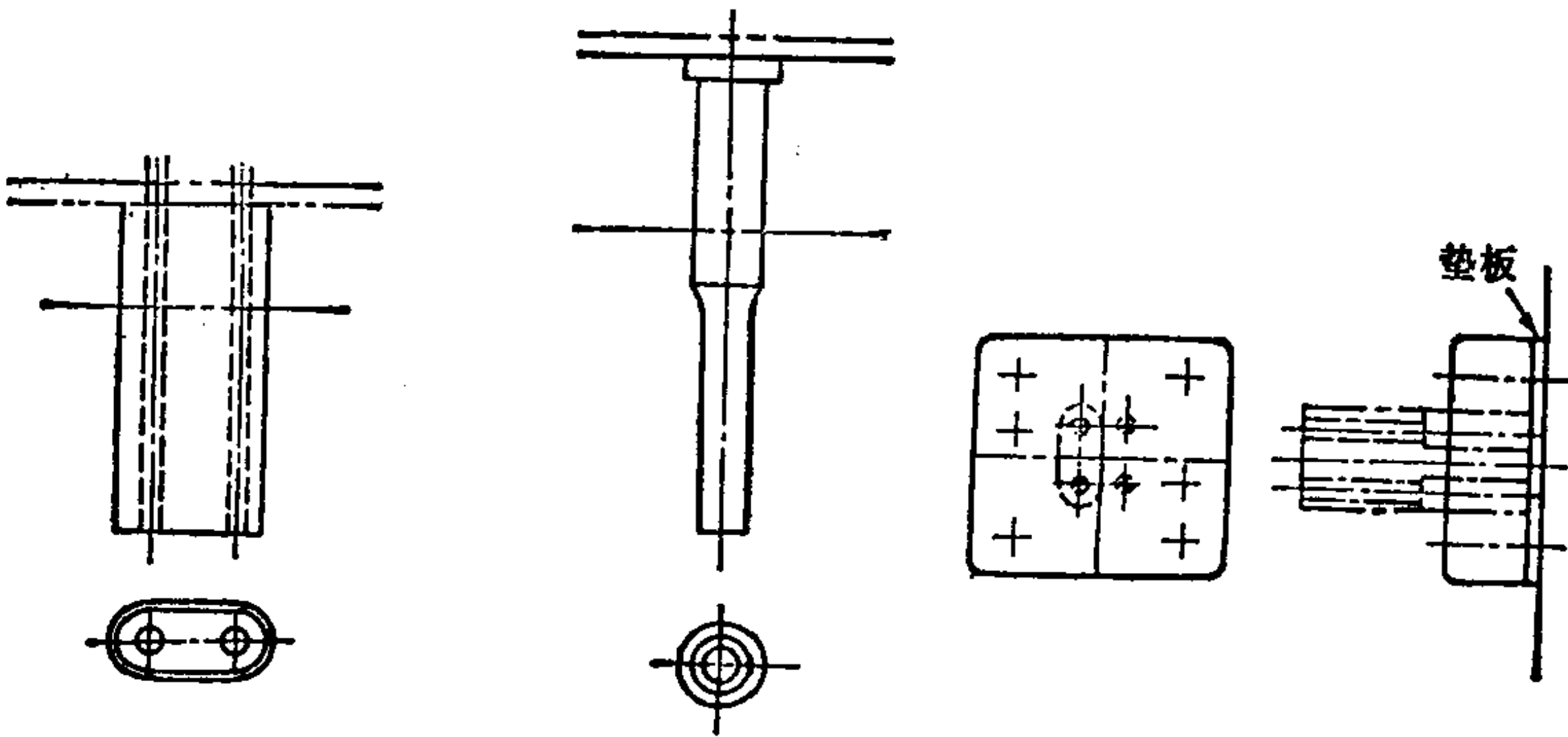


图2.56 落料凸模

图2.57 冲孔凸模

图2.58 凸模固定板

(vi) 导正销(图2.59) 应对导正销的直径和孔径的关系、大小、定位的相关位置、强度以及在凸模重磨时卸取方法等加以分析。

(vii) 卸料板(图2.60) 对采用固定式或活动式加以探讨, 亦考虑自动限位或手动限位器的安装位置等关系。

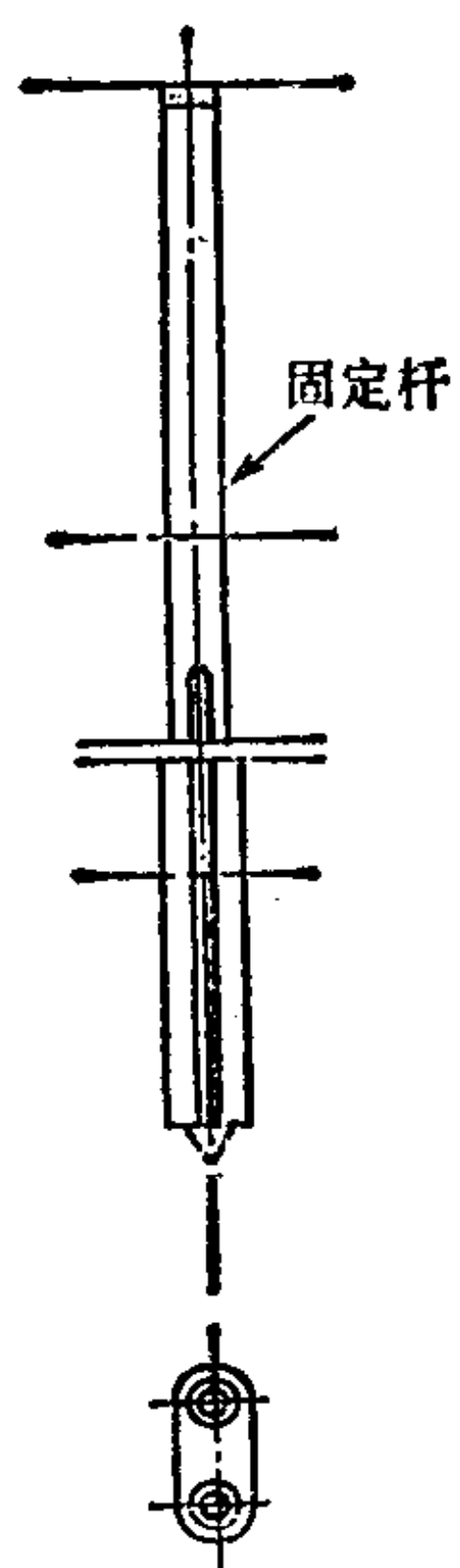


图2.59 导正销

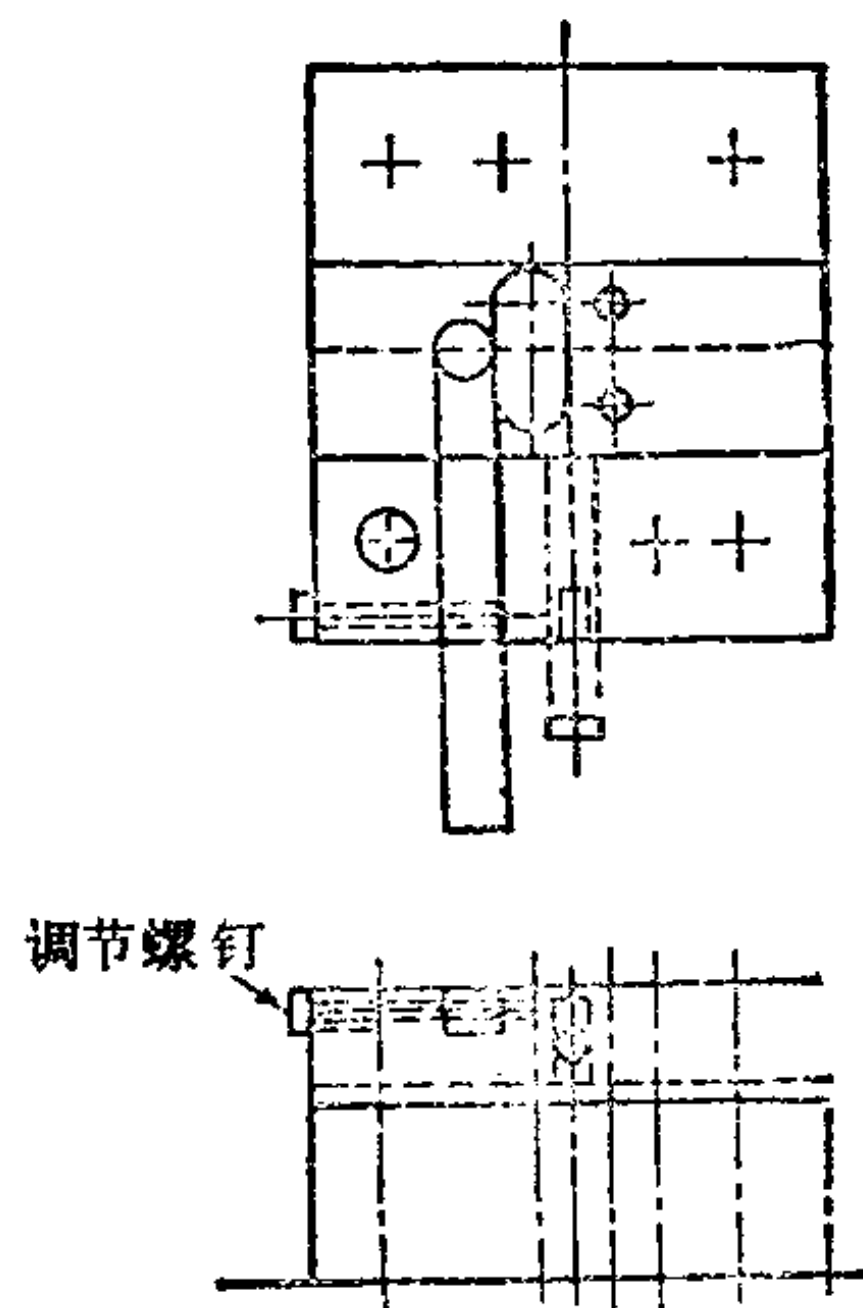


图2.60 卸料板

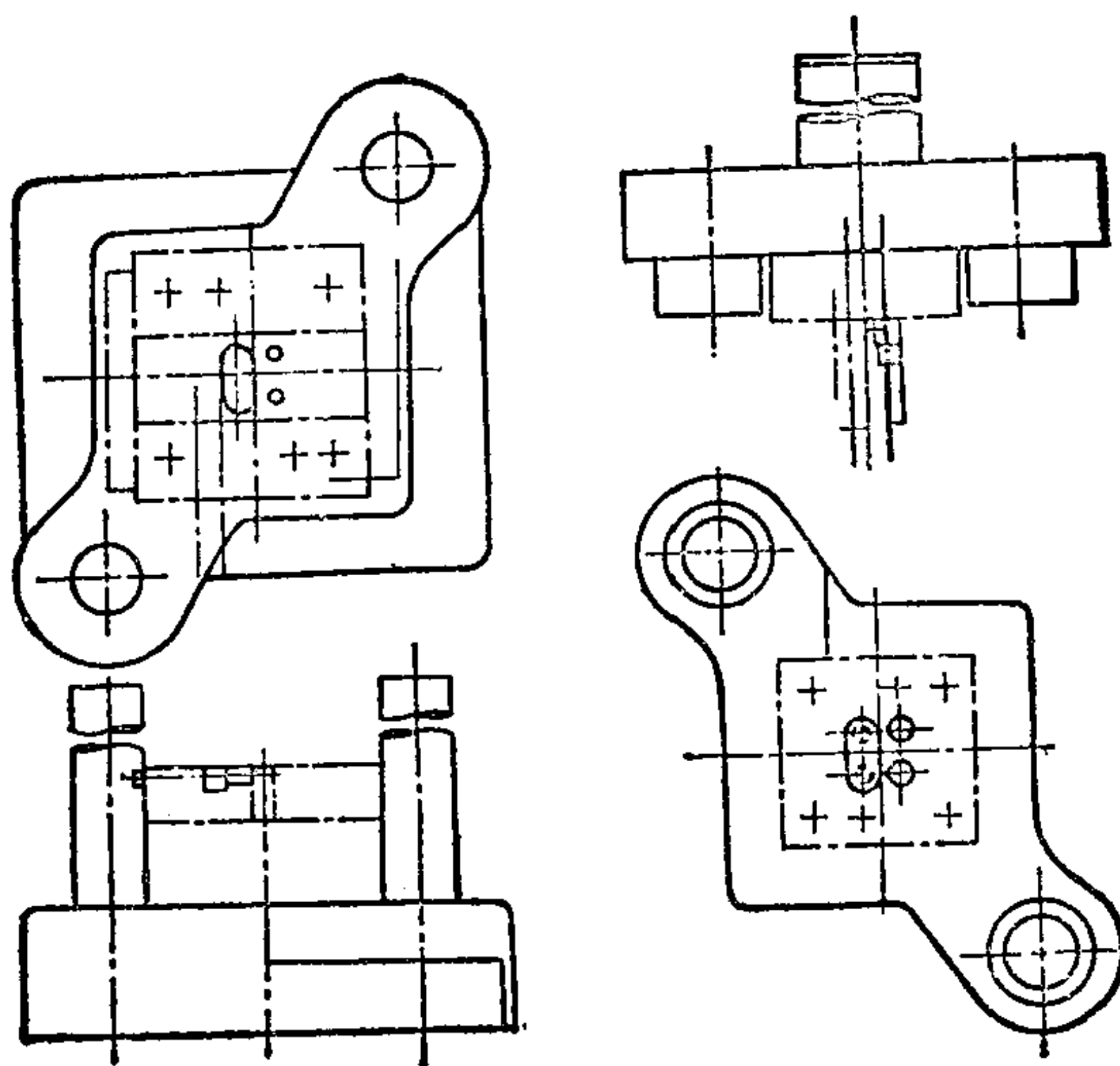


图2.61 模架

(viii) 模架 (图2.61) 应对其尺寸大小、导柱位置及模具的安装方法等加以分析。

(ix) 尺寸的标注 (图2.62) 形状决定后, 应注上零件图和装配图的相关尺寸。这时, 对加工方法有特殊要求的地方必须注明。

(x) 注明材料热处理 最终有效保持模具性能的是模具的材质, 然而使用要求过高的

高级材料, 将使模具的成本增高, 所以要选取最恰当的材料。

表 2.3 所列为冲裁模设计时必须考虑的事项。

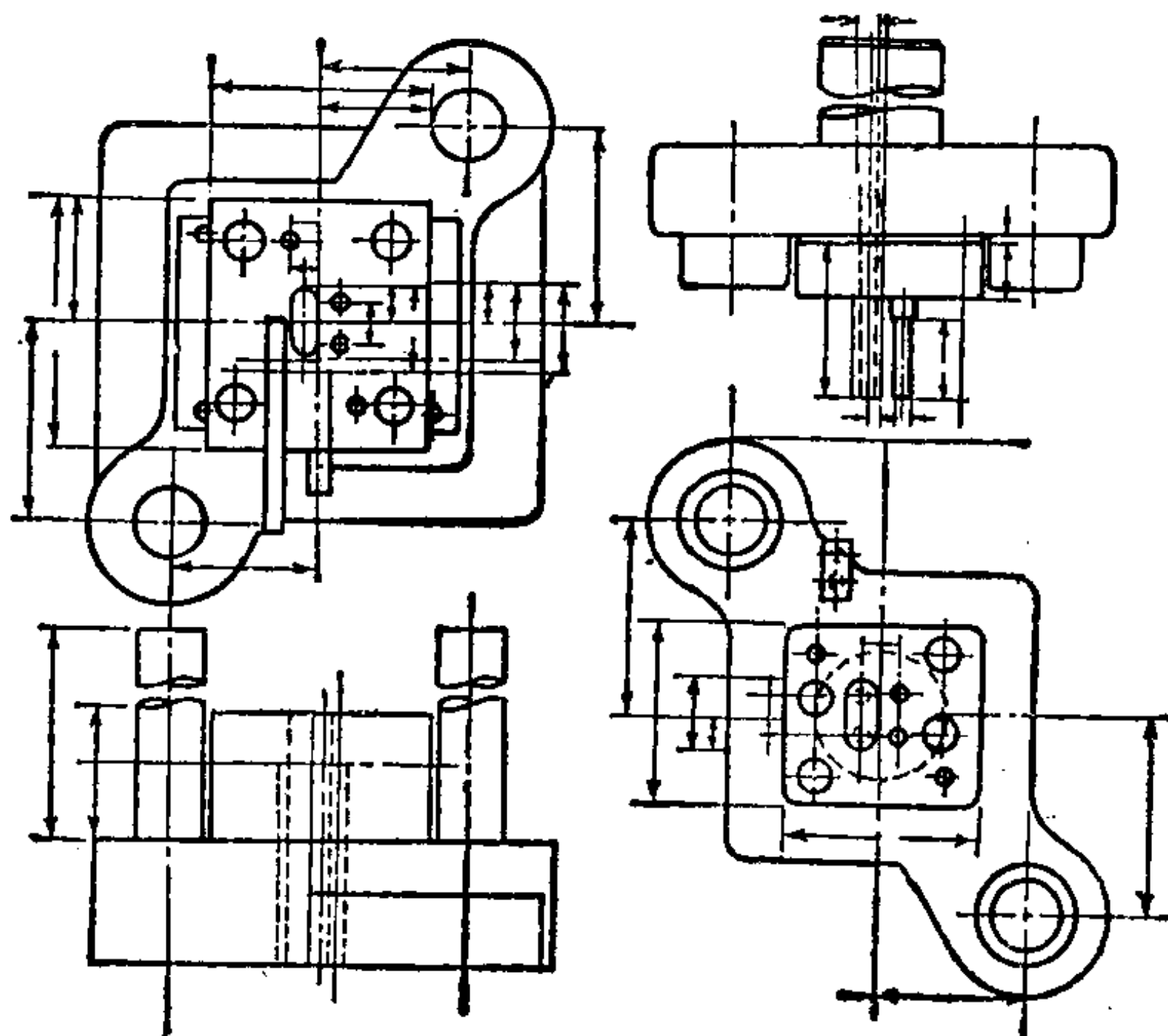


图2.62 尺寸的标注法

表2.3 冲裁模设计时必须考虑的事项

1. 冲裁加工

序号	项目	应考虑的事项	详细内容
1.1	设计方案	冲裁方向 剪切断面 复合凹模 修边加工 展开尺寸 工序设计	毛刺及冲裁面 考虑光洁度 必须考虑尺寸精度及平整度 端面是否要精加工 由试验决定尺寸后的结构, 决定拉延和成形同时加工时的坯件 根据制件要求, 分析制作误差
1.2	落料	落料排样 整体模 组合模、镶块模 固定法	材料利用率, 降低模具成本 便于机械加工的落料形状 根据落料形状及模具强度 坚固的底板, 键止动, 压入

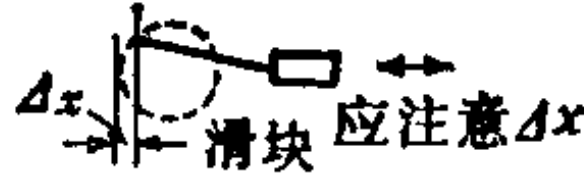
(续)

序号	项 目	应考虑的事项	详 细 内 容
1.2	落 料	镶块精度 压力垫 二次落料 模具缓冲垫 连续落料 部分修边 落料搭边量 (C_1) 交错落料	组合后的尺寸精度 使用空气或弹簧, 保持坯件平整 减轻冲裁力 大型工件, 落料时缓冲 先冲孔或进行切口等一部分形状的加工 落料时或落料前 根据材料厚度取, 但不小于1.6mm 考虑一次落料后, 料变弯, 再掉头落料的困难
1.3	冲 孔	孔径 小直径凸模长度 卸料板导向 导向套 垫板 和凸模高度的差 孔间距 防止转动 凸模高度差 斜刃 固定板 间隙	大于板料厚度 (一般) 尽可能短, 防止折损 使用衬套, 防止折损 保护小直径凸模 淬火, 防止压塌 防止由于材料变形造成的折断 (冲小孔同大坯件边接近时) 强度, 变形间隔的有无 使用防止凸模、凹模转动的键 减小冲孔力 防止长槽等变形, 减小冲孔力 必须有能支承凸模的厚度 适当的量
1.4	切口切边	垫板 凸模 桥式件 卸料板导向 废料刀 夹持切边 切边凸模 半模 斜刃过渡圆角 R 合并工序	防止后让 安装定位块, 凹模孔承受侧向力 在冲窄带时, 二侧同时切口则不要挡块 半边切口时, 防止凸模折损 板件端面拉延凸缘时, 切边可减小冲裁力 操作需要时 (夹持切边) 胀形和由剖分内侧扩展时需要 (窄料) 防止损伤 切口可和落料或冲孔一并进行
1.5	修 边	次数 修边留量 导向位置	考虑必要的次数 单侧留料厚的 6~10% 各边留量均匀

(续)

序号	项目	应考虑的事项	详细内容
1.5	修边	孔和外形一起加工 废料刀 排屑 剪切端面的保护 卸料力 垫板 工艺修边 间隙 组合模 导柱	孔和复杂外形冲裁面同时加工, 用于冲裁 及时清理, 减小力 操作方便, 结构可靠 考虑容器, 模具结构 用强力弹簧, 不如气垫为好 防止损伤, 可按凸模底部制作 通过修边相对侧来平衡侧压力 最小极限值 便于磨削加工 中心线上的位置或凹模座对称位置确保导向

2. 作业安全

2.1	制件的 保护	半成品表面涂层保护 塑料纸包装 装托架, 容器 机械滑块前粘贴橡胶垫	防止推落, 吹走造成的损伤 (注: 中间输送通过胶辊、毛毡等夹持) 防止由废料和顶出机构造成的损伤 防止大型工件弯曲时因冲撞造成的损伤
2.2	模具的 保护	强度分析 零件强度的安全系数 侧挡板 顶出器的止动位置 非对称模具结构 安装限位开关 卸料板的活动余量	模具零件作用的应力、冲击力 能承受由于送料误差造成两个以上零件进入 模具引起的超载 防止废料和零件进入 顶出过量, 急停  防止组装误差 (导柱的位置、直径、垫板等) 送料不当, 引起超载 (随行程连同) 能进入两件
2.3	压力机的 保护	模架上下底板倒角 连接, 安装 机架刚性 导柱长度适当 报警装置	防止损伤垫板等 过载能力及耐久性 过载能力及耐久性 防止和行程冲突 滑块意外下降时报警 (空压式)

(续)

序号	项 目	应考虑的事项	详 细 内 容
2.4	压力机塑料护板	需检视部位及送料器 护板安装理由 推出式安全装置 双手互锁 垫块	防止眼睛过于疲劳, 便于观察凹模面 防止手和其他物件进入模具 (但模具内部的主要部分, 应便于观察) (详细不明) 在无护板时 防止大型压力机滑块意外下落
2.5	用卸料板回程卸料的场合装模具护板	卸料板的高度 侧板 局部护套	手不能进入 防止手指、扳手等进入 (弹簧、压料板、卸料板) 在长滑块的场合, 导套和导柱分离时的安全
3. 搬运和保管			
3.1	吊起 (大型模具)	挂链槽 爪钩、销、杆 在各零件上攻丝开孔装吊环螺栓 打印重量	安装链子 安装链子 搬运用, 吊环螺栓设于上表面, 孔的位置于4角 搬运准备用
3.2	移 动	模具限位用螺栓	防止上下模脱离
3.3	保 管	装隔板 突出件的拆卸	堆积保管用 堆积保管用
3.4	易脱落零件	紧固检查	定位销、板等
3.5	标 志	打印 上色	模具, 同一零件用模具的识别 模具, 同一零件用模具的识别
4. 模具的制造			
4.1	材 料	标准件的采购规格 材料选择基准 指定热处理 原材料尺寸	底板, 台阶螺栓, 弹簧, 顶销等 根据选择表选定 受力零件, 耐磨零件 确定适当的尺寸, 市场能买到的商品, 考虑加工
4.2	制造能力	加工技术水平 加工设备	保证加工精度 可加工的最大尺寸, 形状复杂程度, 加工能力

(续)

序号	项目	应考虑的事项	详细内容
4.2	制造能力	设备的维护更新 热处理炉 模具零件的制造基 准	提高加工效率及精度 了解其能力, 规格 铸造, 切削
4.3	模具结构	强度 有无导柱 导套的出气孔 导柱长度 润滑 组合模标准 组合模接合面的空 刀 组合模各分模尺寸 定位销间距 销孔尺寸精度 侧挡块 加工压料板孔 弹簧长度 弹簧的安全芯棒 弹簧座面的加工 弹簧承载中心 上下模的凹窝 销子打入配合	模架整体的强度要求 根据精度及模具大小决定 运动的安全 在冲裁、弯曲等加工前先试闭合高度 导套等磨损零件 经济性, 容易加工 模具贴合 考虑热处理变形, 强度, 安全 大些好 要垂直, 便于取出定位销 在有侧向力作用时防止移动 模块, 卸料板, 顶料板, 防松板 必须考虑过载及疲劳 防倒, 飞入模具 便于固定弹簧 要和压力机中心一致 制成一样
4.4	重磨	重磨余量 卸料板的拆卸 易损零件 螺栓座 螺纹孔 凹模厚度减少 凹凸模磨削方便	5 mm 作成易于拆卸的结构 导向柱, 挡销, 导块, 限位器 要深, 由下面拧紧时不宜过深 要深 弯曲量, 拉延深度, 弹簧的受力, 导柱长度 加工方法的限制
4.5	修理	衬套 导向 破损	可更换 小孔处 凸模, 凹模, 部分更换

(续)

序号	项目	应考虑的事项	详细内容
4.5	修理	多工位模的工序分配 淬火件可更换 镶块磨损 压入件的取出 螺杆的操作 小型冲孔模的更换 拆卸容易 大拆卸容易	合理划分工序 刃口和挤压面, 挡块等磨损表面 加垫片 便于操作 旋转千斤顶等的空间 设计和制造成可更换的 压配的小件, 便于拆卸 要求不必翻转, 就能拆卸

2.3.2 凸模设计

a. 凸模强度 冲裁时凸模因承受了全部压力, 所以承受了相当大的压应力, 同时在卸料时又承受有拉应力, 交变反复作用。因此, 在冲裁厚的和硬的材料时, 有达到破坏应力或者由于疲劳而破坏的危险。尤其是在凸模细长时, 因有纵向弯曲的危险, 所以对其强度必须充分考虑。

(i) 抗压强度 设凸模直径为 d , 板厚为 t , 板的剪切抗力为 K_{sm} , 则冲裁力可用 πdtK_{sm} 表示。因此如凸模材料的抗压强度为 σ_c 则必然存在下列关系:

$$\pi/4d^2\sigma_c > \pi d_p t K_{sm}$$

由此则得

$$d/t > 4K_{sm}/\sigma_c \quad (2.15)$$

(ii) 纵弯曲极限 冲孔时作用在凸模上的最大力是在凸模压入材料一定程度以后出现的。因此, 可把凸模作为长杆考虑, 其两端的条件可按图2.63 a) 和 b) 的中间状态推定是安全的。图2.63 a) 所示为取纵弯曲载荷小时作为一端固定, 另一端为自由移动而不旋转。其纵弯曲力为

$$\frac{\pi^3 d^4}{64l^2} E$$

因此, 存在下列关系:

$$\frac{\pi^3 d^4}{64l^2} E > \pi dt K_{sm}$$

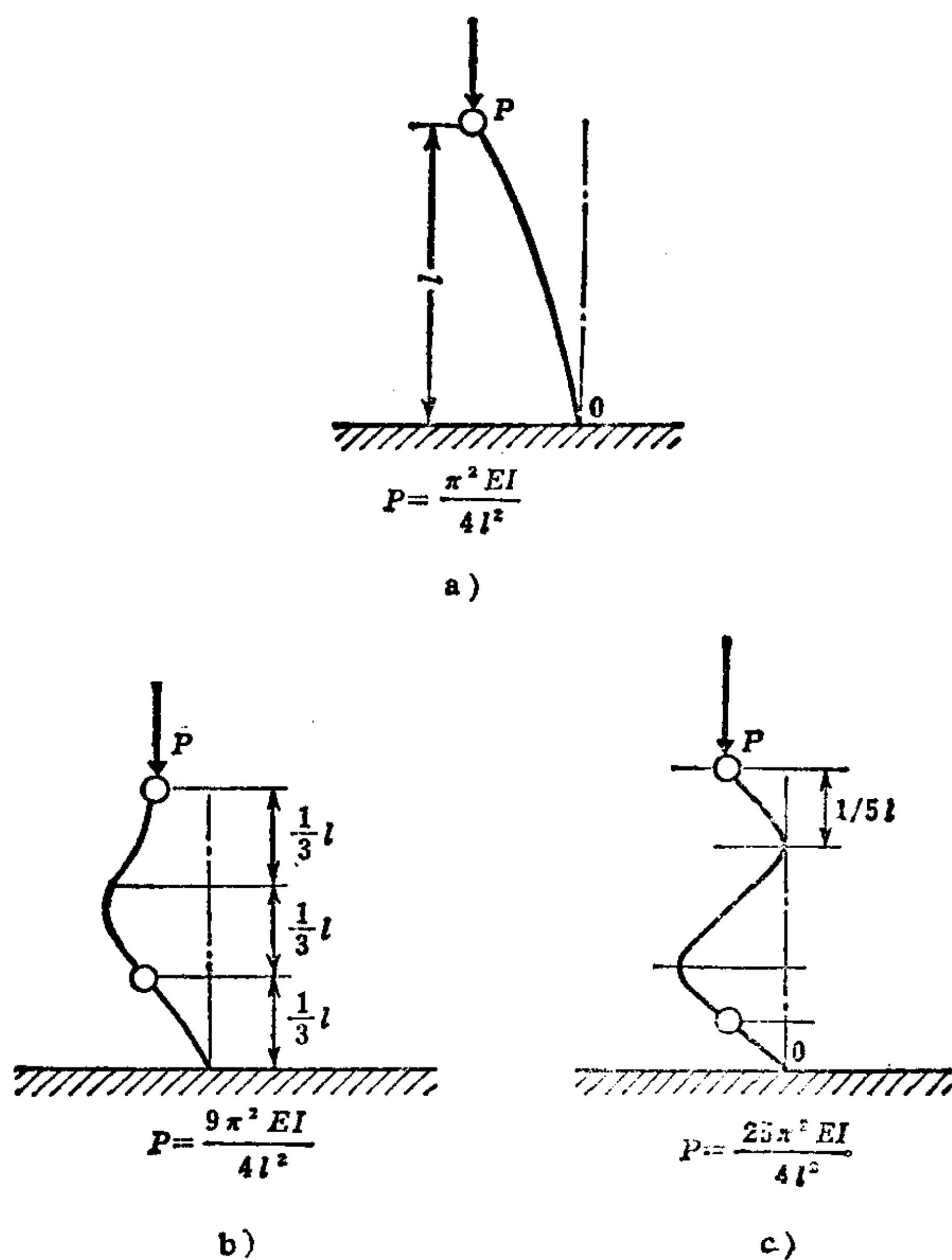


图2.63 纵弯曲的条件

由此则得:

$$l < \frac{\pi}{8} d \sqrt{dE/tK_{sm}} \quad (2.16)$$

现在作凸模材料的两种特殊工具钢, 其抗压强度取为 $\sigma_0 = 210 \text{ kgf/mm}^2$, 板材的剪切抗力见表 2.4, 将其代入公式 (2.15) 则得:

$$\left. \begin{array}{l} \text{软钢板} \quad d/t > 0.50 \\ \text{黄铜板} \quad d/t > 0.61 \end{array} \right\} \quad (2.17)$$

现取凸模材料的纵向弹性模量 $E = 2.2 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2$, 并将表

2.4中材料的剪切抗力值代入公式(2.16), 得到凸模极限长度 L 、凸模直径 d 、板厚 t 的关系曲线, 如图2.64 a)、b)所示。

在冲裁结束后凸模返回拔出时承受拉力, 即承受卸料力。此力与间隙、刃口锋利程度、润滑油等不同而有差别, 但大体上是冲裁力的5~15%。

如上所述, 因为凸模承受压缩和拉伸的交变应力, 并且受很大冲击应力, 所以往往引起疲劳破坏。特别是在冲较小的孔(相对板厚)时, 凸模的寿命有限, 设计者必须了解这种情况。但是, 即使凸模寿命只有2000件左右和用切削加工方法(如钻孔)相比还是很经济的。

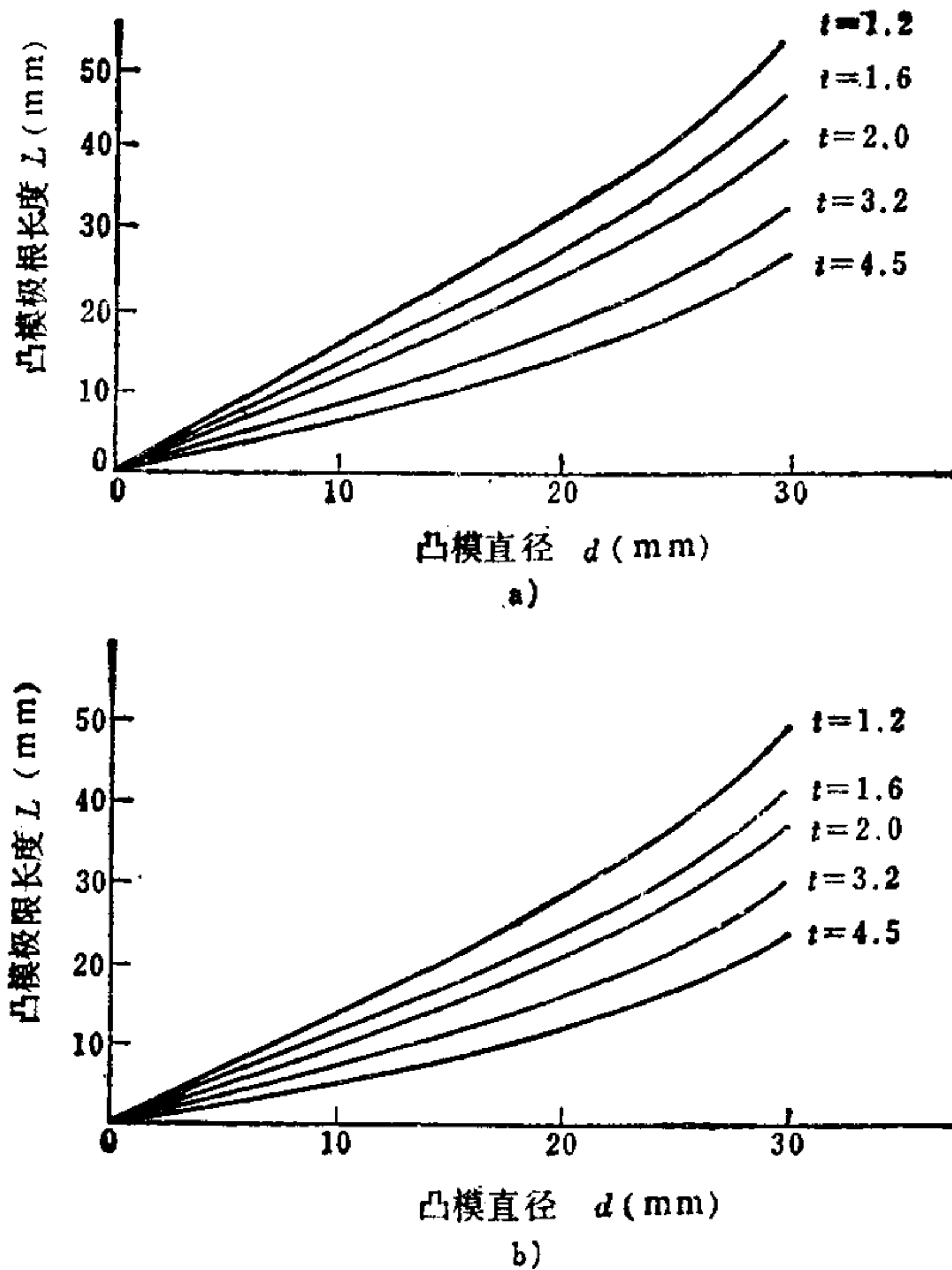


图2.64 凸模的极限长度

a) 软钢 b) 黄铜

表2.4 各种材料的剪切抗力和抗拉强度

材 料	剪 切 抗 力 (kgf/mm ²)		抗 拉 强 度 (kgf/mm ²)	
	软	硬	软	硬
铅	2~3	—	2.5~4	—
锡	3~4	—	4~5	—
铝	7~11	13~18	8~12	17~22
硬铝	22	38	26	48
锌	12	20	15	25
铜	18~22	25~30	22~28	30~40
黄铜	22~30	35~40	28~35	40~60
青铜	32~40	40~60	40~50	50~75
锌白铜	28~36	45~56	35~45	55~70
铁板	32	40	—	45
拉延铁板	30~35	—	32~38	—
钢板	45~50	55~60	—	60~70
含C0.1%钢板	25	32	32	40
含C0.2%钢板	32	40	40	50
含C0.3%钢板	36	48	45	60
含C0.4%钢板	45	56	56	72
含C0.6%钢板	56	72	72	90
含C0.8%钢板	72	90	90	110
含C1.0%钢板	80	105	100	130
硅钢板	45	56	55	65
不锈钢板	52	56	65~70	—
镍板	25	—	44~50	57~63

2.3.3 凹模设计

凹模设计应考虑的事项是关于凹模强度、制造方法及其加工精度等。特别是凹模孔的尺寸，在实用上是和制件尺寸一致来考虑的，它关系到制件质量的好坏，因此对其加工表面质量亦必须予以充分地考虑。

凹模的厚度和外形尺寸，对于其承受的冲裁力，必须具有不引起破损和变形的足够的强度，但对于复杂形状的零件，其凹模的强度计算复杂，因而在一般情况下，通常根据经验设计。凹模厚度 h 一般用下式确定：

$$h = K \sqrt[3]{P} \quad (2.18)$$

式中 h ——凹模厚度(mm);

P ——冲裁力(kgf);

K ——修正系数。

但是有必要补充下列条件:

(i) 计算的结果 凹模厚度的计算结果即使在小于 10mm 的情况下, 凹模面积达 55mm^2 时应取 10mm。

(ii) 冲裁件的周长超过 50mm 时按表 2.5 中的系数进行修正。

表2.5 修正系数 K

冲裁周长 (mm)	<50	50~75	75~150	150~300	>300
修正系数	1.00	1.12	1.25	1.37	1.50

(iii) 凹模必须是经过热处理的工具钢, 要求安装在平面上进行工作。

(iv) 长期反复使用者, 必须加上重磨刃口的厚度。关于凹模的大小必须注意以下几点:

a) 凹模孔至外缘的最小距离 小凹模取 $(1.5 \sim 2.0)h$, 大凹模取 $(2 \sim 3)h$, 另外, 在凹模孔的形状简单时取小值, 复杂时取大值。

b) 螺孔及其他孔到凹模外缘的距离应大于孔径。

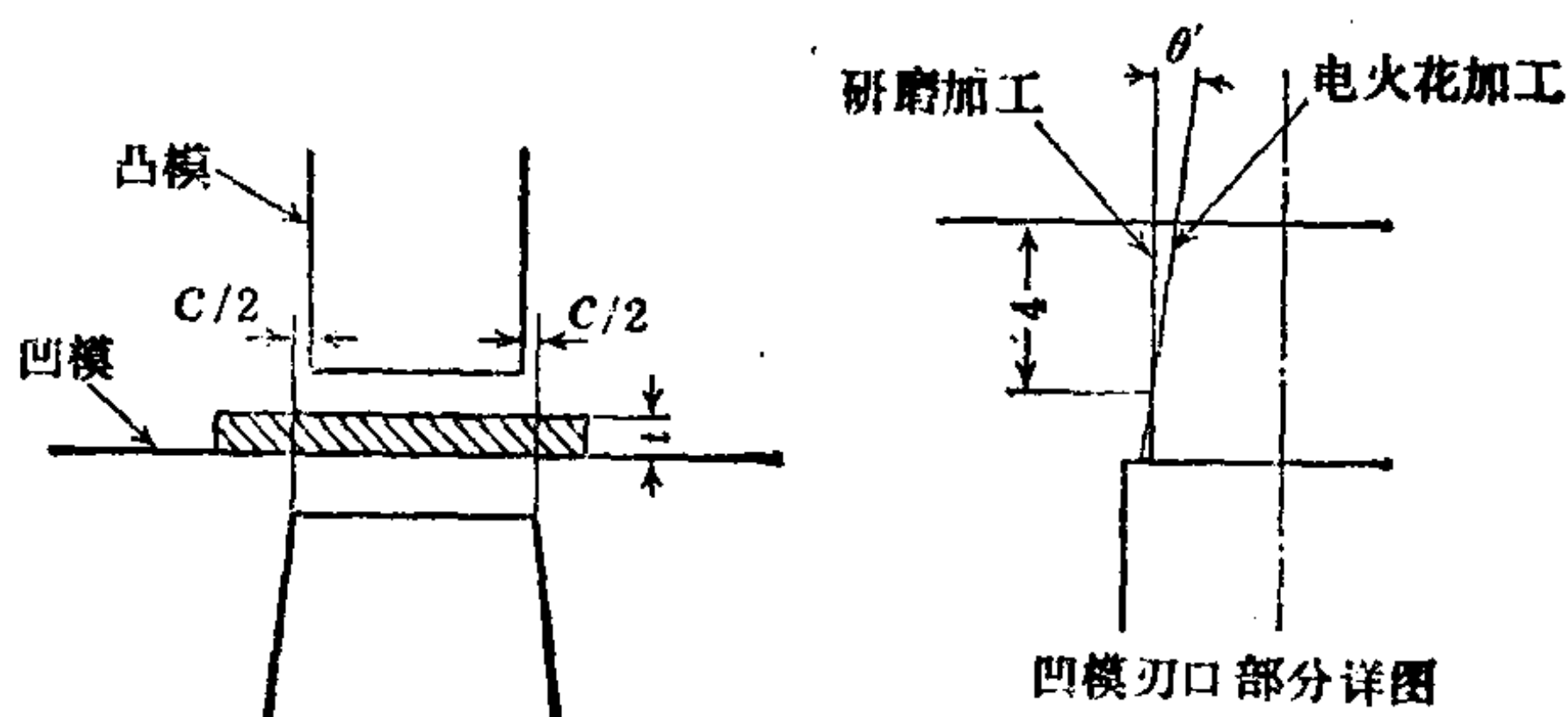
此外, 凹模厚度的确定在实际设计时往往在强度不足的地方应作保守的考虑, 并要求能便于更换。

2.3.4 间隙

如果凸模和凹模间的间隙大, 则冲裁力减小, 但同时使塌角增大, 使剪切断面的垂直度恶化, 因而要根据冲裁的目的灵活选取。表 2.6 所示为以板厚的百分数 (%) 表示的实用的双面间隙值。因为间隙有随使用而逐渐增大的倾向, 所以新模具一般取较小的值。

凸模一般不作出后角, 对于凹模, 在冲裁向下出料时作出

表2.6 冲裁模



a)

模具加工方法 板材	板厚 0.1~0.2		0.2~0.4		0.4~0.8		0.8~1.2		1.2~1.6	
	研 磨	电 火 花	研 磨	电 火 花	研 磨	电 火 花	研 磨	电 火 花	研 磨	电 火 花
软钢SPO, SPM, SUYP 黄铜BSP	0.01	0.01	0.03	0.02	10% t	7% ①	10% t	8% t ①	11% t	9% t ①
硬钢SUP, SPH, SOM, SUS	0.01	0.01	0.05	0.03	14% t	10% t	17% t	15% t	20% t ①	18% t
锌白铜NSS 磷青铜PBS	0.01	0.01	0.04	0.02	12% t	8% t	12% t	10% t	13% t	11% t
酚醛树脂层压板	0.01	0.01	0.01	0.01	※2% t ①	※2% t ①	※2% t ①	※2% t ①	※2% t ①	※2% t ①
纤维板	0.01	0.01	0.01	0.01	2% t	2% t	2% t	2% t	2% t	2% t
胶木板	0.01	0.01	0.01	0.01	2% t ①	2% t	—	—	—	—
铝和铝合金(软质)	0.01	0.01	0.03	0.02	12% t	8% t	12% t	10% t	12% t	11% t
铝和铝合金(硬质)	0.01	0.01	0.03	0.02	14% t	10% t	14% t	12% t	14% t	13% t

① 表示已经实践的经验。

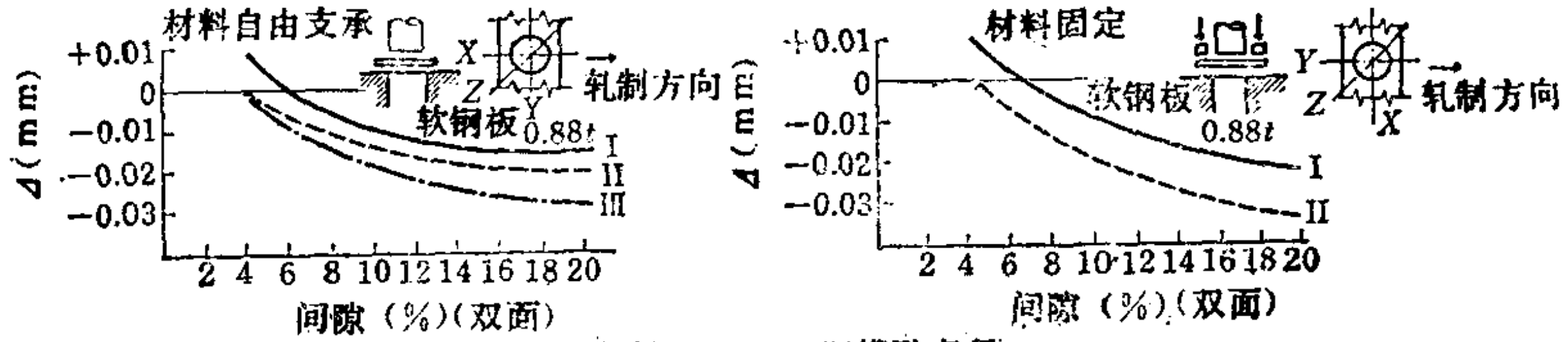
注：1. 冲裁件的冲孔形状见图b)。

2. ※表示板材预热后进行加工。

3. 纤维板在室温 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ 、湿度50~70%时进行落料。4. 冲小孔时因为余料上翘，表中C值不适用（一般冲孔时， $t < 10\text{mm}$ 时，于加工金属材料。5. 电火花加工精加工凹模，由于刃口侧面约有 9° 的放电角，刃口研磨多次则加工专门委员会报告（精密机械 XXV. 11）。

的间隙值C

(mm)



$\Delta = \text{落料直径} - \text{凹模孔直径}$

b)

1.6~2		2~2.5		2.5~3		3~4		4~5		5~6	
研	电	研	电	研	电	研	电	研	电	研	电
磨	火花	磨	火花	磨	火花	磨	火花	磨	火花	磨	火花
1% t	10% t ^①	12% t	11% t	13% t	12% t ^①	14% t	13% t	16% t	15% t	19% t	18% t
23% t	21% t	25% t	24% t	26% t	25% t	27% t	26% t	23% t	27% t	29% t	28% t
14% t	13% t	15% t	14% t	16% t	15% t	17% t	16% t	19% t	18% t	21% t	20% t
※2% t ^①	※2% t ^①	※2% t ^①	※2% t ^①	※2% t ^①	※2% t ^①	—	—	—	—	—	—
2% t	2% t	2% t	2% t	2% t	2% t	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12% t	11% t	12% t	11% t	12% t ^①	11% t	12% t	11% t	12% t	11% t	12% t	12% t
14% t	13% t	14% t	13% t	14% t	13% t	14% t	13% t	14% t	13% t	14% t	14% t

C = 5% t; t = 1~2 mm时, C = 7% t; t = 2~4 mm时, C = 10% t), 但仅限间隙逐渐增大, 所以初始间隙应取小值 (参见图中凹模刃口部分)。参考文献: 机械

$1/4^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 的后角。要求精密地长期使用者取小值，短期使用或冲裁力大者取大值。

2.3.5 排样

冲压加工从本质上说是要产生边料和搭边废料的。若能完全消除这种边料和搭边废料，则可使材料费达到最小。为此，有必要把合理的排样作为技术研究的重点。同时，选取与操作工序相适应的尺寸规格的材料也是重要的。即首先根据冲裁件的形状适当排列，同时考虑和其他制件组合的可能，必须使一定的材料能生产尽可能多的制件。并且从一张一定尺寸的板料上下料时，不仅考虑切下用于生产一种制件的条料，有必要时同时考虑用于不同制件的各种下料方法使材料得到充分地利用。以下讨论应注意的主要事项。

a. 定尺板料的下料方法

(i) 各种下料尺寸的组合下料法。

(ii) 根据所定尺寸下料后残留的边料用在其他方面的方法。

(iii) 最后一条不切断，由该板料切成几条其他尺寸的方法生产另一种制件。

(iv) 在下料之初在纵向或横向切去某制件的用料之后再按规定的尺寸下料的方法。

b. 对于材料利用率的考虑

(i) 冲裁排样 图2.65所示为相同形状的坯件在落料时的四种排样方法。若以一个坯件所需的面积来比较，可以看出，由于排样方法不同有明显的差别，如图2.65 a)、b)所示，前者约为后者的两倍，很明显，图2.65 d)所示的材料费最为便宜。因此，在考虑到由于排样的不同对材料的使用有惊人的得失，所以排样的重要性有必要重新认识。

现将各种排样方法列于表 2.7 中。当然，这是作为提高材料利用率的一种手段。无论采用哪种方案，都会对生产率、精度、模具寿命等有影响，必须全面考虑利弊，应参考如下的分析慎重

表2.7 各种排样方法

排 样 方 法	备 注
无搭边排样法	产品精度差, 毛刺和塌角不在一个方向
交错排列法	不适用于短板, 要用卷料
倾斜法	形状限制多, 适用范围小
旋转交错排列法	必须退回废料, 效率低
翻转交错排列法	必须翻转同方向落料, 效率不高

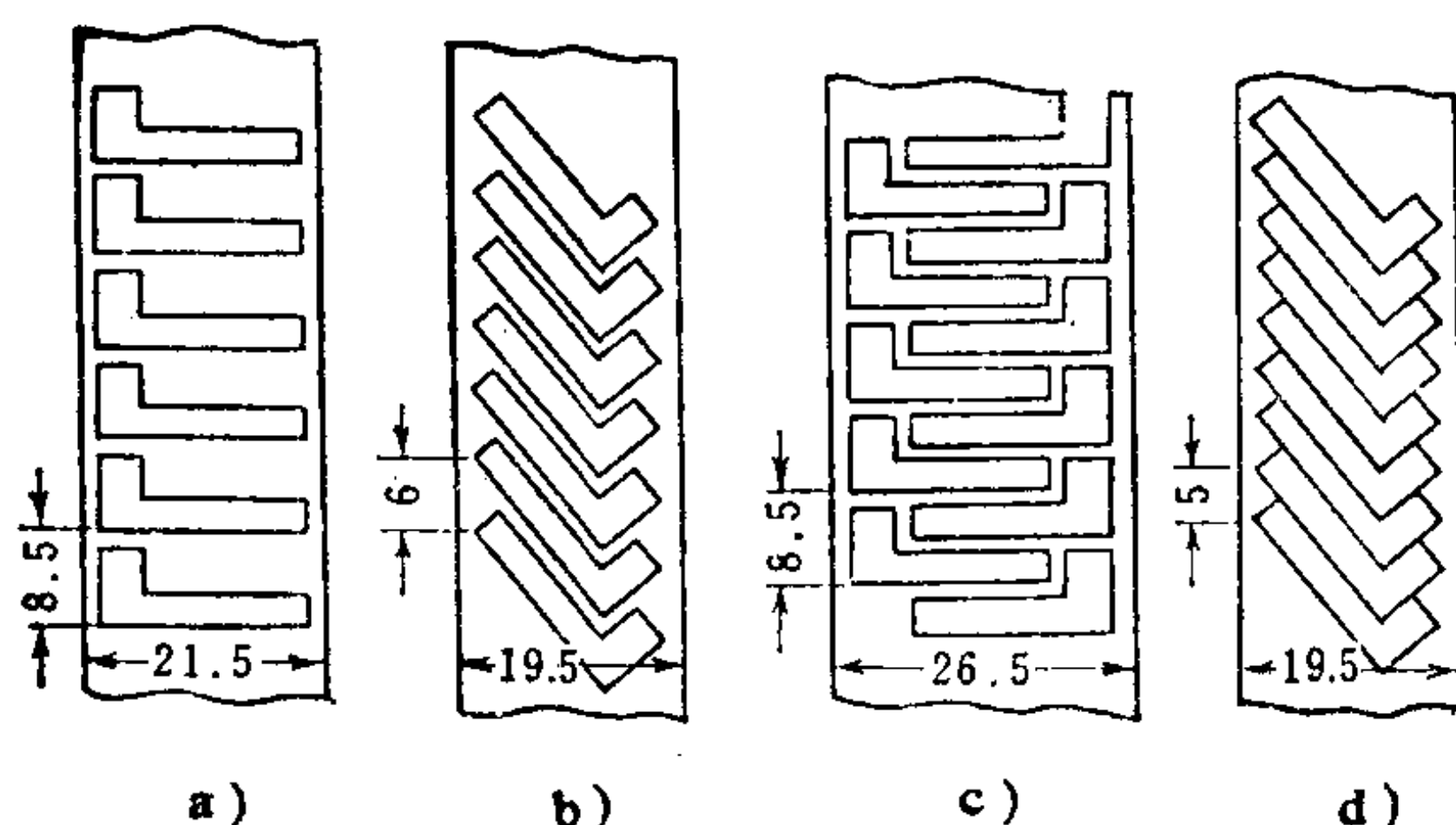


图2.65 各种排样方法的比较

a) 182.7mm b) 117mm^2 c) 112.63mm^2 d) 97.5mm^2

地确定排样方案。

所谓无搭边排样方法, 是用落料形状的一个边为下一个制件的边缘的方法, 如图2.65 d) 所示。图2.66 a)、b)所示的落料形状, 若采用无搭边排样法, 材料的利用率几乎是100%。

但是, 这种方法亦有缺点。其最大的缺点是塌角和毛刺不在同一个面上。即在相邻的剪切断面上, 塌角和毛刺出现在完全相反的方向上。另一个缺点是尺寸不容易准确。所谓挡块定位下料时, 当有杂物废屑夹入或定位顶力不同, 不可能象全周长落料那样得到正确的坯料。而图2.66 b) 的

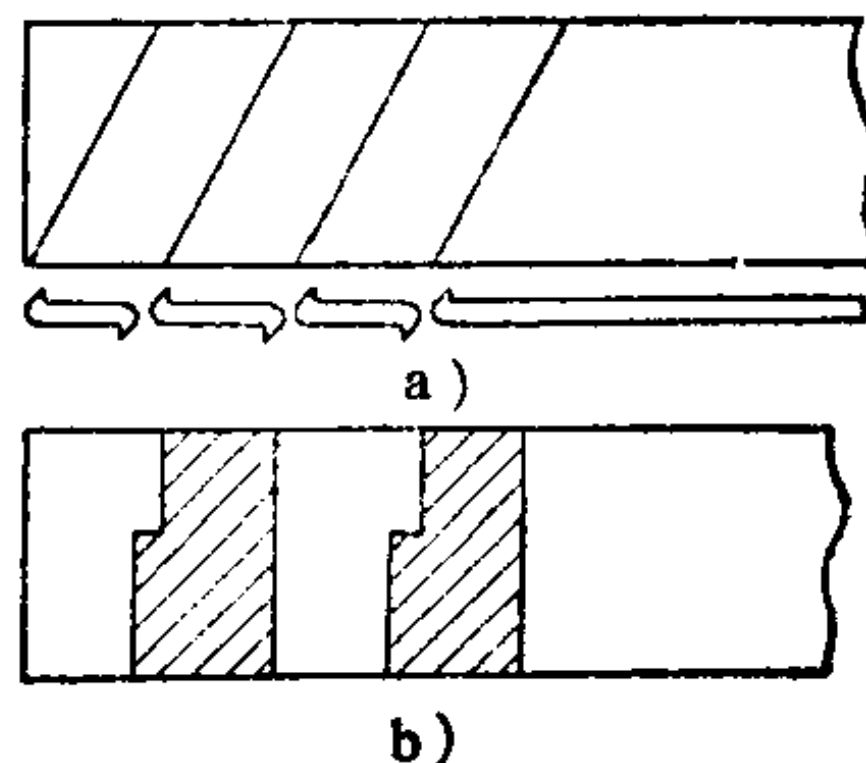


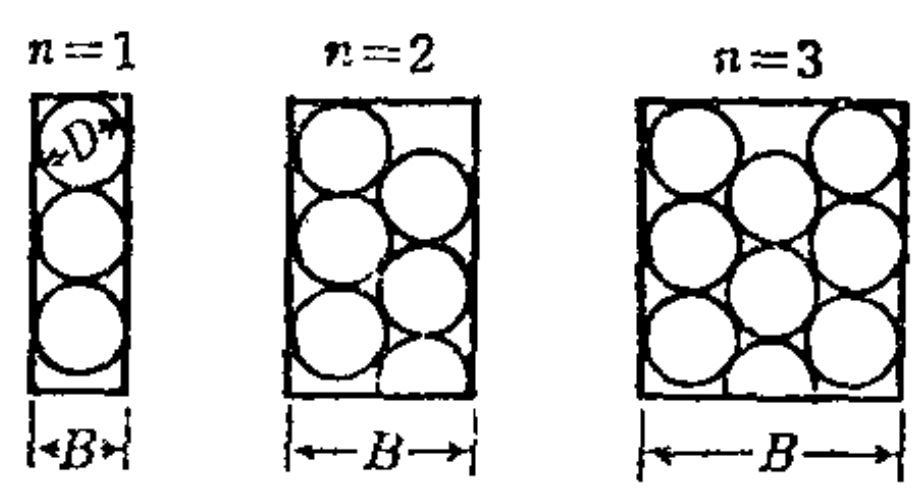
图2.66 无搭边排样法

情况，如果进行跳料冲切如打斜线的形状，则一个冲程可以冲出两个制件，生产率高，但这种场合其塌角和毛刺每件也不在同一个面上。

交错排列法，如表 2.8 的附图所示，对于冲裁圆料尤其是必要的。圆形坯料利用率本来很低，即使无搭边落料也有 21.5% 的废料。一般总要留有搭边，所以材料利用率更差。

作为补救的方法，交错排列落料，其列数要尽可能的多。表 2.8 所示为无搭边排列时列数和材料利用率的关系，材料利用率随着列数的增加而增加。

表 2.8 圆形坯料落料时列数和材料利用率的关系



n	B	Y	η	n	B	Y	η
1	10	200	0.785	9	79.28	1.795	0.89
2	18.66	399	0.84	10	88	1.995	0.89
3	27.32	598	0.86	12	106.2	2.394	0.894
4	36	798	0.87	15	131.2	2.992	0.895
5	44.64	1197	0.878	20	174.5	3.990	0.898
6	53.3	1396	0.884	23	200.5	4.588	0.9
7	61.96	1396	0.885	28	243.8	5.586	0.903
8	70.6	1596	0.886				

注： n 为列数， B 为板宽， $D = 10\text{mm}$ ， Y 为从长度 2000mm 下料的个数， η 为每个坯料的材料利用率。

但是，增加列数会使模具变得更为复杂，并且由于模具结构上的限制，同时冲切相邻两件是不可能的，则由于增加列数使模具在送进方向上亦要增长。短的板料，每块都会产生残件或不能再冲的料头等问题（有好料和残料混在一起）。为了克服其缺点，交错多列排样最好采用卷料。

所谓倾斜排列法如图 2.67 所示，根据形状的不同，其排列法

有时可大大提高材料的利用率。然而由于受到形状的限制较多，故应用范围有限。

所谓旋转交错排列法（见图 2.68）是坯件相互成 180° 旋转交错排列的方法，一般需要将板料掉头往返冲裁，故称为旋转法。图 2.69 也是旋转交错排列法的一种，这里，对于和送进方向垂直的轴线不是对称的形状，如果往返冲裁时翻转了原材料，则必须注意制件的毛刺和塌角将是相反的。

所谓翻转排列法（见图 2.65 c）是将坯件的形状翻转 180° 并交错排列，即简称为翻转法。在用一副落料模间隔落料时，第二次落料时则要将板料翻面，如果要求依然按原落料方向落料将是不行的。

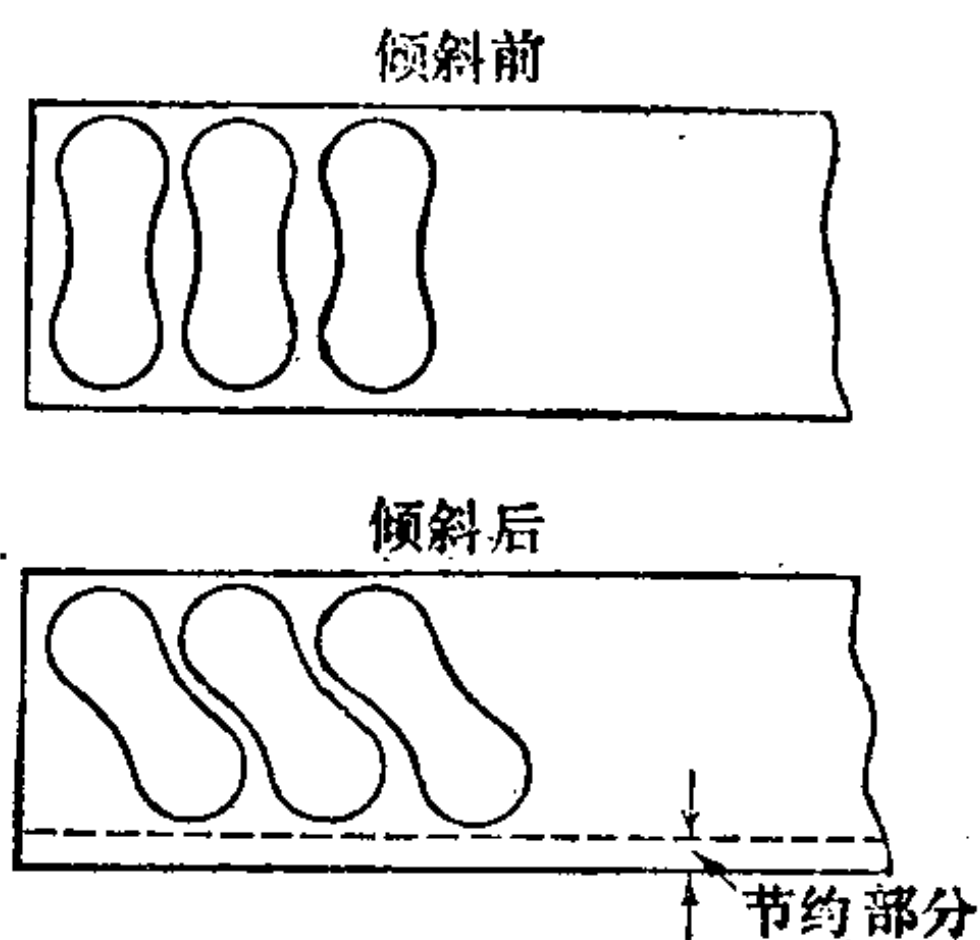


图 2.67 倾斜排列法

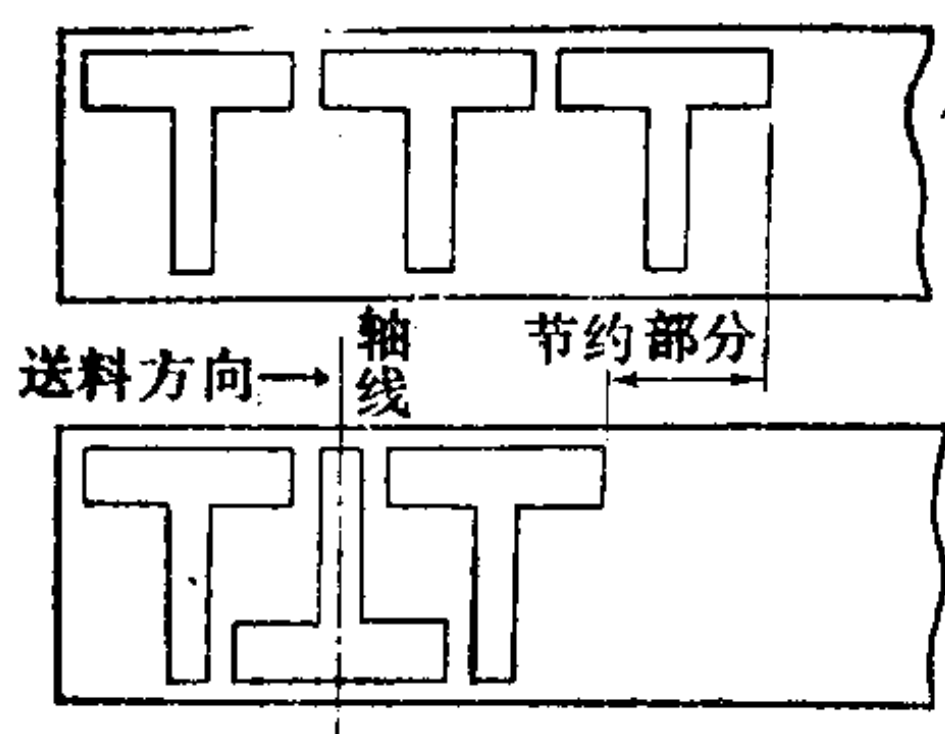


图 2.68 旋转交错排列法

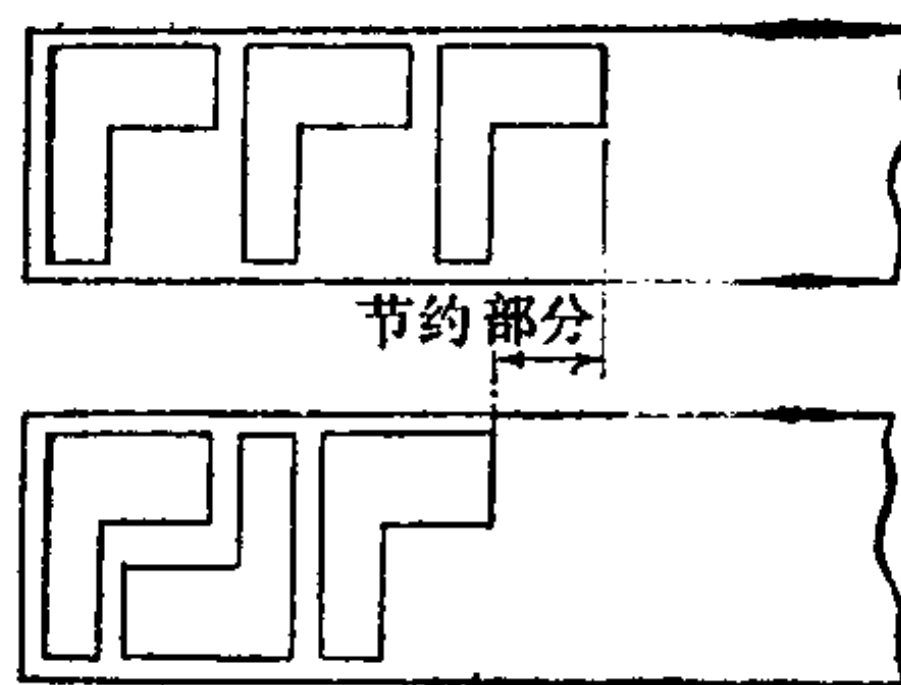


图 2.69 旋转交错排列法

(ii) 排列方法以外的提高材料利用率的方法 上面所述都是利用改变排样的方法进行下料设计的，此外提高材料利用率还有其他手段。以下介绍组合下料和改变制件设计的两种方法来提高材料利用率。

所谓组合下料（见图 2.70）是将大小不同的制件组合起来进行落料的方法。虽然这是谁都能做的事，但是实际上并不一定能实行，在组合排样时应注意到它是利用已冲过的料，即从“废料”上再冲出小型制件的方法，但这种方法经济价值不大。因为

使用、管理和操作上都有困难，废料再生产效率亦很低，由于工人的工资高，从废料中一个一个的去冲出小型制件那是愚蠢的办法。组合下料只有采用不同零件同时落料，必须将不同制件的模具复合在一副模具上，否则是没有价值的。

用改变设计来提高材料利用率的方法，通常是稍许改变制件的形状就能大幅度节约材料，这在生产现场以批判者的立场是能很好的发现问题的，而在设计者则往往是不易发现问题。图2.71 a) 是最初的排样设计，如把形状改成如图 2.71 b) 所示的实线，则可改为图 2.71 c) 所示的排样。因而将使材料利用率从原来的 62% (见图 2.71 a) 提高到接近 100%。平时若将制件形状稍作改变或修正即能使材料利用率大大提高的情况是很多的。

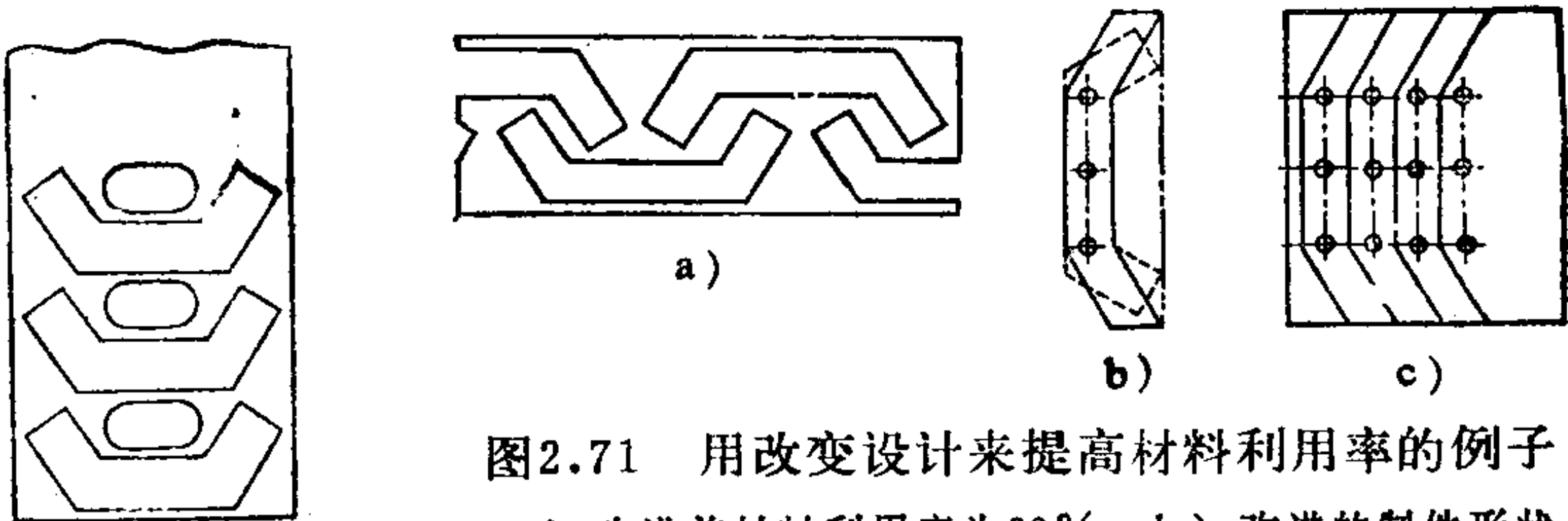


图2.71 用改变设计来提高材料利用率的例子

a) 改进前材料利用率为62% b) 改进的制件形状

c) 改进后材料利用率接近 100%

图2.70 组合下料

c. 排样(下料)的计算方法(参照图 2.72) 探讨零件的制造方法时应采用最合理的加工方法，在最高的材料利用率的情况下可用下述方法确定下料尺寸：

(i) 条料宽度尺寸 B_1

$$B_1 = B_2 + 2b_2 \text{ (mm)}$$

式中 B_2 ——最高材料利用率时制件在宽度方向的最大尺寸 (mm)；

b_2 ——搭边值 (mm)。

(ii) 从标准尺寸板料、带材及不规则尺寸的板料取的条料数 (N 条)

(1) 由标准尺寸板料下料时

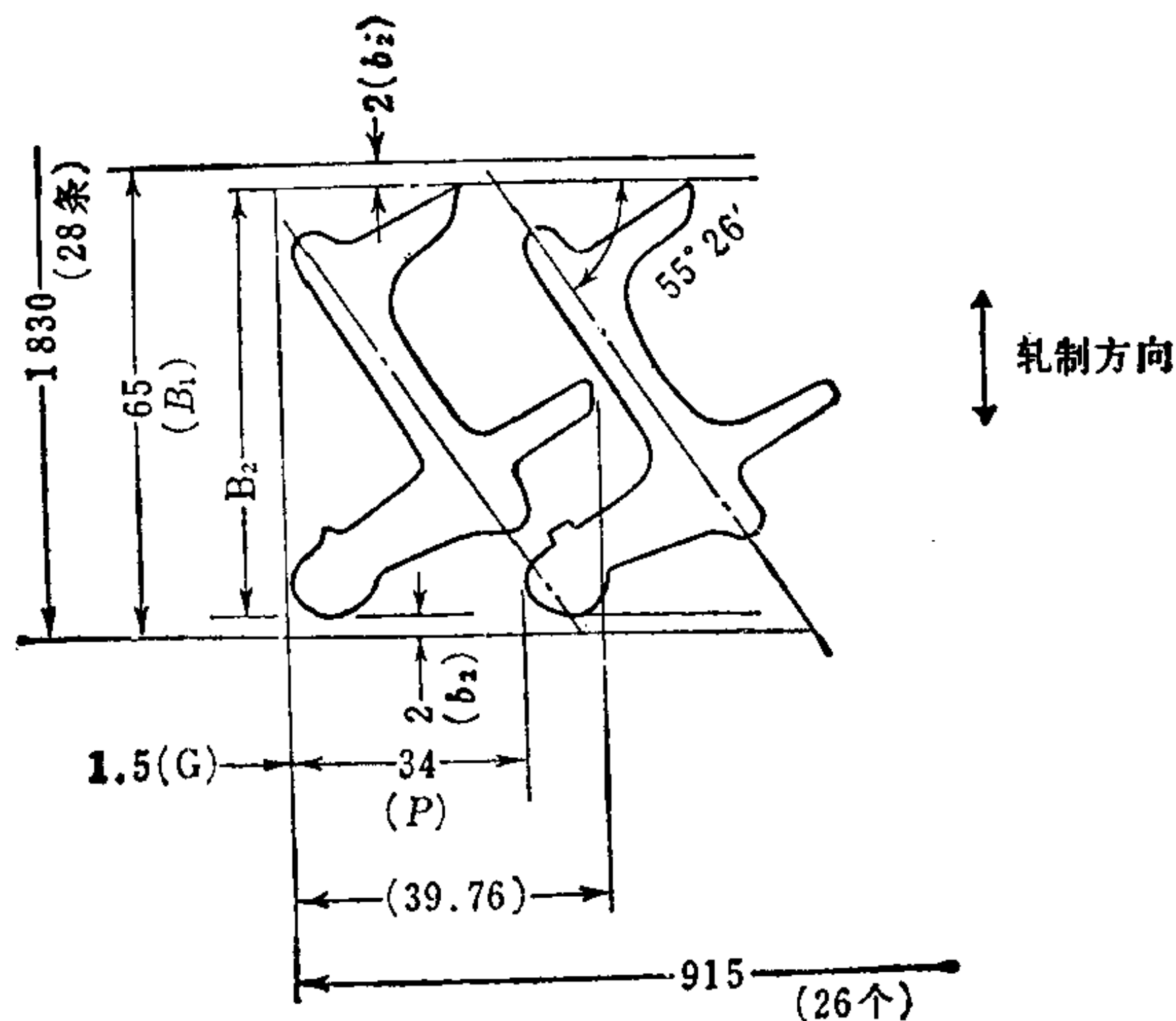


图 2.72

$$N = L_0 / B_1$$

L_0 ——标准板料的长度（原则上是长的方向，由轧制方向确定）。

(2) 由带材、不规则尺寸的板料下料时

$$N = B / B_1 \times L_A / L_2$$

式中 B ——板料（带材）宽度（mm）；

L_A ——带材、不规则尺寸板料的基准长度（mm）；

L_2 ——所下条料的长度（mm）（料头长度最少应接近 1m）。

(iii) 条料、带材、不规则尺寸的板料每张可取制件的个数 (n_0 个)

(1) 条料时

$$n_0 = (L_2 \times n_2 / p) - n_3$$

式中 n_2 ——1 个进距落料的个数；

n_3 ——不完整制件的个数（连续模最后部分）；

p ——落料进距（mm）。

(2) 带材时

$$n_0 = L_A \times n_2 / p - (n_3 + 5)$$

(3) 不规则尺寸的板料时

$$n_0 = (L_B \times n_2 / p) - n_3$$

式中 L_B ——不规则尺寸板料的基准长度 (mm)。

(iv) 相当于每个零件所需要的尺寸 l_4 (mm)

(1) 条料时

$$l_4 = L_2 / n_0$$

(2) 带材时

$$l_4 = L_A / n_0$$

(3) 不规则尺寸的板料时

$$l_4 = L_B / n_0$$

(v) 相当于每个制件所需要的原材料重量 w (g)

(1) 条料时

$$w = W / N \times n_0$$

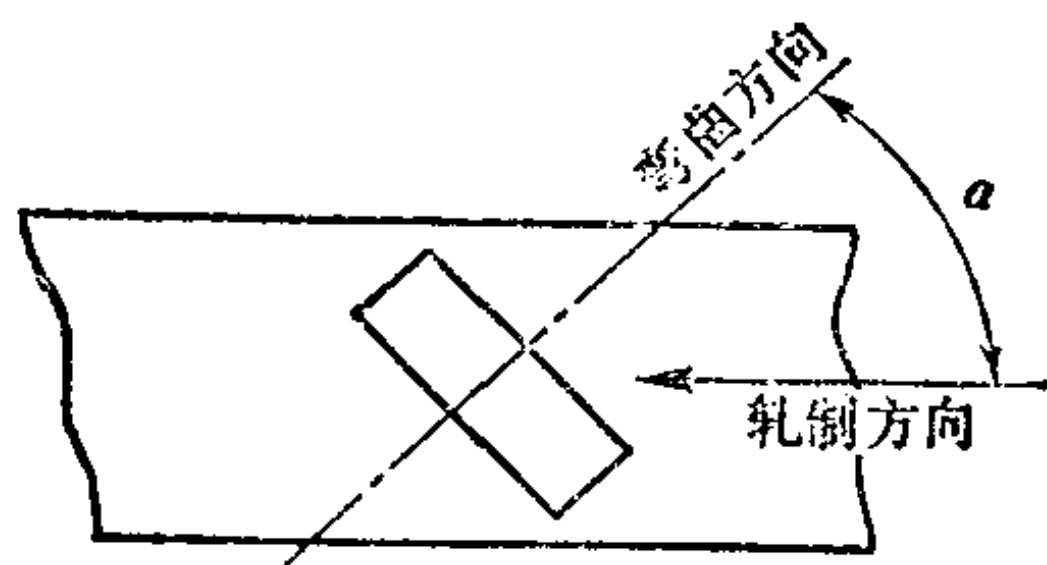
式中 W ——标准尺寸板料的总重量。

(2) 带材、不规则尺寸的板料时

$$w = W / n_0$$

d. 对于二次加工的考虑

(i) 材料的轧制方向 制件作弯曲加工时, 根据材料的不同, 必须对轧制方向加以考虑。这不仅对制件精度有影响, 也是弯曲裂纹产生的原因。作为一般的考虑, 在冲裁有弯曲加工的制件时采取轧制方向和弯曲方向成倾斜的落料方法, 并要探讨落料方向和弯曲半径的关系及提高材料利用率。图 2.73 所示为青铜板料弯曲时弯曲半径和轧制方向的关系的一例。



材 料	最小弯曲半径	α
青 铜	$< 2t$	90°
	$2 \sim 4t$ ①	65°
	$> 4t$	45°

① 原文误为 $2 \sim 9t$ 。——译注

(ii) 毛刺方向 毛刺方向 图2.73 材料的轧制方向和排样方向

若同时也是弯曲方向，这样的制品有时会对其性能有妨碍。因此，除有特别指定的场合，一般要求从装配和使用方面进行分析。作弯曲加工的落料件，原则上毛刺应置于弯曲的内侧，要注意如放在外侧容易引起弯曲裂纹。

e. 对于作业性的考虑 为提高生产率和有效地使用材料的长度，送料进距应尽可能小。根据制件的形状，应同时考虑作业性和材料利用率。图 2.74 所示为关于作业性的一例，由于排样方向不同所引起的不同效果。关于材料利用率，可以认为图 2.74 a) 和图 2.74 c) 是一样的，而从作业性上来看就并不一样。图 2.74 b) 所示是图 2.74 a) 排样所出现的现象，这时不可能连续送料。因此，希望用图 2.74 c) 那样的排样。

一般如果只考虑作业性，在制件形状有凹进侧时，则取如图 2.74 c) 所示的送料方向，这可以说是一个原则。关于搭边的不同也是必须考虑的，一边的侧搭边宽度小时，材料会弯曲，根据模具形式往往不仅使作业不可能，并将成为模具损坏的原因。关于边缘搭边宽度必须和排样形状一起考虑。图 2.75 和图 2.76 为其排样示例。

f. 对于模具的制造和维护的考虑 当制件带有孔和槽等复

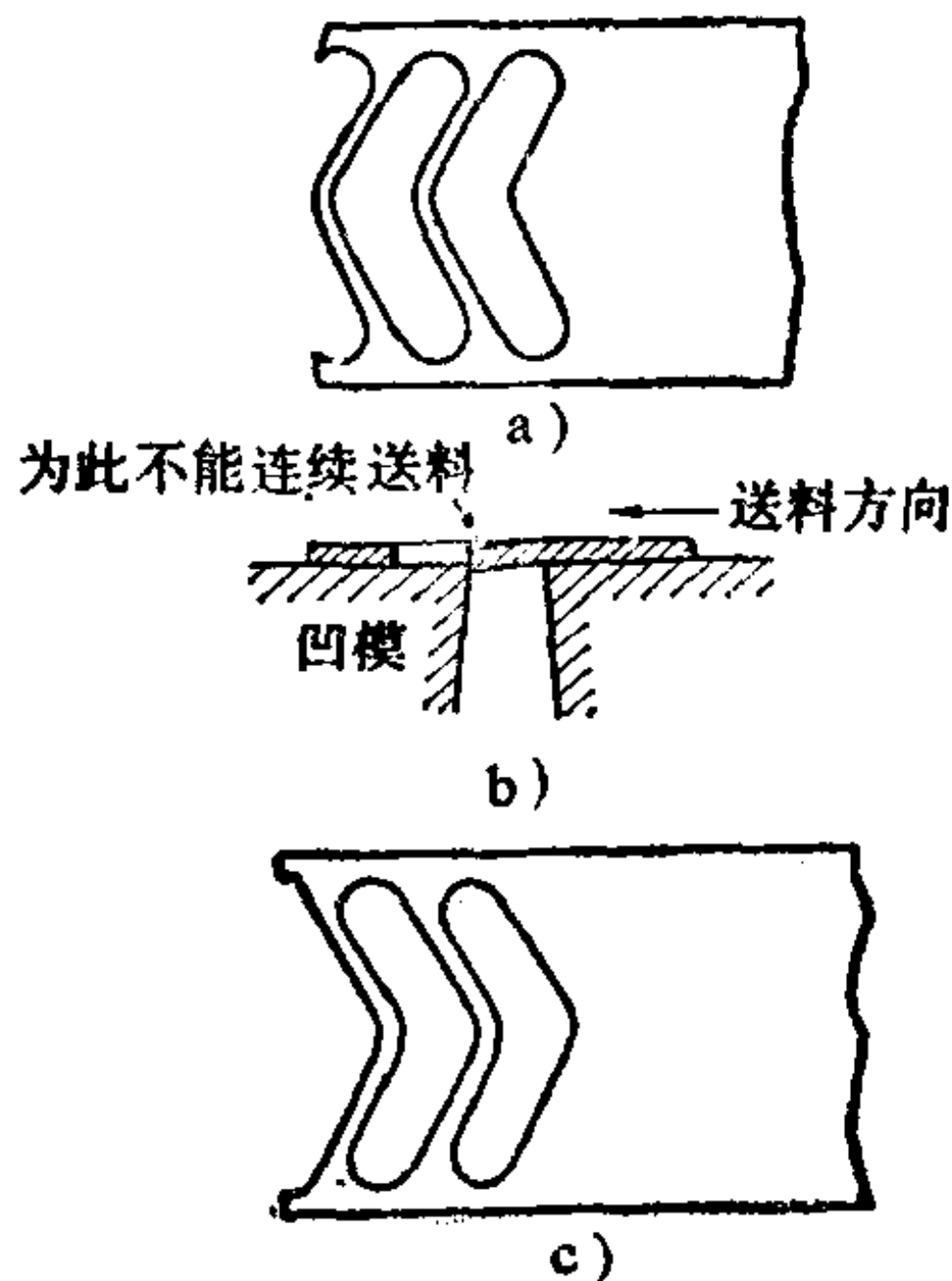


图2.74 排样示例



图2.75 排样示例

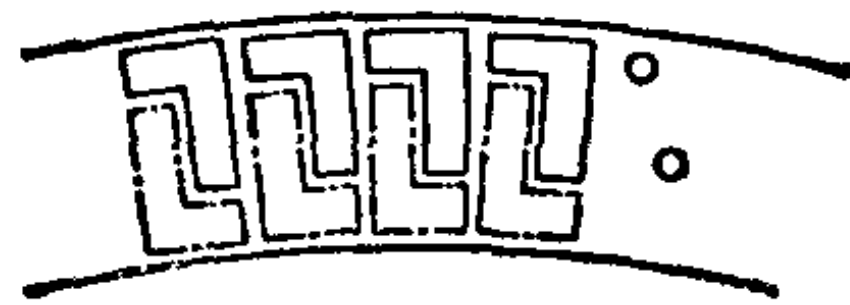


图2.76 排样示例

杂形状时，将其加工分成二次和多次进行，反而使模具制造或维护上变得更容易些。图 2.77 为其一例，它主要是考虑了模具制造上的问题。这时往往会降低材料利用率。另外，即使在材料利用率相同时，也要从模具制造和维护上加以考虑，如图 2.78 所示。图 2.78 a 所示为从冲孔凸模的重磨方面来看是不理想的一个例子。图 2.78 b) 所示是在这种情况下合理的排样。

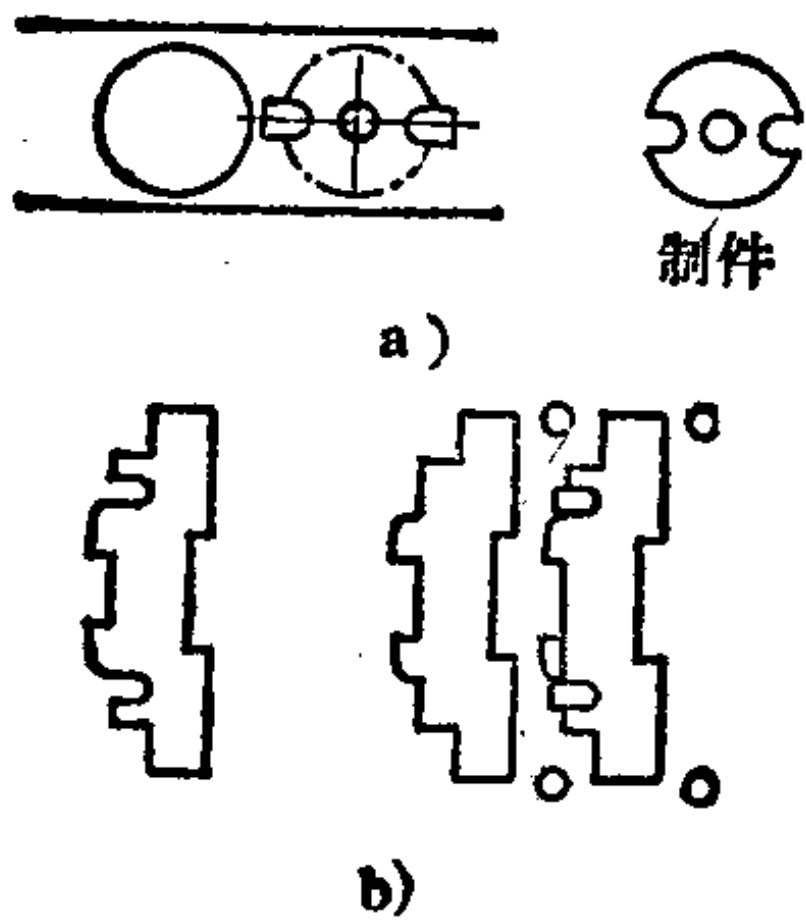


图2.77 制件形状和凸模的配置

- a) 有缺口的制件
- b) 复杂外形落料

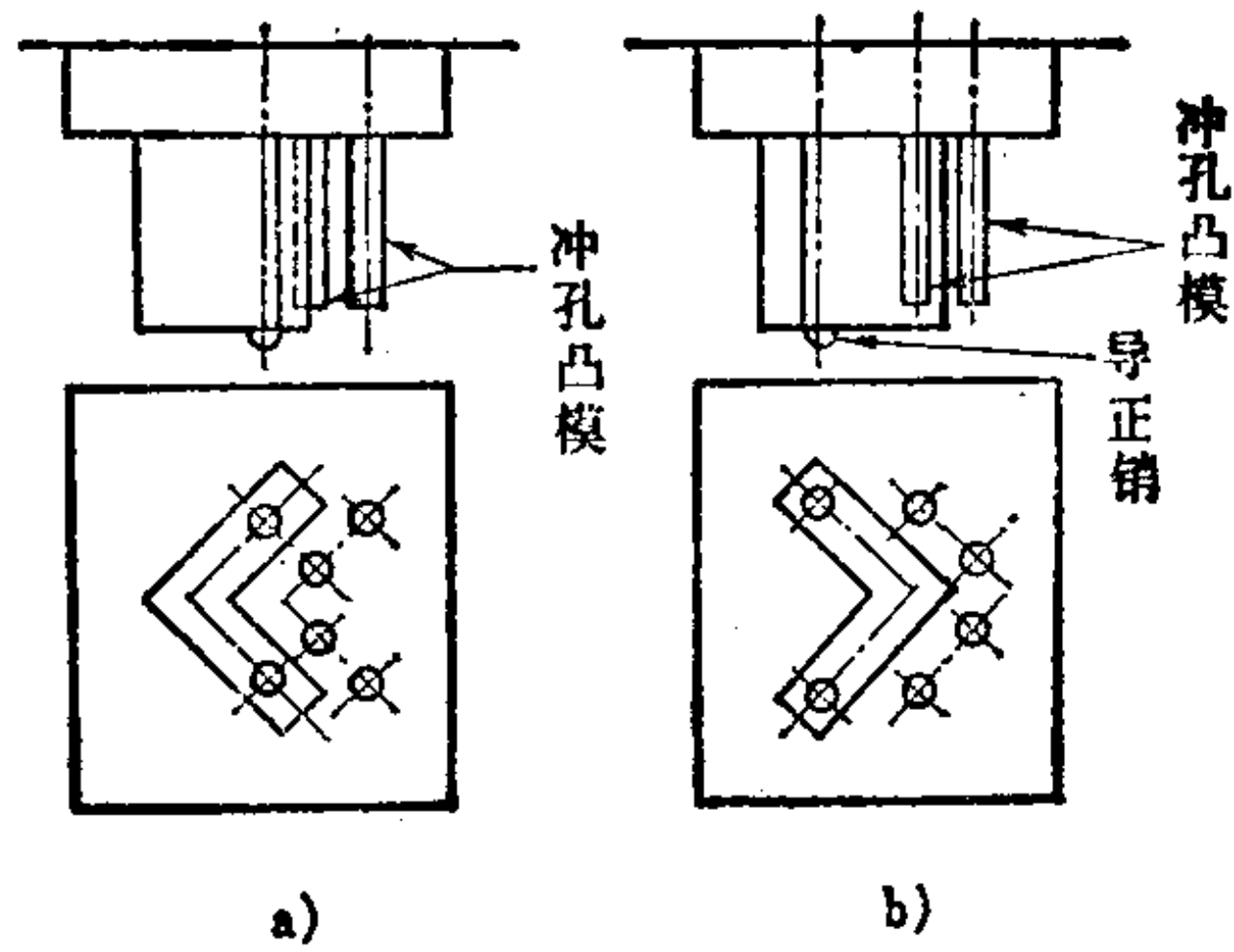


图2.78 制件形状和凸模的配置

- a) 不好
- b) 好

2.3.6 搭边宽度

对于落料模，为了经济而有效地利用材料，关于搭边宽度的探讨是重要的。过大的搭边宽度不仅造成材料浪费，也不能达到某些预期的效果。搭边可以分为送进方向上的搭边和边缘搭边。搭边必须根据制件形状、材料、料厚和排样方法来考虑，当然还要从作业性上来探讨。

a. 能正确送料所需的搭边 为了能正确地送进材料，材料要有一定的刚性。由于模具结构和形式的不同，对材料刚性的要求也不同，如果材料有一定的刚性即使相当小的搭边宽度也能正确地送料，并且在操作上没有什么困难。无废料冲裁可以说是其一例。但是一般过小的搭边，由于材料变形的结果，多数场合使材料不能正确地送进。这样，在用连续模等时，将成为落料件的尺寸不好和导正销折断的原因。

b. 使材料不致断裂或显著变形的搭边 在冲裁非金属材料及脆性材料时，对于材料断裂必须加以探讨。例如：冲裁酚醛层压板等，搭边量过小时，不仅由角部会出现裂纹或开裂，给制件造成不良影响，同时由于碎片的飞散成为引起模具损坏的原因，并使连续作业成为困难。在冲裁布料、漆布或非常薄的金属板时，特别要考虑在送进时的刚性变形。

送进搭边量、边缘搭边量的最小值如图 2.79 所示。

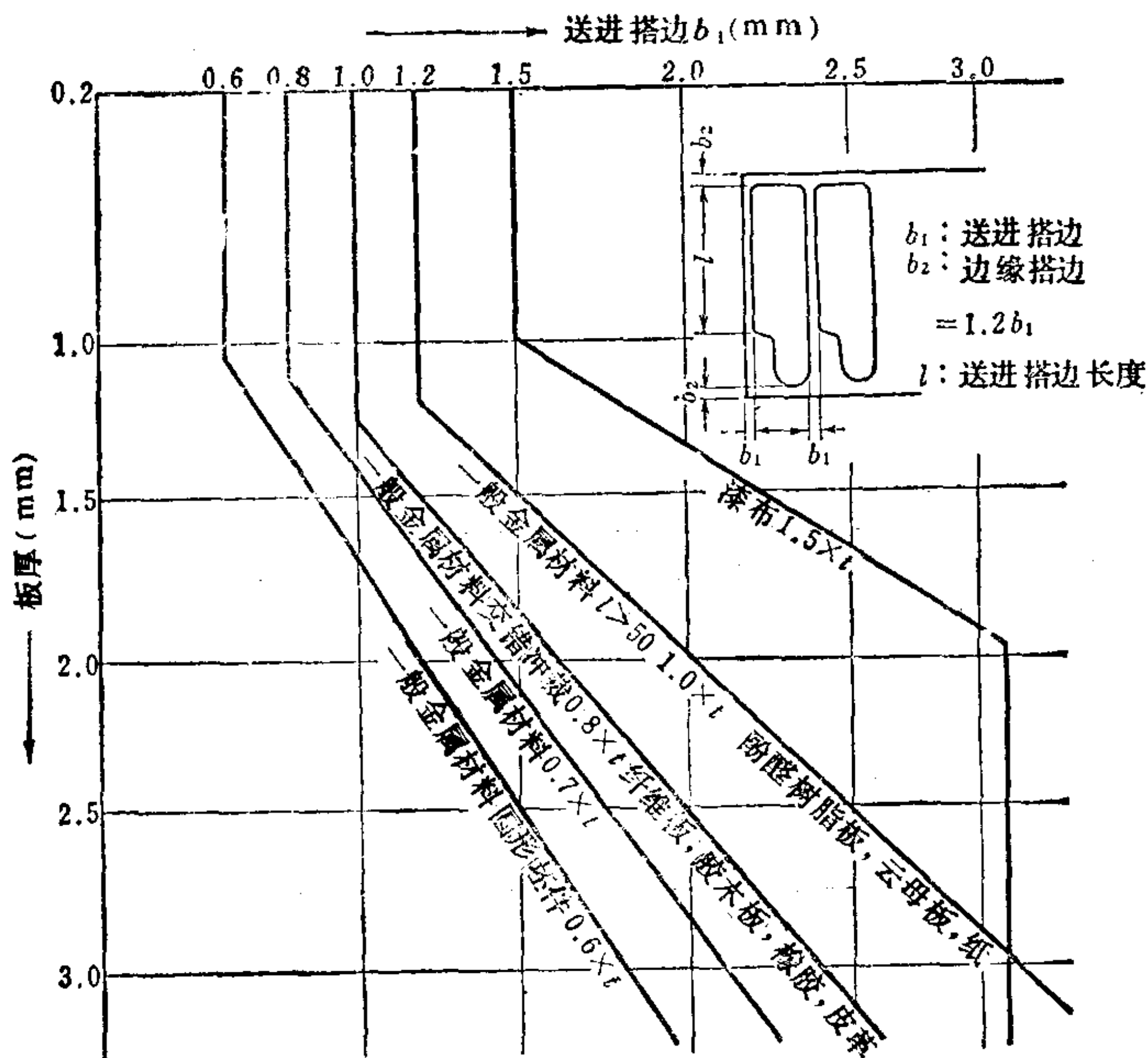


图 2.79

注：1. 小数点以后 2 位 4 舍 5 入； 2. $l > 50$ mm 指最小处的长度超过 50mm 时； 3. 交错冲裁，1 个落料模一次落两个以上的料； 4. 圆形坯件：指最小搭边处； 5. 特殊情况另行考虑

2.3.7 模架的选择基准 (表 2.9)

模架形式的选择按如下步骤进行：

(i) 由基准 (1) 中决定属于 i)、ii)、iii) 中的哪一组；

表2.9 选择基准

形式	基准(1)			基准(2)					基准(3)	
	制件精度	生产个数	模具余量	工序数	加工间隙(mm)	模具材料	加工坯样	送料方法	模具类别	模具尺寸
A	普通级	2000/月以下	—	2以下	0.03以上	SBD SKS- ₂	全部软材料	手	简单—落料冲孔、弯曲、拉延等	全部
BB	高级	2000/月以上	20KX以上	1~7	0.02以上	CRD SBD SKS- ₂ SKH	全部软材料、硬材料	手	复杂—落料、冲孔、弯曲、拉延等(但是冲孔,上下平面有平行度要求装定位器的除外)	按图2.80
CB	高级	2000/月以上	20KX以上	1~7	0.01以上	CRD SBD SKS- ₂ SKH	全部软材料、硬材料	自、手	复杂—冲孔、弯曲、拉延、多孔冲等,简单—剪切复合压印、锻造等	按图2.80
DB	高级	2000/月以上	20KX以上	1~7	0.01以上	CRD SBD SKS- ₂ SKH	全部软材料、硬材料	自、手	复杂—落料、冲孔、弯曲、拉延、多孔冲、长板簧落料等简单—剪切复合压印、锻造、多工序等	按图2.80
FB	精密级	2000/月以上	20KX以上	1~7	0.005以上	CRD SBD SKS- ₂ SKH 硬质合金	全部软材料、硬材料	自、手	复杂—落料冲孔、弯曲、拉延等简单—剪切复合压印、锻造多工序、挤压、拉削等	按图2.80
滚动导向模架	精密级	1000/月以上	20KX以上	1~7	0.005以上	CRD SBD SKS- ₂ SKH 硬质合金	全部软材料、硬材料	自、手	复杂—同上,导向间隙0.005以下(特别是在修边压力机使用时)	全部

(续)

形式	基准(1)			基准(2)					基准(3)	
	制件精度	生产个数	模具余量	工序数	加工间隙(mm)	模具材料	加工坯样	送料方法	模具类别	模具尺寸
浮动模架	精密级	1000/月以上	20KX以上	1~7	0.005以上	CRD SBD SKS-2 SKH 硬质合金	全部软材料、硬材料	自、手	复杂一同上, 特小的加工间隙和上下台面的求平行度的	全部
3导柱模架	高级	2000/月以上	20KX以上	1~7	0.01以上	CRD SBD SKS-2 SKH 硬质合金	全部软材料、硬材料	自、手	复杂一落料冲孔、弯曲、拉延(偏心载荷时)等	全部
备注	普通级: 普通公差 高级: 包括普通公差以内 精密级: 普通公差的50%以内	(1) 模具余量按GB求 (2) 模具余量由下表求定					手: 手动 自: 自动 (手): 二次加工以后为手动		单: 简单形状的 简单: 比较简单形状的 复杂: 复杂形状的	

- i) 无导柱的A (JIS形式);
- ii) BB、CB、DB、FB三导柱模架;
- iii) 滚动导向模架, 浮动模架。

(ii) 确认所选择的组别是否适应基准(2)。不适应时, 在上一级中再选组别, 重新选定形式。

(iii) 在基准(2)中不能选定的问题, 再由基准(3)求定。在模具类别中不能确定的可由图2.80决定。模具尺寸在图的附近取右上角所示的形式。

在市场上, 商品模架的导柱、导套的间隙在0.01~0.02mm之间, 如需要特殊间隙时应注意这点。另外, 在特定的压力机上安装时可不按本标准。

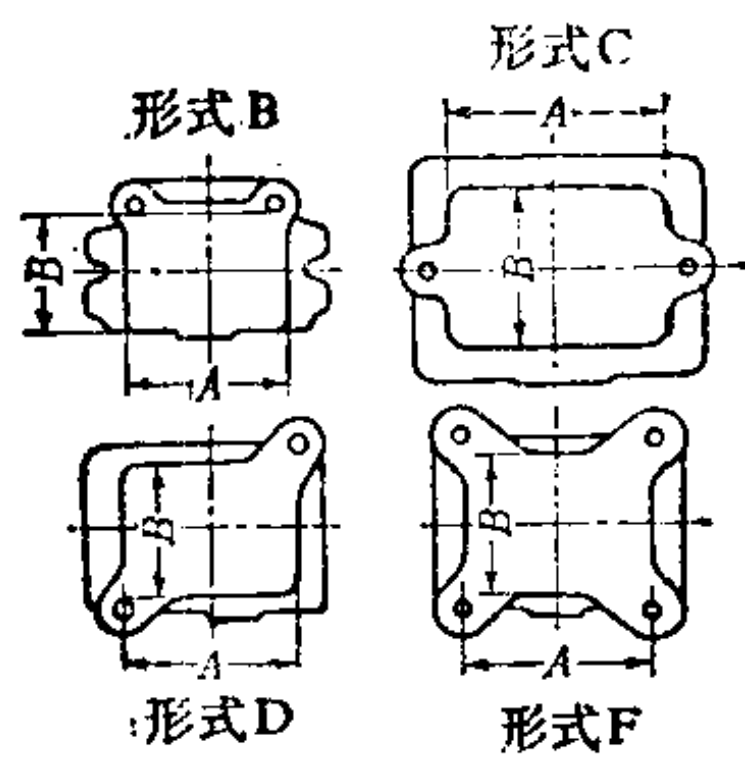
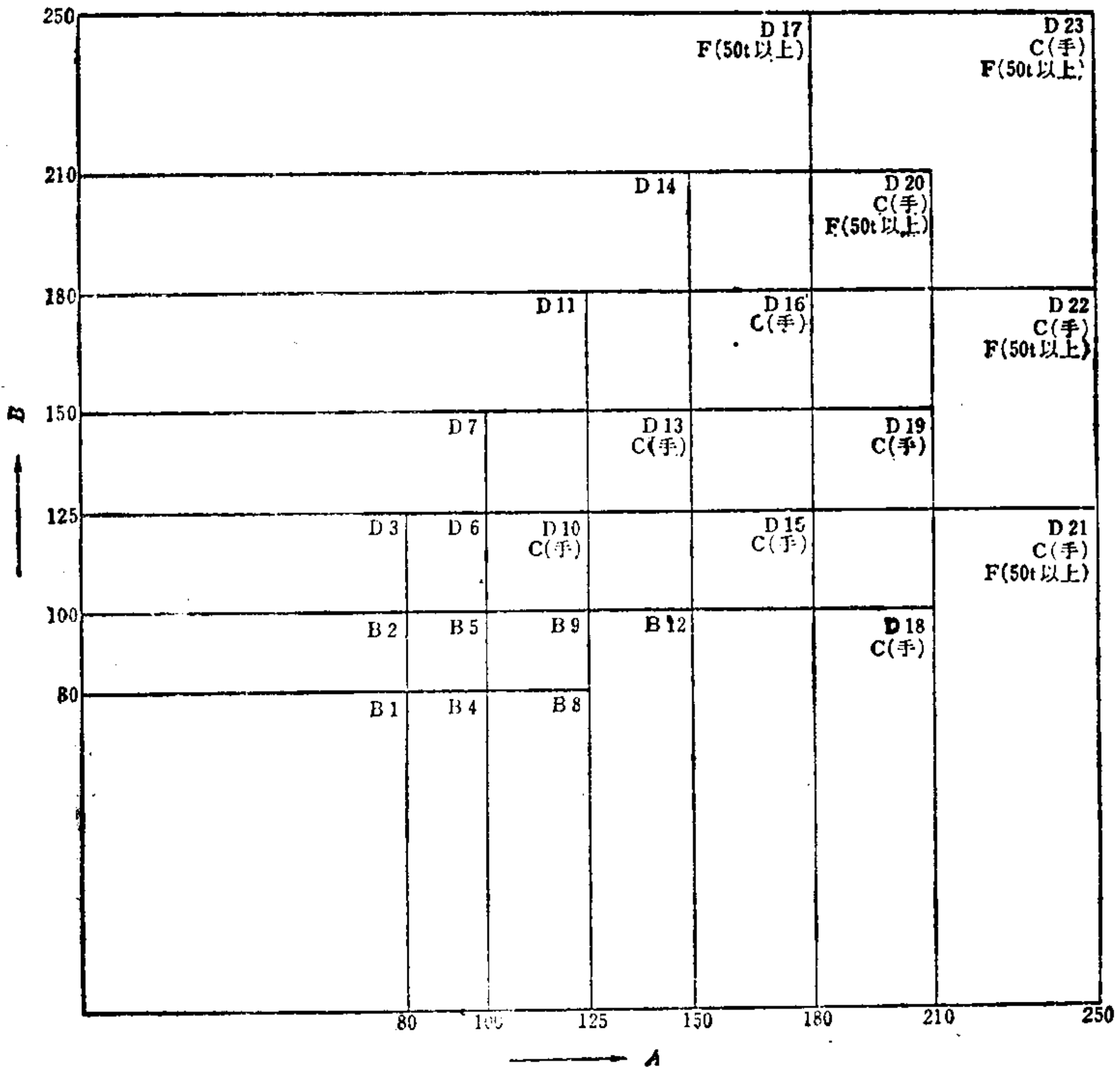


图2.80 模具尺寸和模架形式

(1) 使用状态已标上符号，考虑到是否手工操作而定

(2) 吨数表示加工所需吨位数

2.3.8 硬质合金模设计

a. 材质的选择 硬质合金的机械性能和物理性能如图2.81所示。由此图可知，随含Co量的变化其性能有显著变化。根据模具的形式，含Co量的选择基准见表2.10。例如标例 WC-Co18（符号G是JIS标准，为制造有用符号M和符号H的，要求在图面上标注含Co量）。

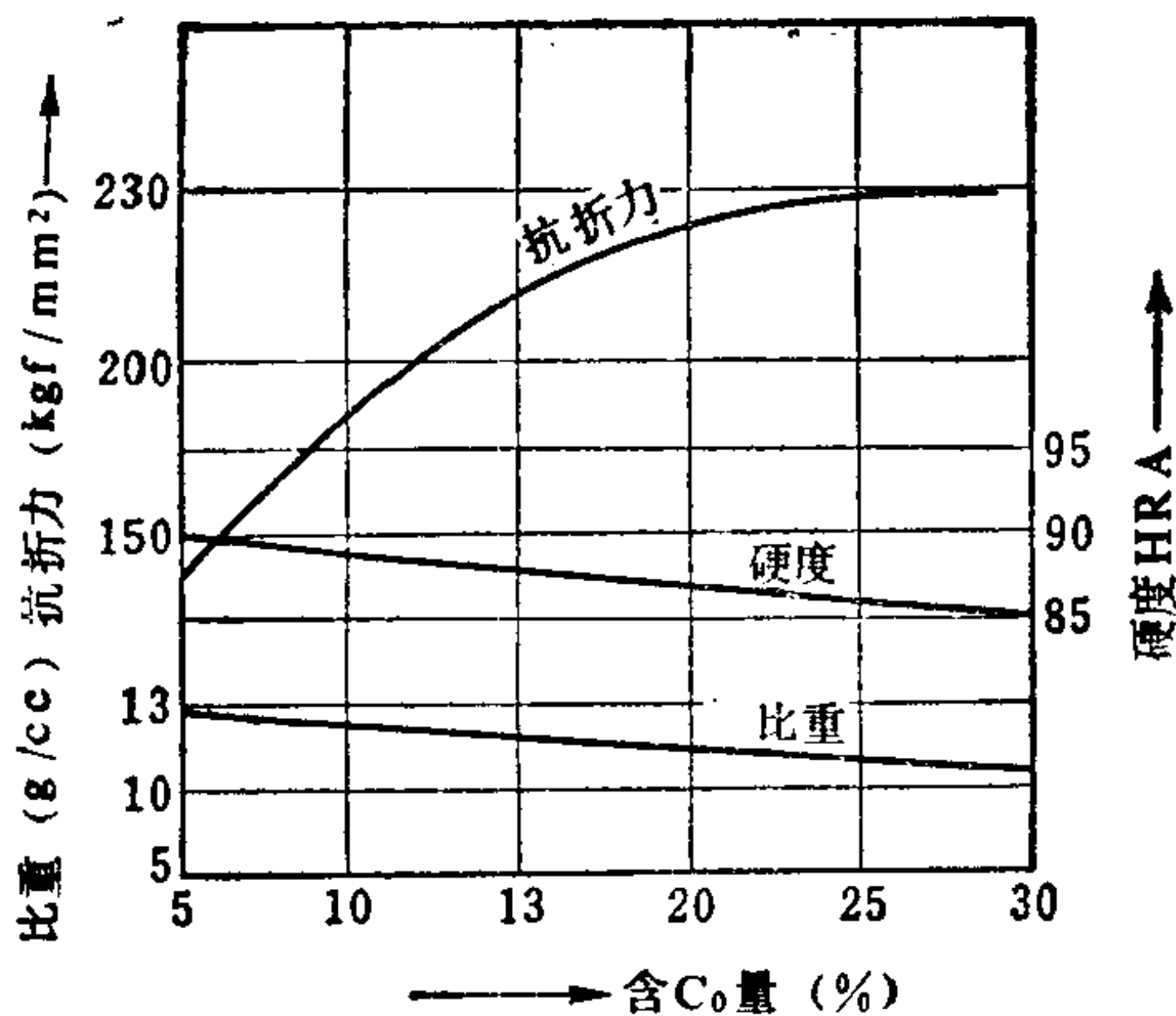


图 2.81

表2.10 含Co量的选择基准

	含Co量 (%)	耐磨性 小↔大 抗折力 大↔小
冲裁模	18~20	G6↔G2 G5G4G3
弯曲模	15~16	G6↔H1 G4↔G1
拉延模	16~18	G6↔H1 G5G3G2G1
压印模	16~18	G6↔G2

注：符号G是JIS标准。

b. 设计上的注意事项（参照图2.82、2.83）在弯曲、拉延加工时乍一看好象冲击很大，但因为有较强的受力面积，故不要求模具有很大的耐冲击性能。然而在冲裁时其刃口部分瞬时承受了很大的力，为此在设计冲裁模时要考虑下列事项：

(1) 对于延长寿命，冲模的结构应具有足够的强度和刚性。

(2) 提高模具精度并能长期保持其精度。

(3) 硬质合金刃口被牢固地固定。考虑到承受冲击，可采用有预应力的热压配合和机械固定。刃口钎焊经长时间使用有可能松动。

(4) 对于冲裁模，因为间隙不均匀是使刃口缺损而助长裂纹产生的原因，所以应注意以下两点：

- i) 设计成四导柱式模架，采用滚珠导向。
- ii) 为了防止凸模的偏移，应采用卸料板导向方式。

(5) 对于连续模要提高送料精度 冲缺料和双料是崩刃的最大原因。如可能应安装安全装置。图 2.82 和图 2.83 所示了几种固定方法。在外形落料时硬质合金的形状尺寸大，硬质合金在烧结时易变形，同时因为材料可能不均匀，所以最好作成组合模。

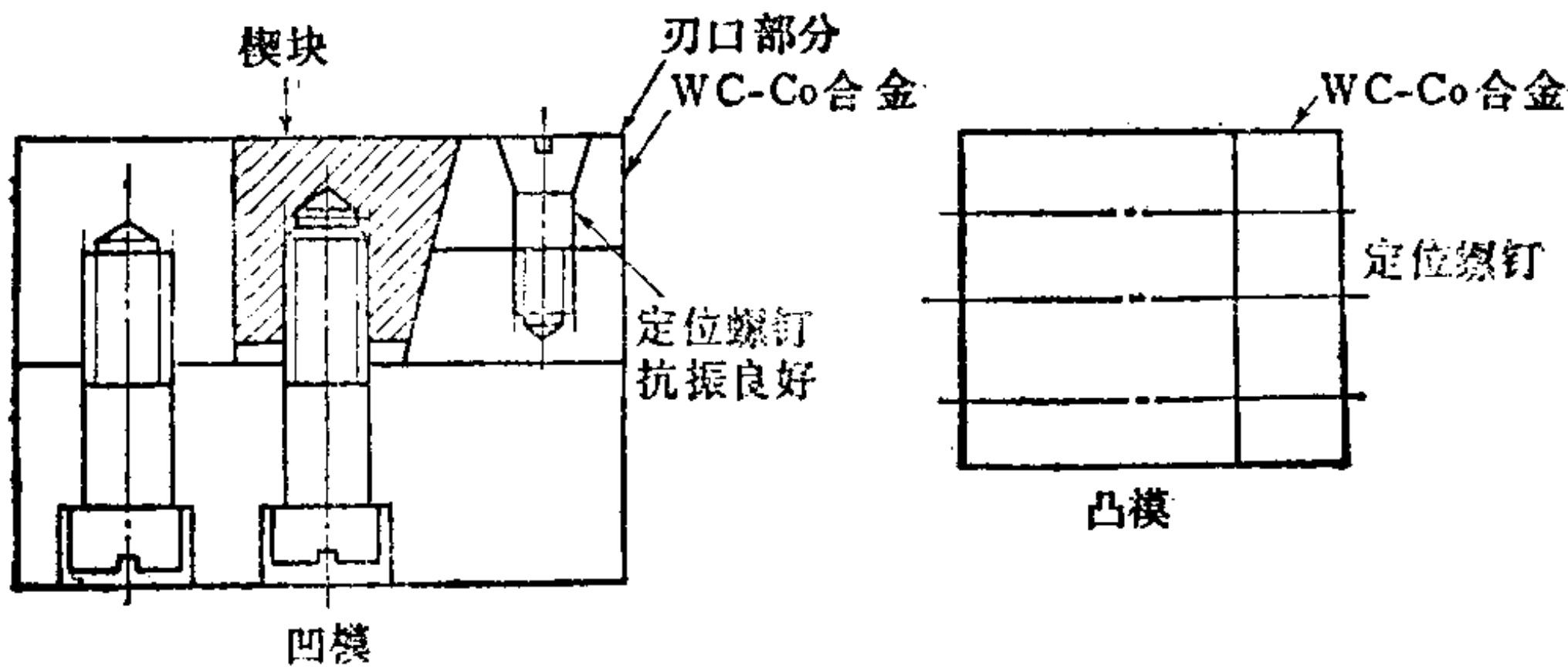


图 2.82

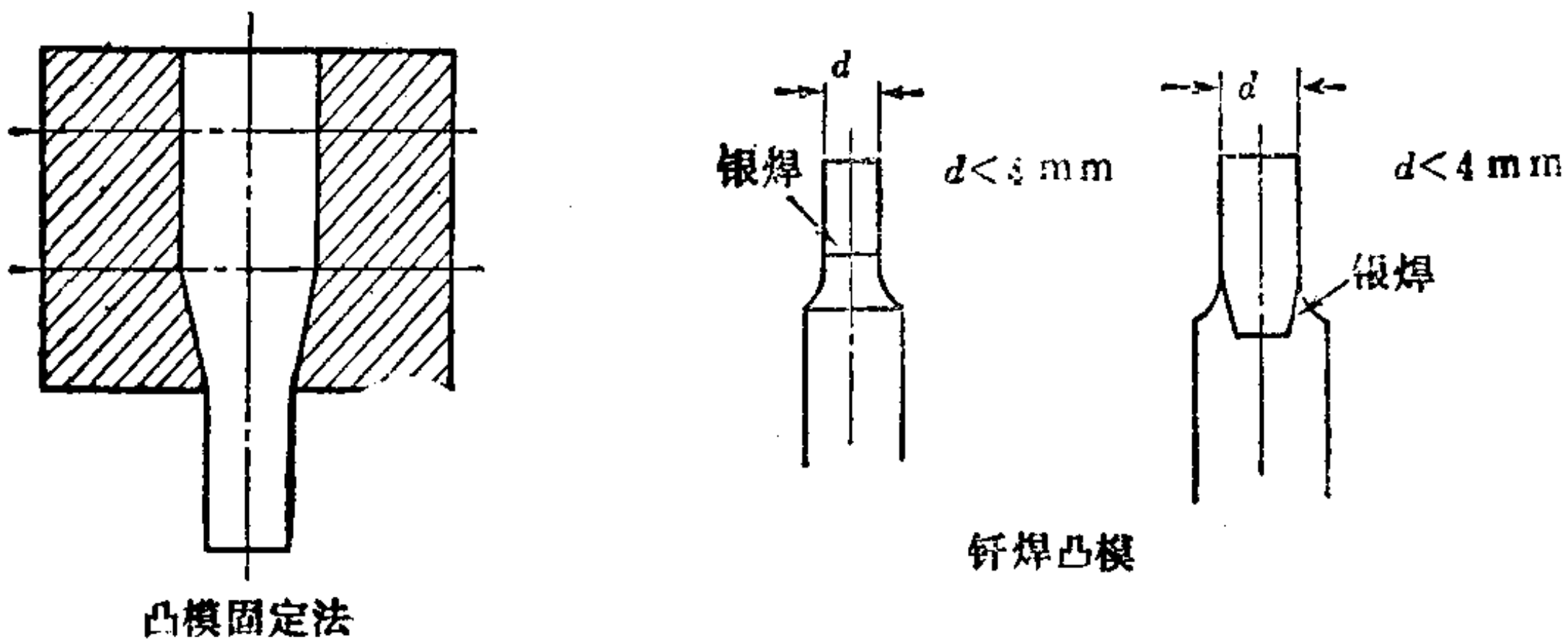


图 2.83

c. 坯料尺寸的决定方法 硬质合金刃口由于烧结造成的收缩，在长度方向为 20~25%，体积收缩约 10%，并且如表 2.11 所示，对于烧结时的弯曲量，JIS 标准作了规定。在购入烧结的硬质合金刀片时要考虑其收缩量和弯曲量后再决定坯料尺寸。但是如图 2.84 所示在图面上指定了公差值时，由于制造厂已进行了粗磨，所以不用担心弯曲。这种场合由于指定了公差范围价格将增高，但是考虑到厂里加工所用的工时后，即使刀片的价格略

高些还是经济的。最终的研磨量单面取 0.05mm 即可。

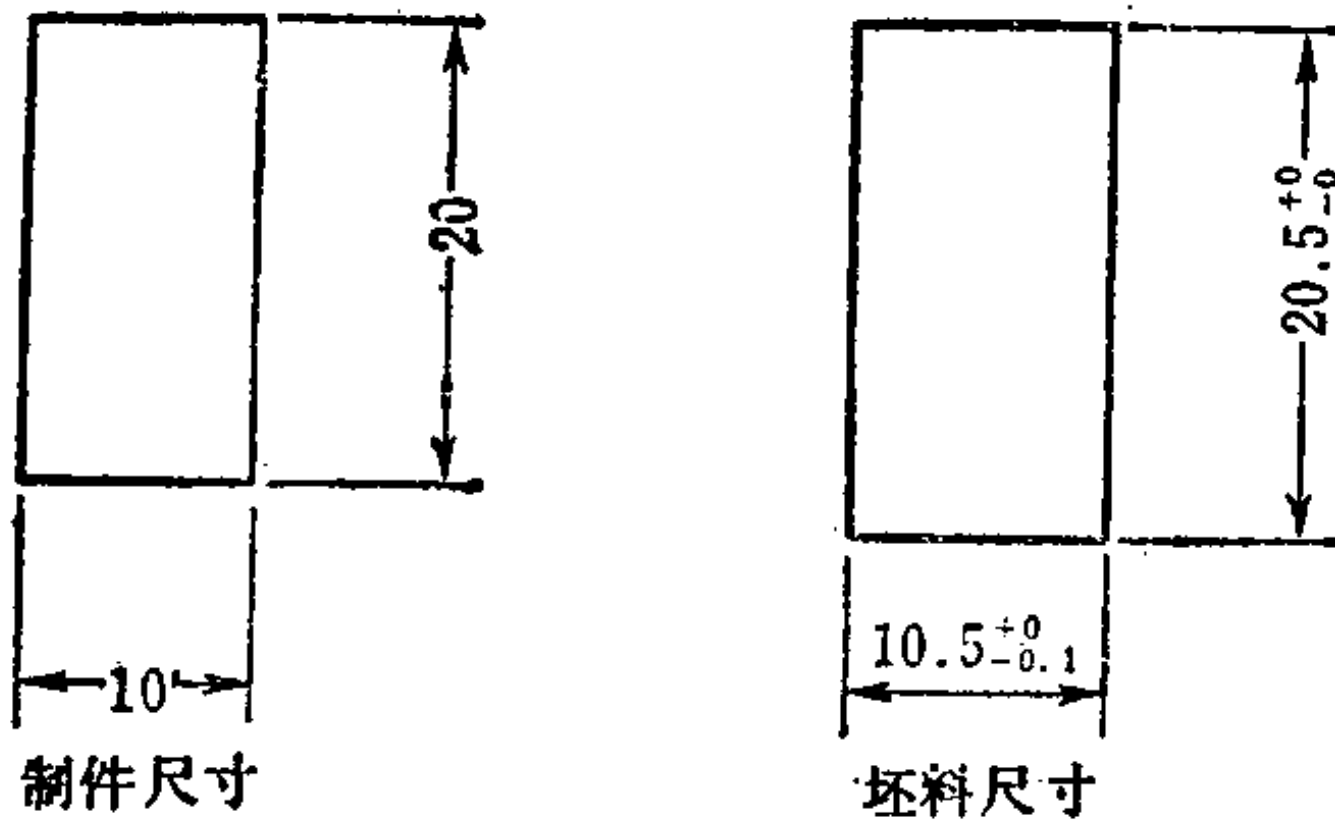


图 2.84

表 2.11

尺寸 (mm)	弯曲公差 (%)
<3①	<±0.3
3~10	<±0.5
10~25	<±0.7
25~30	<±1
30~80	<±1.5
>80	<±2

① 原文误为 5。——译注

d. 钎焊 钎焊强度：抗剪强度是 10~15kgf/mm²。热膨胀系数：银焊时 6×10⁻⁶/°C；铜焊时 12×10⁻⁶/°C。钎焊温度：银焊时 700°C；铂钎焊时 1000°C。在钎焊面积大时焊缝间垫以铜板，以消除由于钎焊引起的变形。

2.3.9 压力机用冲裁模的级别表

压力机用冲裁模的级别见表 2.12。

表2.12 压力机用冲裁模的级别表

级 别	级 别	精 密 级	高 级	普 通 级	粗 级	试 制 级
	符 号	AA	A	B	C	D
使用对象 (规格)	精度	公差在普通公差的 50% 以内	普通公差以内	普通公差	尺寸公差大或尺寸在某一容许范围以内	不重要的尺寸在某一容许范围内
	冲裁个数	1000个/月以上	100~1000个/月	100~3000个/月	每月 100个以下 或 200~1000	200个以下
	形状	复杂	复杂, 一般	一般	比较简单	简单
	板厚	小于 0.1mm	大于 0.1mm	大于 0.25mm	大于 0.5mm	软料和硬质材料小于 1mm
	毛刺高度	小于 0.03mm	小于 0.05mm	0.05~0.1mm	不指定	不指定

(续)

级 别	级 别	精 密 级	高 级	普 通 级	粗 级	试 制 级
	符 号	AA	A	B	C	D
模 具 结 构	模具形式	多工位模、连续模	连续模	落料模、连续模	连续模、落料模	连续模、落料模
	标准模架	特殊浮动模架C、D、E	C、D、E四导柱	参照ABC	A、E或参照A、B	不按标准
	凹模结构	组合凹模	多数作成组合模	整体	整体	整体
	送料挡块	第1、第2挡块自动挡块	第1、第2挡块	固定挡块	无	无
模 具 零 部 件 及 其 加 工 方 法	凹模厚度	标准	标准	标准	标准或减薄5mm	比标准薄5~8mm
	凹模刃口长度	标准	标准	标准	比标准短2mm	比标准短2~5mm
	凹模精加工	G级精度孔GJ(锥度)	G或F	F	F	F
	凹模后角	15'	15'~30'	30'	1°30'	取大值(钻头的切削角)
	凸模高度	标准	标准	标准	比标准低5mm	比标准低10mm
	凸模头部精加工	G级精度	G或F	F	F	F
	凸模材料 凹模材料	CRD 或 SKS-2	SKS-2	SKS-2	SKS-2	特殊材料(锌合金) SKS、SK(生)
	凸模柄	有	有	有	无	无
	凹模座	有	有	有	无	无
	顶出器(凹模)	孔GJ, G级精度, 锥形或直孔	G加工锥形或直孔	粗加工直孔H级那样的	粗直孔有的无	无
	卸料板	有, 卸料板导向	有	有	有的不装	无
	导料板	精确	精确	普通	普通	无
	抬起装置	有, 配合	有	有	无	无
凹模垫板	有	有的装	无	无	无	

2.3.10 模具零件的材质和淬火硬度

表 2.13 所示为模具零件的材质和淬火硬度的标准。

表2.13 模具材质和淬火硬度

模具种类						零件名称	分 类	材 质	硬度HRC 公差±2°
连续模	落料模	冲孔模	弯曲模	波形弯曲模	拉延模				
○	○	○				凸模	一般	SBD	56
							加工不锈钢、钛合金	CRD	60
○	○					凸模	一般	SBD或SKS-2	58
							加工不锈钢、钛合金	CRD	60
○	○	○				凸模端部	≥φ6	SKS-2磨	58
							<φ6	SKS-2磨	56
			○	○	○	凹模 凸模	一般	SBD	58
							加工不锈钢、钛合金	CRD	60
							特易粘模的材料	SBD, CRD	56
	○			○		侧板	以凸模导向时 表面淬火	SK-4磨	45
							一般	SPM或SPC	不淬火
○	○	○	○	○	○	导板	—	SKS-2磨	45
○	○	○	○	○	○	导销,挡料销, 沉头销	—	SKS-2磨	40
○	○	○	○	○	○	导料板	一般	SS34FD或 SPM	不淬火
							既导向又压料 考虑磨损时	SK-4磨	40
○	○	○		○	○	垫板		SK-4磨	45
	○			○	○	弹性压料板 (下模卸料或压料用) 压料板 (上模卸料压料用)	酚醛树脂层压 板落料凹形形状 时	SK	40
							其他落料	SS34P	不淬火
							拉延	SKS	45

(续)

模具种类						零件名称	分类	材 质	硬度HRC 公差±2°
连续模	落料模	冲孔模	弯曲模	波形弯曲模	拉伸模				
	○			○	○	顶出器(下模中)推出器(装于上模)	起凹凸模作用时	SKS-2, SBD	56
							其他	SK, SKS-2	50
							单为顶料	SS34P	不淬火
			○	○		合模角部	—	SK-2	50
○	○	○		○	○	导柱	—	SKS-2	58
○	○	○		○	○	导向套	—	SKS-2	58
○	○	○	○	○	○	顶销	—	SKS-2	58
○	○	○	○	○	○	锥形顶销	—	SKS-2	58
	○	○		○	○	卷簧	—		不定(外购)
	○	○		○	○	盘形弹簧	—	SK	45

2.3.11 凸模导向板

采用凸模导向板是提高模具寿命的一种方法，特别是用在大量生产零件和冲裁小于板厚的狭槽和小孔时。表 2.14 a)、b) 规定了凸模导向板式模具的标准结构和标准尺寸。

表 2.14a)

方式	模 具 结 构	适 用 范 围
A(上模式)		<p>导柱安装在上部的结构，便于制件放入和取出，从操作的安全来看，适合于2个工序以下的加工</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 冲孔模 2. 修边模 3. 切口模 4. 带暗榫的模具 5. 上模式落料模 6. 各种硬质合金模

(续)

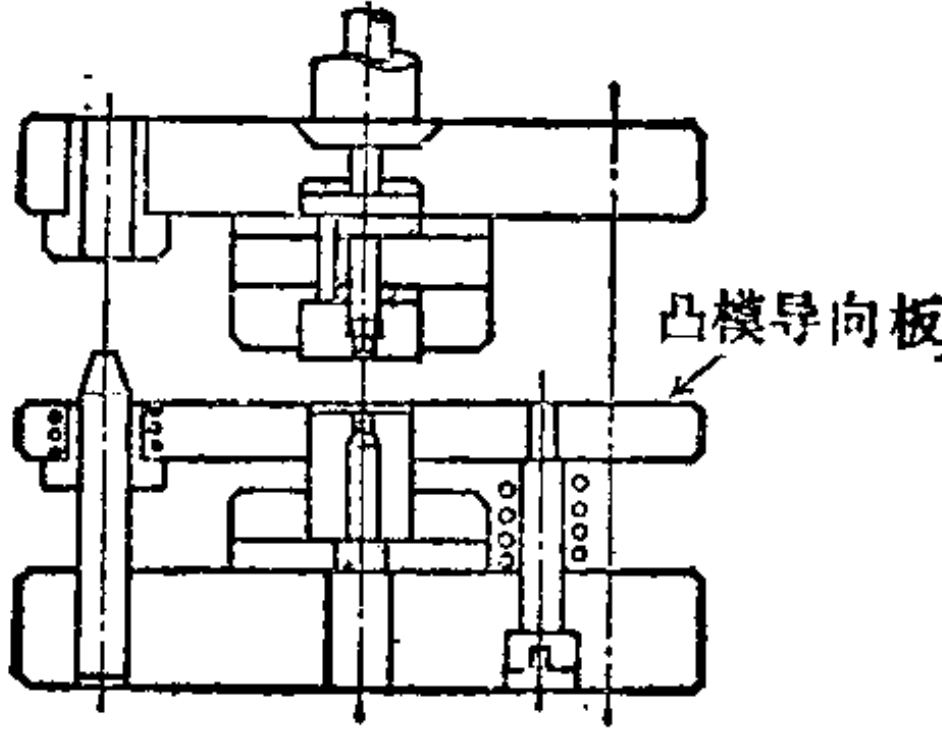
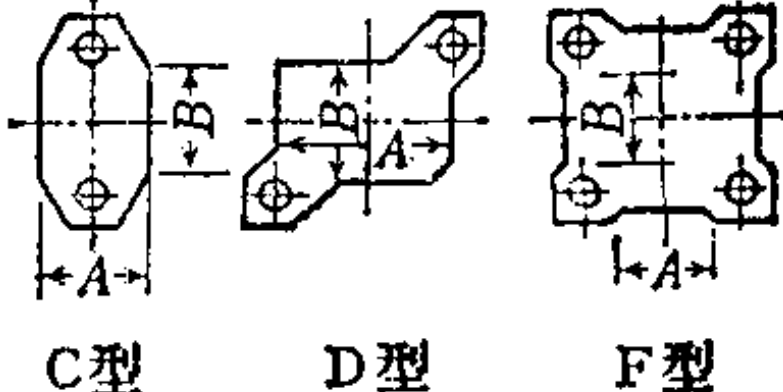
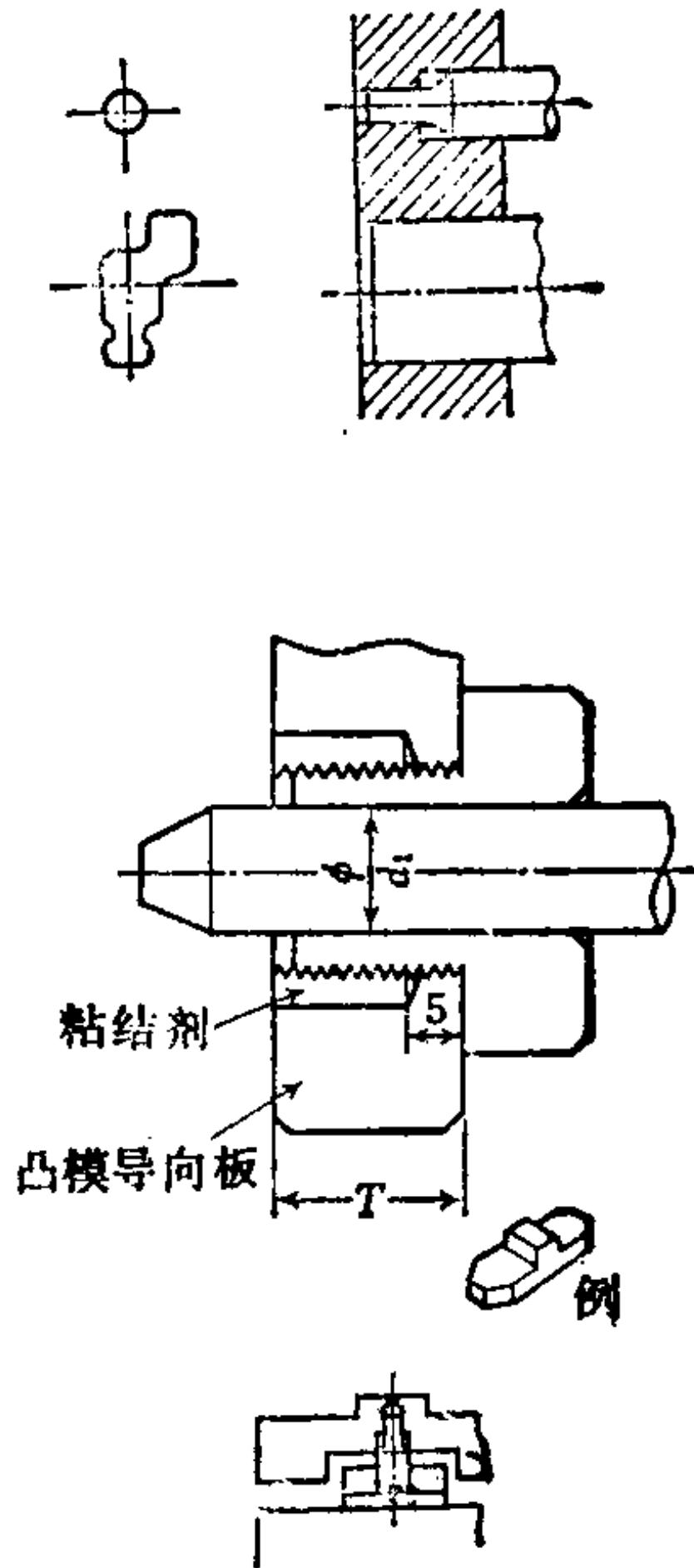
方式	模具结构	适用范围
B(下模式)		导柱装在下模的结构 1. 一次落料模 2. 弯曲模 3. 各种硬质合金模

表 2.14b)

序号	项目	内 容	图 示																																								
1	凸模导向板	1) 凸模导向板的配合 <table border="1"> <tr> <td>导向部分</td> <td>圆和椭圆, GJ加工</td> <td>0.01</td> </tr> <tr> <td>的形状</td> <td>圆以外Se和F</td> <td>0.01</td> </tr> </table> 2) 表面处理 <table border="1"> <thead> <tr> <th>处 理</th> <th>硬度HRC</th> <th>材 质</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 淬 火</td> <td>50</td> <td>SKS-2</td> </tr> <tr> <td>2 渗硫处理</td> <td>在图上标明</td> <td>SKS-2</td> </tr> <tr> <td>3 退 火</td> <td>—</td> <td>SKS-2</td> </tr> </tbody> </table> 3) 尺寸和形状  <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>尺寸A × B</th> <th>d₁</th> <th>T</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">C</td> <td>100 × 150 以下</td> <td>25</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>100 × 150 以上</td> <td>30</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">D</td> <td>150 × 125 以下</td> <td>25</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>150 × 125 以上 200 × 200 以下</td> <td>30</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>200 × 200 以上</td> <td>30</td> <td>25</td> </tr> </tbody> </table>	导向部分	圆和椭圆, GJ加工	0.01	的形状	圆以外Se和F	0.01	处 理	硬度HRC	材 质	1 淬 火	50	SKS-2	2 渗硫处理	在图上标明	SKS-2	3 退 火	—	SKS-2		尺寸A × B	d ₁	T	C	100 × 150 以下	25	20	100 × 150 以上	30	25	D	150 × 125 以下	25	20	150 × 125 以上 200 × 200 以下	30	25	F	200 × 200 以上	30	25	 <p>注: 1. 原则上是整体的 2. 凸模和冲头尽可能短些</p>
导向部分	圆和椭圆, GJ加工	0.01																																									
的形状	圆以外Se和F	0.01																																									
处 理	硬度HRC	材 质																																									
1 淬 火	50	SKS-2																																									
2 渗硫处理	在图上标明	SKS-2																																									
3 退 火	—	SKS-2																																									
	尺寸A × B	d ₁	T																																								
C	100 × 150 以下	25	20																																								
	100 × 150 以上	30	25																																								
D	150 × 125 以下	25	20																																								
	150 × 125 以上 200 × 200 以下	30	25																																								
F	200 × 200 以上	30	25																																								

(续)

序号	项目	内 容	图 示												
2	导套和导柱	<p>1) 加工顺序 件1→件2→件3 2) 导套的固定法 件3用粘结剂(デプコン①)固定, 大型模具时件1也可用粘结剂(デプコン)固定 3) 间隙 件1和件2 $0.1 = 0.008 \sim 0.03$ 件1 注: 1. C = 落料间隙 2. C大不满足件1时, 可取在 $0.008 \sim 0.03$ 范围之内 3. 冲薄板时可用人力拔出插入 4) 尺寸(其他尺寸, 参照03—02—10, 25—03—02—10, 29)</p> <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th></th> <th>d_1</th> <th>A_1</th> <th>B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>25</td> <td>25</td> <td>19</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>24</td> </tr> </tbody> </table>		d_1	A_1	B	1	25	25	19	2	30	30	24	<p>注: 在上模式中①的A考虑刃口重磨面不高出刃口</p>
	d_1	A_1	B												
1	25	25	19												
2	30	30	24												
3	凸模导向板的安装方法	<p>1) 凸模导向板和经淬火的活动销用4个顶丝防松, 适用于图a)~c) 2) 采用强力弹簧时, 用带六角孔的活动销为好 JIS、B-1176 图a)所示为一般用 (1) 可用于小型模具, 模具制造费用便宜 (2) 销孔深度不准时, 安装平行精度难保证 图b)所示为高级用 (1) 模具制造费用较高, 用于大型模具 (2) 套筒安装时应保证平行精度 (3) 刃口磨削时要和套筒一起磨, 使两者能经常保持一定的尺寸关系 图c)所示为高级用 (1) 模具制造费用高, 大型模具用 (2) 螺纹垫圈和套筒安装时要保证平行精度 (3) 刃口磨削时和套筒一起磨, 使两者能保持一定的尺寸关系 (4) 装卸方式亦能用于小型模具</p>	<p>a) 凸模导向板 b) 凸模导向板 c)</p>												

① 表中デプコン为日本生产的一种粘结剂的商品名称——译注。

2.3.12 冲模工作部分的尺寸标注法

a. 尺寸的标注 不论是组合模还是整体模，凸模和凹模都以其某端面为基准面，主要尺寸都由基准面开始标注。对于组合模的主要尺寸是给出冲裁刃口部分和接合面的位置，整体模的主要尺寸是给出表示冲裁模各部分的位置的主轴线位置（参照图 2.85、图 2.86 及图 2.87）。以相对于基准面是倾斜的两条正交直线作为主轴线时，主要尺寸要以交点的位置作为基准来标注，其他尺寸在倾斜的角度方向标注。

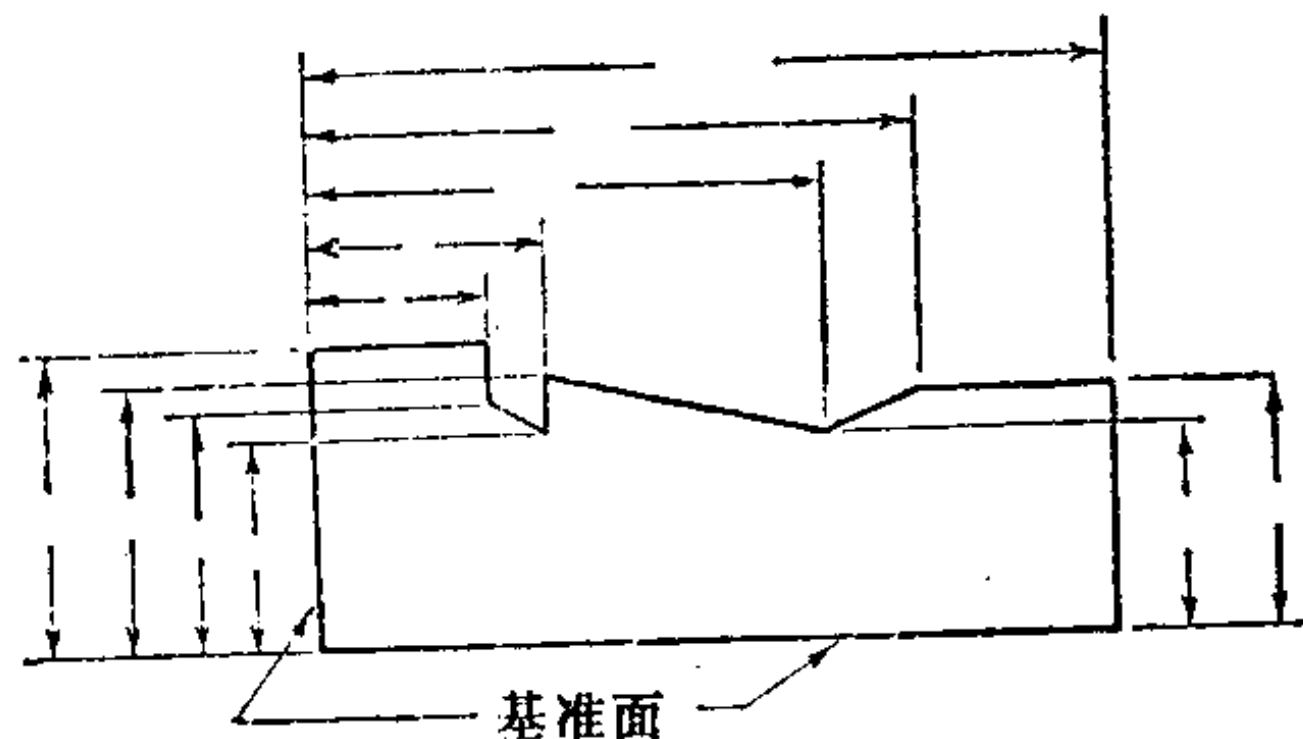


图2.85 组合模的主要尺寸

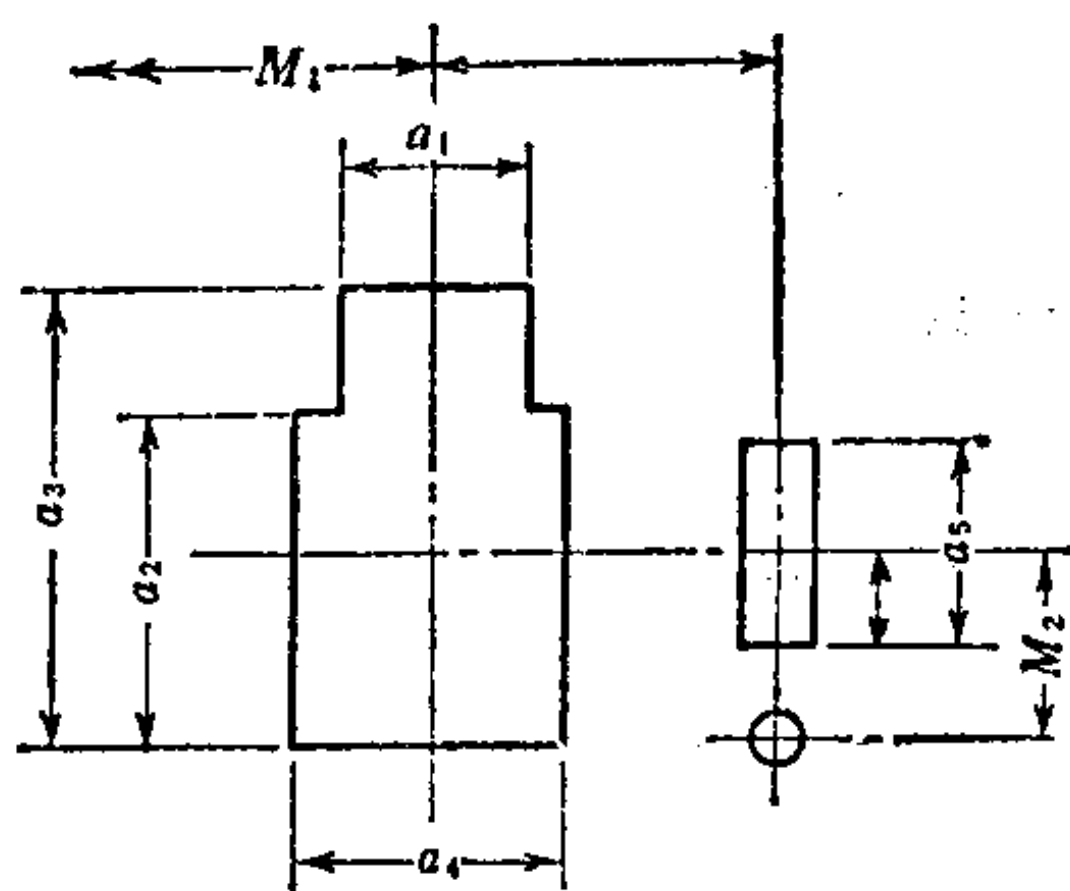


图2.86 整体模的主要尺寸

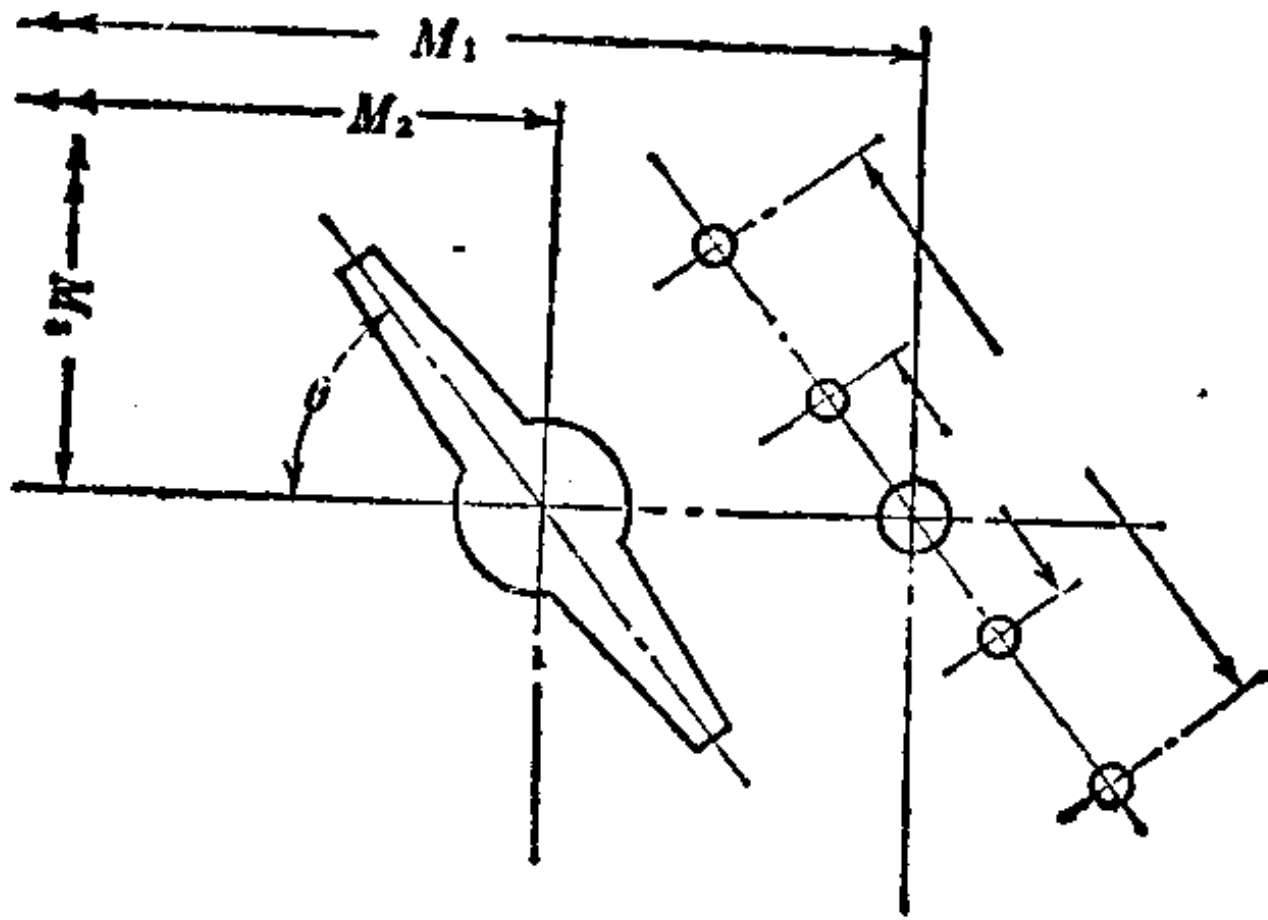
M_1 、 M_2 是主要尺寸， $a_1 a_2 a_3 \dots a_5$
根据模具考虑

b. 冲裁形状的尺寸 无论是内形冲裁、外形冲裁，是采用组合模还是整体模，都以凹模尺寸为基准，在凹模尺寸上注明制造公差。以模具制造上的公称尺寸作为工作的名义尺寸，工作名义尺寸的公差用单件加工公差表示，确定工作名义尺寸时要考虑制件尺寸的伸长量和收缩量以及间隙。

凹模的工作名义尺寸在外形冲裁时应包括间隙值，内形冲裁时不包括间隙值。另外，凹模的工作名义尺寸除间距和需要单独进行磨削加工的部分以外不注公差。凸模 \ominus 的工作名义尺寸在内形冲裁时应包括间隙值，外形冲裁时不包括间隙值。

c. 实例 将板厚为 t 的材料冲裁成如图 2.88 所示的形状

\ominus 原文误为凹模——译注。



M_1, M_2, M_3 是主要尺寸

图2.87 倾斜的情况

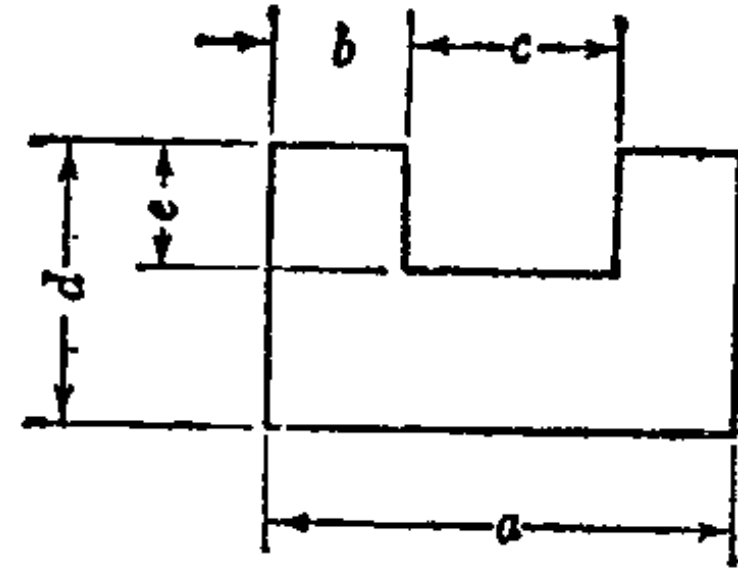


图2.88 制件示例

(i) 在尺寸 a 和 d 处是外形冲裁, c 和 e 是内形冲裁, 根据材质和料厚确定其伸长量 δ_a, δ_d 及收缩量 δ_c, δ_e 和 δ_b 。

(ii) 根据材质和料厚决定冲裁间隙 G 。

(iii) 凹模各部分尺寸计算如下:

$$a: a - \delta_a; \quad c: c + \delta_c; \quad b: b - \delta_b - G;$$

$$d: d - \delta_d; \quad e: e + \delta_e$$

(iv) 凸模各部分尺寸计算如下:

$$a: a - \delta_a - G; \quad c: c + \delta_c + G; \quad b: b - \delta_b;$$

$$d: d - \delta_d - G; \quad e: e + \delta_e$$

(v) 凹模尺寸计算值应考虑加上 G 的相应公差 $\pm \frac{G}{2}$, 即

$$a: a - \delta_a - G \pm \frac{G}{2} \text{ 等}$$

(vi) 这些尺寸按以下方式转换为凸模的工作名义尺寸标于图纸上:

$$a: A \pm \delta_A \text{ 等。}$$

(vii) 凹模的工作名义尺寸由 (iii) 的计算结果决定。

2.3.13 冲模图校核基准

在制造冲模时必须作如下的校核:

a. 总校核

(i) 一般校核

(1) 规格 (技术要求) 和用途的必要条件是否充分。

(2) 设计是否经济, 是否现实。

(3) 是否能用标准件或已设计的零件代用, 备品零件的必要性。

(4) 装配的难易程度如何。

(5) 有无涉及其他公司的专利, 是否有必要申请专利。

(6) 能否更小些, 安全性如何。

(7) 同使用的设备的规格(技术参数)是否适合(闭合高度、落料孔、力能参数、精度)。

(ii) 加工方法

(1) 是否有更便宜的合适的加工方法。

(2) 设备的加工能力、加工方法的分析, 能否使用标准工具。

(3) 组合模的形式及固定方法是否合适。

(4) 采用电加工方法需要多长的电极。

(5) 模架的选择当否。

(iii) 尺寸

(1) 基准面、基准线、基准孔在何处, 是否因有假想的中心线而不能测量的地方, 是否适于实际作业和检查。

(2) 再次检查图纸上是否有差错。

(3) 校核相关零件的相关尺寸。

(4) 相关的复杂零件是否绘制了部分装配图和放大图。

(5) 螺栓的有效长度是否合适, 有无漏标。

(6) 校核导柱长度、模具高度。

(7) 有无遗漏尺寸。

(8) 是否标注了外轮廓尺寸。

(iv) 公差

(1) 无公差部分用普通公差, 但用普通公差有无不满足需要的地方。有无比普通公差要求更高的地方。

(2) 标注的公差是否过严。

(3) 局部公差和累积公差间是否有矛盾。

- (4) 是否校核了配合部分的相关部分的公差。
- (5) 配合是否适当。
- (6) 配合是否用了基轴制。
- (7) 角度公差是否适当, 平行度的标注是否合适。
- (8) 表面光洁度的标注是否适当。

(v) 材料

- (1) 规格和用途的必要条件是否充分。
- (2) 是否脱离现实而要求过高。
- (3) 是否容易得到。
- (4) 是否能充分利用废料。
- (5) 强度、硬度、耐磨性如何。

(vi) 热处理

- (1) 是否注明了必要的热处理, 规定的热处理是否适当(硬度、加工变形)。
- (2) 是否已注明热处理后的加工方法。
- (3) 零件形状是否适于热处理, 是否有厚度不均, 是否有适当的圆角半径 R 。

(vii) 表面处理

是否在使用部位注明了合适的表面处理方式(电镀, 涂覆层)。

(viii) 材料选取

坯料尺寸, 切削余量, 装卡余量, 定位切口量是否合适。废料是否过多, 是否考虑了材料利用率。

b) 冲裁模校核

(i) 核对规格(技术要求)

- (1) 零件图上有无变更。
- (2) 修边余量, 铰孔余量, 其他精加工余量的关系如何, 展开长度如何。

(3) 考虑由前后工序引起尺寸变化的必要性如何, 镀层、冲小孔、弯曲、矫直等引起的伸长量和收缩量等。

(4) 检查冲裁面, 平整度, 精加工面, 精度如何。

(5) 能否把制件图改进更便于加工。

(ii) 排样图

(1) 材料利用率是否最高。能否通过改变零件尺寸提高材料的利用率。冲裁进距有无差错 (复杂零件是否作过放大校核)。

(2) 考虑轧制方向是否妥当, 冲裁件数和坯料重量有无错误。

(3) 能否用带料进行自动冲裁。

(4) 决定条料长度时是否考虑了防止冲半个件。

(iii) 模具规格和模具构造

(1) 间隙是否合适, 冲裁所需吨位和卸料力是否进行了计算。

(2) 所选压力机是否合适 (闭合高度, 力能参数, 落料孔, 行程长度)。

(3) 采用滚动导向及浮动式结构是否必要。

(4) 采用凸模导向板的必要性。

(5) 校核模具的强度, 凸模固定法和强度。

(6) 刃口的磨削和模具的维护如何, 模块和凸模的更换是否容易。

(7) 校核导料板的位置、尺寸、形状。

(8) 防止圆形, 方形废料翘起的办法如何, 可否用侧刀防止废料翘起。

(9) 校核冲裁力的均衡性。

(10) 模具的安装方法是否好, 是否和压力机的安装条件相符。

(11) 检查各处的空刀槽是否有, 切屑的清理如何。

(12) 弹性销, 顶出销, 挡料销是否有。

(13) 有无安全罩或保护挡板。

(14) 更换的结构是否好。

(iv) 材料的送进和取出

- (1) 是否有手动限位器和侧刀, 有无冲半料。
- (2) 能否不使用观察孔, 而使用自动定位。
- (3) 送料机构是否平稳。
- (4) 校核“带上式”冲裁的制件取出, 是否有卸料板。反向顶出方式的制件取出和弹簧的强度如何。
- (5) 对冲裁废料和制件未落入落料孔的情况作如何考虑。
- (6) 是否设有贮料器。

2.4 精密冲裁

在通常的冲裁加工中, 因为是在模具刃口处产生裂纹而使剪切分离, 所以制件的剪切断面由塌角、剪切面、剪裂面和毛刺组成。其中, 除特殊情况外, 塌角、剪裂面和毛刺都被视为是制件的缺陷。另外, 冲裁是在多少存在弯曲的状态下进行的, 由于回弹, 剪切断面和板面不垂直, 这也是制件尺寸和模具尺寸不一致的原因。同时由于有残余弯曲, 使制件的平整度不佳。为消除上述冲裁件的缺陷, 以得到高精度的制件为目的, 对常用的冲裁加工加以改善的加工方法, 称为精密冲裁。下面的各节中主要以广泛应用的修整法、光洁冲裁法、精密冲裁法等加工方法为中心加以记述。

2.4.1 修整法(修边法)

a. 修整法〔39~42〕 修整法如图2.89所示, 是对冲裁件的剪切断面用同样的冲裁模再一次进行切削, 以得到平滑而且精度高的方法。因此, 包括最初的冲裁工序在内至少需要两道工序。第二道工序的修整加工需要沿加工轮廓有一定的加工余量 δ , 所以在模具上要设有坯料定位用的导向板, 为了便于排屑和装入坯料, 常采用图2.90所示的回转导向板。

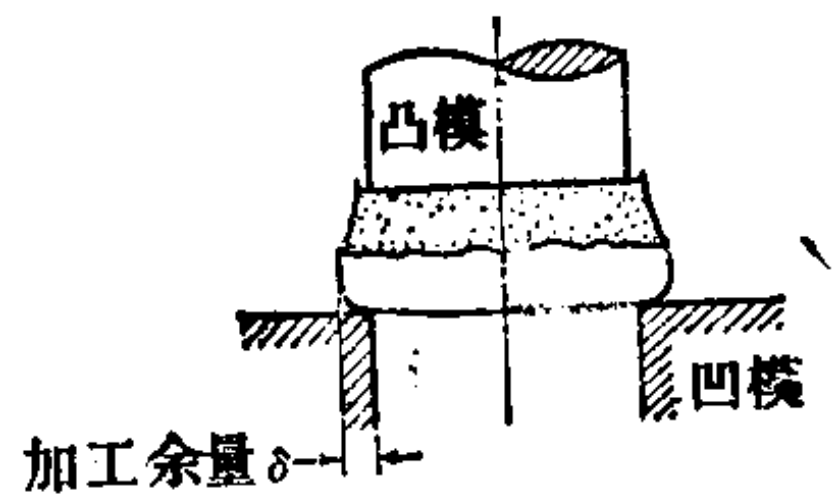


图2.89 修整法

对于修整加工的制件不仅要求剪切断面具有一定的精度, 而往往要求整个制件具有较高的尺寸精度。另外, 在修整时的间隙非常

小，一般为0.02mm左右，所以对模具的精度要求也很高。

(1) 修整工序 从加工机理方面来看，修整法与其说是冲裁加工倒不如说是使用压力机的切削加工，从某种意义上来说是利用拉刀的一个或两个切削刃进行的拉削加工。修整的加工过程如图2.91所示。在加工初期，与利用不带前角的切削工具进行切削的加工机理相同，剪切变形面产生于切削一侧，母材的金属纤维被切断。切削过程继续进行，则切削逐渐增大，剪切变形面接近于连接工具切削刃的连线。凸模继续前进，大约在切入板厚的2/3以后，由于切屑增大，使剩下板厚的加工余量增加，剪切变形面大体与凸模和凹模的连线一致。从此以后，切屑的成长减弱，其加工机理即与通常的冲裁一样形成伴有塑性流动的剪切面，最后从凹模切削刃的端部发生裂纹，并且向凸模切削刃发展以至分离。在这最终行程产生的裂纹，与通常的冲裁加工产生的裂纹相似，但是剪切变形面一般不进入制件一侧，而且也不受切屑的约束，所以由凹模切削刃造成的裂纹不会深入制件内部。因而被修整的剪切断面在其毛刺一侧往往有少许剪裂面，而这种剪裂面为较浅的粗糙面。根据这种加工机理，在凹模刃口上制成前角是为了提高修整时的切削性

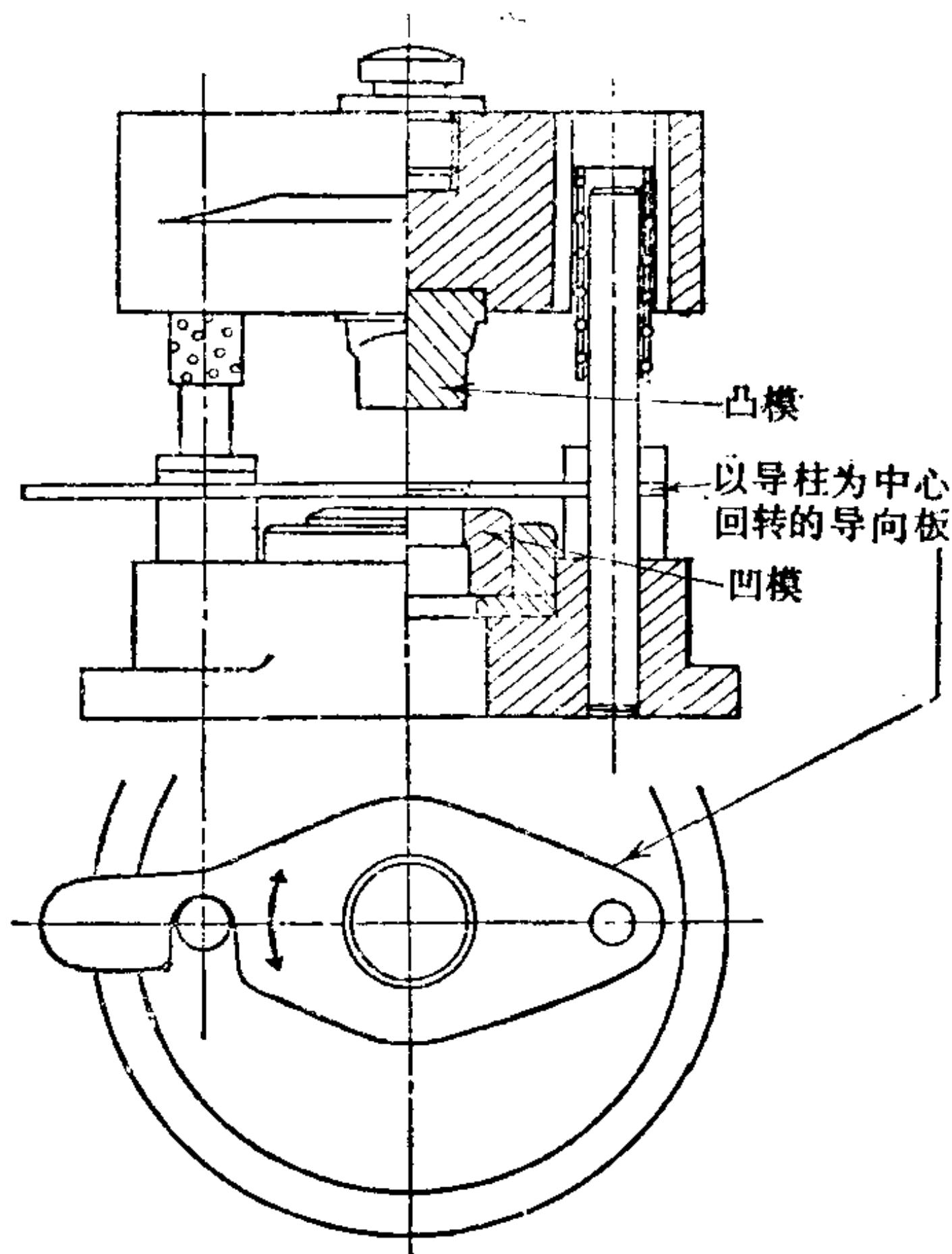


图2.90 修整模

凸模继续前进，大约在切入板厚的2/3以后，由于切屑增大，使剩下板厚的加工余量增加，剪切变形面大体与凸模和凹模的连线一致。从此以后，切屑的成长减弱，其加工机理即与通常的冲裁一样形成伴有塑性流动的剪切面，最后从凹模切削刃的端部发生裂纹，并且向凸模切削刃发展以至分离。在这最终行程产生的裂纹，与通常的冲裁加工产生的裂纹相似，但是剪切变形面一般不进入制件一侧，而且也不受切屑的约束，所以由凹模切削刃造成的裂纹不会深入制件内部。因而被修整的剪切断面在其毛刺一

侧往往有少许剪裂面，而这种剪裂面为较浅的粗糙面。根据这种加工机理，在凹模刃口上制成前角是为了提高修整时的切削性

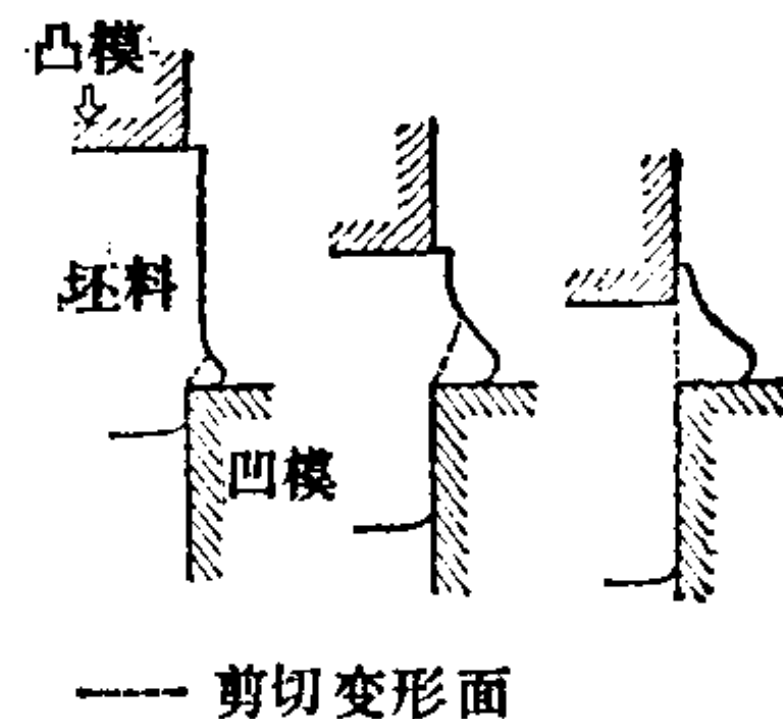


图2.91 修整过程

侧往往有少许剪裂面，而这种剪裂面为较浅的粗糙面。根据这种加工机理，在凹模刃口上制成前角是为了提高修整时的切削性

能，如图2.92所示制成前角是有效的，但是模具制造和重磨相当困难。

(ii) 修整加工余量

在修整加工时对切削工序影响最大的是加工余量。加工余量的最佳值因加工材质不同而异，但可按表2.15所示，推荐取板厚4~7%的数值作为标准值。切削性能越好的材料越可取较大的加工余量。

另外，板的厚度越薄，加

工余量对板厚的比例也可取大些。从修整时的切削现象来看，如图2.92所示，加工余量小的较好，但是这些数值还取决于坯件的定位精度和坯件的剪切断面形状。也就是说，假如修整加工余量不大于制造坯件的前工序的间隙，就不可能完全消除剪裂面。另外，如果为此把加工余量取得过大，裂纹就要深入制件内部。因此，在前工序所采用的间隙，最好小于通常的修整加工余量。

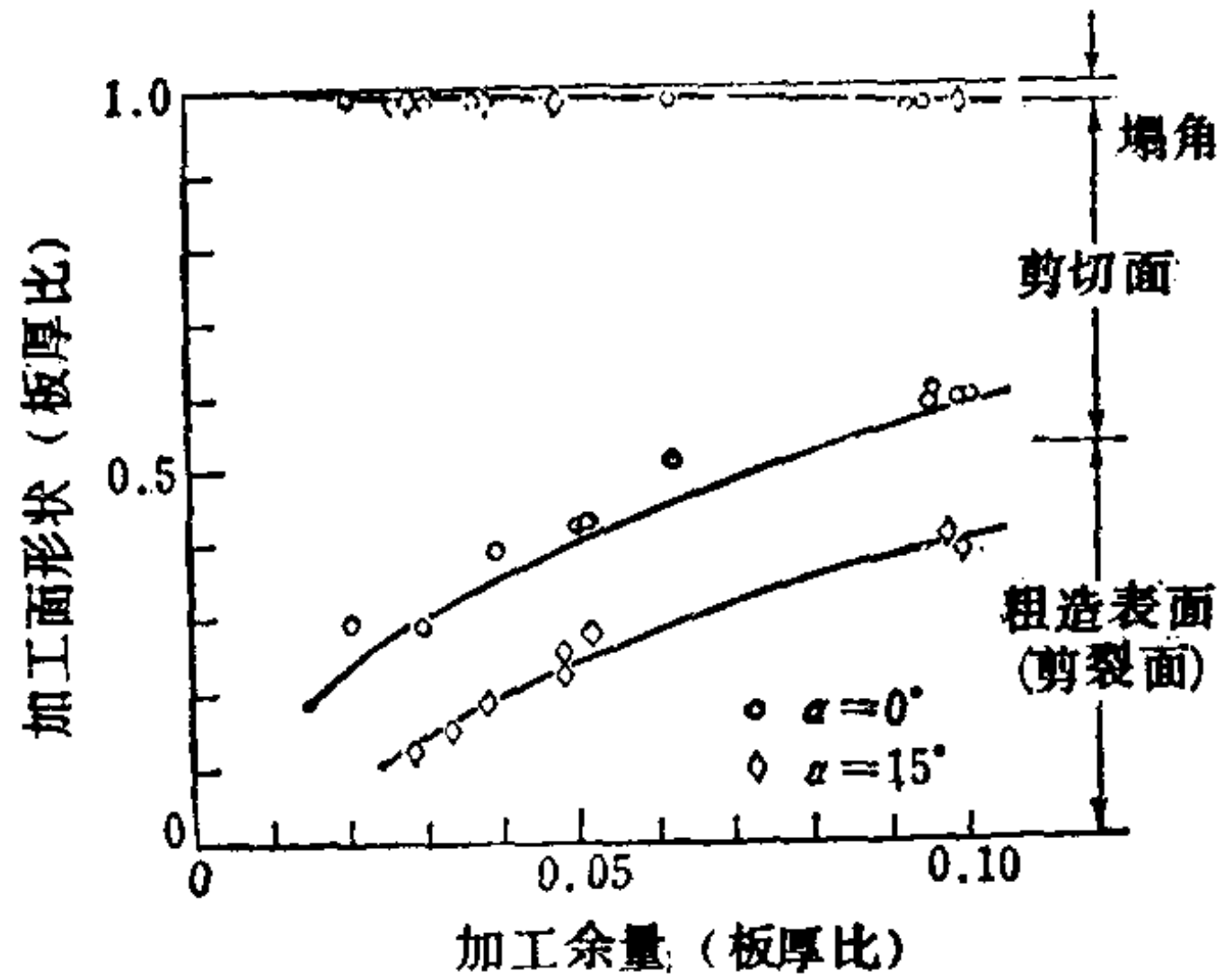


图2.92 修整加工余量和前角 α 的影响 (铝棒材) (山内)

表2.15 修整加工余量 (一次加工时) (爱克美模具设计学校资料) [3] (mm)

坯料厚度	低碳钢	中碳钢	高碳钢	锌白铜	黄铜
1.2	0.06	0.08	0.10	0.13	0.13
1.6	0.08	0.10	0.13	0.15	0.15
2.0	0.09	0.13	0.15~0.18	0.18	0.18
2.4	0.10	0.15	0.18~0.20	0.20	0.20
2.8	0.13	0.18	0.23~0.28	0.25	0.25
3.2	0.18	0.23	0.30~0.36	0.36	0.36

(iii) 二次修整 图2.93所示为前工序的间隙和加工余量的关系，对于不易修整的钢等材料或板厚超过一定限度的坯件，用一次修整得不到平滑的剪切断面时，就要进行二次修整。这时因

为第一次修整已经得到相当平滑的剪切断面，所以为了使第二次修整容易进行，加工余量可取表2.15所列数值的一半。

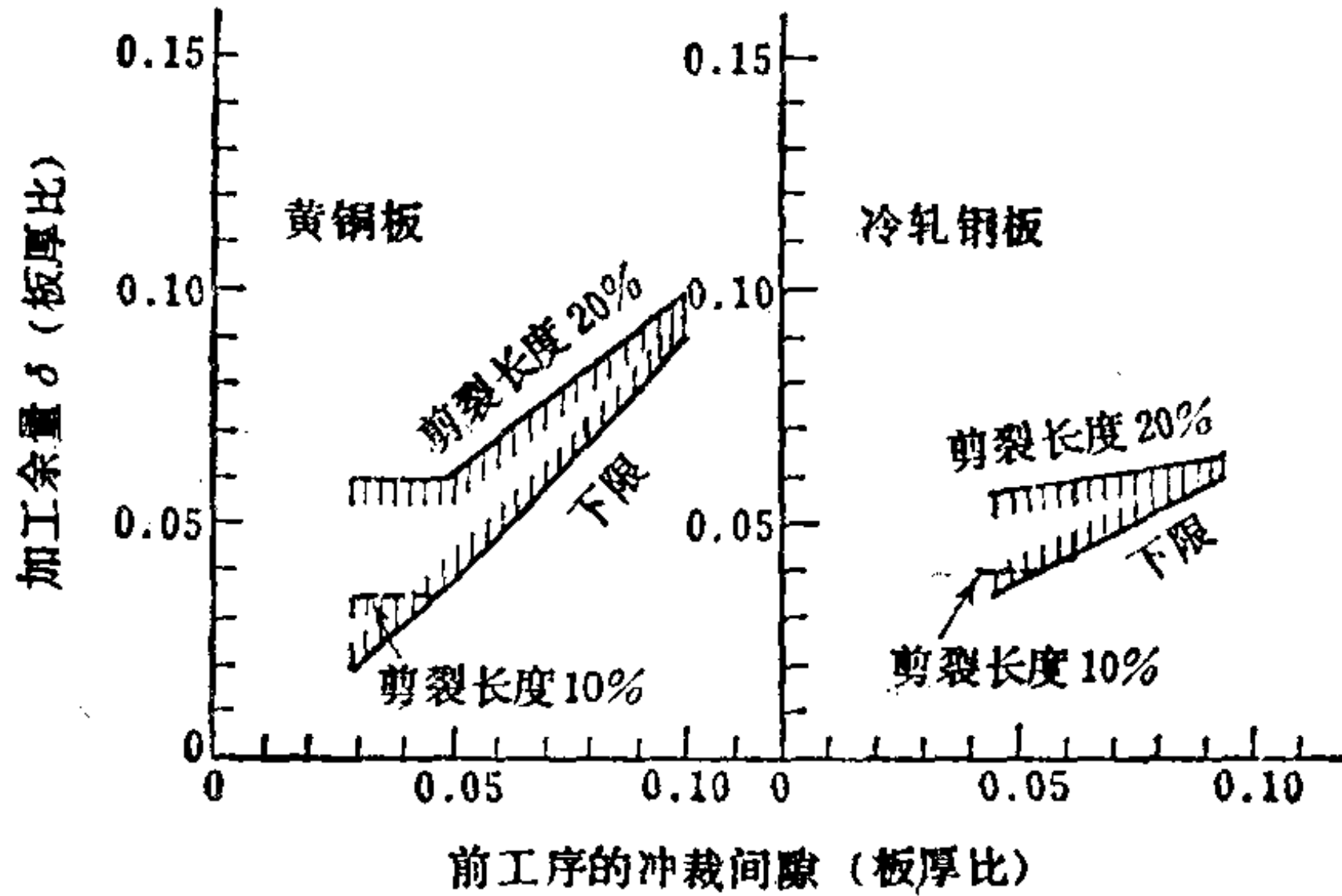


图2.93 前工序的冲裁间隙和修整加工余量的关系 (山内)

(iv) 修整方向 修整方向如图2.94所示可考虑两个方案，但一般都采用图 a) 的方案，由于修整的方向与冲裁的方向相同，是从塌角一侧进行的切削，可以得到较好的剪切断面。即由于切屑的产生虽使加工余量增大，但在容易发生裂纹的后半过程，加工余量实质上是逐渐减少的。修整

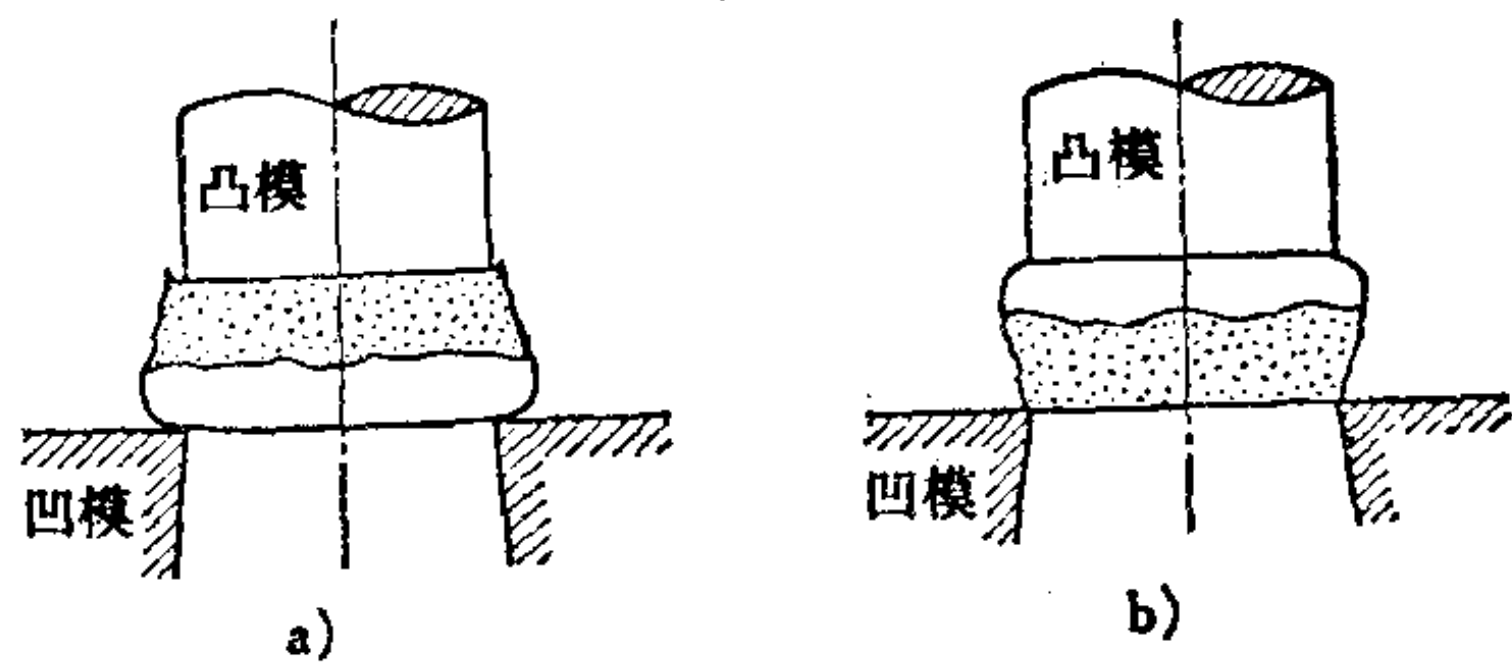


图2.94 修整方向

a) 正 b) 倒

的方向也要根据加工材质的不同来改变，如切削性能较好的黄铜等非铁合金，从减少塌角的观点来看，相反要采用图 b) 的方案。

(v) 加工的材料 修整加工与其他光洁冲裁或精密冲裁不同，其特点是不论被加工的材料有无塑性几乎都能适用。如对加铝的黄铜，铝合金或酚醛树脂层压板等所谓脆性材料，专门采用这种方法进行精密剪切。一般金属材料对于修整加工的适应性，基本上与切削性能相对应，黄铜或铝等非铁金属容易修整，而

钢板或不锈钢板等则较难以修整,并且也加剧了模具刃口的磨损。

(vi) 制件精度 关于经修整的制件精度,如果除去毛刺的问题,在所有各方面都比一般的冲裁法好。在良好的加工条件下,可以得到如图2.95所示的表面光洁度在 10μ 以下的剪切断面。由于修整时的切削阻力远远小于剪切阻力,所以基本上不会产生塌角,只是保留前道工序的塌角。另外,修整时的弯曲小,因而由回弹引起的尺寸变化小,剪切断面的垂直度也好。一般来说,加工余量越大,或者由于磨损等原因引起刃口越钝化,制件精度就越下降。

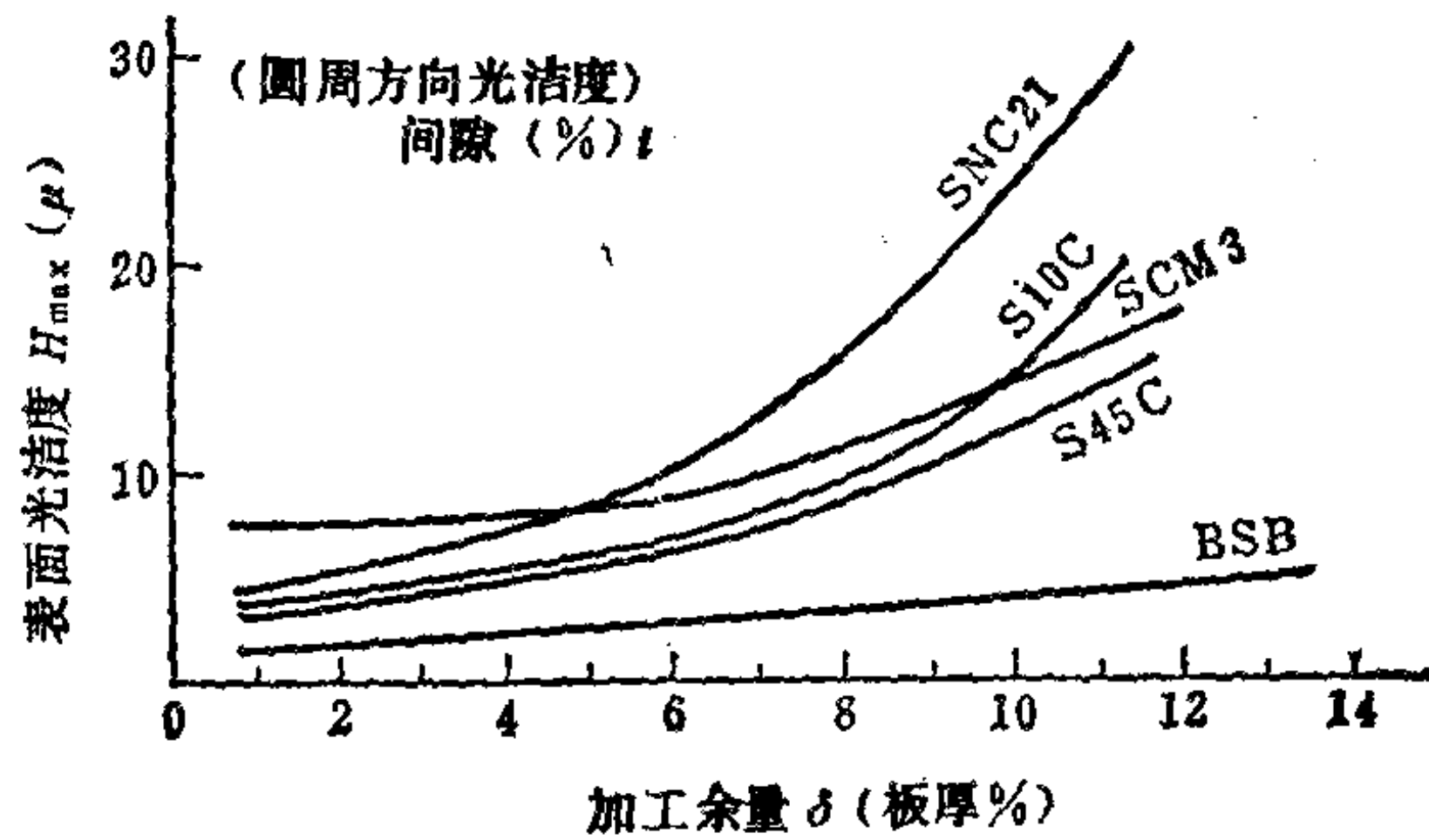


图2.95 加工余量和修整加工面光洁度的关系(親松、萩原)

关于毛刺,因为间隙小在加工初期虽然很少,但是通常由于刃口的磨损较快,使毛刺增大,模具的使用寿命缩短。

b. 振动修整法〔40, 41〕 为了提高修整时的切削性能和获得良好的剪切断面,可将沿工具轴线方向的振动加在凸模上进行断续切削,这种方法称为振动修整法。利用这种方法要使用特殊的专用压力机,振动由机械方式驱动,振幅取 0.4mm ,振动频率为每秒20次左右。振动修整法的主要优点是对于较难修整的材料可以容易地进行修整,并且可以提高剪切断面的光洁度。另外,由于修整时的弯曲小,可提高制件的尺寸精度,由于切削性能提高,加工余量的容许值也可以多少大些。不过要有效地利用这些优点,就必须选择适当的加工条件。由于被加工材料种类的不同,也有时显示不出来与无振动修整的差别。

c. 重叠冲裁修整〔40, 41〕 通常的修整加工,存在着因为间隙小而需要相当高精度的模具,以及选择最合适的加工余量等问

题，未必能够经过一次修整而得到平滑的剪切断面。为了解决这类问题，可采取如图2.96所示的方法，把两块坯件重叠起来，使用大于凹模的凸模进行重叠冲裁修整。也就是隔着一块坯件用凸模加压，即修整到坯件板厚的 $2/3 \sim 3/4$ ，将下一块坯件送入，再利用二次行程进行修整的方法。

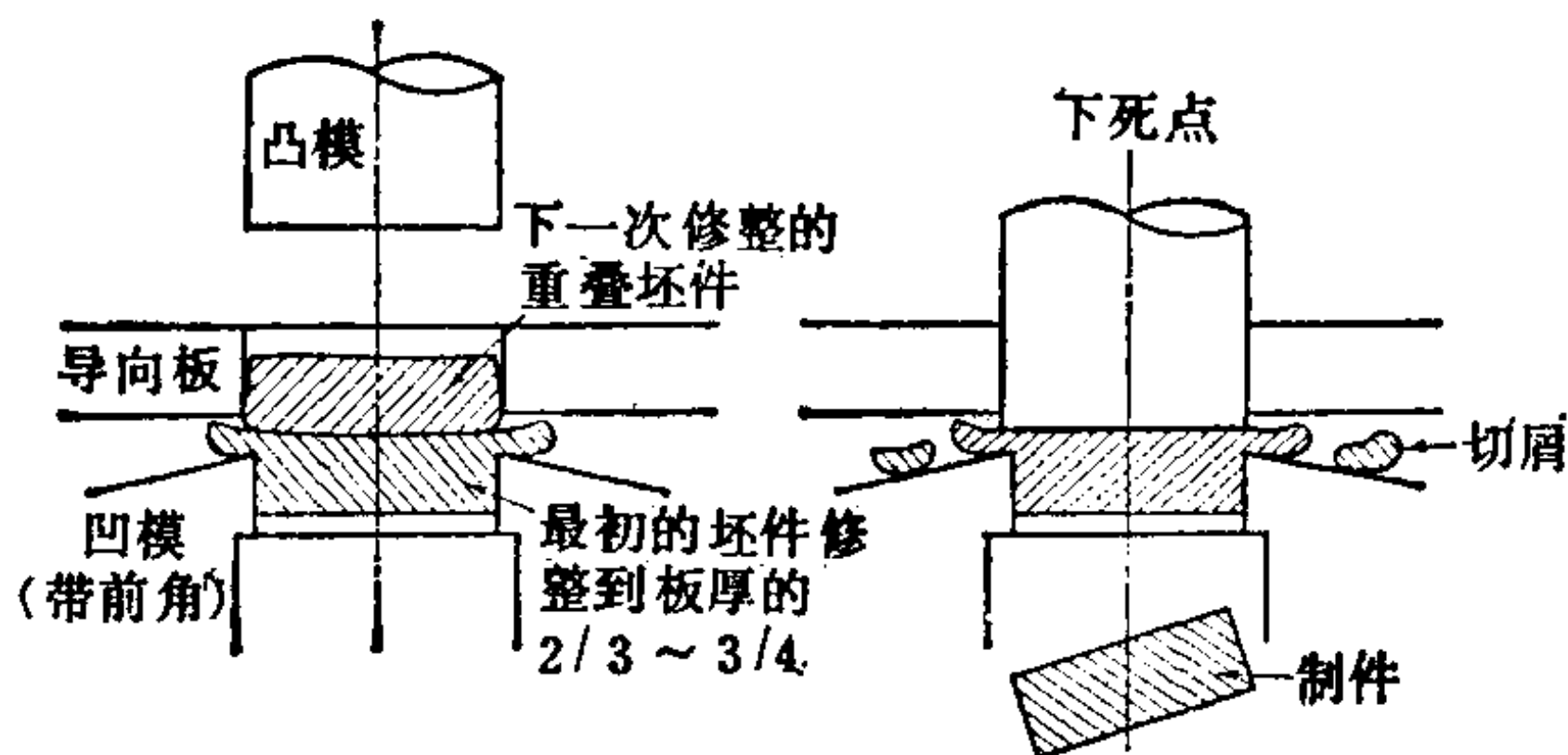


图2.96 重叠冲裁修整

这种方法的优点是凸模不进入凹模内，因而模具制造容易，并且凸模的磨损也不会成为问题。另外，与通常的修整法相比，适用材料的范围较广，容许加工余量的范围较大，可以说是一种简易修整法。但是也有一个缺点即必须在下道工序的坯件装入状态下清除切屑，因而需要考虑排屑的措施。为了提高切削性能和顺利地排除切屑，可采取在凹模面上制成 $10^\circ \sim 15^\circ$ 前角的方法，或者设置断屑槽，或者提高压缩空气的气压将切屑吹出等各种各样的方法。在这种方法中，下道工序用的坯件起凸模的作用，但是这坯件与凸模相比，其材质是相当软的，与凸模切刃口有圆角的状态相同，制件会产生很大的毛刺，这是一个难点。

d. 锻件的修整(精整)

这种方法是应用在负间隙时容易修整这样一个事实，而且为了解决在重叠修整方法中难以排屑的问题所采用的精整法。这种方法主要用于六角螺栓头的侧面等锻件的精修，如图2.97所示，利用负间隙进行修整以后，顶

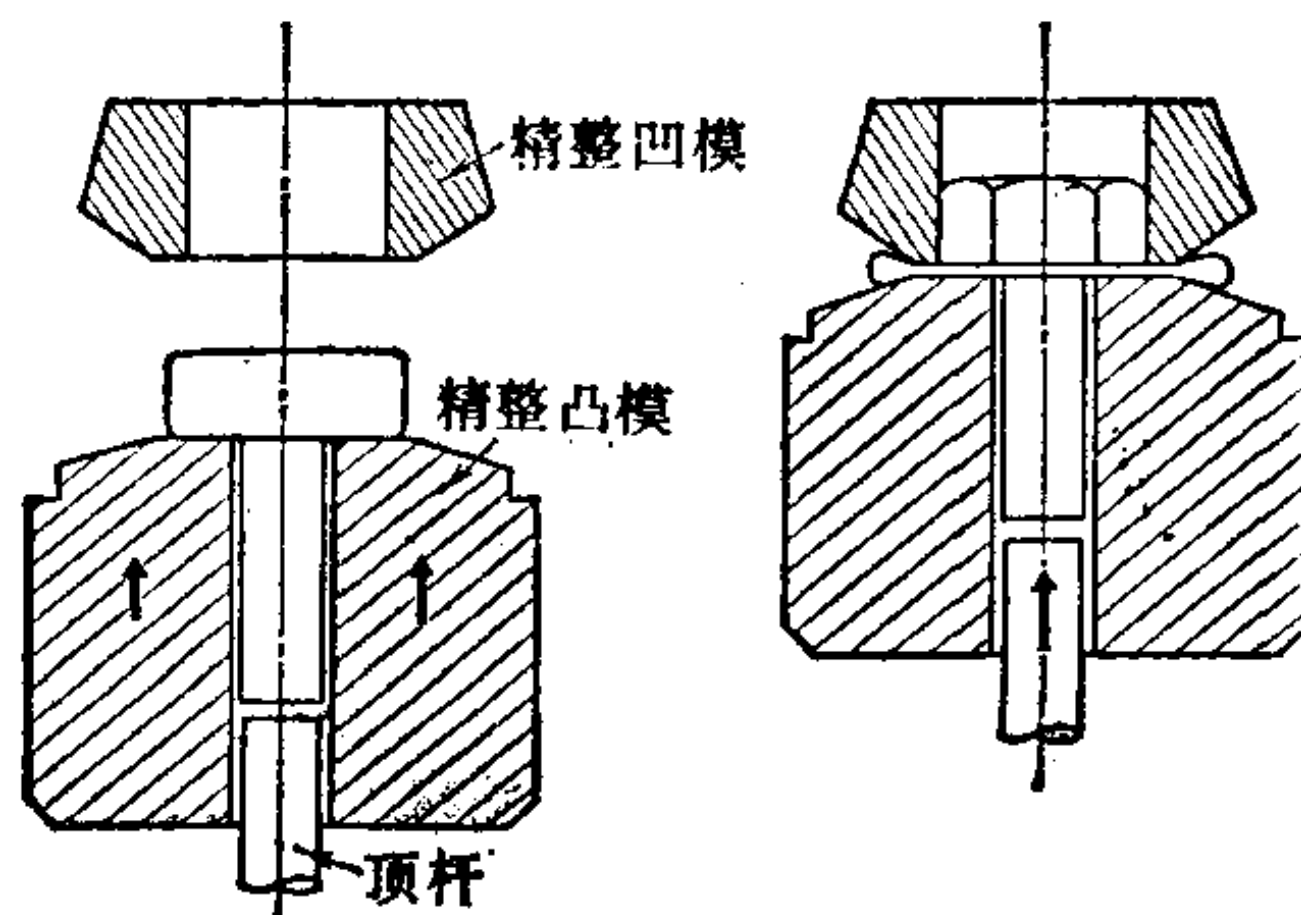


图2.97 锻件精整法

螺栓的下部并压入凹模孔腔，最后分离。为了提高切削性能，可将凸模和凹模双方都制成负前角。这种方法的特点是不需要高精度的模具，就能得到平滑的表面，而且适用材料的范围较广，即使是10mm以上的厚板也能适用。

e. 去毛刺的修整(冲削)^[43] 这种方法是为了通过修整来去除冲裁时产生的加工硬化层，以防止象翻边或弯曲加工那样从剪切边缘发生的断裂所采用的一种修整法。这时，选用模具和加工条件要注意的是减少残余加工硬化层比提高剪切断面的精度更为重要。加工余量约为10%，模具的间隙并不要求那样严格。如果没有必要修整全部轮廓时，可采用台阶切刃。在一次行程中进行修整。利用这种方法可在很大程度上提高断裂极限，如果选择适当的加工条件，同通常的剪切断面相比可获得大约高一倍的延伸变形能。

f. 一次行程修整 修整法的最大缺点是至少需要两道工序，为了消除这个缺点也想了各种办法。

(i) 拉削法 具有封闭曲线轮廓的切屑连在一起时较难处理，但是只修整轮廓的一部分时，如图2.98所示将凸模的切刃分成几个台阶，就能在一次行程中进行修整。此时必须用压缩空气等将切屑吹出。另外，因加工余量被限制在前行程的间隙值以内，所以在某些场合也有可能得到良好的剪切断面。

在冲孔时比较容易排除切屑，并且也容易把切刃制成二个台阶以上。在对具有封闭曲线的轮廓冲孔时，可将模具的切刃制成三个台阶以上，并在切刃上开断屑槽，这样便可在第一个切刃切剩下的部分由第二个切刃进行切削。修整用的切刃越多，每一次的加工余量就越少，被加工的表面质量也就越好。在

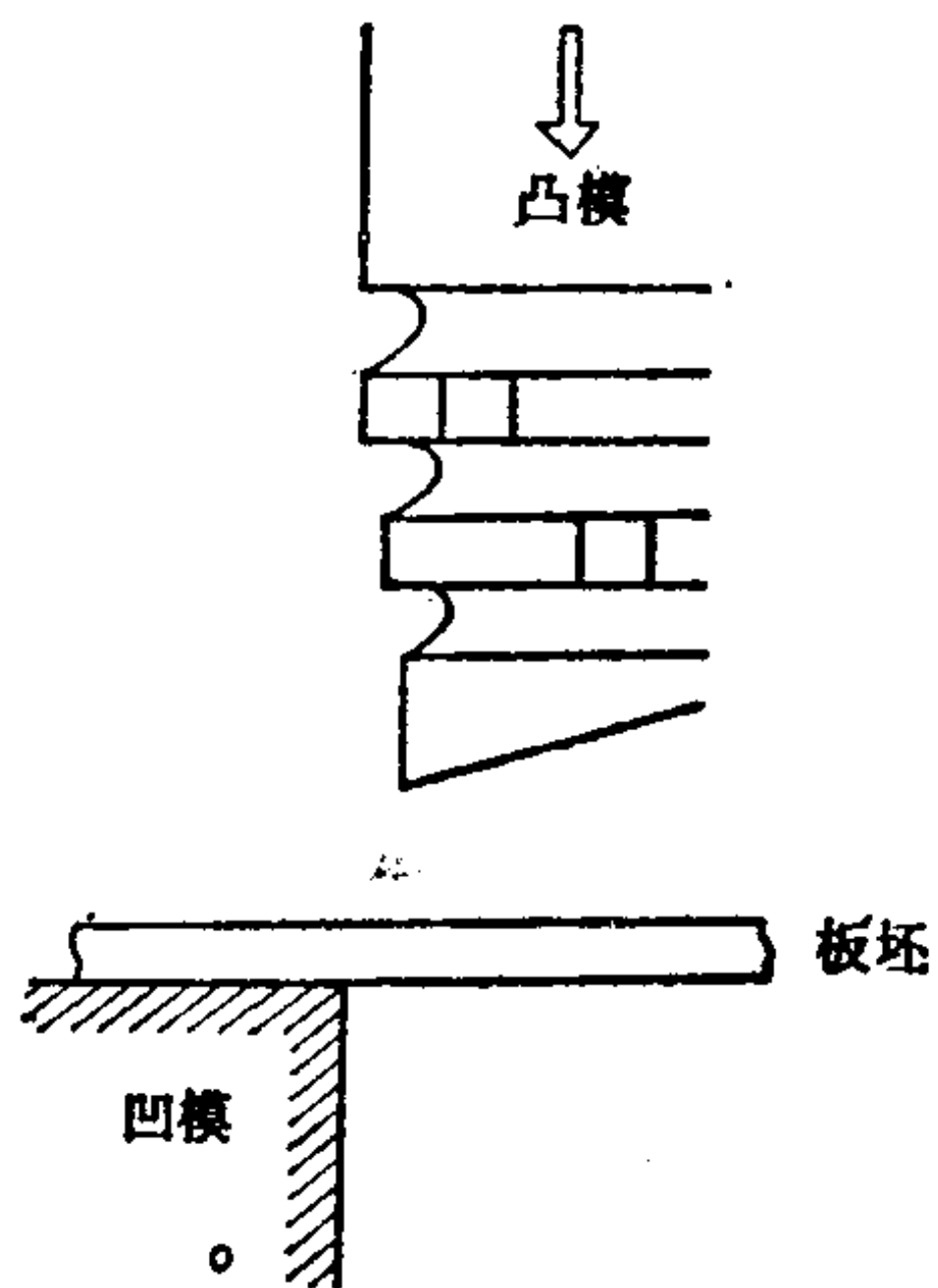


图2.98 拉削法

某些场合也有将切刃制成十个台阶左右的。不过这种方法也有它的缺点，即模具的重磨比较困难。在凹模上制成分台阶的切刃时，可将凹模板制成两块，这种结构便于研磨。

(ii) 台阶修整法（流动冲剪法）〔44〕 这种方法虽然具有和利用台阶切刃的修整法大体相同结构的切刃，但在排屑上有独特之处。如图2.99 a) 所示，在凹模的切刃上带有与(i)相反的锥度，并且使凸模带有很小的后角，将连接成环状的切屑从凹模内腔提起带到凸模侧面，而后压入废料容器内。另外，在修孔时利用如图2.99 b) 所示的工具，便可简单地进行修整。这时，修整的机理与通常的修整不同，切屑的流动受到约束使压应力重叠可得到伴有相当大的塑性流动的剪切断面。尽管模具刃口的磨损似乎很快，但由于磨损使切刃带上圆角，而变成一种挤光加工，如果不考虑毛刺的问题，模具寿命不会那么短。

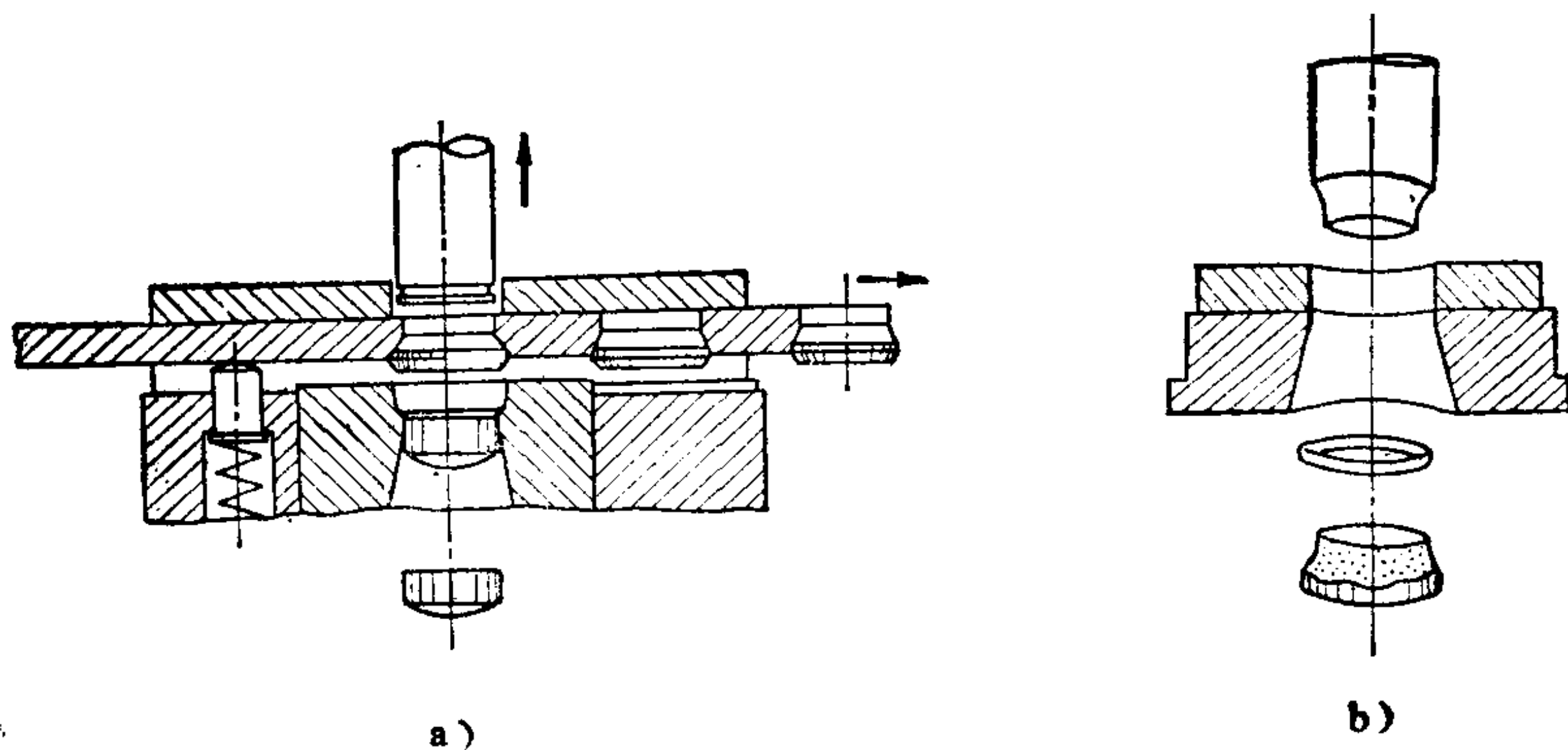


图2.99 台阶修整法（流动冲剪法）(Stomberger)

a) 修外形 b) 修孔

(iii) 上下修整法 (OS) 工艺〔45〕 这是利用间隙不同的上下两个凹模，如图2.100所示的模具进行修整的方法。这种场合也是将切屑送入废料容器内。虽然模具的动作多少复杂一些，但是利用装在模架中的连杆和凸轮可完成各种动作，将模具安装在普通压力机上即可进行修整。

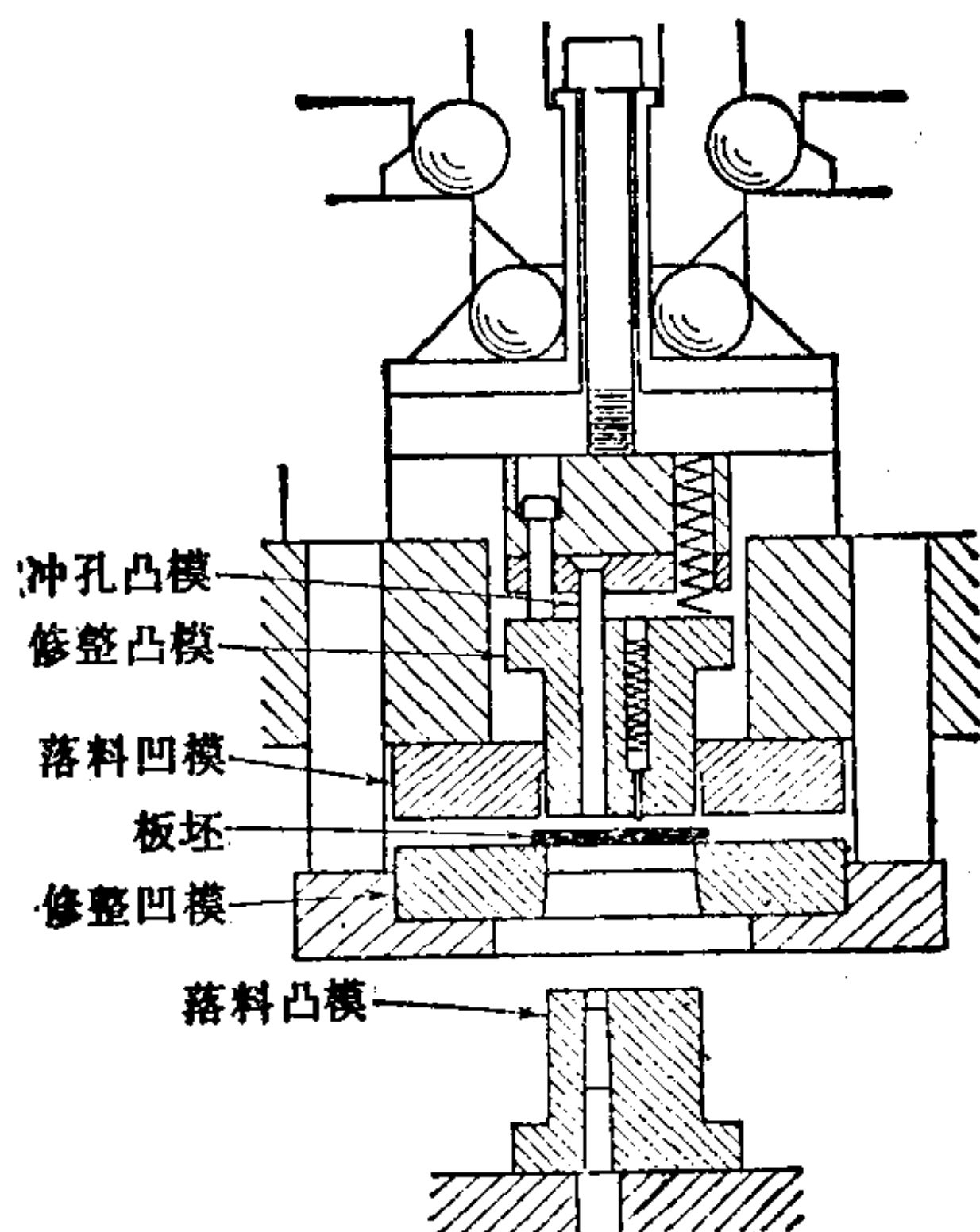


图2.100 上下修整法 (OS) 工艺 (Stoekli, Sharpe)

2.4.2 光洁冲裁法 (finish blanking) [46~50]

这是使用间隙为零或负的模具，并将凹模或凸模的刃口制成如图 2.101 那样的圆角或倒角进行冲裁，以获得具有平滑冲裁断面的冲裁件的一种方法。在冲裁时将凹模的刃口制成圆角，在冲孔时将凸模的刃口制成圆角。这种方法不象修整那样需要两道工序，另外也不象精密冲裁那样需要特殊的压力机，因而可以比较

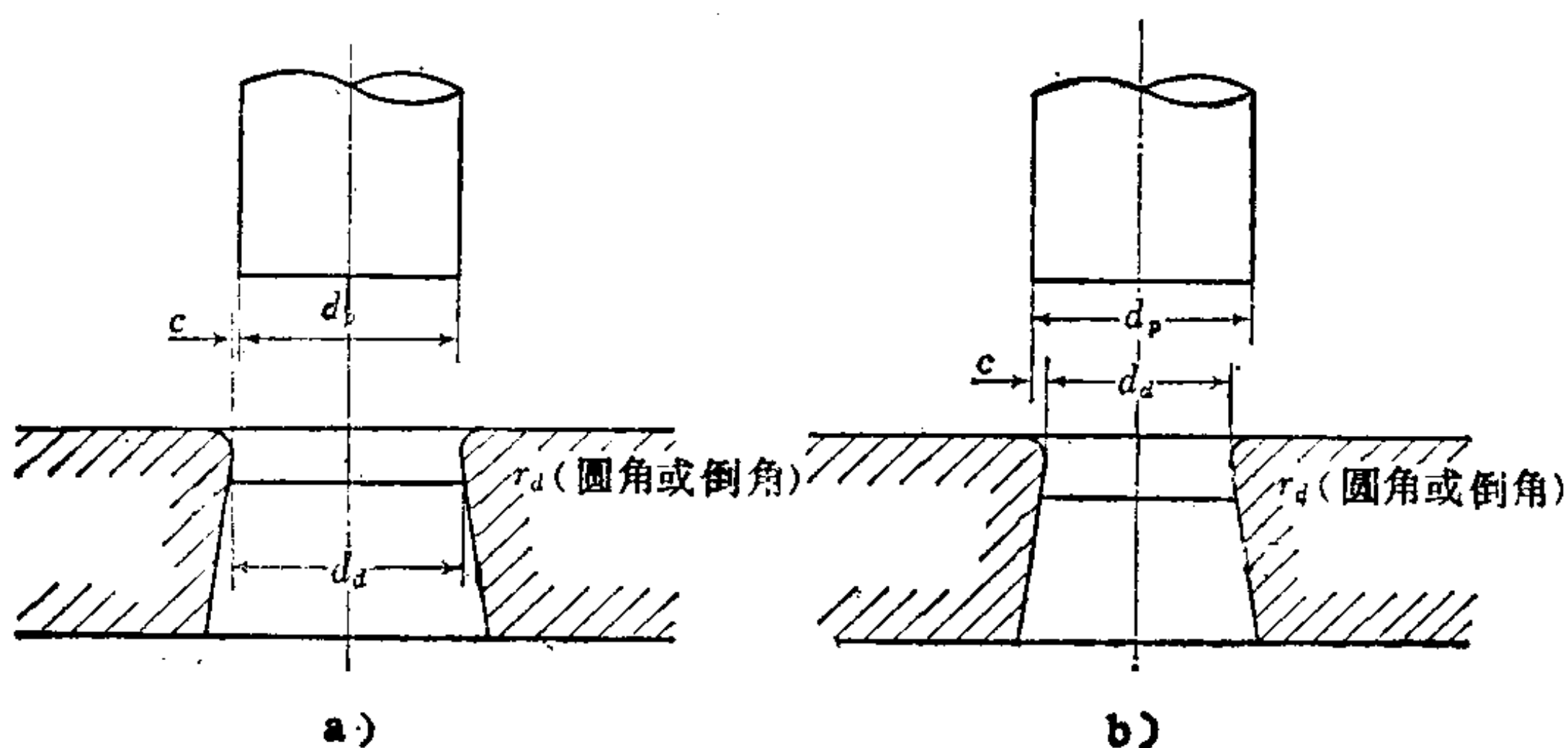


图2.101 光洁冲裁

a) 光洁冲裁 b) 挤压冲裁 (负间隙光洁冲裁)

简便地获得平滑的剪切断面，这是光洁冲裁法的最大特点，它从生产冷锻用坯料开始正在广泛地应用于各种机械零件的制造中。

a. 光洁冲裁工序 在冲裁加工中产生裂纹的部位是从锋利的刃口尖端略偏于侧面的地方。这是由于该处材料所承受的应力处于拉伸状态的缘故。光洁冲裁法是通过将刃口制成圆角以使容易产生裂纹的刃口侧面成为压应力状态，进而使材料从模具平面流入模具侧面，缓和与模具侧面接触的材料拉应力，以防止产生裂纹。

将刃口制成小圆角，能收到很大效果（见图2.102），但是仅采取把刃口制成圆角的方法所能适用的条件受到很大的限制。

也就是说，此方法是通过塑性剪切使剪切断面成为剪切面的，所以它只能限于适用延性高的材料，例如纯铝、纯铜及铜合金、低碳钢、退火的渗碳钢以及低碳合金钢等。另外，可适用这种方法的冲裁轮廓形状也只限于简单的形状，很难消除凸形尖角处的剪裂面。此外，在冲裁外形时，需要利用冲裁搭边以约束材料的办法来提高压缩力，所以只能用于冲裁封闭曲线轮廓，并且搭边宽度不能太小，因而要使材料利用率降低。为了克服这个缺点，也有利用一模冲多件的方法来相互约束的。

将刃口制成圆角，冲裁时所需的能量虽然要多少增加一些，但由图 2.103 可知，最大冲裁力同锋利的刃口相比没有大的差别。另外，卸料力反而减小。

b. 刃口形状 刃口的最佳圆角半径固然根据被加工材料的

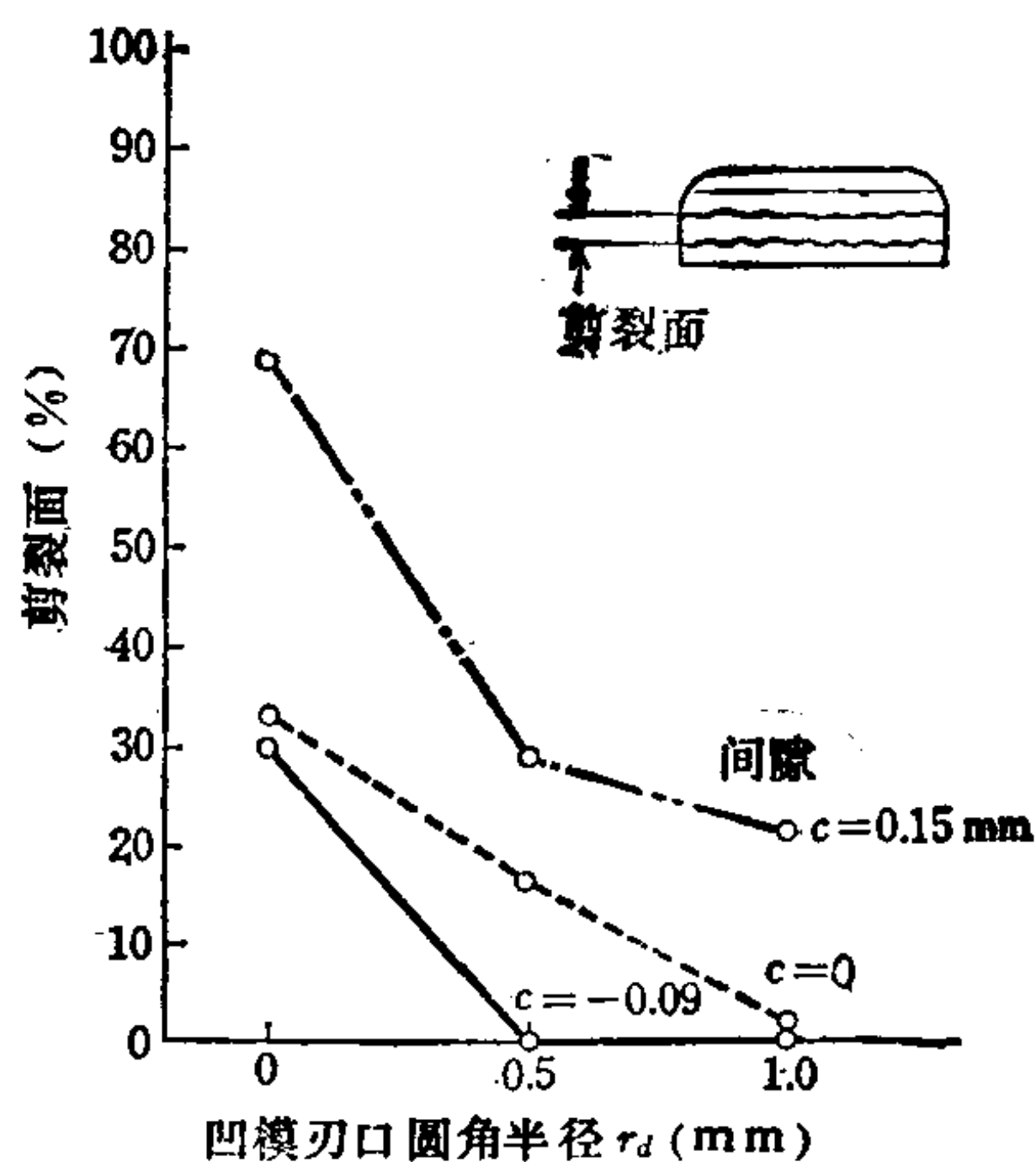


图2.102 凹模刃口圆角半径和剪裂面 (%) (S 10 C, 8.5mm) (山田、北島)

材质，厚度，轮廓和搭边宽度的不同而变化，但作为大致的标准可按照表2.16所列那样即取板厚的10~20%。刃口的圆角半径大小没有效果，取得过大则产生毛刺致使制件精度下降，因此一般最好是进行试冲逐渐增大圆角，最后达到必要的最小限度。在凸形轮廓的尖角部分，如果不增大刃口的圆角就不能消除剪裂面，但是塌角随着圆角的增大而增大。

我们知道，即使不把刃口制成圆角，采取倒角的办法也能得到大体相同的效果，这时最佳倒角量可以考虑采用上述的 r_d 值。根据这一事实可以认为圆角是存在最佳形状的，但制造高精度的圆角是没有意义的。另外，没有圆角或倒角的刃口，希望尽可能作得锋利，如果钝了不仅会成为产生毛刺的原因，而且也会在剪切断面上出现剪裂面。

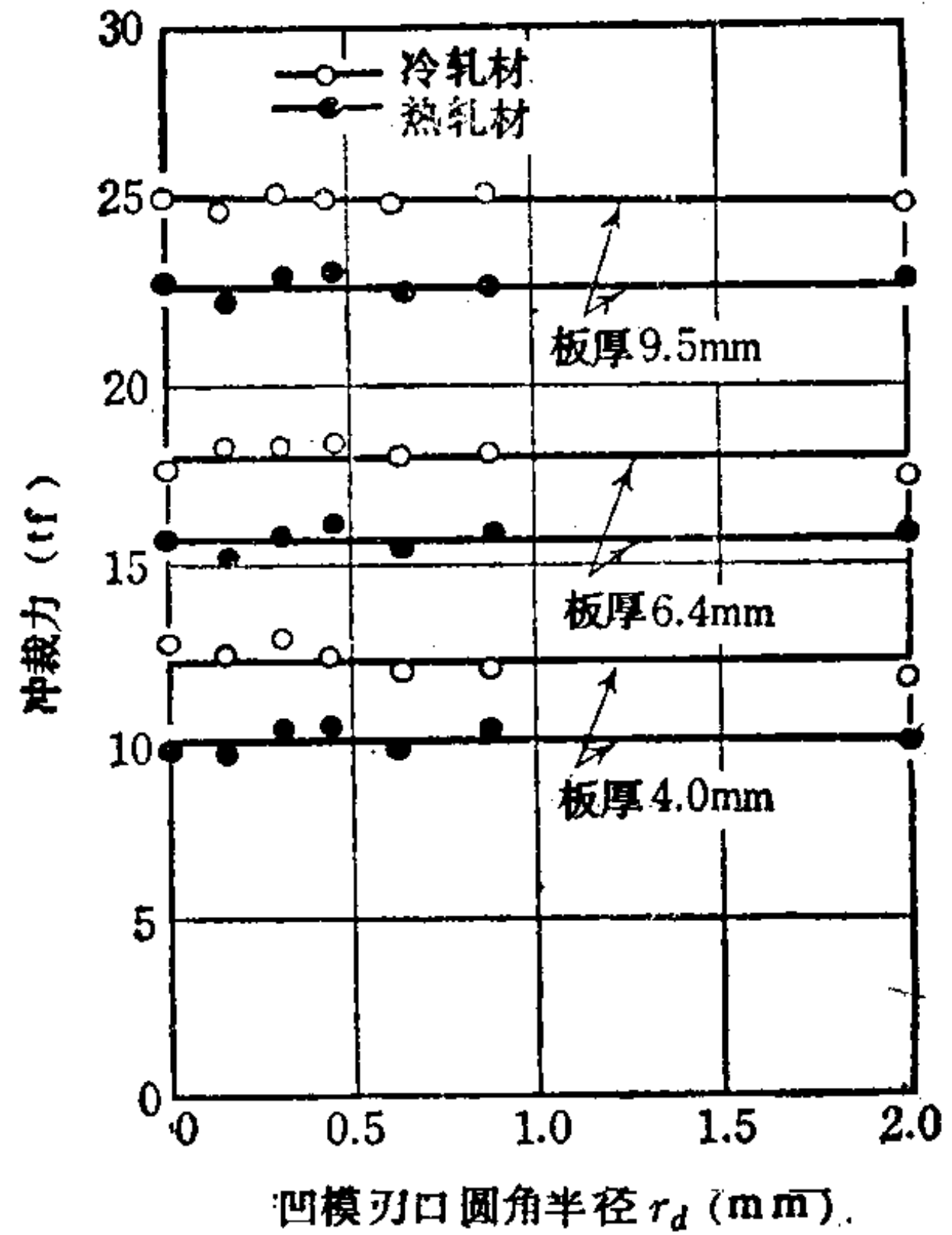


图2.103 刃口的圆角半径对冲裁力的影响 (低碳钢, $\phi 25.4$, 间隙0.025mm) (Howard)

表2.16 光洁冲裁时刃口的圆角半径 r_d (森田、音田)

加工材料	板厚 (mm)	1	2	3	5
	铝 (A1070)		0.25	—	0.25
铜 (CuP1)		0.25	—	0.50	(1.00)
低碳钢 (SPCC)		0.25	0.50	(1.00)	—
黄铜 (BSP1)		(0.25)	—	(1.00)	—
不锈钢 (SUS304)		(0.25)	(0.50)	(1.00)	—

注：括号内为参考值 (mm)。

c. 间隙 如果存在着间隙，即使将刃口制成圆角，由于产

生拉力也会造成剪裂面。希望间隙尽量小，通常把间隙取在0.02 mm以内。如果再进一步减少间隙，甚至变成负间隙的状态，就叫做挤压冲裁。这时的间隙值可取板厚的2~10%，并且要慎重地调节下死点，以使凸模刃口能够冲裁到凹模刃口的圆角或倒角部分。负间隙光洁冲裁如图2.102所示也容易得到剪切面，制品的塌角虽小，但毛刺增加。

d. 精度 从制件精度来看，光洁冲裁除了剪切断面的光洁度较好外，其余都不如其他的精密冲裁。如图2.104所示，随着刃口的圆角半径或倒角量的增加，塌角、弯曲和毛刺都增加，并且剪切断面和板面的垂直度也恶化。塌角和弯曲在很大程度上取决于被加工材料的种类，一般，加工硬化系数 n 值越大的材料，塌角和弯曲也就越大。因此，如图2.105所示，在铝、铜、黄铜等软质材料或不锈钢上留有相当大的塌角和弯曲。另一方面， n 值小的硬质材料垂直度下降。

剪切断面光洁度值取决于模具刃口圆角部分的表面光洁度，

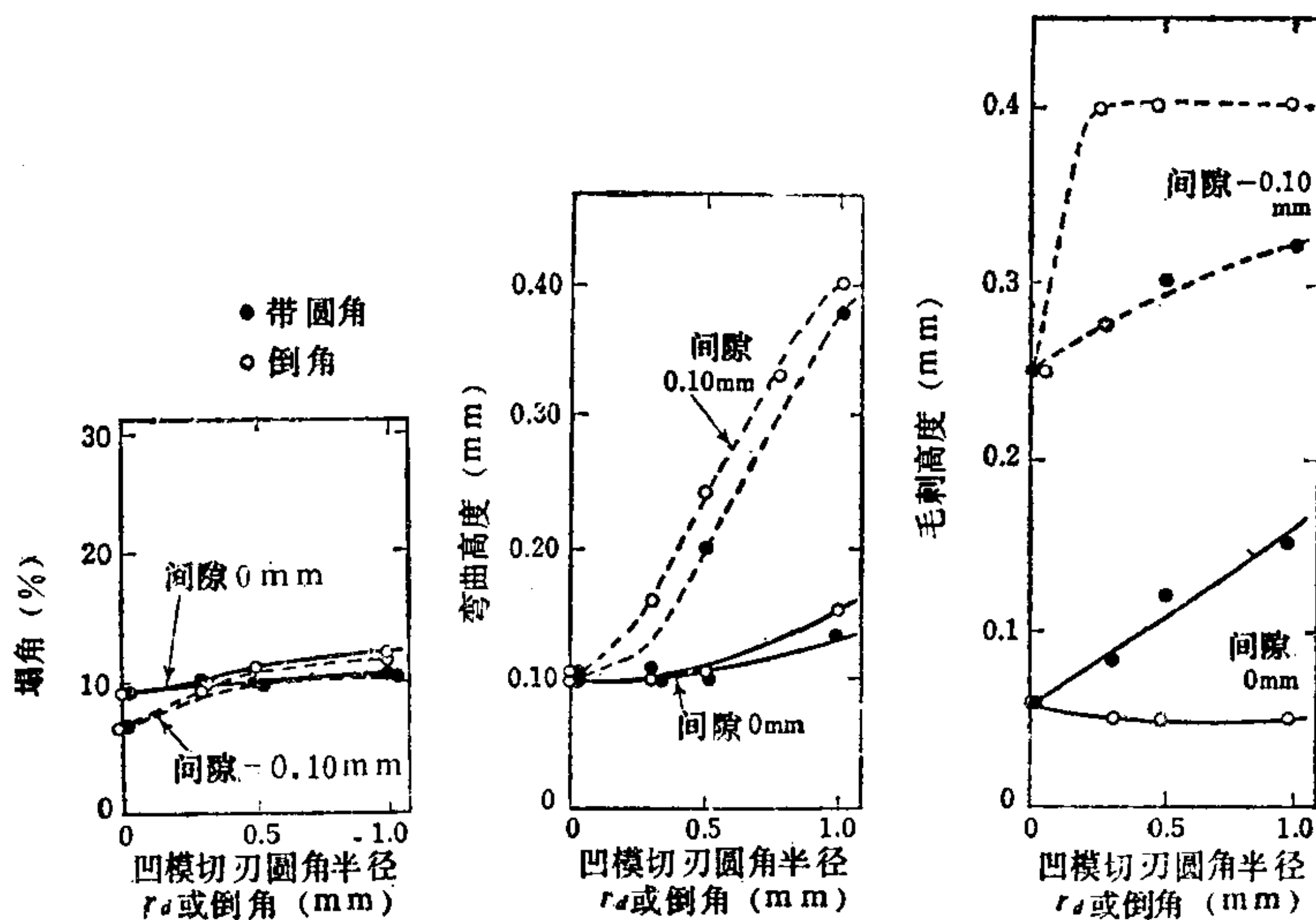


图2.104 光洁冲裁件的塌角、弯曲、毛刺

(5 mm厚的热轧钢板, $\phi 35$) (尾裕)

这是因为制件是由模具该部分挤光的。在润滑条件良好的情况下，采用经研磨过的刃口，光洁冲裁象纯铝那样延性大的材料，有可能得到 1μ 以下的镜面。

但是在光洁冲裁一般钢材时，在刃口上多少有些粘着或由于刃口的磨损会使制件表面产生划伤，因而其表面光洁度为数微米。

用这种方法要想长期得到无毛刺的制件是困难的，因此一般都采用滚筒抛光的方法去除毛刺。模具寿命往往是以毛刺变得过大时来判断，但在毛刺极限没有严格要求时，只要不是厚钢板，模具寿命就很少有比一般冲模大幅度下降的情况。重磨与产生毛刺有关，只磨削到锋利刃口即可。

e. 冲裁包覆法^[51] 光洁冲裁法中，材料的金属纤维是连续的，因而外表面的金属可将剪切断面全部包覆起来。冲裁包覆法就是利用这一事实，如图 2.106 所示，使表面的不同的材料流到剪切断面上，从而被全部包覆起来。

这种方法和电镀一样，可用于具有耐蚀性、导电性和美观性等要求的制件，例如硬币的制造，可采用表面具有锡包覆层的铅作为坯料进行挤压。

这种方法是和光洁冲裁法大体相同的条件进行的，但凹模刃口存在着最佳值，太大或太小都不合适（见图 2.107）。这样，即使不是通常的包覆材，而只是将板材重叠起来进行冲裁也能包覆。

但是，在单纯的重叠冲裁时，板材与板材相互接触的表面要清洁，最好用钢丝刷进行处理。另外，表面的包覆材料和中间的

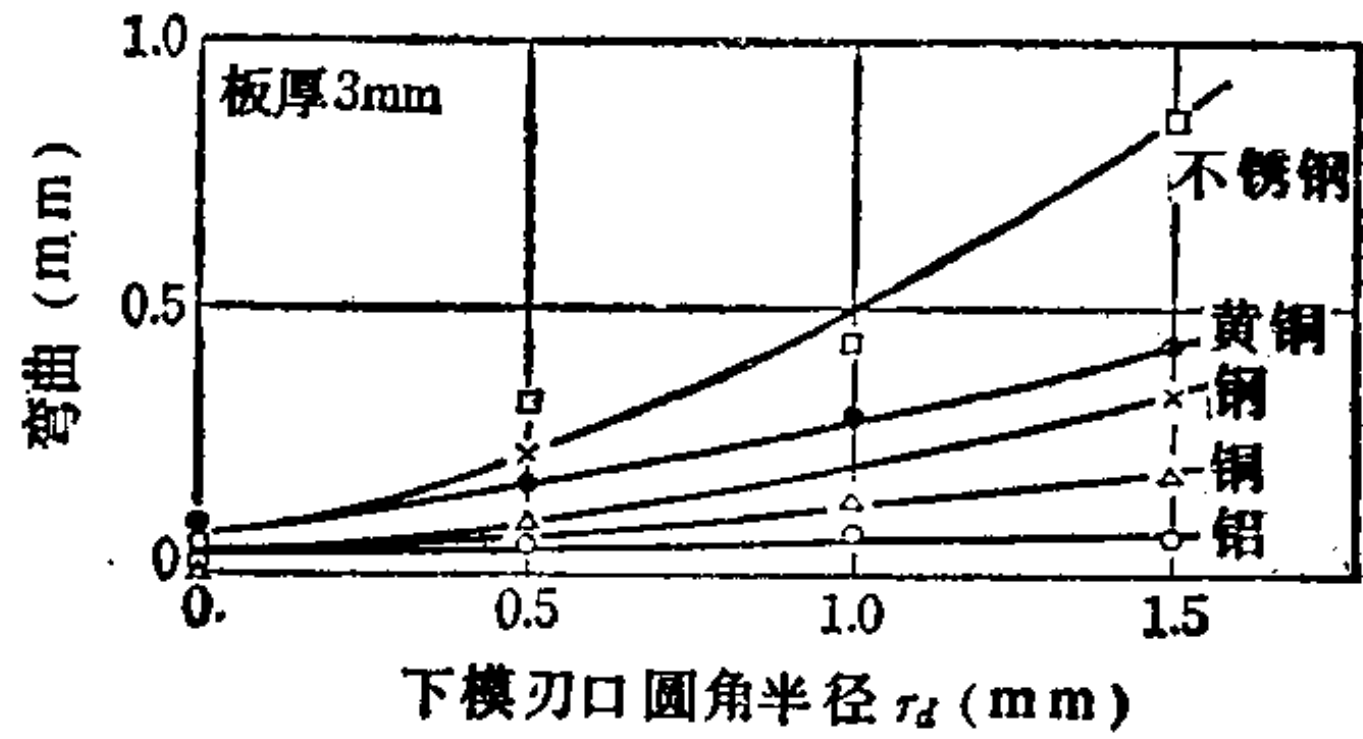


图 2.105 制件的弯曲和凹模刃口圆角半径 r_d 的关系 (森田、音田)

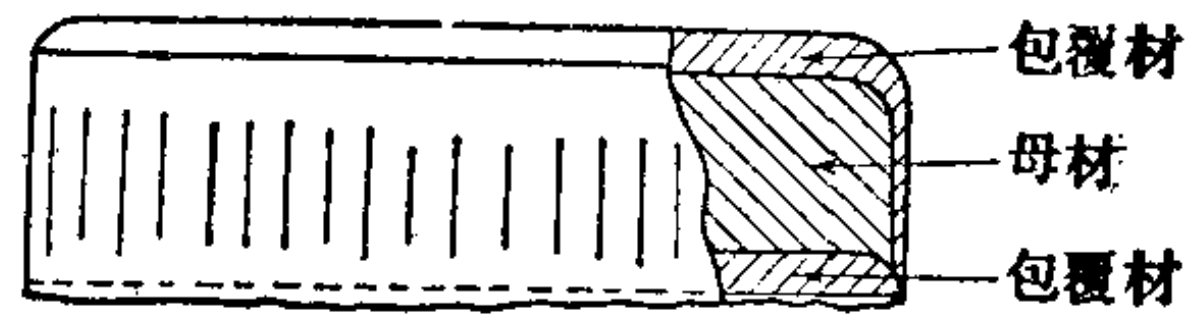


图 2.106 不露母材的包覆板光洁冲裁制件

母材当然都应是延性大的材料，最低限度包覆材要比母材软。

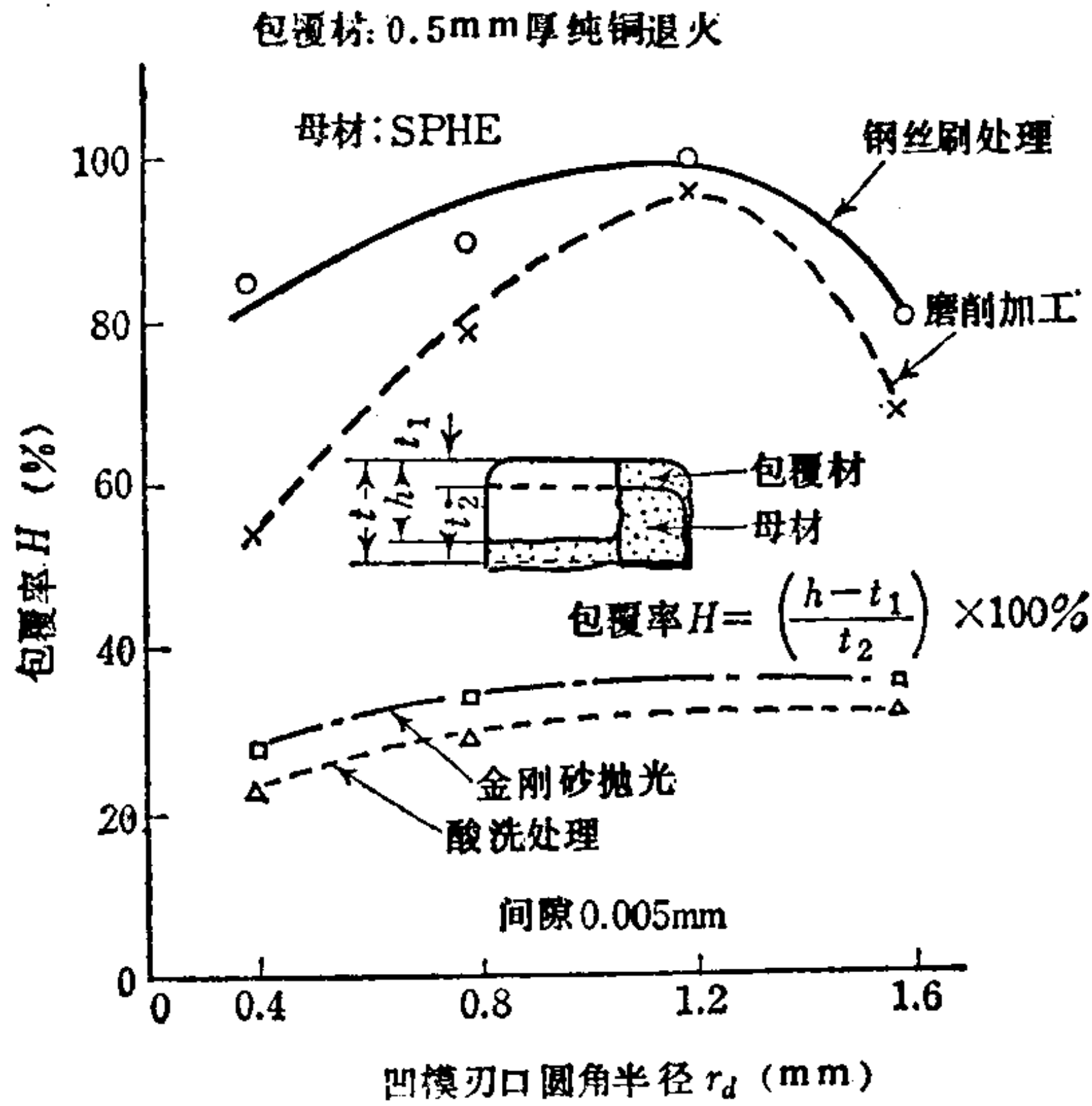


图2.107 重叠板材光洁冲裁的冲裁包覆 (前田、井出)

2.4.3 精密冲裁法 (fine blanking) [52~60]

如图 2.108 所示，这种方法是利用配置在凸模周围的压边圈对凸模与凹模之间的板坯加压，同时对凸模下面的材料利用顶板从相反方向加压而进行冲裁的。此法是使剪切变形部分的材料保持压应力状态，在不发生裂纹的情况下进行剪切分离。尤其是作为提高压缩力的有效方法，可在压边圈和凹模面的一方或双方沿冲裁轮廓制成环状三角形突起，并将其压入板坯。此外，间隙大致取为零，刃口要多少带些圆角。从原理上说，可以认为与光洁冲裁法相同，但从更加积极地建立压缩应力状态这一点上来看是不同的，可以说精密冲裁法就是为了建立压应力状态，实际上采用了一切可能的手段和方法。

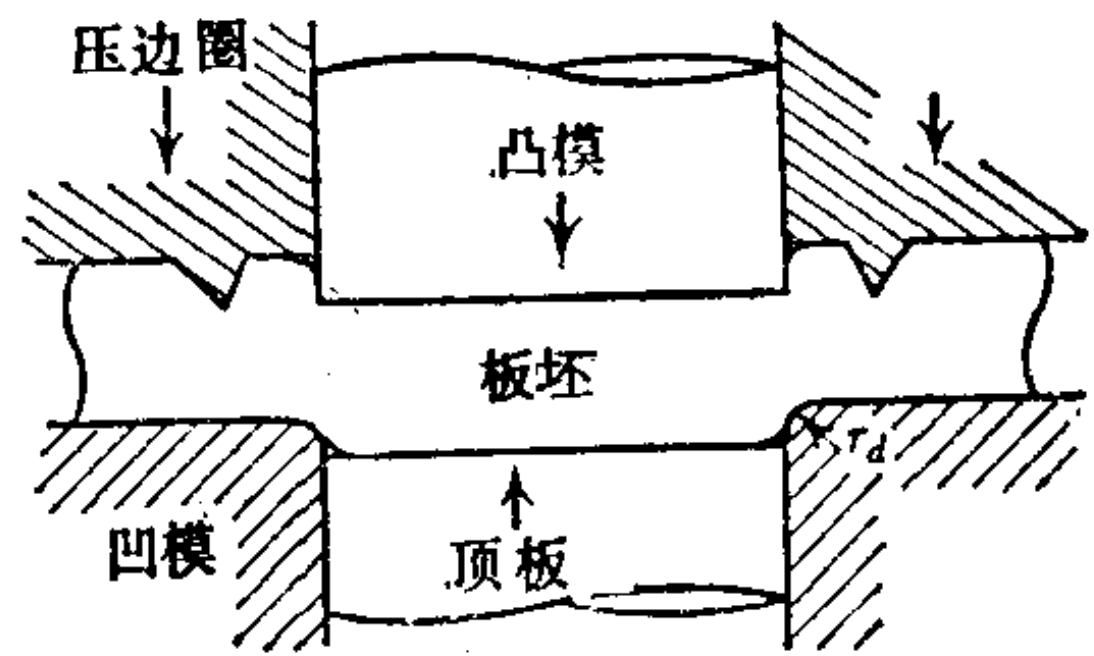


图2.108 精密冲裁法

因而其适用的材料范围和冲裁轮廓比光洁冲裁法广泛得多。这种方法是二十世纪三十年代由 Shiness 提出的，但因其需要很高的技术，直到一九六〇年前后研制出专用的压力机，精密冲裁技术才得以确立和普及。这种方法的缺点是需要有昂贵的三动压力机和高精度的模具，但在目前使用的精密冲裁法中，是制件精度最高和适用范围最广的，在办公机械、电气机械、精密机械和汽车等精密机械零件的制造中得到广泛的应用〔78〕。

a. 加工条件

(i) 间隙 在提高压缩力的各种手段中，间隙是最重要的。间隙的效果即使在图2.109那样的微小的范围里也是非常重要的，通常的允许间隙为0.01~

0.02mm。如果超过这个范围，在毛刺一侧就会留有较浅的粗糙的剪裂面。由于需要这样严格的允许间隙，故在模具的制造上要特别注意防止间隙的偏心。如果制成负间隙，则在制件毛刺一侧的角上会产生隆起，使制件精度下降，模具的磨损也要加快，因而一般不采用负间隙。

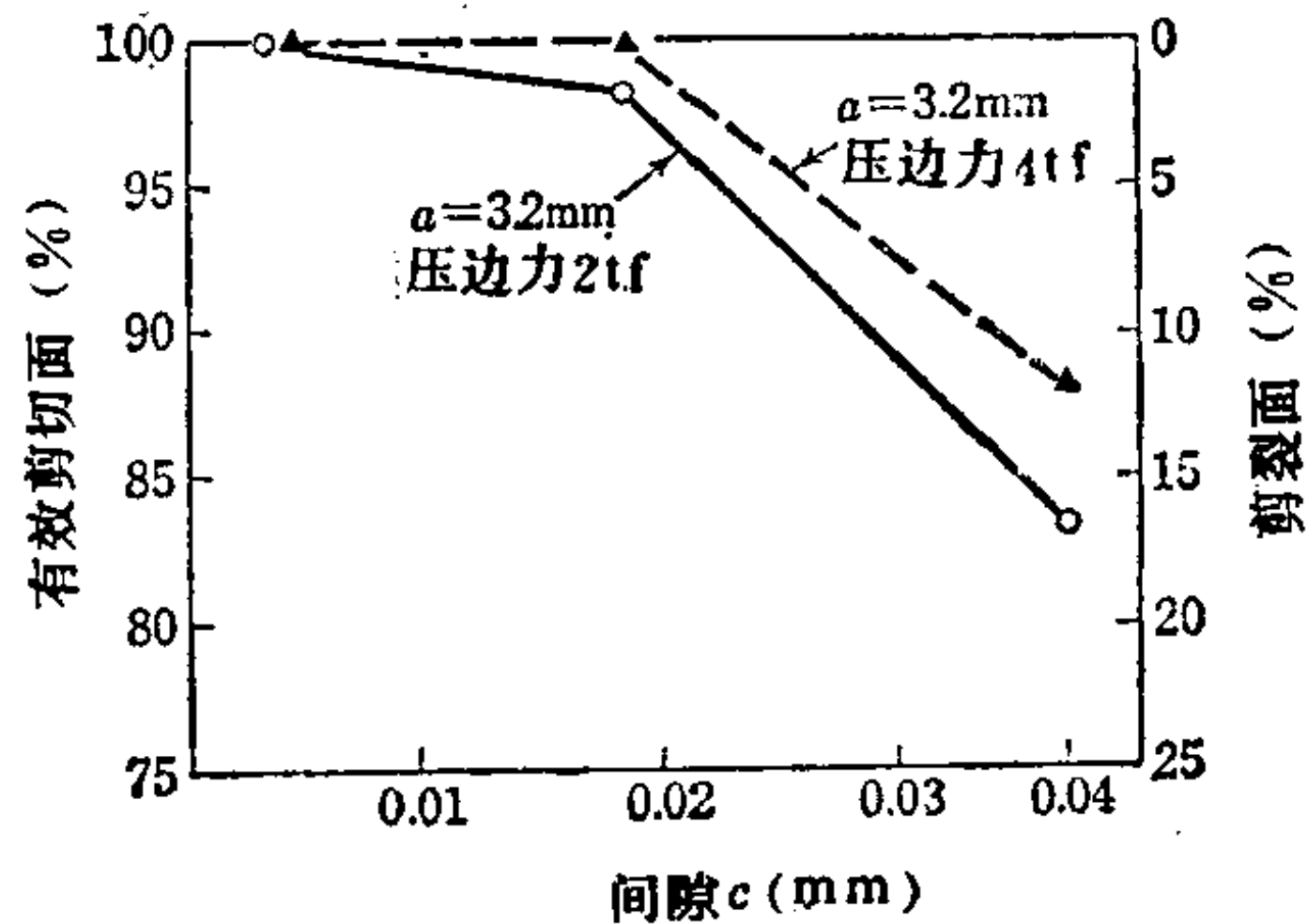


图2.109 间隙的影响 (S 20 C, 3.2mm厚, ϕ 16mm, 顶件反力 5.6tf) (前田、中川)

(ii) 刃口的圆角 刃口可制成与光洁冲裁时同样的圆角或倒角，但其圆角半径值较小，通常在轮廓部分取0.1mm左右，在凸部取板厚的10%到0.5mm左右。由于把刃口制成圆角对防止产生裂纹的效果极大，圆角值可在试冲过程中逐渐增大，但是为了保持刃口的长寿命，希望增大到剪裂面消失的程度为止。

(iii) 压边力 压边力的作用是将凹模平面上的板坯牢固地固定和防止余料上翘，以及在负间隙冲裁过程中不使发生的压应力消失，主要是提高凹模刃口尖端附近材料的压应力，防止材料

在凹模刃口处产生裂纹。压边力增加，则如图 2.110 所示冲裁件的剪裂面减少，压边力的大小因突起的配置状态不同而异，由图 2.111 可读出每 1 mm 长度突起所需的压边力 Θ ，乘以突起轮廓的长度便可求出压边力。用这种方法求得的压边力，一般可达冲裁力的 30~50%，但是过剩的压边力不能提高剪切断面的质量，而且会成为缩短模具寿命的原因。

(iv) 顶板 顶件反力对于改善冲裁件的剪切断面质量不起作用，但如图 2.112 所示，对孔的内表面消除剪裂面是有效的。精密冲裁几乎没有只用于冲孔的，一般都是冲裁外形和冲孔同时进行的复合冲裁。在冲裁外形时，顶板起顶出器的作用，在进行复合冲裁时，顶板除了起顶出器的作用以外，还起着冲孔凸模导向、卸料板和压料板的作用。

这样，在冲孔时即使不配置特殊的突起，也能将周边完全固定，因而一般都能得到光洁的剪切断面。但是在孔的内表面存

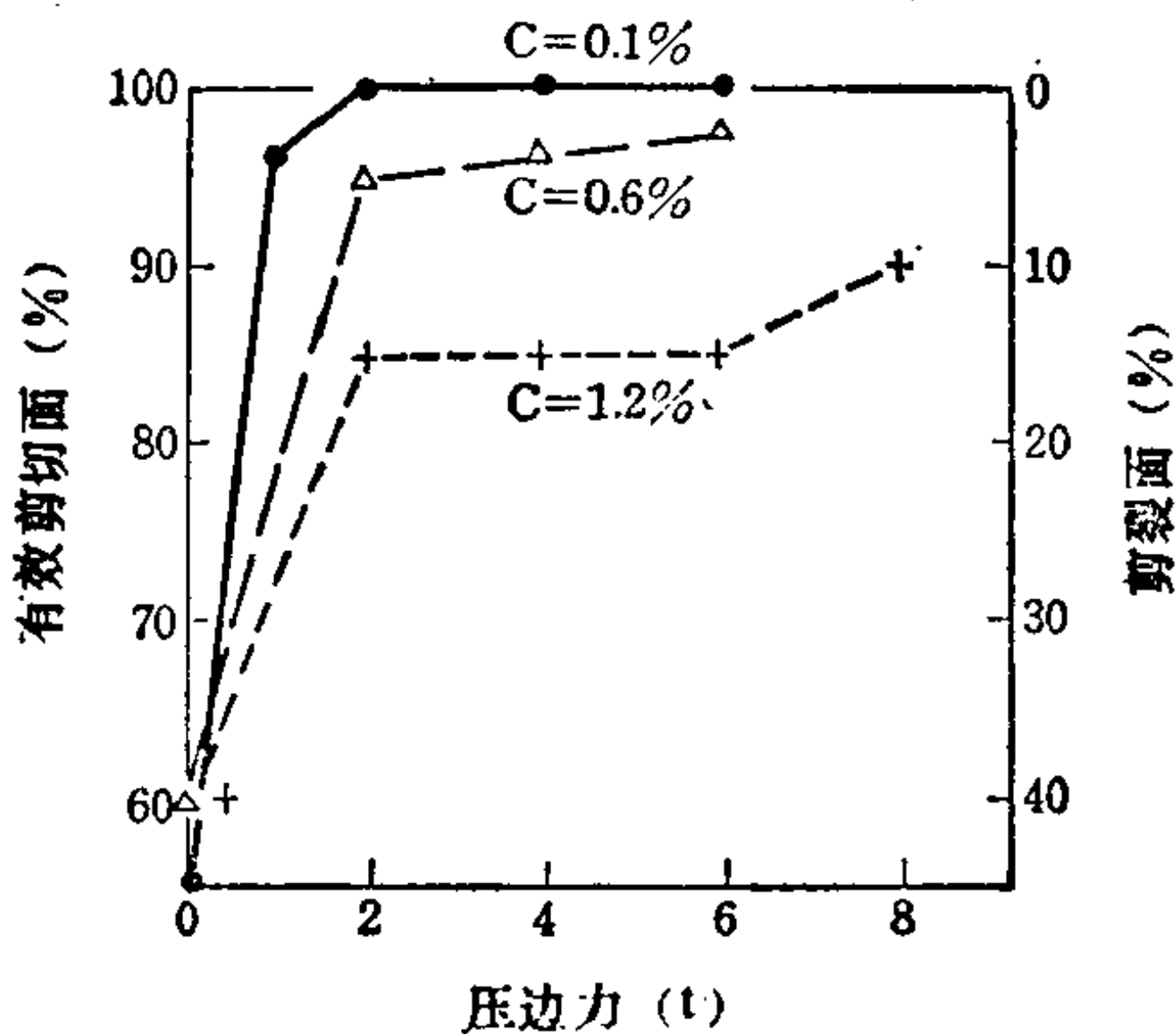


图2.110 压边力的影响 (S 20 C, 3.2mm厚, $\phi 16\text{mm}$, $a = 3.2\text{mm}$, 顶件反力为零) (前田、中川)

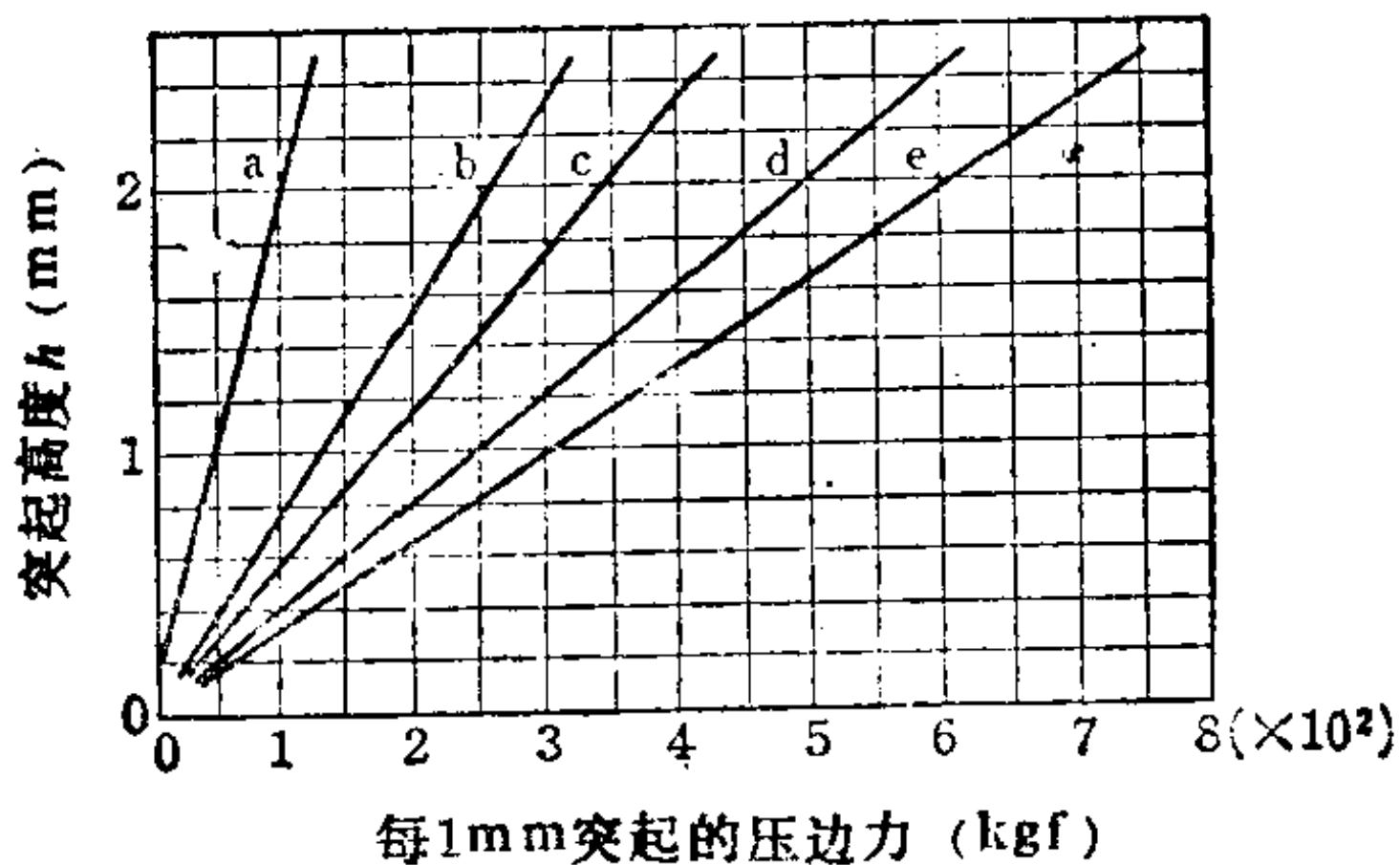


图2.111 单位突起长度的压边力(Guidi)

- a: 纯铝
- b: 紫铜(软), AlMgSi(半硬)
- c: 低碳钢, St1~4 渗碳钢, C10, C15, 黄铜(半硬) AlMgSi(硬), 紫铜(硬)
- d: 合金渗碳钢
- e: 不锈钢

① 原文误为压入量——译注。

在凸部时，也有把装入凸模中的顶销或冲孔凸模的一方或双方都制成突起的。

顶板还有防止冲裁过程中板料弯曲和提高冲裁后制件的平整度和剪切断面的垂直度的作用。顶件反力的单位压力为 $2 \sim 7 \text{kgf/mm}^2$ ，为冲裁力的 $10 \sim 15\%$ 。

b. 突起^[77] 突起在有效地起到压边圈作用的同时，还产生板面方向的压力，以补充剪切变形部分压缩力的不足。现在

主要使用的是如图 2.113 a) 所示的具有三角形断面形状的突起。即使突起的角度有 10° 左右的变动，效果也不会改变。另外，尤其是搭边宽度大

时，如果不是特别难于加工的形状或材料，即使采用如图 2.113 b) 那样的平面突起也是无妨的。采用三角形突起时重要的是其

尺寸和刃口的距离，这些都根据被加工材料、轮廓形状和搭边宽度等的不同而变化，但是只在压边圈上制成突起时，如图 2.114 所示，距刃口过近也并不能提高剪切断面的质量。表 2.17 所列的值作为突起的大致标准。

当板厚在 $3 \sim 5 \text{mm}$ 以上时，也要在凹模面上制成突起，但这时每一个突起的高度可稍小些，突起到刃口的距离也要稍近些。

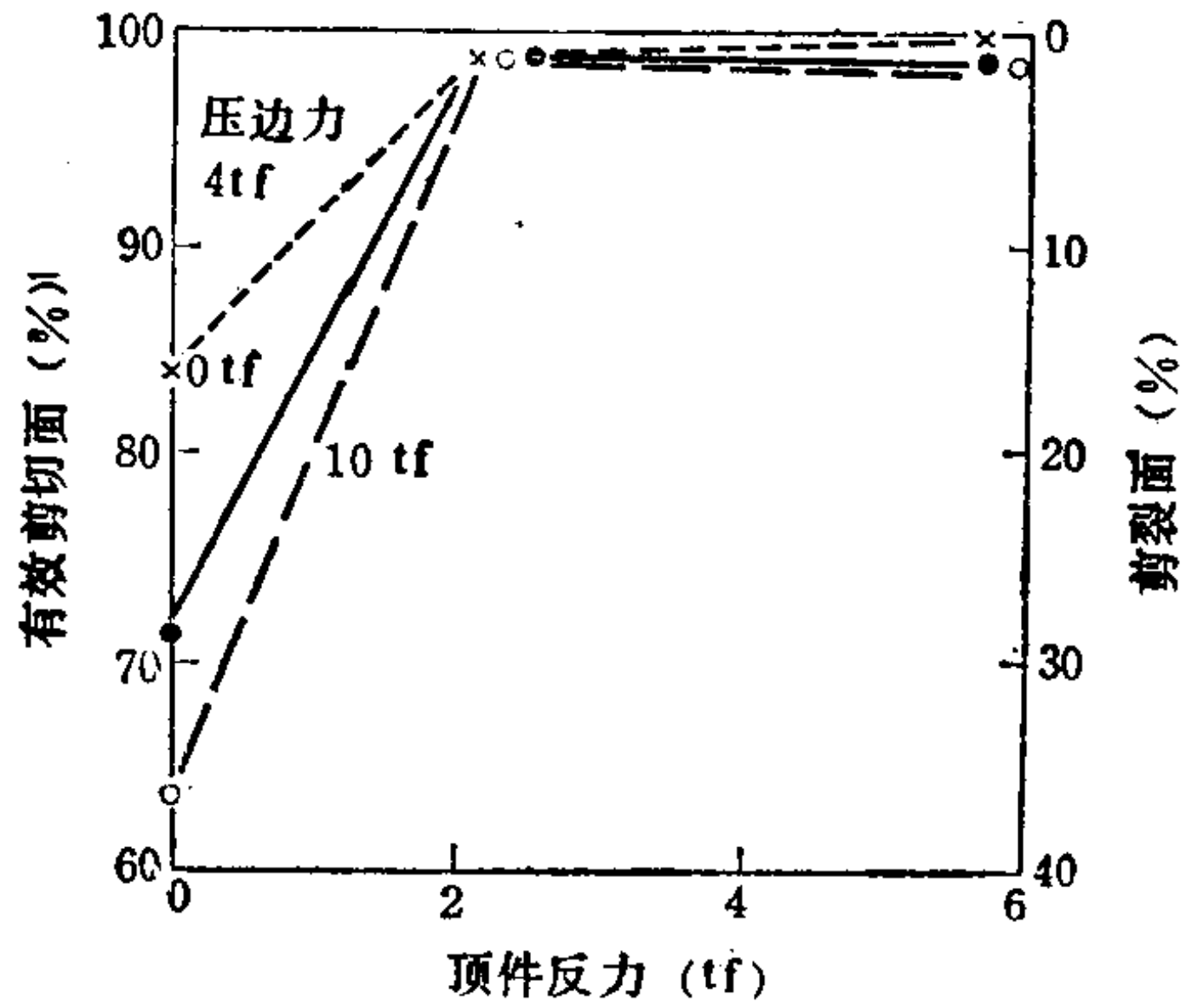


图 2.112 顶件反力对孔内表面的影响 (S 50 C, 3.2mm 厚, 间隙 0.003mm, $a = 4.1 \text{mm}$) (前田、中川)

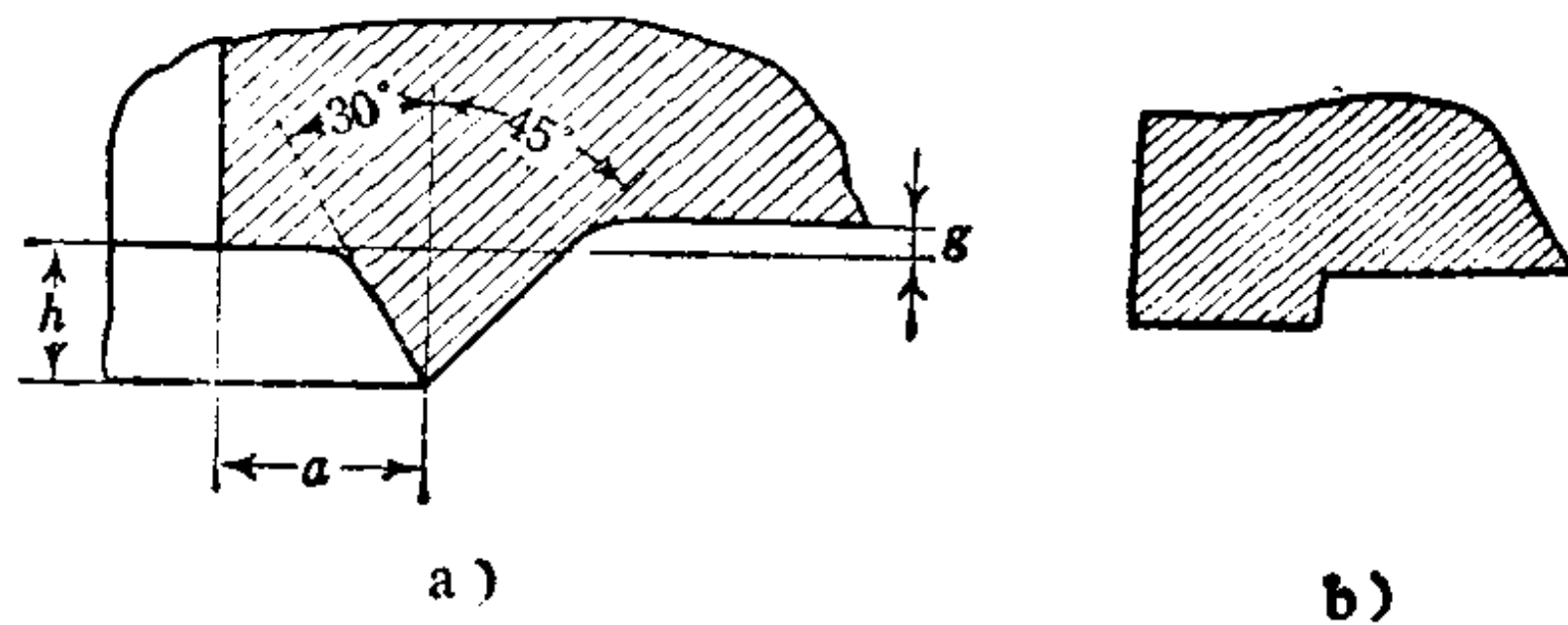


图 2.113 突起形状

a) 三角形突起 b) 平面突起

表2.17 三角形突起形状和尺寸示例(Bösch & Stäger) (标准尺寸)

板厚 t	g	h	a
1~4	≥ 0.05	$0.2 t$	$0.66 \sim 0.75 t$
> 4	$0.08 \sim 0.1$	$0.17 t$	$0.6 t$

注：符号见图2.113——译注。

对于突起轮廓的配置如图 2.115 所示，要避免不需要突起的凹部，重视精密冲裁有困难的凸部。

精密冲裁的困难程度是与塌角大小相对应的，因而突起的配置也要参考塌角的大小，塌角小的地方可以不配置突起。齿轮等制件往往在上下两方都配置突起，但也有将突起简化制成圆弧状。

c. 制件极限 制件轮廓的尖角，不仅对消除剪裂面有困难，而且模具刃口的磨损也大，并容易引起崩刃。

图 2.116 所示为凸部的极限。关于凹部的极限，从防止凹模刃口崩刃考虑，允许达到此极限拐角值的 0.3 倍。另外，抗拉强度在 50kgf/mm^2 以上的材料，应取此极限角值的 1.3 倍。同样，图 2.117 是齿轮的极限模数和板厚的关系。

精密冲裁模由于凸模的导向较好，模具的刚性也高，因而可比常用的一般模具进行条件更为苛刻的加工。就图 2.118 的例子

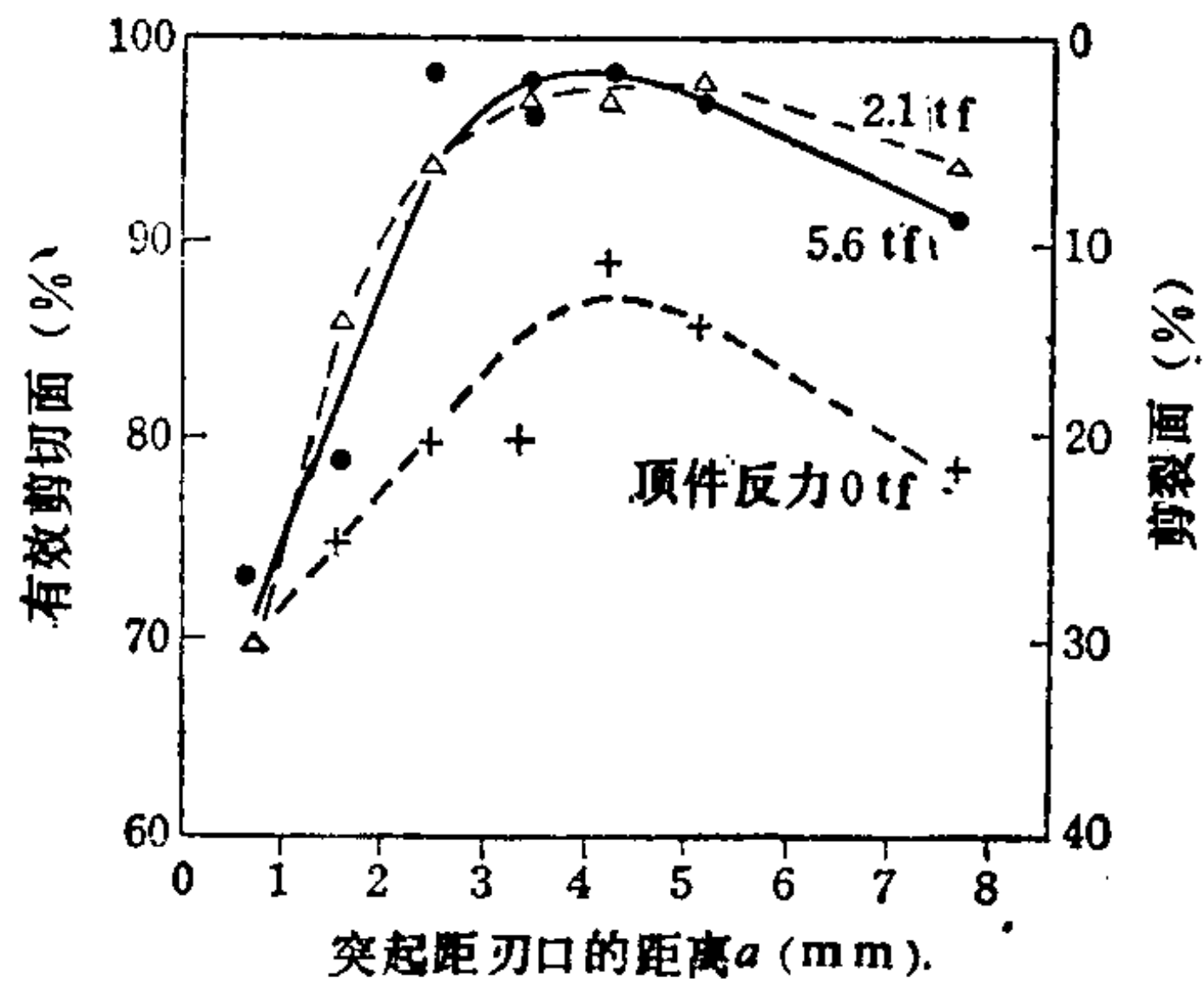


图2.114 突起位置的影响 (S 50 C, 3.2mm厚, $\phi 10 \text{mm}$, 间隙0.1%, 压边力 8tf) (前田、中川)

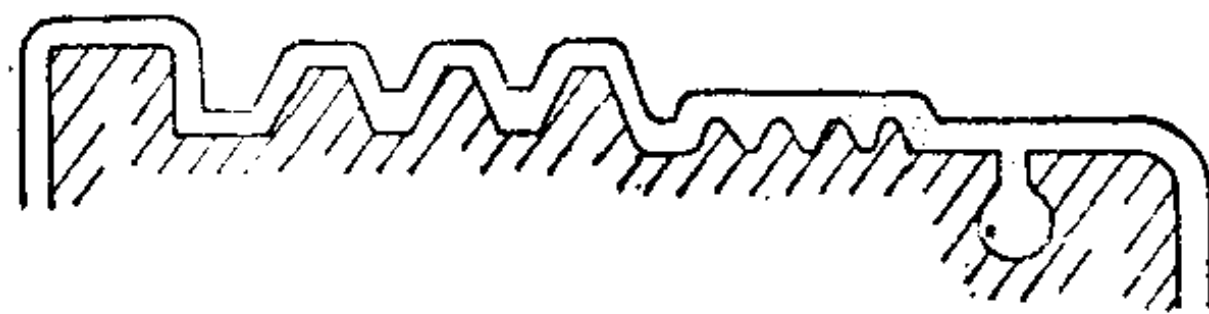


图2.115 突起的配置示例

来说，一般模具时， $w:t = 1:1$ ，而精密冲裁模在加工普通材料时， $w:t = 2/3:1$ ，加工延性大的材料时 $w:t = 0.5:1$ ，加工延性小的材料时 $w:t = 0.8:1$ 。

使用三动压力机，很容易地以一次行程进行弯曲、压印和压花加工的复合冲裁。

搭边宽度过小，不能利用压边圈进行充分固定，在冲裁断面上会产生剪裂面，因而存在有如图 2.119 所示的搭边极限值。如果增大搭边宽度，则材料利用率下降，因而可在凹模面上也制成突起以减少搭边宽度。

d. 精度 因为板坯是被夹在凸模和顶板之间在加压的状态进行冲裁的，所以在冲裁结束后回弹小，基本上无弯曲。制件的尺寸公差根据模具的加工公差和加工条件变化，但其标准精度见表 2.18。

剪切断面及孔内表面对板面的垂直度良好，但在冲裁外形时，板的厚度越

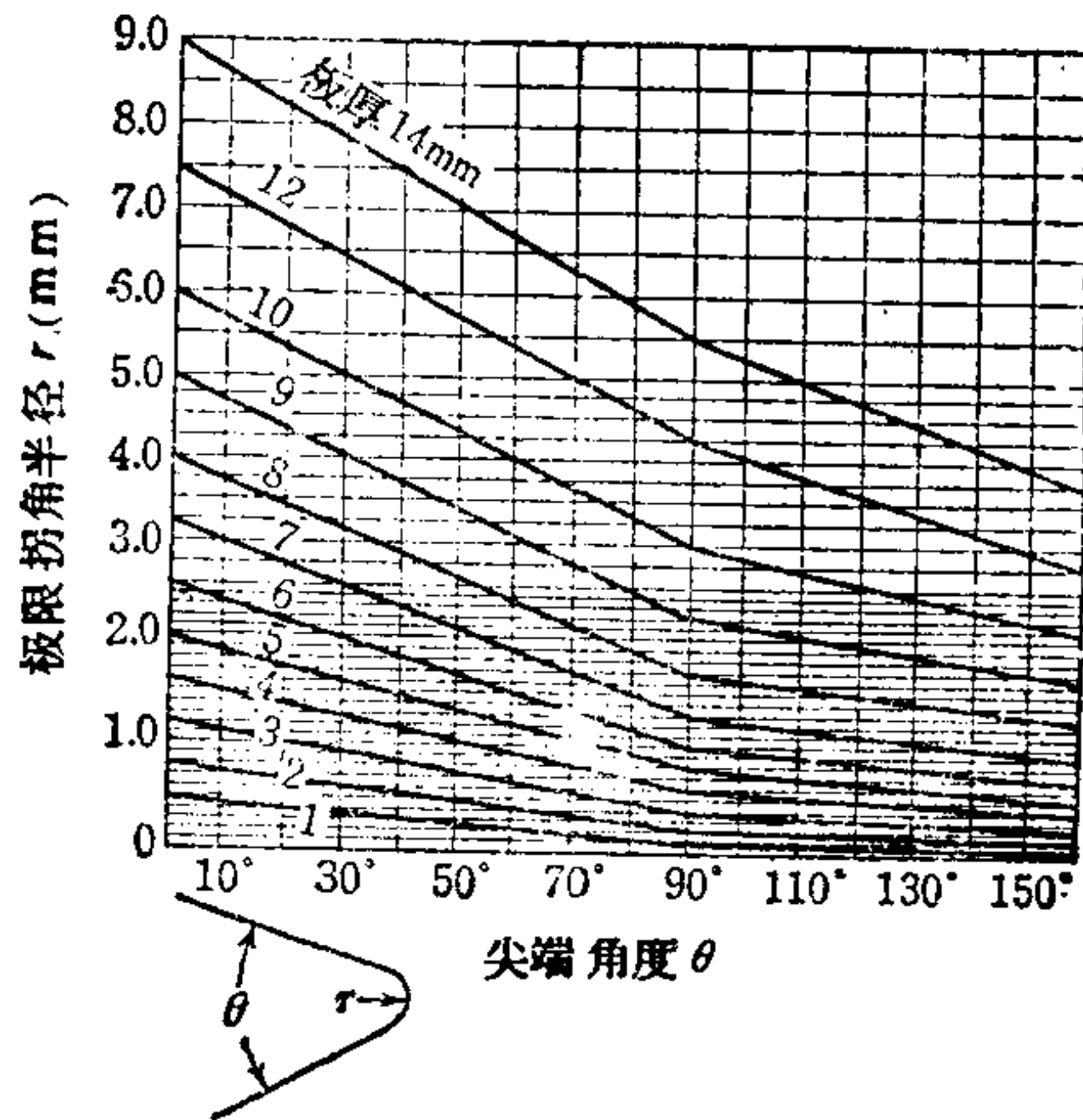


图2.116 尖端角度和极限拐角半径的关系 (Schmid)

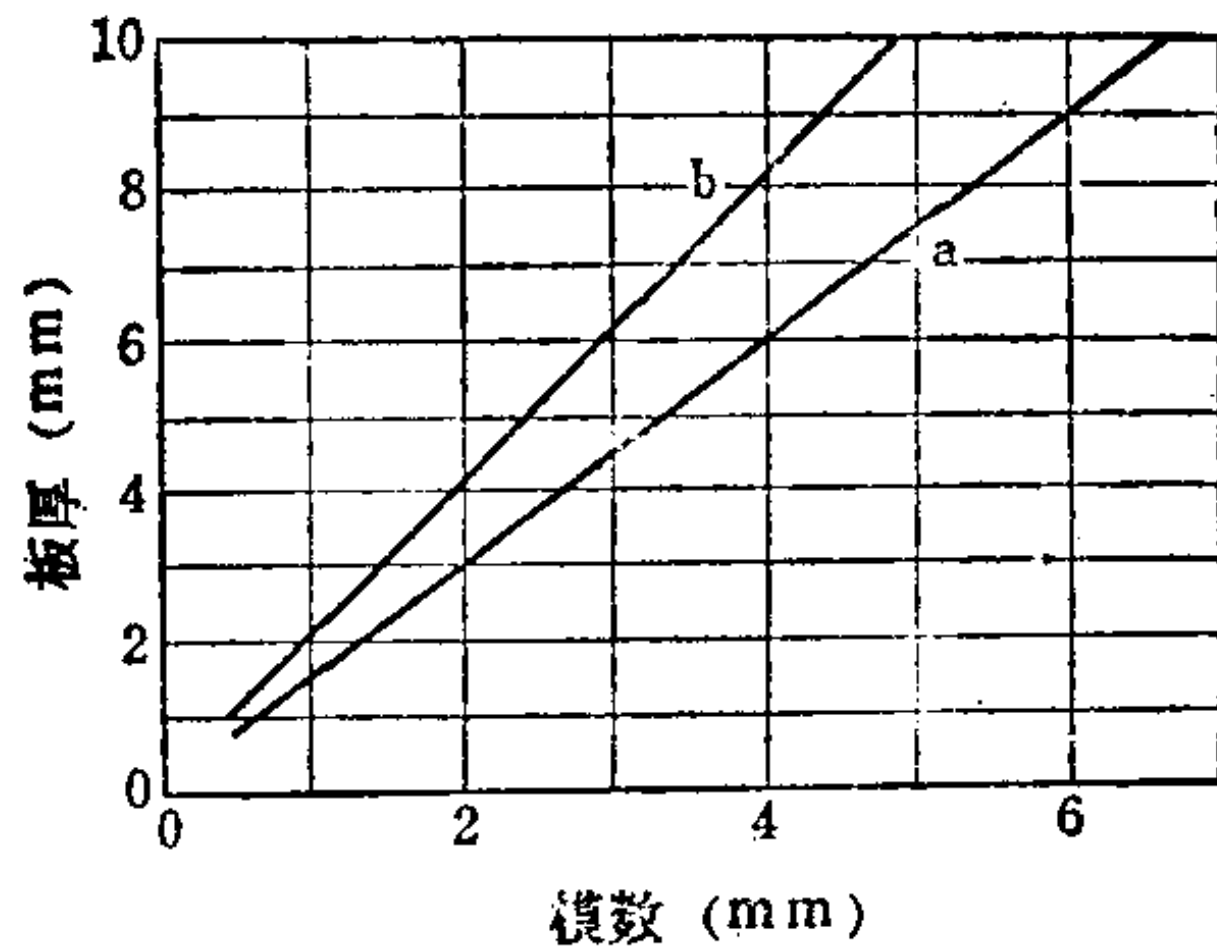


图2.117 齿轮模数的极限值 (Guidi)
a: 一般材料 b: 延性大的材料

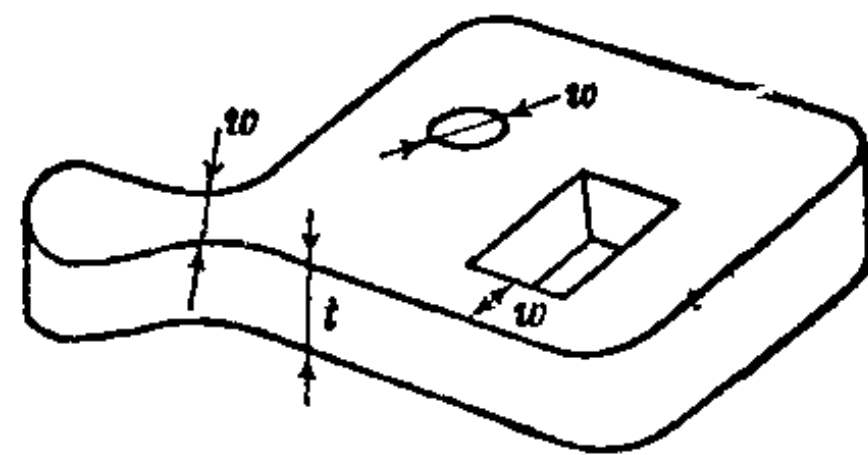


图2.118 制件轮廓的极限 (Bösch & Stäger)

厚，材质越硬，垂直度就越坏。如图 2.120 所示，使制件尺寸精度下降。剪切断面的表面光洁度为几微米，与由光洁冲裁法得到的剪切断面相比无大差别。另外，由于轮廓形状的不同，在消除剪裂面的难度上有差别，如图 2.121 所示，在 90° 附近最困难，塌角与一般的冲裁法相比是相当小的。塌角由于冲裁轮廓的不同而有差别，一般钢材的塌角如图 2.122 和图 2.123 所示。另外，塌角也因被加工的材质不同而有很大差别，硬质材料塌角较小，而软质材料塌角却很大。

毛刺主要是由于凸模切刃的磨损引起的。在刃口刚研磨过以后毛刺少，但随着冲裁数量的增加又会产生相当大的毛刺。通常利用滚筒抛光或砂带磨削去除毛刺。一般可根据由磨损或崩刃引起的毛刺的发生情况来判断模具寿命，以便重磨凸模刃口。模具寿命取决于被加工材质、轮廓形状、板厚和精度要求等，但与一般的冲裁模相比是相当短的〔82〕。

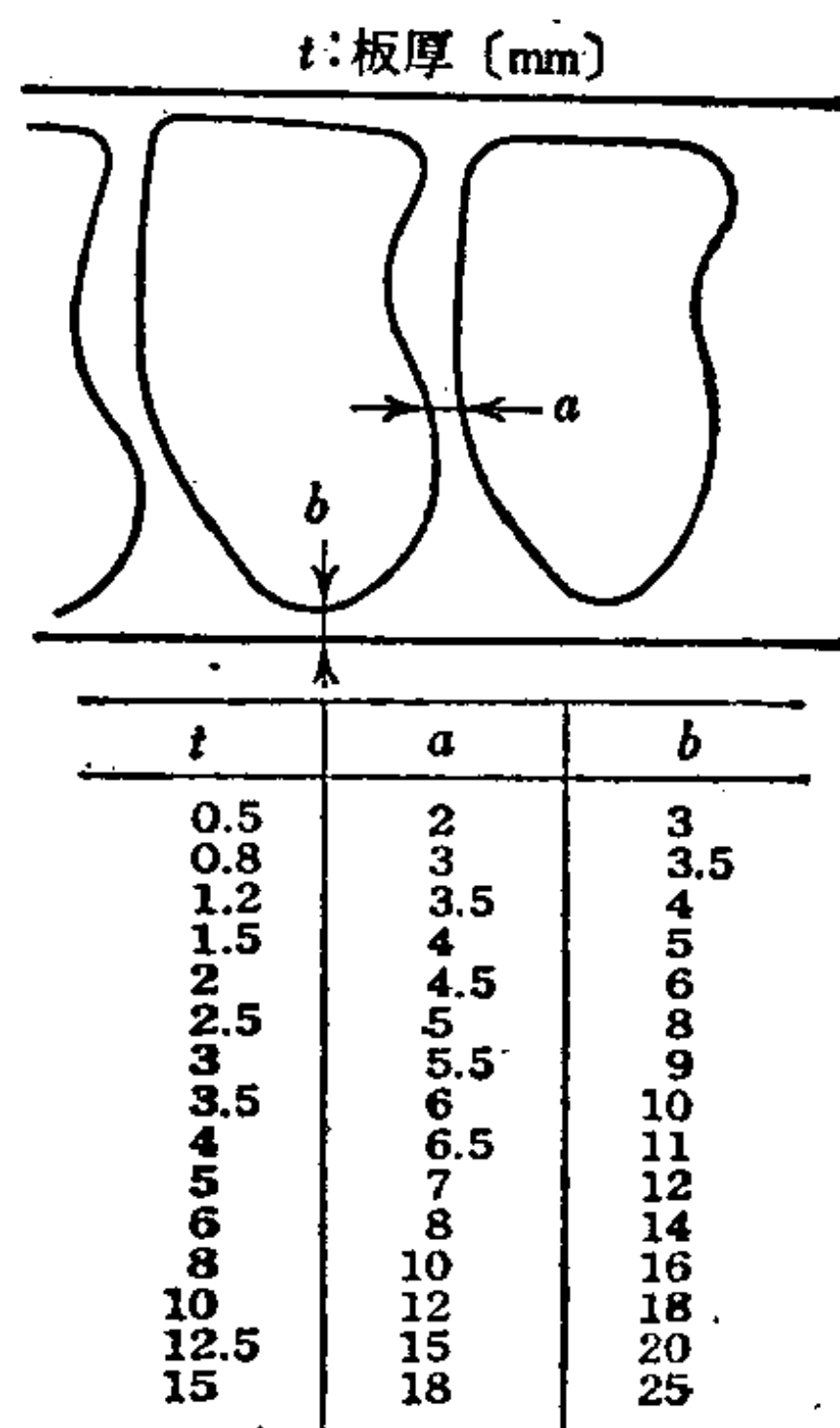


图2.119 搭边宽度
(Schmid)

表2.18 尺寸精度 (Feintool公司)

板 厚	板的抗拉强度 $\leq 50 \text{kgf/mm}^2$			板的抗拉强度 $> 50 \text{kgf/mm}^2$		
	冲 孔 ISA 等级	冲裁外形 ISA 等级	孔间距离 (mm)	冲 孔 ISA 等级	冲裁外形 ISA 等级	孔间距离 (mm)
0.5~1	6~7	7	± 0.01	7	8	± 0.01
1~2	7	7	± 0.015	7~8	8	± 0.015
2~3	7	7	± 0.02	8	8	± 0.02
3~4	7	8	± 0.03	8	9	± 0.02
4~5	8	8	± 0.03	8	9	± 0.03
5~6	8	9	± 0.03	8~9	9	± 0.03
>6	8~9	9	± 0.03	9	9	± 0.03

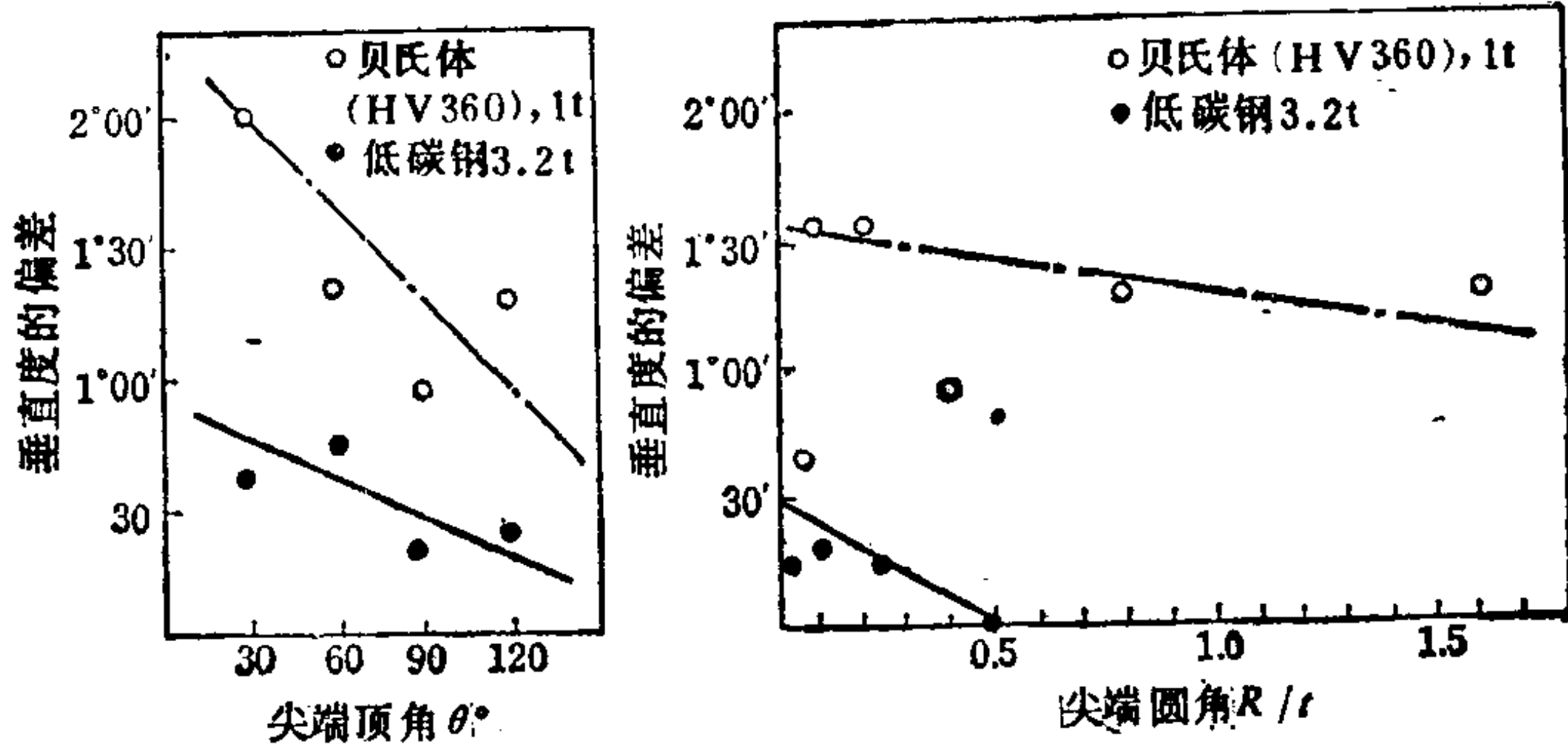


图2.120 轮廓形状和剪切断面垂直度的偏差 (中川、鈴木, Cupka)

e. 剪切断面的硬化 精密冲裁是利用塑性变形进行剪切分离的，因而剪切断面产生相当大的加工硬化。图 2.124 所示为钢材进行精密冲裁时其

断面的硬度上升情况，贝氏体钢上升 2 倍左右，一般钢材上升 3 倍左右。这样的硬度上升，当然会提高断面的耐磨性。特别是毛刺一侧的硬度上升较大，但在冲裁断面上稍有斜度，因而这部分成为同其他

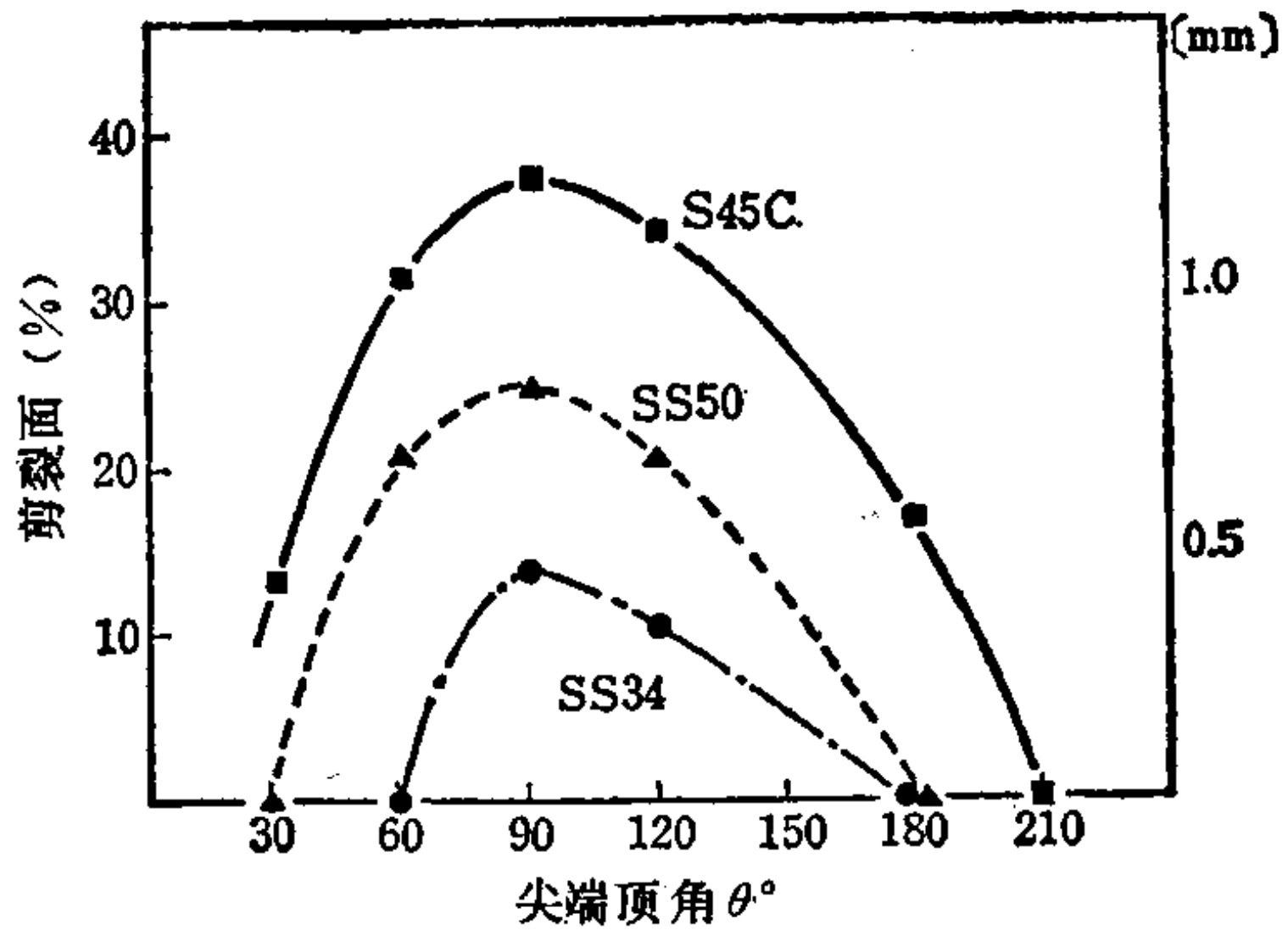


图2.121 精密冲裁

零件接触的接触面也是很合适的。这种硬度上升只限于表面层，随着向材料内部深入硬度则下降，在板厚 3% 左右的地方硬度下降一半，在板厚 10% 的点上硬度则与母材大致相同。在光洁冲裁时也可以看到同样的硬度上升情况。

f. 被加工材料 由于是利用塑性剪切而分离，所以被加工材料要有足够的延性。材料的精密冲裁性能是与拉伸试验的断面收缩率和该材料的弯曲加工或在冷锻时发生裂纹的难易程度以及

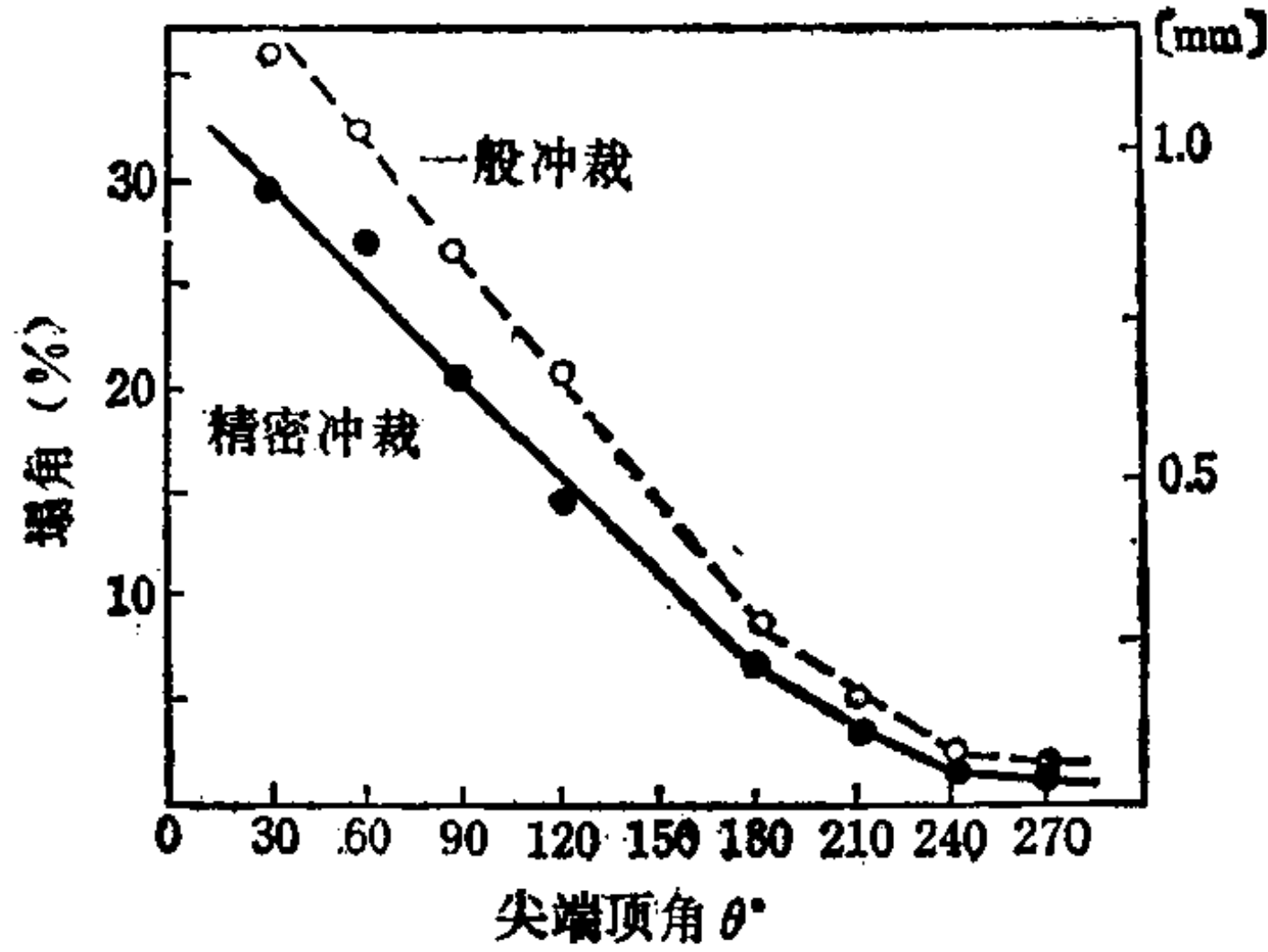


图2.122 精密冲裁与一般冲裁的尖端顶角 θ 和塌角的关系 (中川、鈴木、木下)
材料: SS41。 $R = 0.4\text{mm}$, $r_d = 0$

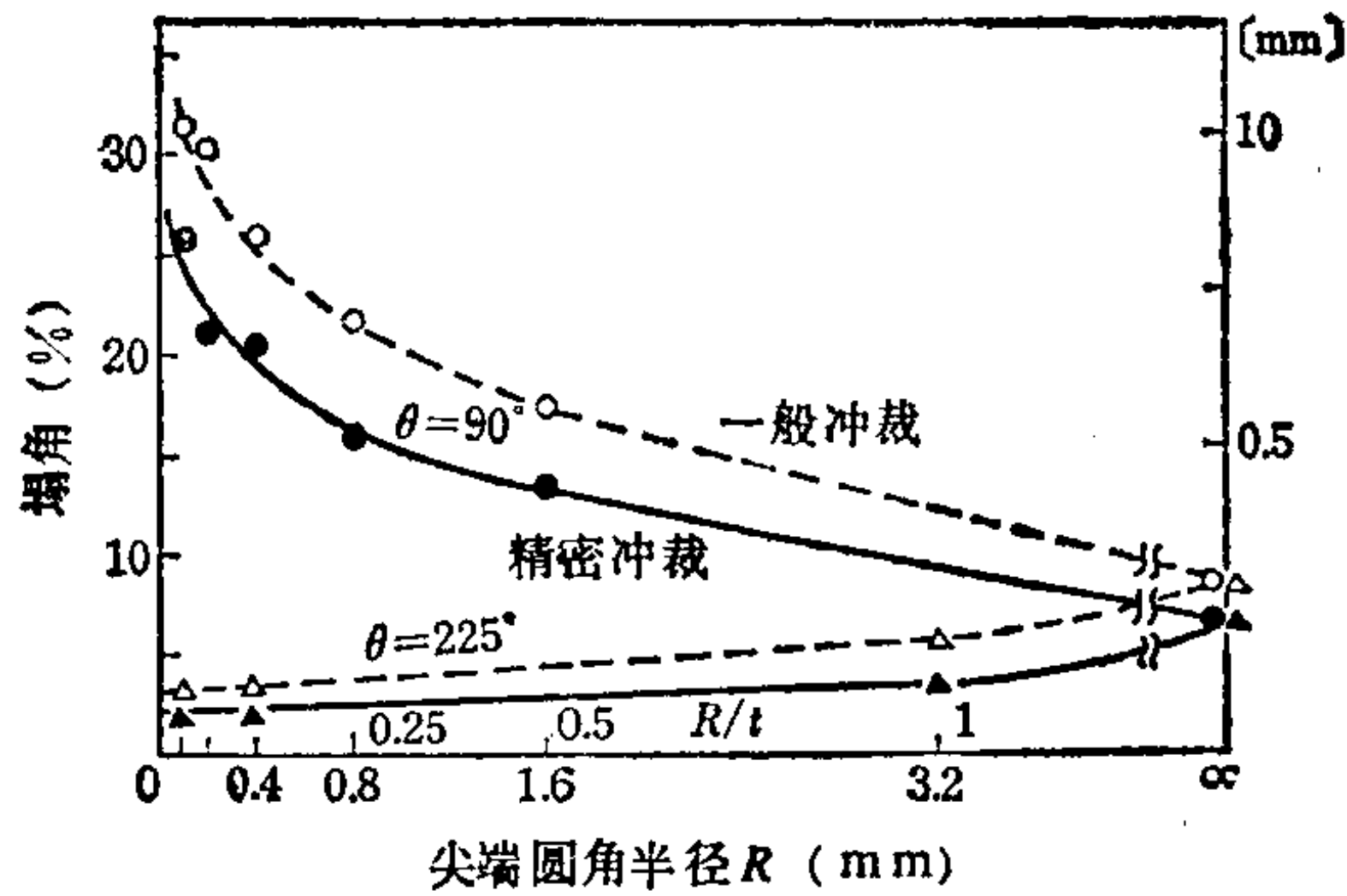


图2.123 精密冲裁与一般冲裁的尖端圆角半径 R 和塌角的关系 (中川、鈴木、木下)
材料: SS41, $r_d = 0$

在一般冲裁中剪切面的大小等相对应，为此可判断材料的精密冲裁性能。精密冲裁的材料，大部分是钢材，但是铜，含铜63%以上而无铅的黄铜、青铜和纯铝等也容易进行精密冲裁。在钢材中，含碳量极少的低碳钢，在标准渗碳体的退火材料中，含碳量达0.7%左右的碳钢、渗碳钢和合金钢等也能进行精密冲裁。精密冲裁钢材的抗拉强度为 $60\text{kgf}/\text{mm}^2$ ，而对于薄板也可使用象贝氏体

钢那样抗拉强度超过 $60\text{kgf}/\text{mm}^2$ 的材料。

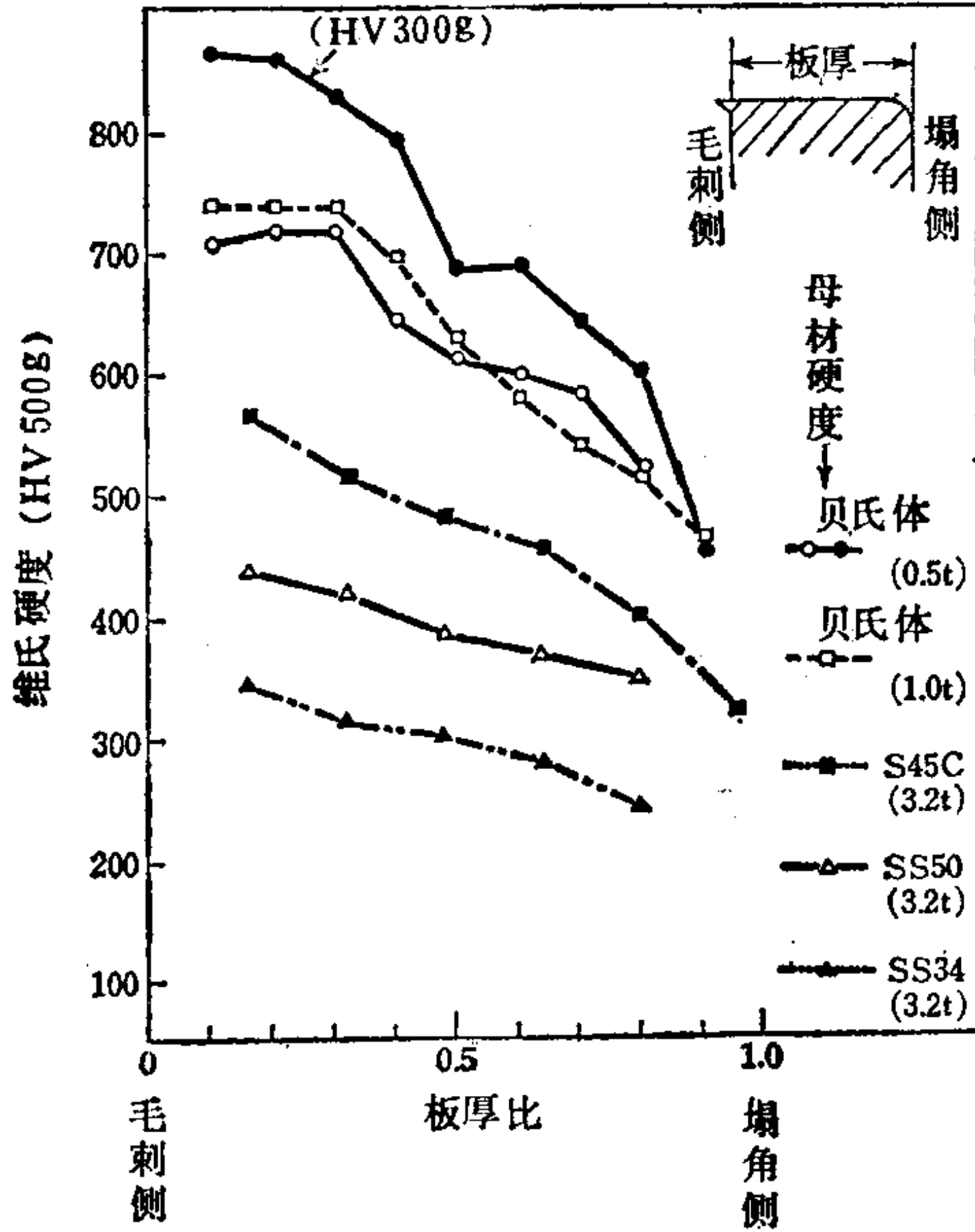


图2.124 剪切断面的表面硬度 (中川、鈴木, Cupka)

2.4.4 其他精密冲裁法

其他的板料精密冲裁法有下述的各种方法。

a. 对向凹模冲裁法^[61~79] 这是近藤提出的方法, 是利用通常的凹模和与之相对的带突起的凹模以及顶出器进行冲裁分离的方法。

加工工艺如图 2.125 所示, 在凹模刃口和带有突起的凹模外刃口之间产生剪切变形面, 利用与修整法同样的切削机理进行剪切。这时, 夹在两凹模之间的冲裁废料部分处于被压紧的状态, 由顶出器进行剪切分离。因此在剪切终期接近于带附加压缩的精密冲裁的剪切机理。顶出器也有配置在带突起凹模一侧的。

对向凹模冲裁法从加工机理方面可以看作是修整法中的重叠修整法或用于锻件修边的精整法应用于板料。这种方法同一般

的修整法相比，需要双动或三动压力机，模具结构也比较复杂。但是也有一些优点，即通过巧妙地使用顶出器或推杆可以实现使板的两面形成微小塌角和无毛刺的剪切；允许间隙也不那么严格。另外，这种方法与重叠修整法相同，相当于修整余量的搭边宽度的限制可以放宽，如图 2.126 所示，即使是搭边小的落料，废料也能遍及全周，利用顶出器一次行程即可完成，因而可以弥补修整法需要两道工序的最大缺点。不过对于冲孔或具有较深凹部轮廓的制件，需要采用在前工序中冲底孔等办法，未必能用一道工序完成。

这种方法与精密冲裁相比，其优点是：采取与修整法同样的加工机理，所以塌角减少；并且可冲裁具有凸形轮廓的制件；

适用于包括酚醛树脂层压板和铝合金等脆性材料在内的较广范围的材料；能适用于厚板；可以冲裁板宽小于板厚的材料。

实行这种方法的主要之点是搭边宽度和突起凹模的宽度，上述宽度要根据不同种类的材料具体决定。另外，对于延性材料，为了防止由于平凹模刃口在剪切后期引起裂纹，也有象光洁冲裁那样把凹模刃口制成圆角的。

目前，这种方法是采用也能同时进行精密冲裁的特殊液压机

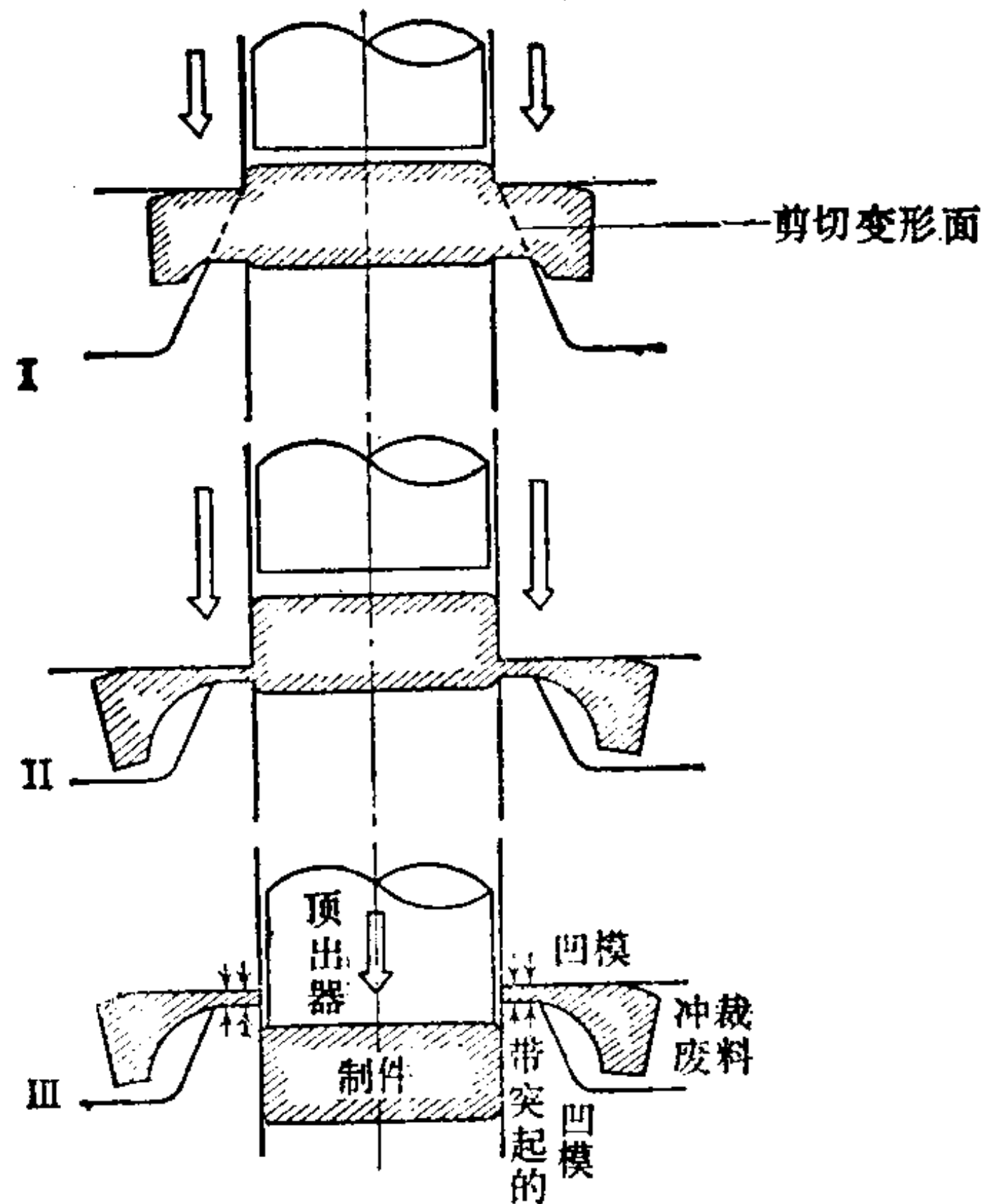


图2.125 对向凹模冲裁法（近藤）

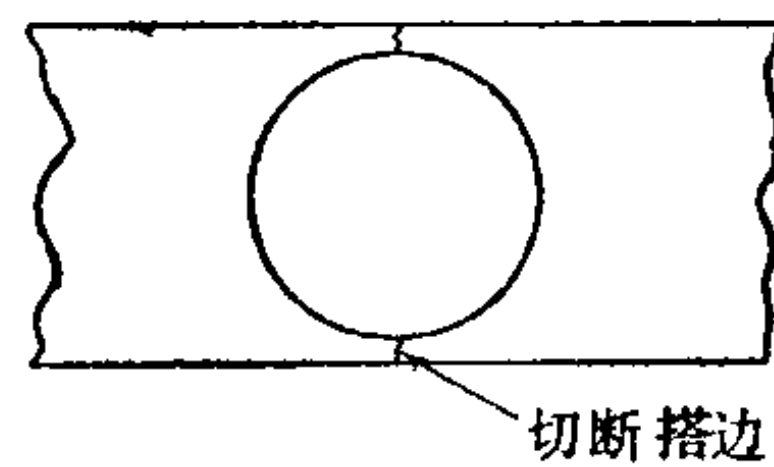


图2.126 带切断搭边的一次行程对向凹模冲裁法

进行的。这样就成为具有许多特长的新型精密冲裁法，可应用于制造不允许有塌角或毛刺的精密机械零件以及冲裁难以进行精密冲裁的厚板或特殊材料。

b. 往复冲裁〔62〕 在冲裁加工中之所以产生毛刺，是由于刃口磨损等原因，使裂纹的发展从刃口尖端少许进入模具面的缘故。

往复冲裁法就是使剪切断面的两角形成塌角，从而防止产生毛刺的方法。加工工艺如图 2.127 a) 所示，在给材料以某种程度的剪切变形的状态下一度中断其加工，然后用配置在与最初的模具相对位置的第二模具进行反向加工，使材料最初受到的剪切变形恢复原状。这时，如果最初的凸模冲入量适当，则最初行程中所产生的剪切面和塌角就不会消失而残留下来，在第二行程中由凹模刃口或由从残留剪切面尖端发生的裂纹使之剪裂分离。

因此，剪切断面如图 2.126 b) 所示，中间残留有剪裂面，两角形成塌角而不会产生毛刺。

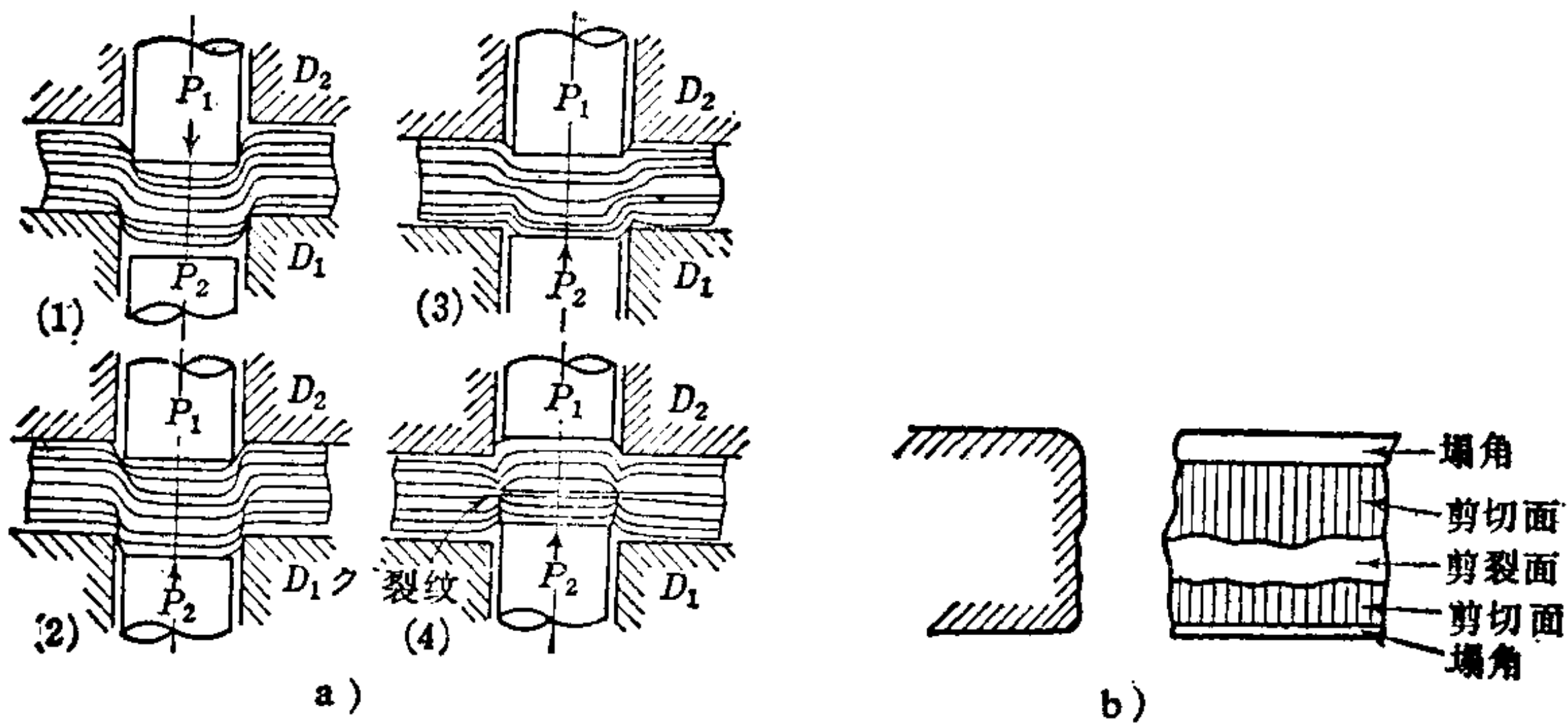


图2.127 往复冲裁（前田）

a) 各行程时材料的变形 b) 剪切断面

c. 振动往复冲裁〔63〕 这是利用往复冲裁模具，即用上下的凹模和凸模将材料固定，凸模作上下振动进行冲裁的方法，是为了冲裁脆性材料而开发的。在冲裁脆性材料时，当凸模稍有冲入的阶段就在刃口处沿约 45° 的方向发生无数裂纹（一次裂纹），

照这样继续冲裁下去，就会象图 2.128 a) 那样使一次裂纹继续成长，在剪切断面上留下凸凹不平的面。而振动往复冲裁法，是在一次裂纹尚小的时期，就使冲裁方向上下反复，从而使由上下模具引起的一次裂纹互相交叉，如图 2.128 b) 所示形成新的裂纹线(二次裂纹)，逐渐增加上下模具的振幅，使二次裂纹成长，结果得到平滑的剪切断面。

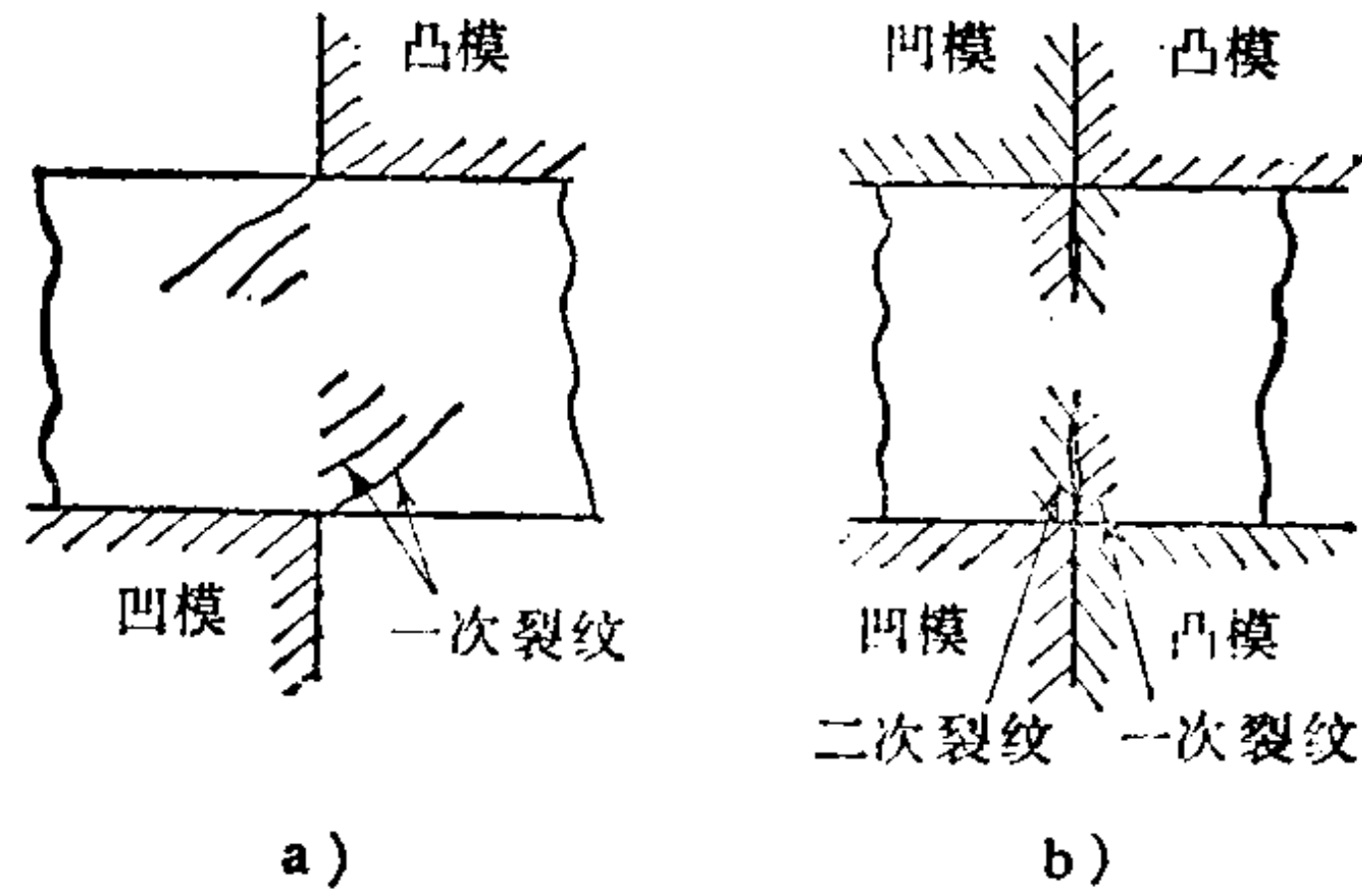


图2.128 振动往复冲裁 (北条)

a) 一般冲裁 b) 振动往复冲裁

对于用一般冲裁因为要发生表面裂纹，所以需要进行热冲的酚醛树脂层压板以及除砂轮切断以外不可能冲裁的铁氧体板材等脆性材料，采用振动冲裁也可得到良好的结果。采用这种方法需要考虑研制特殊的专用压力机。

d. 超声波冲裁 [64~65] 这种方法如图 2.129 所示，是在冲裁模的轴向给与超声波振动进行冲裁，本来是考虑用于冲裁酚醛树脂层压板的。在把超声波振动加在凸模上进行冲裁时，裂纹的成长过程同一般冲裁相比如图 2.130 所示。即一次裂纹的发生

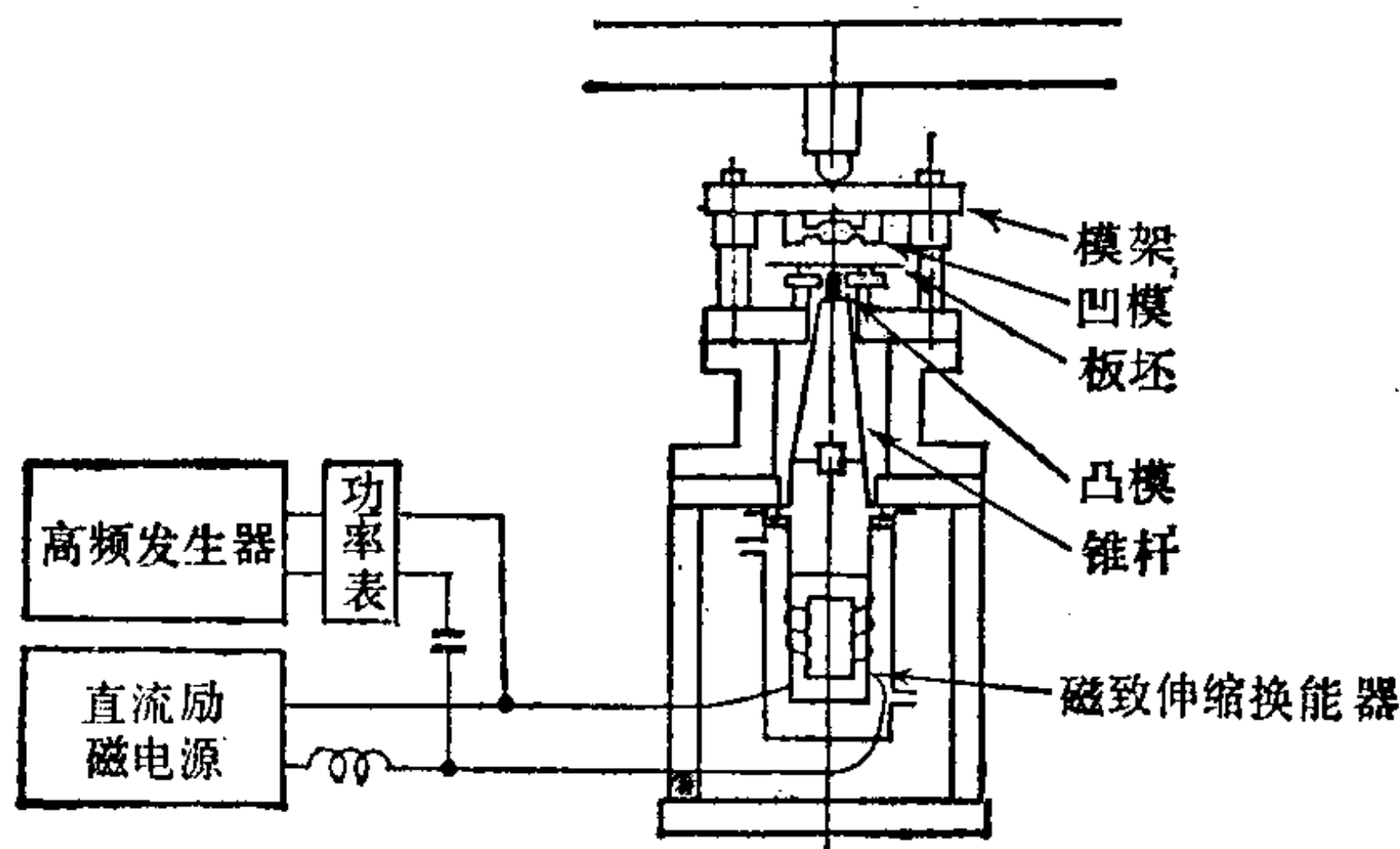


图2.129 超声波冲裁 (山内、小牧)

时期滞后,所发生的一次裂纹与板面平行,因而结合一次裂纹的二次裂纹与板面垂直。这种二次裂纹,如不加振动就偏向凹模侧的方向成长,但由于附加超声波振动,其成长有偏向凸模侧的方向或者是垂直于板面的方向的倾向。即凸模振动对孔的内表面有成效,而在冲裁外形时必须使凹模振动。除了使凸模振动冲小孔以外,利用这种方法都需要有大容量的超声波振动装置。

e. 凸模加热冲裁法〔65〕 凸模加热冲裁法是利用加热体把凸模加热进行冲裁的一种方法,是为了对酚醛树脂层压板冲孔而建立的。利用这种方法冲孔,其表面光洁度如图 2.131 所示,与一般的冲孔法相比有很大提高。冲孔时加在凸模上的热量传递给被加工材料,促进凸模附近材料的软化,抑制裂纹的产生与成长,与酚醛树脂层压板的热冲有同样的效果。为使这种方法获得良好的结果,要在一定程度上降低冲裁速度。

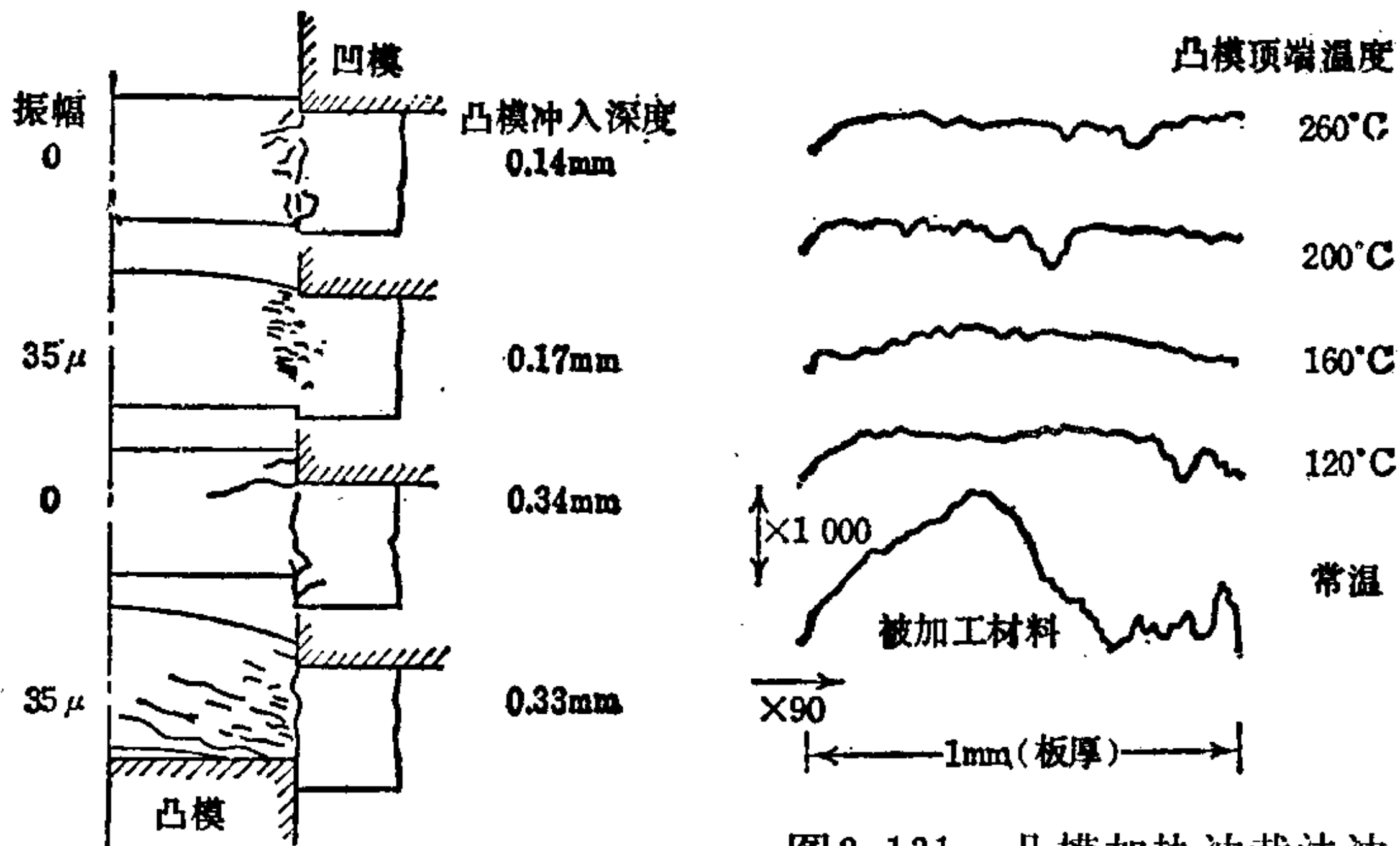


图2.130 超声波振动冲裁的裂纹发生与成长(山内、小牧)

酚醛树脂层压板 1 mm厚,间隙9.5mm[⊖],
凸模直径 ϕ 3 mm,冲裁速度 5 mm/min

图2.131 凸模加热冲裁法冲孔的内表面形状(山内、小牧)

被加工材料:酚醛树脂层压板(厚 1 mm),冲裁速度20mm/min,凸模直径 ϕ 10mm,间隙0.005mm

f. 刀刃剪切法〔51〕 这是很早以来就用于纸张、塑料和皮

⊖ 原文如此似误。——译注

革等非金属软质材料的切断式剪切法，是在刃口锋利的状态下通过刃部的切入而进行剪切分离的，制件剪切面的平滑度良好。但是通常的切断式剪切，为了保护刃口，下垫也采用软质材料。采用这种方法，使用硬下垫，即使是冲剪铝或铜等软质金属板，也能得到剪切面平滑而且塌角少的精密剪切件。利用硬下垫冲剪金属板会降低模具寿命，为了解决这个问题可采取如图2.132 a)所示的方法，即在金属下垫上开有沟槽使其在剪切时成为非接触状态。采用这种方法，如果刃口的间隙不是非常小，就要产生剪裂面。

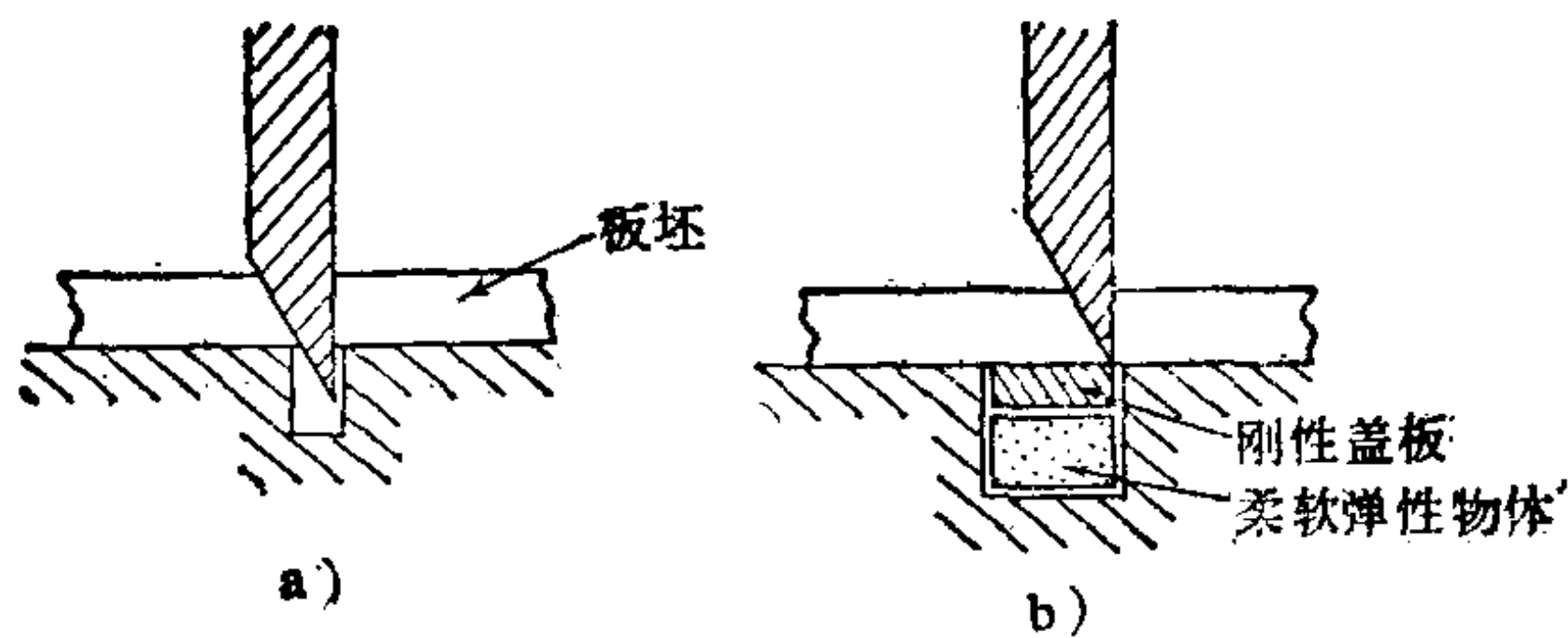


图2.132 刀刃切断法(前田、铭莉)

a) 带沟槽的下垫 b) 沟槽中装有填料的下垫

该间隙的允许值很小，在实用上是相当麻烦的，为了扩大间隙值可采用如图2.132 b)所示的办法。即在下垫沟槽中装入弹性物体，用刚性材料制成盖板盖在上面。

另外，即使将刀刃尖端制成稍带平面，剪切面的状态也不会恶化，如果少许带有圆角剪切面还能成为镜面。这种方法适用于轮廓比较简单的软质金属的剪切，是一种小批量生产的简易精密冲剪法，也能用于塑料棒或管的剪切。

2.5 冲裁件形状的选择方法〔75~76〕

设计冲压件时，在不特别影响制件性能的前提下，为了便于设计制造冲模及容易制造冲压件，应考虑形状的选择方法。将其中要点叙述如下。

(1) 具有宽度 b 超过板厚 t 的 2 倍的狭窄桥部或突起等的复杂形状冲裁件, 在设计时要尽量加以避免。如图 2.133 a) 所示为桥部或突起的宽度

$$b \geq 2t。$$

(2) 不要有锐利的尖角。内角的圆角半径 r 当然是大些好, 至少也要超过板厚的 1/2 ($r \geq 0.5t$, 参见图 2.133 b)。

(3) 在用一道工序冲裁时, 拐角处应尽量设计成较大的圆角。

在用二道工序以上冲裁外形时不在此限 (参见图 2.133 c)。即使将冲裁凹模拐角处不制成圆角 (圆角半径为零), 在冲裁件上也必然出现半径为间隙的 2.5 倍的圆角, 因此严格地说不可能制成具有尖角的制

件。在选择不影响制件功能的冲压件外拐角处的圆角值或内拐角处的圆角值时, 要考虑到便于设计和制造冲模以及容易制造冲压件, 同时还要考虑延长模具寿命等问题。图 2.134 所示的圆角下限值为:

$$0.25 \leq r / t \quad (r \text{ 为圆角半径, } t \text{ 为板厚})$$

冲裁件的 r / t 值小于 0.25 时, 模具寿命大大缩短 (参照图 2.35)。

(4) 宽度 B 为板厚 t 的 3 倍以下的细长零件, 以不采用冲

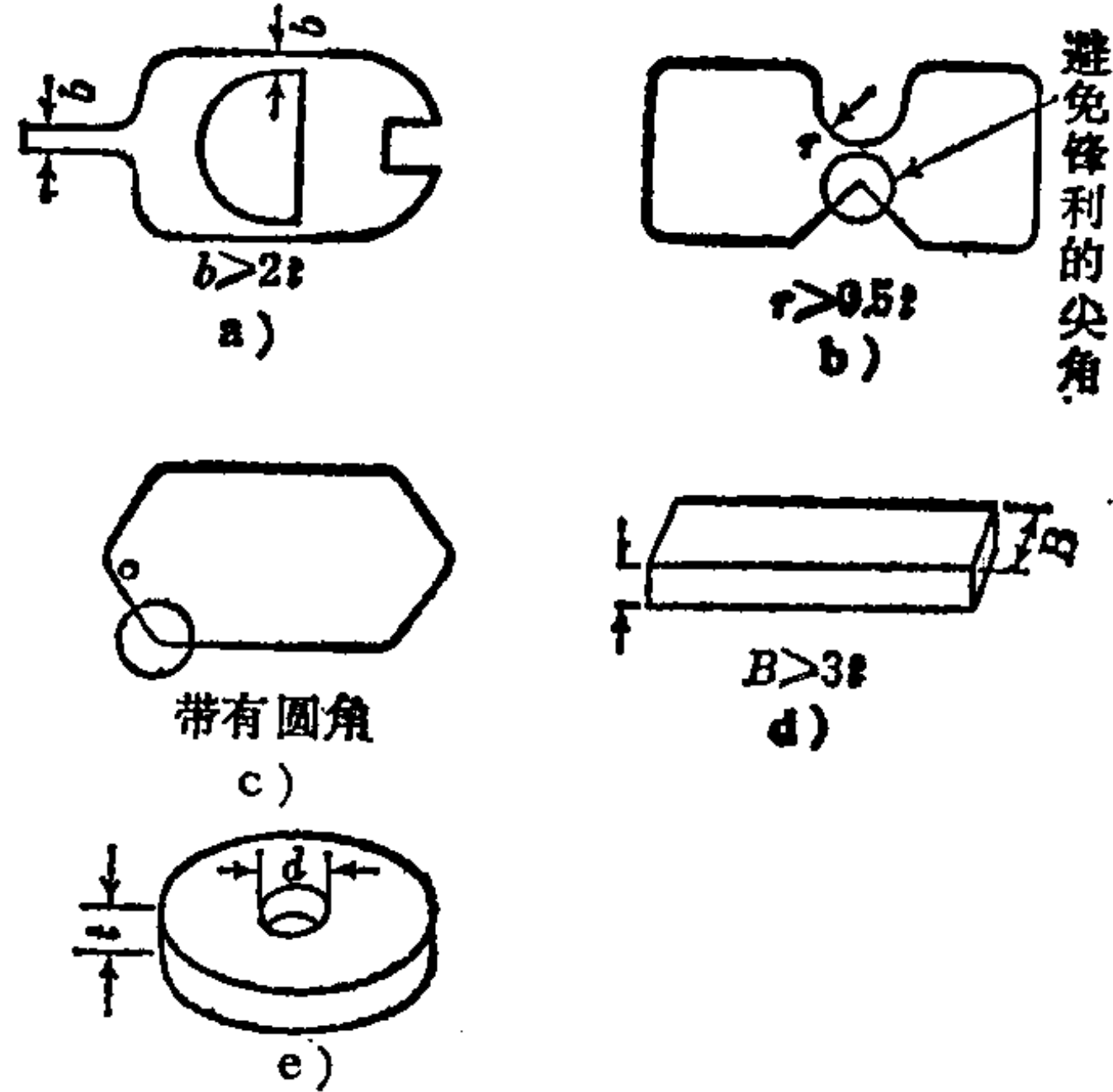


图 2.133 在设计冲裁件时应考虑之点

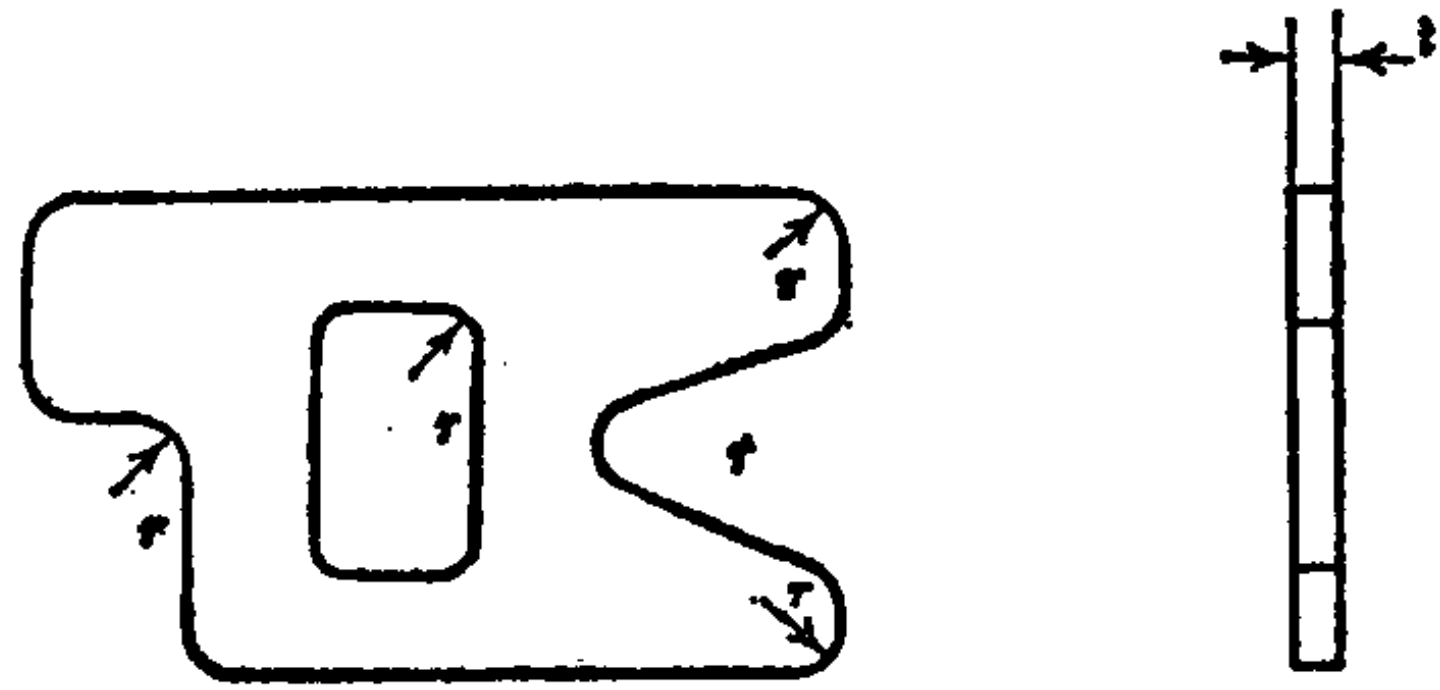


图 2.134 冲裁件

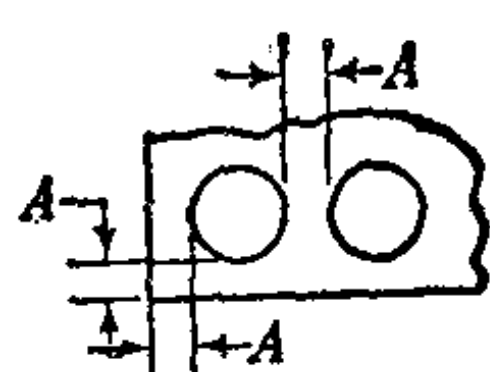
裁法制造为宜。采用将金属丝压扁的方法来制造较好（参见图 2.133 d）。

（5）利用冲裁法冲小孔的直径是有极限的〔75〕（参见图 2.133 e），表 2.19 所示为其极限值。

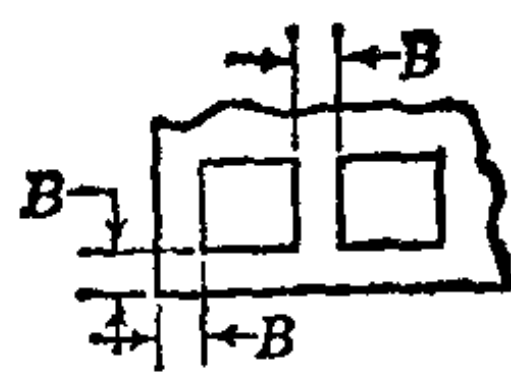
表 2.19 可冲的最小孔径 d ($t =$ 板厚)

被加工材料	普通冲孔		具有精密的卸料板导向的模具冲孔 ($d \geq 0.4\text{mm}$)	
	圆形凸模	矩形凸模	圆形凸模	矩形凸模
中碳钢	$1.3t$	$1.0t$	$0.5t$	$0.4t$
低碳钢、黄铜	$1.0t$	$0.7t$	$0.35t$	$0.3t$
铝	$0.8t$	$0.5t$	$0.3t$	$0.28t$

（6）关于带孔的冲裁件要按图 2.135 确定孔的边缘与零件外形线之间的距离。



a) 冲圆孔



b) 冲方孔

板厚 $\leq 1.55\text{mm}$ 时	最小距离 A 3.1mm
$> 1.55\text{mm}$ 时	板厚的 2 倍

板厚	最小距离 B 4.6mm
$> 2.3\text{mm}$ 时	板厚的 2 倍

图 2.135 金属板的冲孔位置

（7）在深拉伸件等的底部冲孔时，孔的位置按图 2.136 确定，但不能太接近制件的侧壁。

（8）冲孔后冲裁件还要进行弯曲加工时，孔的位置如图 2.137 所示，要设在稍微离开弯曲部分的地方。

除上述几点之外，在冲压加工与模具寿命之间的关系方面，还应注意零件形状，见表 2.20。

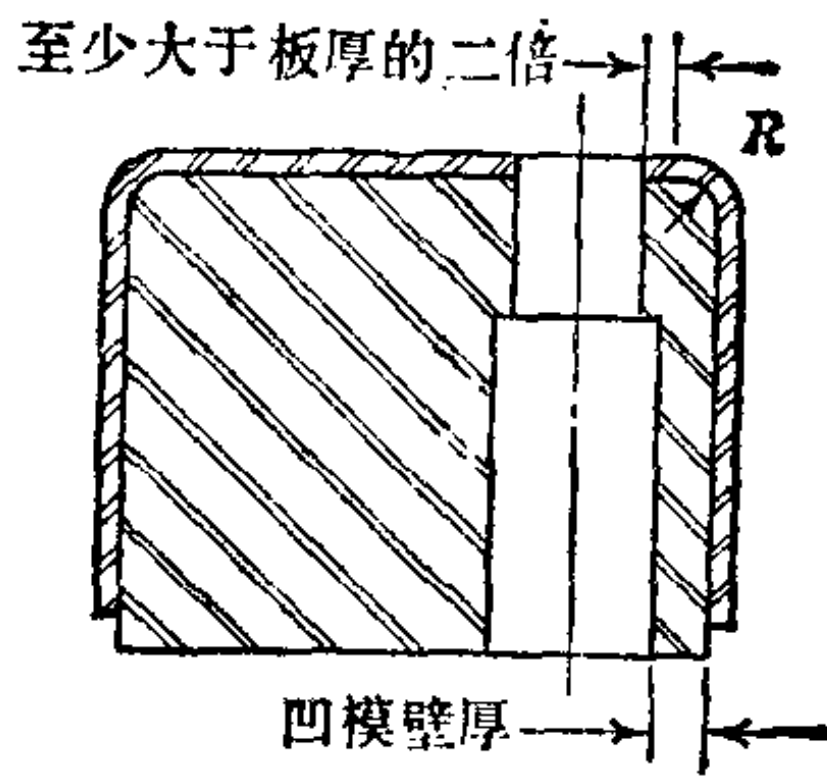


图2.136 深拉延件底部的冲孔

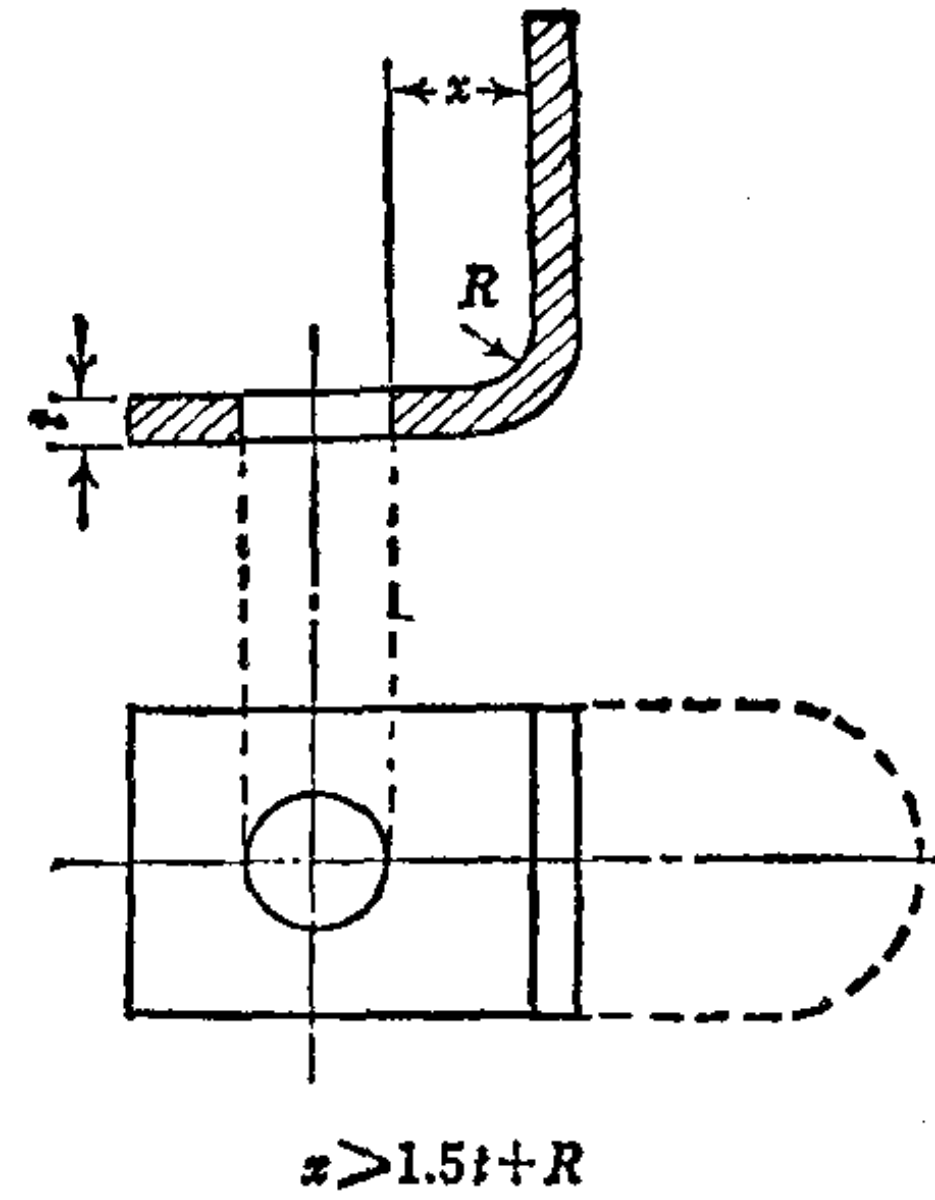
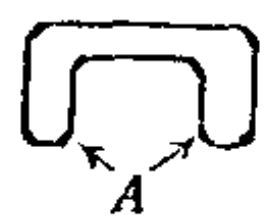
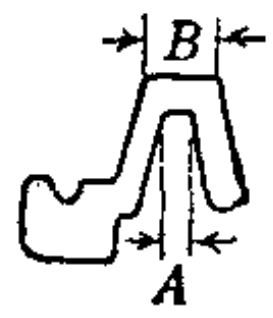
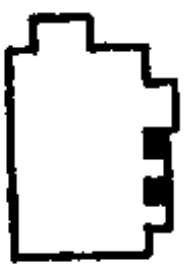
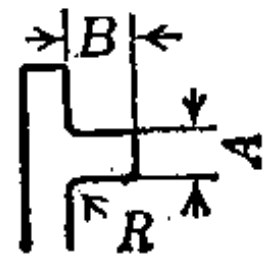
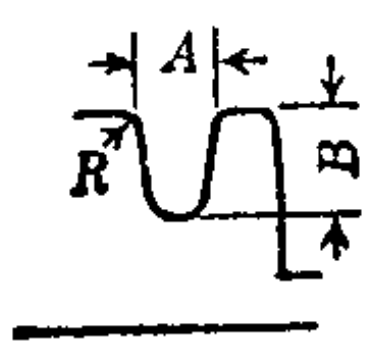
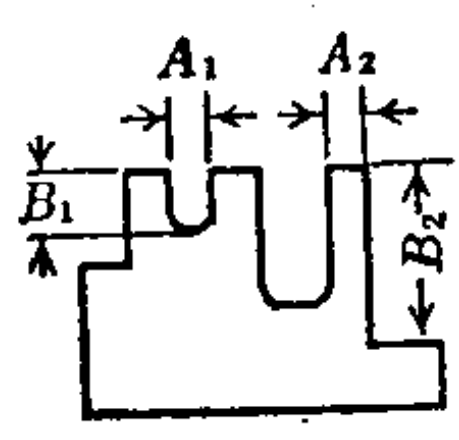

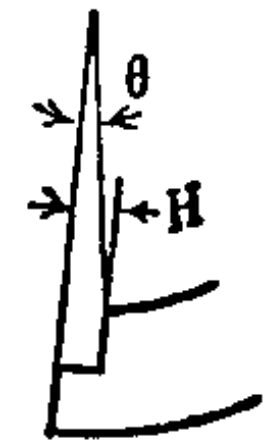
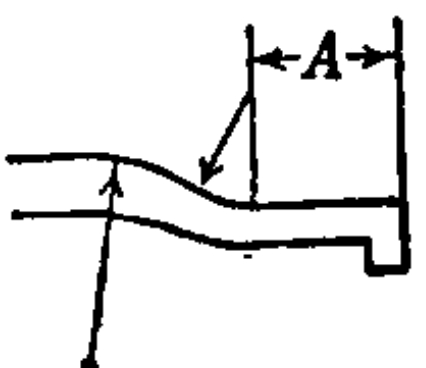


图2.137 冲孔后需弯曲时孔的位置

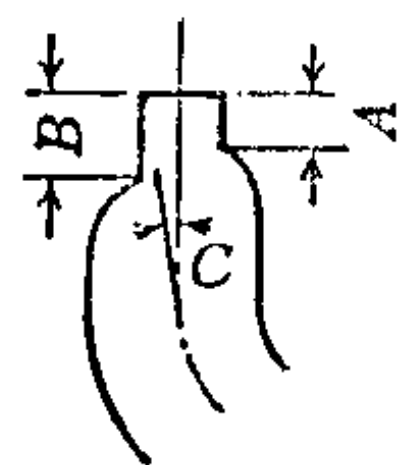
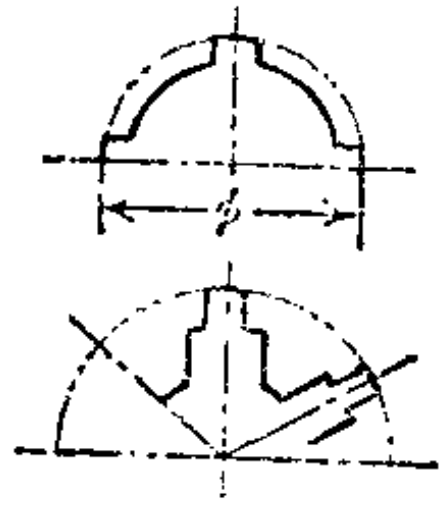
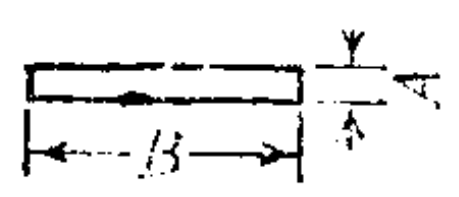
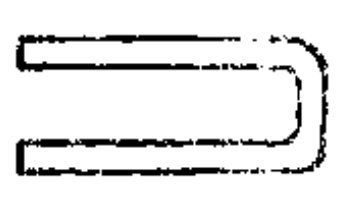
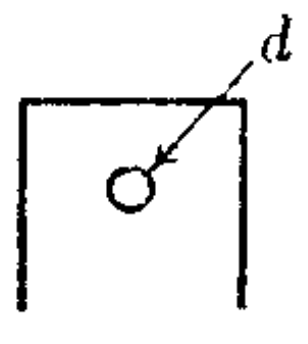
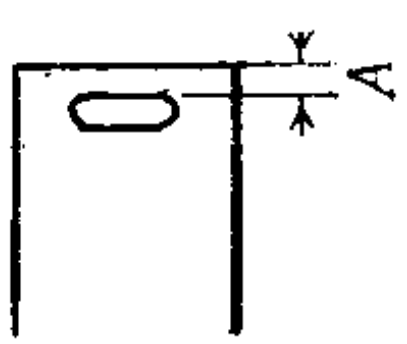
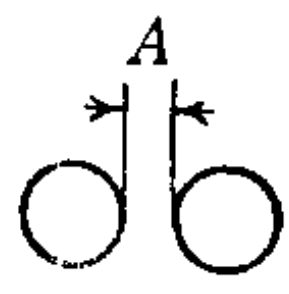
表2.20 形状选择法

冲压加工的种类	项目	简图	内容	理由
落料	落料拐角的圆角半径		$>0.25 t$	模具寿命
落料	落料拐角的圆角半径	—	在 $R0.6\text{mm}$ 以下无数值限制时, 要指出: “没有指定的拐角可给以小的圆角半径”	模具寿命
落料	落料拐角的圆角半径	—	需退火时必须规定 $R0.5\text{mm}$ 以上	退火拐角产生缺陷
落料	落料拐角的圆角半径		厚件 (4 mm 以上) 要带 $R1\text{mm}$ 以上的圆角, 特别是U形的尖端A部	模具寿命
落料	带斜度的根部尺寸公差		$A、B$ 的公差取 $\pm 0.02\text{mm}$	测量困难
落料	热冲层压板的落料尺寸		取最小公差为 $\pm 0.2\text{mm}$	因有温度收缩, 当 $t = 0.6\text{mm}$ 以下时, 要使用冷冲用的材料

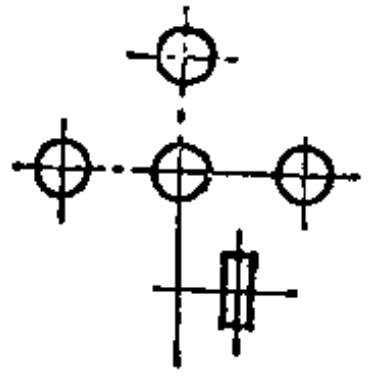

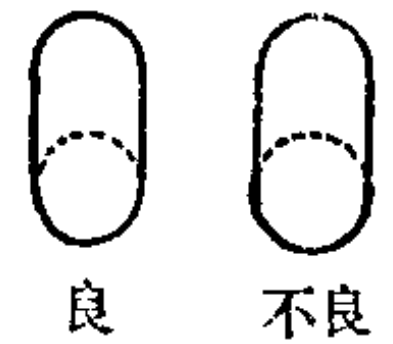
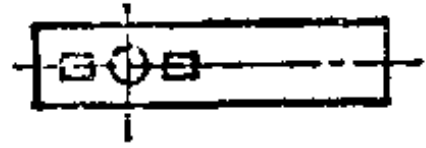
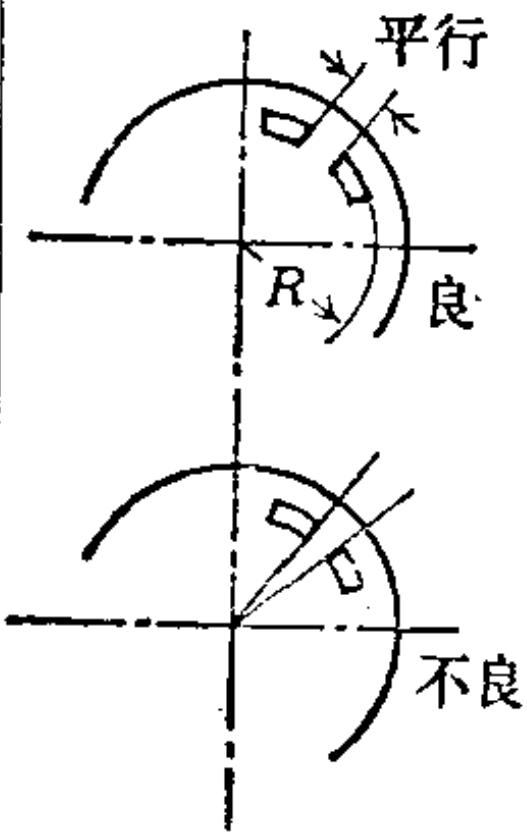
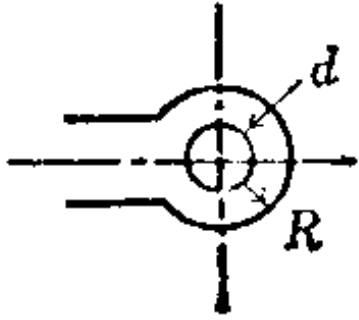
(续)

冲压加工的种类	项目	简图	内容	理由
落料	层压板的极限值		(例) 加入白布的特殊层压板, 当 $t = 2$ 时, 不能冲宽度 $1.5 \times$ 切深 2.5 的沟槽缺口	模具温度, 材料
落料	凸起的形状		$B_s P_s - \frac{1}{4} H t 0.3$ $A = 1.5 \text{ mm}, B = 2 \text{ mm}$ $R = 0.3 \text{ mm}$	凸模的强度
落料	凹挡的形状		$B_s P_s - \frac{1}{4} H t 0.8$ $A = 1 \text{ mm}, B = 1 \text{ mm}$ $R = 0.3 \text{ mm}$	凹模的强度
落料	有凹凸的落料极限		$A_1 = A_2 > 2t$ $B_1 = B_2 < 3t$	模具的强度
落料	中间扩大的沟槽		要避免中间扩大的沟槽	模具的强度
落料	尺寸标注法		以 θ 作为参考值标注 H	模具设计尺寸规定
落料	尺寸标注法		用圆弧连接时, 标注圆的中心 A	模具设计尺寸规定

(续)

冲压加工的种类	项目	简图	内容	理由
落料	尺寸标注法		偏心时, $C \neq 0$, 标注 A 和 B	模具设计尺寸规定
落料	外周圆形		外周不标注直线, 标注圆弧	模具设计尺寸规定
冲孔	细长孔、沟槽的极限		$A_{\min} = 1.7t$ 时 $B_{\max} = 60t$	考虑模具强度在极限内时寿命有问题
冲孔	极限以上的沟槽	—	落料连接段规定为 0.1mm	要适合压力机工作和冲压加工的精度
冲孔	工字形沟槽			
冲孔	孔径的极限		$d = 1.2t$ 退火(热)的最小记录是 $t = 1.2\text{mm}$ 时 $d = 0.8\text{mm}$ $t = 1.6\text{mm}$ 时 $d = 1.2\text{mm}$	模具寿命
冲孔	接近外周的孔		$A_{\min} = 1.2t$ 退火时 $A_{\min} = 1\text{mm}$ $t = 1.2\text{mm}$, $A = 1\text{mm}$ $t = 1.6\text{mm}$ $A = 1.5\text{mm}$	因为产生隆起的断面弯曲, 在退火时产生裂纹或隆起
冲孔	孔间距		$(A)_{\min} = 1\text{mm}$, 不锈钢为 2mm , $A_{\min} = 1.2t$ 退火时 $t = 1.2\text{mm}$ $A = 1.0\text{mm}$ $t = 1.6\text{mm}$ $A = 1.2\text{mm}$	模具寿命, 退火时产生裂纹

(续)

冲压加工的种类	项目	简图	内容	理由
冲孔	标注方法		一个制件上有方孔和圆孔时圆孔的位置要以方孔为基准	便于研磨
冲孔	月牙形状		选月牙形比马蹄形好	有利研磨
冲孔	椭圆形		不要有棱角 (半径与宽度相同)	便于模具加工, 为了淬火后的磨削
冲孔	工艺孔		只有方孔或 $\phi 4 \text{ mm}$ 以下的小孔要设 $\phi 5 \text{ mm}$ 以下的工艺孔	提高冲压效率
冲孔	圆形制件上的方孔		不要标注矩形孔, 标注由同心圆弧构成的孔的形状, 而且槽的宽度要平行	便于模具加工
冲孔			$d \geq 1.2 t$ $R \geq 1.6 t$	模具强度, 制件的平直度

关于用冲裁加工得到的制件，其尺寸公差的标准见表2.21、表2.22和表2.23。至于怎样才能适应零件公差的要求，必须仔细研究模具材料，模具的制造方法和模具结构等。

表2.21 冲裁件外径尺寸的标准公差(mm)

板 厚 (mm)	一般冲裁的精度				精密冲裁的精度				修整的精度		
	零 件 外 形 尺 寸										
	<10	10~50	50~150	150~300	<10	10~50	50~150	150~300	<10	10~50	50以上 100以下
0.5~0.5	0.08	0.1	0.14	0.20	0.025	0.03	0.05	0.08	—	—	—
0.5~1.0	0.12	0.16	0.22	0.30	0.03	0.04	0.06	0.10	0.012	0.015	0.025
1.0~2.0	0.18	0.22	0.30	0.50	0.04	0.06	0.08	0.12	0.015	0.02	0.03
2.0~4.0	0.24	0.28	0.40	0.70	0.06	0.08	0.10	0.15	0.025	0.03	0.04
4.0~6.0	0.30	0.35	0.50	1.00	0.10	0.12	0.15	0.20	0.04	0.05	0.06

表2.22 冲孔内径尺寸的标准公差 (mm)

板 厚 (mm)	一般冲孔的精度			精密冲孔的精度			修整的精度	
	孔 径 尺 寸							
	<10	10~50	50~150	<10	10~50	50~150	<10	10~50
0.2~1	0.05	0.08	0.12	0.02	0.04	0.08	0.01	0.015
1~2	0.06	0.10	0.16	0.03	0.06	0.10	0.05	0.02
2~4	0.08	0.12	0.20	0.04	0.08	0.12	0.025	0.03
4~6	0.10	0.15	0.25	0.06	0.10	0.15	0.04	0.05

表2.23 孔距的标准公差(mm)

板 厚 (mm)	一般冲孔的精度			精密冲孔的精度		
	中 心 距 尺 寸					
	<50	50~150	150~300	<50	50~150	150~300
<1	±0.1	±0.15	±0.2	±0.03	±0.05	±0.08
1~2	±0.12	±0.20	±0.3	±0.04	±0.06	±0.10
2~4	±0.15	±0.25	±0.35	±0.06	±0.08	±0.12
4~6	±0.2	±0.30	±0.4	±0.08	±0.10	±0.15

2.6 非金属材料的冲裁

随着石油化工的发展,各种塑料作为制造机械零件的材料被大量应用。因而对塑料类原材料的剪切和落料等高精度高效率的冲裁加工就成了问题。另外,不仅是单纯的塑料,就连加入玻璃纤维的增强塑料和贴有铜等导电体的酚醛树脂层压板等复合材料的冲裁也是重要的。

2.6.1 酚醛树脂层压板

a. 冲裁过程和剪切断面 这种材料是以纸、布、石棉布和玻璃布等为基体材料的层压材料。酚醛树脂本身是热固性的脆性材料,因而这种材料的冲裁过程与金属或热塑料等不同〔66〕。在这种材料上呈现出特有的剪切断面。即在行程初期材料经弹性变形之后,如图 2.138 a) 所示,在材料内部由于脆性破坏引起的若干细微裂纹向刃口的外侧发展。这种裂纹叫做一次裂纹,然后如图 b) 所示在 β 方向产生连接这些裂纹的二次裂纹,于是材料进行分离,冲裁载荷急剧下降。但是,象落料或冲孔那样,或者利用压边圈与顶板等工具使材料受到充分约束,则如图 c) 所示,使模具行程继续前进,就能由模具刃口切削材料的分离面而结束整个冲裁过程。因此,剪切断面如图 2.139 所示,由切削形成的剪

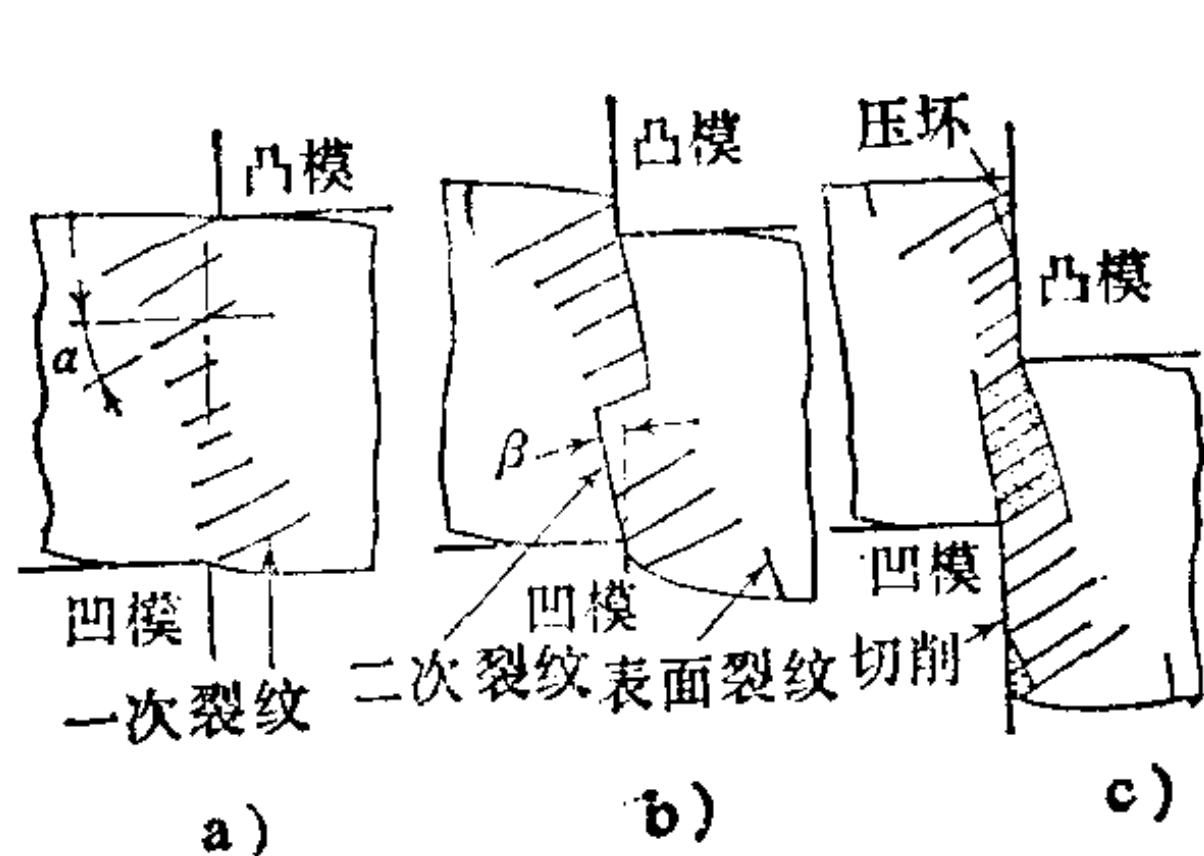


图2.138 一般的冲裁过程

a) 1次裂纹发生期 b) 2次裂纹发生期 c) 切削期

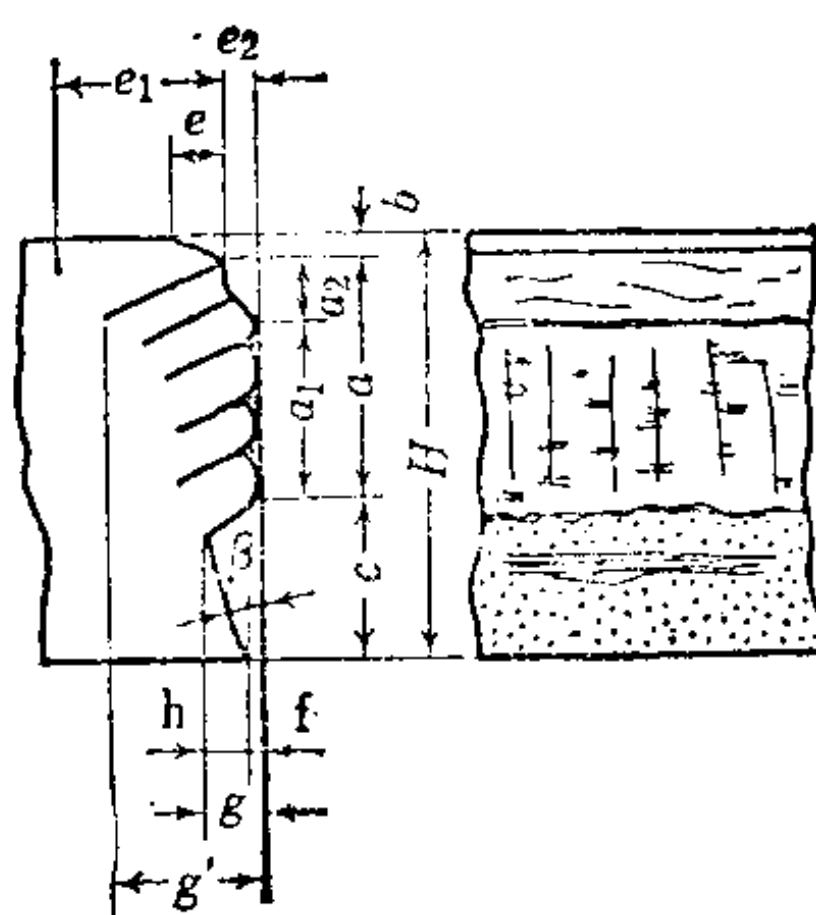


图2.139 剪切面的形状

a 为剪切面 b 为塌角
c 为剪裂面

切面，由一次裂纹和二次裂纹构成的剪裂面以及在模具刃口切入材料时出现的塌角构成，基本上看不到在金属冲裁时出现的毛刺，塌角也非常小。在多数场合，如图 2.139 所示，在塌角 e 的外侧，产生平行于冲裁轮廓线的表面裂纹，并且在这个范围内发生变色现象。另外，在冲裁过程中上翘的材料给模具表面以强大的压力，所以在剪切面 a 表层一侧的一部分，产生深度为 e_2 的剪切面缺口 a_2 ， a_2 的长度大体上等于达到最大载荷时的凸模冲入量。因为剪切面 a_1 是由模具刃口切削的，所以应该叫做切削面，但在一般情况下可以看到无数的微细缺口，因而称为所谓崩刃的表面状态。剪裂面 c 是由一次裂纹和二次裂纹所形成的三角形沟槽状部分，有大量的碎屑附在上面，有时这种碎屑也被埋在沟槽里面。由于情况不同也发生如图 2.140 所示的情况，在刃口附近的一次裂纹发展

严重时，会从这种裂纹的尖端产生向别的方向发展的二次裂纹，因而由一次裂纹和二次裂纹所包围的三角形的较深的剪裂面几乎扩展到整个板厚。

这种较深的三角形

叫做凹陷，其深度 g 大致等于一次裂纹的深度。这种剪切断面在常温下无约束冲裁时经常可以看到。对这样的脆性材料来说，材料的约束状态对二次裂纹以后的剪切过程影响很大。

层间剥离性大的材料会产生层裂，因而其冲裁过程与上述的稍有不同。即如图 2.141 所示，层间剥离的各层由于拉力的作用而断裂，所形成的剪切断面一般都不光洁。云母的冲裁就是明显的例子。

在冲直径小于板厚的小孔时，其冲裁过程也同上述略有不同

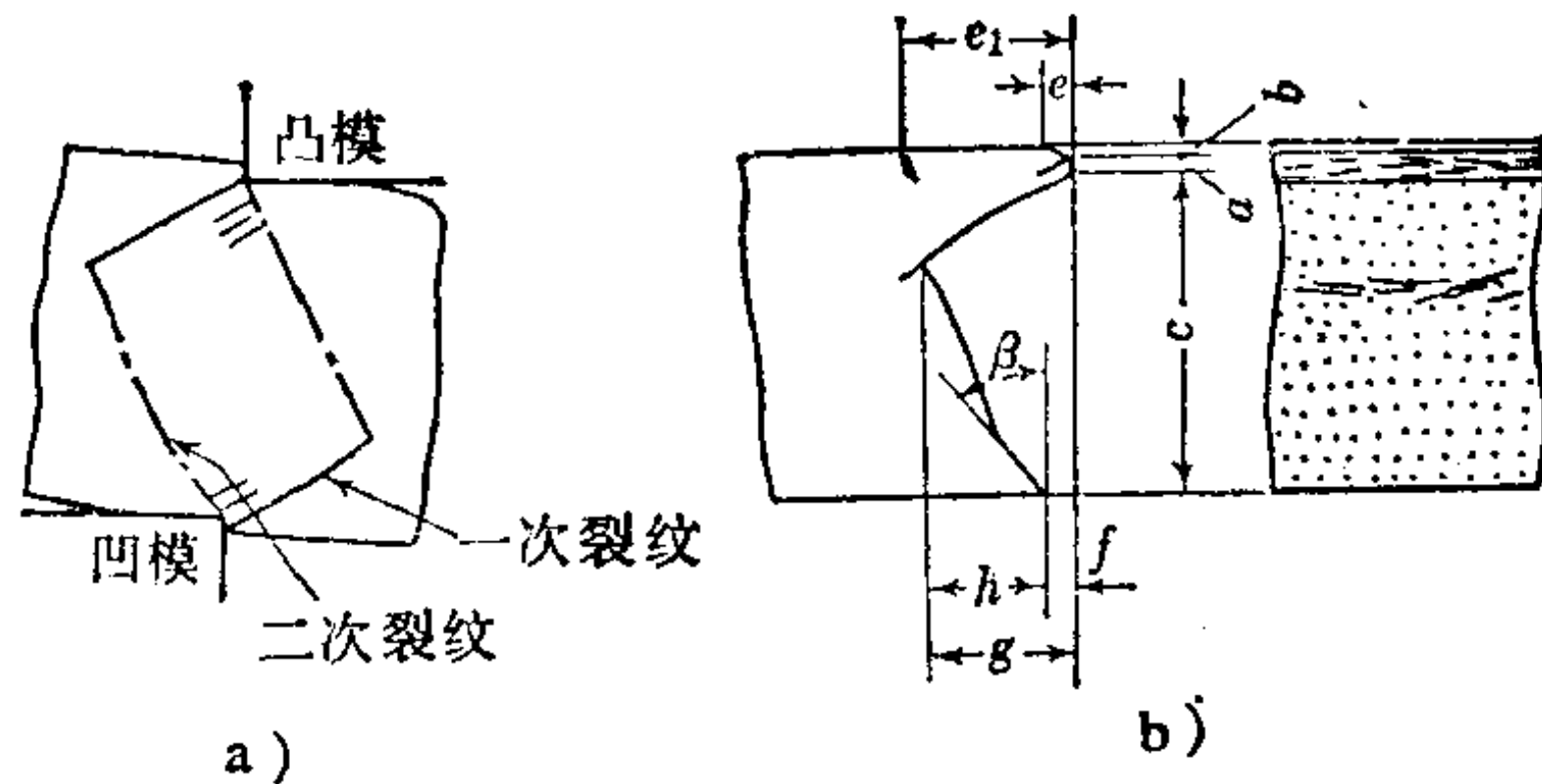


图 2.140 一次裂纹严重的剪切断面形状

a) 二次裂纹发生期 b) 剪切断面形状

同，如图 2.142 所示，会在凸模刃口尖端产生大的二次裂纹，这种二次裂纹与从凹模刃口尖端产生的一次裂纹合成一体，在凸模下面的坯件（多数场合是余料）上产生较大的凹陷，但凹模上的冲孔内表面却几乎全是剪切面，缺口 a_2 和剪裂面 c 是极小的。

酚醛树脂层压板由于冲裁时应力的作用，在冲裁轮廓附近的材料表面上，会产生各种各样的缺陷。如图 2.143 所示的表面裂纹和阴影具有代表性。

其中，表面裂纹如图 2.144 所示，由于材料自由表面层的拉伸破坏可分为以下两种类型，即在 B 、 D 处产生的表面裂纹和在与模具接触的压痕

面的边界 A 、 C 处产生的裂纹。在冲小孔时凸模周围的外侧会产生如图 2.143 所示的放射线状表面裂纹，或者是被称为“阴影”的与孔同心的涉及很广的变色层，还会产生如图 2.142 所示的被称为“隆起”的鼓胀 j 。

关于这些缺陷，可以认为当凸模冲入材料时，如果材料具有塑性则因侧压力的作用而产生隆起，如果缺乏塑性则在基体材料之间引起剥离而产生阴影〔67〕。隆起的大小因冲裁条件不同而变化，如图 2.145 所示，当孔径小时，隆起的高

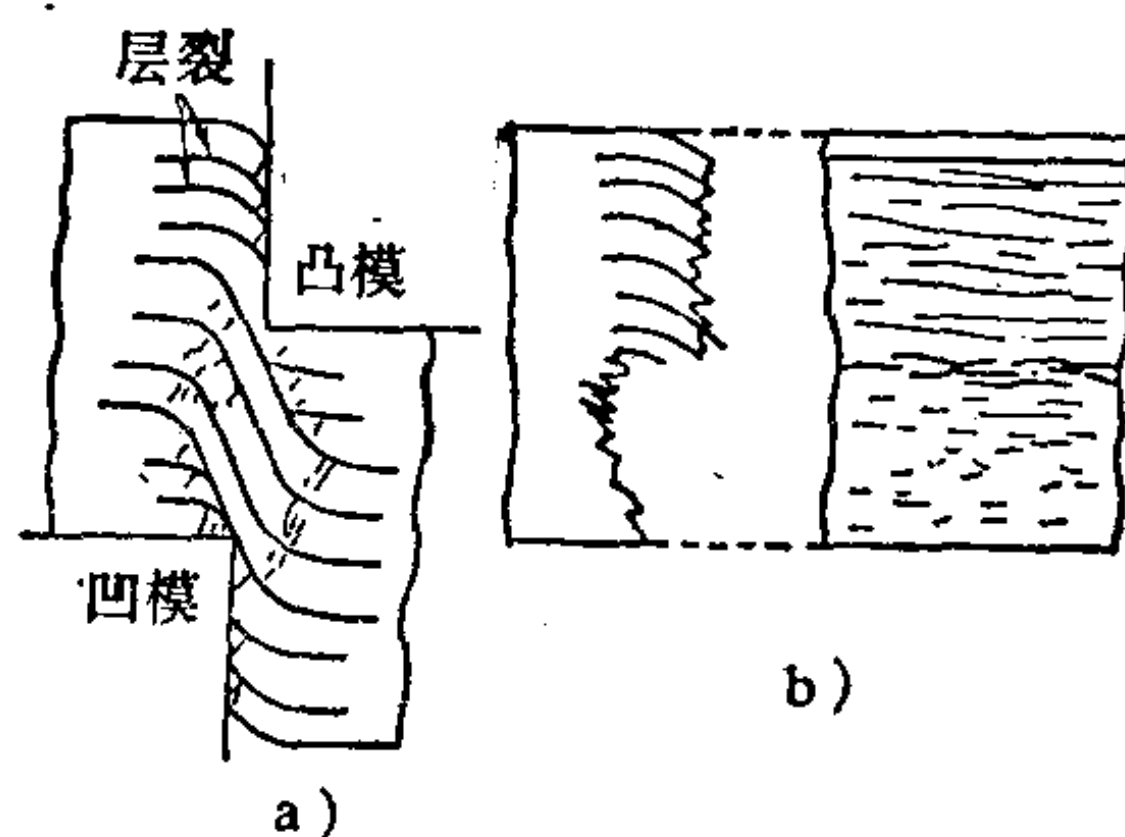


图 2.141 层间剥离性显著的材料剪切断面形状

a) 冲裁过程 b) 剪切断面形状

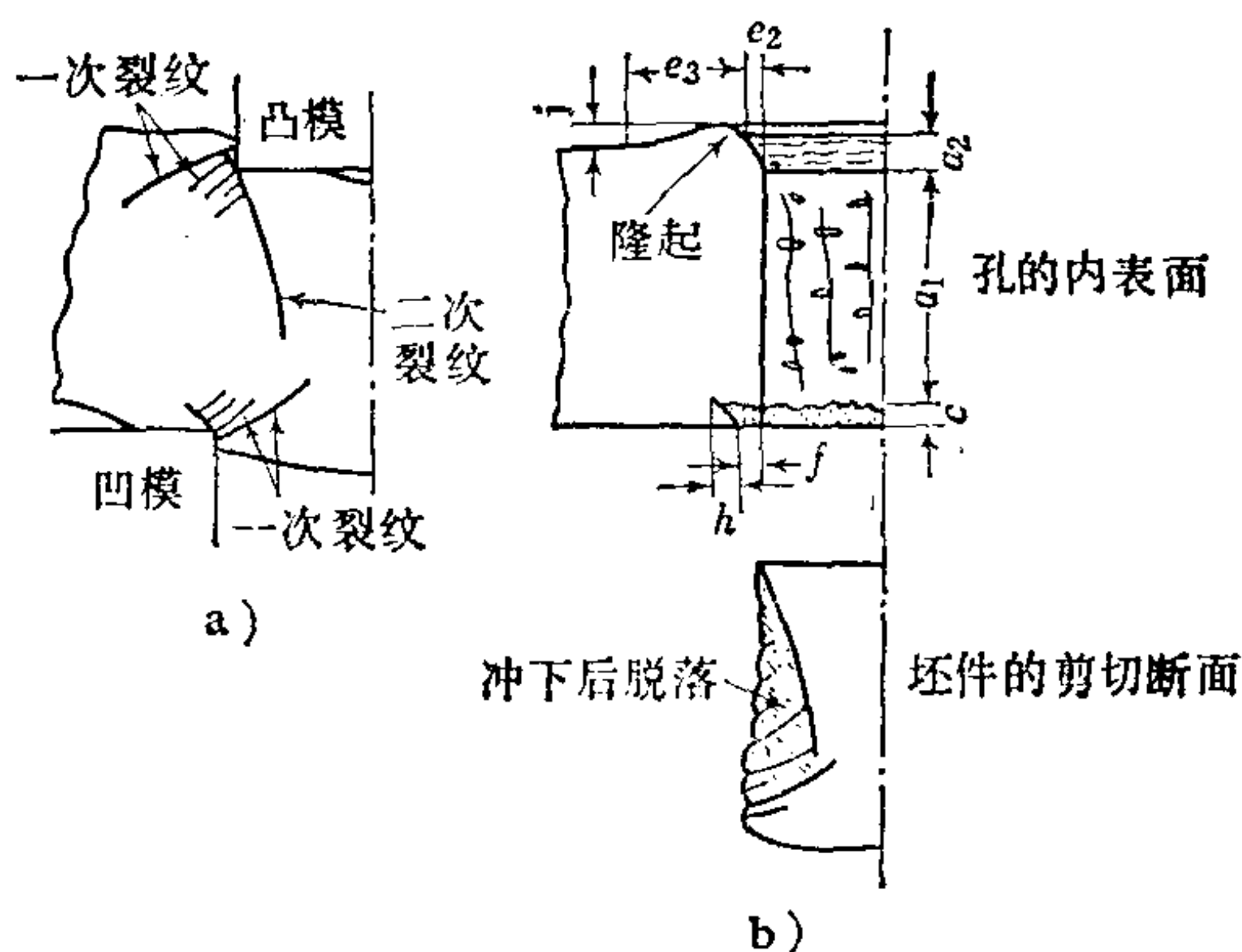


图 2.142 冲孔的剪切断面形状

a) 冲裁过程 b) 剪切断面形状

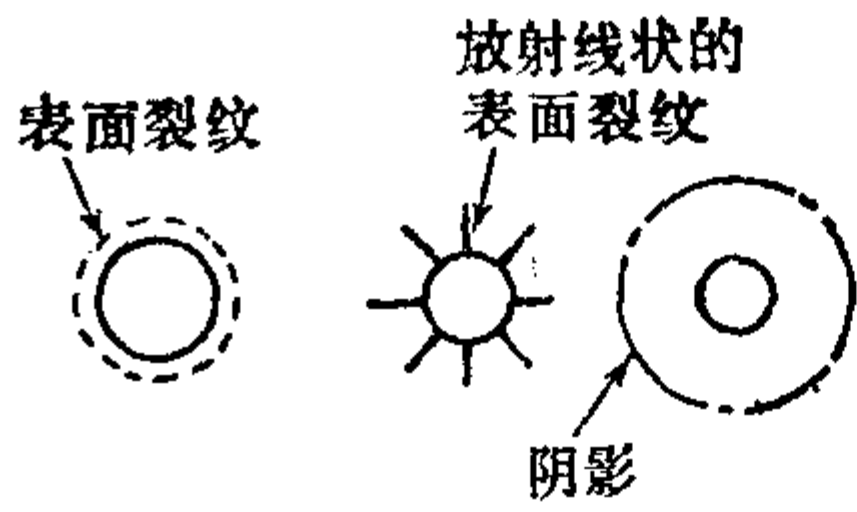


图2.143 表面裂纹和阴影

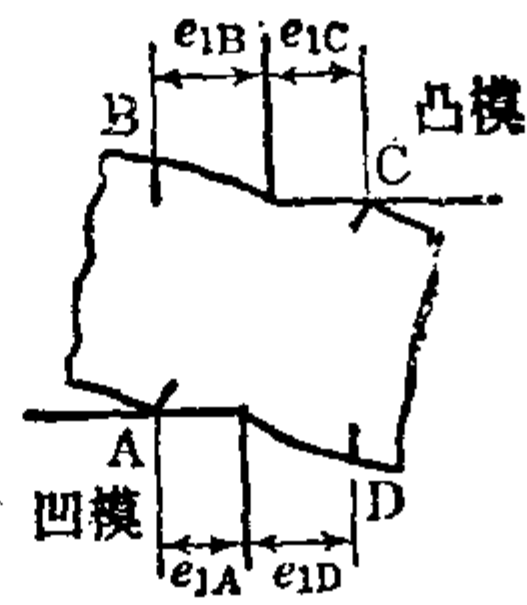


图2.144 表面裂纹的发生部位

B、D：自由面上的裂纹 A、C：压痕边界上的表面裂纹

度就急剧增大。另外，如图 2.146 所示，当间隙减小，隆起的高度增加。关于材料加热的条件，如图 2.147 所示，在用 250℃ 左右的高温加热，当加热时间为 15~30 秒时隆起高度为最小。在 185℃ 以下的低温加热时，加热温度和加热时间对隆起的影响不大。关于凸模侧面的精加工，其表面光洁度 R_{max} 为 4μ 左右的比 1μ 的隆起高度往往稍低一些。另外，电性能高的材料隆起高度较低，而电性能较低软质的冲裁性能好的材料隆起高度大。

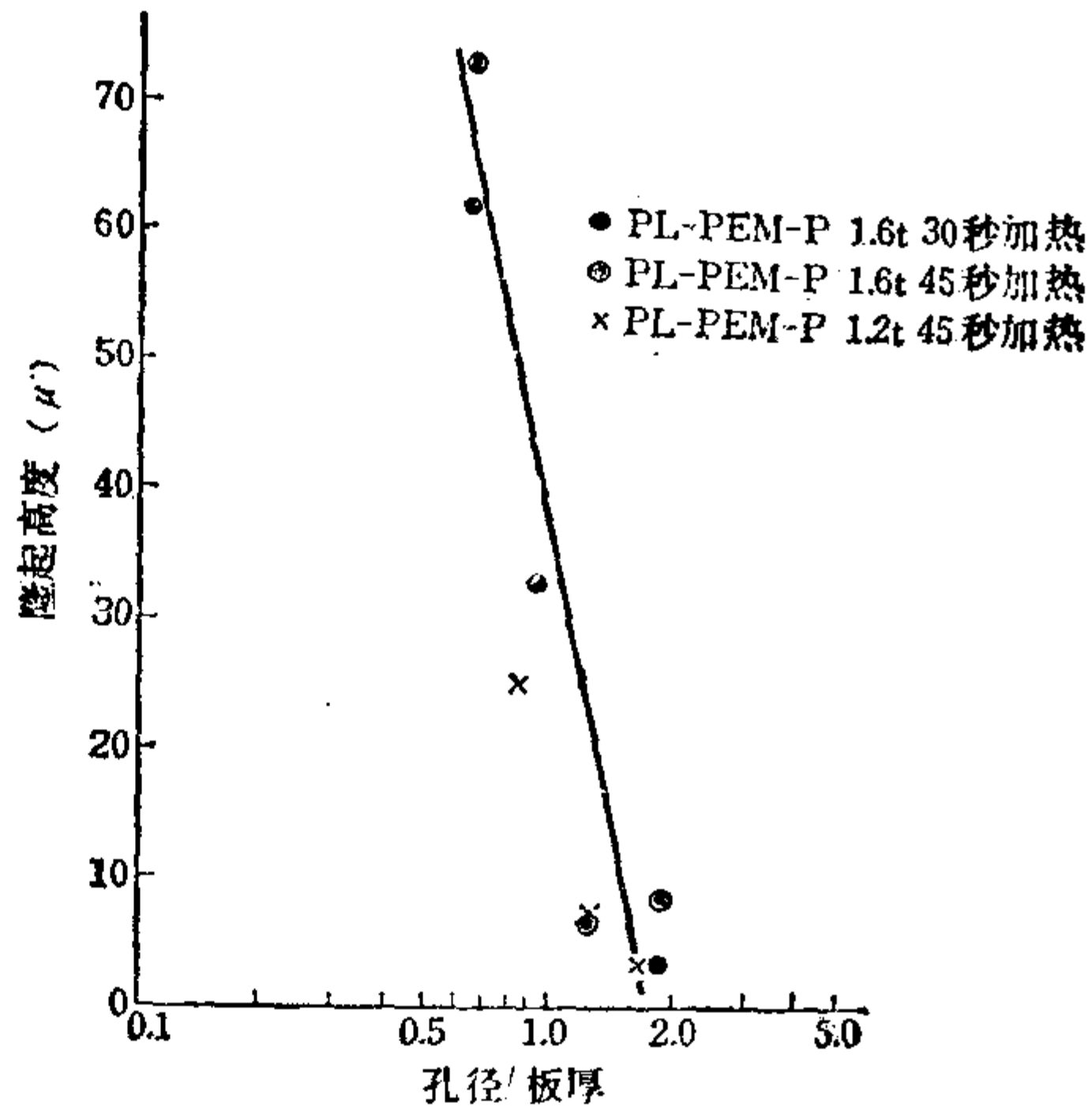


图2.145 孔的大小与隆起高度的关系 (加热温度255℃) (前田)

关于塑性较小的材料所出现的阴影，如图 2.148 所示，间隙小时阴影有增大的倾向。

b. 搭边宽度 在图 2.149 中 b_1 、 b_2 和 b_3 分别叫做送进搭边，边缘搭边和孔搭边。如果搭边小，在这部分就会产生裂纹。尤其象印刷电路板那样开有若干接近的小孔时，如果发生裂纹就会引起电气特性的下降，因而事先了解 b_2 和 b_3 的最小极限值，在

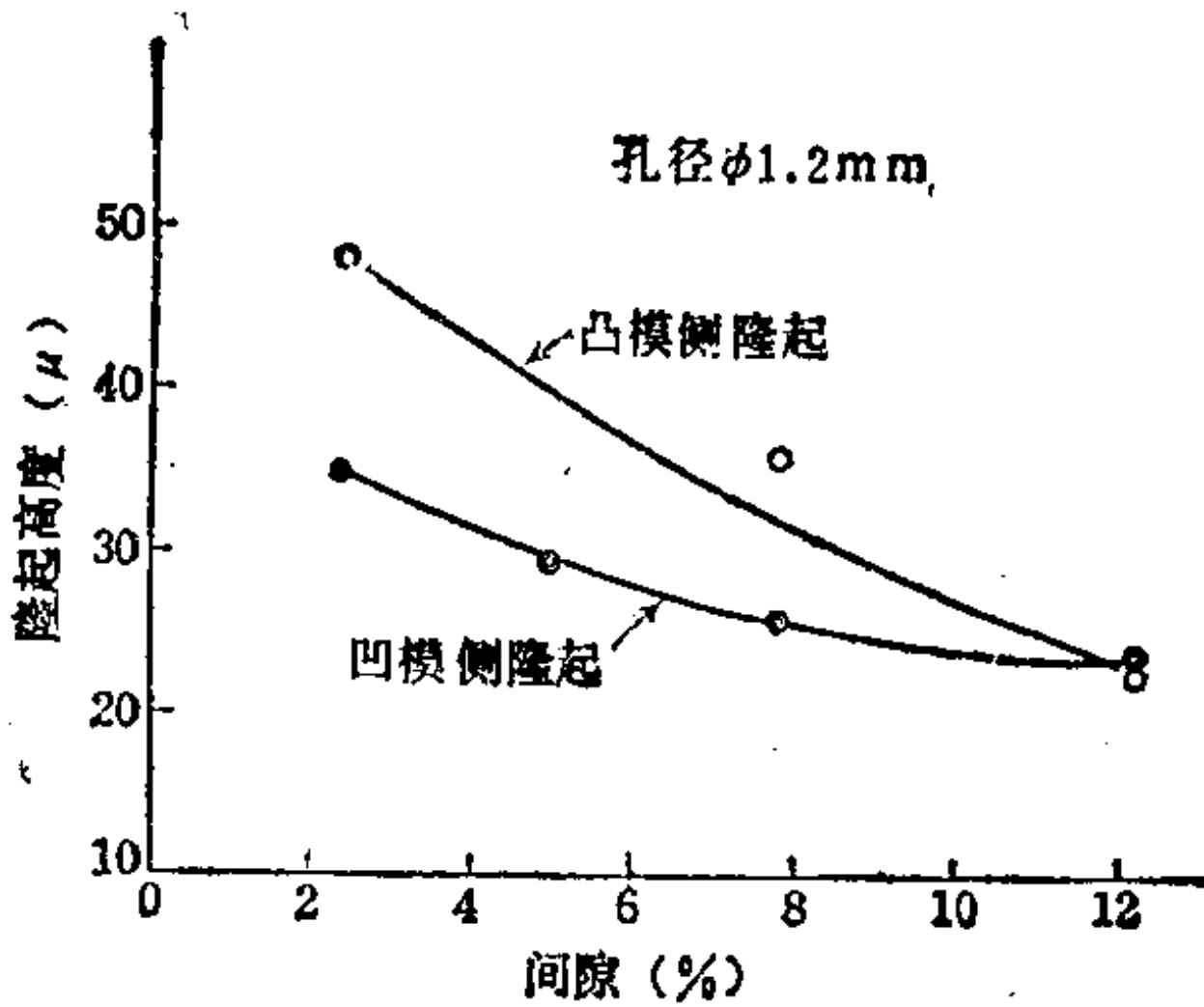


图2.146 间隙大小与隆起高度的关系
(材料: PL-PES-P, t 2.5) (前田)

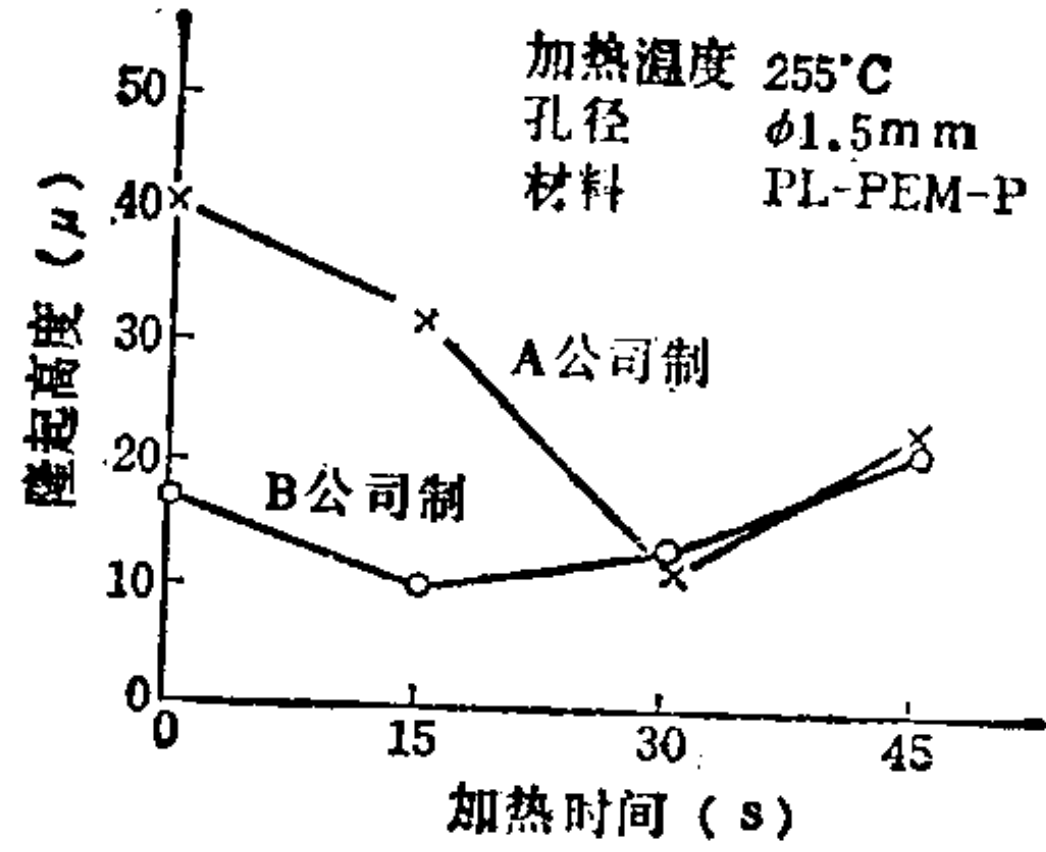


图2.147 加热时间与隆起高度的关系 (前田)

实际应用上是很重要的。表 2.24 是圆孔搭边的极限和圆孔搭边宽度 b_s 与表示最佳加热条件的数据的一例，由于材料和板厚的不同， b_s 也稍有差异，但大体上为板厚 t 的 1.5~2 倍。一般地说，薄板的冲裁性能好不需要加热，但是厚板因有搭边裂纹问题要优先考虑加热。

另外，最佳加热条件与材料种类或板厚无关，在 185℃ 加热 4 分钟左右即可。这时，材料的实际温度为 140~170℃，提高加热炉的设定温度，会使材料的温升率提高，能抑制促进热硬化的反应，因而一般是采取缩短加热时间的方法。在实际作业中，有时保证不了最佳加热条件，因而在不允许有裂纹时，从安全的角度出发需要使 b_s/t 值达

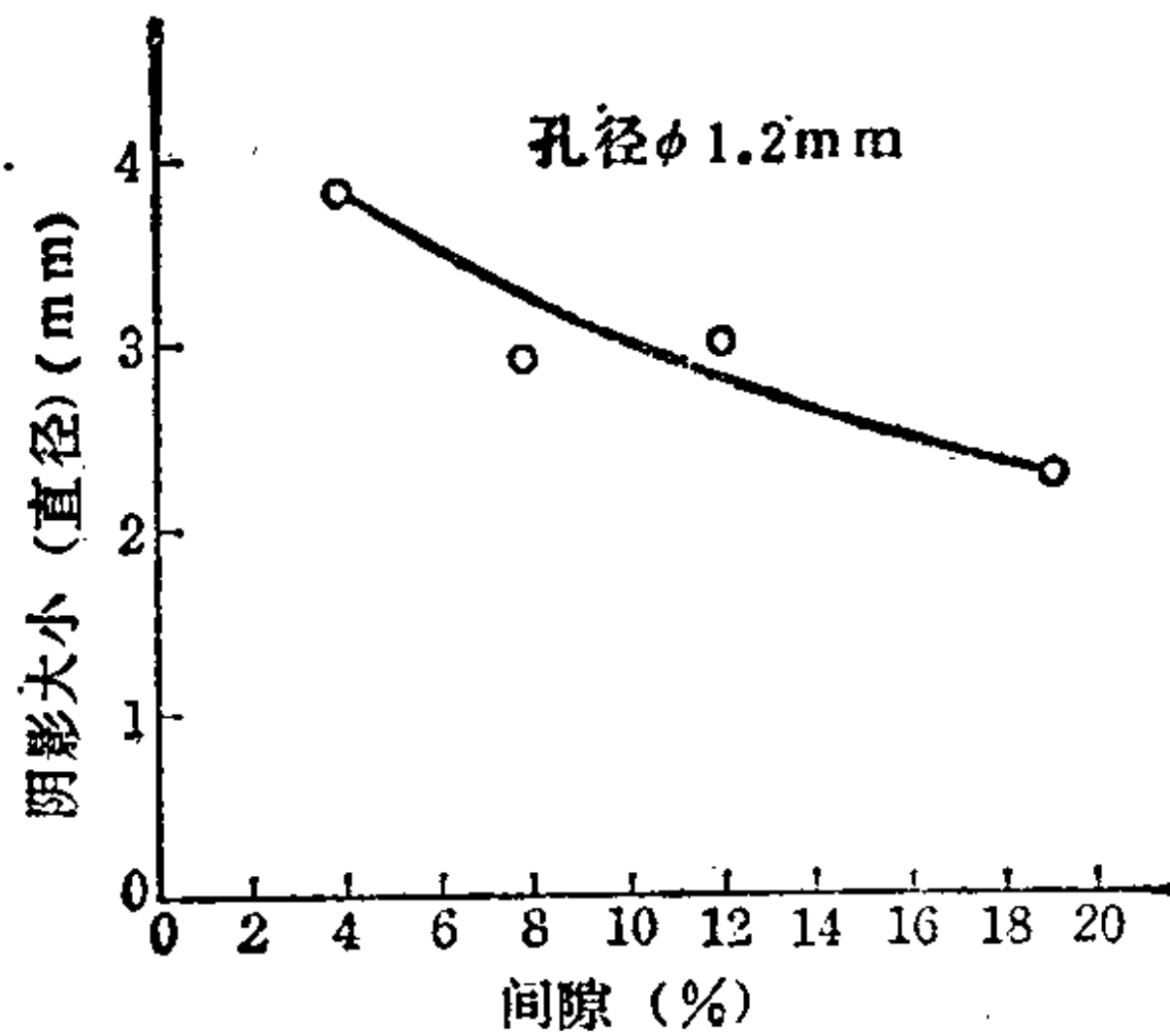


图2.148 间隙与阴影大小的关系 (材料: PL-PEM-P, t 1.6mm) (前田)

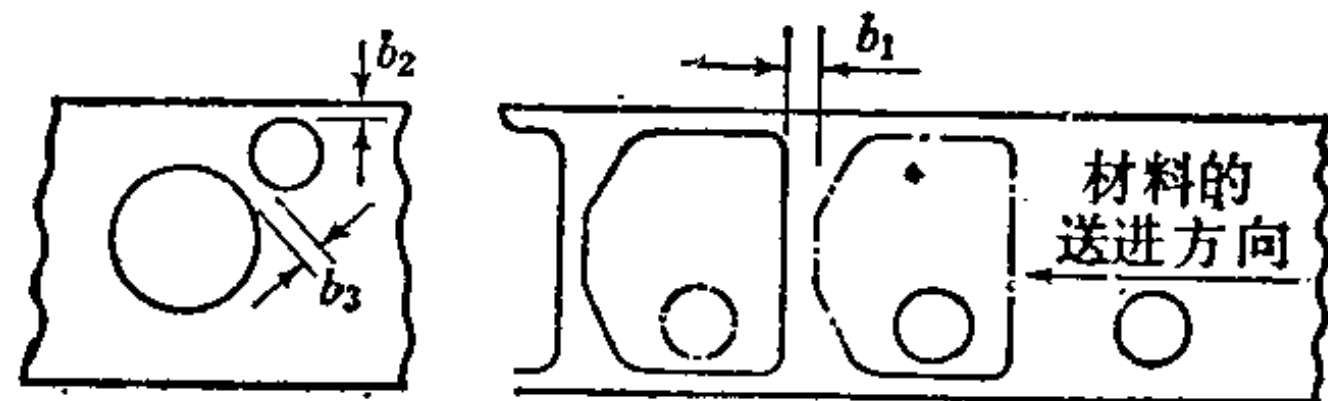


图2.149 搭边的种类

b_1 为送进搭边 b_2 为边缘搭边 b_3 为孔搭边

从安全的角度出发需要使 b_s/t 值达

表2.24 圆孔搭边的极限宽度和最佳加热条件

材 料	特种冲裁用纸基材料 (通讯设备)				PL-PES-P (纸基材料)			
	板厚 t (mm)	2.4	1.6	(1.6)①	0.8	2.4	1.6	(1.6)①
圆孔极限搭边宽度 (b_3/t)③	1.5	2	1.75	2	1.25	1.5	1.75	2
最佳加热条件下的圆孔极限搭边宽度 (b_3/t)	1.25	1.75	1.25	2	1.25	1.25	1.5	1.75
最佳加热条件	温度(°C)	185	185	185	185	185	185	—
	时间(min)	4	4~7	4	4②	4~7	4	7 1②

① 表示间隙为 $0\sim 5\mu$ 的场合, 其他为 2.5%。

② 数值的参考值。

③ 圆孔极限搭边宽度表示在下述情况下的平均值, 即允许缺陷值达到 0.05 (参照图 2.155) 时的温度分别为 135°C 、 160°C 和 185°C 以及加热时间为 4 分钟、7 分钟和 10 分钟。

到 2 以上。关于圆孔的边缘搭边宽度 b_2 的极限值, 当材料的边缘为经机械加工的平滑的加工面时, 可以取圆孔极限搭边宽度 b_3 的 $1/2$ 左右。

在冲方孔时, 如果孔的角与角是相对的, 则方孔的极限搭边宽度至少也要达到板厚的 2 倍, 如果连微小的裂纹也不允许, 有时则孔的极限搭边宽度要达到板厚的 2.5~3 倍。材料的最佳加热条件与圆孔的场合相同。方孔的边缘搭边宽度极限值也和方孔极限搭边宽度值相同。

送进搭边宽度 b_1 的大小, 对冲裁后的制件尺寸有影响。由图 2.150 一例可知, 若把送进搭边宽度放大则制件尺寸收缩就小。

c. 制件尺寸 冲裁件的有关尺寸是随着冲裁前的加热引起的材质变化和热膨胀以及伴随加工后的冷却引起的收缩和干燥而变化。另外, 冲裁模结构、冲裁方式和间隙等机械方面的加工条件, 也对制件尺寸的变化有很大影响。因而对制件尺寸的分析是极为复杂和困难的。

(i) 热因素的影响 图 2.151 所示为材料的热膨胀和冷却

收缩曲线模型。一般冲裁由于材料从加热炉中取出后温度就下降，所以要在收缩曲线 I 的 B 点（材料温度为 θ_B ，延伸为 Δl_B ）上冲裁。因此，在常温（ θ_0 ）下冲裁件和模具之间的尺寸差是由热的因素引起的，材料的延伸 $\Delta l_0 = \Delta l_B + \Delta l_c$ 。如将收缩曲线近似地视为直线并设材料的收缩系数为 α' ，凹模尺寸为 L ，则 $\Delta l_0 = \alpha'(\theta_B - \theta_0)L$ ，这样只考虑材料的收缩特性和冲裁时的材料温度即可。 α' 因材料种类的不同而异，但如表 2.25 所示，一般的数值为 3×10^{-5} ($1/^\circ\text{C}$) 左右。另外，在恒温炉中加热时，用图 2.151 上的曲线 II 表示，AA' 表示炉中的材料的收缩，但这时的收缩系数 α' 基本上与曲线 I 的场合相同，因而尺寸变化 Δl_0 也大体上与前面的数值相同。由此可见，对于由热的因素引起材料的尺寸变化，只要控制冲裁加工时的材料温度即可〔68〕。

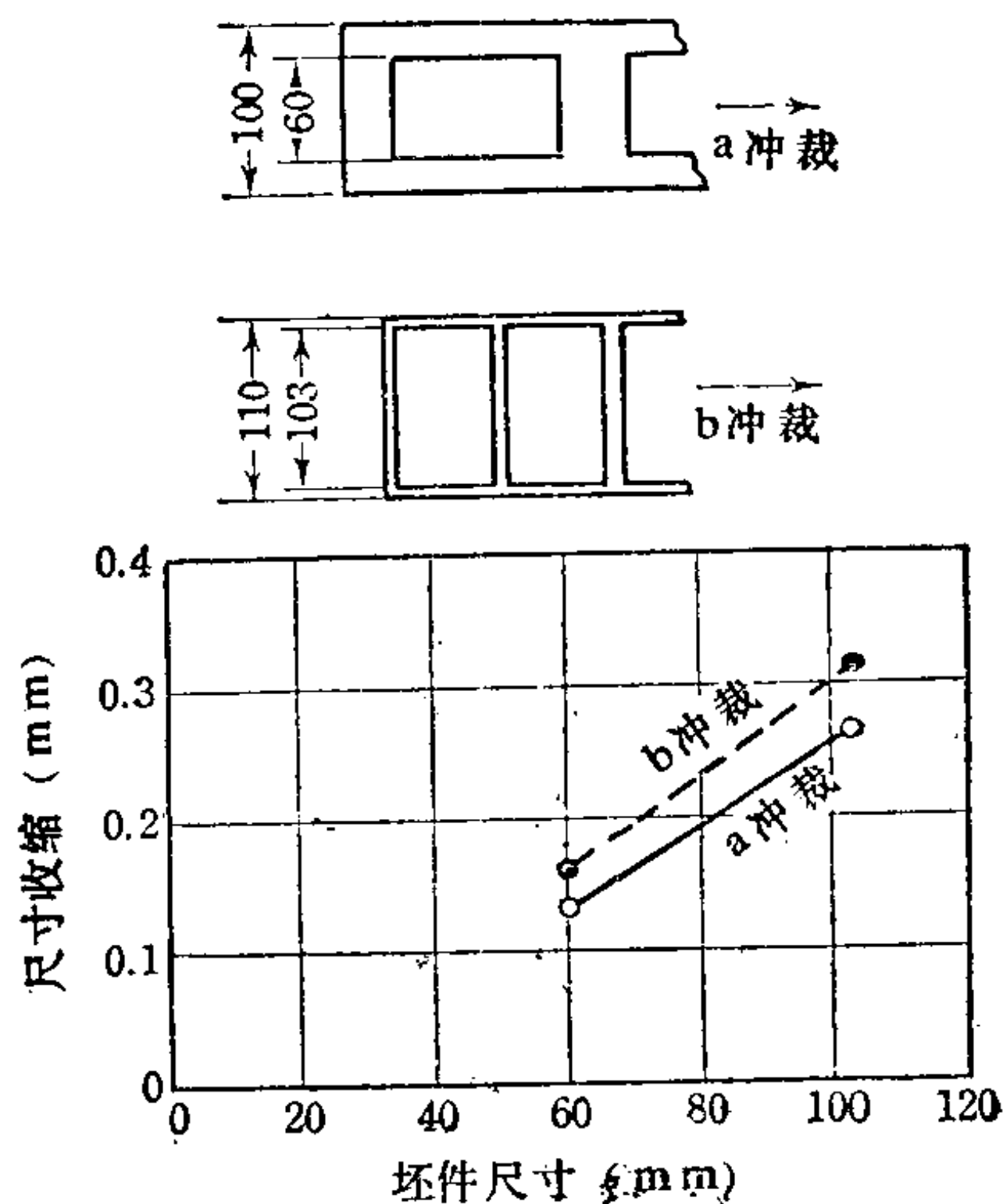


图2.150 送进搭边宽度对冲裁件收缩的影响（楠本）

材质：特殊冲裁用纸基材料；板厚 1.6mm；加热：石棉上的温度约 250°C ；保温时间 35~60 s

由此可见，对于由热的因素引起材料的尺寸变化，只要控制冲裁加工时的材料温度即可〔68〕。

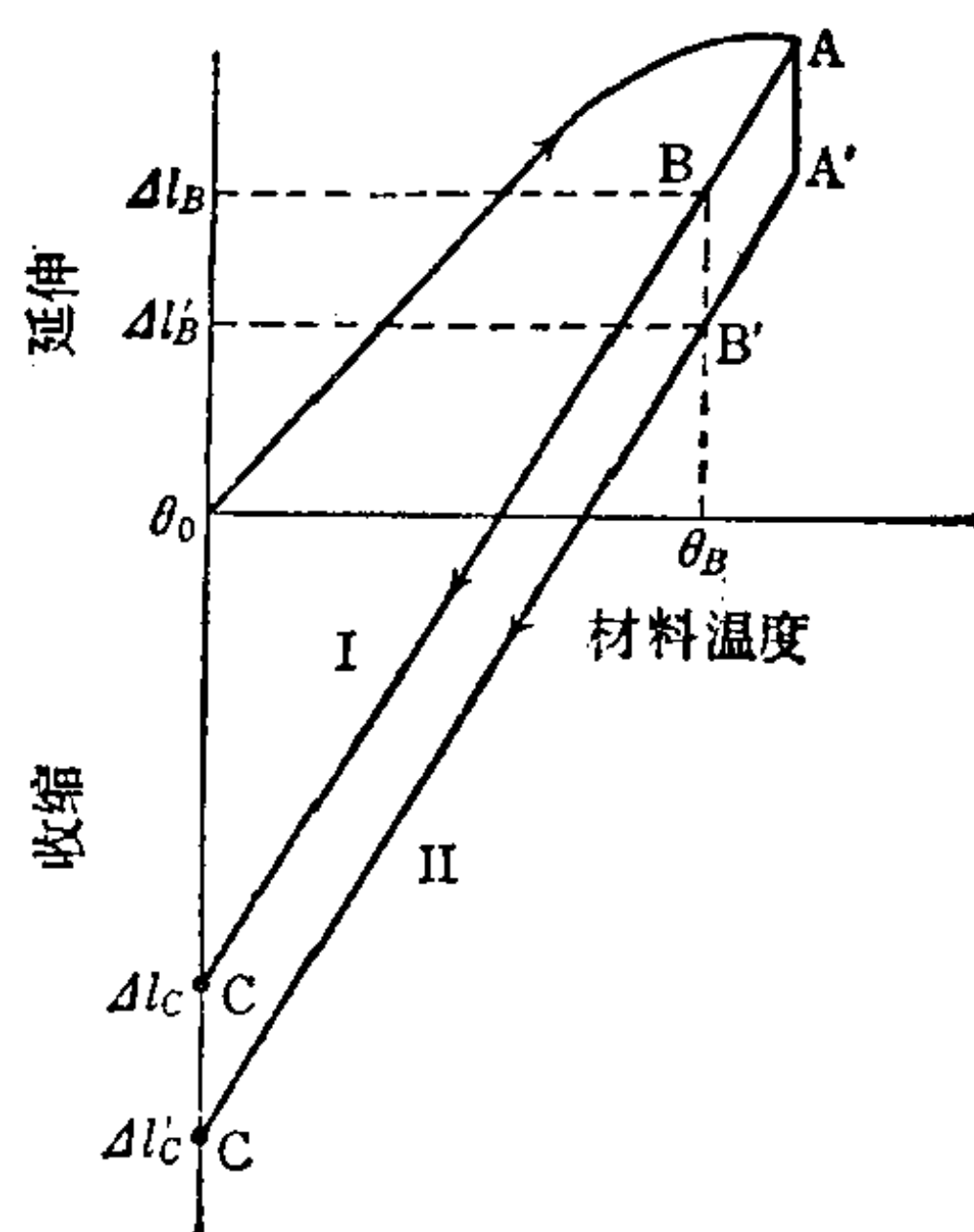


图2.151 收缩特性和坯件尺寸变化的关系

(ii) 机械因素的影响 冲裁时材料的弯曲变形和板面方向上内应力的大小受材料的约束条件、间隙和制件形状等的影响。

表2.25 各种材料的膨胀收缩系数

材 质	方 向	膨胀系数 $\alpha_0(\times 10^{-5})$	收缩系数 $\alpha'(\times 10^{-5})$	备 注
特殊冲裁用 纸基材料A	平行	2.93	3.42	从常温到 190°C的范围
		2.67	3.08	加热到 160°C以后冷却, 再加 热到 156°C
		—	3.23	加热到 115°C以后冷却, 再加 热到 117°C
	—	3.25	将上述材料冷却后再加热到 128°C	
	45°	2.83	3.27	加热到 203°C
特殊冲裁用 纸基材料B	平行	2.53	3.48	加热到 178°C
PL-PES-P	垂直	2.25	2.76	加热到 200°C

冲裁件的尺寸, 因凹模孔的尺寸而变化。一般, 间隙减小, 冲裁件的尺寸有减小的倾向。另外, 材料的约束条件和冲裁制件尺寸的关系是极为复杂的〔68〕。

(iii) 历时变化 酚醛树脂层压板有相当大的吸湿性, 这种吸湿性可引起尺寸变化。在加热冲裁时, 可以看成大体上处于完全干燥的状态, 冲裁后随着时间的推移而吸湿, 通常随吸湿过程尺寸有所伸长。伸长的程度因周围气体条件和材料种类的不同而异且很难预测。例如, 冲裁板厚为 1.6mm、直径为 ϕ 32mm 的制件, 经过一个月后尺寸增加量约为 30~40 μ 〔68〕。材料冲裁时由于加热条件和机械因素的影响, 尺寸的历时变化只有数 μ , 因而即使忽略不计也没有什么妨碍〔68〕。

d. 冲裁性能试验法 具有代表性的试验方法是美国材料试验标准 ASTM D617-44〔69〕, 英国工业标准 BS2076 (1954)〔70〕和日本精机学会专门委员会提出的方案〔71〕。

ASTM D617 如图 2.152 所示, 在冲裁试验时, 采用六个评分等级; 规定 100 或 90 分为最优, 80 分为优, 70 分为良, 50 分为可, 25 分为劣, 0 分为不可, 分别对试样的剪切断面, 表面裂

纹和小孔边缘的隆起程度进行评价。在评价时以上三个项目的分数的平均值作为评定材料冲裁性能好坏的尺度。试验用模具的间隙均定为 0.05mm 以下。关于热冲裁的加热条件，为在保持 135±2℃ 温度的加热炉中把带材加热 15 分钟，然后敏捷地取出进行冲裁。

精机学会专门委员会的方案如图 2.153 所示，是采用凸模排成一列的试验模具来评定材

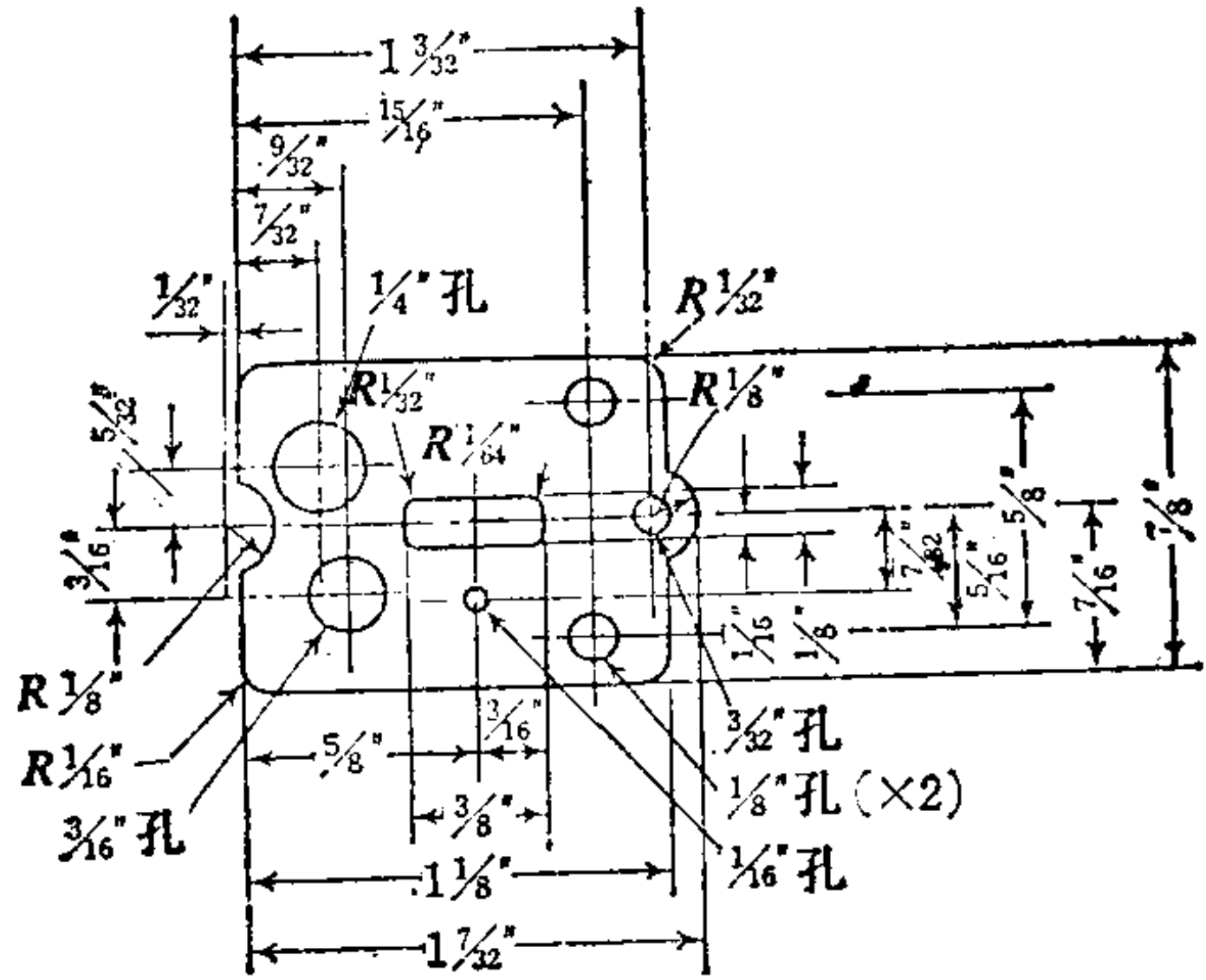
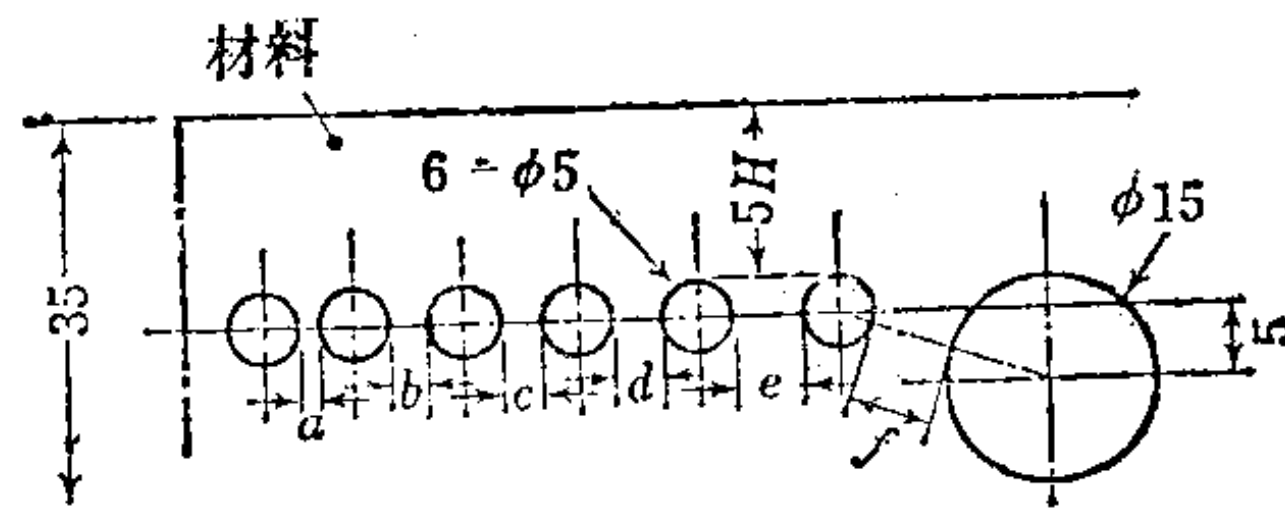


图2.152 ASTM D617规定的冲裁试样

料的冲裁性能。即把直径为 5mm 的 5 个凸模和 15 mm 的一个凸模，使其边缘整齐地排列在一条直线上，采用带有活动卸料板的模具进行冲裁，孔的搭边宽度(b_3)和板厚(t)之比 (b_3/t) 取级差为 0.25，从端部开始依次变换 6 种，最小取 0.75，最大取 2.0。

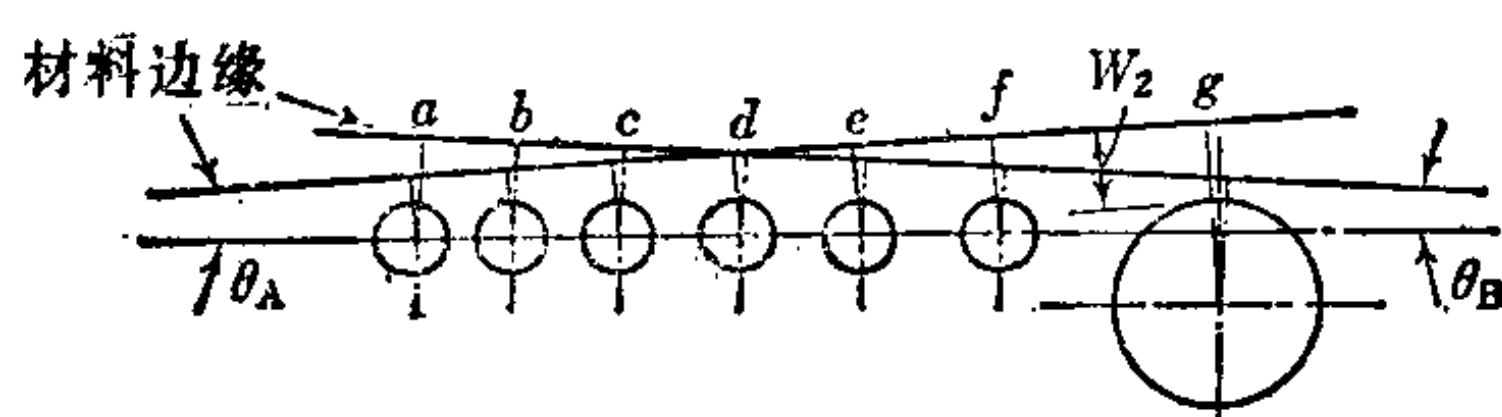


板厚 t (mm)	孔的搭边宽度 b_3 (mm)						间隙 (mm)	
	a	b	c	d	e	f		
0.8	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	0.02 ± 0.004	---
1.6	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	0.04 ± 0.008	0~0.005
2.4	1.8	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	0.06 ± 0.012	—
板厚比 b_3/t	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	2.5%	—

注：间隙取各种板厚 2~3% 的范围，其公称值定为 2.5% 加给凹模一侧。

图2.153 孔的搭边尺寸 (精机学会)

模具的间隙（单侧）用板厚的百分比表示，取为 2.5%，为使 b_2/t 和间隙对于板厚为 0.8、1.6 和 2.4mm 的 3 种板材保持上述的数值，要准备 3 种不同的模具，并且还要加上对板厚 1.6mm 的极小间隙 $0\sim 5\mu$ 的模具，因而应有 4 种模具。先用机械加工方法将试样加工成宽度 $35\text{mm}\times$ 长度 100mm ，而后放在设定规定温度的电炉中按规定时间进行加热，加热后立即放在机械压力机上冲裁。这时，要使试样的长边与凸模的边缘直线平行，使边缘搭边在 $5t$ 以上，以使边缘搭边裂纹的影响不致波及孔的搭边裂纹。边缘搭边裂纹的试验，如图 2.154 所示，使试样的长边与凸模边缘直



板厚 t (mm)	边缘角度		边缘搭边宽度和板厚之比 (b_2/t)						
			a	b	c	d	e	f	g
0.8	θ_A	$1^\circ 26'$	0.75	0.94	1.11	1.29	1.49	1.69	2.0
	θ_B	$1^\circ 25'$	2.0	1.83	1.65	1.46	1.27	1.07	0.75
1.6	θ_A	$2^\circ 23'$	0.75	0.91	1.08	1.26	1.46	1.66	2.0
	θ_B	$2^\circ 27'$	2.0	1.80	1.66	1.47	1.27	1.06	0.75
2.4	θ_A	$3^\circ 18'$	0.75	0.91	1.09	1.28	1.49	1.71	2.0
	θ_B	$3^\circ 36'$	2.0	1.82	1.63	1.42	1.19	0.95	0.75

图2.154 边缘搭边的尺寸（精机学会）

线倾斜两个角度 θ_A 和 θ_B ，边缘搭边的板厚比 b_2/t 最小取 0.75，最大取 2.0。 b_2/t 的值如图中的表所示。根据以上的试验评定搭边裂纹，用肉眼进行观察，将完全开裂的定为 1，没有裂纹的定为 0，在 0 与 1 之间根据裂纹程度划分为 10 个等级，按缺陷多少评分。其评定标准如图 2.155 所示，但要对材料的表里两面进行评价。根据情况的不同，为了考察方孔搭边裂纹，也有把边长

5mm 的正方形凸模，在对角线方向上按照 1.60、2.24、2.88、3.52、4.32、5.12mm 的 6 个间隔排列成一条直线，利用这种有 7 个凸模的冲模进行冲裁试验的。其评价可参照图 2.155 进行。尺寸变化可利用圆孔的搭边裂纹试验模具上的直径

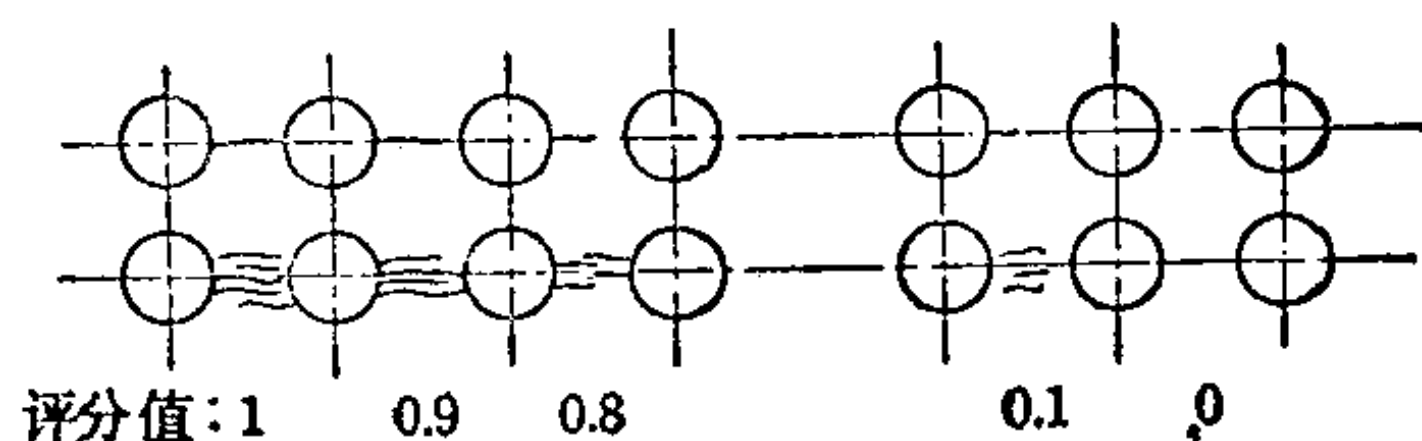


图2.155 孔的搭边裂纹状态和平均分

为 15mm 的凸模及与其相邻的直径为 5mm 的凸模进行冲裁，通过求得冲裁试样的直径及孔径分别与凸模尺寸之差来分析。

关于隆起和阴影，要另外准备好凸模直径/板厚为 0.5~2.0 的圆孔冲裁试验模具来测定发生于小孔周围的隆起或阴影的程度，并进行分析评定。

2.6.2 热塑性塑料

a. 利用复刃（凸模与凹模）的冲裁 根据材料种类的不同，其剪切分离的方式虽不同，但在常温下进行的冲裁加工大体上可分为以下三类〔72〕。

(i) 由于拉伸而分离：聚丙烯，聚乙烯，尼龙 6，聚缩醛。

(ii) 由于裂纹贯通而分离：聚氯乙烯，聚苯乙烯。

(iii) 由于裂纹成长和二次剪切而分离：聚碳酸酯，赛璐珞。

b. 冲裁过程和剪切断面 在材料支承和间隙为 5% 的情况下进行圆形冲裁时的冲裁过程和剪切断面阐述如下。

(i) 聚丙烯 随凸模行程材料在与板面成一定角度的方向有很大流动，形成流动面。其后，如果超过最大冲裁载荷点，裂纹首先从凹模刃口尖端处起伸展到材料内部，接着在凸模刃口尖端处也产生裂纹。裂纹成长到板面表层就停止，由于凸模继续进行，两个刃口之间的材料就被拉断而完成冲裁。因此，冲裁件的剪切断面如图 2.156 所示，由流动面和剪裂面构成，而该剪裂面由裂纹剪裂面（开裂剪裂面）和拉伸剪裂面构成，在其端部可以看

到毛刺。在使用压料板固定材料进行冲裁时，与凸模和凹模刃口端部接触的材料，只是发生裂纹的顺序相反，剪切断面的形成过程及其形状，没有本质上的差别。冲裁速度对剪切断面的影响不明显。

(ii) 聚氯乙烯 冲裁这种材料时，在最大冲裁载荷点前后，微小裂纹从模具刃口的尖端向材料内部伸展，而在以后的凸模行程中，这种裂纹就不再成长，不久由于产生拉伸剪裂而形成新生表面。当凸模行程达到板厚的一半左右时，从凸模刃口尖端向外侧伸展的裂纹（二次裂纹）急剧成长，与从凹模刃口尖端发生的裂纹合成一体，实质上的剪切分离到此结束，这时冲裁载荷急剧下降。接着由于二次裂纹产生的剪裂面，使得凸模一侧和凹模一侧的材料相互摩擦，于是坯件被压入凹模孔中，但也有一部分剪裂面上的材料被模具刃口切削。从而所得冲裁件的断面形状如图 2.157 所示，主要是由拉伸剪裂面和二次裂纹剪裂面所组成，在其上下有小的塌角和毛刺。这种断面形状，受间隙和冲裁速度的影响较大，如果在低速冲裁区域（ $3 \times 10^2 \text{mm}$ 以下）增大间隙，则塌角和裂纹深度增大，形成极坏的剪切断面。但是，如果达到高速冲裁区域（ $2 \times 10^3 \text{mm/mm}$ 以上），剪切断面的

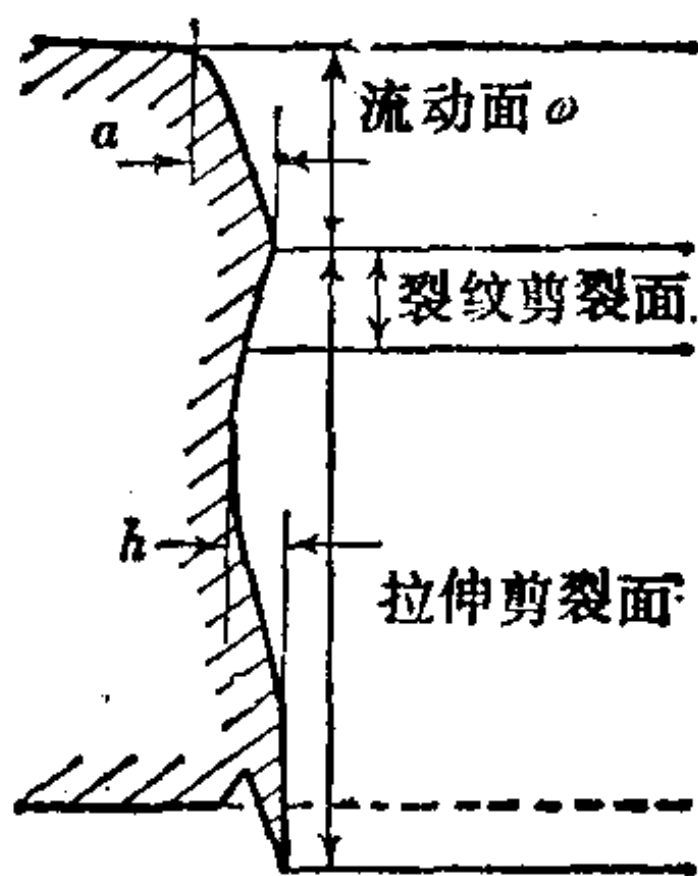


图2.156 聚丙烯冲裁件的剪切断面
间隙 5%，材料支承，
冲裁直径32mm

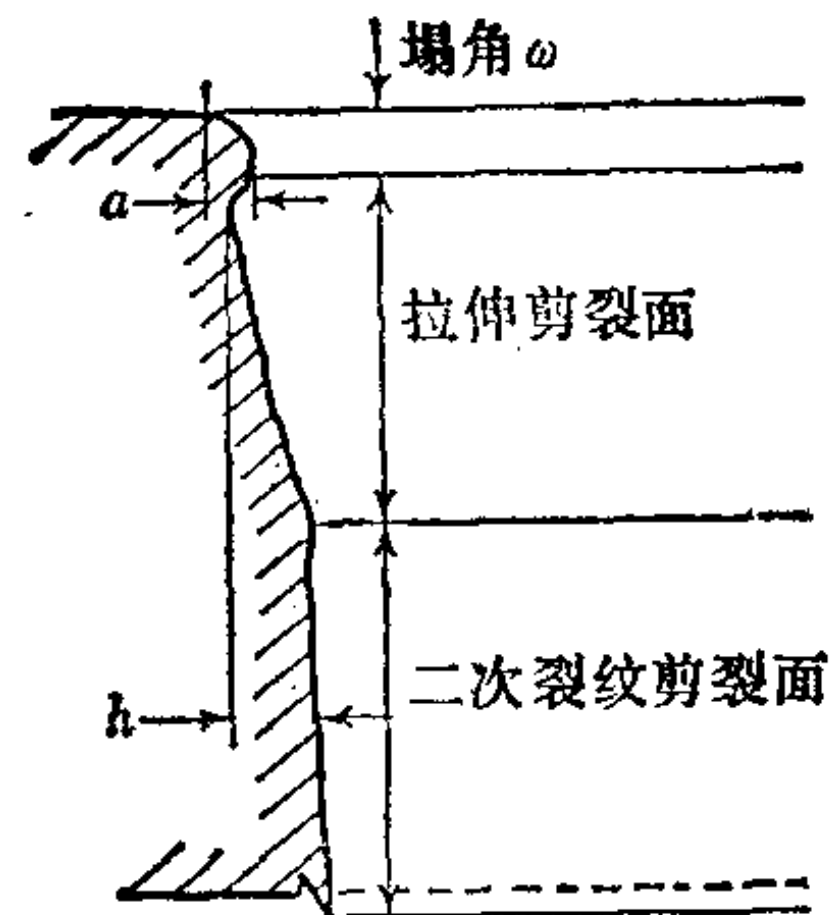


图2.157 聚氯乙烯冲裁件的冲裁断面
间隙 5%，材料支承，
冲裁直径32mm

平滑度提高，可得到良好的断面。间隙增大到 20% 左右时锥度明显增大，因而间隙仍以 5% 以下为宜。

(iii) 聚碳酸酯 这种材料的剪切断面形状，因(冲裁直径)/(板厚)的大小不同而改变，所以比冲裁其他塑料复杂。在冲裁直径/板厚 ≥ 3 时，随凸模行程而形成大的塌角面，接着塑性区贯通整个板厚，首先是从凹模刃口处发生裂纹，随后从凸模刃口处发生裂纹。这些裂纹都随着凸模行程而成长，超过最大载荷点直至凸模贯通板厚，在凹模一侧有微小开裂和进行反复地切削(二次剪切)。在此期间凹模一侧的裂纹停止成长。如果冲裁直径/板厚 < 1.5 ，在凸模一侧发生裂纹之后，在凸模一侧的二次剪切和凹模一侧的裂纹也相继发生，不久就达到最大冲裁载荷点，接着二次裂纹贯通板厚，实质性的剪切分离就此结束。

在材料支承时冲裁件的剪切断面，如图 2.158 a) 所示。它由塌角和裂纹引起的剪裂面以及二次剪切面和毛刺等组成。而在材料固定时冲裁件的剪切断面由塌角、剪裂面和毛刺等构成，如图 2.158 b) 所示。冲裁速度对剪切断面的影响不明显。

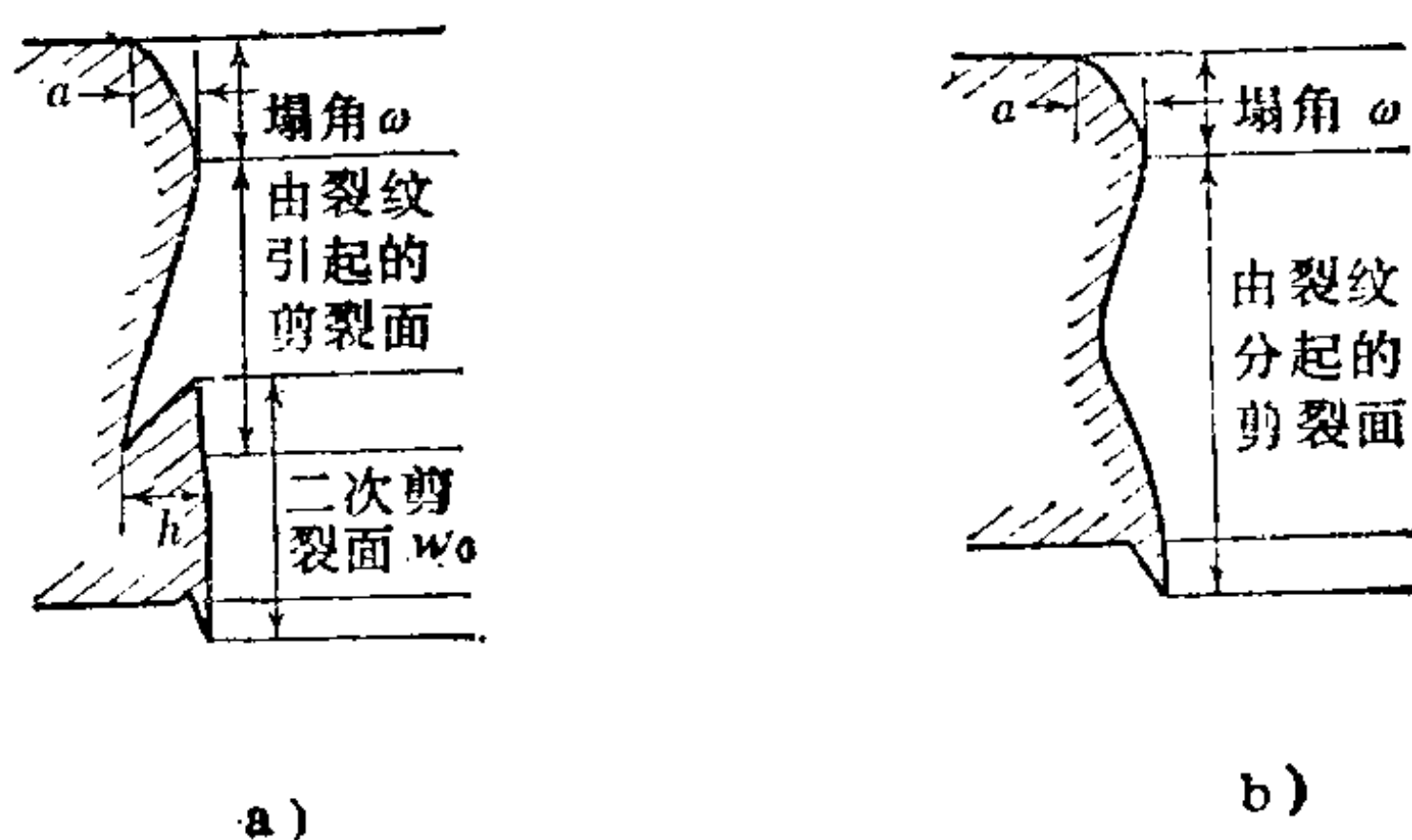


图 2.158 聚碳酸酯冲裁件的剪切断面
a) 材料支承 b) 材料固定

图 2.159 所示为间隙对上述三种材料的圆形冲裁件剪切断面形状的影响。由图可知，对于聚氯乙烯和聚丙烯两种材料，冲裁时采用材料全固定的方式，并把间隙尽量取小，可以得到剪切断面良好的冲裁件。对于聚碳酸酯，即使会使凹陷深度稍有增大，也是取小间隙使二次剪切长度 w_0 增大较为有利。

c. 剪切抗力 材料种类不同冲裁过程也不相同，因而冲裁力随凸模行程的推移也不相同。另外，即使是一种材料，而其

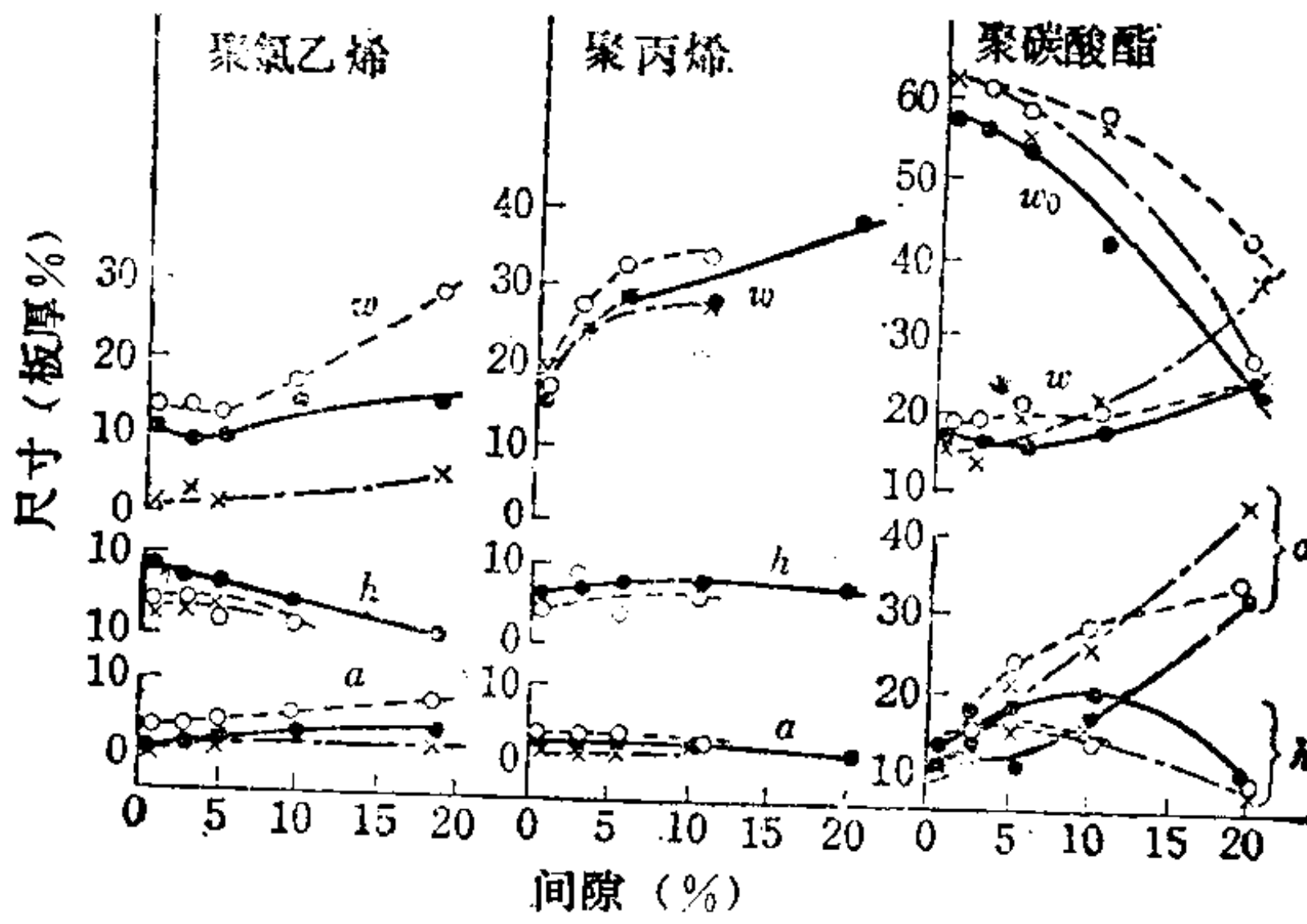


图2.159 冲裁件剪切断面的尺寸

—•— 材料支承
 - - - ○ - - - 材料固定
 - · - · × - · - · 材料全固定

} 冲裁直径32mm

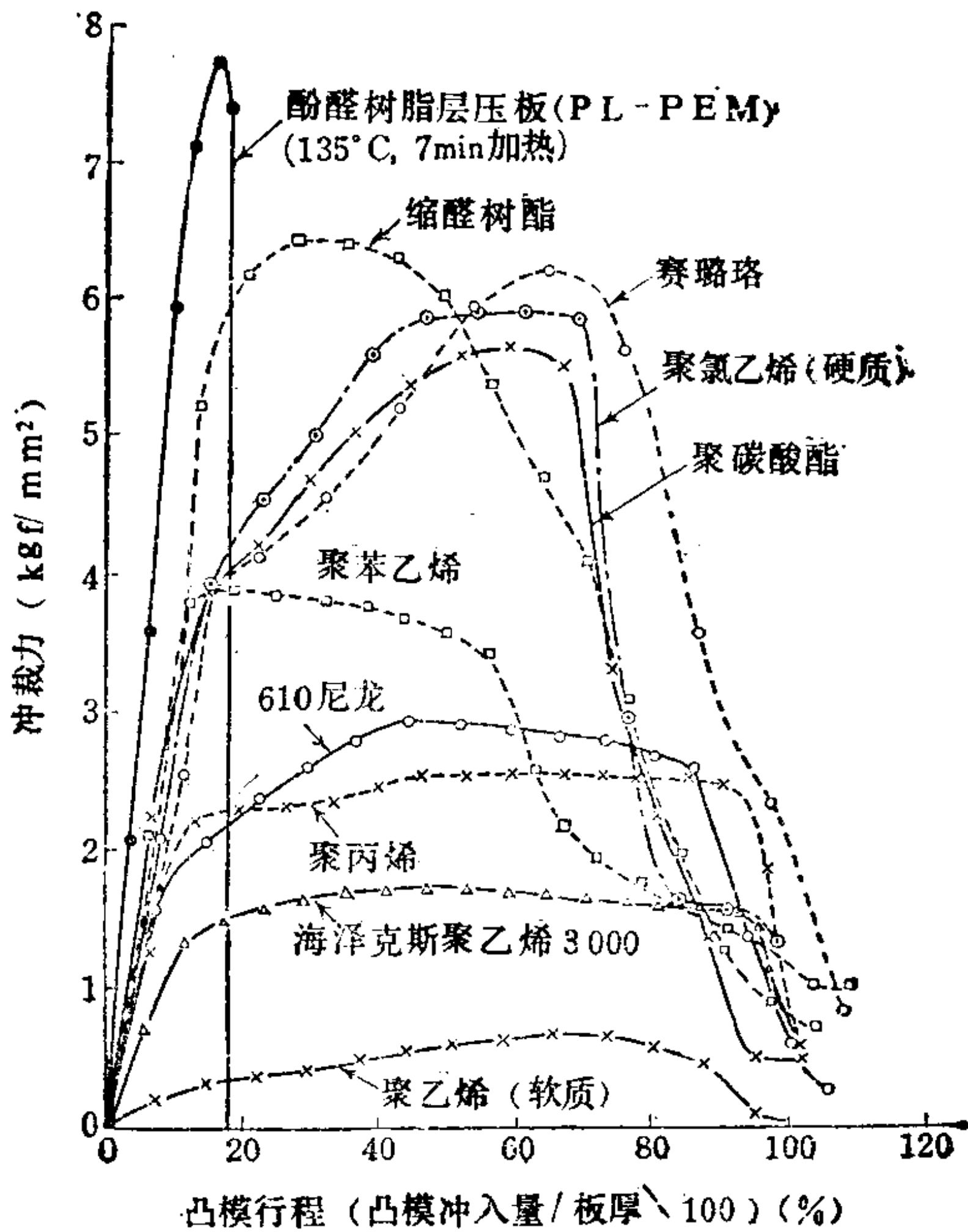


图2.160 冲裁力—凸模行程曲线图

加工条件（如材料温度、冲裁速度、材料的约束条件、间隙和冲裁轮廓等）不同，冲裁有相当大的变化。图 2.160 所示为在室温下间隙为 0.01mm 以下各种材料的冲裁曲线图。由图可知，聚丙烯，高密度硬质海泽克斯(Hizex)聚乙烯和软质低密度聚乙烯等材料的曲线，在凸模的全行程中大体上是平坦的，而聚苯乙烯在凸模行程的初期就达到最大冲裁力，在以后的凸模行程中冲裁力减小。聚氯乙烯、聚碳酸酯和赛璐珞等材料，到凸模行程中部以后，才比较明显地出现最大载荷点（脆性的酚醛树脂层压板在达到最高载荷点之后载荷骤减）。

(i) 间隙的影响 图 2.161 所示为间隙的大小对剪切抗力的影响，与冲裁金属时相同，剪切抗力随着间隙的增加而减少。

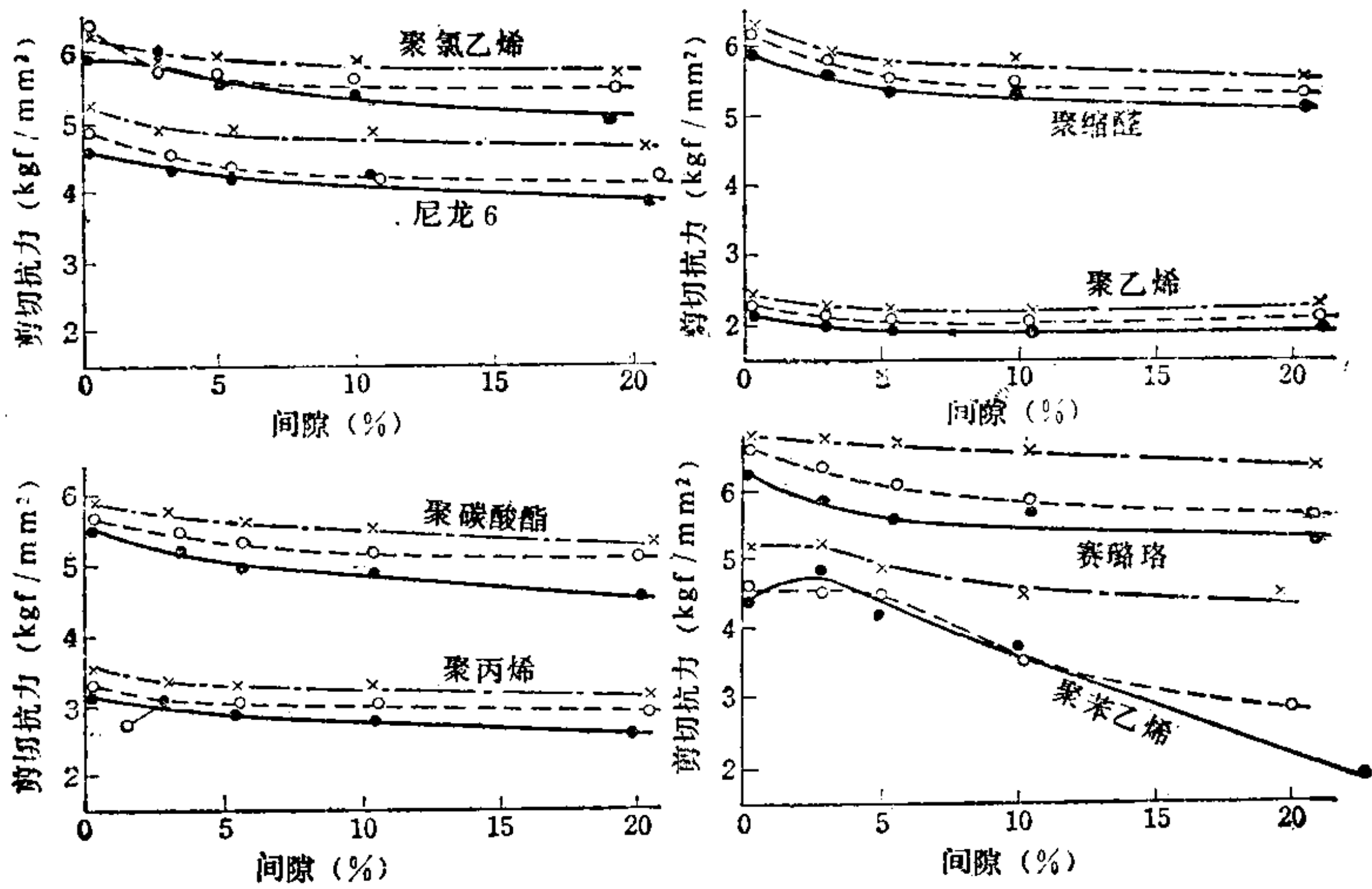


图2.161 剪切抗力和间隙的关系

—•— 材料支承
 ---○--- 材料固定
 -·-x-·- 材料全固定

} 冲裁直径32mm

(ii) 冲裁直径大小的影响 图 2.162 所示为在圆形冲裁时，冲裁直径 d_d 的大小对剪切抗力的影响，在 $d_d/t < 1.5$ 的小

孔冲裁区域内，剪切抗力随着冲裁直径的减小而显著下降的较多。

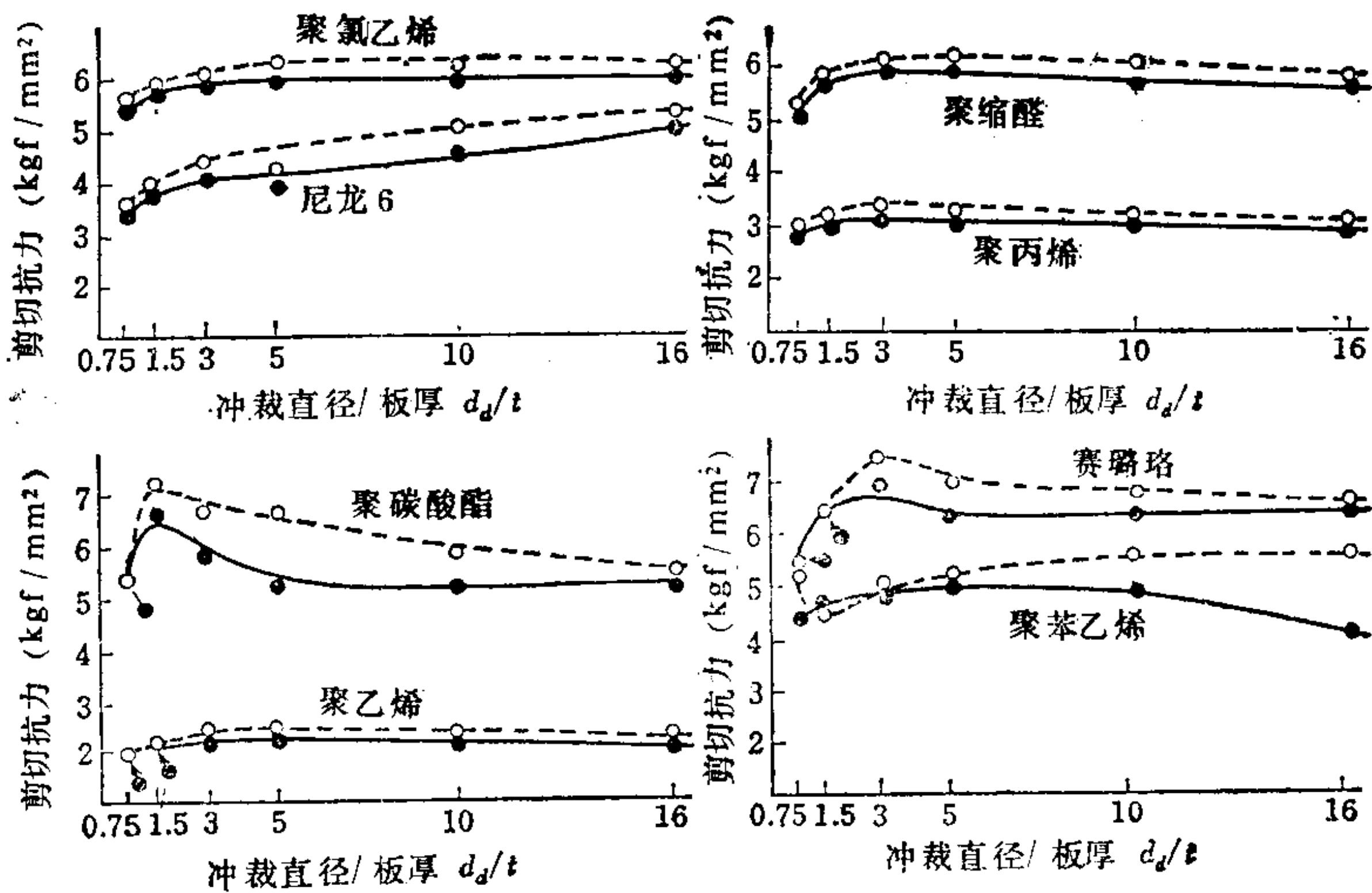


图2.162 剪切抗力和冲裁直径的关系

—●— 材料支承 } 间隙 5%
 —○— 材料固定

(iii) 冲裁速度的影响 如图 2.163 所示为冲裁聚氯乙烯和丙烯树脂等材料时，随着速度的变化冲裁曲线的形状有较大的变化，但是在冲裁聚乙烯和聚碳酸酯等材料时，冲裁曲线的形状变化小。然而剪切抗力值如图 2.164 所示，当冲裁速度增大时剪切抗力显示出增加的趋势，特别是在冲裁速度达到 10^3 mm/min 以后，剪切抗力值上升显著。

(iv) 材料温度的影响 一般，由于温度变化使冲裁曲线有显著变化，该曲线的形状和由速度变化引起的变化有相类似的倾向。即材料温度下降时和速度加快时一样，剪切抗力随之增加，至冲裁完毕的全部凸模行程缩短。图 2.165 所示为聚氯乙烯由于温度变化引起的冲裁曲线变化，图 2.166 所示为各种材料由于温度变化所引起的剪切抗力的变化。

d. 冲裁件的尺寸和弯曲 热塑性塑料和酚醛树脂层压板—

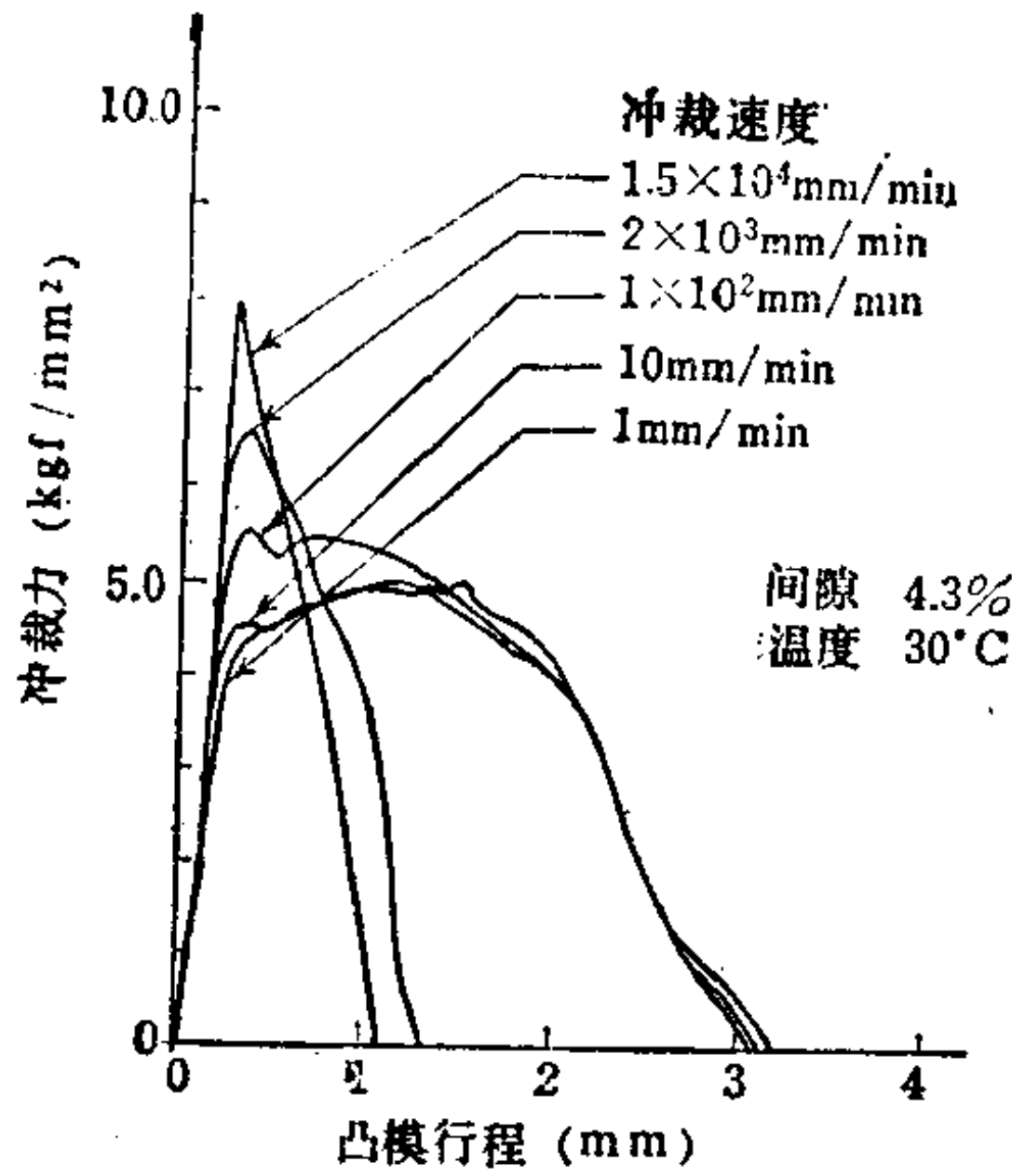


图2.163 聚氯乙烯的冲裁曲线图 (速度的影响)

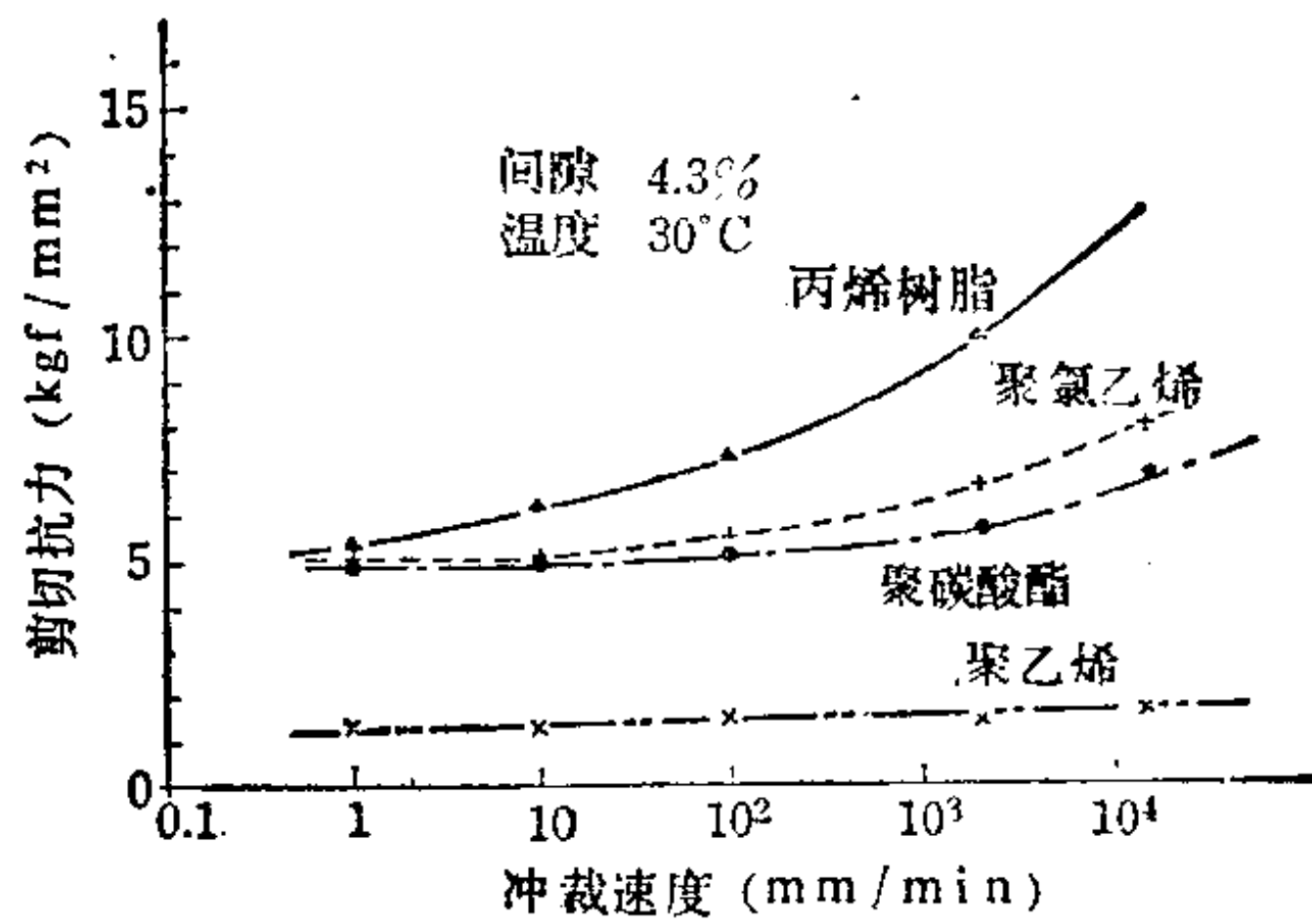


图2.164 剪切抗力和冲裁速度的关系

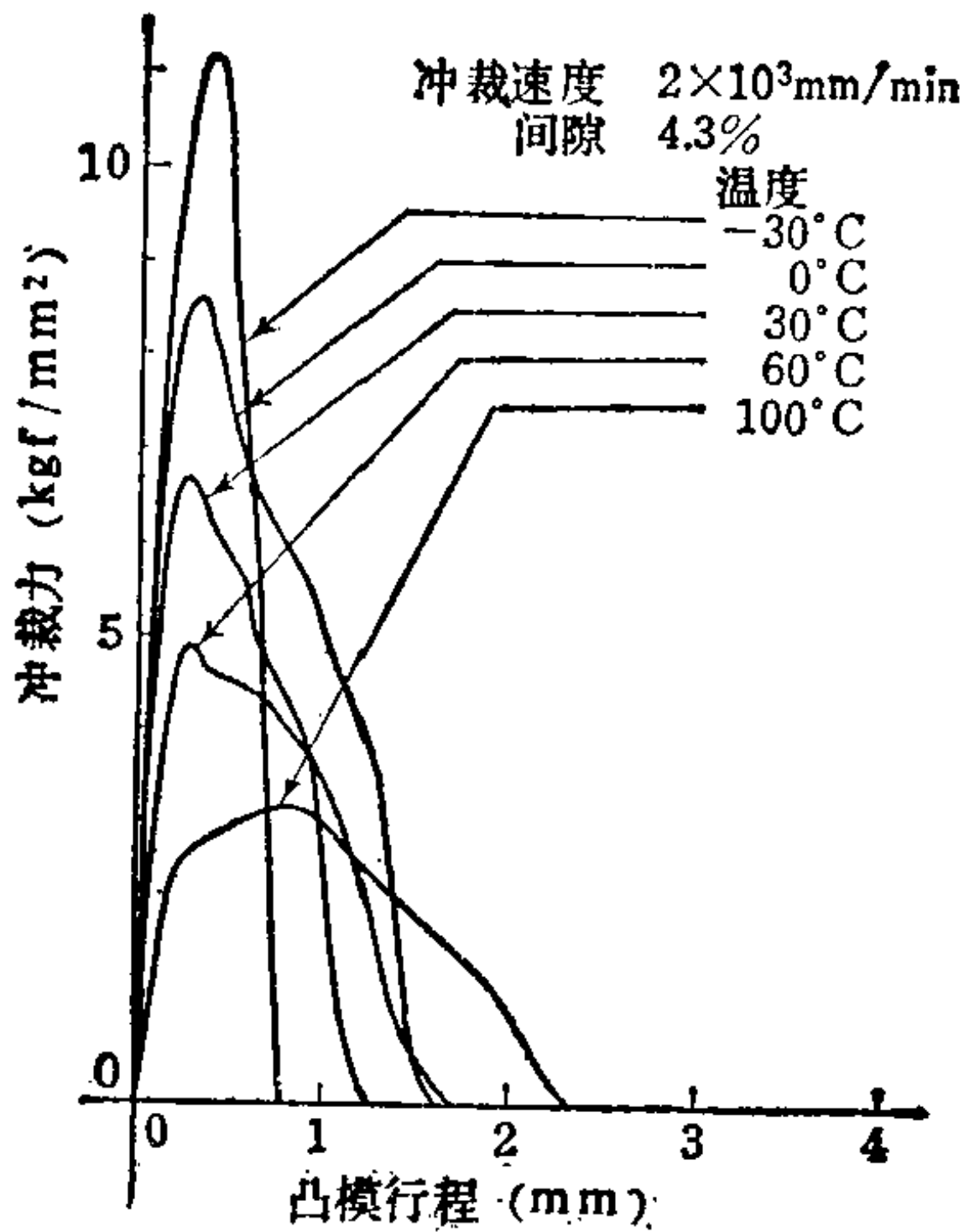


图2.165 聚氯乙烯的温度变化而引起冲裁曲线的变化

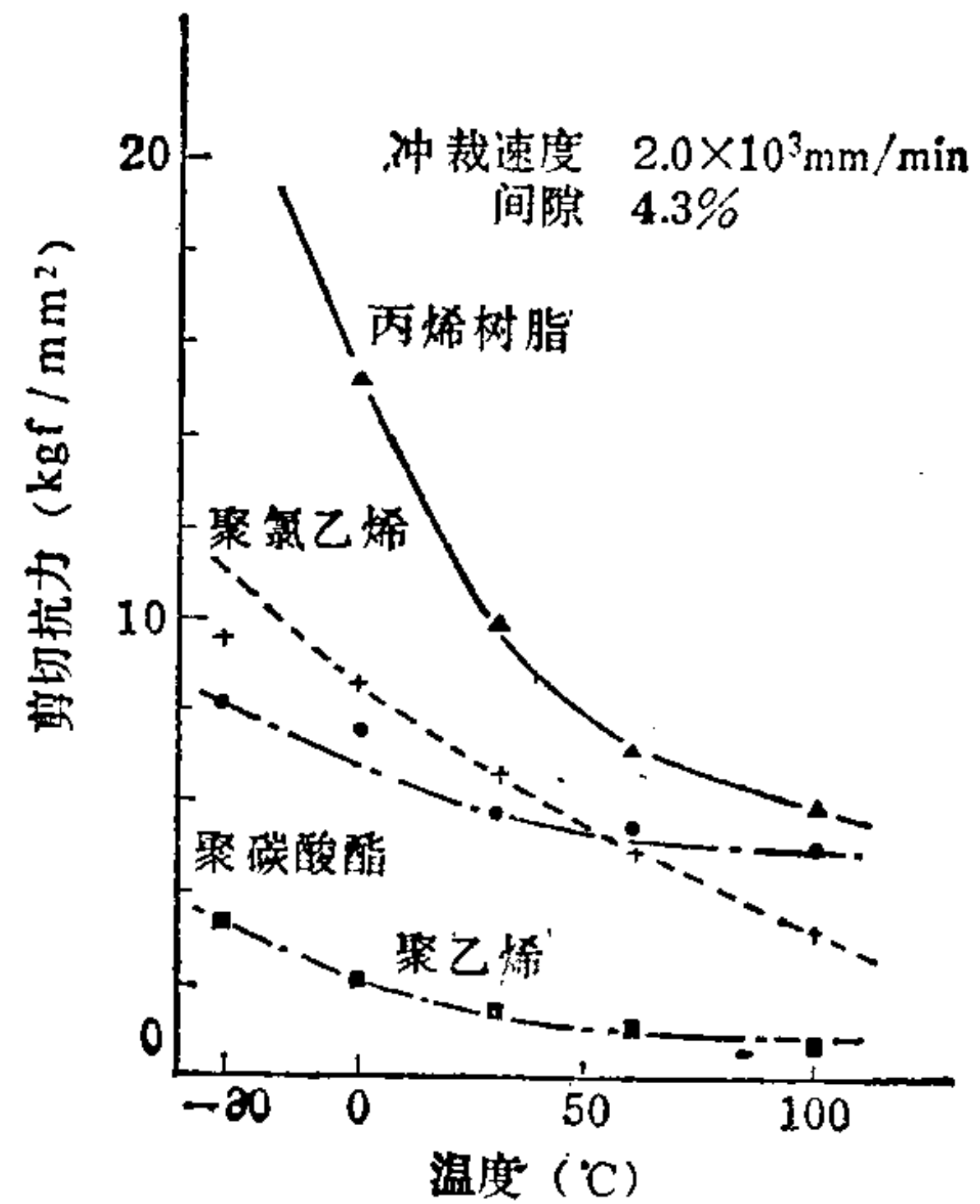


图2.166 材料的温度变化而引起剪切抗力的变化

样，冲裁件的尺寸取决于冲裁完毕时的弯曲回弹和在冲裁件径向产生的收缩或膨胀。这些因素由于间隙不同而有很大变化。在加热冲裁时还要考虑热的因素。

图 2.167 所示为冲裁件尺寸和凹模孔尺寸差的实测结果的一

例。和冲裁金属时一样，往往是随着间隙增加而制件尺寸减小。另外，由于材料的约束程度的不同，制件尺寸也有变化。在间隙为5~10%时，制件的尺寸往往和凹模孔尺寸一致。不过，在制件尺寸为30mm左右时间隙为0~20%，制件和凹模孔的尺寸差可用0.1mm的单位表示，同金属材料相比大一个数量级。冲裁速度和材料温度对冲裁件尺寸的影响，在高速和高温的冲裁条件下，冲裁件的尺寸多少有些减小。

关于冲裁件的弯曲，在冲裁聚氯乙烯、聚苯乙烯、聚丙烯、聚碳酸酯和赛璐珞等材料时，弯曲与间隙大小和

材料的约束条件无关，在冲裁直径为32mm的圆形件时，曲率在 $10^{-6}mm^{-1}$ 以下，可以认为基本上是没有弯曲。但是，在冲裁尼龙、聚缩醛和高密度聚乙烯等材料时，制件的曲率可达 $10^{-5} \sim 10^{-4}mm^{-1}$ 。

e. 利用刀刃(冲切型)的冲裁 利用复刃冲裁塑料，从生产率方面来看有很大优越性，但一般来说无论怎样选择冲裁条件也

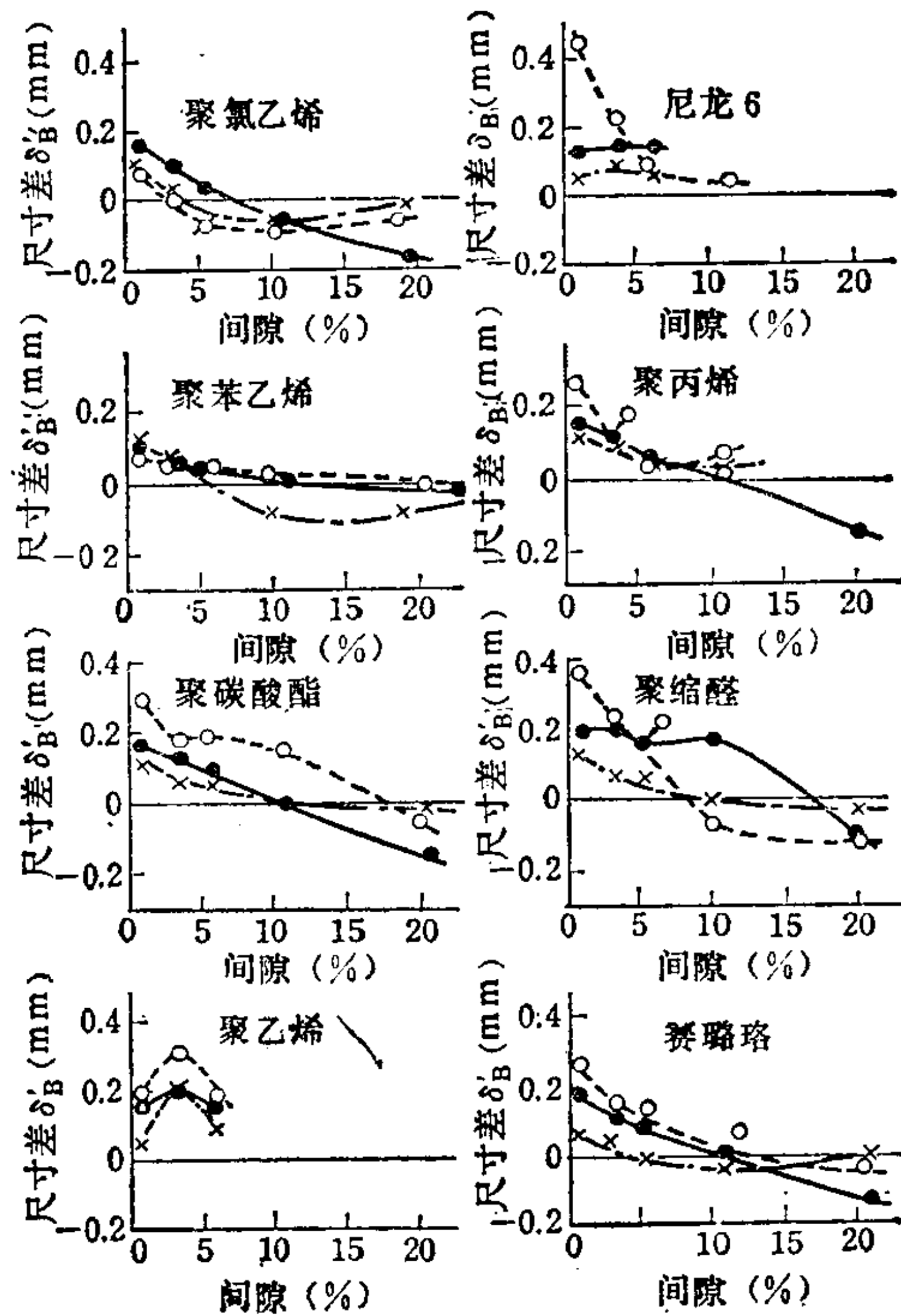


图2.167 冲裁件和凹模孔的尺寸差

—•— 材料支承
 - - - ○ - - - 材料固定
 - · - × - · - 材料全固定

} 冲裁直径32mm

不能得到光洁的剪切断面。针对这种情况，已将过去用于剪切皮革、纸和布等方面的刀刃剪切法用于冲裁塑料，从而获得非常平滑而光洁的剪切断面，最近这种方法正引起人们的注意。这种方法如图 2.168 所示，是将具有刃尖角 α 的刀刃制成冲裁轮廓的形状，再使该刀刃压入放置在平坦的下垫

(以适当的材料制成)上的塑料板，冲裁成所需要的形状。将这种方法应用于大量生产时，会产生刃口的磨损和破裂以及所用下垫损伤等问题。为此应该考虑选定适当的刃尖角 α ，并且要使刃口带有适当的圆角，还要设法改进下垫的材质和结构。

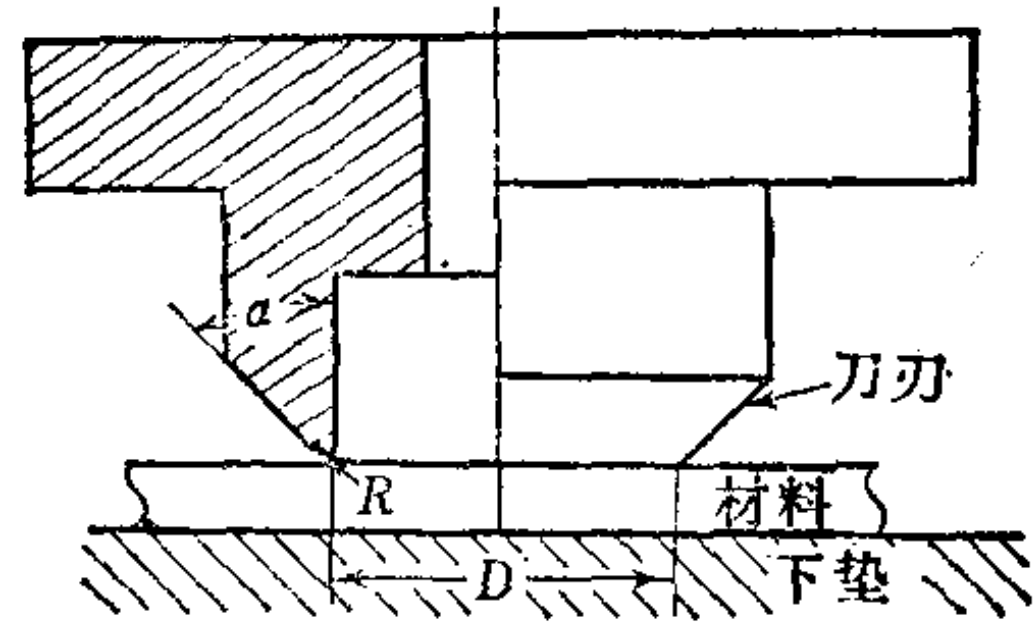


图2.168 刀刃型冲裁模

图 2.169 所示为冲裁聚碳酸酯板时刀刃受力的变化曲线图，在下垫材料硬度与被加工材料相同或者更硬时，在刀刃切入板厚的80%左右时，裂纹进入材料内部，直到完全贯通板厚后冲裁力继续下降。其后，当刃尖开始切入下垫材料时，冲裁力再一次上升。当下垫的材质比被加工材料软时，要引起下垫的上平面下沉，致使完成冲裁时需要的行程增加，另外最高冲裁力也增大。一般的倾向是下垫材质硬时最大冲裁力低，在较早的行程位置出现最大载荷点。

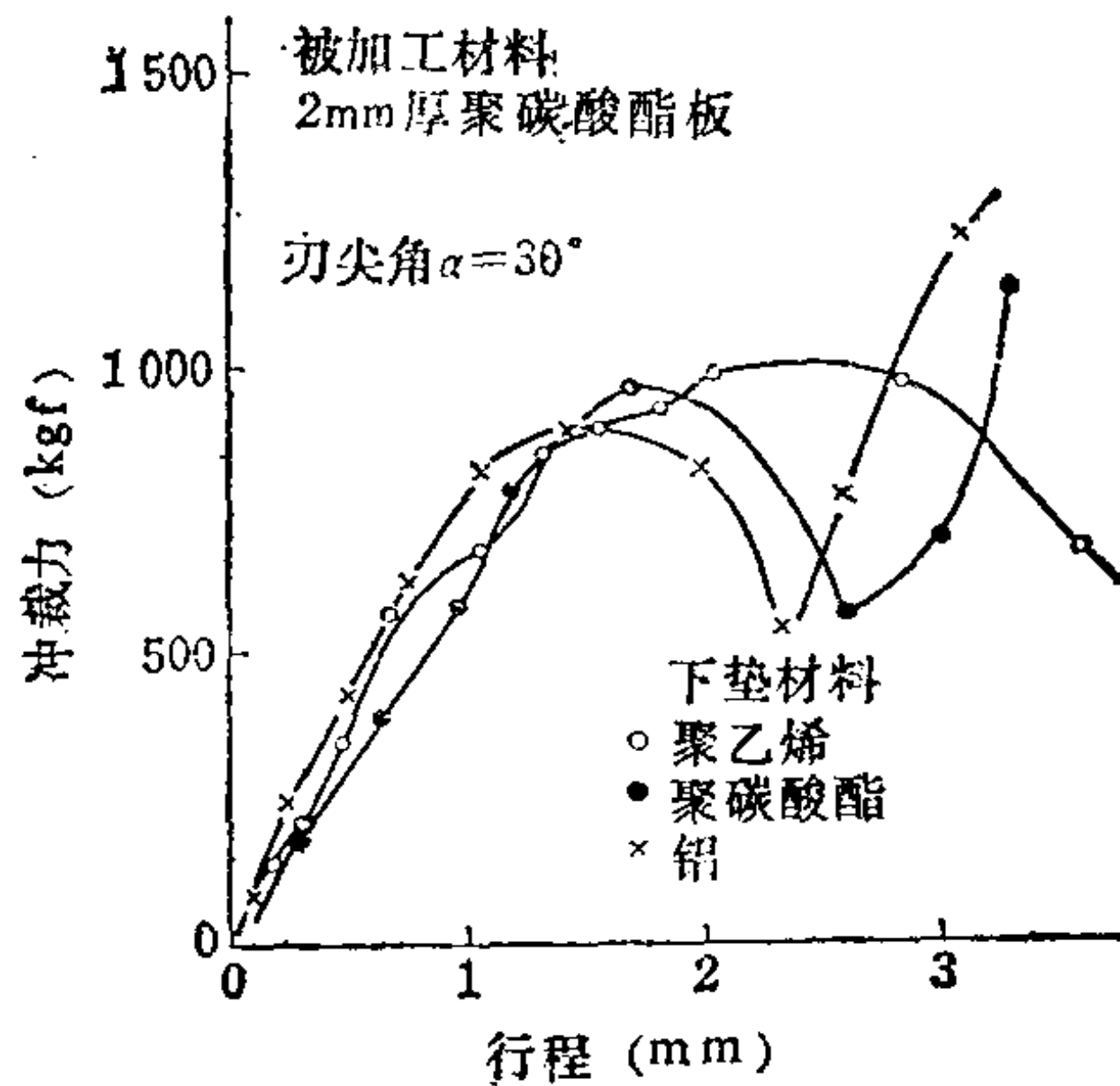


图2.169 刀刃的冲裁力—刀刃行程曲线图 (冲裁聚碳酸酯板, 改变下垫材料)

一般，如果使用软质材料作下垫，其弹性模量小时，剪切断面上由裂纹引起的剪裂面显著。在刀刃锐利时，除去下垫极软的

场合，剪切断面一般都非常光洁。为了防止刀刃损坏，如将刃尖制成圆角 R 为 0.1mm 、冲裁速度低（ $3\text{mm}/\text{min}$ 左右）时，剪切断面的形状不好，但如将速度提高到 $3.6\text{m}/\text{min}$ 左右可得到光洁的剪切断面。刃尖角 α 在 $30^\circ\sim 45^\circ$ 之间，对剪切断面的光洁程度没有什么影响。在冲裁直径为 30mm 左右的制件时，制件尺寸与刀刃尺寸 D 之差为百分之几 mm ，小于一般冲裁时的 0.1mm ，可得到尺寸精度良好的制件。

为了防止下垫的损伤，可在下垫上面制成如图2.170所示的与刀刃相配合的沟槽，或者如图2.171所示在槽中充填适当的物

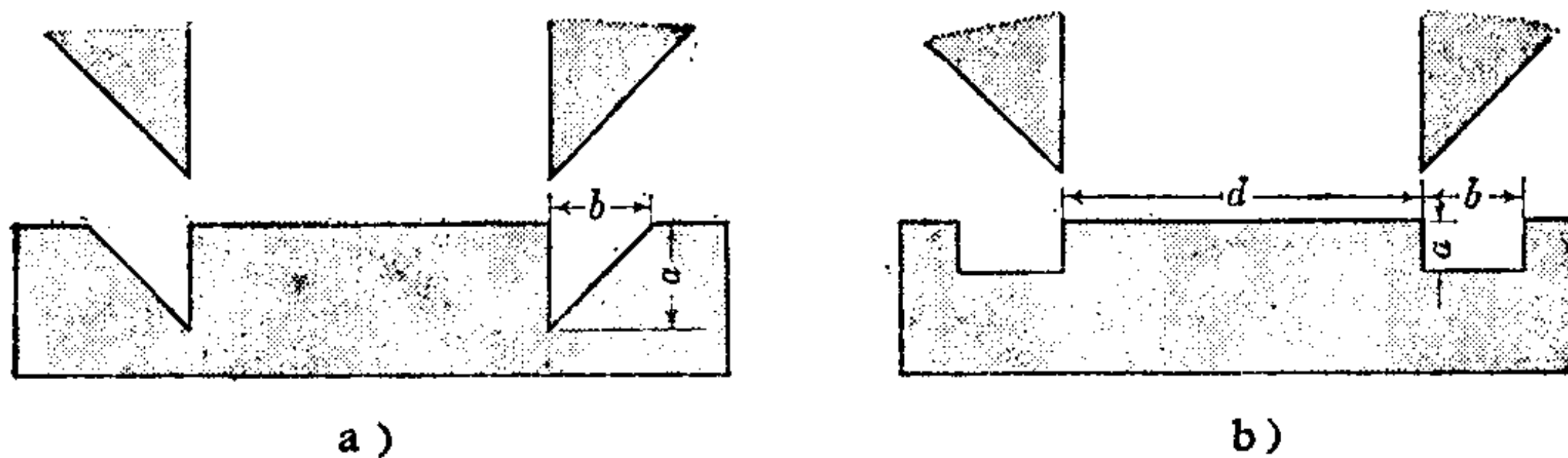


图2.170 改进的下垫结构

a) 带有三角形沟槽的下垫 b) 带有方形沟槽的下垫

质。在下垫上面开沟槽可以防止刀刃的损伤，但是如果沟槽的宽度 b 和深度 a 大，就会使制件的剪切断面的质量下降。因为 a 和 b 大，在冲裁时材料要被压进沟槽，其下面受拉应力的作用，于是这一部分被撕破而断裂，使剪切断面恶化。就这一点来说，无论是三角形的沟槽还是四方形的沟槽，如果其宽度 b 和深度 a 相同则与

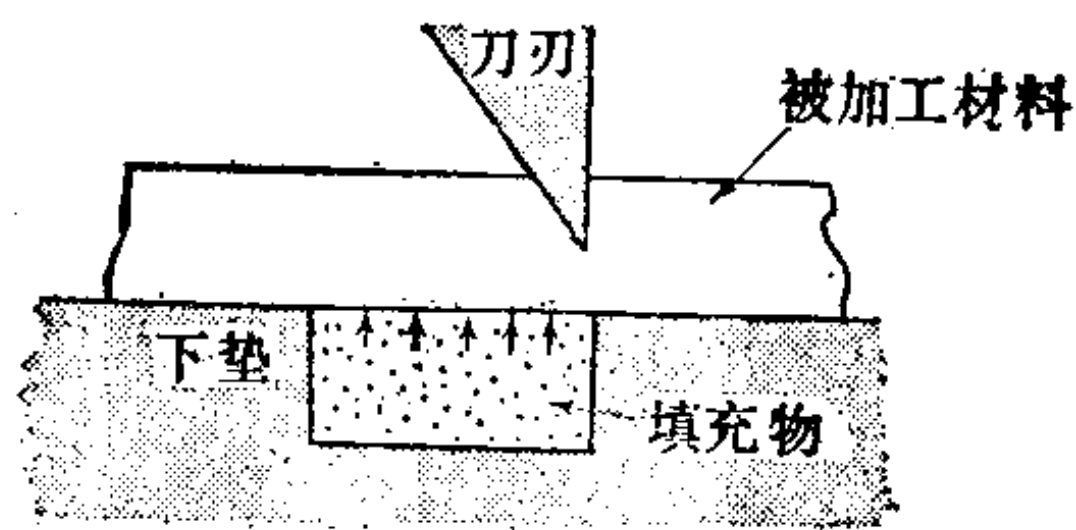


图2.171 沟槽填充的下垫

沟槽的截面形状没有关系。在沟槽里如果填入聚丙烯或橡胶等柔软物体，以抑制冲裁时材料的变形，剪切断面就会显著地改善，可以得到与用硬质平板作下垫时同样的良好结果。这种下垫叫做沟槽填充下垫。另外，在刀刃的外侧利用压料板压紧材料，虽然可以提高对材料的约束程度，但从剪切断面光洁的角度来看未必有

效。

为了制造价廉的刀刃冲裁模，如图 2.172 所示，将一侧带有

刀刃的带钢弯曲成冲裁轮廓形状，嵌入增强胶合板制成镶嵌冲裁模。这种模具叫做毕克冲模或本迪克斯式冲模^[73]，被用来剪裁纸或布。这种模具所用的带钢如图 2.173 所示，厚度为 0.7~2.0mm，宽度(刃的高度)为 20~40mm，硬度为 Hs45~70，刃尖角为 30°~60°，刀刃的形状有单

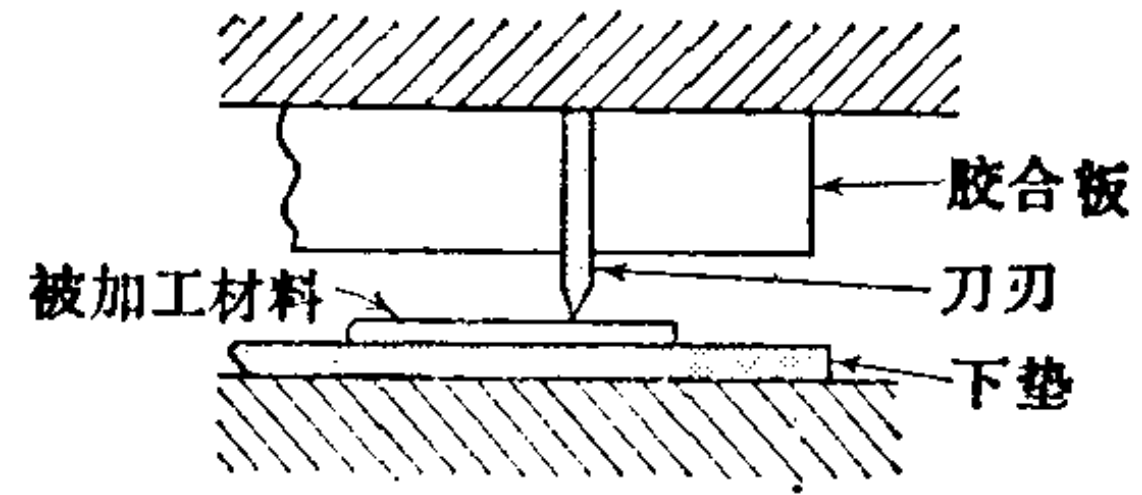


图2.172 冲切模（本迪克斯式冲模）


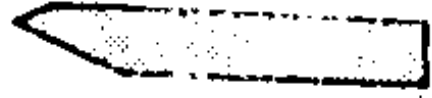
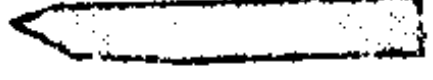
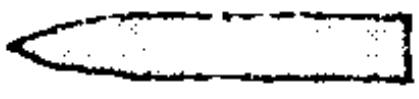
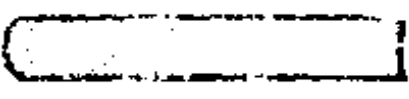
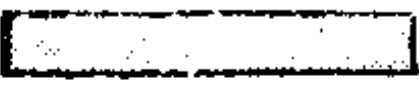
刀刃高度 (mm)	刀刃厚度 (mm)	刀刃硬度 (Hs)	刀刃形状
23.6 29	0.7	45	双面刃  刃尖角30°, 40°, 45°, 48°, 60°
	0.9	50	
	1.2	60	
	1.5	70	
	2.0		
23.6 29 32	0.7	45	单面刃 
	0.9	50	
		70	
20 32 29 40	2.0	45	单面二段刃 
		50	
20 23.6	0.7	45	双面二段刃 
	0.9	55 60	
29 32 40	0.7	45	钝刃 
	0.9	50	
	1.2	60	
	1.5 2.0	70	
			钝刃 

图2.173 带钢的刀刃种类

面和双面的，另外还有其它若干种，可根据要求从市场上买到。因为这种模具的结构简单，所以制造周期短，而且成本低，因此用于冲裁精度要求不太高的塑料板极为方便。如果同时使用沟槽填充的下垫，可得到具有光洁剪切断面的冲裁件。

2.7 棒料及管材的剪切

2.7.1 棒料的剪切

a. 棒料剪切〔85〕 切断棒料基本上依靠切削加工，利用剪切法切断的例子还不那么多。从生产性上看，棒料剪切法具有加工速度快、材料无损失等优点，胜过别种类型的切削切断法。但是剪切件的精度却相当差，因而主要用于剪切精度要求不高的线材，或象锻造坯料那样在剪切后还可借助后续加工进行校正的材料。

就棒料而言，被切断部分的材料厚度大多比板材的厚度要厚，而切断长度则小于其直径，因此切断面一般在剪切件的表面中占有很大的比例，致使切断面的质量显得极为重要。在广泛使用棒料剪切法的锻坯下料领域中，多数都是为了得到长度小于直径的薄剪切件。剪切长度的极限在精度上规定为其直径的 $1/2$ 。再薄的坯料可通过后续的镦锻加工来获得，但是如果镦锻后的坯料很薄，即直径超过其厚度的 6.5 倍时，则采用板料冲裁较为有利。另外，对于直径大于 60mm、长度大于 70mm 的坯料，从设备和加工速度方面来看，则以采用锯床切断为宜。

b. 棒料剪切模〔86〕 棒料剪切是以单面剪切的切断方式进行的，因此能够做到无材料损耗，但同时两个切面都必须成为良好的剪切面。为了简化模具结构，也有采用

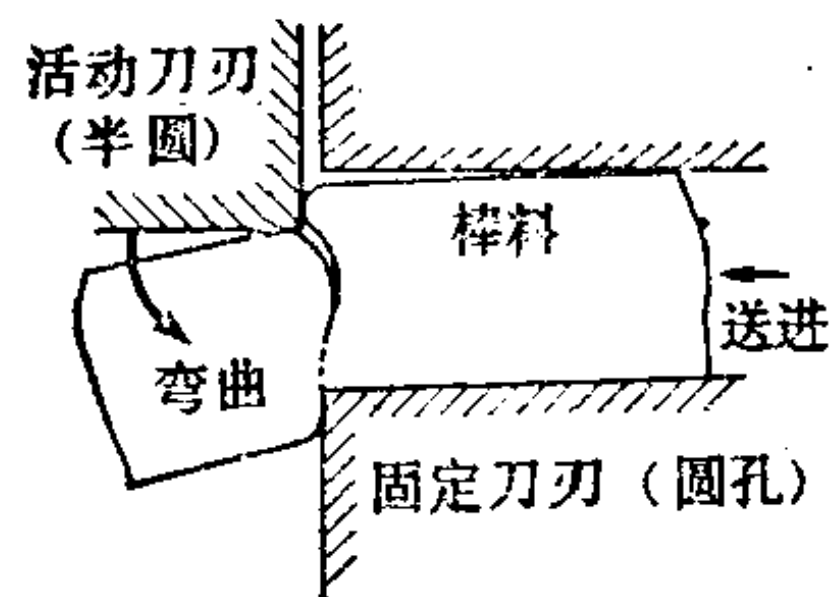


图2.174 半圆孔活动刀刃剪切

用如图 2.174 那样的简单半圆形剪切模的，切断的制件下方无支承。但由于剪切时产生的弯曲作用，就会留下因相当大的压痕而

带来的压塌，又因为裂纹产生自活动刀刃那一侧，即受弯时的拉伸一侧，所以被切下部分的切口为凸面，留下的切口为凹面。因为这种状态是不希望得到的，所以一般多采用如图 2.175 所示的剪切模，其活动刀刃也是圆刃。这种场合需要安装能在压力机下死点附近迅速动作的顶出装置。并且在材料送进时，必须使固定刀刃和活动刀刃的中心一致，因而在剪切和顶出后，必须利用弹簧等使活动刀刃退回到规定的位置。因此这种模具的活动刀刃不与压力机滑块相连接，只在剪切时才由压力机滑块承受载荷。

刀刃一般作成如图 2.176 那样的圆筒形镶块安装在模具上。在两个刀刃之间除了保留滑动用的间隙外，还要附加与材料厚度相对应的间隙。即在剪切棒料时，由于材料厚度从中心到两端逐渐变薄，因此间隙和材料厚度之比

必须一样。为此，在剪切圆棒时可在刀刃上开出圆弧状沟槽，或

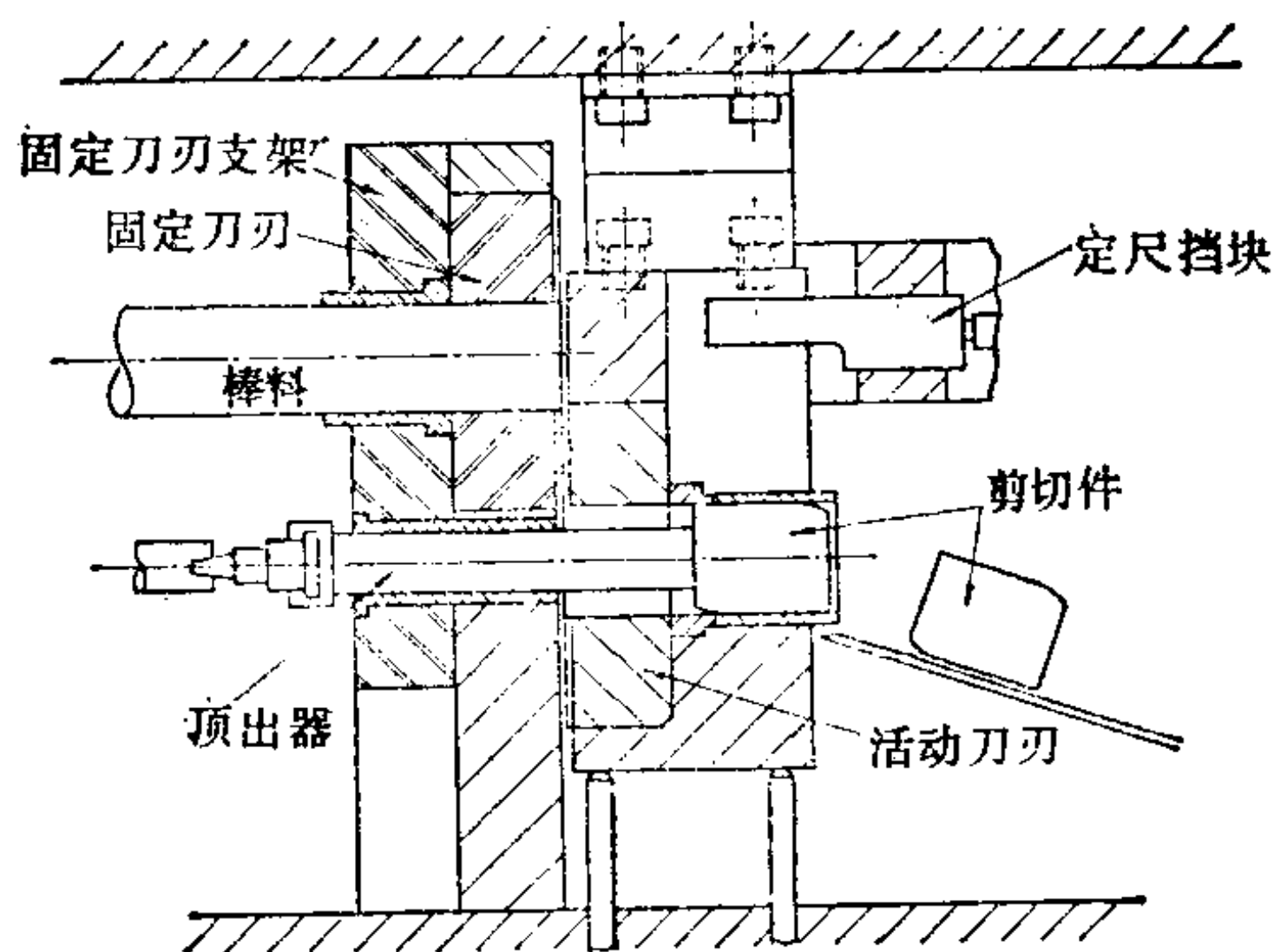


图2.175 圆孔活动刀刃剪切模
(Verson Allsteel Press Co.)

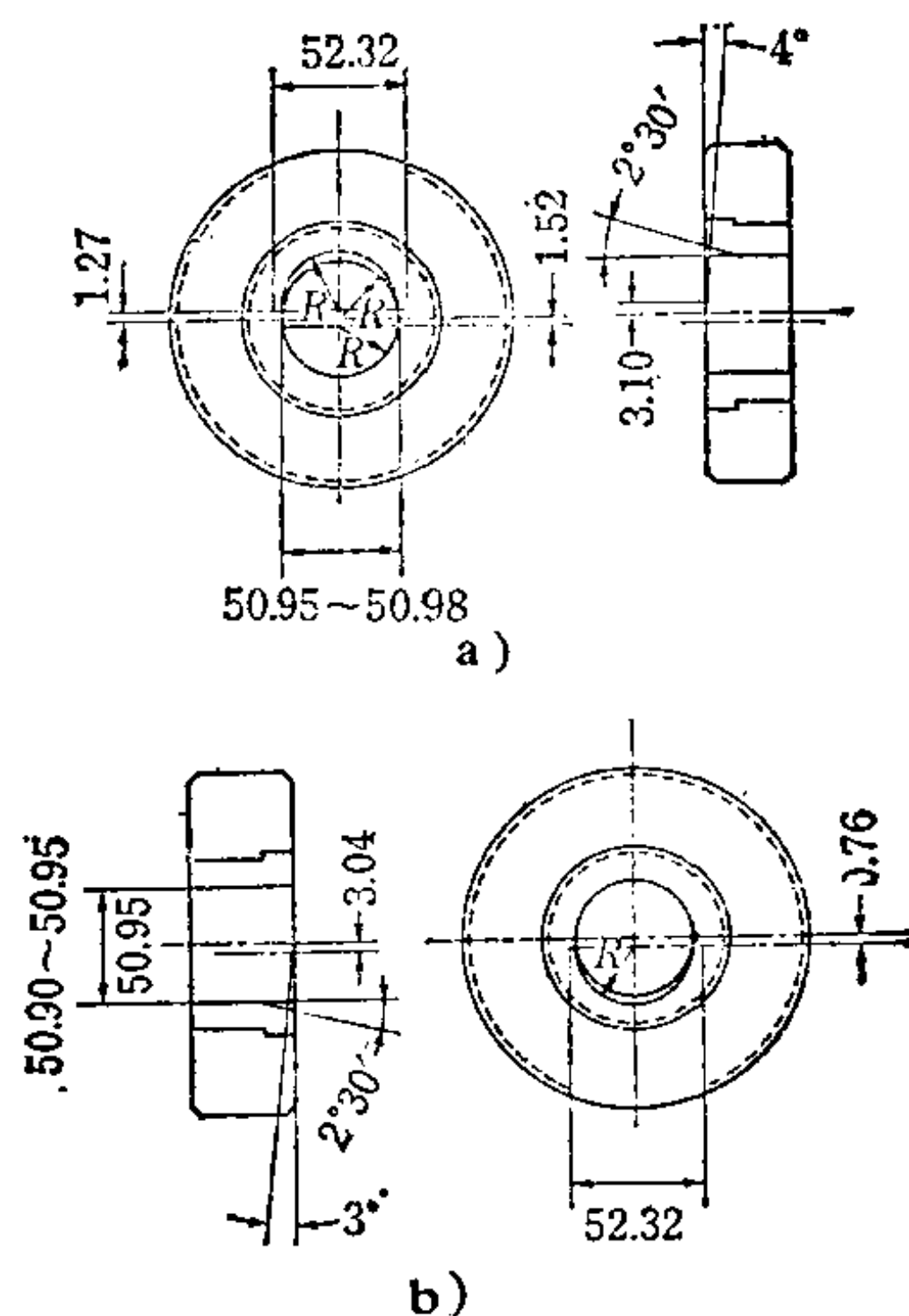


图2.176 刀刃镶块和间隙示例
(Verson Allsteel Press Co.)

a) 活动刀刃 b) 固定刀刃

者如图所示倾斜着研磨刀刃侧面，使间隙大致保持一致。

另外，为了补偿因压痕引起的压塌，有时也在刀刃的前面制出如图所示的退让槽。此外，考虑到棒料直径的尺寸分散性和送进方便，可把棒料和刀刃孔径的间隙值取为直径公差的1.5倍左右。

c. 剪切件的缺陷〔87~89〕 图2.177所示为棒料剪切件上出现的有代表性的缺陷。这些缺陷虽不一定是棒料所特有的，但切口精度问题在棒料剪切中特别突出。

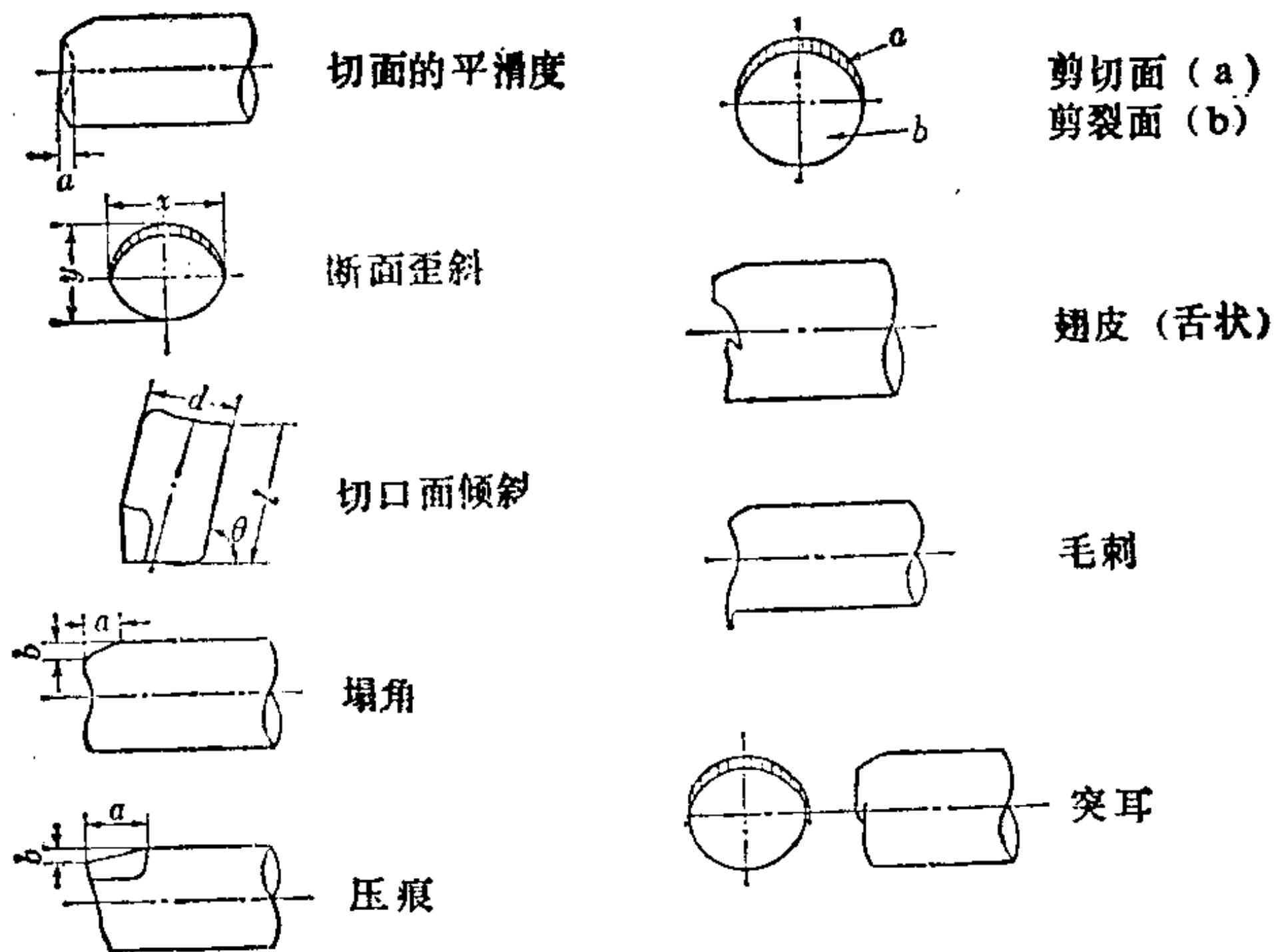


图2.177 剪切件的缺陷 (摘自ICFG数据表No. 72004)

(i) 切面的平滑度 剪切裂纹和刀刃的连线不一致。即使在裂纹会合很好的良好剪切时，切面也是呈轻微的S形的剪裂面。

(ii) 断面歪斜 塌角和棒料直径与刀刃孔径之差引起的压塌会产生这种缺陷。

(iii) 切口面倾斜 由于存在间隙和剪切时材料上翘，使得切口面与棒料轴线不垂直而引起，特别是剪切长度/直径小于1时更容易出现这种缺陷。

(iv) 塌角 产生于材料受拉缩，会使端面的圆度下降。软

质材料塌角特别显著。

(v) 压痕 因刀刃压塌材料而产生压痕。半圆刀刃の場合，压痕特别大。

(vi) 剪切面 在剪切棒料时会出现月牙状的塑性流动面。剪切棒料的目标是得到平滑的剪裂面，从模具寿命的角度来看，剪切面越小越好。另外，也不希望出现由于间隙过小而产生的二次剪切面或二次修整面。

(vii) 剪裂面 在剪裂面中有如图 2.178 所示的因间隙过小时裂纹受到抑制而产生的翘皮(舌状)或结疤，在间隙过大时产生台阶。

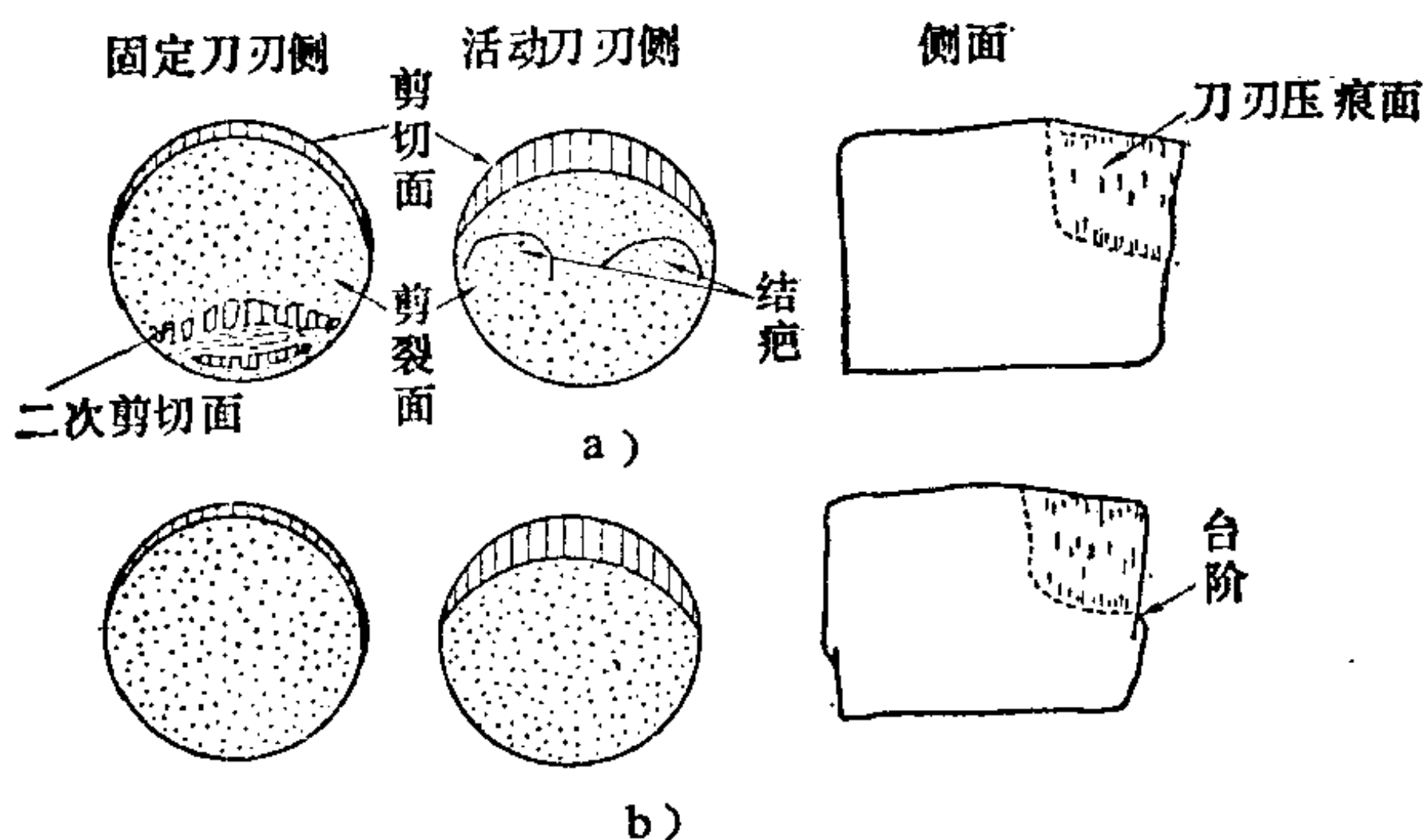


图2.178 剪切件缺陷和间隙的关系(工藤, 田村)

a) 间隙小时 b) 间隙大时

(viii) 毛刺 通常的毛刺是由间隙过大或刀刃磨损与崩坏产生的。此外，也有因为刀刃侧面受到强烈摩擦而产生的剪切面或剪裂面的凸出部分的毛刺，还有圆棒料特有的两端部的毛刺(突耳)。

d. 剪切条件的影响

(i) 适当的间隙〔90〕 在剪切棒料时，适当的间隙取决于切口精度。由两刀刃处发生的裂纹必须会合，而且开裂产生的剪裂面也要尽量平滑。因此，对于间隙的控制要比板料冲裁时更为严格。一般来说，棒料剪切时材料约束较弱，间隙应小一些才好。剪

切棒料的适当间隙比冲裁板料时小得多，可以取5%为中心的2~10%的值。间隙的适当值也因棒料材质的不同而不同，材质越硬或越脆时间隙越要取小些，材质越软或材料的延性越大时间隙越要取大些。另外，材料的约束条件强时可取稍大一些的间隙。

(ii) 材料约束 利用圆孔活动刀刃可以防止因材料弯曲引起的上翘。但是棒料的轴向约束不利于裂纹的成长和会合，剪切面增加而使剪裂面的状态恶化，并且断裂分离后的切口还会因相互摩擦而导致出划伤等许多缺点。因此，在实际生产中有许多在裂纹成长中棒料能在其轴向自由移动的条件下进行剪切的例子。有时棒料在轴向上的约束也会受到送料装置或定尺的影响。但是市售的棒料剪切机中，也有不带轴向约束的，而是有意识地设法夹紧棒料，以便得到良好的尺寸精度和满意的切口面。

(iii) 倾斜剪切〔91〕 既然有间隙就不可能避免切口的倾斜。为了解决这个问题，可采用如图2.179所示的倾斜剪切法。这种方法是使供给的棒料轴线对水平倾斜 7° ，以补偿切口面的倾斜。这种场合即使在刀刃上不开设特殊的沟槽，间隙也能与材料厚度相适应。另外，如果装有如图所示的可后退的支架，利用半圆形活动刀刃也能收到与圆孔活动刀刃同样的效果。

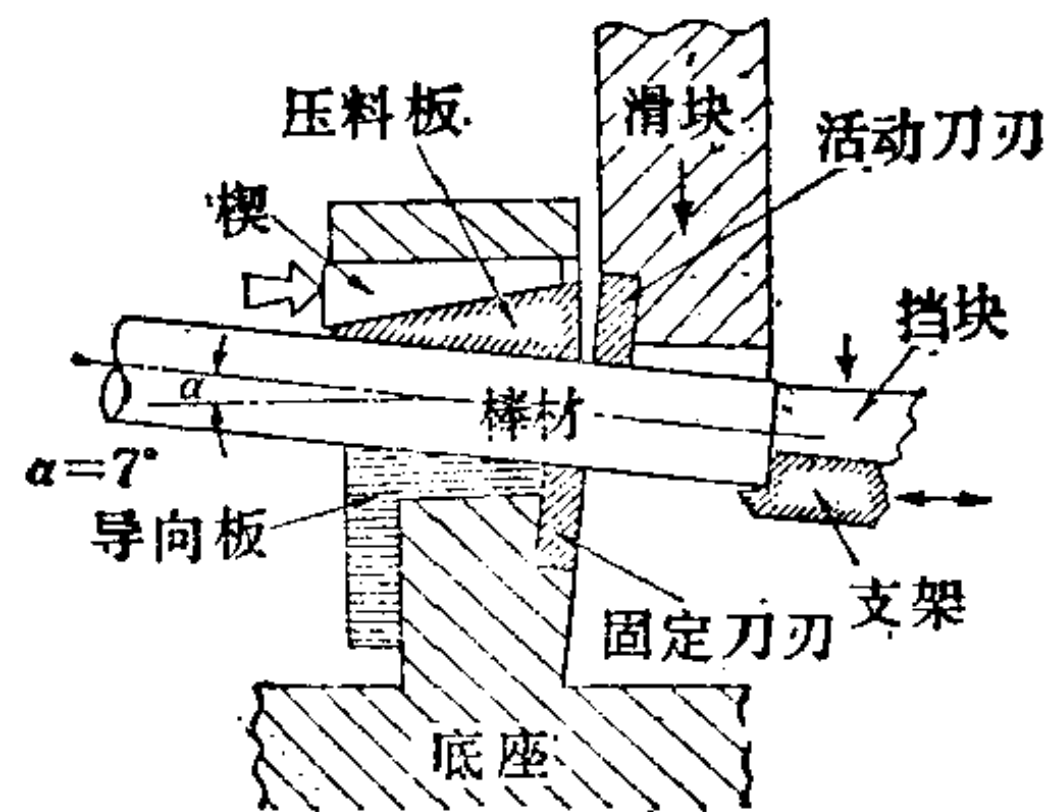


图2.179 倾斜剪切装置(Hayward Int. Cold Forg Co.)

(iv) 剪切速度 剪切速度的影响是相当显著的，高速剪切可获得缺陷少的良好切口面。这种速度效应对于钢材特别明显。普通机械压力机的剪切速度范围通常可达50~300mm/s。因此机械压力机比液压机好，另外，在压力机满负荷的情况下进行剪切时，也有剪切速度因加载而下降导致切口面变坏的例子。可以认为这种现象与剪切变形速度有关，因此在使用同一台压力机进行剪切时，棒料直径越大变形速度越低，切口面的质量也越

差。积极利用这种效应的是高速精密剪切，不过即使没有这种特殊压力机，也可研制那种使用凸轮机构具有 1000mm/s 的高速机械压力机，以便利用这种速度效应而取得良好的结果。

(v) 可剪切性 切口面的精度也因棒料材质的不同而异。在剪切棒料时，为了使裂纹很好会合以得到平滑的裂面，因而稍脆的硬质材料比软质材料容易得到高精度的切口面。对于钢材来说，中碳钢和合金钢的裂纹方向和剪切方向比较接近，其裂纹的会合也较容易，歪斜也少，但是低碳钢的含碳量越少，剪切越困难。因此，先降低材料的延伸率使其脆化后再进行剪切，也是得到优质切口面的一种方法。另外，未退火的材料比退火的材料容易得到良好的切口面，加工硬化的冷拔材料比软质材料容易得到良好的切口面。特别是低碳钢加热至蓝脆温度进行剪切比加热剪切〔90〕更能得到良好的切口面。此外，高碳合金钢等材料在剪裂面内沿偏析方向偶尔发生的微小裂纹，可通过低温加热剪切予以防止。

e. 棒料的精密剪切法

(i) 约束剪切法〔92〕 约束剪切法本来是用于板料精密冲裁的，而现在则把这种方法用于棒料的精密剪切，也就是利用塑性剪切使加工面成为剪切面的方法。在这种方法确立的初期，作为一种抑制裂纹的手段，如图 2.180 a) 所示，试验了从棒料的轴向上附加压力的轴向加压剪切法，但是正在采用更简便的可获得同样效果的约束剪切法如图 2.180 b) 所示，利用在棒料送进侧的压料板和棒料之间的摩擦力对材料进行约束。另一端的端面与挡

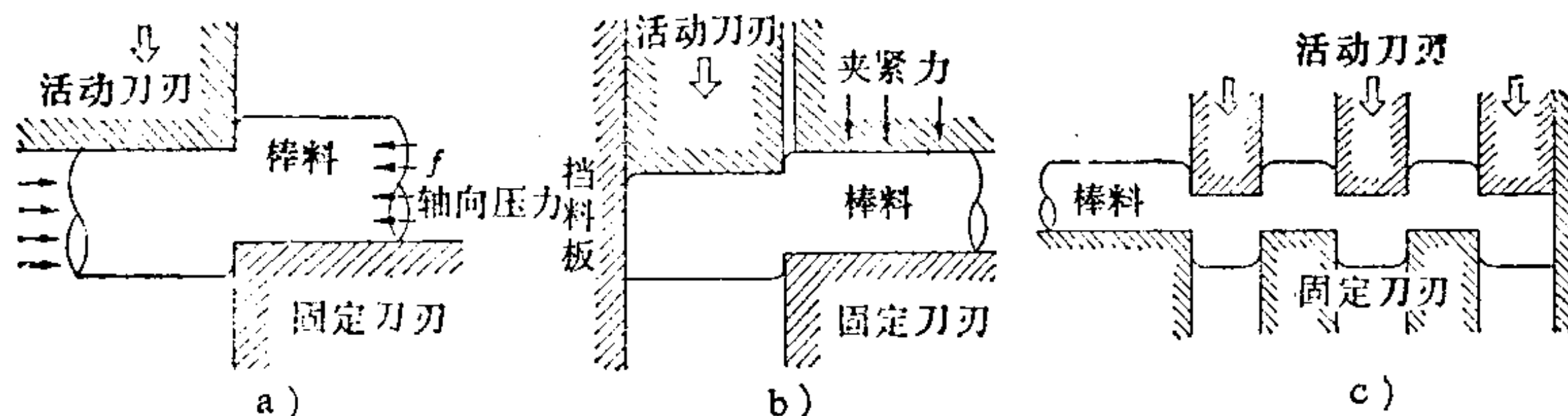


图2.180 约束剪切法 (中川、前田)

a) 轴向加压剪切法 b) 夹紧式约束剪切法 c) 互相约束的多数面同时剪切法

料板表面接触，因而材料在这个方向的移动也受到约束。在这种约束状态下，在间隙为零的条件下进行剪切，棒料就受到以刀刃为界使其向两侧移动的力的作用，这种移动受到约束就产生轴向压力。图 2.181 所示为由于约束作用产生的轴向压力的测定结果。由图可知，所产生的轴向压力高达剪切抗力的 $1/2$ 。

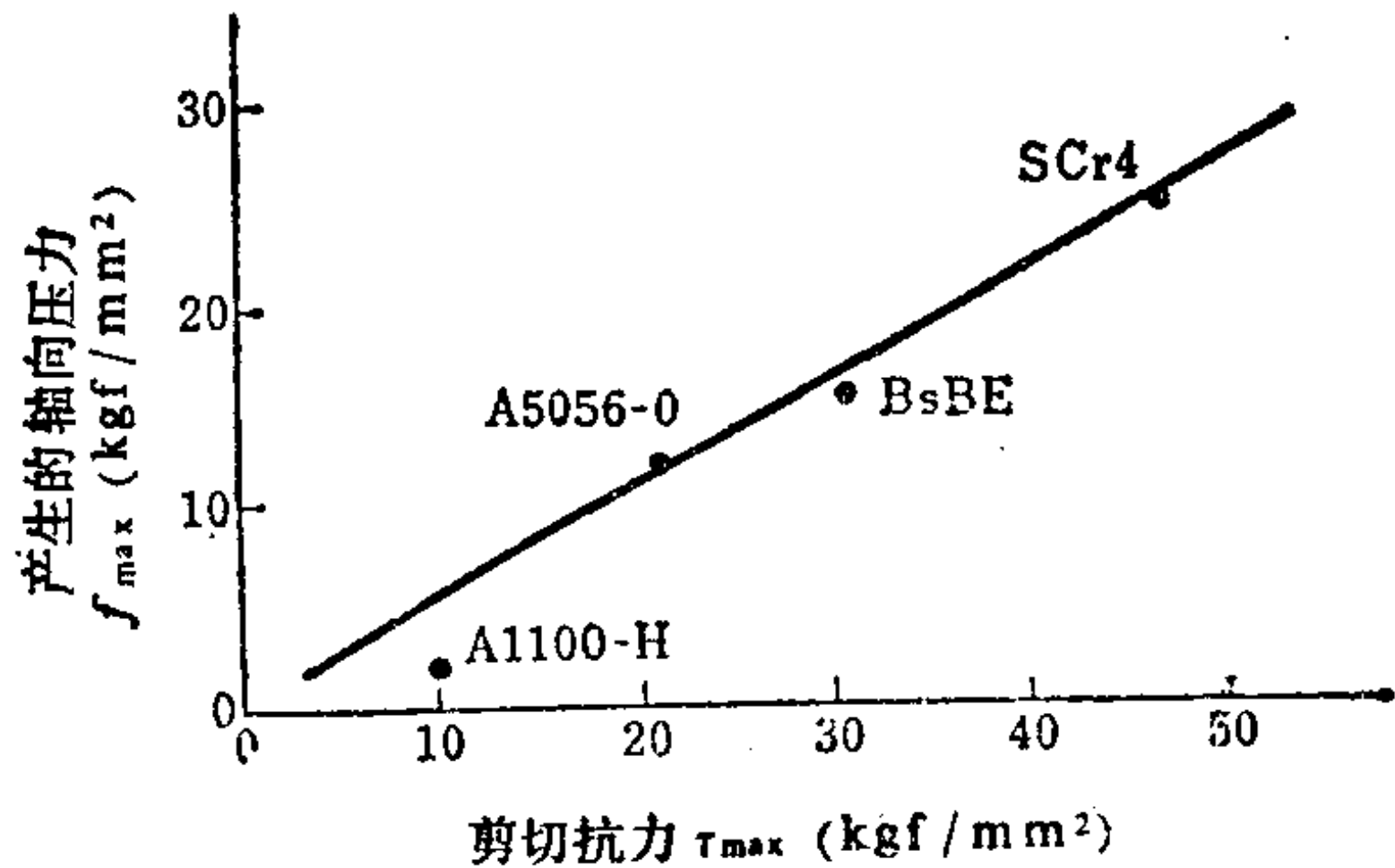


图2.181 约束剪切时产生的轴向压力
(中川、前田)

这种约束剪切法，从加工机理方面来看，可以视为与板料的精密冲裁法或光洁冲裁法相同，在实施中遇到的问题也有许多是共同性的。但是棒料剪切也有其特有的问题。一般来说，棒料剪切与板料的精密冲裁相比，技术方面的困难问题较多。例如，在精密冲裁法中所用的突起压入会损伤棒料表面，因而不应采用。因此要采用增加压料板长度的办法使约束力的值达到剪切力的几倍。另外，关于使刀刃带圆角作为防止产生裂纹的办法，会产生毛刺，所以也不能采用。此外，在棒料剪切中要求两个切口面都是良好的加工面，这是难以采取各种有效对策的原因。

棒料约束剪切的材料直径一般都在 10mm 以上，因此模具的烧伤和磨损加剧，寿命缩短。从理论上来说，适用于精密冲裁的延性材料无疑能采用约束剪切法，但因直径太大和凹模刃口不能开设圆角等原因，那么不论是一般钢材还是极软钢材，也只能限于 $\phi 10\text{mm}$ 以下的线材，因此在实际应用中多限于如铜，铝等非铁金属那样一些与模具寿命无关的材料。采用这种方法剪切，不仅可以得到表面光洁度良好的切口表面，而且塌角和歪斜也较少，因而对硬质材料剪切的长度可达直径的 $1/3 \sim 1/4$ 。

速剪切法的另一个优点是剪切变形区被限定在局部，因而塌角小，切口歪斜也小。

能明确显示出高速剪切效果的刀刃剪切速度一般为 $5\sim 15\text{m/s}$ 。这样的速度可由锻造用高速压力机来实现，但在目前也有采用简单机械设备的，如采用空气锤的剪切方式〔93〕，但也在研究利用内燃式高速锤（Petroforg）进行高速剪切。这种高速剪切的效果对于钢材尤为显著，因而主要用于钢材的剪切。

高速剪切法的主要问题是工具破损和工具寿命短。关于工具破坏问题，要通过适当的工具设计和采用吸收冲击能的装置来解决，关于工具寿命问题要通过选择适当的加工条件和选用良好的工具材料来解决，特别是关于工具寿命，可以预料会出现两个相反的结果，即在剪切过程中发生的高热会促进工具磨损，但是在实际中可通过适当选择加工条件有效地解决工具寿命问题。另外，在剪切长度小于直径的坯件时，即使采用带圆孔的刀刃也不一定能够得到平滑的剪裂面。这种现象可以认为是由于被剪下的制件惯性小而向后方排出引起的。此外，在高速剪切的场合，由设备和工具产生的噪声也是一个严重的问题。为了解决这个问题，可将设备本身完全罩起来，或者实行全自动化在无人操作的工作室里进行剪切。

高速剪切能够得到质量优良的剪切切口的原因，目前还有许多不明确的地方。起初有人认为其原因是材料的脆化，或者是刀刃速度比塑性变形速度和裂纹成长速度快造成的。但最近有人认为主要原因是剪切中发生的热使应变集中的缘故。也就是由于剪切变形产生的热量，没有充分的时间从变形的部分向四周传递，形成局部加热状态导致材料软化，使得这部分的局部变形更加急剧，最终只在薄层状的领域内引起剪切变形。该薄层出现在变形最激烈的连接刀刃的连线上，因而可以认为裂纹沿着该薄层成长，或者沿该层被撕裂而完成分离过程。

2.7.2 管材的剪切

a. 管材剪切 管材剪切与其他切削或磨削切断相比，除了

加工速度快和生产率高以外，还具有不会因有切屑而弄污管料内部，也不会切口上产生毛刺等优点。虽然剪切有相当广泛的潜在用途，但剪切加工本身很麻烦，而且在技术上也有不够成熟之处，所以实际上管材剪切的例子极少。如果用剪切棒料的方法剪切管材时，管材必然被压扁而不能使用。在管材剪切时注意防止薄壁管因剪切被压扁是重要的，现在已有几种特殊的管材剪切法可以采用。另外，在剪切厚壁管时除有压扁的问题以外，还有与棒料剪切同样的切口面精度问题，使剪切更为困难。

(i) 双重冲切法〔95〕 在管材剪切时发生歪斜是因为剪切时刀刃的作用力，使材料被挤向管的内侧，而管的内侧没有任何支承而造成的。因此，如果采用某种方法加上一种力，使材料从管内向外扩张，再用刀刃从外侧支承，就能防止管材发生歪斜。所谓双重冲切法，如图 2.183 所示，就是首先在第一道工序中利用刨刀①刃口在水平方向将管材切一切口，然后在第二道工序中利用尖端锋利的活动薄片刀刃②切入切口的方法。这时切口的两侧由于组合模的作用被牢固地夹紧，该组合模起到固定刀刃的作用。相当于活动刀刃厚度的切屑向两侧外部排出，没有使管材产生歪斜的作用力。在精度方面存在的问题是，在第一道工序刨切切口时和在底部冲切时多少会产生一些毛刺和歪斜。这种方法可用于钢管等的大量剪切，但第一道工序的切口加工有限制，因而能用于剪切薄壁管而不适用于厚壁管。另外，这种方法有切屑，所以材料利用率多少有些下降，目前剪切切断长度大的管材专门采用这种方法。这种双重冲切法需要有两道工序，所以通常是使用专用设备。但是，如果没有第一道工序的切口，也就不需要夹紧装置，只在普通压力机上装剪切模即可进行剪切加工，可以大大简化。例如象铝制窗框

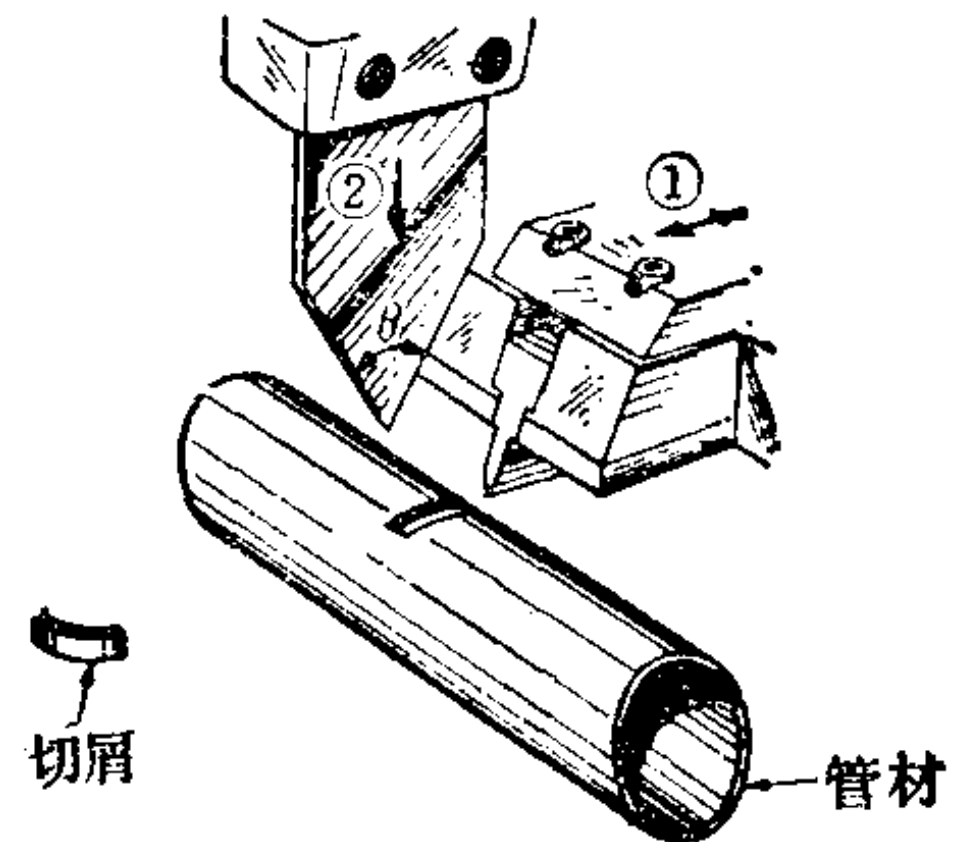


图2.183 双重冲切法
(Pines公司)

的挤压材或轧制成形的槽形材，在其断面上有开口部分，就用这种开口来代替切口，这样便可用一道工序完成剪切加工。象管材那样具有封闭曲线断面的材料，不能用压力机切出这种切口，也可用切削加工或磨削切出切口，这时可以放宽壁厚的限制。

对于薄壁管，允许其切口多少有些歪斜时，可以省略双重冲切法第一道工序的

切口加工，而用角度很小的薄片刀刃进行冲切，这种方法叫做冲切法。采用这种方法进行切断，如图 2.184 所示。当刀刃的尖端角度小时，就能得

到歪斜较小的剪切件。虽然尖端角越小歪斜也越小，但管材壁厚稍有偏厚，刀刃产生崩刃的危险就增大。

(ii) 芯棒剪切法^[96] 防止管材被压扁的另一个方法是往

管内放置芯棒的剪切法。一旦将芯棒放入管内就没有压扁的余地，因而切口的歪斜程度被限制在芯棒和模具之间的间隙内。这种方法如图 2.185 所示，将活动芯棒安装在活动刀刃上，两者形成一个整体，因而从模具结构和制件取出的角度来说，这

种方法适用于剪切长度较短的制件。这种方法与双重冲切法相比，其优点是不需要两道工序，对于厚壁管或断面形状复杂的异形管也能进行无材料损失的剪切。另一方面，由于冲模对中心及剪切后制件的取出等问题，模具多少要复杂些。

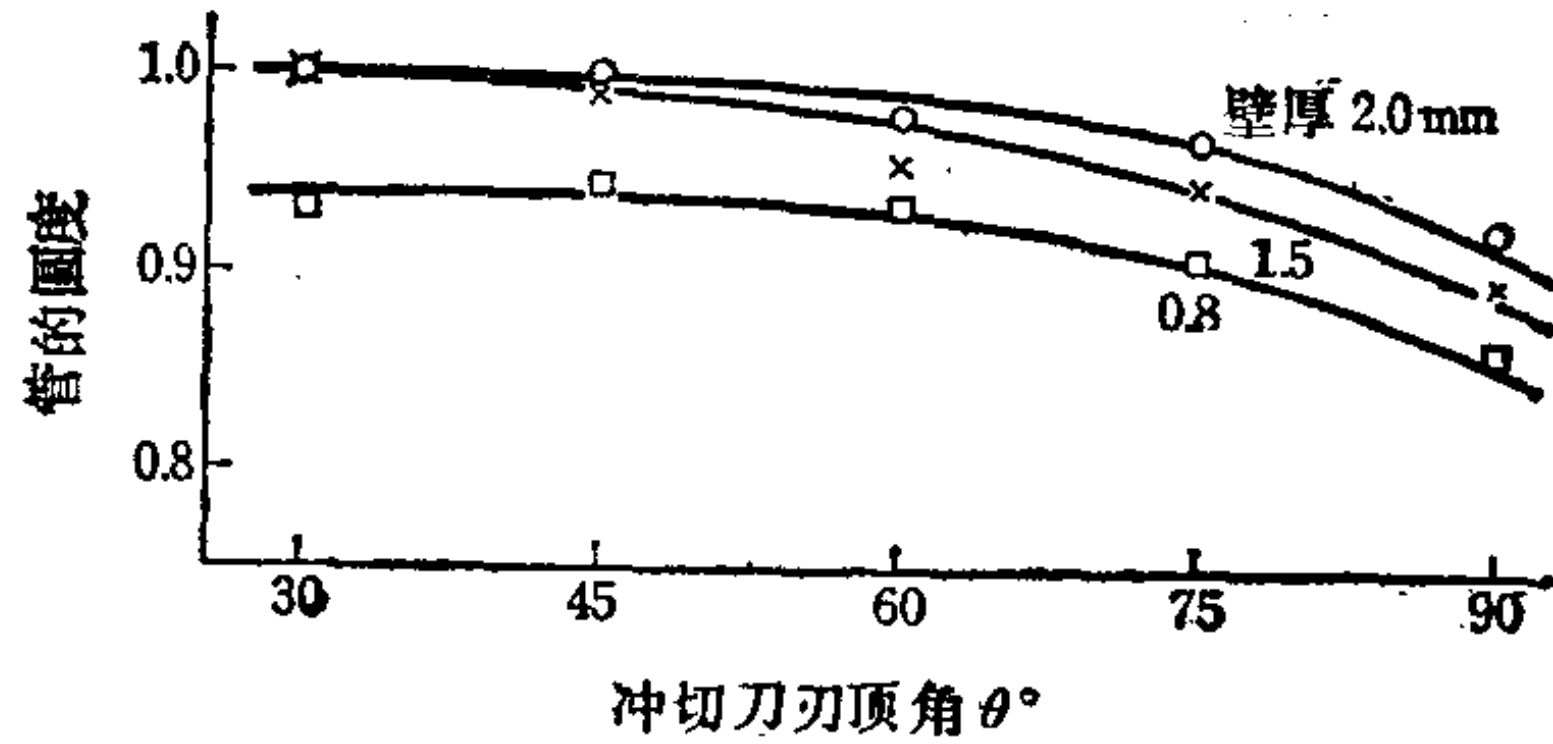


图2.184 无切口一道工序冲切时管材的压扁
(黄铜硬质材料，外径 $\phi 15\text{mm}$) (中川、鈴木)

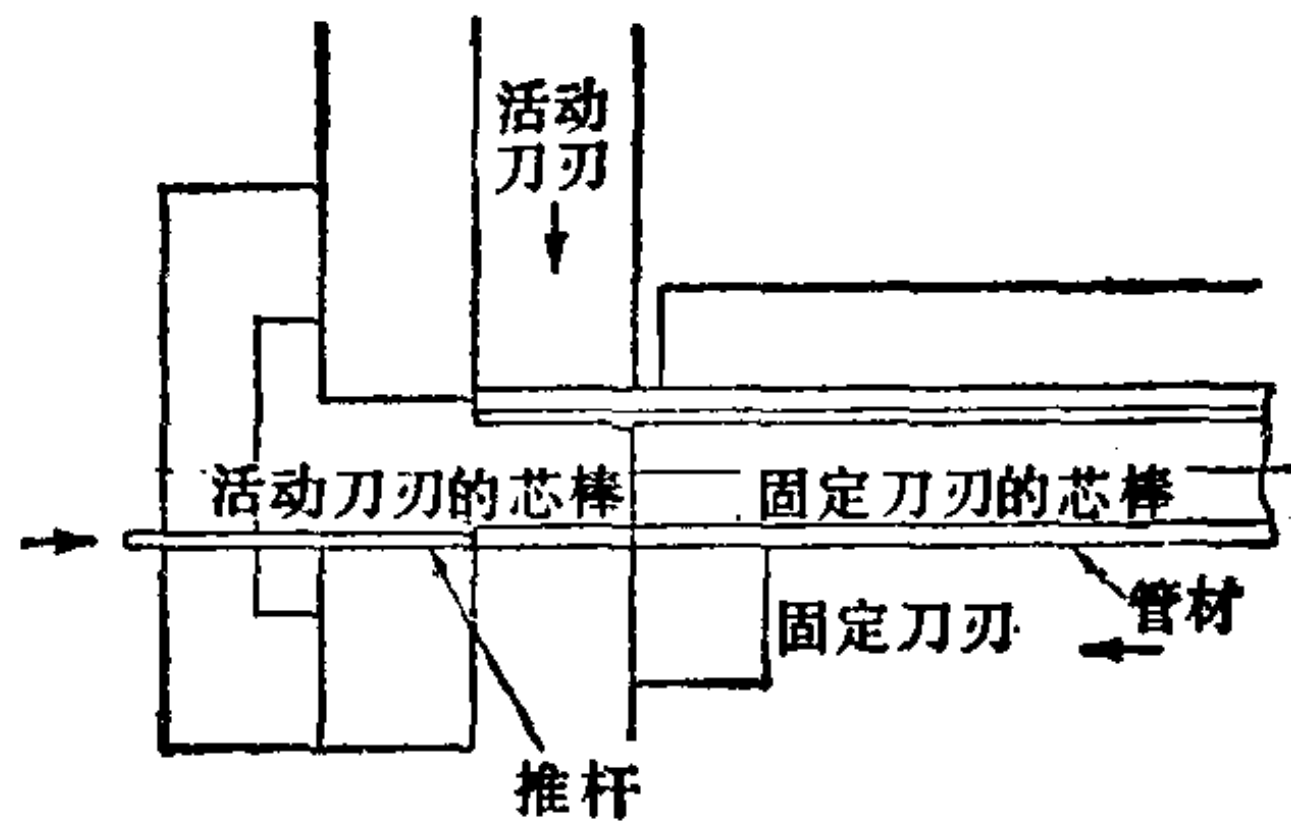


图2.185 管材芯棒剪切法

这种方法的要点是芯棒和模具内径之间的间隙值的取法。如果间隙值取得过小,送料就有困难。反之,如果间隙值取得过大,切口就要歪斜。为此可将活动刀刃一侧的间隙取得比固定刀刃一侧的间隙大些,或者将靠活动刀刃那一侧的芯棒端部倒角以便于送料,但是如果因管料本身的尺寸精度不良而放大间隙就会产生大的歪斜,这样的例子不少。将送料侧的芯棒固定,对于材料供给是不便的。为了解决这个问题,可采用芯棒放在管中处于浮动状态进行剪切的浮动芯棒剪切法。这种方法利用了剪切时芯棒基本不后退这样一个事实。图 2 186 为浮动芯棒剪切模的例子。为了防止在送料时因跳动而引起芯棒后退,在浮动芯棒上安装有 O 型环或者带有弹簧的钢球。

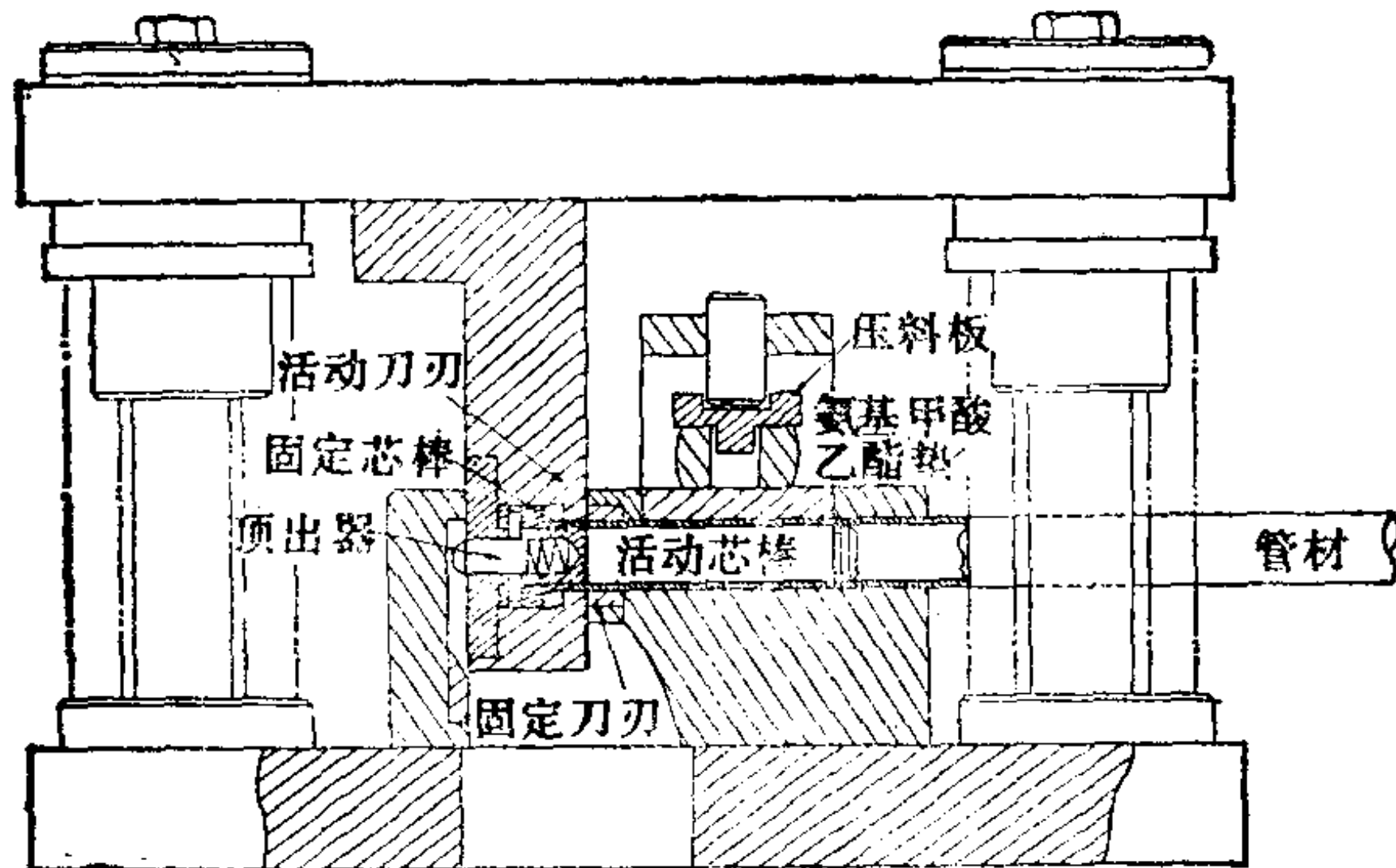


图2.186 浮动芯棒剪切模 (中川)

芯棒剪切法的特点是可以剪切厚壁管,但这时与棒料剪切一样会产生切口面的精度问题。特别是切口面的左右两端部因剪切厚度增大而成为有缺陷的切口面。作为其对策,和棒料的精密剪切一样,可采用约束剪切来获得塑性剪切面,或者进行高速剪切以获得平滑的剪裂面。特别是进行高速剪切,由于形成初期会产生裂纹,因而其原理也适用于管的芯棒剪切法。

(iii) 芯棒双重剪切法 这种剪切法是为了消除在切口面左右两端部的缺陷而提出的。所谓芯棒双重剪切法就是在芯棒放置在管中的状态下,利用使模具相对地上下左右稍微错动一下的办

法，一部分一部分地进行剪切，以防止产生这种缺陷。这时，如前所述的芯棒剪切法那样制件不易顶出是一个问题。为此，可采用图 2.187 所示的机构，将活动芯棒巧妙地装在送料侧的固定芯棒上，设有在剪切终了后经常返回规定位置的机构，其后利用送进的料来顶出制件。这种方法从机构方面来看是优越的，但问题是只能适用于薄壁管的剪切，而且需要昂贵的专用设备。

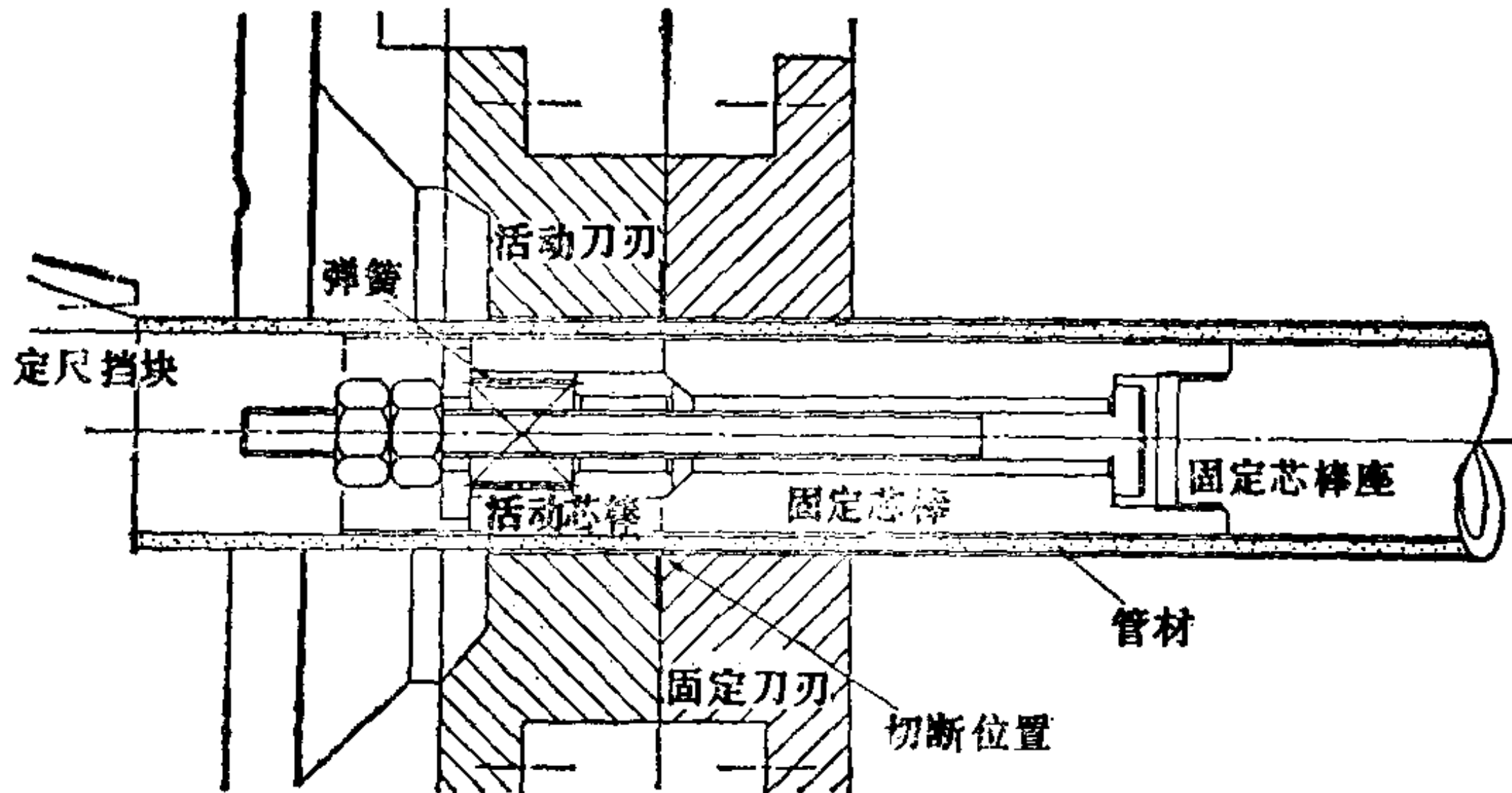


图2.187 芯棒双重剪切法

此外，这种方法不一定要使用在上下左右作直线运动的加压装置，也可以使活动刀刃侧一边作偏心旋转，一边错动进行剪切。

(iv) 旋转辊剪切法〔97〕 这种方法与深拉伸或挤压加工的圆筒修边法相似，利用具有与辊轧机相同运动机构的装置，其剪切方法如图 2.188 所示。这种场合只有一侧装入芯棒，因而管材直径会多少有些变化或产生歪斜，但是由于是经过全周慢慢地进

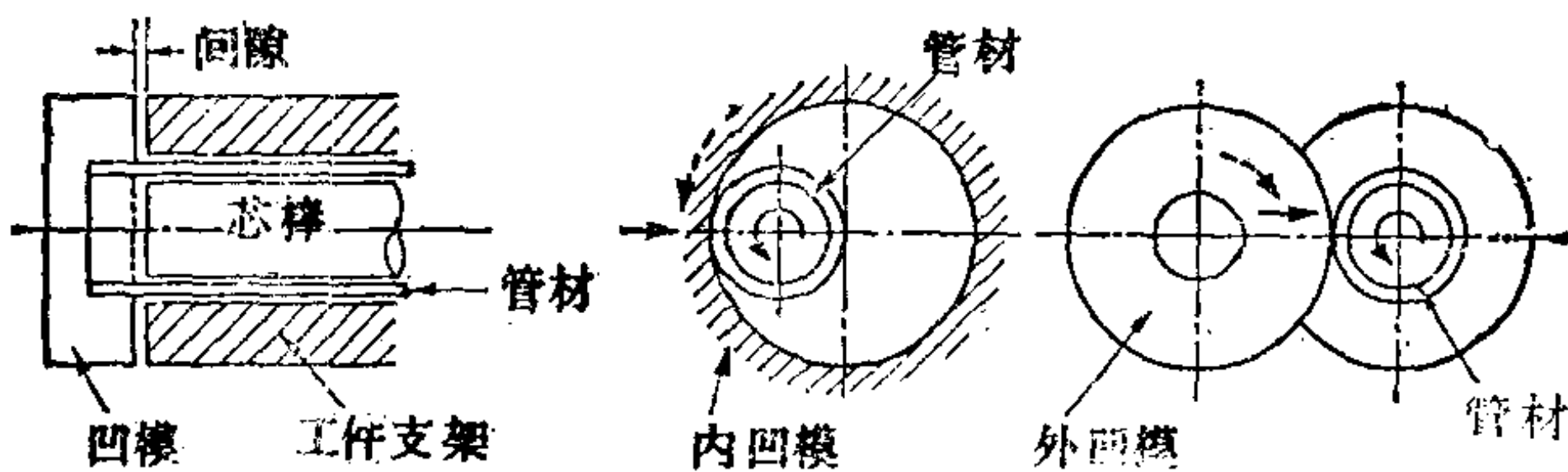


图2.188 旋转辊剪切法（稻田、中沢、条川）〔97〕

行剪切，所以有可能得到较好的切口面。当然，它只适用于圆柱形的管材断面，剪切厚壁管材也有困难。

另外，还有虽不叫做剪切的如图 2.189 所示的使 V 形辊轮压入管料进行切断的方法。用这种方法切断管料，虽然圆度较好，但切口面倾斜，切薄壁管会产生毛刺，切厚壁管在外周会产生隆起。对于厚壁管，也有采用将管材表面刻出 V 形槽以后，利用回转弯曲引起的疲劳破坏而进行切断的方法〔98〕。

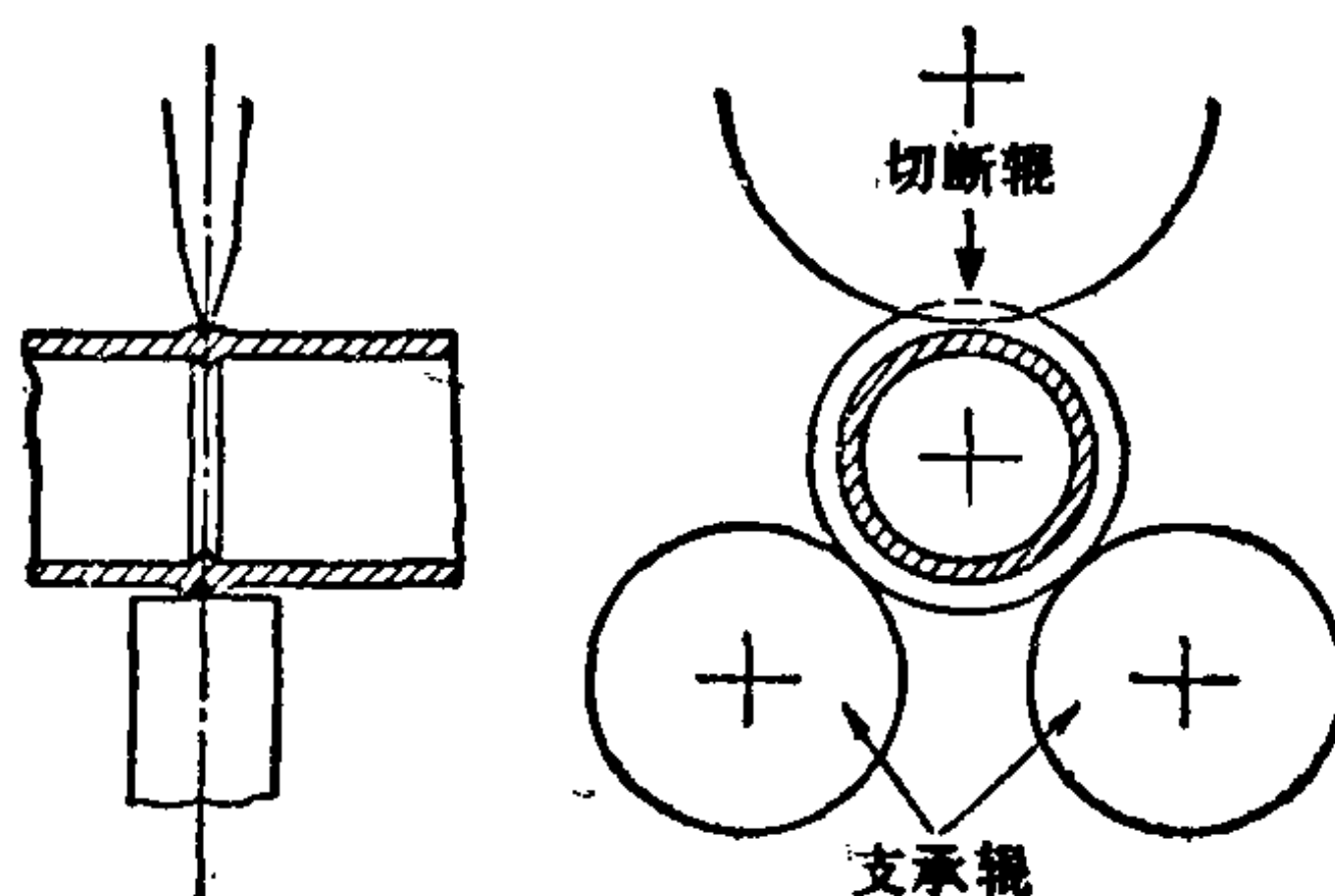


图2.189 利用旋转辊的冲切

对于厚壁管，也有采用将管材表面刻出 V 形槽以后，利用回转弯曲引起的疲劳破坏而进行切断的方法〔98〕。

引用文献

- 1) 神馬, 塑性と加工, 10-99 (1969), 226.
- 2) 前田, 精密機械, 25-6 (1959), 248.
- 3) 前田, 精密機械, 25-6 (1959).
- 4) 神馬, 塑性と加工, 10-99 (1969), 226.
- 5) W. Krämer, 第 18 回 Preprint, CIRP (1968).
- 6) W. Crasemann, Sheet Metal Ind., 37-396 (1960), 259.
- 7) 田村, 工藤, 塑性と加工, 7-66 (1966), 360.
- 8) H. Kudo, T. Tamura, Proc. JSME 1967 Semi-Inter. Symposium, Exp. Mech. Vol. 2.
- 9) 益田, 神馬, 山内, 日本機械学会論文集, 31-225 (1965), 855.
- 10) 精密せん断特集号, 塑性と加工, 10-99 (1969).
- 11) 中村, 容具, 塑性と加工, 4-29 (1963), 387.
- 12) 近藤, 塑性と加工, 10-99 (1969), 236.
- 13) 前田, 精密機械, 25-8 (1959), 364.
- 14) 福井, 前田, 精密機械, 16-8 (1950), 216.
- 15) 前田, 精密機械, 24-11 (1958), 575.
- 16) R. Tilsley and F. Howard, Machinery, 93-2383 (1958), 153.
- 17) ASTE 編, Die Design Handbook, 4-19 (1955).
- 18) 前田, 精密機械, 17-1 (1951), 17.
- 19) 前田, 日本機械学会誌, 62-489 (1959), 1570; および精密機械, 25-11 (1959), 601.
- 20) 日比野ほか, 塑性と加工, 5-46 (1965), 779.
- 21) 前田, 精密機械, 25-8 (1959), 363; 25-9 (1959), 439.
- 22) 前田, 塑性と加工, 2-10 (1961), 619.
- 23) 前田, 田村, 日本機械学会誌, 62-489 (1959), 1415.
- 24) 前田, 精密機械, 25-11 (1959), 607.

- 25) C. Zener, *Fracturing of Metals* (1948), 3.
- 26) J.C. Mikkers, Paper for the Meeting of the C.I.R.P. in Nottingham (1968), 1.
- 27) R. Davies and S.M. Dhawan, Proc. 7th Machine Tool Design and Research Conf. Birmingham (1966), 67.
- 28) C. Zener and J.H. Hollomon, *J. App. Physics*, 15 (1944), 22.
- 29) R. Davies, Proc. 9th Machine Tool Design and Research Conf. Birmingham (1968), 135.
- 30) A.R. Dowling et al., *J. Inst. of Metals*, 98 (1970), 215.
- 31) R. Davies and S.M. Dhawan, Proc. of the Institution of Mech. Engineers, 180 (1965/66) part 3. I, Paper 28, 182.
- 32) 前田, 塑性と加工, 7-64 (1966), 223.
- 33) K. Buchmann, *Werkstattstechnik*, 53-3 (1963), 128.
- 34) K. Buchmann, *Werkstattstechnik*, 53-11 (1963), 561.
- 35) 前田, 青木, 塑性と加工, 15-163 (1974), 652.
- 36) 前田, 松野, 日本機械学会誌, 69-568 (1966), 609.
- 37) 前田, 松野, 塑性と加工, 7-64 (1966), 265.
- 38) W. Kienzle, Dissertation Tech. Hochschule Hannover (1957), 58.
- 39) 山内, プレス技術, 4-10 (1960), 38.
- 40) 親松, 萩原, プレス技術, 4-10 (1960), 43.
- 41) 中村, 容具, 塑性と加工, 4-29 (1963), 387.
- 42) 前田, 精密工作便覧, 精機学会編 (1969), 1031.
- 43) 中川, 吉田, 塑性と加工, 10-104 (1969), 665.
- 44) C. Stromberger, K.H. Buttstädt, *Werkstatt u. Betrieb*, 102-4 (1969), 225.
- 45) O.W. Stoekli, E. Sharpe, *The Tool and Manufacturing Engineer*, April (1968), 38.
- 46) F. Howard, *Sheet Metal Industries*, 7-397 (1960), 339, 351.
- 47) 音田, National Technical Report 5-4 (1959), 472.
- 48) 森田, 音田, 塑性と加工, 2-6 (1961), 79.
- 49) 山田, マシナリー, 26-89 (1963), 956.
- 50) 尾碓, 非削加工, 1-6 (1970), 13.
- 51) 前田, プレス技術, 8-7 (1970), 3.
- 52) 中川, プレス技術, 7-3 (1969), 7, 21.
- 53) 中川, プレス技術, 8-7 (1970), 15.
- 54) 前田, 中川, 林, 塑性と加工, 9-92 (1968), 618, 627.
- 55) A. Guidi, *Werkstatt u. Betrieb*, 95-9 (1962), 637.
- 56) Bösch, Stäger, *Werkstatt u. Betrieb*, 96-9 (1963), 607; 96-11 (1963), 843.
- 57) A. Guidi, *Sheet Metal Ind.* (1969-Jan.) 1, (1969-Feb.).
- 58) H. Schmid, "Neuen Zürcher Zeitung" Beilage "Technik" Nr. 1331, Nr. 1332 (1967)
- 59) 中川, 鈴木, 木下, 塑性と加工, 10-129 (1971), 742.
- 60) 中川, 鈴木, V. Cupka, *生産研究*, 24-8(1972), 72.
- 61) 近藤, プレス技術, 8-7 (1970), 10.
- 62) 前田, 機械の研究, 10-1 (1958), 140.
- 63) 北条, プレス技術, 4-10 (1966), 34.
- 64) 隈部, 日本機械学会論文集, 27-181 (1961), 1418.
- 65) 山内, 小牧, 塑性と加工, 11-111 (1970), 267.
- 66) 北条ほか, フェノール樹脂積層板のせん断加工, 第二報せん断過程と切り口形状, 精密機械, 27-12 (1961), 765~779.
- 67) 前田, (精機学会専門委員会報告), フェノール樹脂積層板のせん断加工, 精密機械, 20-12 (1961), 806.
- 68) 北条, (精機学会専門委員会報告), フェノール樹脂積層板のせん断加工, 精密機械, 20-12 (1961), 808.
- 69) ASTM Designation; D 617-44 (1944) Standard Method of Test for Punching Quality of Phenolic Laminated Sheets.
- 70) British Standard Specification (BS 2076-1954) Thermosetting Synthetic-Resin Bonded-Paper

Forming Sheets for Use at Radio Frequencies.

- 71) 精機学会専門委員会報告, フェノール樹脂積層板のせん断加工, 精密機械, 20-12 (1961), 788.
- 72) 北条ほか, 熱可塑性高分子材料の室温におけるせん断加工, 塑性と加工, 9-88 (1968), 304~314.
- 73) 三水, ベンディックス刃型による金属板の打抜き, 機械技術, 15-4 (1967), 65~71.
- 74) 和田, 小松, 塑性と加工, 13-134 (1972), 204.
- 75) 尾崎, 吉海, 塑性と加工, 13-140 (1972), 683.
- 76) 尾崎, 吉海, 塑性と加工, 13-142 (1972), 819.
- 77) 武田, 大西, 精密機械, 38-9 (1972), 721.
- 78) 栗野, プレス技術, 10-1 (1972), 70.
- 79) 渡辺, プレス技術, 10-6 (1972), 57.
- 80) 田村, 塑性と加工, 13-135 (1972), 242.
- 81) 前田, 青木, 塑性と加工, 14-152 (1973), 697.
- 82) 浅見, 武山, 福永, 塑性と加工, 14-149 (1973), 492.
- 83) 稲列, 齊藤, 奥谷, 塑性と加工, 14-151 (1973), 189.
- 84) 青木, 善崎, 塑性と加工, 15-159 (1974), 315.
- 85) 松本, 塑性と加工, 12-131 (1971), 910.
- 86) F.W. Zapf, Preprints for 4th Int. Meeting Cold Forging, Düsseldorf. (1970), 301.
- 87) M.T. Watkins, NEL Report No. 550 (1973).
- 88) 工藤, 田村, 塑性と加工, 6-48 (1965), 27.
- 89) 工藤, 田村, 塑性と加工, 6-50 (1965), 165.
- 90) H. Zabel, Werkstatt Technik, 54-10 (1963), 530.
- 91) 高橋, 塑性と加工, 12-131 (1971), 917.
- 92) 中川, 前田, 日本機械学会誌, 73-614 (1970), 339.
- 93) P.O. Strandell, & P. Huml, Preprints for 4th Int. Meeting Cold Forging, Düsseldorf (1970), 325.
- 94) 中川, 生産研究, 27-7 (1975), 51.
- 95) 中川, 鈴木, 昭和46年塑性加工春季講演会論文集 (1971), 153.
- 96) 中川, 昭和49年度塑性加工春季講演会 (1974), 149.
- 97) 稲田, 中沢, 桑川, 昭和48年度精機学会春季大会前刷 (1973), 321.
- 98) 田村, 寺崎, 工藤, 塑性と加工, 12-131 (1971), 893.

参考文献

- (1) 「簡易抜き型」塑性と加工, 15-157 (1974).
- (2) 「型の自動加工・設計」塑性と加工, 16-170 (1975).
- (3) 「エコノミックダイの活用法」プレス技術, 8-3 (1970).
- (4) 「最近のせん断加工」プレス技術, 8-7 (1970).
- (5) 「経済的な材料取りの実際」プレス技術, 9-2 (1971).
- (6) 「最近のせん断加工」プレス技術, 10-12 (1972).
- (7) 「最近の簡易型と活用の実際」プレス技術, 12-5 (1974).

3. 弯曲加工

3.1 弯曲加工概述〔1、2〕

3.1.1 弯曲加工的分类

本章讲述的对象，除板料的弯曲加工外，也包括管子和型材的弯曲加工。根据所用的设备，常用的弯曲加工大体可分为压弯、卷弯和滚弯三种类型（见图 3.1）。

a. 压弯 用压力机或弯板机进行的板料弯曲，大致都属于这种类型，对应于制件的

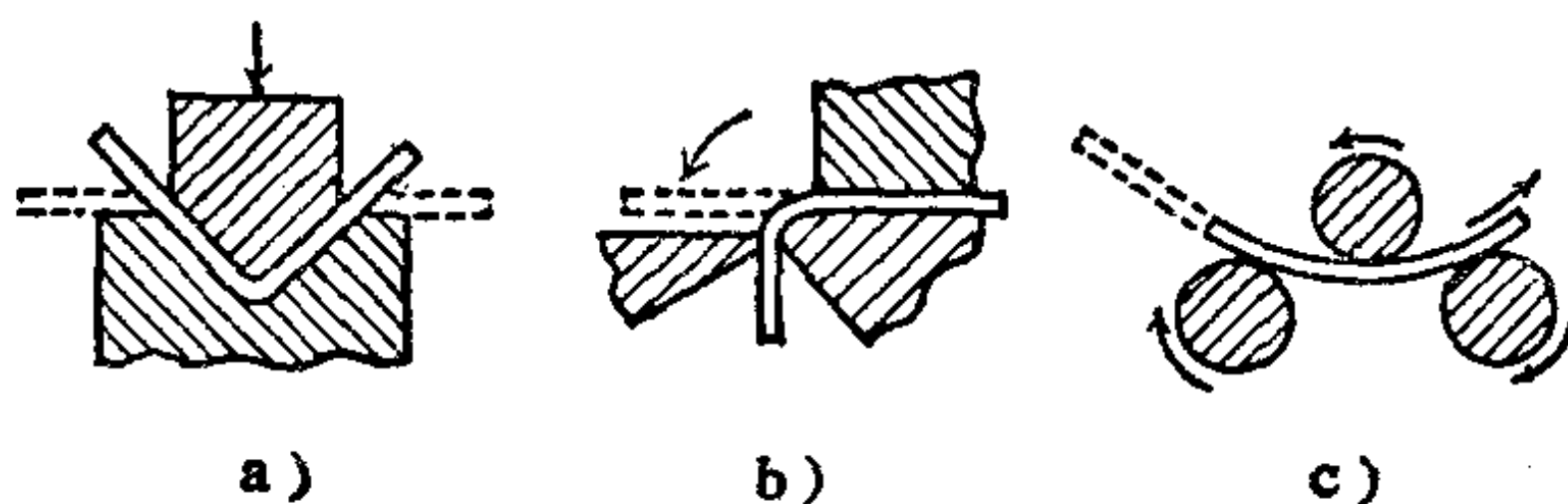


图 3.1

a) 压弯 b) 卷弯 c) 滚弯

形状尺寸来选用模具，适用范围极广。最简单的形式，是用一个固定凹模和一个活动凸模的弯曲（图 3.1 a），在此类型中，也有的用橡胶凹模代替金属凹模。在 JIS 中作为压力机弯曲模具，除普通的弯曲模外，还规定有凸轮式弯曲模、切口-弯曲复合模以及弯曲-冲裁复合模。关于板料的压力机弯曲模的具体例子，型材和管子的压弯，将分别在 3.2 节和 3.5 节中论述。

b. 卷弯 如图 3.1 b) 所示为用沿着固定工具周边移动的压弯工具，一边将材料压在固定工具圆角部分，同时又使其贴合在一起的弯曲方法；管子和型材的弯曲也采用这种形式。用以弯曲象图 3.2 那样的带凸缘的板件的切线弯板机（图 3.3）也属于这一类型。

c. 滚弯 用三个滚轮或四个滚轮作大口径管件的弯曲（图 3.1 c）以及螺旋焊接钢管的制造就是这种类型

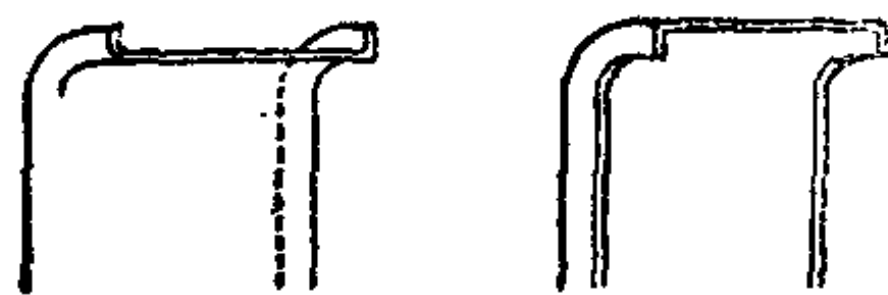


图 3.2 带凸缘的板件的弯曲

的实例。滚压成形 (roll forming) 如电焊钢管的成形所代表的那样, 使带料顺次地通过几组成形辊轮, 成形一定断面形状, 这种成形也视为滚弯而包括在这一章中。滚压成形也用于结构用轻型型材。

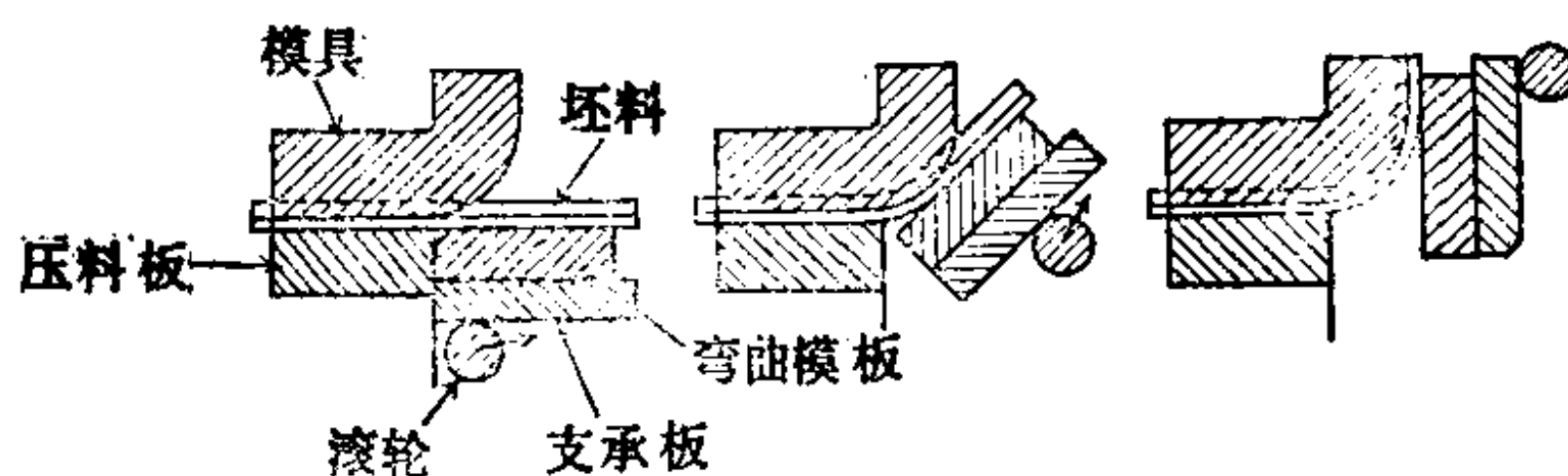


图3.3 切线弯板机的弯曲机构

本章所说的弯

曲, 如果就板料而言, 当象图 3.4 a) 所示那样沿着直线边缘对板料作弯曲时, 原则上是指: 与弯曲线相平行的金属纤维不致拉伸和压缩, 板料的中性层是可展开曲面的成形。因此, 如图 3.4 b) 和 c) 所示, 沿着曲线的板料曲面成形, 就用“伸长类翻边”和“压缩类翻边”的叫法以区别于弯曲加工。这类加工将在第四章中讨论。同样, 加以拉伸作用进而完全贴合于复杂曲面模具之上的张拉成形法也将在第 4 章里讨论。

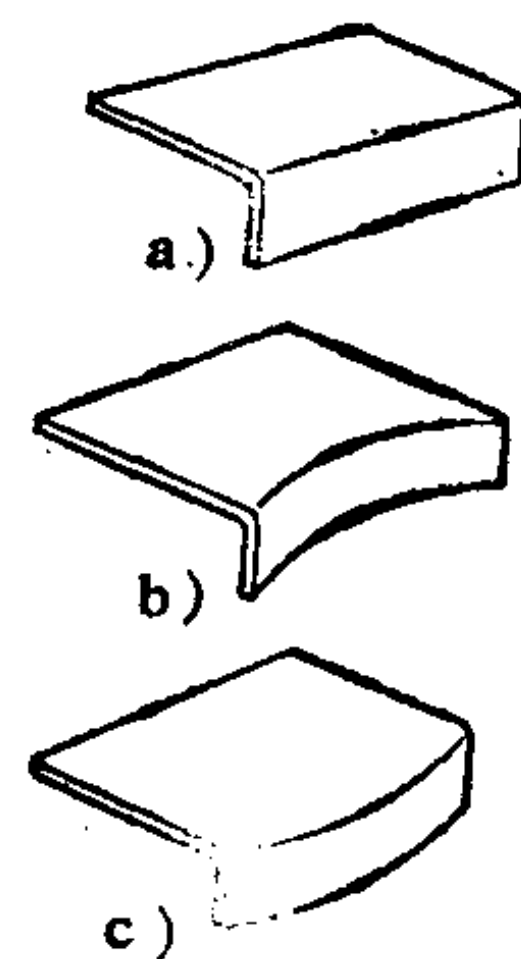


图 3.4

a) 弯曲 b) 伸长类翻边 c) 压缩类翻边

使用机械设备的弯曲加工, 一般是在常温状态下进行, 然而大型的厚钢板是在热态下弯曲的。作为特殊的弯曲加工, 也有只是对厚钢板的一侧给以快速加热使在厚度方向造成强烈的温度梯度, 利用热应力作塑性弯曲的方法 (线型加热弯曲)。

3.1.2 塑性弯曲的纯理论

a. 棒料弯曲的纯理论 棒料弯曲的纯理论是将材料力学直线梁的纯理论原样引伸到塑性领域当中, 其缺点是, 为了使用要作数学上的简化处理。如果不是激烈的弯曲, 这一理论是完全满足要求的。在此, 仅以均匀弯曲 (只是承受弯曲力矩 M 的情况), 就材料的加工硬化特性和棒料的横断面形状的影响予以论述。

纯理论是假定: 1) 横断面保持平面; 2) 横断面的形状尺

寸也不发生变化；3) 各纵向纤维（把杆件的轴向称为纵向）的纵向应力和纵向应变的关系，与单向拉伸和单向压缩时相同。在图 3.5 中，取纵向中性线 NN（无拉伸压缩的纵向纤维，亦即是变形为零的纵向纤维）的曲率半径为 ρ ，与中性线仅仅相距 η 的任意纤维 PP 的纵向应变 ε ，就可以表示为：

$$\varepsilon = \eta/\rho \quad (3.1)$$

如果已知应力和应变的关系 $\sigma = f(\varepsilon)$ ，则任意纵向纤维的应力 σ 即为：

$$\sigma = f(\eta/\rho) \quad (3.2)$$

根据平衡条件

$$M = \int_{(A)} \sigma \eta dA \quad (3.3)$$

$$\int_{(A)} \sigma dA = 0 \quad (3.4)$$

中性线的位置（图 3.5 中 b 的 η_1 , η_2 ）就由公式 (3.4) 确定。另一方面，由于公式 (3.3) 的右边是曲率 $1/\rho$ 的函数，由这公式可求出弯曲力矩 M 和曲率 $1/\rho$ 的关系。

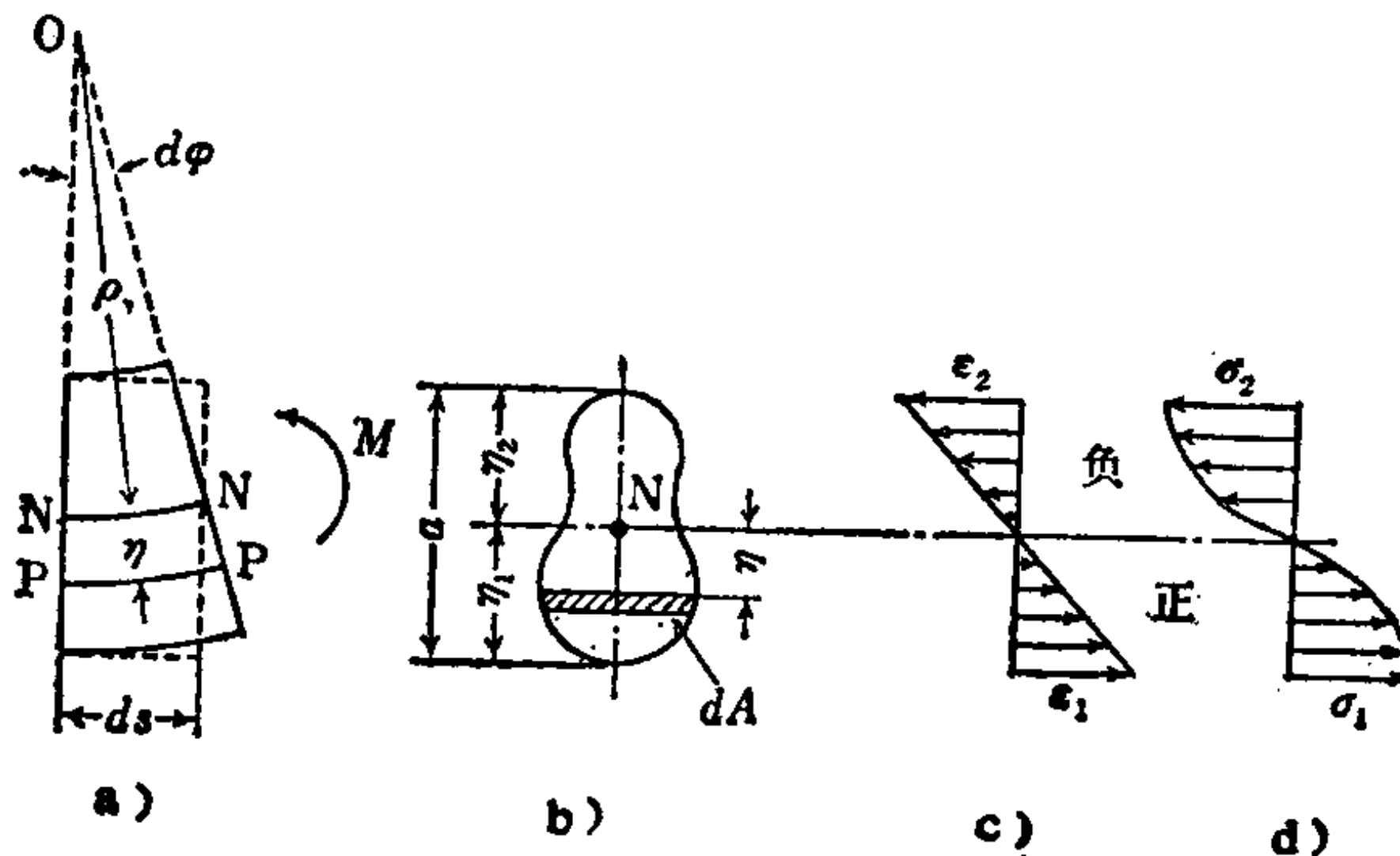


图3.5 弯曲变形及应力应变的分布

(i) 矩形断面的非硬化材料 图 3.6 所示系非硬化塑性体（弹性-理想塑性体， σ_s ：屈服应力， E ：纵弹性模数）的拉伸-压

缩塑性曲线（应力 σ 和应变 ε 的关系），当横断面为矩形（高度 a ，宽度 b ）时，中性线的位置即为 $\eta_1 = \eta_2 = a/2$ 。设屈服开始时（也就是外层金属纤维的应变 $\varepsilon_1 = a/2\rho$ 达到屈服应变 $\frac{\sigma_e}{E}$ 时）的弯曲力矩和弯曲半径为 M_e 和 ρ_e ，则

$$M_e = \frac{a^2 b}{6} \sigma_e, \quad \frac{1}{\rho_e} = \frac{2}{a} \frac{\sigma_e}{E} \quad (3.5)$$

根据公式 (3.3)

$$\text{当 } \frac{1}{\rho} \leq \frac{1}{\rho_e} \text{ 时} \quad \frac{M}{M_e} = \frac{\rho_e}{\rho} \quad (3.6)$$

$$\text{当 } \frac{1}{\rho} \geq \frac{1}{\rho_e} \text{ 时} \quad \frac{M}{M_e} = \frac{3}{2} \left\{ 1 - \frac{\frac{1}{3}}{\left(\frac{\rho_e}{\rho}\right)^2} \right\} \quad (3.7)$$

图 3.7 所示为公式 (3.6) 和 (3.7) 的关系曲线。随着曲率 $1/\rho$ 的增加，弯曲力矩 M 就突然地停留在一个常数值上。即

$$M_0 = 1.5 M_e = \frac{a^2 b}{4} \sigma_e \quad (3.8)$$

此极限值 M_0 称为极限弯曲力矩或全塑性弯曲力矩。当曲率 $1/\rho$ 为屈服开始时的曲率 $1/\rho_e$ 的数倍以上时，就可以认为 $M \approx M_0$ 。换句话说，这时的塑性弯曲可以认为大体是以恒定的弯曲力矩 M_0 进行的。

(ii) 各种断面的全塑性弯曲力矩 通常，对于象图 3.8 所示那样的左右对称的断面，在全塑性状态下的横中性线 BC，由将

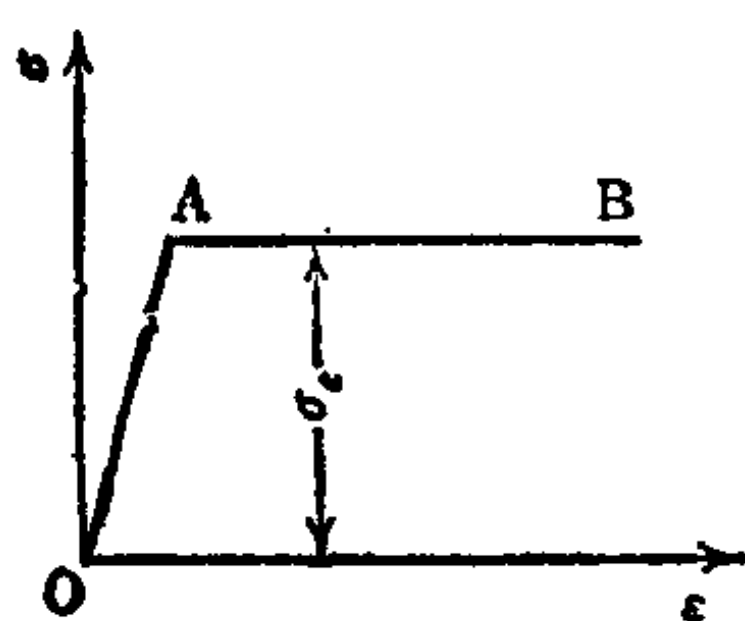


图 3.6

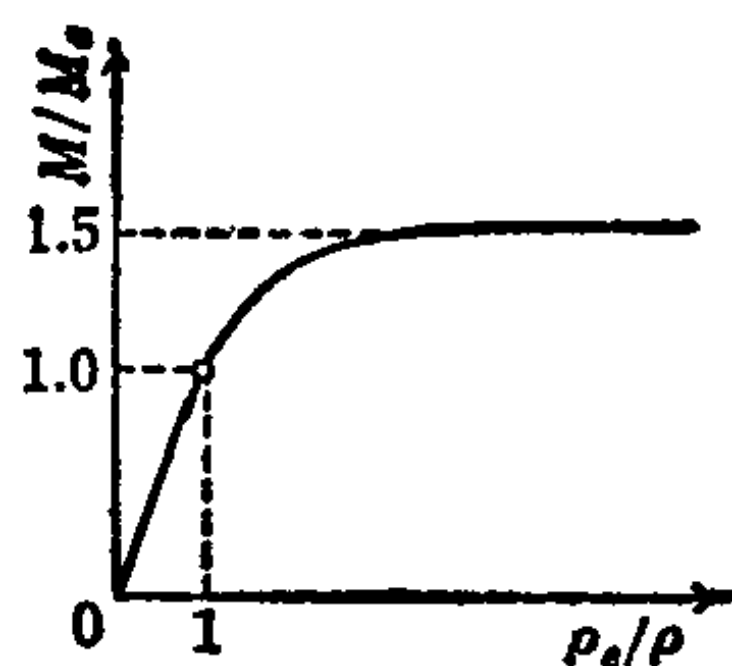


图3.7 非硬化材料

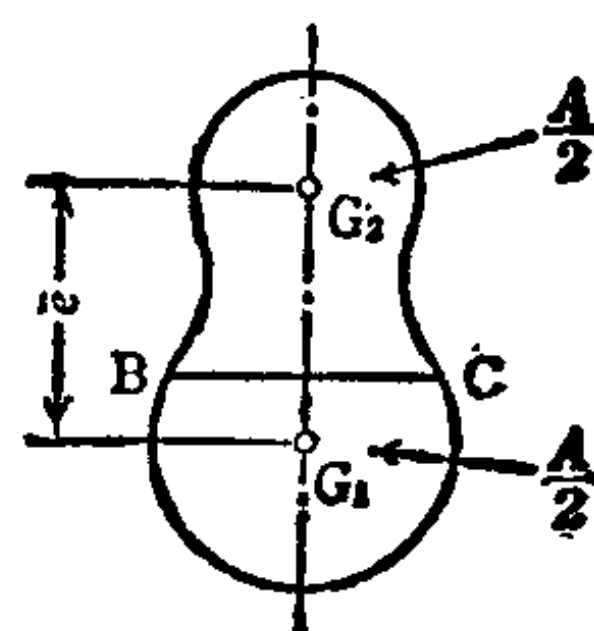


图 3.8

断面积作上下二等分的等分线而定, 全塑性弯曲力矩 M_0 按下式计算:

$$M_0 = S_0 \sigma_e, \quad S_0 = \bar{e} \frac{A}{2} \quad (3.9)$$

式中 \bar{e} ——图 3.8 中上下面积的重心 G_1 、 G_2 之间的距离;

A ——横断面面积;

σ_e ——拉伸屈服应力;

S_0 ——塑性截面模数。

表 3.1 所列为典型断面形状的截面惯性矩 I 、弹性截面模数 Z 、塑性截面模数 S_0 、以及形状系数 S_0/Z 。如果用表 3.1, 则屈服开始时 (弹性极限) 的弯曲力矩 M_e 和全塑性弯曲力矩 (作塑性弯曲时的弯曲力矩的近似值) M_0 可分别用下列公式计算:

$$M_e = Z \sigma_e, \quad M_0 = S_0 \sigma_e \quad (3.10)$$

M_0 和 M_e 的比值随断面形状而异, 即

$$\frac{M_0}{M_e} = \frac{S_0}{Z} \quad (3.11)$$

(iii) 线性硬化材料 (矩形断面 $a \times b$) 拉伸和压缩的塑性曲线当近似地认为是图 3.9 那样的两条直线时,

$$\text{OA 部分:} \quad \sigma = E \varepsilon \quad (3.12)$$

$$\text{AB 部分:} \quad \sigma = \lambda E \varepsilon + (1 - \lambda) \sigma_e \quad (3.13)$$

式中 $\lambda < 1$ 时, λ 表示为直线 AB 和直线 OA 倾斜度比值的材料常数。此时, 采用和公式 (3.5) 相同的 M_e 、 ρ_e , 由公式 (3.3) 即可得到:

$$\text{当 } \frac{1}{\rho} \leq \frac{1}{\rho_e} \text{ 时, } \frac{M}{M_e} = \frac{\rho_e}{\rho} \quad (3.14)$$

$$\text{当 } \frac{1}{\rho} \geq \frac{1}{\rho_e} \text{ 时, } \frac{M}{M_e} = \lambda \frac{\rho_e}{\rho} + \frac{3}{2} (1 - \lambda) \left\{ 1 - \frac{\frac{1}{3}}{\left(\frac{\rho_e}{\rho}\right)^2} \right\}$$

(3.15)

表3.1 截面形状和截面模数

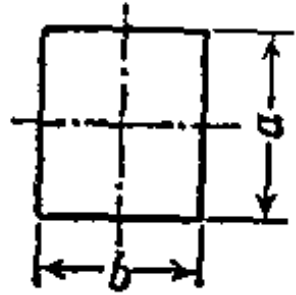
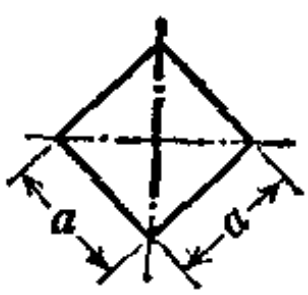
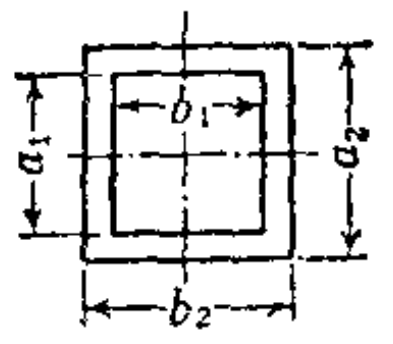
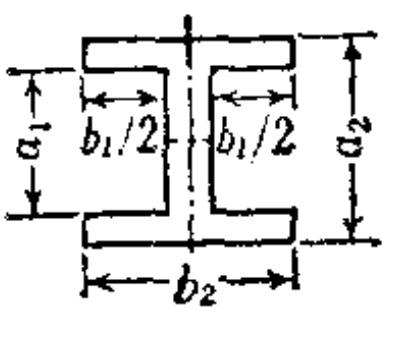
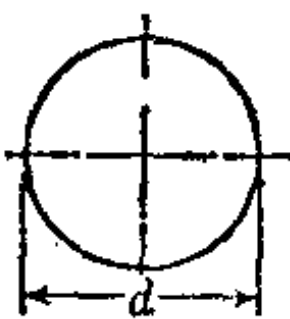
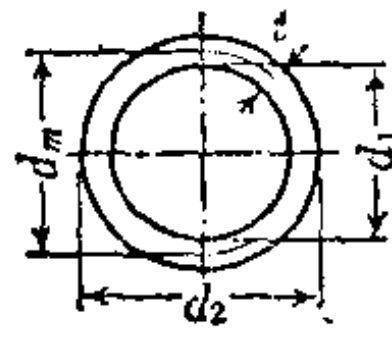
序号	截面形状	惯性矩 I	弹性截面模数 Z	塑性截面模数 S_0	形状系数 S_0/Z
1		$\frac{a^3 b}{12}$	$\frac{a^2 b}{6}$	$\frac{a^2 b}{4}$	1.50
2		$\frac{a^4}{12}$	$\frac{\sqrt{2}}{12} a^3$	$\frac{\sqrt{2}}{6} a^3$	2.00
3	 	$\frac{a_2^3 b_2 - a_1^3 b_1}{12}$	$\frac{a_2^3 b_2 - a_1^3 b_1}{6 a_2}$	$\frac{a_2^2 b_2 - a_1^2 b_1}{4}$	一般工字 钢的平均值 1.14
4		$\frac{\pi}{64} d^4$	$\frac{\pi}{32} d^3$	$\frac{1}{6} d^3$	1.70
5		$\frac{\pi}{64} (d_2^4 - d_1^4)$	$\frac{\pi}{32} \frac{d_2^4 - d_1^4}{d_2}$	$\frac{d_2^3 - d_1^3}{6}$ $\approx d_m^2 t$ (薄壁时)	薄壁时 $1.27 \left(= \frac{4}{\pi} \right)$

图 3.10 所示为上述公式的曲线关系。当进行某种程度的弯曲时， M 和 $1/\rho$ 的关系大体为一条直线，可近似地用下式表示。

$$\frac{M}{M_e} \approx \lambda \frac{\rho_e}{\rho} + \frac{3}{2} (1 - \lambda) \quad (3.16)$$

也就是说，这时的塑性弯曲可以认为是按照公式 (3.16) 的关系进行的。

(iv) n 次幂硬化材料(矩形断面 $a \times b$) 对于拉伸和压缩

的塑性曲线以

$$\sigma = F\epsilon^n \tag{3.17}$$

来表示时 (F 、 n 为材料常数), 弯曲力矩 M 和曲率 $1/\rho$ 的关系即为

$$M = B \left(\frac{a}{2\rho} \right)^n, \quad B = \frac{a^2 b F}{2(2+n)} \tag{3.18}$$

如果比较无量纲表示的 $\sigma/F \sim \epsilon$ 和 $M/B \sim a/2\rho$, 即知两者是完全一致的。

图 3.11 所示为对应于此种 n 值时它们的 n 次幂曲线。

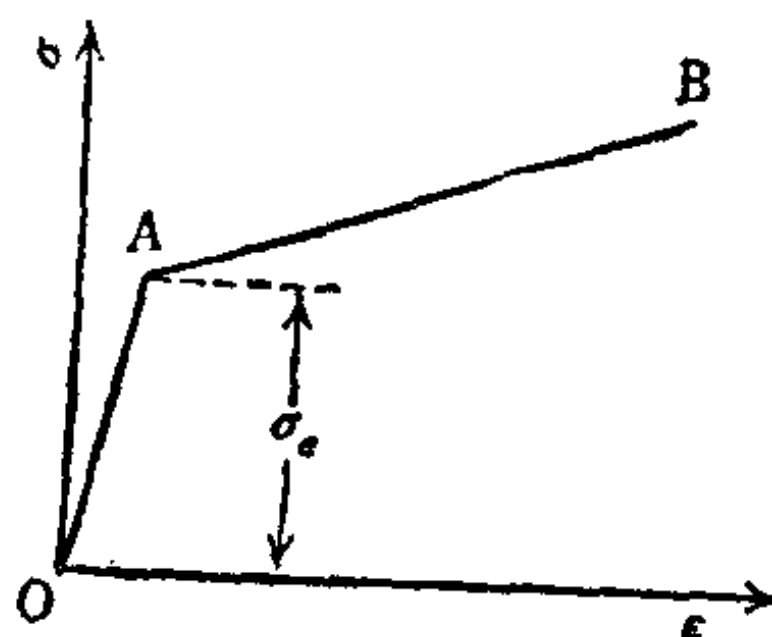


图 3.9

再则, 此时的表层应力 σ_1 (图 3.5 中 d) 就用下式表示。

$$\sigma_1 = \frac{M}{Z} \cdot \frac{2+n}{3}, \quad Z = \frac{a^2 b}{6} \tag{3.19}$$

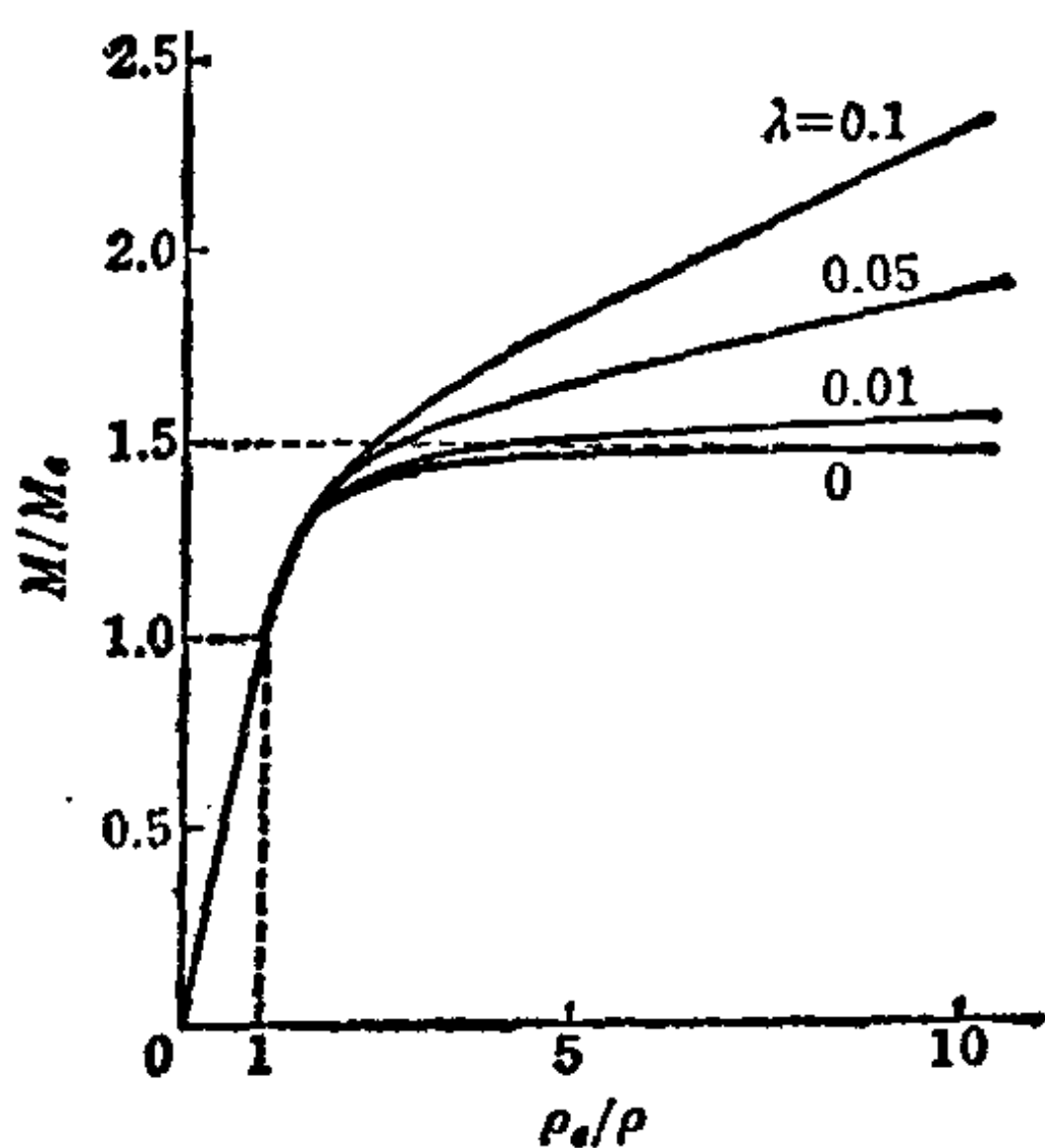


图3.10 线性硬化性材料

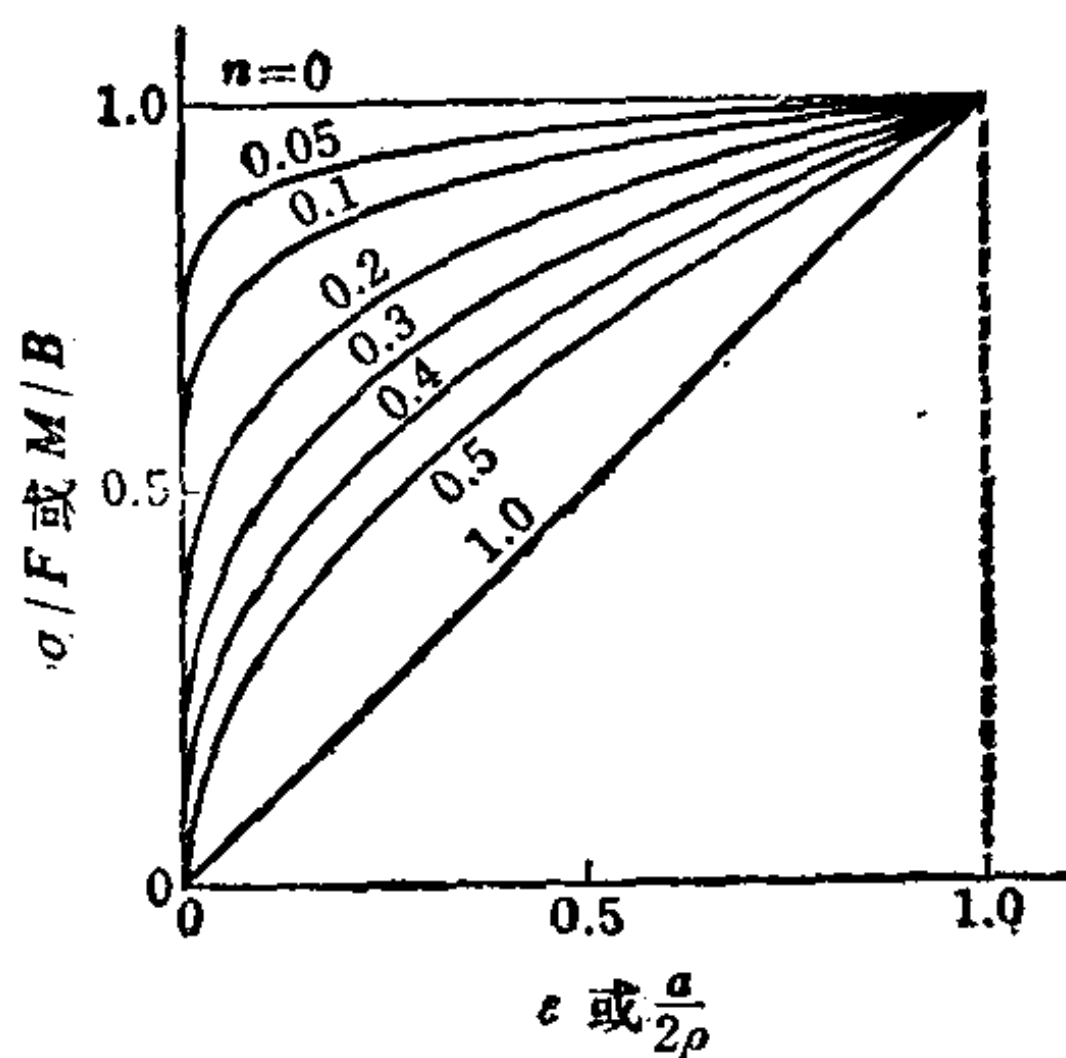


图3.11 n次幂硬化材料

(v) 修正 n 次幂硬化材料(矩形断面 $a \times b$) 拉伸和压缩的塑性曲线如图 3.12 的实线部分那样表示:

$$\text{OA 部分 } (\sigma \leq \sigma_e): \quad \sigma = E\epsilon \tag{3.20}$$

$$\text{AB 部分 } (\sigma \geq \sigma_e): \quad \sigma = F\epsilon^n \tag{3.21}$$

当代入与公式 (3.5) 相同的 M_e 、 ρ_e , 则

$$\frac{1}{\rho} \ll \frac{1}{\rho_e} \text{ 时, } \frac{M}{M_e} = \frac{\rho_e}{\rho} \quad (3.22)$$

$$\frac{1}{\rho} \gg \frac{1}{\rho_e} \text{ 时, } M = B \cdot \left(\frac{a}{2\rho} \right)^n \left\{ 1 - \frac{1-n}{3} / \left(\frac{\rho_e}{\rho} \right)^{2+n} \right\}$$

$$B = \frac{a^2 b F}{2(2+n)} \quad (3.23)$$

把这些关系用图表示出来, 即为图 3.13 的实践。如果进行某种程度的塑性弯曲, 那么上面公式中 { } 内的值, 即趋近于 1, 取近似值即为

$$M \approx B \left(\frac{a}{2\rho} \right)^n \quad (3.24)$$

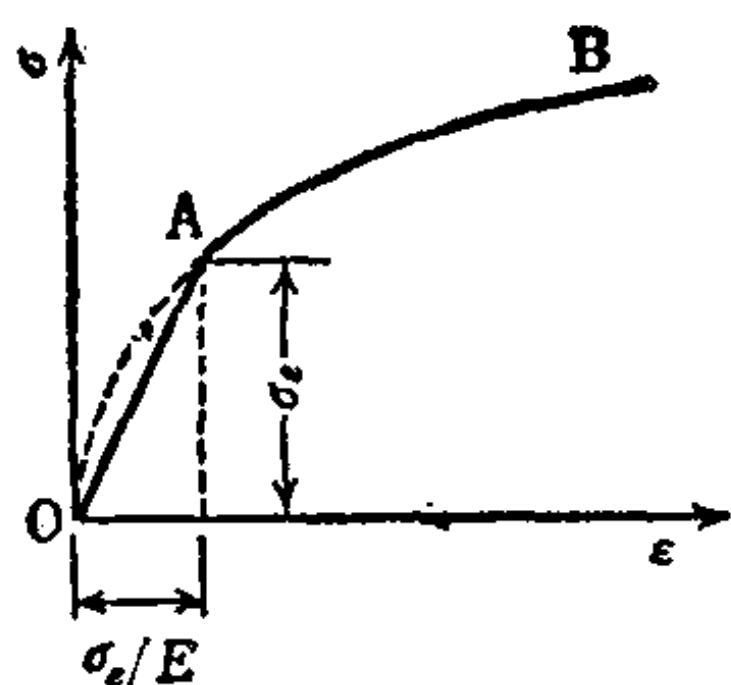
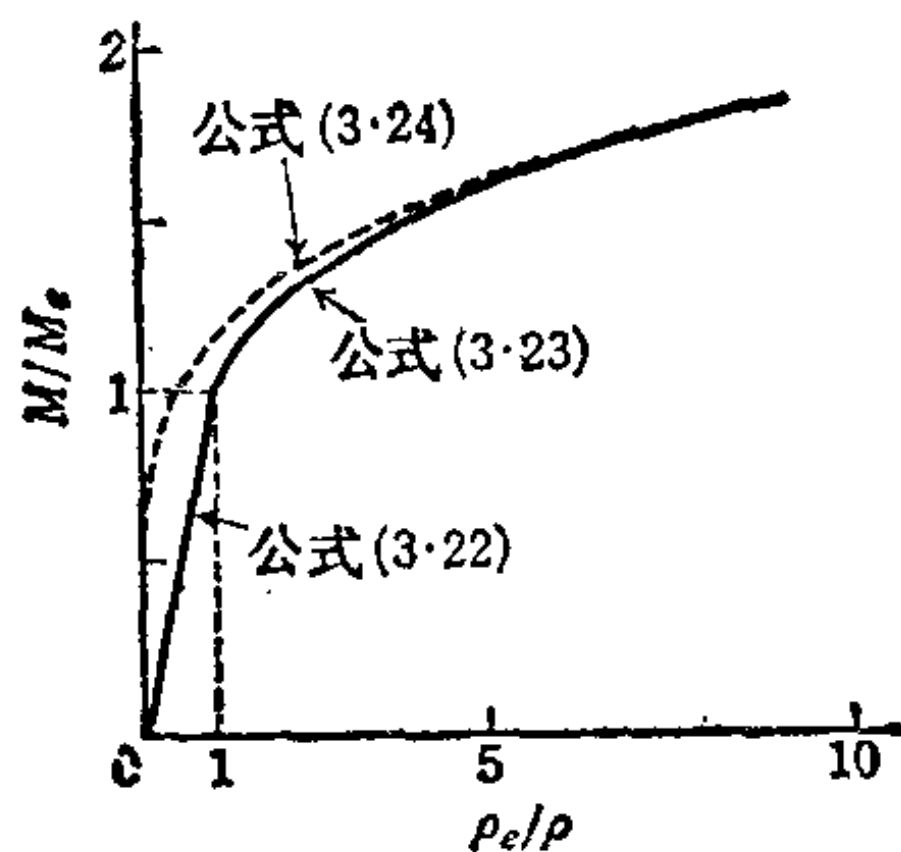


图 3.12

图 3.13 修正 n 次幂硬化材料

这即与忽略图 3.12 中的弹性区域 OA 进而以 $\sigma = F\varepsilon^n$ 去表示整个区域的公式 (3.18) 相一致。再有, 对于材料常数 E 、 F 、 n 、 σ_e 之间, 一定成立如下关系:

$$\frac{\sigma_e}{F} = \left(\frac{\sigma_e}{E} \right)^n, \quad \frac{F}{E} = \left(\frac{\sigma_e}{E} \right)^{1-n} \quad (3.25)$$

(vi) 对板料弯曲的适用性 即使用均匀弯曲力矩对材料作圆筒弯曲, 只要外层金属纤维应变 ε_1 在百分之几以内, 上述矩形断面杆件的纯理论也是照样适用的。图 3.14^[3]是将铝板均匀弯曲试验的结果与对应的矩形断面的纯理论值相比较的关系曲线。当板料宽度为 b , 板厚为 t 时, 当 b/t 的值小时则近于纯理论值; 反之, 当 b/t 的值大时就与纯理论值有明显的差异。这样一来对

于宽板的弯曲即成为平面变形状态，这是因为板料宽度方向的应力也与之相关的缘故（关于平面变形状态，参照 3.1.3. a 所述）。

再则，如果按照图 3.14 来看，当试验值 $b/t > 10$ ，就不能用 b/t 的值，而（理论值和实验值）大体一致的关系即不存在。

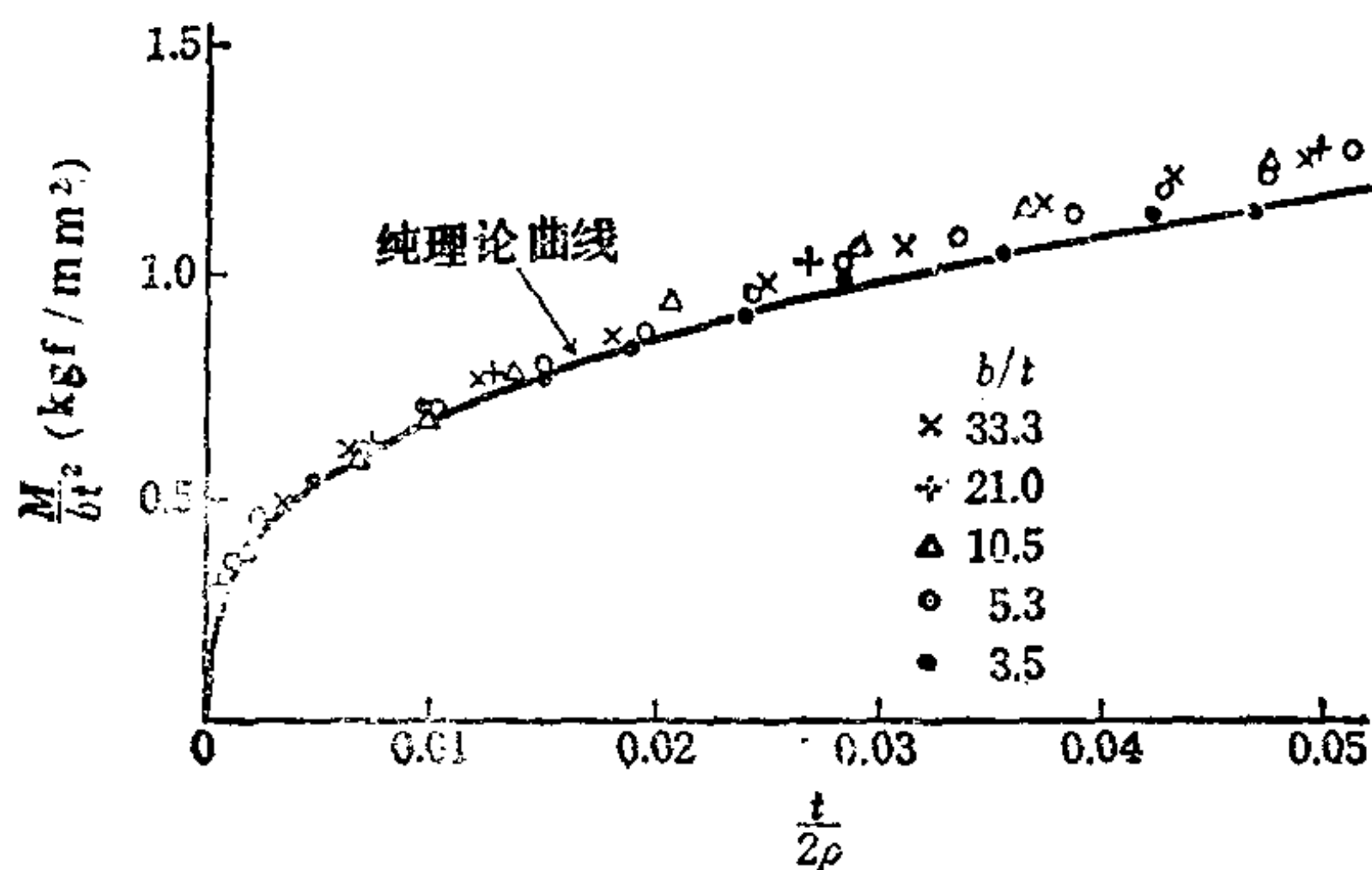


图3.14 均匀弯曲的理论值和实验值的比较

b. 回弹的纯理论

(i) 棒料的

均匀弯曲 将棒料按均匀弯曲力矩以相同的曲率 $1/\rho$ 进行弯曲之后，当消除弯曲力矩时，将显示出弹性回复的倾向。这一现象被称之为回弹，从弯曲制件精度上来看，回弹是极为重要的现象。完全消除载荷之后的曲率半径 $1/\rho'$ （见图 3.15）及回弹角 $\Delta\theta = \theta - \theta'$ 有如下关系：

$$\frac{1}{\rho'} = \frac{1}{\rho} - \frac{M}{EI} \quad (3.26)$$

$$\Delta\theta = \frac{M\rho}{EI} \theta = \frac{Ml}{EI} \quad (3.27)$$

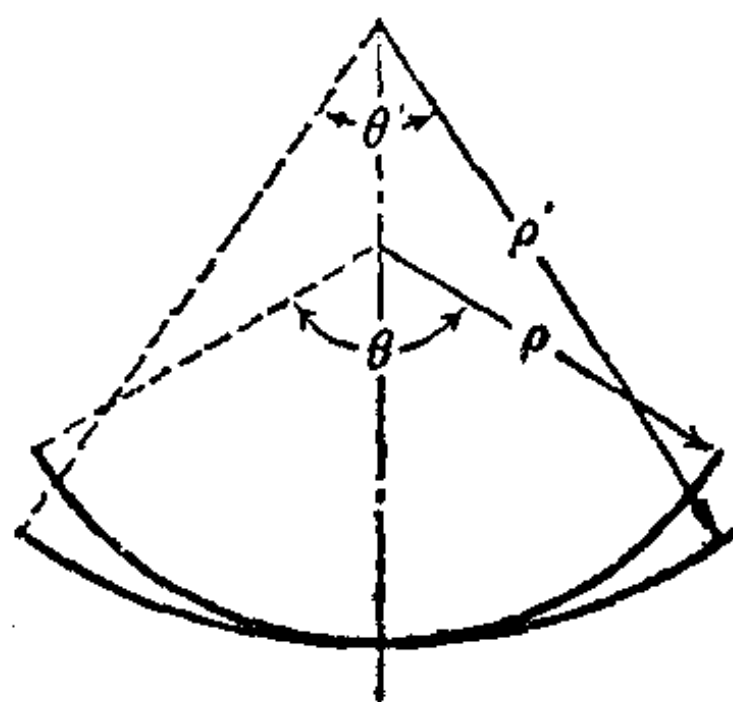


图 3.15⊖

式中 I —— 惯性矩（见表 3.1）；

$l = \rho\theta$ —— 棒料的长度。

例如：对于直线硬化材料（图 3.9），如果用表示进入某种程度塑性弯曲状态时的公式（3.16），那么，对于矩形断面就有：

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \lambda + 3(1 - \lambda) \frac{\sigma_e}{E} \frac{\rho}{a} \quad (3.28)$$

对于修正 n 次幂硬化材料（图 3.12）的矩形断面，用公式（3.22）

⊖ 原文 ρ' 的箭头标得不对，应标在与 θ' 所对应的弧线上。——译注

就有：

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{3}{2+n} \left(\frac{\sigma_e}{E} \frac{2\rho}{a} \right)^{1-n} - \frac{1-n}{2+n} \left(\frac{\sigma_e}{E} \frac{2\rho}{a} \right)^3 \quad (3.29)$$

或者使用表示进入某种程度弯曲状态时的公式 (3.24) 就有：

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{3}{2+n} \left(\frac{\sigma_e}{E} \frac{2\rho}{a} \right)^{1-n} \quad (3.30)$$

对于非硬化材料 (矩形断面)，当进入某种程度弯曲状态时就有：

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = 3 \frac{\sigma_e}{E} \frac{\rho}{a} \quad (3.31)$$

等关系存在。公式 (3.31) 与公式 (3.28) 中 $\lambda = 0$ 时，或者在公式 (3.30) 中 $n = 0$ 时的结果是一致的。

(ii) 棒料的不均匀弯曲 当曲率 $1/\rho$ 在纵长方向不同时 (见图 3.16)，在杆件端部测得的回弹角可按下式计算：

$$\Delta\theta = \int_0^\theta \frac{M\rho}{EI} d\varphi = \int_0^l \frac{M}{EI} ds \quad (3.32)$$

这里，在图 3.16 中 x 轴的 O 点选在棒料的一端， ds 是沿着棒料轴线方向的增量。

(iii) 对板料弯曲的实用性 严格地说，板料弯曲中的回弹，与棒料的纯理论值相比是不大的〔4〕。现在，如果把平板的弹性均匀弯曲与等厚等长的杆件的弹性均匀弯曲相比较，则弯曲角为 $(1 - \nu^2)$ 倍的关系 (ν 是泊松比)。如果忽略弯曲时的曲率并作简化考虑，则宽板弯曲后的回弹角 $\Delta\theta$ ，相对于用于杆件的公式 (3.27) 就应作出修正，即

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = (1 - \nu^2) \frac{\bar{M}\rho}{(EI)}, \quad I = \frac{bt^3}{12}$$

式中 b ——板宽；

t ——板厚。

但是，由于 \bar{M} 是宽板所需的弯曲力矩，所以，如图 3.14 所示那样，与杆件弯曲力矩相比就要大一些。因此，如果采用杆件

的 M 代替 $(1 - \nu^2)\bar{M}$, 那么, 公式 (3.28)~(3.31), 即使是对于板料弯曲, 也是可以使用的。只是矩形的高度 a 要改读为板厚 t 。

图 3.17 是在模块上用橡皮垫对板料作贴合弯曲时的回弹试验值^[5], 假定材料相同即使板料厚度有所变化, 也大体处在一条直线上面 (和 ρ/t 呈线性关系) 并与公式 (3.28) 的趋势相同 (只是将公式中的 a 改读为 t)。图 3.18 是改变材料后的同类实验值^[6]。由此可知 ρ/t 越大, 或者变形抗力越高 (也就是越硬) 的材料, 回弹角 $\frac{\Delta\theta}{\theta}$ 越大。对于由冲压模具作 V 形弯曲或 U 形弯曲时的回弹, 均匀弯曲的结论就不完全适合了, 而必须对弯曲的变

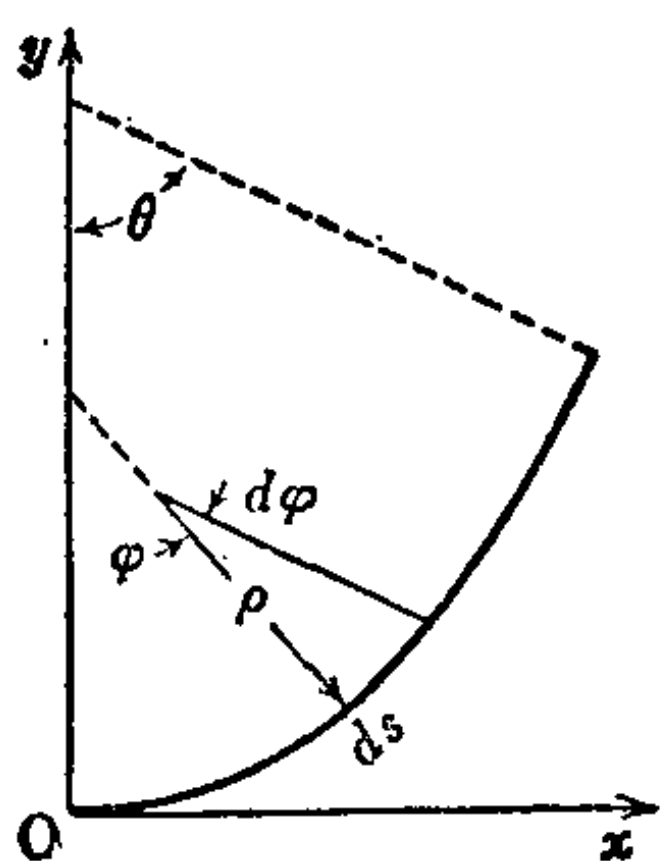


图 3.16

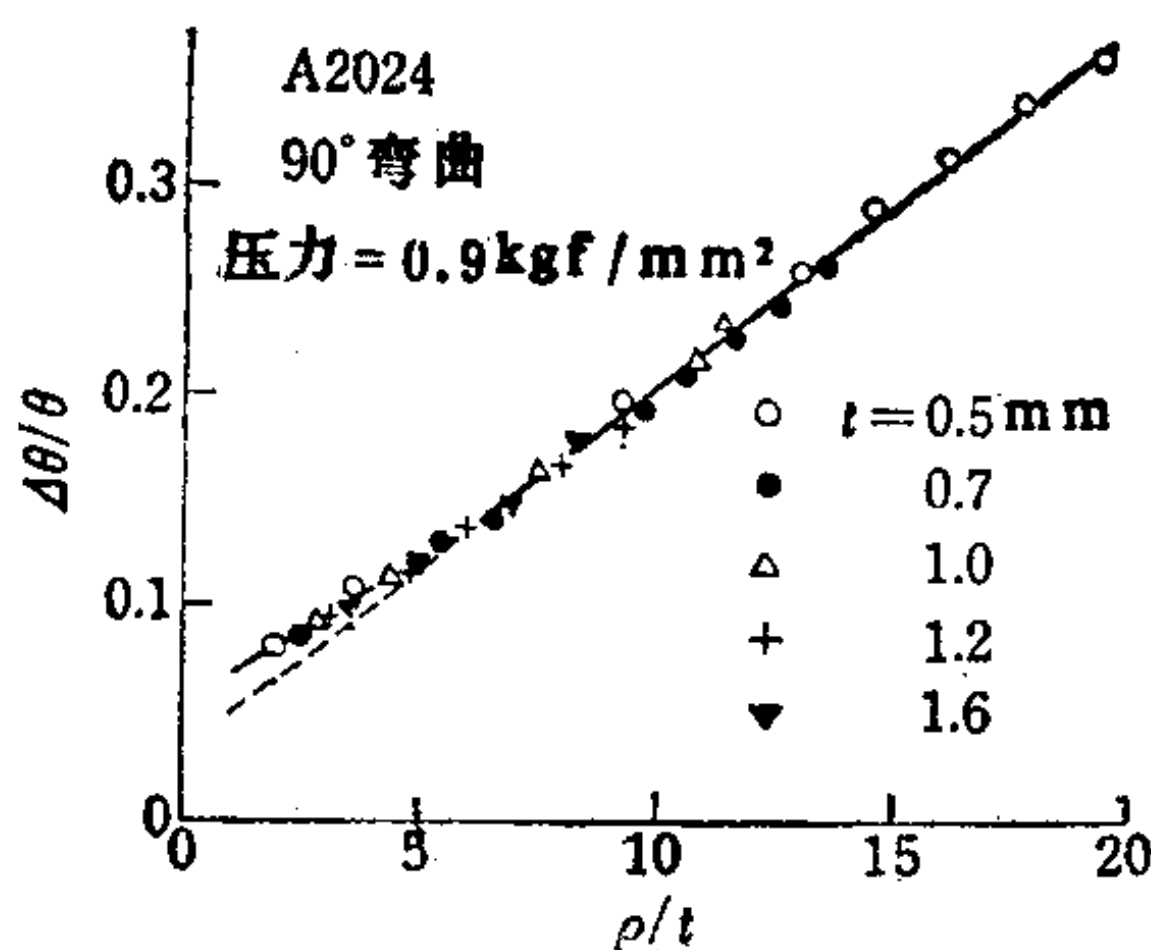


图3.17 橡胶冲压法的回弹实验值

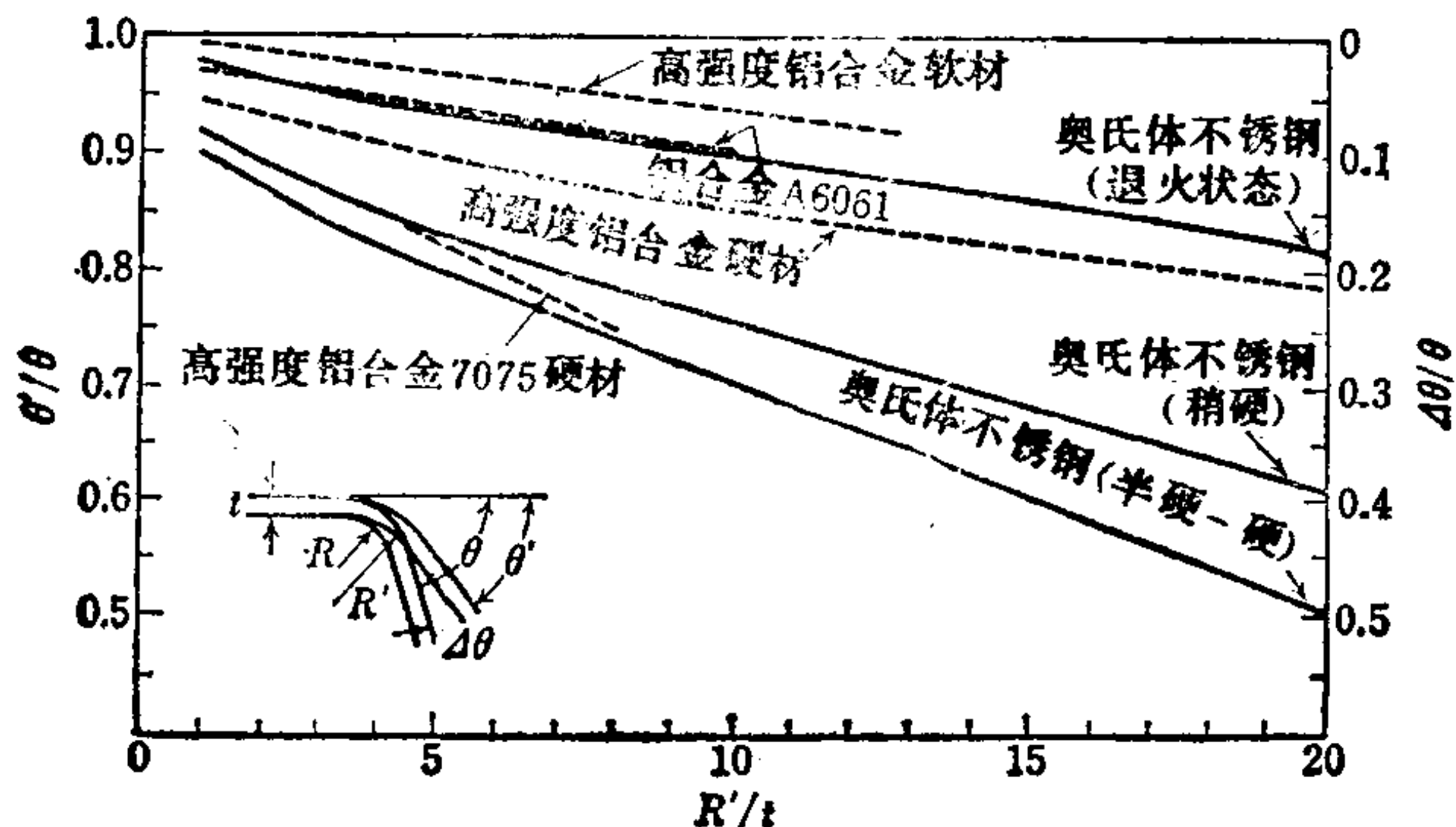


图3.18 橡胶冲压法的回弹实验值

形过程作详细的研究〔12~24〕。而且控制回弹的措施也有着许许多多的考虑方案〔31~34〕（参照 3.2.4. b）。

3.1.3 弯曲时材料的变形

a. 板料的弯曲变形 沿着直线的板料弯曲，外观上看，属于纯弯曲，但是，如果详细地研究却是相当复杂的。下面，就产生翘曲和板厚变薄的实际状况予以论述。

(i) 翘曲 弯曲板料时，靠近凸面（外表面）的纤维沿纵向受到拉伸，靠近凹面（内表面）的纤维受到压缩。假定各纤维不是互相约束而是可以自由变形的话，那么靠近凸面的纤维就在横向收缩，而靠近凹面的纤维就在横向膨胀。其结果是在横向出现曲率，被弯曲部分的横断面即变为扇形，进而板料产生马鞍形翘曲（见图 3.19）。

当其在塑性状态下弯至很大的曲率时，则横向弯曲阻力增大，而在只是对板料中间部分作锐角弯曲等情况下，由于不受弯曲的平直部分给以强有力的横向约束，所以几乎不产生翘曲，仅仅是在靠近边缘的地方（板料厚度的 1~3 倍左右）才出现不太严重的翘曲（图 3.19 b）。更且在压弯那类变形中，如果在最后对薄板加上很大的压力，那么就几乎没有翘曲问题。但是象在弯板机上所见到的那样，对于横向尺寸很长的制件作弯曲时，情况就稍稍有所不同。也就是说，如象图 3.20 那样，如果 l 与宽度 b 的比值很小，那么，约束横向翘曲的阻力则不大，而且由于弯板机的

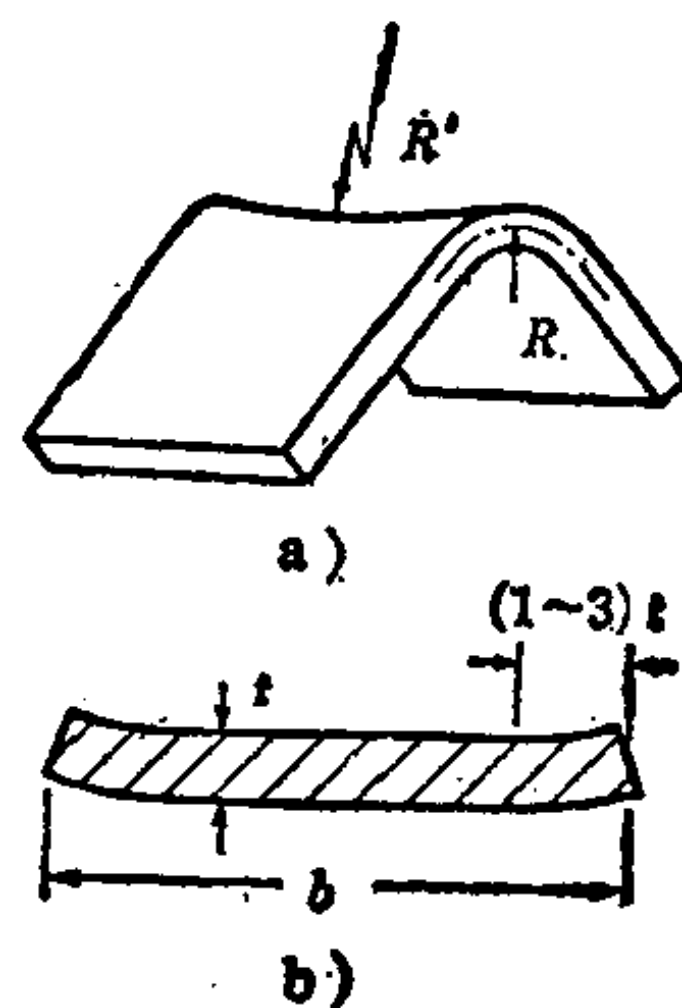


图 3.19

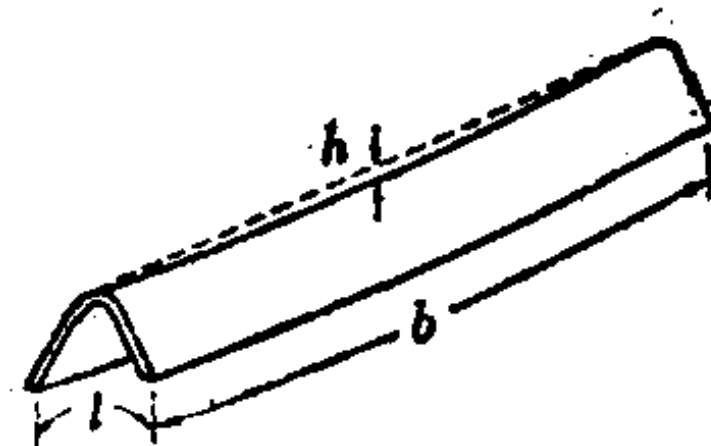


图 3.20

模具本身的刚性不足，伴随着弯曲时已经出现的变形，就会产生相当大的翘曲量 h 。反之，如果宽度很小（ b 为 t 的 5~6 倍以下），那么产生的翘曲就波及到整个宽度，事实上横断面就变成近于扇形。然而，正因为宽度很大的板料上产生翘曲的地方，被局限

在靠近边缘的部分，所以作为整个板料宽度就几乎不发生变化，而近于平面变形状态。

根据这一事实，为严密分析对宽板作大变形程度弯曲时的应变和应力，就必须按照平面变形理论去考虑宽度方向的应力〔8〕。另一方面，在宽度很小的场合下($b < t$)，作为平面应力状态问题(宽度方向的应力为零)去分析是恰当的。

(ii) 板厚的变薄

图 3.21 所示为由于弯曲作用板厚变薄的实验值〔7〕。弯曲得越厉害(弯曲半径 R 与板厚 t 的比值愈小)，板料厚度的变薄就越加显著。在 $R/t > 4$ 时，大体上不认为板厚有所减少。当确定坯件长度时，必须估计到板料厚度的变薄(参照 3.2.4. c)。

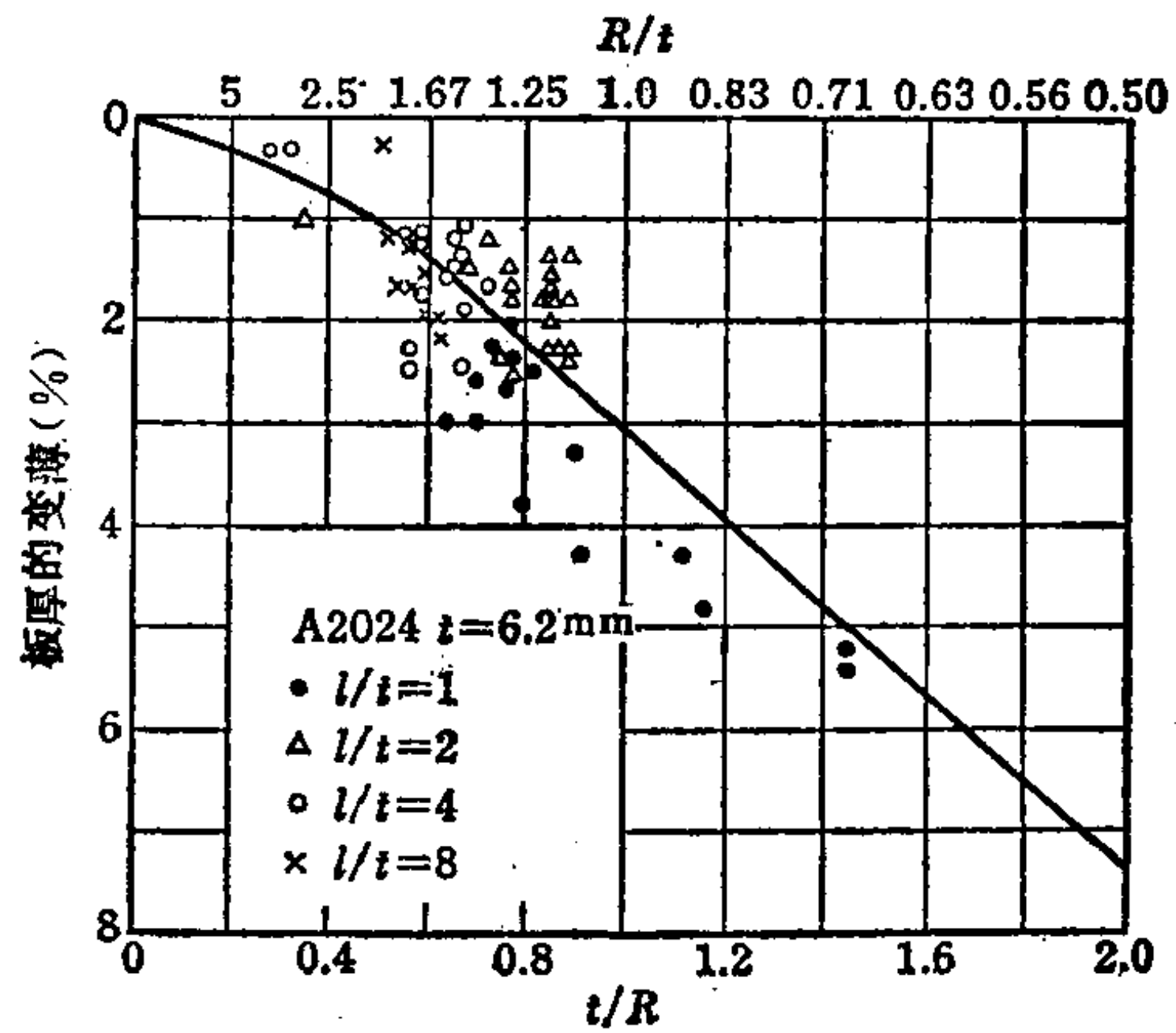


图3.21 板厚的变化

b. 管子、型材的弯曲变形 在圆管的自由弯曲时，随着弯曲过程的进行，断面形状就变扁进而形成椭圆状，而且壁部厚度也在外侧变薄，在内侧变厚进而出现厚度不均。在变形程度极大的弯曲中，有时是在内侧产生皱折，有时是在局部出现塌陷(见图 3.22)。管子弯曲加工的精度和极限就取决于这些因素。矩形断面的管子也与此相同。

管和型材的弯曲加工也以图 3.1 的三种方式为代表，然而，为了防止皱折或塌陷，芯棒和其它辅助工具是必要的(参照 3.5.1)。

c. 滚压成形的变形 滚压成形时，在板料的中心面上(厚度的中心面上)产生拉伸和压缩这一点，与用压力机弯曲有着本质的不同。例如：在图 3.23 中，如果将经压力机成形的单角

弯曲与用滚压成形的单角弯曲成形相比较来看,即使是两种方案的坯料(带料)(I)和制件(III)形状相同,但中间过程(II)

则全然不同。在用压力机弯曲时,弯曲方向相当于完全没有拉伸和压缩的状态(平面变形状态);滚压成形时,靠近板料边缘的纤维,在滚轮的曳入处在送进方向受到拉伸,随着靠近滚轮,材料在送进方向受到压缩,最后又大致回复到原来的长度。象这样在送进方向承受拉伸和压缩,其变形过程随着位置的不同(或近于边缘或近于中心线)是各不相同的。

这就是滚压成形的特征,而

且当成形之中受到的拉伸压缩过大,则在滚轮通过后的板料边缘上,就有产生波形皱折的危险。掌握板料通过滚轮时的变形过程,对滚轮设计是最重要的事情(参照3.4.2)。

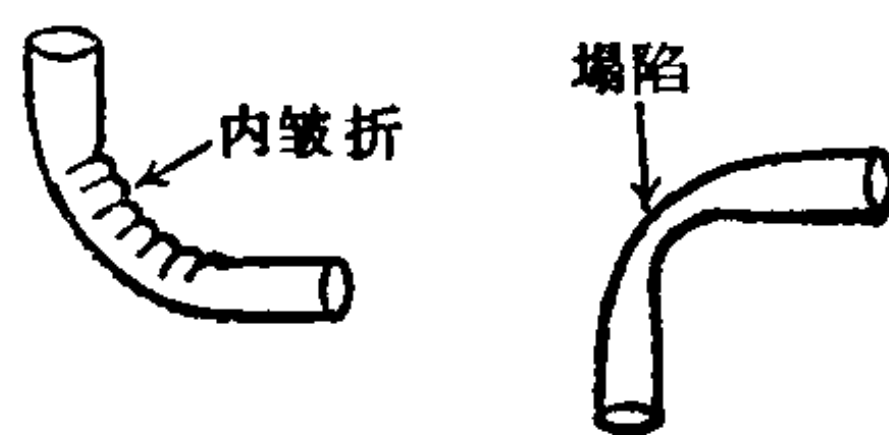


图 3.22

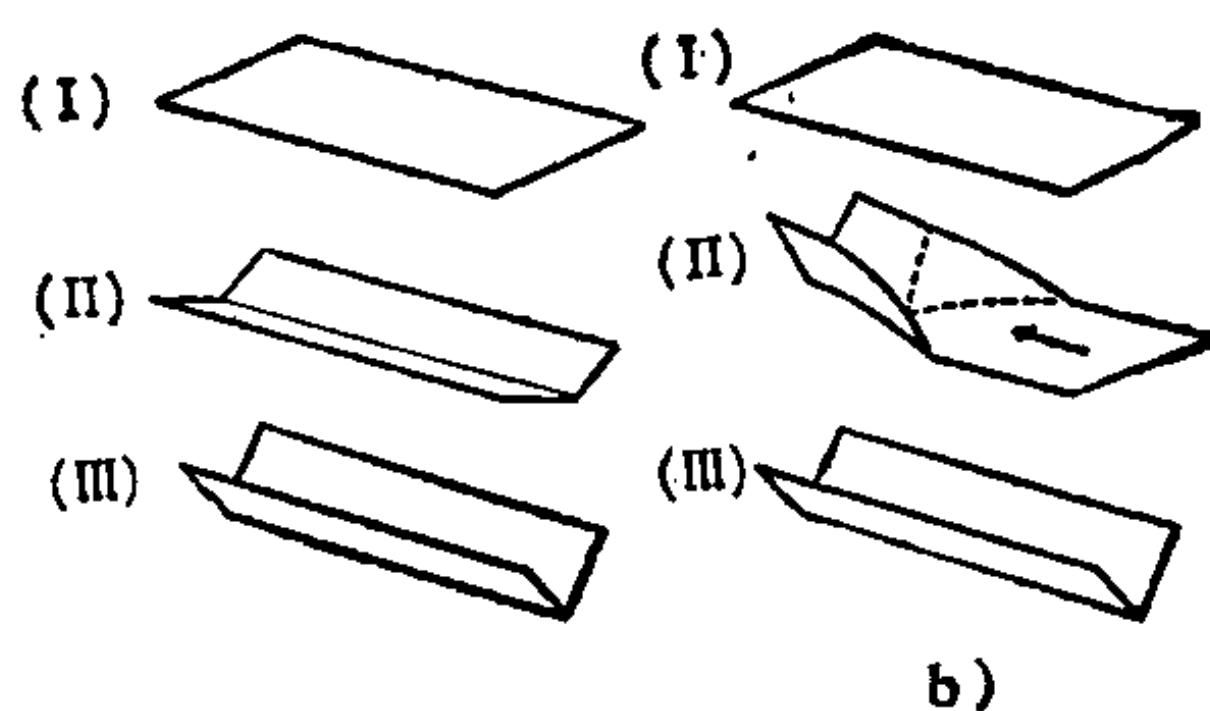


图 3.23

a) 压力机弯曲 b) 滚压成形

3.2 板料的压力机弯曲 [8~42]

3.2.1 弯曲模

a. 弯曲模的类型 对应于制件形状的弯曲模也具有各种各样的形式。关于弯曲中制件的基本形状及其模具,如图3.24所示[49]。其中No1~No4以及No8用单工序作业来成形的方式是弯曲加工的基础,分别称为:V形弯曲、W形弯曲、L形弯曲、U形弯曲和Z形弯曲。形状相当复杂的弯曲件,采用如图所示的简单模以多道工序也是可能成形的。对于用多工序作弯曲成形的场合,必须注意到弯曲的顺序。图3.25[49]所示即为该类型的例子。

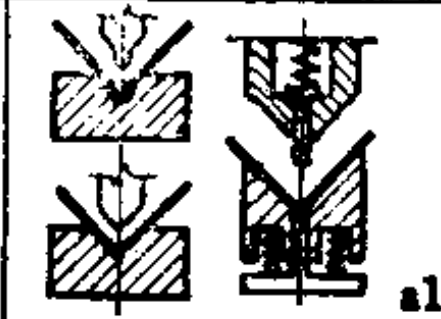
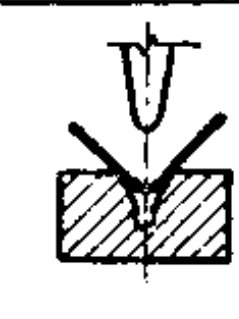
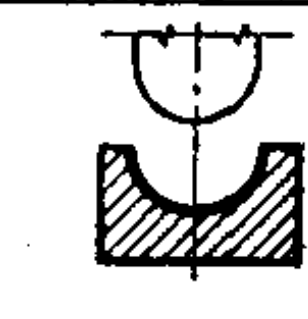
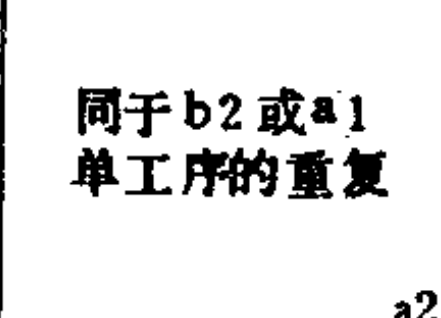

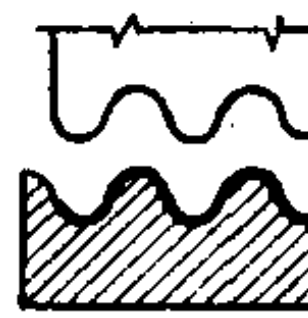
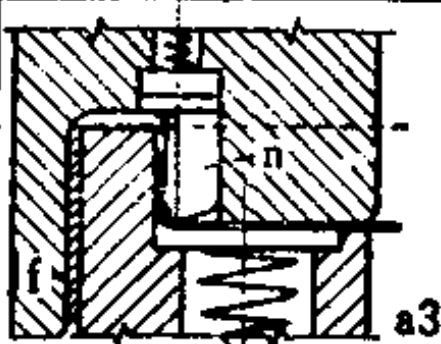
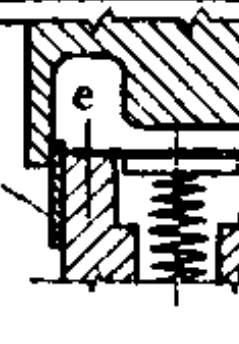
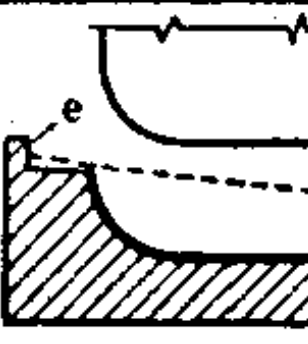
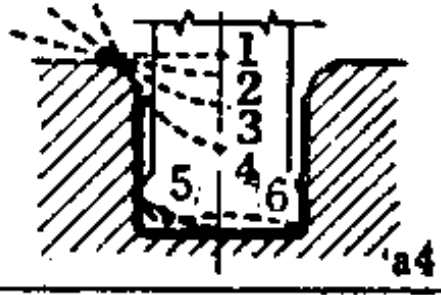
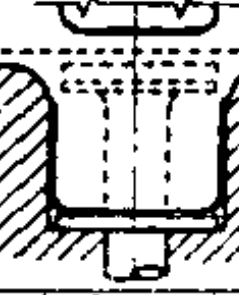
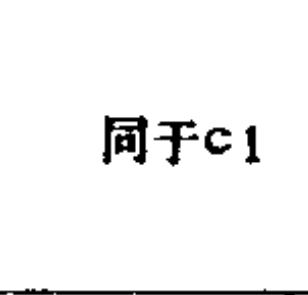
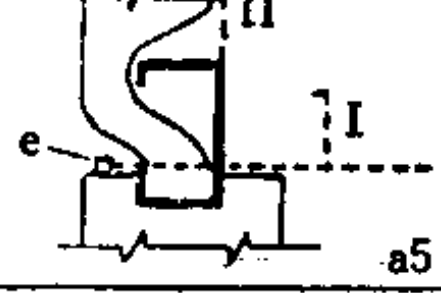
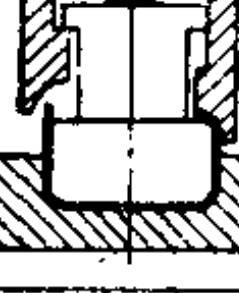
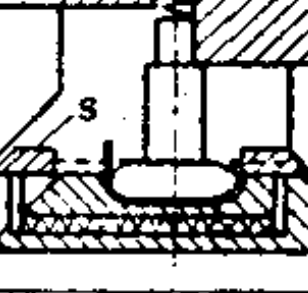
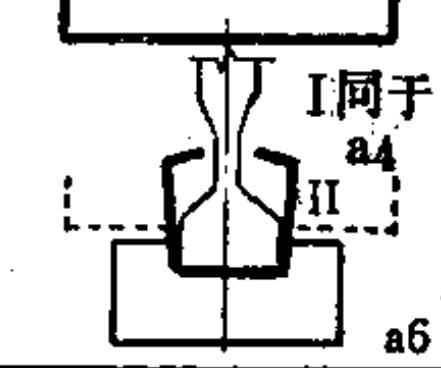
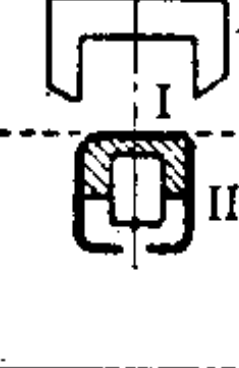
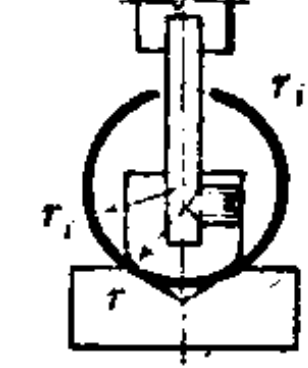
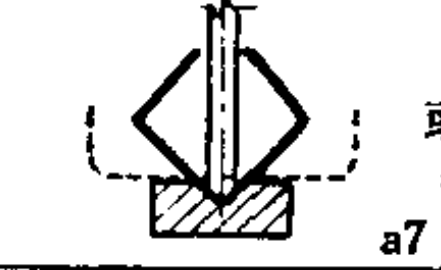
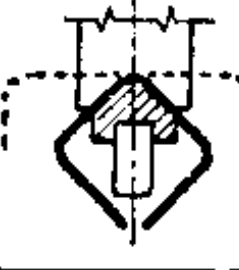
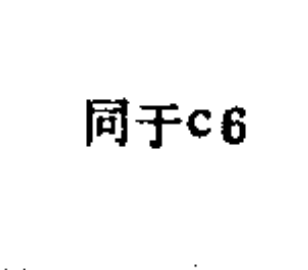
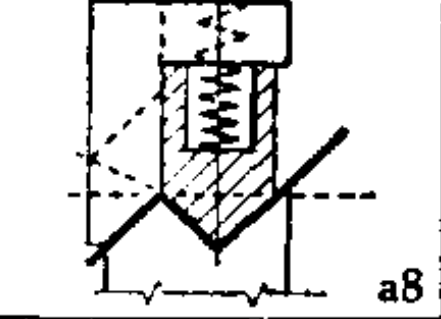
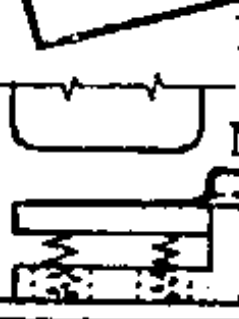
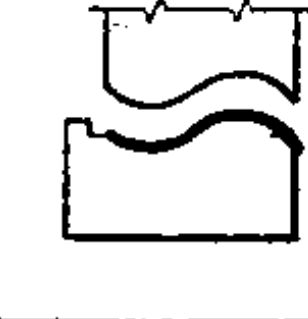
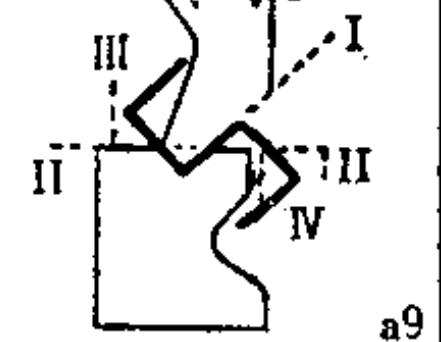
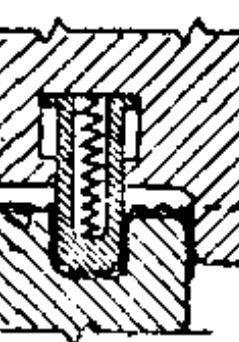

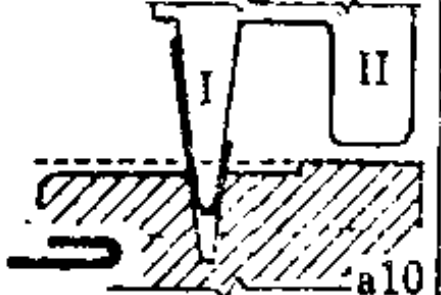


No.	符号和说明	a) 锐角	b) 圆角	c) 圆弧
1	V 两边倾斜的单角弯曲 (V形弯曲)	 a1	 b1	 c1
2	W 连续的几个V形弯曲 (W形弯曲)	同于b2或a1 单工序的重复  a2	 b2	 c2
3	L 单角的直角弯曲 (L形弯曲)	 a3	 b3	 c3
4	U 两个L形弯曲的复合 (U形弯曲)	 a4	 b4	同于c1  c4
5	C 内侧有弯头的U形弯曲 (C形弯曲)	 a5	 b5	 c5
6	O C形弯曲的弯头 中间闭合的弯曲 (O形弯曲)	I同于a4  a6	I同于b4  b6	 c6
7	D 同于O形弯曲但在拐角处闭合	 a7	或  b7	同于c6  c7
8	Z 两反向的V形弯曲 或L形弯曲的组合 (Z形弯曲)	 a8	 b8	 c8
9	S 两反向的U形弯曲的组合 (S形弯曲)	 a9	 b9	 c9
10	F 对折弯曲 (F形弯曲)	 a10	I同于a10 IIa IIb n  b10	 c10

图3.24 弯曲的基本形状和弯曲模〔49〕

即使对于相同形状,也有加工方法之分,因此,模具的结构要作多种多样地考虑。图 3.26 就是对靠近板料的端部作直角弯曲的例子。图 a), 使用标准的 V 形弯曲模就行了,但是由于两直边的长度不对称,所以必须注意到容易出现错移。在图 b)的情况下,由于模具斜面的倾角不同,用凸模作弯曲在滑入凹模时的阻力的不同,所以板料出现错动进而弯曲位置就容易偏移。如图 c), 由于材料在凸模下面的倾斜部分比凸模的尺寸长,所以在凸模向下运动的初始阶段,被弯曲过的地方在行程终结时就要受到推挤并滑移至直立边,因此在制件上会出现歪扭变形。图 d)、e) 与图 a)~c) 相比,模具的结构虽复杂,但可以确保尺寸精度(图 d 中的 l)。

图 3.27 是表示 Z 形弯曲时因模具结构的不同,制件变形上的差异。

为了加工 U 形件,如果象图 3.28 a) 那样用一个工序弯曲,就要发生如图所示的不规则变形。因此,也就有分成两个工序,使用象图 b) 那样的简单 U 形弯曲模的情况。进而如果使用图 c) 所示的模具,那么,由于在冲压行程的中途就完成了第一工序的 U 形弯曲,所以在压力机的一次行程中,就可以获得一个完整的制件。

象图 3.29 那样,模具的某一部分具有可回转的结构时,由于板料在凸模的工作端部 (R 部分) 作连续地贴合弯曲成形,所以,用整体结构模具时那样的歪扭变形(参照 3.2.2) 就不会在制件上出现,也因为制件表面不滑过凹模肩部,所以就不造成伤痕。

对于圆环状制件的成形 (O 形弯曲), 使用图 3.24 中 №6 (c 6) 那一类型的模具, 采取先从靠近板料端部顺序弯曲, 进而在最后才弯曲如图所示的中间部分的方法。此外, 在制件直径较小的场合, 可用各式各样结构的模具。图 3.30 是在第 1 工序中成形出波形, 在第 2 工序中, 用圆筒形凸模在反向对已被弯过的中间部分进行弯曲而成形出圆筒形制件的情况 (图 3.25 中的 №23 也是利用这种形式)。图 3.31〔43〕是在用弹簧支承着的圆柱形凸

14	
15	
16	
17	
18	
19	

8	
9	
10	
11	
12	
13	

1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	

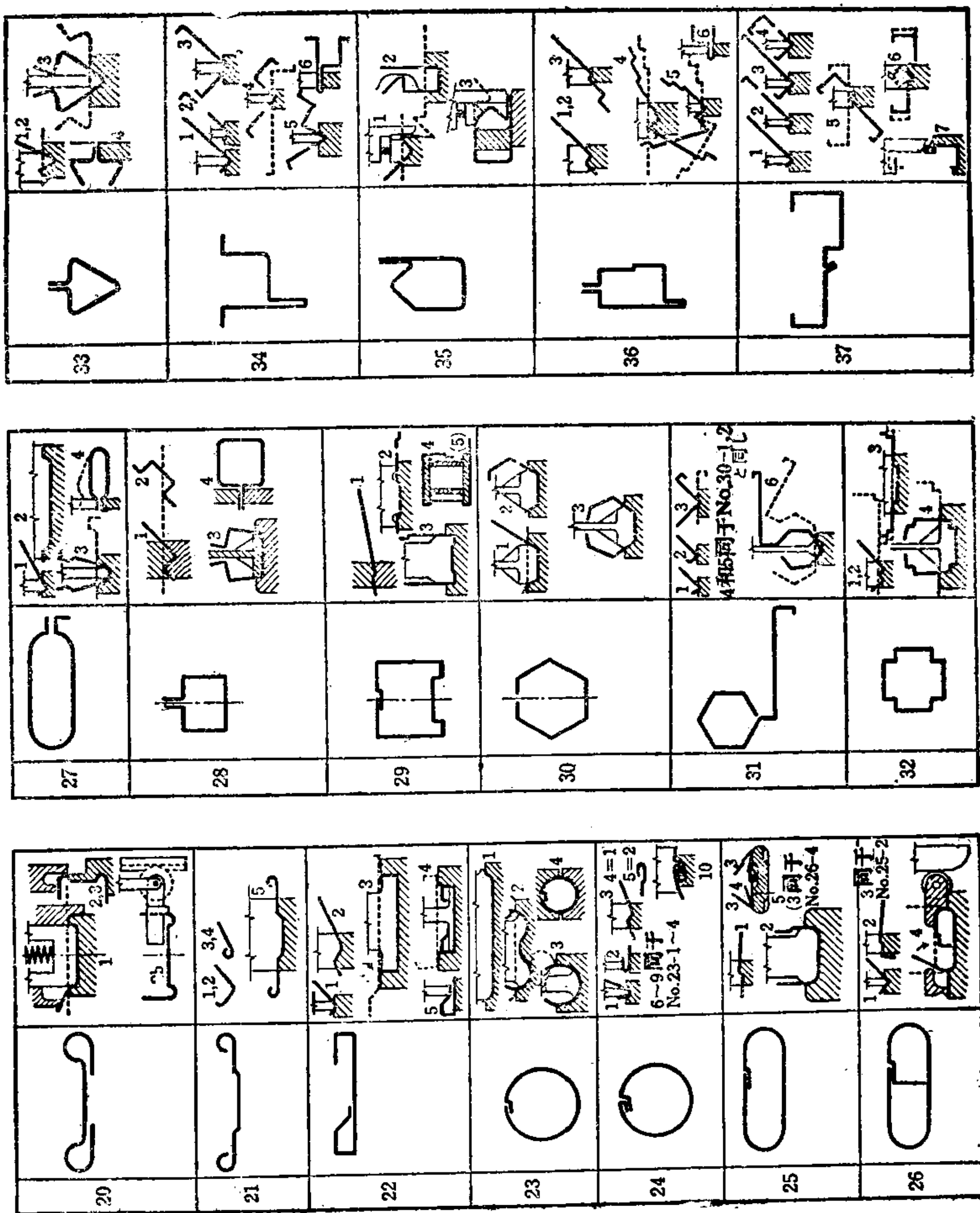


图3.25 复杂形状的弯曲顺序及模具

模上面放上市料，随着上模下降，首先是中间部分受到弯曲，接着上模和凸模一同下降通过下模而成形出圆筒形来。图 3.32 和图 3.33〔43〕，也是用与图 3.31 相同的圆筒形凸模从中间部分弯曲，在压力机的一次行程中完成成形，并利用凸轮从两侧闭合起来的结构。如果圆管长度大，仅仅在一端支承圆筒形的凸模就困难了，所以，要采用图 3.34 那样的方法。用于大直径钢管成形的 U—O 形冲压法，是将用圆筒形凸模成形出的 U 形坯件放在具有半月形沟槽的上下模之中而

成形出 O 形制件的方法（见图 3.84）。

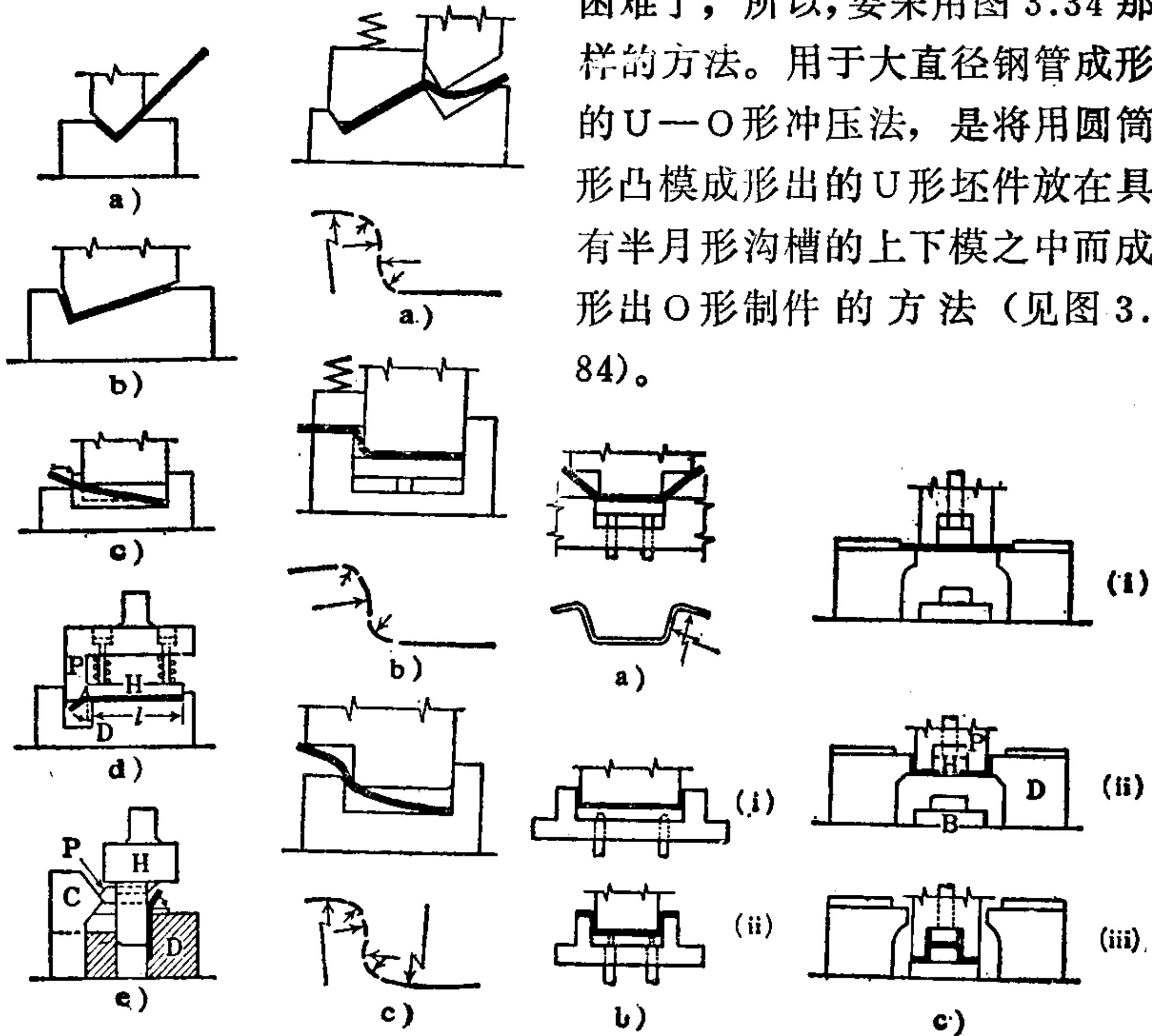


图3.26 单角的直角弯曲

图3.27 Z形弯曲的模具结构和制件的变形

图3.28 U形件的弯曲

在弯曲加工中，使用尿烷（氨基甲酸乙酯）镶块模具，不仅可使制件的畸变小，表面上无伤痕，而且还有通用性强等优点。尿烷放进如图 3.35 那样的模腔当中，即使加相当大的压力也不会局部地方出现压力偏高的现象，当成形出所需形状时，多余

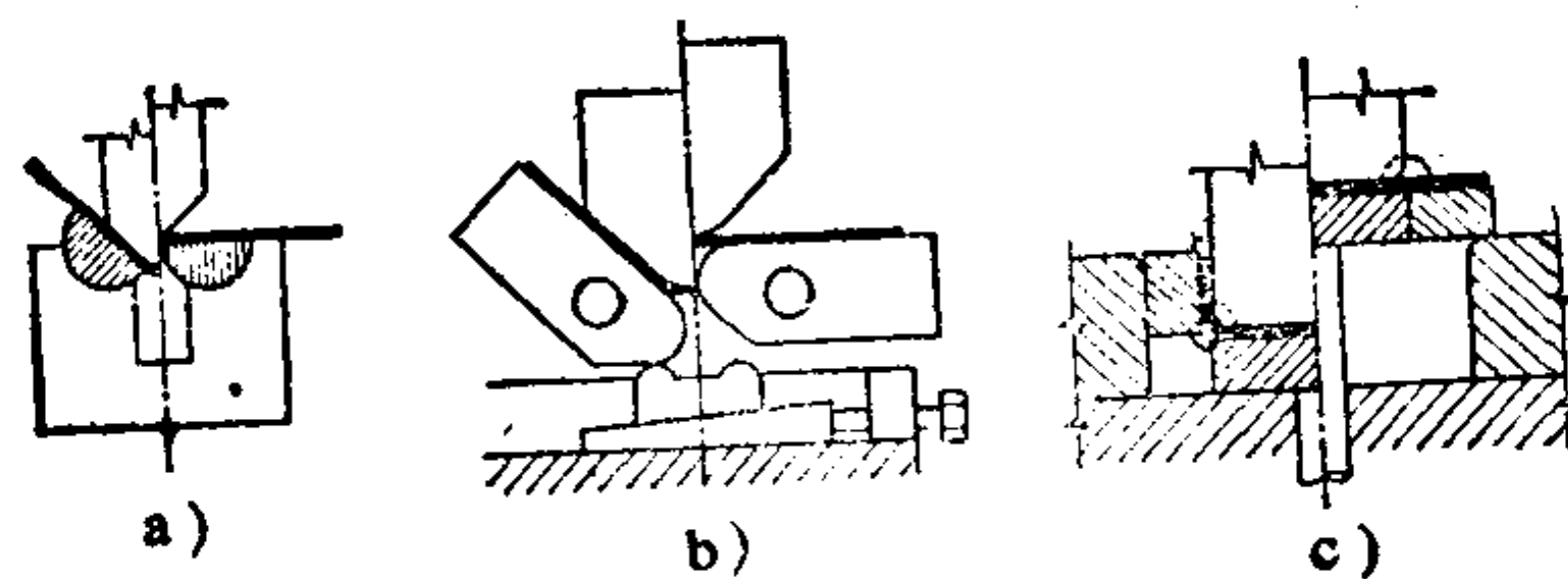


图3.29 具有回转结构的模具

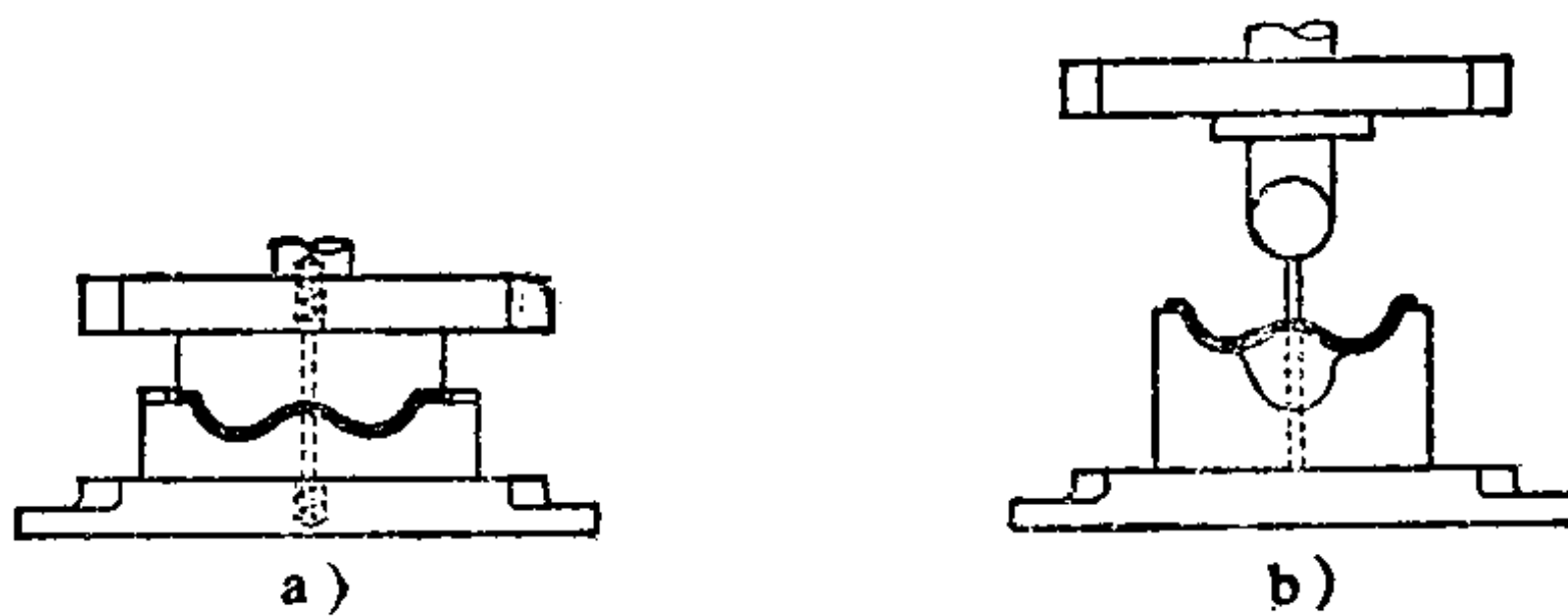


图3.30 圆环成形模

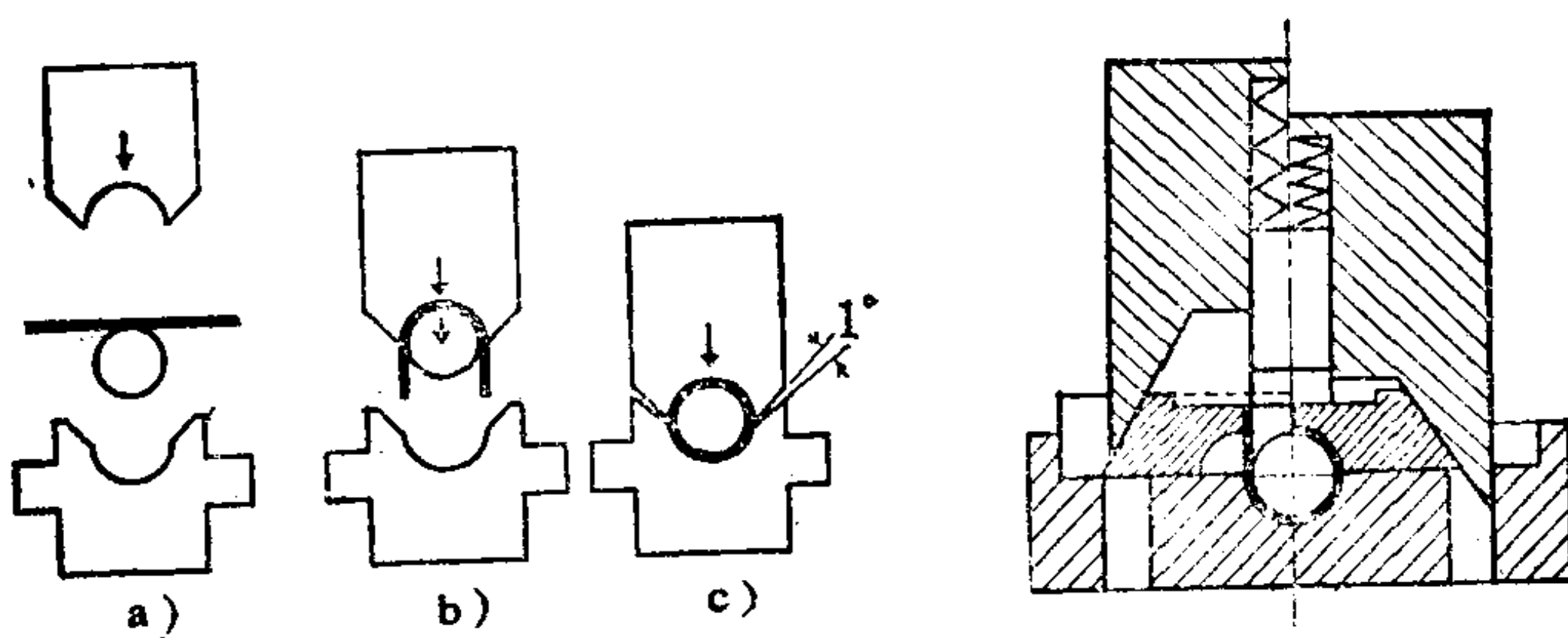


图3.31 圆环成形模

图3.32 圆环成形模

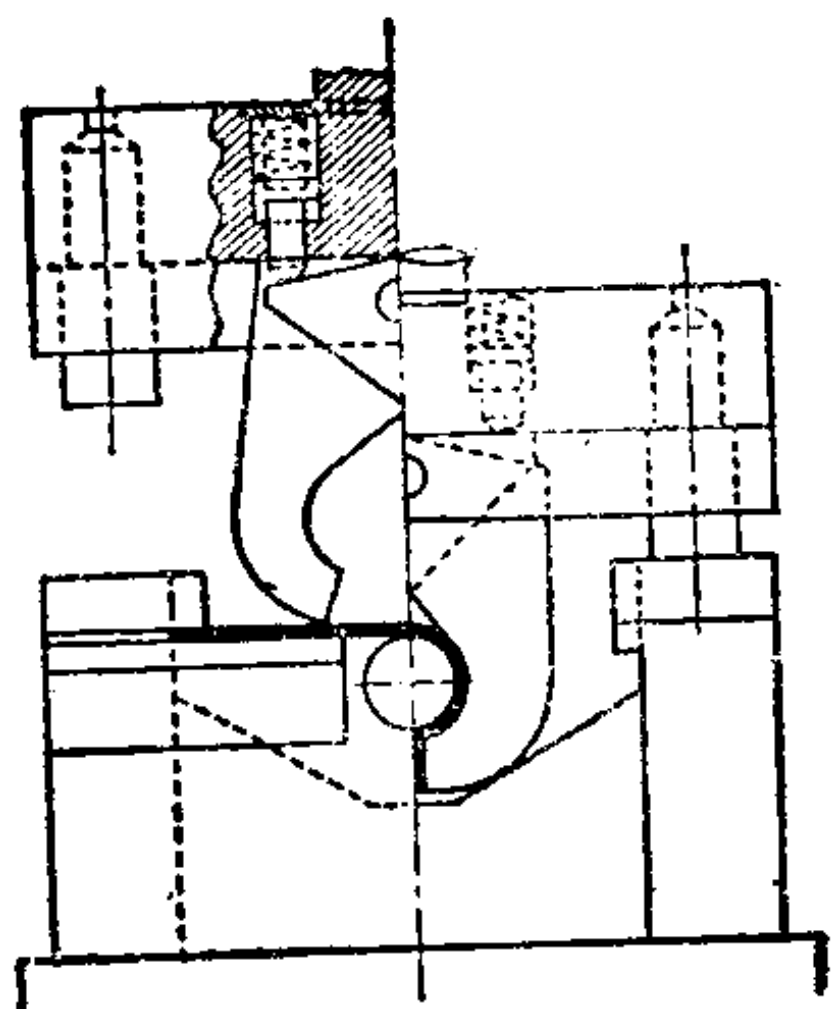


图3.33 圆环成形模

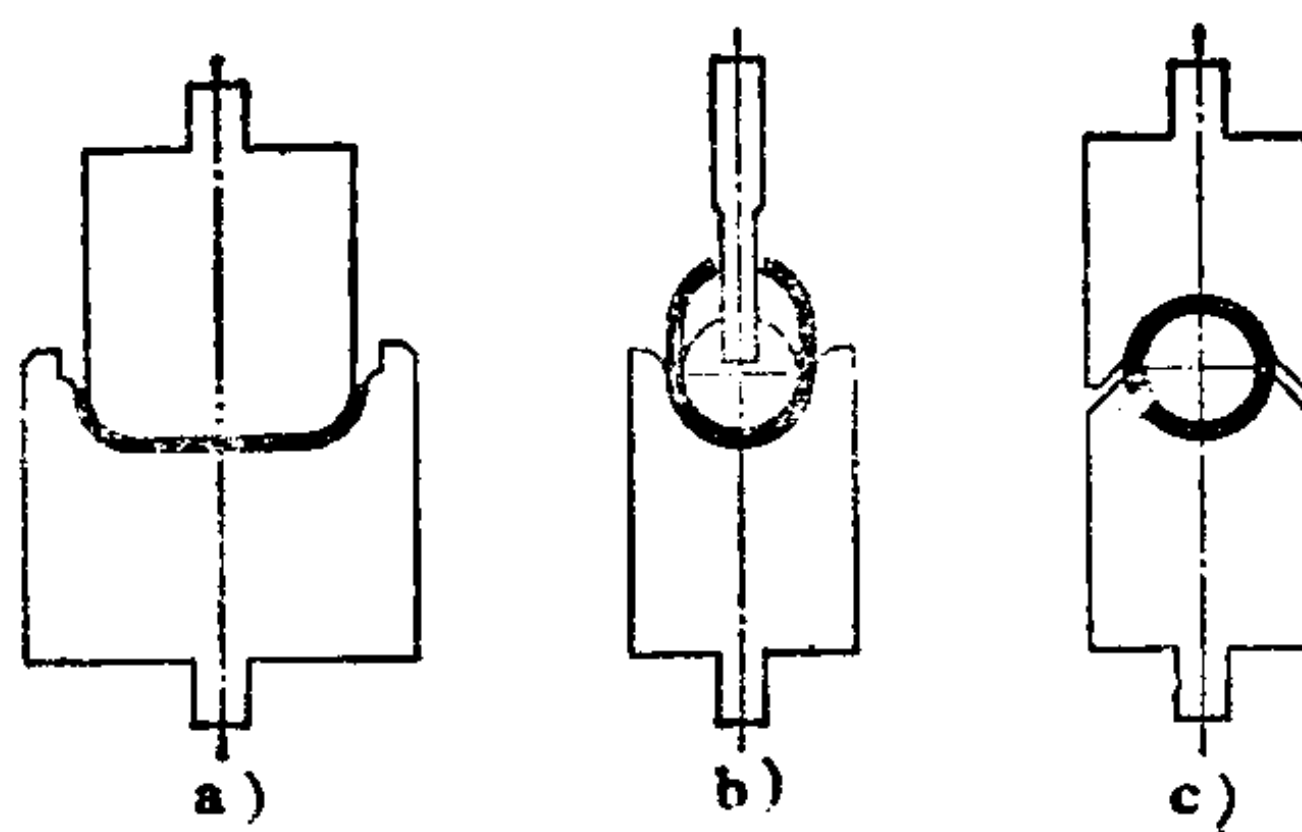


图3.34 圆环成形模

的尿烷即流到模腔的底部。此外，在L形的弯曲模上也可以使用象图 3.36 那样的尿烷镶块。

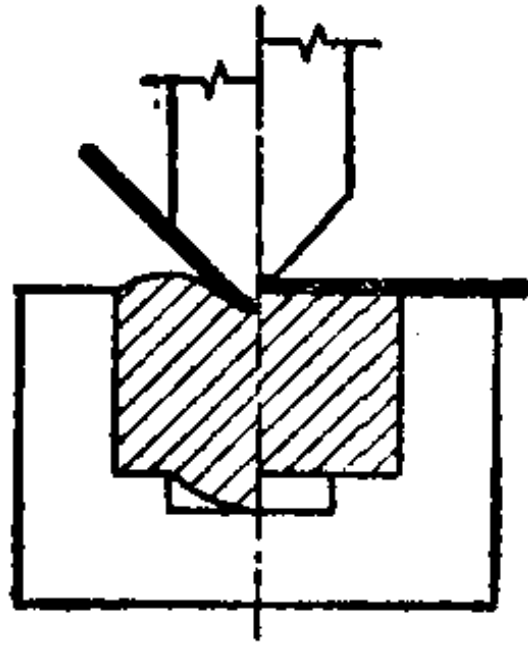


图3.35 尿烷镶块模

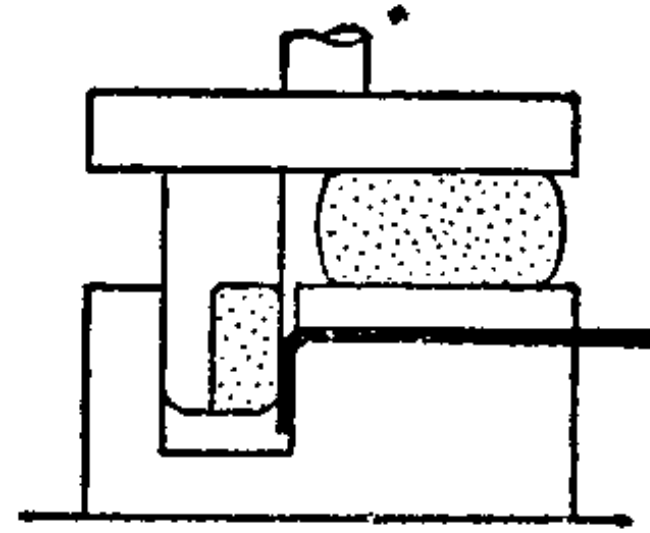


图3.36 用尿烷镶块的L形弯曲模

b. 弯曲模的结构实例 图 3.37 是U形弯曲模的一个例子，在模具上除附有定位板之外，在压力垫上还具有定位销以确保准确的位置精度。图 3.38 也是U形弯曲模的实例，它是取凸模和凹模的间隙稍稍大于板料厚度，在行程终结时，由凸轮作用从两个侧面紧紧地压在凸模之上的结构形式。如果采用这种结构，就可

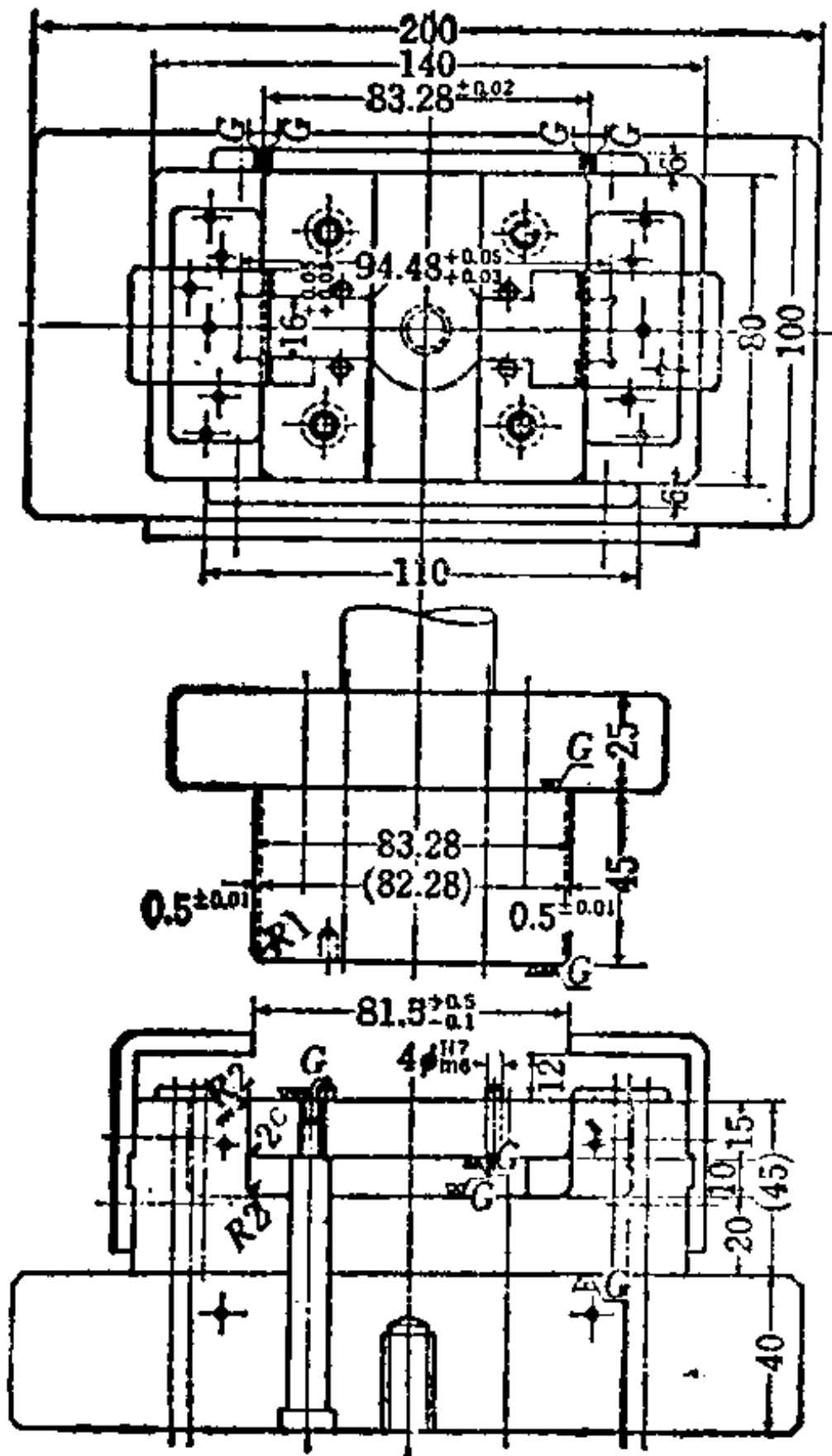


图3.37 U形弯曲模

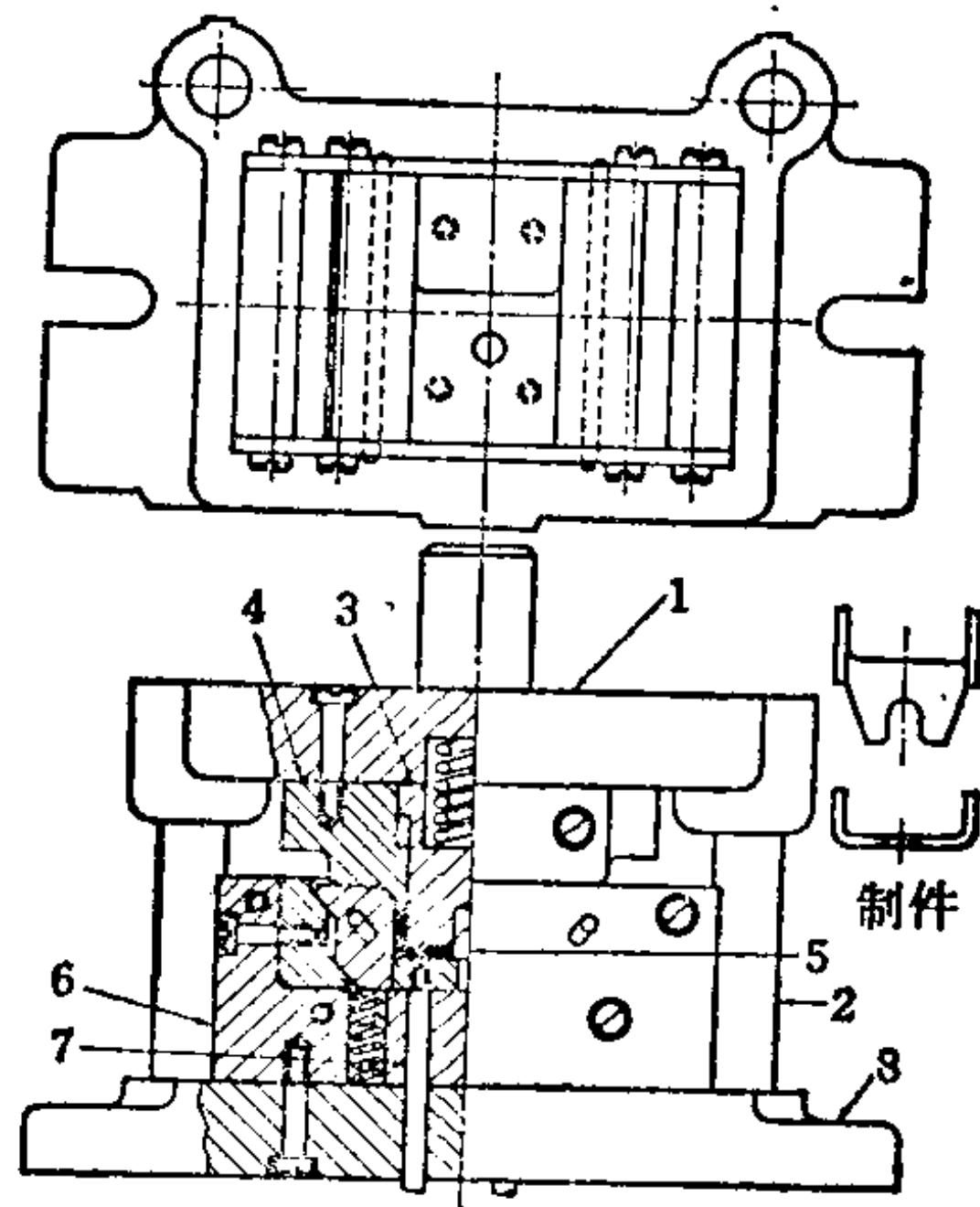


图3.38 U形弯曲模

- 1—上模板 2—导柱 3—凸模 4—凸模固定板
- 5—定位销 6—凹模 7—顶出器 8—下模板

以允许板料厚度有一定程度的偏差。图 3.39 的 U 形弯曲模, 是特别用来弯曲单侧的弯曲角度有精度要求的制件的模具结构, 因此, 就要将板料倾斜起来弯曲以尽可能减小回弹角。

图 3.40 是弯曲角小于 90° 的 Z 形弯曲模的一个例子, 压力垫在压住坯料一端的同时进行弯曲, 在行程的下死点由上下模对已经弯曲的部分在板料的厚度方向施加压力而达到精度要求。

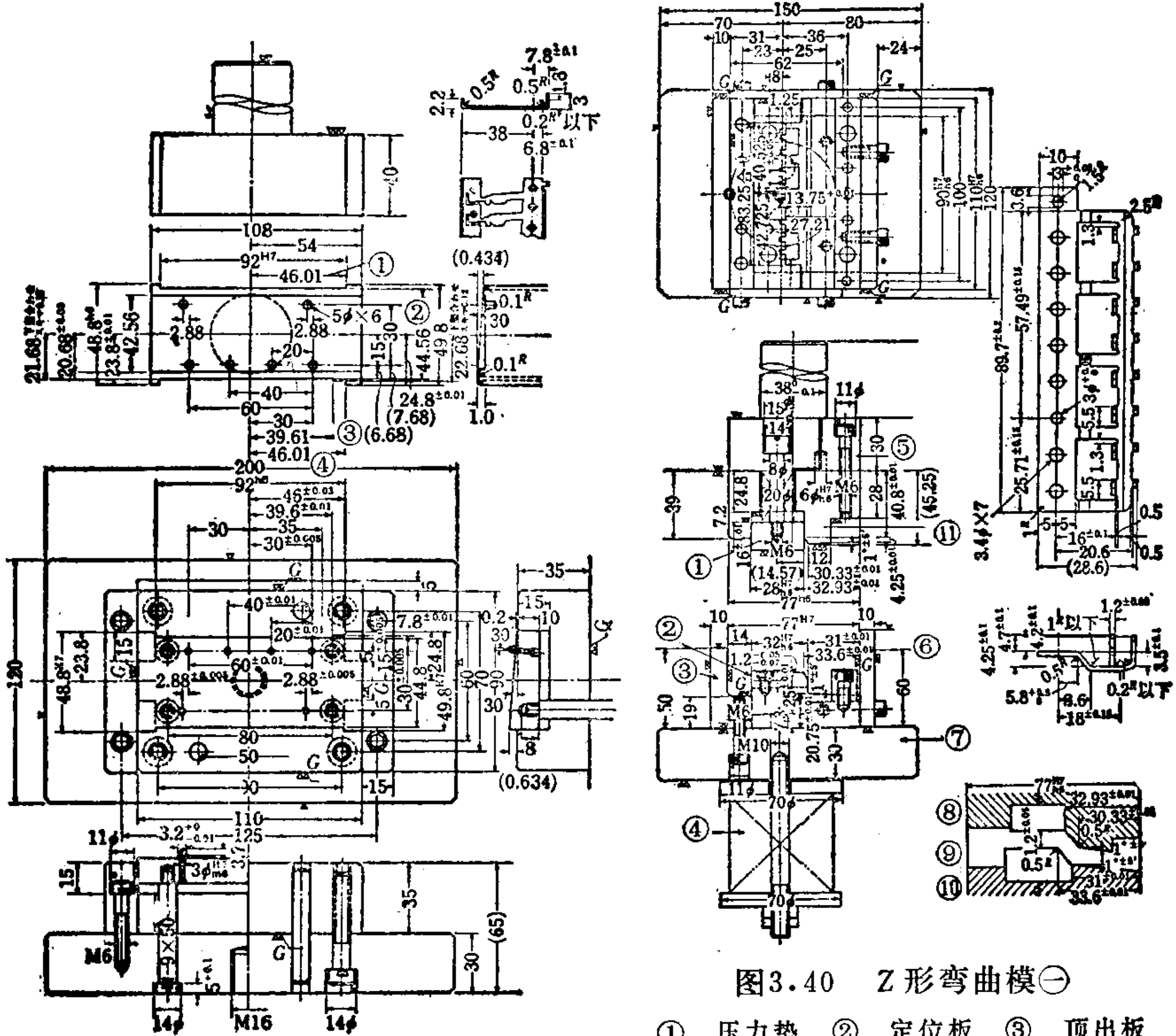


图 3.39 U 形弯曲模 ⊖

①②③④⑤ 下模配合间隙

图 3.40 Z 形弯曲模 ⊖

① 压力垫 ② 定位板 ③ 顶出板
④ 弹簧 ⑤ 上模板 ⑥ 侧板
⑦ 下模板 ⑧ 上模 ⑨ (校正弯曲) 底部细图 ⑩ 下模 ⑪ 凸模

如果利用凸轮使模具的一部分在水平方向运动, 那么, 复杂

⊖ 原图过小, 未作加工。——译注

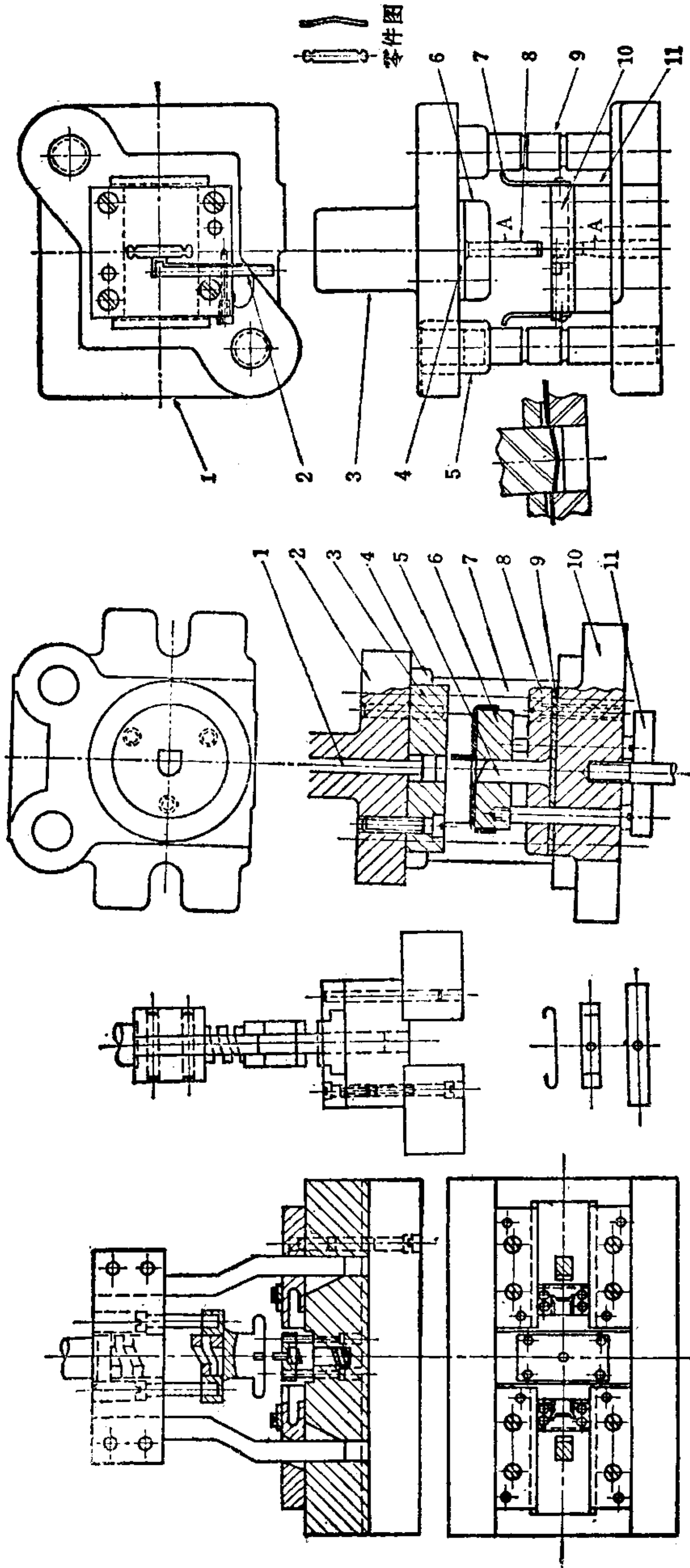


图3.41 凸轮式弯曲模

1—顶件机构 2—上模板 3—凹模 4—导套 5—凸模 6—压力垫 7—导柱 8—凸模固定板 9—垫板 10—下模板 11—顶出器

图3.42 切口弯曲模

1—下模板 2—自动停止装置 3—上模板 4—垫板 5—导套 6—凸模固定板 7—防护装置 8—凸模 9—导柱 10—卸料器 11—凹模

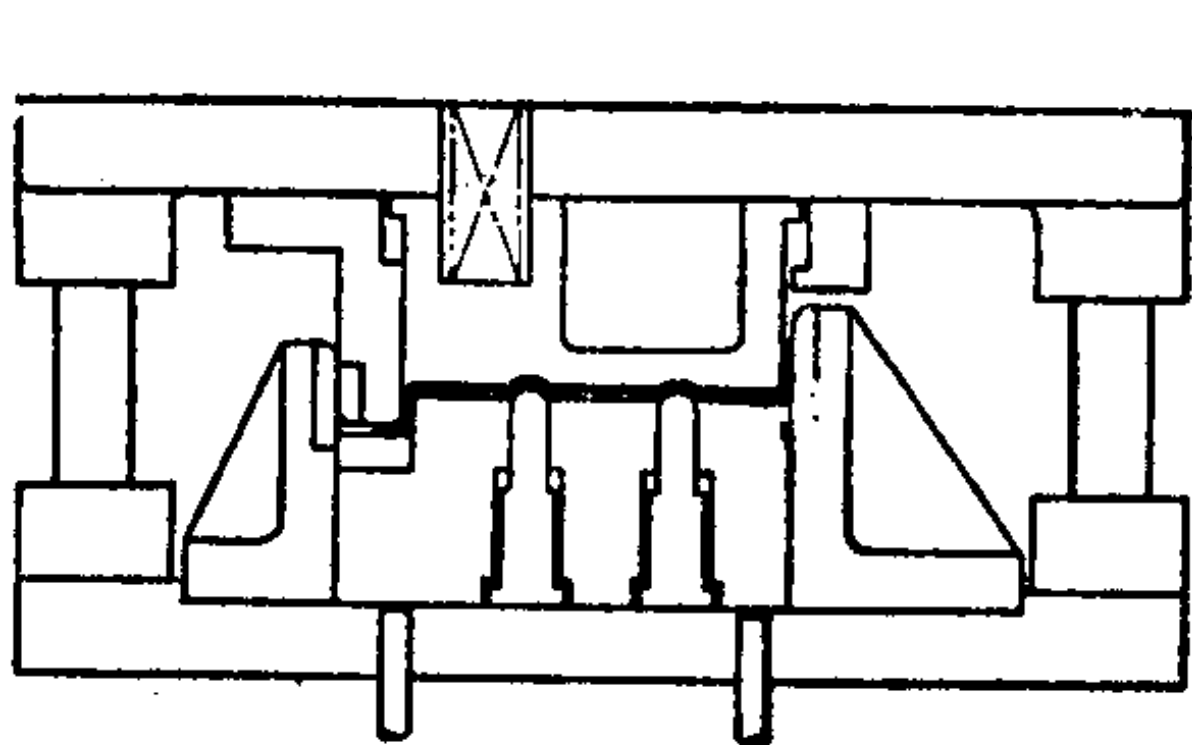


图3.44 弯曲一起伏成形模

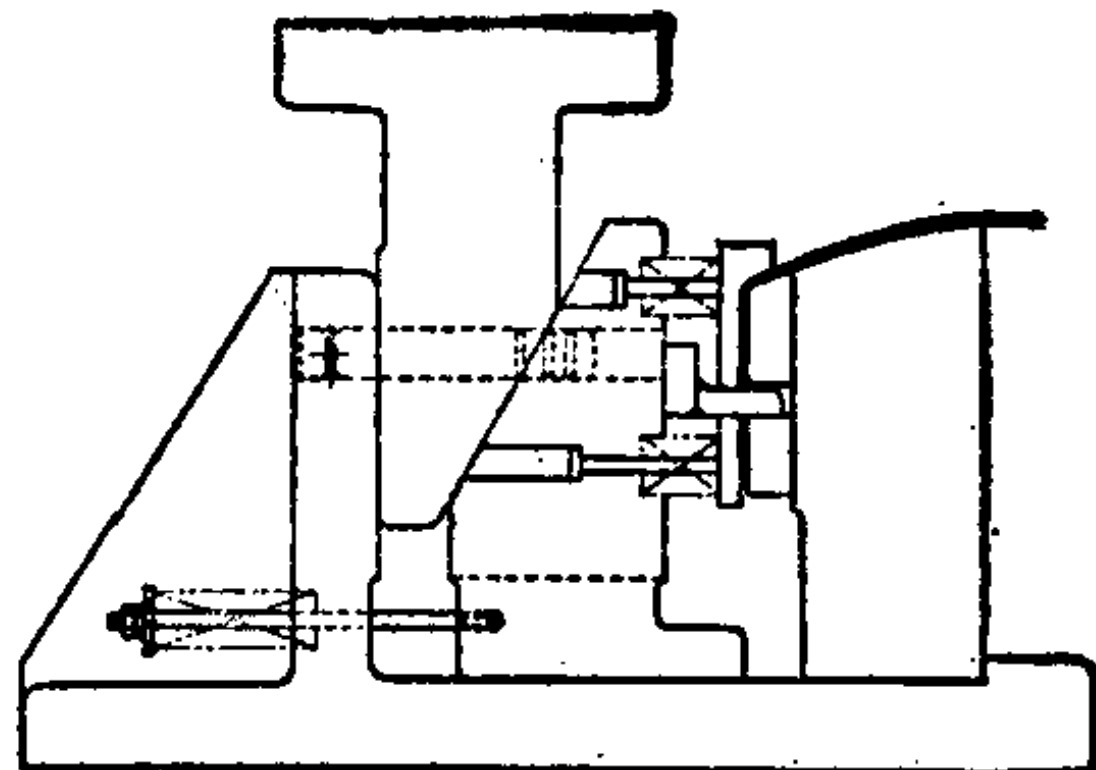


图3.45 凸轮式弯曲一切头模

的弯曲也就可以在一个工序中完成。图 3.41 就是它的一个例子。

与别的加工复合起来进行弯曲的模具，也是多种多样的。图 3.42 就是切口—弯曲模的一个例子。运用这种方法时，必须注意开裂的问题(参照 3.2.3. a vii)。图 3.43 是弯曲—落料模的例子；图 3.44 是弯曲一起伏成形模的例子；图 3.45 是凸轮式弯曲一切头模的例子。

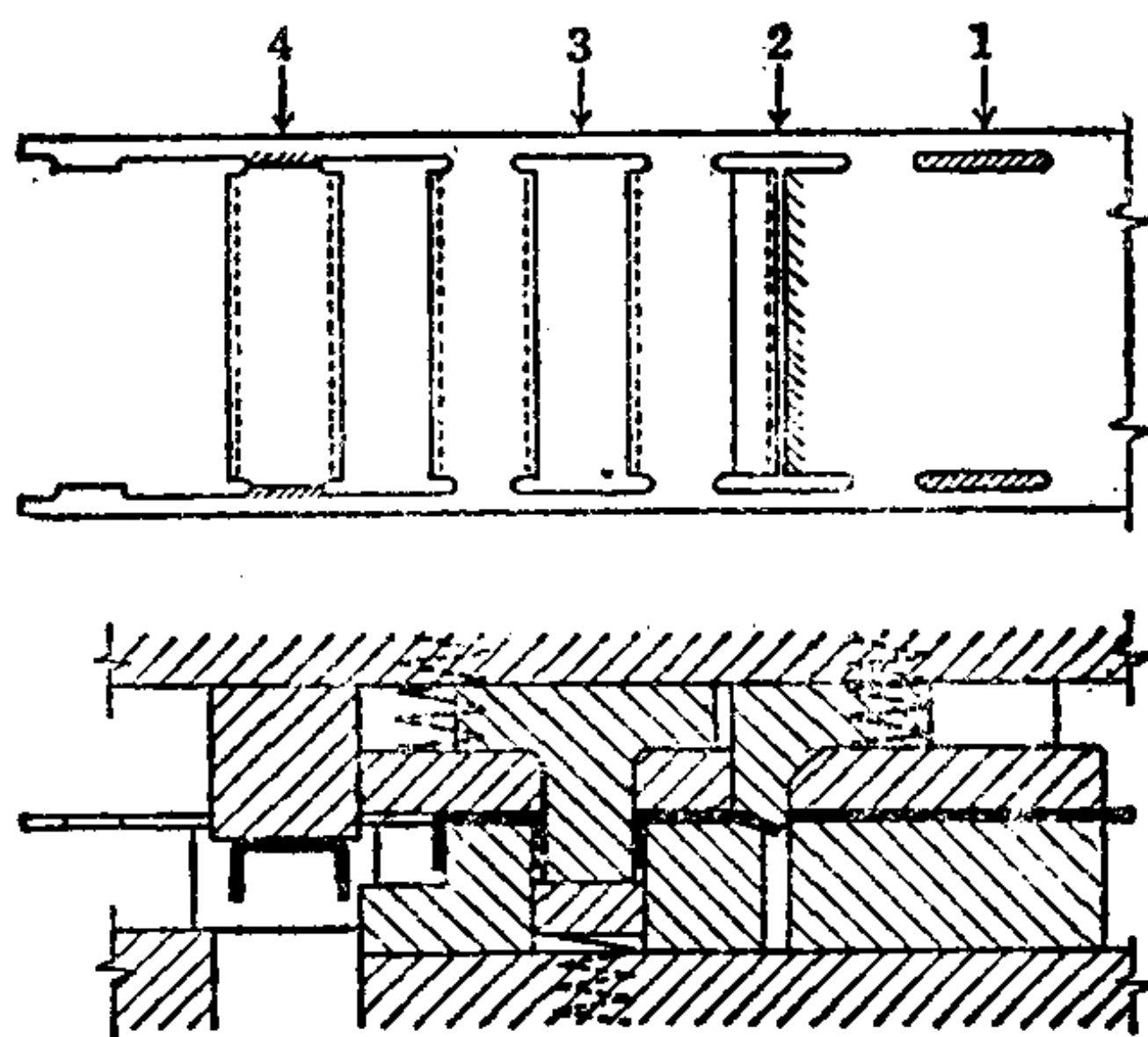


图3.46 连续模

一边送进板料一边进行顺次加工的连续模，效率非常高，易于实现自动化。图 3.46 为制作 U 形制件的连续模的一个例子。

3.2.2 成形原理

a. V形弯曲 V形弯曲时(图 3.24 的 No 1)，遵循图 3.47 [44]那样的变形过程。也就是说，放在凹模上面的平板料，随着凸模的向下运动，在凹模肩部的支承下开始弯曲，形成图 a) 的状态。当凸模进一步下行，那么，就按照 b)~d) 的过程发生变形。即如果板料的支点在凹模的斜面上移动，则在此之前于支点间已被弯曲的部分材料，由于移到支点的外面就从凹模的斜面上

离开进而与凸模相接触,并由凸模使其弯曲而返回,最后在凸模和凹模之间受到压力的作用,形成与凸模形状大体一致的外形。从图中表示与变形过程相对应的载荷—行程关系曲线可以看出,在变形的初始阶段是以很小的力来进行弯曲的。把V形弯曲限制在此一初始阶段(至图3.47中a的范围为止)而完成的加工这种方法称之为自由弯曲(air bending)(参照图3.24的No1b)。与此相反,对板料的伸臂部分在凸模和凹模之间的加压展平为止所作的强行压制方法叫做强制弯曲、矫正弯曲(bottoming)等。

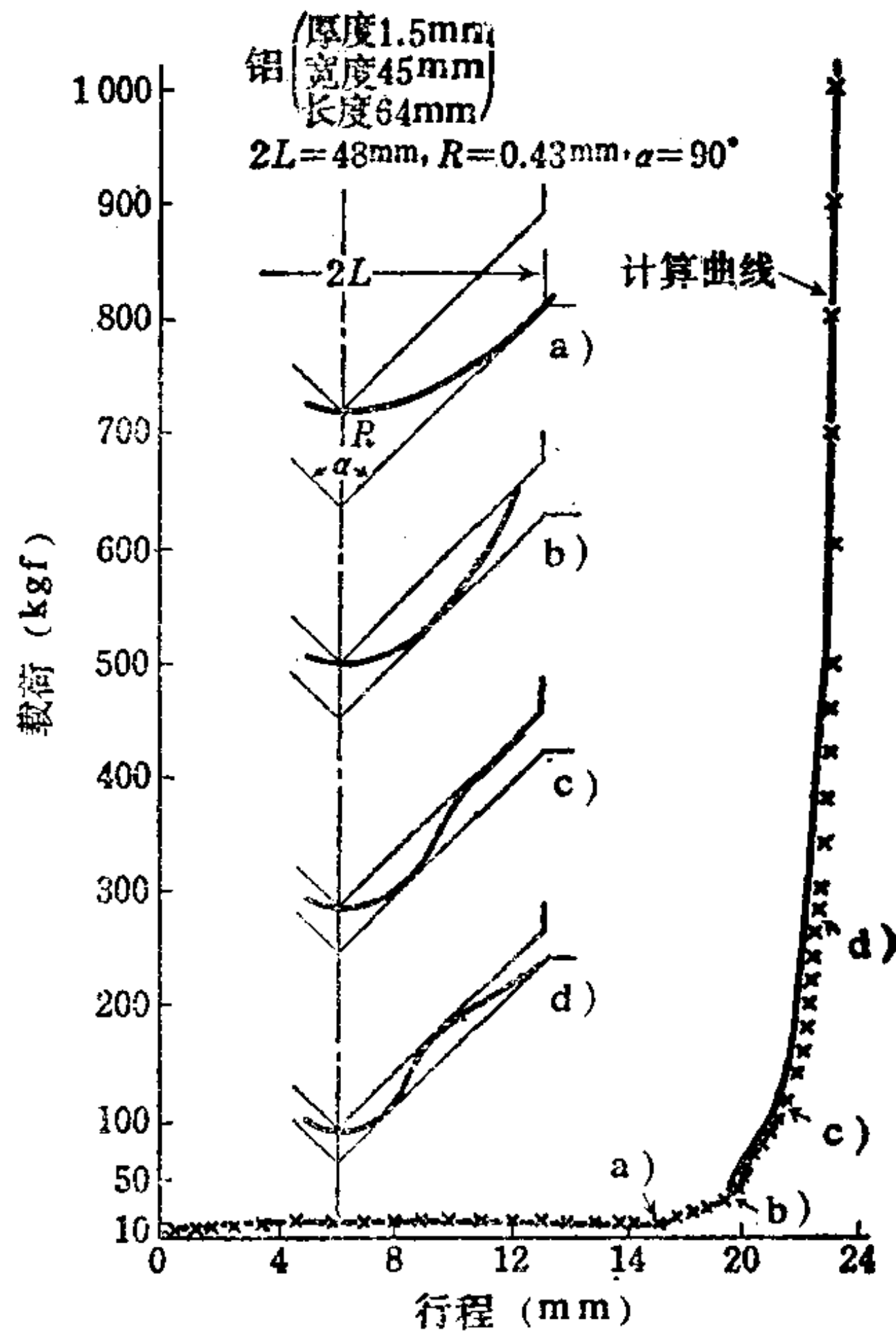


图3.47 V形弯曲的变形过程和
载荷—行程曲线〔44〕

自由弯曲时的回弹,是由于消除载荷后板料的各个部分多出了几个具有曲率的地方,与各曲率相对应处的变形有所回复,使得弯曲角变小。在矫正弯曲后消除载荷的情况下,板料的各个部分对应于各自的变形过程而产生回弹。也就是说,象图3.48所示那样,靠近凸模圆角 R 的 OA 部分,出现了半径变大那样的普通回弹(与纯弯曲的变形相同),并使直边端部的角度张开产生回复作用(取此角度变化的方向为正回弹)。然而, AB 部分却在内侧方向, BC 部分却在外侧方向产生回弹,从而使直臂部分出现波形。由于在直臂端部所测得的回弹角,是表示了该弯曲件上各个部分回弹之和,所以,当 AB 部分的负回弹占优势时,作为整个制件来看也就变成负回弹,从外观上看,卸载之

后还出现进一步变形的现象。至于回弹的大小，受模具形状以及最终压力等因素的影响（参照 3.2.4. b）。

弯曲力常用下式计算：

$$P = C \frac{bt^2\sigma_b}{W} \quad (3.33)$$

式中 b ——板料宽度；
 t ——板料厚度；
 σ_b ——板料的抗拉强度；
 W ——凹模肩部的开口宽度（此地系指 $r_d \approx 0$ 而言）；
 C ——是随 r_p/t 以及 W/t 而变化的系数。按照不同学者的意见， C 值取在 $2/3 \sim 1.8$ 的范围内（有关符号参照图 3.49）。

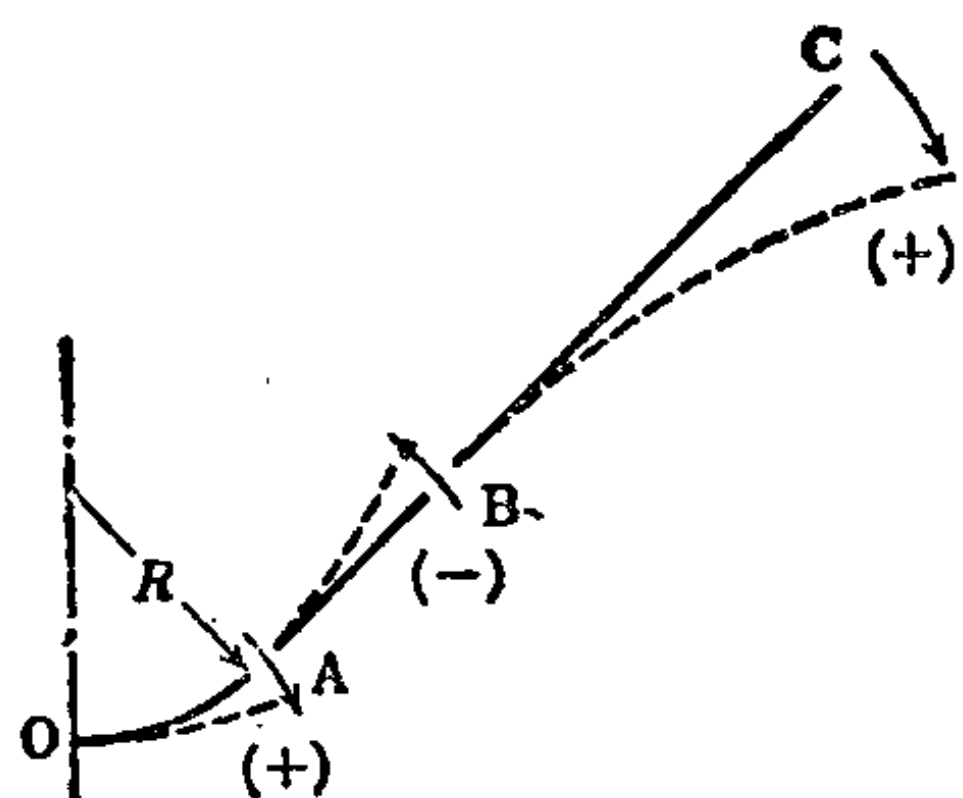


图3.48 板料各部分的回弹

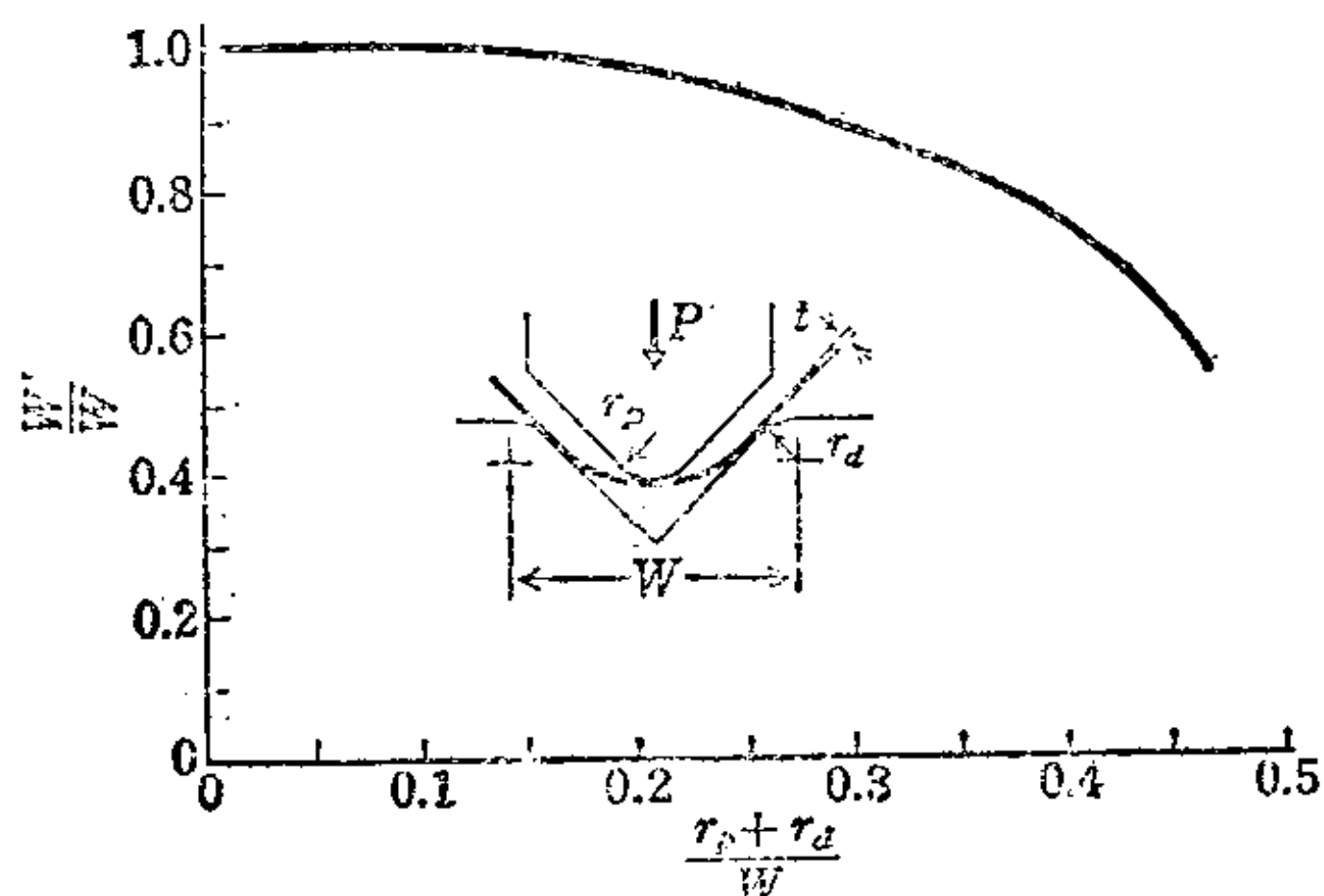


图3.49 用于弯曲力 P 计算公式中的符号和 W' [45]

在图 3.47 上，至 a) 为止的最高载荷，如果使用上面的公式则取 $c = 0.3 \sim 1.5$ ，上面的公式可以认为是以自由弯曲为对象的弯曲力计算公式，但是，随着材料和模具尺寸等因素的不同， C 值的变化是很大的。下式是自由弯曲时弯曲力的经验公式 [45]：

$$P = KbtF, \quad K = \frac{(1-n)t/W'}{1 + (0.6 + 0.04W'/t)n} \quad (3.34)$$

式中 n 、 F ——将应力-应变曲线近似地以 $\sigma = F\varepsilon^n$ 表示时的系数；

W' ——图 3.49 上用曲线所表示的考虑到 r_p 、 r_d 之后的相对凹模肩部开口宽度。

图 3.50 是 K 值曲线图。

为了减小回弹并得到准确尺寸,其弯曲加压力可按下式求得:

$$P_v = (1 \sim 2) bl \sigma_e \quad (3.35)$$

式中 σ_e ——材料的屈服应力;

l ——板料承压面的总水平投影长度。

考虑变形过程推导出求解弯曲加压力的公式〔44、46〕为

$$P_v = 2bFL \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{\frac{n'+1}{n'}} \frac{n'}{(n'+1)^{1-\frac{1}{n'}}} \left(\frac{t}{L} \sin \frac{\theta}{2} \right)^{\frac{1}{n'}} \times \int_{\frac{r+t}{L} \sin \frac{\theta}{2}}^1 \frac{(1-u) du}{\{1 - (1-u)^{n'+1}\}^{1/n'}} \quad (3.36)$$

图 3.51 是这个公式的计算图表,在同一图上还表明了符号的含义。凹模底部具有圆角,在凹模底部和凸模的 R 部分之间对板料加上附加压力时的弯曲力 P_{vR} , 仅仅是在上面公式的 P_v 上加以 R 部分的弯曲力 P_R , 也就是

说 $P_{vR} = P_v + P_R$ 。 P_R 可用下面的公式表示, 图 3.52 是它的计算图表〔44、46〕。

$$P_R = 2bFr \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{\frac{n'+1}{n'}} \left(\frac{n'}{n'+1} \right) \left(\frac{t}{2r+t} \right)^{\frac{1}{n'}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (3.37)$$

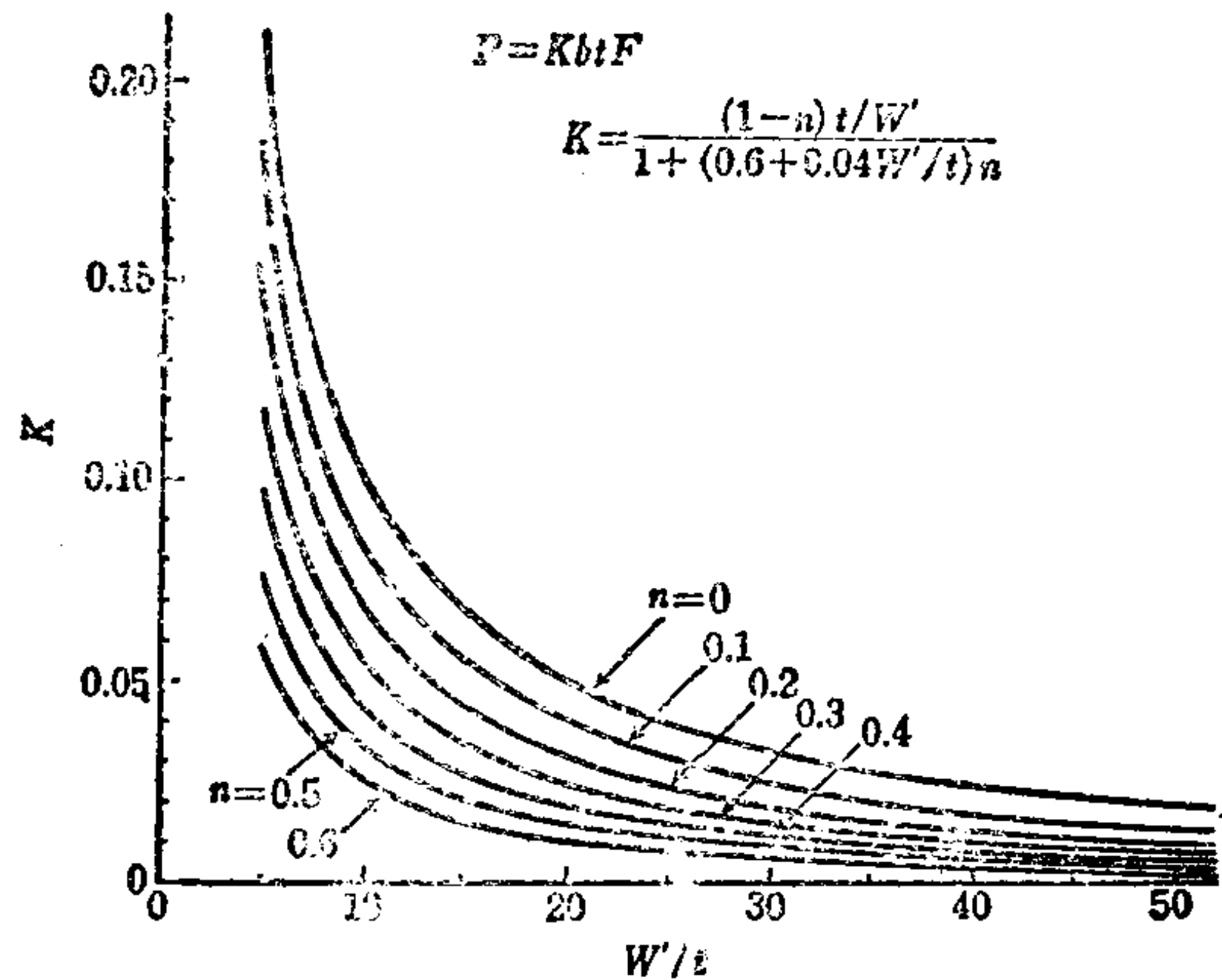


图 3.50 弯曲力 P 的计算线图〔45〕

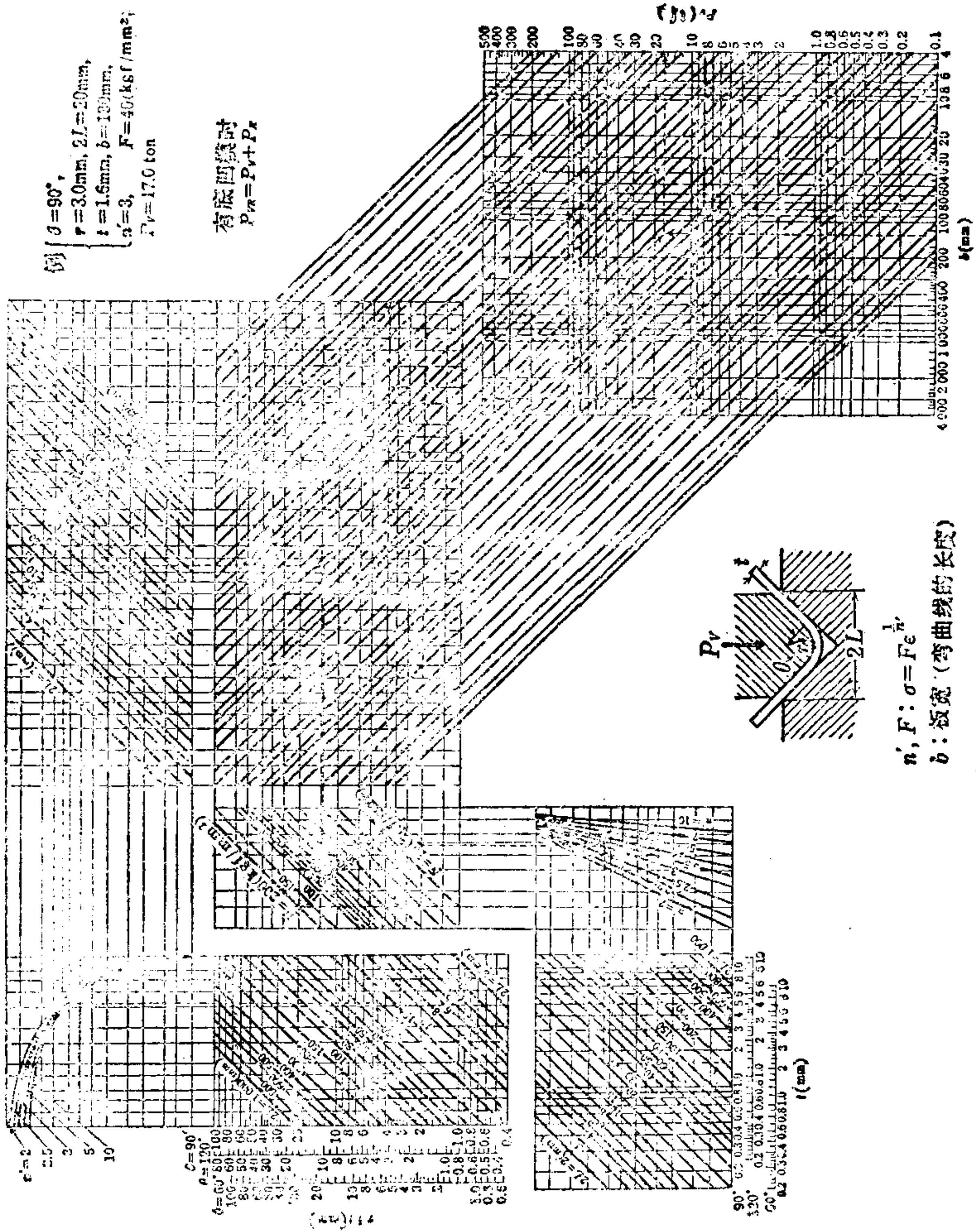


图3.51 弯曲压力 P_r 的计算图表[44、46]

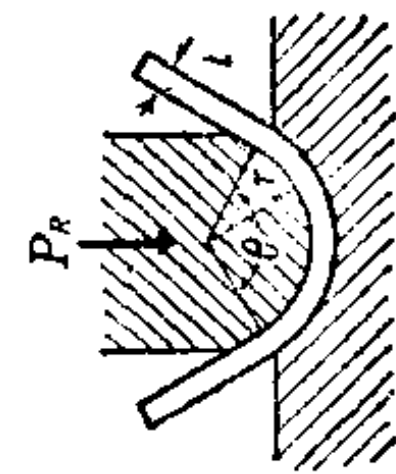
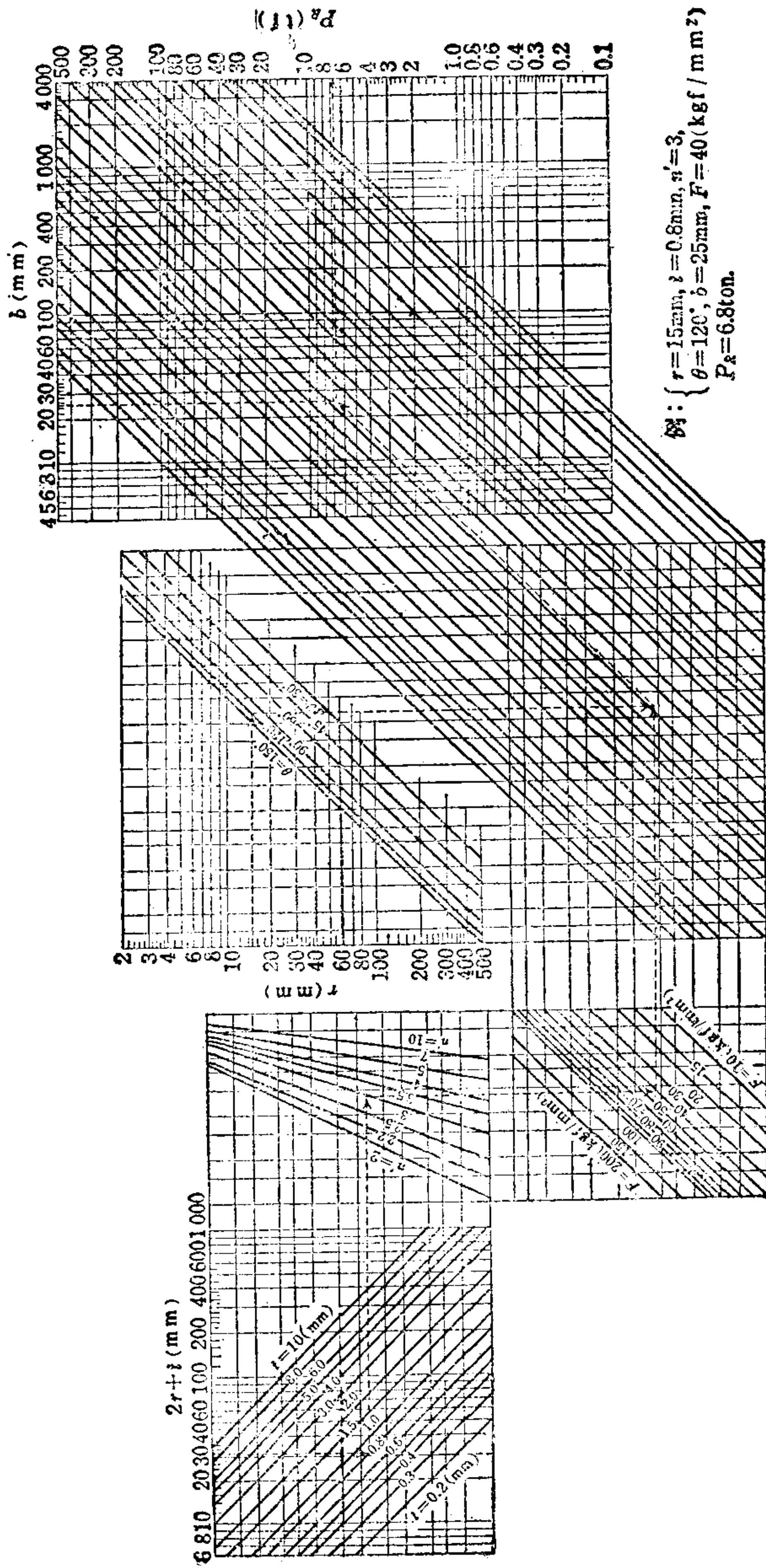


图3.52 弯曲压力 P_R 的计算图表[44、46]

此外，使用橡胶凹模的场合，材料从凸模端部作顺次的贴合，就几乎没有用凸模弯曲时的回弹了。所需载荷及此载荷的绝大部分是将凸模压进橡胶凹模所必须的载荷。

b. U形弯曲

在U形弯曲中(图3.24中的No4)板料的变形过程，是随着凸模的对面有无压力垫而异。在不带压力垫的场合，就象图3.53所示的变形过程那

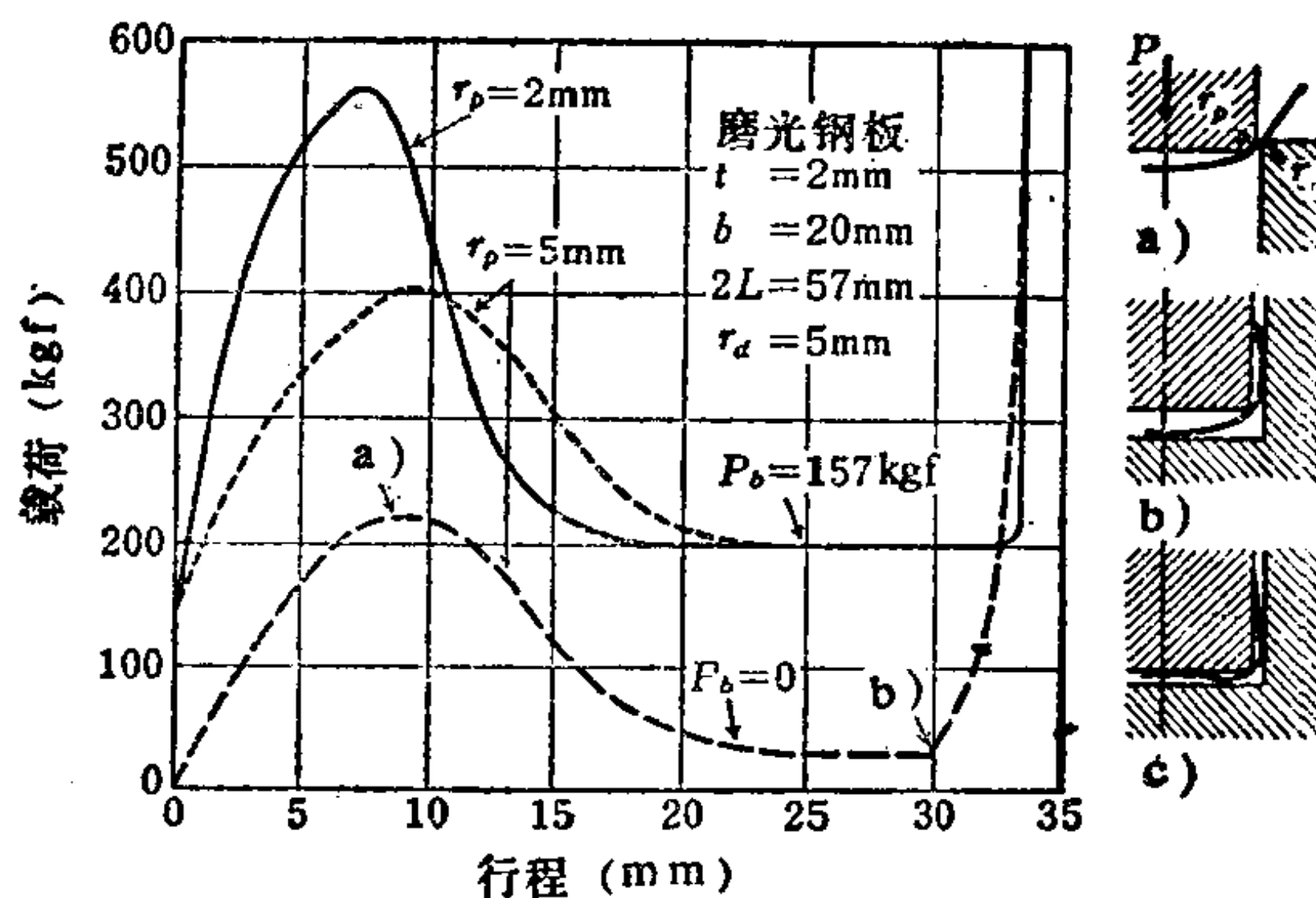


图3.53 U形弯曲的变形过程和载荷—行程曲线〔47〕

样，板料变为幅板的部分(指U形弯曲的底边)，向下面凸起弯曲而从凸模的下面离开。因此，板料被拉入凹模中，而应形成直臂的部分，在凹模肩部的支承点内侧，特别是在凸模的R部分受到弯曲(图a)。当凸模行程到最后阶段时，从凸模上离开的板料就与凹模的底部相接触(图b)。当凸模进一步下降，则该处的板料就受压而伸展开来。还有，在此时当板料厚度相对于凹模肩部开口宽度较薄时，就象(图c)那样在一次弯曲呈凹面之后就伸展开来。在带压力垫的场合，板料就不从凸模下面离开，以比较简单的过程完成变形。当然，即使是具有压力垫，但其压力不足时，板料与凸模端部之间也有可能一度出现间隙，并遵循与无压力垫时那样的变形过程。图3.53是在载荷-行程曲线图上〔47〕将变形过程对应地表示出来，但是，有无压力垫的差异，大体上不过是在行程的最后阶段才表现出来。

回弹系对应于板料各部分的变形过程出现〔48〕。图3.54的OA部分形成向下凸起的回复，此一回复呈现出使直臂的CD部分向内封闭的倾向，因为外形上弯曲角增大，所以形成负回弹。

AB 部分, 则形成大于凸模圆角半径 r_p 的正回弹; BC 部分, 则形成向外凸起的负回弹。因此, 根据上述各个部分回弹量的总合就确定了 CD 部分也就是板料端头部分回弹的方向和大小。上述这些, 都随着模具形状以及加工条件的不同而变化(参照 3.2.4.b)。

U 形弯曲所需要的力, 在行程的初始阶段出现最大值, 并用如下经验公式〔49〕概略计算:

$$P_1 = cb\sigma_B(0.4t)^{1.65} \cdot \sqrt[4]{\frac{2.5t}{r_d}} \times \sqrt[9]{\frac{t}{r_p}} \quad (\text{kg}) \quad (3.38)$$

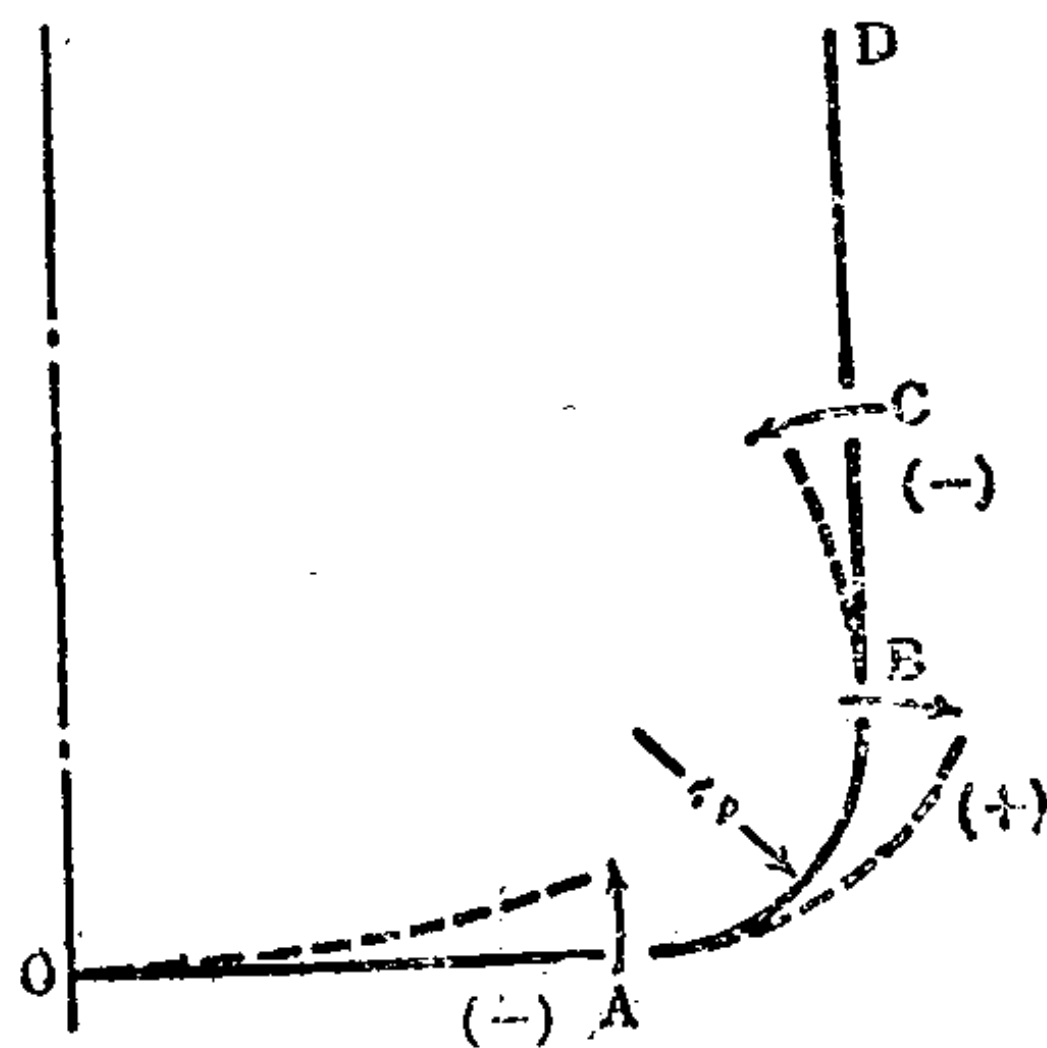


图 3.54 板料各部分的回弹

式中 b ——板料宽度 (mm);

σ_B ——板料的抗拉强度 (kg/mm^2);

t ——板料厚度 (mm);

r_d ——凹模肩部圆角半径 (mm);

r_p ——凸模转角部分圆角半径 (mm);

c ——修正系数, 取 0.25~0.5。

当有压力垫时, 应将垫的压力 P_b 加上无垫时的 P_1 。即:

$$P_{1b} = P_1 + P_b$$

当其在行程的下死点对凸模下面的那部分板料加以很大的压力时, 就可以使图 3.54 上的 OA 部分变直同时给板料端部以正回弹的影响。为了使 OA 部分平直而必须施加的最终压力 P_2 可以取作:

$$P_2 \approx 3P_1$$

再则, 由于垫的压力 P_b 越大, OA 部分在变形过程中就只是稍微地发生一些弯曲, 所以 P_2 就可以小些。如取垫的压力 P_b 为:

$$P_b \approx 0.3P_1$$

则 OA 部分在不离开凸模的状态下即可完成加工。

c. L形弯曲 象图 3.24 中的 No 3 和 No 4 所记述的那样, L形弯曲就相当于只是半侧 U形弯曲的变形。因此 L形弯曲的变形过程以及弯曲力等, 可以认为与 U形弯曲的类同。与 U形弯曲的不同点, 在于必须具备压力垫, 当垫的压力不足时, 板料就有发生错移的危险。为防止错移起见, 大多利用板料上开好的孔在凹模导正销上定位, 当然还是希望压力垫的压力足够大为好。

L形弯曲的弯曲力, 可用上述 U形弯曲力 P_1 的一半来估算, 将此估算值加上垫的压力 P_0 就是所需的载荷。此外, 在最后阶段相当于 P_2 的载荷是不存在的。

d. Z形弯曲 板料的变形过程随成形方法(模具结构)的不同而异。象图 3.27 所示那样, 板料的各个部分, 对应其变形过程产生回弹, 在制件上产生畸变。

3.2.3 加工极限

弯曲的加工极限用最小弯曲半径表示。一般地说, 是板料在弯曲时不产生裂纹的前提下所能弯曲的最小内侧半径作为最小弯曲半径。但是, 根据不同情况, 也有的采用不同的标准。例如: 有时是按照弯曲后无裂纹以及制件弯曲部分外表等的粗糙程度来决定; 反之, 即使存在微小裂纹, 但是当这些微小裂纹对于使用性能没有妨碍时, 则由其他要求来确定。

a. 对最小弯曲半径的影响因素 以是否产生裂纹为标准的最小弯曲半径 R_{min} , 受下列诸因素的影响。

(i) 材质的影响 由于材质的不同, 不言而喻, 最小弯曲半径 R_{min} 也将显著不同。一般地说, 由于裂纹就是破坏, 所以塑性越高的材料, 最小弯曲半径 R_{min} 就可能越小。因此, 就是同类材料, 但随着轧制及热处理条件的不同, 最小弯曲半径 R_{min} 也有所不同。图 3.55〔50〕所示是几种材料在 V形弯曲中最小弯曲半径 R_{min} 的曲线, 图 3.56〔50〕所示是其中的黄铜板经退火处理后最小弯曲半径 R_{min} 的变化情况。

(ii) 弯曲方向的影响 由于板料是用轧制生产的, 所以具有各向异性。特别是在轧制方向, 由于晶粒和夹杂物等伸长进而成

为纤维状态，所以当在与纤维相垂直的方向上作用由于弯曲而产生的拉应力时，就容易产生裂纹。因此，当有二个以上的弯曲方向时，至少不要在与纤维平行的方向上安排弯曲线以选取最小弯曲半径。表 3.2^[51]是取弯曲方向相对于图 3.5 7 上的轧制方向之间的夹角为 α 时，研究由于 α 的变化而出现开裂的情况。

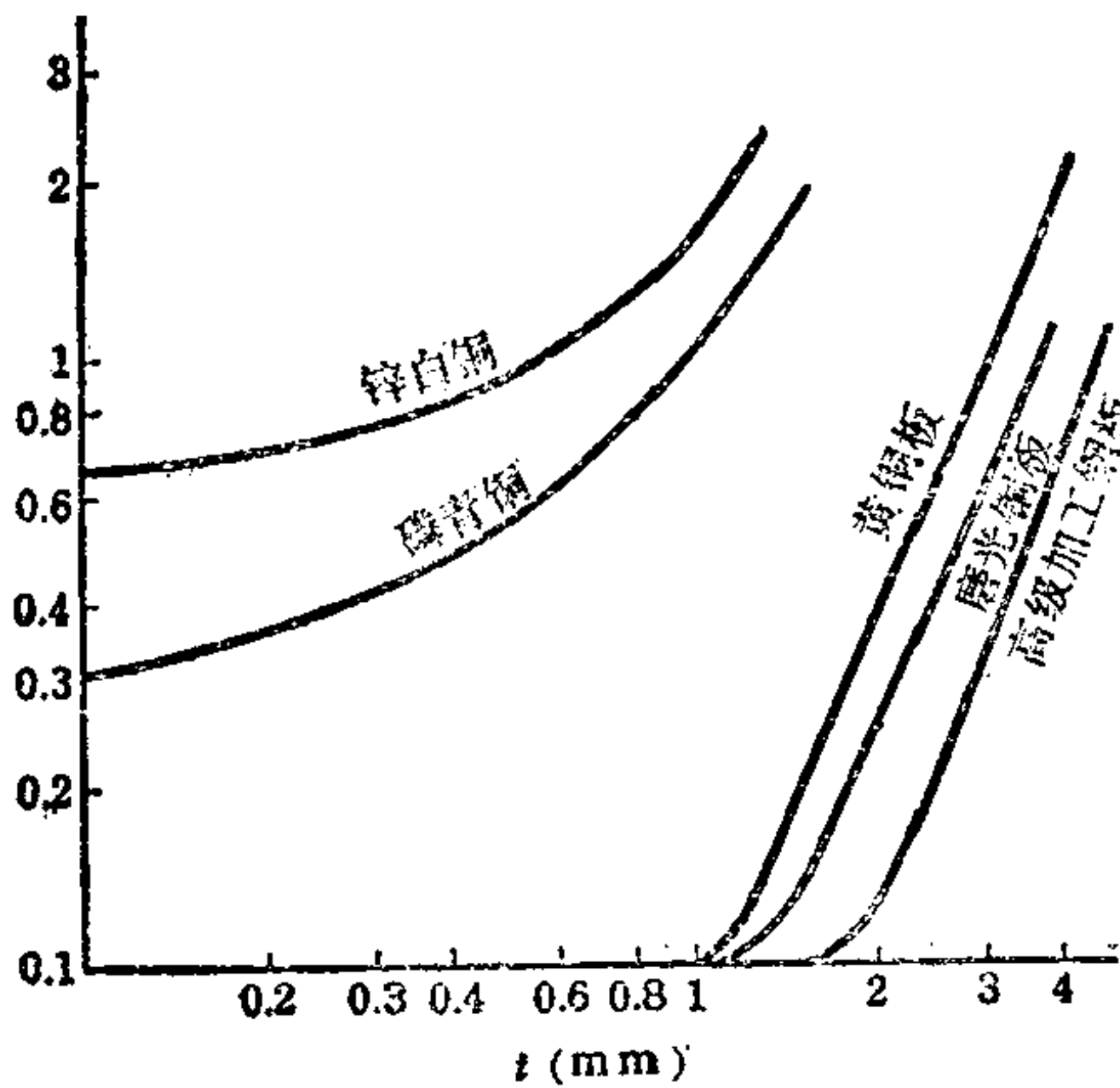


图3.55 各种材料的最小弯曲半径^[50]

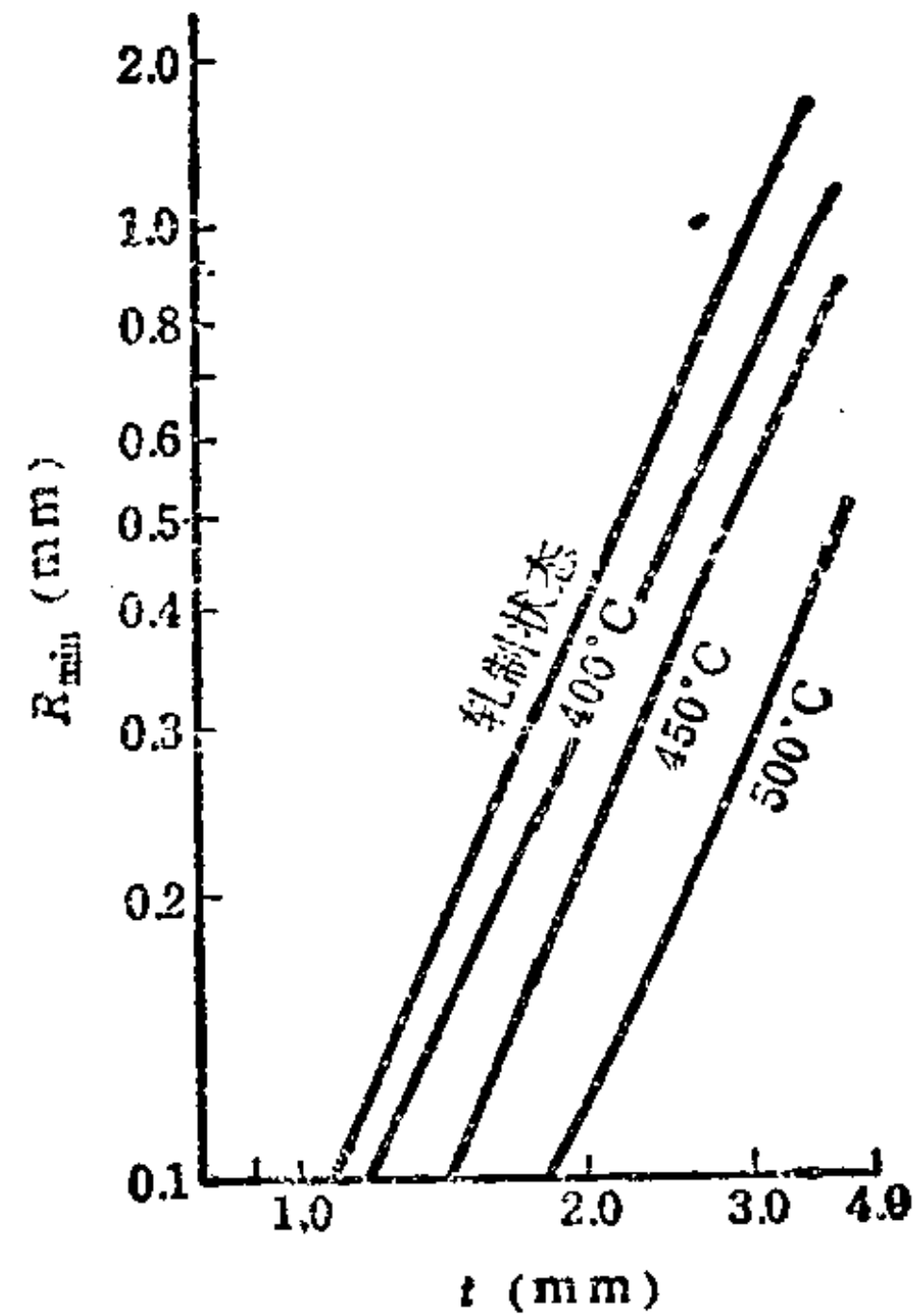


图3.56 由于退火处理最小弯曲半径的变化^[50]

表3.2 由于板料排样方向的不同出现裂纹的状况^[51]
(1.2mm厚的硬质黄铜板)

R (mm)	α	0°	22.5°	45°	67.5°	90°
1.7		A	A	C	D	E
1.45		A	B	D	D	E
1.20		B	B	D	E	E
0.85		B	C	E	E	E

注：A—几乎无裂纹 B—小裂纹 C—大裂纹 D—近于断裂 E—断裂

(iii) 弯曲角的影响 在弯曲角 θ 不大时，最小弯曲半径 R_{min} 就可能小。图 3.58^[52]所示是各种材料的最小弯曲半径 R_{min}

与板厚 t 的比值与弯曲角的关系。象这样的关系，当弯曲角不大时，随着 R/t 的变化，外层纤维面的变形是不会达到许用值的。

(iv) 弯曲方法的影响 象弯板机那样，将板料的一端固定在模具上作贴合弯曲，要比 V 形弯曲时的最小弯曲半径 R_{min} 多少有可能小一些〔53〕。这是因为模具在弯曲板料的同时，由于移动时的摩擦作用在板料上附加了额外的拉应力的缘故，但此拉应力并无显著影响。但是，在特别附加拉力或附加压力进行加工の場合，最小弯曲半径 R_{min} 则发生相当大的变化。

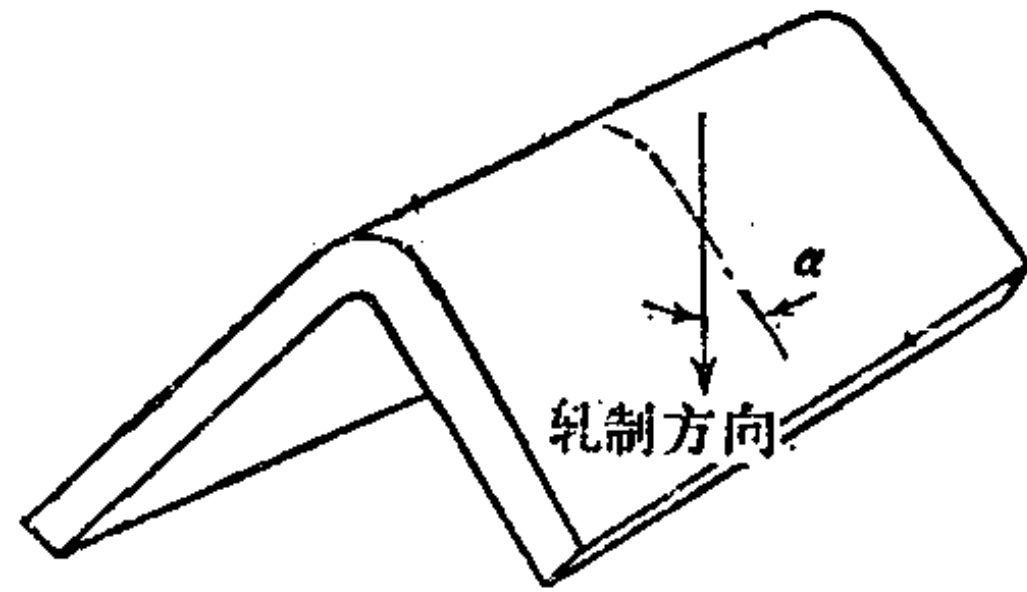


图3.57 板料的轧制方向和弯曲方向的夹角

(v) 板宽的影响 板料越宽，最小弯曲半径 R_{min} 就越大，但是当 b/t 在 8~10 以上时，其影响就很小了(图3.59)〔54〕。如果弯曲宽度很大的板料，则宽度方向的变形就受到相当大的约束而成为平面变形状态 (参

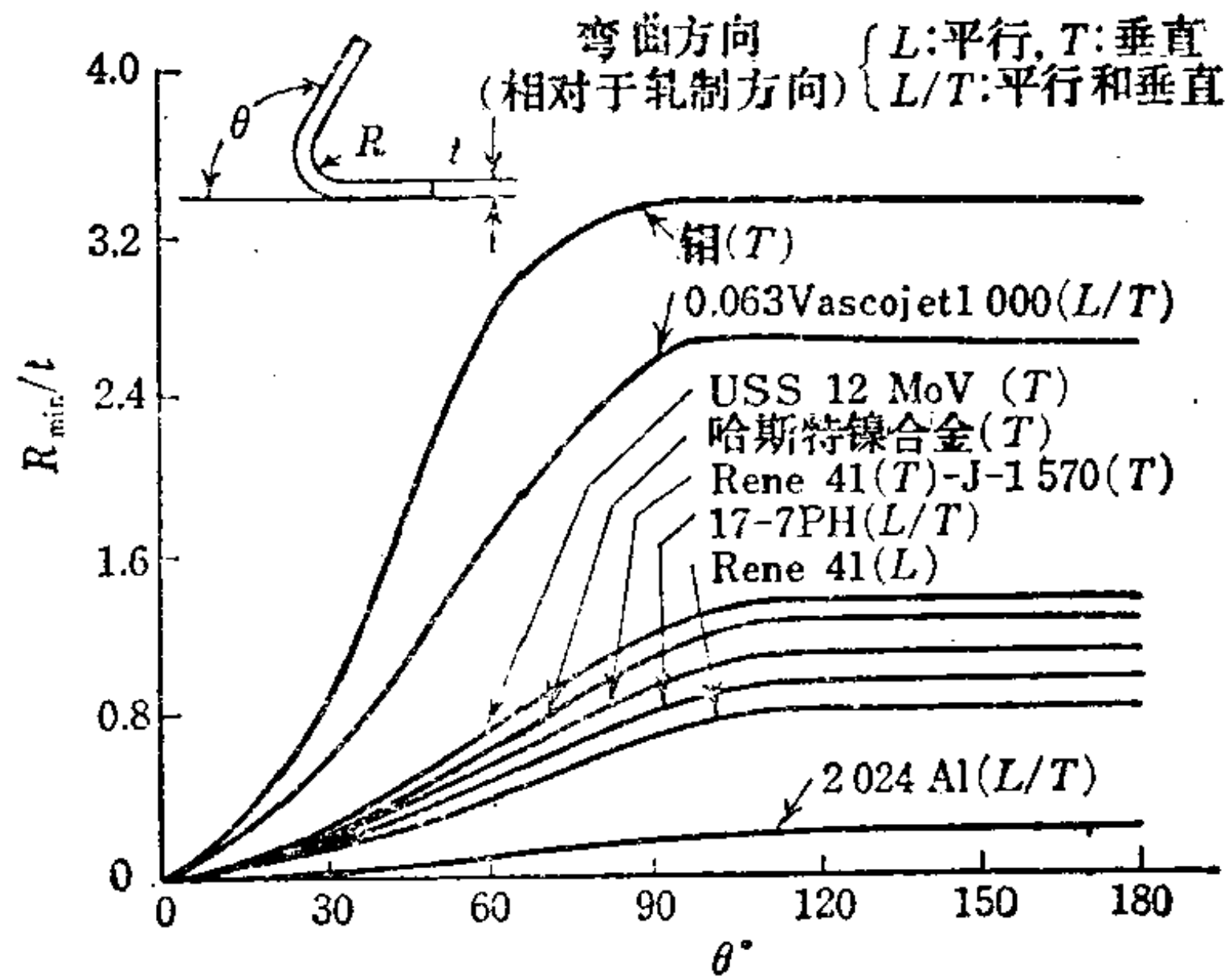


图3.58 弯曲角和最小弯曲半径的关系〔53〕

照3.1.3. a)，由于外层金属面上变成两向拉应力，所以就呈现出平面应力状态这样的倾向。并且，开始出现裂纹的地方，就象图 3.60 那样转移至离开边缘的部位去了。

(vi) 板厚的影响 板厚 t 越大，最小弯曲半径 R_{min} 越大。也有板厚 t 越大， R_{min}/t 的值也越大的倾向。这一趋势如图 3.61〔55〕所示那样显著，当然，也有相反的情况，但一般情况下

以前者居多。再有，图 3.61 的曲线 A 是以普通方法弯曲后的情况；曲线 B 是以半径递减的凸模作顺次弯曲的情况。这些曲线是在板料与凸模端部相接触的状态下求得的开裂极限。

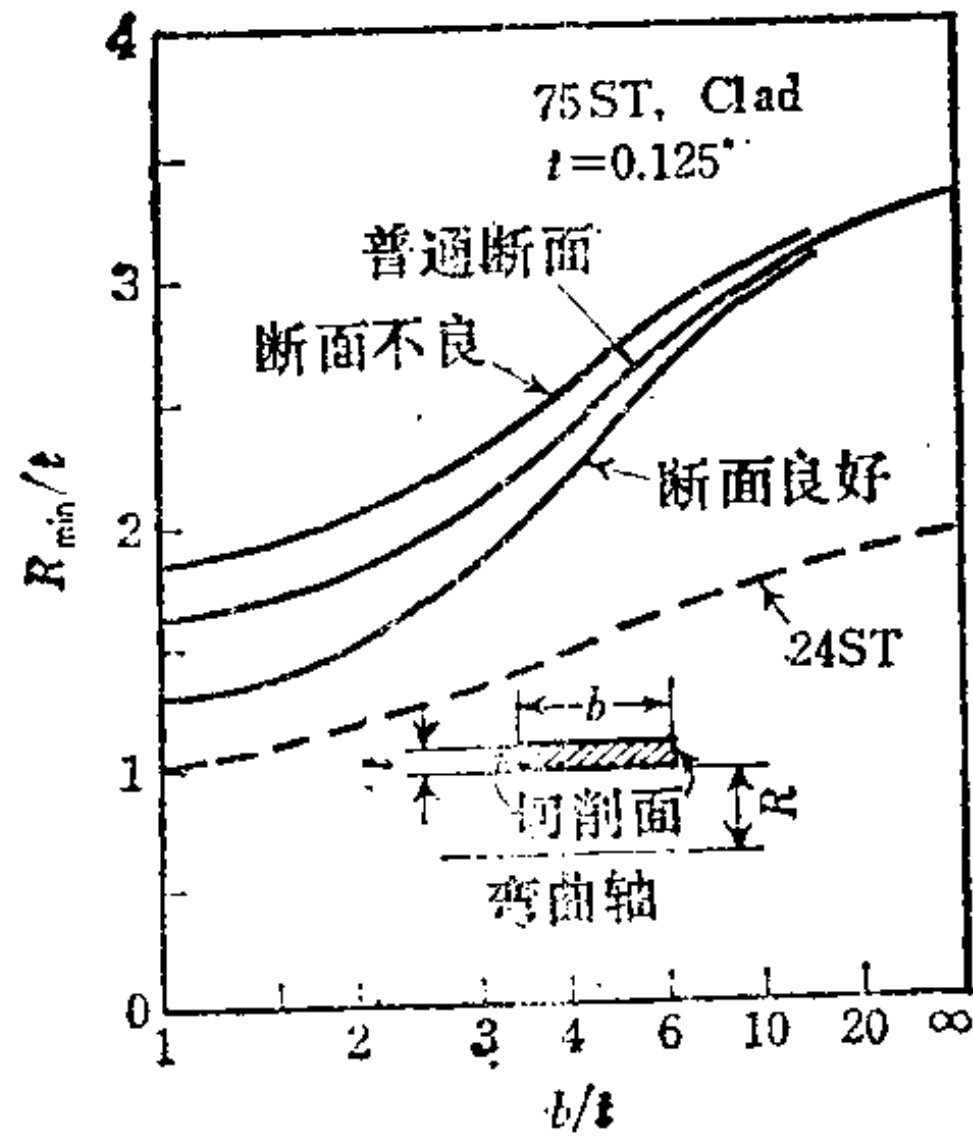


图3.59 板料宽度和断面的加工状态对于最小弯曲半径的影响〔54〕

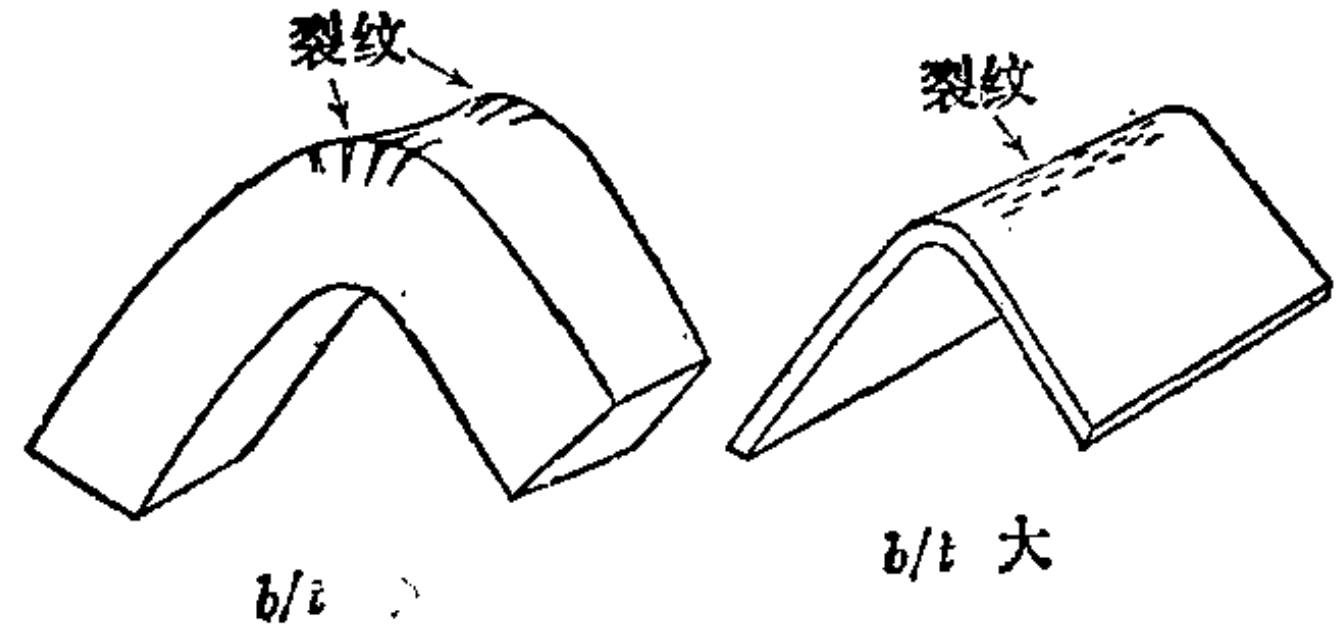


图3.60 发生裂纹的部位

(vii) 端面和表面状态的影响 对板料宽向边缘进行过铣削加工时，加工面的状态随着铣削状况而变化，而 R_{min} 随加工面的状态变化（图 3.59）。由于有无会形成裂纹源的伤痕是一个关键问题，因此，在边缘不进行加工而以剪切断面的坯件进行弯曲的场合就必须予以注意。也就是说，对于剪切断面，如果将有毛刺的面作为内侧，将产生塌角的面放在外侧进行弯曲开裂的危险就小；反之，就容易产生裂纹（图 3.62）。因此，对

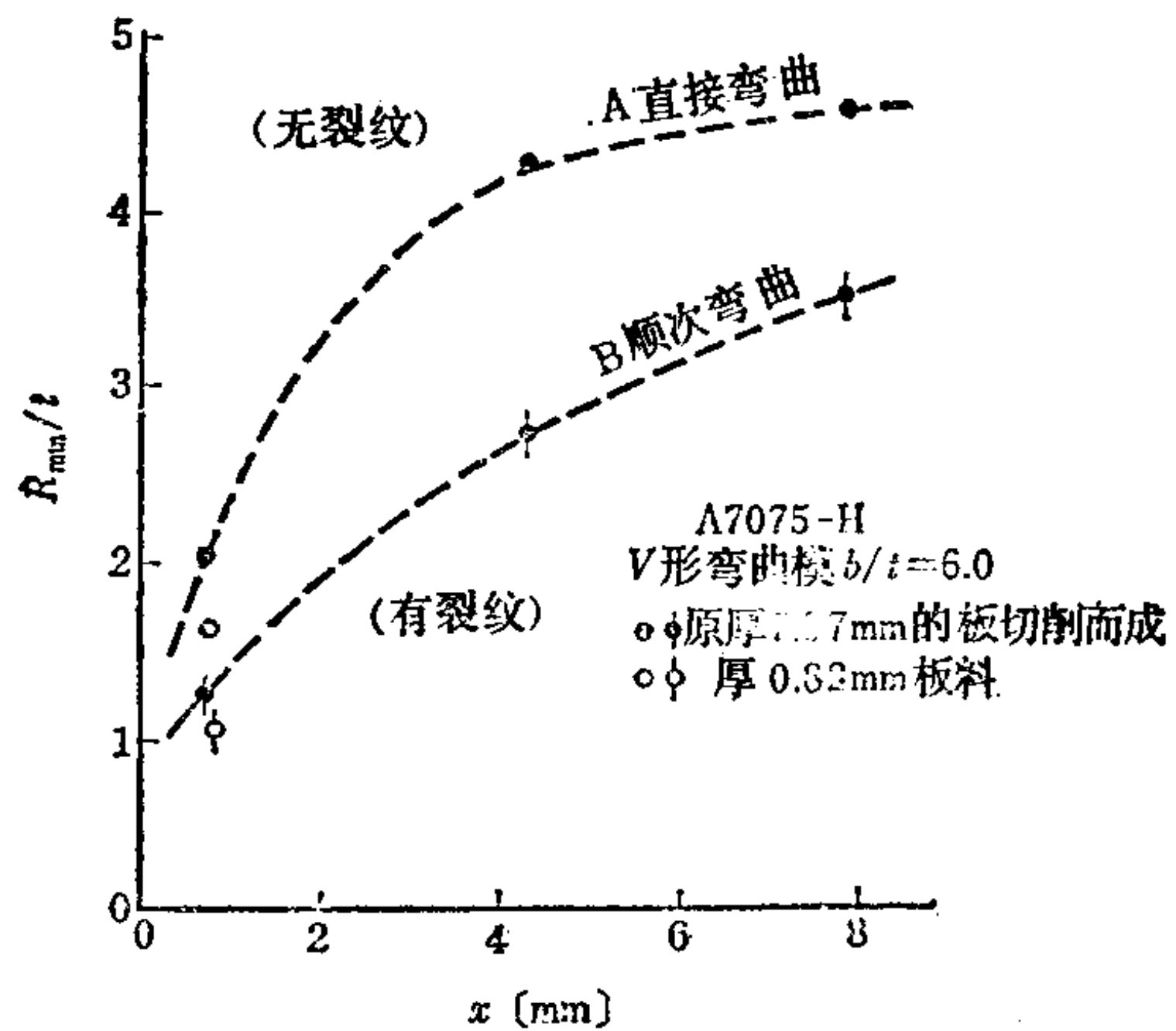


图3.61 板厚对于最小弯曲半径的影响〔55〕

曲开裂的危险就小；反之，就容易产生裂纹（图 3.62）。因此，对

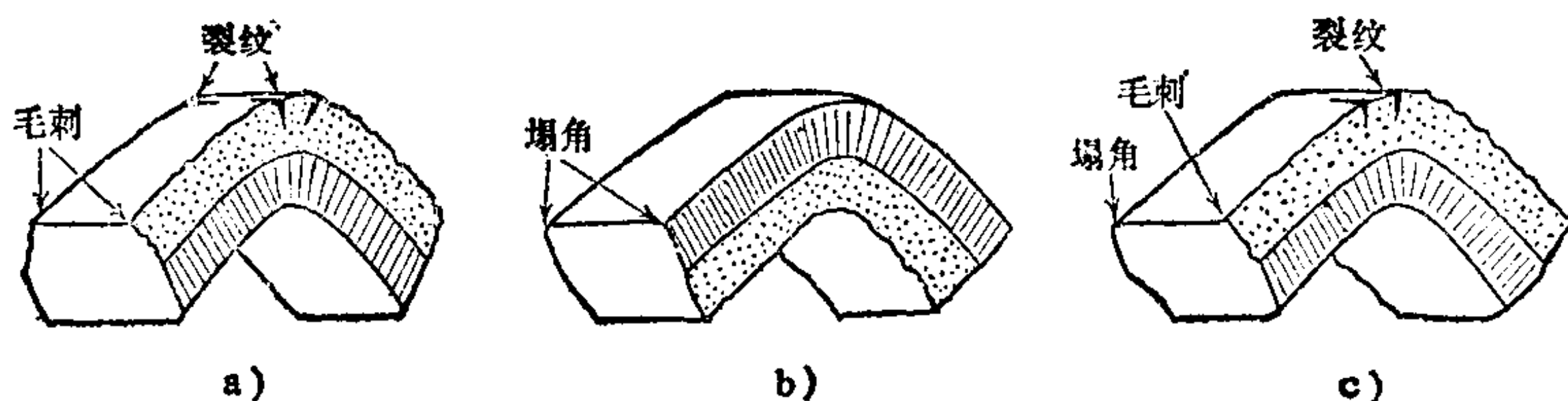


图3.62 剪切坯件的弯曲

于冲裁坯料，以板料的哪一个面作为外侧进行弯曲，其 R_{\min} 是不相同的。再则，当一边经冲裁一边又交替作单面切断的板料作为坯料时，由于一侧切口的毛刺必然变为弯曲的外侧，所以就难以用小的半径进行弯曲。在板料宽度很大的情况下，由于如图 3.60 那样，从离开边缘的地方发生裂纹，所以板料表面的伤痕反而成为问题了。如果在弯曲方向存在线状伤痕（与图 3.60 的裂纹方向垂直的方向），则大体没有影响。

当板料的表面有缺口，并使缺口成为内侧顺缺口弯曲，那么，就能作锐角弯曲（图 3.63）。如果将切口作为外侧进行弯曲，显而易见，就是以很大的半径作弯曲也要产生裂纹。此外，如果采取从弯曲前到弯曲过程中都连续不断地从凸模的反方向对板料加上压力的反向加压法〔56〕，即令是比较脆的材料也可能用小的内侧半径弯曲。

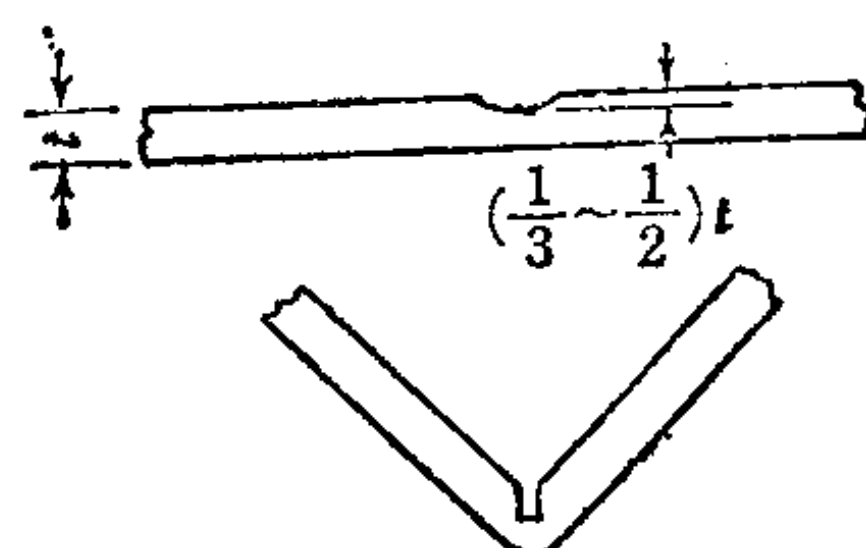


图3.63 内侧带切口的弯曲

b. 最小弯曲半径 R_{\min} R_{\min} 虽随上述诸因素而变化，但随着材料的不同而有什么变化呢？下面所述就是与材料的其它性质有关的一些因素。

图 3.64〔57〕是把按拉伸试验的断裂部分的面积算出的断面收缩率，与各种材料的最小弯曲半径和板厚的比值 R_{\min}/t 的关系予以整理而得到的曲线。虽然作为总的趋势来说是相符合的，但是就每一个值而言，未必都符合。再则，对于薄板由于断面收缩率的测定困难，所以可以用短的标点距离（例如用 0.5mm）的延

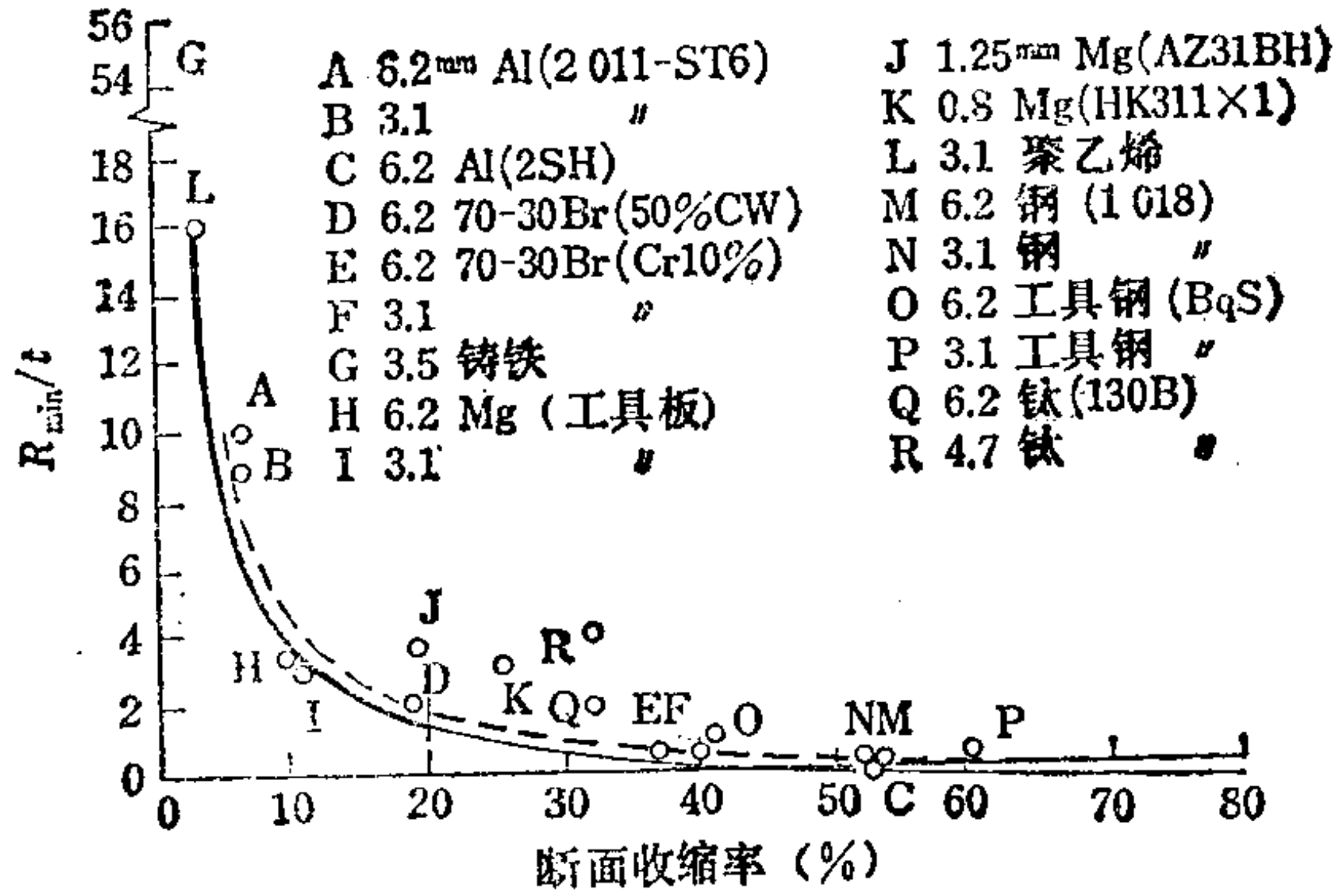


图3.64 断面收缩率和最小弯曲半径的关系

伸率来代表。图3.65〔58〕是在实验基础上得出的诺模图，图中把 $\epsilon_A/\sigma_{0.2}$ 定义为成形性能指数，并据此来求 R_{min}/t 及板料以此半

径弯曲时表面延伸应变 ϵ 。在这里， ϵ_A 是由拉伸试验的断面收缩率用体积不变条件算得的断裂拉伸应变（对数应变）； $\sigma_{0.2}$ 是材料的屈服强度〔psi〕。在此诺模图上，除了表示延性值之外也表示了变形抗力或强度对最小弯曲半径 R_{min} 的影响。对于轻金属板的经验公式〔59〕如下：

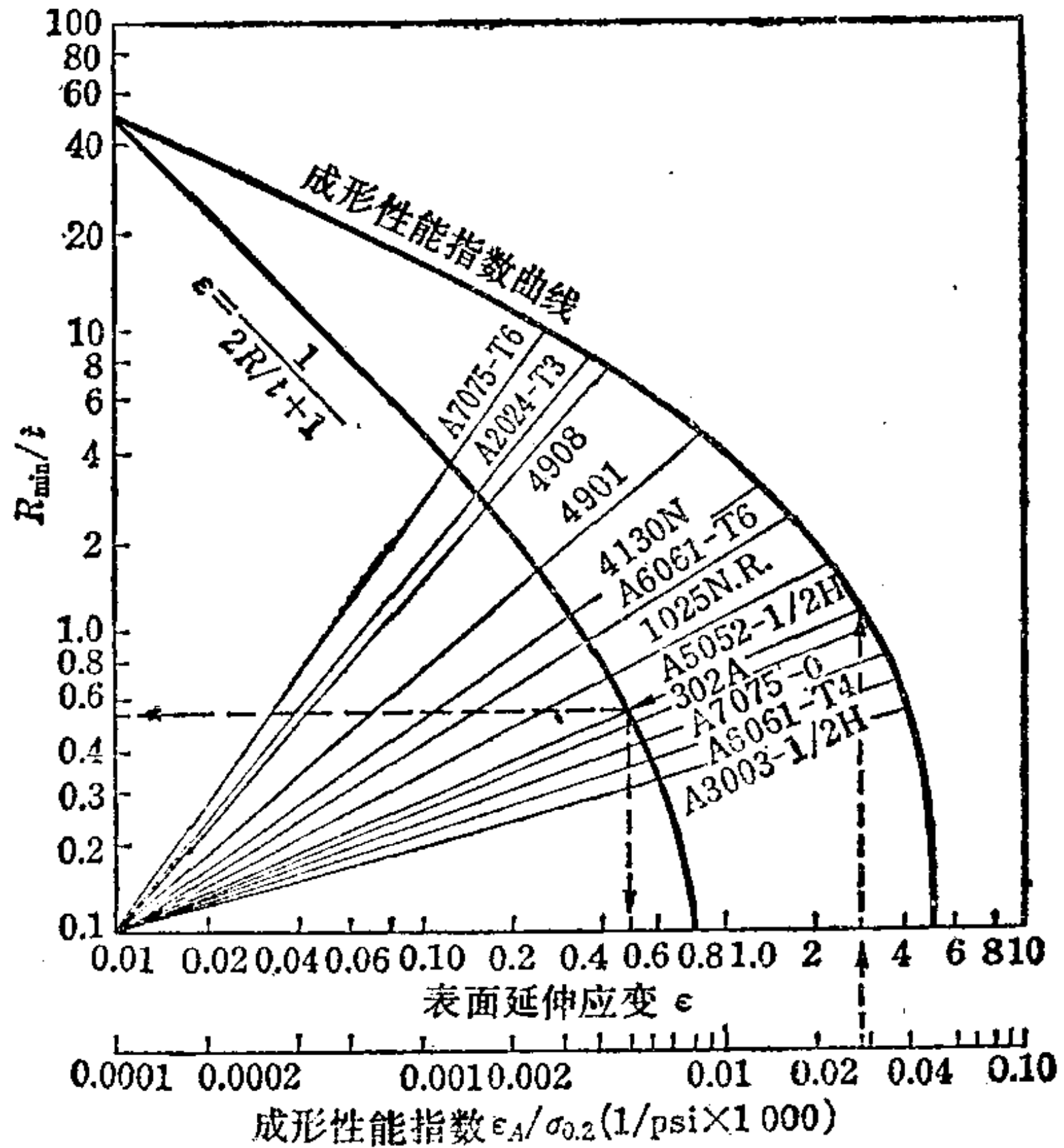


图3.65 由成形性能指数确定的最小弯曲半径〔58〕

$$\frac{R_{min}}{t} = 0.78 \frac{\sigma_b}{\delta}$$

式中 σ_B ——材料的抗拉强度(kgf/mm²);
 δ ——延伸率(%).

图3.66〔60〕是除了按以 $\sigma = F\varepsilon^n$ 式近似地作为拉伸的应力-应变关系时的 n 值之外, 还按照由剪切抗力大小所支配的裂纹发生时的剪切变形量 Γ , 在理论上算得的 R_{\min}/t 的变化关系和实验结果相比较的情况。在总的趋势上, 厚板、薄板 Γ 值的大小是一致的, 但是, 剪切抗力越小的材料, 板料厚度对于 R_{\min} 的影响就越大。关于板料厚度的影响, 可通过下列经验公式求得:

$$R_{\min}/t = at^{2/3}$$

对于较厚的钢板, 从安全着眼取 $a = 1.5 \sim 2$ 〔61〕。

表 3.3 和图 3.67 所示为一般作业中使用的 R_{\min} 值。至于表 3.3(b) 中的材料, 由于弯曲方向不同, R_{\min} 值也显著不同, 所

表3.3(a) 最小弯曲半径

材 料	状 态	R_{\min}/t
极软钢	轧制	<0.5
半硬钢	—	1~1.5
铜	—	1~2
铍钢	软	<0.5
铍钢	硬	2~5
铝	—	<0.5
铝合金	软	<1
铝合金	硬	2~3
硬铝(杜拉铝)	退火	<1
硬铝(杜拉铝)	硬	3~4
镁合金	退火(常温)	4~5
镁合金	硬(常温)	8~9
镁合金	硬(400°F)	6~7
钛	—	3~5
镍铬铁耐热合金	—	≈ 0
不锈钢(奥氏体型)	软	<0.5
不锈钢(铁素体型)	软	0.5~1

表 3.3 (b)

材 料	状 态	R_{\min}/t	
		和轧制方向垂直	和轧制方向平行
黄铜	软	0	0~0.5
黄铜	硬	1~2	10~12
磷青铜	硬	1~2	10~13
锌白铜	硬	1.5~2	5~6
蒙乃尔合金	硬	1.5	6~7

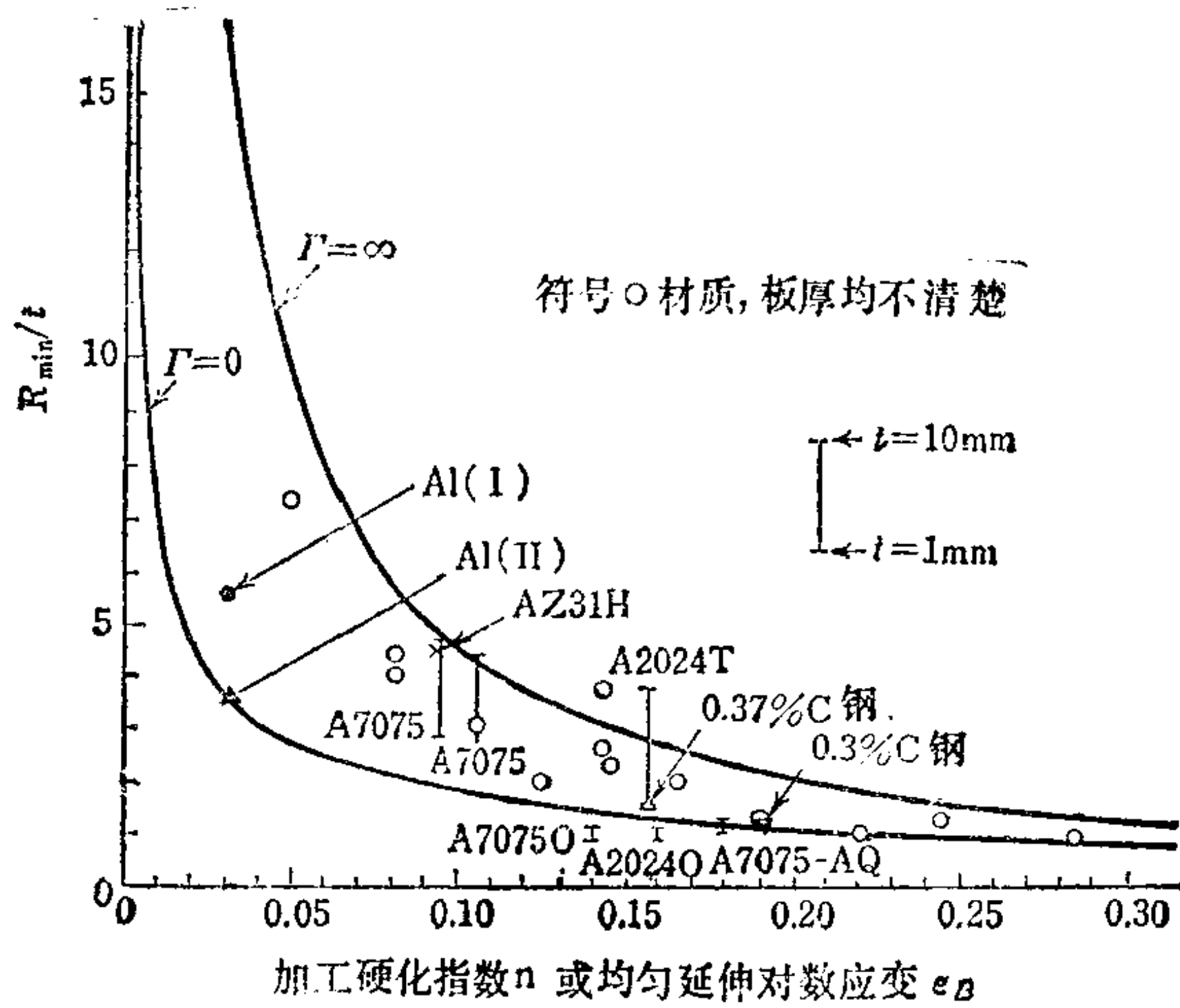
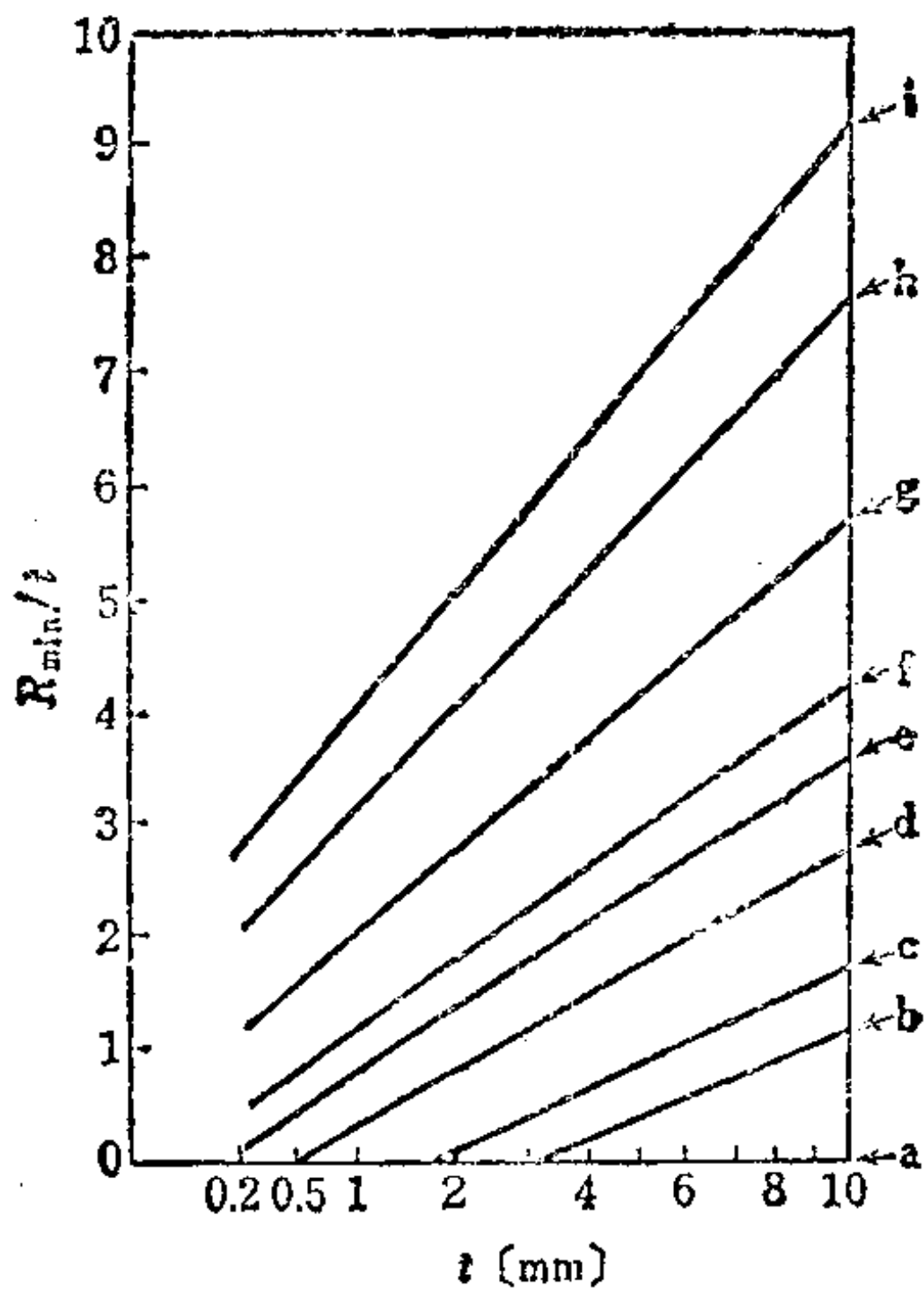


图3.66 最小弯曲半径的理论值[60]



合金及牌号	类别	合金及牌号	类别
A1100-O	a	A5052-H34	d
A1100-H12	b	A5052-H36	f
A1100-H14	b	A5052-H38	g
A1100-H16	d	A6061-O	b
A1100-H18	f	A6061-T4	e
A3003-O	a	A6061-T6	g
A3003-H12	b	A2024-O	b
A3003-H14	c	A2024-T3	h
A3003-H16	e	A2024-T36	i
A3003-H18	g		
A5052-O	b	A7075-O	d
A5052-H32	c	A7075-T6	i

图3.67 铝合金的最小弯曲半径

以要予以注意。图 3.67 是表示经整理后的板料厚度对于各种 铝合金的 R_{min} 的影响情况。

3.2.4 加工精度

a. 弯曲制件的尺寸公差 用压力机弯曲所生产的制件精

度，根据加工方法及其它条件的不同而有很大差别。因此，在制件精度有要求时，必须明确指出其意图。至于在精度上无特殊要求时，其公差值在 JIS 中有规定。表 3.4 所列为其公差值。

表3.4 弯曲制件的尺寸公差 (JIS B 0408) 弯曲角的角度公差 (度)

弯曲的种类	精度等级	
	精密级 ±	普通级 ±
直角弯曲	1	2
其它弯曲	1.5	3

注：不适用于弯曲半径大于板厚的场合。

弯曲的尺寸公差 (mm)

精度等级	尺寸范围			
	<30	30~100	100~300	300~1000
精密级 ±	0.3	0.4	0.6	0.9
普通级 ±	0.5	0.7	1.0	1.5

注：1. 适用于板料厚度在 2.3mm 以下的场合。

2. 对主要尺寸 l 适用，对于其它尺寸取此表值的 1.5 倍。



b. 回弹 用压力机弯曲的回弹，由于其变形过程复杂而不是简单的回弹，并随着加工方法，加工条件而发生变化。

(i) V形自由弯曲的回弹 自由弯曲时，由于弯曲终结时（卸载前）板料的形状是由凸模的行程下死点和凹模的相对位置来确定的，所以制件（卸载后）的形状、角度，随行程终结时的高度而发生显著变化。因此最终就是用试弯的方法寻求满足制件角度要求的行程高度，不过，由于估计到此时的回弹量就必须以补偿弯曲 (over bend) 的方法（过弯曲）来满足精度要求。表 3.5 给出了这种情况下的大致标准。

矫正弯曲时，制件的形状、角度随着凸模最后所加的载荷而

表3.5 V形弯曲的回弹角 (90°自由弯曲)

钢种	R/t 板厚(mm)	Δθ°		
		<1	1~5	>5
软钢	<0.8	4	5	6
	0.8~2.0	2	3	4
	>2.0	0	1	2
半硬钢 (σ _b = 40kgf/mm ²)	<0.8	5	6	8
	0.8~2.0	2	3	5
	>2.0	0	1	3
硬钢 (σ _b = 60kgf/mm ²)	<0.8	7	9	12
	0.8~2.0	4	5	7
	>2.0	2	3	5

变化。当直臂部分 (图 3.48 的 ABC 部分) 在凸模和凹模之间于板料的厚度方向加压, 则该部分的回弹减小, 从而使其平直化, 并大体上保持一定的形状, 此时制件的回弹 (在板料的端部) 也就大体限定在某一范围之内。图 3.68~3.70 [62、63] 所示为直臂部分的翘曲状态和制件的回弹随凸模施加的外力而变化的关系。图 3.71 [64] 和表 3.6 [65] 大体表示局限于某一范围的回弹角与 R/t 之间的关系, 在非 90° 弯曲时也具有相同的关系 (图 3.72 [65])。

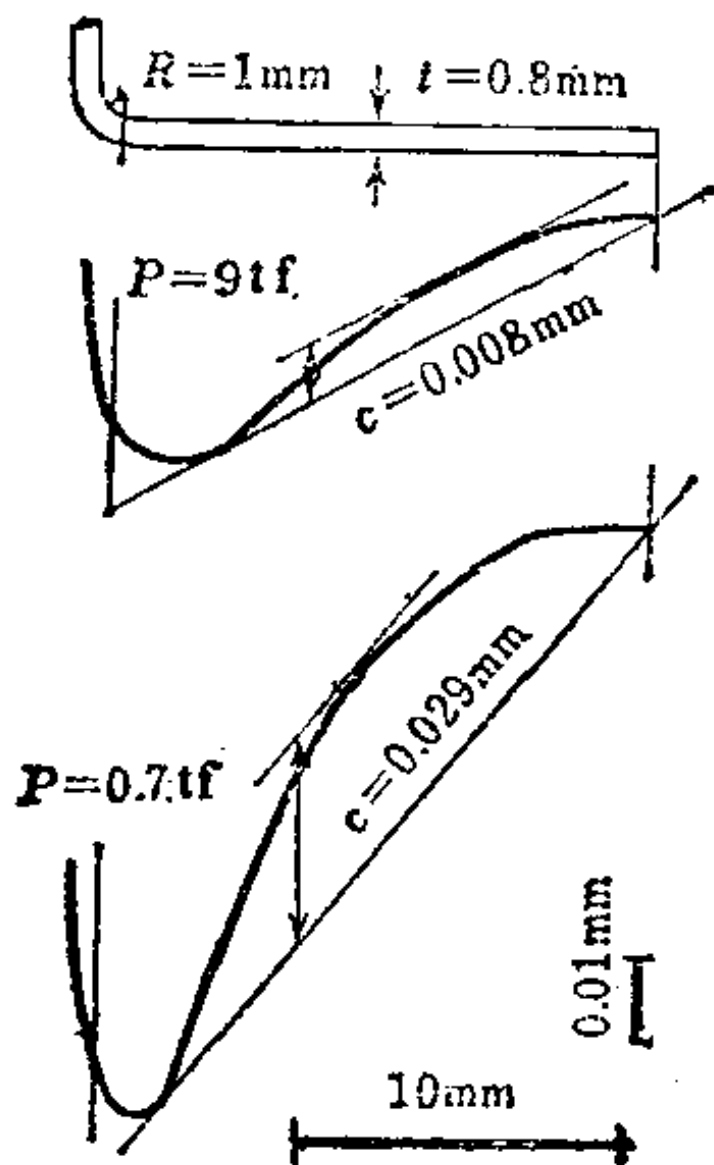


图3.68 直臂部分的翘曲形状 [62]

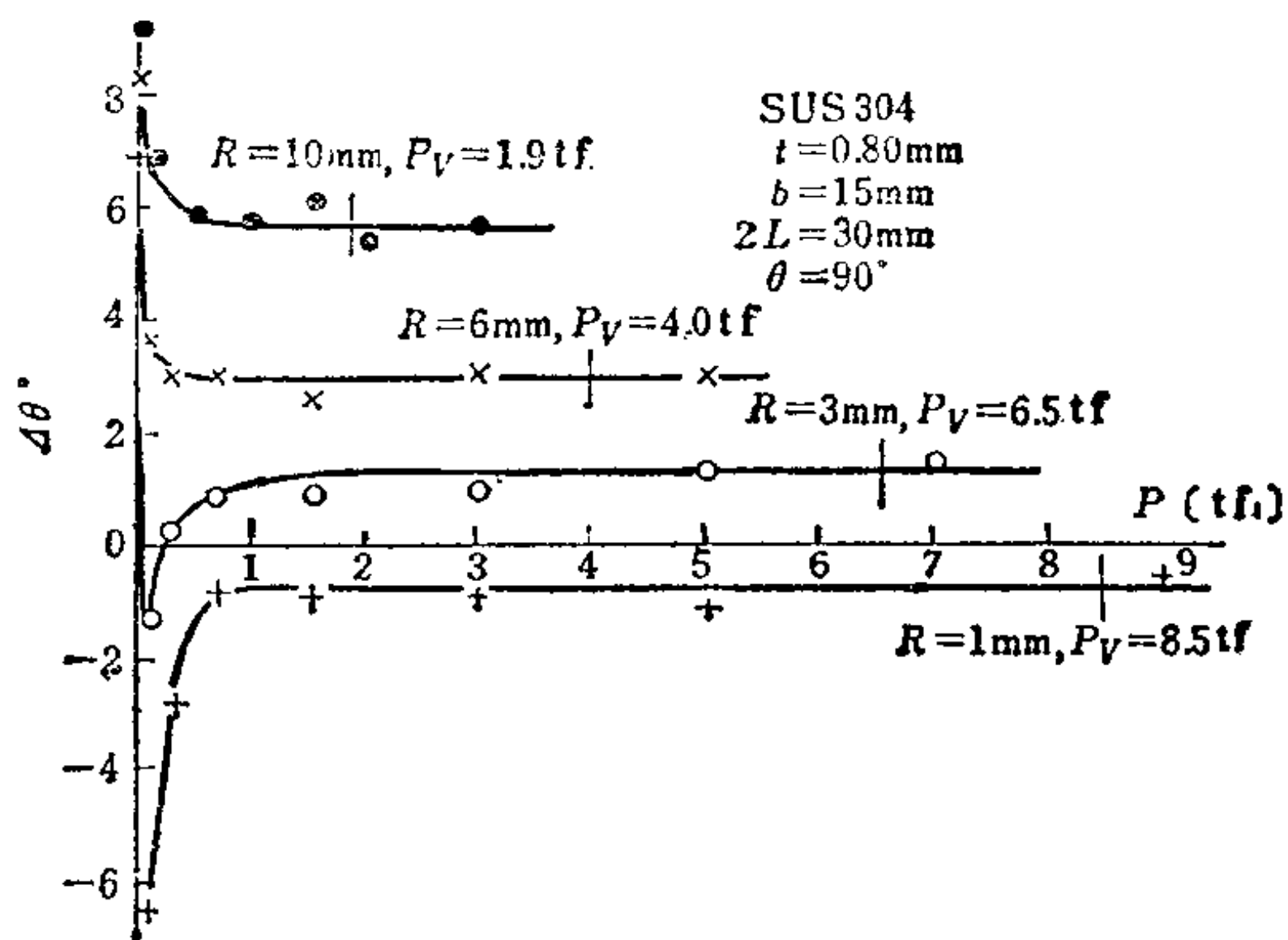


图3.69 由于V形弯曲力变化回弹角的变化 [62]

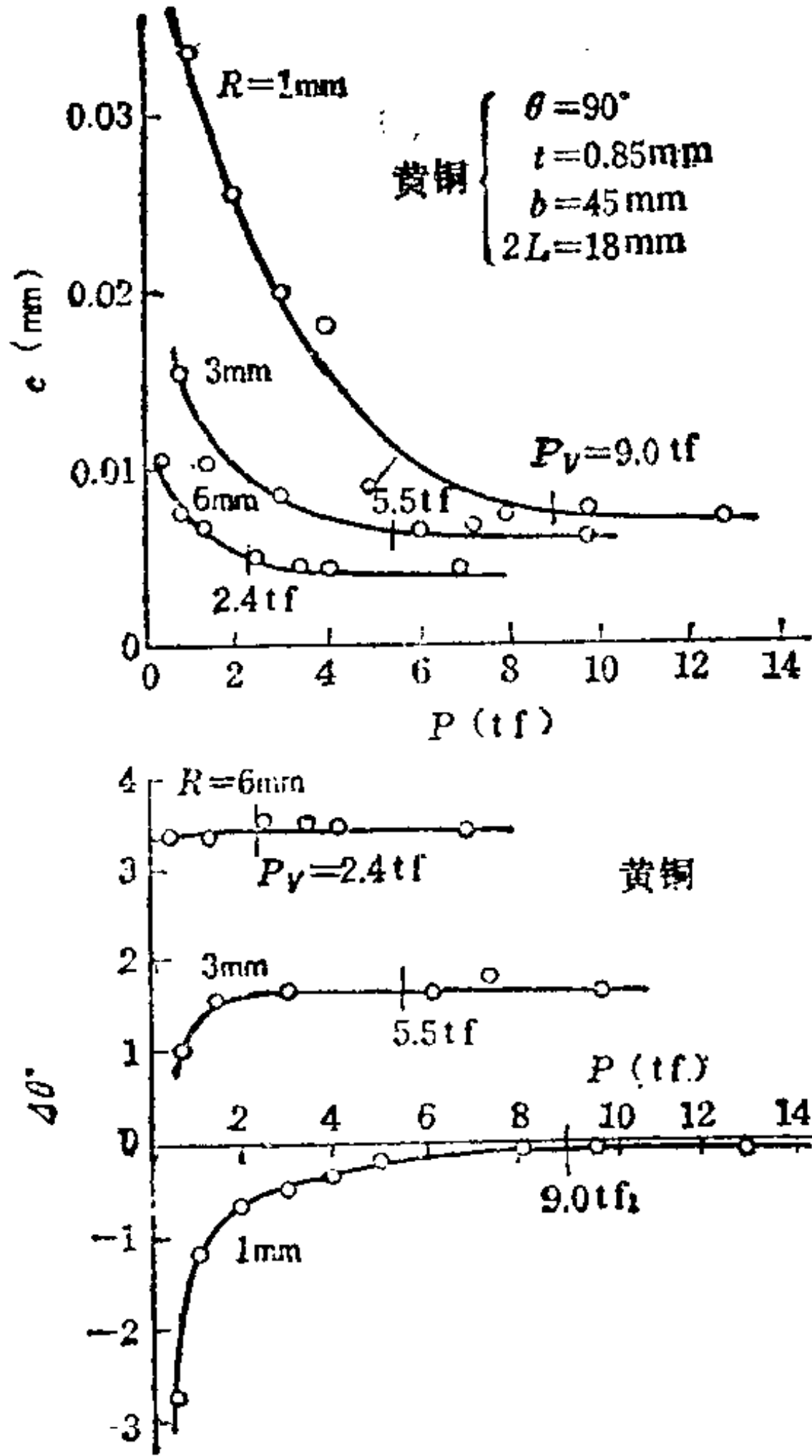


图3.70 由于弯曲力变化，直臂部分的翘曲高度 c 和回弹角 $\Delta\theta$ 的变化〔63〕

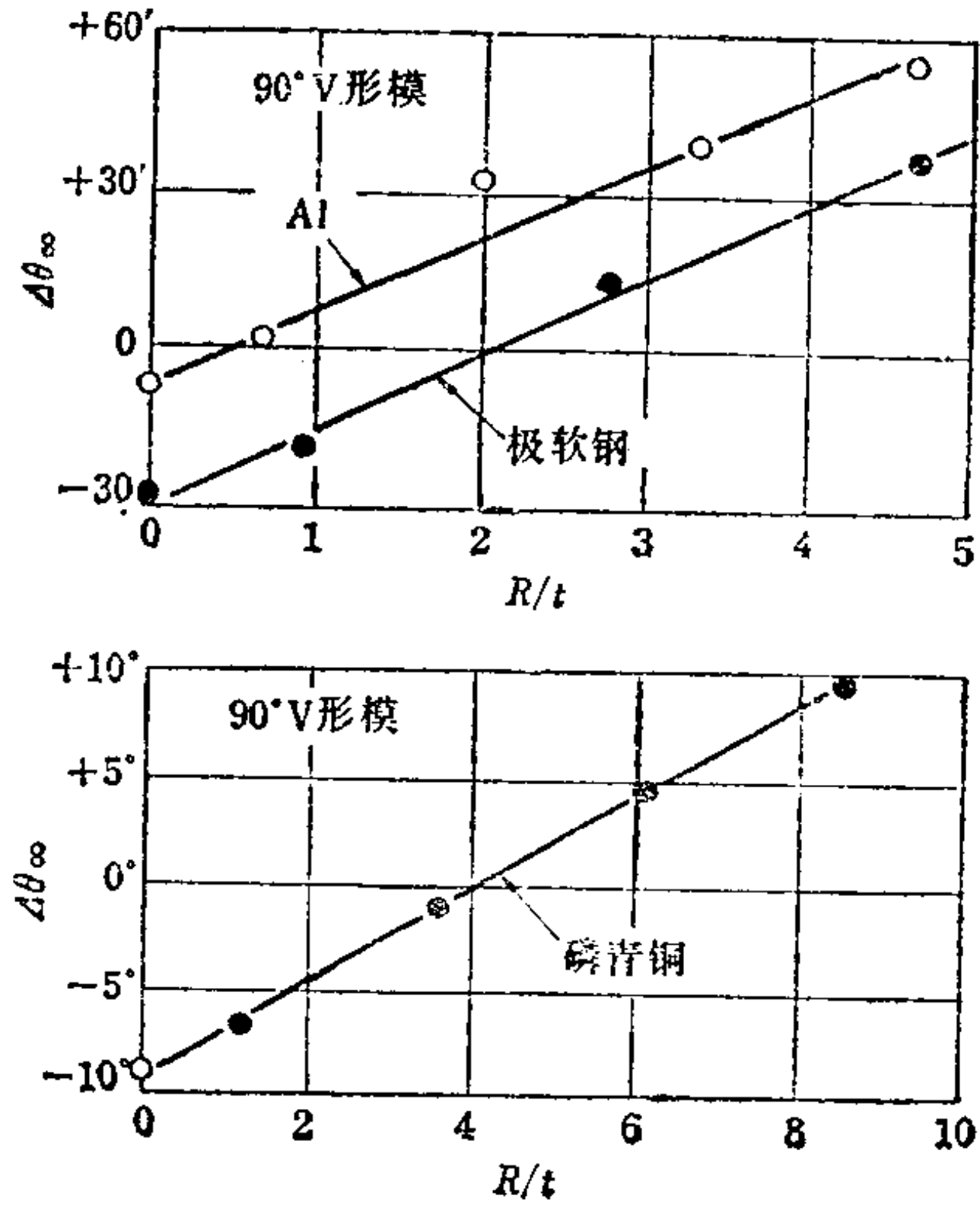


图3.71 矫正弯曲的回弹角〔64〕

表3.6 V形弯曲的回弹角 (90°矫正弯曲)

钢号 (抗拉强度、延伸率)	$\Delta\theta^\circ$
MC _T 1; C _T 08, 10 (35 kgf/mm ² , 26%)	$0.43 \frac{R}{t} - 0.61$
C _T 2, 3, 15, 20 (40 kgf/mm ² , 24%)	$0.434 \frac{R}{t} - 0.36$
C _T 4, 25, 30 (47 kgf/mm ² , 20%)	$0.78 \frac{R}{t} - 0.79$
C _T 5, 35 (55 kgf/mm ² , 16%)	$0.79 \frac{R}{t} - 1.62$

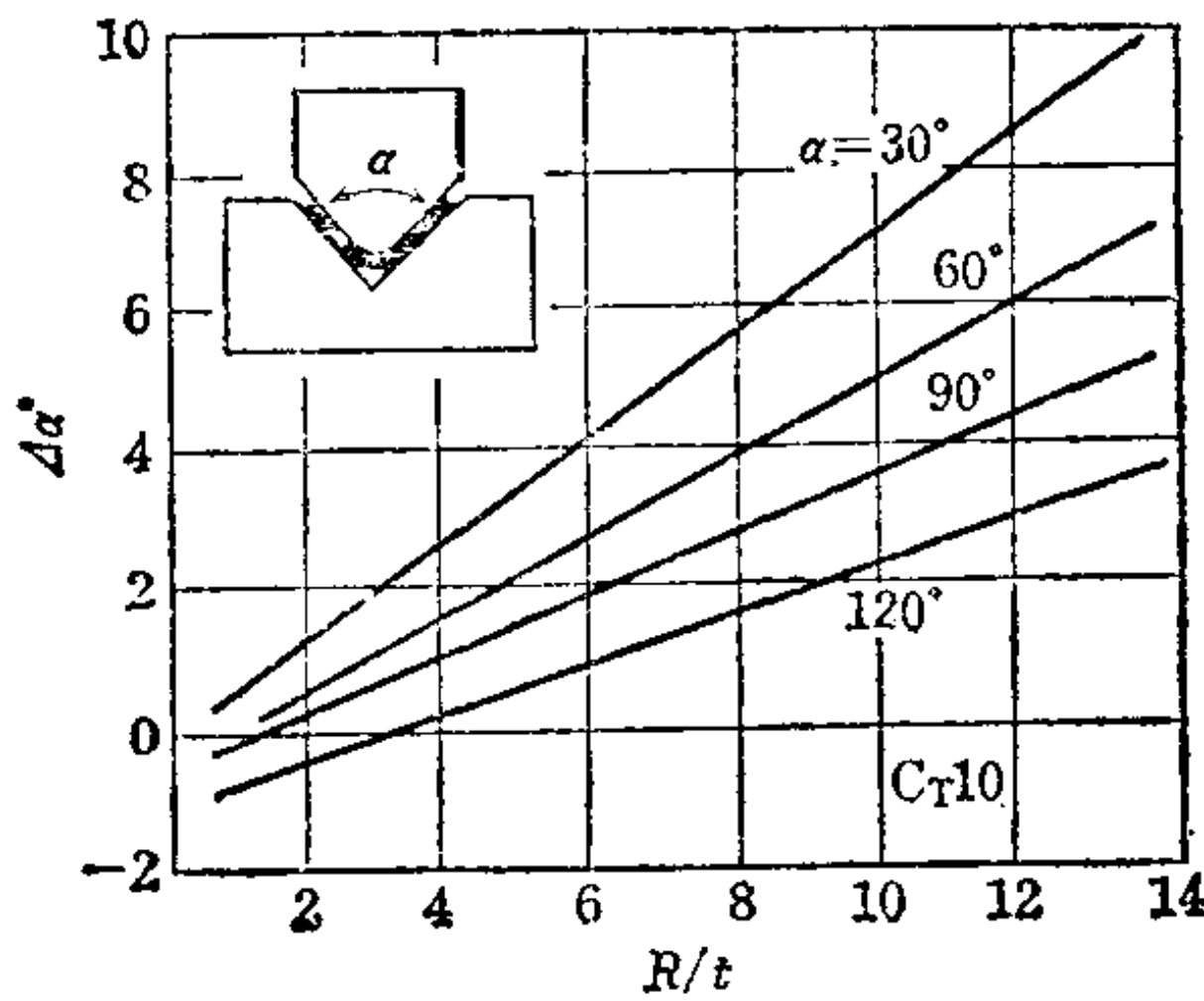


图3.72 矫正弯曲的回弹角〔65〕

板料宽度窄的时候，回弹角稍稍变小一些，此外，如果凹模肩部开口宽度过窄（板料厚度的6~7倍以下），回弹角变大〔66〕。

用橡胶作为凹模时的回弹角，在 R/t 小时，大致形成不大的负回弹〔67〕，但是随 R/t 而增加的比例却不大。

(ii) U形弯曲的回弹 随着压力垫的压力 P_b 大小的不同，板料的变形过程显著地有所不同，并影响回弹角（图3.73〔68〕）。在工具的形状之中，使板料产生弯曲变形的凸模端部圆角半径 r_p 必然对回弹角有很大的影响（图3.75）。凹模肩部圆角半径 r_d 的大小，在直臂处使具有弯曲过程的那个部分（图3.54中的BC部分）的范围发生变化，凸模和凹模的间隙当其比板厚大时，在加工终结时也不妨碍板料与凸模形状相一致，如果凸模和凹模的间隙比板厚小，则板料变薄。图3.74〔69〕和图3.75分别是凹模肩部圆角半径 r_d 和凸凹模间隙等与回弹角之间的关系。此外，象图3.75的例子那样在凸模的侧面上带有退让空间的情况下，就具有负回弹的效果。还有，凹模U形槽的深度浅，板料直臂部分在凸模侧面和凹模内表面之间被卡住的那部分的长度，如果是板料厚度的 $1/4 \sim 1/5$ 的话，就不能得到恒定的制件角度。

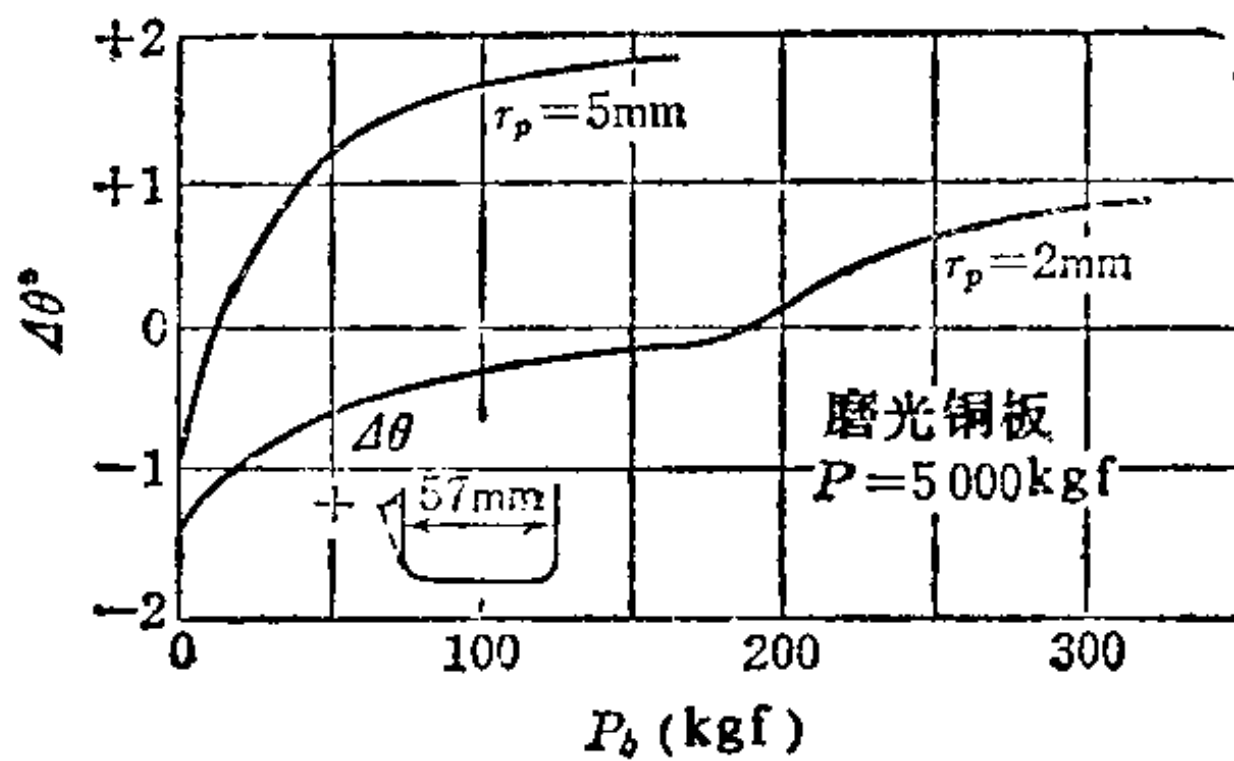


图3.73 随U形弯曲压力垫压力的变化回弹角的变化〔68〕

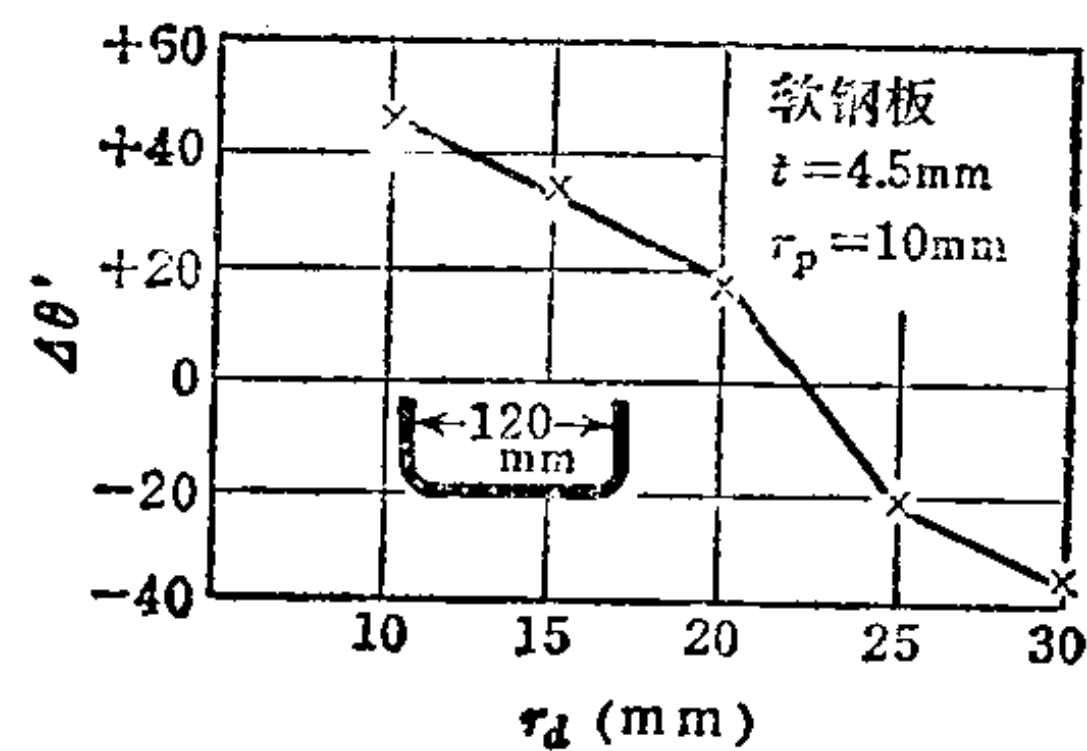


图3.74 随凹模肩部圆角半径的变化回弹角的变化〔69〕

(iii) L形弯曲的回弹 L形弯曲如前已述及的那样（3.2.2.c），可以认为与U形弯曲相同，所以其回弹也就与图3.74和图3.75的趋势完全吻合。在定量分析上，由于U形弯曲包含有垫

的压力的影响，所以要作比较是困难的，但是，与相同的 R/t 的 V 形弯曲相比回弹要稍小一些。

(iv) Z 形弯曲的回弹

Z 形弯曲具有多种形式，用图 3.76 的模具弯曲时的结果〔70〕如该图中所示。这种模具的结构，属于图 3.27 中的 (a) 那种类型。回弹并不是简单地随弯曲半径 R 和板料厚度 t 的变化而变化，而是随着弯曲角 θ 而发生变化。不过在任何情况下都是 $\Delta\theta_1 > \Delta\theta_2$ ，制件的两个直臂也不会平行。而且，如果垫的压力不足，则 $\Delta\theta_1$ 变小。

c. 坯料的长度 为了将制件弯曲至规定的尺寸，必须注意在弯曲前预先确定坯料所需板料的长度。在计算坯料长度时，最好是知道保持和弯曲之前同等长度的板料中性层的位置。但是，中性层的位置却受多种因素的影响。

板厚随着弯曲的变形程度加大而变薄，而且其中性层从板料厚度的中心转移至内侧。板厚的变薄量也受加工方法的影响，其差别如图 3.77〔71〕所示。即使是弯曲的转角部分具有相同的内侧半径，可是变形却未必一致，并在直臂的边界区存在变形扩展部分。因此，当弯曲角小时，在弯曲转角部分中其扩展部分所占的比例就大，即使是相同的加工度 (R/t) 而实际的变形却要变小。此外，越是柔软的材质越容易受由于板料与模具接触所引起的摩擦力等因素的影响，仅仅是在某些场合，才在弯曲内侧存在与初始长度相同的面。

考虑到上述因素，实际运用中就可以考虑象图 3.78 那样划分为弯曲的转角部分和直臂部分并在此边界区段发生不连续变形，

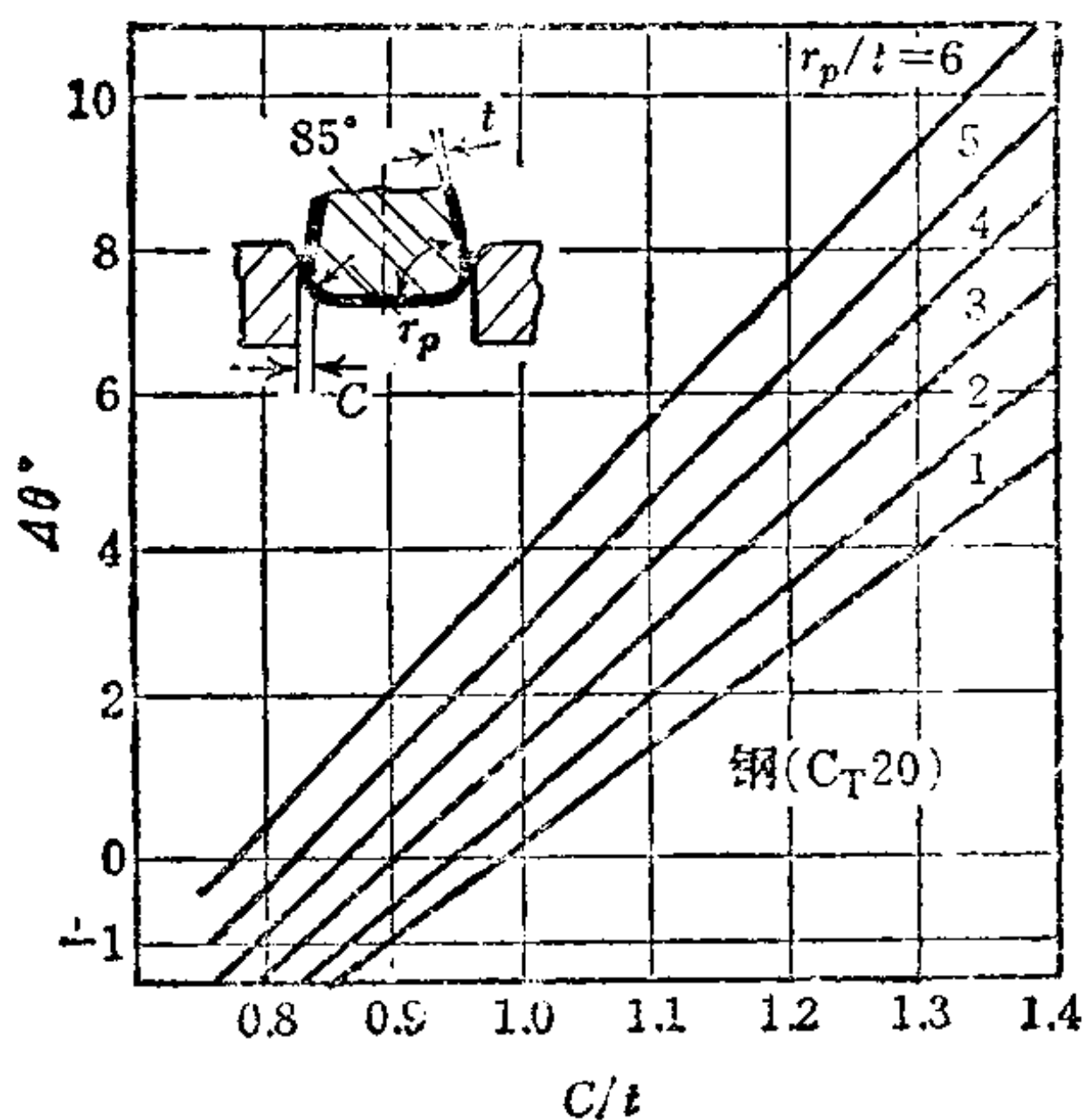


图3.75 随凸模端部半径和间隙变化回弹角的变化 (B. Л. ОСТРОВСКИЙ)

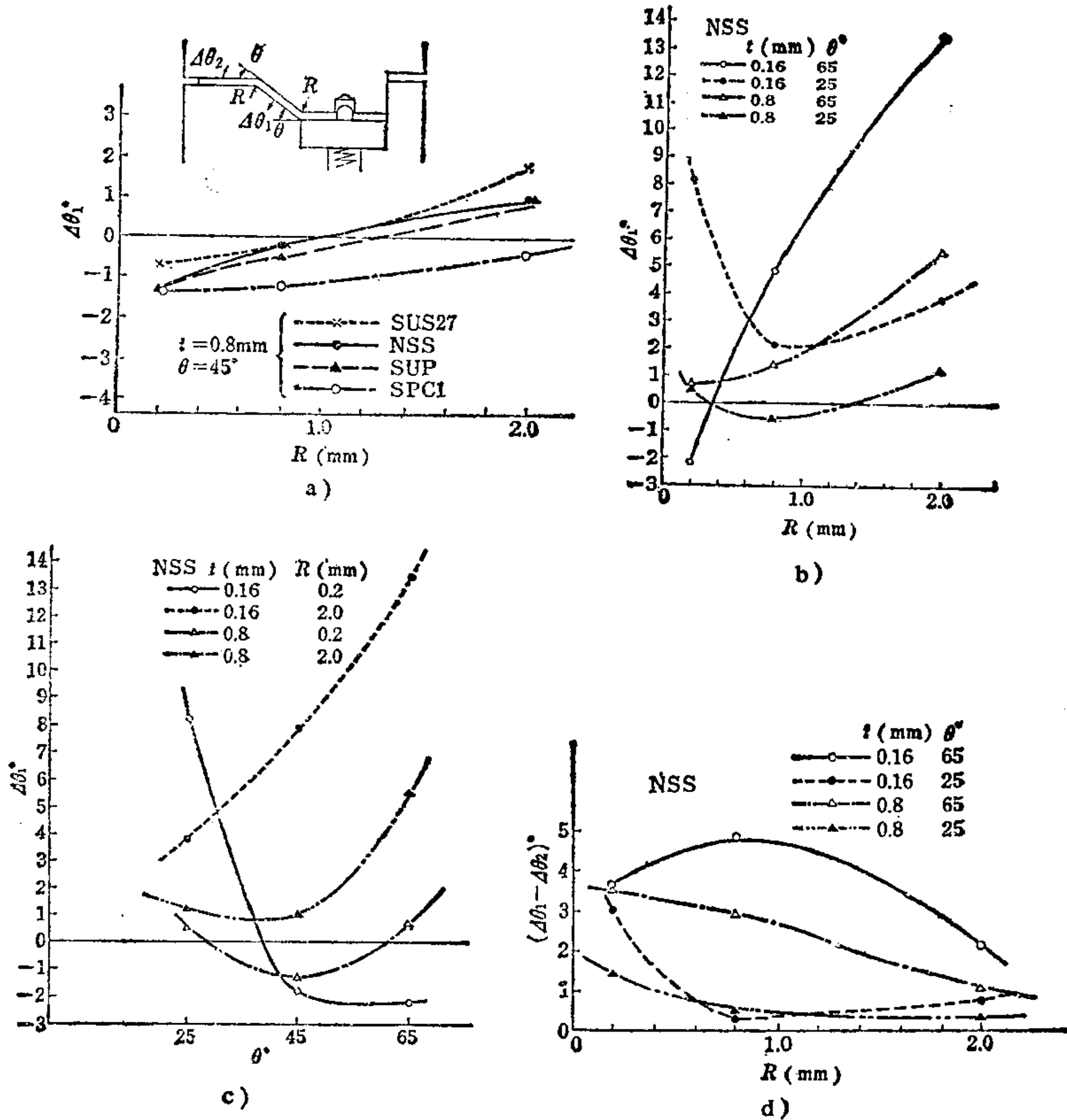


图3.76 Z形弯曲的回弹〔70〕

进而根据条件适当选取下面公式中的系数 k 进行计算。即坯料的长度 L 为

$$L = A + B + 1.57 (R + kt) \frac{\theta^\circ}{90^\circ} \quad (3.39)$$

式中, k 值从图 3.79 的曲线读取并根据材质的不同稍作调整。

对于坯料长度, 利用上面的公式即可得到足够的精度, 可是制件的尺寸精度, 由于受弯曲位置错移的影响很大, 所以就必须对压力垫以及定位销等的利用作深入的研究。

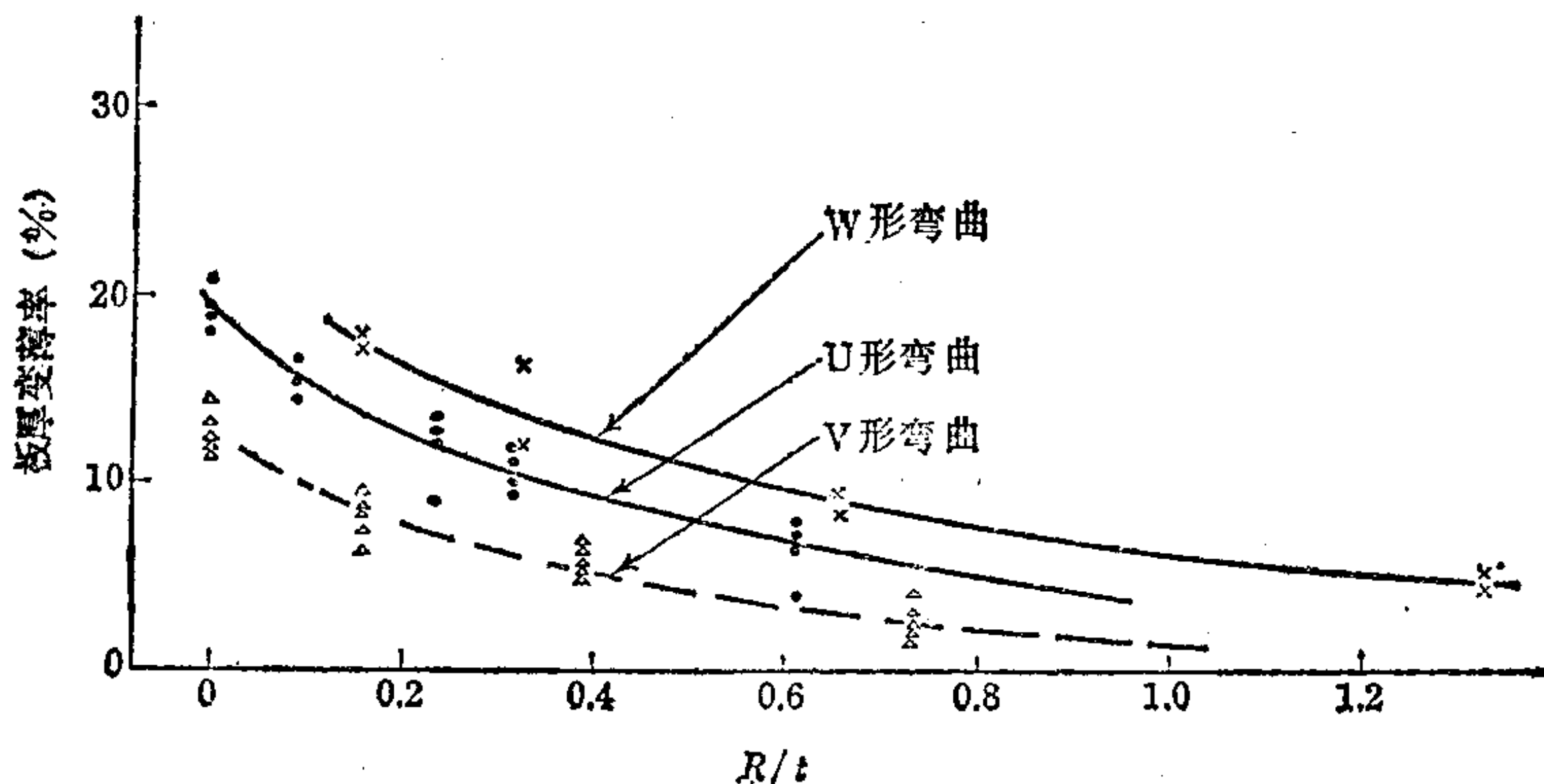


图3.77 弯曲转角部分板料的变薄情况[71]

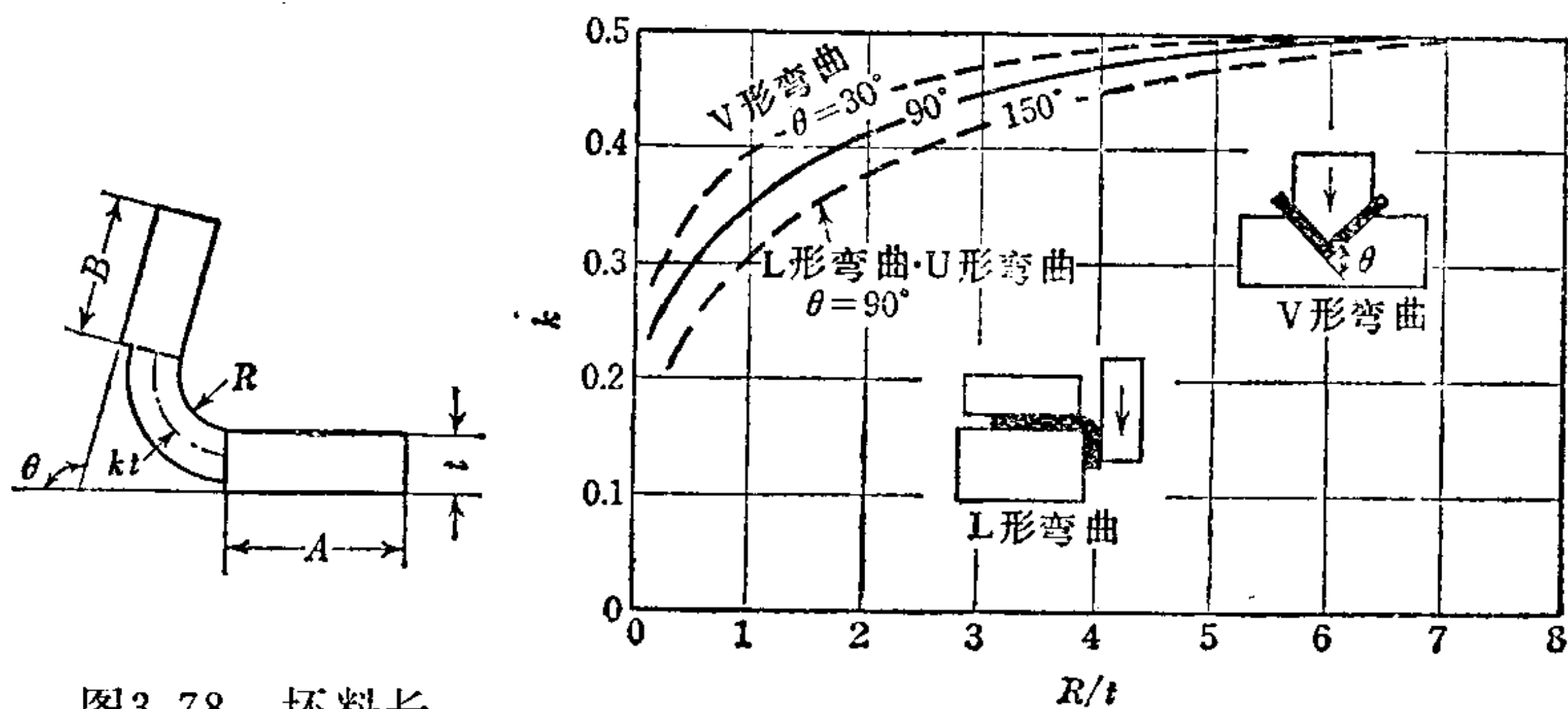


图3.78 坯料长度计算图

图3.79 坯料长度计算公式中的系数 k 值

d. 提高制件角度精度的途径

(i) 制件角度变化的原因 在回弹角大的情况下，要获得规定角度的制件虽不容易，但如果掌握了回弹角的大小，即可按其大小预先作适当的补偿弯曲。因此，在大量生产某一零件时，与其说回弹角的大小是个问题倒不如说回弹角的波动是个问题。

如果需加工的板料尺寸(板厚)不一致，即使是弯曲半径相同可是弯曲的变形程度却不一样，因而回弹发生变化。在 JIS 中，作为板厚的允差是 $\pm 10\%$ 左右，此种情况下，回弹角也发生同等程度的偏差。机械性能变动的的影响也是大的。软钢的屈服点和抗

拉强度就是在同一卷料内也有 10% 的差异〔72〕。而且由于材料排样方向的影响〔73、74〕，仅从拉伸试验的结果，还不能作出判断。此外，对于弹性模量的各向异性也必须注意。

由于冲压设备因受加工力而产生的弹性变形的不同，制件的角度也将出现变化〔74、75〕。如果以刚度不同的压力机进行加工，那么，由于板厚以及材料性能的变化对于加工终结时的载荷和凸模位置的影响就不同。对于弯板机，由于滑块产生挠度，在纵长方向加工终结时的条件就不一致。由于这些原因，所以就难以获得一定角度的制件。

(ii) 限制回弹的措施 如果在板料的各个部分使回弹的绝对值变小，那么回弹的波动量也就变小，就可以指望提高制件的精度。为了限制回弹，沿着已经弯曲的板面拉伸或压缩，或者在板料的厚度方向加以压缩就可以收到限制回弹的效果〔63〕。

随着冲压力的加大，即可使 V 形弯曲件的直臂部分变直〔3.2.4. b. i〕，这就体现出施加压力限制回弹的效果。如果在板厚方向对凹模底部带有圆角的弯曲转角部分施加压力，就有可能象图 3.80〔63〕那样在以较大半径进行弯曲的情况下，使回弹角

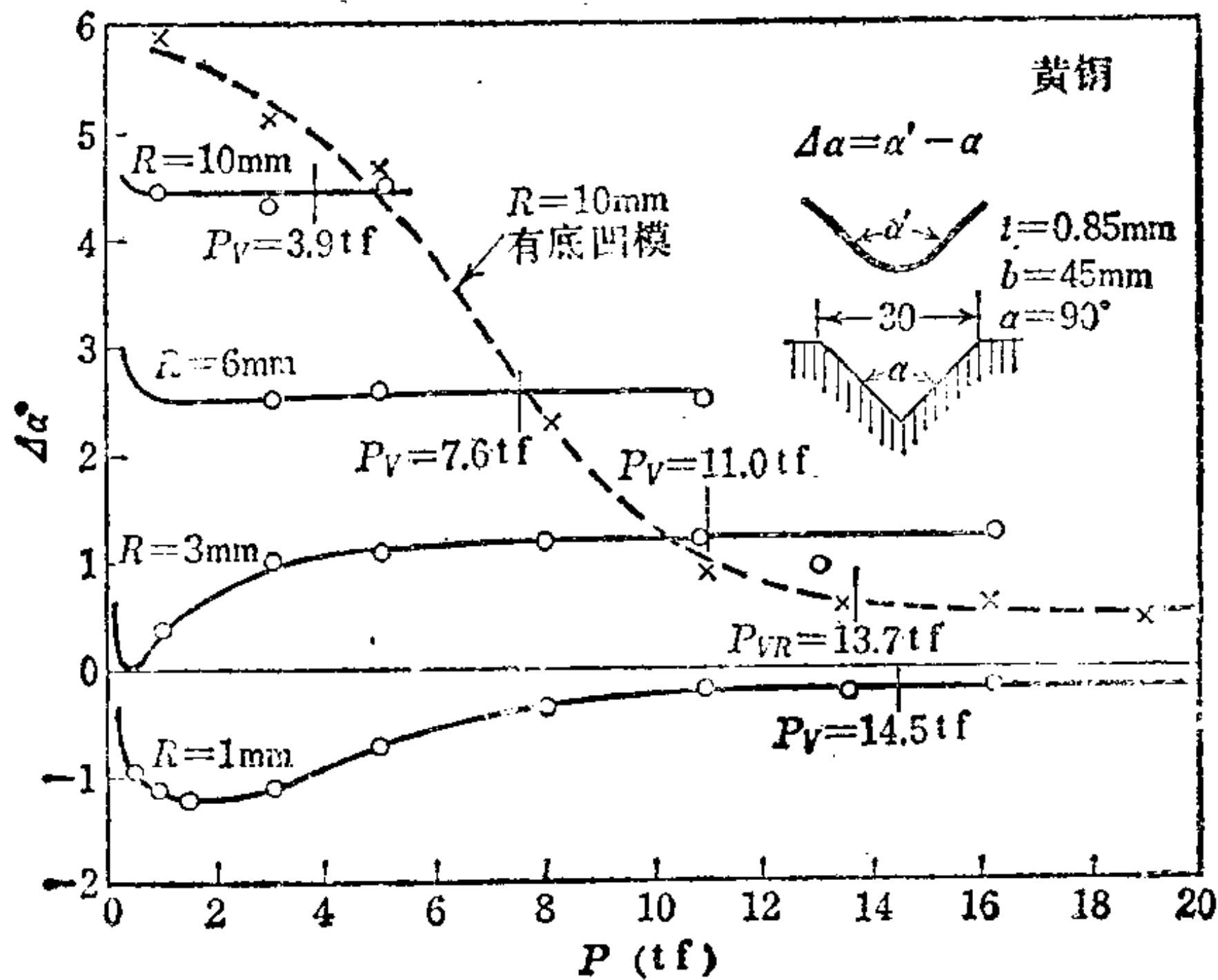


图3.80 用有底凹模限制回弹〔68〕

限制在一个小的范围之内。借助对弯曲转角部分沿板厚方向施加压力的效果去限制回弹，可以用图 3.81 上的凸模和凹模。

在弯曲的宽度方向加压的压缩弯曲加工法〔76〕，对于 V 形弯曲之外的其它弯曲也能适用，都能以较小的载荷限制回弹。用图 3.82 所示结构的模具作弯曲后其结果如图 3.83 所示。

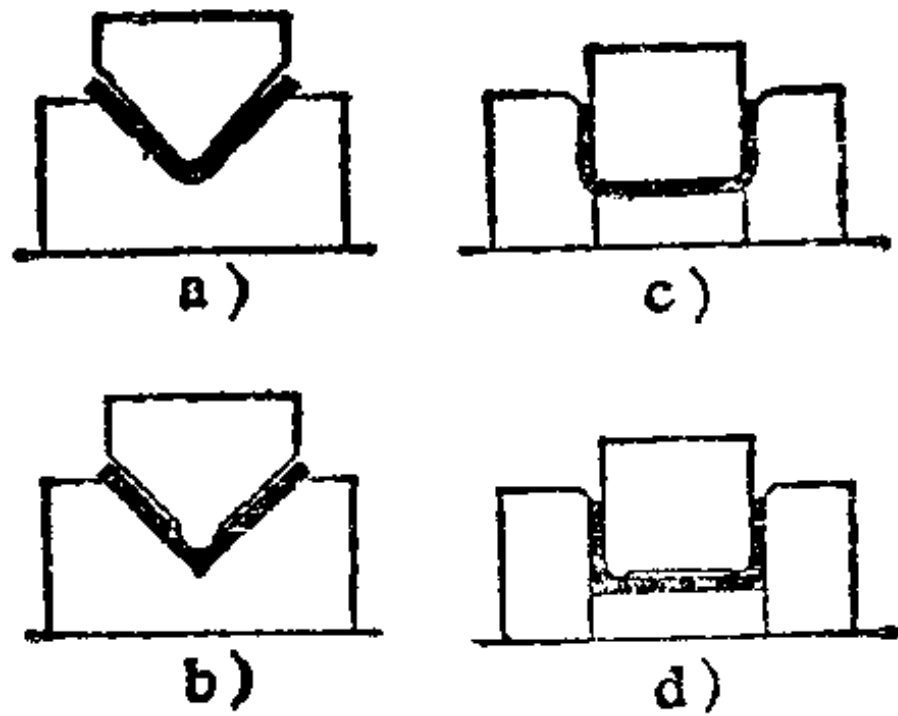


图3.81 对弯曲转角部分加压的凸模和凹模

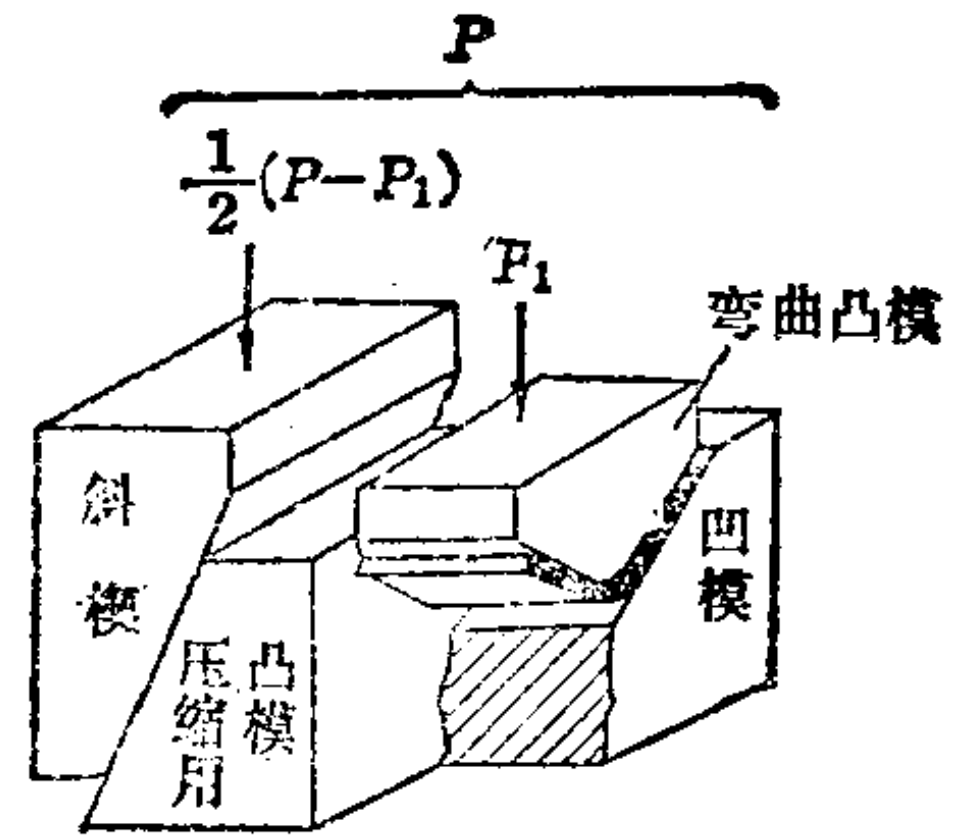


图3.82 压缩弯曲用的模具〔46〕

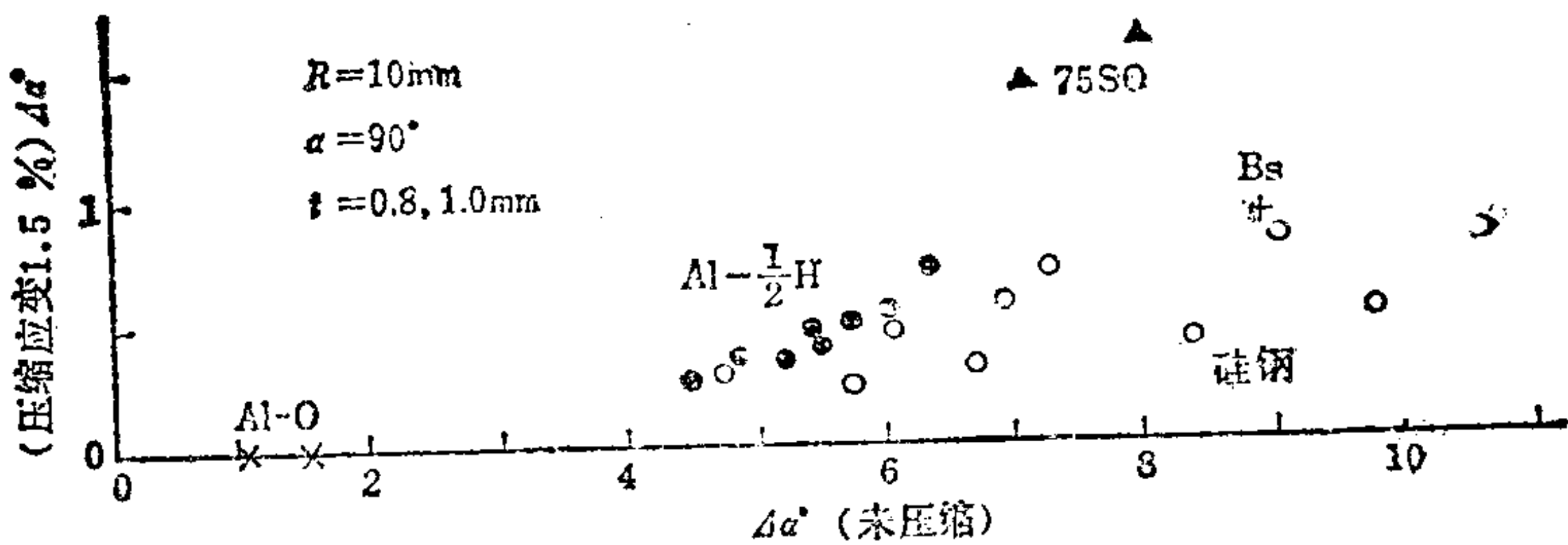


图3.83 宽度方向压缩的效果

圆环成形时也是用在圆周方向给以压缩就能得到近于正圆的制件〔77、78〕（图 3.84）。

象上述那样的加压效果，用于校正加工中对弯曲件进行校正也有多种方法。图 3.85~图 3.87 为其实例，图 3.85 是在板厚方向加压，图 3.86〔79〕和图 3.87 是沿板面方向加以压缩的情况。此外，作为材料性能的鲍欣格效应，对此种加压效果的大小也有所影响。

弯曲制件的形状不合理也会发生翘曲。可是弯曲转角部分的翘曲在很大程度上受直臂部分限制，而且如果与模具相接触的话，则随着接触压力变小，进而在工具之间从板料的两面加压就几乎不出现翘曲。因此，借助上述限制回弹的方法进行加工，则在大部分场合下，制件的形状也就同时有所改善。此外，一般地说，与板厚相比宽度大的板，翘曲量是相当小的，但是，用弯板机成形时，也有翘曲量变大的情况。这是由于弯板机的滑块和压力垫在加工力的作用下产生挠度的缘故。

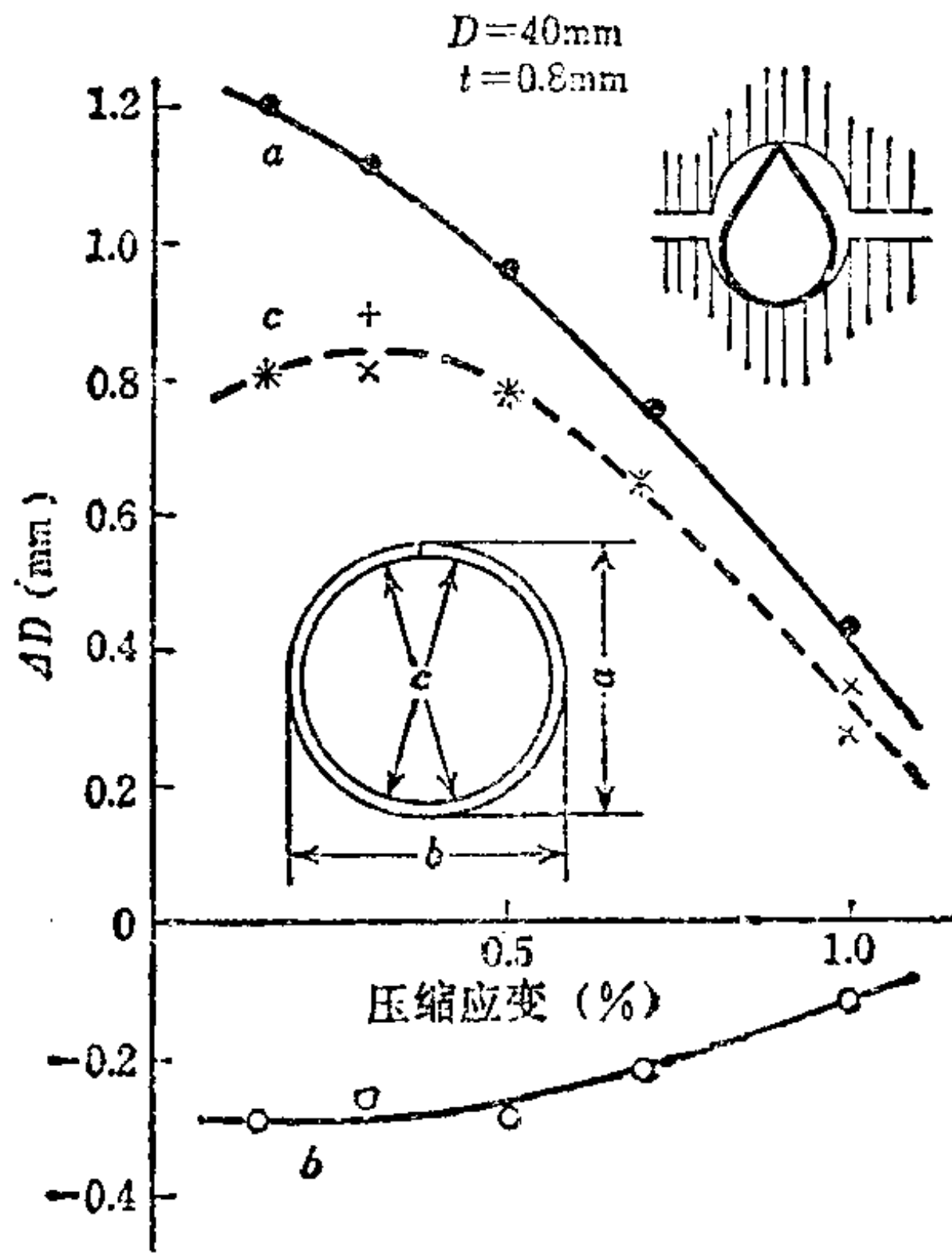


图3.84 U—O形制件用冲压方法弯曲的压缩效果

机成形时，也有翘曲量变大的情况。这是由于弯板机的滑块和压力垫在加工力的作用下产生挠度的缘故。

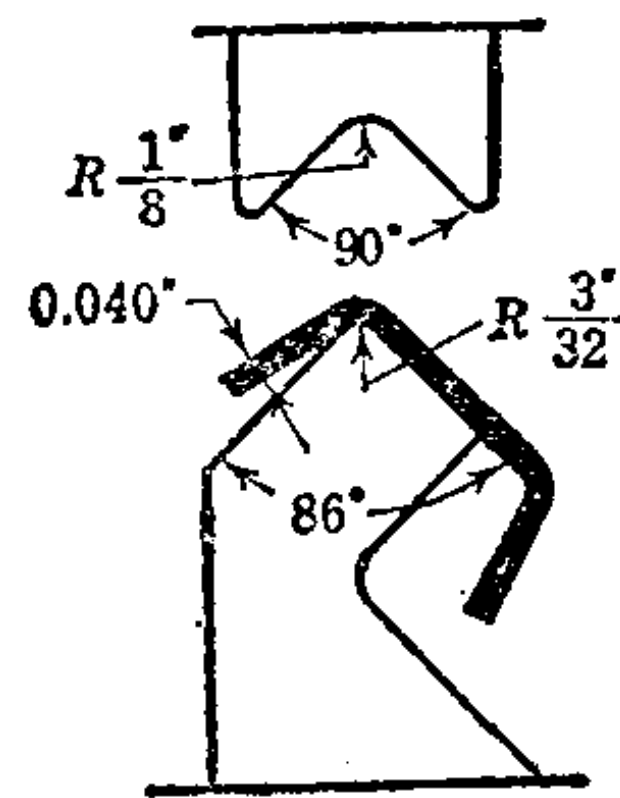


图3.85 矫正模

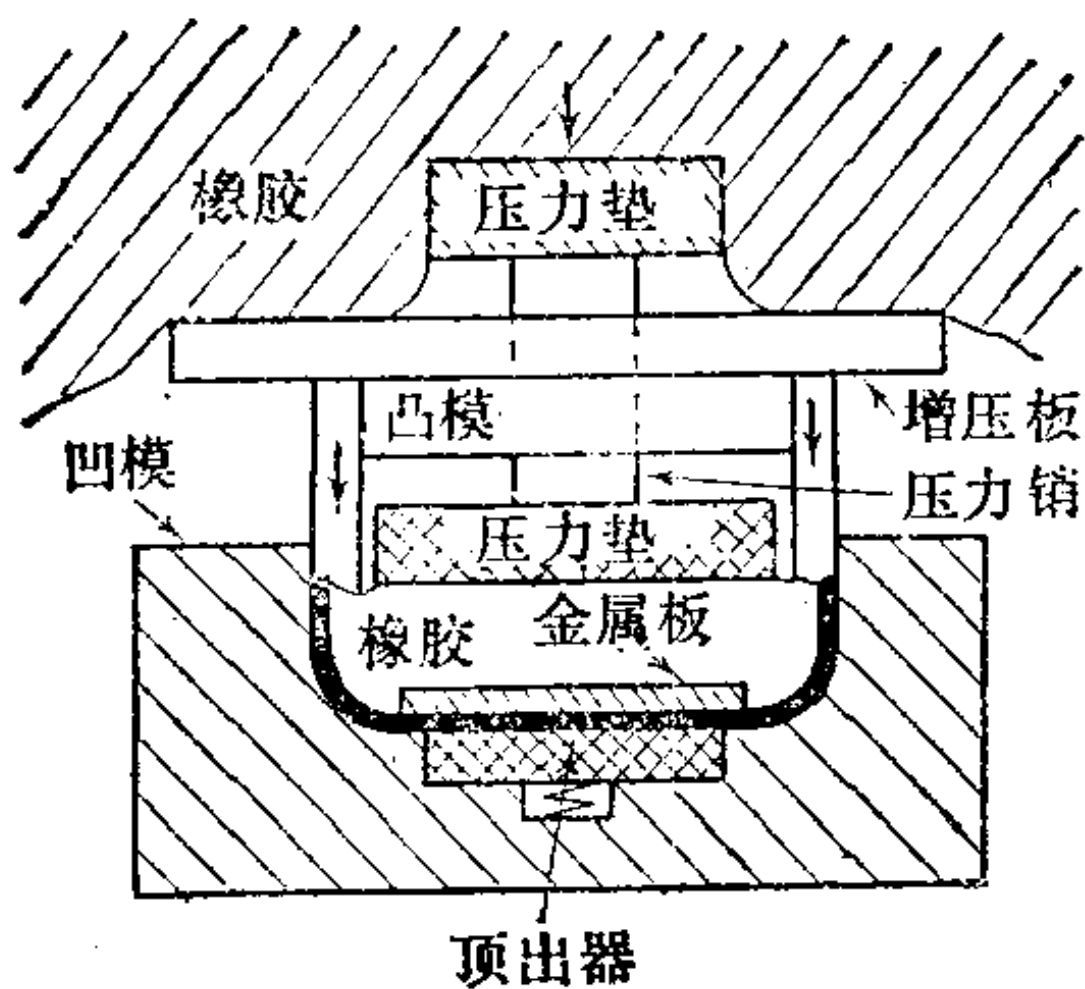


图3.86 压缩成形模〔79〕

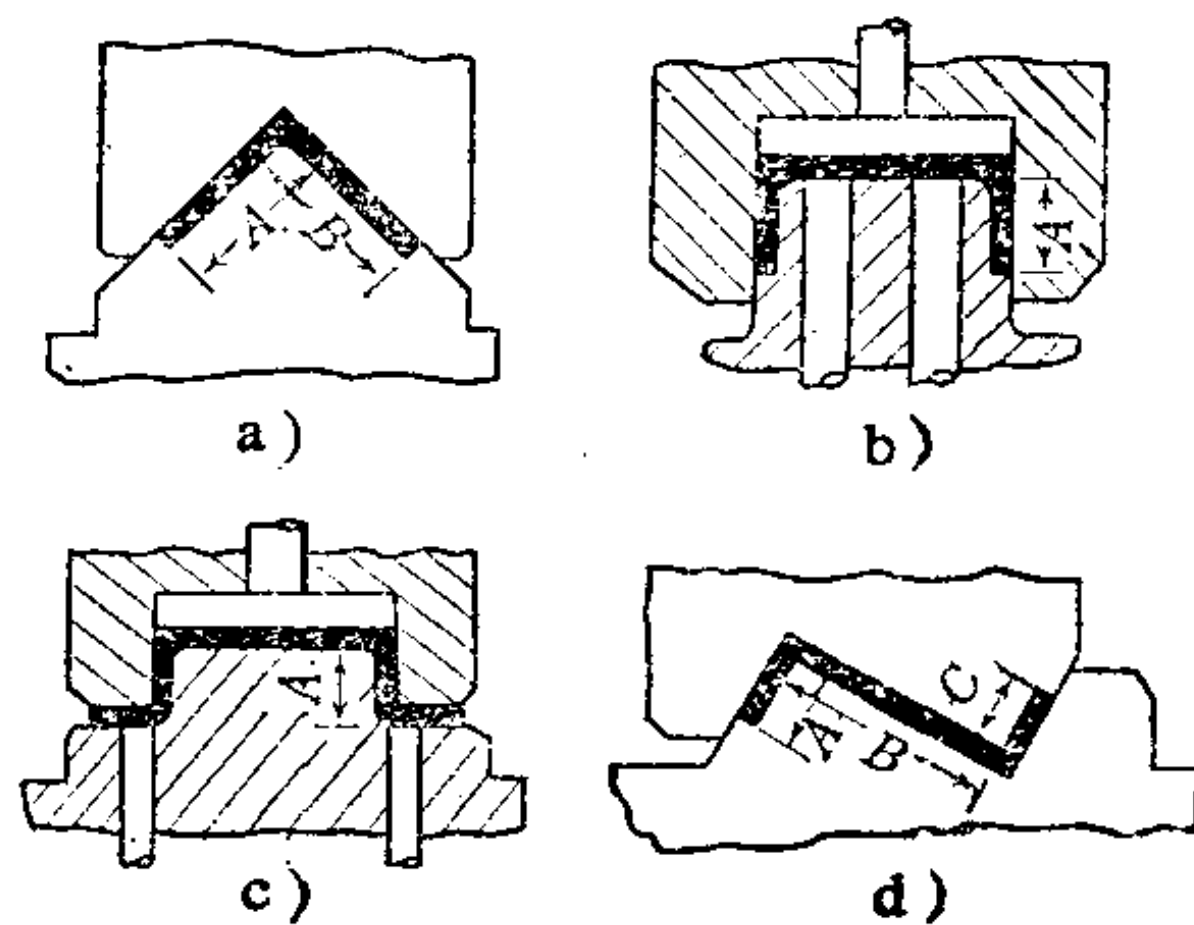


图3.87 矫正模

3.2.5 弯曲件和弯曲模的设计

a. 弯曲件的设计要点 弯曲件不但要考虑有关使用性能、精度、强度等方面的要求，而且也要考虑到原料的性能、尺寸以及这些因素的均一性进而对工艺方法、模具结构等方面作出考虑和研究之后再行设计。就弯曲件的精度而言，通过上面的讨论，选择适合要求的原材料和加工方法就可以在在一定程度上满足要求。按照已经给出的条件，弯曲半径必须选得大于最小弯曲半径。

(i) 直臂部分的最小高度 如果直臂部分太短则弯曲转角部分的影响就表现在直臂的端头上，端部发生畸变而且也不能保证角度的精度。最小直臂高度通常是从内侧的圆角半径 R 的中心算起具有两倍料厚即 $2t$ 的样子，特别要注意的是，即使在弯曲半径 $R = 0$ 的情况下，也要使最小直臂高度等于 $1.3t$ (图 3.88)。

象图 3.89 那种场合也是一样，因为图 a) 的直臂高度小，所以弯曲时在带尖角的地方要产生裂纹。在要求制件直边高度一定不能太大的场合下，就要象图 b) 那样成形出直臂之后，再将多余的部分切除。

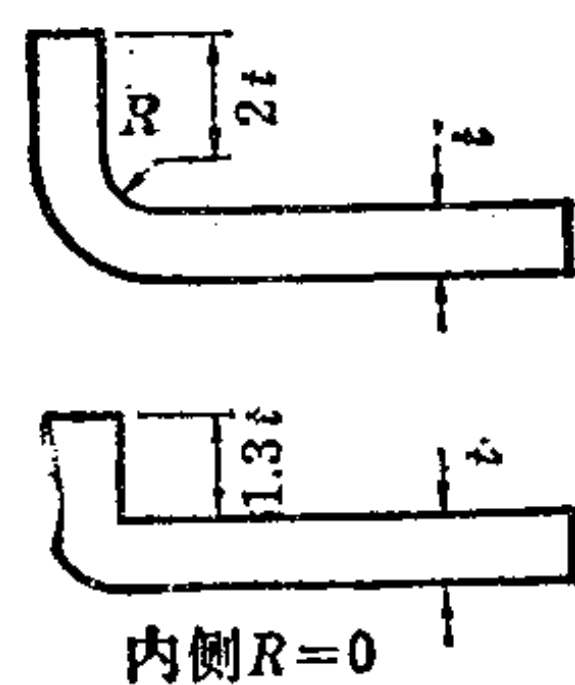


图3.88 直臂的最小高度

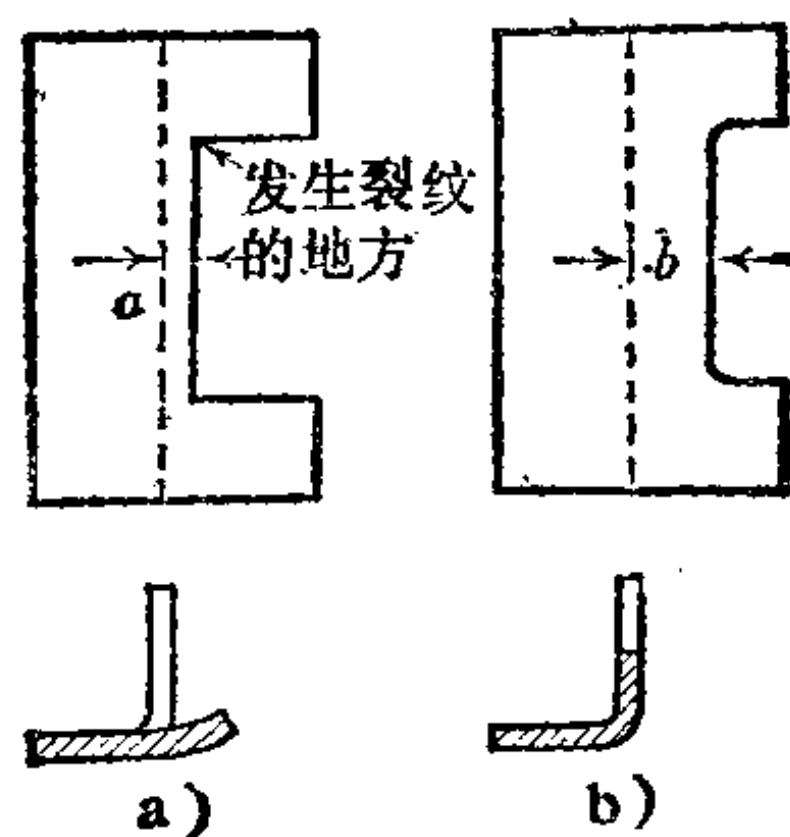


图3.89 直臂高度不同的某些制件

(ii) 弯曲线附近的孔 在图3.90〔43〕中，象图 a) 那样由于弯曲作用使弯曲转角处（弯曲线）附近的孔发生变形。如果是象

图 b) 那样 $s > t$ 则有可能作使孔大致不变形的弯曲。当希望孔较上面的情况更近于弯曲线的时候, 则象图 c) 和图 d) 那样开工艺孔是颇为有效的。在有精度要求时, 以弯曲后再冲孔为宜, 此时, 由于冲孔凹模一侧的壁厚变薄, 所以必须注意要有足够的模壁强度。

(iii) 弯曲线附近的外形 当弯曲板料两侧的外形轮廓不对称时, 由于弯曲作用产生横向偏移。图 3.91〔80〕为这种情况的一例。因此, 象图 3.92 那样, 相对于弯曲线的轮廓存在小于 60° 的倾角时, 就要象图 b) 那样冲切成直角, 并使 h 与图 3.88 的直臂高度相同。

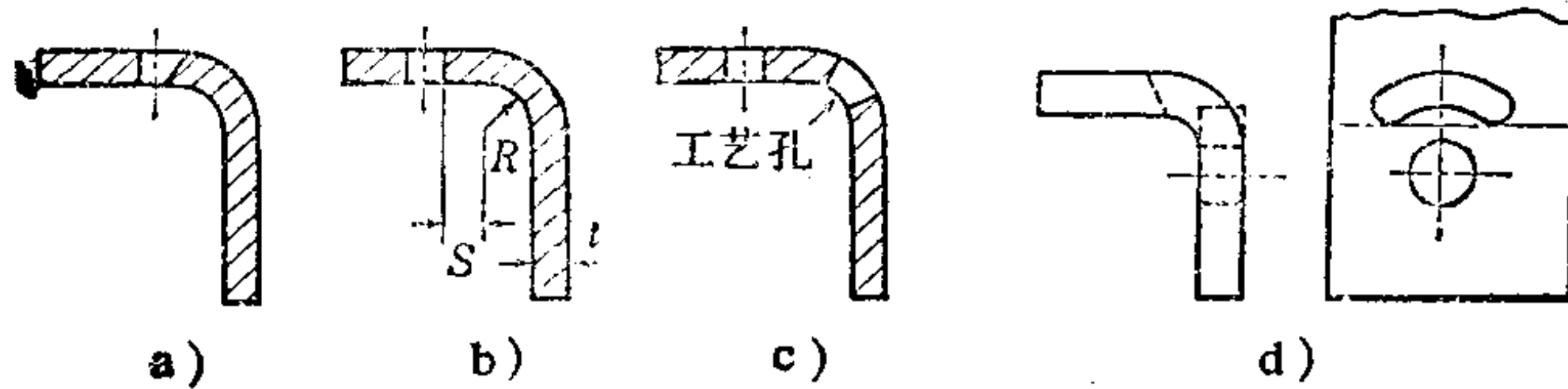


图3.90 弯曲线附近的孔

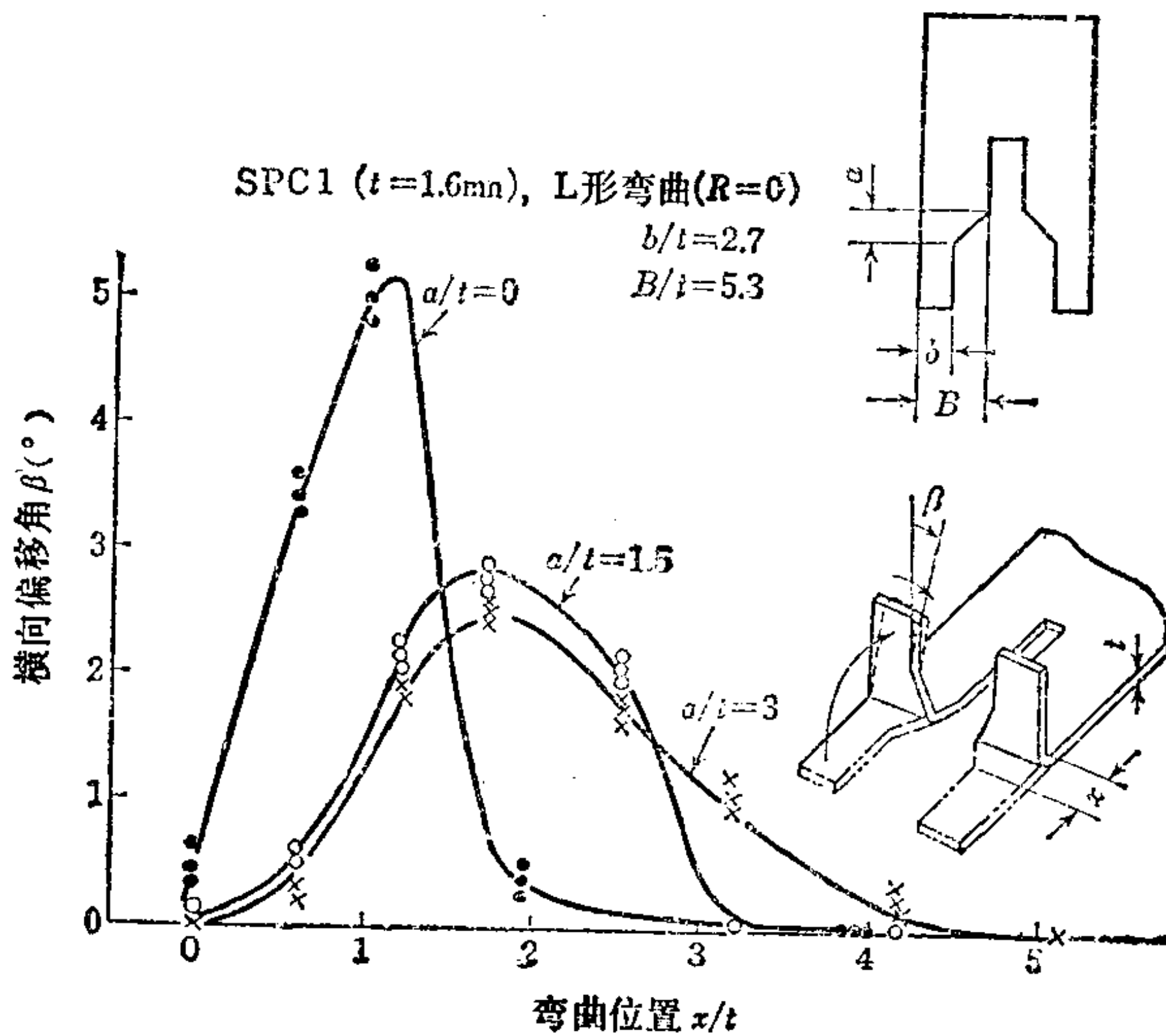


图3.91 非对称轮廓板料的弯曲

如使图 3.93 a) 所示的弯曲线与外形轮廓相一致, 那么, 由于不合理的变形从尖角部分开裂, 或者产生畸变。最好是象图 b) 那样使 $a \geq 2t$, 但当不能满足这一条件时, 就要冲出象图 c)、图 d) 那样的切口。在图 d) 中, $a \geq R$ 或 0.8mm , 或者 $b \geq 2a$ 或 2.5mm , 图 e) 模具制造简单, 但要削弱弯曲部分的强度。图 f) 的形式不但易于偏移也容易产生裂纹。图 g) 和图 h) 在模具制造和维护上将涉及经费问题。

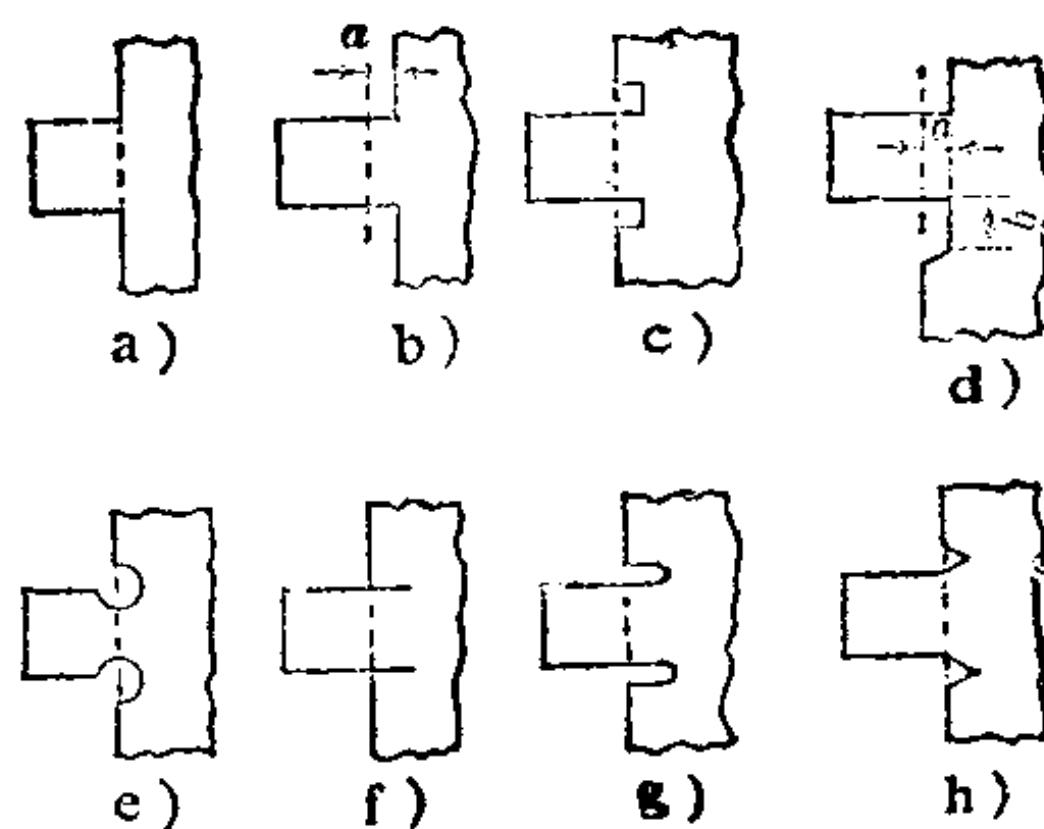
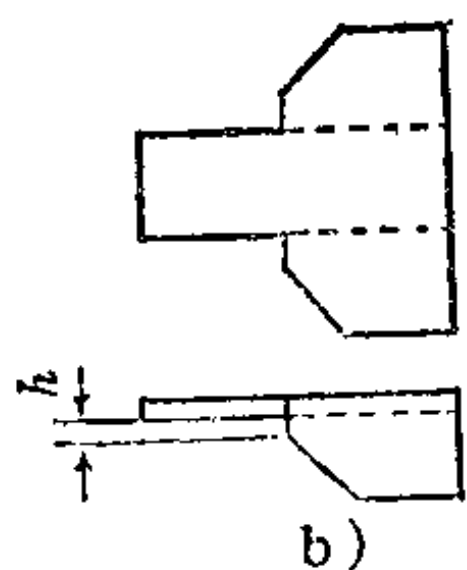
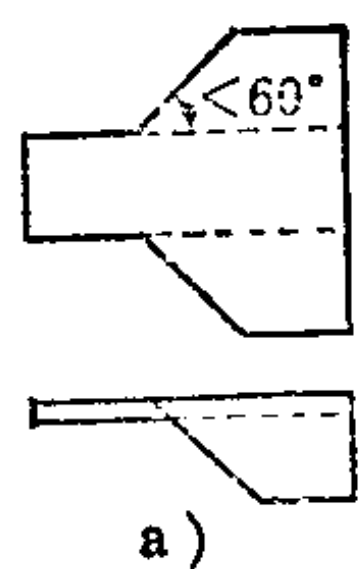


图3.92 外形轮廓的变更

图3.93 弯曲线附近的工艺缺口

(iv) 切口—弯曲 将板料的某一部分保存并将另一部分分离, 象图 3.94 那样作切口—弯曲时, 也可以说与上述的情况是一样的。对于所开的切口, 由于担心产生与图 3.93 f) 相同的裂纹, 因此, 要象图 a) 那样开出防止裂纹的圆孔。但是, 被冲切弯曲过的地方从凹模取出时将会出现障碍。如果象图 b) 那样将切口的周边至少切去 $2t$ 的宽度, 那么这个问题就不用担心了。如果象图 c) 那样带有倾角, 就是原来那种形状也行。

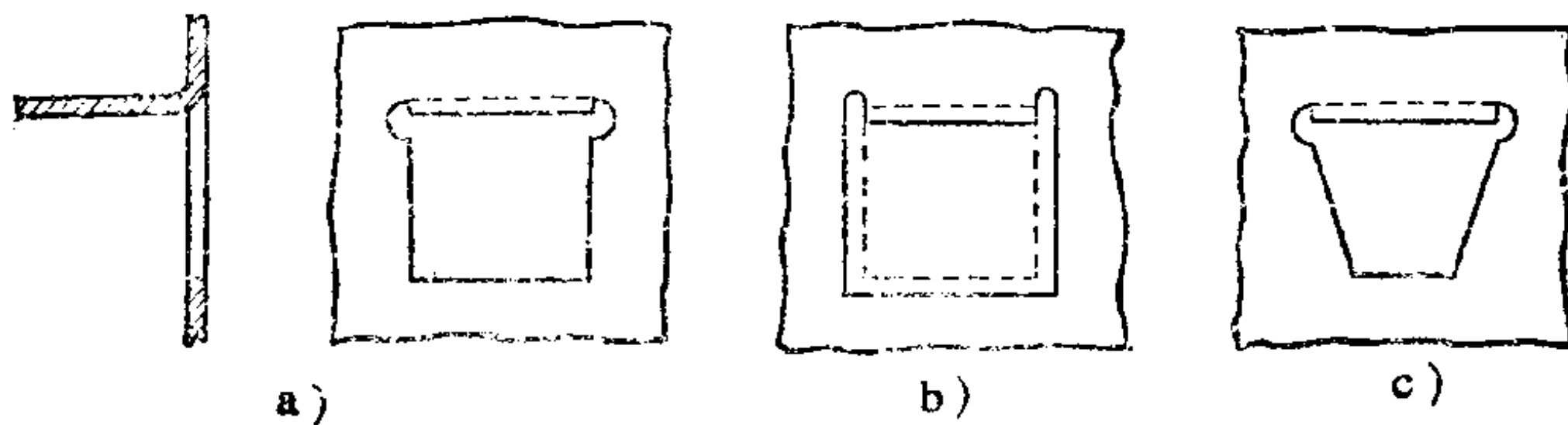


图3.94 切口—弯曲件的形状

(v) 弯曲部分的刚性 图 3.95 中的 a) 由于在弯曲部分承

受剪力，所以刚性最大。对于以弯矩的形式作用的情况，则图 b) 比图 c) 的刚性大。当弯曲件为薄板时，就要象图 3.96 那样采取加强措施以提高刚性。这样做刚性即可提高 2~3 倍。

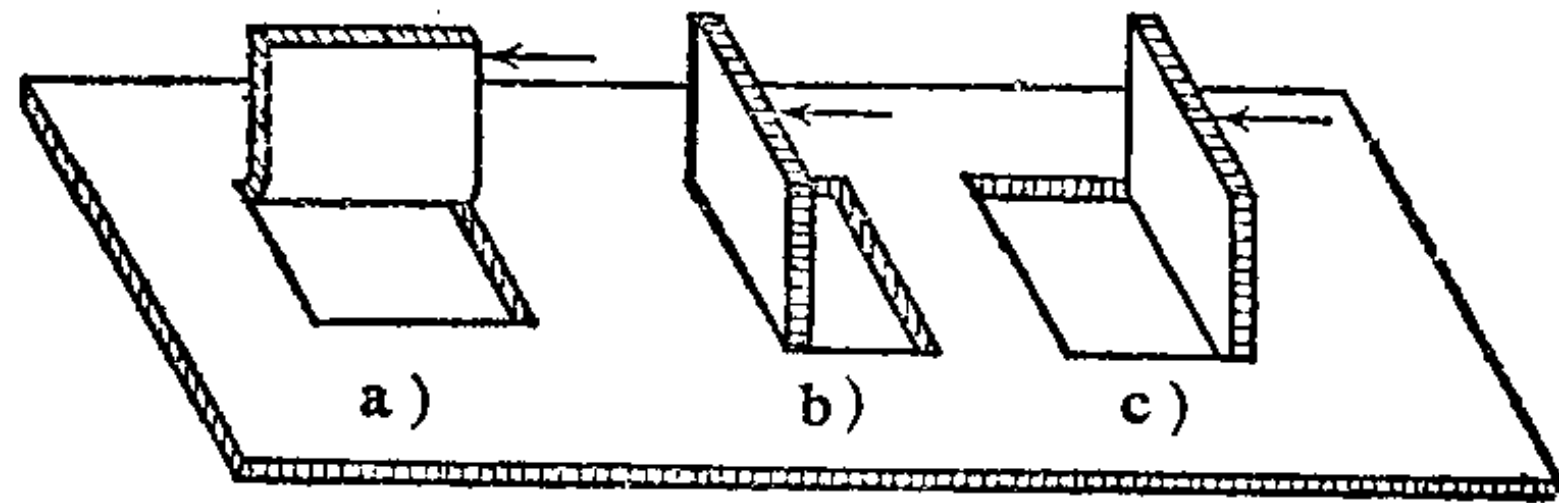


图3.95 受力方向和刚性

(vi) 弯曲方向的限制 由剪切而产生的坯件毛刺，要置于弯曲方向的内侧，为了不致搞错方向作弯曲，对于外形轮廓对称的制件，可在不影响制件要求的地方开孔，或作成非对称的形状（图 3.97）。

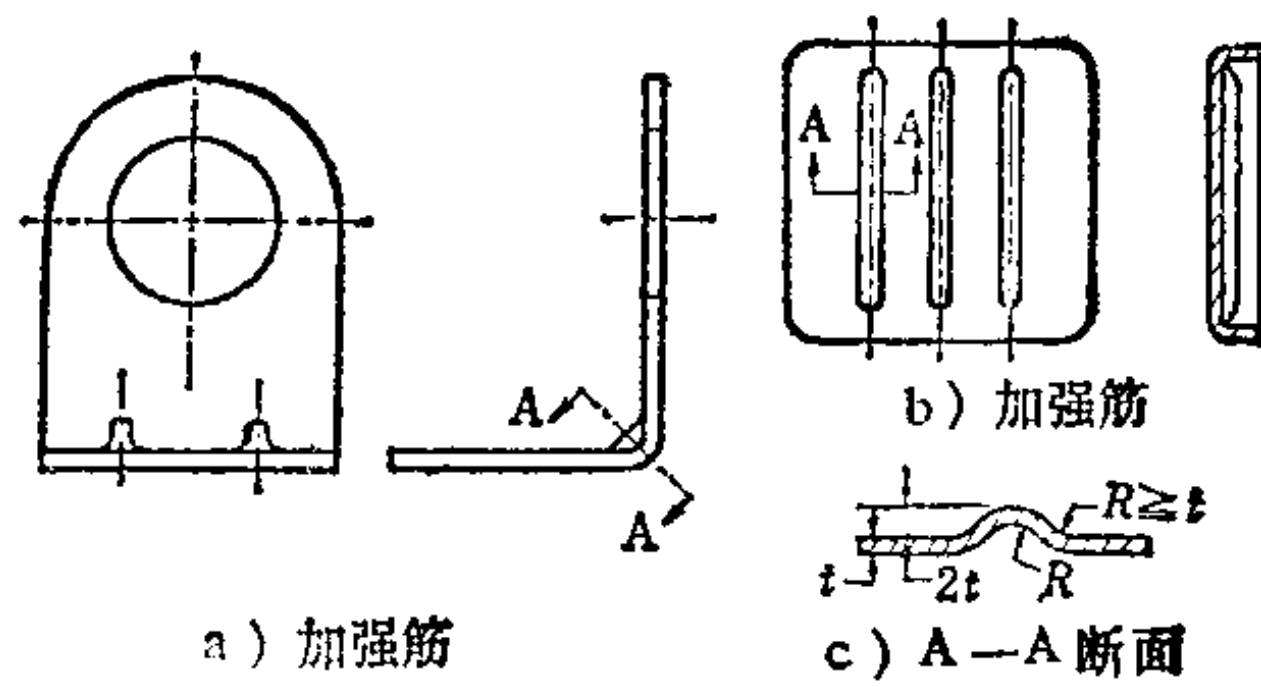


图3.96 增加薄板刚性的途径

(vii) 为了尺寸精度所作的修正 图 3.98 中的尺寸 l_1 要求以较高的精度进行加工。然而，尺寸 l_0 由于要加上板厚 t 的波动值，所以其公差就必然增大。对于 l_0 有精度要求的场合，就要采用象图 b) 那样在 l_0 上保留一部分不作弯曲加工的形状。装配时，也有要求宽度尺寸精度的情况。这时就要象图 3.99(b) 那样，将弯曲线附近的宽度预先做窄一些，使 $b > a$ 即可。

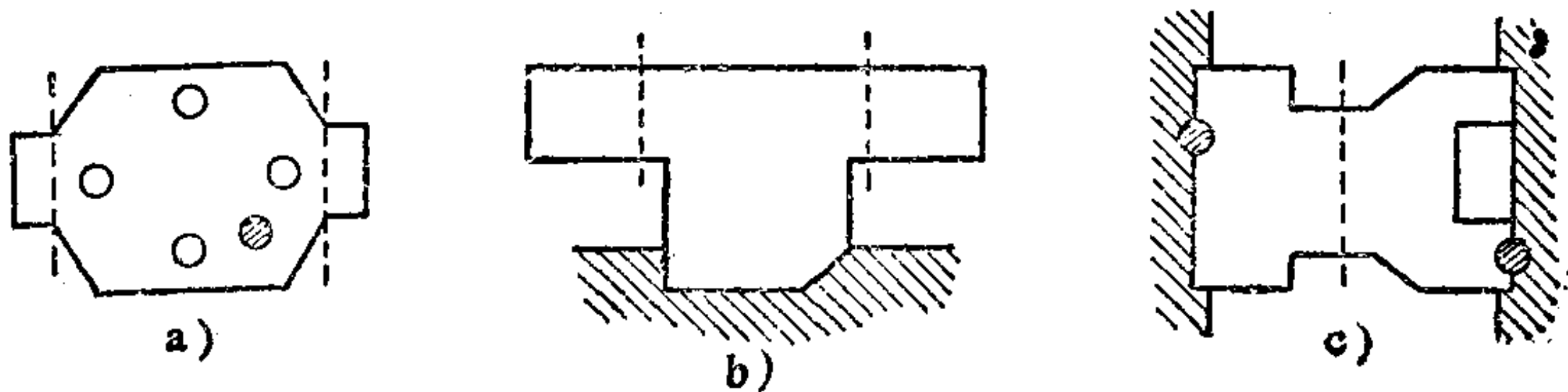


图3.97 确定弯曲方向的导正销或定位板

(viii) 制件形状的变更 满足相同性能要求的制件形状，可

以是多种多样。图 3.100 为不用焊接形成一体，并能以最简单的工艺即可完成加工的例子。图 3.101 是将制件分为三件以利于加工的例子。图 3.102 是使弯曲方向一致，力求使模具结构简化，并且消除对于因剪切断面的毛刺而担心会导致裂纹的例子。图 3.103 是避免卷曲工艺及烦杂工序进而变为最简单的弯曲工艺的例子。

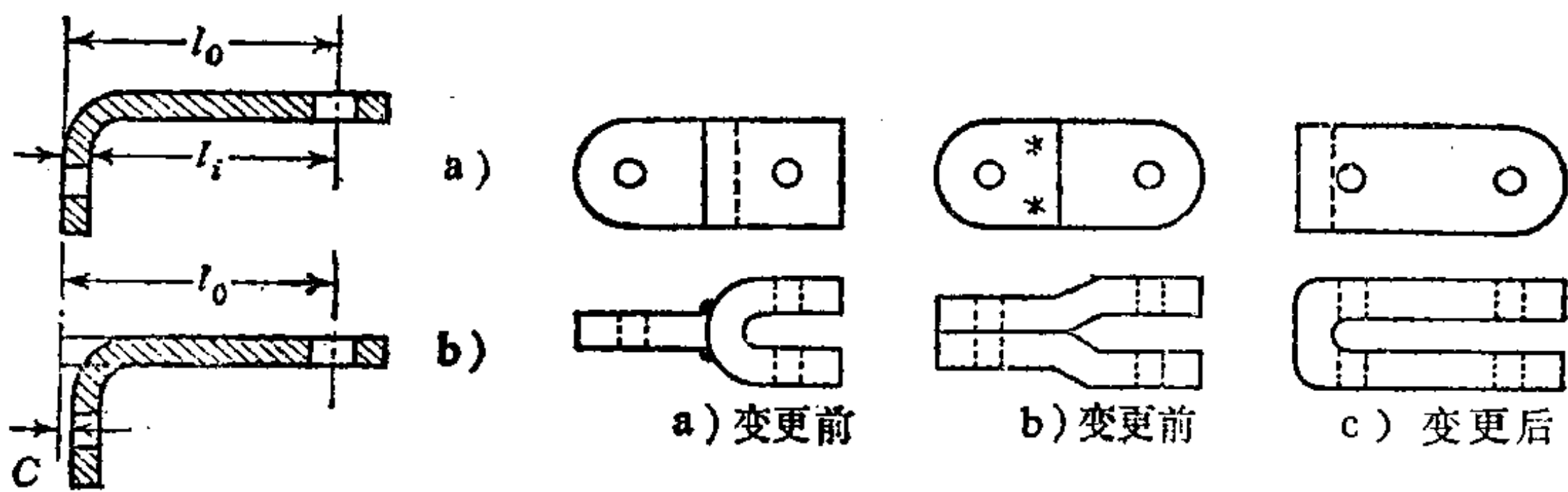


图3.98 外侧尺寸有要求时形状的变化

图3.100 改变制件形状的例子

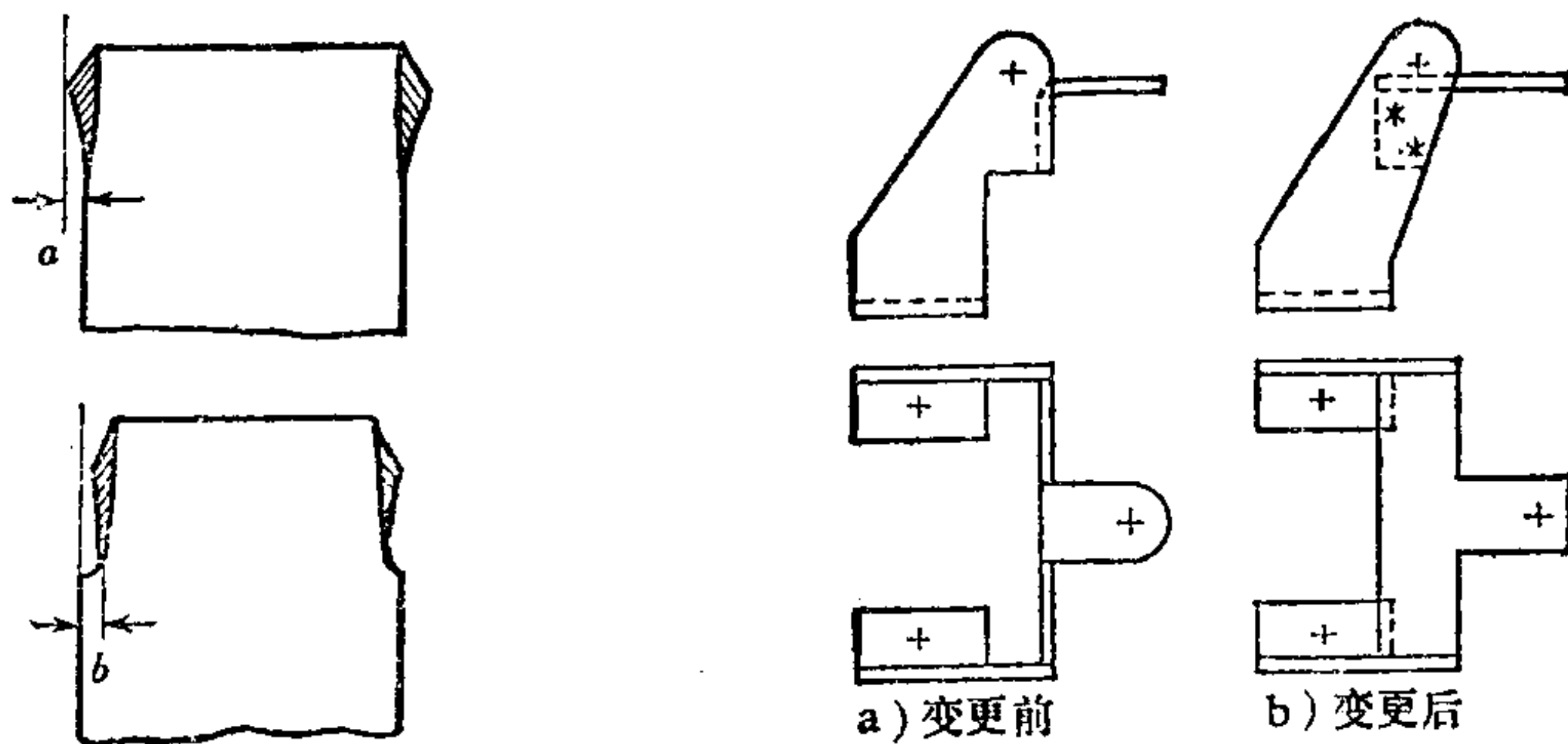


图3.99 有宽度尺寸精度要求时形状的变化

图3.101 改变工艺方法的例子

b. 模具设计中的注意事项 设计弯曲模时，应把前面谈到的所有注意事项综合起来考虑。兹将其归纳分述如下：

(i) 弯曲工序和模具尺寸的确定 充分考虑制件的形状然后确定弯曲工艺的顺序。

(1) 弯曲角和弯曲次数多的制件、非对称形状的制件、有

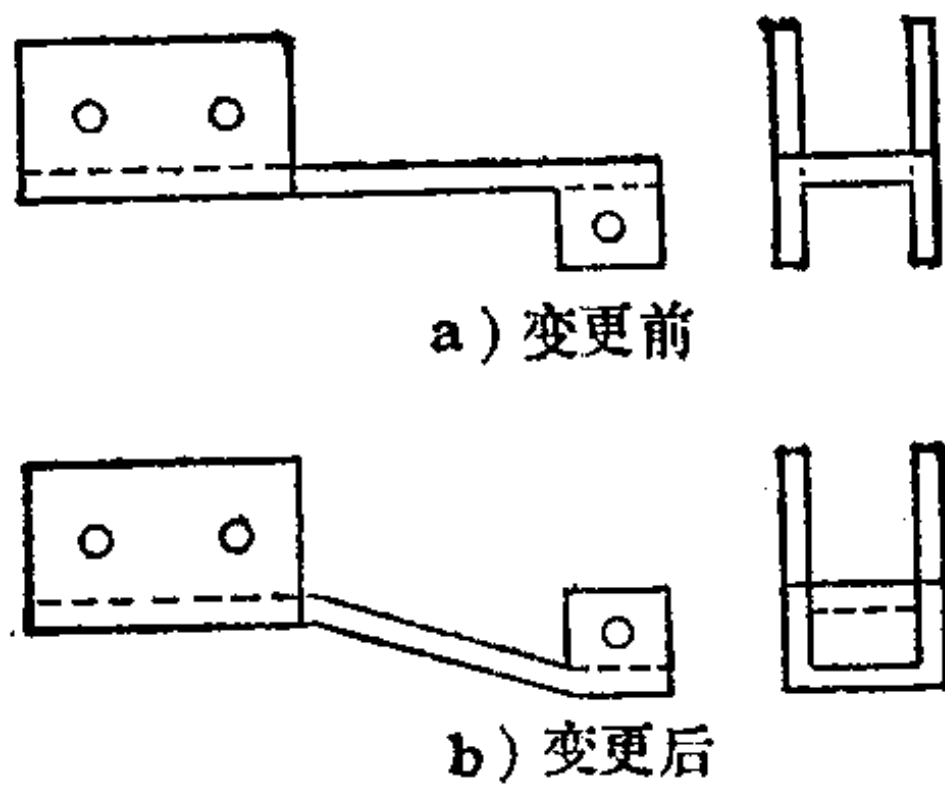


图3.102 改变制件形状的例子

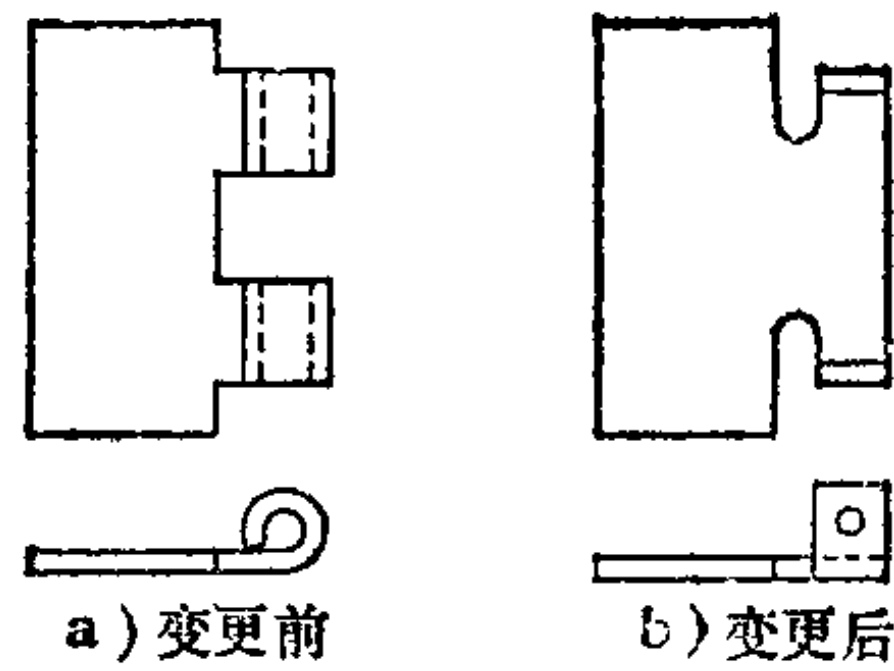


图3.103 改变制件形状的例子

孔或有切口的制件等，由于弯曲的作用特别容易变形或出现尺寸误差。必须注意，最好是在弯曲之后再作切口和冲孔。

(2) 首先计算出制件的坯件长度，以此计算坯件在已设计好的弯曲模上作试弯曲。然后经过修正，将正式的坯件确定下来就可以得到最近于要求尺寸的制件。因而首先要进行弯曲模的设计制造。

(3) 选取比弯曲力吨位稍大的设备，对与此相适应的模具大小、高度、行程长度等等作出考虑。特别是为了保证尺寸必须设计矫正模的某些场合，此矫正模就要做得既结构简单又要牢固可靠，能够承受足够大的压力。

(ii) 坯件的定位 坯件的定位必须能迅速而准确地进行。坯件应尽可能水平放置，并要考虑到下列诸点：

(1) 尽量利用制件上的孔。万一制件上的孔不能利用，则在坯件上开工艺孔。图 3.104 是以坯件的外形作粗定位，并用凸模上的导正销作精定位的方法，它适合于平而厚的板料的弯曲，制件的精度好生产效率也高。对于采用外形定位困难或为薄板件的场合，就象图 3.105 那样，利用设在压力垫上的导正销，但此时凹模与压力垫之间不允许有错移存在。对作过拉伸的盘类制件进行弯曲时，在拉伸时就要在制件上无关紧要的地方象图 3.106 那样用翻边的办法开出工艺孔，进而利用此工艺孔定位。

(2) 选取弯曲加工中不发生变形的部位定位。在万不得已要使用发生变形的部位作定位时，要有不妨碍材料移动的结构，图

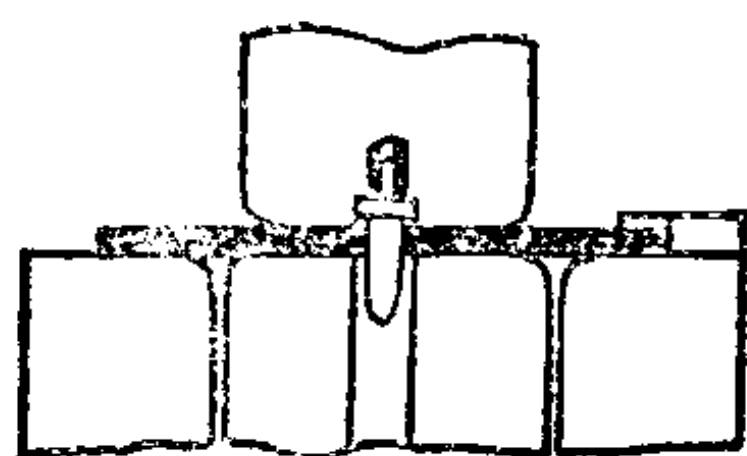


图 3.104

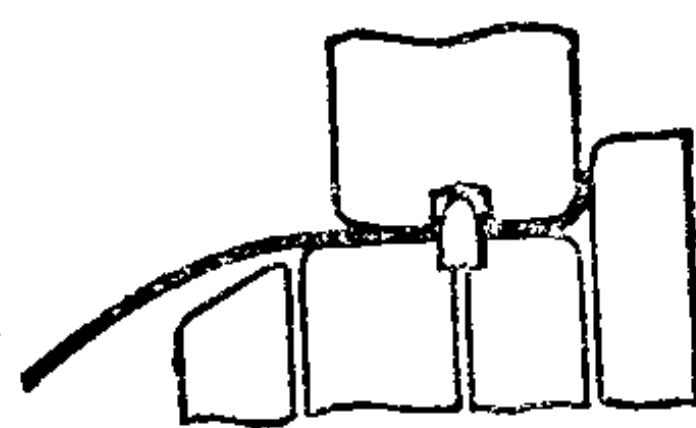


图 3.105



图 3.106

3.107所示即为一例。

(3) 当工艺上要求多道工序时,各工序要有同一定位基准。

(4) 当为厚板的场合,要特别注意使定位板不致与端面的毛刺相干扰。

(iii) 坯件的压紧装置

(1) 下模 在外形尺寸很大的场合下,应尽可能利用压力机的气(液)垫(压力垫)。与弹簧相比,气垫易于获得较大的行程;产生强有力而且在工序中是恒定的压力,但其缺点是受所用压力机类别的限制,且在模具的安装调整上麻烦一些。当压力垫(板)为浮动的时,由于弹力作用就有飞出的危险,因此必须象图 3 108 那样设置限程装置。此时,当气垫向上到极限位置而限程装置又不具备间隙则将损坏模具。在弯曲小件时,可以使用专门的弹簧式压力垫,有时也兼作定位之用。

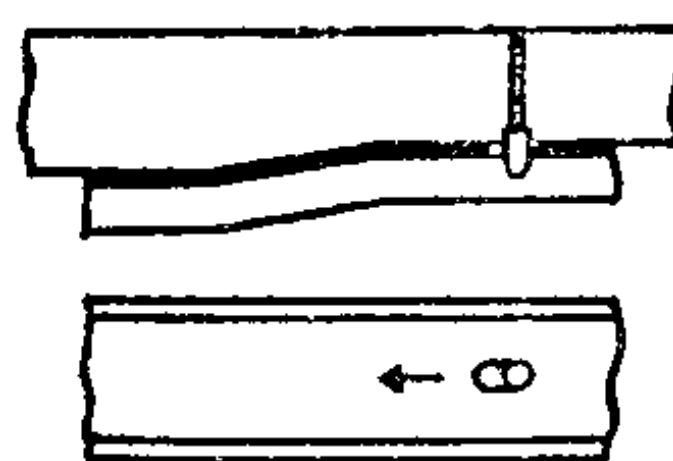


图 3.107

(2) 上模 通常是图 3.109 那样的弹簧压料装置。要将制件的斜面压住时,就要考虑承受横向推力的平衡装置。另外,如果在薄而窄的面积上压料,由于容易在制件上造成伤痕,所以也要予以注意。

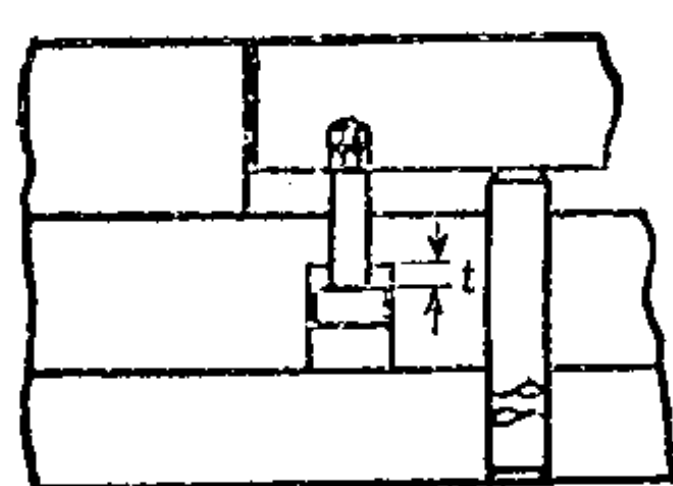


图 3.108

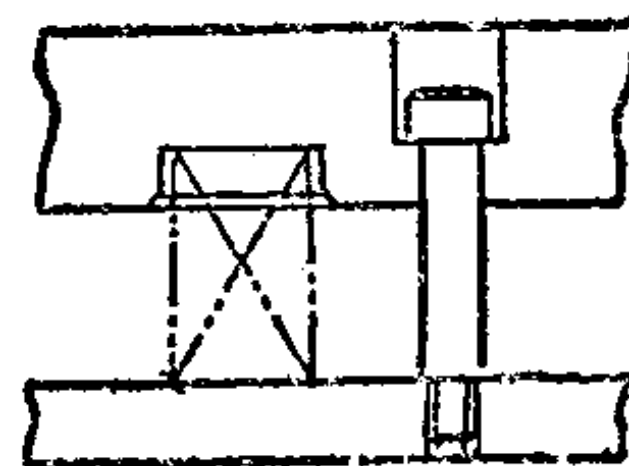
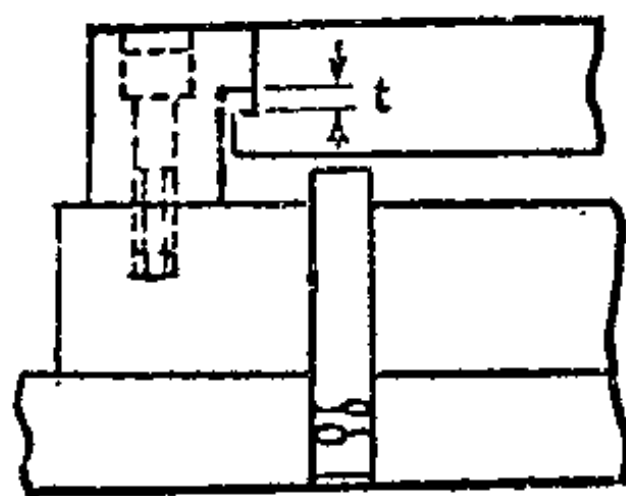


图 3.109

(iv) 制件的取出装置 制件的取出必须能迅速安全地进行, 通常使用顶出装置、压缩空气吹出装置等。弹簧式顶出装置多与压料装置并用。

(v) 注意操作者的安全 注意力不仅限于压力机的安全装置, 而且也要避免在模具以及板厚不同等情况发生危险; 操作者的手不能进入危险区域也要予以充分注意。

(vi) 模具的标准化 与其它类型的模具一样, 弯曲模也要尽可能作到标准化。

(vii) 其它

(1) 薄板小批单件生产时, 模具材料用普通铸铁。但在大量生产时, 要在凹模或凸模的工作部分镶上经淬火处理的 SK3 或 SKS3 一类工具钢。工作部分的硬度希望大于 HRC 60。当工作表面不是磨削得十分光洁平滑时就成为拉伤制件等缺陷的原因。

(2) 凸模和凹模的间隙取制件板料厚度允差的最大值。

(3) 在模具上镶装工具钢的地方, 与制件相接触的部分(特别是与凹模等相接触的地方), 紧固螺钉的孔要尽可能不出现在其表面之上。

(4) 弯曲线的周围, 如果没有足够的成形区, 就不能准确地获得制件所要求的形状。

3.3 板料的滚弯〔81~88〕

3.3.1 概述

滚弯是由 2~4 个辊轮在送进板料的同时作连续弯曲加工的方法, 与压弯和折弯相比, 一般说来滚弯的弯曲半径是相当大的, 总的来看制件(某一截面上)的曲率相等, 也就是说, 滚弯工艺被广泛地用在圆筒形、局部圆筒形、圆锥形、部分圆锥形等零件的加工制造之中。此外, 由于可相对于板料的送进量将辊轮的位置作适当的变化, 所以也可以制作四边形、椭圆形, 以及其它非圆断面的筒形件〔89〕。除此之外, 还可以用于圆筒形或非圆断面的筒形件的凸缘加工以及由带料制作异形环、型材的弯曲加工等。

根据情况，还可以用于宽平板的小曲率复杂曲面的成形，是一种用途极广颇有潜力的加工方法（参照图3.110）。在本节，仅就基本的由板料所作的圆筒成形或圆锥成形予以论述。

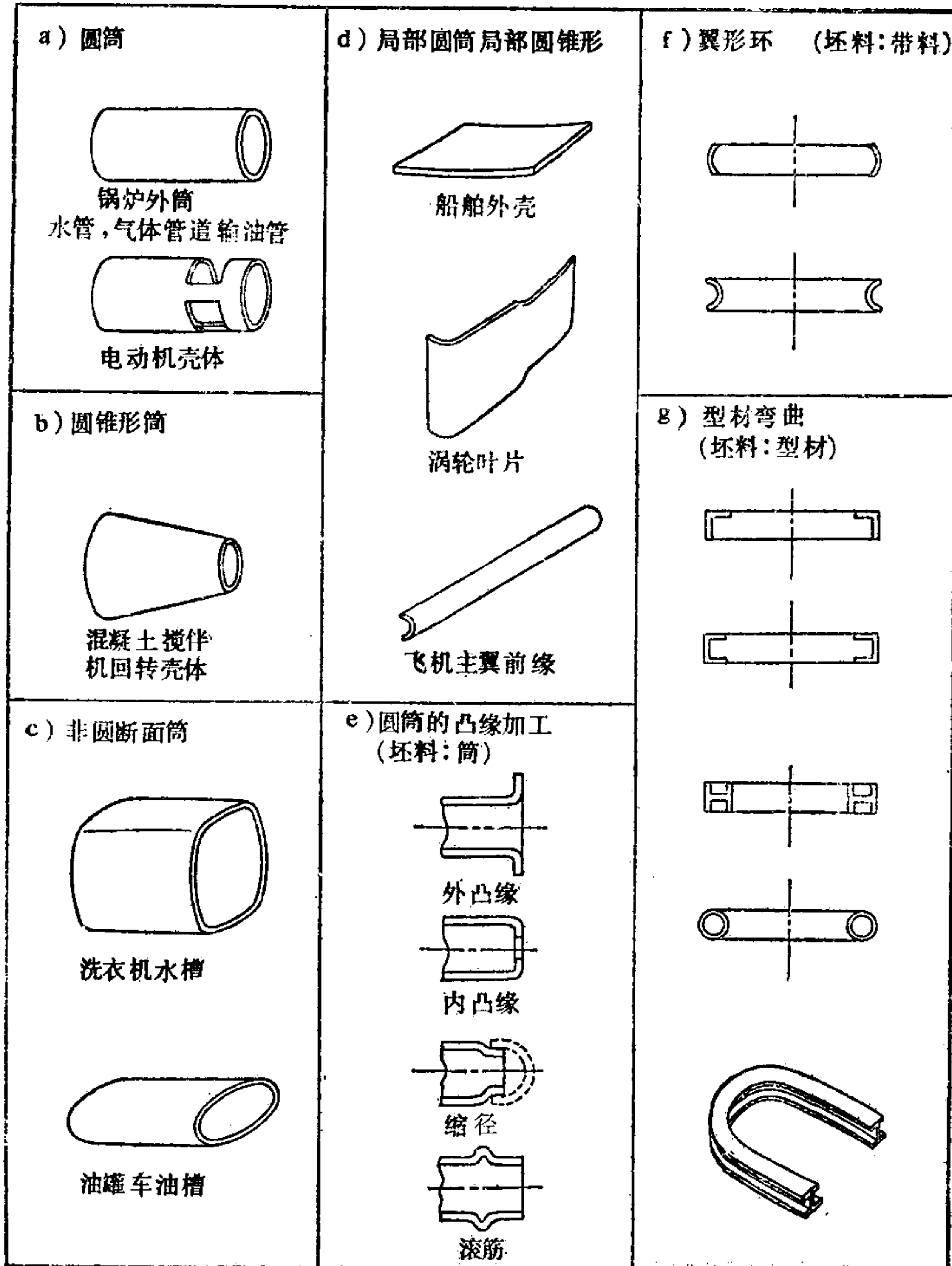


图3.110 滚弯制件的实例

3.3.2 辊式弯板机

a. 辊式弯板机的分类 用于滚弯的设备称为辊式弯板机

(bending roll) 或滚弯机 (roll bender, roll bending machine)。辊式弯板机大致分为：只用刚性辊轮的三辊或四辊弯板机以及用刚性辊轮和弹性辊轮的二辊弯板机两种类型。就其弯曲机构而言，三辊弯板机和四辊弯板机没有本质的差别，只是后者有多方面的使用性能，方便一些，而前者由于价格便宜所以被广泛采用。

如图 3.111 所示，按照辊轮的配置方式，三辊弯板机和四辊弯板机大体分为角锥型和夹紧型两大类。角锥型象图 b) 那样，是使位置固定的两个上下辊轮作回转运动并送进板料，以置于其中心位置的上辊轮的压下量来决定板料的曲率。至于夹紧型 c)，是在上下并列的两个辊轮之间送进板料，使下面的辊轮向上推并压紧板料之后，使上辊轮回转将板料向前送进的同时，由另一个辊轮（侧辊轮）进行弯曲。d) 是将上下辊轮于左右方向稍微错开的一种结构。e)、f) 是使角锥型的两个下辊轮分别可作上下移动从而兼有角锥型和夹紧型两种性能的结构，被称之为夹紧-角锥型结构。g) 可用在图 3.110 所示的部分圆筒形零件的制造上面，这种场合，就没有必要象整圆筒成形用的弯板机那样为取出成形后的圆筒，要求上辊轮某一侧的轴承具有可拆卸性。而且，由于弯板的曲率一般都不大，所以上辊轮结构上，允许在上面作支承以增大弯曲刚性，就可以用非常细长的辊轮制造弯曲线很长的零件。此外，这种结构的弯板机，象图 g) 右边的那样，在上下辊轮之间装上适当的模具也就可以作为压力机使用。h) 是在角锥型的三辊弯板机的一侧加上一个斜动辊轮，借使此附加辊轮作向图上的虚线位置的移动，也就可以当作简单的矫正设备使用。i) 是在对向夹紧型的三辊弯板机的一侧再加上一个辊轮的结构。j) 象图 3.112 所示，是随着辊轮配置方式的变更，既可作为夹紧型、角锥型的两种三辊弯板机，又可作为矫正设备中的任何一种来使用的结构形式，这一形式虽说价格昂贵但使用范围很广。k) 是立式三辊弯板机。l) 是用于小型圆锥形件制造的夹紧型三辊弯板机，使用的是圆锥形辊轮。但是，锥形圆筒的成形，多由用普通圆柱形辊轮的三辊或四辊弯板机来制作。

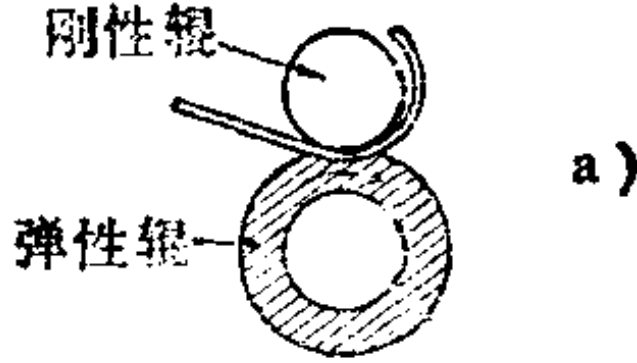
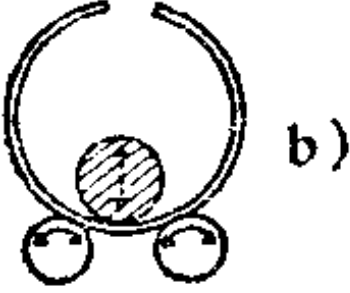
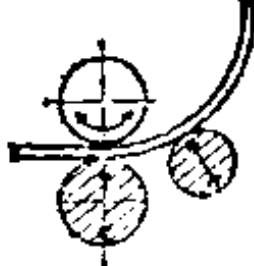
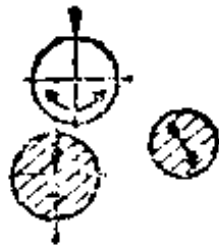


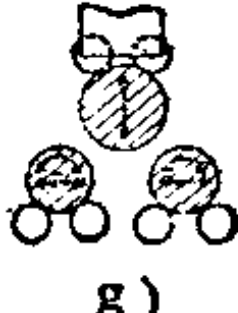
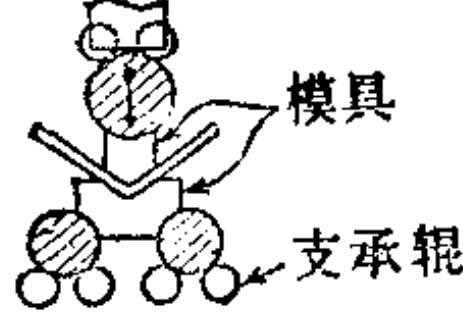



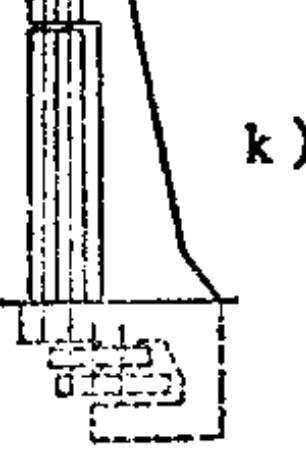
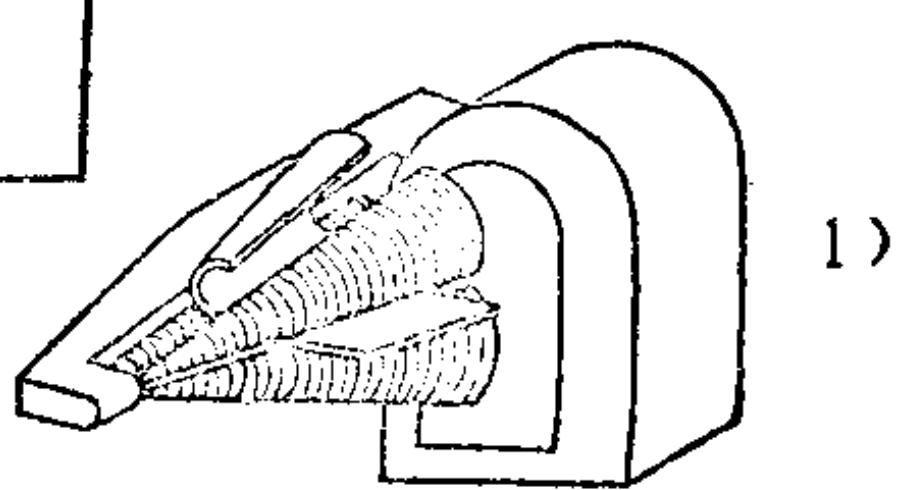
<p>二辊</p>	 <p>a)</p>
<p>三辊</p>	<p>角锥型  b)</p> <p>夹紧型</p> <p>对向型  c) 对向型</p> <p>偏置型  d) 偏置型</p> <p>复合型</p> <p>e)  e)</p> <p>f)  f)</p> <p>两端开启的成形件用 (造船、飞机等)</p> <p>g)  g)</p> <p>模具  支承辊</p>
<p>四辊</p>	<p>复合型 (兼作矫正设备用)  h)</p> <p>夹紧型  i)</p> <p>万能型  j)</p>
<p>立式滚弯机</p>	 k)
<p>圆锥滚弯机</p>	 l)

图3.111 辊式弯板机的类型

图 3.111 中, 用斜线箭头表示可动辊轮的移动方向, 用弧形箭头表示驱动辊轮的回转方向, 但是辊轮的驱动方式和移动方法是多种多样的, 不必受此图所示的限制。一般地说, 虽仅对固定辊轮作回转驱动, 但为了送进板料准确还是以驱动所有的辊轮为好, 对于以薄板弯曲为对象的设备更是如此。辊轮的移动, 通常用电动或液压来实现, 可是小型滚弯机也有用手动的时候。动力驱动的滚弯机的加工能力, 用可加工的最大板料宽度和最大板厚表示, 但是, 手动滚弯机则多用辊轮长度和辊轮直径表示〔89〕(参照表 3.7)。

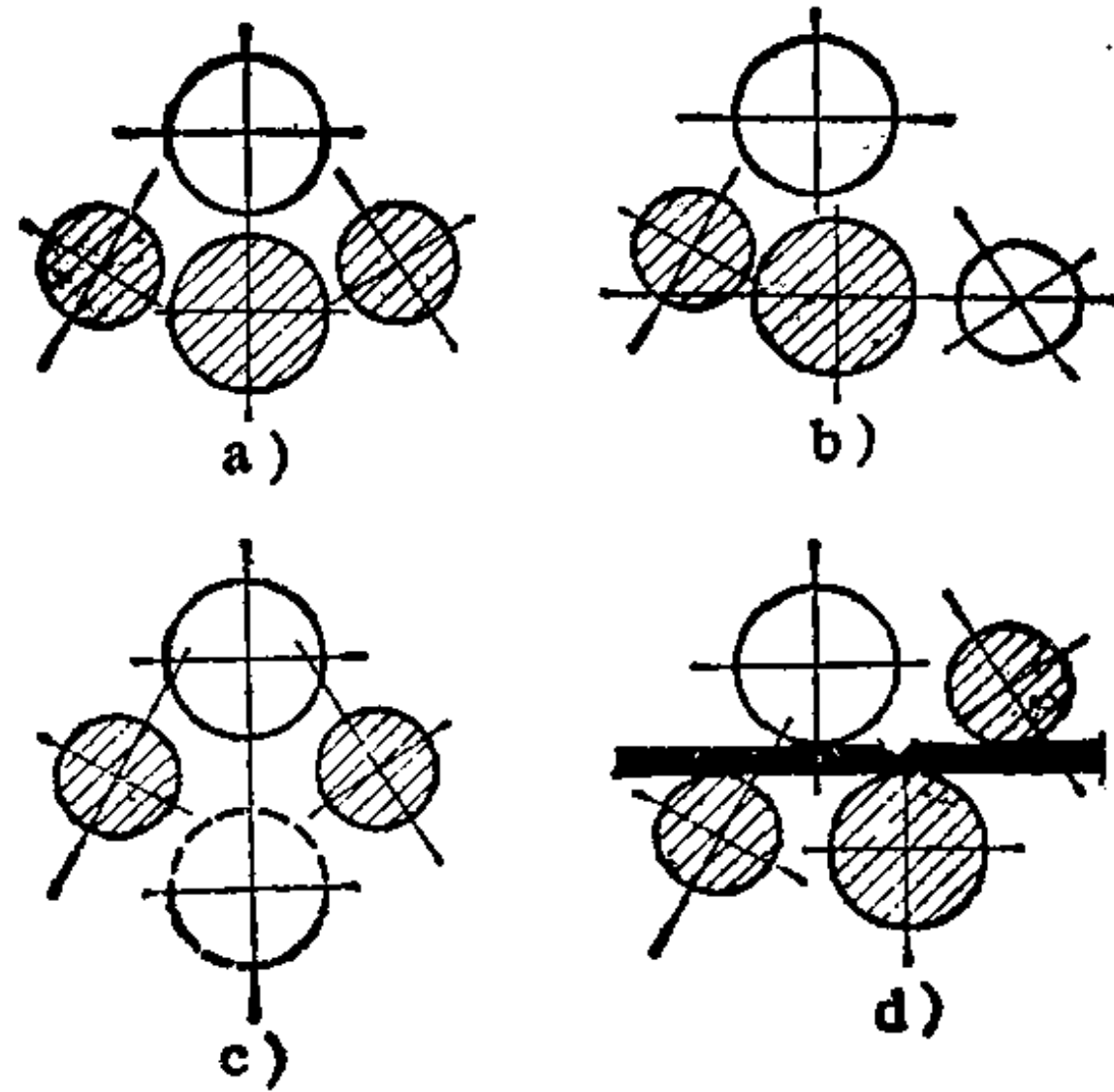


图3.112 万能四辊弯板机的辊轮布置方式

b. 立式滚弯机和卧式滚弯机〔82〕

(i) 滚弯机 (图 3.111.k) 的优点

(1) 所加工板料的自重由水平床身或导向辊轮支承, 而不象卧式滚弯机那样对大尺寸板料必须使用可倾式导向装置和起重机。

(2) 设备本身占地面积小。驱动马达通常放在床身的下部。而且也不必象卧式弯板机那样为了取出所加工的制件需在设备之外占据一定的面积。

(ii) 立式滚弯机的缺点

(1) 要从辊轮上方取出加工后的制件, 车间的屋顶和起重机的轨道就必须有足够的高度。

(2) 不论是对何种长度的筒形件作弯曲加工, 弯曲过程都是在辊轮的下面部分进行, 因此, 除了接近于辊轮全长的筒形加工外, 由于辊轮挠度的影响, 于是在筒形件的上端和下端辊轮的中心间距就各不相同, 所以容易形成带锥度的筒形制件。卧式滚

表3.7 角锥形三辊弯板机的规格〔90〕

能力 板厚×板宽 (mm×mm)	辊轮		电动机			速度		设备重量 (tf)	外形尺寸 (m×m×m)
	上辊直径 (mm)	下辊直径 (mm)	辊轮驱动电 机 (kW-P)	辊轮升降电 机 (kW-P)	辅助电 机 (kW-P)	弯曲速度 (m/min)	辊轮升 降 速度 (mm/min)		
30×3100	450	360	40-10	20-8	1.5-4	4E-7	100	29	8.4×2.0×3.2
32×3600	500	300	50-10	30-10	2.2-6	4E-7	100	38	9.5×2.3×3.5
35×3100	490	380	50-10	30-10	2.2-6	4E-7	100	34	8.8×2.2×3.4
38×3100	500	400	60-10	30-10	2.2-6	4E-7	100	35	9.0×2.3×3.5
40×2000	410	320	50-10	30-10	2.2-6	4E-7	100	20	6.8×1.9×2.9
40×4000	580	340	75-10	40-10	3.7-6	4E-7	100	53	10.8×2.6×4.1
45×3600	560	340	100-10	40-10	3.7-6	4E-7	100	47	10.2×2.5×3.9
50×3600	600	360	100-10	60-10	3.7-6	4E-7	100	54	10.6×2.7×4.2
55×4000	670	400	125-10	75-10	3.7-6	4E-7	100	70	11.8×3.0×4.7
65×4000	750	450	150-10	75-10	5.5-6	4E-7	100	88	13.3×3.6×5.6

弯机加工时，板料原则上置于辊轮的中间位置，则无此问题。

(3) 对薄板作大直径弯曲时，即使用了导向辊轮，由于板料下端面和工作台之间的摩擦作用，制件的曲率精度也要降低。

(4) 为了对加工后的筒形件作缝焊等其它加工，须进行将筒的轴线转换到水平方向的附加作业。

(5) 圆锥弯曲时板料的操纵是困难的。

由于卧式滚弯机除具有上面所包含的优缺点外，还有制件易于检查等优点，所以除了特殊情况之外，卧式滚弯机比立式滚弯机的应用范围更为广泛。

3.3.3 三辊弯板机和四辊弯板机的弯曲成形[⊖]

a. 端部弯曲〔82~84、91〕 用辊轮将平板料弯曲成圆筒形时，在弯曲（板料）的首端和末端，由于板料的弯曲变形不足，所以就象图 3.113 那样，在板料的两个端部残留下平直部分（将此部分称为平直段）。为了获得正圆断面的弯曲件，必须作端头弯曲。关于端部弯曲，可用下列各种方法。

(i) 使用端部弯曲模 滚弯加工之前，先由装有图 3.114 那样具有一定曲率的一付模具的压力机或弯板机，对板料的两个端部作弯曲。

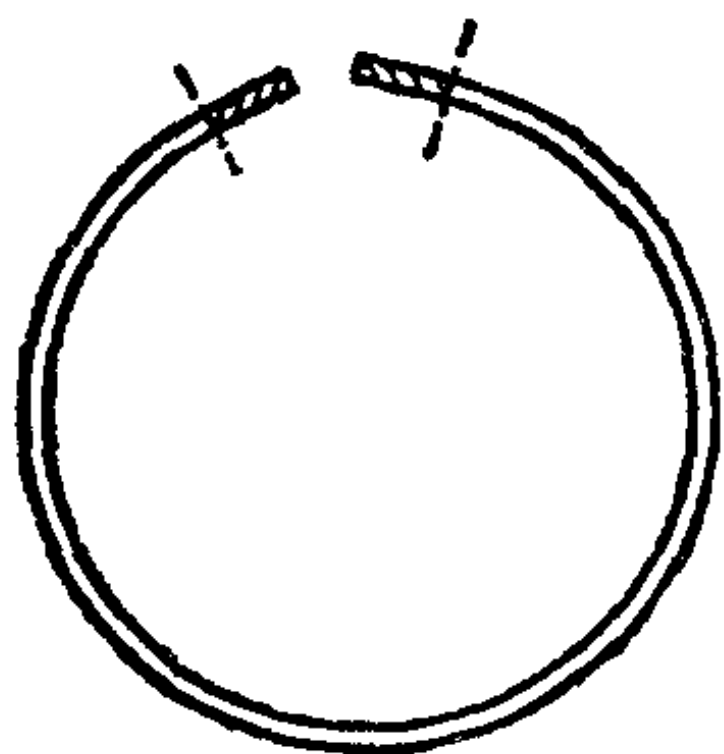


图 3.113

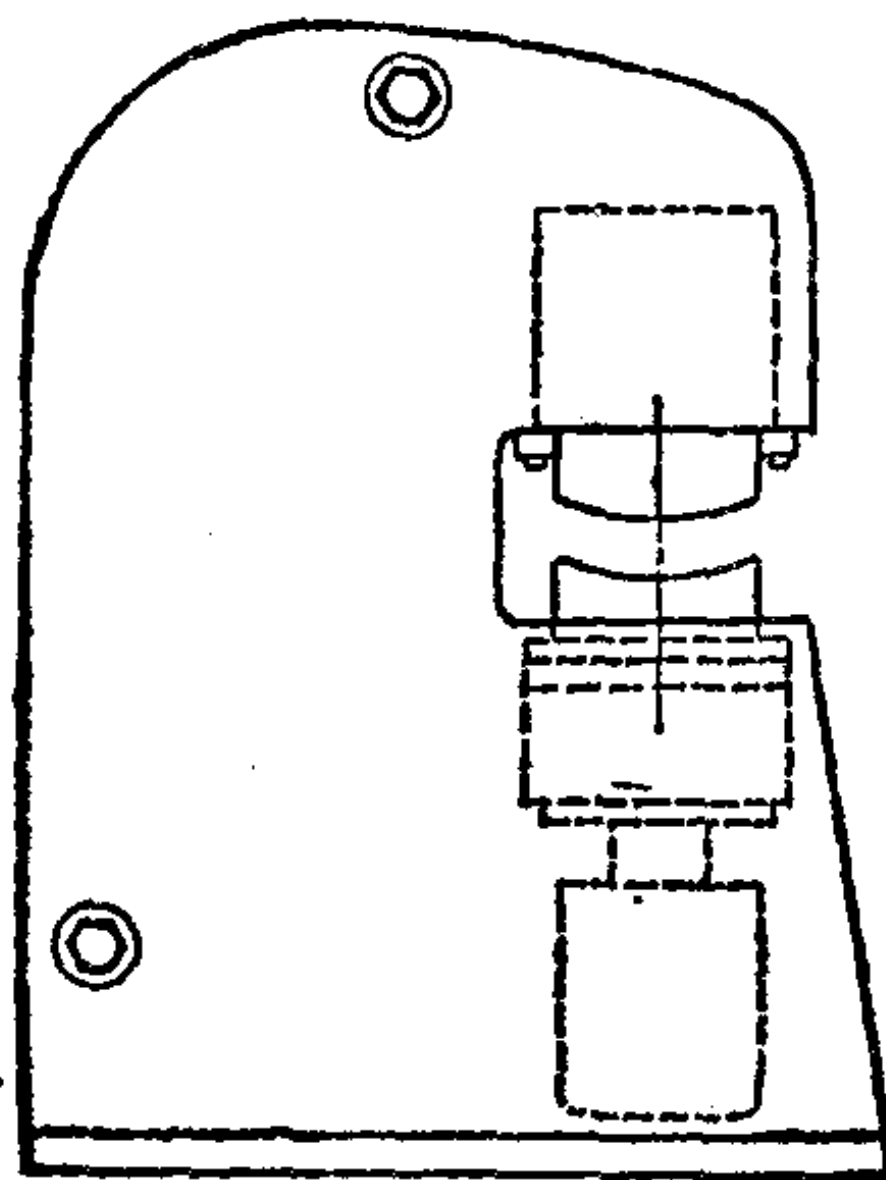


图3.114 弯头压力机

⊖ 关于三辊弯曲中，板料变形的理论分析，原文的参考文献〔81〕中有详细论述（曾田、小西）。

(ii) 使用端头滚弯机 如图 3.115 那样, 端头滚弯机是在所需长度上隔开布置着的两对辊轮之间使板料的两端通过并进行弯曲的加工方法, 为使两对辊轮适合板料的长度, 可用改变机架间距的办法来实现。

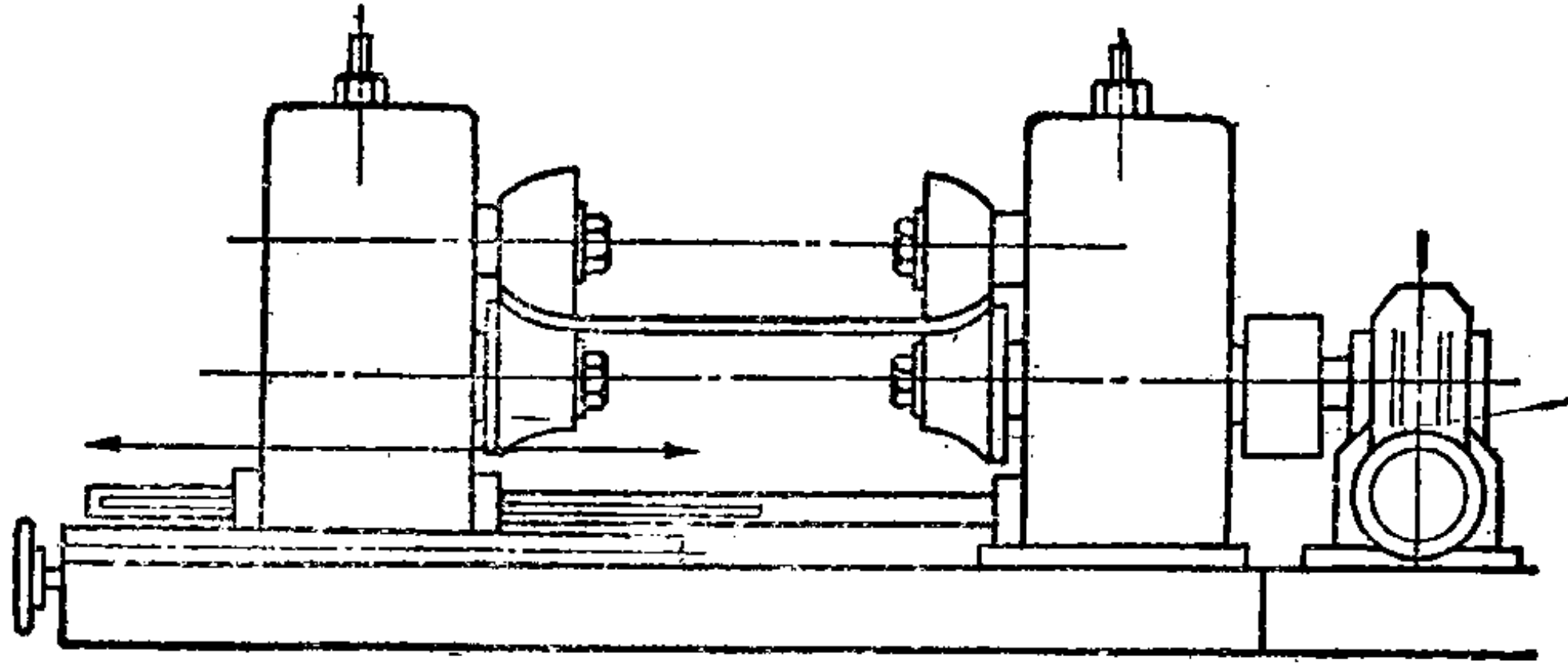


图3.115 端头滚弯机

(iii) 用夹紧型辊式弯板机弯曲端部〔82~84、91、93〕 如图 3.116 所示, 开始, 将侧辊轮 3 置于下面的位置, 把板料从左边送入进而在两夹持辊轮之间板料端部被牢牢夹住。接着, 使侧辊轮上升, 板料的右端即弯曲至所要求的曲率。在将板料取出并转移至夹紧辊轮右侧的同时, 变换板料的方向使左端换到右端, 将侧辊轮 3 固定在所要求的弯曲加工位置之后, 此时, 从右边先从弯曲过的一端将板料送入夹紧辊轮, 就这样使其全部通过为止, 弯曲即进行完毕。除此以外, 也有预先定出两夹紧辊轮的间隙等于板料厚度并使侧辊轮上升固定在适当位置之后, 再使辊轮回转, 从左边插入板料直到弯曲过的端部从夹紧辊轮中稍稍出来一些为止, 以对板料的右端作端头弯曲之后使其后退再取出来的方法。并且, 也有以上述方法对板料的两端作端头弯曲的情况。

也可以用夹紧型-角锥型三辊弯板机的角锥型部分当作端头弯板机使用, 其原理如图 3.117 所示。通常, 夹紧型三辊弯板机所加工的制件的平直部分长度约为角锥型弯板机加工件的 1/6 左右。

在夹紧型四辊弯板机以一次通过来实现弯曲的场合下, 比如

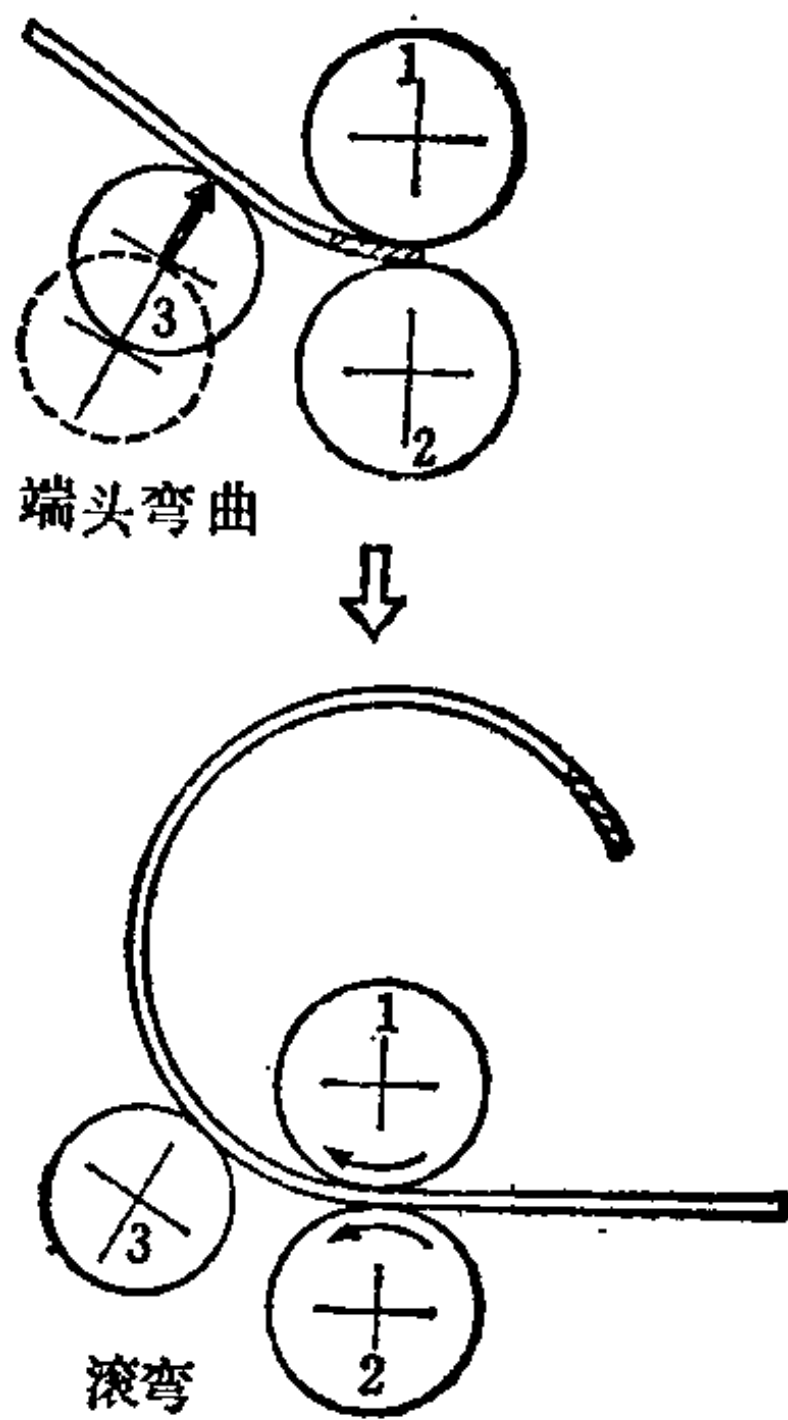


图3.116 用夹紧型三
辊弯板机作端头弯曲

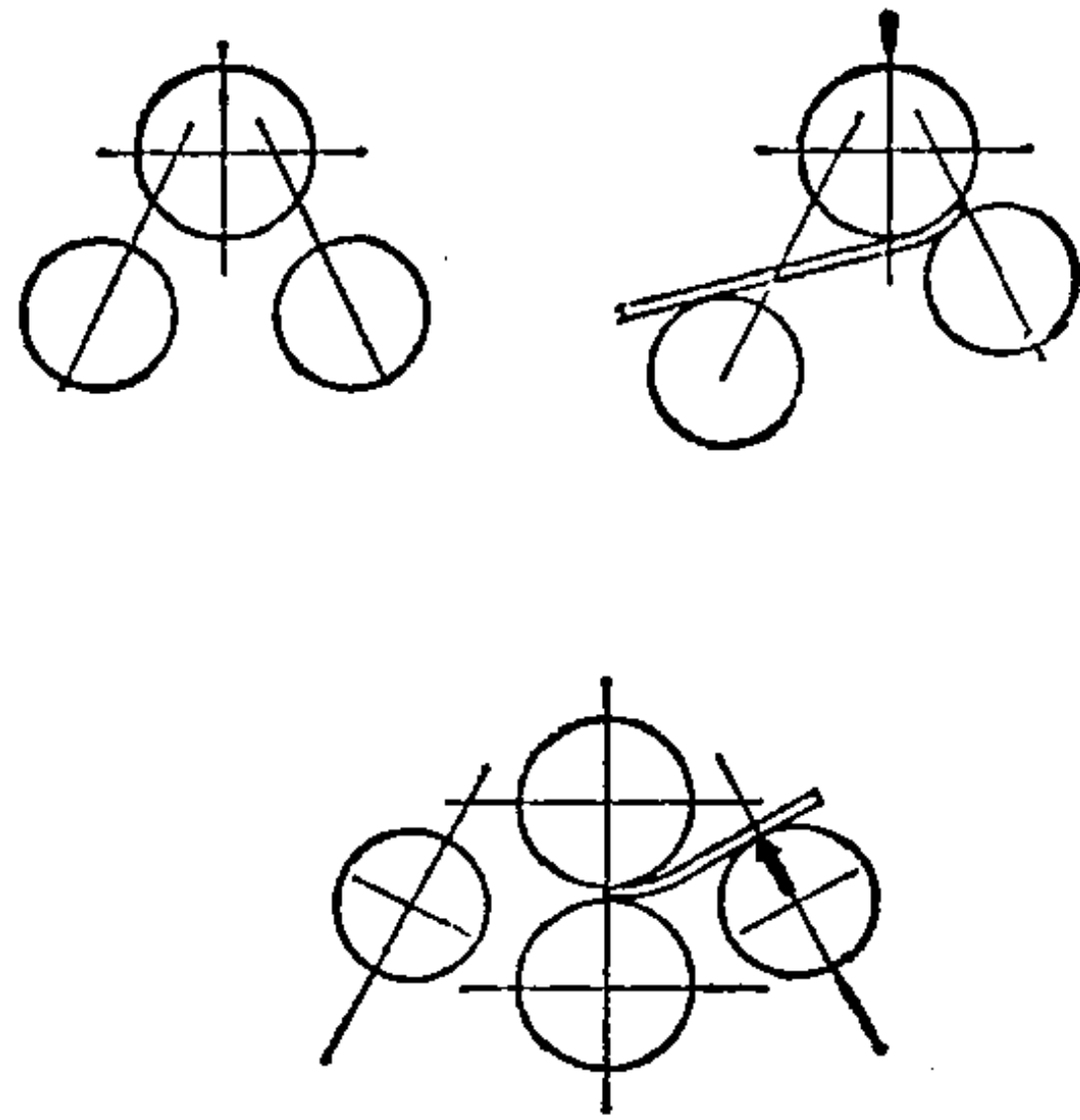


图3.117 用夹紧型-角锥型三
辊弯板机和夹紧型四辊弯板机
作端头弯曲

说,首先从右边插入板料,由上下夹紧辊轮和右侧辊轮以同于夹紧型三辊弯板机的原理对板料左端作端头弯曲后,降下右侧辊轮,使左侧辊轮上升至要求位置之后,驱动夹紧辊轮并将板料向左送进,利用两夹紧辊轮和左侧辊轮的作用即使弯曲得以完成。在经由几次通过进行弯曲的情况下,作过上述那样的左端端头弯曲之后,将两个侧辊轮下降到与下夹紧辊轮同一水平面上,进而将板料向左送进直至板料的右端正好处在被两夹紧辊轮夹住的位置,再将左侧辊轮推上去进而对板料的右端作端头弯曲。象这样完成了两端头弯曲之后,再顺次将左右两侧辊轮升起,将板料向左右交替送进就可以进行弯曲。总之,如果与夹紧型三辊弯板机比较,夹紧型四辊弯板机省去了将板料用起重机吊起来从辊轮的一侧转移至相反的一侧以改变板料方向的手续,提高了效率。

图 3.118 所示的角锥型 3 辊弯板机,是在两个下辊轮之间放进了可作上下运动的压料板,从而有作端头弯曲可能的一种结构〔92〕。用此设备,首先将板的一端牢牢地夹在压料板和上辊轮之间,接着把一个下辊轮推上去作端头弯曲,再将压料板退回使

下辊轮回转并在送进板料之后即对另一端以同样方法进行弯曲。在此之后，退回压料板进行一般的圆筒形弯曲。

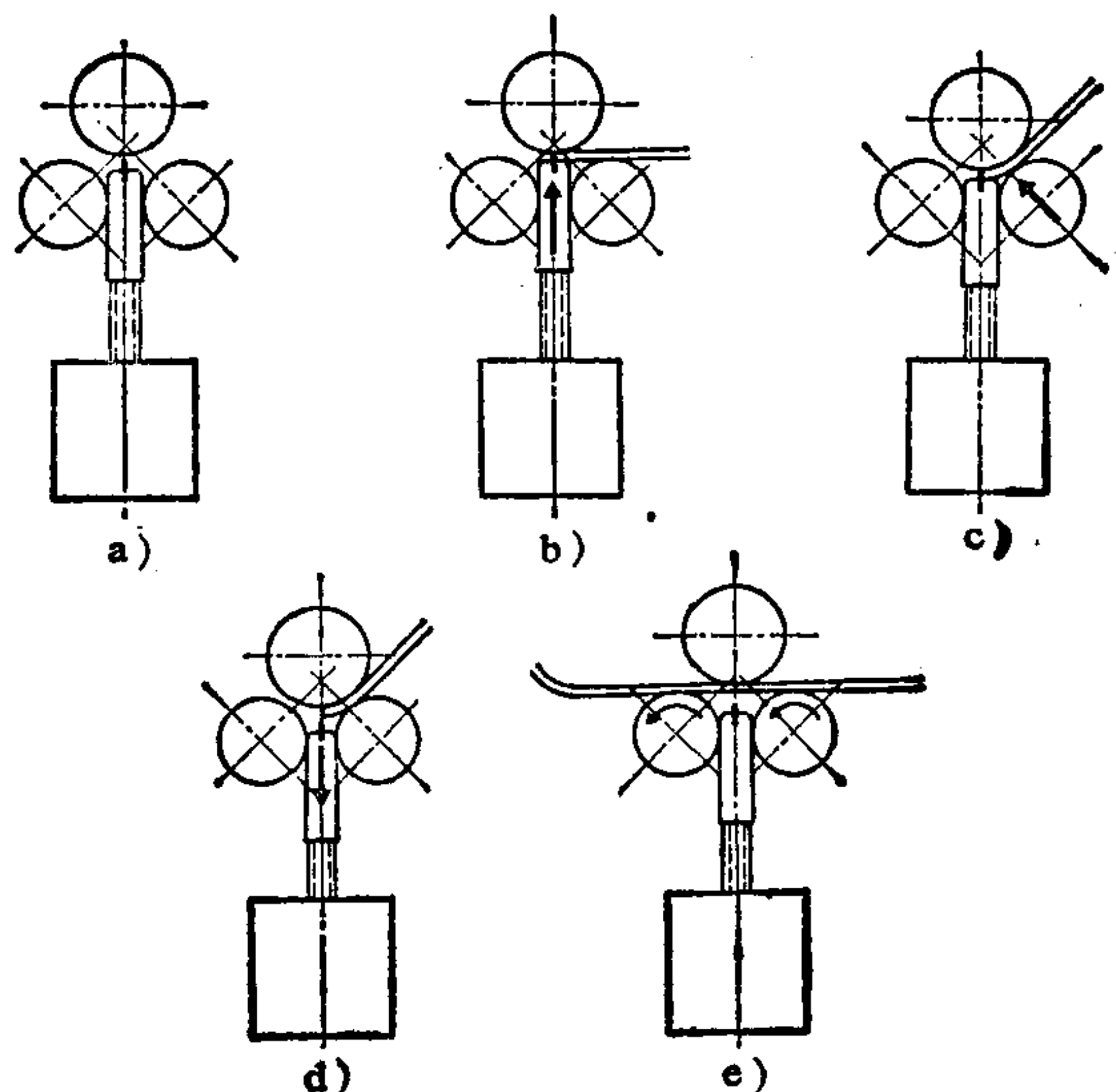


图3.118 具有端头弯曲用压料板的三辊弯板机

b. 辊轮的挠度和板料的桶状变形 滚弯加工之后，制件不能变成为直圆筒，而是在中间部分形成鼓凸状的桶形(图3.119)。这种现象是由于弯曲加工时板料的变形抗力致使辊轮产生挠度，因而在圆筒中间部分出现辊轮的中心间距大于两端的現象，弯曲半径越小越容易发生这种现象，就是以相同的半径弯曲，加在夹紧型三辊弯板机辊轮上的力也大于加在角锥型三辊弯板机辊轮上的力，所以夹紧型三辊弯板机辊轮的挠度也要大一些。

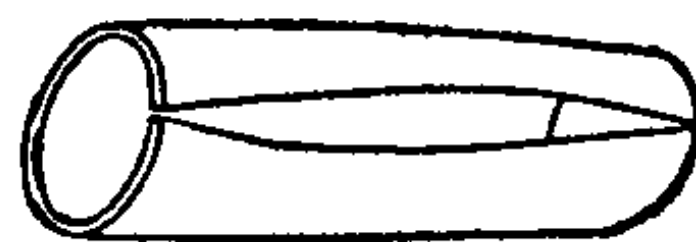


图3.119 滚弯件的桶状变形的桶状变形

为了防止桶状变形，就有把辊轮中部做得粗一些的结构形式，并将此结构叫做“凸面辊”。但是，这种方法，仅对特定尺寸范围内的板料才是有效的。

作为防止辊轮挠曲的方法，可使用支承辊，然而，对于成形

后的工件完全包住上辊轮的情况支承辊是不能使用的，所以仅用这种方法就不能制作太长的筒形件。可是，当辊轮长度为直径的8倍以上时，通常就要对下面或侧面的辊轮设置支承辊。对于图3.111 g) 那种作部分圆筒形加工的专用滚弯机，就常常采用在整个细长的工作辊上配置多个支承辊的方法。对于具有长工作辊的滚弯机，可以使用象图3.120那样的活动支承辊，并且，当采用此类设备而板料宽度不大时，就有可能大幅度地增加滚弯加工的板料厚度。

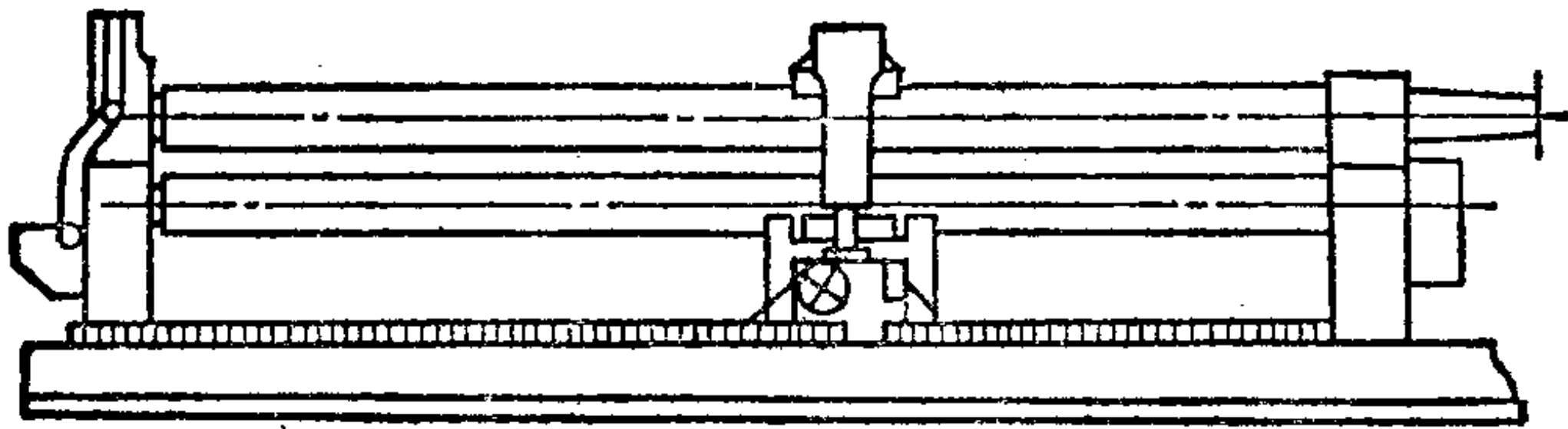


图3.120 活动支承辊

对于细长管件成形用的滚弯机，为消除加工中辊轮的挠曲，就采用预先在辊轮上给出与变形方向相反的挠度。图3.121 a)就是对上辊轮施以挠曲的情况，上辊轮的两端超出轴承进一步向外

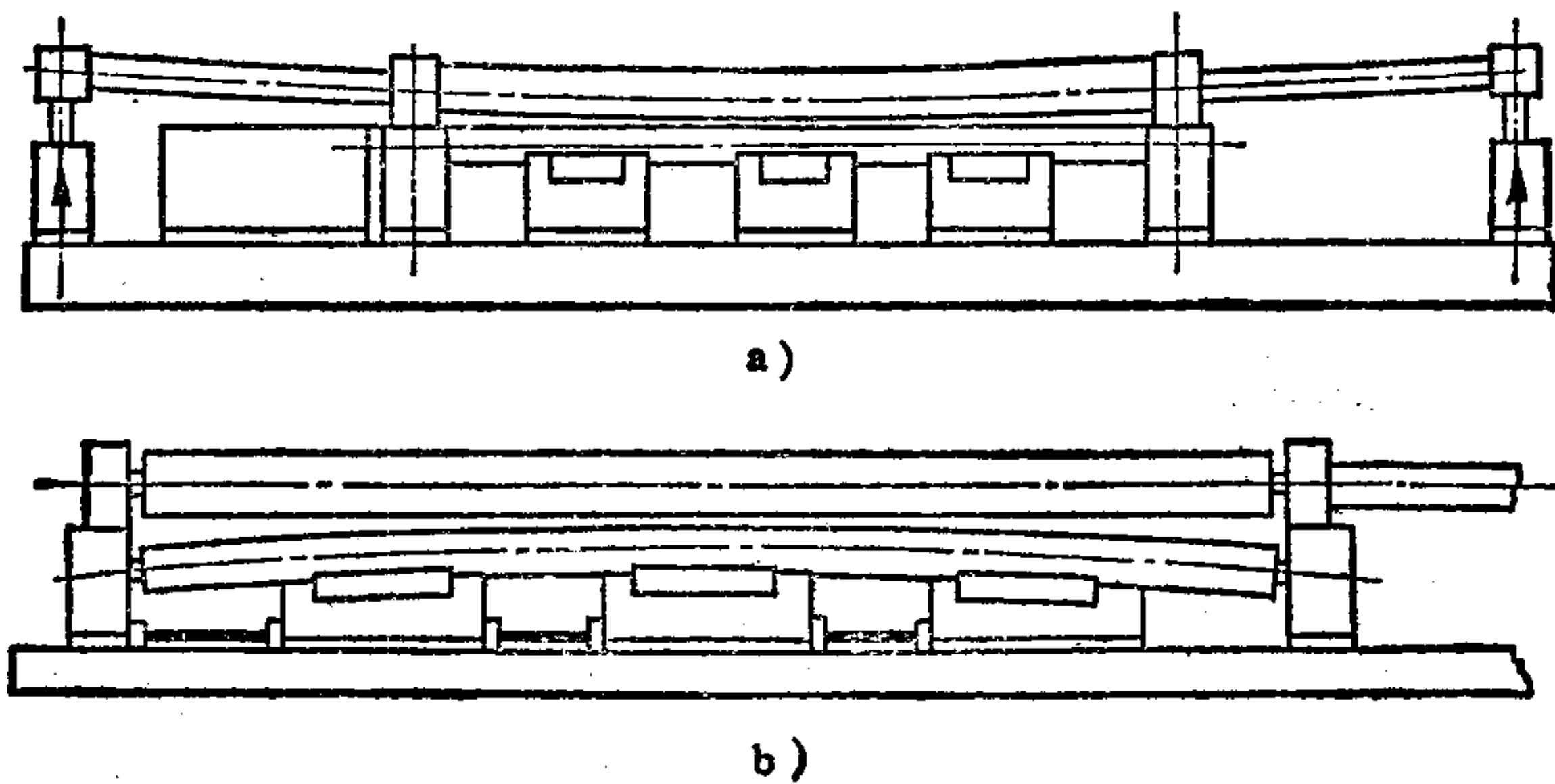


图 3.121

a) 预载荷型滚弯机 (上辊预载荷) b) 预载荷型滚弯机 (下辊预载荷)

延伸,在其端部利用油压施加向上的作用力从而在辊轮上造成向下凸起的翘曲效果。如果采用这一方法,就有可能相应于板料的材质、尺寸以及弯曲半径给出要求的翘曲量。同一图上的(b)是用分离的支承辊在下辊轮上造成任意上凸翘曲的方法。

c. 圆锥形筒的成形〔82~84、94〕 在辊轮的两端轴承可作分别位移的特殊的角锥型滚弯机上,可在辊轮两端变化上辊轮相对于下辊轮的送进量,或是将两个下辊轮张开成“八”字形,或者是将这两种方式合并使用,而对于夹紧型滚弯机则是使侧辊轮相对于两夹紧辊轮而倾斜。板坯系预先切成将成形圆锥筒予以展开的扇形。为使成形得以准确进行,加工中板坯必须围绕扇形中心回转,因此,板坯在辊轮轴线方向就不能有所偏移,垂直于辊轮轴线方向板坯的送进速度必须与从圆锥顶点算起的距离成比例。但是,当其为圆柱形辊轮时,辊轮的圆周速度在轴向是一致的,因此,如果辊轮和板坯之间不出现滑移,这一条件就不能得到满足,仅仅是使辊轮倾斜,板料就不能充分地回转。作为解决这一问题相应的措施,通常是象图 3.122 所示那样,在靠近辊轮端部的位置设置一个杆件,限制坯料内侧边缘的运动。至于薄板时,就是不使辊轮倾斜,只是以此制动措施也能得到正圆断面的锥形件。如果在板坯上画出数条圆锥形母线,那么,通过观察加工过程中母线与角锥形滚弯机的上辊轮与夹紧型滚弯机的夹紧辊轮是否平行接触,就能起到判断成形效果好否的作用。

也有使用图 3.123 那样的特殊装置以确保板坯准确地送进〔94〕。

还有一种圆锥筒成形用夹紧型四辊弯板机〔94〕,其各辊轮是由与各辊轮轴滑动配合的数个外径相同的短圆柱所组成。在这种滚弯机上,仅仅是上下夹紧辊两端的小滚柱,才以对应于成形圆锥筒尺寸而互不相同的回转速度驱动,而两夹紧辊中间和两侧辊上的小滚柱则是自由回转的。

备有图 3.111 1) 那样的圆锥形辊轮的大型设备也在发展之中〔94〕。

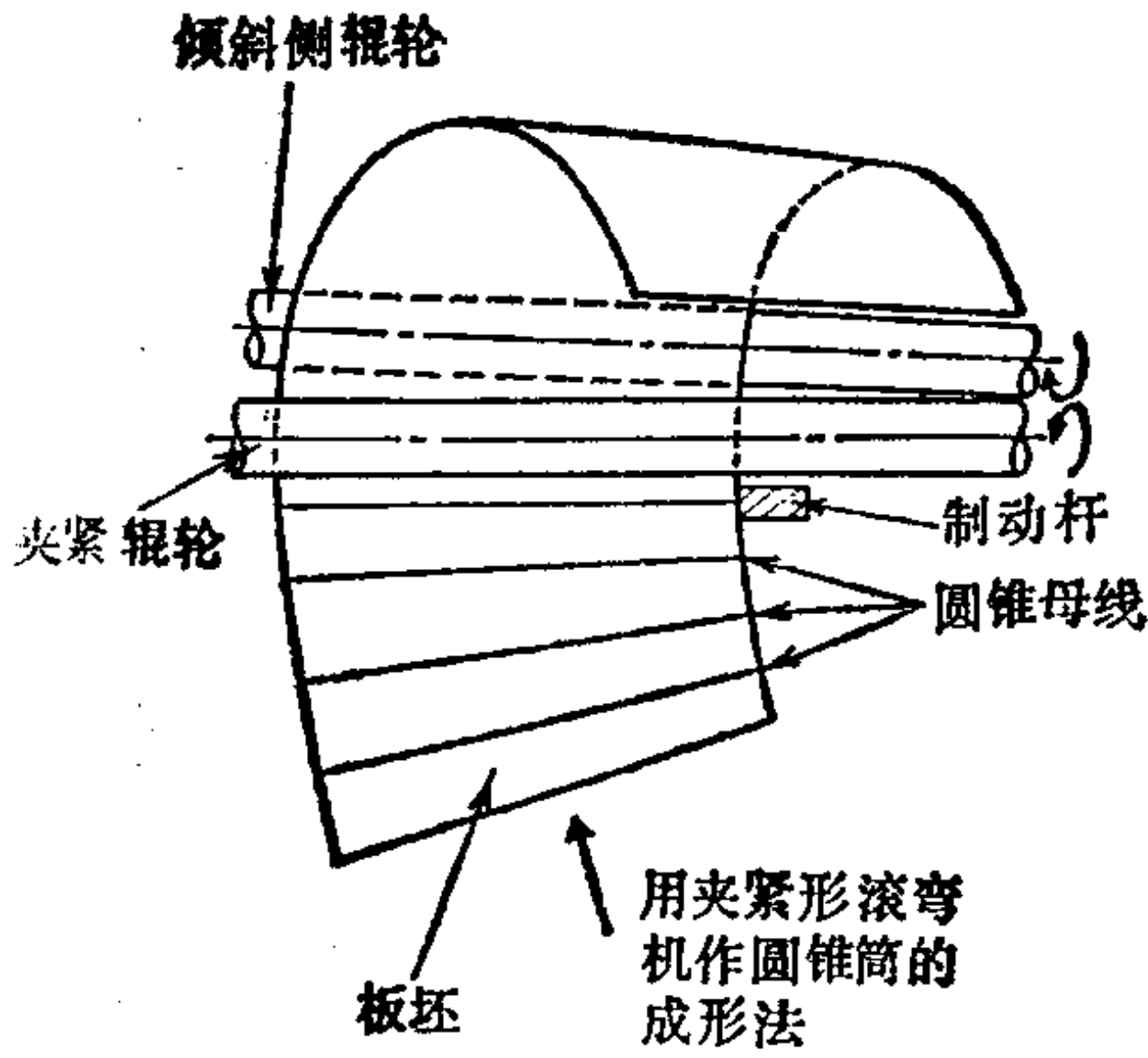


图3.122 用夹紧型滚弯机作圆锥筒的成形法

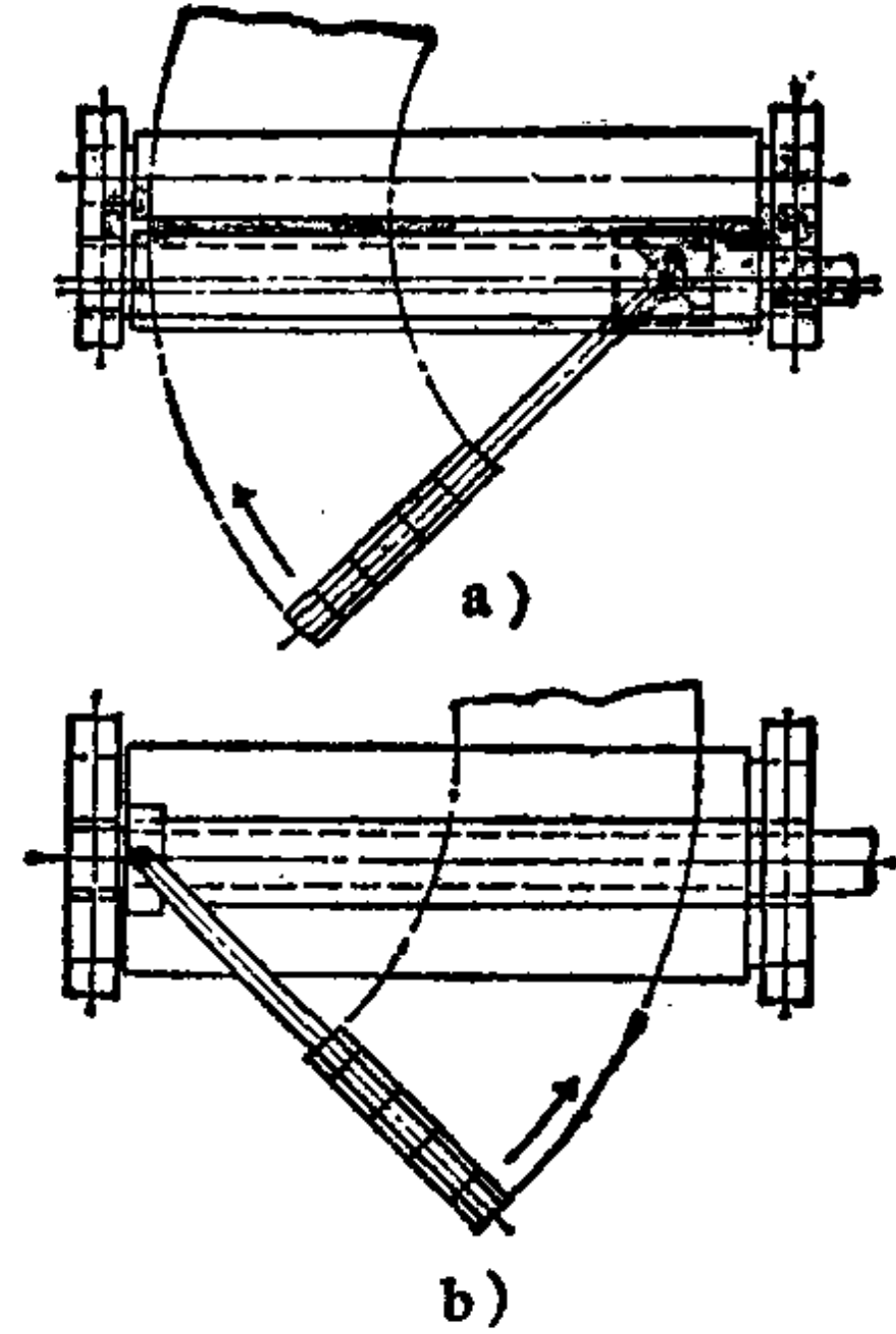


图3.123 圆锥形弯曲用的板料送进装置

3.3.4 二辊弯曲〔95〕

在二辊弯曲中，板坯由于弹性辊轮的压力作用就连续地绕在刚性辊轮上面进而使其成形为圆筒形。利用橡胶作为弹性体的例子前面已有过了，然而这一加工方法的完全实用化，是在使用了富于韧性、耐磨性，具有适当弹性的尿烷（氨基甲酸乙酯）合成橡胶之后的事。适于本加工方法的尿烷合成橡胶辊轮的硬度为肖氏硬度 A 85°~95°。

图 3.124 所示为辊轮压下量（尿烷合成橡胶辊轮的下凹量）与成形件直径关系的试验值。压下量达到某一临界值，板料贴合在辊轮上之后，即使是将辊轮的压下量增加到临界值以上，制件直径的变化也是非常小的。所以，取较临界压下量稍多一些的变形量即为合理压下

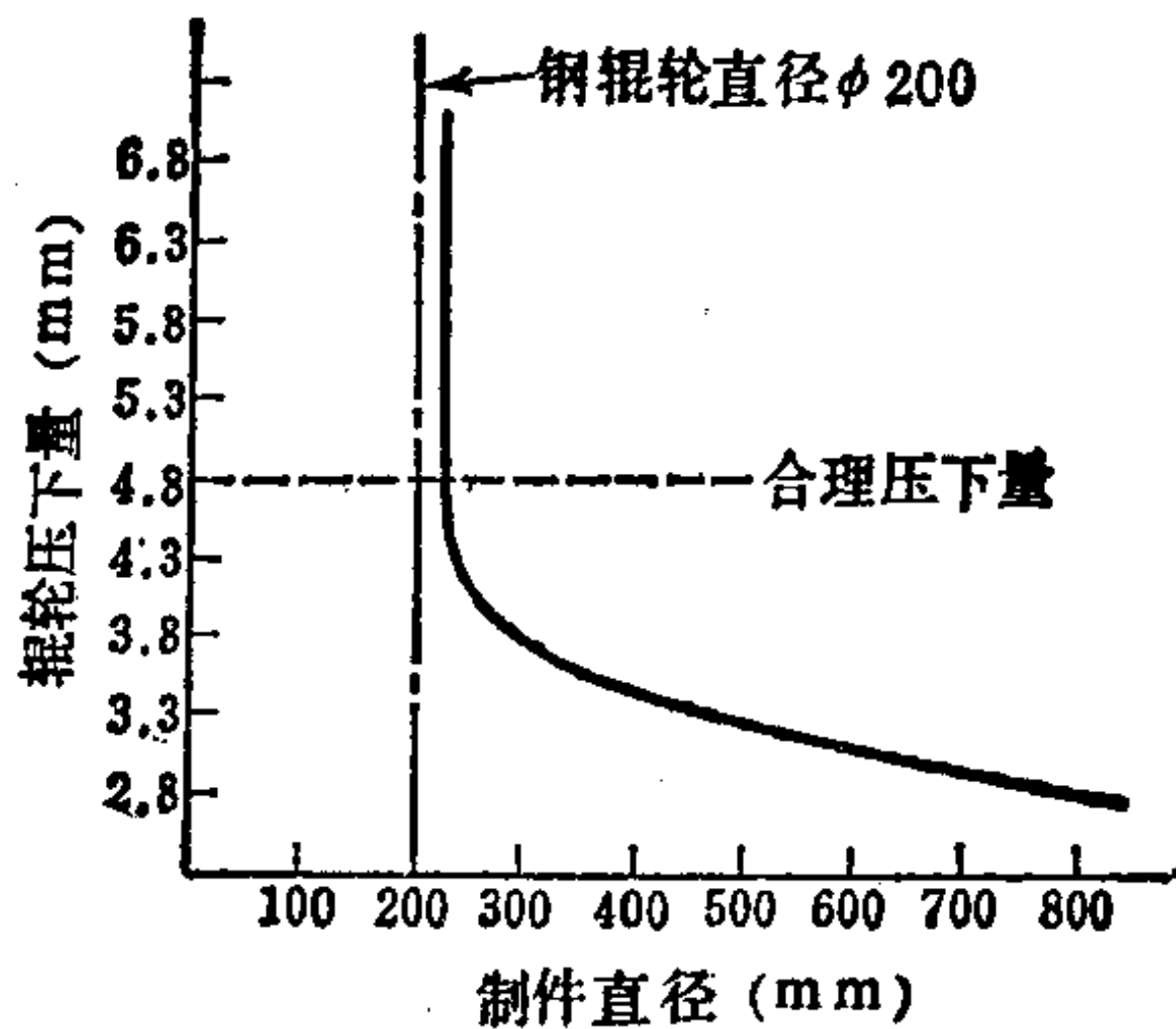


图3.124 二辊弯曲中辊轮压下量和制件直径关系的实测值

量。虽说在临界压下量以下，根据对辊轮压下量的调整情况，也不是不可能制造出直径不同的各种圆筒件，但是，由于不够稳定，故一般不采用这种方法。为了改变制件的直径，就象图 3.125 那样，专门在刚性辊轮上套以适当直径的导向轮来进行弯曲加工。

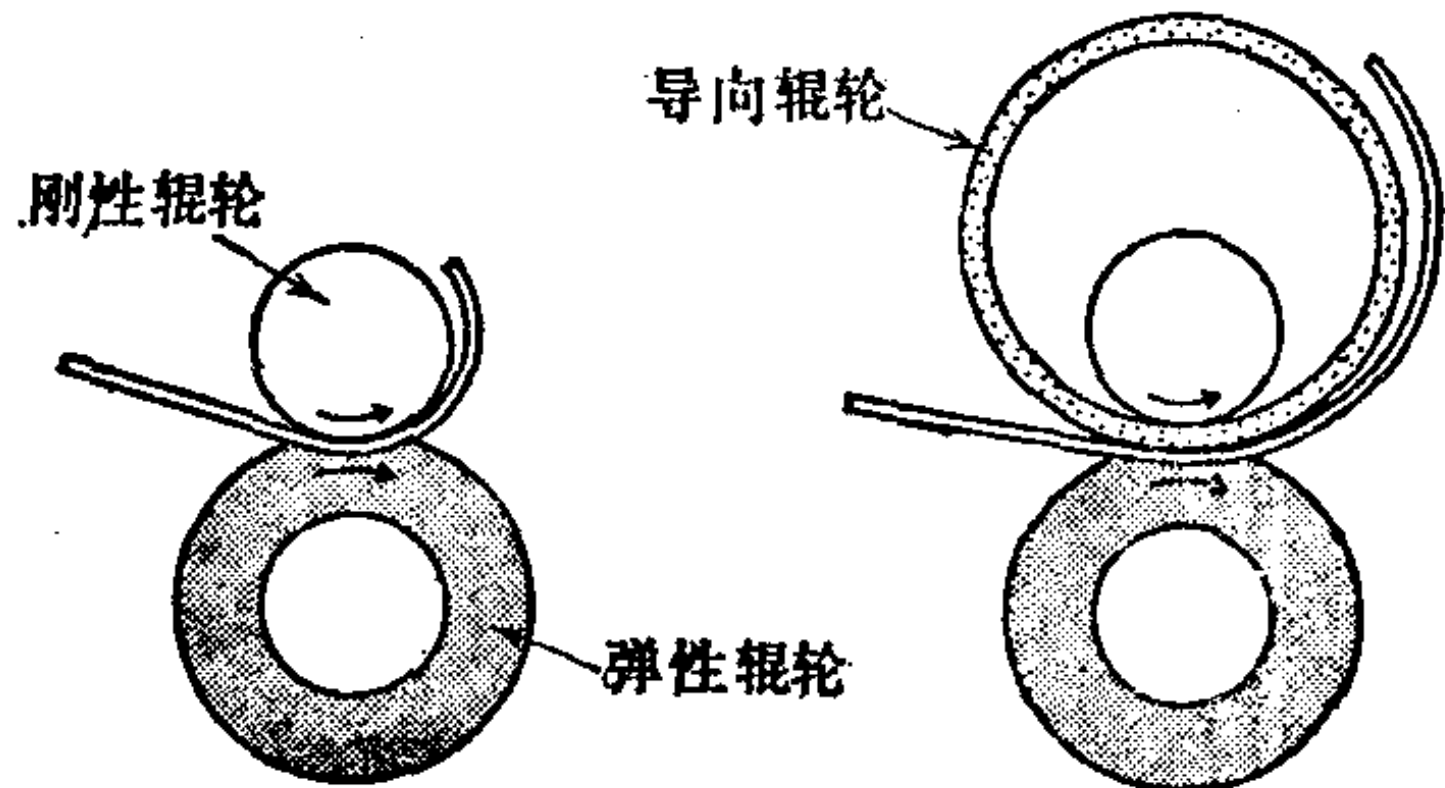


图3.125 用导向辊轮加工大直径圆筒件

与三辊、四辊弯曲相比，二辊弯曲的优点是：i) 不必端头弯曲，

加工速度快；ii) 在一次行程中有作高精度成形的可能；iii) 板坯即使是经过冲孔、切口、起伏成形等加工，也不致产生折裂及不规则翘曲等；iv) 不产生皱折，不在制件表面造成划痕；v) 如果把辊轮的压下量取大，即使两辊轮的间距有所变动而制件的直径也不发生变化，因此设备精度不是很高也行，使用的是简单的装置等等。

另一方面，二辊弯曲的缺点是：i) 由于相对于制件直径的每一个变化都需要制作导向辊轮，故不适于多品种小批量生产；ii) 不能作厚板的加工（最大加工板厚 6~9mm）。

3.4 板料的滚压成形〔96~131〕

3.4.1 特征〔98〕

板料的滚压成形是将长的金属带料于前后直排的数组成形辊轮中通过，随着辊轮的回转，在将带料向前送进的同时又顺次进行弯曲加工以成形出所需断面形状的加工方法。这种加工方法具有如下特征：

(1) 适合于长的等断面制件的大量生产，由于是辊轮送进，所以就有可能与冲孔、起伏成形、焊接、切断等其它加工装置联动进而使多种工艺连续化生产成为可能。

(2) 由于长尺寸制件的冲压弯曲必须大型设备, 因而滚压成形是经济的。但是, 在制件尺寸不长的多品种小批量生产的情况下, 冲压弯曲却是经济的。

(3) 用拉拔设备成形时, 容易产生翘曲扭转等缺陷, 但是用滚压成形即可防止这些弊病。

(4) 由于板厚方向没有压下量, 与轧机相比, 滚压成形设备的强度低而结构简单。

(5) 由于经各辊轮孔型的变形量小, 故加工表面良好, 涂覆材料也适用。

(6) 由于是作弯曲加工, 所以对于很小的尖角成形是不合适的, 能成形的尖角大小, 取决于材料的弯曲性能。

3.4.2 成形原理〔119〕

滚压成形的成形原理, 就象图 3.126 所示那样是由各组成形辊轮顺次弯曲并向前送

进的滚压成形, 如果就第一组辊轮来看就是图 3.127 那样。板料从辊轮的入口处一面受到弯曲一面向前运动, 在辊轮的中心断面 4 处即成形完毕并从辊轮中穿出来。图 3.128 所示为在成形辊成形过程中垂直

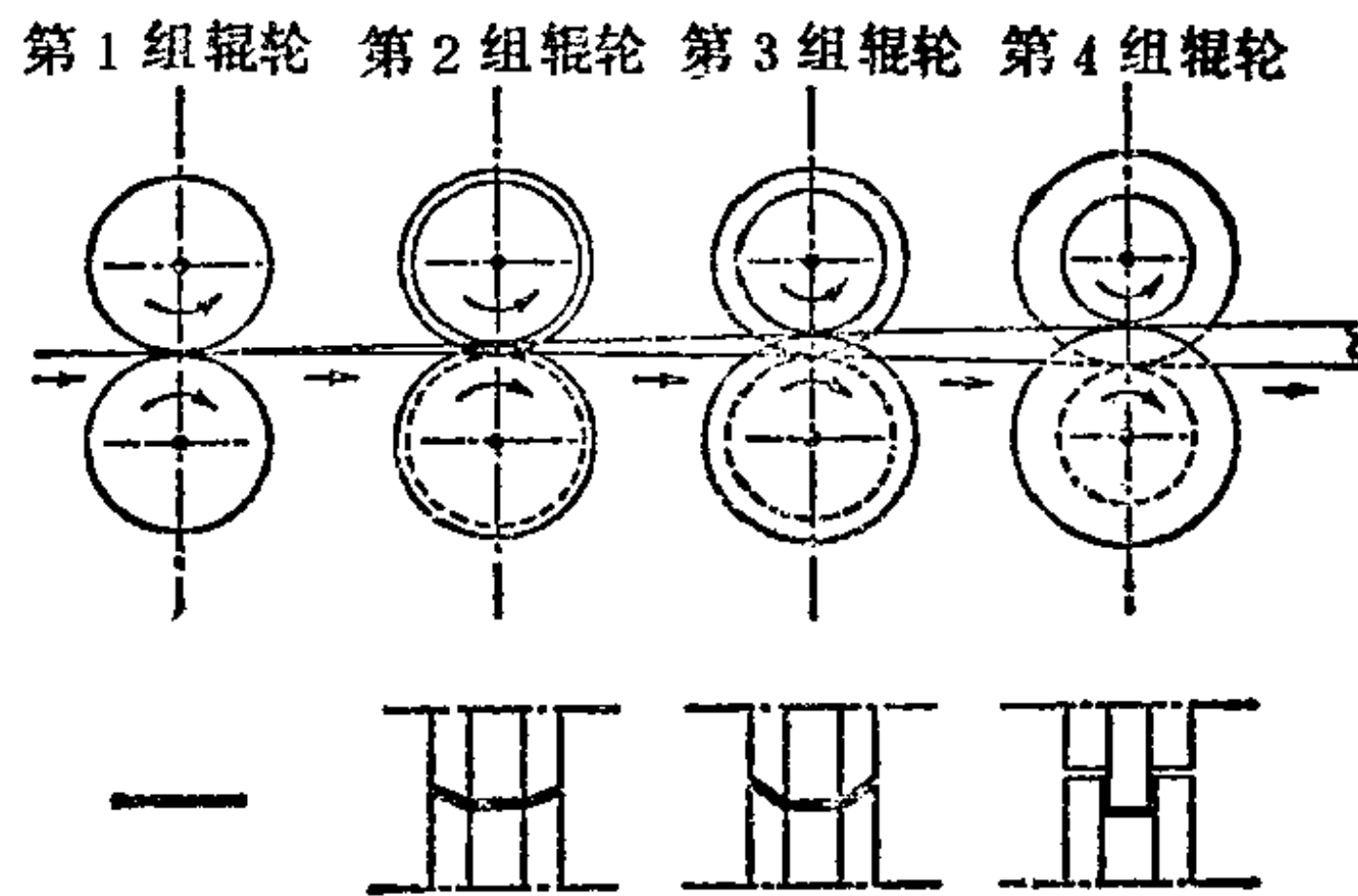


图3.126 冷滚压成形

断面上的滚压力的理想作用状态。如果考察增量 dx 这一微小长度

的断面, 那么, 由上下辊轮的中心力 $\frac{pdx}{\cos\theta_1}$ 、 $\frac{pdx}{\cos\theta_2}$ 的垂直分

量 pdx 就起到校正弯曲的作用。而中心力的水平分力 $pdx \tan\theta_1$ 、 $pdx \tan\theta_2$ 将作用于推出材料的方向。如果由中心力所产生的摩

擦力 $F_1 = \mu \frac{pdx}{\cos\theta_1}$ 、 $F_2 = \mu \frac{pdx}{\cos\theta_2}$ 不能克服由中心力所产生的水

平分力 $p dx \tan \theta_1$ 、 $p dx \tan \theta_2$, 则板料就将打滑而不能向前送进。根据对成形辊的辊轮压力分布的实测结果[120], 显示出辊轮压力从入口侧开始增加进而至辊轮中心达到最大值, 从而使材料向前送进的摩擦力也在辊轮中心达到最大值。为使板料端部易于咬入, 有效的方法是尽可能将端部作成三角状细条快速送到辊轮中心使

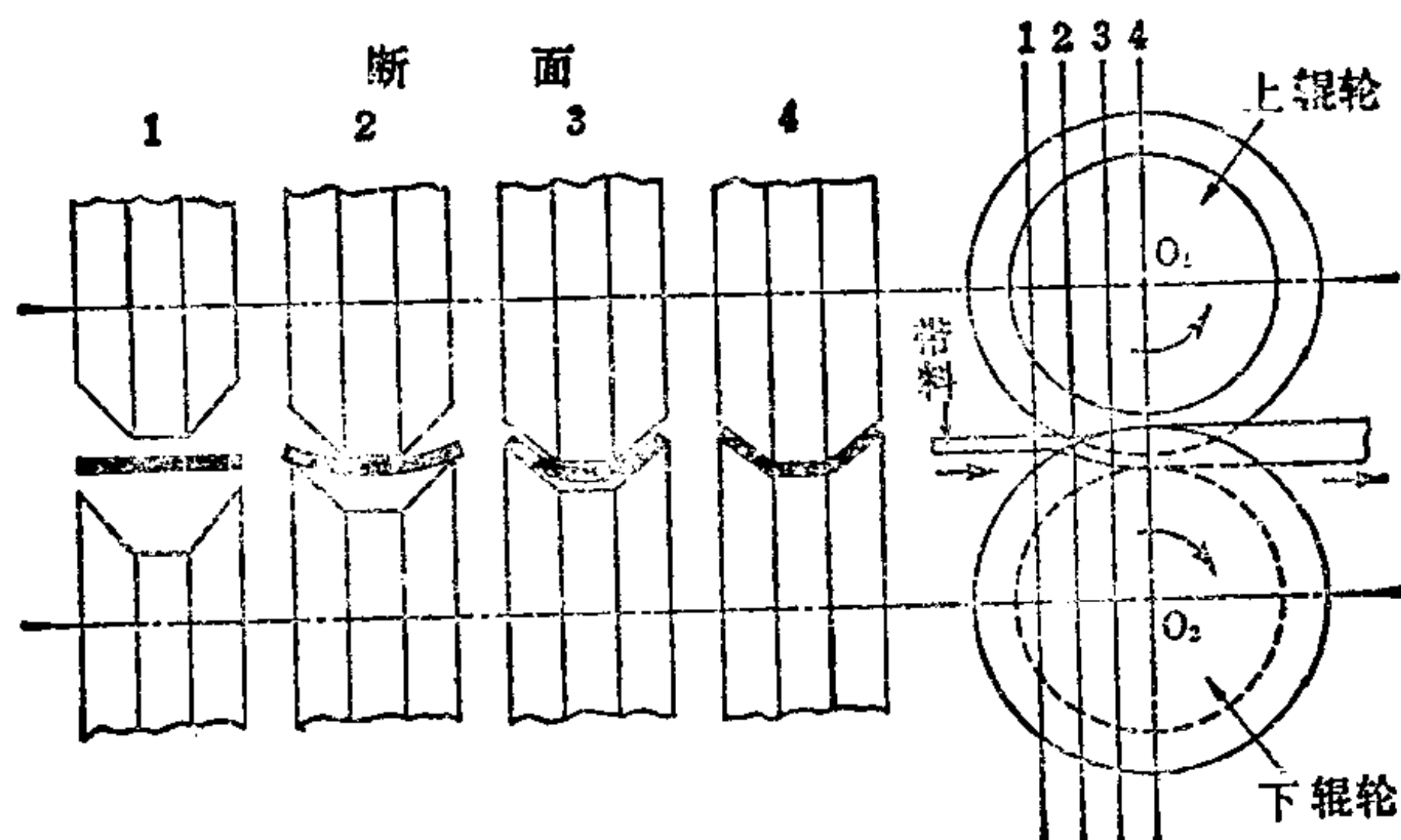


图3.127 成形过程

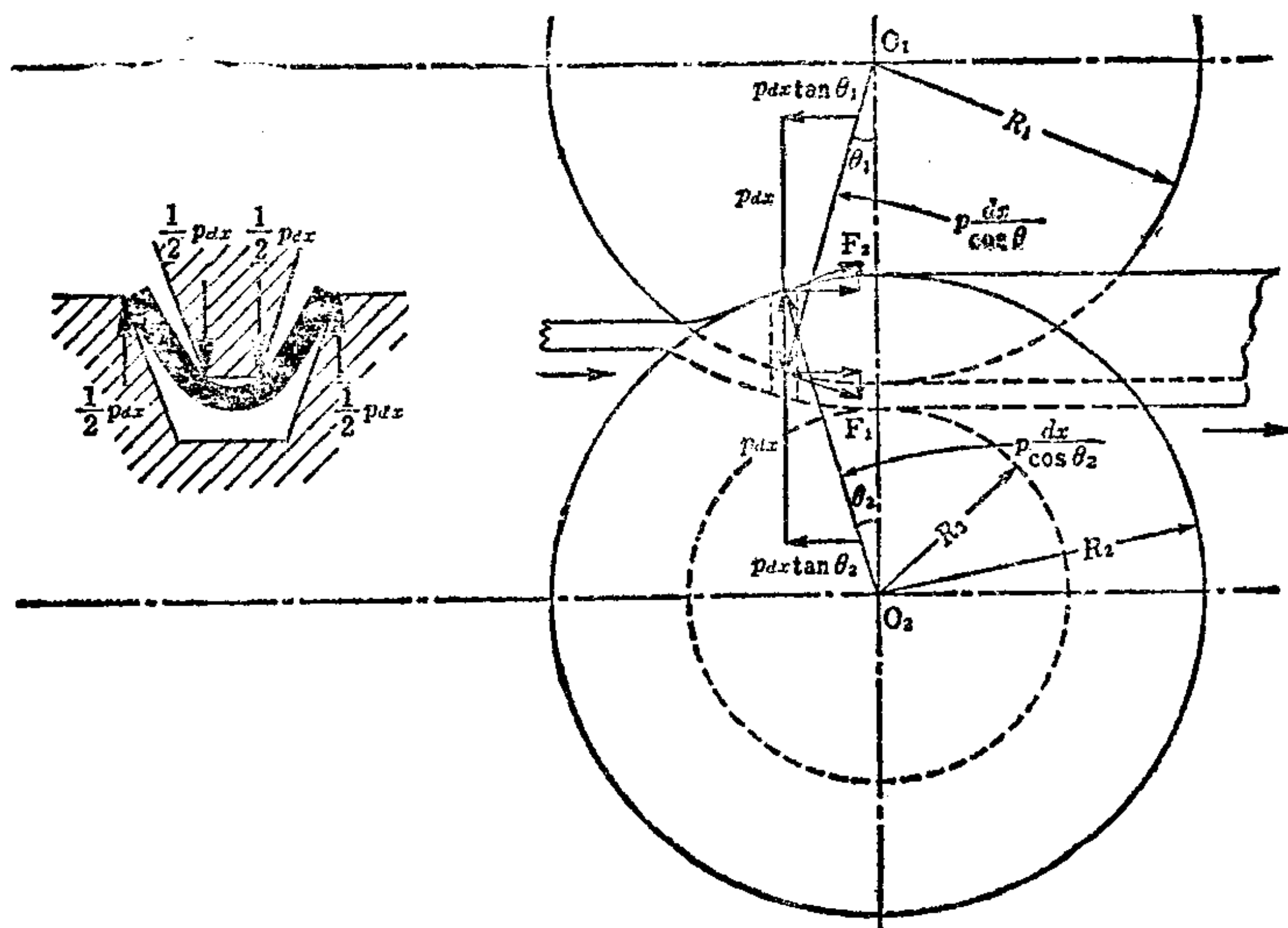


图3.128 滚压成形的受力分析

其咬住。还有，在实际的滚压成形中，板料和辊轮的接触状态是复杂的，根据条件多是与下辊轮的接触长，与上辊轮的接触短，而且板料在被咬入辊轮之前，在辊轮的外面就已经受到弯曲作用，当加大弯曲变形量则此一倾向就变得更加明显，特别是在即将进入辊轮之前即受到了很大的弯曲。

了解成形中加到辊轮上的载荷、辊轮与板料的接触状态以及板料的变形情况，是设计上所必须的前提条件，但是，如果进行以上下辊轮对板料作冲压试验，那么，就能得到图 3.129 所示那样的载荷-变位曲线，就可以求出不同间隙时辊轮载荷的实验值。

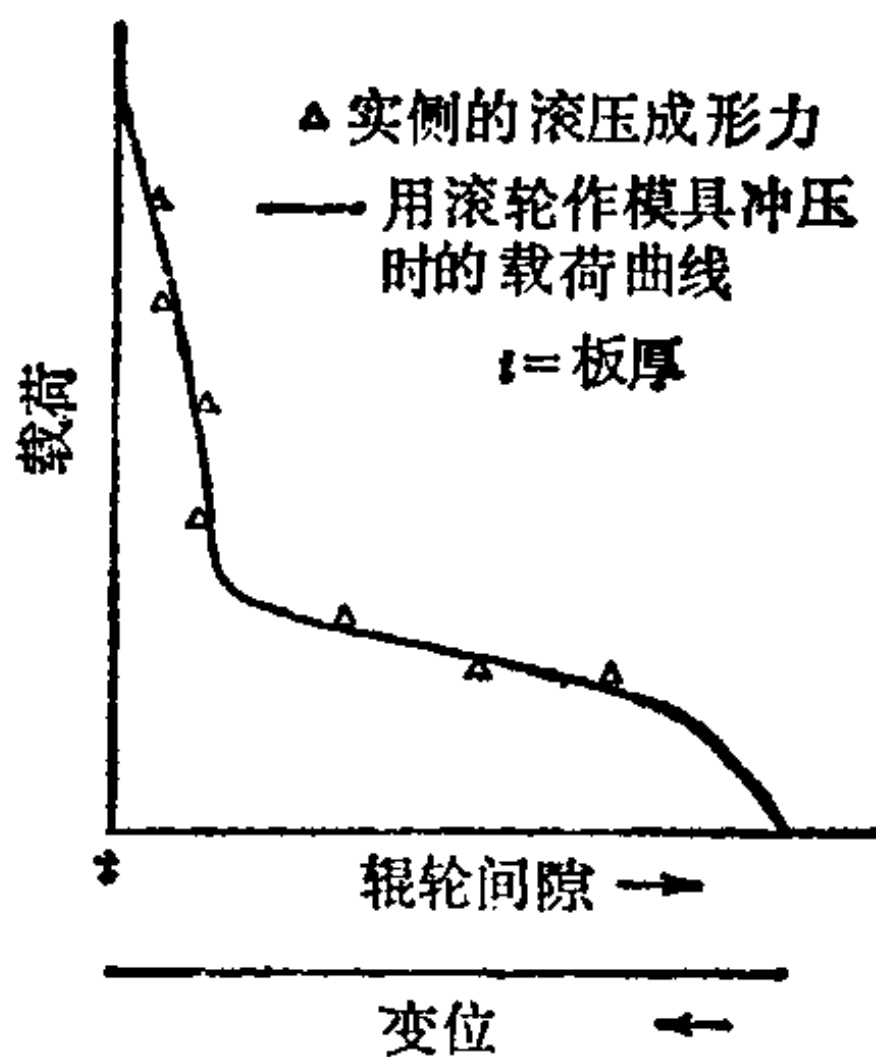


图3.129 上下辊轮之间的间隙和滚压力的关系

3.4.3 滚压成形力和滚压成形扭矩

滚压成形力 P 与模具弯曲的情况具有相类似的关系，一般来说， P 与板厚 t 的平方成正比：

$$P = k\sigma_y t^2$$

式中 k —— 系数；

σ_y —— 材料的屈服应力。

滚压成形扭矩 T 在上辊轮和下辊轮上往往是不一致的。但是如将辊轮与板料的接触长度之半当作扭力臂来考虑则是安全的，扭矩与板料宽度成正比，与板料厚度成反比。

$$T = P \times (\text{扭力臂})$$

滚压成形功一般用下式表示

$$W = W_1 + W_2 + W_3$$

式中 W —— 总功；

W_1 —— 板料弯曲所需的功；

W_2 —— 板料和辊轮间的摩擦功；

W_3 —— 机械损失功。

$$W_1 = \alpha W_0$$

式中 W_0 ——平面变形条件下板料的弯曲功；

α ——比例系数 ($\alpha > 1$ ，一般情况下 $\alpha = 3 \sim 4$)。

$$W_2 = \mu W_1$$

式中 μ ——摩擦系数，通常 $\mu \approx 0.1$ 。

在实际的滚压成形中， $W_1 + W_2 = 0.4 \sim 0.5W$ ， $W_3 = 0.5 \sim 0.6W$ ，滚压成形功是不大的。

滚压成形功 W_1 近似的与弯曲角的变化量和板厚的平方成正比，用下式表示：

$$W_1 = \alpha \sigma_y t^2 \beta$$

式中 $\alpha = 0.5 \sim 1.0$ ；

σ_y ——屈服应力；

t ——板厚；

β ——弯曲角的变化(弧度)。

下面，是综合各研究者的意见得出的下列求解公式，详细的内容，望参照有关文献。

(i) 圆形滚压 (一) [120]

$$\text{滚压成形力: } P = kbt^2 \cos\left(\frac{b}{r}\right) \left\{ (4/r) + (1/r_1) + \cos(b/r)/r_3 \right\} / \mu d$$

$$\text{下辊轮扭矩: } T = kbt^2 r_3 \left\{ (4/r) + (1/r_1) + \cos(b/r)/r_3 \right\}$$

$$\text{式中 } r_3 = r_2 + r_d \left\{ 1 - \cos\left(\frac{b}{r}\right) \right\};$$

r_1 ——上(凸)辊轮的最大半径；

r_2 ——下(凹)辊轮的最小半径；

r_u ——凸辊轮宽度方向的半径；

r_d ——凹辊轮宽度方向的半径；

$$r = \left(\frac{r_u + r_d}{2} \right);$$

b ——板料宽度的 $\frac{1}{2}$ 。

(ii) 圆形滚压 (二) [108]

滚压成形力:

$$L_i = P_i + Q_i + R_i \pm 0.5Q_{i+1} \pm 0.15Q_{i+2}$$

宽度方向的弯曲力:

$$P_i = \frac{8 \cdot C^* \cdot F}{(n+1)(n+2)2^{n+2}} \cdot D_n^{\frac{1}{2}} \frac{b^2}{t} \frac{(t/\rho_{yi})^{n+2}}{1 - \cos(b/\rho_{yi})}$$

纵长方向的弯曲力:

$$Q_i = \frac{F}{(n+1)2^{n+1} \cdot k^{n+1} \cdot SD_i^{2n+1}} t \{ \rho_{yi} (1 - \cos b/\rho_{yi}) \}^{n+1} |RH_i|^{n+1}$$

咬入力:

$$R_i = CKt(1 - \Lambda_i)$$

式中 $C^* = 0.012$; $K = 0.25$; $C = 0.75$;

t —— 坯料厚度;

$2b$ —— 坯料宽度;

ρ_{yi} —— 第 i 工位的辊轮弯曲半径;

RH_i —— 第 i 工位的辊轮高度;

SD_i —— 第 i 工位的工位间距;

RC_i —— 第 i 工位辊轮的设计间隙;

K_i —— 第 i 工位的刚性;

Λ_i —— 第 i 工位的压下系数 $\left(= \frac{RC_i}{t} \right)$;

L_i —— 第 i 工位的滚压成形力 (下辊轮承受总变形力的一半);

P_i —— 第 i 工位的断面成形在宽度方向的弯曲力;

Q_i —— 第 i 工位纵长方向的弯曲力;

R_i —— 第 i 工位的咬入力。

求滚压成形力 L_i 时, 当 $RH_{i+1} > RH_i$, 则 Q_{i+1} 为负; 当 $RH_{i+2} > RH_{i+1}$, 则 Q_{i+2} 为正; 当 $RH_{i+1} < RH_i$, $RH_{i+2} < RH_{i+1}$ 则分别相反地取正负值。

(iii) V形滚压成形 [121、122]

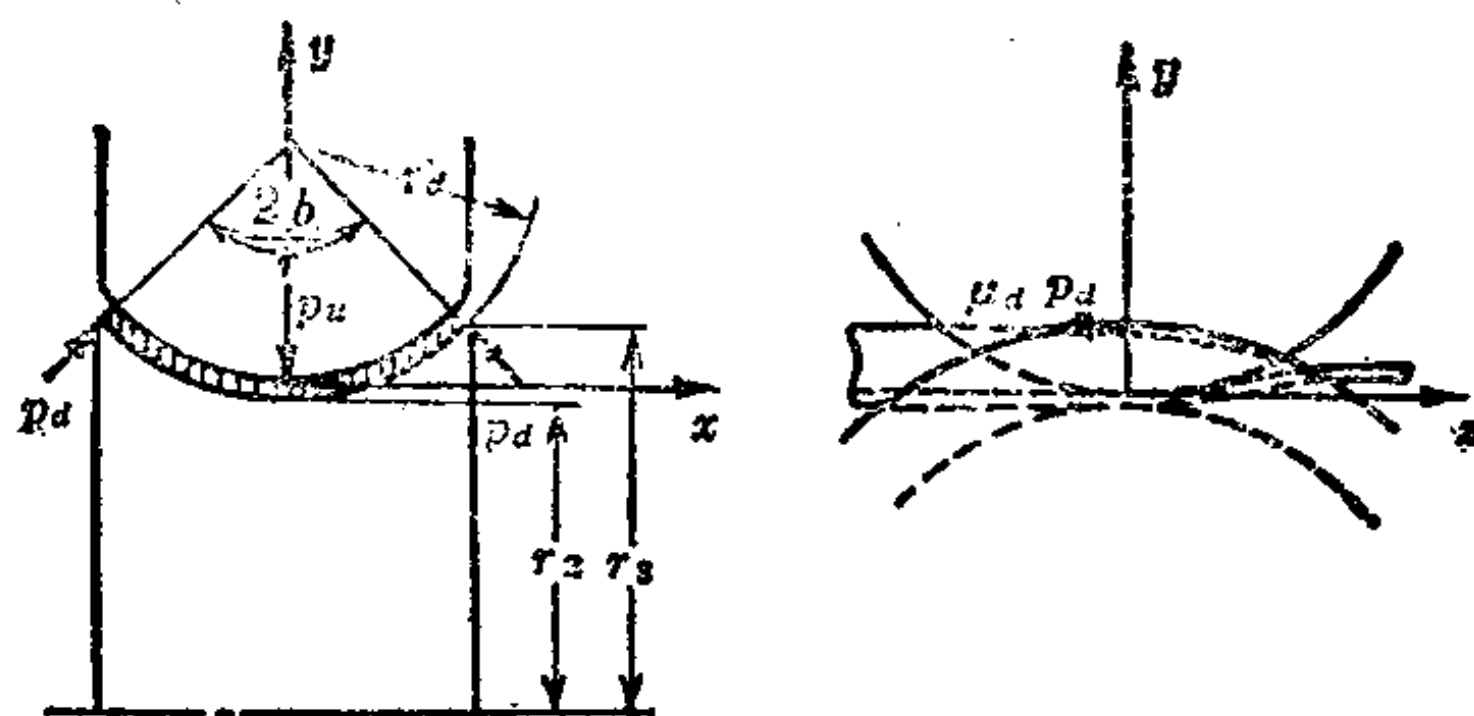


图3.130 圆形滚压成形

成形功:

$$W_1 = (\sigma_y/12)[3t^2 - (2\sigma_y \cdot \rho/E)^2]\beta v$$

式中 σ_y ——屈服应力;
 ρ ——弯曲内侧半径;
 E ——纵弹性模量;
 $\beta = \beta_1 - \beta_2$ 角度变化;
 v ——速度。

滚压成形力:

$$P = (\alpha/\sqrt{3}\mu)\sigma_y t^2 (\theta - \theta_0) \cos\theta \ominus / (1 + \cos\theta)$$

上辊轮扭矩:

$$T_u = (\alpha/2\sqrt{3})\sigma_y t^2 (\theta - \theta_0) d_1 \cos\theta / (1 + \cos\theta)$$

下辊轮扭矩:

$$T_d = (\alpha/2\sqrt{3})\sigma_y t^2 (\theta - \theta_0) (d_2 + 2b\sin\theta) / (1 + \cos\theta)$$

(iv) U形滚压成形[123]

滚压成形力:

$$P = k_1 \cdot (\alpha\sqrt{3}\mu)\sigma_y t^2 (\theta - \theta_0)$$

上辊轮扭矩:

$$T_u = k_2 \cdot (\alpha/2\sqrt{3})\sigma_y t^2 (\theta - \theta_0) d_1$$

下辊轮扭矩:

$$T_d = k_3 \cdot (\alpha/2\sqrt{3})\sigma_y t^2 (\theta - \theta_0) \{d_2 + 2b\sin\theta / (1 + \kappa)\}$$

式中 $\kappa = P_2/2P_3$

⊖ 原文恐有误, 因查不出原文出处无法校对。——译注

$$k_1 = (\cos\theta + \kappa) \cos(\theta/2) / \{\cos\theta + (1 + \kappa) \cos(\theta/2) + \kappa\};$$

$$k_2 = (\cos\theta + \kappa) / \{\cos\theta + (1 + \kappa) \cos(\theta/2) \ominus + \kappa\};$$

$$k_3 = (1 + \kappa) \cos(\theta/2) / \{\cos\theta + (1 + \kappa) \cos(\theta/2) + \kappa\}。$$

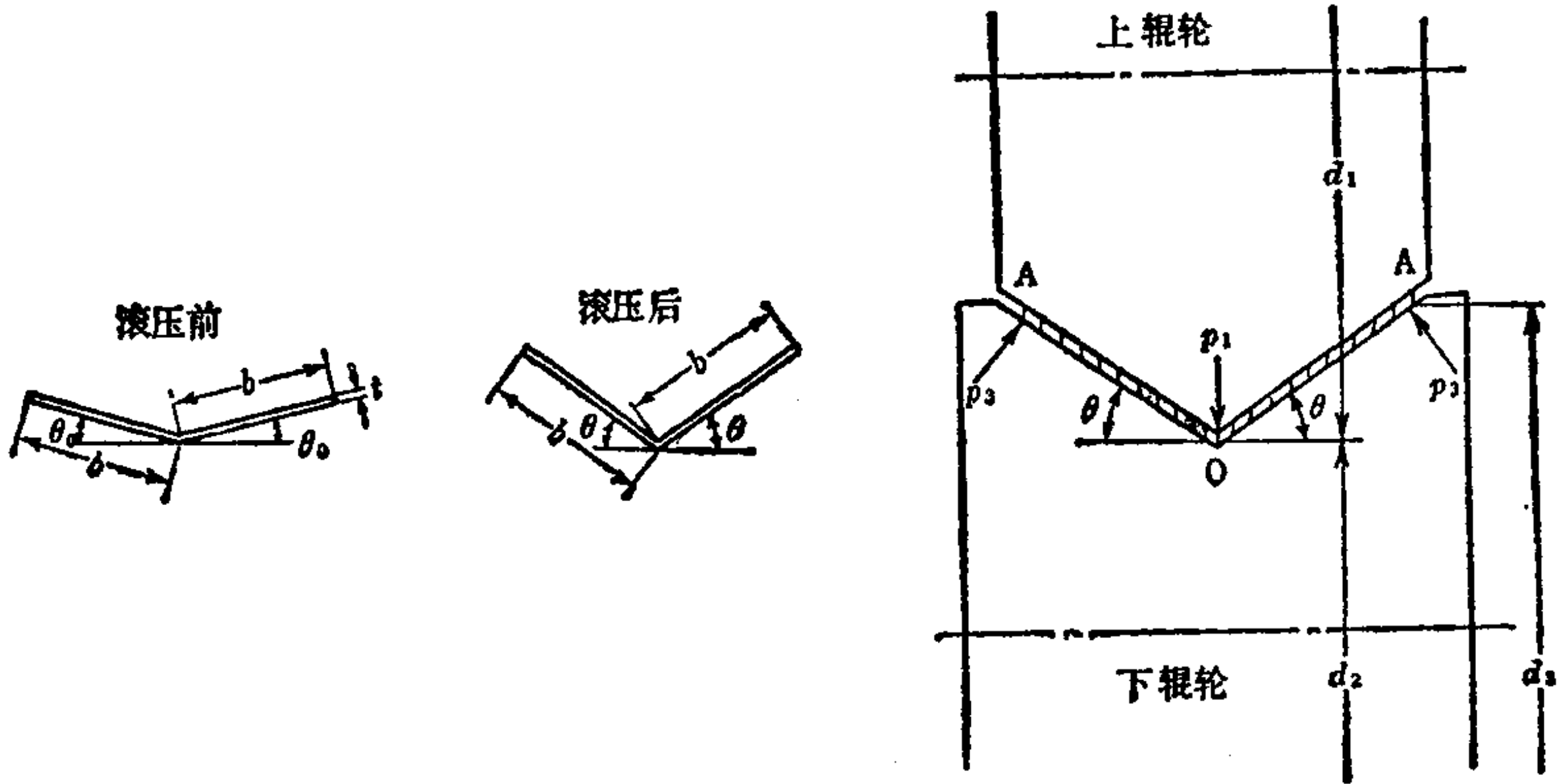


图3.131 V形滚压成形

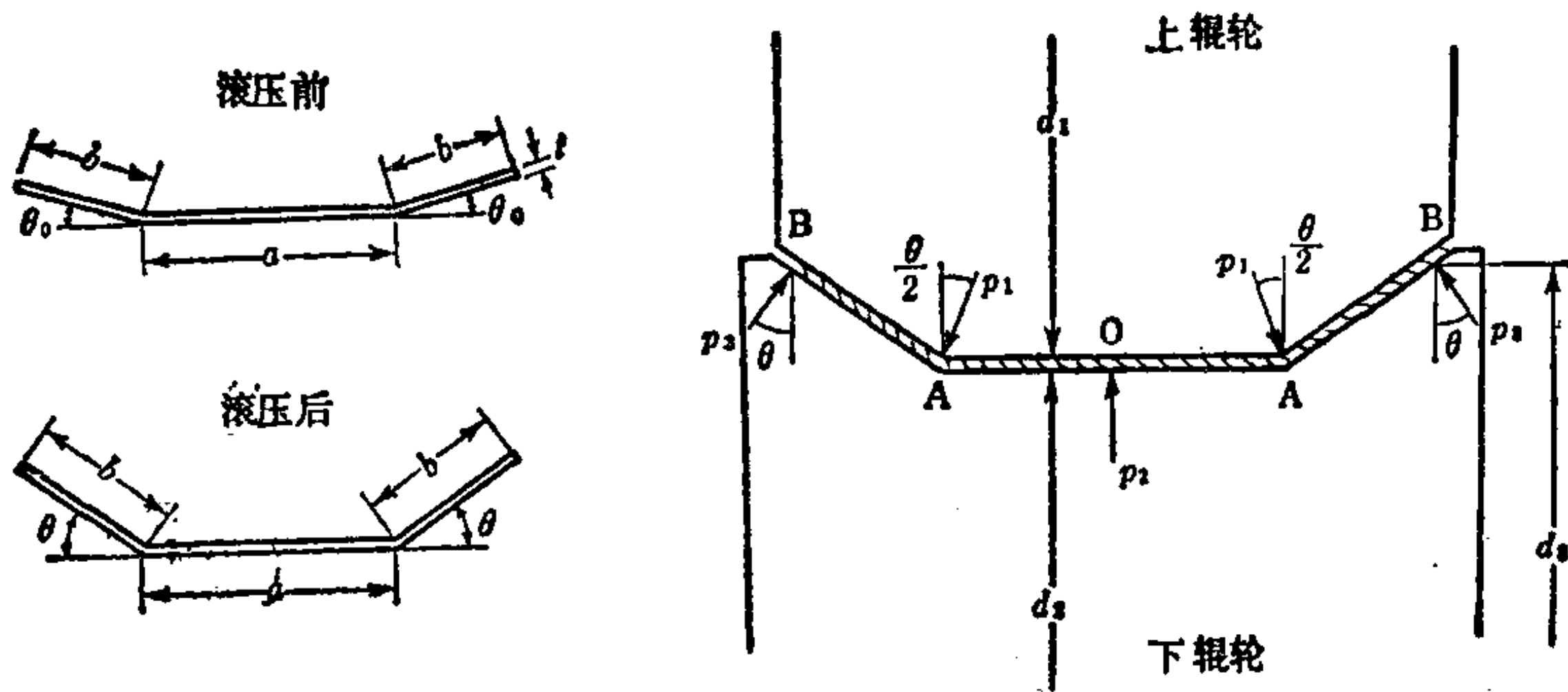


图3.132 U形滚压成形

3.4.4 带料的塑性变形

滚压成形长带料时，带料发生纵横两个方向的塑性变形。在图 2.8 所示那样的板的横向上，出现与模具弯曲相同的变形，在

⊖ 原文为 $\cos\theta\left(\frac{\theta}{2}\right)$ ，可能有误。——译注

弯曲处，外侧产生拉伸变形，内侧产生压缩变形。然而另一方面，滚压成形的特点是在板料的纵长方向要发生特殊变形。纵长方向的变形，分布于带料的整个横断面上，特别是容易在边缘部分发生拉伸变形，当边缘处的延伸状态被保留下来，就出现象图3.137那样的翘曲变形，成形材料即不能一直向前送进，加工也难于进行。而且，边缘部分的拉伸在进到辊轮入口之前即已开始，在中间达最大值，随着与辊轮中心靠近而受到压缩的作用，所以，如果延伸过大就要产生失稳，即在制件的边缘产生波纹状的变形亦即边缘波纹。防止边缘波纹是一项重要的技术。

a. 圆形滚压

(i) 基本的成形方式 在管状成形时，基本上有如下三种方法。象图 3.134 所示那样的边缘成形法 (edge forming)，是从板坯两端用等于管件外径的半径，以各辊轮进行等量弯曲加工去增大圆弧的方法，板料两边的运动轨迹形成一条摆线，可用下式

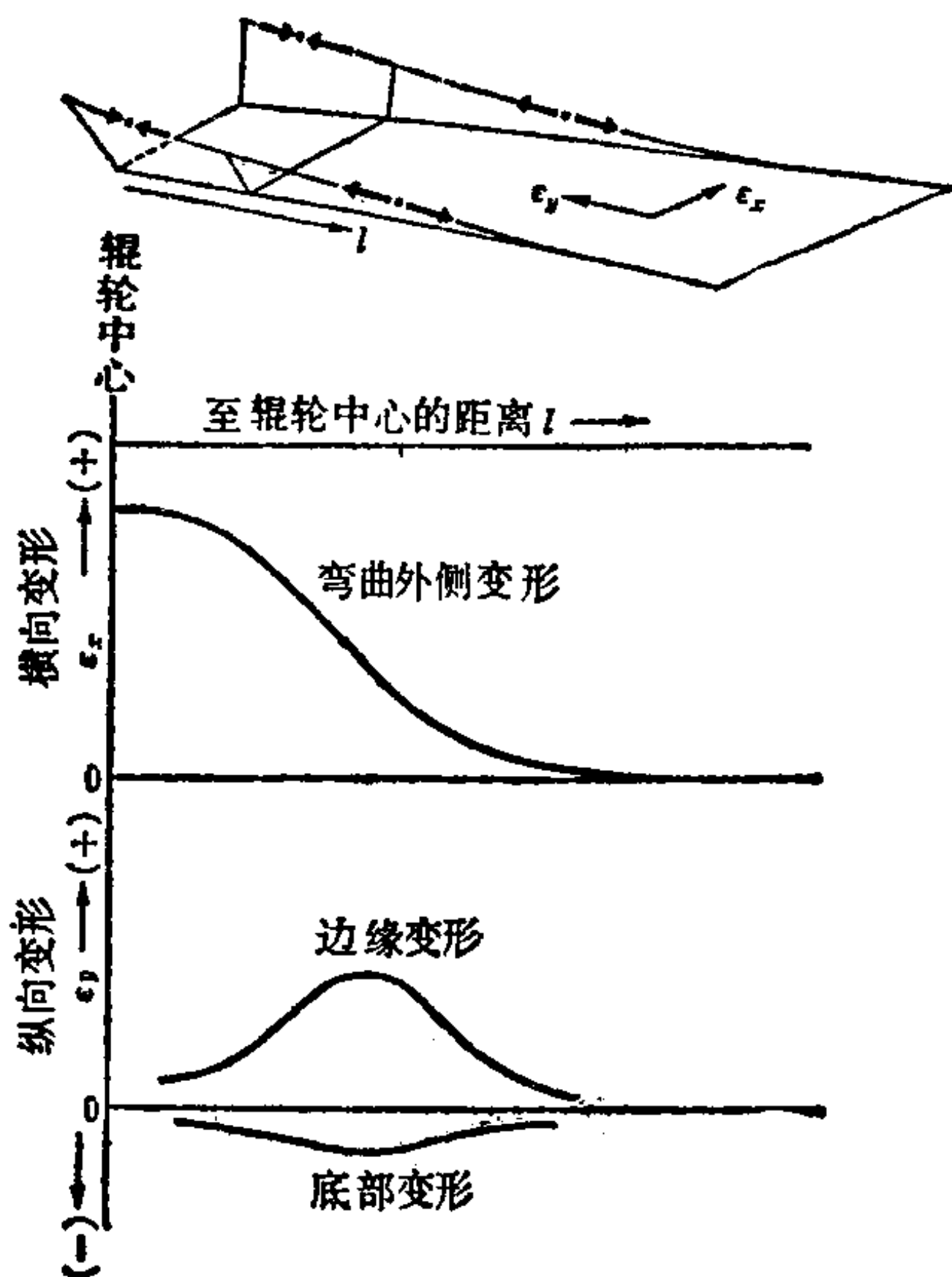


图3.133 板坯的变形

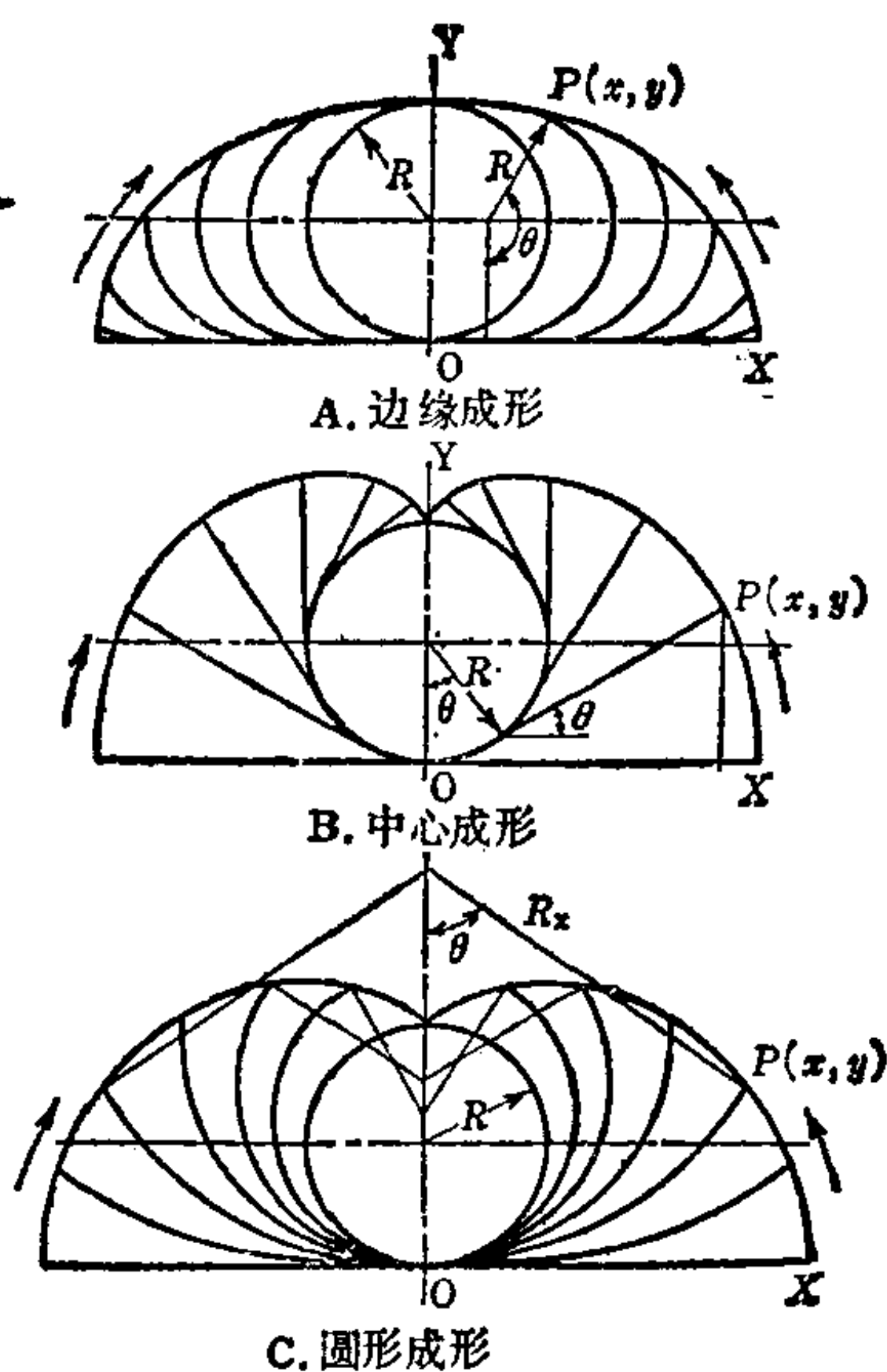


图3.134 管形件的成形法

表示:

$$\begin{cases} x = R(\pi - \theta) + R\sin\theta \\ y = R(1 - \cos\theta) \end{cases}$$

中心成形法 (center bending), 是从带料的中心用等于管件外径的半径, 以各辊轮进行等量弯曲加工的方法, 类似于拉住一条线将其卷成圆筒, 板料两端的运动轨迹为渐开线, 用下式表示:

$$\begin{cases} x = R\{\sin\theta + (\pi - \theta)\cos\theta\} \\ y = R\{1 - \cos\theta + (\pi - \theta)\sin\theta\} \end{cases}$$

圆形成形法 (circular bending), 是在用 n 个成形辊轮将带料弯曲为半径为 R 的管件时, 使 x 号成形辊轮的弯曲半径为 R_x , 用

$$R_x = R_n/x \text{ (式中 } x = 0 \sim n \text{ 的正整数)}$$

去表示变形过程中的弯曲半径的方法。成形中弯曲半径是顺次缩小的, 其关系用下式表示:

$$\begin{cases} x = \left(\frac{\pi R}{\theta}\right)\sin\theta \\ y = \left(\frac{\pi R}{\theta}\right)(1 - \cos\theta) \end{cases}$$

取圆筒直径为 D , 试以上面的三个公式求板料边缘的轨迹长 L , 则

边缘成形时:

$$L = R \int_0^\pi \sqrt{2(1 - \cos\theta)} d\theta = 2D$$

中心成形时:

$$L = R \int_0^\pi (\pi - \theta) d\theta = 2.47D$$

圆形成形时:

$$L = \pi R \int_0^\pi \left\{ \left(\frac{1}{\theta}\right) \sqrt{1 + (2/\theta^2) - (2\sin\theta/\theta) - (\cos\theta/\theta^2)} \right\} d\theta = 2.22D$$

由此可见三种轨迹长度中以边缘成形最短，圆形成形次之，中心成形最长。除小直径管件使用中心成形法外，实际运用中，全是边缘成形法和圆形成形法相结合，由于减少 L 而导致边缘延伸变形减小的技术正在得到运用。

(ii) 边缘的延伸 管状成形时边缘延伸的计算，首先要求出作为带料纵长方向中性层的关系式〔124〕。假定取板料边缘辊轮出口处中性层的应变为 ϵ_0 ，则：

$$\epsilon_0 = \left(\frac{1}{2}\right) \left\{ \left(\frac{dZ_e}{dy}\right)_{y=0} + \left(\frac{dx_e}{dy}\right)_{y=0}^2 \right\}$$

式中

$$\begin{aligned} \left(\frac{dZ_e}{dy}\right)_{y=0} &= a(c-a)/4b\sqrt{\rho_1^2 - (a/2)^2} \\ \left(\frac{dx_e}{dy}\right)_{y=0} &= (c-a)/2b \end{aligned}$$

通过对圆形成形法作近似计算所求得的边缘的延伸和管件外径 D ，成形辊轮的工位数 n 以及下辊轮的中部直径 ϕ_i 之间的关系，其结果如图 3.136 所示。从图可见： D 越大，边缘部分的延伸也就随之增大，然而通过增加工位数和下辊轮的直径即可减少边缘的延伸。

b. V形滚压和U形滚压〔106, 118〕 关于纵向翘曲 $\frac{1}{\rho_x}$ 和弯曲角 2θ 的关系，对纵向中性层变形和纵向弯曲变形在板料宽度方向上的分布作出实测就可得出图 3.137 那样的结果。考察

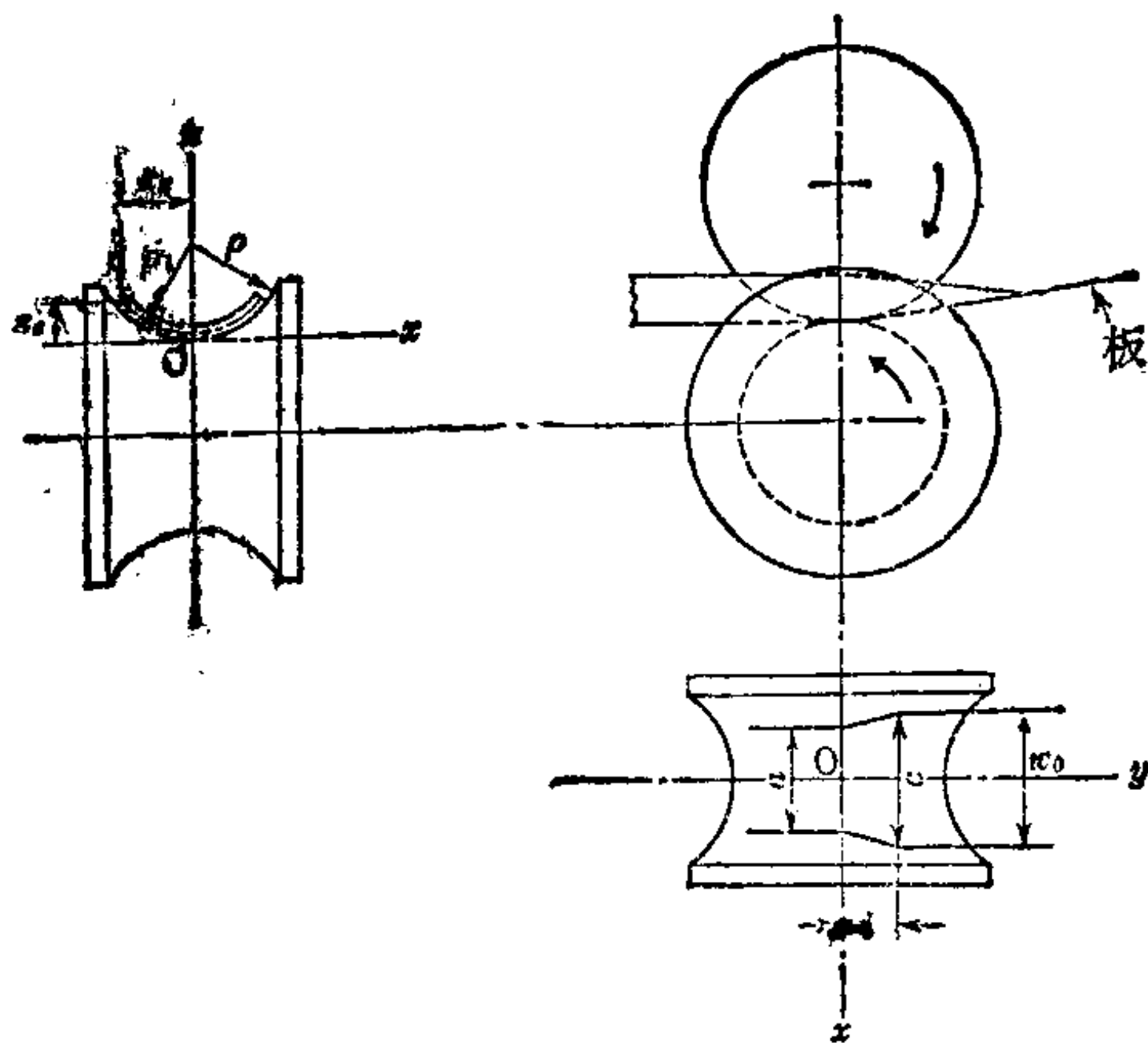


图3.135 在圆形成形中板料和辊轮的关系

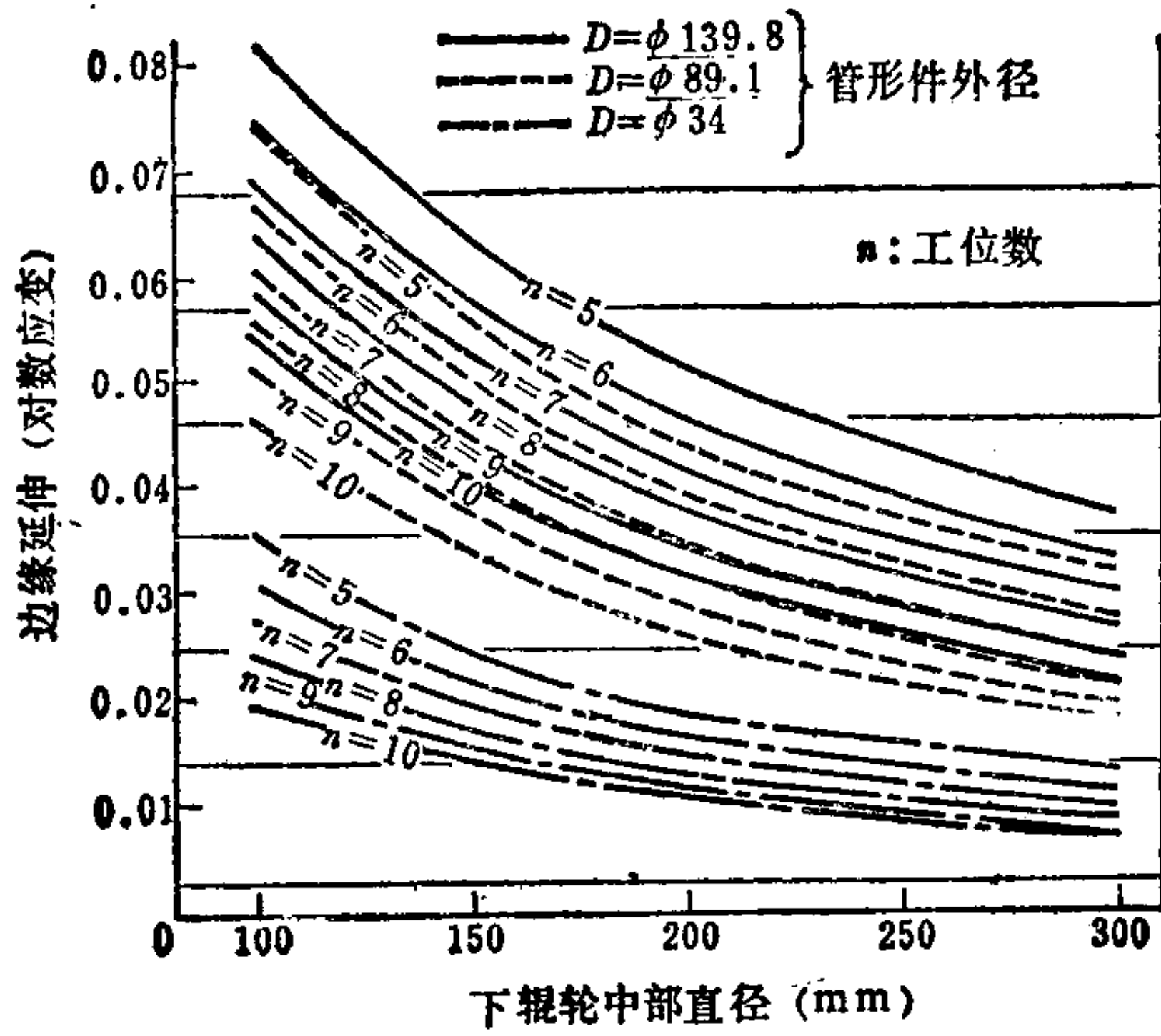


图3.136 边缘延伸变形与辊轮直径、管形件外径、工位数的关系

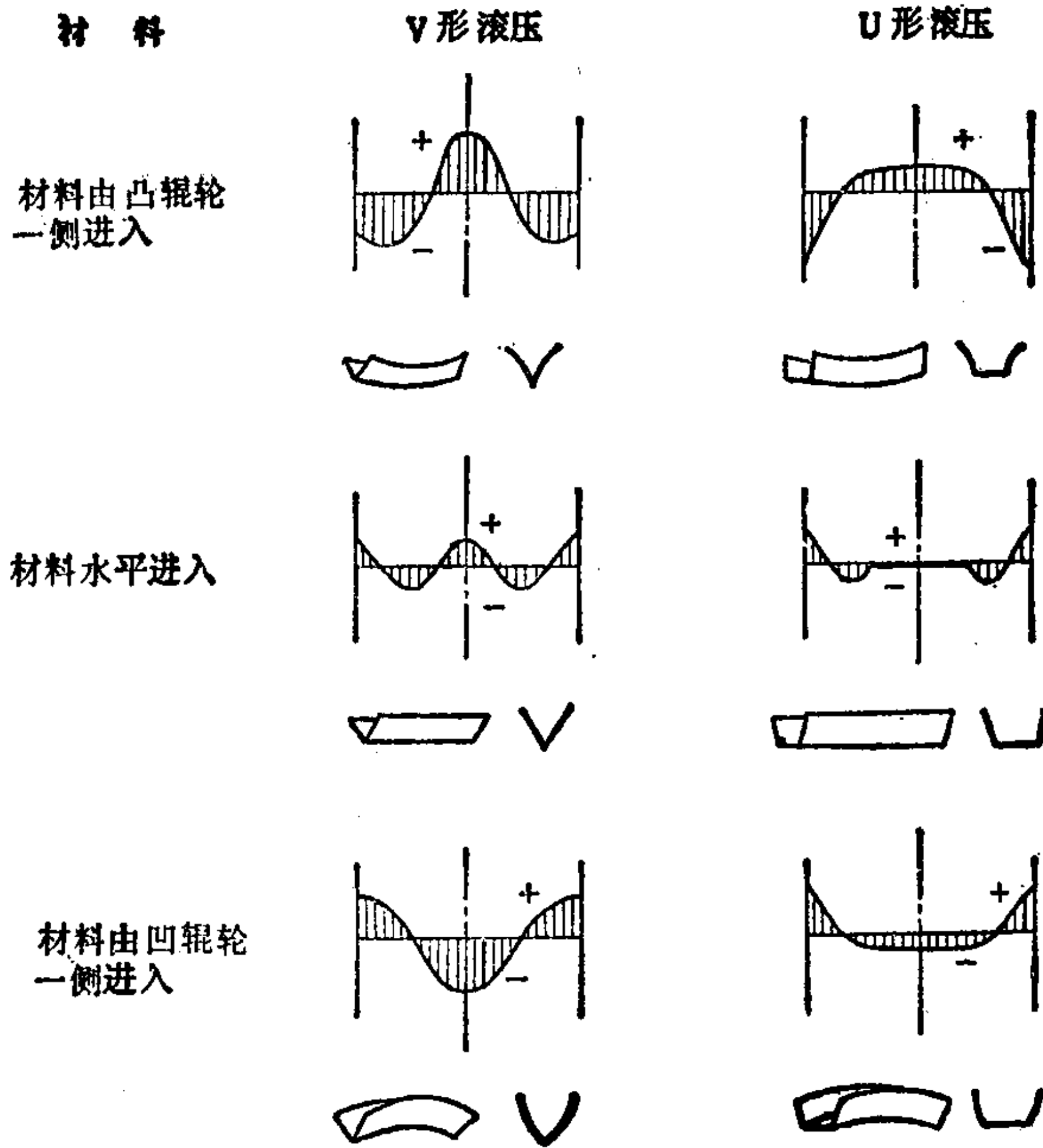


图3.137 纵向翘曲和中性层的变形

板料进入辊轮的状态, 就可以看出: 当板料从凸辊那边进入, 则在边缘产生压缩变形; 当板料于水平状态进入, 则边缘的延伸变形小且分布均匀; 当板料从凹辊一边进入, 则又在边缘产生很大的延伸变形。为了减少纵向翘曲, 使纵向中性层的变形和纵向弯曲变形在宽度方向的分布均匀化, 就必须增加断面材料的弯曲刚性, 如果使用加工硬化指数 n 值高的材料, 那么翘曲的变化就要增加。弯曲角度加大将加大滚压成形力, 板料宽度 b 与孔型宽度 W 之比、板料宽度 b 与宽度方向弯曲半径之比; 如果宽度方向的弯曲半径与板厚 t 的比值减少, 则弯曲角度也随之减小; n 值小的材料弯曲角度的变化就增加。在 V 形滚压中, 辊轮间隙与板料厚的比值越大, 弯曲角度就减小, 但是, 在 U 形滚压中就显示出相反的趋势〔106〕。关于材料特性和翘曲的关系, 除上述的加工硬化指数 (n 值) 外, 与材料的鲍欣格效应的关系也很密切, 鲍欣格效应大的材料, 具有翘曲量小的倾向〔118〕。

3.4.5 滚压成形用材料

a. 钢 碳素钢中, 常用的多为含碳量 0.2% 以下的软钢, 其成形是容易的。当纵长方向分布有线状夹杂物时, 就容易成为弯曲裂纹的起因。特别是必须使用高级材料的场合, 最好是用铝镇静钢。如果是球状珠光体组织, 含碳量约在 0.6% 以下, 都可以作急剧过渡的直角弯曲。

滚压成形速度为 15~16 m/min。

b. 不锈钢 13Cr、18Cr-8Ni、18Cr 等不锈钢很好使用。13Cr 不锈钢的成形性能类似于含碳量 0.3% 的碳钢, 18Cr、18Cr-8Ni 钢的成形性能稍差一些。成形速度在 8~25 m/min 的情况下要防止由于发热而烧伤表面。必须使辊轮的润滑良好并保持其表面清洁。

当板厚小于 2mm, 弯曲半径取为板厚的 2 倍左右是安全的。

c. Ni 和 Ni 合金 比不锈钢的成形性能稍差。成形速度要低。对板厚的要求与不锈钢相同。

d. Mg 在冷作状态下, 由于加工硬化而产生裂纹, 所以滚

压成形时必须加热，用红外线灯管在入口处和辊轮间加热是方便的。

e. Zn 及 Zn 合金 成形性能良好。

f. Cu 及软黄铜 成形性能良好。

g. Al 及 Al 合金 铝及耐腐蚀铝合金 A2P3 (含 Mn 1%)、A2P1 (含 Mg 2~3%, Cr 0.2%) 等材料成形性能良好。但是硬铝合金 (杜拉铝) A3P2 (含 Cu 4%, Mg 0.8%) 以及 24S (含 Cu 4%, Mg 1.5%) 就必须加热方可成形 (图 1.38) [126]。成形速度为 30 m/min 以下。

h. 表面被覆材料

由于镀镍、镀铬材料硬度大，容易产生裂纹。但是镀铜和黄铜的材料可以滚压成形，而镀锌和镀锡的材料是容易成形的。由于浸镀材料成形困难，故必须加大弯曲半径。油漆类涂覆材料，必须以尽可能

低的滚压力加工。使用韧性良好的硬质涂料 (油漆) 作滚压成形的条件是：将弯曲半径加大至板厚的 4~5 倍。

i. 复合材料 将两种或三种金属材料重叠起来进行滚压成形的工艺是可能的，有时是在软钢上面覆上不锈钢或铜的薄板进行成形，有时还能使木材和橡胶等材料复合起来。

关于各种材料在常温下的最小弯曲半径，可参照 3.2.3。

3.4.6 滚压成形设备

滚压成形机有两类：一类为悬臂式，辊轮主轴为单边支承，是薄壁小断面成形用的设备；另一类为闭式，主轴为双边支承，是厚壁大断面成形用的设备。

作为成形设备设计和使用的基本出发点，与变形力呈函数关系的辊轮主轴直径被认为是强度和尺寸的基本因素，主轴与板厚

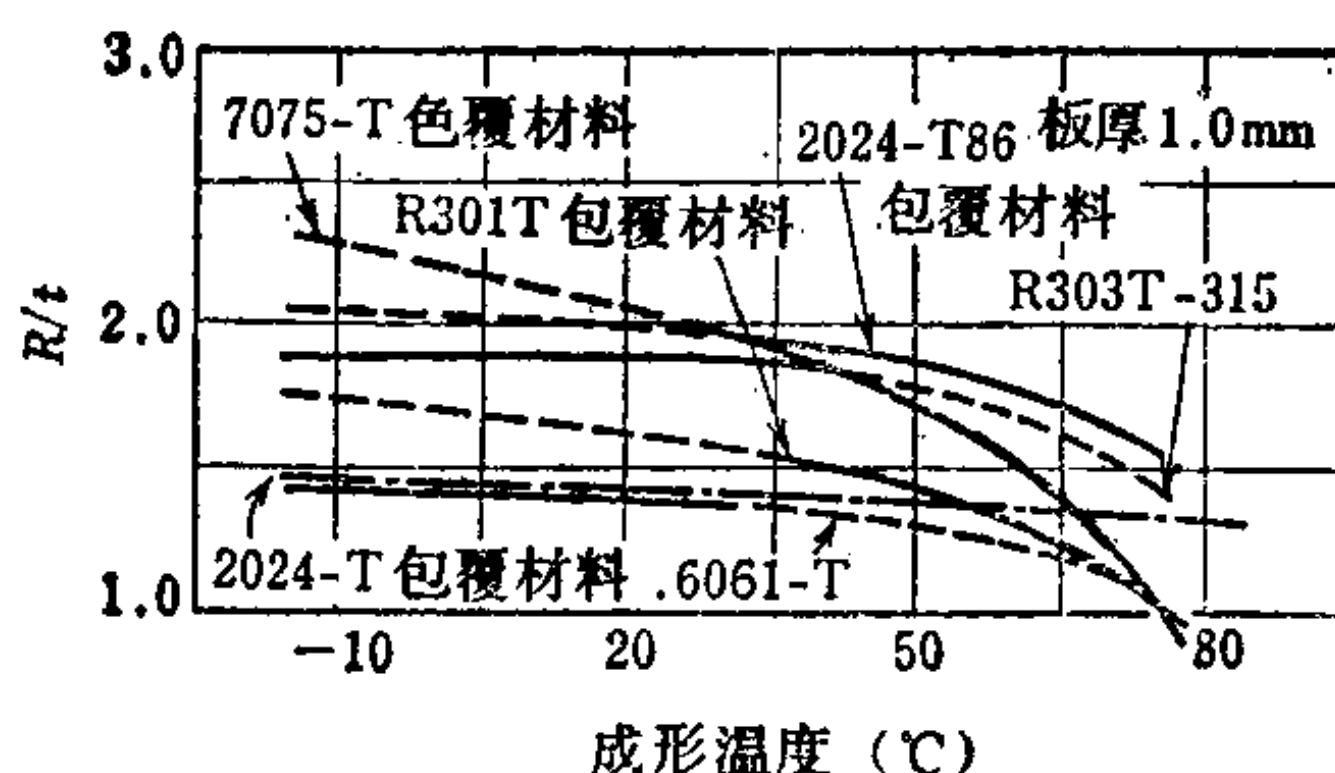


图3.138 强力铝合金的成形温度和最小弯曲半径

表3.8 滚压成形机规格之一例

辊轮轴直径 (in)	工位间隔 (in)	成形深度 (in)	板宽 (in)	板厚 (in)	使用软钢时的断面积 (in ²)	动力 (HP)
1 ¹ / ₂	11	1/2	2	0.048	0.500	5
2	15	1 ¹ / ₂	5	0.064	1.125	15
2 ¹ / ₂	18	2	8	0.128	1.750	30
3	24	6	20	0.128	2.500	75

之间具有图 3.139 所示的关系。主轴的驱动方式有上下等速驱动，变速驱动和下轴驱动等，在辊轮的孔型设计中要注意摩擦损失。为减小辊轮和材料之间的摩擦，水溶性油混合液（2~10%）被用作冷却润滑。表 3.8 即为滚压成形机规格之一例。

作为滚压成形的辅助加工装置，常把导向、滑槽、托辊、矫正、剪切、切口、冲孔、起伏成形、压印、接合等机构结合起来使其联动。

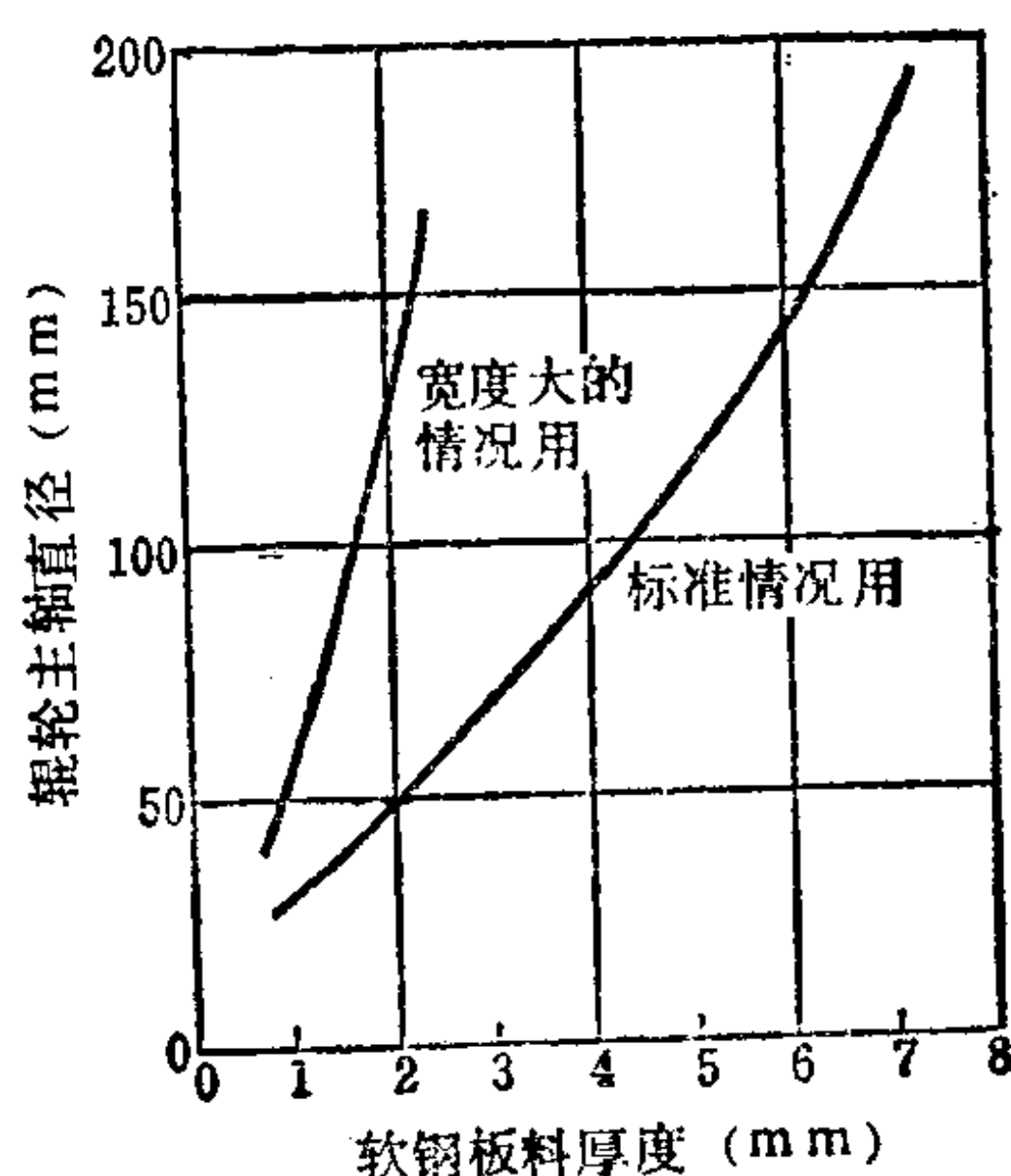


图 3.139

3.4.7 辊轮设计 [127、128]

滚压成形中，辊轮设计是最重要的技术，但是，在理论上并不完整，而以经验和推断占八成，理论分析占二成，实验的因素很多。

a. 制件形状 考虑所需形状的时候，首先要避免制件断面形状出现太深的沟槽，对于弯曲半径，要考虑材质的弯曲性能，避免急剧过渡的尖角，死尖角成形是难以达到精度要求的。这些都是首要的基本条件。

b. 花型展开图 当着手设计时，要考虑所需断面的形状，接着，绘制把弯曲件逐渐展开直至回复到平板料的展开草图，对如图 3.140 所示那样的将展开过程中的形状叠放在同一张纸上的

花型展开图 (flower) 进行分析研究。这种方法, 无论是对于形状简单的断面还是复杂的断面都是有效的研究方法, 进而就可以从整体上去考查从一个辊轮孔型移至下一个辊轮孔型的时候, 高度方向和宽度方向的弯曲加工有无不合理的地方。

c. 成形直边角度 如图 3.141 所示那样, 成形材料的最大高度是基于以直线关系向上增加为出发点, 其设计方法为控制成形直边角度使之合理化。对于软质材料采用 3° 左右即可, 但边缘部分的延伸过大恐怕就有发生边缘波纹的危险。

对于不锈钢也有资料认为最好是 $1^\circ 35'$, 但是只要取为 $1^\circ 25'$ 对于大部分金属材料都是安全可行的。如果在图中把辊轮的工位间距取为 d , 定出各工位上的成形高度就可以作出花型展开图和各辊轮孔型的设计图。

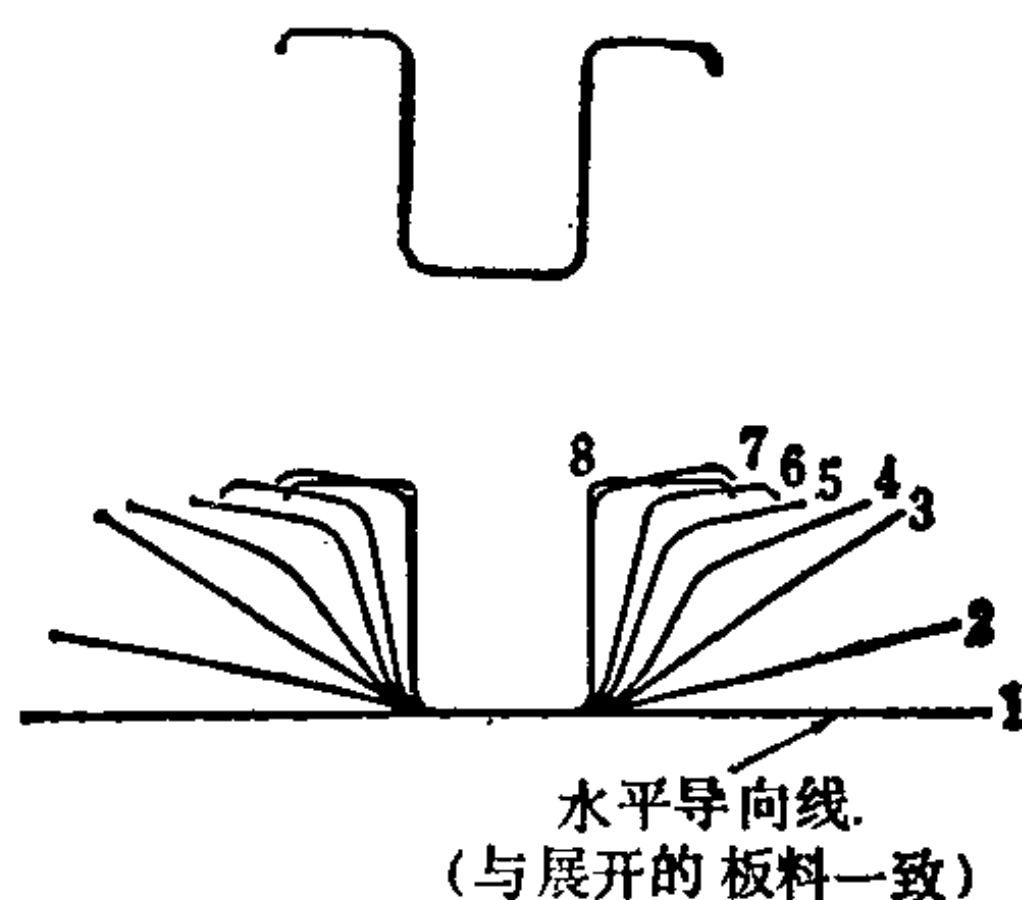


图3.140 概略设计
和水平导向线

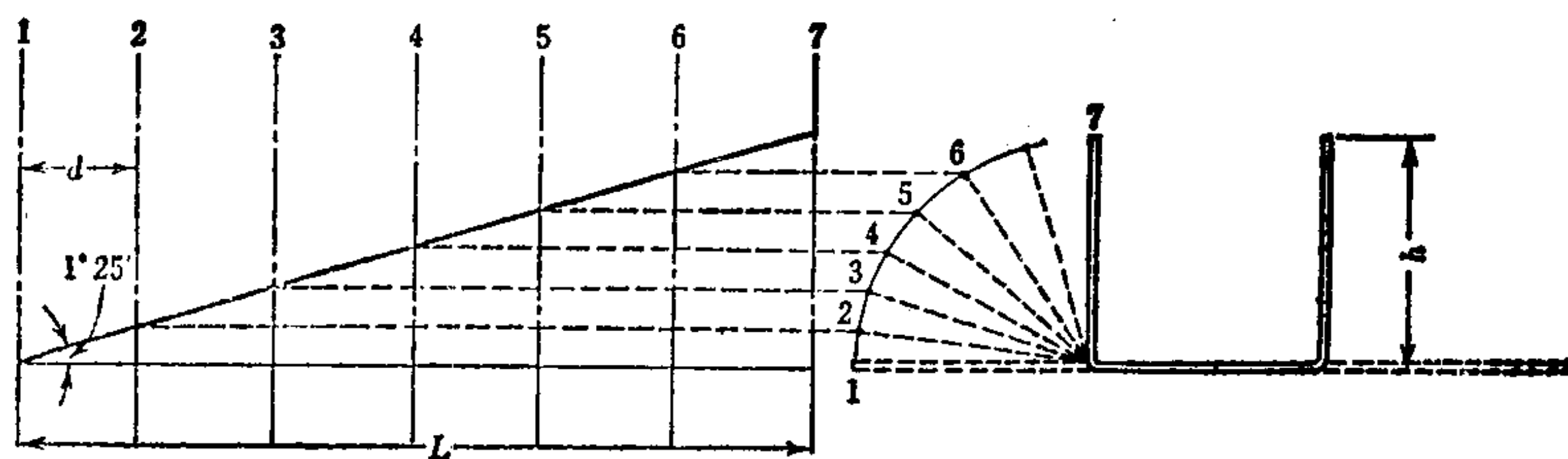


图3.141 成形直边的角度和成形高度

d. 导向线 为使板料从平板状态向前移动直至成形出所需断面形状, 就需要有水平导向线和垂直导向线。水平导向线从第一组辊轮开始到最后的一组辊轮为止始终保持在同一水平面上, 为确定成形辊轮的节圆直径的基准。垂直导向线垂直于辊轮轴线, 是从第一组辊轮至最后一组辊轮使得在此导向线两侧的成形加工

量都是均等的一条基准线，在对称断面中，此导向线与断面中心线一致。

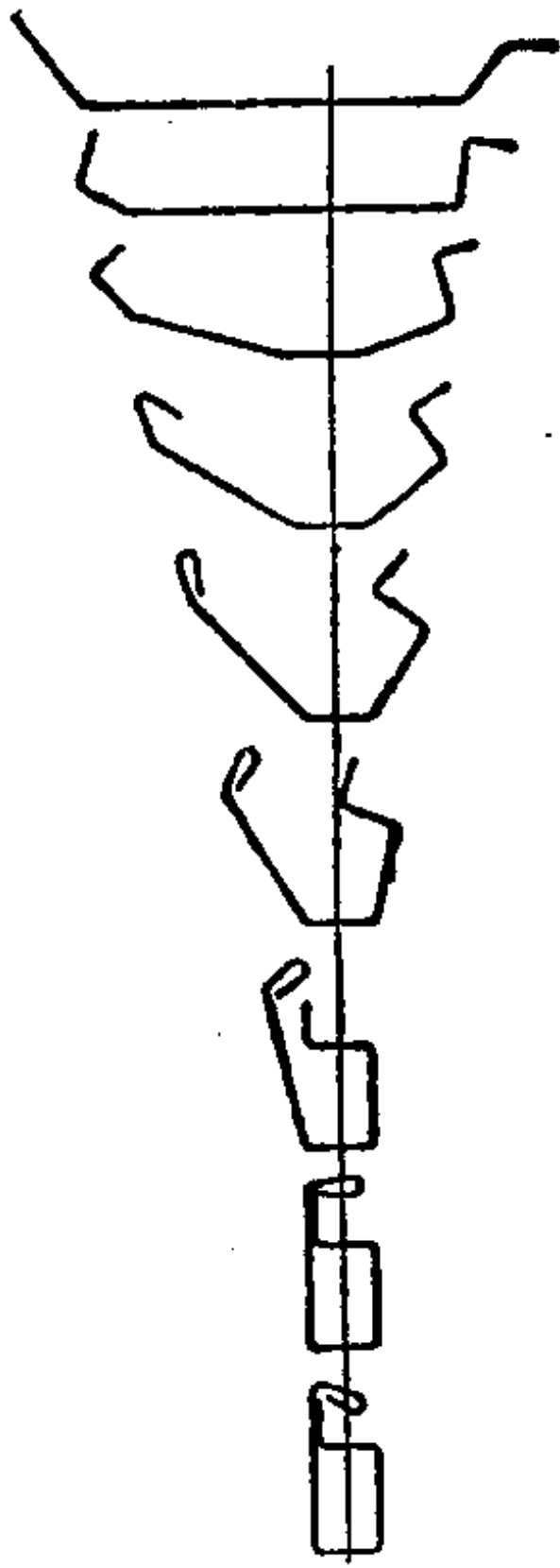


图3.142 垂直导向线

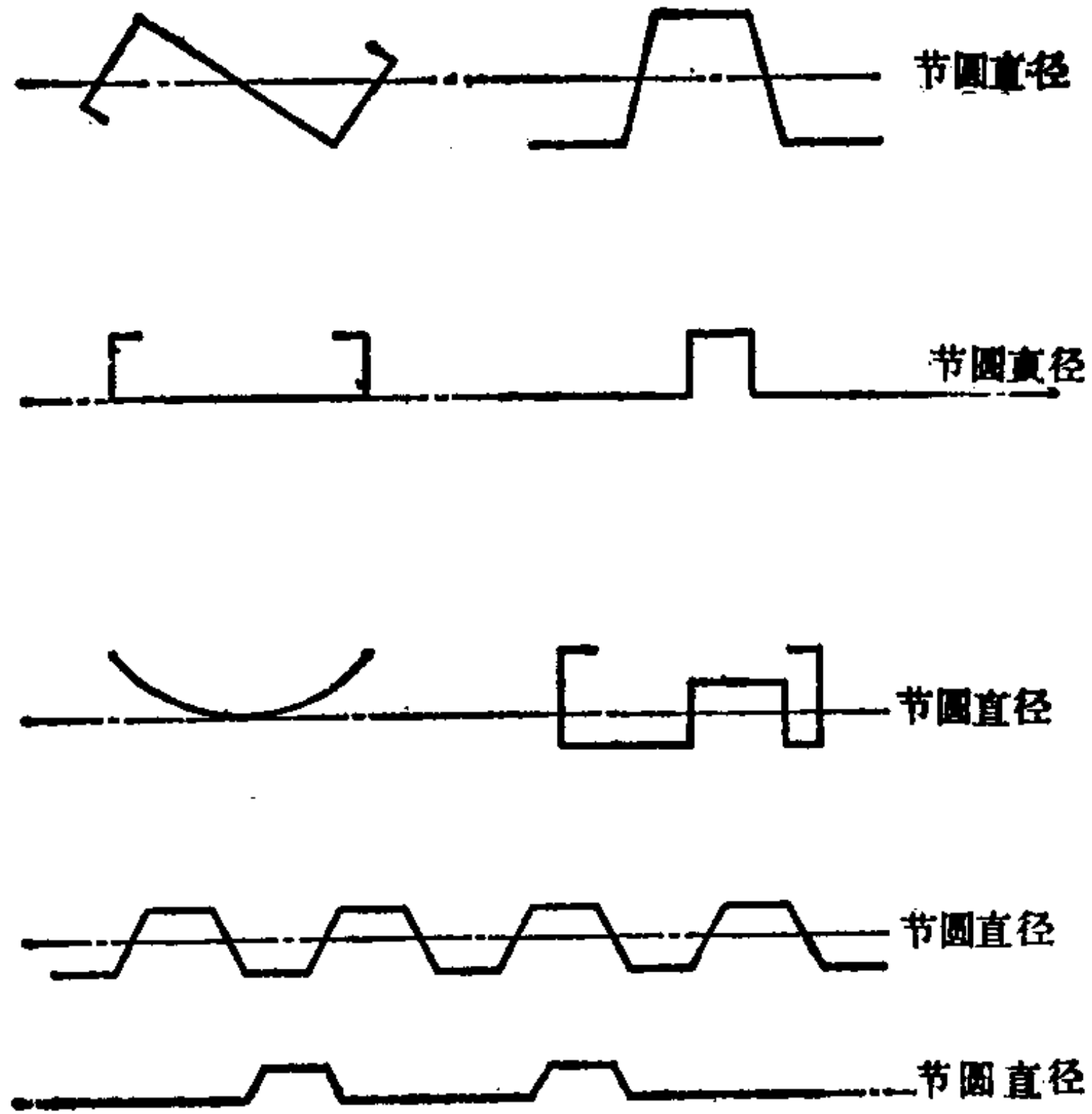


图3.143 辊轮节圆直径的位置

e. 辊轮节圆直径 上下辊径一致的直径是辊轮的节圆直径，也称为孔型线，在节圆上可以无滑移地送进成形材料，在此点以外的辊径上，辊轮和材料之间就要发生滑移。将辊轮节圆直径选在成形辊轮孔型的哪个点上是一个重要的问题。从理想的角度出发，最好是选在辊轮受力最大的点上，但是这些点在每一组成形辊轮上是变化的。在这里，如考虑设计得使通过第一组辊轮直至最后一组辊轮的水平导向线和辊轮节圆直径相一致，那么，在各辊轮中，使节圆直径与断面形状的底面或者与断面高度的中心相重合就方便了。节圆直径的长度要在每一孔型中增加0.5~1.0%左右，朝着最后一组辊轮方向对材料给以拉伸作用以防止弯曲和扭转。

f. 辊轮的组数 辊轮组数的确定是一个困难的问题，但是对于简单断面的成形，如象图3.141所示那样确定成形直边的上

升角度为 $1^{\circ}25'$ ，辊轮工位间距为 d ，成形设备的全长为 L ，那么辊轮的组数 n 就可以用下式确定：

$$n = \frac{L}{d} = \frac{h \cdot \cot 1^{\circ}25'}{d}$$

但是对于复杂断面，照此沿用是不行的，需增加辊轮数量才行。如果利用托辊或边辊从横向加工，则可以减少垂直成形辊轮的数量。

g. 成形顺序 大体上有三种方法。(i)从板料宽度的中心起顺次向两边成形的方法，被广泛地用于宽料等的成形之中，由于在中间使材料流向两边，就不用担心发生不合理的拉伸。(ii)从板料的两边开始成形再顺次成形到中间的方法，被用于管形件等的成形之中，在先使边缘成形更为方便时以及由于用边缘成形以提高边缘的纵弯强度等场合下，就采用这种方法。(iii)在板料的中间和两边都不加区别地同时对各个部分作成形的的方法，被用于宽料等的成形之中，最初对整体作缓和的过渡弯曲，接着再对急剧过渡的角度作精加工。

h. 弯曲方法 作为基本的弯曲方法有如下几种：(i)弯曲半径一定使弯曲弧长度逐渐增加的方法，被用于普通钢以及不锈钢的成形之中。图 3.134 所示的管件成形的边缘成形法以及中心成形法就是这一类型。(ii)保持弯曲弧的长度一定，一面使弯曲角度加大一面减小半径并急剧作弯曲的方法，除钢材之外也用于强力铝合金的成形中。管件成形中的圆形成形就是这种方法。

(iii)对于 Ti、Mg、Al 合金等材料，将板坯加热在某些场合是由于成形的需要，也有些场合是为了起到减小弯曲半径的作用。

(iv)在常温下，特别需要作急剧弯曲时，要用图 3.144 那样的方法。

i. 板坯宽度的计算 与模具弯曲的情况一样，滚压成形的板坯宽度按等于弯曲中性线的长度来计算。

在急剧弯曲的部位，必须注意到中性线向受到压缩的一侧亦即是弯曲的内侧转移这一现象。如果取中性线的长度为 l ，弯曲

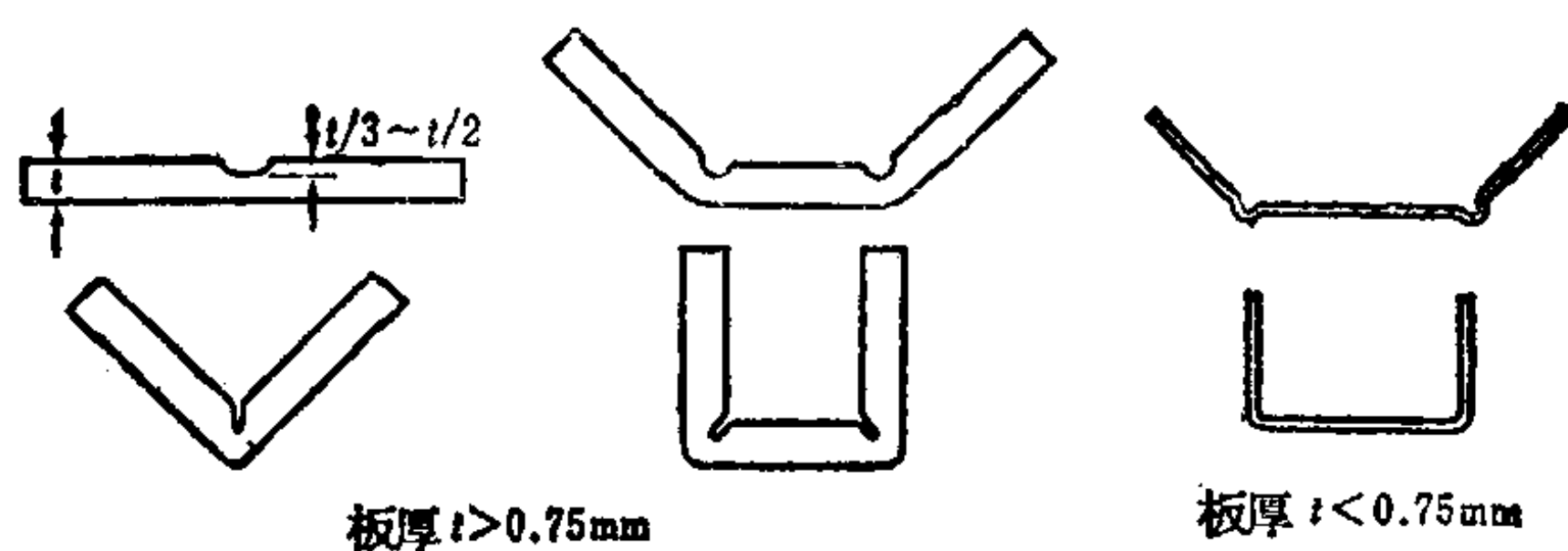


图3.144 急剧弯曲的成形法

角为 α ，内侧弯曲半径为 R ，板厚为 t ，从弯曲内侧到中性线的距离为 kt ，则

$$l = 2\pi(R + kt) \left(\frac{\theta}{360} \right) = 0.01745 \theta (R + kt)$$

中性线在板厚的 $\frac{1}{2}$ 处时（弯曲半径大的情况下）， $k = 0.5$ ，但是随着出现急剧弯曲， k 即变为 $0.4 \sim 0.3$ 。关于 k 值参照图 3.79。

j. 辊轮孔型的间隙 在滚压成形中，板厚不会出现变厚的现象，对于弯曲部分，由于材料变薄，因此就可以取间隙等于材料的厚度。由于除去辊轮节圆直径之外，原则上都要发生滑移，所以对于节圆直径以外的点，倒是取得较板厚大一些更为安全。此外，对于最后一组辊轮孔型以外的各中间孔型最好是把间隙取得大一些。

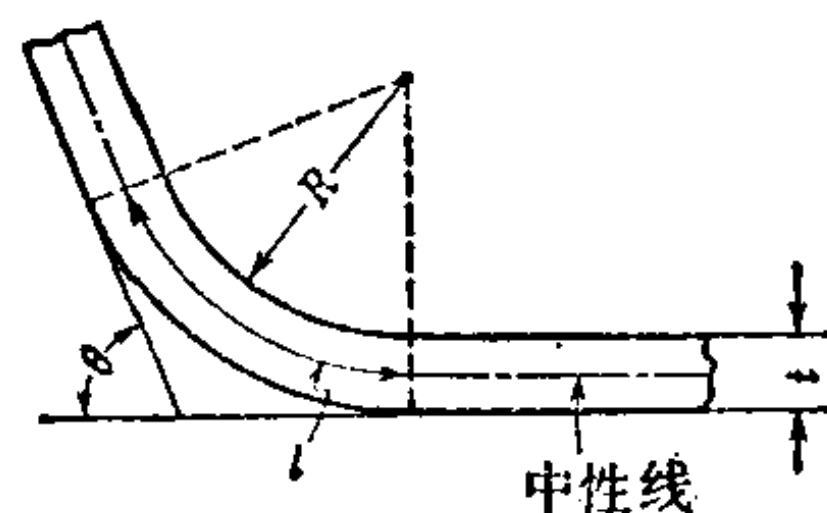


图3.145 弯曲弧的长度

k. 防止回弹 为克服回弹而采用的过弯曲法；对正在精整辊轮孔型中的制件从四周向孔型作强制加压的方法；以及对于管形件那样的封闭断面，在进到精整孔型的制件加以均匀压缩应力等方法，对于限制滚压成形件的回弹都是行之有效的。

1. 防止表面伤痕 滚压成形中，如果是图 3.146 E 的状态板坯放置在辊轮肩部半径处，那么，由于辊轮回转的滑移作用，就要在纵向表面上产生连续的表面伤痕。为了防止这种缺陷，要

象 F 那样作成宽阔的孔型，这对将板料放进孔型的倾斜面成形或者由侧辊轮从横向挤压都是有效的。

m. 辊轮 将碳素工具钢、特殊工具钢等材料淬火至洛氏硬度 C 60 左右即可作为辊轮使用。大尺寸的辊轮用特殊铸钢，对于软材料的滚压成形也有用铸铁作辊轮的。镀铬辊轮和硬质青铜辊轮可以防止产生表面伤痕。再则，由于辊轮孔型的各个部分产生磨损的情况各不相同，因此，就有局部更换的必要了。对于形状复杂的成形辊轮，组合式辊轮比整体式辊轮更为方便(图3.147)。

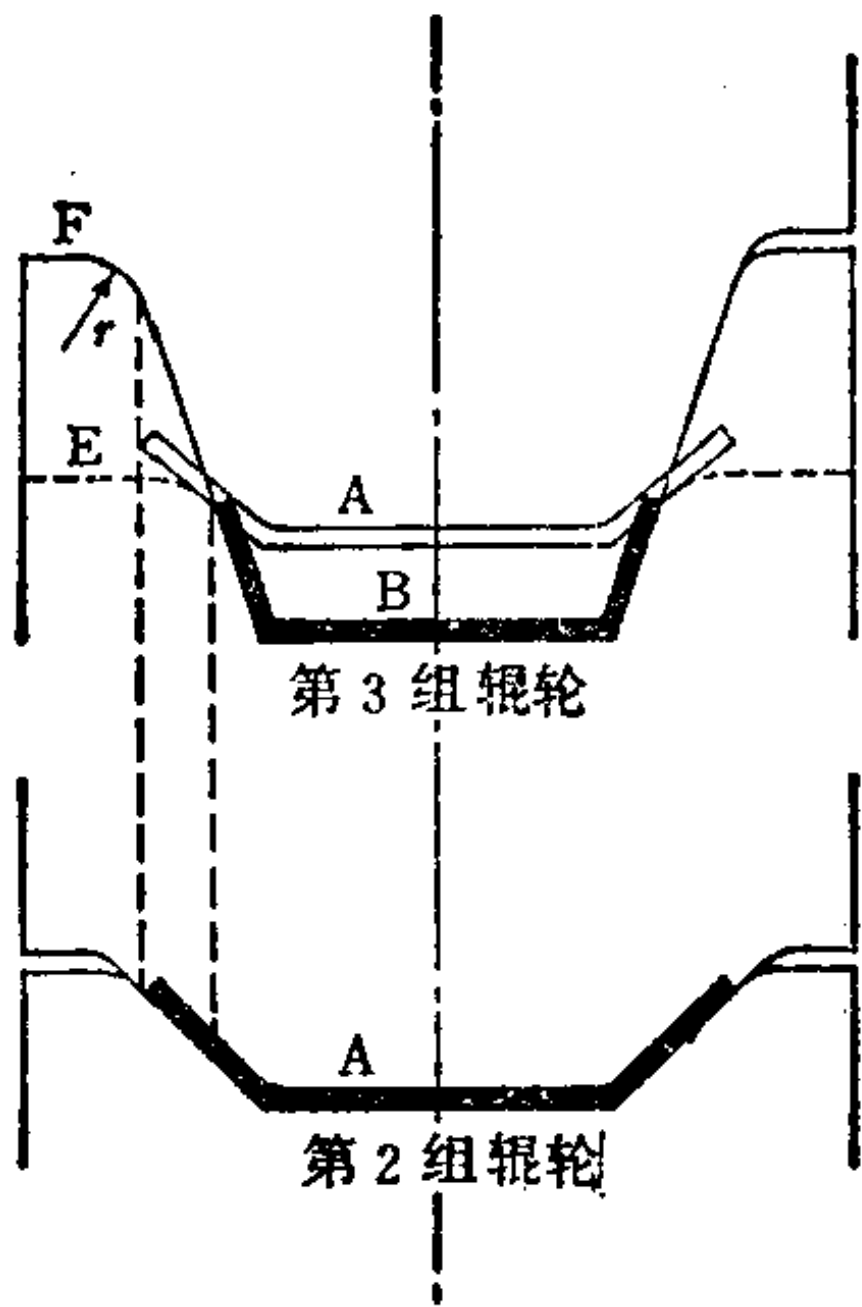


图3.146 孔型侧壁的设计

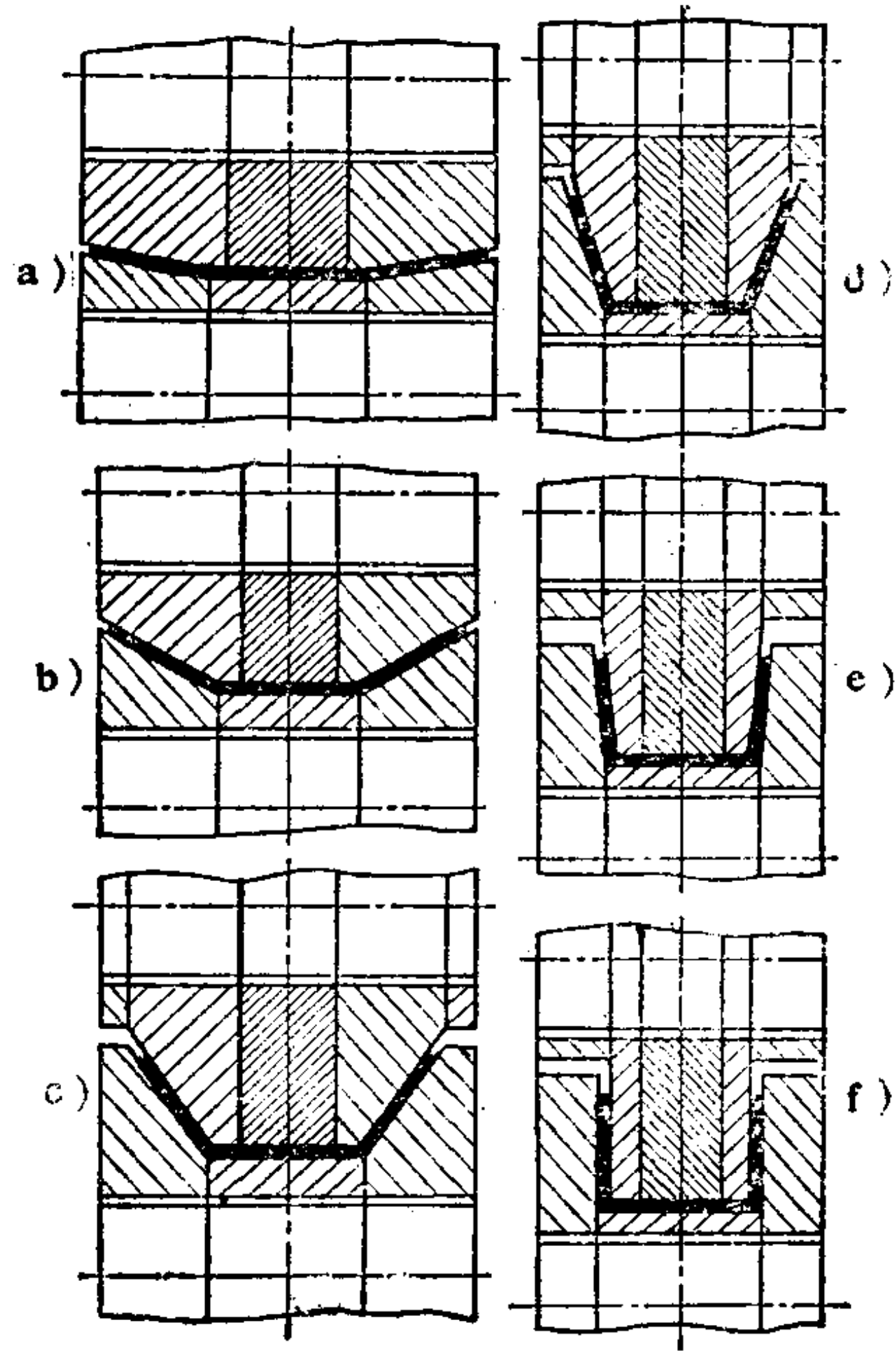


图3.147 组合式成形辊轮之一例

3.4.8 成形辊轮孔型的实例

a. 槽形件的成形 以图 3.148 所示的情况为例，带料宽度的计算如下：

$$\begin{aligned}
 A &= \text{直臂高度} - (\text{内侧半径} + \text{板厚}) \\
 &= 0.750 - (0.078 + 0.062) = 0.610[\text{in}]
 \end{aligned}$$

$$B = \text{弯曲弧长度} = \left(\text{内侧半径} + \frac{\text{板厚}}{2} \right) \times \frac{2\pi}{360} \times 90$$

$$= \left(0.078 + \frac{0.062}{2} \right) \times 0.017 \times 90 = 0.171[\text{in}]$$

$$\begin{aligned} \text{板料宽度} &= 1.720 + 2A + 2B \\ &= 1.720 + 1.220 + 0.342 \\ &= 3.282[\text{in}] \end{aligned}$$

第一组辊轮的弯曲角要小，以使板料的咬入状态良好，并防止边缘的延伸。为了作出急剧过渡的转角部分，因此也有带筋(线状凹面)的结构。在最后一组辊轮的前面，用空转辊轮从左右方向挤压以产生防止回弹的过弯曲作用。

b. 管形件的成形 图 3.149 上的缝焊管，图 3.150 上的咬缝管都是管形件滚压成形的例子。作为板料宽度的计算方法，当取 $W =$ 板料宽度， $T =$ 板厚， $2R =$ 管件外径， $A =$ 整形加工裕量，则有如下两个公式：

$$W = (2R - T) \times \pi + A + \left(\frac{2}{3} \right) T$$

$$W = (2R - T) \times \pi + A + T$$

这两个公式仅仅是第 3 项不同。对于 $1 \frac{3}{4}$ " 的管件，如取 $A = 0.094$ in，则得到板料的宽度分别为 5.439in 和 5.468in。

c. 异形断面件的成形 图 3.151^[129]所示为固定百叶窗用的板条断面的成形辊轮。板料宽度的计算，花型展开图，第 5 组孔型和第 6 组孔型之间的空转辊轮和矫正装置也示于同一图上。越是后面的孔型辊轮的直径取得越大，以产生拉伸作用。到

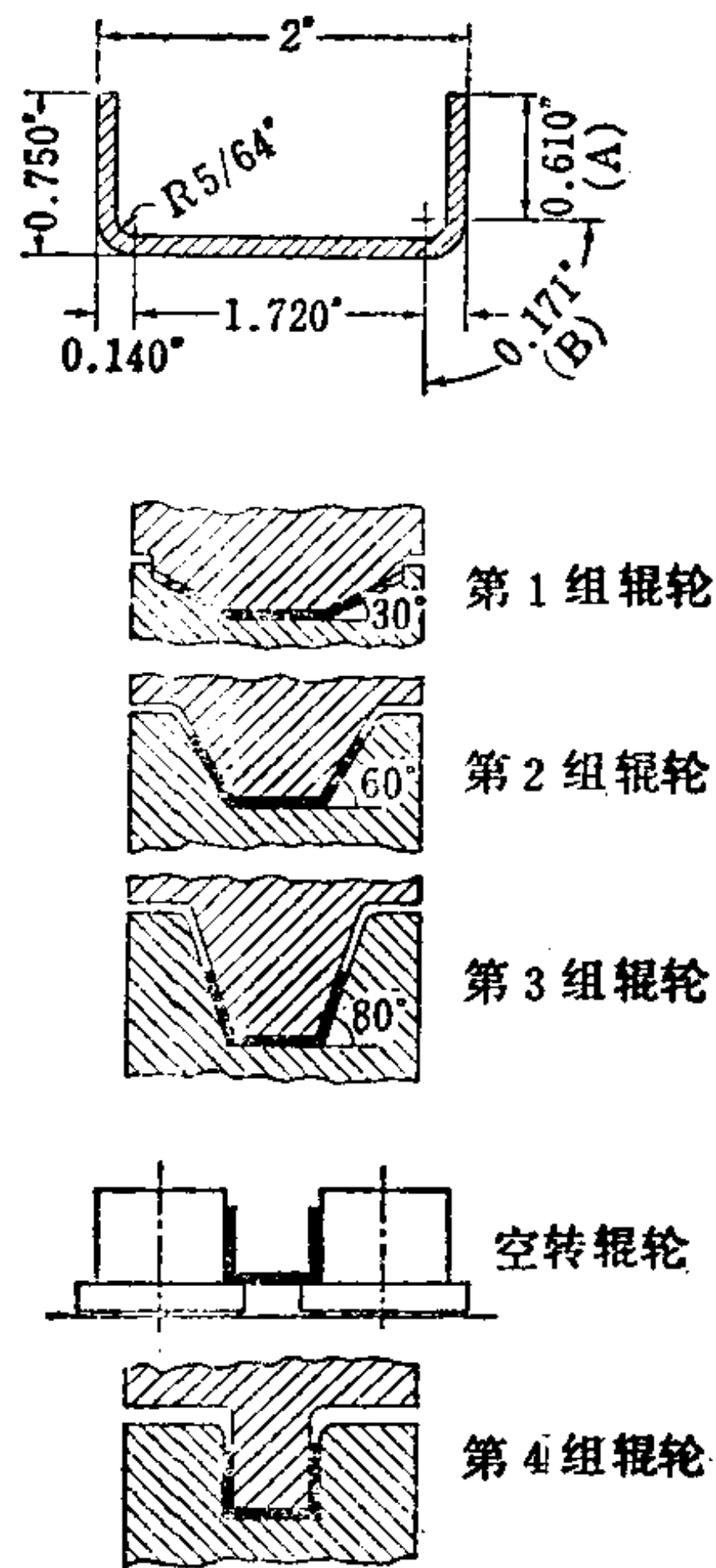


图3.148 槽形件的成形

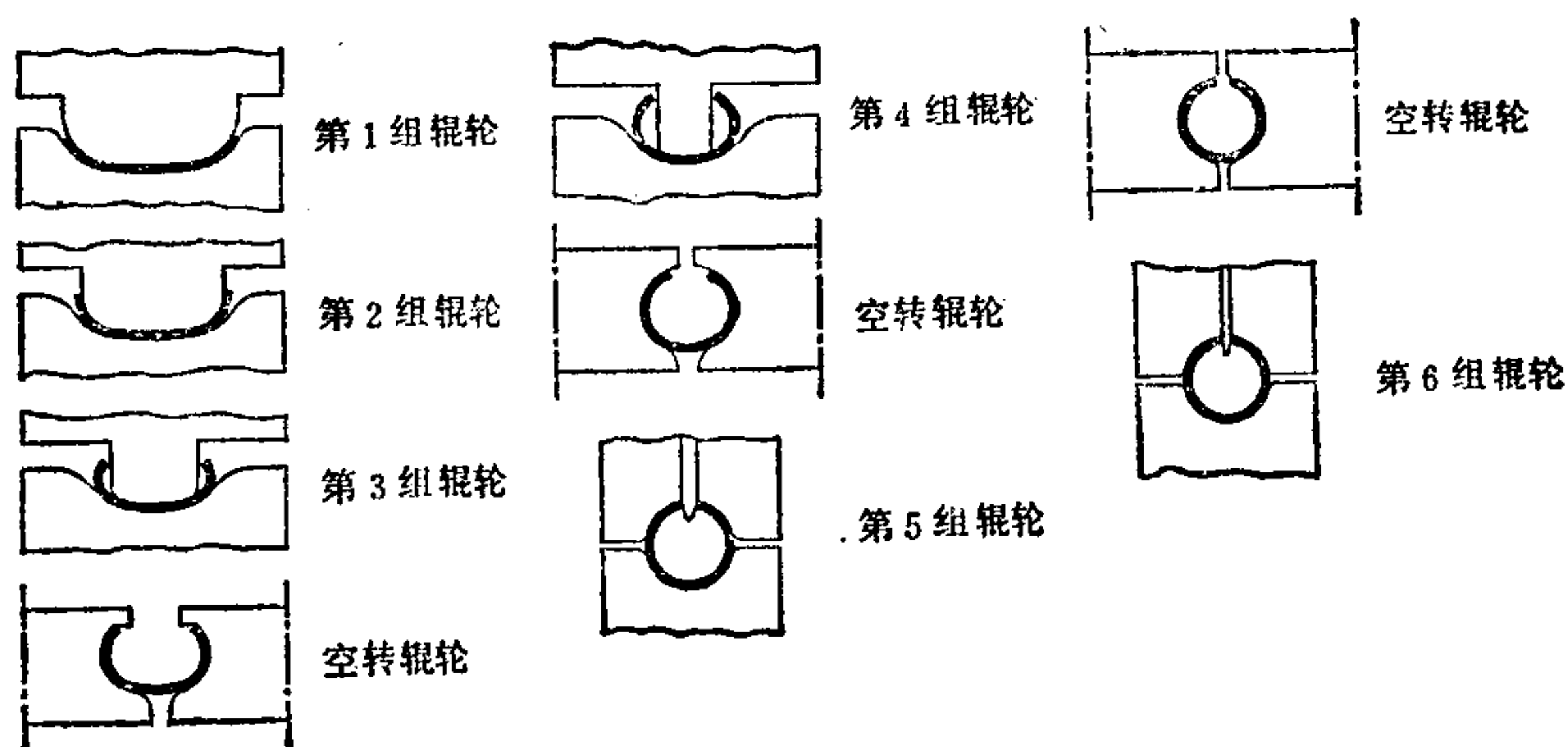


图3.149 焊接管的成形

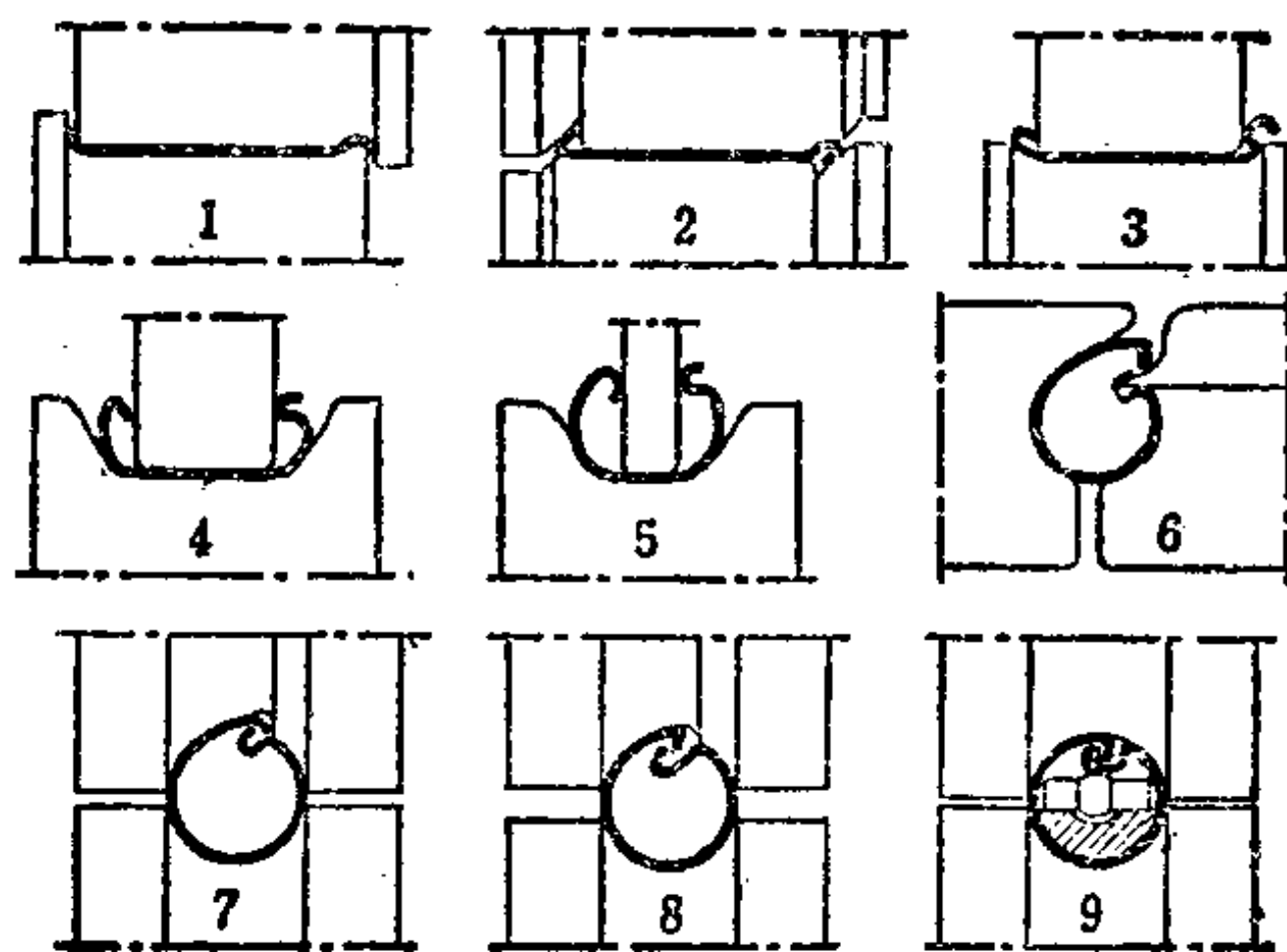
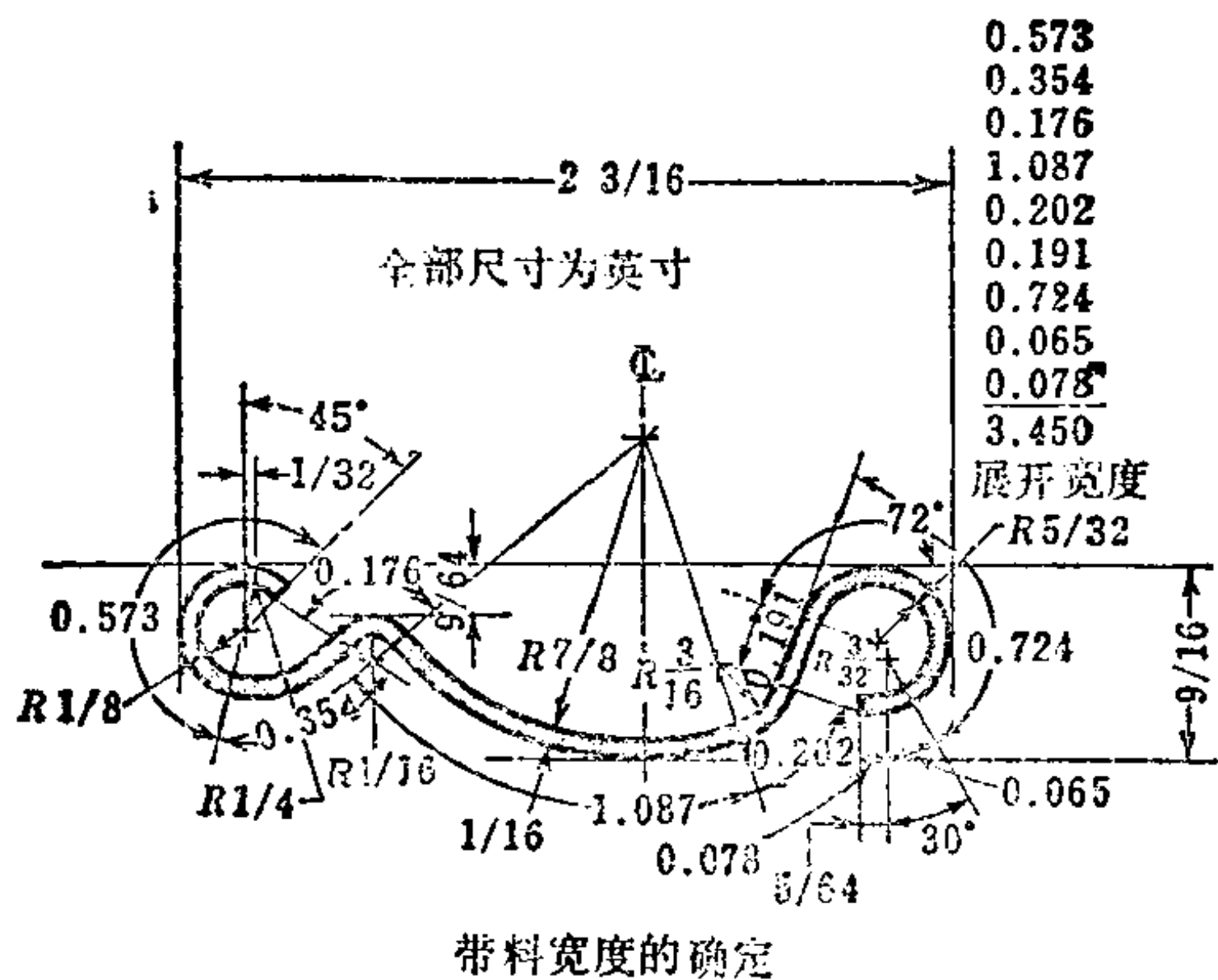


图3.150 咬缝管件的成形

第3组辊轮的孔型即完成中间部分的成形，第4至第8组辊轮是两边的卷耳成形。

d. 波纹板成形 图3.152所示为波纹板成形辊轮的一例。是从中心部分开始顺次进行左右两边的成形的方式，板料被保持在同一水平面上。图3.153所示是为了防止边缘波纹的一种方法〔130〕。

e. 几种断面形状的复合成形 如图3.154〔131〕所示，是对A、B、C断面分别成形，进而在最后组合起来的一种成形方法。



花型展开图

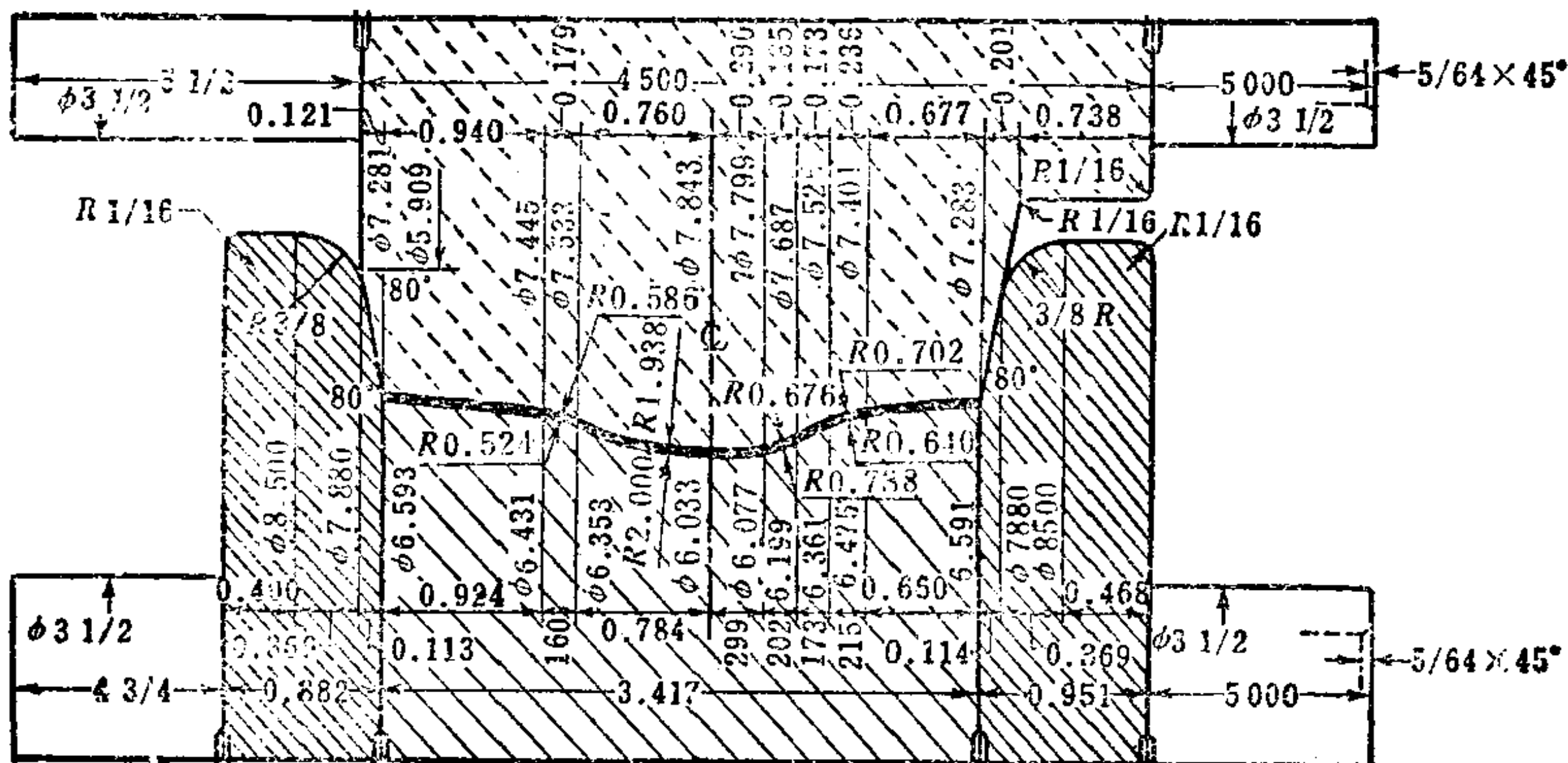


图3.151 (1) 异形断面成形辊轮

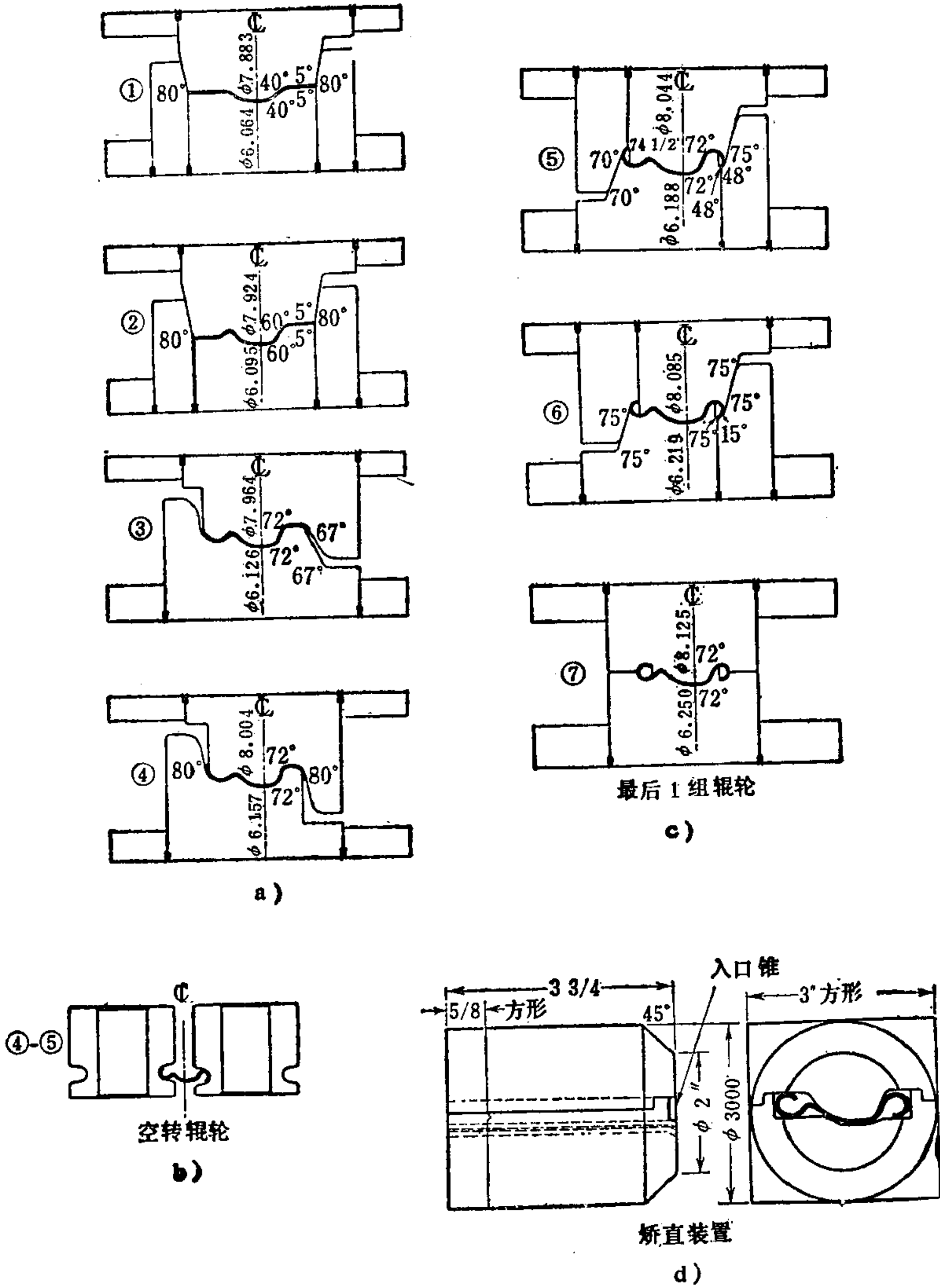


图3.151 (2) 异形断面成形辊轮

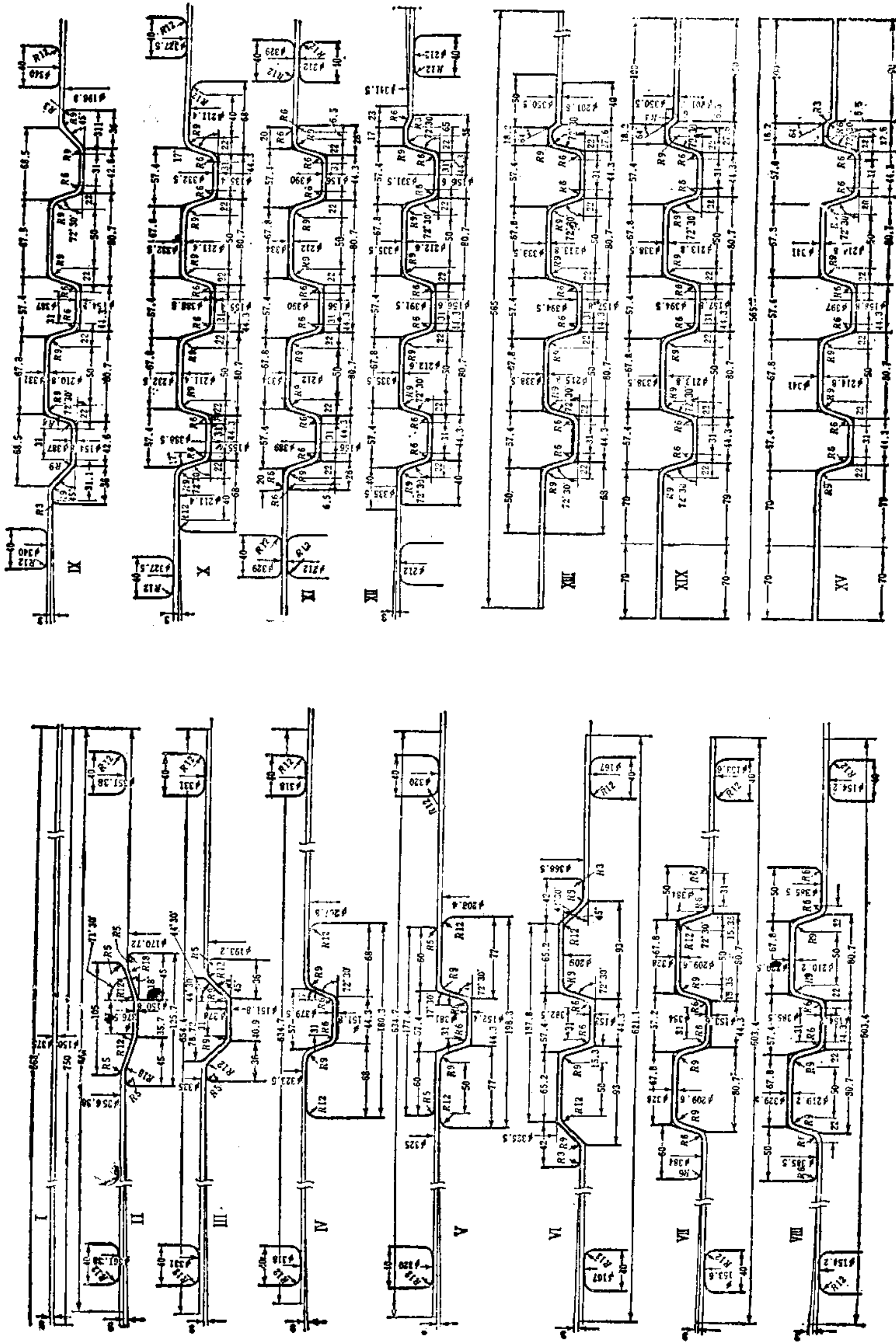


图3.152 波纹板成形辊轮①

① 原图过小，未作加工。——译注

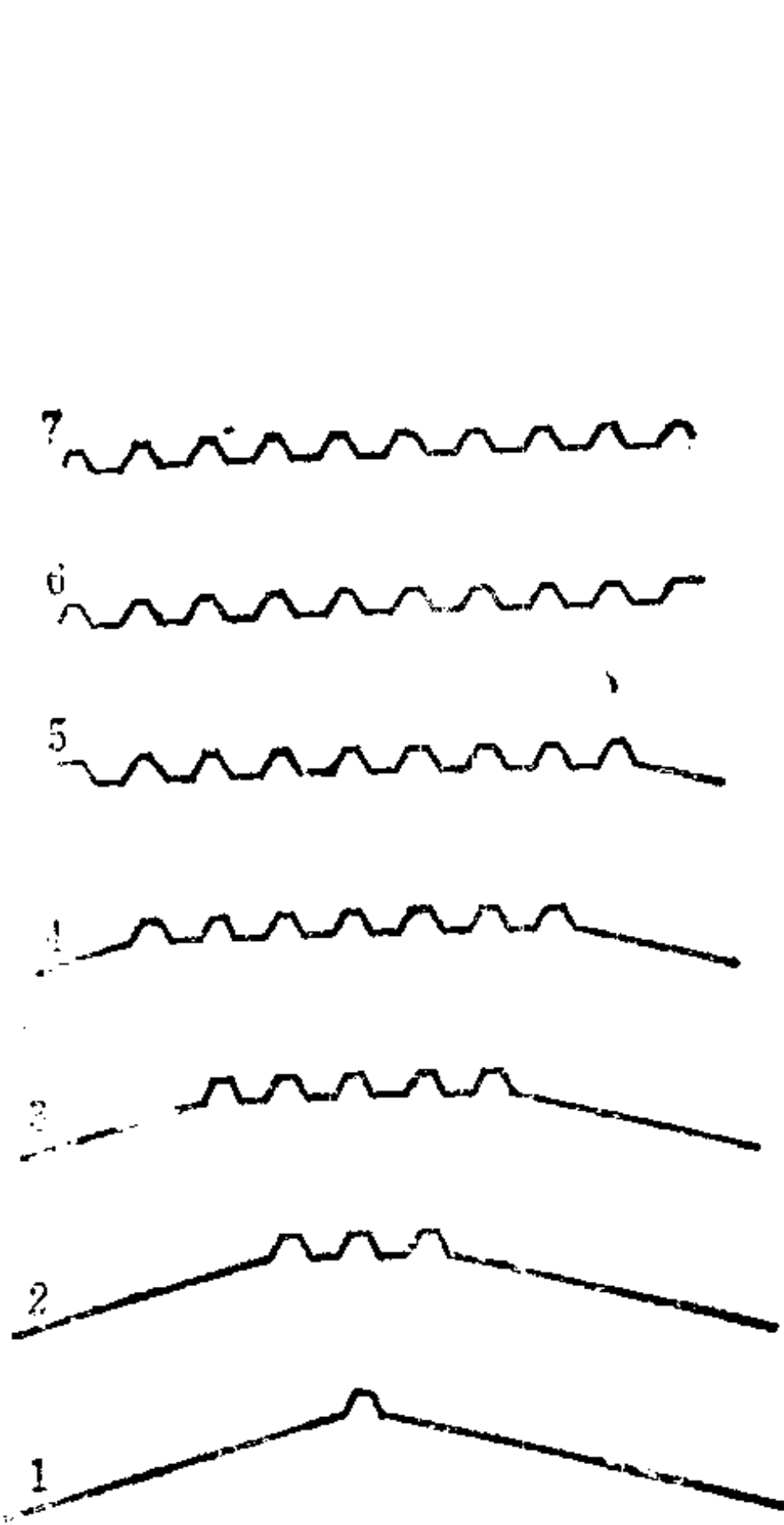


图3.153 库克逊 (Cookson) 法波纹板成形

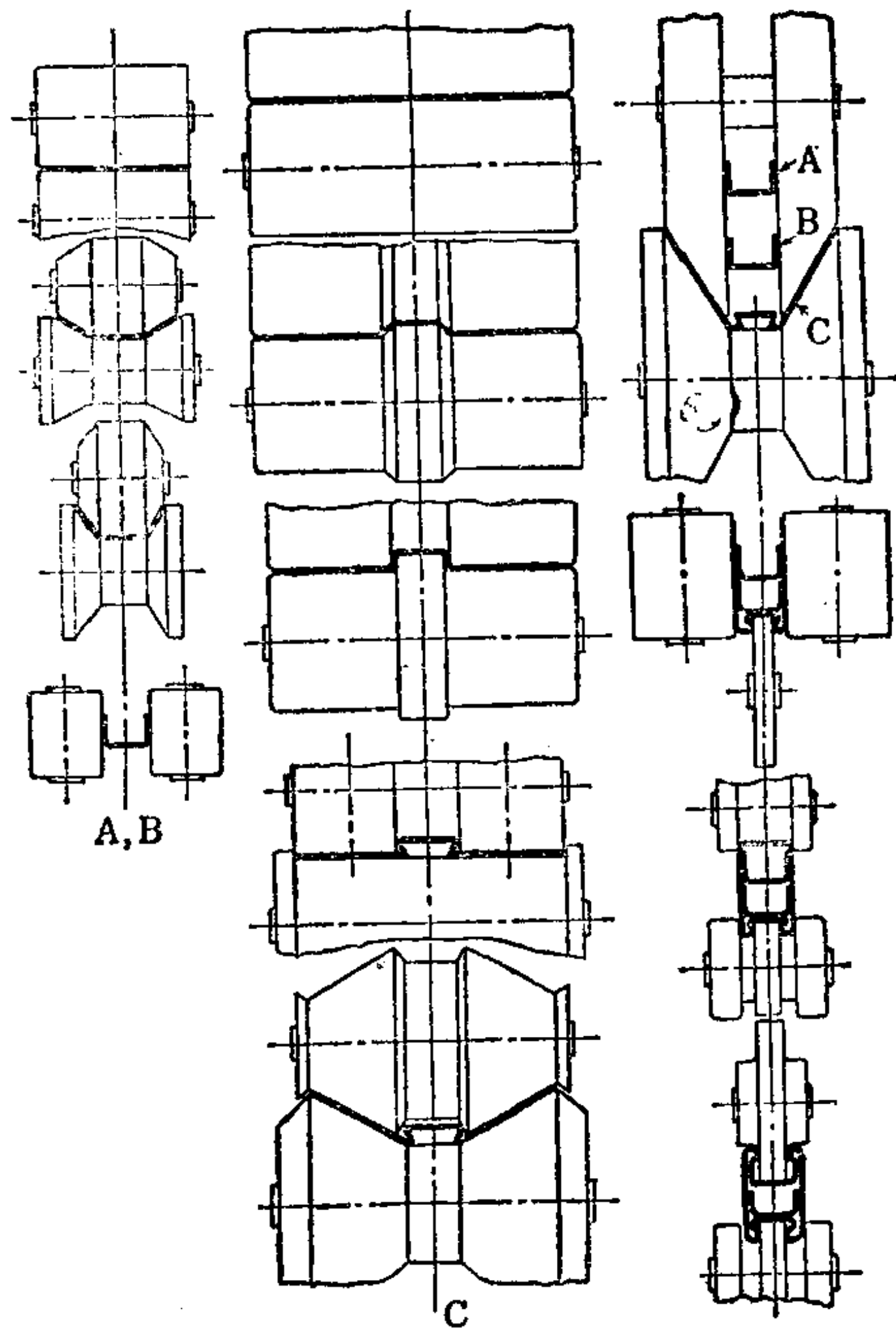


图3.154 3个断面的复合成形

3.5 型材、管材的弯曲加工 [132~136]

管材、型材的弯曲加工与板料相比，由于其横断面的形状复杂，所以和通常的板料弯曲加工有所不同。特别是由于弯曲附加应力（与弯曲纤维的轴线相垂直）的作用，横断面形状就一定要发生变化，而且也会使壁厚发生变化。因此，当进行管材和型材的弯曲加工时，必须充分考虑各种因素，采用适当的方法。

3.5.1 弯曲加工的方式

在管材和型材的弯曲加工中，由于存在断面形状的变化，因此，其加工方式也就与板料的加工方式有所不同，其主要方式可以分为下列5类：

- 1) 压制弯曲；

- 2) 压缩弯曲;
- 3) 延伸弯曲;
- 4) 拉弯;
- 5) 滚弯。

此外, 尚有如下的其他加工方式:

- 6) 锥形芯棒扩管弯曲 (只作为圆管的加工方法);
- 7) 振动冲击弯曲 (只作为型材弯曲的加工方法)。

但后两种方式, 系不加弯曲力矩对材料进行弯曲的特殊方法, 不象前述 5 种那样带有通用性。至于极其特殊的方法还有:

- 8) 其他形式的特殊弯曲。

a) 压制弯曲 图 3.155 所示形式的弯曲, 系最古老的用作弯曲加工的一种形式。它是在两个支承凹模的中间, 将凸模推压下去以进行弯曲的一种结构形式。装置简单而价廉, 但制件的形状不够理想。此外弯曲角也是有限的 (大致为 120° 左右)。通常, 这种弯曲方法只限于在同一平面内弯曲, 而采用木质弯曲模以进行复合弯曲的方法也有所发展^[137]。在这种情况下, 就可以作 2 维、3 维空间的复杂弯曲加工。

b) 压缩弯曲 图 3.156 所示形式的弯曲, 系绕固定弯曲模的周围使活动推压模回转以进行弯曲的一种加工形式。这种方法也有手动的结构, 对小型制件 (杆件等) 进行弯曲是经济的。压缩弯曲的生产效率较高, 弯曲角也可能到达 180° 左右, 但是弯曲

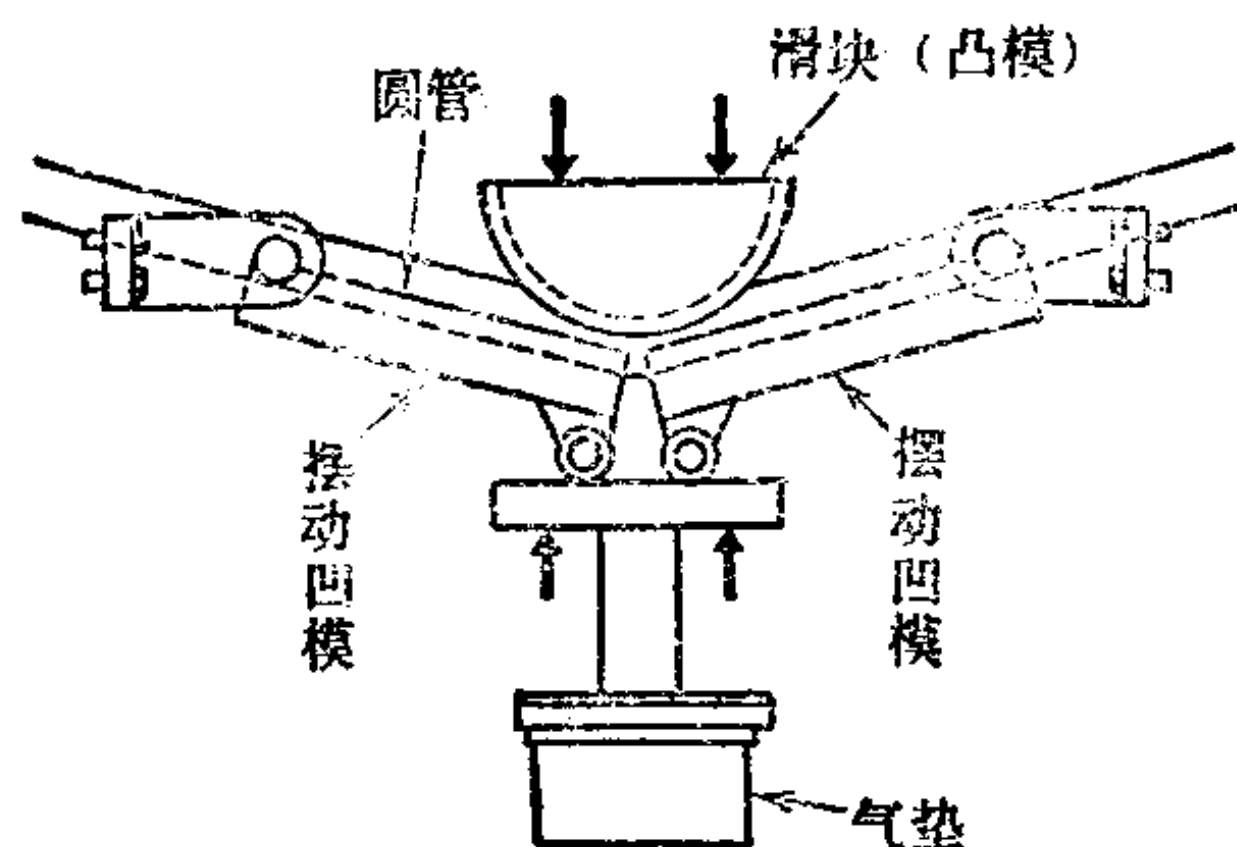


图3.155 压制弯曲

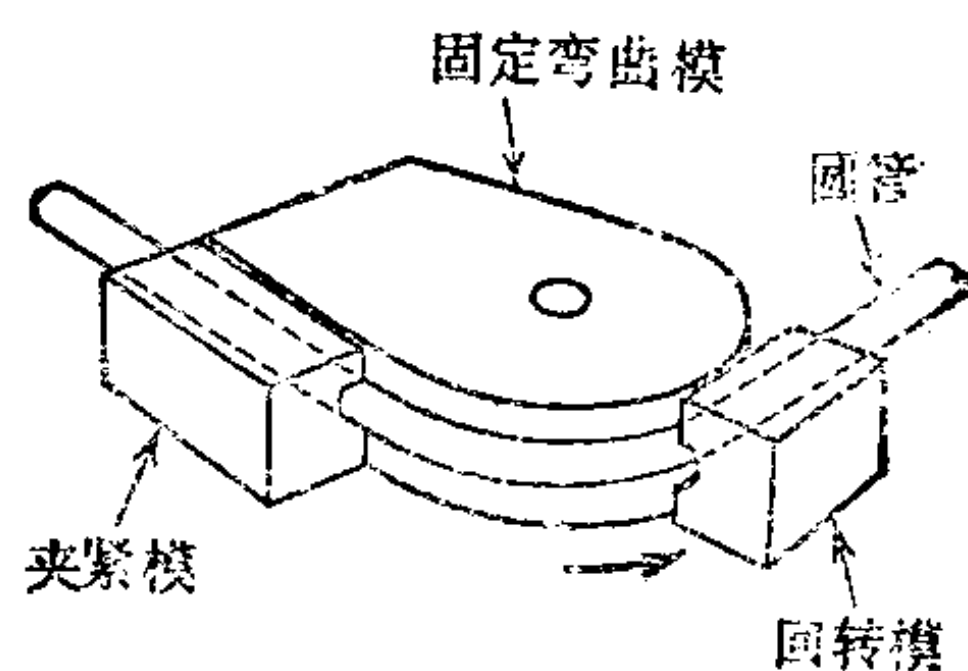


图3.156 压缩弯曲

半径不能太小。特别是对厚壁钢管等作弯曲加工时，在弯曲的内侧可能发生皱折。

c. 延伸弯曲 如图 3.157 所示，延伸弯曲是将材料压在固定弯曲模上，在对其端部进行延伸的同时作弯曲加工的方法。根据弯曲模的形状，可以同时作多种曲率的成形。在一般的延伸弯曲中，最大弯曲角大约为 180° ，但是也有可弯至 360° 的方法。此外，还可以进行椭圆、抛物线等与中心距离有变化的弯曲加工，具有在其它加工方法中所没有的特征。

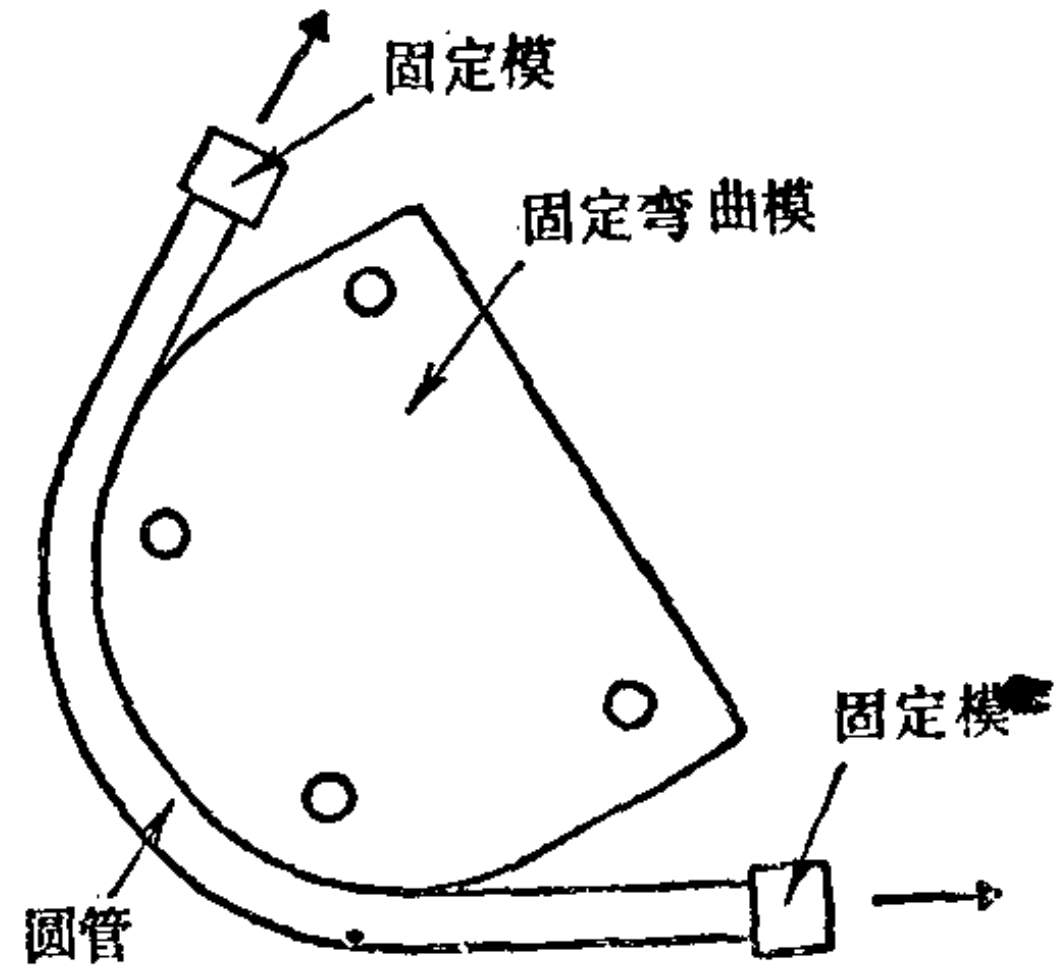


图3.157 延伸弯曲

d. 拉弯 拉弯是最常用的弯曲方法。基本的形式如图 3.158 所示。除这种基本方式外，还有不让压模移动的方式，用助推机构在管子的轴向给以推力的方式等巧妙的弯曲方式。拉弯可以得到小的弯曲半径，弯曲角也可以到 180° 以上。由于是将拉力加在材料上，因此，

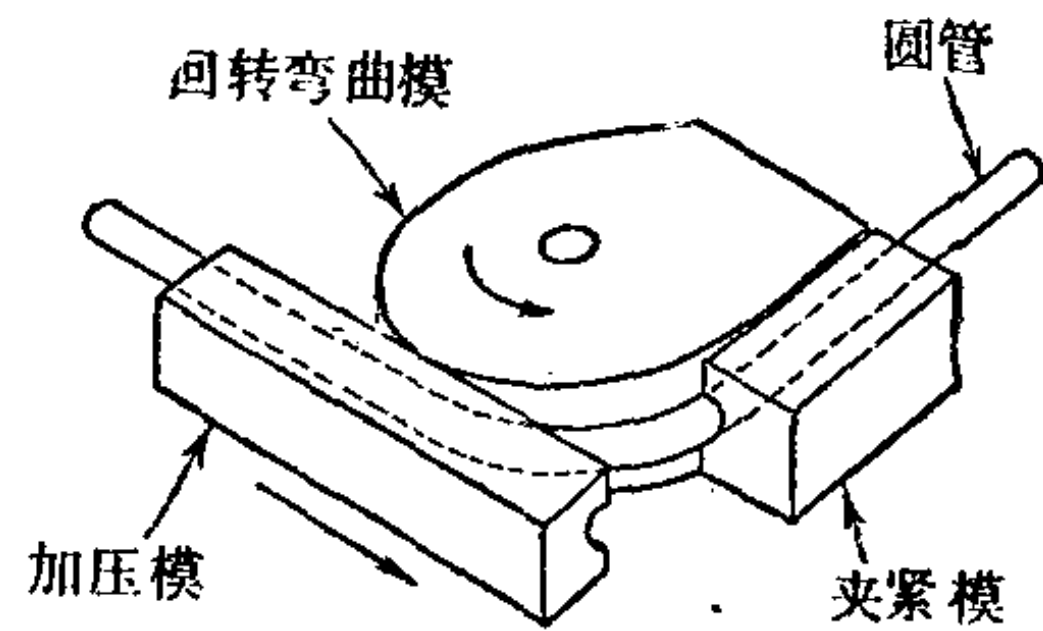


图3.158 拉弯

即使是在弯曲件的内侧，也难以发生皱折。在轴向施加推力时，就有可能控制管件的壁厚（参照 3.5.2. c 的图 3.177）。而且，如使弯曲模作少许滑动，则有可能作一定程度的除圆弧外的、曲率半径不同的弯曲（越是延伸弯曲，越不会出现自由状态的形状）。钢管的冷作弯曲加工，大体上都是采用这种方式。

e. 滚弯 是用 3 个驱动辊轮对材料进行弯曲，按辊轮的配置方式可分为角锥型和夹紧型两类（参照 3.3 节的图 3.11）。通过变化辊轮的间隔，就可以作任意曲率半径的弯曲，如果在出口一端设置一组辊轮，相对于弯曲面作垂直弯曲，则具有可弯曲出螺旋形状的特征。但是这种方法其弯曲半径有一定限度，对于辊

轮的形状等因素也有所限制。

f. 锥形芯棒扩管弯曲 是不加弯曲力矩，仅仅是对圆管的弯曲加工方法，被用于弯头、肘形管等的制作中。它是在均匀加热后的管状坯料中，压入圆锥形的具有要求曲率的芯棒，一边作扩管一边进行弯曲的加工方式。

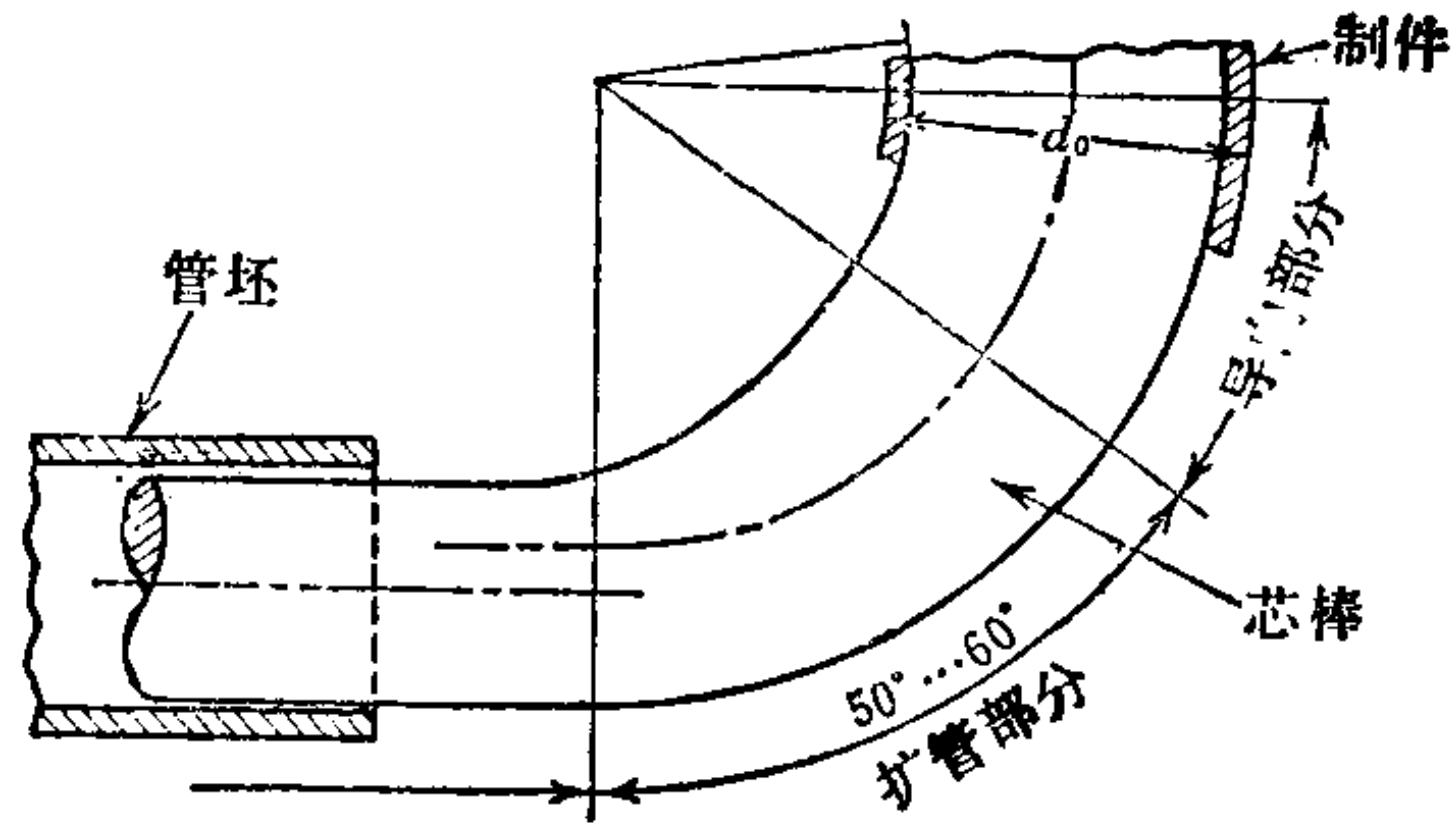


图 3.159〔138〕所示为芯棒的一例。制件的壁

图3.159 锥形芯棒扩管弯曲法所用的芯棒

厚均匀，横断面的形状也保持圆形。但是，由于加工条件苛刻，所以管坯一定不能有缺陷，对于加热，芯棒的形状等方面必须小心谨慎。由于是扩管所以制件的壁厚与管坯的壁厚相比要出现变薄。

在原理上与锥形芯棒扩管弯曲相同的还有偏心塞式弯曲法〔139〕。这种方法，就象图 3.160 那样，是用带有偏心球的塞子在局部作扩管加工的同时进行弯曲，弯曲件的加工曲率可由塞子端头球形的偏心量来确定。

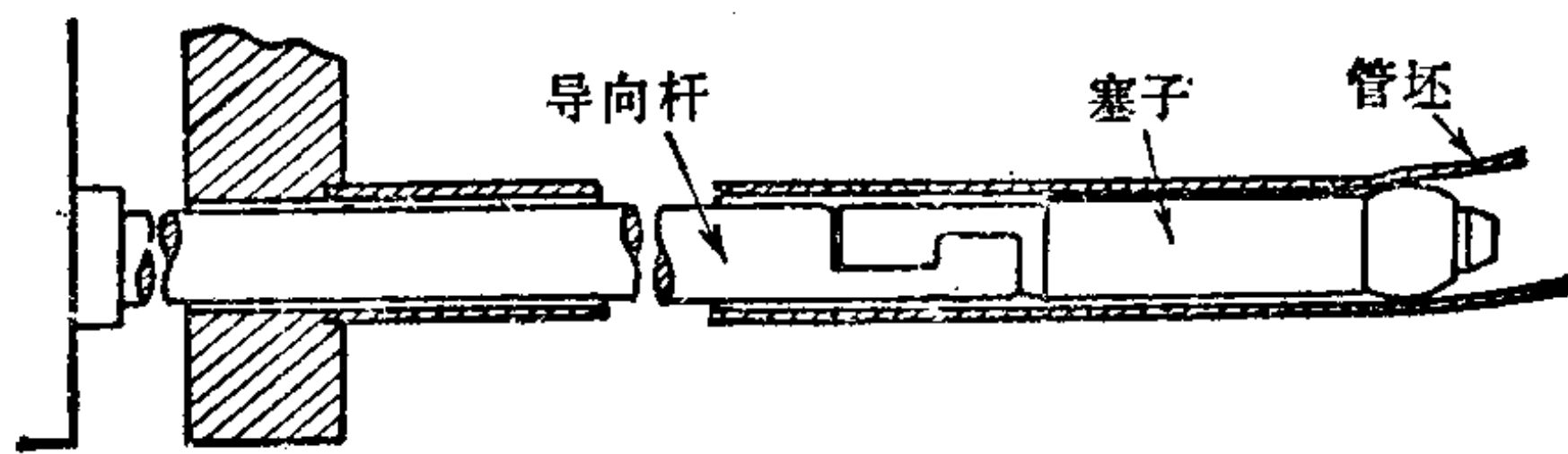


图3.160 偏心塞式弯曲

这类弯曲加工方法，在原理上对于大直径薄壁圆管的弯曲加工，都是不合适的。

g. 振动冲击弯曲〔140、141〕 只是对具有开口断面的型材作弯曲加工的方法，是在型材的一个部分用加以振动冲击进而对

3.5.2 横断面形状和壁厚的变化

在管材和型材的弯曲加工中，不能无视横断面形状和壁厚的变化。在前述的弯曲加工方式中除锥形芯棒弯曲之外的全部加工方式，都会或大或小地发生横断面形状变化和壁厚不均的现象。因此，当弯曲加工时，必须认真推敲制件所要求的精度等因素进而再选择加工方式。

a. 圆管断面形状的变化^[142、143] 图 3.164 所示是对铝质圆管（外径 30mm；壁厚 2、2.5、3 mm 的 A1100 软质材料）加上弯曲力矩时横断面形状的变化情况。随着弯曲的进行，就可以看到在图 3.164 上的断面形状变得上下不对称（即在弯曲的管子上内外侧不对称）。图 3.165 就是为使这种现象更加清楚，在横

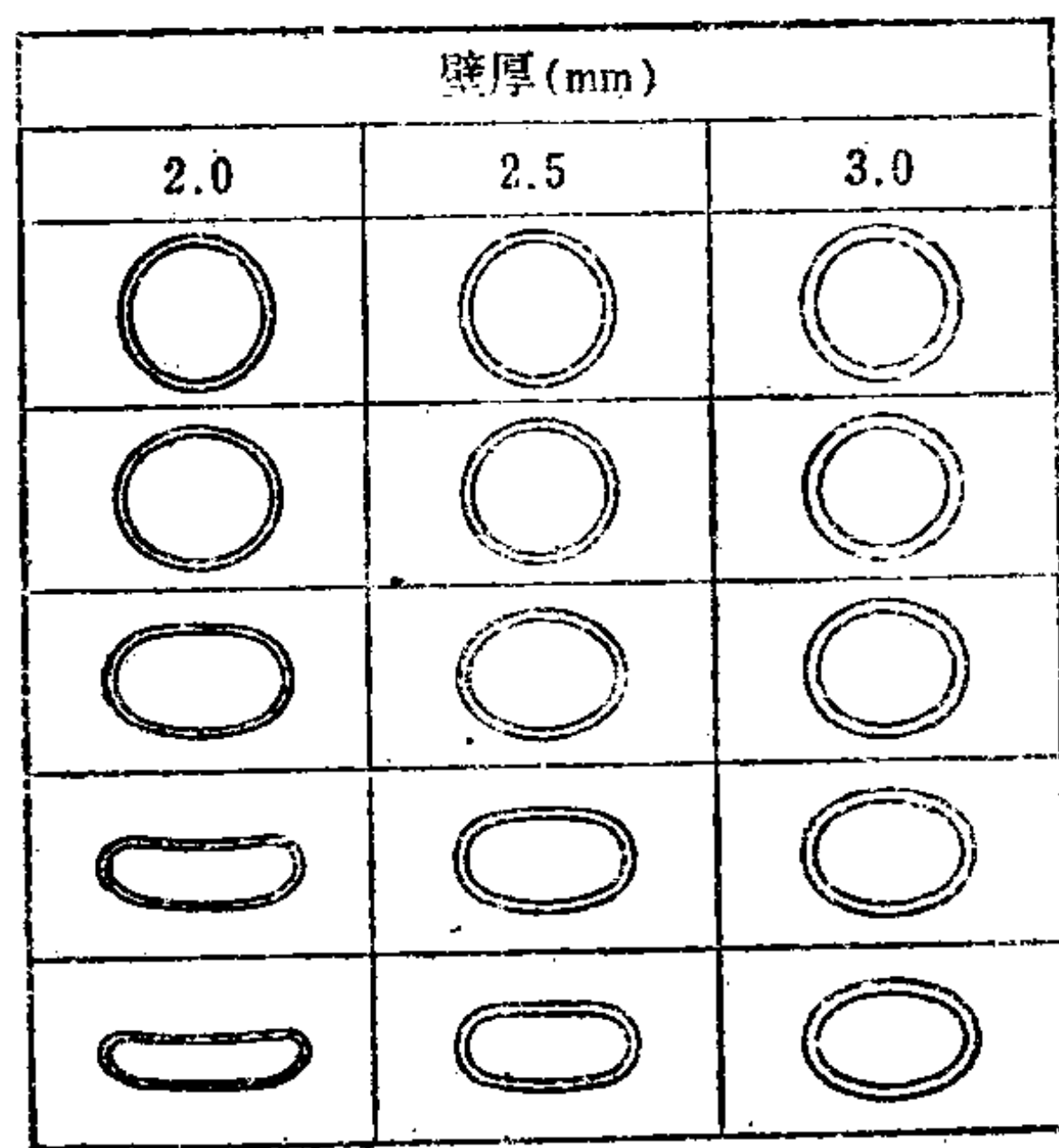


图3.164 横断面形状的变化

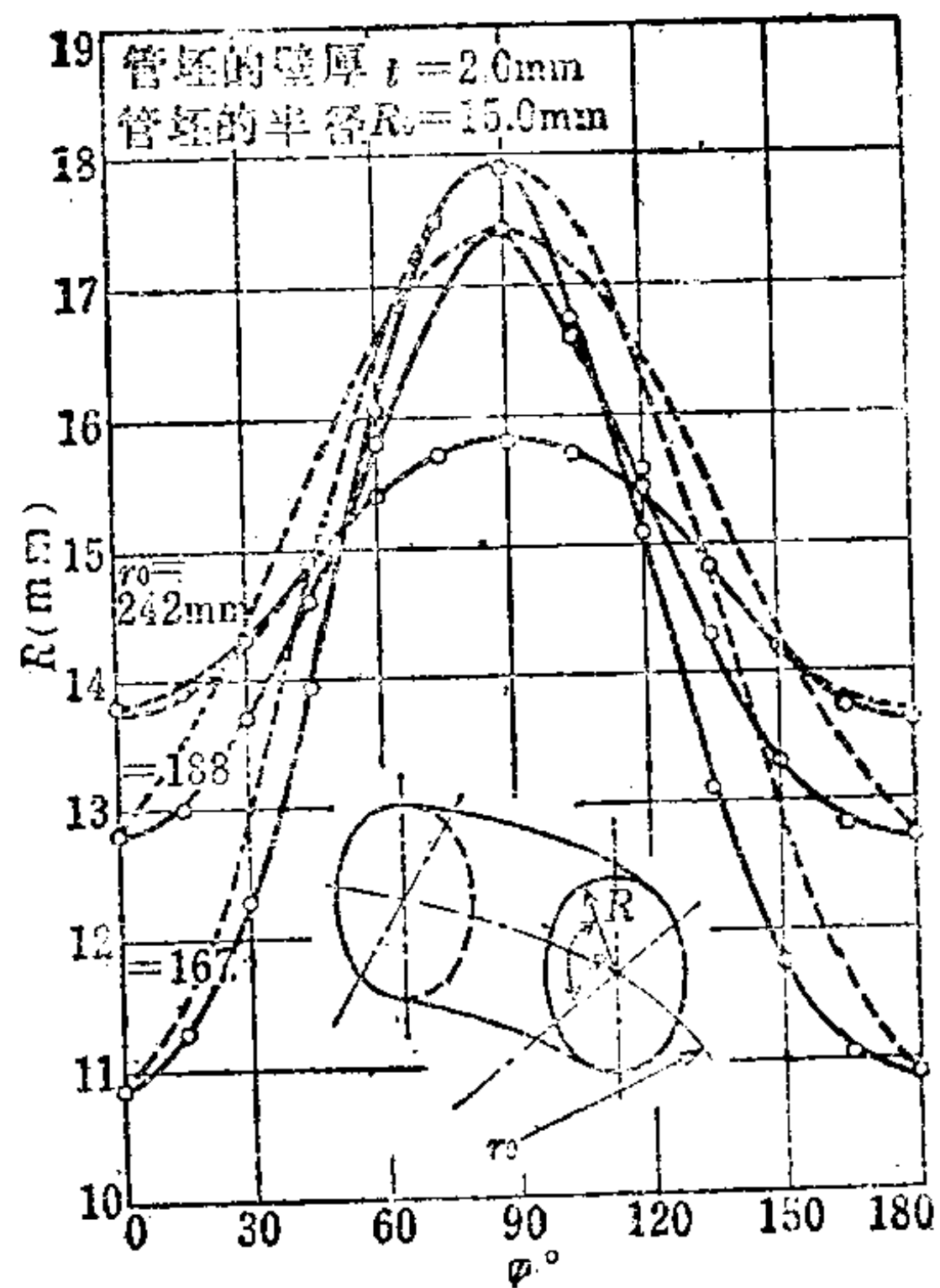


图3.165 横断面的形状

断面内，将从中心到外周的位置矢径 R 在圆周方向 (φ 方向) 的变化表示出来的情况。图中的虚线是表示将最大直径 d_{\max} 和最小直径 d_{\min} 分别作为长轴和短轴所形成的椭圆。在弯曲的初始阶段，虚线和实线大体是一致的，然而，随着弯曲的进行虚线和实线就变得不一致了。在这种情况下，变扁的横断面就不能

用椭圆表示。图 3.166 是为了定量地获得这一变化的大小，采用长轴变化率 $\left(\frac{d_{\max} - d_0}{d_0}\right)$ 和短轴变化率 $\left(\frac{d_0 - d_{\min}}{d_0}\right)$ 研究其变化的关系曲线（式中 d_0 是圆管坯的直径）。在弯曲的初始阶段，两种变化率大体相等，但是随着弯曲程度的变大，短轴变化率即相应增大。此即表示了横断面形状的非对称性的大小。

由于用长轴变化率、短轴变化率是不可能从整体上抓住扁平化的实质，所以就将 $\left(\frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_0}\right)$ 作为扁平度的定义。图 3.167 就是把扁平度对应于无量纲曲率 R_0/r_0 ($2R_0 = d_0$, r_0 — 曲率半径) 的变化表示在对数坐标上的情况。它是以壁厚比 t/R_0 作为参变量的直线族来表示的。因此，对于材料 A1100 就可以得到如下关于扁平度的经验公式：

$$\left(\frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_0}\right) = 0.07 (R_0/r_0)^{1.4} / (t/R_0 - 0.05)^{0.167} / (t/R_0 - 0.05)^{2.67}$$

$$0.02 \leq R_0/r_0 \leq 0.4, \quad 0.1 \leq t/R_0 \leq 0.5 \quad (3.40)$$

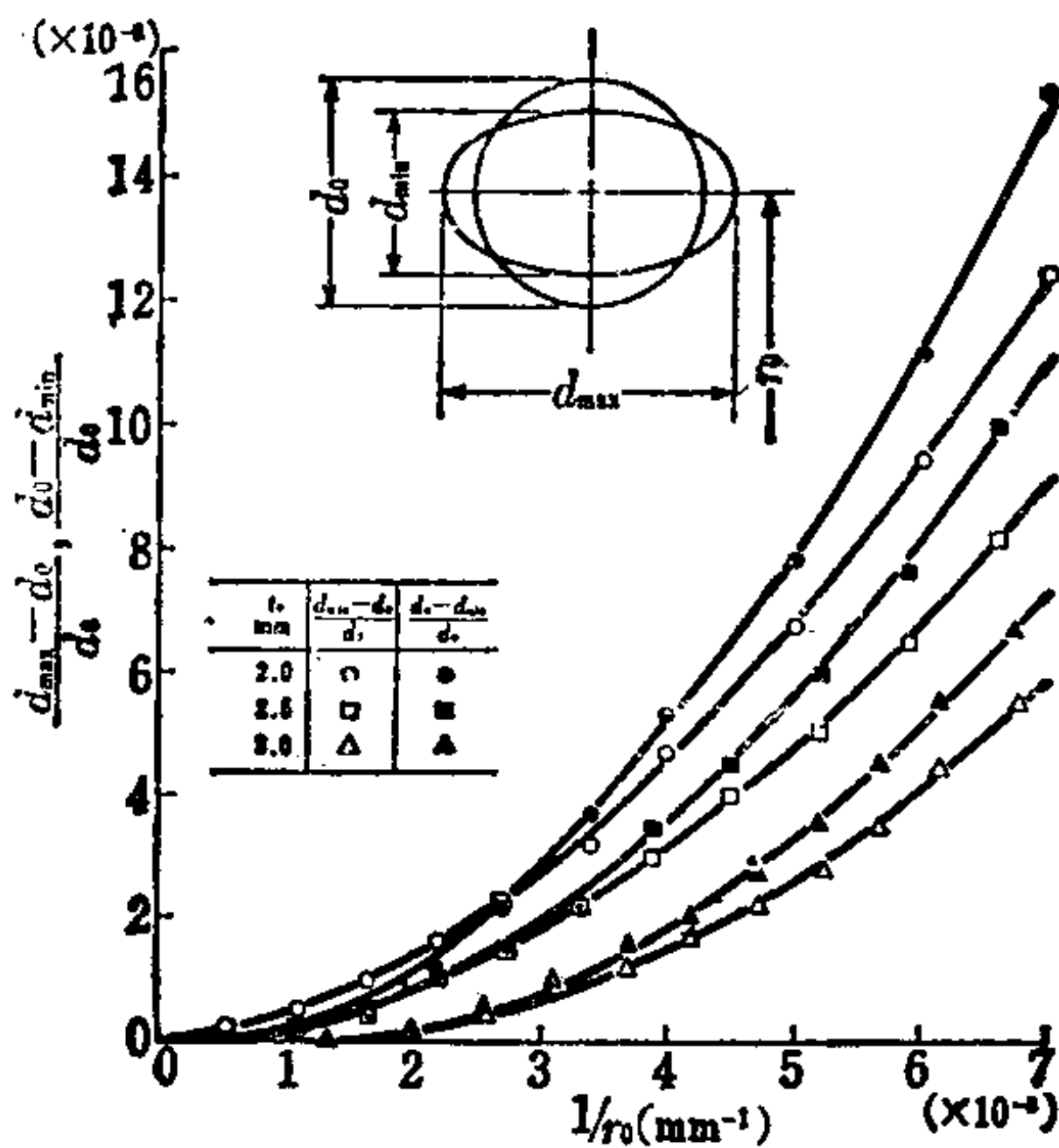


图3.166 长轴变化率及短轴变化率

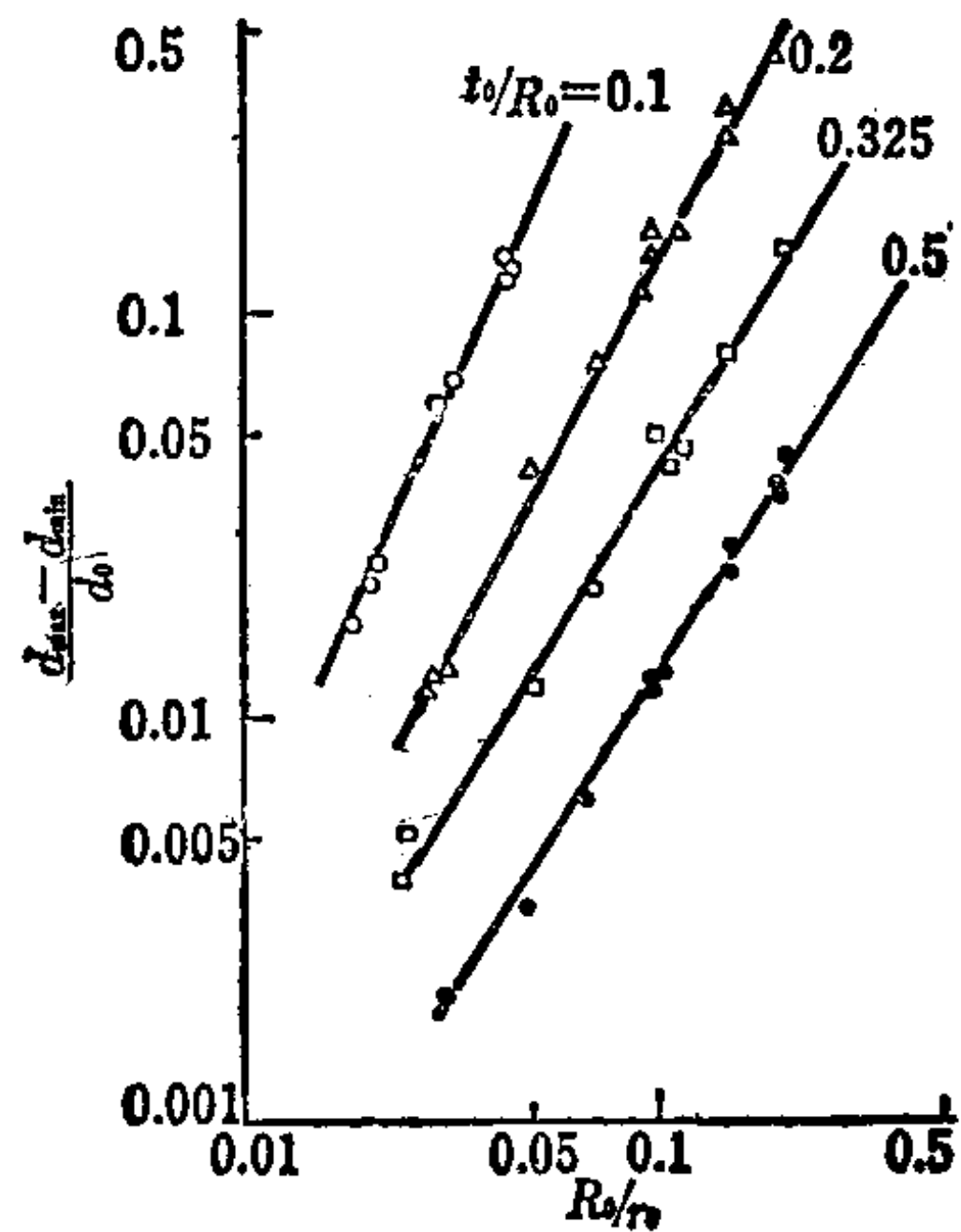


图3.167 扁平度

此外，即使弯曲力矩不均^[146]出现倾斜的时候，上面的公式也是成立的。但是，在加了轴向力的场合下是不成立的。

在圆管的弯曲中，从积极的方面出发将变扁现象用在弯曲之中即为塌角弯曲〔144〕。塌角弯曲是将图 3.168 那样的横断面加压使其塌陷进而得到预定弯曲角的制件。仅仅是要求弯曲角外侧形状的制件，例如：办公机器用的及汽车用的薄板构架等的制造就是采用这种方法来完成的。

b. 圆管变扁的防止 在圆管的弯曲加工中，如果用防止变扁的方法、限制变形的部位来划分的话，则可以分为：

- (1) 从管子外面限制（凹模）；
- (2) 从管子里面限制（芯棒、内压力等）；
- (3) 从管子里、外两面限制（凹模和芯棒）。

(i) 从管子外面限制〔145〕 图 3.169 表示仅仅在弯曲内侧用模具（管子外径为 20mm，间隙为 0.9mm）弯曲时的长轴变化率，短轴变化率，扁平度的情况。由于管子和模具之间有间隙的关系，在未与模具接触时，扁平度值与均匀弯曲时的值相同，在与模具接触之后最大直径 d_{max} 受到限制，但是对最小直径 d_{min} 的抑制效果不大。因此扁平度的变化仅仅用模具去限制是不可能的。

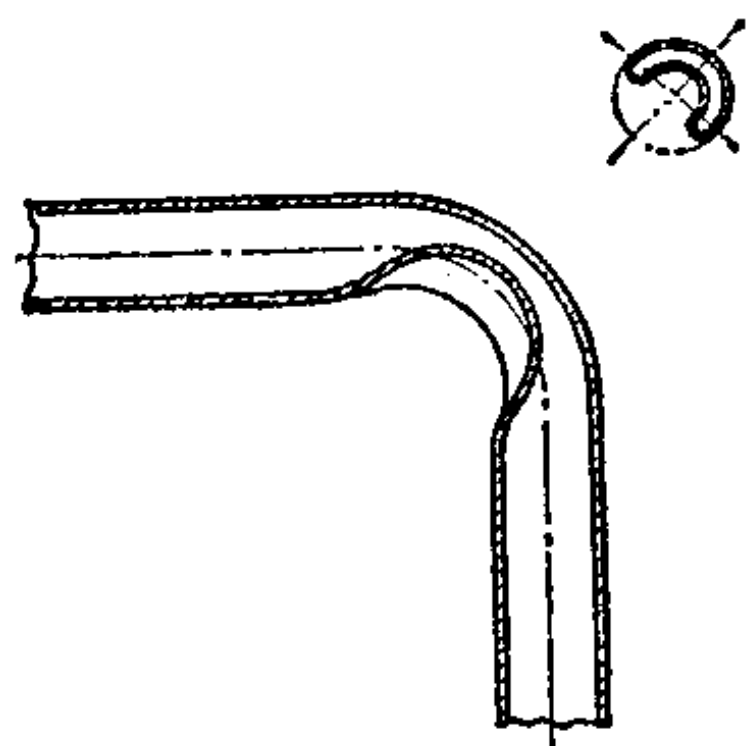


图3.168 塌角弯曲

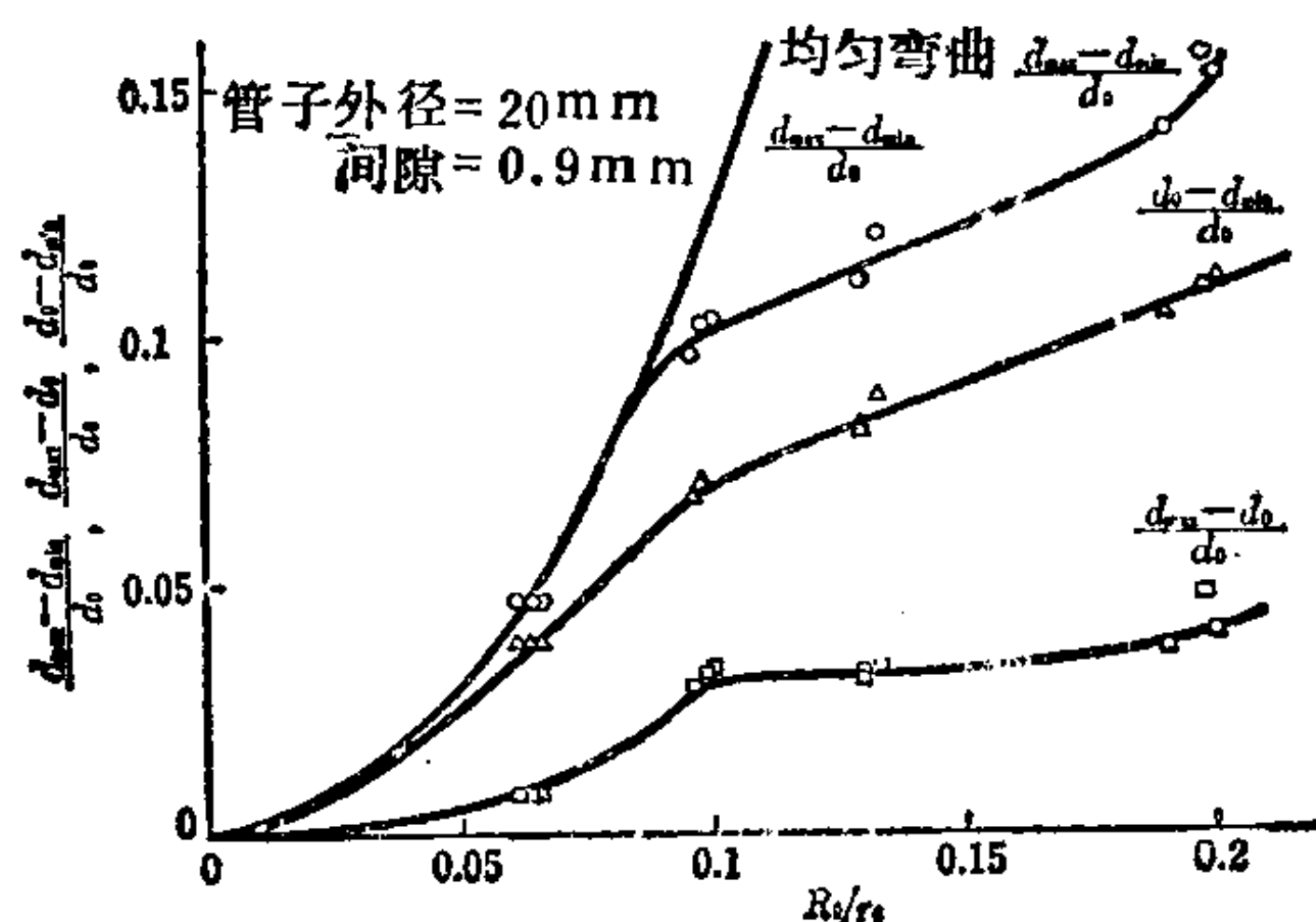


图3.169 模具对变扁的限制效果

图3.170就是注意到模具所能限制的仅仅是最大直径，即用平行平板夹住管子，研究改变平板和管子之间的间隙在加以均匀弯曲力矩时的变形关系。从图可见此关系曲线与使用模具的效果相

同（由于板的刚性不够，最大直径多少有所增加）。a 图中的虚线系表示塑性屈服点的曲线，由此看来存在有间隙的最佳值。因此，确定模具的间隙必须考虑加工精度和加工极限两个方面。

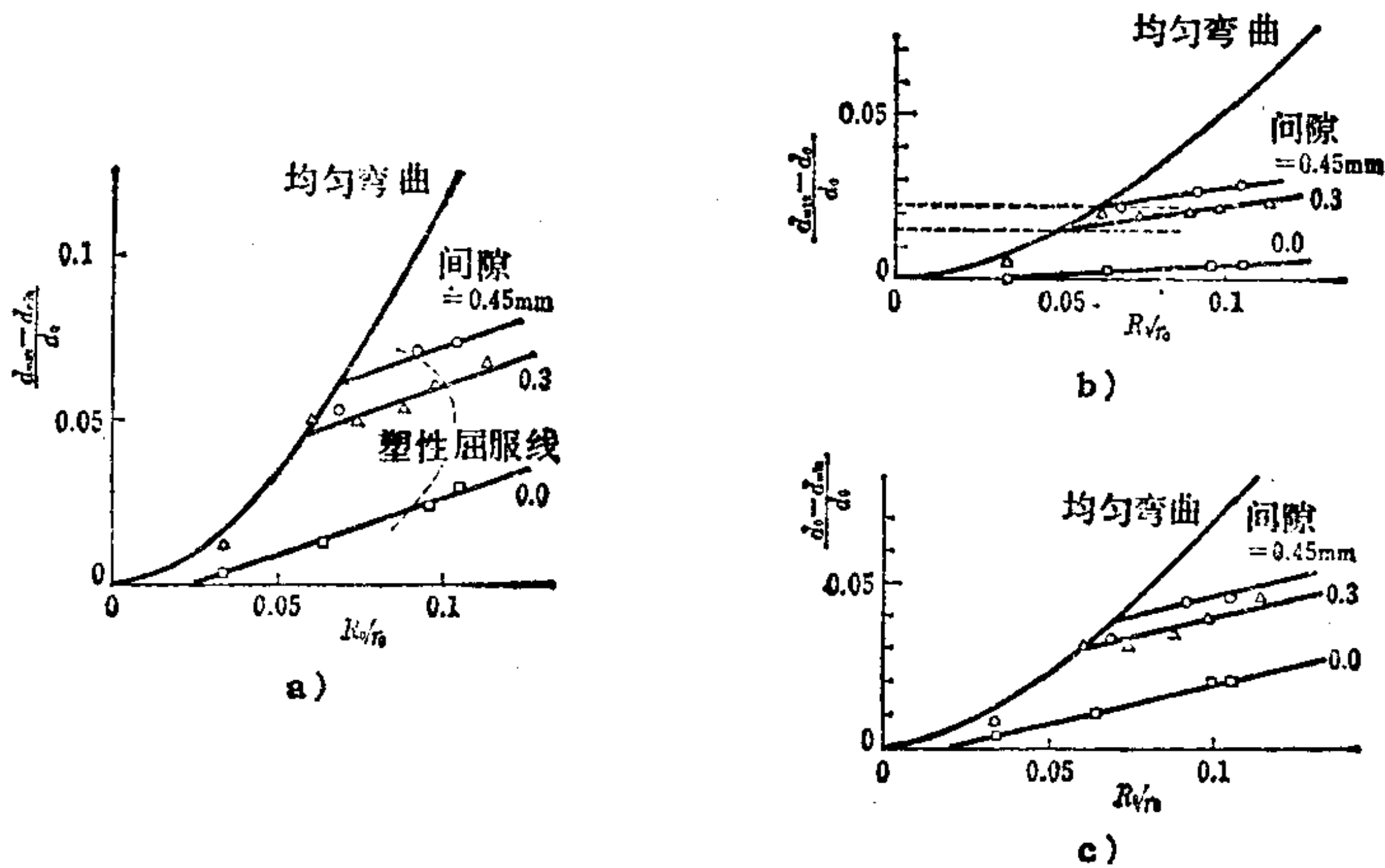


图3.170 模具间隙的效果

(ii) 从管子里面限制 从管子里面限制变形时，在管子里面必须填塞东西。对填充物性质的要求是：（1）容易放到管子中去，十分密实地充填在管子之中，弯曲后易于取出；（2）为使管子被弯曲后的横断面保持圆形，应有足够的刚性；（3）具有和被弯管子相同的或更好的柔性；或者是其柔性虽说小些但不妨碍随管子一道弯曲变形等。作为实际生产中所使用的材料有：

- （1）芯棒（塞子、成形芯棒、钢球、层压板及钢丝绳等）；
- （2）粒状物质（砂、盐等）；
- （3）流体（作为压力介质的水、油）；
- （4）低熔点合金等。但是，要完全满足上述条件的材料是不存在的。因此，还必须考虑选择加工条件等因素。

图 3.171〔146〕是研究在铝质圆管内充填低熔点合金作弯曲时的扁平度和壁厚不均度的关系。在此情况下，管子的变扁现象即被完全克服。但是，产生壁厚不均现象，横断面虽然保持圆形，

但内圆和外圆却不同心。象这样的低熔点合金是近于理想状态的填充材料，但是生产效率并不很高，随着管子材料的不同也有可能变扁。

图 3.172〔145〕是表示在铝质圆管中加上内压时的扁平度与曲率、内部压力之间的函数关系。作为内压大小的尺度，用所加的油压 P (kgf/mm²) 在直圆管中产生的圆周应力 $\sigma_{\varphi} = pR_0/t_0$ 表示。而该图中的 $\sigma_{\varphi} = 0$ 是用 3.5.2 中的 a (圆管横断面形状的变化) 中所表示的经验公式 (3.40) 的值。加高内部压力虽可限制扁平度，但由于内压变高所产生的扩管作用必须加以注意。

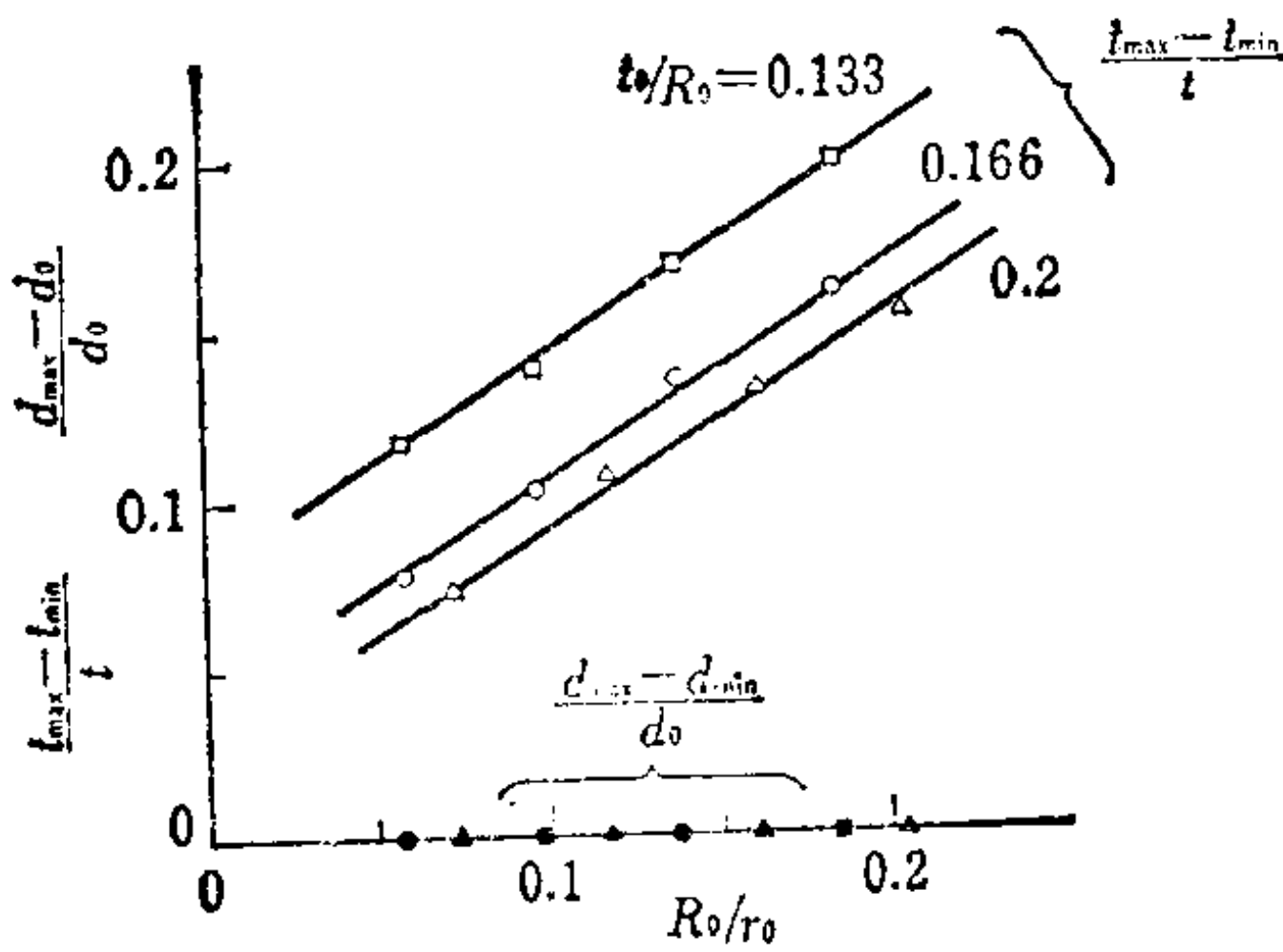


图3.171 填充低熔合金后在铝质圆管弯曲中的扁平度和壁厚不均匀度

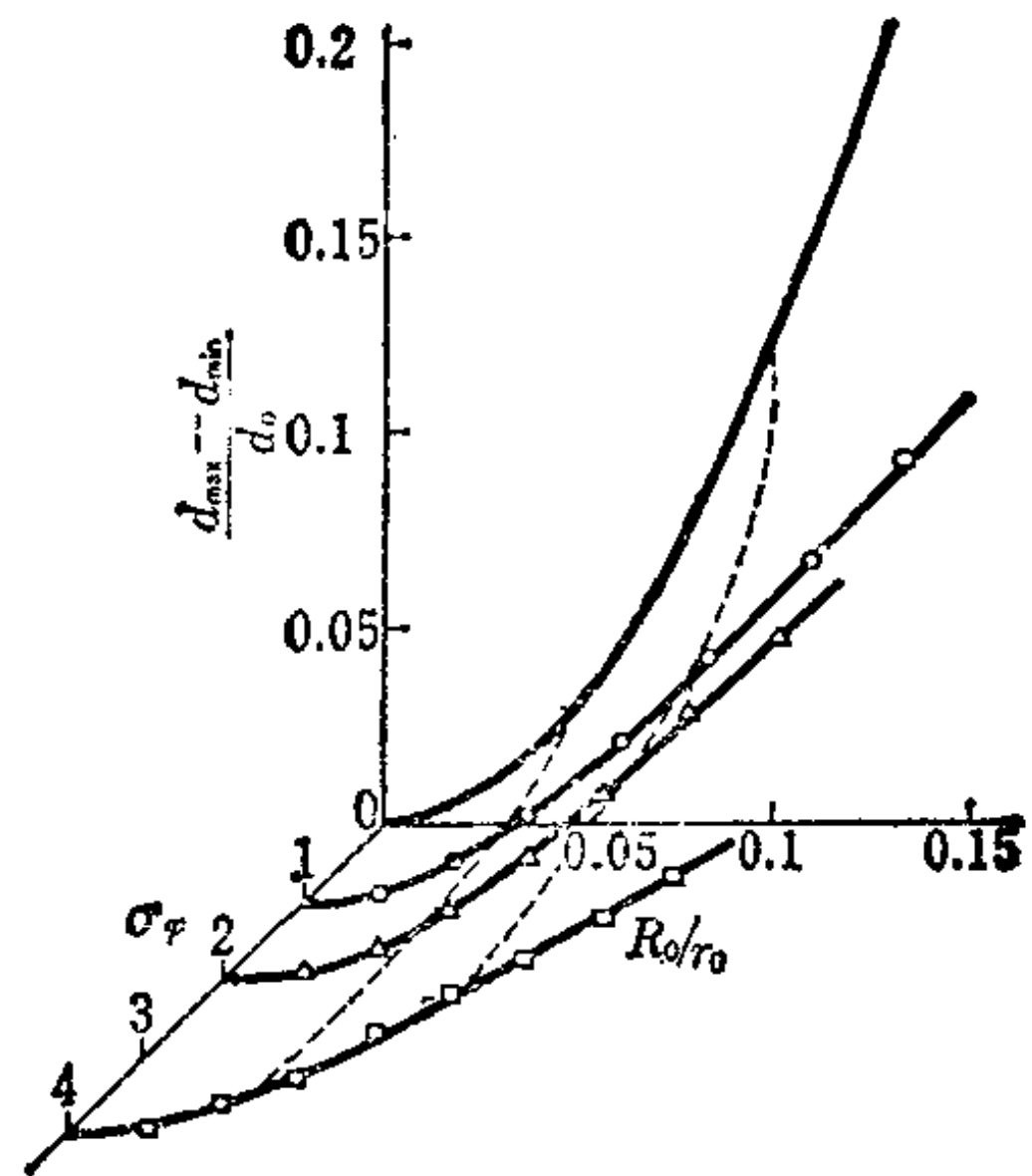


图3.172 内部压力对扁平度的限制效果

(iii) 从管子里、外两面限制 在通常的管子弯曲加工中使用的是模具，然而在要求精度的场合下，则与芯棒合并使用。图 3.173 所示为常用芯棒的形状。图 3.174 所示为拉弯中芯棒效果的一例〔137〕。表 3.9〔147〕所示为拉弯中芯棒的选择基准。在表中，数值表示所用钢球的个数， F 表示使用成形芯棒。

c. 圆管壁厚的变化 图 3.175〔148〕所示为在铝质圆管上加上均匀弯曲力矩时壁厚变化的情况。在这里如果取最大壁厚为 t_{max} ，最小壁厚为 t_{min} ，原始壁厚为 t 则以 $(t_{max} - t_{min}) / t$ 作为

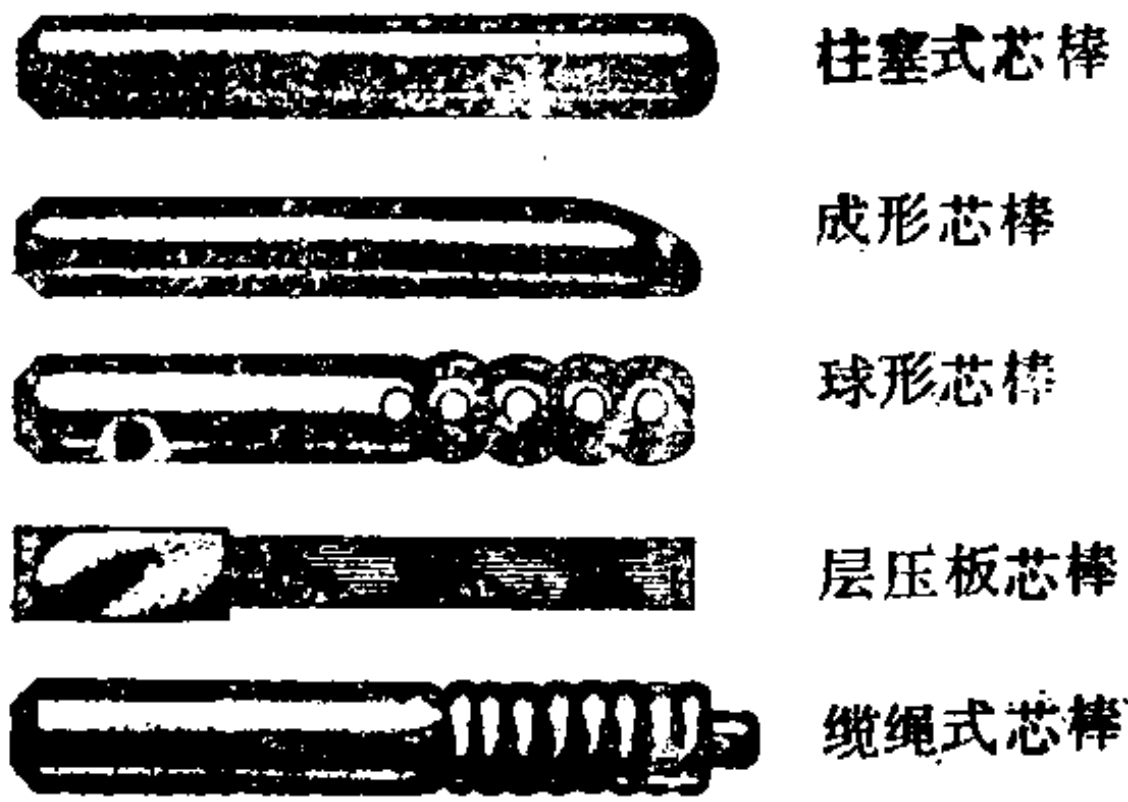


图3.173 基本的芯棒形状

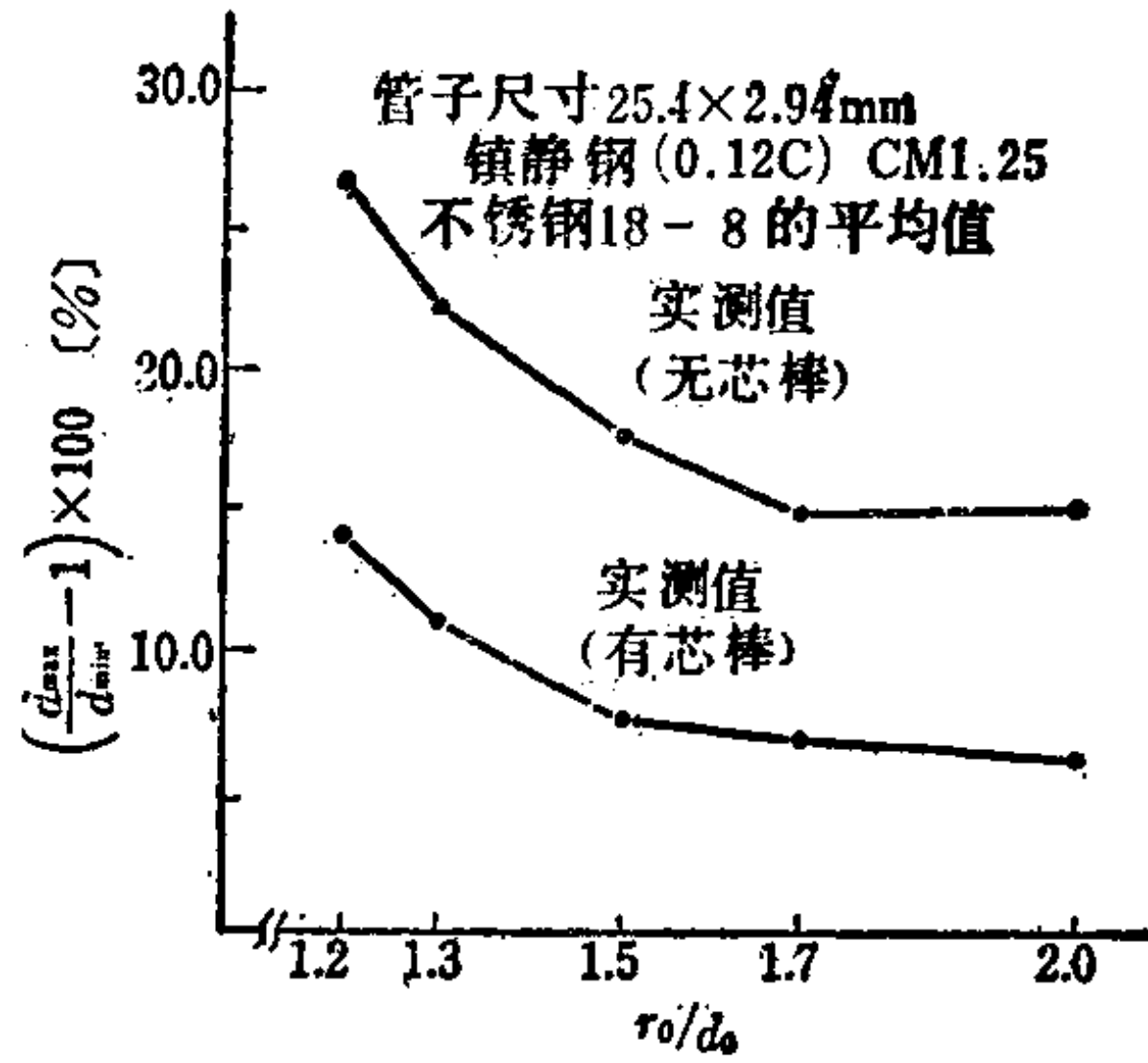


图3.174 拉弯中芯棒对扁平度的限制效果

壁厚不均度的定义。壁厚比 t/R_0 越小，壁厚不均度就越大。如果将这一情况用经验公式表示，则有：

$$\left(\frac{t_{\max} - t_{\min}}{t}\right) = 0.092 \left(\frac{t}{R_0}\right)^{-0.824} \log_{10} \left(\frac{R_0}{r_0}\right) + 0.158 \left(\frac{t}{R_0}\right)^{-0.824}$$

$$0.02 \leq R_0/t \leq 0.15; 0.1 \leq t/R_0 \leq 0.5 \quad (3.41)$$

必须注意的是：虽然限制了变扁现象但却发生了壁厚不均现象，图 3.171 即表示了这种关系^[146]。对于这种场合则：

$$\left(\frac{t_{\max} - t_{\min}}{t}\right) = 0.65 \left(\frac{R_0}{r_0}\right) + 0.703 \exp\left(\frac{-16.29 t}{R_0}\right) \quad (3.42)$$

$$0.05 \leq R_0/r_0 \leq 0.2$$

图 3.176 所示为拉弯中使用芯棒时壁厚变化的一例。图中的曲线按下式表示。

最外层的壁厚减少率：

$$\left(\frac{t - t_{\min}}{t}\right) = \left\{ \frac{1 - (1 + 8/100) - (1 + t/d_0)}{(2 - t/d_0)} \right\}$$

最外层的轴向延伸率：

$$\delta = (1.26 - t/d_0) / (2r_0/d_0 + 0.74) \quad (3.43)$$

表3.9 芯棒的选择基准

外径 (mm)	壁 厚 (mm)														
	0.406	0.508	0.635	0.711	0.889	1.067	1.245	1.473	1.651	1.829	1.981	2.108	2.413	2.769	3.048
15.88	1	1	1	1	1	F	F	F	F	—	—	—	—	—	—
19.05	1	1	1	1	1	1	1	F	F	—	—	—	—	—	—
22.23	1	1	1	1	1	1	1	F	F	F	—	—	—	—	—
25.40	2	2	2	2	1	1	1	F	F	F	F	—	—	—	—
31.75	3	3	2	2	2	2	2	2	2	1	F	F	F	F	F
38.10	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1
44.45	4	4	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
50.80	4	4	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2
57.15	4	4	4	4	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2
63.5	4	4	4	4	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2
76.2	4	4	4	4	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2
88.9	5	5	5	5	4	4	4	4	3	2	2	2	2	2	2
101.6	5	5	5	5	5	4	4	4	3	2	2	2	2	2	2
114.3	6	6	5	5	4	4	4	4	3	3	3	2	2	2	2
127	6	6	6	6	5	5	5	4	4	4	4	3	3	3	3
139.7	6	6	6	6	6	5	5	5	4	4	4	4	3	3	3
152.4	6	6	6	6	6	6	6	5	5	4	4	4	4	3	3

注：F表示成形芯棒。数值表示球形芯棒的钢球数量。此外对于钢丝绳式芯棒，将表列值乘2加1。但是，对于左下角虚线之内的那一部分最好是加2。

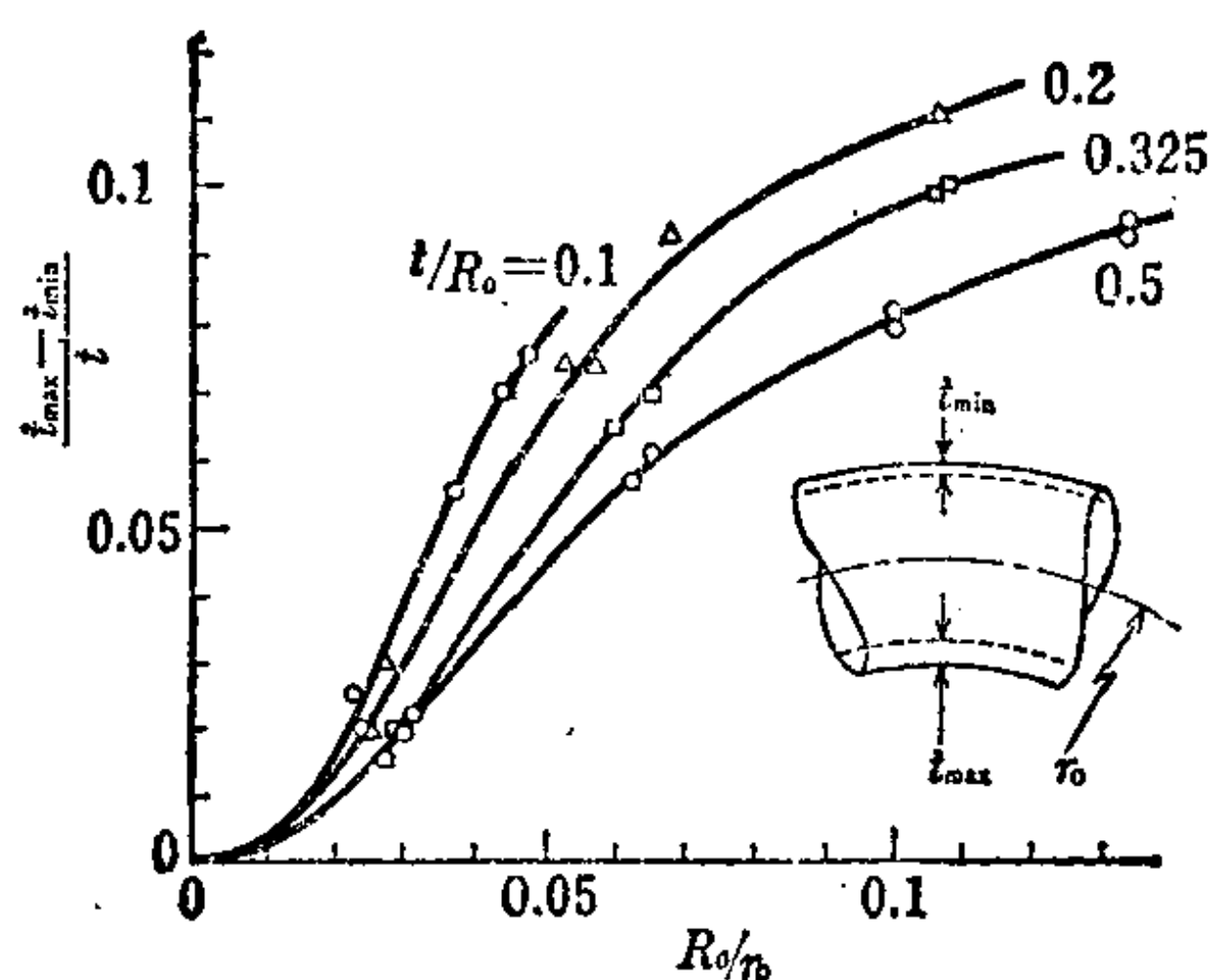


图3.175 壁厚不均度

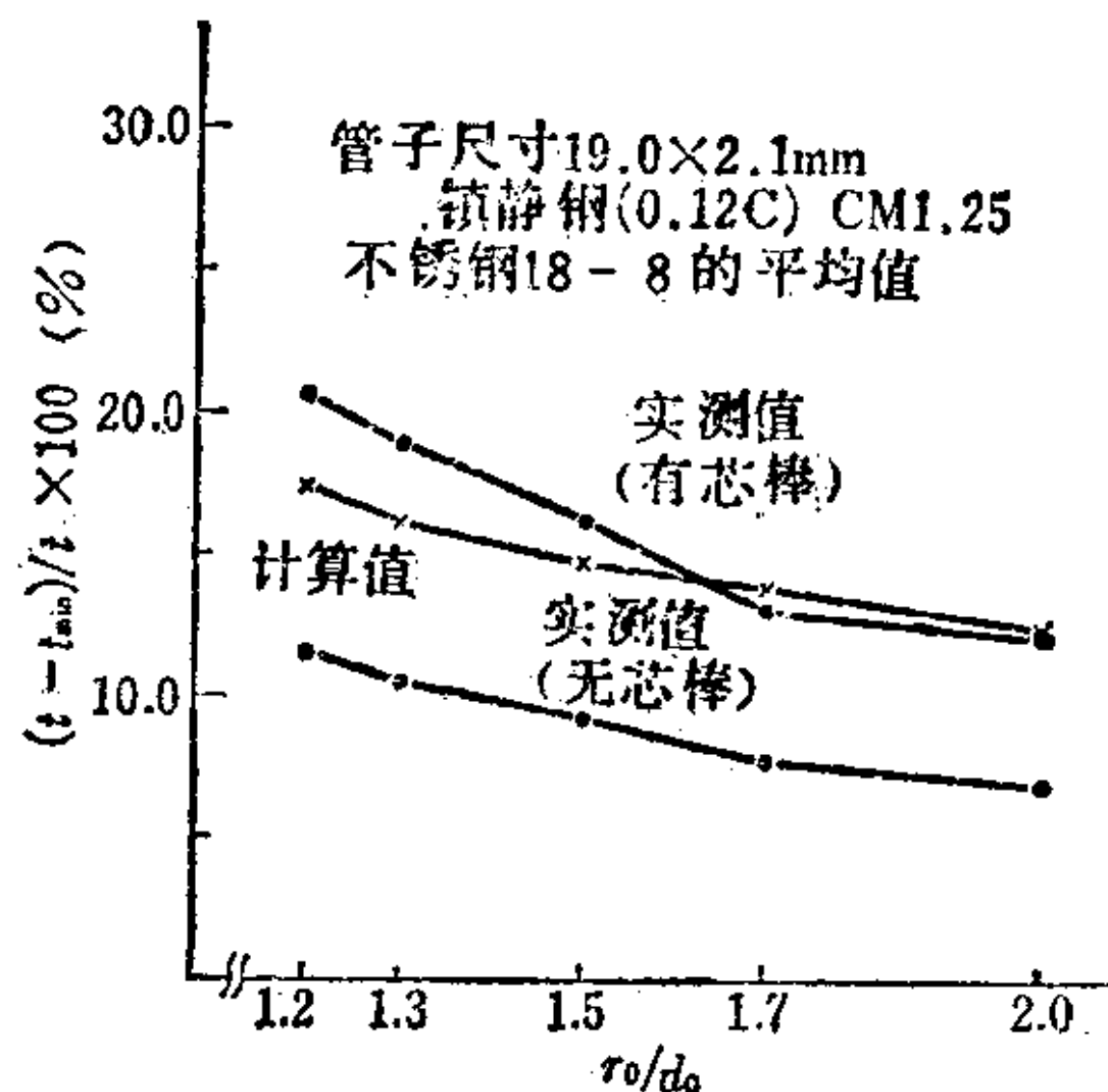


图3.176 拉弯中芯棒对壁厚减少率的影响

式中 $d_o = 2R_o$ ——管子外径;

r_o ——至中性层的弯曲半径。

对于锅炉钢管等管材的弯曲加工, 必须尽可能限制壁厚变薄, 因此就有对弯曲内侧加热, 并用助推装置对管子的轴向加以推力的加工方法。图 3.177 [148] 所示为此种情况下壁厚变化的一例。

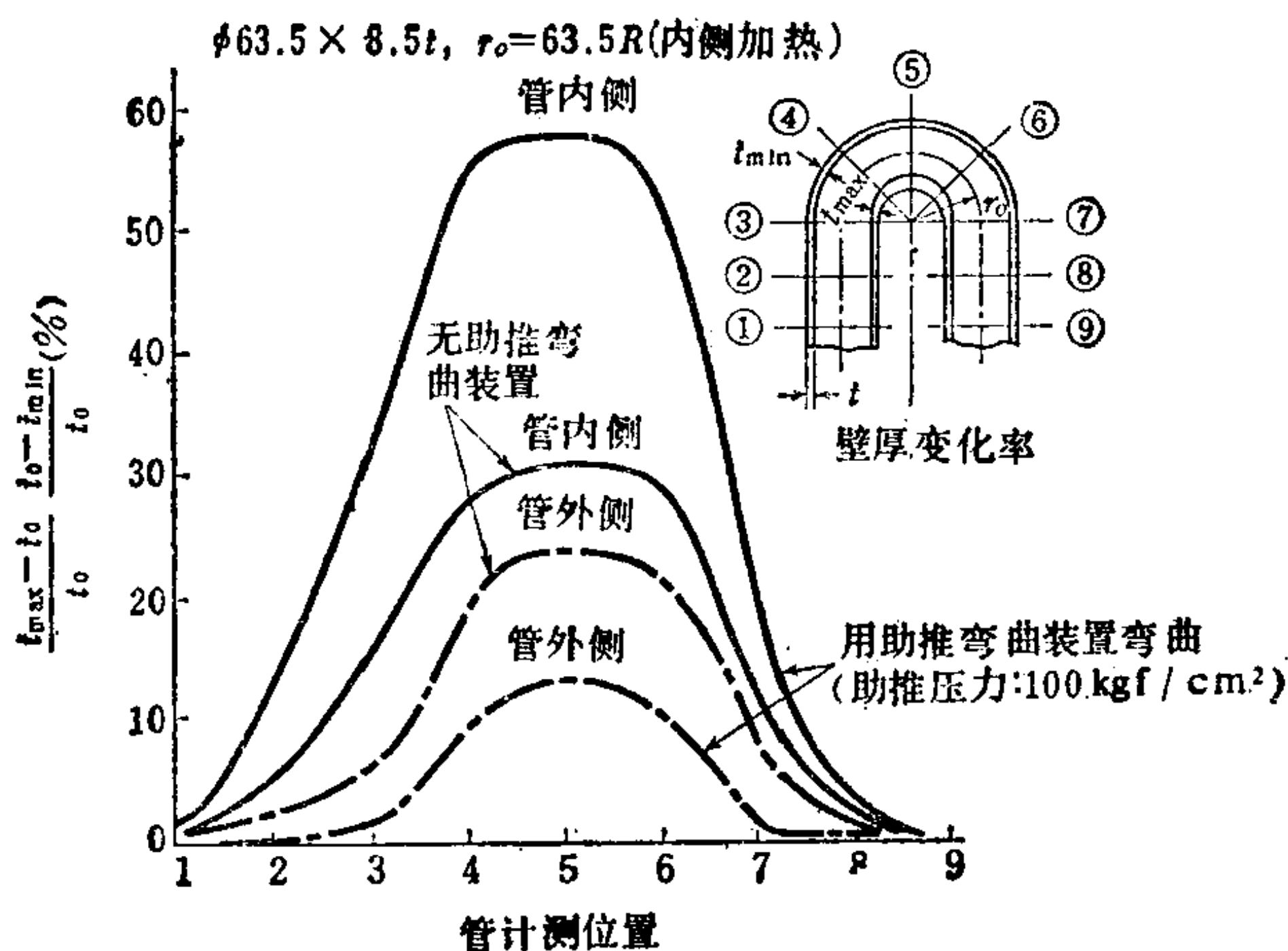


图3.177 在锅炉钢管的弯曲加工中助推装置对壁厚变化的影响

由于外加推力的作用，虽然弯曲内侧的壁厚有所增加，可是却防止了外侧壁厚变薄。

d. 矩形管的断面形状和壁厚的变化〔149〕 在微波波导管那类矩形钢管的弯曲加工中，最重要的是保持管子的内部形状不发生变化。当使用其它的弯曲加工方法时，将产生皱折、或管子内部形状发生变化，或出现破裂，然而，拉弯时用助推装置在轴向施以推力就有可能作这类管件的弯曲加工。此时的芯棒，就要用图 3.178 所示那样的形式。在这类弯曲中，因为注重管子里面的形状，所以壁厚在弯曲加工之后有大幅度的变化（图 3.179）。特别是使用助推装置时此种倾向更为显著，弯曲内侧的壁厚变得过大，加在芯棒上的压力过高就要造成破坏。为此，就在活动压模、加压模、弯曲模上作出适当的锥度以使壁厚发生变化，以防止芯棒的破坏。图 3.180、图 3.181、图 3.182 所示即为壁厚和管子高度变化的情况。图上符号的含义按图 3.179 确定。

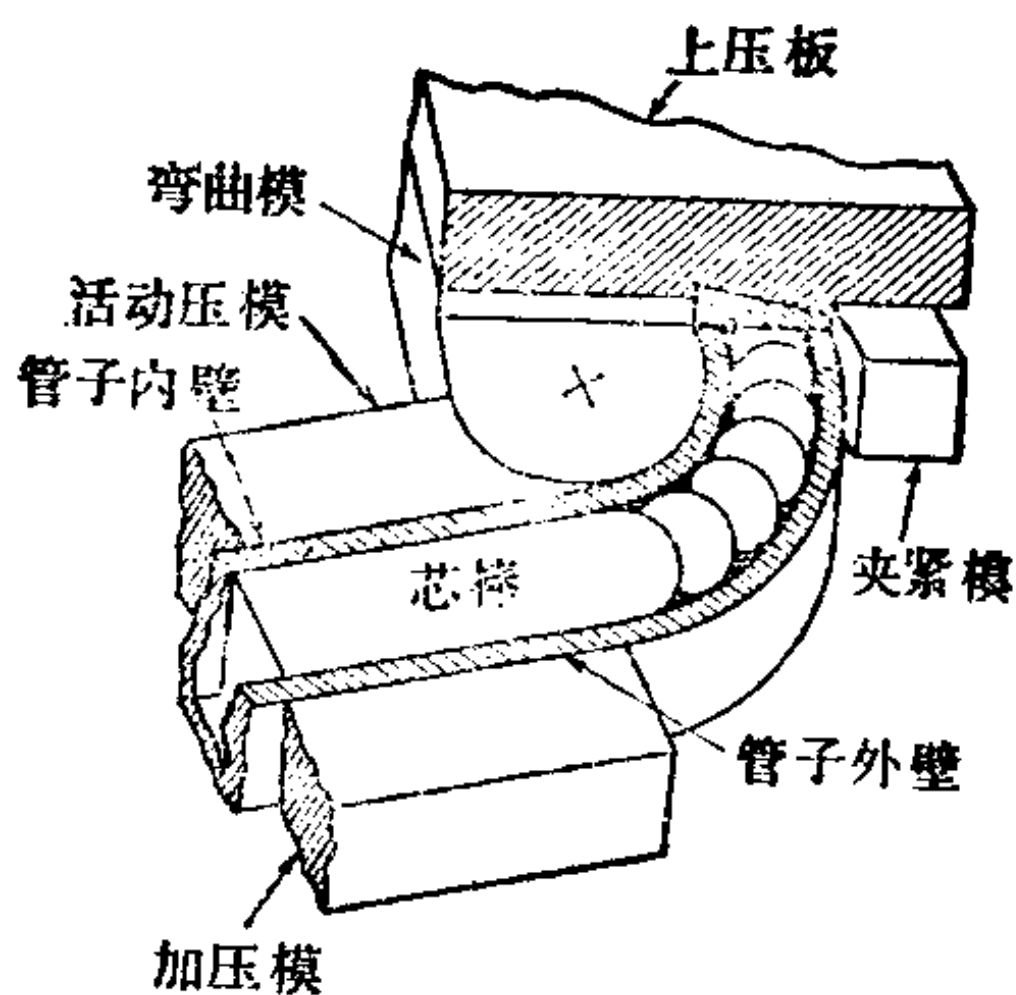


图3.178 波导管的弯曲

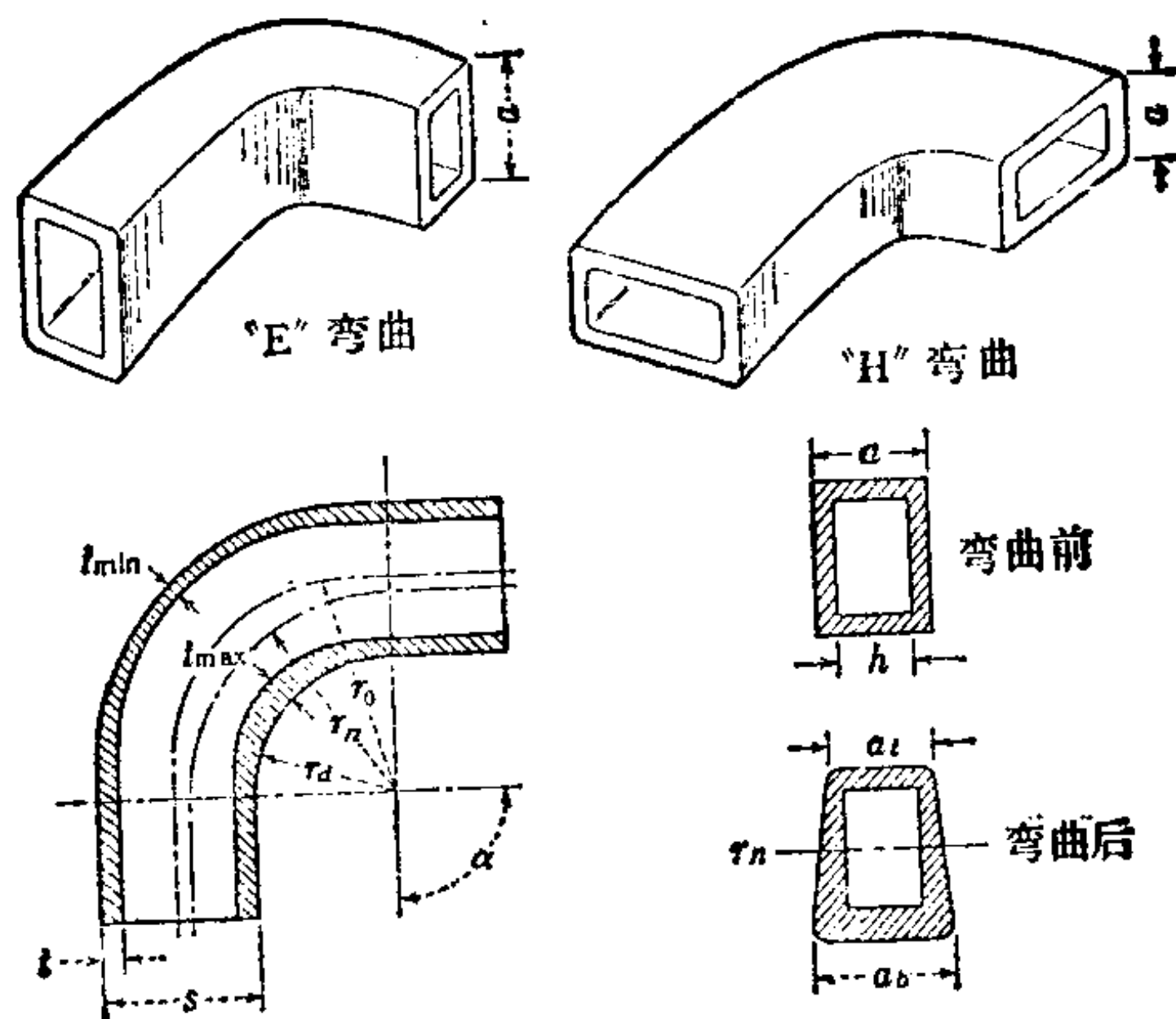


图3.179 波导管的弯曲变形

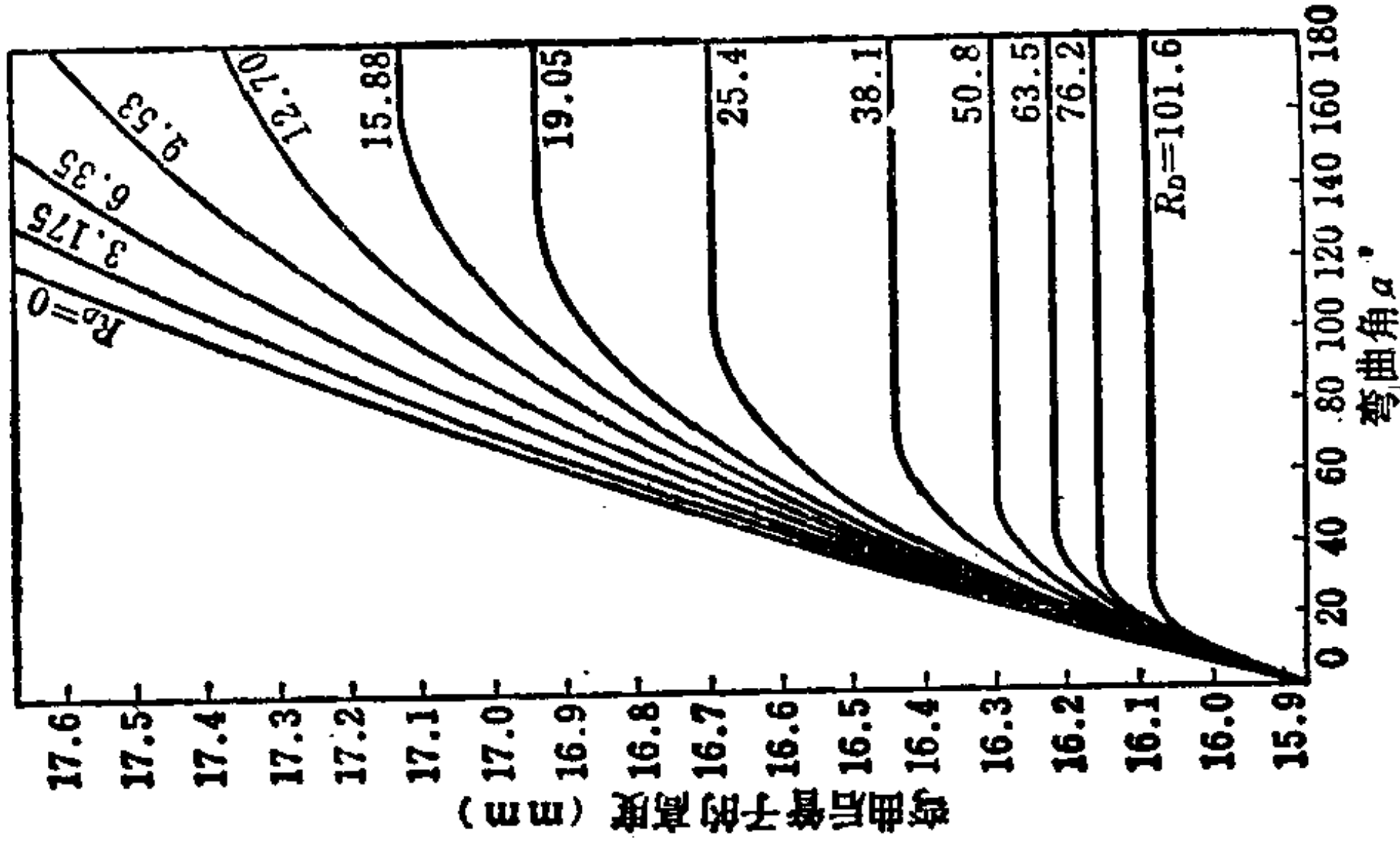


图3.182 弯曲后管子的高度和弯曲角的关系

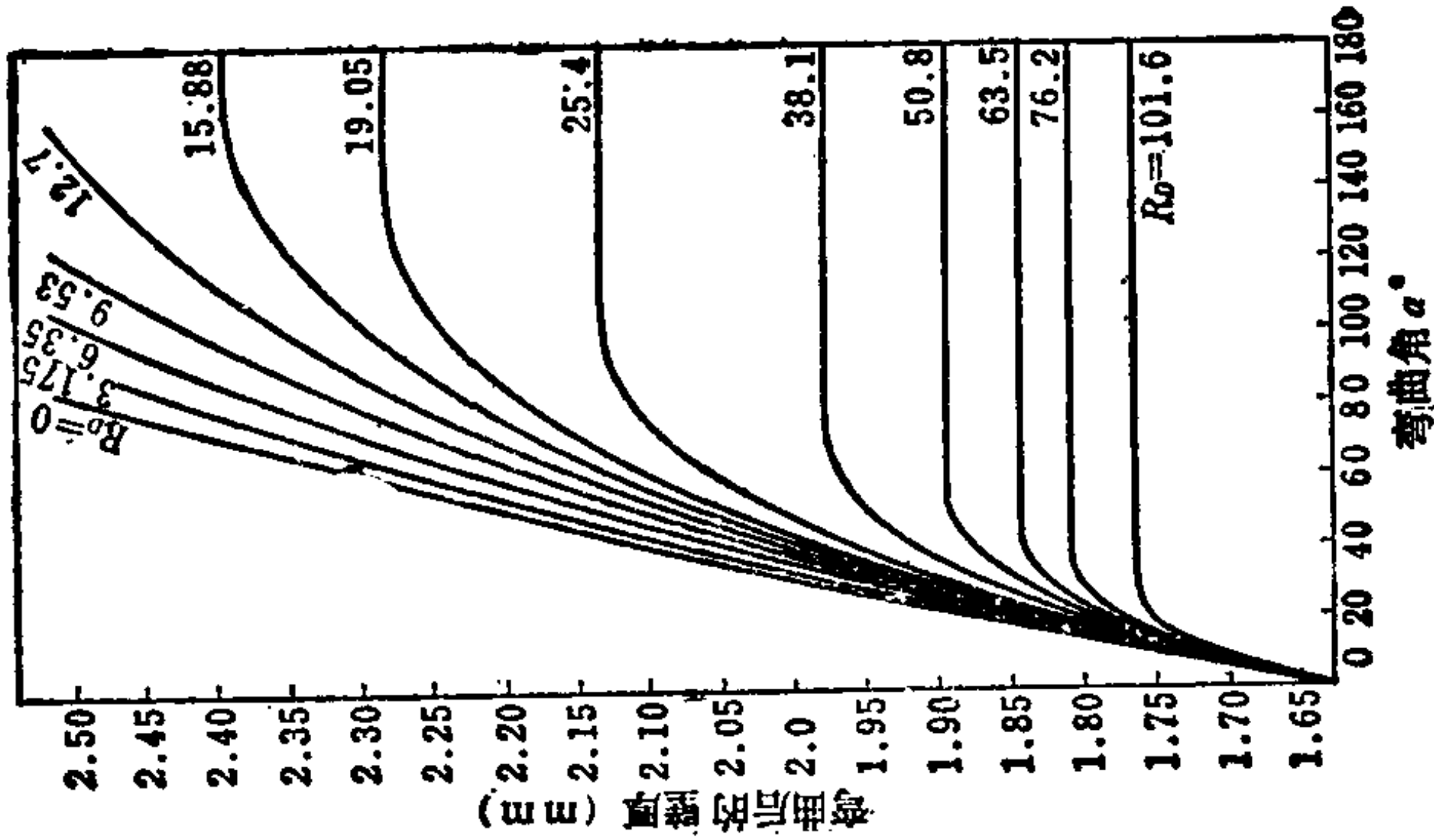


图3.181 壁厚和弯曲角的关系

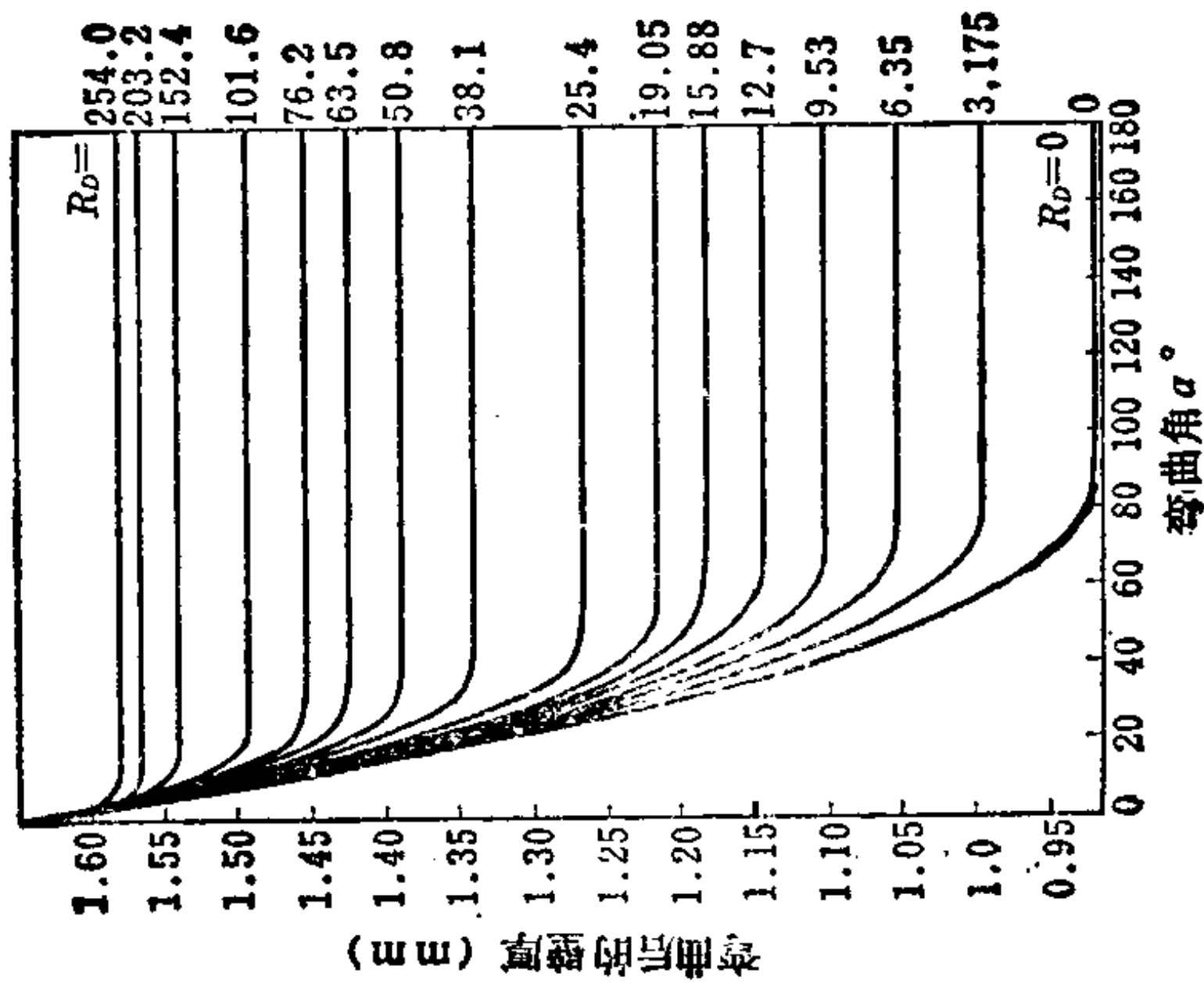


图3.180 壁厚和弯曲角的关系

3.5.3 最小弯曲半径

考虑最小弯曲半径时，必须充分研究管材的变扁和壁厚不均允许到什么程度。因此，按照用途的不同，最小弯曲半径就各不相同，由于加工方式、加工设备的不同当然也就要出现差异。用通常的弯曲方法对圆管作弯曲，是以对管材的强度，外观不出现问题作为它的加工极限。表 3.10 表明随着各弯曲加工方式的不同，最小弯曲半径也不同。表 3.11、表 3.12 所示为采用拉弯工艺时最小弯曲半径的情况〔137〕。薄壁圆管的弯曲加工是特别困难的，表 3.13〔148〕所示为对薄壁圆管作弯曲加工得出的最小弯曲半径的实际情况。

此外，在不取决于加工精度的场合下，加工极限即由起皱和塑性屈服等两种塑性不稳定现象〔150〕来确定，对于无轴向推力作用，拉伸和压缩塑性曲线相同的场合，即可用理论分析〔151〕得出加工硬化指数越大弯曲加工极限越小的结论。

表 3.14〔152〕所示为矩形管的最小弯曲半径。

关于型材的弯曲，其横断面形状与管材弯曲时的情况是不同的，通常，由于型材是非对称形状，所以用哪个面作弯曲的外侧，其最小弯曲半径也就各不相同。表 3.15~表 3.17〔153〕所示系对角钢、槽钢和几形钢以延伸弯曲的方法作弯曲时的最

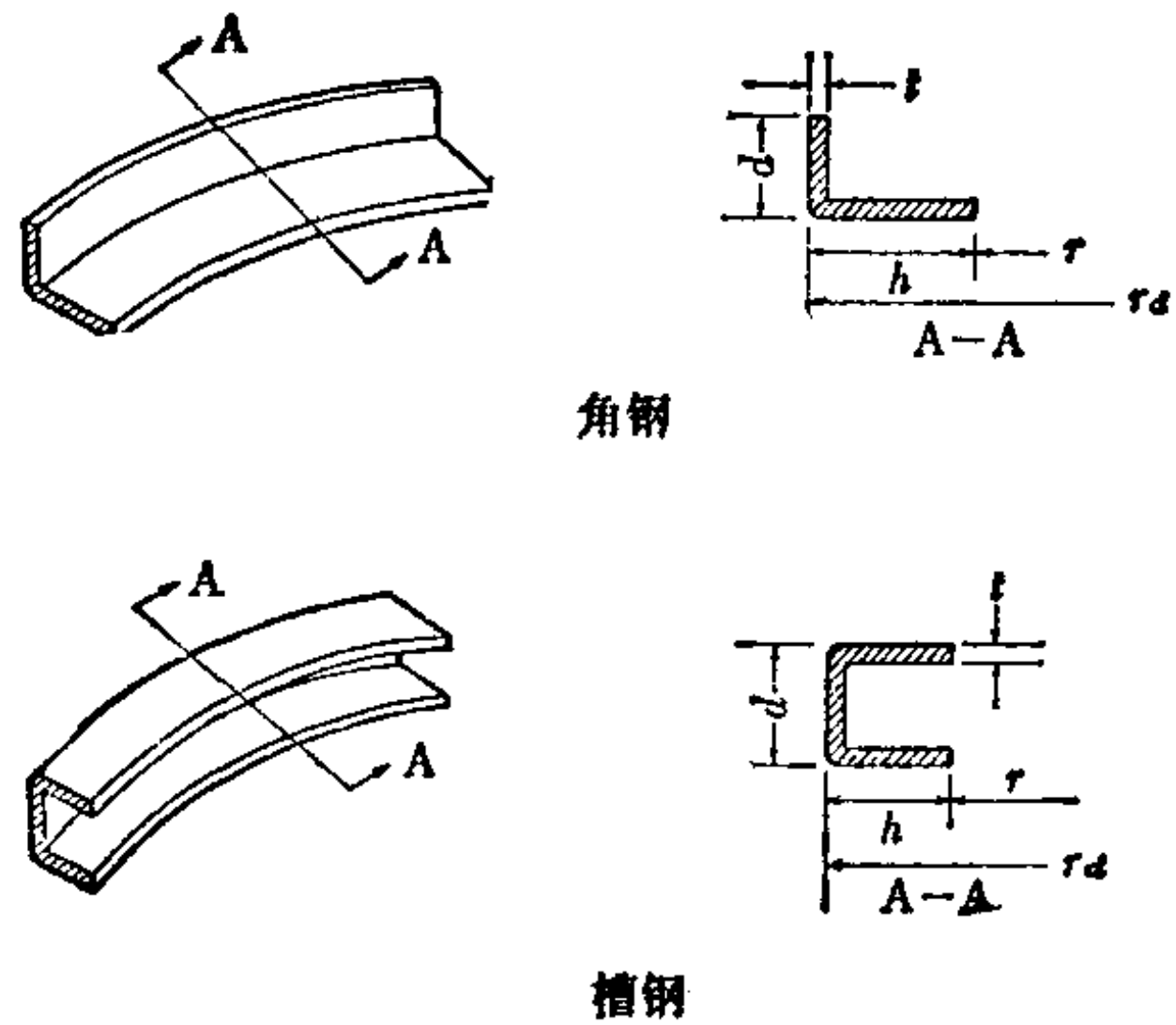


图 3.183

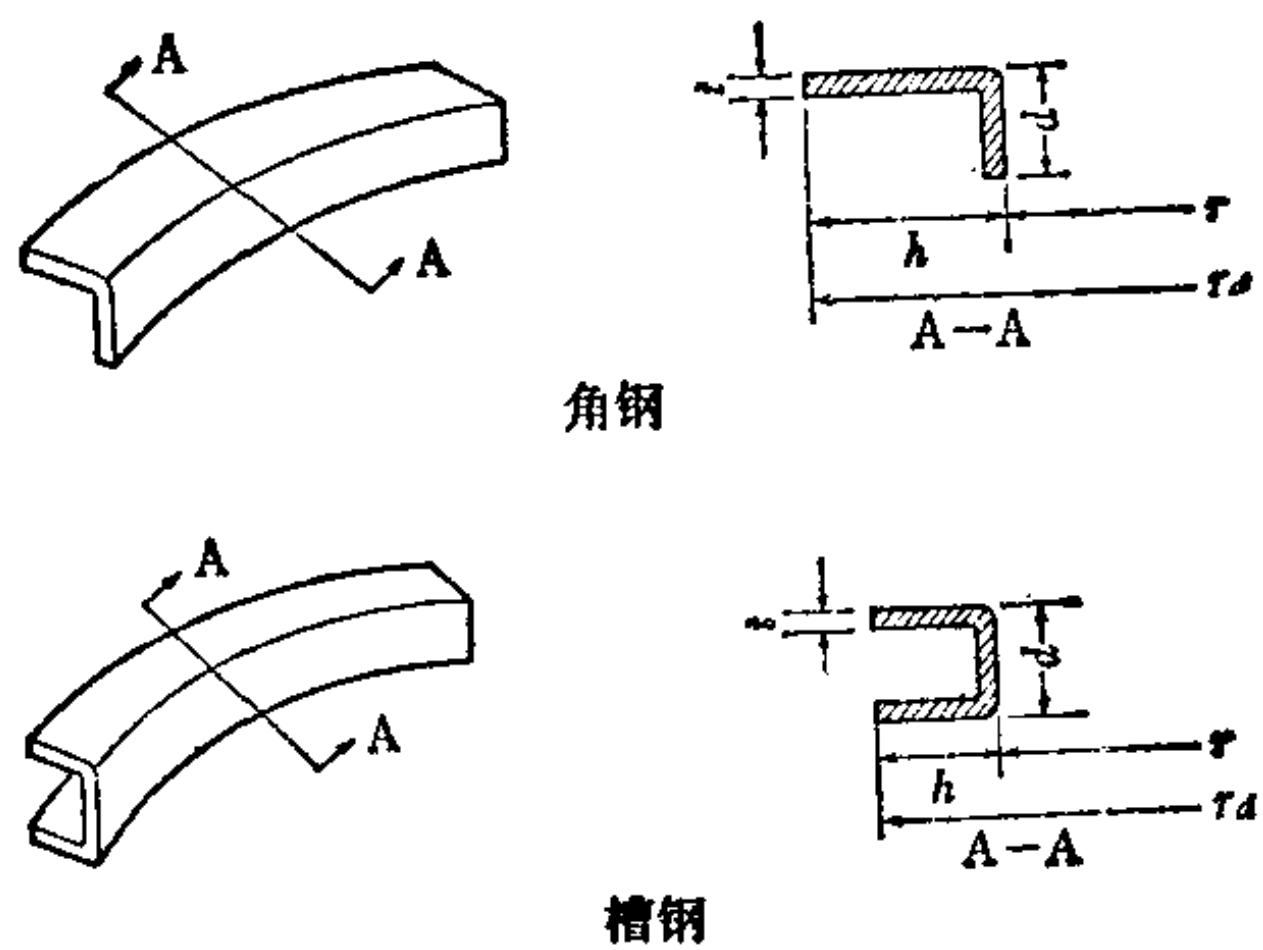


图 3.184

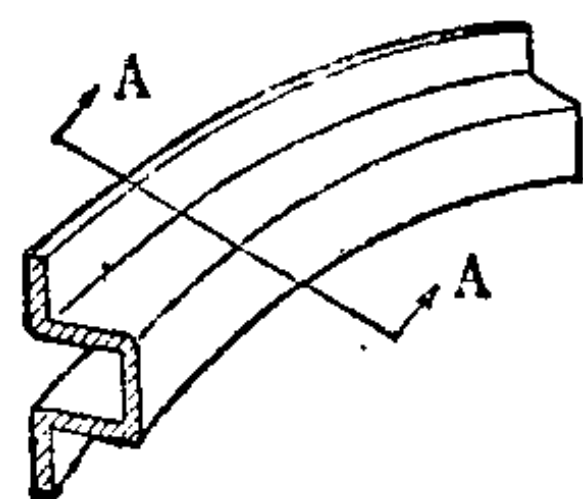
小弯曲半径。并分别参照如图 3.183~图 3.185 所示。

表3.10 弯曲加工方式和最小弯曲半径

弯曲方式	工 模 具	最小弯曲半径
压制弯曲	半月形凹模	$6D$
压制弯曲	半月框形凹模	$3D$
压缩弯曲	无芯棒	$2\frac{1}{2}D$
压缩弯曲	有芯棒	$2D$
滚 弯	3个辊轮	$6D$
拉 弯	参照表3.11、表3.12	参照表3.11、表3.12

表3.11 拉弯的最小弯曲半径

外 径 (mm)	壁 厚 (mm)	最小弯曲半径			
		无 芯 棒	有 芯 棒		模具与球形芯棒合并使用
			柱状芯棒	球状芯棒	
12.7~22.225	0.89	$6\frac{1}{2}D$	$2\frac{1}{2}D$	$3D$	$1\frac{1}{2}D$
	1.25	$5\frac{1}{2}D$	$2D$	$2\frac{1}{2}D$	$1\frac{1}{4}D$
	1.65	$4D$	$1\frac{1}{2}D$	$1\frac{3}{4}D$	$1D$
25.4~38.1	0.89	$9D$	$3D$	$4\frac{1}{2}D$	$2D$
	1.25	$7\frac{1}{2}D$	$2\frac{1}{2}D$	$3D$	$1\frac{3}{4}D$
	1.65	$6D$	$2D$	$2\frac{1}{2}D$	$1\frac{1}{2}D$
41.275~53.975	1.25	$8\frac{1}{2}D$	$3\frac{1}{2}D$	$4\frac{1}{2}D$	$2\frac{1}{4}D$
	1.65	$7D$	$3D$	$3\frac{1}{2}D$	$1\frac{3}{4}D$
	2.11	$6D$	$2\frac{1}{2}D$	$3D$	$1\frac{1}{2}D$
57.15~76.2	1.65	$9D$	$3\frac{1}{2}D$	$4D$	$2\frac{1}{2}D$
	2.11	$8D$	$3D$	$3\frac{1}{2}D$	$2\frac{1}{4}D$
	2.77	$7D$	$2\frac{1}{2}D$	$3D$	$2D$
88.9~101.6	2.11	$9D$	$3\frac{1}{2}D$	$4\frac{1}{2}D$	$3D$
	2.77	$8D$	$3D$	$4D$	$2\frac{1}{2}D$



┐形钢

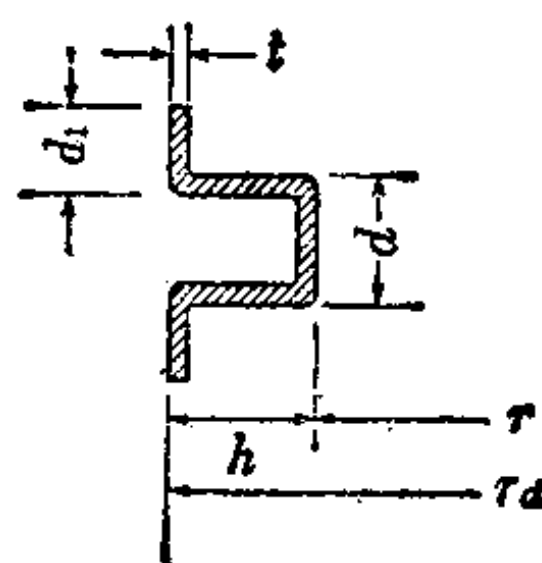


图 3.185

表3.12 拉弯的最小弯曲半径

外 径 (mm)	壁 厚 (mm)	最小弯曲半径 有 芯 棒		最小弯曲半径 无 芯 棒	
		弯 曲 角		弯 曲 角	
		90°	180°	90°	180°
9.53	0.71	2 D	2.3D	3.3D	6.7D
	0.81	2 D	2.3D	3.3D	4.7D
	0.89	1.7D	2 D	3 D	4.7D
	1.25	1.5D	2 D	2.7D	4 D
12.70	0.81	2 D	2.25D	3 D	4 D
	0.89	1.8D	2 D	3 D	4 D
	1.25	1.5D	1.8D	2.8D	3.5D
	1.65	1.5D	1.8D	2.5D	3.5D
15.88	0.89	1.6D	2 D	3.2D	4 D
	1.25	1.4D	2 D	2.8D	4 D
	1.65	1.2D	1.8D	2.4D	3.6D
19.05	0.89	1.8D	2 D	3 D	4 D
	1.25	1.7D	1.9D	3 D	4 D
	1.65	1.5D	1.7D	2.7D	3.3D
	2.12	1.3D	1.5D	2.7D	3.3D
22.23	0.89	1.9D	2 D	2.9D	4 D
	1.25	1.6D	1.9D	2.9D	3.7D
	1.65	1.4D	1.8D	2.6D	3.7D
	2.12	1.3D	1.6D	2.6D	3.4D
25.40	1.25	1.6D	1.9D	3 D	4.5D
	1.65	1.5D	1.8D	3 D	4 D
	2.12	1.25D	1.8D	2.75D	4 D
	2.77	1.25D	1.65D	2.75D	3.75D
28.58	1.25	1.7D	2.1D	3.1D	4 D
	1.65	1.6D	2 D	2.8D	4 D
	2.12	1.4D	1.9D	2.7D	3.8D
	2.77	1.4D	1.8D	2.7D	3.8D
	3.05	1.5D	1.8D	2.7D	3.8D
31.75	1.25	1.8D	2.1D	3.2D	4.0D
	1.65	1.7D	2 D	3 D	3.8D
	2.12	1.5D	1.8D	3 D	3.6D
	2.77	1.4D	1.7D	2.8D	3.6D
	3.05	1.4D	1.7D	2.8D	3.6D
34.93	1.25	1.8D	2.1D	3.3D	4.4D
	1.65	1.7D	2 D	3.1D	4 D
	2.12	1.6D	1.9D	3 D	4 D
	2.77	1.5D	1.7D	2.9D	3.6D
	3.05	1.5D	1.6D	2.7D	3.6D

(续)

外 径 (mm)	壁 厚 (mm)	最小弯曲半径 有 芯 棒		最小弯曲半径 无 芯 棒	
		弯 曲 角		弯 曲 角	
		90°	180°	90°	180°
38.10	1.25	1.8D	2.1D	3.2D	4.7D
	1.65	1.75D	1.9D	3 D	4.3D
	2.12	1.5D	1.8D	2.8D	4.3D
	2.77	1.4D	1.7D	2.8D	4 D
	3.05	1.4D	1.6D	2.7D	4 D
44.45	1.25	2 D	2.1D	3.1D	4.6D
	1.65	1.7D	1.9D	3 D	4.3D
	2.12	1.5D	1.6D	3 D	4.3D
	2.77	1.3D	1.6D	2.9D	4 D
	3.05	1.2D	1.5D	2.9D	4 D
50.80	1.25	2 D	2.1D	3.25D	4.5D
	1.65	1.75D	1.9D	3 D	4.25D
	2.12	1.75D	1.9D	3 D	4.25D
	2.77	1.7D	1.8D	3 D	4 D
	3.05	1.6D	1.75D	2.9D	4 D
57.15	1.25	1.9D	2.1D	4.4D	5.3D
	1.65	1.8D	1.9D	3.1D	4.2D
	2.12	1.8D	1.9D	3 D	4.2D
	2.77	1.7D	1.8D	3 D	4 D
	3.05	1.7D	1.8D	2.9D	4 D
63.5	1.65	1.8D	1.9D	3.2D	4 D
	2.12	1.75D	1.9D	3 D	4 D
	3.05	1.7D	1.8D	2.8D	3.8D
76.2	1.65	1.8D	2 D	—	—
	2.12	1.75D	1.8D	3 D	—
	3.05	1.7D	1.75D	3 D	—
88.9	1.65	2.1D	2.3D	—	—
	2.12	2 D	2.2D	—	—
	3.05	2 D	2.1D	—	—
101.6	1.65	2.25D	2.4D	—	—
	2.12	2.1D	2.25D	—	—
	3.05	2 D	2.1D	—	—
127	1.65	2.5D	2.5D	—	—
	2.12	2.4D	2.45D	—	—
	3.05	2.3D	2.4D	—	—

表3.13 美国薄壁管弯曲的最新资料

材 料	外 径 (mm)	壁 厚 (mm)	弯曲半径① (mm)	弯 曲 角
321SS	63.5	0.31	76.2	90°
AM 350CRES钢	38.1	0.71	38.1	180°
钛 A40	101.6	0.89	152.4	90°
耐腐蚀耐热镍基合金	88.9	0.71	88.9	45°
因科镍铬合金	38.1	0.46	38.1	90°
铝6061 T6-0	50.8	0.71	44.5	90°
304SS	177.8	0.89	177.8	180°

① 管子中心。

注：数值是已换算为公制的值。

表3.14 矩形管的最小弯曲半径 (mm)

壁厚 (mm)	尺寸 (mm)			
	2.11	1.65	1.24	0.89
12.7	41.28	44.45	47.63	50.0
19.05	50.8	50.8	63.5	76.2
25.4	76.2	76.2	88.9	101.6
28.58	76.2	76.2	88.9	101.6
31.75	88.9	88.9	101.6	—
38.10	114.3	114.3	127.0	—
44.45	152.4	165.1	177.8	—
50.80	177.8	215.9	228.6	—
63.50	228.6	266.7	—	—
76.20	304.8	381.0	—	—

表3.15 角钢、槽钢在延伸弯曲中的

材料	极限比	破 裂 极 限 h/r_d										
		温度	h/t									
	R_D/T	(°C)	3	5	7	10	15	25	30	40	50	
2024-T3	225	常温	h/r_d	0.23	0.22	0.21	0.19	0.17	0.14	0.14	—	—
			r_d/r_0	13	22.8	34	52.5	88	172	217	—	—
Ti-8-1-1	229	常温	h/r_d	0.21	0.20	0.18	0.17	0.16	0.13	—	—	—
			r_d/r_0	14.3	25.4	38.1	58.8	96.1	188	—	—	—
TZM Moly	358	常温	h/r_d	0.23	0.22	0.21	0.19	0.17	0.15	0.14	0.13	—
			r_d/r_0	13	23.2	33.9	52.5	86.5	168	212	316	—
Cb-752	203	常温	h/r_d	0.32	0.30	0.29	0.26	0.24	0.21	0.20	—	—
			r_d/r_0	9.4	16.6	24.5	37.8	62	117.6	150	—	—
PH15-7Mo	260	260	h/r_d	0.38	0.35	0.33	0.31	0.29	0.25	0.24	0.22	0.20
			r_d/r_0	8.2	14.3	21	31.8	51.6	98.5	124	183	250
L-605	155	常温	h/r_d	0.51	0.49	0.47	0.46	0.43	0.39	0.38	0.35	0.33
			r_d/r_0	5.9	10.2	14.8	21.9	35	63.5	80	114	150
Ti-8-1-1	268	常温	h/r_d	0.22	0.20	0.19	0.17	0.15	0.13	0.12	—	—
			r_d/r_0	13.7	25	37.4	57.5	98.4	192	244	—	—
Ti-13-11-3	155	260	h/r_d	0.31	0.29	0.27	0.25	0.23	0.20	—	—	—
			r_d/r_0	9.7	17.5	25.9	39.4	65	125	—	—	—
TZM Moly	316	常温	h/r_d	0.27	0.26	0.25	0.23	0.21	0.18	0.17	0.15	—
			r_d/r_0	10.9	19.3	28.2	43.3	72.7	139	180	269	—
Cb-752	253	常温	h/r_d	0.32	0.30	0.29	0.26	0.24	0.21	0.20	0.18	—
			r_d/r_0	9.5	16.4	24.5	37.8	62	117.6	150	222	—

① 原文误为图3.178。——译者

加工极限 (参照图3.183①)

		纵弯(起皱)极限 h/t								
温度	h/r									
(°C)	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40	
常温	h/t	67	48	39	36	36	36	—	—	—
	r_d/t	3417	1248	689	486	396	276	—	—	—
常温	h/t	52	36	30	29	29	—	—	—	—
	r_d/t	2652	936	530	392	319	—	—	—	—
常温	h/t	85	60	49	44	44	—	—	—	—
	r_d/t	4335	1560	866	594	484	—	—	—	—
常温	h/t	72	51	41	38	38	38	38	—	—
	r_d/t	3672	1326	725	513	418	291	228	—	—
常温	h/t	104	75	61	53	53	52	52	—	—
	r_d/t	5304	1950	1076	716	583	399	312	—	—
427	h/t	121	85	70	60	58	58	58	58	58
	r_d/t	6171	2210	1235	810	640	444	348	251	203
260	h/t	60	42	34	32	32	—	—	—	—
	r_d/t	3060	1092	601	432	352	—	—	—	—
260	h/t	52	37	30	29	29	29	29	—	—
	r_d/t	2652	963	530	392	319	222	174	—	—
260	h/t	92	65	53	46	46	46	—	—	—
	r_d/t	4692	1690	937	621	506	353	—	—	—
427	h/t	85	60	49	44	44	44	44	—	—
	r_d/t	4335	1560	866	594	484	337	264	—	—

表3.16 角钢、槽钢在延伸弯曲

材料	极限比 R_D/T	破裂极限 h/r_d										
		温度 (°C)	h/t									
			2	5	7	10	15	20	25	30	40	
2024-T 3	104	常温	h/r_d	0.48	0.42	0.39	0.36	0.31	0.28	0.15	—	—
			r_d/t	4.17	11.9	17.9	27.8	48.4	71.4	172	—	—
Ti-8-1-1	299	常温	h/r_d	0.22	0.19	0.18	0.16	0.14	0.13	—	—	—
			r_d/t	9.10	26.3	38.9	62.5	107	154	—	—	—
TZM Moly	536	常温	h/r_d	0.26	0.23	0.21	0.19	0.17	0.16	0.12	0.11	—
			r_d/t	7.70	21.7	33.4	52.6	88.3	125	203	270	—
Cb-752	128	常温	h/r_d	0.48	0.42	0.39	0.35	0.31	0.28	0.17	—	—
			r_d/t	4.17	11.9	17.9	28.6	48.4	71.4	150	—	—
PH15-7Mo	127	260	h/r_d	0.63	0.55	0.51	0.47	0.42	0.38	0.20	0.19	—
			r_d/t	3.17	9.1	13.7	21.3	35.7	52.6	125	160	—
L-605	50	常温	h/r_d	1.2	1.04	0.98	0.90	0.79	0.70	0.32	0.31	—
			r_d/t	1.67	4.8	7.14	11.1	19	28.6	77	96.6	—
Ti-8-1-1	379	常温	h/r_d	0.22	0.19	0.18	0.16	0.14	0.13	0.11	—	—
			r_d/t	9.10	26.3	38.9	62.5	107	154	233	—	—
Ti-13-11-3	82	260	h/r_d	0.44	0.38	0.35	0.32	0.28	0.25	—	—	—
			r_d/t	4.54	13.1	20	31.2	53.6	80	—	—	—
TZM Moly	550	常温	h/r_d	0.27	0.23	0.22	0.19	0.17	0.16	0.12	0.12	0.10
			r_d/t	7.40	21.7	31.8	52.6	88.3	125	203	260	403
Cb-752	164	常温	h/r_d	0.48	0.42	0.39	0.35	0.31	0.28	0.17	0.15	—
			r_d/t	4.17	11.9	17.9	28.6	48.4	71.4	150	202	—

① 原文误为图3.179。——译者

中的加工极限 (参照图3.184①)

		纵弯 (起皱) 极限 h/t								
温度		h/r								
(°C)		0.015	0.03	0.05	0.08	0.15	0.20	0.20	0.30	0.40
常温	h/t	102	73	57	45	33	29	—	—	—
	r_d/t	6800	2435	1140	563	220	145	—	—	—
常温	h/t	83	60	46	37	—	—	—	—	—
	r_d/t	5530	2000	920	463	—	—	—	—	—
常温	h/t	130	94	73	58	—	—	—	—	—
	r_d/t	8670	3130	1460	725	—	—	—	—	—
常温	h/t	115	82	64	51	37	32	26	—	—
	r_d/t	7660	2733	1280	638	246	160	156	—	—
常温	h/t	161	115	90	70	52	44	37	—	—
	r_d/t	10710	3835	1800	875	347	220	217	—	—
427	h/t	185	131	102	80	60	52	42	35	31
	r_d/t	12320	4370	2040	1000	400	260	252	152	108
260	h/t	95	67	52	41	—	—	—	—	—
	r_d/t	6330	2232	1104	512	—	—	—	—	—
260	h/t	83	59	46	36	26	23	20	—	—
	r_d/t	5540	1965	920	450	173	115	120	—	—
260	h/t	138	98	76	60	—	—	—	—	—
	r_d/t	9200	3265	1520	750	—	—	—	—	—
260	h/t	138	98	76	60	44	38	—	—	—
	r_d/t	9200	3265	1520	750	293	190	—	—	—

表3.17 帽形钢 (几形) 在延伸弯曲

材料	极限比	破裂极限 h/r_d						
		温度	h/t					
	R_D/T	(°C)	3	5	8	10	15	20
2024-T3	172	常温	h/r_d 0.23 r_d/t 13.3	0.21 24	0.19 41.3	0.19 53.4	0.17 86.4	0.16 128
Ti-8-1-1	215	常温	h/r_d 0.17 r_d/t 17.3	0.16 31.3	0.15 55	0.14 72.5	0.13 115	0.12 174
TZM Moly	393	常温	h/r_d 0.19 r_d/t 15.5	0.18 27.7	0.17 48	0.16 62.6	0.14 103	0.13 153
Cb-752	156	常温	h/r_d 0.25 r_d/t 11.8	0.24 20.6	0.22 35.6	0.21 47	0.19 77.5	0.18 111
PH15-7Mo	200	260	h/r_d 0.30 r_d/t 10.1	0.28 17.8	0.26 30.2	0.25 39.4	0.23 65	0.22 92.7
L-605	93	常温	h/r_d 0.44 r_d/t 6.8	0.42 11.9	0.40 20.1	0.39 25.8	0.36 41.3	0.34 58.4
Ti-8-1-1	281	常温	h/r_d 0.17 r_d/t 17.3	0.16 31.3	0.15 53.7	0.14 70.6	0.13 115	0.12 174
Ti-13-11-3	107	260	h/r_d 0.25 r_d/t 11.8	0.24 21.1	0.22 36.5	0.21 47.8	0.19 80.3	— —
TZM Moly	424	常温	h/r_d 0.19 r_d/t 15.5	0.18 27.7	0.17 48	0.16 94	0.14 103	0.13 149
Cb-752	261	常温	h/r_d 0.25 r_d/t 11.8	0.24 21.1	0.22 36.5	0.21 47.8	0.19 80.3	0.17 115

① 原文误为图3.180。——译者

中的加工极限 (参照图3.185①)

		纵弯 (起皱) 极限 h/t					
温度		h/r					
(°C)		0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.15
常温	h/t	66	48	40	35	32	26
	r_d/t	3366	1248	199	472	352	199
常温	h/t	52	38	32	28	25	—
	r_d/t	2652	988	565	378	275	—
常温	h/t	83	61	51	44	40	—
	r_d/t	4233	1584	901	594	440	—
常温	h/t	72	52	44	38	34	29
	r_d/t	3672	1352	777	514	374	222
常温	h/t	103	76	64	55	50	42
	r_d/t	5253	1976	1130	743	550	322
427	h/t	120	86	72	63	57	48
	r_d/t	6120	2231	1272	851	627	368
260	h/t	62	46	38	33	30	—
	r_d/t	3162	1196	672	446	330	—
260	h/t	54	40	34	29	27	22
	r_d/t	2754	1040	601	392	297	169
260	h/t	90	65	55	48	44	—
	r_d/t	4590	1688	971	648	484	—
260	h/t	90	65	55	48	44	36
	r_d/t	4590	1688	971	648	484	276

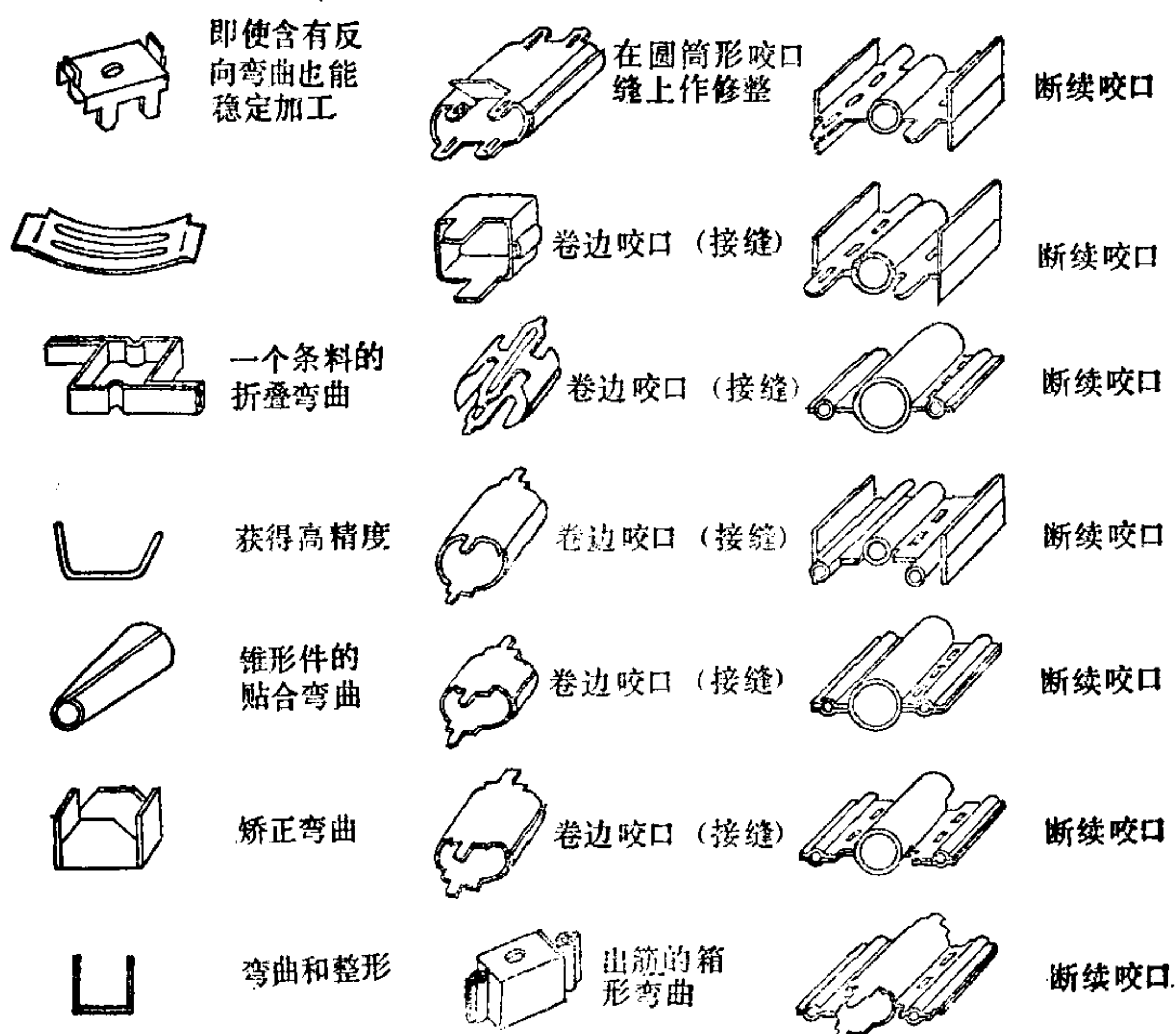


图3.192 制件实例之二

3.6.1 多滑块压力机的基本动作

多滑块压力机由连续模部分和成形部分所构成，把下面的基本动作组合起来即可作复杂形状的加工。

(1) 冲裁 在连续模部分进行，但小的切口、弯曲处的精密冲孔等，使用对向滑块上的工（模）具与弯曲同时加工。

(2) 切断 使用切刀和贯通凹模。

(3) 弯曲、成形 由下列工（模）具相组合的冲压动作完成。即：a) 芯棒和滑块上的工（模）具之间；b) 对向滑块上的工（模）具之间；c) 中心固定工（模）具之间；d) 摆动工（模）具和固定工（模）具之间；e) 侧向加压的工（模）具之间；f) 卷曲工（模）具和材料送进动作的复合；g) 中心工（模）具的滑块压下运动。

(4) 反复弯曲 使用对向滑块和工（模）具之间或者芯棒和

滑块的工具之间作反复弯曲。复合弯曲时，在不作切断的地方作局部弯曲，松开并送进再次进行弯曲，或者用一次卡紧成形，退出工（模）具进而再用别的工（模）具进行加工。

（5）折叠 在带料上作全部成形，在所要求的地方折叠。也有先作直角弯曲，将一部分工（模）具退出之后再 用别的工（模）具作锐角弯曲，或

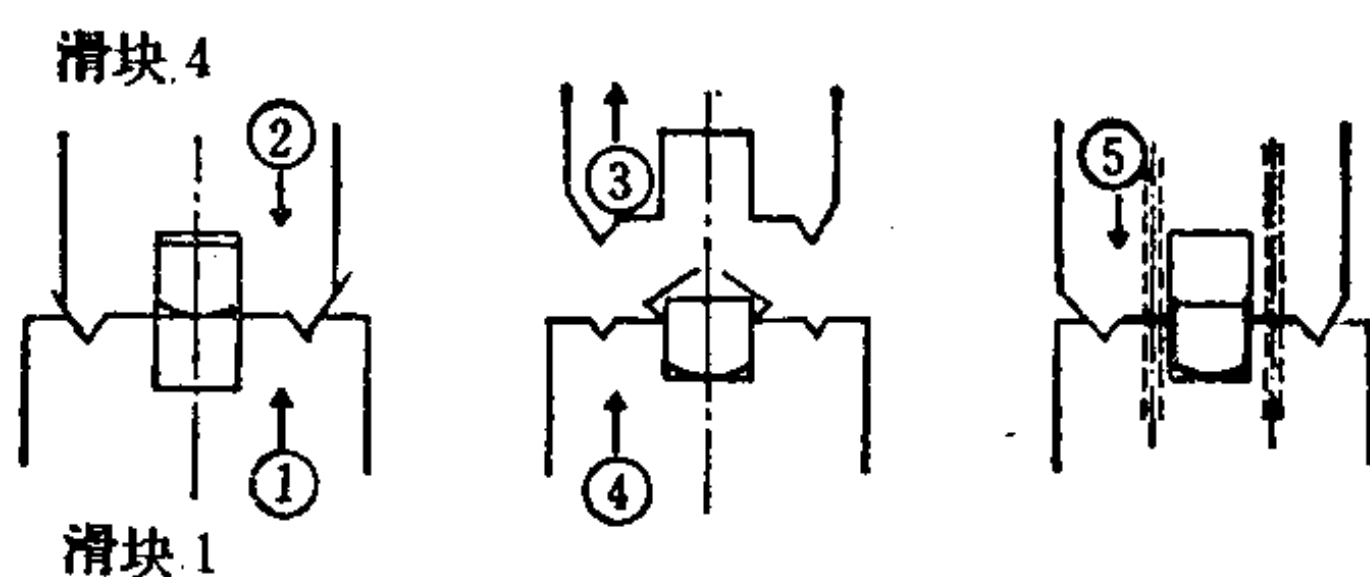


图3.193 折叠弯曲的工序安排

（图中数字①、②…表示动作顺序）

或者将这样的制件压合在一块，或作切线弯板机式的折弯（图3.193）。

（6）两件复合 把两个带料重叠起来送入，一起冲裁之后再 用斜楔将其分成两件，成形过程简单。但是，这种方法仅限于两件形状完全相同的制件。当稍有不同时，即不能采用这一方法。这时，可使用如图3.186 d)所示的双向多工位压力机，或采用前项的折叠复合法。

（7）位置移动 当希望对两处作不同加工时，就在变动制件位置的时候作其它加工。最简单的位置移动法，就是沿芯棒或槽形推出一要求量，经常使用的是被称为中心销的中心芯棒。在后面的滑块上带有芯棒，使用辅助凸轮向前推出的方法也常被使用。

3.6.2 应用动作

a. 卷边咬口（接缝） 是多滑块压力机最合适的作业，被用于板料两边的结合、圆形敛缝方面。图3.194~图3.199所示即为卷边咬口（接缝）工艺的种种实例。

b. 断续咬口 是将两张板料不用铆钉而以自身的材料作敛缝的方法。将被加工件结合处的材料切开，从里面去压击卷边的突出部分并固合起来。切口凸模的端部具有锋利的两个刃口，其所以那样仅仅是为了切口，并使其在凹模之间将剪断部分结合起

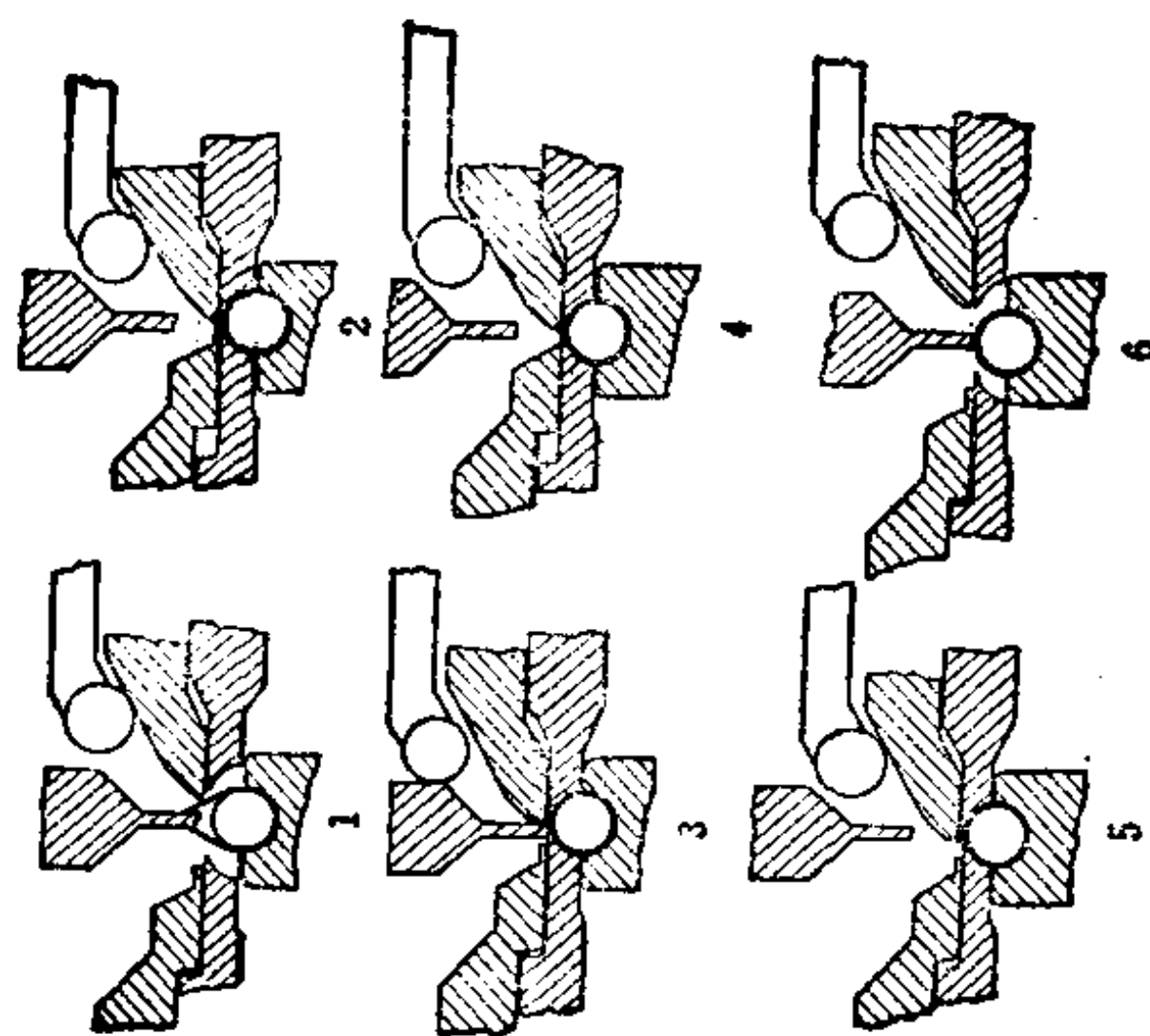


图3.195 卷边咬口(接缝)工序例(2)[155]
1~6表示工序顺序号

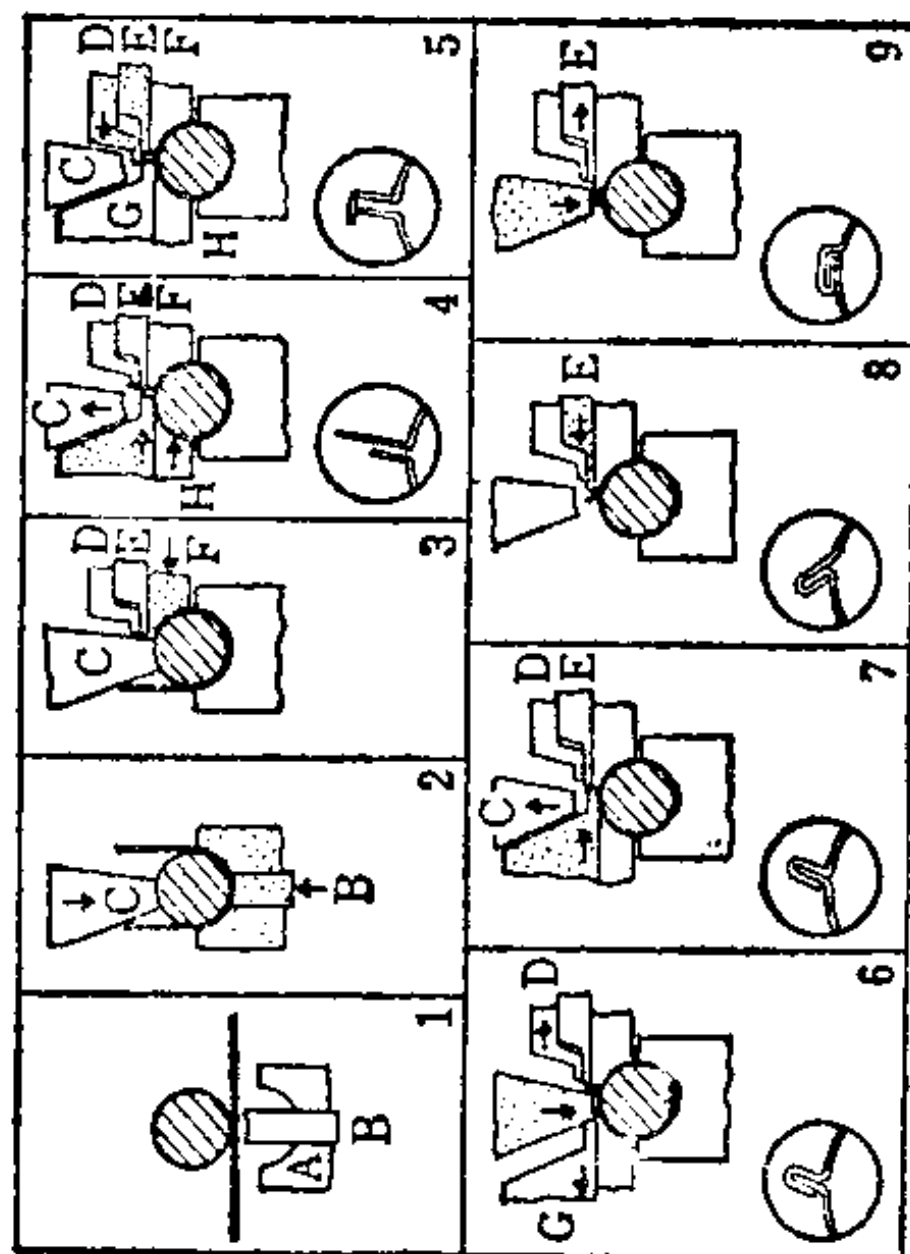


图3.196 卷边咬口(接缝)工序例(3)[155]
1~11表示工序顺序号 A~O表示件号

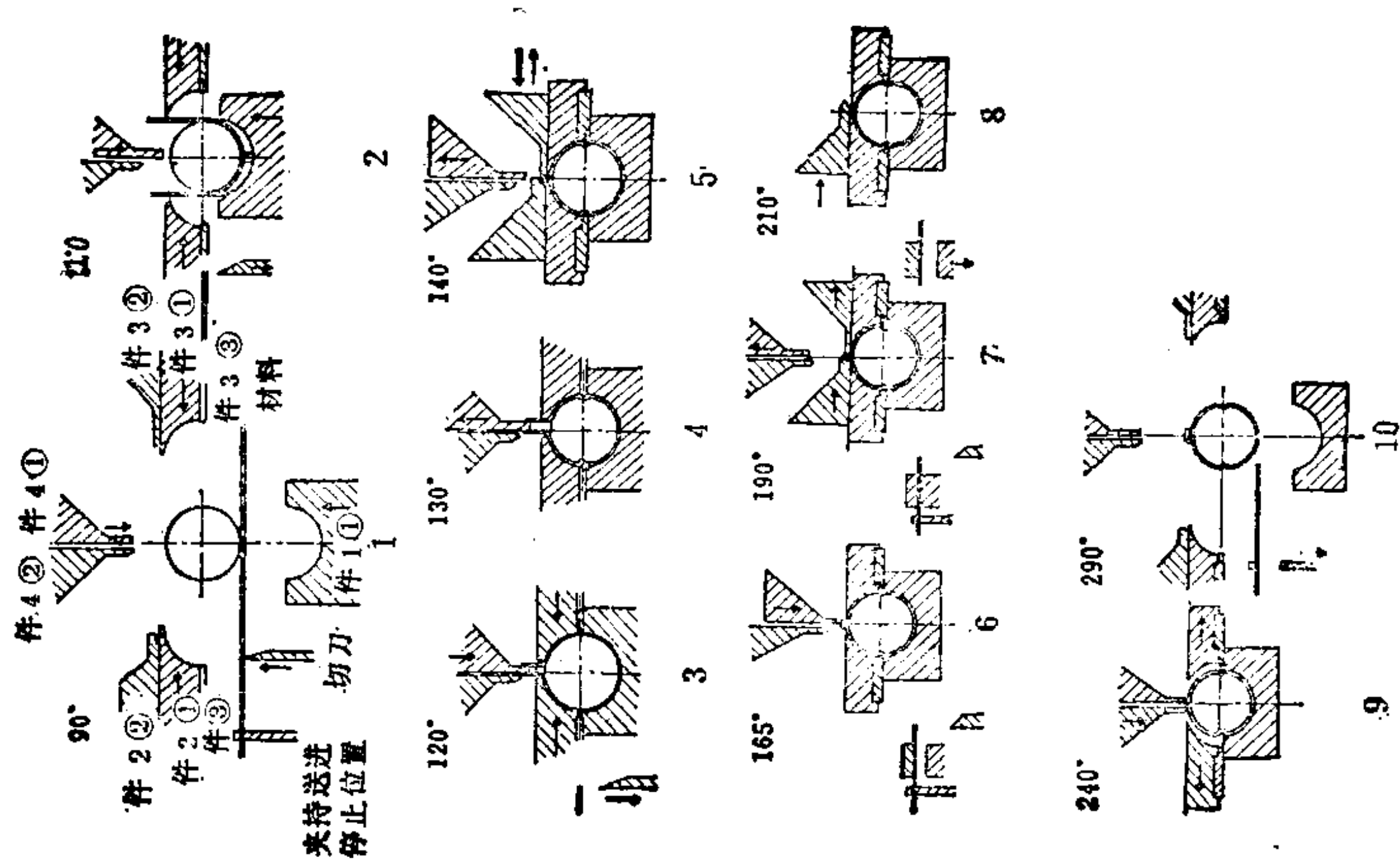


图3.194 卷边咬口(接缝)工序示例(1)[155]
1~10表示工序顺序号 ①~③表示动作顺序号

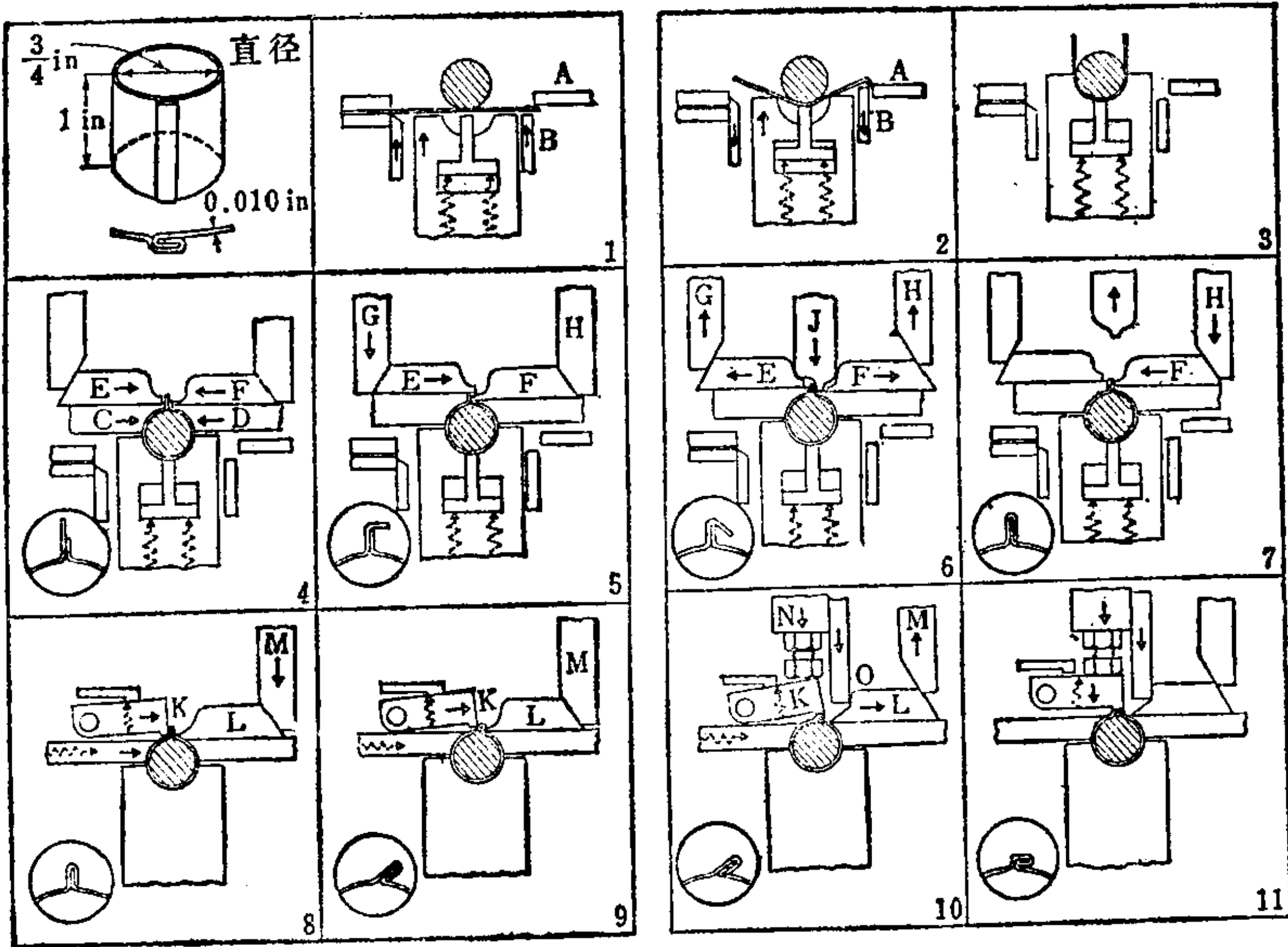


图3.197 卷边咬口（接缝）工序例（4）[155]

1~9表示工序顺序号 A~H表示件号

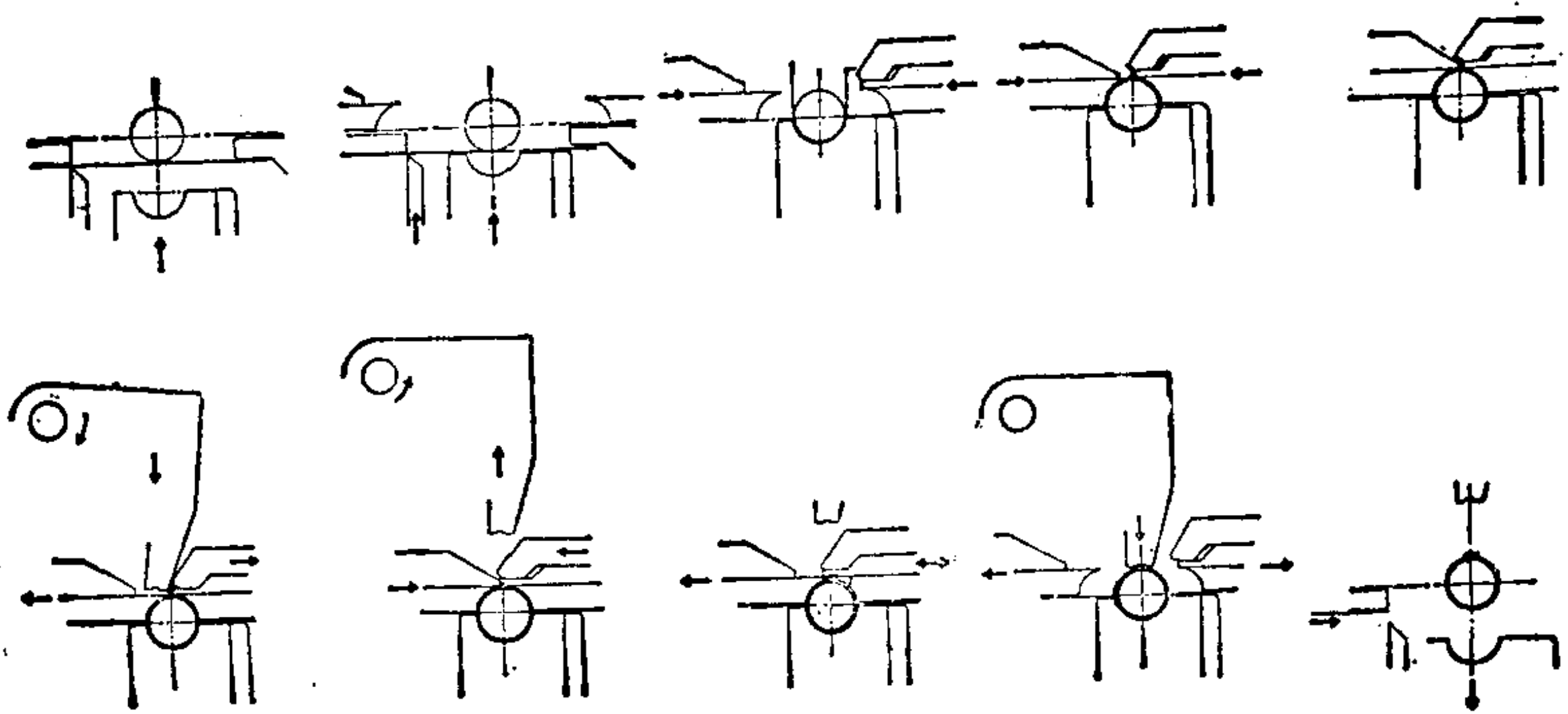


图3.198 卷边咬口（接缝）工序例（5）

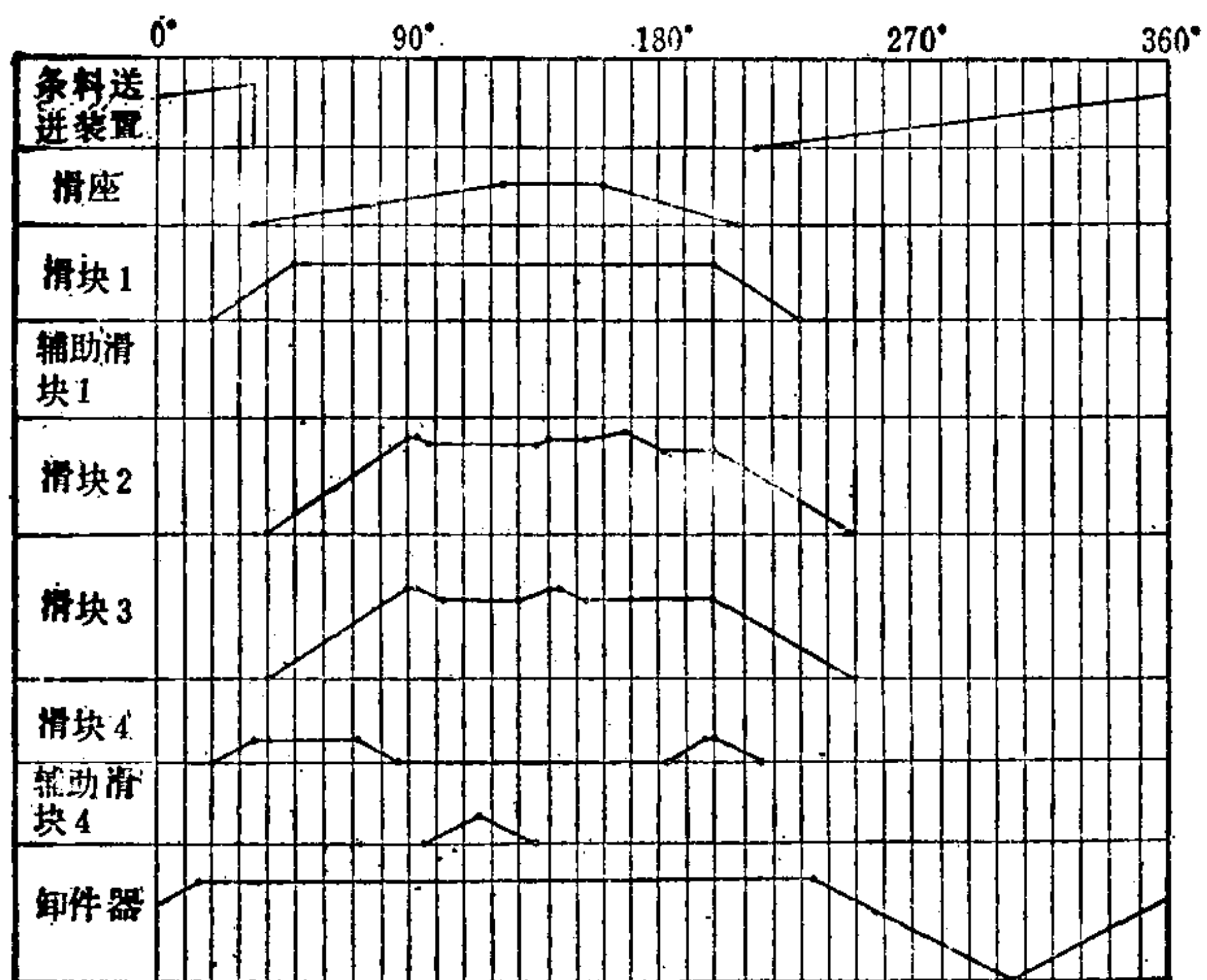


图3.199 卷边咬口（接缝）的凸轮曲线图

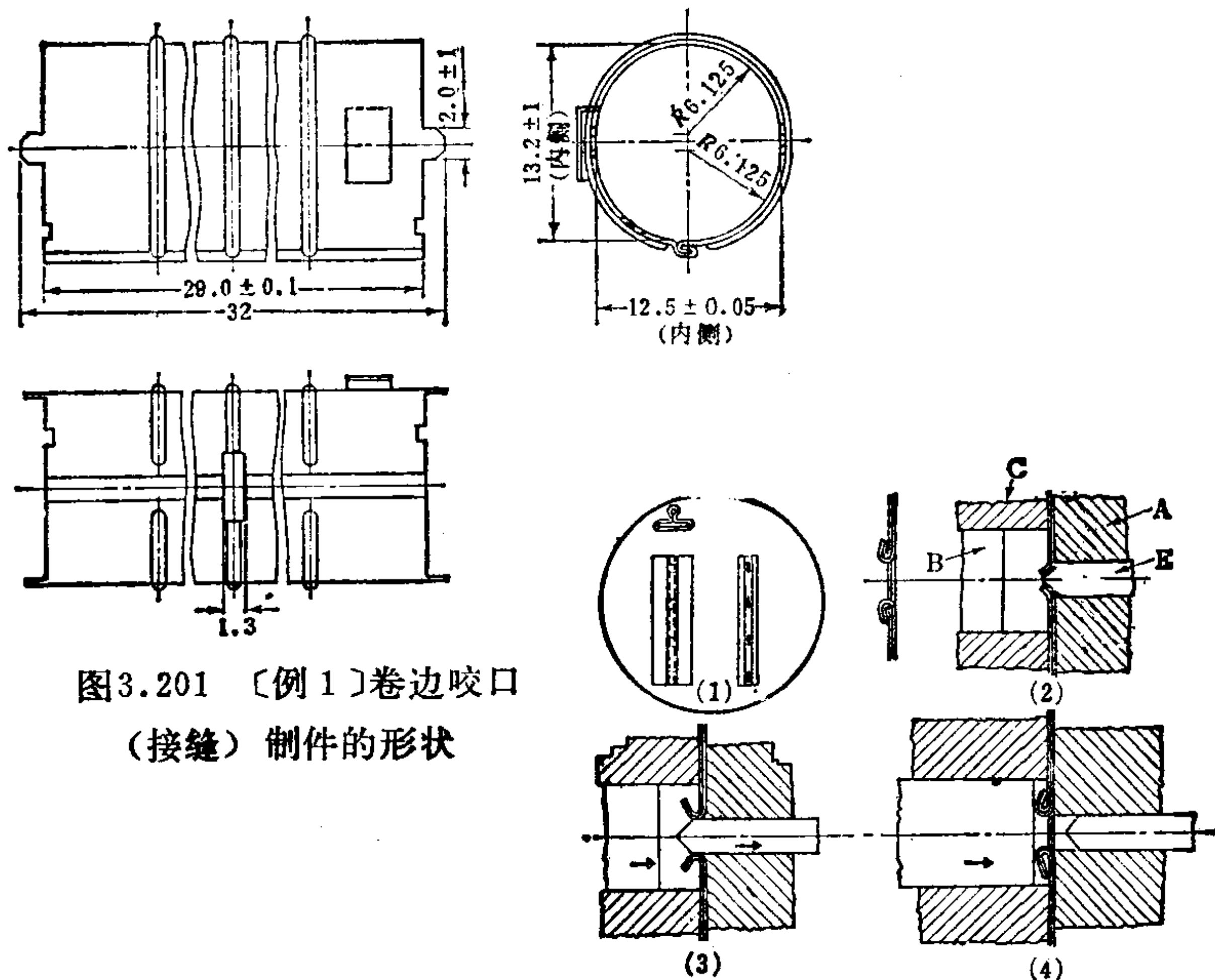


图3.201 [例1]卷边咬口
(接缝)制件的形状

图3.200 断续咬口的方法

来。图 3.200 所示，即为切口敛缝凸模的动作。

3.6.3 实例

a. 例 1 卷边咬口（接缝）零件 图 3.201 所示为制件形状，图 3.202 所示为条料的排样情况。在连续冲裁模上作出筋，进行冲裁等，经过数个节距的空工位使其达到成形部位。第一个滑块上的工（模）具，当其与芯棒将板料作夹紧的同时以切刀将条料分离，就开始敛缝工序。

由于这种工序是基本的，所以凸轮可以通用。

图 3.203 所示为冲裁凹模部分，图 3.204 所示为成形工（模）具的状况。材料从左向右送进，将成形部中心的芯子作为中心进行敛缝，如象右侧的视图所示那样，制件从机架上的孔向下方离开芯子被推出去。

b. 例 2 用两张板料作断续咬口 是将两块条料于同一方向送进，用断续咬口作方形件成形的示例。

c. 例 3 非对称形状的一个条形制件 是将一块条料作折叠得到非对称形状的例子。

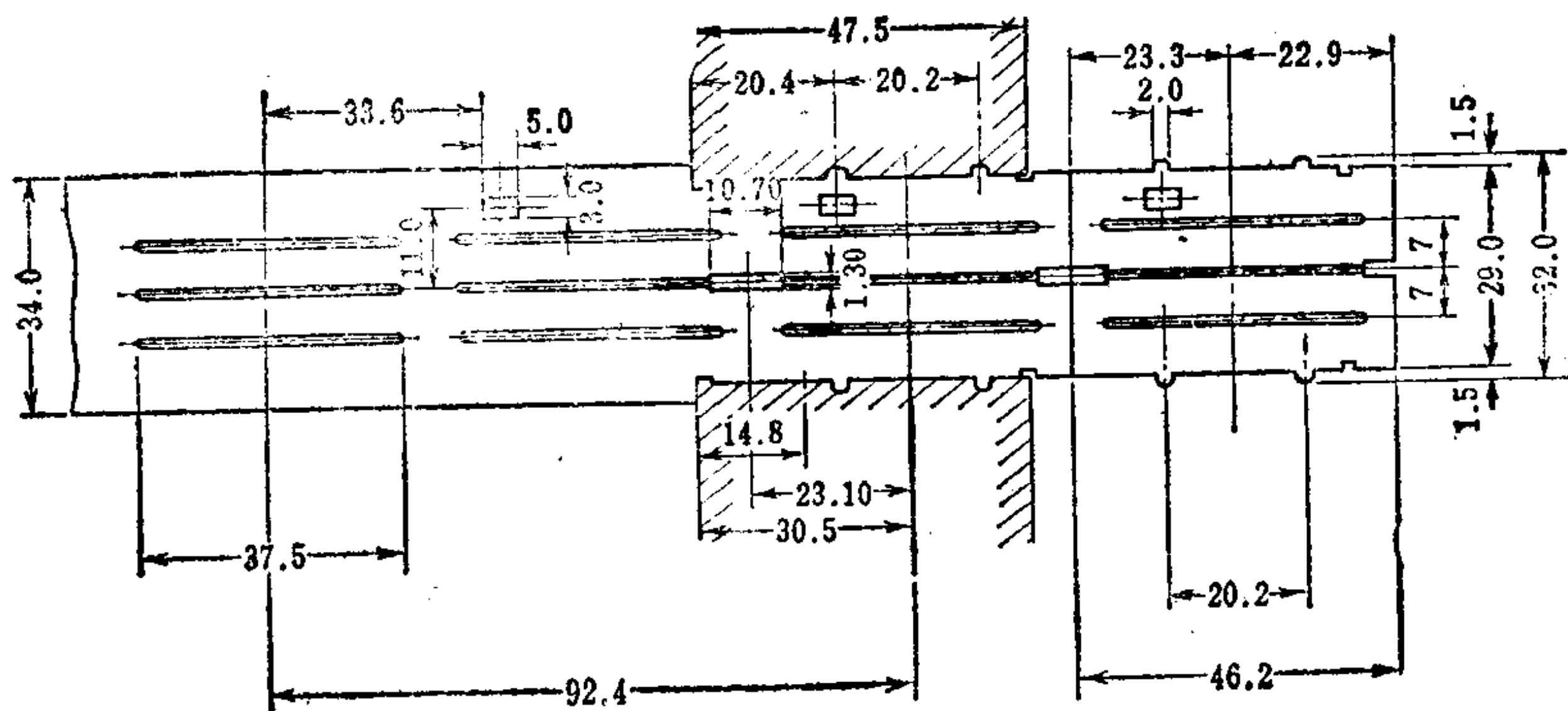


图3.202 [例1]条料的排样

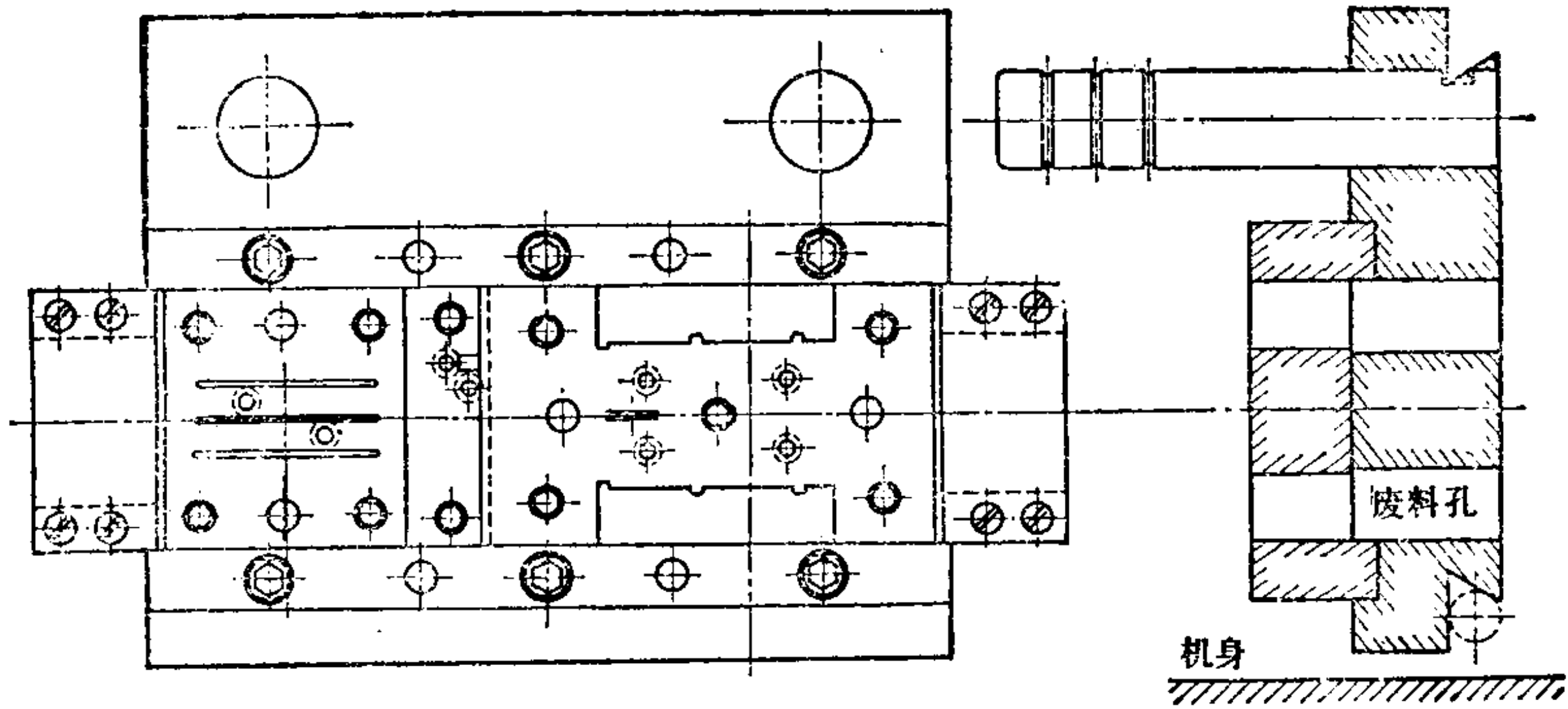


图3.203 [例1]冲裁凹模部分

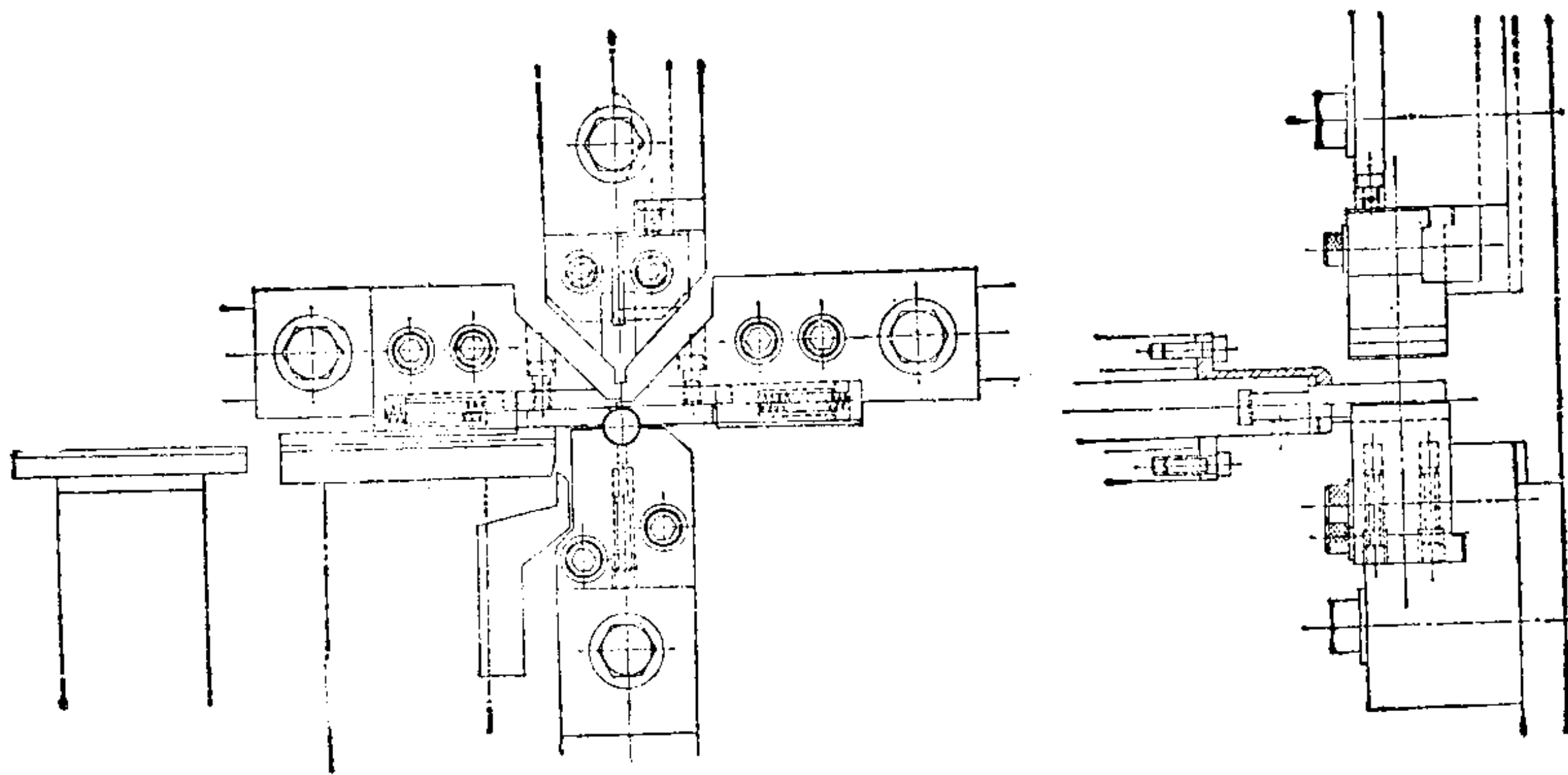


图3.204 [例1]成形处工(模)具的配置图

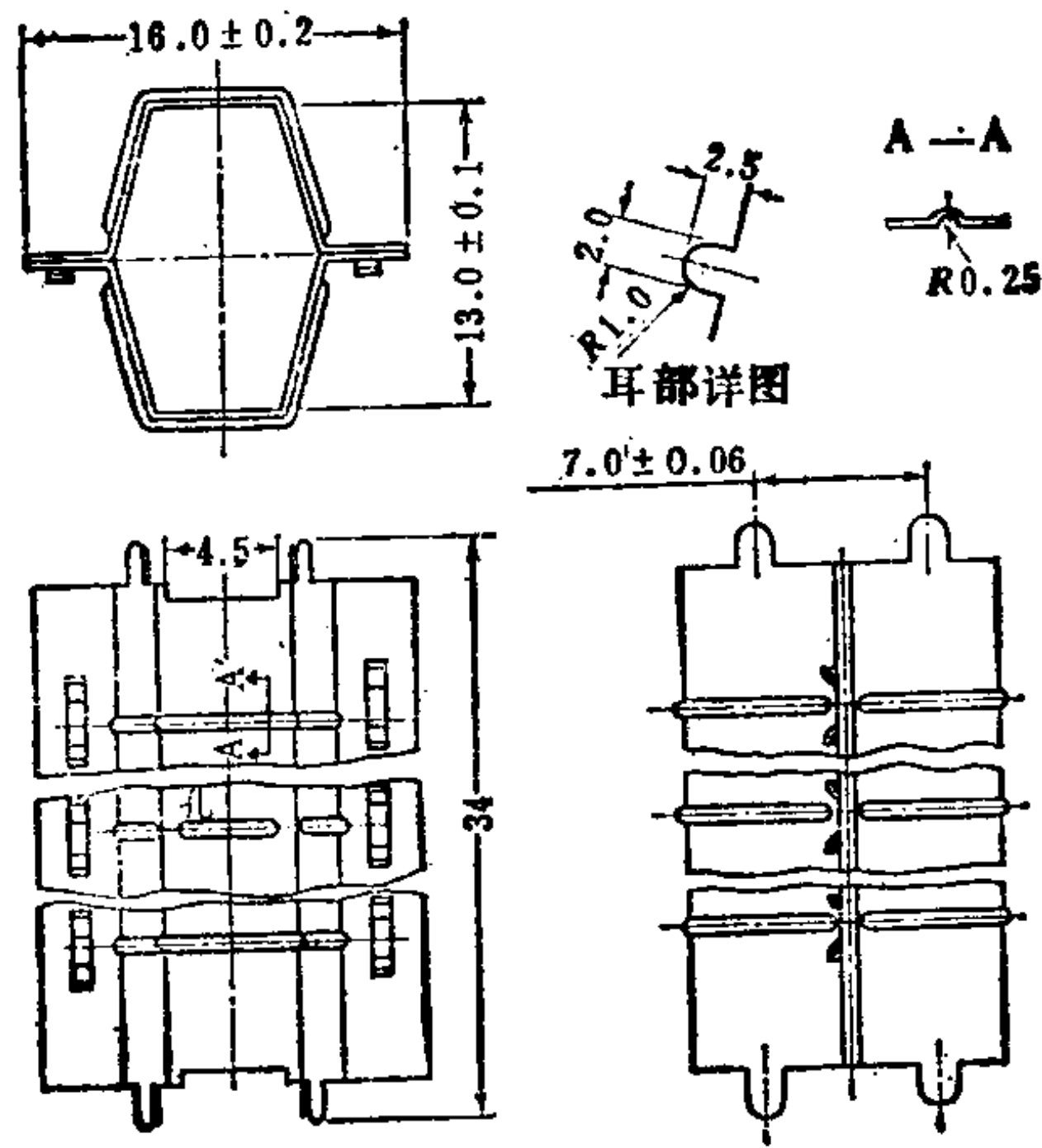


图 3.205

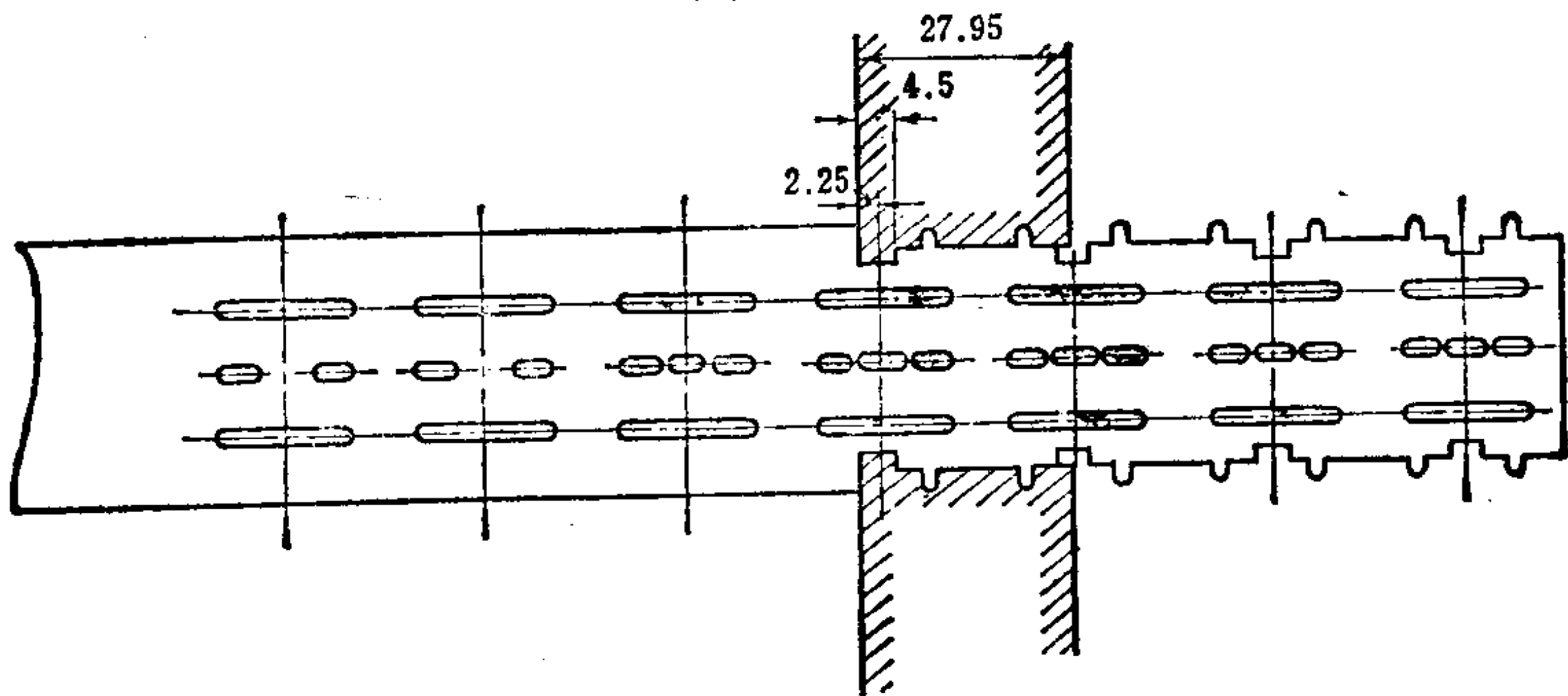


图3.206 [例2]条料的排样

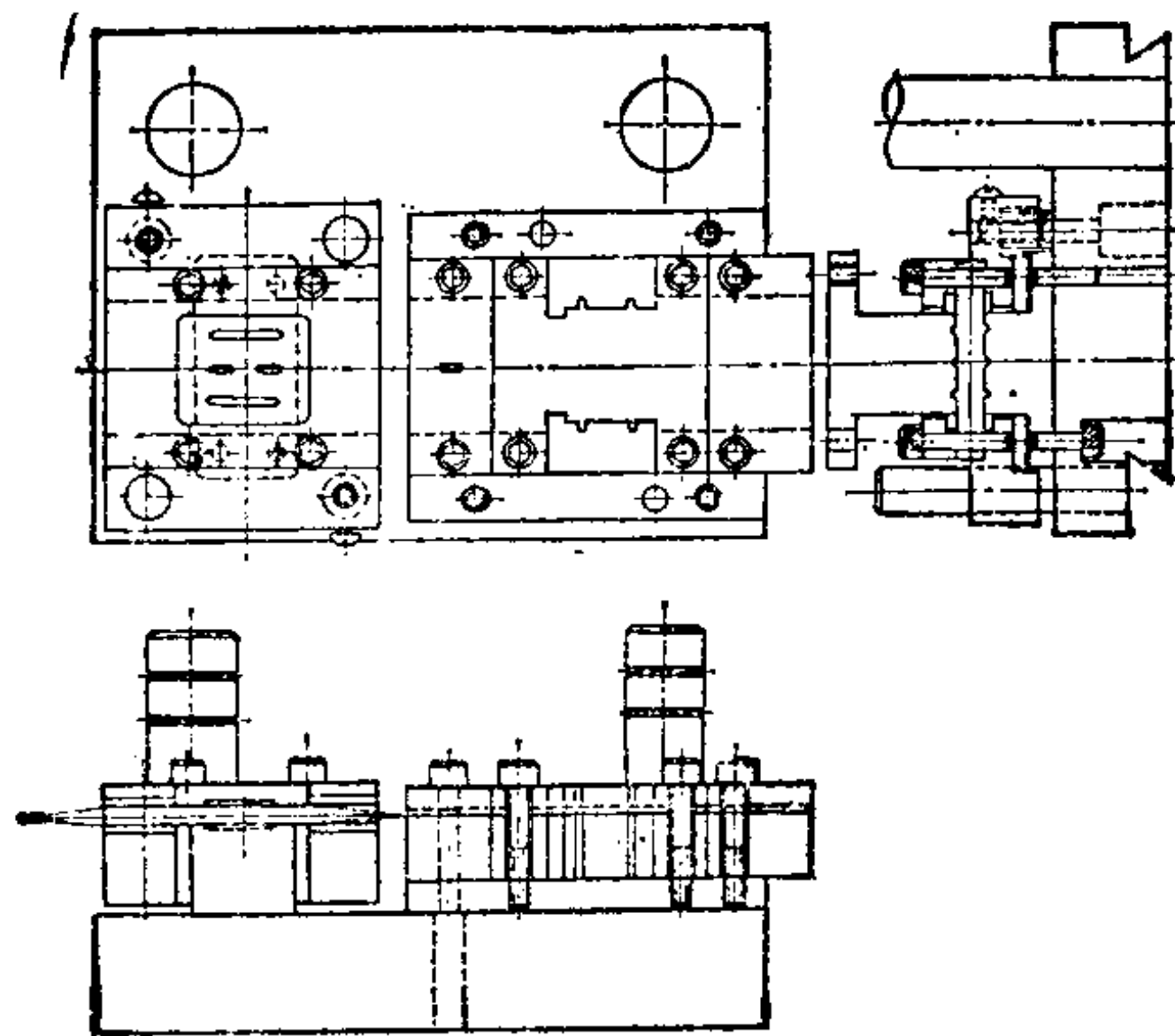


图3.207 [例2]冲裁部分

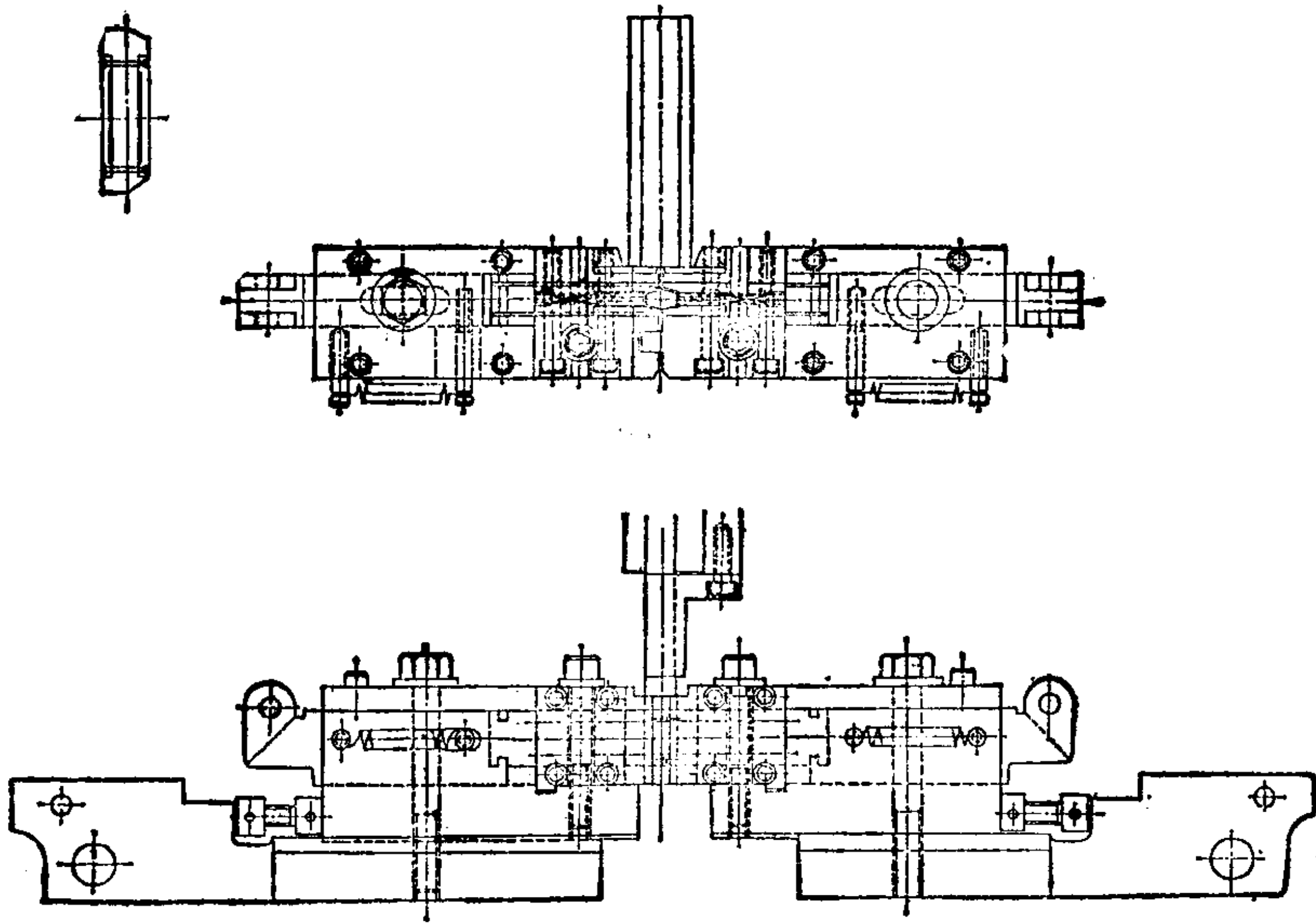


图3.208 [例2]成形部分

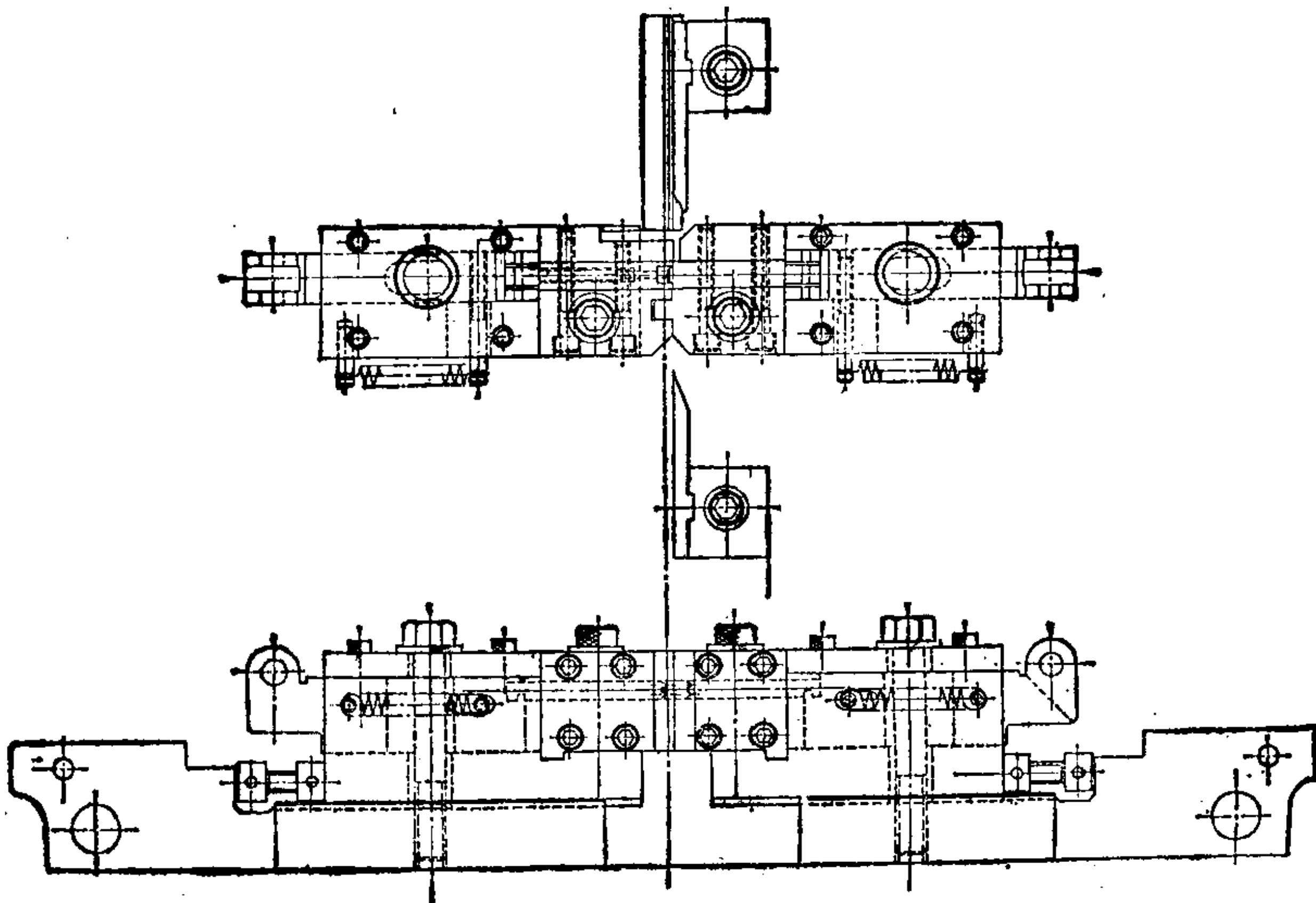


图3.211 [例3]成形部分

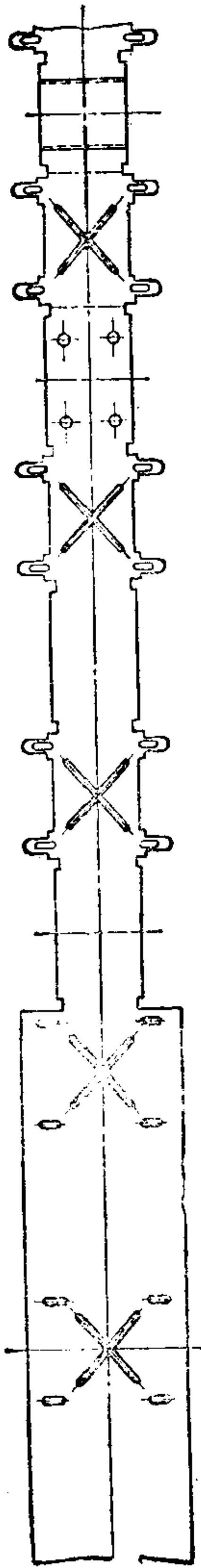
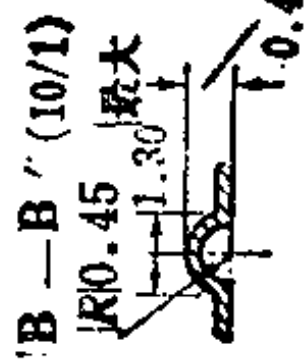
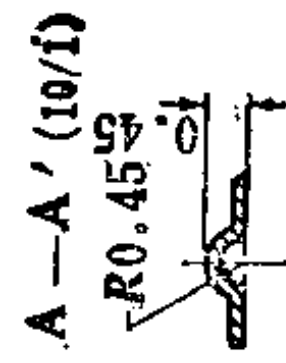
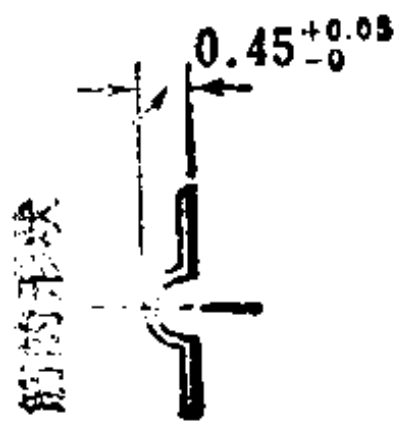


图3.210 [例3]条料的排样



1.75 ± 0.02 (内圆)

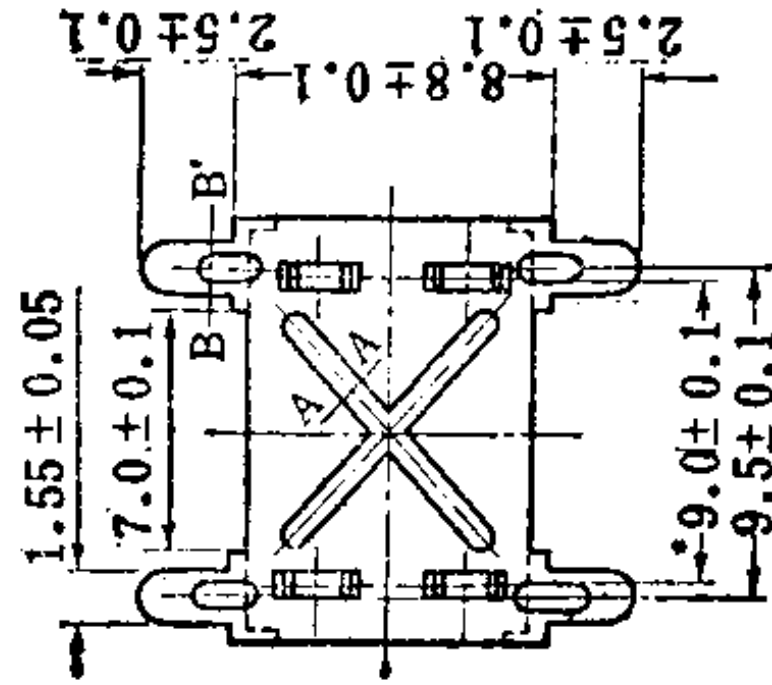
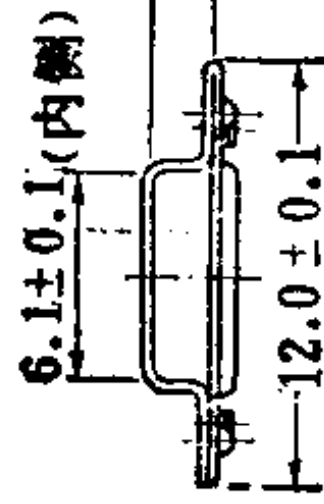


图3.209 [例3]制件图

1.55 ± 0.05
7.0 ± 0.1
8.8 ± 0.1
2.5 ± 0.1
2.5 ± 0.1
9.0 ± 0.1
9.5 ± 0.1

引用文献

- 1) 益田, 薄板の曲げ加工 (1958), 誠文堂新光社……昭和 31 年までの板の曲げ加工に関する文献はだいたい網羅されている。
- 2) 益田, 曲げ加工理論の近況, 日本機械学会誌, 58-434 (1955), 196.
- 3) 益田, 薄板の曲げ加工 (1958) 63, 誠文堂新光社.
- 4) 戸沢, 日本機械学会誌, 68-559 (1966), 59.
- 5) F.B. Chapman, T.H. Hazlett & W.M. Schroeder, *Prod. Engg.*, 13 (1942), 382.
- 6) G. Sachs, *Principles and Methods of Sheet-Metal Fabricating* (1951), 91.
- 7) G.S. Sangdahl, E.L. Aul & G. Sachs, *Proc. Soc. Exp. Stress Analysis*, 6 (1948), 1.
- 8) 齊藤, 金属板の曲げ加工について, 日本機械学会論文集, 16-55 (1950), 133.
 " (第2報), " , 19-79 (1953), 53.
 " (第3報), " , 20-90 (1954), 49.
 " (第4報), " , 21-102 (1955), 103.
- 9) 齊藤, 杉本, 直交異方性板の塑性曲げ, 日本機械学会論文集, 32-233 (1966), 8.
 " (第2報), " , 33-250 (1967), 895.
 " (第3報), " , 35-272 (1969), 735.
- 10) 川島, 杉本, 齊藤, 直交異方性板の塑性曲げ (平面応力), 塑性と加工, 15-162 (1974), 535.
- 11) 守時, 金属板の塑性曲げに関する解析的研究 (第1報), 日本機械学会論文集, 38-314 (1972), 2514.
 " (第2報), " , 40-330 (1974), 324.
 " (第3報), " , 40-330 (1974), 336.
 " (第4報), " , 40-330 (1974), 354.
- 12) 益田, 戸沢, 薄板の塑性曲げについて (第1報), 日本機械学会論文集, 16-53 (1950), 129.
 戸沢 " (第2報), " , 18-70 (1952), 43.
- 13) 益田, 中村, 薄板の曲げ加工の研究 (第1報), 日本機械学会論文集, 18-71 (1952), 26.
 益田, 室田, " (第2報), " , 20-90 (1954), 114.
 益田, 室田, 森田, " (第3報), " , 21-106 (1955), 431.
 益田, 森田, " (第4報), " , 22-118 (1956), 412.
- 14) 益田, 室田, 薄板の V 型曲げにおける変形過程とはね返り, 日本機械学会誌, 61-474 (1958), 799.
- 15) 松山, 鈴木, 薄板の曲げ加工に関する研究 (第1報), 日本機械学会論文集, 27-175 (1961), 300.
 鈴木, 高野, " (第2報), " , 27-184 (1961), 1931.
 鈴木, 高野, " (第3報), " , 28-193 (1962), 1139.
 鈴木, 高野, 根岸, 横内, " (第4報), " , 32-237 (1966), 816.
 鈴木, 根岸, 上村, " (第5報), " , 32-244 (1966), 1869.
- 16) 嵯峨, 佐藤, 薄板の折り曲げ加工の研究 (第1報), 塑性と加工, 8-80 (1967), 493.
 " (第2報), " , 8-80 (1967), 502.
 " (第3報), " , 8-82 (1967), 597.
 " (第4報), " , 9-86 (1968), 151.
- 17) 佐藤, 嵯峨, ばね用高炭素鋼の折り曲げ加工, 塑性と加工, 13-136 (1971), 362.
- 18) 福田, 山口, ゴムダイスを用いた金属板の V 曲げにおけるスプリングバック, 塑性と加工, 8-82 (1967), 624.
- 19) 福田, 山口, ゴムダイスを用いた金属板の V 曲げに関する解析, 塑性と加工, 9-89 (1968), 374.
- 20) 山内, 林, 薄板の U 形曲げについて, 日本機械学会誌, 62-489 (1959), 1423.
- 21) 林, 間宮, 薄板の球状曲げ, 塑性と加工, 4-24 (1963), 897.
- 22) 加藤, U-O プレス大径溶接鋼管, 塑性と加工, 1-3 (1960), 231.
- 23) 福田, 薄板のプレス U 曲げ加工精度に関する一検討, 塑性と加工, 8-82 (1967), 646.
- 24) 馬場, 戸沢, 川田, 薄板の円環成形に関する基礎的研究 (第1報), 塑性と加工, 13-132 (1972), 33.
 戸沢, 川田, " (第2報), 塑性と加工, 13-134 (1972), 171.
 " (第3報), 塑性と加工, 13-136 (1972), 323.
- 25) 安田, 鋼板のプレス曲げにおける曲げ型選定について, 日本機械学会誌, 52-371 (1949), 402.
- 26) 工藤, 曲げ型の設計, 塑性と加工, 1-4 (1960), 317.

- 27) 益田, 戸沢, 成形加工程度としての曲げ破壊 (第1報), 日本機械学会論文集, 27-178 (1961), 771.
 ● (第2報), " , 27-178 (1961), 776.
 ● (第3報), " , 27-178 (1961), 783.
 ● (第4報), " , 27-178 (1961), 794.
- 28) 戸沢, 板の最小曲げ半径について, 塑性と加工, 3-16 (1967), 299.
 29) 太田, りん青銅の曲げ性について, 塑性と加工, 8-20 (1967), 617.
 30) 三井, 軽合金棒の組合せ引張曲げ加工の理論, 日本機械学会論文集, 15-50 (1949), 6.
 31) 益田, 戸沢, 圧縮曲げ加工法に関する研究, 精密機械, 27-9 (1961), 473.
 32) 馬場, 戸沢, 引張成形法におけるスプリングバックにおよぼす引張力付加過程の影響, 日本機械学会誌, 67-542 (1964), 413.
 33) 戸沢, 薄板のスプリングバックに関する理論解析, 日本機械学会誌, 68-559 (1965), 1090.
 34) 戸沢, 川田, 薄板の2方向曲げにおけるスプリングバック, 塑性と加工, 8-78 (1967), 367.
 35) 橋田, 薄板材のスプリングバックテスト, 塑性と加工, 5-37 (1964), 153.
 36) 加賀, 引張曲げ加工による複曲面の精度について, 日本機械学会誌, 69-568 (1966), 617.
 37) 鈴木, 根岸, 複合板のスプリングバック, 塑性と加工, 8-78 (1967), 340.
 38) 水野, 久納, コイルばね製造のさいのスプリングバック, 塑性と加工, 6-50 (1965), 159.
 39) 上正原, ばね製造における塑性加工の問題, 塑性と加工, 6-50 (1965), 173.
 40) 井上, 葉山, 尾関, 熊谷, 爆発成形のスプリングバックについて, 日本機械学会論文集, 29-205 (1963), 1499.
 41) 窪田, 神馬, 近藤, 高速曲げ加工の研究, 機械学会誌, 73-614 (1970), 347.
 42) 栗野, 伊藤, 磯貝, 団野, 山本, 松居, 振動衝撃曲げ加工 (第1報), 塑性と加工, 12-121 (1971), 101.
 " (第2報), " , 12-123 (1971), 273.
- 43) Die Design Handbook, McGraw-Hill book Co. (1965).
 44) 益田, 戸沢, 機械の研究, 10-1 (1958), 151.
 45) 馬場, 戸沢, 川田, 千葉大学工学部研究報告, 13-23 (1962), 33, 39.
 46) 戸沢, 千葉大学工学部研究報告, 14-26 (1963), 1.
 47) 山内, 林, 日本機械学会総会講演会前刷 (1956), 49.
 48) 金尾, 日産技術, 20 (1954), 7.
 49) G. Oehler, Abkantpressen, Abkantmaschinen und Profil-walzmaschinen, Mitteilungen der Forschungsgesellschaft Blechverarbeitung, 1962, Nr 12/13 (1962), 165~192.
 50) 益田監修, 薄板の曲げ加工 (1958), 15.
 51) 長屋, 日立製作所戸塚工場資料.
 52) W.W. Wood, Iron Age (1961), 93.
 53) G.R. Gohn & S.M. Arnold, Proc. ASTM, 46-19 (1946), 1053.
 54) G. Sachs & G. Espey, Trans. ASM, 37 (1946), 468.
 55) 益田, 戸沢, 日本機械学会論文集, 27-178 (1961), 771.
 56) チェプカ, 鈴木, 中川, 第23回塑性加工連合講演会講演論文集 (1972), 93.
 57) J. Datsko & C.T. Yang, Trans. ASME, Series B, 84-4 (1960), 809.
 58) W.W. Wood, Amer. Machinist, 101-4 (1957), 121.
 59) Mäkeit, Werkstattstech. u. Masch.-Bau, 39-1 (1949), 17.
 60) 益田, 戸沢, 日本機械学会論文集, 27-178 (1961), 771, 776, 783, 794.
 61) G. Oehler, Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 1633 (1966).
 62) 戸沢, ステンレス, 7-3 (1963), 22.
 63) 戸沢, 千葉大学工学部研究報告, 14-26 (1963), 1.
 64) 益田, 室田, 機械の研究, 8-4 (1966), 430.
 65) Romanowski, Handbuch der Stanzertechnik, VEB Verlag Tech. Berlin (1965).
 66) 益田, 薄板の曲げ加工, 誠文堂新光社 (1958).
 67) 福田, 山口, 塑性と加工, 8-82 (1967), 624.
 68) 山内, 林, 47).
- 69) 小沢, 機械の研究, 11-8 (1959), 1078.
 70) 日立製作所戸塚工場設計資料.
 71) 木下, 青木, 第20回塑性加工連合講演会講演論文集 (1969), 365.
 72) 小林, 第9回塑性加工シンポジウム前刷 (1964), 68.
 73) 戸沢, 石川, 第19回塑性加工連合講演会講演論文集 (1968), 485.
 74) 戸沢, 第2回 塑性加工学会講演会テキスト (1973), 7.

- 75) 戸沢, 精機学会秋季大会シンポジウム前刷 (1967), 253.
 76) 益田, 戸沢, 精密機械, 27-7 (1961), 473.
 77) Y. Tozawa, K. Kawada, Proc. 12th M.T.D.R. Conf. (1972), 355.
 78) 戸沢, 川田, 第18回塑性加工連合講演会講演論文集 (1967), 249; 塑性加工春季講演会講演論文集 (1975) 283; 塑性加工, 13, 132, 134, 136 (1972), 33, 171, 323.
 79) Amer. Machinist, 101-13 (1957), 88.
 80) 青木, 日立製作所戸塚工場設計資料.
 81) 曾田, 小西, 3本ロール曲げによる板の変形, 塑性加工, 3-18 (1967), 474.
 " (続報), " , 4-31 (1968), 515.
 82) Sheet Metal Industries, 33-356 (1956), 813 および, 33-356 (1956), 887.
 83) E. Draeger, Blech, 14-4 (1967), 100.
 84) 橋本, プレス曲げ加工 (1963), 135, 日刊工業新聞社.
 85) J. W. Langton, Sheet Metal Ind., 37-397 (1960), 362.
 86) G. Oehler, Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 1614 (1966), Westdeutscher Verlag.
 87) G. Oehler, Werkstatt u. Betr., 95-10 (1962), 679.
 88) M.B. Bassett, and W. Johnson, J. Strain Analysis, 1-5 (1965), 398.
 89) 山川ほか4名, 23回塑性加工連合講演 (1972), 571 および 24回塑性加工連合講演 (1973), 93.
 90) 富士車輛(株)製品カタログ(鍛圧機械).
 91) 横田, プレス技術, 6-9 (1967), 75.
 92) Werkstatt u. Betr., 96-5 (1963), 296.
 93) T. Goebell and W. Schluter, Sheet Metal Ind., 40-438 (1963), 335.
 94) E.N. Moshnin and M.M. Yuzhakov, Russian Engng. J., 45-11 (1965), 30.
 95) 加賀, プレス技術, 10-7 (1971), 97.
 96) 小島, コールド・ロールフォーミング, 日本機械学会誌, 58-434 (1965), 270.
 97) 加藤, 冷間成形圧延法 (I), 金属学会誌, 22-12 (1959), 270.
 " (II), " , 23-1 (1960), 14.
 98) 加藤, 冷間ロール成形, 日刊工業新聞社.
 99) 山川, 単段V形ロール成形における板材の変形について, 塑性加工, 4-35 (1963), 783.
 100) 山川, ロール成形, 塑性加工, 13-137 (1972), 440.
 101) 益田, 室田, 神馬, 玉野, 雨宮, ロールフォーミングに関する基礎的研究, 日本機械学会誌, 67-542 (1964), 406.
 102) 益田, 室田, 神馬, 玉野, 福田, ロールフォーミングの変形過程, 塑性加工, 5-43 (1964), 519.
 " " (第2報), 塑性加工, 6-54 (1965), 379.
 103) 生田目, 薄肉電鍍鋼管の成形法, 塑性加工, 8-82 (1967), 591.
 104) 木内, ロール成形, 塑性加工, 10-100 (1969), 375.
 105) 鈴木, 木内, 中島, 赤堀, ロールフォーミングに関する実験的研究 (第1報), 塑性加工, 10-97 (1969), 102.
 106) 鈴木, 木内, 中島, 赤堀, 雪竹, 柴田, " (第2報), " , 10-98 (1969), 157.
 107) 鈴木, 木内, 中島, 赤堀, " (第3報), " , 10-102 (1969), 494.
 " " (第4報), " , 10-102 (1969), 502.
 108) 鈴木, 木内, 中島, 市田山, " (第5報), " , 11-110 (1970), 202.
 " " (第6報), " , 11-112 (1970), 315.
 " " (第7報), " , 11-119 (1970), 913.
 " " (第8報), " , 12-130 (昭46), 830.
 109) 鈴木, 木内, 中島, 高田, " (第9報), " , 13-133 (1972), 83.
 " " (第10報), " , 13-138 (1972), 508.
 110) 鈴木, 木内, 中島, 市田山, " (第11報), " , 13-143 (1972), 102.
 111) 木内, ロールフォーミングに関する解析的研究 (第1報), 塑性加工, 10-104 (1969), 635.
 " " (第2報), " , 10-104 (1969), 646.
 " " (第3報), " , 11-112 (1970), 343.
 " " (第4報), " , 12-120 (1971), 20.
 112) 鈴木, 木内, 木村, 広幅断面のロール成形に関する実験的研究 (第1報), 塑性加工, 12-123 (1971), 301.
 " " (第2報), " , 15-162 (1974), 547.
 113) 鈴木, 木内, 新谷, " (第3報), " , 15-162 (1974), 547.
 114) 小門, 小野田, 薄鋼板にみぞ付け加工を行なう場合の長手方向そりとひずみの推移, 塑性加工, 13-132 (1972), 21.

- 115) 小門, 小野田, 広幅鋼板に円弧形断面みぞを単一スタンドにより成形する場合の成形荷重, 塑性と加工, 13-142 (1972), 851.
- 116) 小門, 小野田, 広幅鋼板に円弧形断面みぞを単一スタンドにより成形する場合の成形トルク, 塑性と加工, 14-151 (1973), 612.
- 117) 小門, ロール成形, 塑性と加工, 14-150 (1973), 553.
- 118) 斎藤, 藤田, 加藤, V形ロール成形における成形材の長手方向そりにおよぼす板材材質の影響, 塑性と加工, 13-143 (1972), 907.
- 119) 加藤, 日本鋼管技報, 21 (1961), 44.
- 120) 益田, 室田ほか, 塑性と加工, 6-54 (1965), 379.
- 121) A. Geleji, 五弓訳, 金属塑性加工の計算 (1955), 193.
- 122) 戸田, 玉野ほか, 鉄と鋼, 51-11 (1965), 2135.
- 123) 戸田, 玉野ほか, 鉄と鋼, 51-11 (1965), 2136.
- 124) 生田, 塑性と加工, 8-82 (1967), 591.
- 125) 馬場, 住友金属, 15-2 (1963), 19.
- 126) G. Sachs, Principles and Methods of Sheet-Metal Fabricating (1951), 524.
- 127) E.J. Vanderploeg, Tool Engineer, Oct. (1953), 59.
- 128) R.T. Angel, Iron Age, Nov. 3 (1949), 83.
- 129) Iron and Steel Engineer, Nov. (1959), 141.
- 130) Cookson, Sheet Metal Industries, Oct. (1966), 756.
- 131) G. Oehler, Mitt. Forschungsgesellschaft Blechverarbeitung, 12-13 (1952), 191.
- 132) 山下, 鋼管の自動冷間屈曲機, 日本機械学会誌, 54-384 (1961), 27.
- 133) 山崎, ポイラ用管の冷間曲げ加工, 塑性と加工, 10-103 (1970), 617.
- 134) 田所, パイプの塑性加工, 塑性と加工, 11-117 (1970), 764.
- 135) 田所, 管継手の製造, 塑性と加工, 12-120 (1971), 52.
- 136) 落合, 藤原, 福山, 薄肉チャンネル材の曲げ加工の検討, 塑性と加工, 10-103 (1970), 591.
- 137) 生田目, 八幡鋼管 3 (1965), 49.
- 138) W.D. Franz, Das Kalt-Biegen von Rohren (1961), 98, Springer-Verlag.
- 139) 中川, 五十嵐, 武蔵, 第23回塑性加工連合講演会講演論文集 (1972), 85.
- 140) 栗野ほか, 塑性と加工, 12-121 (1971), 101.
- 141) 栗野ほか, 塑性と加工, 12-121 (1971), 273.
- 142) 室田ほか, 日本機械学会講演論文集 No. 173 (1967), 79.
- 143) 遠藤, 室田, 神馬, 未発表.
- 144) 八木, 菊池, 塑性と加工, 7-60 (1966), 41.
- 145) 室田ほか, 第20回塑性加工連合講演会講演論文集 (1969), 369.
- 146) 遠藤, 室田, 神馬, 昭和50年度塑性加工春季講演会講演論文集 (1975), 289.
- 147) R.J. Kervich, Cold Bending & Forming Tube & Other Sections, ASTM (1966), 77.
- 148) 相津, プレス技術, 4-8 (1966), 75.
- 149) F.J. Fucks Jr., The Bell System Technical Journal (1959), 1457.
- 150) 遠藤, 室田, 神馬, 第22回塑性加工連合講演会講演論文集 (1971), 227.
- 151) 遠藤, 室田, 神馬, 第24回塑性加工連合講演会講演論文集 (1973), 209.
- 152) R.J. Kervich, C. Bend. & Form. T. & Other S. ASTM 87.
- 153) R.J. Kervich, C. Bend & Form. T & Other S. ASTM, 166.
- 154) 日協製作所カタログ.
- 155) Heenan, Multiform Manual (1958).
- 156) 杉村, 塑性と加工, 15-165 (1974), 870.
- 157) プレス技術, 1971年10月号, 特集マルチスライドプレスの機構と活用例.
- 158) 東京芝浦電気株式会社資料.

4. 成形加工

4.1 冲压成形概述

将金属和其他刚性材料制成的工具安装在压力机上对薄板的变形加以控制并使其成形的工艺方法，一般称为冲压成形。这类工具则称为冲模。把橡胶、富有弹性的合成树脂以及液体等用于冲模的主要部分时，由于这些模具材料的柔软性，对控制薄板变形的效果与使用刚性模具时有所不同，所以在分类中通常属于另一类。这类特殊成形法归纳在 4.10 中。

4.1.1 冲模

冲模的基本结构，如图 4.1 所示。凸模、凹模、压边圈是控制薄板变形的冲模的基本零件，这些是和顶出机构以及送料和接件等辅助装置组合在一起的。

制件的底部、侧壁和凸缘的形状，分别由凸模底部、凸凹模的间隙、凹模和压边圈面的形状决定。图 4.1 所示的圆角半径 r_p 和 r_d 的部分，分别称为凸模端部和凹模肩部。落料后作成形用的板料称为板坯（坯件），压住坯料的凹模和压边圈的工作面称为凹模面和压边圈面。通常以凸模或凹模的运动方向为纵向，把模具和成形形状的纵向的截面形状称为纵断面形状。与运动方向相垂直的断面称为横断面。

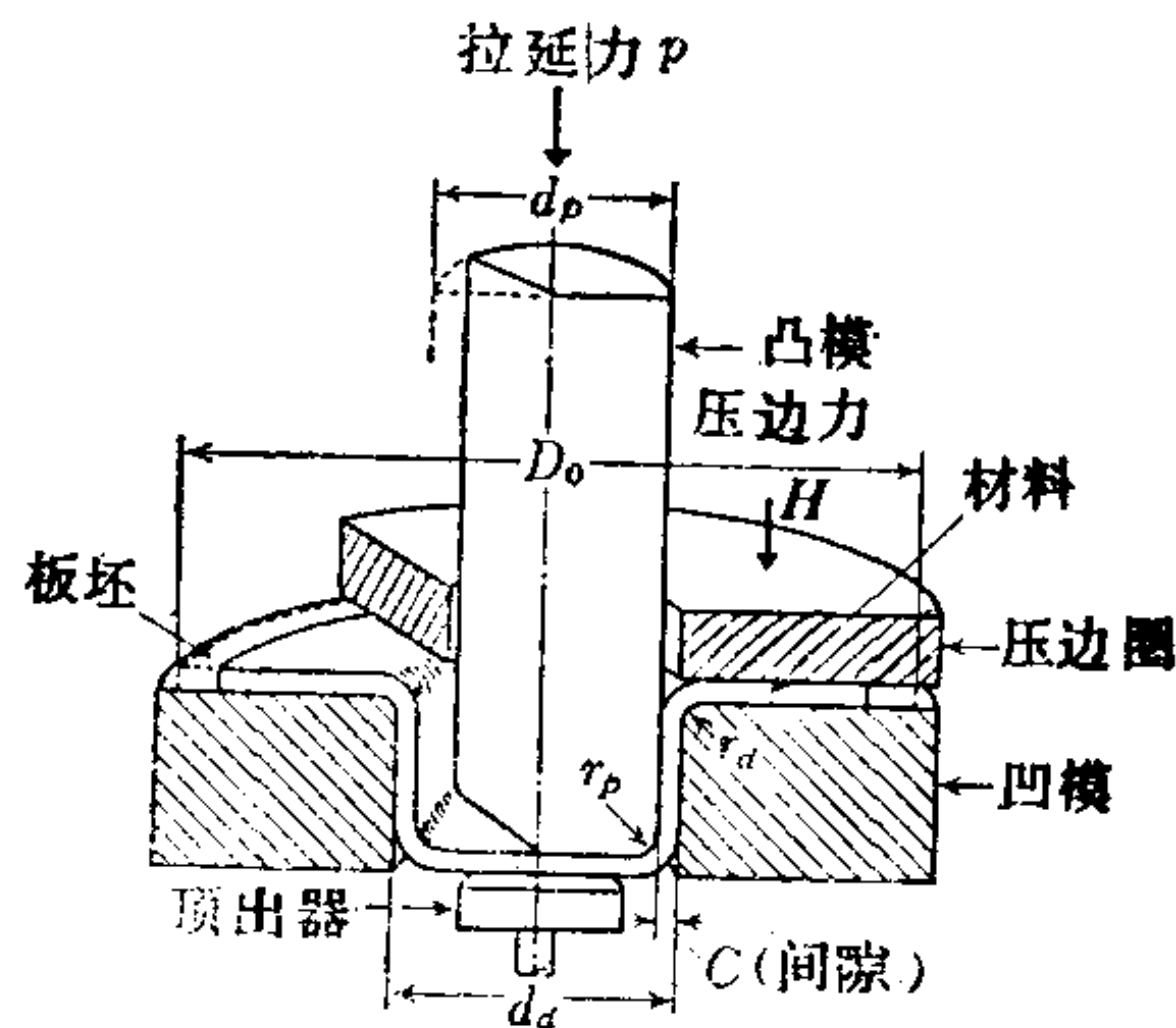


图 4.1 拉延模的基本结构和主要尺寸
 $r_p < 1/2 d_p$ 时为平底凸模；
 $r_p = 1/2 d_p$ 时为球底凸模

制件的基本形状是：纵断面为平底或球底，横断面为圆形，

有时特将这种标准形状称为回转对称形状，把其他的所有形状称为非回转对称形状以示区分。再有，如把前者称为圆筒形，则后者叫做异形。

凸模底部与材料相接触，是传递压力机的作用力的重要组成部分。在凸模底部，由于材料承受拉伸—弯曲的作用，所以当弯曲半径(如 r_p)与板料厚度 t_0 之比 (r_p/t_0) 小于 3 时，由该处局部的弯曲变形而引起的破裂力就显著地减少。该处和材料之间的摩擦，限制着材料的变形和流动并对成形的结果有影响。

在凹模面上，多数情况下材料大幅度流动。而且，由于作用在材料上的外力是由凹模转角处来承受的，所以该处承受着激烈的摩擦并且法向力也很大。因此，就希望该处仔细精加工并且沿材料的流动方向作最后精加工。当凹模肩部圆角半径 r_a 为材料厚度 t_0 的 3 倍以下时，在该处材料的局部拉伸及弯曲变形就很严重，并且变形力也明显增大。

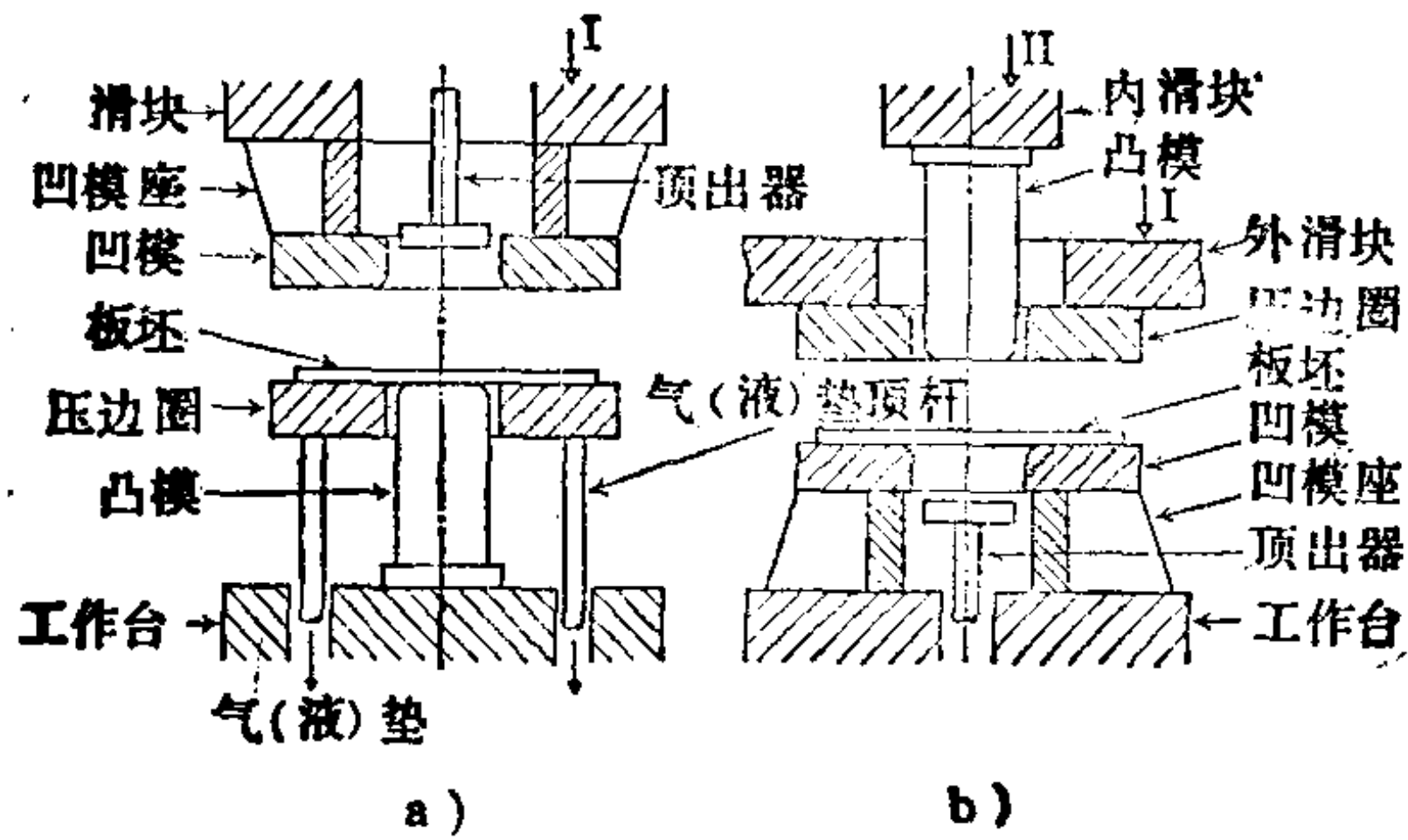


图4.3 拉延模的类型
a) 带气(液)垫的单动压力机上的拉延模 b) 双动压力机上的拉延模

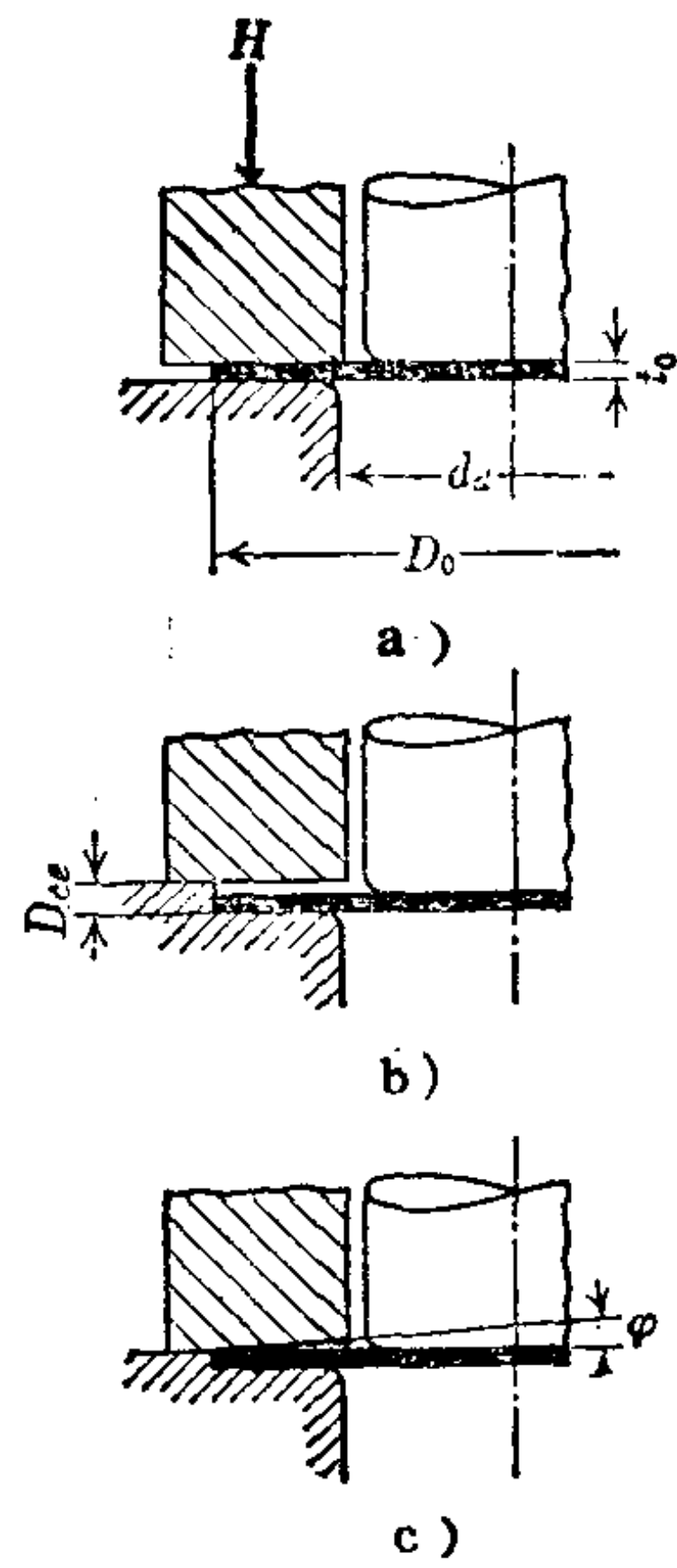


图4.2 压边方式
a) 定压式 b) 固定间隙式(平面) c) 固定间隙式(锥面)

成形时，凹模面上的材料在板料平面上形成波纹并发生皱折。为了限制皱折，故采用压边圈对材料给以约束力。图 4.2 所示的压边方式有定压式和固定间隙式两种，从压边圈的目的来看，压

边圈面的形状要和凹模面的形状相一致。由于压边圈和凹模的弹性变形也会产生问题，所以，必须注意压边圈和凹模的刚性以及从压力机上传递作用力的部位。

当希望对凹模面上的材料流动作有效控制时，可以在凹模面上设置拉延筋。

薄板成形用的压力机，有单动、双动和三动压力机三种形式（参照第6章）。单动压力机具备气（液）垫时，就可以装上图4.3所示的模具作拉延和成形。这样一来，气（液）垫就可能使单动式作为双动式，进而将双动式作为三动式压力机使用。双动压力机是在内滑块上装有凸模，在外滑块上装有压边圈进行工作的。三动压力机具有和双动压力机相同的形式，而且使凸模在三个动作程序中还具有凹模的作用，用于在凸模行程的终结阶段以中间的凸模作二次成形的场合。

如上所述的冲模，因为制件的形状首先取决模具各部分的形状尺寸，所以必须充分考虑模具给予材料的变形和约束，并对所用压力机的类型、工艺条件、管理条件等予以综合的研究，还要有使作业成功的设计和制造。

4.1.2 基本成形的类型和冲压成形的分类〔1〕

为研究有关冲压成形的技术问题，必须合理划分冲压成形的类别，吉田关于划分冲压成形的概念是最为常用的。吉田的概念首先是将基本的变形分为图4.4所示的压缩类变形、伸长类变形和弯曲三种形式。接着是把材料的破裂作为最直观的成形极限，

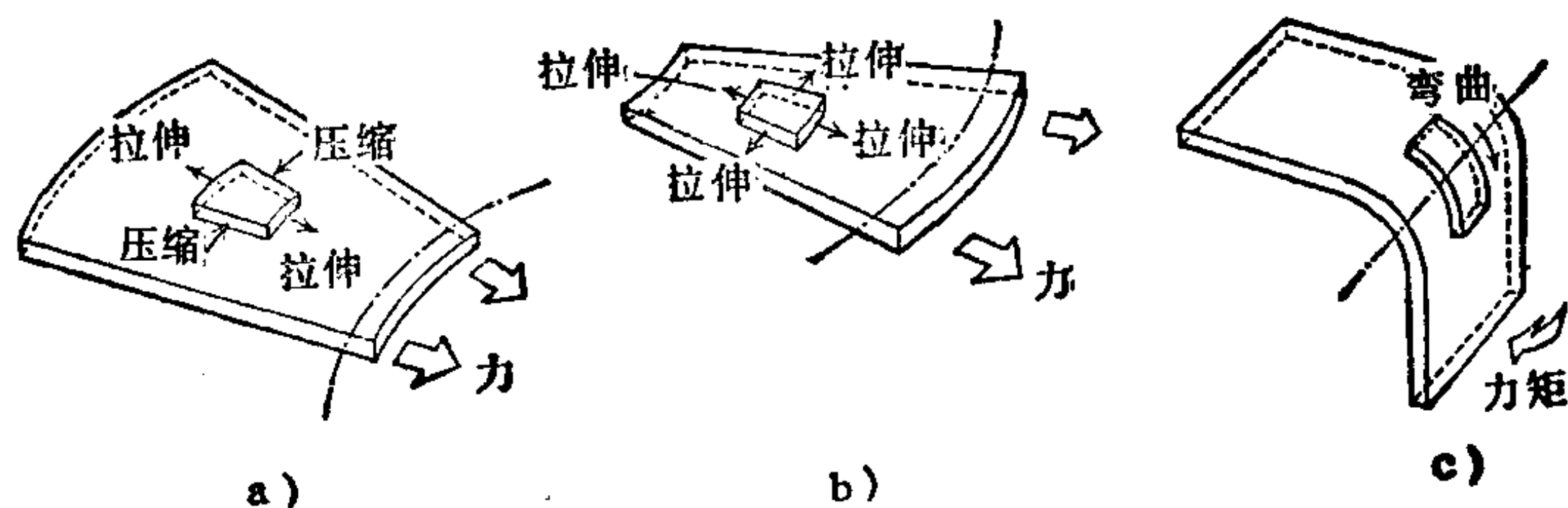


图4.4 基本的变形形式

a) 压缩类变形 b) 伸长类变形 c) 弯曲

进而分为由于弯曲作用而产生的弯曲破裂，由于材料强度不足而产生的破裂（ α 破裂）以及由于材料的延性不足而产生的破裂（ β 破裂）。然后，再按照主变形及该处发生破裂的情况的组合，划分为表 4.1 所示那样的冲压成形类别加以研究[⊖]。

冲压成形可用胀形、拉延、伸长类翻边和弯曲四种基本成形方式来认识。

胀形如图 4.6 所示，是使与凸模底部相接触的材料产生两向延伸变形以成形制件的情况，材料的表面积加大，也就是说，板厚被强制变薄。当成形进展到某种程度，材料在什么地方到达破裂极限就在那里出现破裂。胀形量的大小多以成形深度来表示。也有用材料在成形前具有代表性的某一直线段长度因成形而延伸的值（线性增加率）来作为成形度的，也有用由于成形而出现的板坯表面积增加率（与板厚减少率一致）来表示成形度的情况。

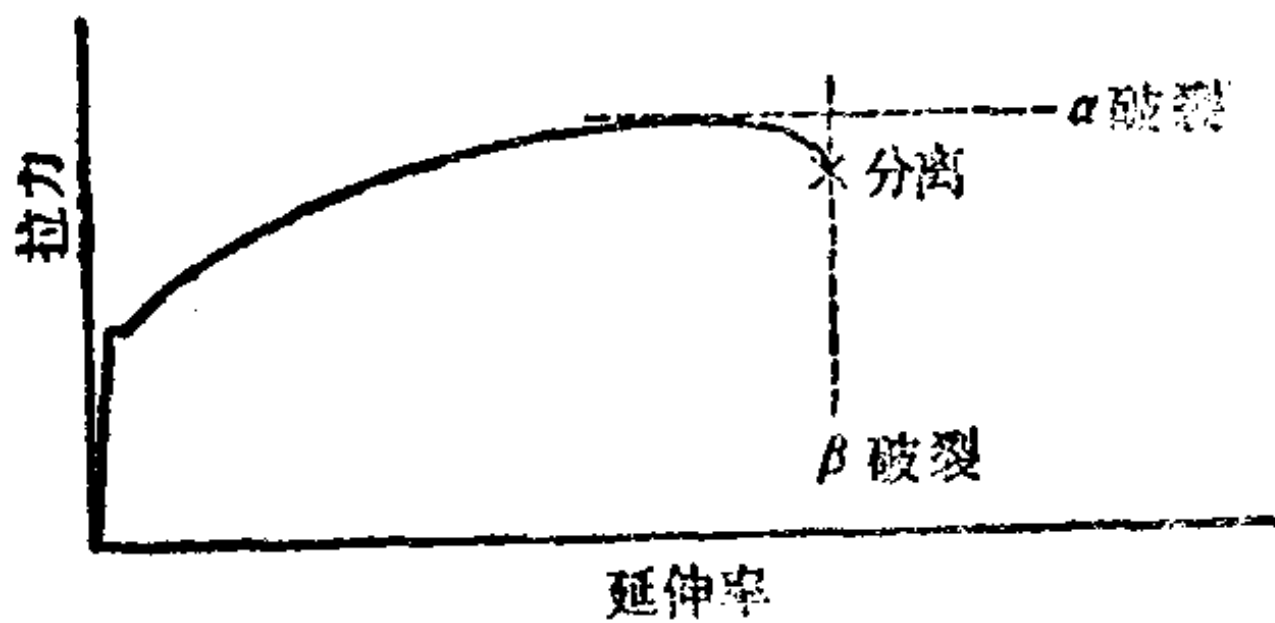


图4.5 破裂的鉴别方法

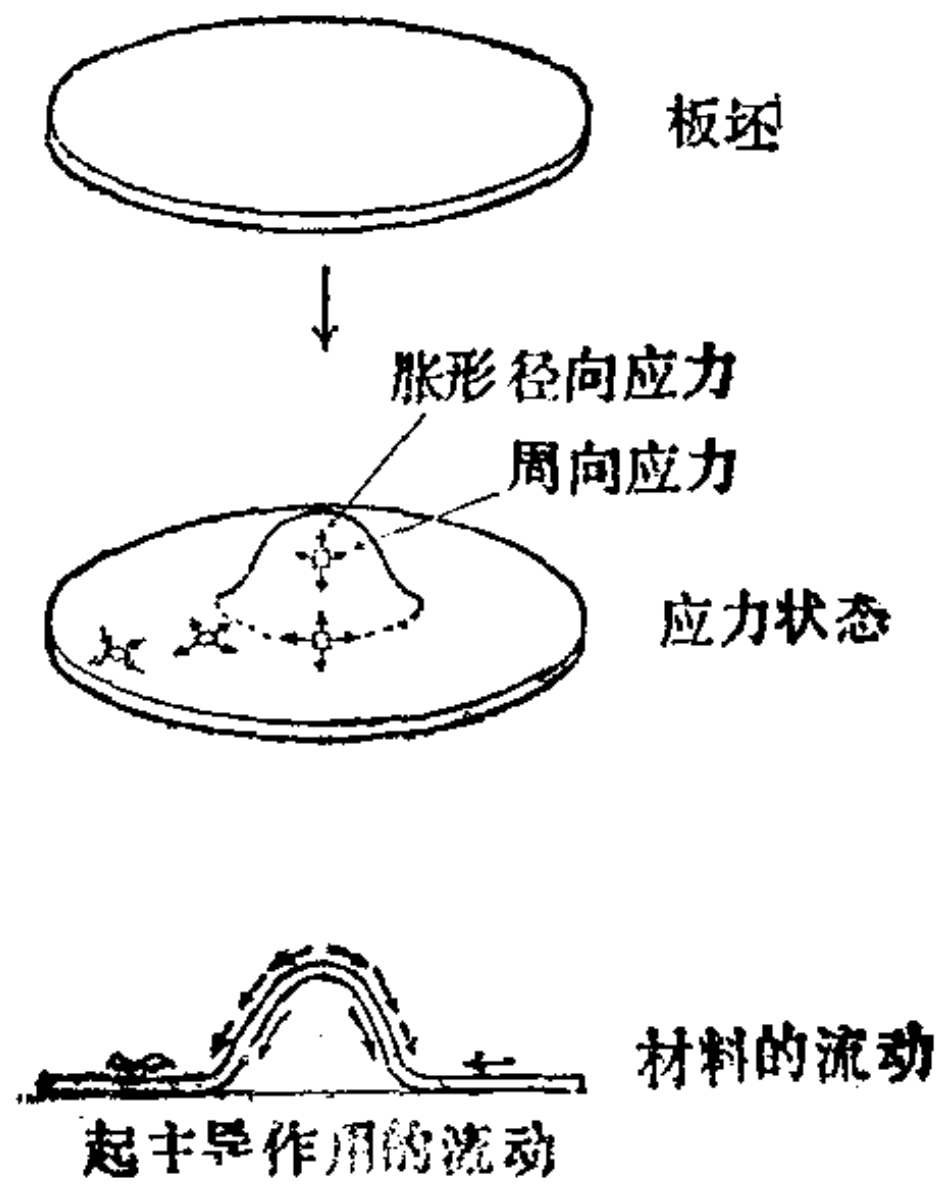


图4.6 胀形

拉延如图 4.7 所示，是指在凹模面上的材料产生压缩凸缘变形而流入凹模孔内的成形过程。当使材料流动所必须的力造成与

⊖ 这里所说的破裂分类，不是由破裂的局部形态区分，而是抓住破裂时的现象，或是将破裂力作为统计值，或是将破裂变形作为统计值按照断裂的工程上的定义来分类的。例如，在单向拉伸中，应力和应变的关系，通常就是图 4.5 所示的那种关系。在此图中，试观察出现破裂现象的拉力，如果在所谓最高载荷点的状态下，进一步增大材料的强度就可以避免断裂的话，此即相当 α 破裂；如果是从局部缩颈状态进至破裂的局部破裂状态，进一步增加材料的延性就可以避免破裂的话，此即可以认为是 β 破裂。

凸模相接触的材料和拉延所形成的侧壁破裂时，就是这种拉延的极限情况。凸模底部的材料，当然也会发生与胀形相同的变形，不过对拉延深度的关系不大。特别是不带凸缘的圆筒形拉延，这种情况是典型的。拉延的变形程度多以拉延系数(凸模直径/坯件直径)或拉延比(坯件直径/凸模直径)来表示。

表4.1 冲压成形的基本分类〔1〕

破裂方式 \ 主要变形	压缩类变形	伸长类变形	弯曲变形
α 破裂	拉 延	胀 形	
β 破裂		伸长类翻边	
弯曲破裂			弯 曲

伸长类翻边如图 4.8 所示，它是用凸模将板坯上预先冲好的孔扩大并同时成形的方法。当将孔扩大到凸模直径时，也可以把这样的成形叫做翻孔或内缘翻边。伸长类翻边的成形极限，用孔的边缘或者靠近孔边缘处的伸长变形部分的破裂来确定。伸长类翻边的变形程度用扩孔比(制件孔径/板坯孔径)来表示。

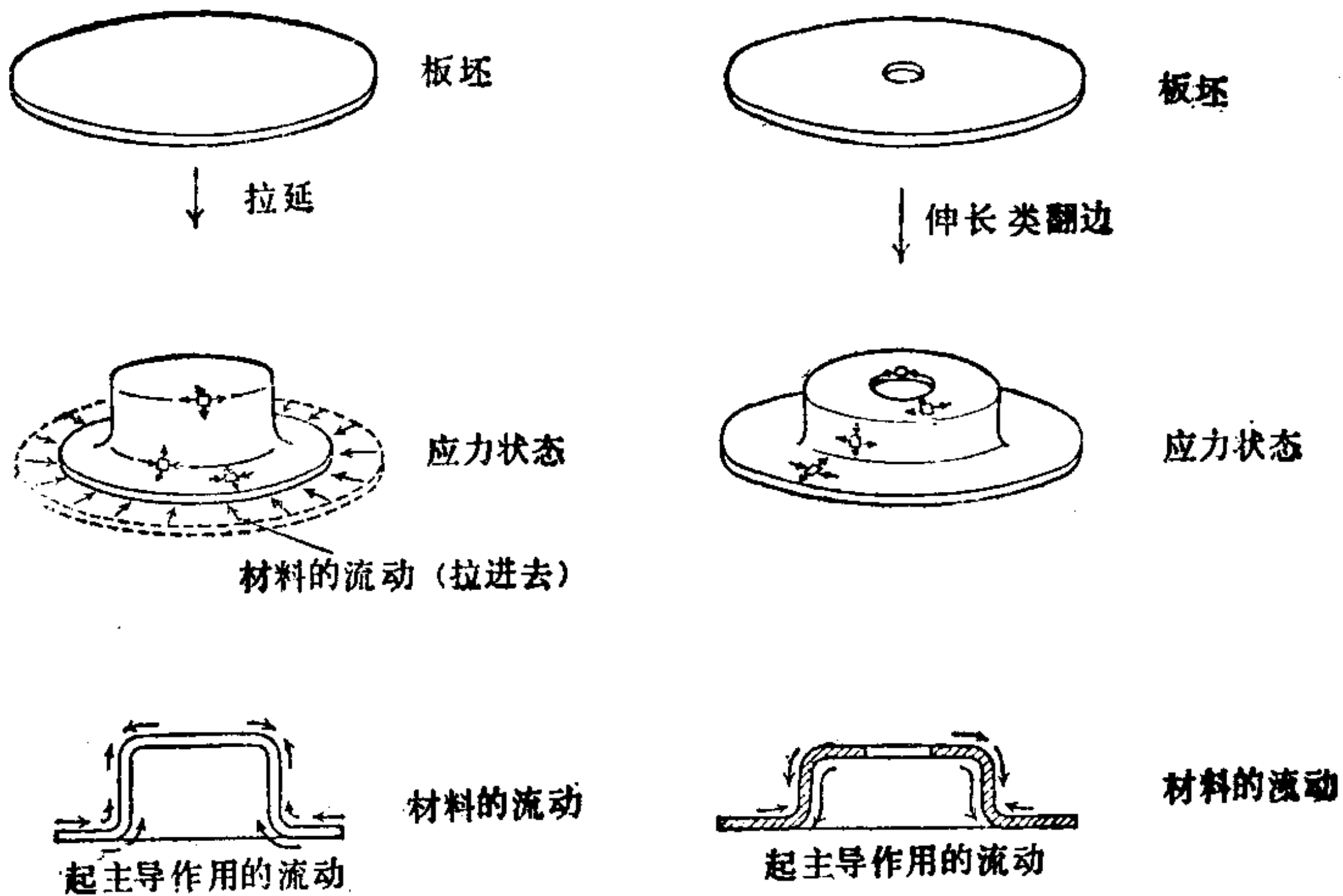


图4.7 拉延

图4.8 伸长类翻边

第3章所叙述过的弯曲为单独用于板料加工的情况，而在这里，也是基本的成形方式之一。一次近似的变形程度是弯曲半径与板厚之比（工具肩部圆角半径/板厚）。

图4.9即表示这四种基本成形方式的相互关系〔2〕。

轴对称形状的成形区域划分图中，纵坐标表示拉伸系数（凸模直径/坯件直径），拉伸系数越小，压缩凸缘的面积愈大。将此纵坐标叫做压缩类变形坐标。横坐标是表示翻孔系数或扩孔系数（原有孔径/凸模直径）的伸长类变形坐标。横坐标上的值越大，表示坯件的孔径越大。在非回转对称形状的情况下，就可以把变形最厉害而且在该处产生破裂的部分，作为局部回转对称形状来考虑，并按前述的方法确定拉伸系数和扩孔系数。

冲压成形区的划分，对解决成形件的成形所必须的变形方式，

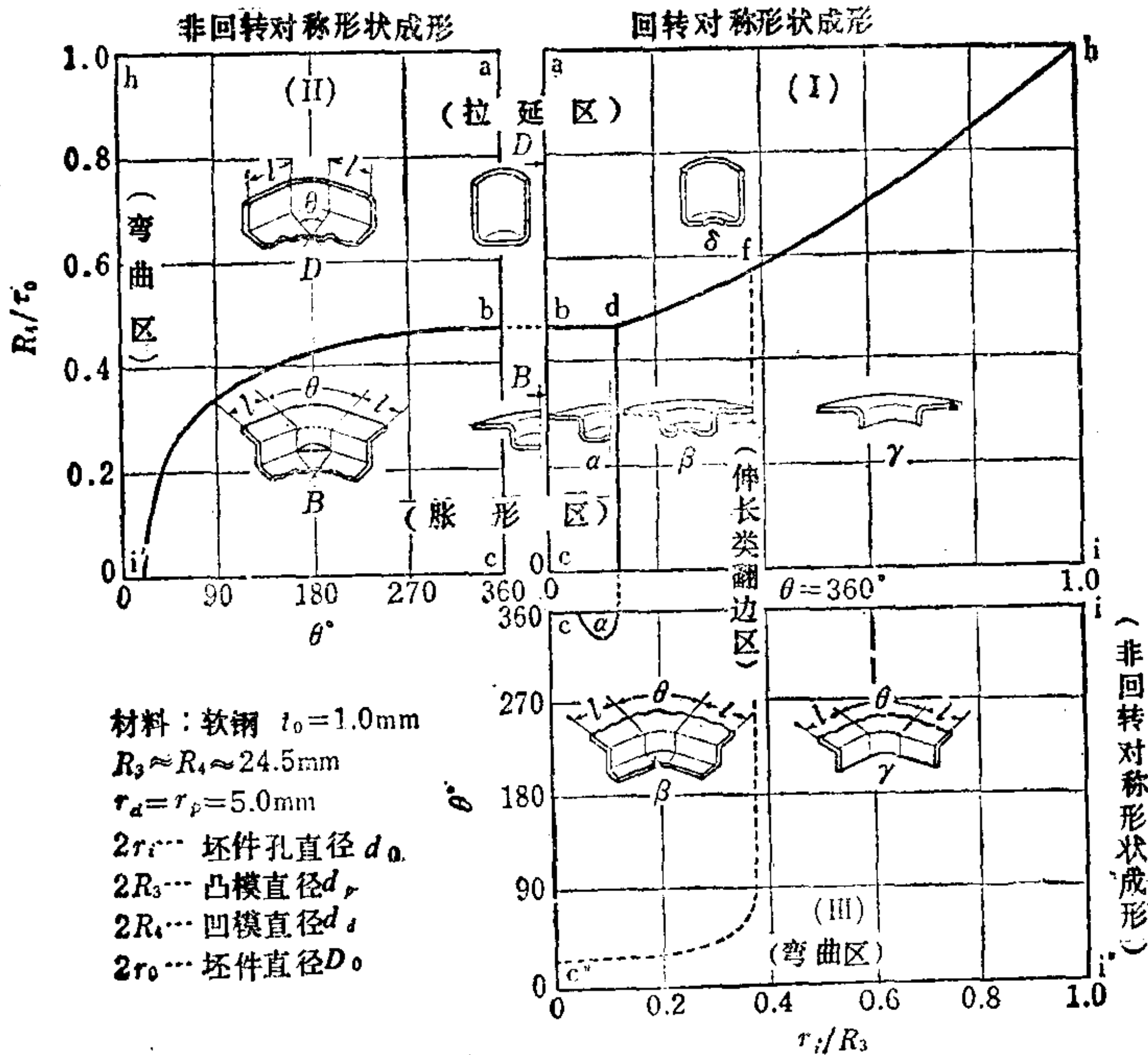


图4.9 冲压成形区域划分图〔2〕

变形程度以及破裂的形式等问题是很方便的。在冲压成形区域图上，由于随着成形区域划分也划分了材料的成形性（胀形性能，拉延性能、翻孔性能、弯曲性能及其复合成形性能），所以该图可用来选取适合成形条件的材料；确定在哪些方面去改变成形条件为好，即指出了改善加工技术的方向。这种方法还可用在有关实际冲压成形的资料整理、分类以及管理之中〔3〕。

4.1.3 基本成形特征

图 4.10 所示为用平底圆柱形凸模，作从拉延到胀形的全过程成形时坯件大小与极限成形深度的关系。虚线 \ominus 系表示纯胀形的成形极限。虚线和实线的差，是凹模面上的凸缘部分流入凹模后所增加的深度。在胀形区的实线，同时具有拉延和胀形的变形因素，称之为拉延——胀形复合的成形（或称复合成形）。在冲压成形

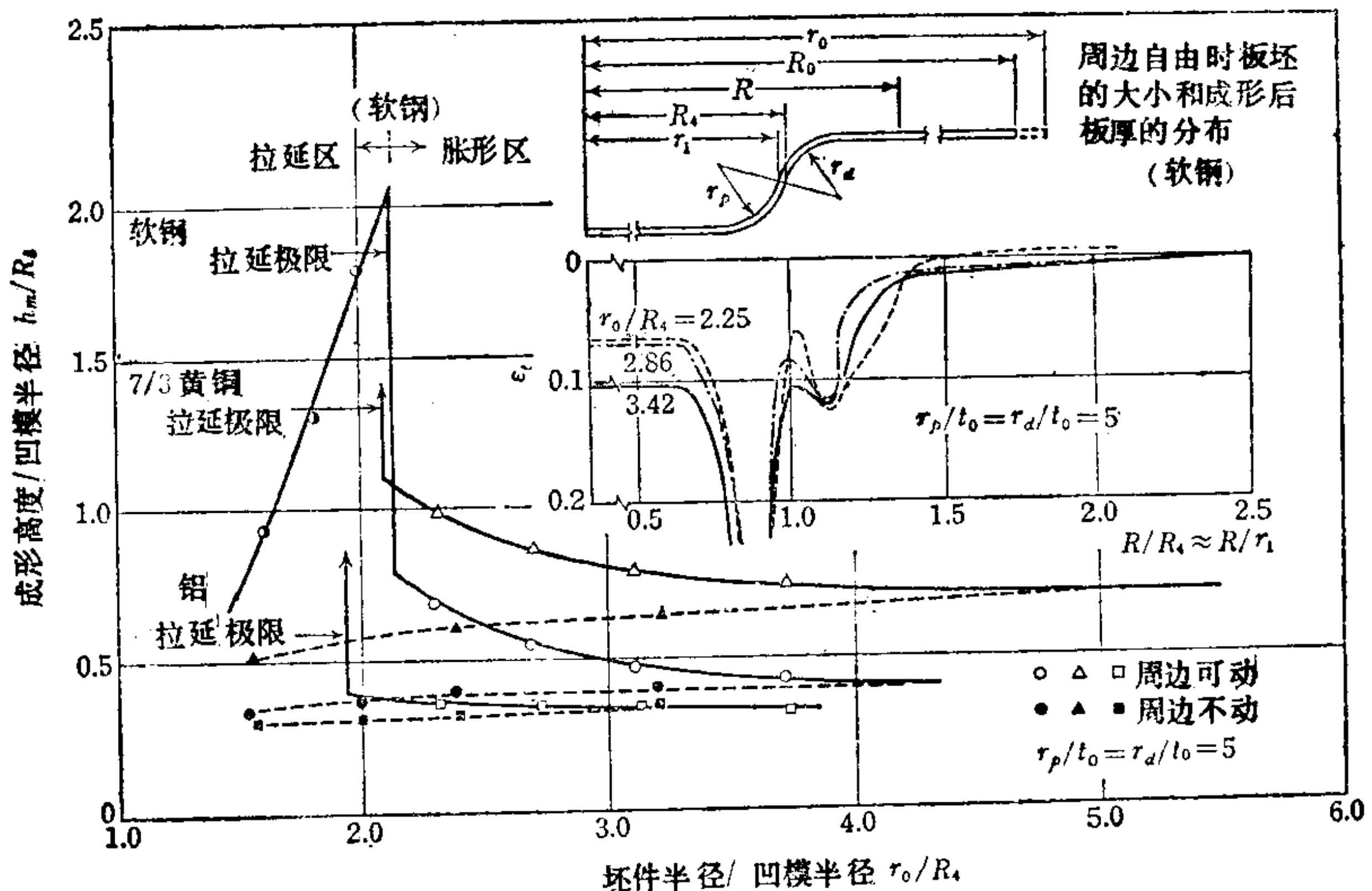


图4.10 坯件的大小和最大成形深度、周边变形与拉延和胀形的关系〔4〕

\ominus 用无限大的板坯，在 $r_0/R = 4$ 为直径的地方设置一道圆周形的拉延筋，由于拉延筋的作用拉延筋外面的材料即不会移动。

中，严格的说几乎都是复合成形。图 4.11 所示为伸长类翻边——拉延复合成形的例子，表示了在 α 破裂范围内的扩孔系数和极限深度的关系〔5〕。如果扩孔系数增加，则由于凸缘的伸长变形作用，凸模面上的凸缘部分向凸模侧壁的流动就大，极限深度也就随之增加。当扩孔系数进一步加大形成 β 破裂，则随着拉延程度的不同，扩孔系数和极限深度的关系即显著地发生变化。

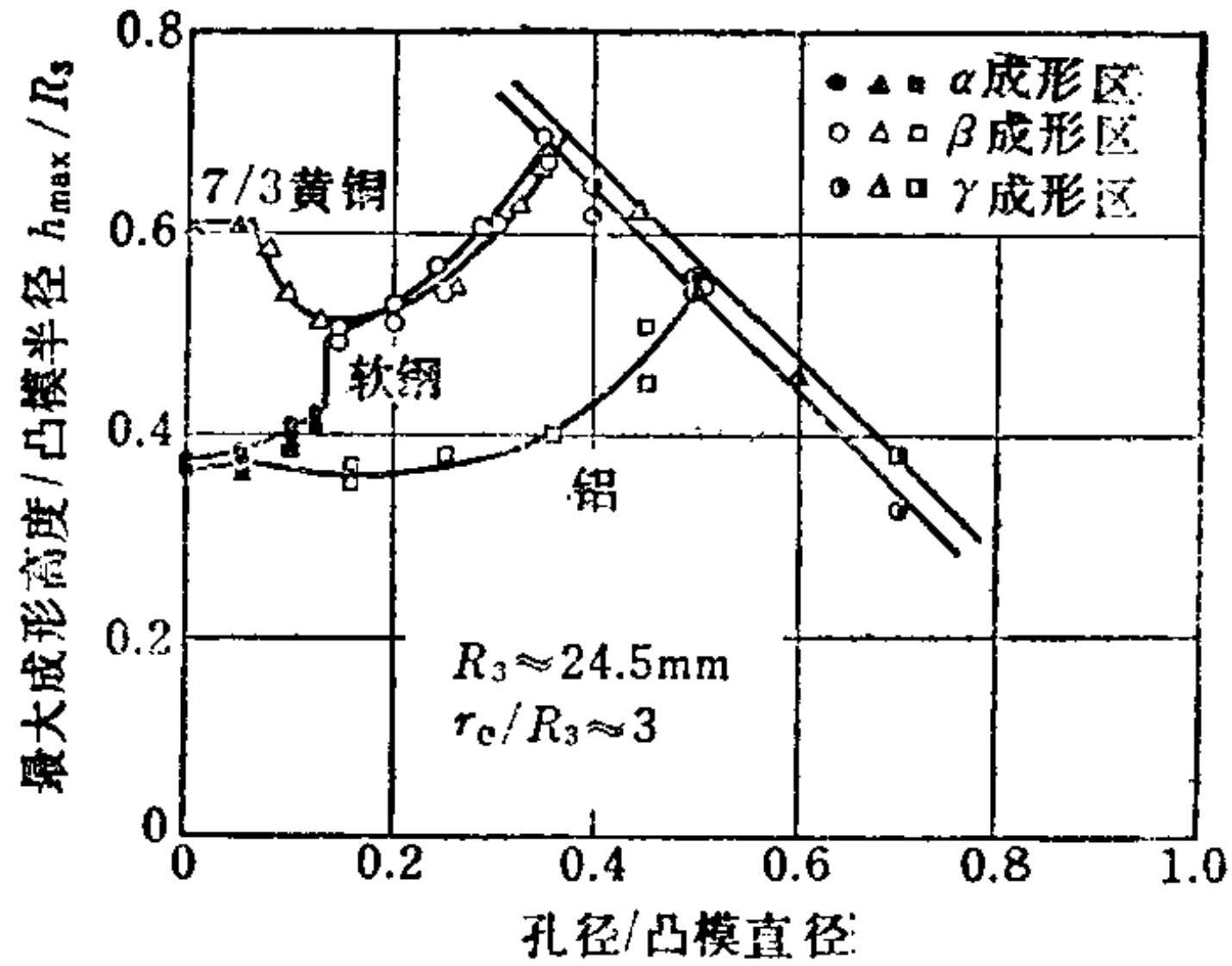


图4.11 最大成形深度与孔径的关系〔5〕

板厚：0.9mm（软钢）；1.0mm（铝）；3/7黄铜

对于实际的冲压件，不能一次成形的情况是很多的，要经再次成形（二次成形）才能获得所要求的形状。

再拉延是一种二次成形方法，用于经一次拉延不能获得要求深度的零件。应将各阶段的拉延比（再拉延比）控制在破裂极限以下进行再拉延。在实际加工所遇到的其它二次成形中，由于受冲压件形状的限制，进行二次胀形或者二次伸长类变形时，要注意成形极限会显著下降。

变薄加工是以凸模和凹模的组合来减少侧壁板厚的成形方法，被用于提高制件表面光洁度、侧壁板厚均匀度以及制件尺寸精度等方面。此外，在不使制件刚度下降而又减轻重量等方面也是有效的。

翻边用于必须具有一定宽度凸缘以满足制件使用要求的场合，如焊接、增大刚性等要求。这种情况下，常常是制件的尺寸形状精度反而比成形极限更为重要。

4.1.4 冲压成形的缺陷〔6〕

所谓冲压成形技术，概括地说就是以经济性为背景的防止和

消除产生缺陷的措施。在冲压工艺及其成形极限方面，有下列一些值得注意的事项。

i) 成形力的极限：以所用冲压设备的能力和冲模的强度作为成形力的上限。

ii) 尺寸极限：以所用冲压设备的大小和坯料尺寸作为成形尺寸的上限。

iii) 破裂极限：在冲压成形中，希望材料无限制的变形以及承受无限大的外力是不可能的，成形中超过破裂限度材料就会在某处发生破裂。

iv) 起皱极限：材料局部出现压缩力或剪切力就要产生纵弯，纵弯残留到最后道工序即起皱。


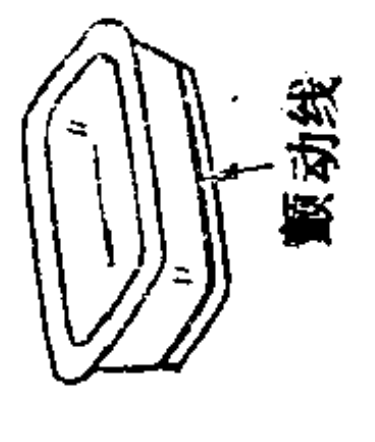
v) 中间形状缺陷的极限：例如，用平底凸模在拉延开始阶段产生的鼓胀，有时到最终工序仍未消除；由于反拉延后侧壁的弹性变形，使制件底部不平整。此外，由于存在所谓回弹等缺陷，所加工的制件一般地说就不会完全和模具的形状一样，与检验标准相比此即成为缺陷。也就是所谓的形状尺寸不好。

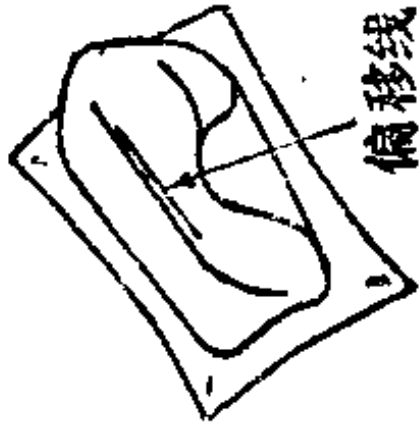
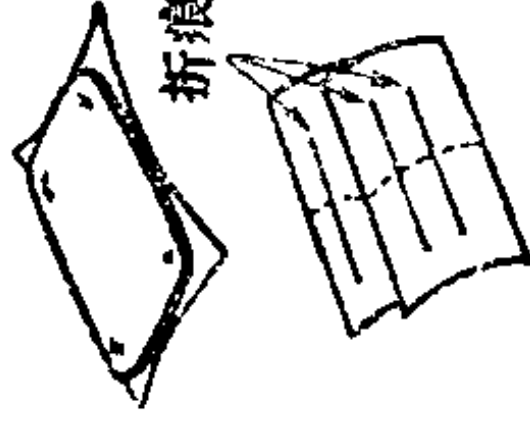
vi) 表面状态的极限：材料产生塑性变形，其表面状态必然发生变化。在与工具相接触的地方，材料容易产生伤痕和烧伤，对于自由表面，由于塑性变形量和变形方式的不同，材料的光洁度就要发生变化。这些现象都取决于工（模）具的材料（以工模具与薄板材料之间的关系而定）、表面加工精度、板料晶粒度的大小等因素。iii)~vi) 所示的极限，一般地说，必须认识到是会有波动的。此外，还必须考虑到随着时间的变化设备和冲模有磨损。

vii) 制件的机械性能等不适当所引起的缺陷：这类缺陷在制件的设计阶段就要从刚性、强度、磨损、应力腐蚀等方面作充分地研究。但是，如果成形后还存在问题的话，那么，往往需要对几乎所有的成形极限进行探讨。例如，制件的残余应力造成问题时，就必须研究成形方式及其相关的问题。


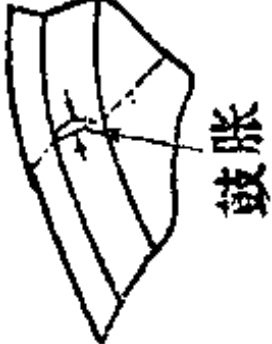
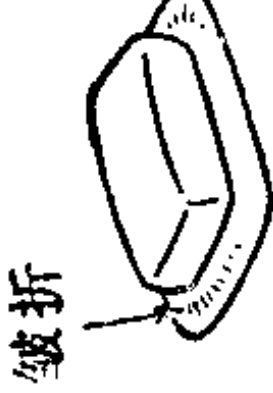

预防冲压成形中缺陷的产生，基本的方面就是在确定作业条件时，对各种成形极限从安全的角度作充分考虑，并将这些因素确

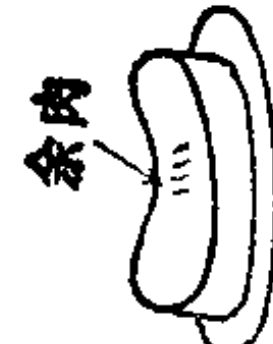
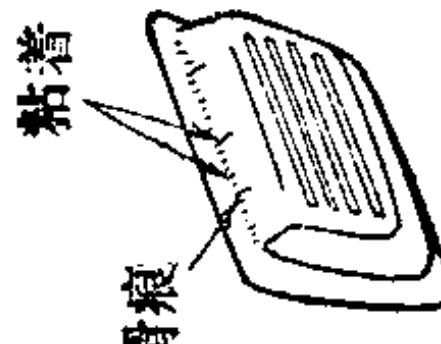
表4.2 冲压成形中的缺陷及其消除措施〔6〕

缺陷名称	原因及特点	图 例	模具方面的措施	冲压作业上的措施	薄板特性方面的措施	备 注
(A) 防止 皱压板引起的 的板料的支 承折线	以复杂的复合曲面凹模对坯料作支承时, 板料受到折曲, 成形后在其棱部以线状残存下来的缺陷		考虑压边面的形状, 加工方向、凸模形状以及凹模孔的轮廓形状, 拉延筋的配置等	板料进入模具前作预弯曲, 注意板料的支承方法		
皱折	以复杂的复合曲面凹模支承坯料作局部拉延时, 随着折曲而产生的缺陷, 拉延成形后也未消除而残存下来, 与折线相比, 呈现出圆角半径更大的波纹状		考虑压边面的形状, 加工方向、凸模形状以及凹模孔的轮廓形状, 拉延筋的配置等	板料进入模具前作预弯曲, 注意板料的支承方法		
(B) 板料流动开始(由静至动)的颤动线	在成形初期凹模圆角半径 R 处, 由于以静摩擦状态拉伸、弯曲, 使板厚变薄以及该处弯曲刚性增大, 在成形后的侧壁部分残存下线状痕迹		考虑压边面的形状, 加工方向, 增大过渡轮廓半径, 提高凹模或凸模面与圆角半径 R 相连接的过渡部位的加工精度。改变过渡轮廓处的形状(采用圆锥面) 定期调整拉延筋使拉延筋发挥效能(调整拉延筋和板	考虑将压边力作用于行程的后期		





<p>偏移线</p> <p>成形完毕之前，存在于凸模底面上的某棱线成为界限，当作用于板坯上的力不能保证材料均匀流动时，由于材料的一部分超越棱线被拉到一边，因而出现原有棱线的痕迹</p>		<p>坯外周至凹模肩部的距离) 将颤动线避开 制件划分工序时，注意第1、第2工序中的R分配 限制与圆角部分相连接处材料的流动(减少滑入量) 确保出现偏移的棱线上材料流动量的平衡(注意压边面的形状，加工方向、拉伸筋的安装位置，使用阶梯拉延)</p>	<p>防止加工前板坯挠曲，在成形的中期或后期开出工艺孔或槽</p>	<p>按发生部位的不同，分别称为端线，特征线，凸模圆角偏移等等</p>
<p>(C) 变形不连续拉伸滑移</p> <p>折痕</p> <p>在受屈服拉伸变形后的局部表面上所见到的应变花纹</p> <p>具有屈服拉伸的板料承受变形时，由于在局部产生线状塑性变形的部分和弹性变形部分同时存在而出现的形状缺陷</p>			<p>使用辊式钢板校平机(控制矫正条件)，控制钢板入库后的使用时间</p>	<p>非时效性 滞后时效性 控制屈服拉伸</p>

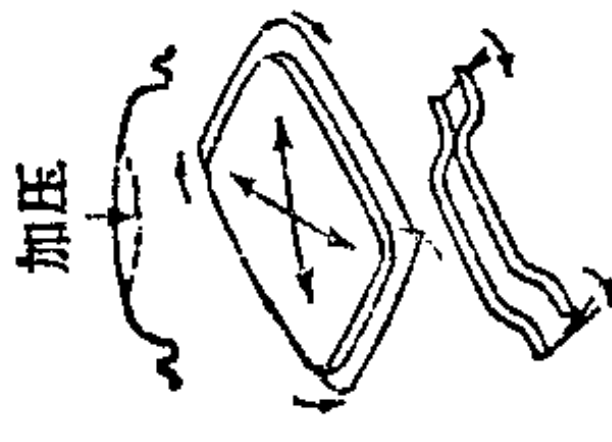
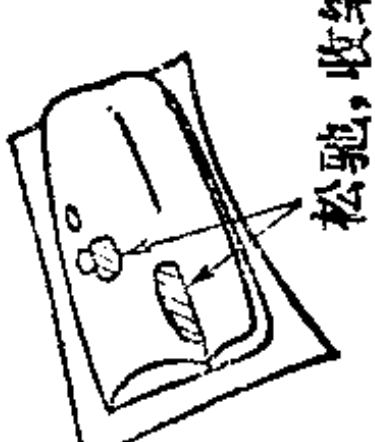
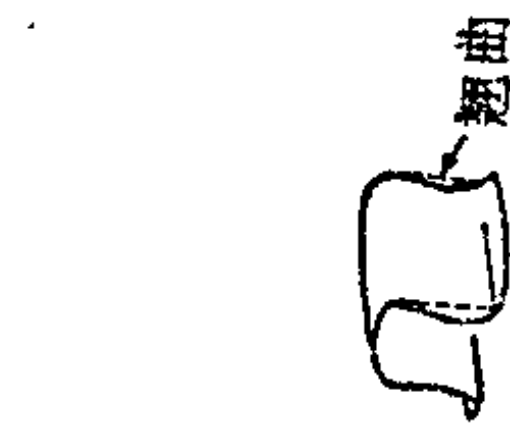
(续)

缺陷名称	原因及特点	图例	模具方面的措施	冲压作业上的措施	薄板特性方面的措施	备注
(D) 弯曲刚性和法线应力造成鼓胀	<p>(1) 凸模底面的那部分坯料, 未给以足够的张力, 当未与凸模贴合即结束成形, 就在整体或局部地方出现鼓胀</p> <p>(2) 由开式模对带有倾斜侧壁的零件作成形时, 出现的侧壁挠曲, 由于在侧壁发生压缩或延伸凸缘变形以及在凸模圆角部分的弯曲、弯曲回复变形相互作用所发生的缺陷</p>	 	<p>考虑压边面的形状、加工方向、凸模形状以及凹模孔的形状</p> <p>采用气(液)垫</p> <p>采用闭式模</p>	<p>用拉延筋和压边圈加以必要的张力防止加工前坯料的挠曲</p> <p>用拉延筋、压边圈加大张力重新考虑坯件的尺寸</p>	<p>高 n 值</p> <p>低屈服点</p> <p>低屈服比</p>	
(E) 板的纵向弯折	<p>由于成形中在板坯上发生压应力或剪应力而出现的塑性纵弯</p> <p>是很轻微的弯折, 间距大, 高度小</p>	 	<p>考虑压边面的形状, 凹模圆角半径 R 及拉延筋的配置 (增大张力以减小压应力, 使拉力均匀以减小剪应力)</p> <p>从间隙合理化、吸收皱折、集中化等方面考虑凸模的形状</p>	<p>增大压边力</p> <p>注意板坯尺寸</p> <p>使用良好的润滑剂, 以提高压边力</p> <p>局部使用润滑剂</p>	<p>高 n 值</p> <p>低屈服比</p> <p>变形面内各向异性小</p> <p>加大 r 值 (增大破裂强度)</p> <p>减少板厚公差 (特别是中厚板)</p>	<p>按产生缺陷的部位分为凸缘起皱和制件本体起皱</p>

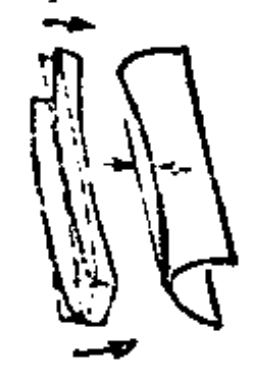



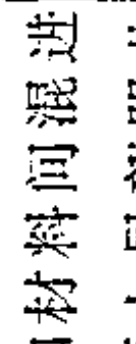


<p>余肉</p>	<p>四周变形大的那部分材料聚集在制件的另一部分而出现的纵弯现象</p>		<p>注意加工方向、压边面以及凸模的形状。注意凹模圆角半径 R，拉延筋的配置</p>	<p>研究板坯形状尺寸</p>	
<p>(F) 与模具的摩擦以及模具的变形而产生的滑痕粘着</p>	<p>板坯经过拉延筋以及凹模圆角 R 处所出现的细微伤痕 (指滑过模具表面后所留痕迹的金属光泽)</p> <p>是较滑痕稍深的缺陷，在板料运动方向出现明显的线状伤痕。特别把板料和模具之间发生局部的融着，在板料上出现的啃削现象叫做“烧伤”</p>		<p>退到修边线之外 考虑模具材料、模具硬度、表面光洁度，研究方向 研究模具的加工方向</p>	<p>使用加高压添加剂的润滑油 清除剪切面的毛刺，清除粘在板料上的灰尘 保护板料表面 洗净板料和模具 涂防护润滑油 使用经表面处理的板料</p>	<p>考虑板料表面的加工方法</p>
<p>模具配合精度不良</p>	<p>由于模具对中性不良以及导向不良，致使局部压力过高</p>		<p>增大模具的刚性</p>	<p>修正模具配合不好的部分</p>	

(续)

缺陷名称	原因及特点	图例	模具方面的措施	冲压作业上的措施	薄板特性方面的措施	备注
(G) 板料裂纹 拉延裂纹	板基的主要变形为压缩凸缘变形时的裂纹		分开工序	减小压边力, 使用润滑剂 (减小凸缘面的拉力), 增大凹模圆角半径 R (减小弯曲阻力)	降低 $C \cdot C \cdot V$ 值 增大 r 值	
胀形裂纹	板坯的主要变形为胀出变形时的裂纹		分开工序	加大凸模圆角半径 R 使用良好的润滑剂	加大 n 值 加大爱利克辛值	
翻边裂纹	板料的主要变形为翻边时的裂纹		分开工序 考虑凸模的形状 (球底, 圆锥底)	改善板料剪切面的质量	加大 n 值 加大延伸率	
弯曲裂纹	板坯的主要变形为弯曲形时的裂纹			增大弯曲半径 注意排样方向	加大 n 值 加大延伸率	

<p>(H) 成形件内空间压力过低, 引起的负压变形</p>	<p>成形终结后, 模具和板坯分离时出现真空状态, 因而使制件表面被收缩而产生的变形</p>	 <p>加压</p>	<p>考虑通气孔的尺寸和配置</p>	<p>减小凸模上升速度 使用粘度高的润滑油, 将制件留在上模上面</p>	
<p>(I) 由于成形件的回弹引起的局部变形 扭曲</p>	<p>制件的刚性不足, 当在成形后的板面上施加压力即产生明显的弹性变形。由于成形中出现板面内的应力分布不均, 成形后的弹性变形使制件的整个形状发生变化</p>	 <p>松弛, 收缩</p>	<p>利用加强筋增大刚性 采用拉延筋、阶梯拉延, 以增大张力 考虑拉延筋的配置及拉延筋的高度</p>	<p>重新考虑板坯尺寸 增大压边力 实现消除变形 (装配时修正特别差是用工具修正)</p>	<p>控制板料的平直度 低屈服点 低屈服比 减小各向异性</p>
<p>扭曲</p>	<p>由于成形中在板面内出现的应力分布不均而引起成形后的弹性变形, 使得零件的部分形状发生变化的缺陷 局部曲率半径变小的现象叫做松弛。局部曲率半径变大的现象叫做收缩 由于板厚上的应力-应变分布不均而出现的缺陷, 经过凹模肩部成形后在侧壁部分所出现的翘曲现象</p>	 <p>翘曲</p>	<p>考虑压边面的形状、加工方向、凸模形状、凹模孔轮廓的形状, 注意拉延筋的布置</p>	<p>增大压边力, 重新考虑板坯尺寸</p>	<p>减小凹模圆角半径 R 用拉延筋、阶梯拉延, 以增大张力</p>

(续)

缺陷名称	原因及特点	图例	模具方面的措施	冲压作业上的措施	薄板特性方面的措施	备注
纵向翘曲	与上述原因相同，与弯曲线相平行的方向上所发生的翘曲		估计回弹量后设计模具在弯曲线上采用压缩加工(曲率半径大的场合)	消除变形	控制板料的平直度	
回弹	由于板厚上的应力-应变分布不均，成形后出现曲率半径和角度的回弹		用拉伸筋、阶梯拉伸，以产生附加拉力	增大压边力	低屈服点 减小 r 值	
局部翘曲	由于凸模和凹模的圆角半径不一致，在凹模圆角处材料局部产生翘曲，在凹模圆角处材料局部产生翘曲	局部翘曲 	(曲率半径小的场合) 压缩弯曲变形处，用拉伸筋、阶梯拉伸，以增大张力			
粘上杂物	由于在工具和材料间混进杂物，致使表面上局部凹凸不平。从制件表面上看是凸状缺陷			更换清洗油，洗净冲模，洗净坯料，车间防尘，注意保持润滑油的清洁，并小心使用，清除剪切面的毛刺		
沉积物	从制件表面上看是凹状缺陷					
冲裁不良引起的毛刺	在凹模一侧剪切面上出现毛刺	毛刺 	间隙的合理化，提高模具的刚性和冲裁方向的重新考虑			
卷边	冲裁后凸模复位时，由于切口附近的材料被拉入而产生缺陷	卷边 	卸料板是否合理的合理化			

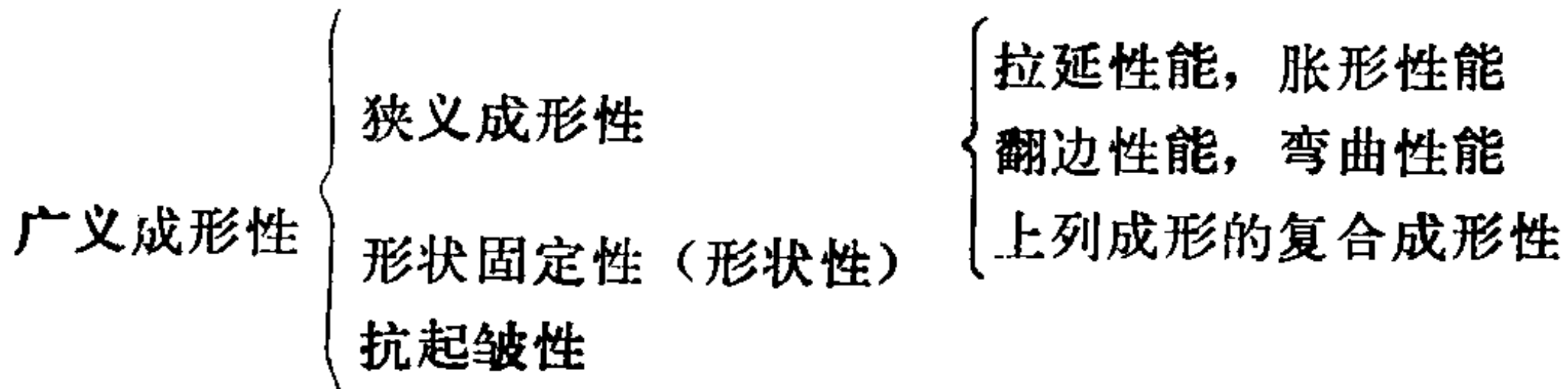
定下来。在现场作业阶段发生缺陷时，就要充分考虑各种成形极限的有机结合，并相应地去除不合理的部分。

表 4.2 是对汽车车身一类大尺寸异形件冲压成形时所含缺陷的分类，关于这些缺陷的原因及其消除措施也列在此表中。

4.1.5 冲压成形性和材料特性〔7~17〕

把材料的可成形能力总称为冲压成形性，然而在狭义的范围內，通常是指有关破裂极限而言的材料性能。

现在的冲压成形性是定性地认识材料性能的一种称呼。也就是根据 4.1.2 中已论述过的成形分类，把狭义成形性进一步区分，并形成我们所使用的概念。另一方面，把有关形状固定极限的材料性能称为“形状固定性”，同时，把发生和消除起皱的难易程度而得的性能称为“抗起皱性”，它们相对于狭义“成形性”，都用来表示冲压成形性。



这些性能，一般都应通过模拟试件的成形性试验作出判断。

胀形性能是在进行典型胀形试验时，比较出现破裂以前所具有的可成形深度来定。

拉延性能是通过典型圆筒件拉延，按其在哪种拉延比（或拉延系数）下发生破裂或者可以把拉延一直进行到底的情况去作出比较。在凸模的形状上，通常是用平底凸模。在使用球底凸模的情况下，可以认为较之平底凸模胀形更有利一些，而且也是用以表示拉延——胀形这一复合成形性能的方法之一。此破裂极限下的拉延比特称极限拉延比 L. D. R (Limmiting Drawing Ratio)。

翻边性能是通过回转对称形状的扩孔试验（翻孔试验），比较孔缘或孔的附近出现破裂时所具有的翻孔系数（扩孔系数）。特将此值称为极限翻孔系数。

由液压胀形试验求得的试验值有胀形系数 k ，在该试验所得到的等双向拉伸状态下，以真实应力——应变关系就可以求出加工硬化指数 (n_2 、 n 值) 和强度系数 F_2 (kgf/mm^2)。

用拉伸试验中拉伸方向的应变 (相对应变) 和液压胀形试验中的板厚应变 (相对应变) 相等点 (延性大时相对应变 20%) 的各自的平面应力 σ_1 和 σ_2 ，就可求出加工硬化各向异性指数 ($X = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$, X 值) (见图 4.13)。

作为金属组织的再结晶粒度，织构组织的主方位及其聚积度等均被认为是与成形特性相关的因素。

表 4.3 列出上述的不同试验值或特性值与成形性的一般关系。

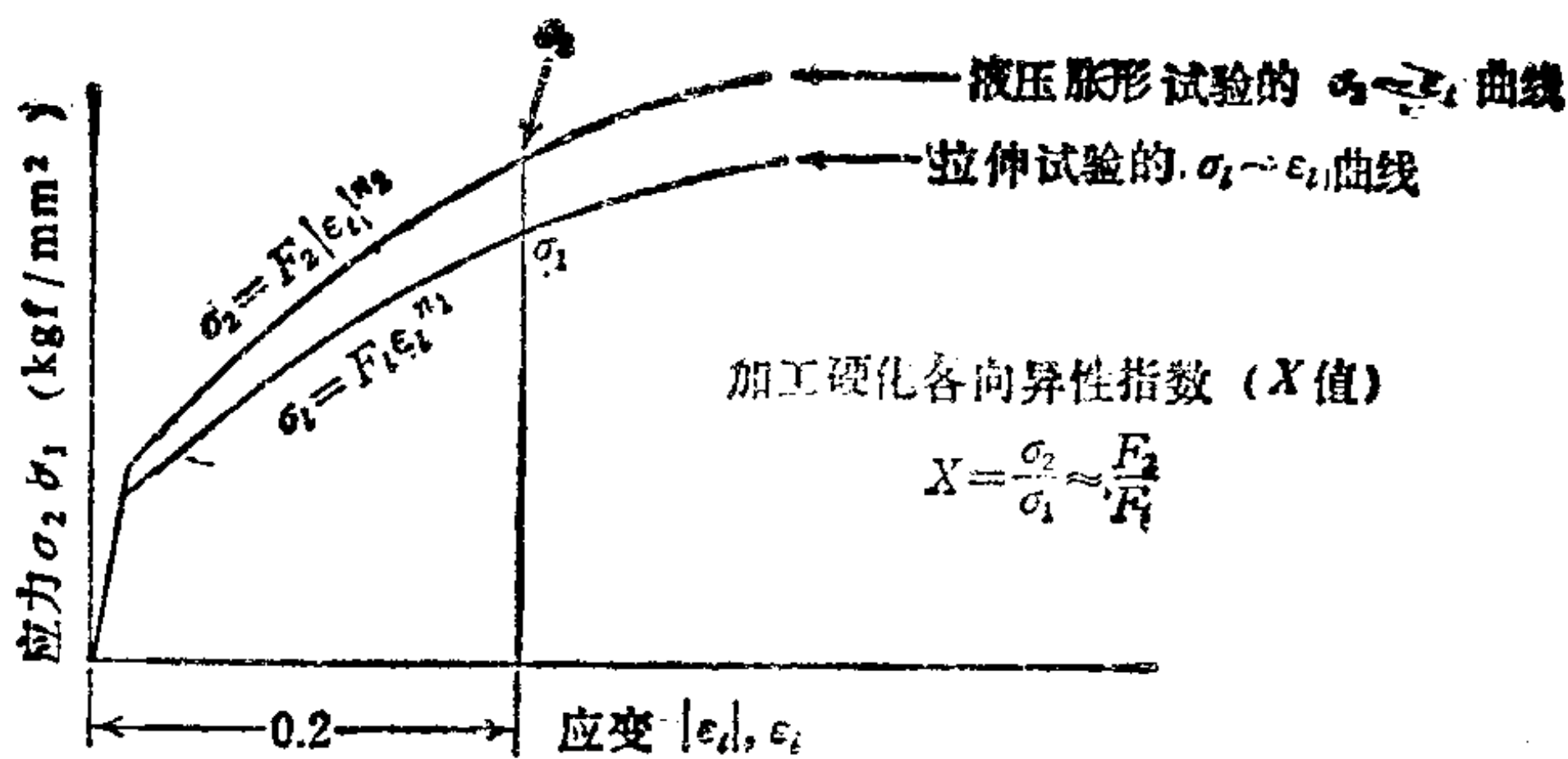


图4.13 在液压胀形试验和拉伸试验中塑性曲线的比较和加工硬化各向异性指数 (X 值)

表4.3 材料特性值和成形性的关系

材料特性	符 号	与成形性的关系
弹性模量	E (kgf/mm^2)	此值越大，形状性就越好[7]
屈服点现象	上屈服强度和下屈服强度的差，屈服延伸率	发生拉伸滑移[8]
抗拉强度	σ_b (kgf/mm^2)	此值越大，成形力越大

(续)

材料特性	符 号	与成形性的关系
总延伸率	e_B (%)	根据材料情况 (与成形性能有关的其它性能大致相同时), 抗拉强度大的成形性好[9] 概括地说, 此值越大, 胀形性能、翻边性能和弯曲性能越好[9]
屈强比	σ_s/σ_b	此值越小, 成形性、形状性越好[9]
均匀延伸率	e_u (%)	此值越大, 胀形性能、弯曲性能和翻边性能越好[9]
极限变形能	$e_{l,lim}$	绝对值越大, 翻边性能[17]、弯曲性能越好
加工硬化指数 (n 值)	n_1 (单向) n_2 (两向)	此值越大, 胀形性能、拉延性能、翻边性能和弯曲性能越好。抗皱折性也好
强度系数 (F 值或 C 值)	F_1 (单向) (kgf/mm^2) F_2 (两向)	此值越大, 成形力越大
塑性应变比 (r 值)	r_0 (轧制方向) 平均 $r =$ $\frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{4}$	在同类材料范围内, 此值越大, 拉延性能越好, 抗皱折性也好[9]
Δr 值	$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{4}$	此值绝对值越大, 拉延件的突耳越大[12]
加工硬化各向异性指数 (X 值)	$X = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \approx \frac{F_1}{F_2}$	对于许多材料, 此值越大, 拉延性能越好。胀形性能也好[13]
胀形系数	$K = \left(\frac{\text{最大胀形高度}}{\text{凹模半径}} \right)^2$	概括地说, 此值越大, 胀形性能越好[15, 16]
晶粒度	A. S. T. M. No 等	晶粒度大则表皮粗糙
再结晶织构组织	主方向和其聚集度	与拉延性能有关[14]

4.1.6 冲压成形技术

冲压成形技术大致划分为：i) 成形材料的选择技术；ii) 成形工序制订；模具设计技术；iii) 模具制造技术；iv) 作业技术等四大类。

首先，作为成形对象的材料，当其在与成形性无关的其他因素被确定下来的情况下，必须对该材料有关的成形性有所认识。在成形上，当有选择材料的余地时，就应该合理地选择对成形最合适的材料。在作变形程度极大的成形时，特别应该注意按什么样的途径选择材料。

确定工序时，不能在一个工序中使变形程度过大，但也不得安排无用的工序。再有，必须对连续工序中相互关连的现象预先予以很好的研究。例如，切断已成形材料的某一部分和切断之后再作成形这两种情况，其结果是明显不同的。在按照已确定的条件设计模具的阶段，必须考虑到所用成形设备（压力机等）的特性进而设计出作业性能良好而且刚性大的冲模来。

模具设计阶段尚未确定的问题，试冲成形时应有作修改设计的可能。关于工序之间的送进问题也是很重要的。

模具制造与模具设计的情况一样，也必须考虑到在试冲成形中的修正余量。例如：凹模肩部圆角半径的修正，因为将其改大一些比改小一些更为容易，所以就要以小公差范围去制造。此外，按照需要最好是考虑到由于磨损从而进行修复的再加工余量，或者对局部地方作成可以更换的形式。必须懂得：板料种类、所用润滑剂种类以及涂覆量等最合理的状态，模具表面的加工情况及方式，对其成形效果有相当大的影响。充分注意冲压车间操作者的安全性、作业性以及噪音等，然后采用冲模作业，就会减轻操作者的精神负担，使生产成品稳定。

冲压成形技术在科学上未被认识的或者叠加效果的判断有明显困难的诸因素，许多场合是用反复试验以及凭经验予以解决。包括冲模在压力机工作台上的位置和压边装置的调节在内的安装调试，润滑油的种类和使用方法，成形速度的确定等，常常是当

作所谓作业标准被确定下来。这样就能够充分估计到相对于发生差错的安全率。这样一来，由于在可调节的因素上留有余地，所以对于尚未确定的因素的变动上，可以说是能够相应地加以解决。

以上四种技术，不言而喻是互相有机地结合在一块而存在的。然而，相对于经常变化的冲压成形材料的成形性能，冲压成形技术必须进一步相应地采取灵活措施。

4.1.7 成形和变形状态〔18〕

冲压成形中板坯所承受的变形，取决于材质及全部成形条件，其变形状态，是看各应变分量的大小及分布状况。表 4.4 列出回转对称形状成形件的变形分布情况。

在拉延和胀形中，与承受成形力的凸模端部轮廓处相接触的

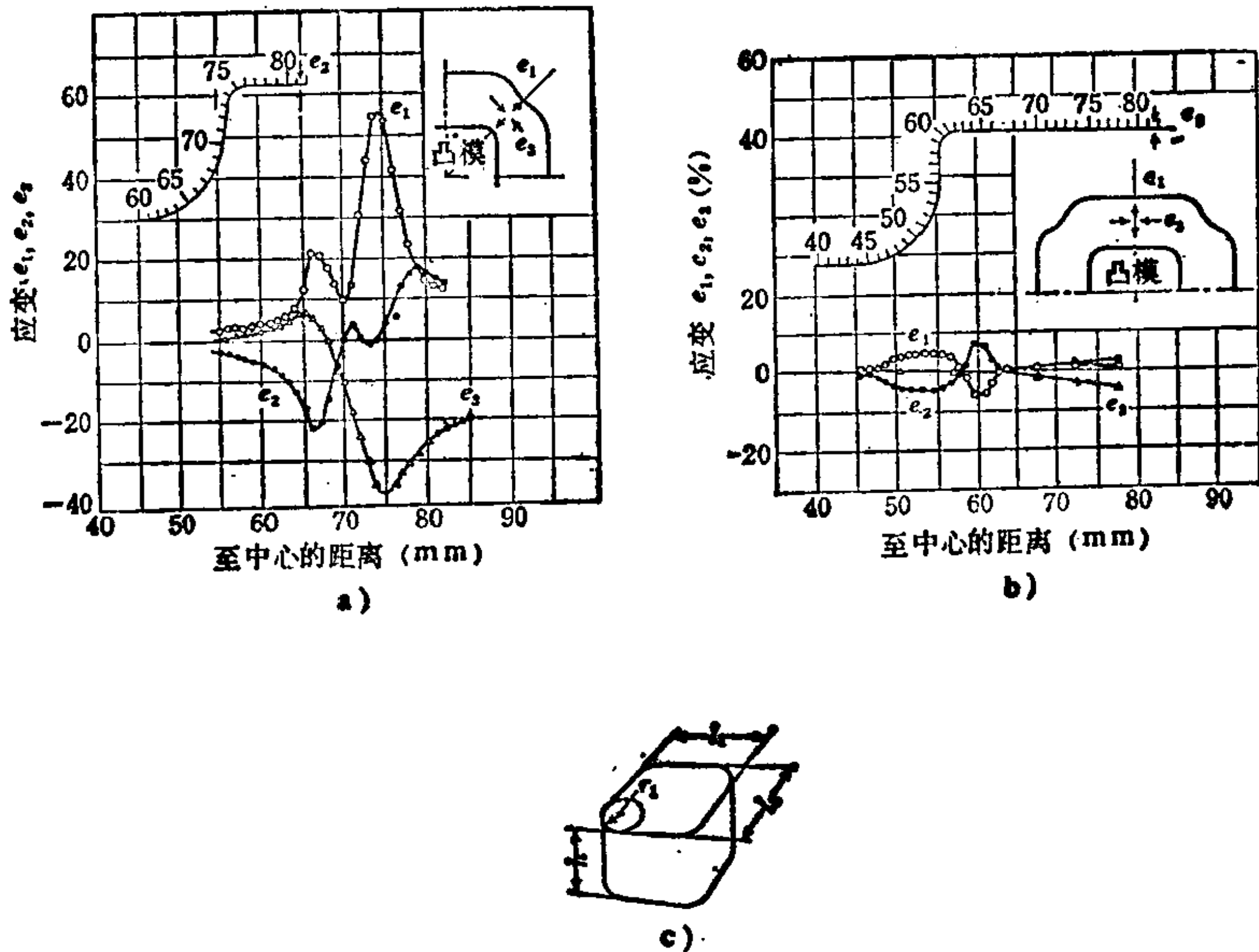


图4.14 盒形拉延件的应变分布〔21〕

a) 转角处的变形 b) 直边处中心的变形 c) 盒形拉延件 $h/r_1=8.1$, $r=4.5\text{mm}$, $r_p=5\text{mm}$, $r_d=2.5\text{mm}$
 $l_1=l_2=100\text{mm}$ 材料：铝，板厚：1mm

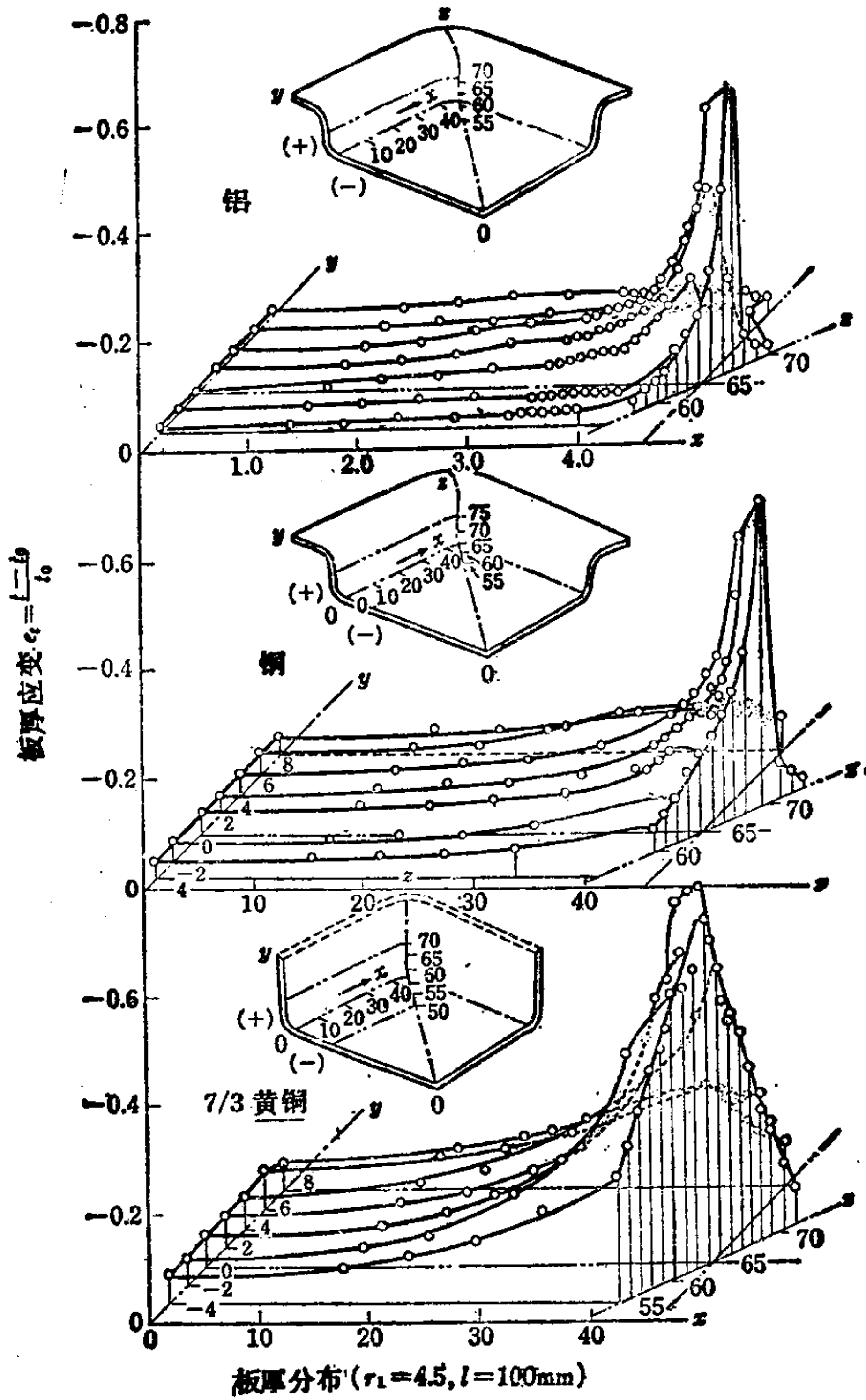


图4.15 盒形拉延件板厚的应变分布示例〔21〕

r_1 为转角半径 l 为直边长度

材料，其板厚发生变薄。一般地说，其最小板厚部分常常就成为成形时的破裂危险处。特别是用球底凸模成形的情况下，随着凸模与材料间摩擦的大小，材料的性质等因素的不同，此最小板厚部分将显著地发生变化。被拉延制件周边部分的料厚，较之板坯的厚度则有所增加。

图 4.14 和图 4.15 所示为非回转对称形状成形件的应变分布的例子。在成形件的一个部分（此时指转角处），将非回转对称形状成形件的应变分布情况与回转对称形状成形件的应变分布情况相对照，即可得出在某种程度上正确的认识。

为了更确切地掌握冲压成形的难易，以改进成形技术并更为合理地选择材料，许多场合均须同时知道主应变 3 个分量的状态。为此，如图 4.16 a) 所示那样用两个主应变分量构成直角坐标系，以表示变形状态。这就是所谓变形状态图。表 4.4[⊖] 列出相应的变形状态图。通过构成变形状态图的变形曲线在坐标系中所处的位置和形状及各点的移动等，就可以知道成形的特征。因此，可以用于形状复杂和成形过程复杂的实际冲压作业的资料整理之中，进而还可以用于

资料系统化、作业管理合理化以及冲压效果的预测上。例如：将变形曲线的形状与图 4.17 所示的破裂极限线相比较，减少特别靠近破裂极限的变形部分的变形，由于改变变形比，所以

也就是改变了成形条件。另外，如图 4.16 b) 所示，把应变 3 个分量取为 x 、 y 、 z ，以表示变形状态的方式〔19〕。

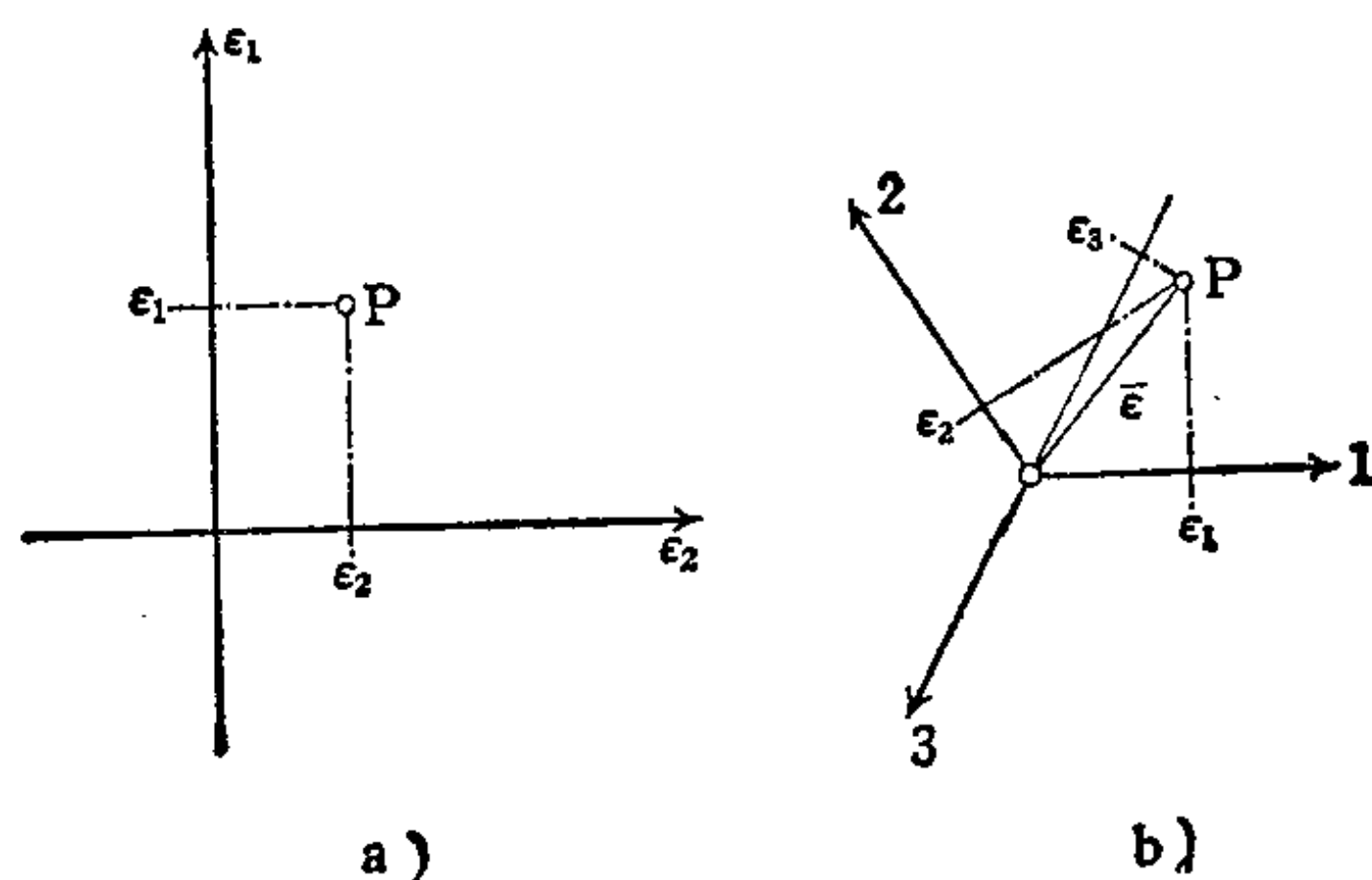


图 4.16 变形状态的表示方法〔19〕

⊖：原文误为“表 4.3”——译注。

表4.4 回转对称成形件的应变分布 (试件)

成形方法	试件纵断面形状	各应变分量的分布	变形状态图	成形方法	试件纵断面形状	各应变分量的分布	变形状态图
胀形, 用球底凸模				拉延, 贯通, 延平			
胀形, 用平底凸模				拉延, 贯通, 延球			
胀形, 加筋时, 球底				凸缘伸长, 平底模			
拉延, 有中间凸缘, 平底				凸缘伸长, 翻孔(成形)			

注: 表中试件材料为软钢, 普通润滑状态。

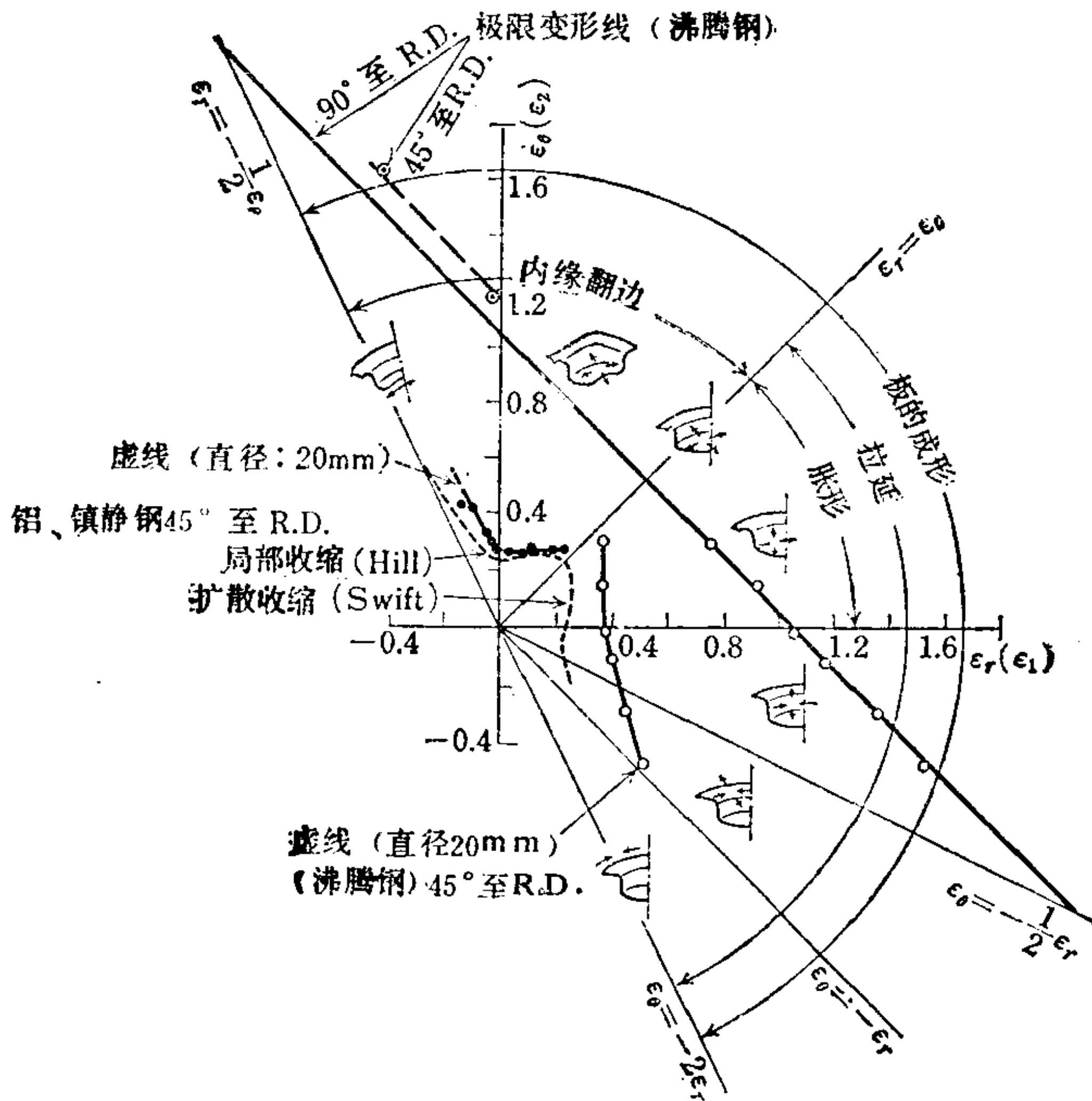


图4.17 变形状态图和成形极限线的关系〔18〕

R. D. (rolling direction) 为轧制方向

4.1.8 冲压成形条件和作业效果〔20〕

从广义上讲，冲压成形技术的最终成果可用生产性来评定。因此，必须研究确定冲压作业的各种条件，并且要很好地理解在此之前已确定的条件。例如：在进行拉延和胀形的复合变形时，其模具的设计思想，在冲压车间就要对是否用拉延还是胀形这一重大决定有所认识，在这里面还应把作业条件综合起来进行研究。

在冲压车间，作为其直接评定其生产性的指标是制件不合格率和冲压设备的负荷率。不合格率和作业条件的关系是很密切的，如图 4.18 所示为压边力和润滑油的种类对不合格率有很大影响。然而在一般情况下，也存在着象 4.1.4 中叙述过的产生许

多缺陷的极限。例如，图 4.19 所示的压边情况，压边力的许用范围，其下限为起皱精度极限，其上限为破裂极限。由此可知，被允许的不合格率以及其它各种各样的作业条件，与某一作业条件的确定（即压边力）有直接关系。

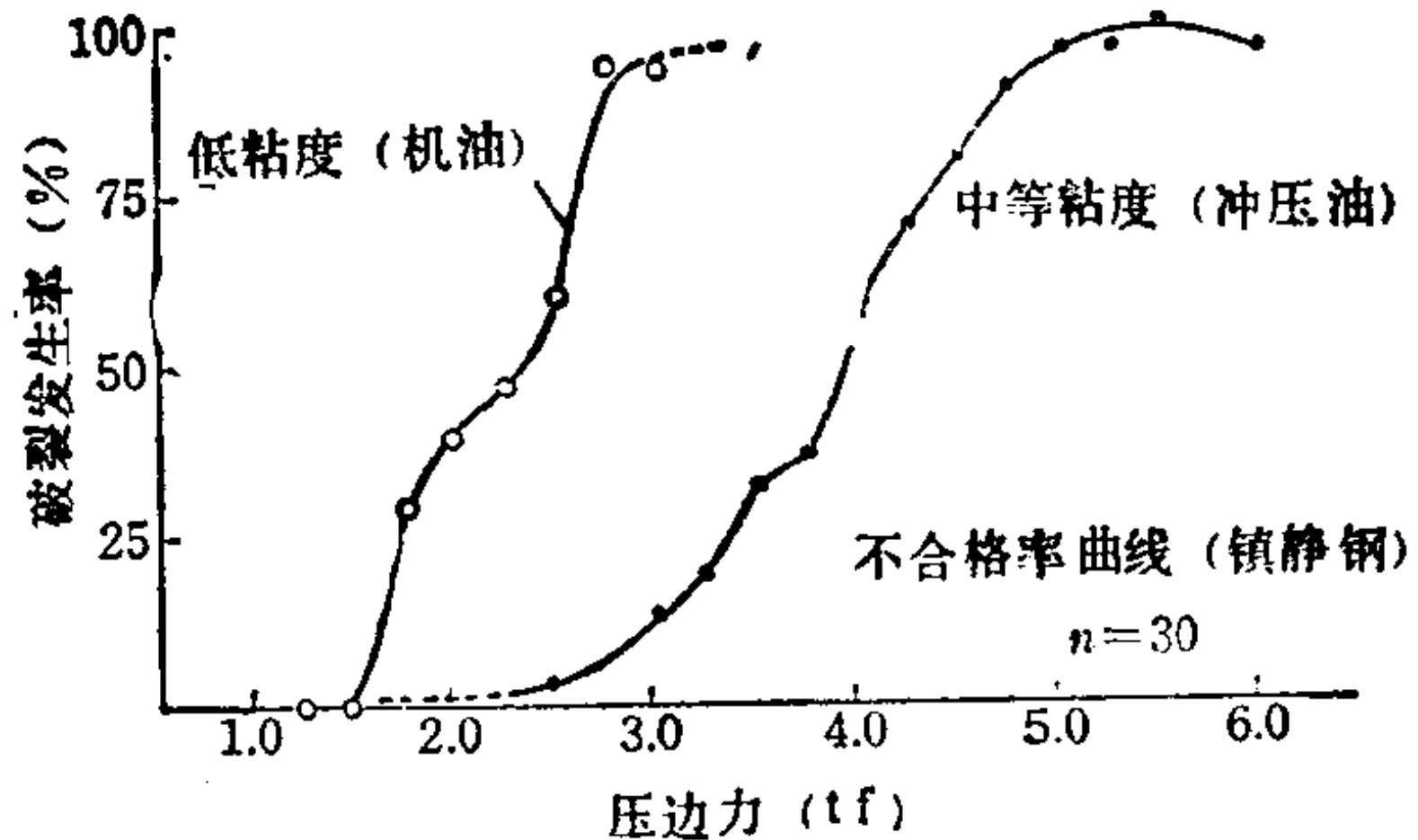


图 4.18 改变润滑油而引起不同的不合格率曲线〔20〕板厚 0.8mm，球头直径 ϕ 48mm；冲压板坯直径 ϕ 105mm

由于冲压成形作业几乎在所有场合都是把大量生产作为对象，所以在冲压成形技术的研究中，必须掌握不合格率的统计数字。合理地确定上述的各种作业条件是十分必要的。

在多数场合下，冲压设备的负荷率和产生缺陷有直接关系。这种情况下，冲压车间必须采取消除缺陷的技术措施。例如：在消除某种缺陷的技术措施极为完备

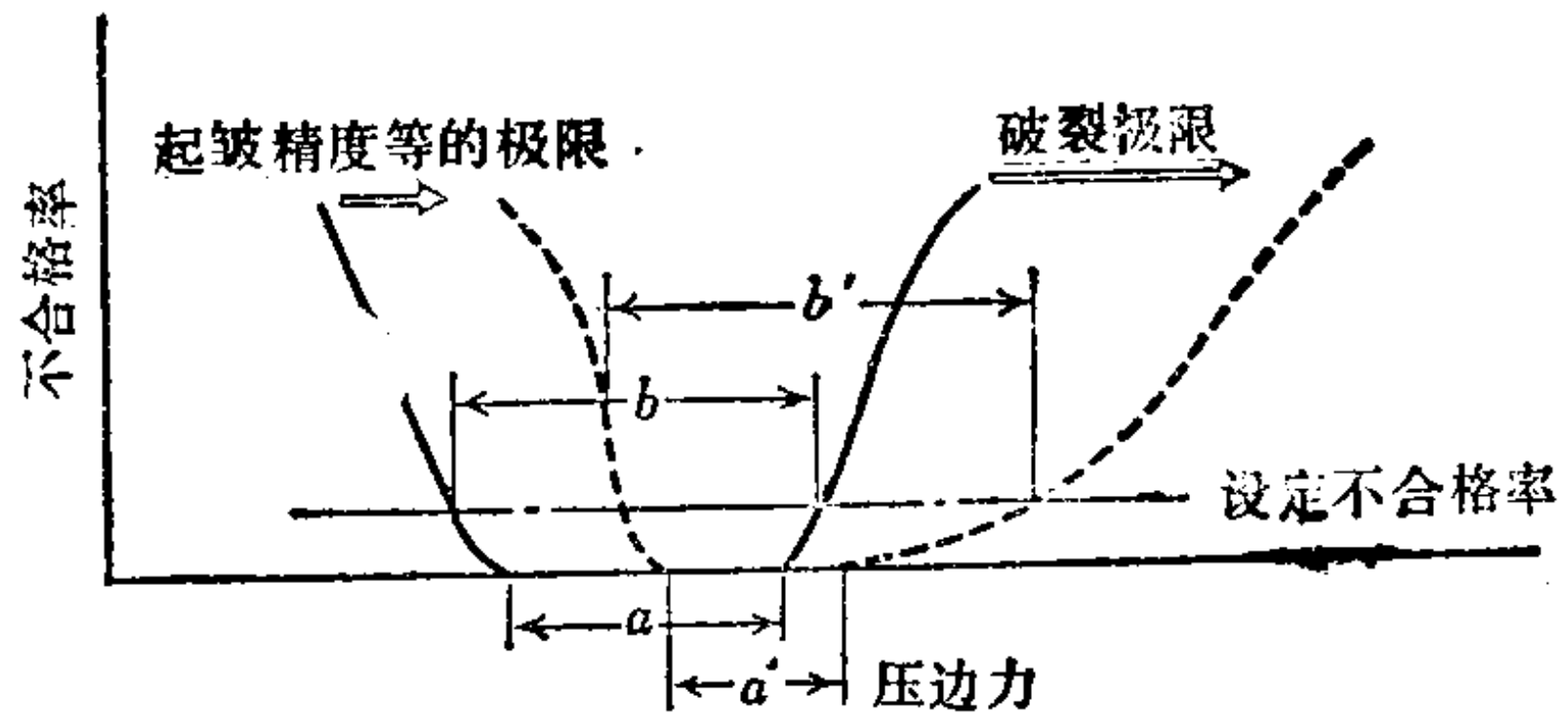


图 4.19 起皱（或达不到精度）与破裂不合格率曲线的相对关系〔20〕
a、a'—不合格率为 0 的允许范围 b、b'—不合格率 \neq 0 的允许范围

的冲压车间，当其存在发生缺陷的危险时，即使这种缺陷发生也是好事。因此，冲压车间消除缺陷的技术措施在许多情况下当然也成了与确定工序、确定作业条件有关的重要因素。

4.2 冲压成形用薄板

4.2.1 一般的评定标准

a. 成形性(参照 4.1.5) 使用成形性优良的材料，可减少成

形工序数量并减轻作业管理,然而,另一方面也容易造成材料性能不能充分地发挥。

b. 均匀性 在获得制件均匀性的同时,为了使冲压车间作业效果稳定,就希望板厚和材料性能的波动要小。在实际中,对于偏差(波动值)也要作定量的分析,必须抱确保材料具备最小偏差的态度。与时间因素相关的均一性,也就是说关于时效性的问题也必须予以研究。

c. 经济性 成形性、均匀性越好的材料,其价格也就越高。但是,如果具备充分而有效地利用材料性能的成形技术,那么,即使是价格昂贵的材料,而对生产费用说来仍然是合算的。废料的有效利用和管理,是节约材料费用的重要因素之一。

d. 通用性 市场性好,容易到手的材料,紧急备用存放期短,质量稳定,材料制造厂的技术服务能力也大。

e. 因成形而引起材质变化 由于表面的粗糙度(光洁度)、机械性能、物理性能等随变形而发生变化,所以在制件设计和材料选择的各个阶段都必须对这个问题作充分的研究。

f. 规格 根据上述各项的研究结果所选出的材料,要按规格购取。现在常用的规格有如下所示的一些种类。但是,在国内(日本),希望尊重日本工业标准(JIS)。

(i) 国家标准 各个国家都制定有不同的标准,就是在国内(日本),某些类型的材料,也有使用国外标准的情况。JIS、ASTM(美国标准)、BS(英国标准)、DIN(西德标准)、NF(法国标准)等,都是有代表性的几种标准。

(ii) 协会标准 是各专门协会制定的标准。关于各种分会正制订合理的系列化标准。AISI(美国钢铁协会标准)、SAE(美国汽车技术协会标准)、AA(美国铝材协会标准)等都是主要的协会标准。

(iii) 制造厂标准 是各制造厂家独自的标准,通常较JIS的内容更加严格。新发展起来的材料,多使用这种标准,在国内(日本)常用类似于JIS的标准。就某种材料而言,也有广泛使

用惯用标准的情况。例如：对于铝系材料一般情况就是用耐蚀铝合金公司的标准。

(iv) 协定标准 是材料制造与需用公司团体或特定用户之间缔结的标准，如日本汽车工业会协定标准等。假定要补充一般标准的不足之处时，就常用协定标准。

(v) 购入标准 是材料用户自己规定的标准。

(vi) 使用标准 用户从生产技术的观点自己制定。在国内（日本）常常是将 JIS 与制造厂标准、协定标准结合起来。

4.2.2 材料的各因素和成形性

a. 成分 纯金属一般比合金材料的延性大，在退火状态下的弯曲性能、成形性能、翻边性能都更为良好。随着合金元素的含量加大，通常是变形性能降低，加工硬化性增加。再则，与纯金属相比，合金材料的 n 值常常是随着所测变形范围的不同而明显地不同。

b. 显微组织〔22〕 由于加工组织的存在而在某种程度上失去延性，所以，对除拉伸性能之外的成形性能都显示出不良影响。作为再结晶组织，就希望把晶粒度调整到最合适的大小和形状，非金属夹杂物尽可能少且使其均匀分布。如果晶粒度过大则变形后的表面就将变得非常粗糙。反之，当晶粒过细又将丧失延性。就不同的成形性而言，具有最合适的晶粒度大小。晶粒的形状有时也与成形性有关。

c. 织构〔23〕 板料塑性的各向异性与金属材料的织构有关。因此，织构组织是拉伸性能和板料平面内各向异性的主要支配因素。对于立方晶系材料，即可看出在靠近平行板料平面的(100)面的方向的材料性能越差，靠近(110)面和(111)面的方向的材料性能越好，拉伸性能就越优越。此外，在个别方向上性能特好的材料即显示出板料平面上的各向异性，并将导致拉伸件的突耳以及变形的不均匀性。

d. 机械性能 所谓一般的机械性能是指用拉伸试验和硬度试验所求得的材料性能。这些试验值是直接影响成形性的因素，

但又不是其全部内容（参照 4.2.8 以及 4.3.1）。

硬度与抗拉强度具有同样的含义，由于求取容易，是检验材料性能差异的有效方法。

e. 表面状态 表面的粗糙程度与成形时的摩擦具有很密切的关系。可在较广的成形速度范围和可使用多种润滑剂稳定地进行冲压作业的粗糙面材料、无光泽材料（符号 D），反而比对润滑油的差异有敏感效果的抛光材料、光亮材料（符号 B）在成形作业上更为有利。最好使用表面粗糙度为几个 μH_{max} 的材料。

经表面处理的材料，特别需要注意由于表面处理附于材料表面的物质与模具材料之间的摩擦。包括包复材料在内的表面材料或复膜的延性比母材延性差时，其成形性是不好的。

f. 板厚 如果板厚减小，则所有的成形性变坏。随着板厚的减小，包含在成形力中的摩擦力的比例即加大，就容易发生起皱等纵弯缺陷，就容易从局部不稳定变形状态进到出现破裂的状态。

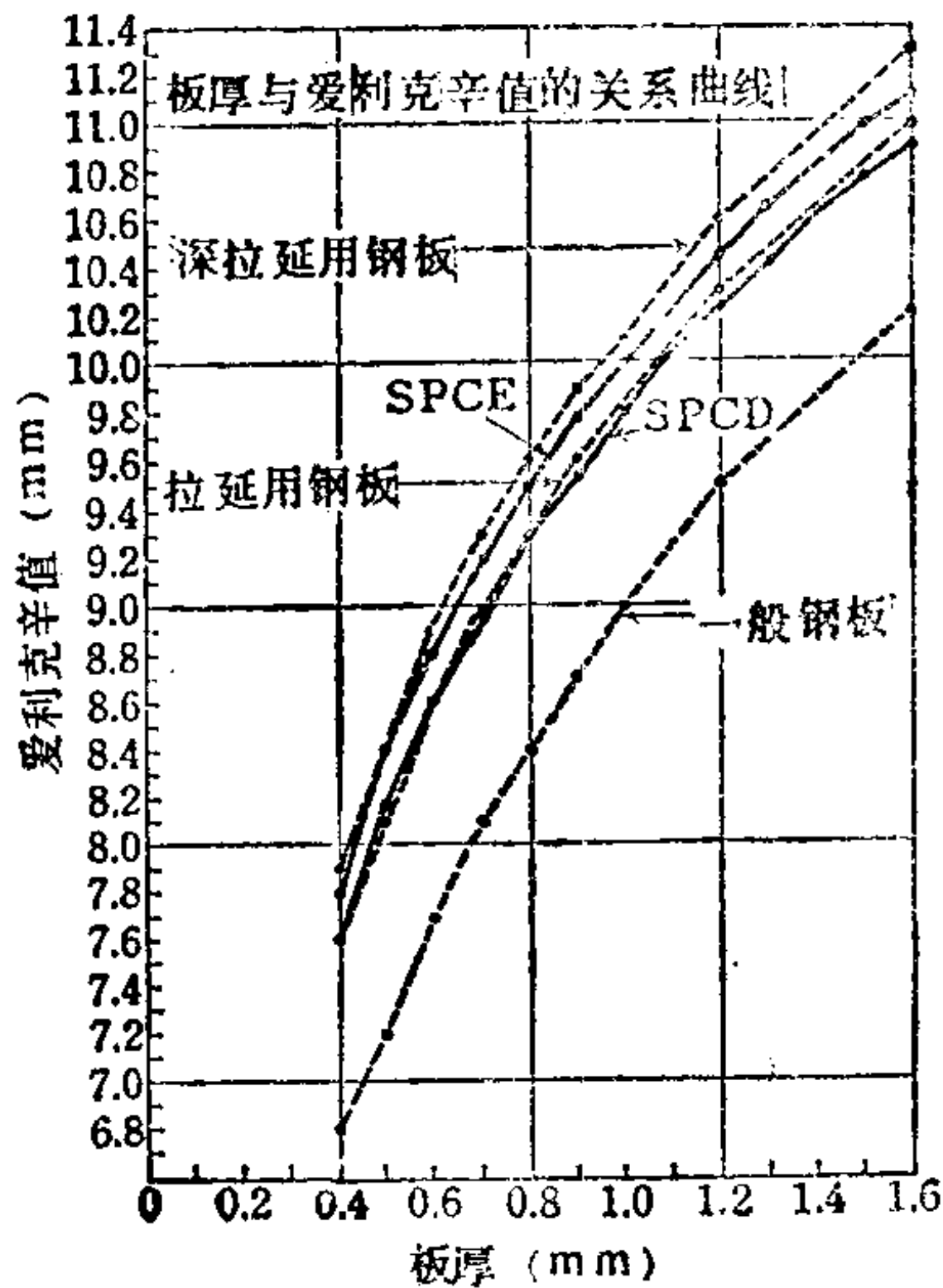


图4.20 板厚与胀形性能之间的关系曲线〔24〕

图4.20和图4.21所示分别为板厚对胀形极限和拉延极限的影响。

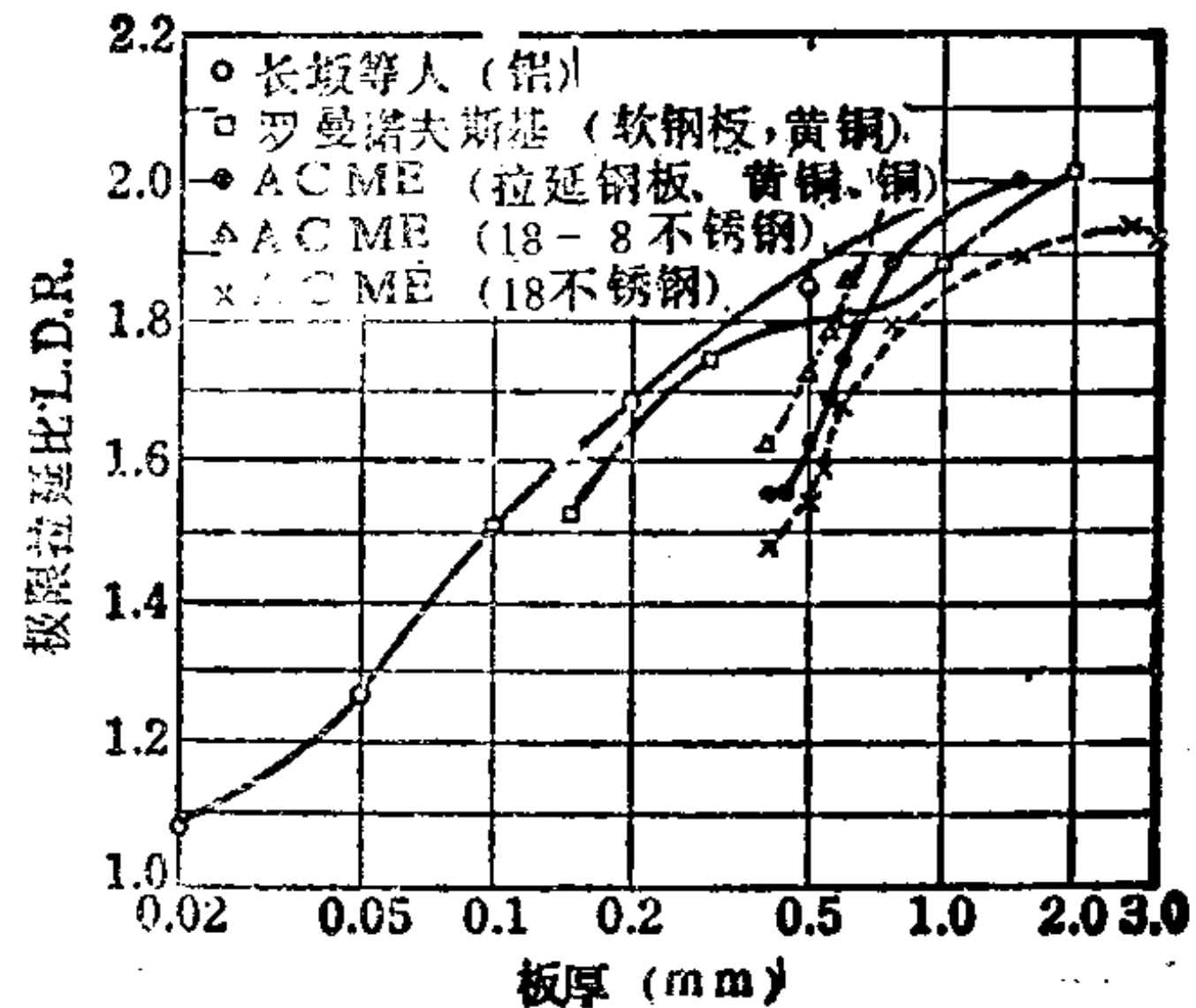


图4.21 板厚对极限拉延比 (L. D. R.) 的影响，板厚与拉延性能之间的关系曲线〔25〕

g. 制造条件 上述诸因素都由板料的制造方法及其有关的条件而定, 因而必须具备处理板料问题的有关各制造工序的基本知识。表 4.5 所示为一般工业用的板材制造工序的大致情况。必须注意各工序的所有条件对制件的成形性以及机械性能有什么样的影响。

表 4.5 所列工序的某些内容已作了简化。

表4.5 板材的制造工序

主要工序	与成形性有关的主要条件	在此工序上产品的一般名称
1. 成分配备 (脱氧, 脱氢处理)	化学成分 处理条件等	熔炼溶液
2. 铸造	铸造方式等	铸锭或钢坯
3. 热轧	轧制温度(始、终轧温度) 压下率(热轧率) 卷绕温度等	热轧材料(H材或R材)
4. 冷轧 (有的作中间退火)	压下率(冷轧率)等	冷轧材料(C材或H材)
5. 退火	退火方式, 退火温度, 退火时间, 加热速度等	退火材料(A材或O材)
6. 调质处理 (轧制、热处理等)	调质轧制压下率(调压率) 热处理条件等	调质材料(S材, T材等)
7. 表面处理	表面处理方式、处理条件等	表面处理材料

4.2.3 薄钢板〔26、27〕

含碳量小于0.12%的钢板特称软钢板, 作为冲压成形用材料, 软钢板的应用最为广泛。按其制造工序是否经过冷轧, 大体上可分为冷轧钢板和热轧钢板两类。冷轧钢板通常是以板厚小于3.2mm, 热轧钢板则是以板厚大于1.2mm的材料在市场上出售。作为JIS标准来看, 在JIS G 3141, JIS G 3131中按其化学成分和加工性大体可分为3类。实际中, 制造厂标准等主要是在加工性

以及用途类别上去区分材料性质。

薄板的冶炼过程，几乎都是用转炉来实现的。钢锭除用铸锭法生产外，用连续铸锭法的也开始多起来。

关于化学成分对成形性的影响，由于含碳量和含锰量越小则材料的延性越好，所以一般来说成形性有所提高，然而由于碳锰减小会降低材料的强度，因而在份量上要控制在适当的范围内。从提高材料成形性的观点出发也要降低 S、P、Cu、Ni、Cr 等杂质的含量。由于钢中的含氮量(N)是形成时效性的主要因素，所以也希望含氮量低一些。钢中的氮，可以用氢脱除或者用 Al、Ti、B、V 等元素作稳定化处理。

将钢水铸成钢锭时，使沸腾反应进行得很充分的钢称为沸腾钢，钢锭外侧的杂质少，可以得到表面性能良好的钢板。这样的钢板称为沸腾钢板。使用 Al、Si 等对钢水作充分脱氧而无沸腾反应，以防止偏析的均质钢锭叫做镇静钢。与沸腾钢相比，镇静钢是均质的，但是板料的表面性能不好。这样的钢板叫做镇静钢板。添加元素 Al、Si 也可以在氮的稳定化上起到作用，而形成非时效性的效果。为了使 [N] 稳定化并提高材料的成形性，有时也可用 Ti、B、V 等元素作为添加剂。这种类型的钢板特称为稳定钢板。

软钢板的 n 值通常为 0.1~0.25。但是 n 值的大小特别与在铁素体中固溶的添加元素和再结晶晶粒度的大小有关。已经知道：固溶元素的存在，常常是使 n 值向小的方向变化，而当晶粒度变小则 n 值就变大。

在冷轧钢板的深拉伸中， r 值大的材料是特别有利的，最好是将 r 值作为检验材料性能的中心内容。对于胀形，以检验材料的 n 值、 σ_s/σ_b 为主。在这种情况下的 r 值，当破裂危险部分呈长线状时或在润滑状态恶劣时，最好是要大一些。反之， r 值也有以小一些为好的时候，不能一概而论。对于作拉伸-胀形的复合成形时，将 r 值作为主要的因素再加上 n 值的大小以判断材料的适应性。对于翻边，用材料的延性、延伸率去检查，组织中的非

金属夹杂物要尽可能少。即希望有纯度高的材料。在形状性成为疑难的作业中，希望使用低屈服点的钢板，在高屈服点、高强度极限钢板的冲压作业中，最需注意的问题就是形状性 \ominus 。

所谓变形时效是指由于用约小于1%的压下量或用辊式钢板校平机等对钢板稍作辊压加工后已消除了的屈服点延伸现象，随着时间的推移又重新出现，进而在成形件上出现拉伸滑移或者使形状性变坏的现象。这种变形时效现象将造成特别严重的问题〔29〕。材料的放置温度对变形时效速度有很大的影响，温度越高则变形时效速度越快。如按 Handy 的公式，换算的时效时间列于表 4.6 中。

表4.6 Handy 的时效时间换算表〔28〕

100°C	25°C	21°C	15°C
4小时	4个月	6个月	1年
2小时	2个月	3个月	6个月
1小时	1个月	6周	3个月
20分钟	10天	2周	1个月
5分钟	2.5天	4天	1周
2分钟	1天	36小时	3天

如果屈服点延伸率在0.5%以下，拉伸滑移（应变）常常是不能用肉眼看见的。在调压后30天以内或者屈服点延伸率小于3%的情况下，用钢板校平机作校正就可以防止拉伸滑移（应变）。由于校正后又有时效问题，所以希望在校平后早些作冲压成形，一般是在24小时内使用。

4.2.4 不锈钢板〔30~32〕

不锈钢为在软钢中含有铬12~24%和镍8~22%的类别繁多的材料。从化学成分上看，可以分为马氏体系，铁素体系和奥氏体系三大类。但作为冲压成形用的不锈钢薄板，仅仅是限于铁素体型和奥氏体型。

\ominus 软钢板的机械性能参照附表或者是 JIS G3301—1970, JIS G3310—1970。

铬为主要合金成分的铬系不锈钢，由于是体心立方晶格，所以也可叫做铁素体型不锈钢，以 17Cr 钢或 18Cr 钢的不锈钢 SUS 24(430) 为代表。铬、镍为主要合金成分的铬镍型不锈钢，由于是面心立方晶格，所以也可叫做奥氏体型不锈钢，以 18~8 不锈钢的 SUS 27(304) 为代表。虽然两者均为不锈钢，但是其物理性能不同，所以仍当作两种金属来对待。可以认为铁素体型不锈钢的物理性能与软钢基本相同，但是奥氏体型不锈钢没有磁性，与铁素体型不锈钢相比，其电阻为 1.2 倍、热传导率为 0.6 倍，热膨胀系数约为 1.7 倍，纵弹性模量也稍小一些[⊖]。

对不锈钢板而言，常常是将其光泽的表面作为制件的主要方面，板坯表面的精加工程度是一个重要的问题。表 4.7 所示为一般作为商品购入时的标准。

表 4.7 不锈钢板的表面加工

加工符号	加工方法
No. 2D	冷轧后，作热处理、酸洗。表面无光泽
No. 2B	No. 2D 加工后，作表皮光轧（调质轧制），表面光泽好
No. 3	用 100~120# 的抛光剂抛光
No. 4	用 150~180# 的抛光剂抛光
BA	冷轧后，作光亮退火，有光泽
HL	镀上一层极薄的锡。用连续的长抛光带作抛光

铁素体型不锈钢钢板的成形性，完全用软钢板的标准。但是在作业中所需的成形力是软钢的 1.4~1.6 倍， r 值一般比软钢要小，拉延性能、胀形性能也稍差于软钢。变形时效性与沸腾钢相同时必须注意拉伸滑移（变形）的发生。当其在轧制方向给以很大的拉伸变形，那么就会发生波纹，这种纹路即称为脊纹或凸纹。波纹会造成材料的缺陷，但是避免过大的拉伸变形就可以防止。

⊖ 不锈钢板的机械性能参照 JIS G 4304--1968, JIS G 4305--1968。

n 值大是奥氏体型不锈钢钢板的特征，在判断成形性的指标当中，必须重视 n 值。奥氏体系不锈钢所需要的成形力约为软钢的 1.8 倍。

为防止起皱，对受到压缩变形的凸缘部分必须施加很大的压边力。因此，对于成形设备的能力、刚性，就希望预先留有充分的余地。在包含有胀形及严重弯曲的拉延、胀形中，不锈钢板显示出较软钢板更为优越的成形性。特别是对于加工硬化性强的 SUS39(301) 等材料，当作过强烈的成形后放置起来则成形件的边缘等部位就要发生因残余应力而引起的自然裂纹(季裂)。成形后立即作退火处理就可以防止出现自然裂纹。由于奥氏体型不锈钢板经过塑性变形后产生变形马氏体组织，所以成形件就将出现磁性。将带有磁性的成形件作退火处理就能得到无磁性的状态。由于组织的变形马氏体化有增加加工硬化的作用，所以，许多场合当以缓慢的成形速度进行加工就会使成形作业获得成功。由于不锈钢在成形中容易与冲模发生烧伤、粘着，因此，作业时润滑剂的粘度最好是要高一些(400 雷德伍德粘度秒 50°C)，为了防止模具的磨损及成形件的拉痕等缺陷，使用耐高压高速润滑油添加剂以及塑料薄膜等作润滑剂都是有效的。在形状性不好时，为获得所需的形状，或者是增设拉延筋并用阶梯拉延，或者是在制件外开工艺槽，随着提高模具的刚性还必须注意压力机能力不足的问题。不锈钢材的翻边性能良好，但是可以看出：由于凸缘周边的加工方法(下料方法)不同，在周边断面上所形成的加工组织对成形极限的影响是很复杂的，所以坯件的冲裁状态也必须予以注意。

4.2.5 铝及铝合金板〔33、34〕

铝一般是指含铝纯度为 99.0% 以上的材料，若含有其它成分则称为铝合金。铝在延性、耐腐蚀性、价格等各个方面都是最良好的材料，但是强度最差。因此，作为铝合金，通常是在铝的强度成问题时使用。铝是不能用热处理增加强度的，是所谓非热处理型材料，但是作为铝合金，Al-Mg 系、Al-Mn 系等材料是非

热处理型，而 Al-Cu 系、Al-Mg-Si 系、Al-Zn-Mg 系等材料则属于热处理合金。在 JIS 中把铝合金分为 3 类，即耐腐蚀合金，高强度合金、耐热合金三个不同的类别。一般情况是用 JIS 的材料分类以及作综合分类的详细标准 AA。AA 标准将材料划分为类似于合金的级别并用 4 位数字来称呼。⊖

铝的纯度越高则成形力越小，延性也有所增加。因此，纯度越高的铝越容易使其变形，但是，作为铝板的成形作业，由于润滑及其它作业条件对成形效果具有强烈的影响，因而也就包含着容易造成拉痕等缺陷的不利因素，类似 A1100 这类铝材，可以认为是最好的使用材料。由拉伸试验所得的 r 值，由于材料本身具有很大的波动，所以难以把 r 值作为成形性指数。软质铝材，在胀形、拉延等方面都显示出具有稳定的成形性，是用途很广的材料，虽然铝材也有相当的加工硬化效应，可是变形后仍然具有延性，因而不经中间退火仍可作多工序的成形。作为调质铝材的 1/4 硬质材有足够的拉延性能，可是在胀形性能，弯曲性能，翻边性能（延伸凸缘性）等方面，与软质铝材相比，都有急剧恶化。在调质方法中，有改变退火程度 (H_{2n} 系) 和改变调质轧制压下率 (H_{1n} 系) 等两种方法，这两种方法具有各不相同的特征，见表 4.8。⊖

表 4.8 各种调质铝板的特征

项 目	轧制调质材料			退火调质材料		
	1/4硬质材 H_{12}	半硬质材 H_{14}	3/4硬质材 H_{16}	1/4硬质材 H_{22}	半硬质材 H_{24}	3/4硬质材 H_{26}
抗拉强度	等 同			等 同		
屈服强度	高			低		
延 伸 率	小			大		
表面硬度	高			低		
特 征	在表面上残留有轧制油薄层 造成伤痕困难拉延时容易出现突耳					

⊖ 铝及铝合金板材的机械性能参照 JIS H 4000—1970。

⊖ 原文漏——译注。

由于模具肩部半径微小的形状变化, 润滑条件、压边力以及坯件形状的微小变化, 都会对作业的结果有影响, 所以, 对于在试冲阶段的诸条件都应细心注意的必要。

铝合金通常较铝的 n 值大, 但是延性、延伸率要小一些。由于所需的成形力变大, 所以铝合金的形状性与铝相比要差些。由于铝合金包含有上述因素, 许多情况下成形性就不是太好, 因而安全系数必须取得高一些。在铝和铝合金板料的冲压成形中, 从材料表面剥落下来的铝屑粘附在模具肩部, 这就常常成为出现拉伤的原因。这种铝屑只要用含油金刚砂纸擦拭就可以去除。Al-Mg 系合金也有发生拉伸滑移 (变形) 的现象。防止拉伸滑移的措施同软钢。

4.2.6 铜及铜合金板〔35~37〕

铜的纯度大于 99.3% 的铜材称为纯铜, 将铜的纯度小于 99.3% 的材料称为铜合金。在 JIS 中, 又进一步把纯铜分为印刷用铜板, 韧性铜板, 磷脱氧铜板, 电子管用无氧铜板, 无氧铜板等类。这些材料中, 除印刷用铜板之外, 都可用作冲压加工。虽然各类纯铜的氧化物和杂质的含量稍有不同, 可是在进行冲压加工时它们之间却无太大的差异。在作变形程度很大的冲压加工时, 无氧铜板是理想的材料, 但市场上却难以买到。

铜合金板料中用得最多的是黄铜板。黄铜板有四类, 在 JIS 中分为: 1 类 (C2600), 2 类 A (C2680), 2 类 B (C2720) 和 3 类 (C2800) 四种。其中, 1 类、2 类称为 α 黄铜, 3 类称为 ($\alpha + \beta$) 黄铜, 在冲压加工中以 α 黄铜最为理想。此外, 在铜-锌合金中, 还有作口红筒那类深拉延用的紫铜板、在 JIS 中, 按照铜的含量, 可分为 1~4 类。它是拉延性能良好的板坯。铜镍锌合金 (锌白铜) 板料, 是在铜中含有镍 20~10%、锌 15~30%, 用以制作光泽美丽的西餐餐具, 装饰品以及电气零件等, 是成形性良好的材料。在 JIS 中分成 1~4 类。作为其它用途的冲压加工用铜合金, 还有用真空管隔板等的磷青铜板。

作为铜及铜合金的共性, 首先是所有材料的光亮加工表面都

呈镜面。这是因为铜制件卖的就是表面。

在材料性能上，其特点是它的晶粒度较结晶方向更能决定材料的成形性。在形状上，常常是使用窄而极薄的板料，特别常用的是板厚在 0.2 mm 左右的条料。这是由于材料昂贵以及延性极好的缘故。

为了评定材料的成形性，进行拉伸试验、爱利克辛试验是特别有效的。作为试验值，屈服强度、抗拉强度、 n 值、延伸率等都是重要的， r 值则不大使用。 n 值特别受到重视，此值与晶粒度有着密切的关系，这是由于与其它金属相比有很大的变化。例如在美国，关于黄铜就制定了表 4.9 那样的标准〔38〕。

表4.9 黄铜的晶粒度和用途

晶粒的大小[μ]	拉 延 用 途
15	轻度拉延
25	浅拉延件
35	表面具有适当的光泽，且为相当深的拉延件
50	一般拉延
100	厚壁大拉延件

象这样用晶粒度来判断成形性，是铜合金特有的性质，此外，由于晶粒度的大小与 n 值有密切的关系，所以也可以用 n 值去判断成形性〔39〕。对于黄铜，当将晶粒度变化为 15~100 μ ，则 n 值变化为 0.05~0.5，而 r 值大体在 0.9 左右而无太大的变化。而且，极限拉延比 (L. D. R.) 变化为 2.0~2.2，爱利克辛值变化为 9~13，成形极限也分别有所变化。虽然如此，但还是胀形性能比拉延性能的变化大。

对于铜合金，必须特别注意的问题是材料的表面粗糙和自然裂纹(季裂)。表面粗糙与晶粒度有着密切的关系。当晶粒度大于 50 μ 时，对于材料的粗糙问题就必须予以注意。对于照相机的壳体、装饰品等制件在作电镀、涂装时将会发生问题。材料的表面粗糙、一般用爱利克辛试验或液压胀形试验来检验。

关于自然裂纹，在拉延后的制件上，就可以当作其后产生裂纹的问题来认识，但是出现裂纹的原因与残余应力及某些外界环境有关。

铜合金的另一个特征是常使用极薄的板料，且成形上的问题也不少。对于极薄的铜合金板料，一般来说，即使是质别相同的材料也还是比薄板的晶粒度细。因此，不仅仅是成形极限降低，而且表面状态、夹杂物的影响显著，易发生破裂。此外，由于拉伸试验等困难得几乎不能进行，所以不能充分控制产品质量，坯料要放置一段时间，以使材质均匀化。

其它一般注意事项同铝。

4.2.7 其它金属板〔40〕

钛、锌、镁等金属为密排六方晶系，是在成形性上具有突出特征的材料。通常钛板的 r 值非常高（2~5左右），与单向拉伸变形（拉伸试验）时相比，近似于等双向拉伸。钛板在作胀形变形时，需要很大的成形力。此外，成形后制件板厚的变形并无太大的变化。钛板等的纯度越高则成形性越好， r 值越大的材料则拉延性能越优越。由于形状性不好，容易和模具发生烧伤、粘着等问题，因而在模具设计时，必须注意使用优质润滑剂。成形件表面粗糙也常常比其它金属显著。

锌可作成铜、钛等的合金板料，当作成形用板料使用。 r 值非常小是这类合金板料的特征，而在延伸率等方面在板料平面内具有强烈的各向异性。在胀形加工时能发挥出很大的延性，拉延性能也不是太差。

纯锌、纯镁板与常温成形相比，还是建议使用温态成形为好。

作为特殊的材料尚有超塑性板〔41、42〕。超塑性材料在室温下成形是困难的，但是随着温度的上升，就可以成为有非常大的延伸率和低变形抗力的特殊材料。对于超塑性材料，一般所知道的有 Zn-Al 系（温度 250℃，延伸率 1000%），Al-Cu 系（500℃，延伸率 500%），Fe 系（800℃，350%），不锈钢（1000℃，800%）

附表 各种金属板料的成形性试验值

材 质	爱利克 辛 值	CCV值	胀形高度 (mm) ($2a = 100$)	轧 制 方 向						r 值
				屈服点 (kgf/ mm ²)	抗拉强度 (kgf/ mm ²)	屈服比	均匀延伸 率 (%)	延伸率 (%)	n 值	
含钛钢	12.3	35.5	38.9	14.1	29.3	0.48	29.6	51.5	0.26	2.06
铝镇静钢	11.6	36.7	37.8	16.1	30.7	0.52	28.7	47.4	0.23	1.88
沸腾钢	11.1	38.0	36.2	20.4	33.9	0.60	27.5	45.6	0.21	1.32
脱炭脱氮钢	12.2	36.8	38.7	13.9	28.6	0.49	31.4	51.1	0.25	1.72
热轧板 (50kg级)	—	—	—	34.6	50.5	0.68	—	37.6	0.18	0.78
45° 方 向										
				14.6	29.7	0.49	28.4	49.9	0.25	1.96
				17.3	31.4	0.55	26.7	44.5	0.22	1.68
				21.4	34.0	0.63	25.9	42.1	0.21	1.05
				14.6	29.5	0.49	29.3	48.0	0.25	1.51
				36.0	50.3	0.71	—	36.7	0.19	0.95
垂 直 方 向										
				14.8	29.3	0.51	29.2	51.6	0.25	2.85
				16.9	30.1	0.56	27.5	46.6	0.22	2.60
				20.9	33.0	0.63	27.4	46.0	0.22	1.64
				14.6	28.5	0.51	30.0	51.9	0.25	2.25
				35.7	50.5	0.70	—	33.7	0.18	0.89
										\bar{r}
										Δr
										2.21
										1.96
										1.27
										1.74
										0.89
										0.50
										0.56
										0.43
										0.48
										-0.11

(a) 软钢板

(续)

4. 成形加工

(b) 不锈钢

材 料	爱利克 辛 值	CCV	LDR	轧 制 方 向						45° 方 向						垂 直 方 向											
				屈服强度		抗拉强度		延伸率		屈服强度		抗拉强度		延伸率		屈服强度		抗拉强度		延伸率		屈服强度		抗拉强度		延伸率	
				$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	(%)	(%)	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	(%)	(%)	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	(%)	(%)	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	(%)	(%)
SUS304	11.4	36.9	2.03	30.9	67.3	0.46	53.5	0.43	1.02	30.0	63.6	0.47	59.0	0.40	1.19	30.7	63.7	0.48	60.0	0.43	0.98	1.10	0.19				
SUS430	9.1	38.6	2.03	35.7	52.3	0.67	28.0	0.18	1.09	39.8	55.3	0.72	23.5	0.16	0.83	38.8	53.8	0.72	22.0	0.16	2.29	1.26	0.86				

(c) 铝1100板

材 料	硬 度 HV	爱利克 辛 值	LDR	轧 制 方 向						45° 方 向						垂 直 方 向											
				屈服强度		抗拉强度		延伸率		屈服强度		抗拉强度		延伸率		屈服强度		抗拉强度		延伸率		屈服强度		抗拉强度		延伸率	
				$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	(%)	(%)	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	(%)	(%)	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	(%)	(%)	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	$(\sigma_{EH}/\text{kgf}/\text{mm}^2)$	(%)	(%)
软 材	22.5	11.2	2.075	2.8	8.7	0.32	42.8	0.24	0.60	2.8	8.9	0.32	44.0	0.3	0.53	3.0	8.4	0.36	41.9	0.28	0.94	0.65	0.24				
半硬材	41.9	8.2	1.975	11.9	13.5	0.87	11.9	0.10	0.41	12.1	13.7	0.88	10.0	0.09	1.12	13.0	14.2	0.92	10.0	0.08	0.81	0.87	-0.51				

(d) Al-3.5%Mg

冷轧率 (%)	退火温度 (°C)	硬度 HV	爱利克辛值	LDR	轧制方向				n 值	r 值
					屈服强度 (kgf/mm ²)	抗拉强度 (kgf/mm ²)	屈服比	延伸率 (%)		
2.5	100	81.4	9.00	2.02	18.2	29.6	0.62	18.5	0.19	0.56
2.5	200	72.6	9.35	2.06	13.3	29.5	0.45	22.4	0.29	0.58
2.5	300	72.2	9.6	2.06	11.8	28.9	0.41	24.3	0.33	0.60
2.5	400	70.2	9.5	2.06	11.7	29.2	0.40	22.6	0.33	0.56
5.0	100	84.4	9.2	2.02	16.5	30.4	0.54	20.8	0.23	0.57
5.0	200	74.9	9.3	2.06	15.2	29.6	0.51	20.3	0.33	0.58
5.0	300	72.7	9.4	2.06	11.7	29.4	0.40	25.2	0.29	0.58
5.0	400	70.4	9.2	2.06	11.2	29.4	0.38	21.7	0.30	0.55
10.0	100	89.3	8.6	1.97	23.1	31.9	0.72	13.1	0.16	0.50
10.0	200	81.3	8.9	2.02	20.3	31.5	0.53	20.9	0.26	0.54
10.0	300	75.9	9.1	2.06	13.0	29.2	0.45	21.8	0.29	0.58
10.0	400	71.7	9.0	2.02	11.3	29.2	0.39	23.9	0.34	0.57

(e) Al-1¹/₄Mn

冷轧率 (%)	硬度 HV	爱利克辛值	LDR	轧制方向				垂直方向				平均 值									
				屈服强度 (kgf/mm ²)	抗拉强度 (kgf/mm ²)	屈服比	延伸率 (%)	n 值	r 值	屈服强度 (kgf/mm ²)	抗拉强度 (kgf/mm ²)	屈服比	延伸率 (%)	n 值	r 值						
0	27.8	11.9	1.94	2.9	8.8	0.33	49.0	0.23	0.67	2.9	8.7	0.33	29.5	0.23	0.60	8.8	9.8	0.33	39.2	0.23	0.63
5	32.9	11.0	1.97	8.3	10.1	0.82	35.3	0.15	0.60	8.4	9.4	0.89	16.5	0.14	0.57	9.8	10.6	0.85	25.9	0.15	0.58
10	37.3	10.4	1.98	9.6	10.3	0.93	24.6	0.10	0.49	8.8	10.8	0.81	11.6	0.10	0.32	10.6	12.2	0.87	18.1	0.10	0.40
20	42.0	10.1	1.98	11.0	12.0	0.91	16.6	<0.05	0.34	11.1	12.4	0.90	6.2	<0.05	0.27	11.1	14.3	0.90	11.4	<0.05	0.30
40	48.0	9.4	1.94	13.2	13.9	0.93	7.3	<0.03	0.29	13.8	14.6	0.94	5.2	<0.03	0.24	13.9	16.0	0.94	6.3	<0.03	0.26
60	52.1	8.9	1.91	14.6	15.7	0.91	7.2	<0.03	0.23	14.4	16.3	0.88	4.9	<0.03	0.22	15.1	16.0	0.90	6.0	<0.03	0.22

(续)

(f) 纯铜 (冷轧状态)

冷 轧 率 (%)	硬 度 HV	爱 利 克 值		制 方 向						垂 直 方 向						平 均 值						
		辛 润 滑 脂	LDR	屈 强 比	抗 拉 强 度 (kgf/mm ²)	屈 强 比	延 伸 率 (%)	n 值	r 值	屈 强 度 (kgf/mm ²)	抗 拉 强 度 (kgf/mm ²)	屈 强 比	延 伸 率 (%)	n 值	r 值	屈 强 度 (kgf/mm ²)	抗 拉 强 度 (kgf/mm ²)	屈 强 比	延 伸 率 (%)	n 值	r 值	
																						屈 强 度 (kgf/mm ²)
0	49.5	12.4	12.6	2.04	5.25	21.7	0.24	51.6	0.43	0.92	4.98	21.1	0.24	51.0	0.44	0.99	5.12	21.4	0.24	51.2	0.44	0.95
3.9	70.0	10.6	11.3	2.06	12.2	22.2	0.55	42.1	0.17	0.85	14.1	21.7	0.65	46.1	0.23	0.94	12.8	22.0	0.58	43.4	0.19	0.88
12.0	81.0	9.5	10.0	2.04	21.0	24.2	0.86	31.9	<0.09	0.67	21.0	23.6	0.89	31.0	0.05	0.65	21.0	23.9	0.88	31.5	0.07	0.66
19.4	92.6	9.0	9.5	2.04	24.5	26.9	0.91	14.1	<0.05	0.54	25.2	26.9	0.94	10.6	0.05	0.61	24.8	26.9	0.92	12.3	0.05	0.57
36.0	108	8.9	9.3	1.97	25.5	32.2	0.79	9.4	<0.05	0.46	25.6	33.2	0.77	6.3	0.05	0.58	25.6	32.8	0.78	7.9	<0.05	0.52
40.0	111	8.1	8.6	1.94	26.7	33.2	0.80	3.7	<0.05	0.20	30.4	34.3	0.89	3.4	0.05	—	28.6	33.7	0.85	3.5	<0.05	0.20
60.2	117	7.0	7.2	1.88	33.1	35.7	0.93	2.6	<0.05	—	32.5	39.0	0.83	3.3	0.05	—	32.8	37.4	0.88	2.9	<0.05	—

4. 成形加工

(g) 纯铜 (退火 250°C—一小时)

0	47.0	12.1	12.5	2.04	5.08	21.2	0.24	53.1	0.44	0.98	4.26	21.1	0.20	56.0	0.50	1.05	4.67	21.2	0.22	54.6	0.47	1.01
3.9	68.0	10.5	11.3	2.04	11.3	21.9	0.51	43.9	0.21	0.86	14.0	22.2	0.63	51.5	0.28	0.97	12.6	22.1	0.57	47.7	0.25	0.91
12.0	79.0	9.7	10.3	2.06	18.2	23.8	0.76	33.1	0.14	0.78	17.8	23.7	0.75	42.1	0.14	0.82	18.0	23.8	0.75	37.6	0.14	0.80
19.4	91.0	9.1	9.8	2.04	23.3	26.3	0.89	18.4	0.07	0.60	24.2	26.7	0.91	14.5	0.07	0.40	23.7	26.5	0.90	16.4	0.07	0.50
40.0	89.0	8.9	9.6	2.00	14.9	25.9	0.58	20.6	0.13	0.67	17.8	27.3	0.65	19.6	0.10	0.65	16.4	26.6	0.61	20.1	0.11	0.66
60.2	68.0	10.4	11.0	2.02	7.4	23.5	0.32	39.1	0.31	0.70	5.8	23.9	0.24	34.3	0.30	0.90	6.63	23.7	0.28	36.7	0.30	0.80

(h) 无氧铜

材料	硬度 HV	爱利 克辛 LDR 值	轧制方向					45°方向					垂直方向						
			屈服 强度 (kgf/ mm ²)	抗拉 强度 (kgf/ mm ²)	屈 强 比	延 伸 率 (%)	n 值	屈服 强度 (kgf/ mm ²)	抗拉 强度 (kgf/ mm ²)	屈 强 比	延 伸 率 (%)	n 值	屈服 强度 (kgf/ mm ²)	抗拉 强度 (kgf/ mm ²)	屈 强 比	延 伸 率 (%)	n 值	r 值	Δr
软 材	49.5	13.4	4.6	22.4	0.2156	0.50	0.90	4.7	21.6	0.2246	0.49	0.94	4.9	22.0	0.2252	0.49	0.77	0.89	-0.11
半硬材	54.0	9.3	22.5	25.3	0.8932	0.05	0.76	22.0	23.8	0.9234	0.047	0.87	22.8	24.2	0.9438	0.041	0.90	0.85	-0.04

(i) 黄铜2种(65/35)软材

材料	板厚	硬度 HV	爱利克 辛 值	轧制方向					45°方向					垂直方向					
				屈服 强度 (kgf/ mm ²)	抗拉 强度 (kgf/ mm ²)	屈 强 比	延 伸 率 (%)	n 值	屈服 强度 (kgf/ mm ²)	抗拉 强度 (kgf/ mm ²)	屈 强 比	延 伸 率 (%)	n 值	屈服 强度 (kgf/ mm ²)	抗拉 强度 (kgf/ mm ²)	屈 强 比	延 伸 率 (%)	n 值	r 值
BsR2AS	0.2	81.9	12.3	11.2	33.6	0.30	56	0.554	0.96	12.0	33.4	0.28	60	0.552	11.7	33.3	0.29	57	0.490
-O	0.6	83.1	12.7	11.0	35.9	0.31	59	0.53	0.86	11.6	34.8	0.33	65	0.52	11.6	35.7	0.33	63	0.53

(续)

(j) 黄铜3种(60/40)软材

材 料	硬度 HV	爱利克辛值	LDR	屈服点 (kgf/mm ²)	抗拉强度 (kgf/mm ²)	轧 制 方 向			r 值
						屈服比	延伸率 (%)	n 值	
软材	102	12.3	2.2	18.0	40.0	垂 直 方 向			0.82
						垂 直 方 向①			
						垂 直 方 向			
				18.9	38.4	0.49	55.9	0.44	0.93
				16.9	38.7	0.44	53.2	0.45	0.81
								r 值	Δr
								0.87	-0.12

①可能是45°方向而原文为垂直方向——译注。

(k) 红铜板

材 料	硬度 HV	LDR	爱利克辛值	轧 制 方 向			r 值		
				屈服点 (kgf/mm ²)	抗拉强度 (kgf/mm ²)	屈服比			
BsP3-0	81.6	2.17	11.0	垂 直 方 向			0.97		
				45° 方 向					
				垂 直 方 向					
				12.2	30.6	0.40	41.8	0.40	0.88
				12.0	29.8	0.40	42.5	0.40	0.88
				12.2	29.6	0.41	44.1	0.38	0.82
								r 值	Δr
								0.89	0.02

(l) 锌白铜板

材 料	硬度 HV	LDR	爱利克辛值	轧 制 方 向			r 值		
				屈服点 (kgf/mm ²)	抗拉强度 (kgf/mm ²)	屈服比			
NSR2-0	12.6	2.25	11.2	垂 直 方 向			0.63		
				45° 方 向					
				垂 直 方 向					
				20.9	45.8	0.46	36.8	0.41	0.63
				20.3	44.4	0.46	42.3	0.41	11.9
				20.9	45.7	0.45	41.4	0.44	1.00
								r 值	Δr
								-1.00	-0.37

(mm) 钛、钛合金

材	料	晶	格	爱利克 辛	LDR	轧制方向						45° 方向					
						屈服强度 (kgf/mm ²)	抗拉强度 (kgf/mm ²)	屈服比	延伸率 (%)	n 值	r 值	屈服强度 (kgf/mm ²)	抗拉强度 (kgf/mm ²)	屈服比	延伸率 (%)	n 值	r 值
钛(软材)		α 六方晶格		11.3	2.45	31.1	37.7	0.82	36.0	0.10	2.25	30.3	37.3	0.82	33.5	0.12	2.08
钛(硬材)		α 六方晶格		7.5	1.91	48.9	62.7	0.78	24.5	0.14	0.62	56.5	61.8	0.91	24.5	0.11	1.28
Ti+5%Al+ 2.5%Sn		α 六方晶格		2.0	1.33	75.6	80.0	0.94	14.0	0.07	2.46	77.6	79.0	0.98	10.5	<0.05	1.41
Ti+6%Al+4%V		α/β 六方体 心立方晶格		4.4	1.36	93.8	97.2	0.97	12.0	<0.05	1.09	88.4	88.9	0.99	11.5	0	1.69
Ti+2%Cu		α 六方晶格		7.1	2.00	50.6	62.3	0.81	23.0	0.13	1.32	52.2	59.0	0.88	24.0	0.13	2.07
Ti+15%Mo		β 体心立方晶格		8.4	2.34	59.8	74.7	0.80	37.0	0.09	1.41	59.6	75.3	0.79	36.0	0.24	1.56
						垂直方向						平均值					
材	料	品	种	屈服强度 (kgf/mm ²)	抗拉强度 (kgf/mm ²)	屈服比	延伸率 (%)	n 值	r 值	屈服强度 (kgf/mm ²)	抗拉强度 (kgf/mm ²)	屈服比	延伸率 (%)	n 值	r 值	r	Δr
钛(软材)		α 六方晶格		32.4	38.4	0.84	33.0	0.12	1.61	31.0	37.7	0.82	34.0	0.11	2.01		-0.15
钛(硬材)		α 六方晶格		62.6	69.8	0.90	21.0	0.15	1.51	56.1	64.0	0.88	23.7	0.13	1.17		-0.22
Ti+5%Al+ 2.5%Sn		α 六方晶格		76.8	76.8	0.96	16.5	<0.05	2.46	76.9	79.4	0.97	12.9	0.05	1.94		1.05
Ti+6%Al+4%V		α/β 六方体 心立方晶格		94.0	94.0	1.00	14.5	0	1.44	91.1	92.3	0.99	12.4	0.01	1.48		-0.43
Ti+2%Cu		α 六方晶格		55.8	60.1	0.93	22.5	0.12	2.38	52.7	60.1	0.88	23.4	0.13	1.96		-0.22
Ti+15%Mo		β 体心立方晶格		61.4	77.5	0.79	31.0	0.29	1.43	60.1	75.7	0.79	35.0	0.22	1.49		-0.14

(续)

4. 成形加工

(B) 锌(150°C15分钟→冷轧→100°C1小时退火)

冷轧率(%)	硬度 HV	爱利克辛值	LFR	轧制方向						垂直方向						平均					
				屈服强度 (kgf/mm ²)	抗拉强度 (kgf/mm ²)	屈强比	延伸率 (%)	均匀延伸率	r 值	屈服强度 (kgf/mm ²)	抗拉强度 (kgf/mm ²)	屈强比	延伸率 (%)	均匀延伸率	r 值	屈服强度 (kgf/mm ²)	抗拉强度 (kgf/mm ²)	屈强比	延伸率 (%)	均匀延伸率	r 值
9	49.7	4.7	1.43	3.64	7.77	0.47	20.3	15.4	0.10	7.56	14.3	0.53	12.2	8.0	0.21	5.60	11.0	0.51	16.2	11.7	0.16
5	52.9	6.2	1.48	5.98	10.9	0.55	42.9	36.7	0.14	12.2	18.1	0.68	15.8	15.1	0.64	9.11	14.5	0.63	29.3	25.9	0.39
9.4	53.9	9.0	1.61	7.35	12.0	0.63	49.5	41.4	0.24	12.8	20.2	0.64	18.1	8.3	1.43	10.1	16.1	0.63	33.8	24.8	0.83
19.3	56.0	8.9	1.73	8.73	13.7	0.64	50.0	49.5	0.28	13.5	21.4	0.63	31.0	21.1	1.50	11.1	17.5	0.64	40.5	35.3	0.89
40.0	62.8	8.4	1.82	9.95	16.5	0.61	39.1	31.6	0.33	12.1	22.8	0.53	26.5	20.5	1.15	11.0	19.7	0.56	32.8	26.0	0.74
60.2	65.0	8.1	1.61	8.40	14.5	0.58	22.8	16.7	0.08	7.56	19.0	0.40	17.6	8.1	0.28	7.9	16.7	0.48	20.2	12.4	0.18

4.3 成形性试验〔45〕、〔46〕

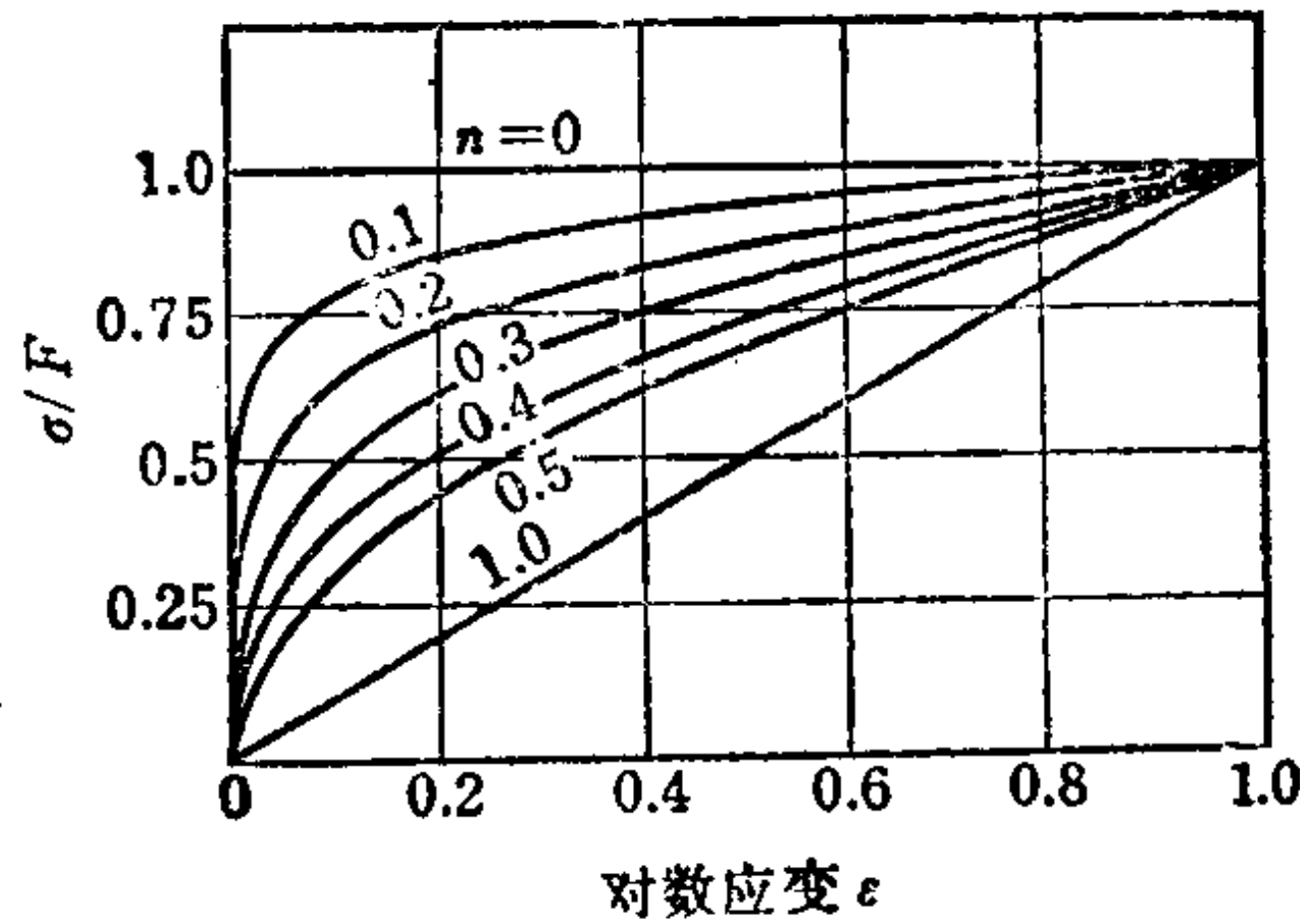
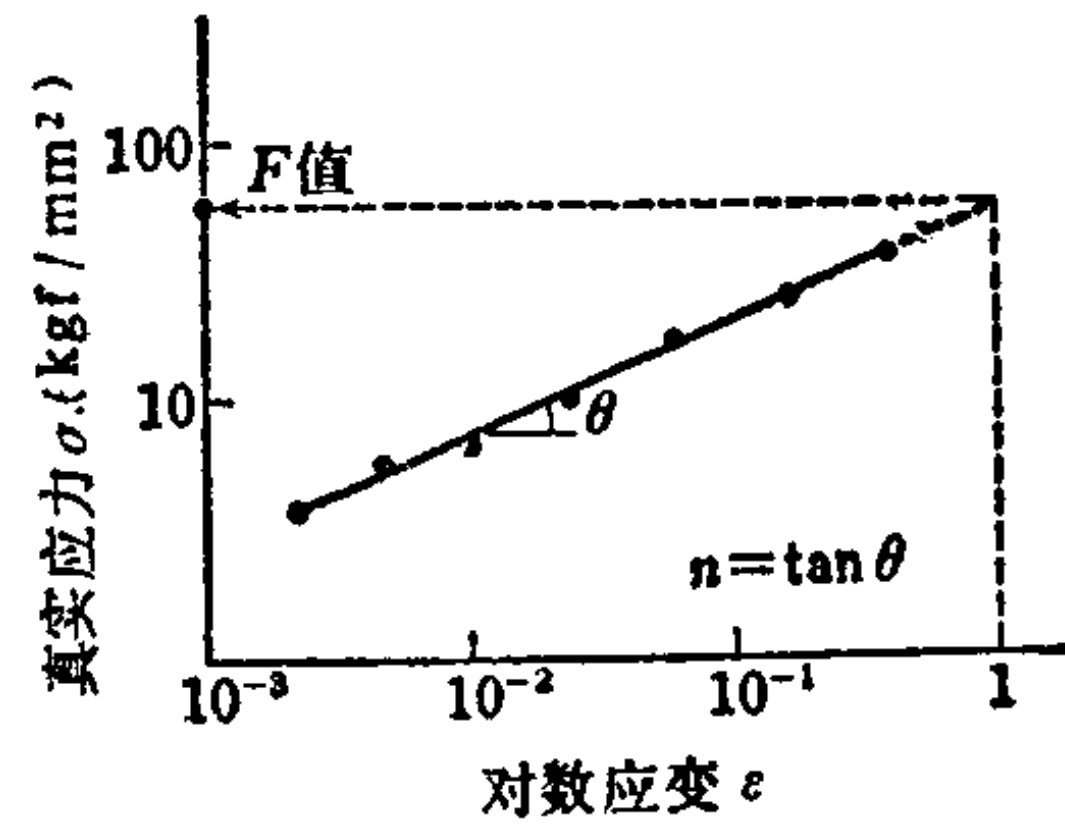
成形性试验大致分为两类。即试验值的物理意义比较明确,能反映出与成形性有密切关系的基本性质的基础试验。以及通过单纯而典型的冲压成形,以其结果作为试验值的模拟成形试验。表

表4.10 各成形性和成形性试验以及对应的试验值

成形性	试验方法(项目)	试验值
胀形性	拉伸试验(1)	加工硬化指数 n 值 均匀延伸率 e_u (%) 延伸率 e_B (%)
	液压胀形试验(2)	加工硬化指数 $[n]$ 值 延性 T 值 胀形系数 k 最大胀形高度 h_{max} (mm)
	爱利克辛试验(3)	爱利克辛值 I_E (mm)
	纯胀形试验(4)	极限胀出高度(mm)
拉延性	拉伸试验(1)	塑性应变比 r 值 宽度收缩应变 ϕ 值
	液压胀形试验(2)	加工硬化各向异性指数 X 值(包含拉伸试验值)
	拉延试验(5)	极限拉延比L. D. R. (用平底凸模)
	T. Z. P. 试验(5)	Engelhardt值 T 值(%)
拉延胀形复合成形性	拉伸试验(1)	$n \times r$ 值 n 值
	锥杯试验(6) (JIS)	锥杯值C. C. V. (mm) 锥形 L. D. R.
	拉延杯形试验(5)	L. D. R. (用球底凸模) 极限成形高度 h_{max} (mm) 外径比 η
翻边性	拉伸试验(1)	极限变形能 $\bar{\epsilon}_f$ 加工硬化指数 n 值 均匀延伸率 e_u (%) 延伸率 e_B (%)
	液压胀形试验(2)	加工硬化指数 $[n]$ 值 延性 T 值
	扩孔试验(7)	扩孔系数 λ (%)

(续)

成形性	试验方法(项目)	试验值
弯曲性能	弯曲试验(8)(JIS)	最小弯曲半径
板面内各向异性	拉伸试验(1) 拉延杯形试验(5) 锥杯试验(6)	Δr 值 突耳率 h_e (%) 外径比的比较
表面恶化性	拉伸试验(1) 液压胀形试验(2) 爱利克辛试验(3) (用切槽的正方形板坯) 折曲试验(9)	屈服现象, 拉伸滑移, 表面粗糙 表面粗糙、起脊等 表面粗糙 拉伸滑移 残余曲率 R 值
形状性	拉伸试验(1) 折曲试验(9) 实物试验(9)	弹性模量 E (kgf/mm) 屈强比 σ_s/σ_b , r 值 所需力 F 值 成形件尺寸差等
抗起皱性	拉伸试验(1)	r 值, n 值
二次成形性	再拉延试验(9)等	极限再拉延比等

图4.24 n 值和应力-应变曲线的形状图4.25 n 值、 F 值的求法

4.10所示为对各种成形性的评价有用的各种试验法和试验值。

4.3.1 拉伸试验〔47〕

作为成形性试验的拉伸试验, 要求用13A号试件(JIS Z 2201-1968)进行。屈服点 σ_s (或 $\sigma_{-0.2}$)、抗拉强度 σ_b 、破断延

伸率 e_u 的测定, 按金属材料拉伸试验方法。称最大负荷时的延伸率为均匀延伸率 e_u 。

在由拉伸试验的载荷 P —延伸率 $e = (l - l_0)/l_0$ 曲线, 求均匀伸长前的真实应力 σ —对数应变 ε 线图 (塑性曲线) 时, 设变形前的断面积为 $A_0 (= t_0 \times w_0)$, 并按下式确定:

$$\text{真实应力 } \sigma = P \times l / A_0 \times l_0$$

$$\text{对数应变 } \varepsilon = \ln(l/l_0)$$

式中 l_0 ——变形前的标点距离;

l ——变形后的标点距离 (mm);

t_0, w_0 ——分别为变形前试样的板厚、板宽 (mm);

\ln ——自然对数。

这种真实应力—应变线图大多有 $\sigma = F\varepsilon^n$ 近似关系。

a. n 值、 F 值 (C 值) 的决定法 n 值不同时塑性曲线 (应力—应变图) 如图 4.24 所示, n 值越大则加工硬化越大, 拉伸变形时塑性不稳定 (产生缩颈) 难于出现, 在较广范围内保持变形的均匀性而不产生缩颈, 能得到大的变形。因此, 可以说材料的胀形性能、翻边性能良好。

为求 n 值、 F 值, 一般用以下方法。

由 $\sigma = F\varepsilon^n$ 取对数:

$$\lg \sigma = \lg F + n \lg \varepsilon$$

此公式在两对数坐标上为直线 (图 4.25), 直线的斜率为 n 值, $\varepsilon = 1$ 时应力值为 F 值, 为求得此直线:

(i) 取塑性曲线上的数点, 用最小二乘法近似地求 n 和 F 值。

(ii) 取塑性曲线的数点作于两对数坐标图上, 连接这些点而引出直线。

(iii) 取代表性的两点 (如均匀延伸率为 25% 的材料, 取 10% 和 20% 两点), 求出各点的应力, 代入 $\sigma = F\varepsilon^n$ 中, 联立求解得出 n 和 F 。

(iv) 因理论式为 $n = \varepsilon_u$, $\varepsilon_u = \ln(1 + e_u)$, e_u 为均匀延伸

率，由此求出 n 值。

方法 (iii) 如在较广应变范围内不能保证直线性时近似度差。方法 (iv) 一般情况近似度也差，应尽可能不用，推荐用 (i) 或 (ii) 法。

b. r 值的决定法 拉伸试验时板宽方向对数应变 ϵ_w 和板厚方向对数应变 ϵ_t 之比，用 r 来表示。称为塑性应变比、 r 值、Lankford 值等。同种材料之间按 r 值往往可评价其深拉伸性能。不同材料之间的对比则是需要研究的问题。 r 值越小则材料的形状性越好。

取延伸率为 20% 或 15% 的点，求得在标点距离 l 内的板厚 t 、板宽 w ， r 值用下式算出。

$$r = \ln(w_0/w) / \ln(t_0/t) = \ln(w_0/w) / \ln(l \times w / l_0 \times w_0)$$

式中 t_0 、 w_0 、 l_0 ——分别为应变前的板厚、板宽和标点距离。

c. 由破断的拉伸试样可求如下成形性指标(图 4.26)。

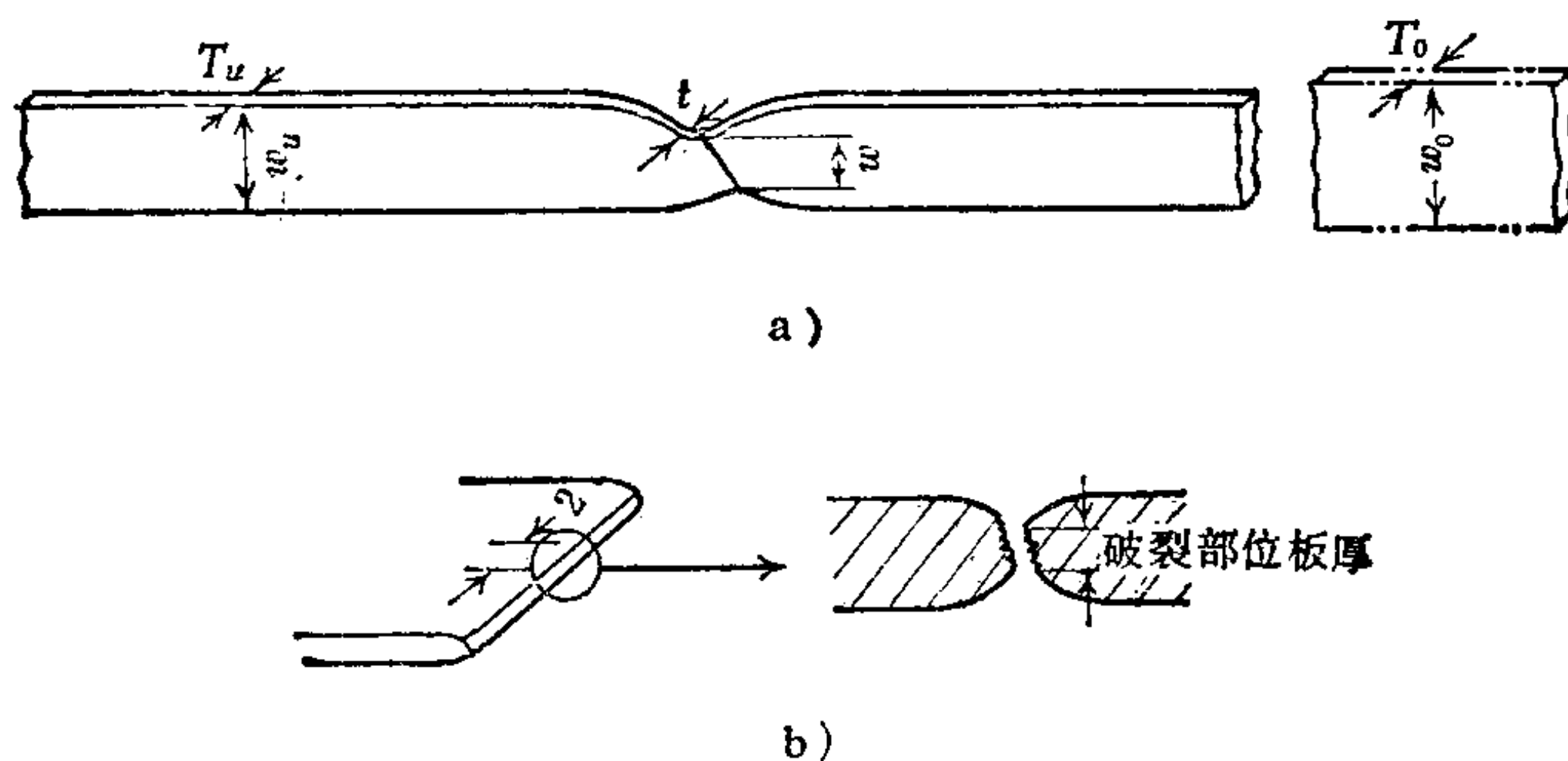


图4.26 通过拉伸试验求成形性指标的示例

a) 求 ϕ 、 u 、 B 值时参考 b) 求极限变形能 ϵ_f 、 ϵ_x 、 ϵ_t 时参考

(i) 宽度收缩应变 ϕ 值 $= \ln(w_0/w)$ [48]，和 r 值密切相关，可用来评价深拉伸性能。也可用 w_0/w 表示。

(ii) 宽度均匀收缩极限 [49]

$$B = (w_0/w_u)$$

$$u = \ln B = \ln(w_0/w_u) = nr / (1 + r)$$

式中 w_u ——最大载荷时的板宽。用来评价具有较大胀形部分的深拉延—胀形的复合成形性。

(iii) 极限变形能 (破裂部位应变) $\bar{\epsilon}_f$ [50] 求出破裂部位板厚对数应变 ϵ_t 和标点距离非常小的 (2 mm) 宽度方向的对数应变 ϵ_y 后, 根据体积一定条件, 求得长轴方向的破裂应变 ϵ_x 为:

$$\epsilon_x = -(\epsilon_t + \epsilon_y)$$

由这 3 个应变可求破裂部位的相当应变 $\bar{\epsilon}_f$, 因 $\bar{\epsilon}_f$ 和 ϵ_x 大致相同, $\bar{\epsilon}_f$ 表示了和 ϵ_t 密切相关的材料的极限变形能, $\bar{\epsilon}_f$ 和翻边性能, 特别是剪断边缘的翻边性能密切相关。

(iv) 拉伸试验的平均值和板面方向性 一般板材的轧制方向称为纵向或 0° 方向, 和轧制方向垂直的方向称为横向或 90° 方向。中间角度方向称为斜方向或 45° 方向。当这些值不等时, 称这板具有板面方向性。广泛应用的所谓平均法就是将板面按 45° 划分, 把各方向的试验值平均后的值称为平均值并用下式。例如 r 的平均值为

$$\bar{r} = (r_{0^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ})/4$$

0° 、 45° 、 90° 等下角标表示拉伸方向。板面的方向性, 以 r 为例多用下式求得:

$$\Delta r = (r_{0^\circ} + r_{90^\circ} - 2r_{45^\circ})/2$$

Δr 值表示了板面的塑性方向性, 往往与深拉延容器口部产生突耳有关。 $\Delta r = 0$ 时不产生突耳, $\Delta r > 0$ 时 0° 、 90° 方向产生突耳, $\Delta r < 0$ 时 45° 方向产生突耳。

拉伸试验后试样如产生拉伸滑移和表面粗糙现象, 如以此作为冲压成形材料将引起发裂。

4.3.2 液压胀形试验 [51]、[52]

如图 4.27 所示, 向固定在半径为 a mm 的圆形凹模上的板坯施加油压 p 而胀形, 如为等方向性的材料, 则在顶部形成半径 ρ 的球面, 为等双向拉应力状态, 根据膜理论, 可建立下列公式:

$$\sigma = p\rho/2t$$

式中， t 为顶点处的板厚，如求得顶点圆周方向和半径方向的对数应变为 ϵ_θ 、 ϵ_r ，则 $t = t_0 e^{-2\epsilon_\theta}$ 。曲率半径 ρ 通过求顶部近旁 3 点的几何学位置关系可算出，另一较好的方法是测定对于各个弦长的平均曲率半径，外推这些结果而求出顶点处的曲率半径。对于等方向性材料而言，平面等双向受拉的板厚应变 ϵ_t 和相当应变 $\bar{\epsilon}$ 相等。

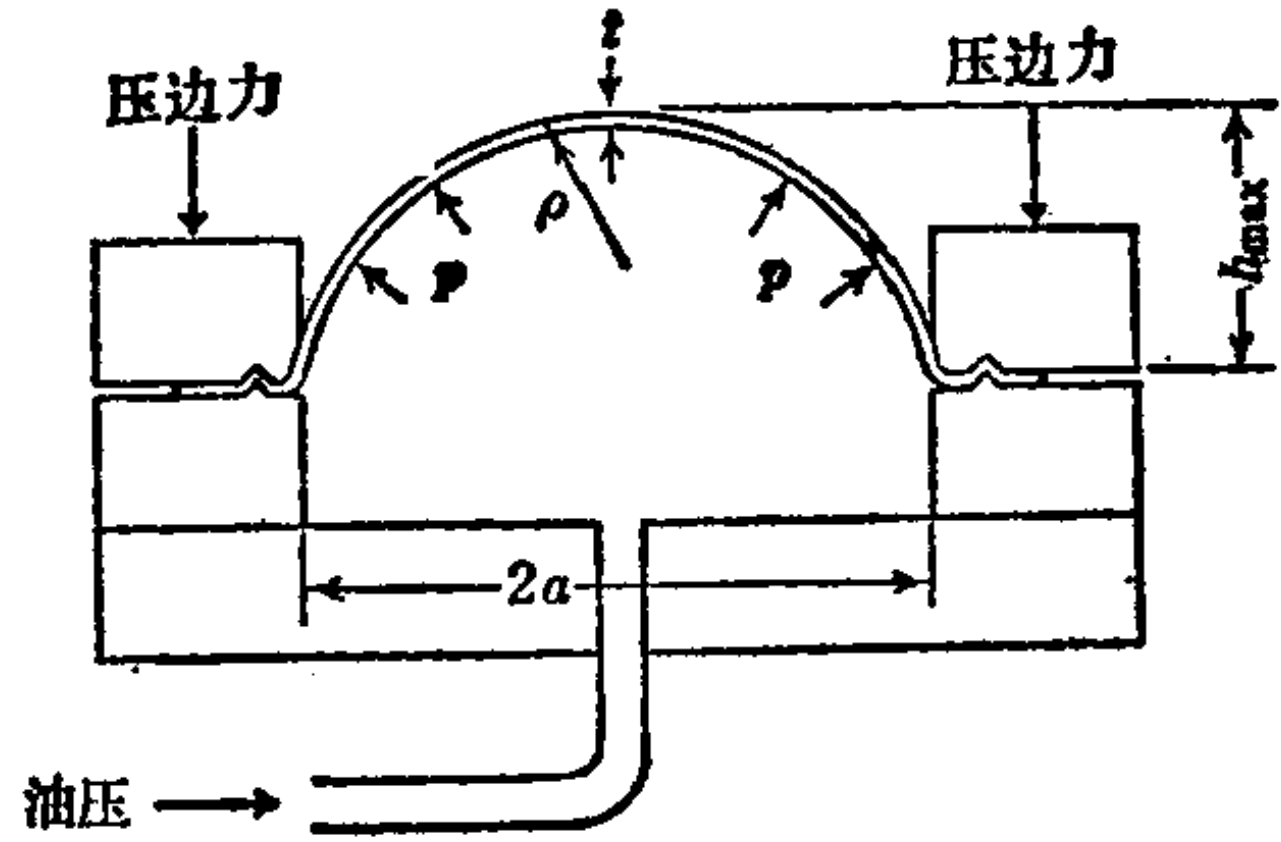


图4.27 液压胀形试验

一般情况下，液压胀形试验由于破裂时板厚应变变量约为拉伸试验时均匀应变量的 2 倍，故可获得比拉伸试验应变范围宽的塑性曲线。

采用和拉伸试验时同样的程序，由公式 $\sigma_n = [F]e_r[n]$ 表示的塑性曲线，可求得近似的 $[F]$ 值和 $[n]$ 值。由于在冲压成形时材料多处于双向受拉状态，等双向受拉时的 $[n]$ 值要比拉伸试验的 n 值更能正确评定胀形性能。为了更正确评定和理解变形行为，可采用 $n^* \sim \epsilon_t$ 曲线，该曲线是通过随着 $\bar{\epsilon}$ 的增大而连续求在曲线上极小应变范围（0.03 左右）的加工硬化指数 n^* 而建立的。该曲线表现了加工硬化率对应于应变量的变化， n^* 在全应变范围内的平均值为 $[n]$ 值。

把拉伸试验的塑性曲线 ($\sigma - \epsilon$) 和等双向拉伸的塑性曲线 ($[\sigma] \sim [\epsilon]$) 重合起来，对于大多数材料，两曲线不相一致。即使用基于各向异性理论的成组 r 值来修正，不一致的材料也很多。这种不一致是一种塑性的各向异性，用相等的相当应变前的应力比 $[\sigma] / \sigma = X$ 表示， X 值称为加工硬化各向异性指数^[58]。 X 值越大则深拉延性能越好，能对不同种类材料的深拉延性能作直接比较。

被胀形的板坯在顶点产生破裂。距其破裂部分极近部位的板

厚应变特称为 T 值，有时用来作为表示材料的变形能力的指标。

由破裂时的最大成形高度 h_{\max} 可得 $K = (h_{\max}/a)^2$ ， K 称为胀形系数，当所胀形的形状为球面的一部分时为表面积的增加率。 K 越大则胀形性能越好，但由于和工具（凸模）间无摩擦，形状不受凸模制约而和用凸模时大不相同，故对于用凸模时的胀形性能评定未必有用。

对胀形件的表面出现不平和起脊等也要考虑（参照 4.2.4）。

除用圆形模具以外的其它模具，也能作不等双向拉伸的变形状态的试验。

4.3.3 爱利克辛 (Erichsen) 试验 (JIS Z 2247-1970) [54]

作为成形性试验，是一种最为古老和最为普及的试验方法。虽对其试验设备的问题已逐渐清楚，遗憾的是至今连最简单的改变也没有。因此，在 JIS 中虽确认了 A 法和 B 法两种方法，但推荐最初加 1 吨压边力的 B 法。试验工具如图 4.28 所示，试验值称为爱利克辛值 I_r ，为破裂时凸模行程（最大成形深度）用 mm 表示的值，测到小数点后两位，圆整到小数点后 1 位。破裂点的确定、工具尺寸、表面光洁度、压边力、润滑、凸模速度等因素都影响试验值，由于操作偏差、设备偏差将使实验值出现波动。例如，图 4.29 所示为由于操作偏差、设备偏差引起的波动。这样，即使用同样的材料也有相当大的偏差，这点必须注意。

作为成形性试验，是一种最为古老和最为普及的试验方法。虽对其试验设备的问题已逐渐清楚，遗憾的是至今连最简单的改变也没有。因此，在 JIS 中虽确认了 A 法和 B 法两种方法，但推荐最初加 1 吨压边力的 B 法。试验工具如图 4.28 所示，试验值称为爱利克辛值 I_r ，为破裂时凸模行程（最大成形深度）用 mm 表示的值，测到小数点后两位，圆整到小数点后 1 位。破裂点的确定、工具尺寸、表面光洁度、压边力、润滑、凸模速度等因素都影响试验值，由于操作偏差、设备偏差将使实验值出现波动。例如，图 4.29 所示为由于操作偏差、设备偏差引起的波动。这样，即使用同样的材料也有相当大的偏差，这点必须注意。

另外，根据某试验为例，以白色凡士林作润滑剂用 A 法试验软钢板时，由一台试验设备所引起的试验值的标准偏差约为 0.15mm，当试验设备和操作者不同时约为 0.4。从而，取试验次

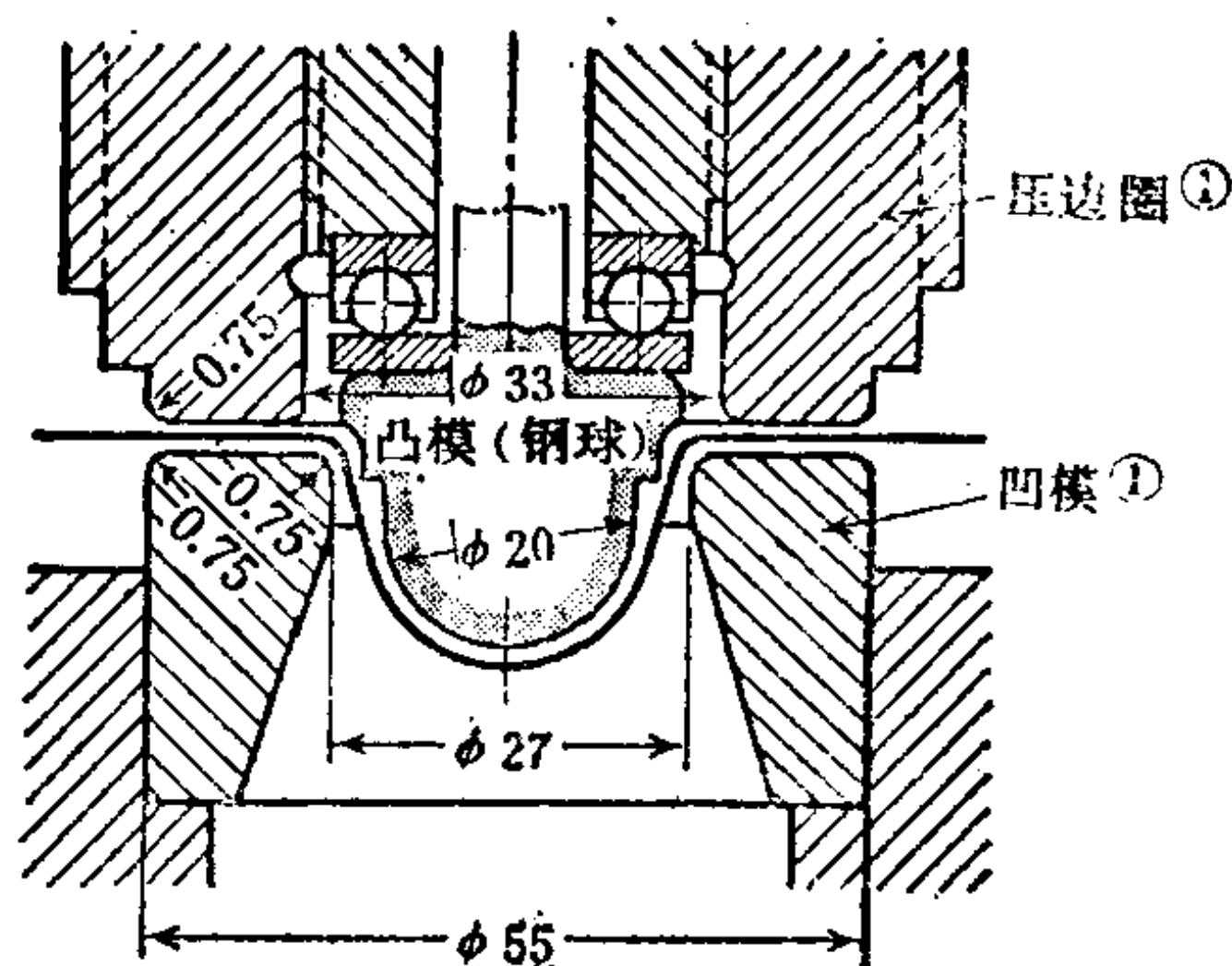


图4.28 爱利克辛试验工具主要部分的尺寸与形状

① 原图注颠倒。——译注

另外，根据某试验为例，以白色凡士林作润滑剂用 A 法试验软钢板时，由一台试验设备所引起的试验值的标准偏差约为 0.15mm，当试验设备和操作者不同时约为 0.4。从而，取试验次

数为 3~5 时, 危险率 5% 的可靠范围对同一试验设备为 0.17~0.13, 对不同试验设备为 0.45~0.35。并且, 为比较两种材料时, 如取试件数为 3~5 件, 则在同一试验设备上平均值的偏差为 0.24~0.19, 当试验设备不同时为 0.64~0.49, 可以此作 5% 危险率的偏差判断。由于具有这种性质, 并且操作简单, 也用以作为稍包含凸缘流入的胀形性能试验的简便方法。

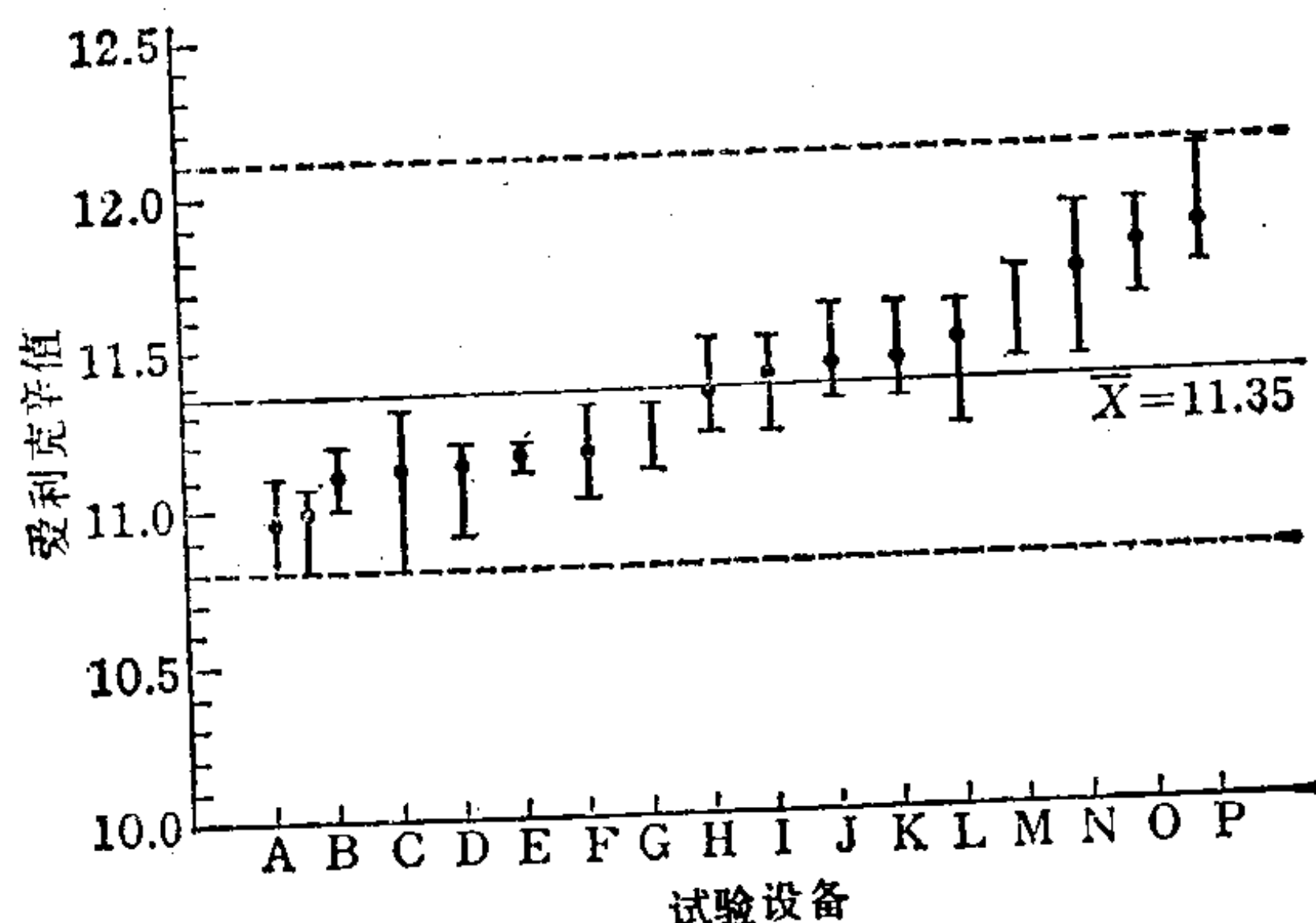


图4.29 爱利克辛试验值的操作偏差和设备偏差

用爱利克辛试验求爱利克辛值的同时, 也能预测关于成品件出现表面粗糙和表面状态变化 (关于材料表面处理等问题)。观察破裂时和某种程度成形时试样的表面状态, 和预先准备的标样 (程度标样等) 作比较, 以进行判断。并且, 也能用来作胀形时润滑剂的比较。

美国广泛采用奥尔申试验 (olsen cup test) 来代替爱利克辛试验。其工具和机构和爱利克辛试验设备相类似。尺寸全部采用英制, 国际性少。

4.3.4 凸模纯胀形试验

由于圆筒成形用模具平面上的凹槽完全制止了外缘材料的被拉入, 故为纯粹的胀形试验。通常, 采用球底凸模, 但使用平底凸模则可作包含强烈的弯曲变形的胀形性能评定。以破裂发生时

的成形深度（和凸模行程相等）作为试验值。由于润滑状态和成形速度等试验条件会影响试件的破裂形式，因此要求严格保持一致。

在拉延杯形件的工具上设置适当的凹槽即可。以瑞典的纯胀形试验方法为代表，用图 4.30 所示尺寸的工具进行试验。这时，压边力要足够。

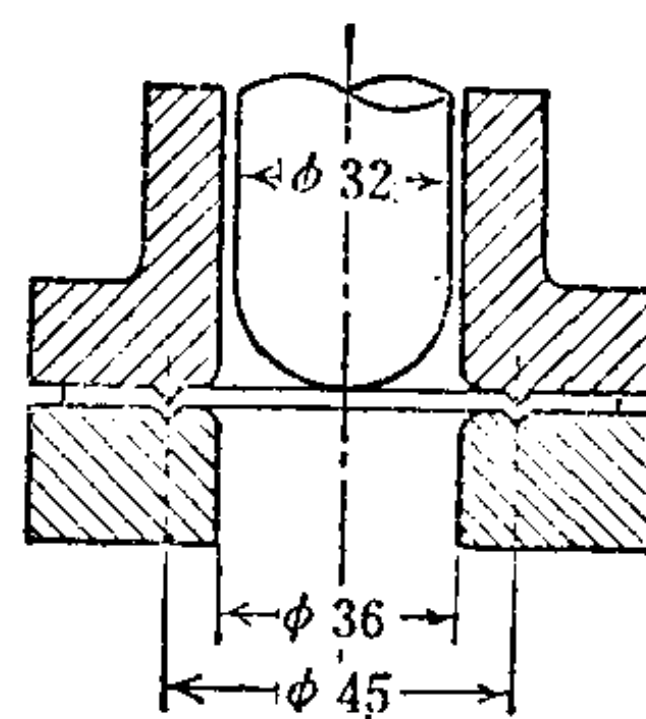


图4.30 纯胀形试验

4.3.5 拉延杯形件试验

为了用圆板试件和平底凸模求圆筒形件的拉延极限 L.D.R, 以比较拉延性能的试验。包括斯维福特 (Swift) 拉延试验 (参照表 4.11), 爱利克辛拉延试验 (凸模直径为 32 mm) 以及采用以这些为标准工具的许多方法。

多数材料的 L.D.R. 在 2 左右, 按惯例读到小数点以下两位。极限点的求法为预先准备几个在正常拉延和产生破裂的极限点附近的直径的圆板坯, 在同一条件下作一连串的成形试验。如果同一直径的圆板坯多取几个, 则所求极限点的准确性可提高。所谓极限板坯直径, 是指在破裂和拉成的机率相等情况下, 所有试件中能拉延出成品的最大试件直径。当然, 在极限点前为安全侧〔55〕。压边力不作特别规定, 可取最低极限值。压边力的决定可通过几次试验或用经验公式近似求得〔56〕、〔57〕。

为避免由以上方法求 L.D.R. 的繁杂, 即使在试

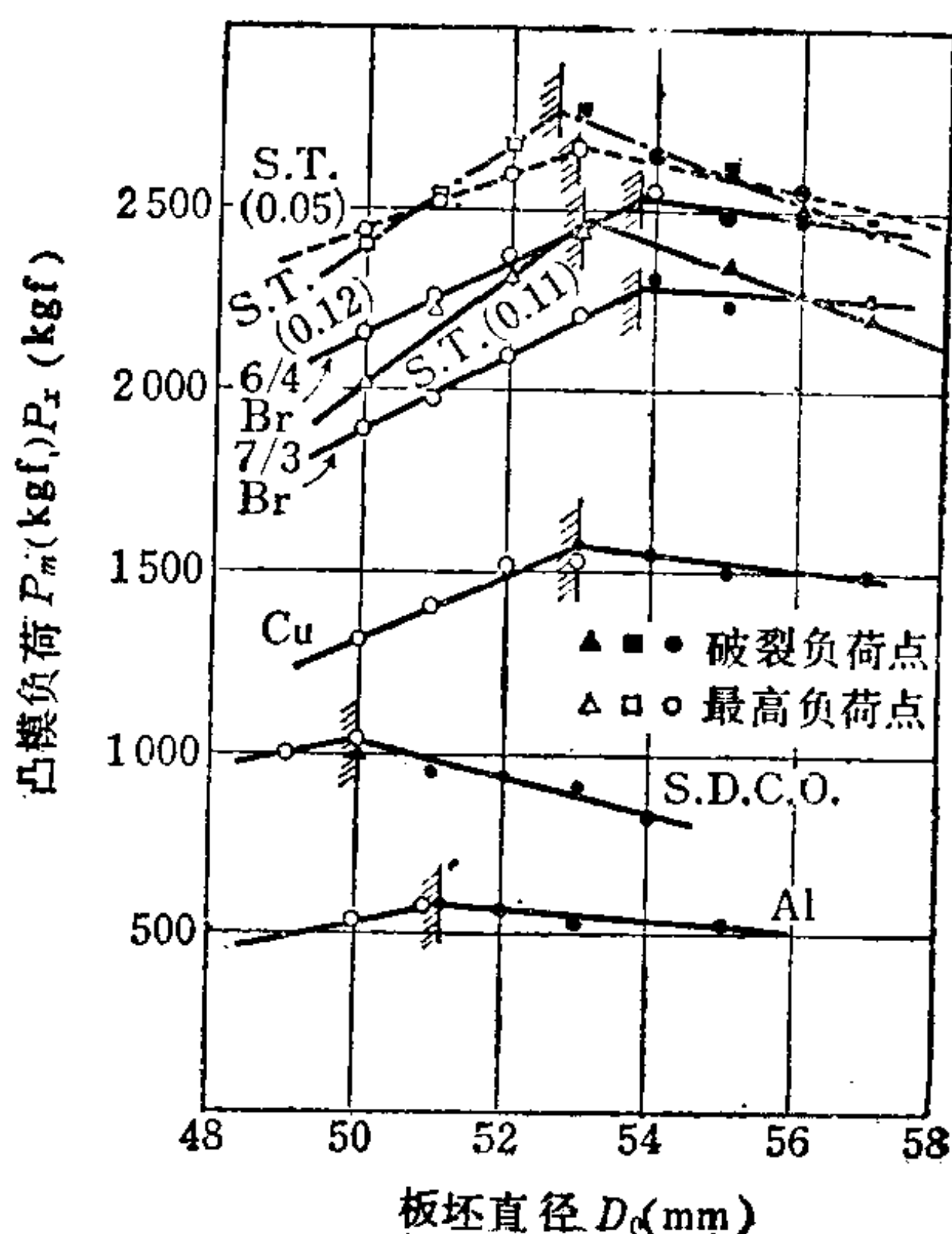


图4.31 由负荷法求L.D.R.

表4.11 斯维福特拉延试验参数

凸模直径 (mm)	凸模圆角 半径 (mm)	板厚 (mm)	凹模内径 (mm)	凹模圆角 半径 (mm)	备 注
32 ⁺⁰ _{-0.05}	4.5 ± 0.1	0.30~ 0.43	33.20+ 0.05	4.3 ± 0.1	对凸模形状而言, 也可用半球头凸模, 这时试验值取: 平底F. B. C. 值 球底R. B. C. 值 以示区别
		0.43~ 0.61	33.72+ 0.05	6.1 ± 0.1	
		0.61~ 0.87	34.44+ 0.05	8.7 ± 0.1	
		0.87~ 1.24	35.48+ 0.05	12.4 ± 0.1	
50 ⁺⁰ _{-0.05}	5.0 ± 0.1	0.45~ 0.64	51.89+ 0.05	7.1 ± 0.1	
		0.64~ 0.91	52.56+ 0.05	9.1 ± 0.1	
		0.91~ 1.30	53.64+ 0.05	13.0 ± 0.1	
		1.30~ 1.86	55.20+ 0.05	18.6 ± 0.1	

润滑剂 基剂 矿物油 — 粘度: Redwood (雷德伍德) 70~80秒 (93.3°C)
 粘度指数: 最低50
 滴点: 最高17.7°C
 闭式燃点: 215°C
 有机酸度: KOH0.10mg/g 最高
 — 无机酸度: 无

耐高压添加剂 (约含35%氯的氯化石蜡型)

基剂90%, 添加剂10%混合后使用, 对非铁金属可不要添加剂。浸渍涂敷。

坯件 以 0.025拉延比作为计量阶段, 所定坯件直径的外圆经车削或磨削加工。

压边力 按不起皱的最低值增加50~70% (允许误差±5%)

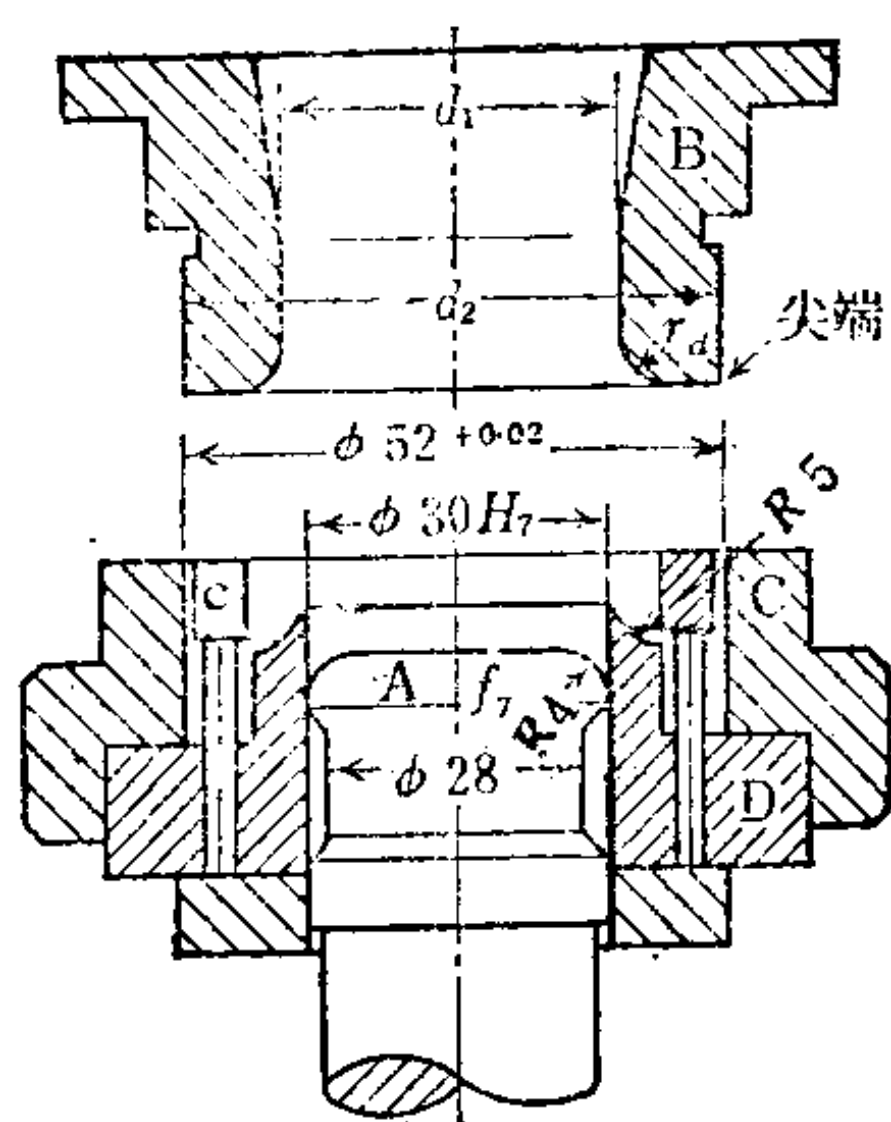
拉延速度 < 35mm/s

试验值表示 极限拉延比

件少时也能简便地求出 L . D . R . 的方法为负荷法〔58〕。图 4.31 所示的横坐标为板坯直径，纵坐标为负荷，图中表示了拉延时的最大负荷和破裂时的最大负荷（等于破裂负荷）。这些分别表现在其直线的交点上。这些交点的板坯直径即为所求的极限板坯直径。作为近似法是有效的。

下面介绍一种更简便的方法求 L . D . R . 相当值。采用直径比极限板坯直径稍大的板坯，将其成形直到破裂为止。求出工件的深度或外径比(工件凸缘直径/板坯直径)，并以此作为试验值。成形深度越大，外径比越小则拉延性能越好。这种简便法也可作为拉延和胀形的复合成形性能试验的一种方法，可以说和 L . D . R . 有较高的相关性。但越简便则可靠性越低。

也可用球底凸模代替平底凸模。同样地可求出 L . D . R . 等。这时由于凸模底部而附加了胀形性质的变形，能表示和判断拉延和胀形的复合性能。



试验板坯 (mm)	直径 d_1 (mm)	直径 d_2 (mm)	凹模圆角 半径 r_d (mm)
0.5~1.5	32.4 ± 0.06	$51.9 \begin{matrix} +0.04 \\ +0.02 \end{matrix}$	4
1.5~2.0	36.5 ± 0.05	$51.8 \begin{matrix} +0.08 \\ +0.08 \end{matrix}$	4

图4.32 T. Z. P. 试验工具

不用压边圈进行拉延性能试验的方法采用锥杯试验的工具 (JIS Z 2249-1963)，也可用平底凸模等按前述的各种方法进行试验。

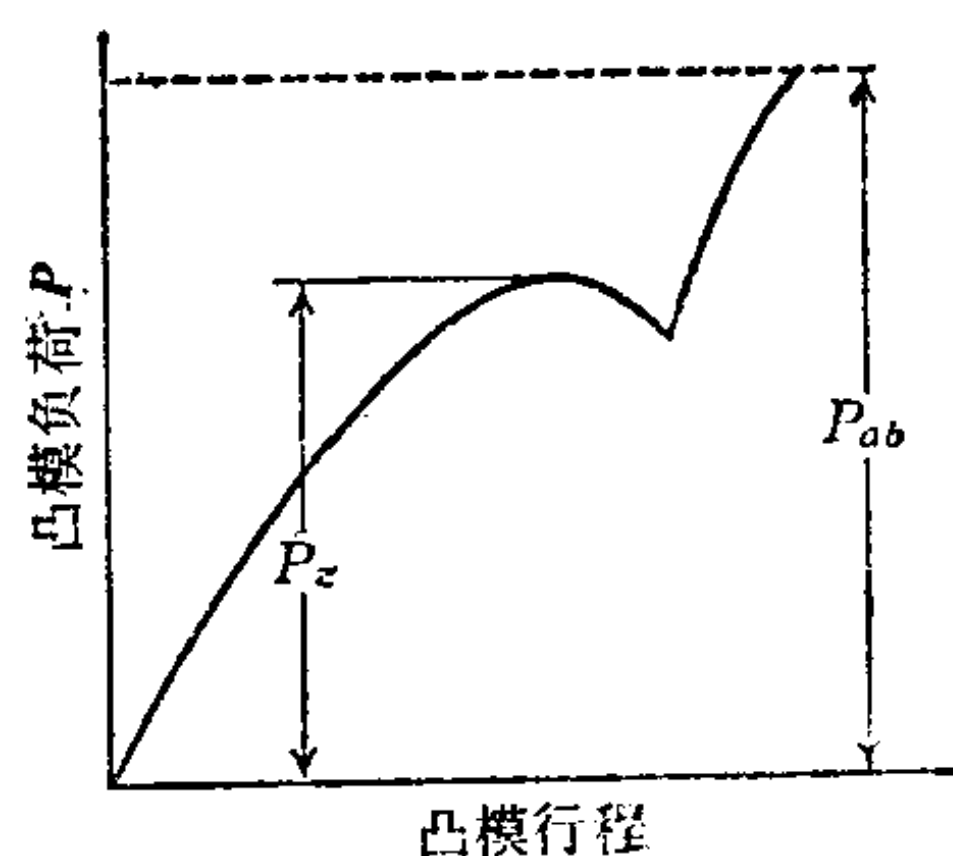


图4.33 T. Z. P. 试验时凸模负荷-行程曲线图

T. Z. P. 试验(Engelhardt 试验)为由一块板坯求出 L. D. R. 相当值的拉延性能试验〔59〕。用图 4.32 所示的工具。首先由凹模 B 和 C 冲裁成圆板坯(直径 52 mm), 由 C 给与适当的压边力同时由凸模 A 进行拉延。最高负荷 P_z 求出后, 拉延完毕之前由 D 和凹模侧壁夹紧坯料, 凸模继续进给到产生破裂, 求出破裂时凸模负荷 P_{ab} (图 4.33)。并按下式计算得 T 值(Engelhardt 值)。

$$T = [(P_{ab} - P_z) / P_{ab}] \times 100\%$$

T 值表示了到拉延极限的富裕量, 其值越大则拉延性能越好。

在拉延完的容器上, 其侧壁口部有时出现的凹凸现象称为“突耳”。

由杯形底部测出凸部的高度假设为 h_1 , 凹部的高度为 h_2 , 一般因产生 4 个突耳, 突耳率按下式计算。

$$h_e(\%) = \frac{(h_{1(1)} + h_{1(2)} + h_{1(3)} + h_{1(4)}) - (h_{2(1)} + h_{2(2)} + h_{2(3)} + h_{2(4)})}{(h_{1(1)} + h_{1(2)} + h_{1(3)} + h_{1(4)} + h_{2(1)} + h_{2(2)} + h_{2(3)} + h_{2(4)}) / 2} \times 100\%$$

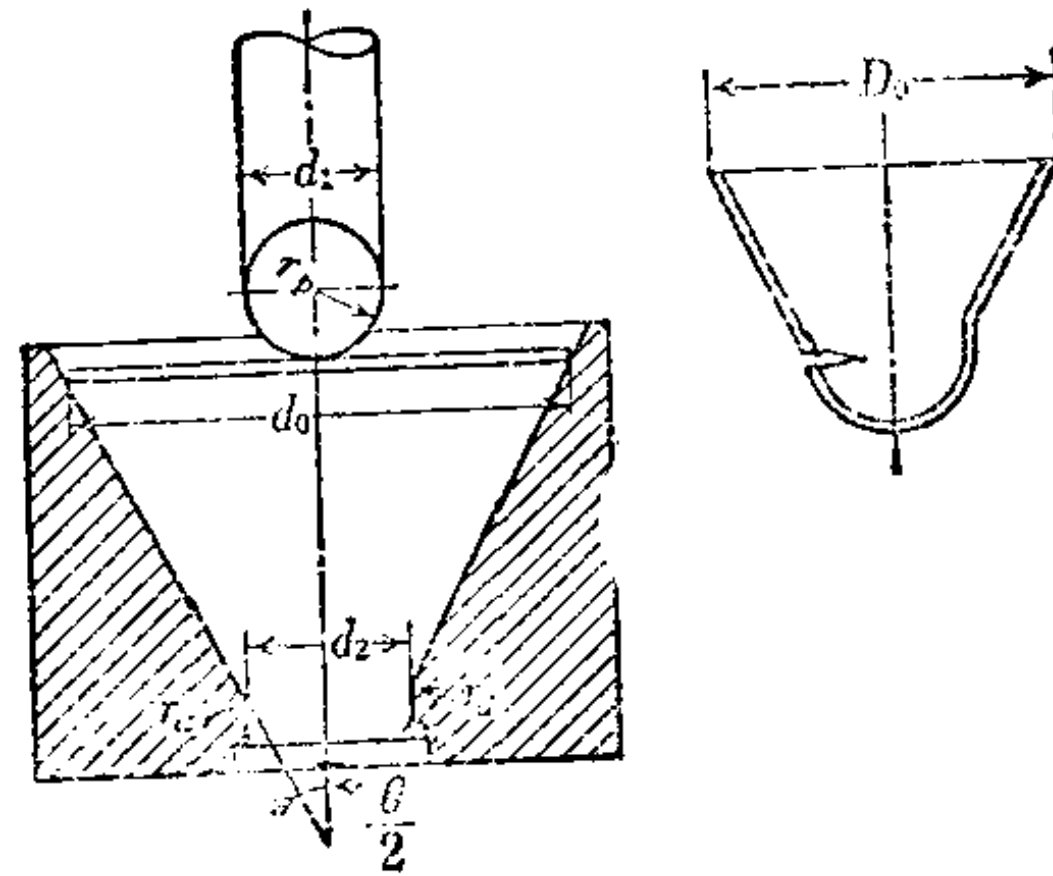
4.3.6 锥杯试验 (JIS 2249-1963)〔60〕

是求厚度为 0.5~1.6mm 薄钢板的拉延和胀形的复合成形性的试验方法[⊖], 使用如图 4.34 所示的工具, 用冲裁成一定尺寸的圆板作为试件。成形锥杯到底部破裂为止, 测定破裂后杯的上部外径 D_0 。对于各向异性的材料, 求其 D_0 最大值和最小值的平均值。 D_0 的平均值称为锥杯值 (C. C. V.)[⊖], 其值越小则成形性越好。这就是外径比法的应用。

用于其它板厚时, 按 $d_0 < (50 \sim 70)t_0$ 设计工具。用这种工具决定 L. D. R. 和测定拉延件的突耳率是方便的。本试验方法在 JIS 中仅对薄钢板有规定, 对于决定非铁金属、不锈钢板的起皱, 拉延性能不能原封照搬使用。如一定想要用时, 最好通过改变板

⊖ 外国叫 fukui test, fukui value $\eta = D_0/d_0$

⊖ conical cup value 的缩写。



型 号	13型	17型	21型	27型
公称板厚 (mm)	0.5~0.8	0.8~1.0	1.0~1.3	1.3~1.6
凹模锥角 θ°	60	60	60	60
凹模孔径 d_2 (mm)	14.60	19.95	24.40	32.00
凹模圆角半径 r_d (mm)	3	4	6	8
凸模直径 d_1 (mm)	12.70	27.46	20.64	26.99
钢球半径 r_p (mm)	$0.5d_1$	$0.5d_1$	$0.5d_1$	$0.5d_1$
试件直径 d_0 (mm)	36	50	60	78

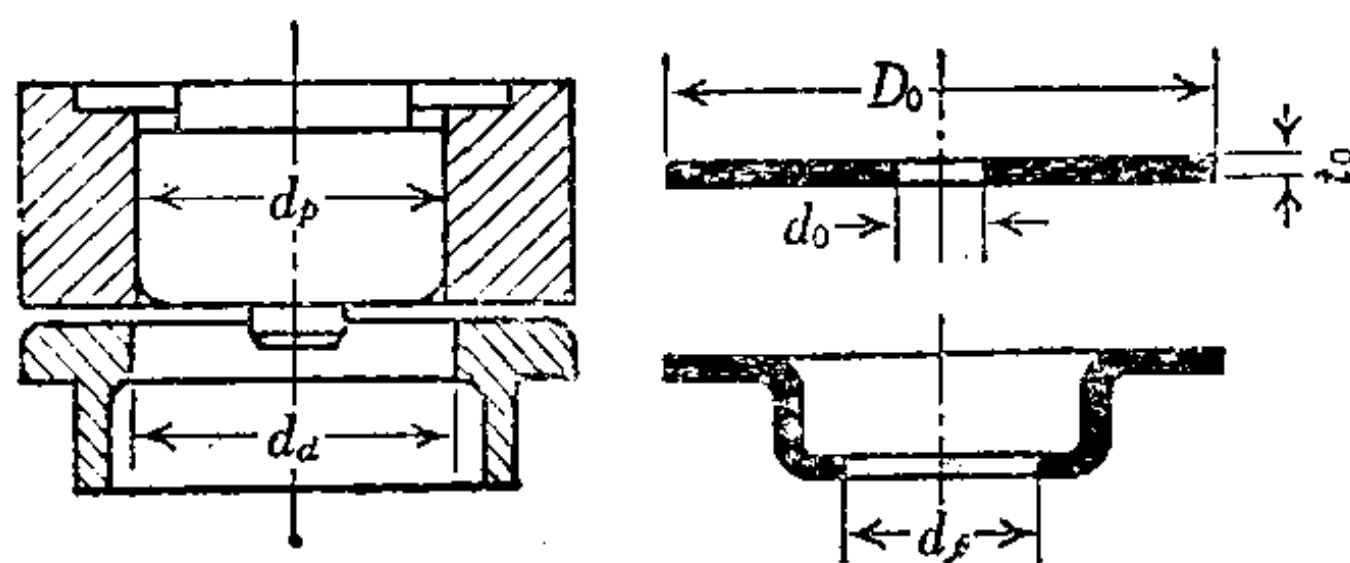
注：表中凹模圆角半径为标准尺寸。

图4.34 锥杯试验工具规格 (JIS Z 2249)

坯直径，以得到适当的锥杯来选取板坯直径，比较其外径比值。并且，如求得极限拉延比，即可求出锥杯 L.D.R.。其值因为无压边力和在凹模肩部无弯曲，所以比 Swift L.D.R. 大。

4.3.7 扩孔试验

为内缘翻边性能试验。板坯预先有孔（直径 d_0 ）由凸模压入



凸模直径 (mm)	孔径 (mm)	凹模孔径 (mm)	板坯直径 (mm)	板坯厚度 (mm)
55	16.5	61	>90	>2
40	12.0	44	>70	<2
25	7.5	27	<70	0.2~1.0
12	4.0	14	>25	0.2~1.0

图4.35 K. W. I. 扩孔试验工具尺寸

将孔扩大，求出孔周围产生变薄和开裂时的孔径 D_f ，可算出扩孔系数：

$$\lambda = [(D_f - d_0) / d_0] \times 100\%$$

必须注意，扩孔系数受板厚和板坯孔径的变化以及孔边缘加工情况的影响。典型的K.W.I.试验 (Kaiser Wilhelm Institute Test) 的工具尺寸，如图4.35所示。这时，其扩孔系数称为K.W.I.值。

4.3.8 其他试验

a. 折弯试验 (图4.36) 为现场测定软钢板为主的屈服点附近性质的试验〔62〕。将钢板的一端插入试验机中，并沿试验机底板的弯头而弯曲。这时，所需的弯曲力由指示器读出，由此可求得 F 值。 F 值和屈服点密切相关。然后拆除试验装置，测量残余曲率得 R 值。 R 值和屈服点的升高有密切关系。按 F 值和 R 值可判断材料的成形性和拉伸变形特性。

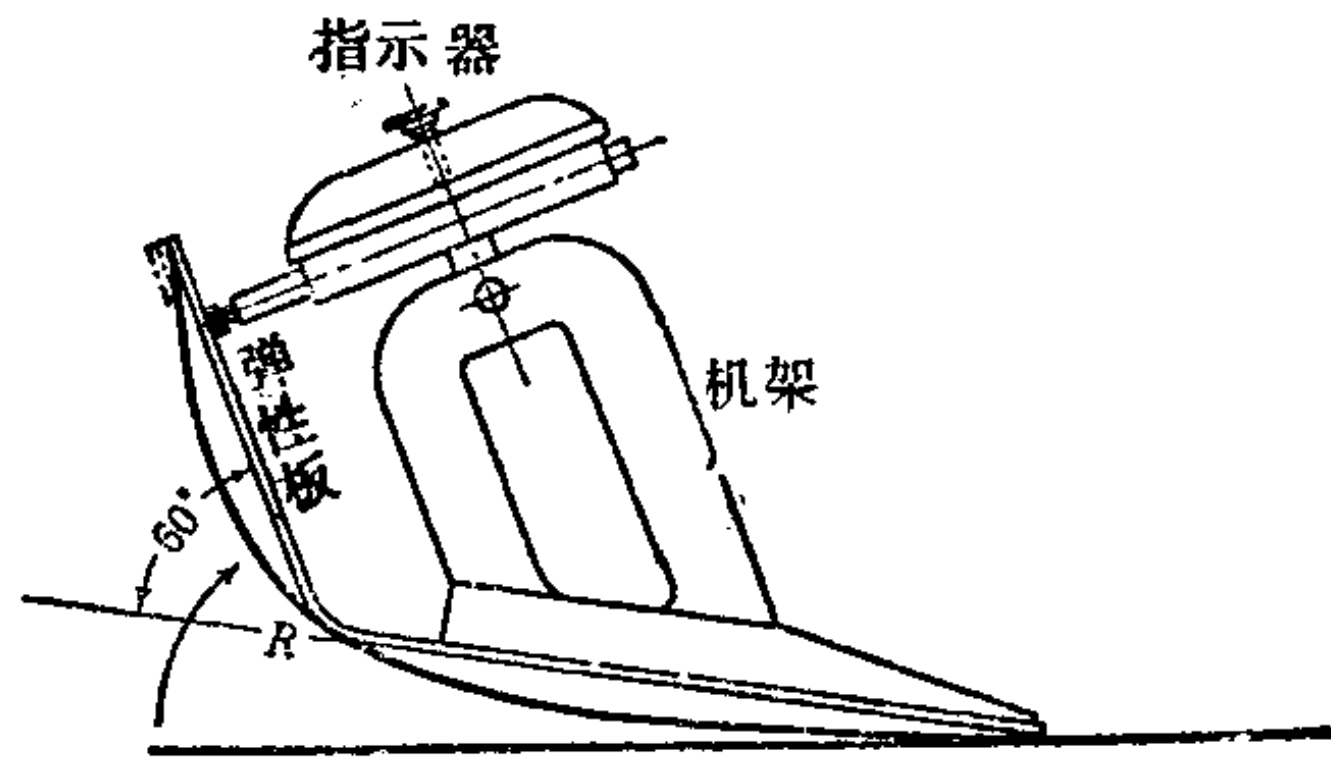


图4.36 折弯试验

b. 网格试验〔63〕 网格试验 (S.C.T.) 是在板坯的表面预先作如图4.37所示的圆系，成形后测定圆

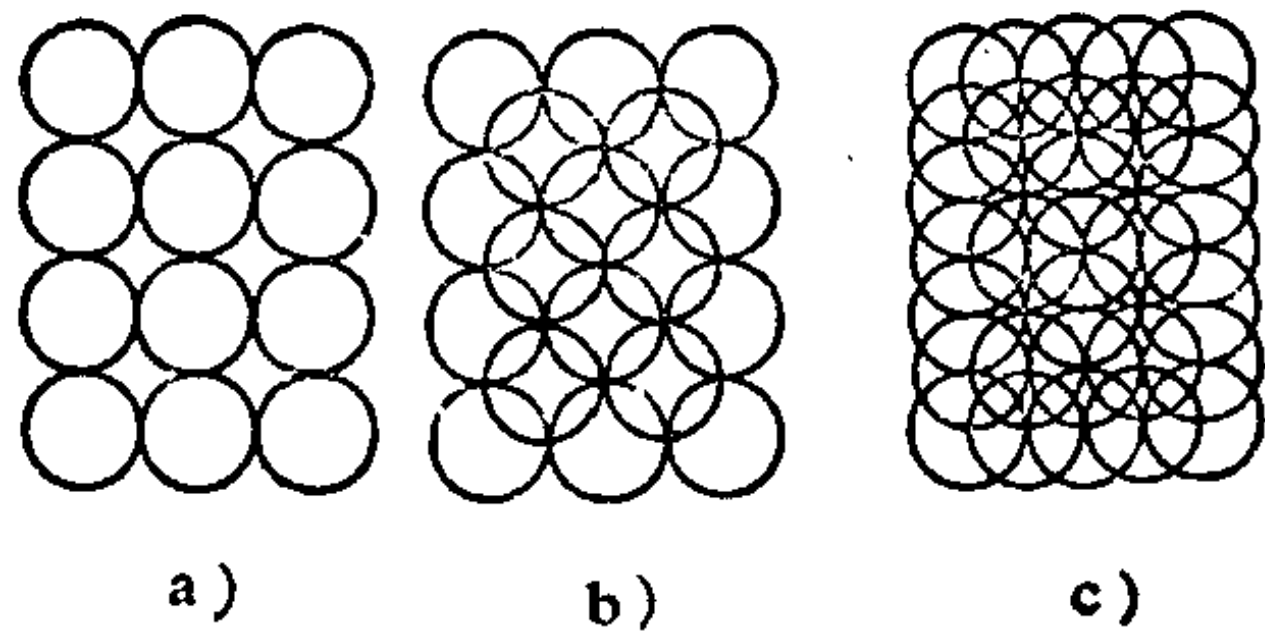


图4.37 网格示例

因变形而发生的应变，从而求得变形量的方法。这种方法的特点为可用于应力、主轴的方向不清楚的变形面上，当变形量不大 (10%以下) 时测定精度不高，最好用于破裂部分应变的现场测定。

作圆网格的方法有：1) 划线法，2) 印相法(涂膜)，3) 电解腐蚀法等。其中，第3种方法最为方便。因网格圆的直径选

择随被测定的应变量的大小而异，其选定应予以注意。如象普通汽车车体面板那样大的件，取直径 10~20 mm。图 4.37 a) 所示的圆系因形成间隙部分，这部分在破裂部位和拐角部位不能正确反映出应变。图 4.37 c) 所示的圆系无此缺点，即使在应变梯度很大时也能正确测定，但测定繁杂。图 4.37 b) 所示的圆系介于两者之间。

应变测定如图 4.38 所示，圆变形成椭圆时，测定椭圆的长轴和短轴，可求出最大应变 e_x 和最小应变 e_y 。用此方法，即使在某个方向上作用的应力不清楚时，按椭圆轴也可以方便地判明。

利用网格法，可以测知破裂危险部位的应变状态，就能够作出某种给定材料的成形极限线。图 4.39 所示为一般称为成形极限线图的基尔 (Keeler) F.L.D. 线图，通过利用此图，可以知道产生破裂的安全量 (成形难易)，给出了选定作业条件、模具、材料等的准则。例如，某种零件成形中产生破裂，用 S.C.T. 法测定了破裂部位近旁的应变，在图 4.39 上为 A 点。然后，修正模具后再次冲压由于这部分的应变已变到 B 点而得到成功。此即在实际成形中应用成形极限图的例子。

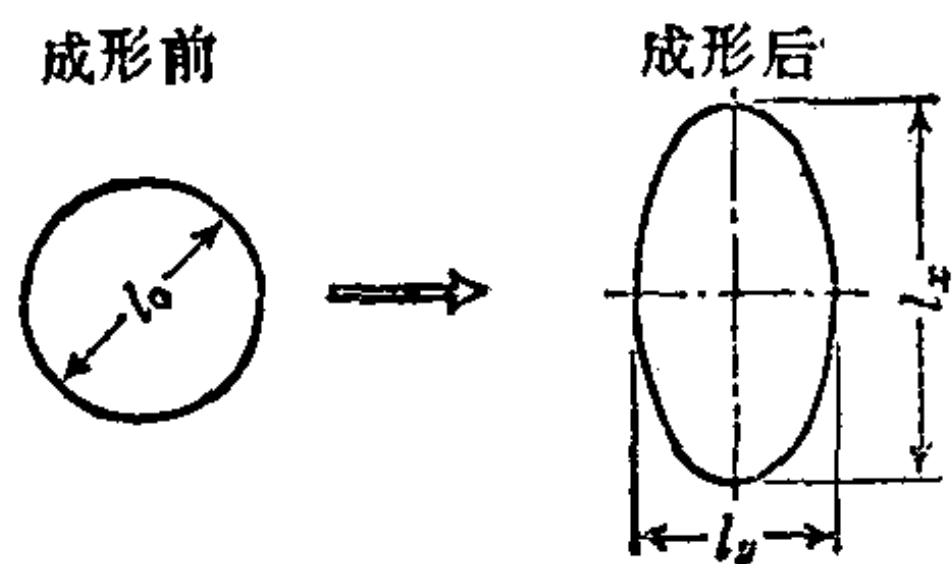


图 4.38 求应变的方法

公称应变

$$e_x = \frac{l_x - l_0}{l_0} \quad e_y = \frac{l_y - l_0}{l_0}$$

对数应变

$$\epsilon_x = \log_e \frac{l_x}{l_0} \quad \epsilon_y = \log_e \frac{l_y}{l_0}$$

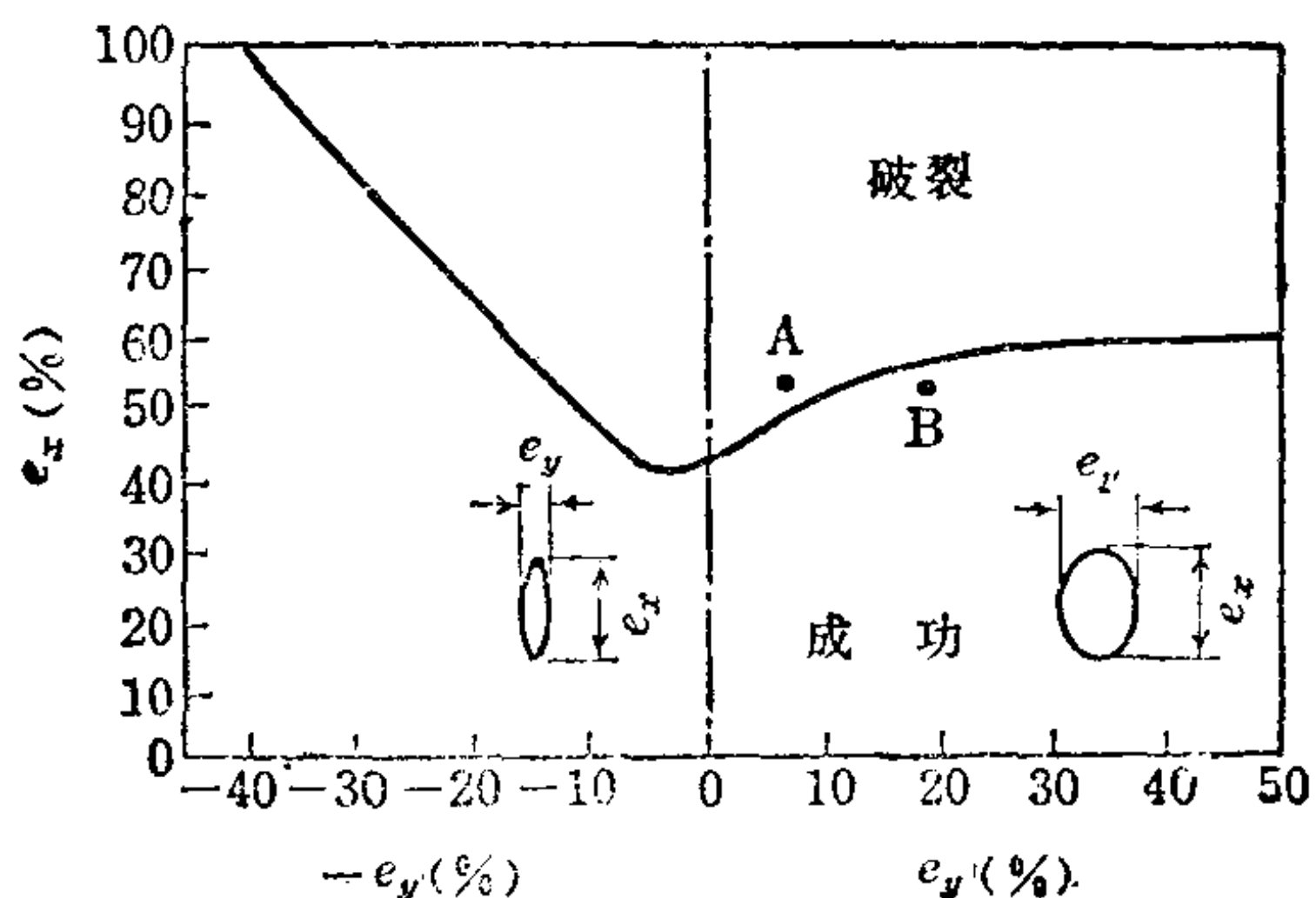


图 4.39 成形极限线图

网格法不用于模拟试验上，最近此法多用于汽车车身这样的

大型冲压件的现场实物试验。

c. 也有凸模为非圆形断面时的深拉伸或胀形试验。成形盒形件、椭圆筒形件时，求出其成形性的比较值。还有利用深拉伸试验机作再拉伸试验的，以求2次成形性，或用深拉伸试验工具将已成形的容器再拉伸成圆筒形，以求其极限。

用实际的压力机和模具对一系列材料进行试验，通过成形的可否和成形件的形状差异的比较，往往可以判断材料的成形性及形状性等。这时，对成形条件等要详细记录，以便于认识数据的特殊性。

4.4 小型零件基本形状的成形

板料成形的基本形状，从横断面来看，如图4.40所示是圆形的异形化，大致可分为具有平滑曲线过渡的椭圆形系列及由直线部分和圆形部分组合而成的角筒形系列。为此，通常说的基本形状是指圆筒形件、盒形件和椭圆筒形件。此外，还有带凸缘的成形件，凸缘是为了将一般的冲压件和其它零件相连接的目的而设置的。这种带凸缘的成形，因为它和容器状的制件其成形性质有所区别，所以另作考虑。

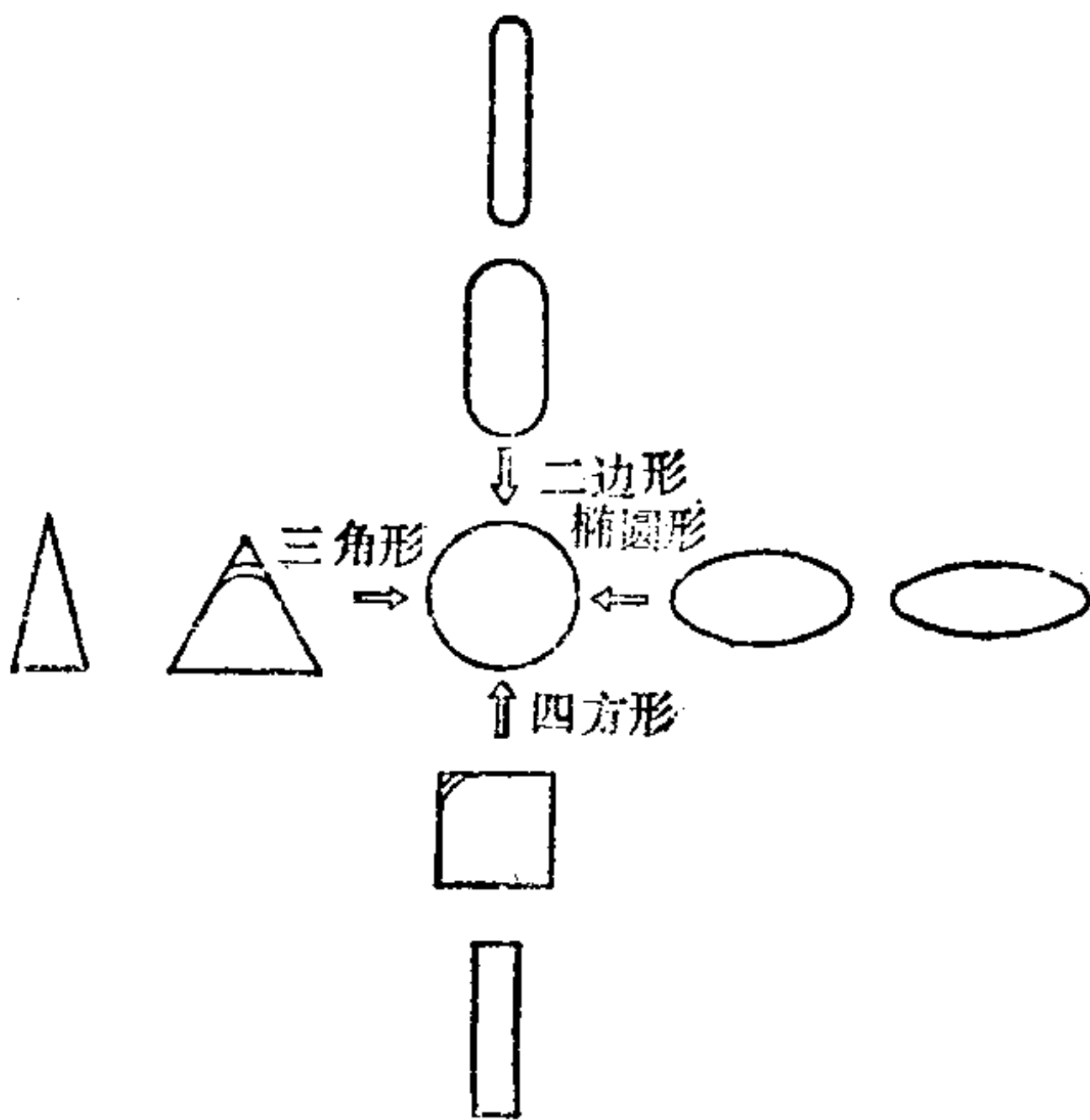


图4.40 从横断面来看，各种成形基本形状的系列[64]

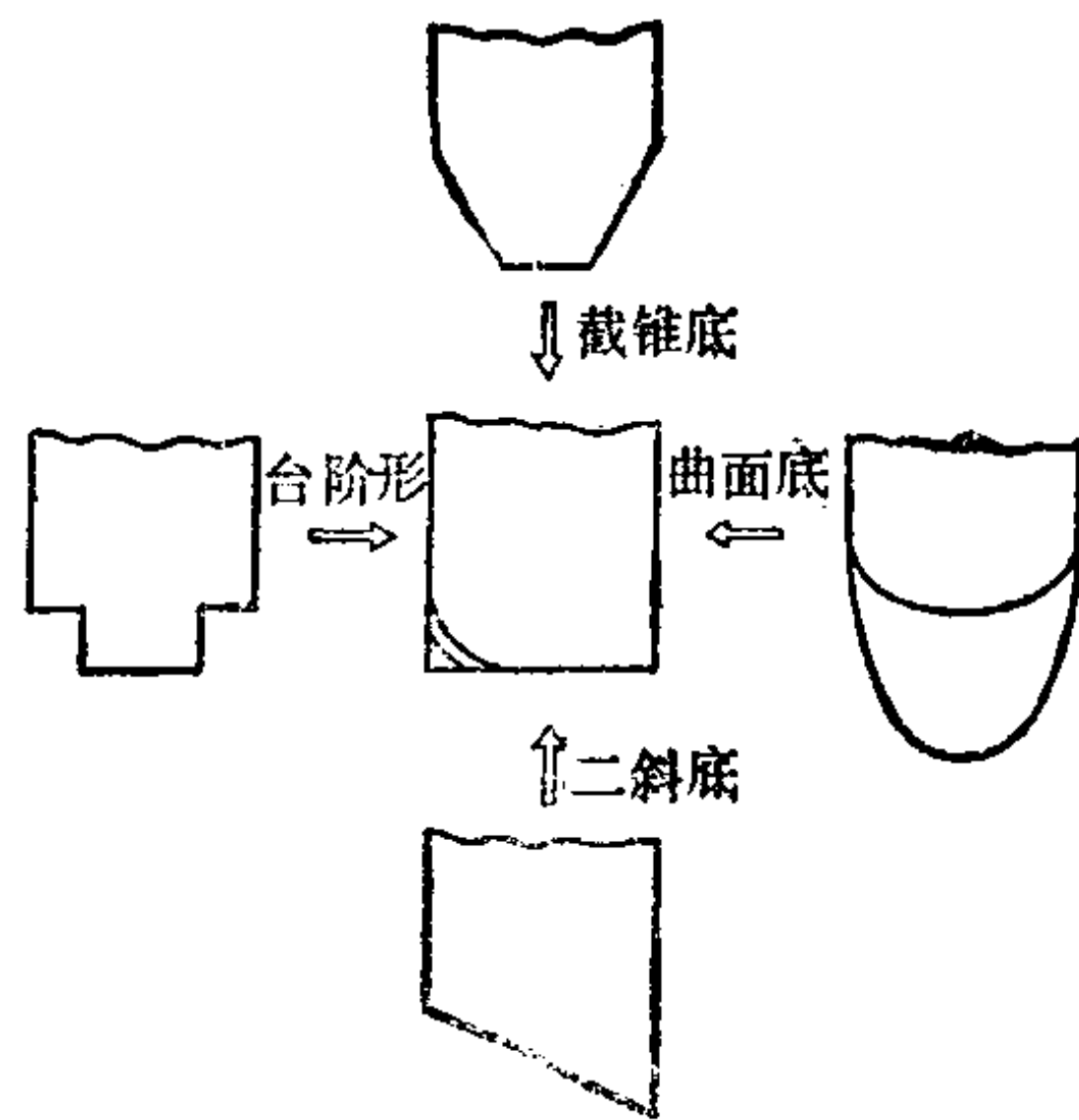


图4.41 从纵断面来看，各种成形基本形状的示例[64]

只有弄清了这些基本形状的尺寸参数对成形极限和成形特性的影响,才能掌握形状更为复杂的制品的成形技术的要领。

4.4.1 圆筒形件的成形

a. 胀形

(i) 胀形极限 圆筒形状的胀形极限,一般以不起皱的情况下开始发生破裂时的胀出深度 h_{max} 来表示。最大胀形深度取决于变形区域的变形状态和变形量的大小。因此,提高胀形极限应从材料、模具形状及润滑等方面综合考虑,设法改善变形状态和使平均变形量增加。具体的说就是使局部集中变形更趋均化、减少低变形区。对一般的形状, h_{max} 可由下列实验公式求出〔65〕:

$$h_{max} = 0.05 \left(\frac{1}{2} d_p - r_p \right) + 0.309 r_p + 0.154 C + 5.814 n \\ - 0.863 r + 19.35 u - 2.956 \phi$$

式中, n 、 r 、 u 、 ϕ 的值由材料的拉伸试验决定(参照 4.3.1), C 是间隙值。 u 、 ϕ 的近似值亦可由 n 和 r 确定〔66〕:

$$u = nr / (1 + r)$$

宽度方向的收缩 $\phi \approx e_b r / (1 + r)$

(ii) 胀形时形状和尺寸的影响 凸模肩部的过渡圆角半径 r_p 为坯料厚度 t_0 的 3 倍以下时,由于在该部集中变形,而提前出现弯曲破裂致使胀形极限值降低。凸模肩部圆角半径越大则大变形区增大。即用球底凸模比平底凸模 h_{max} 值将增加。加大凸、凹模之间的间隙,在用球底凸模时由于低变形区的增加而使 h_{max} 下降,而在使用平底凸模时若加大凸模肩部的圆角半径也有相同的效果,因此凸模直径/凹模直径之比在 0.5 左右时有助于增加 h_{max} 值。增大凹模的肩部半径和加大凹模孔直径这和增加间隙具有相同的效果,一般使 h_{max} 值增加。关于各种形状和尺寸对胀形极限的影响,如图 4.42 所示。

(iii) 胀形作业 胀形时凸模所需力 P 可用下式近似确定:

$$P \leq \sigma_b t_0 S \text{ (kgf)}$$

式中 S ——凸模横断面周长 (mm);

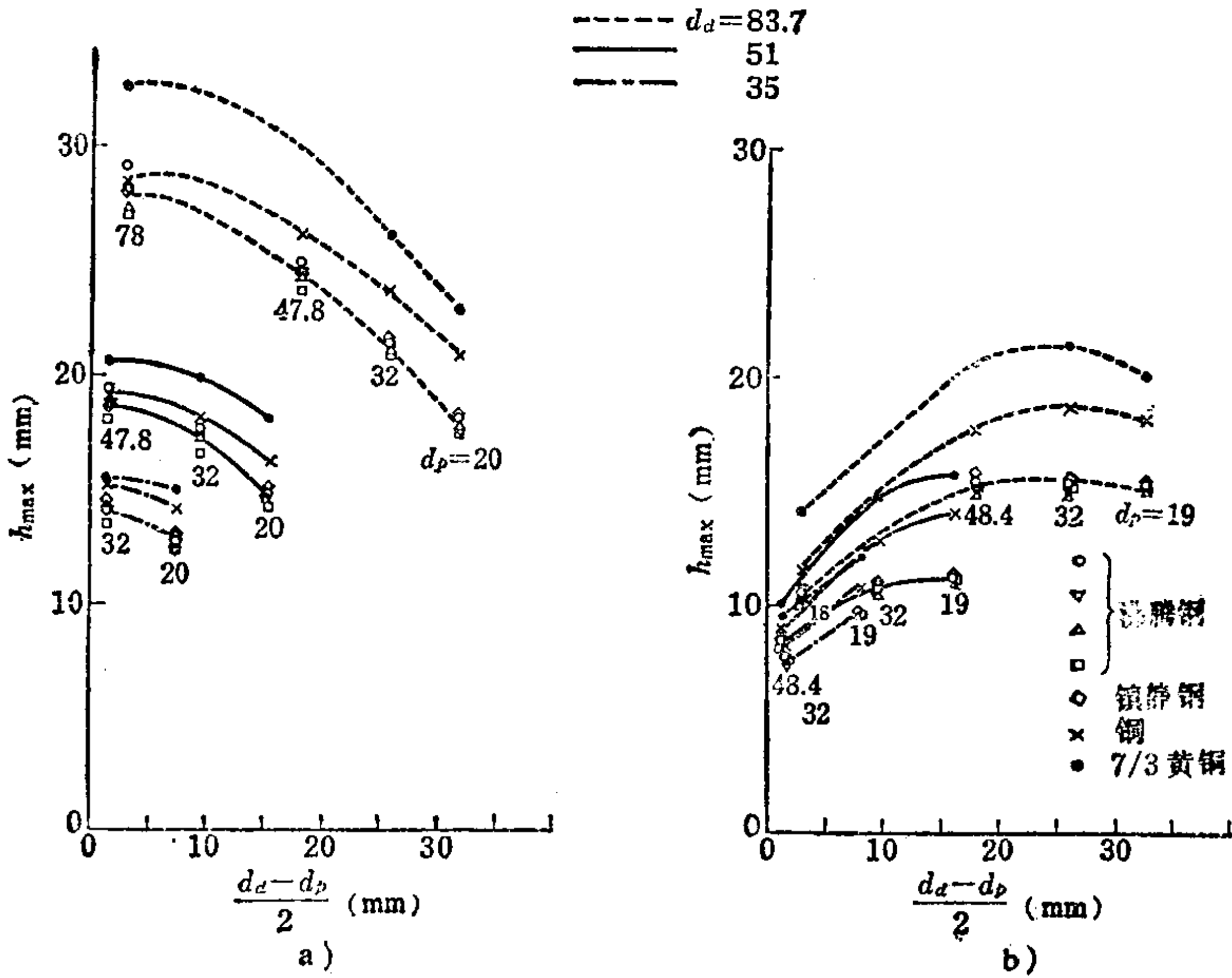


图4.42 极限胀形深度和尺寸[67]
a) 球底 b) 平底 $r_p = 5 \text{ mm}$

t_0 ——板料原始厚度 (mm)。

在没有拉延筋而坯料直径 D_0 大于凹模孔径 3 倍时，压边力 H 值取凸模力的 $\frac{1}{2}$ 左右为好。如坯料直径更大而凹模口的肩部半径较小时， H 值可取小些，反之则取 H 值等于凸模力，或者大于凸模力，否则胀形将是困难的，会在凸缘部分产生很大的变形。在有拉延筋时，压边力 $H = 2 \sigma_B t_0 S$ (S 为拉延筋的周长)。

在四个角布置拉延筋使坯料完全固定时，压边力有时也要大于上式给定值。为了用较小的压边力有效地固定坯料，可以采用三角形的拉延筋。

极限胀形使制件呈卷曲状破裂时，在凸模和材料之间加润滑可以提高成形极限。润滑油的粘度越高则效能越好，在成形力大

的情况下,同时采用和材料相适应的耐压添加剂如石墨、二硫化钼和聚乙烯薄膜等润滑剂,以减少摩擦。因为润滑剂的粘度是重要因素,所以在管理和使用上应注意气温的变化和成形速度等的影响。关于成形速度,一般快速成形对减少摩擦是有效的,但在连续成形时模具的温度会升高,并且由于材料的不同,有时低速成形时更为有利,所以在使用时要使成形速度和润滑剂相适应。润滑剂的粘度和作业性有密切的关系,并且要考虑成形后零件的脱脂是否容易。

b. 拉延和再拉延(无凸缘容器的成形) 由平板料一次拉延所得到的平底容器深度(拉延高度) h 约为拉延件直径的90%(当板厚 t 为坯件直径 D_0 的1%以上时)~30%(在 $t/D < 0.1\%$ 时)就是最深的了。要想得到更深的制件需采用特殊的深拉延方法,或者必须进行再拉延。这里我们把平板料的拉延称为“拉延”(或首次拉延)以区别再拉延。

(i) 拉延的加工极限 拉延的加工程度(加工变形程度)可用坯件直径 D_0 /凸模直径 d_p 之比值来表示,即拉延比,或其倒数的拉延系数。此外,也有用以凸模直径为基准的坯料直径减少比 $[(D_0 - d_p)/d_p]$,或者用以坯料直径为基准的凸缘直径减少率 $[(D_0 - d_p)/D_0] \times 100\%$ 等作为变形程度的比较量的情况。拉延加工极限取决于成形过程中产生的起皱现象,或取决于因凸缘部位的拉延力(径向拉延应力)过大在壁厚剧烈变薄处产生的破裂现象。但是,一般是在采用压边圈等防止起皱的前提下,开始产生破裂时作为拉延极限。

同样,再拉延也是在采取防皱措施的情况下进行的,因此再拉延加工极限亦是以不产生破裂所能得到的最大再拉延比(前工序的凸模直径 d_{n-1} /再拉延凸模直径 d_n)来表示。总之,拉延技术的中心课题是在所使用的材料、模具及润滑等条件下,在不引起破裂和起皱的同时给材料凸缘部位以最大的压缩变形,实现材料在凸模力作用下的最大限度的拉延成形。

(ii) 所需最大成形力 最大的凸模作用力发生在拉延的过

程中， n 值越大的材料，最大成形力出现得越晚。在再拉延时，最大成形力一般出现于行程末期。拉延时最大凸模力 P_{max} 可由福井、吉田等的实验公式近似地求出：

$$P_{max} = 3(\sigma_b + \sigma_s)(D_0 - d_d - r_d)t_0 \quad (\text{kgf})$$

式中 σ_b ——材料的抗拉强度 (kgf/mm^2)；

d_d ——凹模直径 (mm)；

σ_s ——材料的屈服极限 (kgf/mm^2)；

r_d ——凹模圆角半径 (mm)；

D_0 ——坯料直径 (mm)；

t_0 ——板料厚度 (mm)。

在拉延过程中发生断裂时的凸模力 P_b 为：

$$P_b \approx K_F \pi d_p t_0 \sigma_b \quad (\text{kgf})$$

软钢板成形时取 $K_F \approx 1.0 \sim 1.2$ ，非铁金属成形时取 $K_F \approx 1.0$ 。拉延极限成形时其最大凸模力接近于拉断力，为了安全起见，往往可按 P_b 来计算拉延力。再拉延时凸模力亦可按其断裂力求出，即如下式：

$$P'_b \approx K_F \pi d_n t_0 \sigma_b \quad (\text{kgf})$$

式中 d_n ——第 n 道工序拉延凸模的直径。

(iii) 无压边拉延 在拉延比小而板厚相对较大时，即使没有压边也能拉延成形不起皱的容器。图 4.44 所示为无压边时进行拉延的条件。

当再拉延比小而相对板厚 t_0/d_p 不太小时，采用圆锥凹模，在进行反向再拉延时亦可不采用压边圈（参看图 4.43 b、c）。

(iv) 压边方式和压边力 在定压压边方式中，拉延比越大、相对直径比 D_0/t_0 越大、材料的变形抗力越大、润滑条件越好则压边力也要求更大。一般，所谓适当的压边力 H_n 是指最小的必须的压边力，可由下列福井、吉田、阿部等的实验公式求出：

$$H_n = \frac{(\sigma_b + \sigma_s)}{180} D_0 \left[\frac{(D_0 - d_d - 2r_d)}{t_0} - 3 \right]$$

(σ_b, σ_s 单位为 kgf/mm^2 ，其他尺寸单位为 mm 时 H_n 的单位

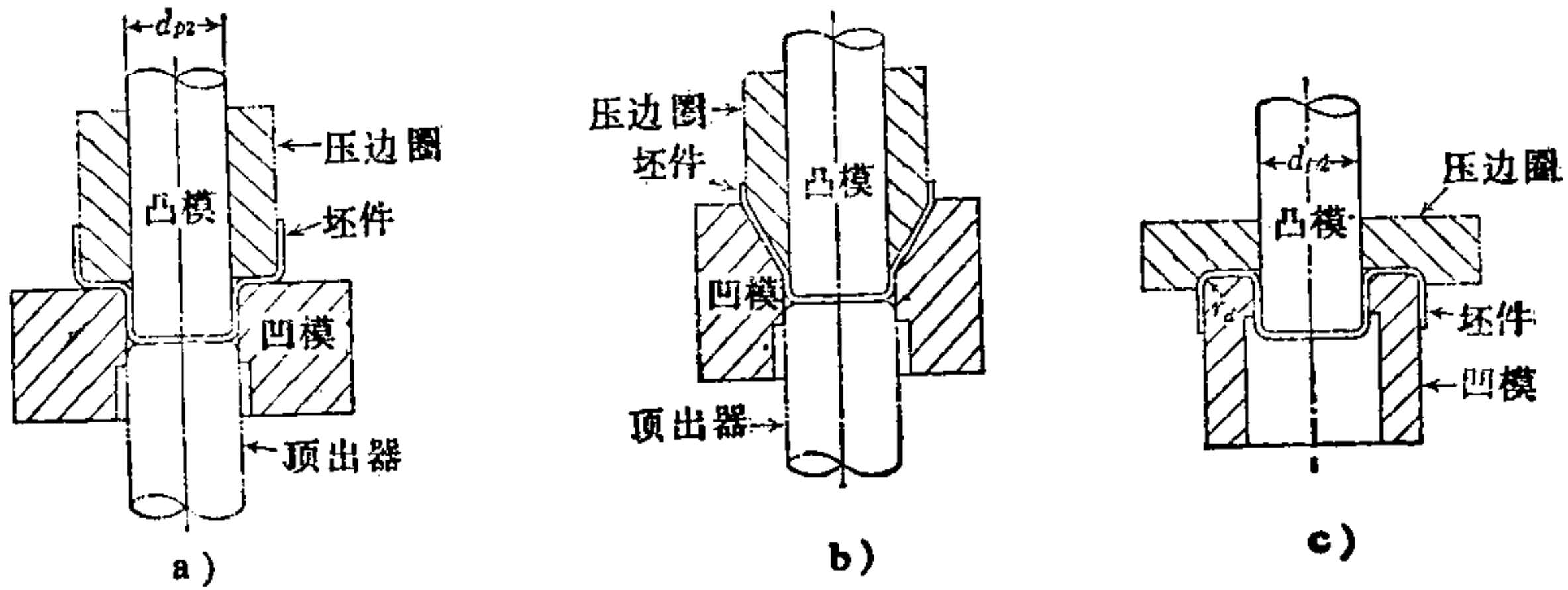


图4.43 再拉延的方式

a) 平面凹模直接再拉延法 b) 圆锥凹模直接再拉延法 c) 反向再拉延法

为 kgf)

因为压边力是拉延加工时的重要因素之一，所以要在试拉时反复试验决定。

在采用固定压边圈时，其间隙 d_{cl} 按下式确定：

$$d_{cl} \leq (0.50 \sim 0.75) \times \left(\sqrt{\frac{D_0}{d_p}} - 1 \right) t_0 + t_0$$

或
$$d_{cl} \approx \frac{t_0}{1+r} \left(\frac{D_0}{d_p} - 1 \right) + t_0$$

式中 r ——材料的兰克福特 (Lankford) 值 (r 值) \ominus 。

如图 4.44 所示，压边面也可作成圆锥面，圆锥角 φ 用下式确定：

$$\varphi \approx t_0 / (1+r)d_p$$

(v) 凹模圆角半径 r_d 凹模圆角半径与板厚的比值过小时，在拉延时附加的弯曲力增大，可能引起弯曲破裂，这是不利的；如果该比值过大，则可能起皱。一般推荐 r_d 值取板厚的

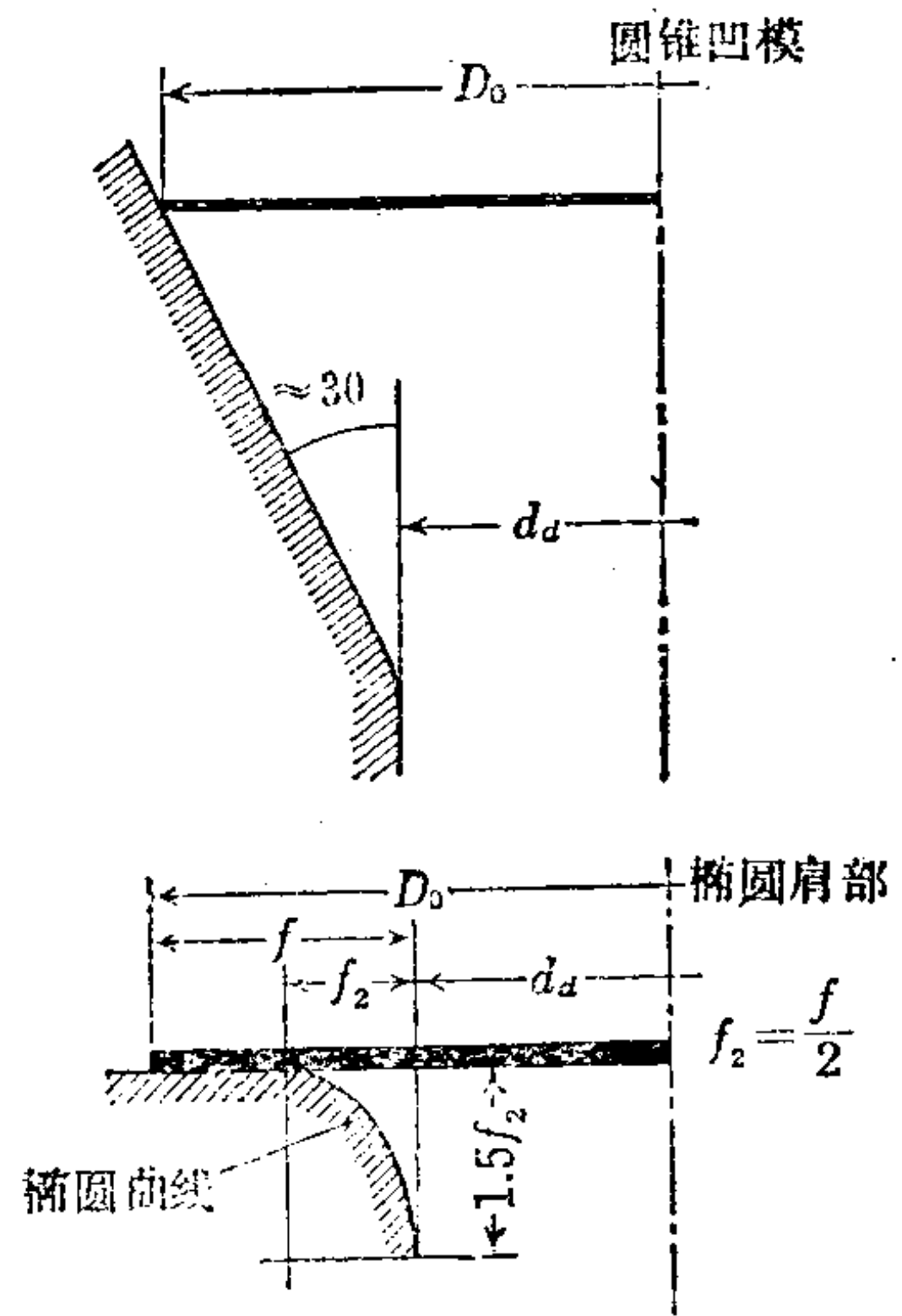


图4.44 无压边时进行拉延的条件〔1〕

\ominus 系指板状拉力试样宽度变形比。——译注

4~6 倍，在非贯穿（即带凸缘）拉延时，即使 r_d 值取板厚的 10~20 倍，在凹模肩部亦不起皱。在贯穿（筒形件）拉延时，合理的 r_d 值范围如图 4.45 所示。对于再拉延亦可参考此图。

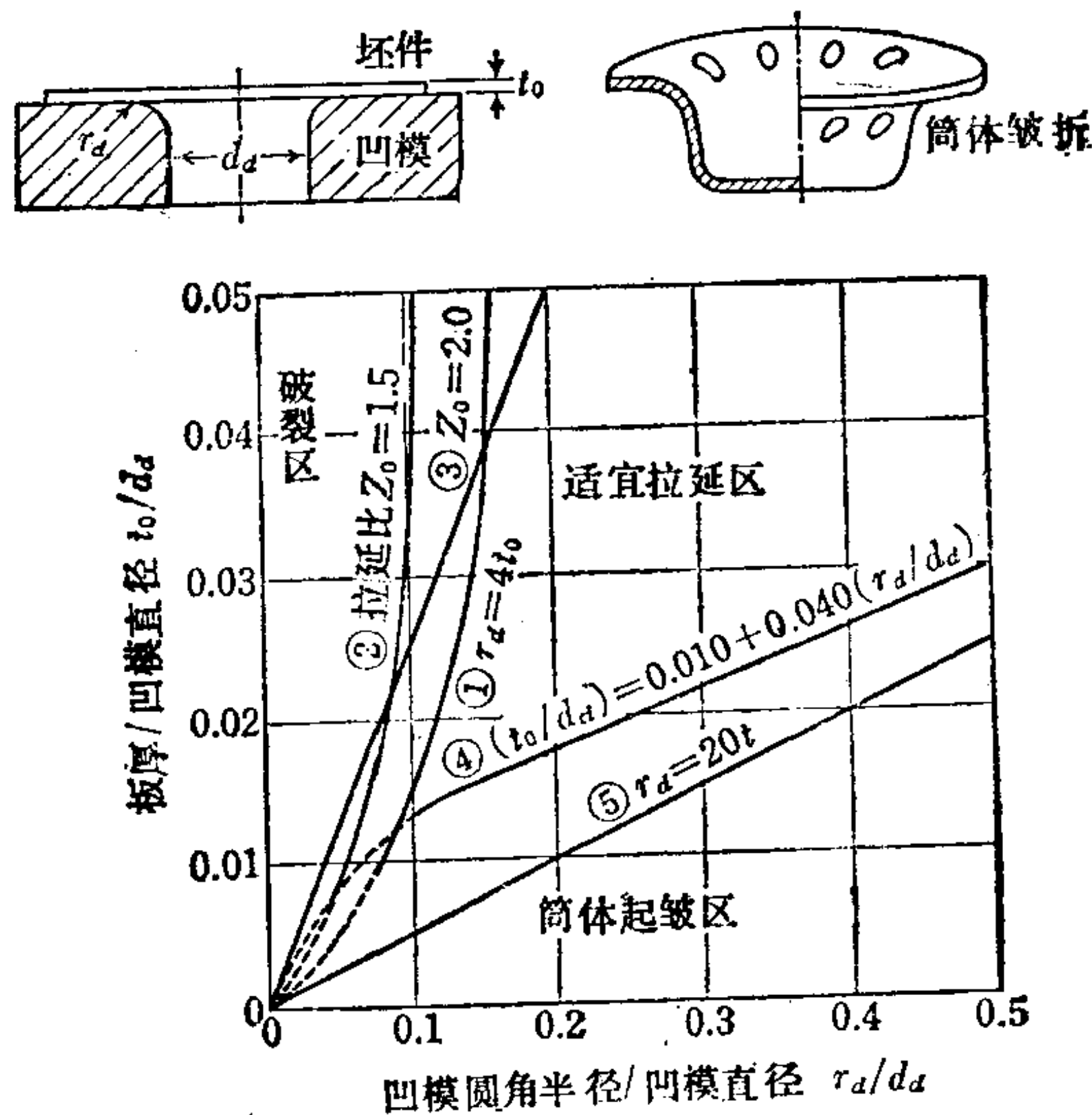


图4.45 圆筒形件拉延时凹模半径的合理值〔68〕

① 直线近似破裂极限线 ②③ 以拉伸比为参考的破裂极限线 $\frac{r_d}{d_d} = 0.8$

$\times \sqrt{z_0 - 1} \sqrt{\frac{t_0}{d_d}}$ (根据Kaczmarek 实验结果整理的公式) ④ 直线近

似筒体皱折极限线 ($r_d/d_d > 0.1$) (宫川) ⑤ 直线近似筒体皱折极限线 (Sachs)

(vi) 凸模圆角半径 r_p 凸模圆角半径一般是由制件形状决定的， r_p 值小于板厚的 3 倍时，由于容易产生弯曲破裂而使拉延极限下降。加大凸模圆角半径，则使凸模底部形状趋于球形，在加工初期给予材料的胀出变形量增大。这对于胀形性能差的材料来说，其拉延加工极限将降低。同时由于凸模圆角半径过大也容易起皱。凸模圆角半径的合理值，可从图 4.46 中选定。

根据零件的形状如要求凸模和凹模的圆角半径小于合理值

时, 应进一步进行矫形工序或者按图 4.47 所示的范围降低拉延比。

(vii) 间隙 C 凸模和凹模之间的间隙, 应按拉延周边的最大板厚 t_{\max} 确定, 因该值经常比原始坯料厚度 t_0 大, 故以 t_{\max} 值为基准按下式确定 C 值;

$$C = (d_d - d_p) / 2 \\ = t_{\max} + \alpha t_0 \quad (\text{mm})$$

平板拉延时 $t_{\max} = t_0 \times \sqrt{D.R.}$, $D.R. = D_0 / d_p$;
再拉延时 $t_{\max} = t_0 \times \sqrt{R.D.R. \times D.R.}$

$$R.D.R. = d_p / d_{pn0}$$

式中 d_{pn} ——第 n 道工序的凸模直径;

α ——按表 4.12 确定。

(viii) 圆板坯料直径 D_0 。坯料直径根据成形件的形状及其尺寸确定, 拉延行程及切边留量由反复试拉延的结果最后确定。在材料有方向性时, 由于拉延时会产生突耳, 因此要取较大的切边量。根据成形的形状所需的板坯直径示于表 4.13。

用连续模拉延成形时, 坯料的形状及尺寸参见表 4.14 确定(参照图 4.45)。

(ix) 工序的确定 工序的确定要考虑在极限拉延时作业的稳定性。关于拉延极限值, 参见表 4.15、表 4.16、图 4.48 及图 4.49。

至于截锥形容器的拉延, 为防止筒体起皱必须增加工序数, 其实例如图 4.50 所示。

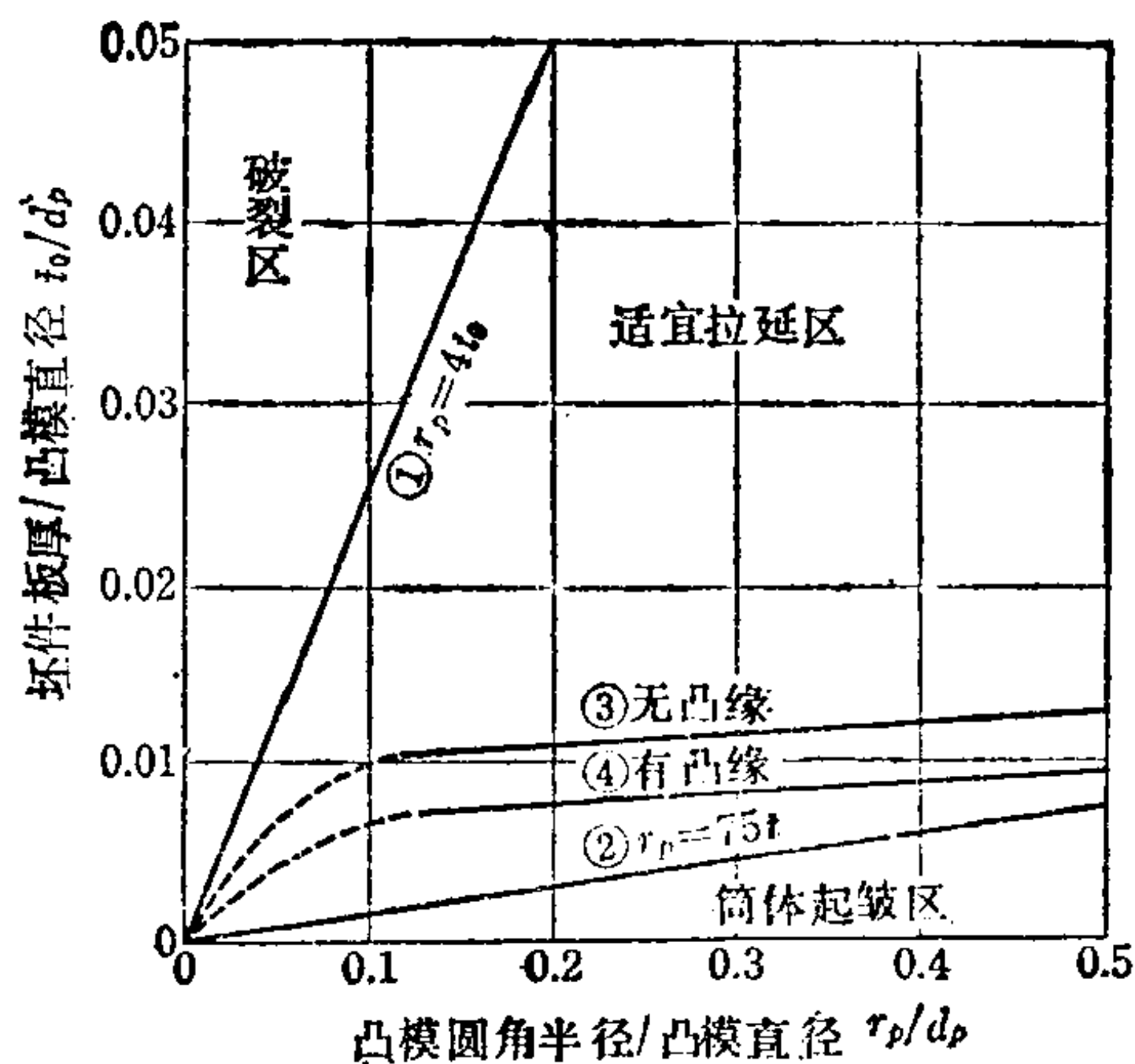


图4.46 圆筒形件拉延时凸模圆角半径的合理值〔68〕

- ①直线近似破裂极限线 ②直线近似筒体皱折极限线(Schroeder & Hazlett)
③直线近似筒体皱折极限线(无凸缘时)(宫川) ④直线近似筒体皱折极限线(有凸缘时)(宫川)

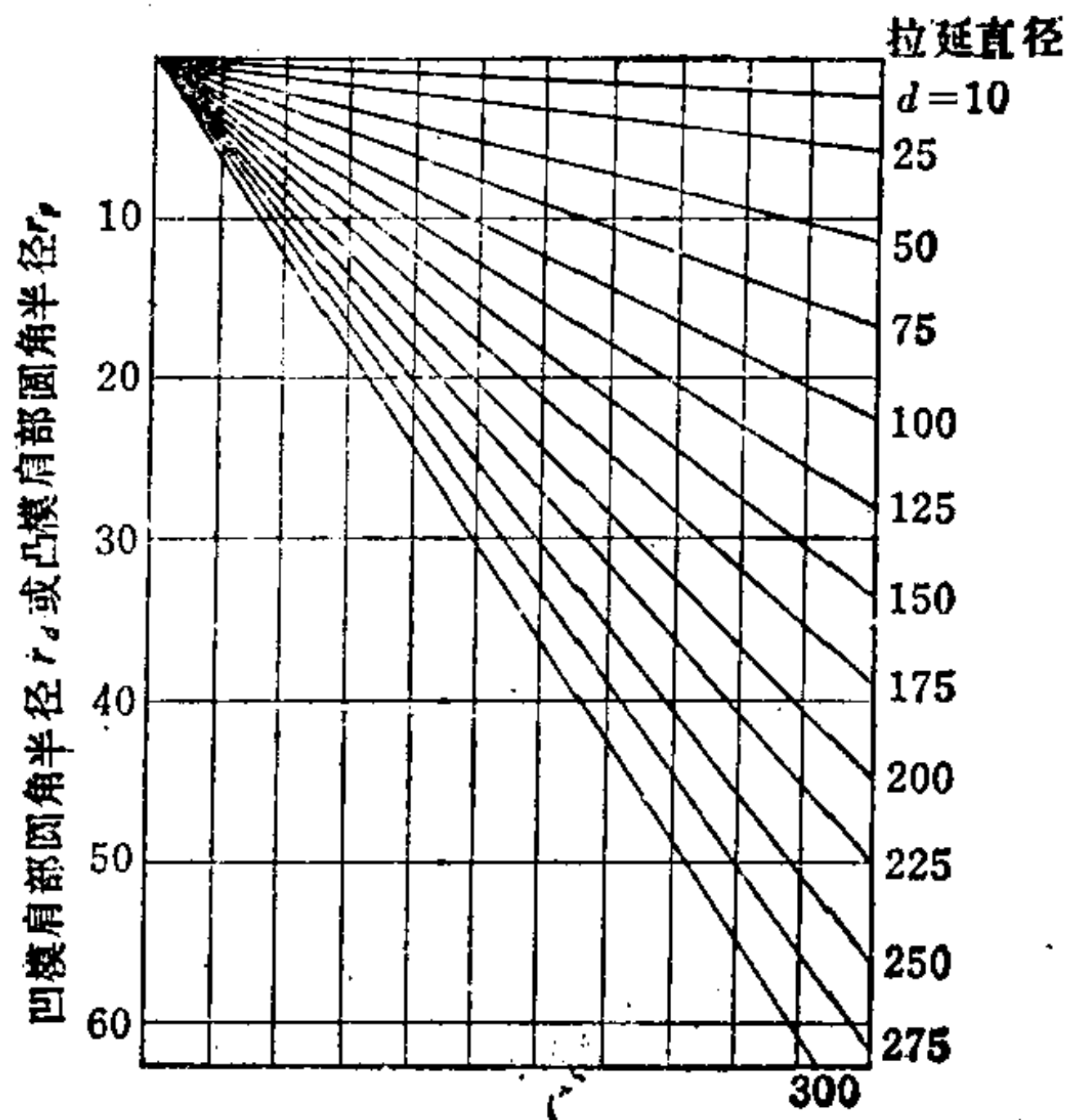
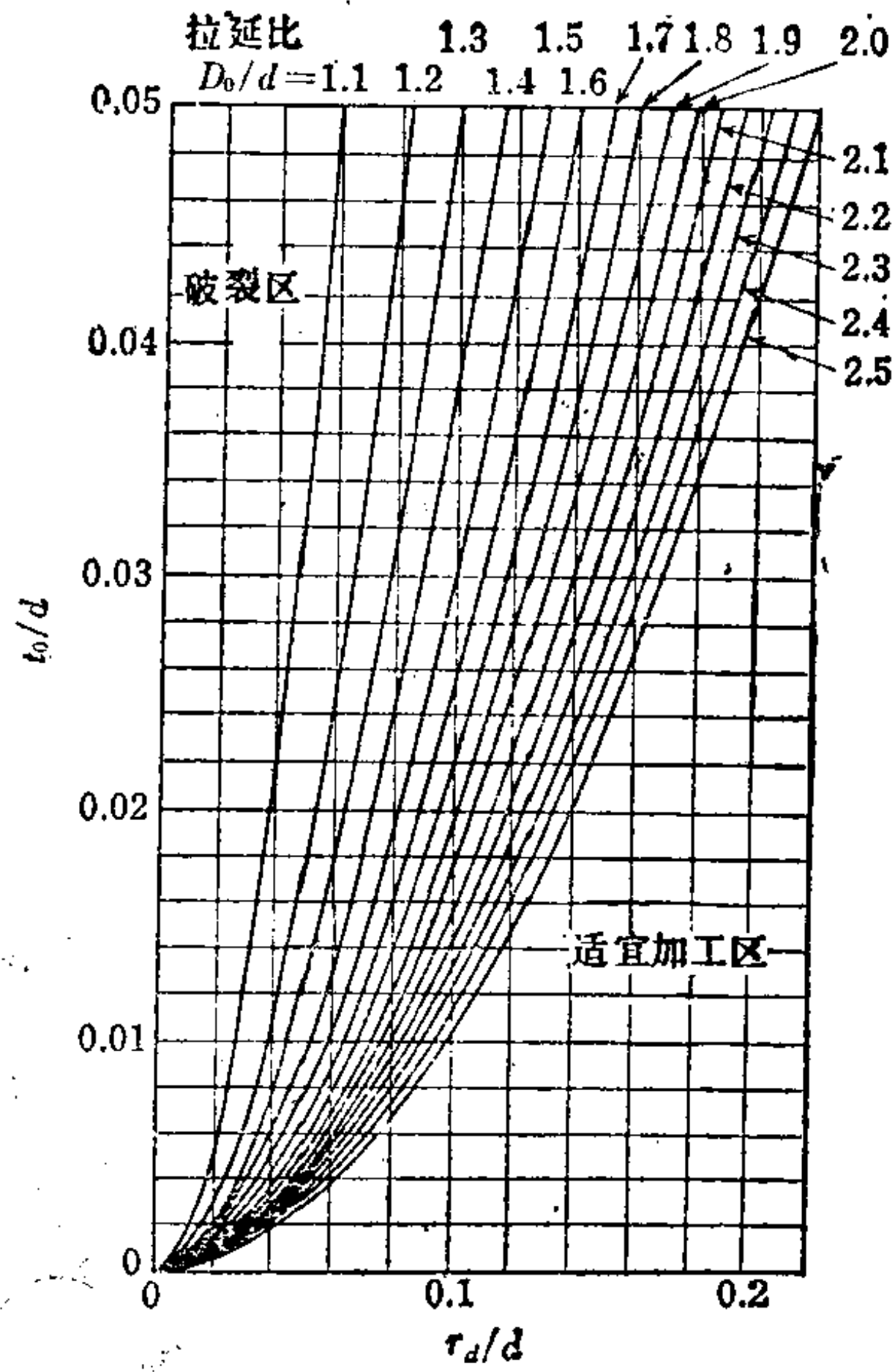
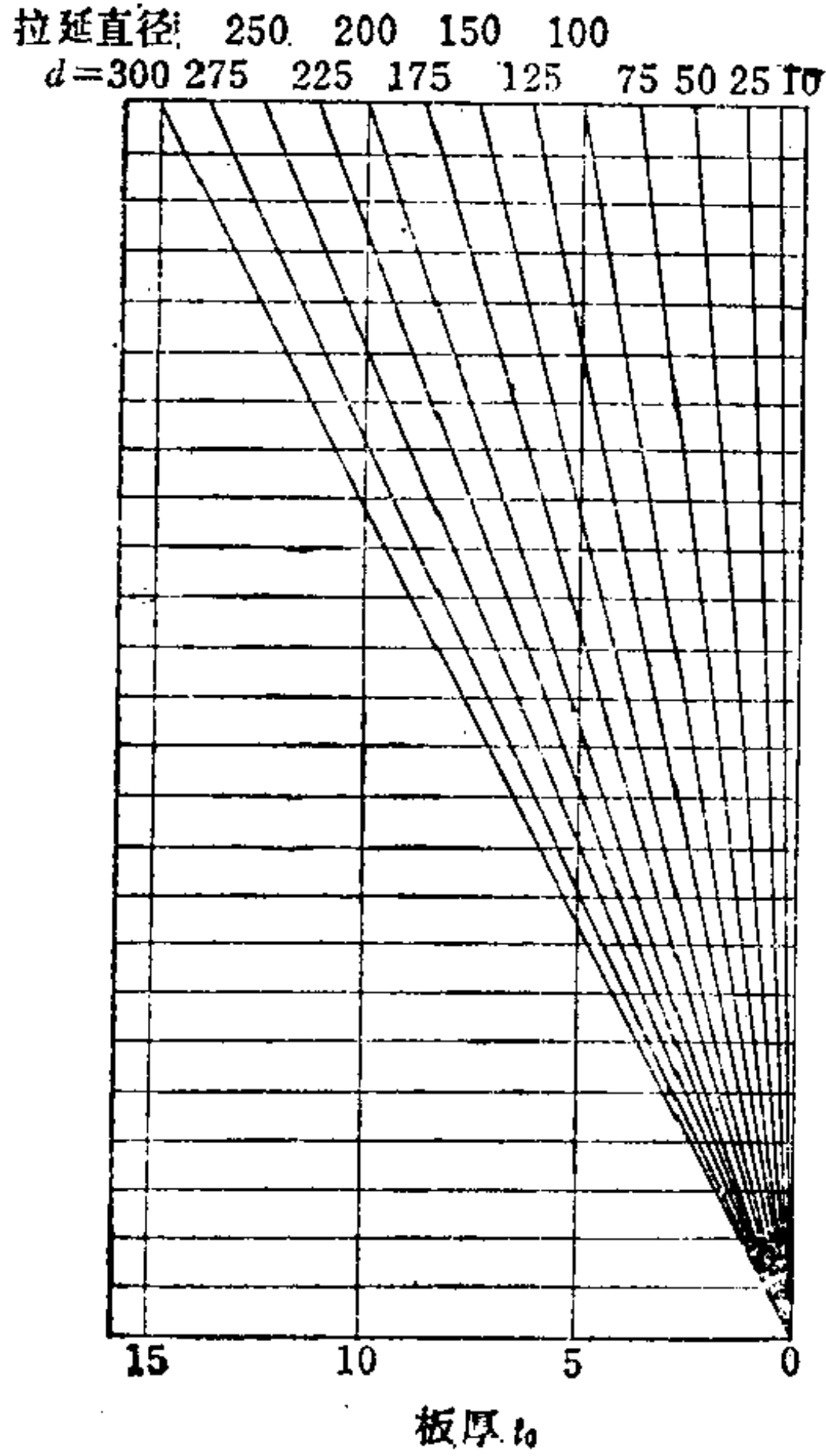


图4.47 圆筒形件拉延时凹模或凸模圆角半径的破裂极限值〔69〕

$$\frac{r}{d} \approx \frac{r_d}{d_d} = 0.8 \sqrt{\frac{D_0}{d} - 1} \times \sqrt{\frac{t_0}{d}} = \frac{r_p}{d_p}$$

符号说明： r_d —凹模圆角半径； d —拉延直径（精确的是取制件的平均直径。近似的可取凹模孔直径或制件的外径）； D_0 —坯料直径； t_0 —坯料板厚； D_0/d —拉延比 各数值的长度单位统一使用mm或in或cm

表4.12 α 值 ($C = t_{max} + \alpha t_0$)

拉 延 工 序	坯料厚度 t_0 (mm)		
	0.5~2	2~4	4~6
第 1 次拉延工序 (首次拉延)	0.2~0	0.1~0	0.1~0
第 1 次拉延工序 (首次拉延) 第 2 次拉延工序 (再拉延)	0.3 0.1	0.25 0.1	0.2 0.1
第 1 次拉延工序 第 2 次拉延工序 第 3 次拉延工序	0.5 0.3 0.3~0	0.4 0.25 0.1~0	0.35 0.2 0.1~0
第 1 和第 2 次拉延工序 第 3 次拉延工序 第 4 次拉延工序	0.5 0.3 0.1~0	0.4 0.25 0.1~0	0.35 0.2 0.1~0
第 1, 2, 3 次拉延工序 第 4 次拉延工序 第 5 次拉延工序	0.5 0.3 0.1~0	0.4 0.25 0.1~0	0.35 0.2 0.1~0

(x) 润滑 在凹模面和压边圈面与材料接触的部分进行润滑, 能提高拉延极限。增加润滑剂的粘度一般能提高润滑效果。使用适于材料的耐压添加剂或高分子薄膜也是有效的。只在坯件的凹模一面进行润滑的所谓单面润滑状态, 因在坯件和凸模之间有摩擦力, 使拉延件底部的破裂危险部位所受的力很小, 所以和两面润滑状态相比拉延极限往往会有所提高, 但为了涂油和卸件的方便, 从提高操作效率来看还是进行坯料全面润滑为好。但是,

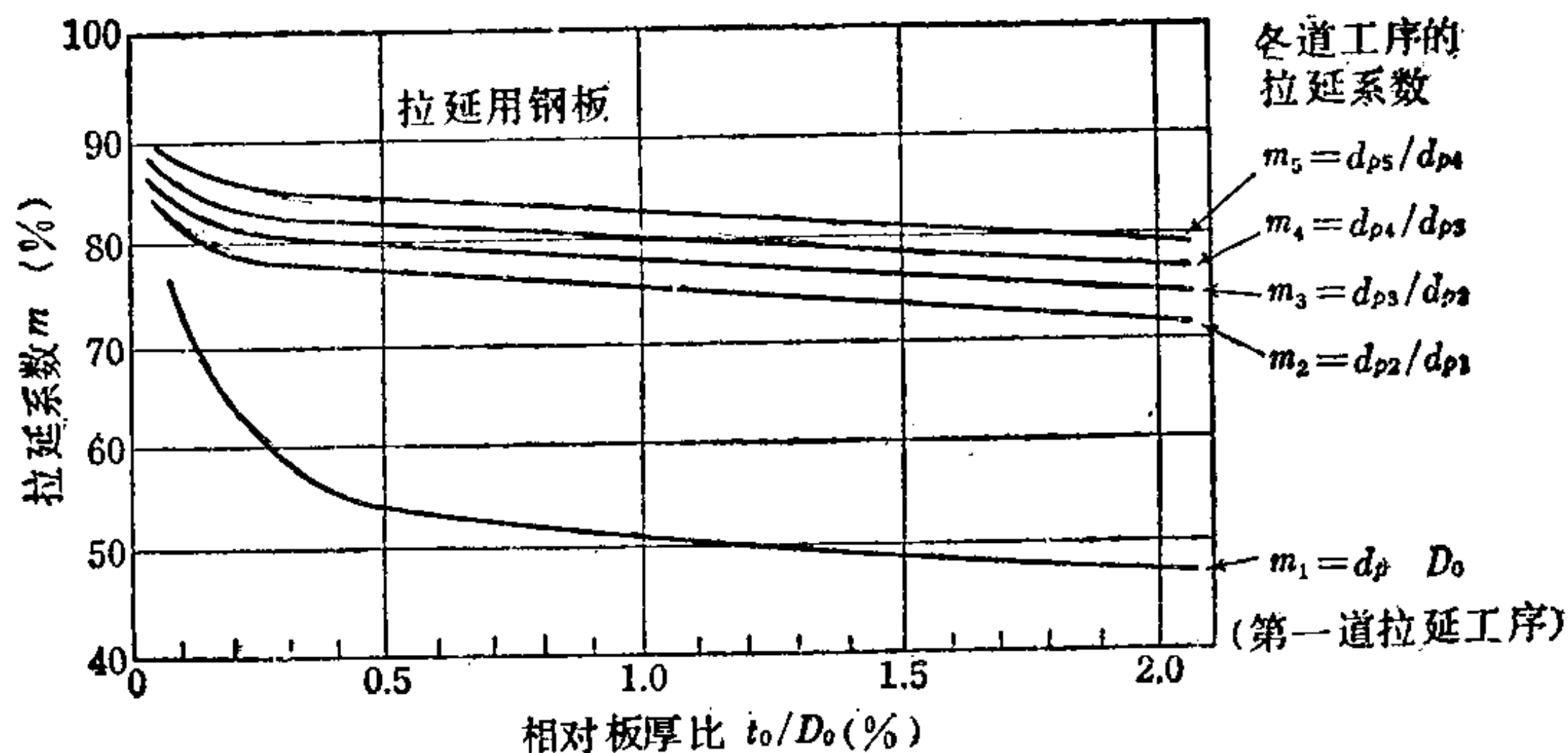
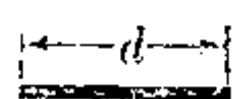
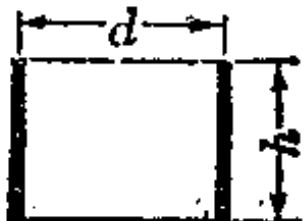
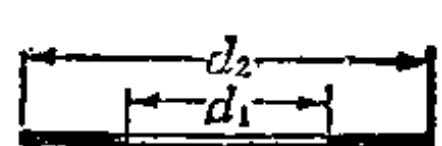
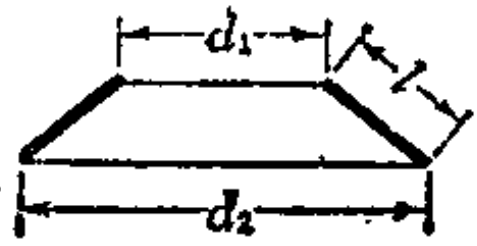


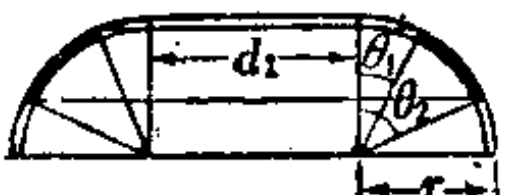
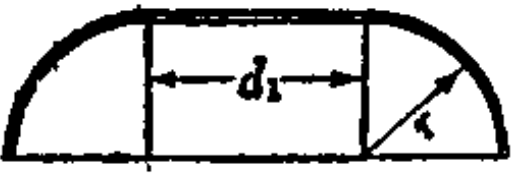




图4.48 拉延系数的标准值〔71〕

表4.13 圆筒形件拉延用圆板坯料尺寸的决定方法

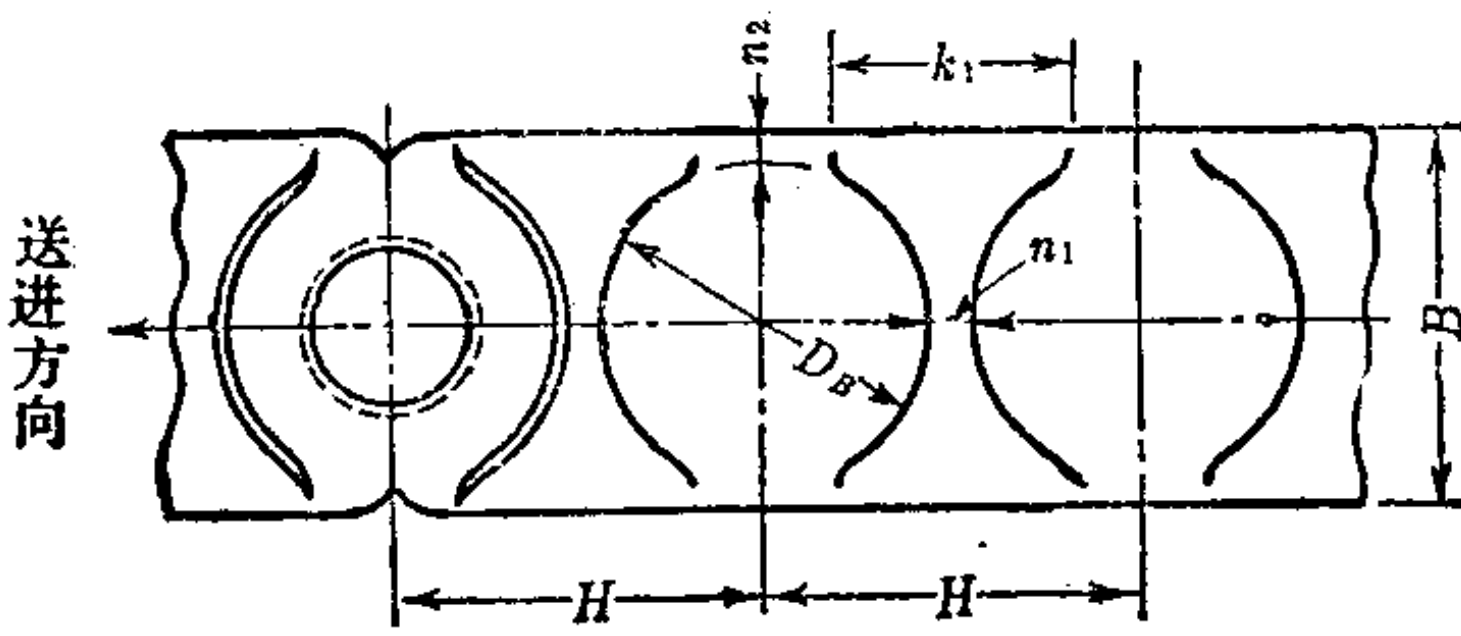
形状①	示图①	面积 A
圆板		$\frac{\pi d^2}{4}$
圆筒		$\pi d h$
环状板		$\frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2)$
截锥筒		$\frac{l}{2}(d_1 + d_2) \frac{d_2^2 - d_1^2}{4 \cos \theta}$
球形底	$\frac{d}{2} > h$ 	$\frac{\pi}{4}(d^2 + 4h^2)$
	$\frac{d}{2} = h$ 	$\frac{\pi d^2}{2}$
容器底肩部 θ_1, θ_2 (弧度)		$\pi r [(\theta_2 - \theta_1) d_1 - 2r (\cos \theta_2 - \cos \theta_1)]$
		$\frac{\pi r}{2} (\pi d_1 + 4r)$
凸缘肩部 θ_1, θ_2 (弧度)		$\pi r [(\theta_2 - \theta_1) d_2 + 2r (\cos \theta_2 - \cos \theta_1)]$
		$\frac{\pi r}{2} (\pi d_2 - 4r)$

① 表头原文中漏，译者加的。——译注

在使用非平底凸模拉延时，因为该部材料要产生胀形，所以不仅凸模端部要润滑，而凸模的侧面也要进行润滑。在成形速度较快时，因为润滑剂的粘度有重要作用，要求形成流体润滑以降低摩擦阻力。因此在材料全面润滑时，要从材料、成形的形状、润滑剂及成形速度等方面加以综合的分析。不过，寻求提高拉延极限的润滑状态除凭经验以外还没有更好的办法。图 4.51 所示为由实验求得的相应关系，可作为参考。

表4.14 连续拉延时的下料(排样) [70]

1. 有切口拉延:



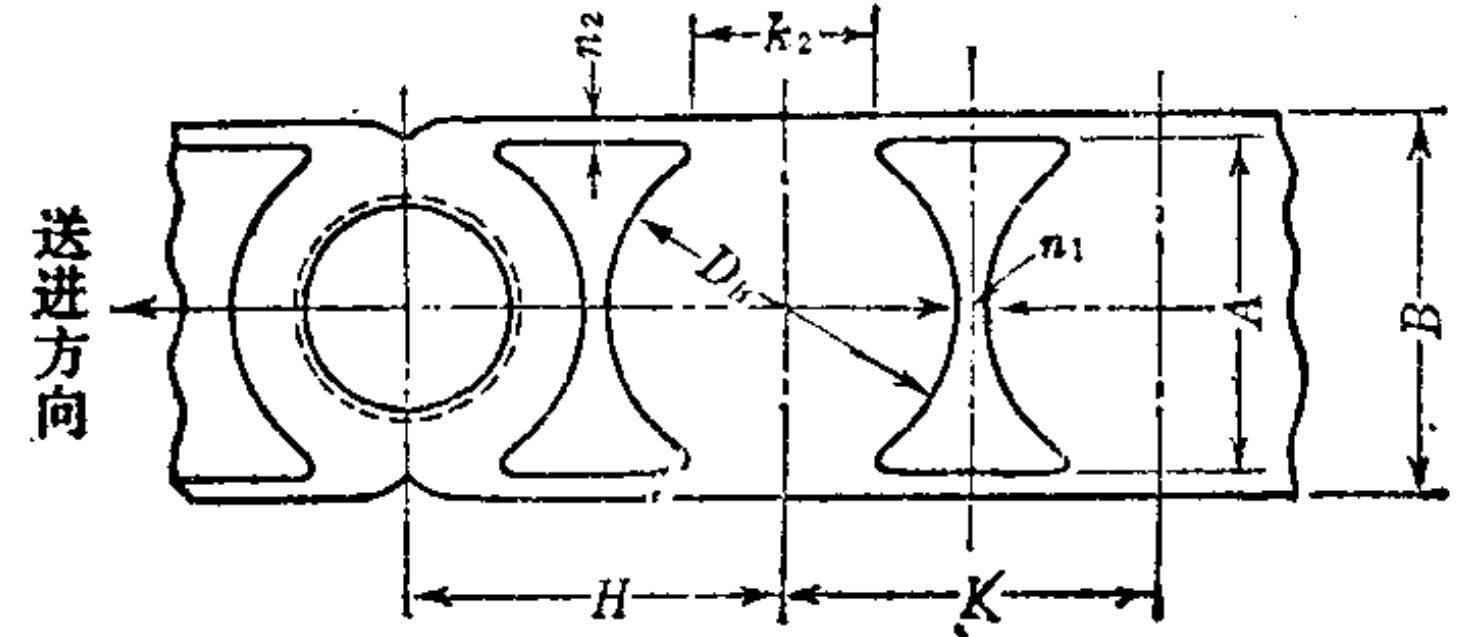
$$B = D_0 + \delta + 2n_2$$

$$= D_B + 2n_2 \quad (\text{mm})$$

$$H = D_B + n_1 \quad (\text{mm})$$

$$k_1 = (0.5 \sim 0.7) D_B \quad (\text{mm})$$

2. 冲切口后拉延:



$$B = (1 \sim 1.05) (D_0 + b) + 2n_2$$

$$= A + 2n_2 \quad (\text{mm})$$

$$H = D_B + n_1 \quad (\text{mm})$$

$$k_2 = (0.25 \sim 0.35) D_B \quad (\text{mm})$$

3. 无切口拉延:

$$B = 1.1D_0 + n_2 \quad (\text{mm})$$

$$H = 1.1D_0 + n_1 \quad (\text{mm})$$

各式中

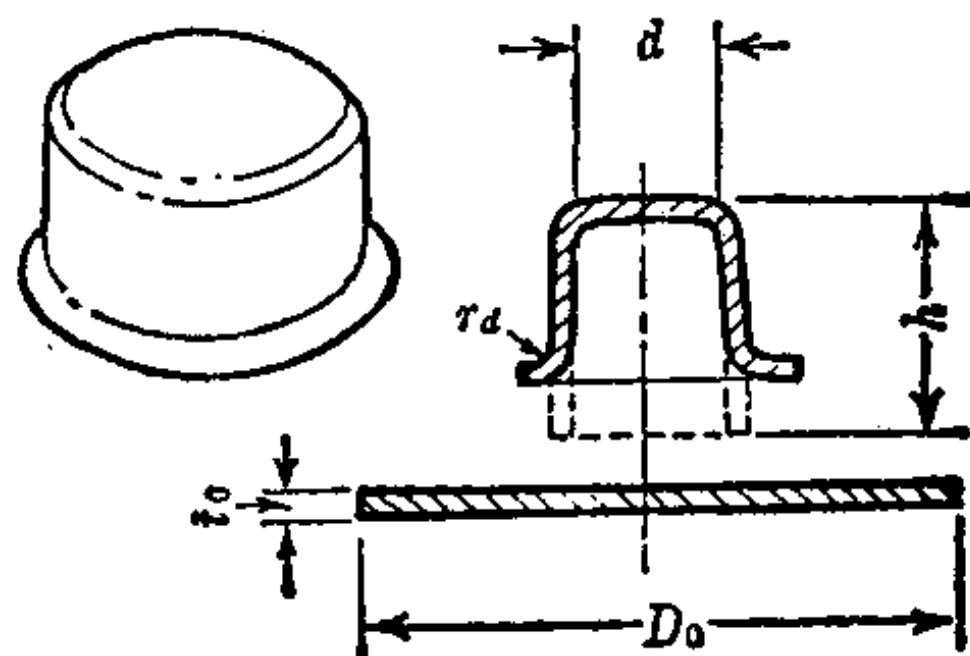
- D_0 —坯料直径 (mm);
- b —坯料切口留量 (mm);
- $D_B = D_0 + b$ (mm);
- n_1 —送料搭边宽度 (mm);
- n_2 —边缘搭边宽度 (mm)

D_B (mm)	n_1 (mm)	n_2 (mm)
<10	1~1.5	1.5~2
10~30	1.5~2	2~2.5
>30	2~2.5	2.5~3

表4.15 实用拉延极限 [72]

材 料	首次拉延的极限拉延系数	再次拉延的极限拉延系数
拉延用钢板	0.55~0.60	0.75~0.80
不锈钢板	0.50~0.55	0.80~0.85
镀锌钢板	0.58~0.65	0.88
铜	0.55~0.60	0.85
黄 铜	0.50~0.55	0.75~0.80
锌	0.65~0.70	0.85~0.90
铝	0.53~0.60	0.80
硬 铝	0.55~0.60	0.90

表4.16 拉延加工极限〔73〕



材 料	温度 (°F)	比	破裂极限直径比 (D_0/d) 破裂极限高度比 (h/d)									
			d/t_0 比									
			25	50	100	150	200	250	300	350	400	500
铝合金 (4.5Cr, 1.5Mg, 析出硬化型)	RT	D_0/d	2.0	2.1	2.0	1.7	1.6	1.5	1.4	1.4	1.4	1.3
		h/d	0.75	0.85	0.75	0.74	0.39	0.31	0.24	0.24	0.24	0.17
镁合金 (Th, Mn, 时效性)	750	D_0/d	2.0	2.1	2.0	1.7	1.9	1.5	1.4	1.4	1.4	1.3
		h/d	0.75	0.85	0.75	0.47	0.39	0.31	0.24	0.24	0.17	0.17
钛合金 (6Al-4V)	RT	D_0/d	1.7	1.7	1.7	1.5	1.4	1.4	1.3	1.2	1.2	1.2
		h/d	0.47	0.47	0.47	0.31	0.24	0.24	0.17	0.17	0.11	0.11
钛合金 (13V-11Cr-3Al)	RT	D_0/d	1.7	1.7	1.7	1.5	1.4	1.4	1.3	1.3	1.2	1.2
		h/d	0.47	0.47	0.47	0.31	0.24	0.24	0.17	0.17	0.11	0.11
不锈钢 USS12MoV	RT	D_0/d	2.0	2.1	2.0	1.7	1.6	1.5	1.4	1.4	1.3	1.3
		h/d	0.75	0.85	0.75	0.47	0.39	0.31	0.24	0.24	0.17	0.17
不锈钢 17-7Ph	RT	D_0/d	2.2	2.3	2.1	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.3
		h/d	0.96	1.1	0.85	0.56	0.47	0.39	0.31	0.24	0.17	0.17
不锈钢 (17Cr, 4Ni, 3Mo)	RT	D_0/d	2.0	2.1	2.0	1.7	1.6	1.5	1.4	1.4	1.4	1.3
		h/d	0.75	0.85	0.75	0.47	0.39	0.31	0.24	0.24	0.24	0.17
不锈钢 (15Cr, 7Ni, 2Mo) Ph, 15-7Mo	RT	D_0/d	2.0	2.1	2.0	1.7	1.6	1.5	1.4	1.4	1.4	1.3
		h/d	0.75	0.85	0.75	0.47	0.39	0.31	0.24	0.24	0.24	0.17
析出硬化钢 (26Ni, 15Cr) A-286	RT	D_0/d	2.1	2.2	2.0	1.8	1.6	1.5	1.4	1.4	1.4	1.3
		h/d	0.85	0.96	0.75	0.56	0.39	0.31	0.24	0.24	0.24	0.17

注：RT表示在室温下。

1. 首先根据给出的各参数计算 d/t_0 。 2. 其次用表根据 d/t_0 用内插法求定 D_0/d 、 h/d ，用 D_0/d 乘以 d 求出极限坯件直径，用 h/d 乘以 d 求出极限高度 h 。

在低速成形时，其拉伸极限随润滑剂粘度的增加而提高。然而，在中速成形时都分别出现拉伸极限的最大值。即达到某一润滑状态时再改善润滑状况而拉伸极限值反而下降，对这种情况应该注意。仅改变凸模底部的润滑状况对拉伸极限的影响如图 4.52 所示。

使用高分子薄膜就防止了坯件和凹模的金属接触，且受温度的影响不大。一般说，在拉伸中润滑条件越好则所需的压边力就越要增加 [78]。

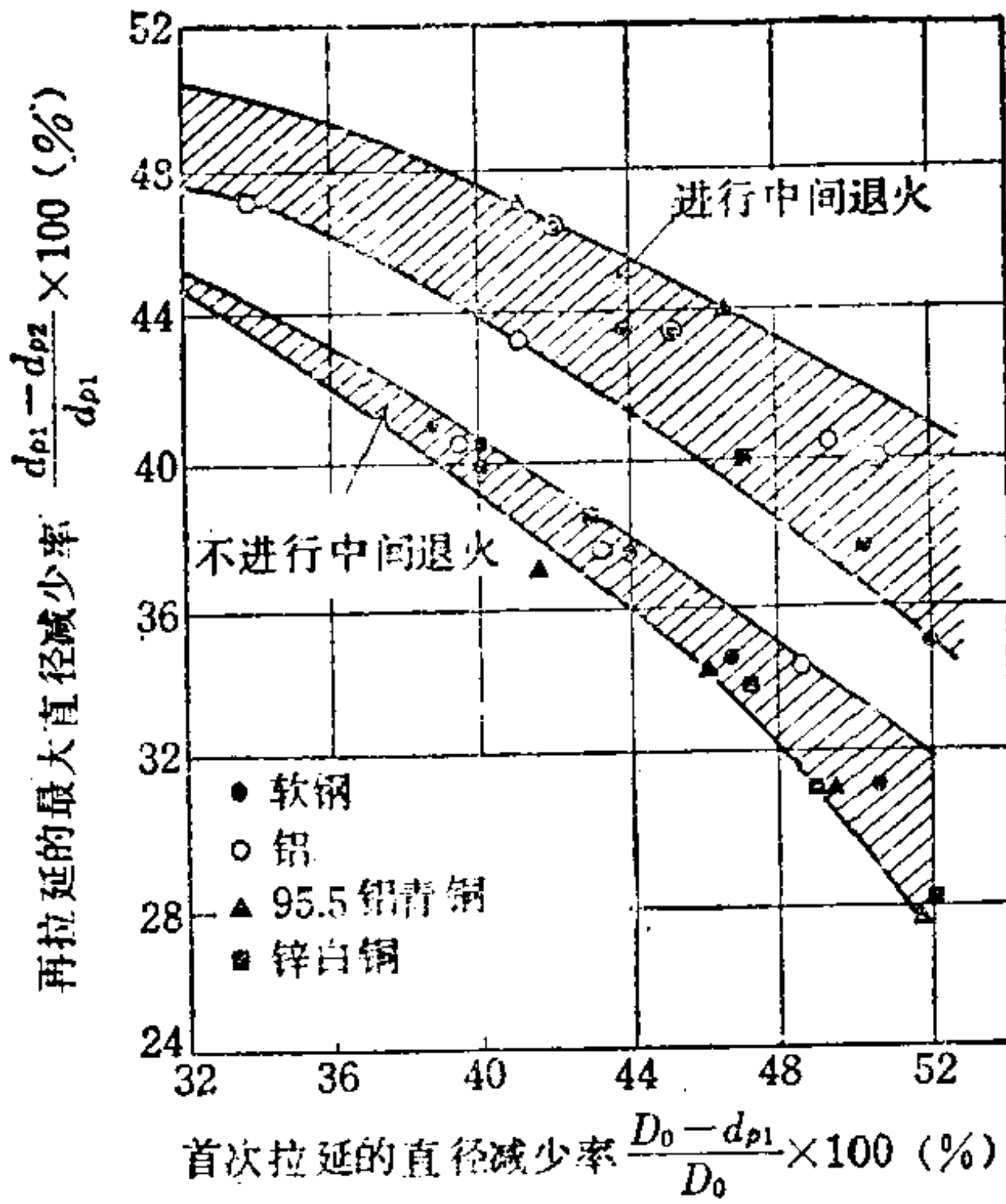


图4.49 首次拉伸对再拉伸极限的影响 [74]

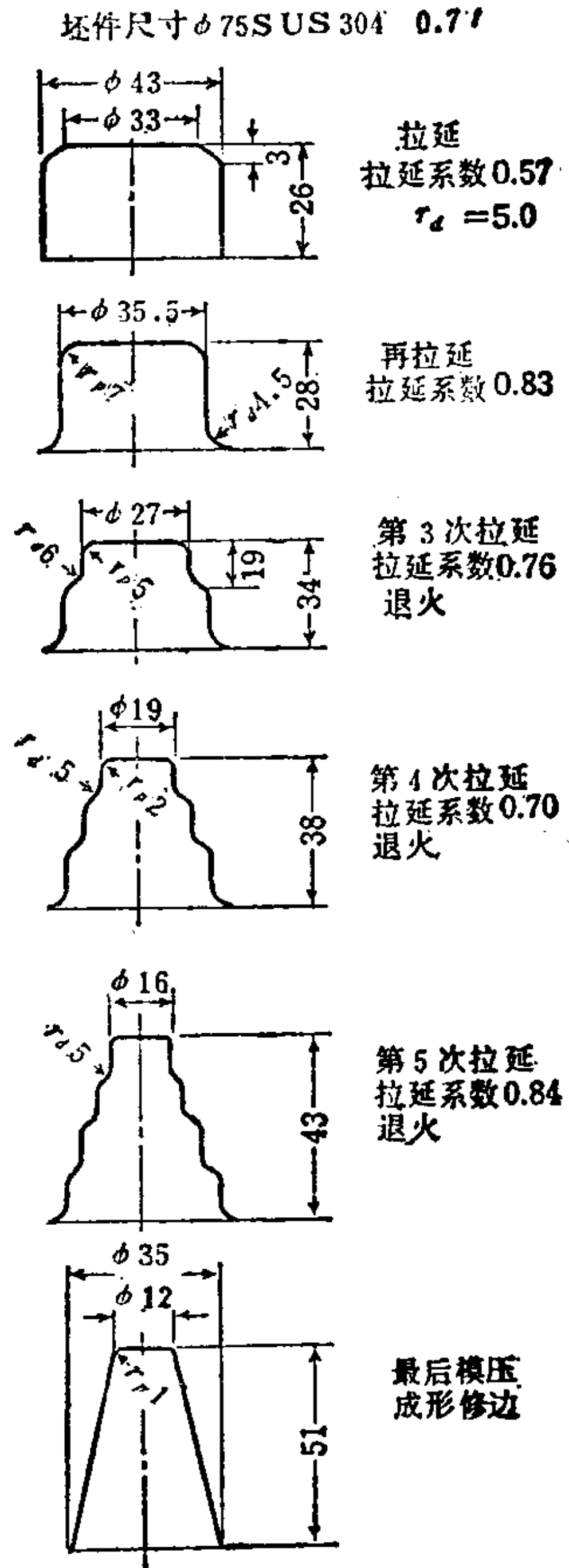


图4.50 深锥形容器的成形工序 [75]

(xi) 模具表面的精加工 凹模和压边圈的表面粗糙度希望加工到小于几个 μ ，但在使用高粘度润滑剂时，有时几个 μ 的表面粗糙度对提高拉伸极限反而有利。表面精加工的方向应与材料

的流动方向一致(即径向加工), 这样, 不容易出现划伤, 并可提高模具的寿命。凹模肩部圆角和平面的连接部分应尽可能的平滑, 这是拉延凹模精加工的关键。

(xii) 其他注意事项 在拉延时因为拉延件紧紧地包住凸模, 所以要注意有卸料器。凸模底部应设有通向外部的通气孔, 以避免在从凸模上卸料时工件由大气压作用而变形。

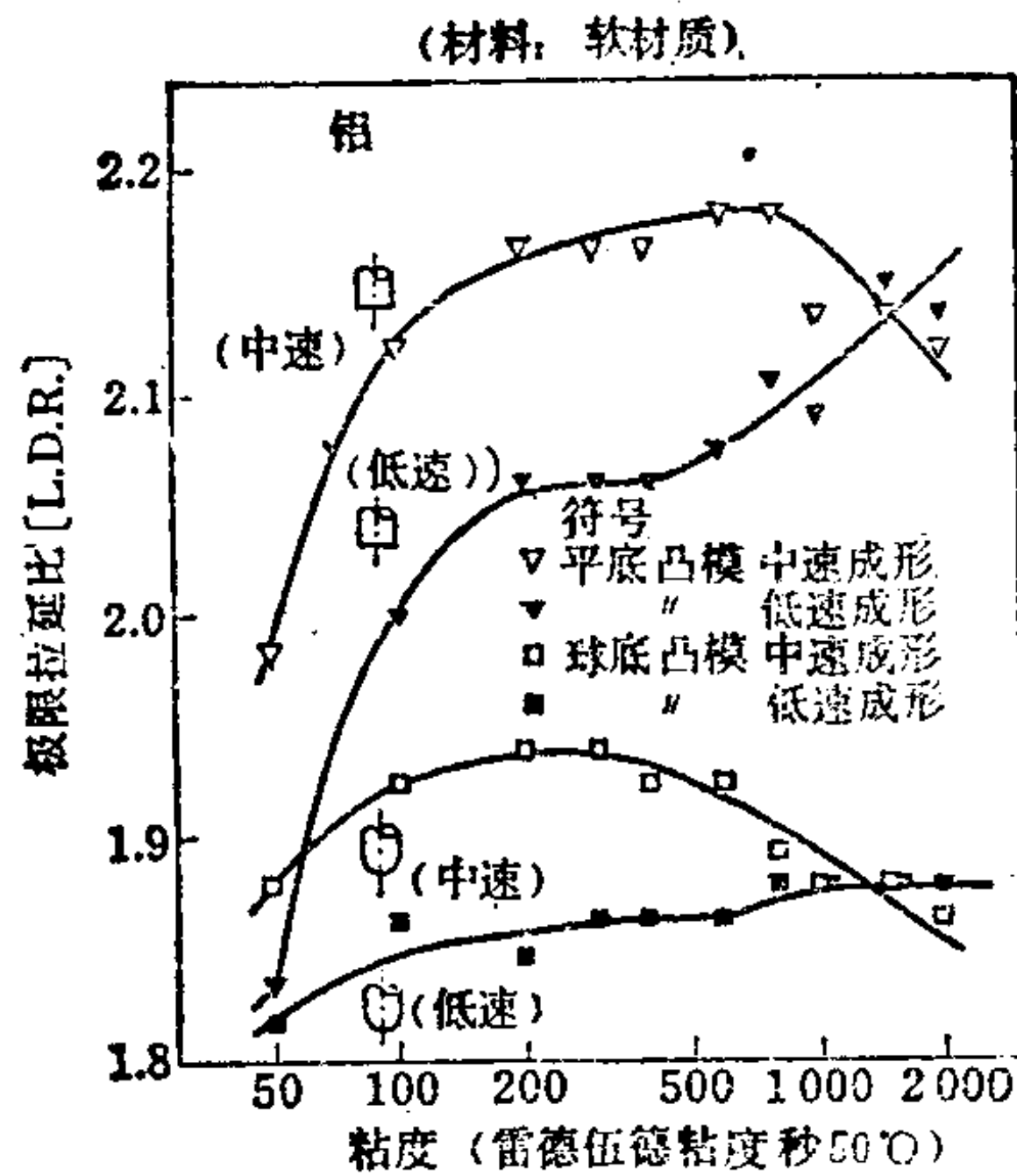
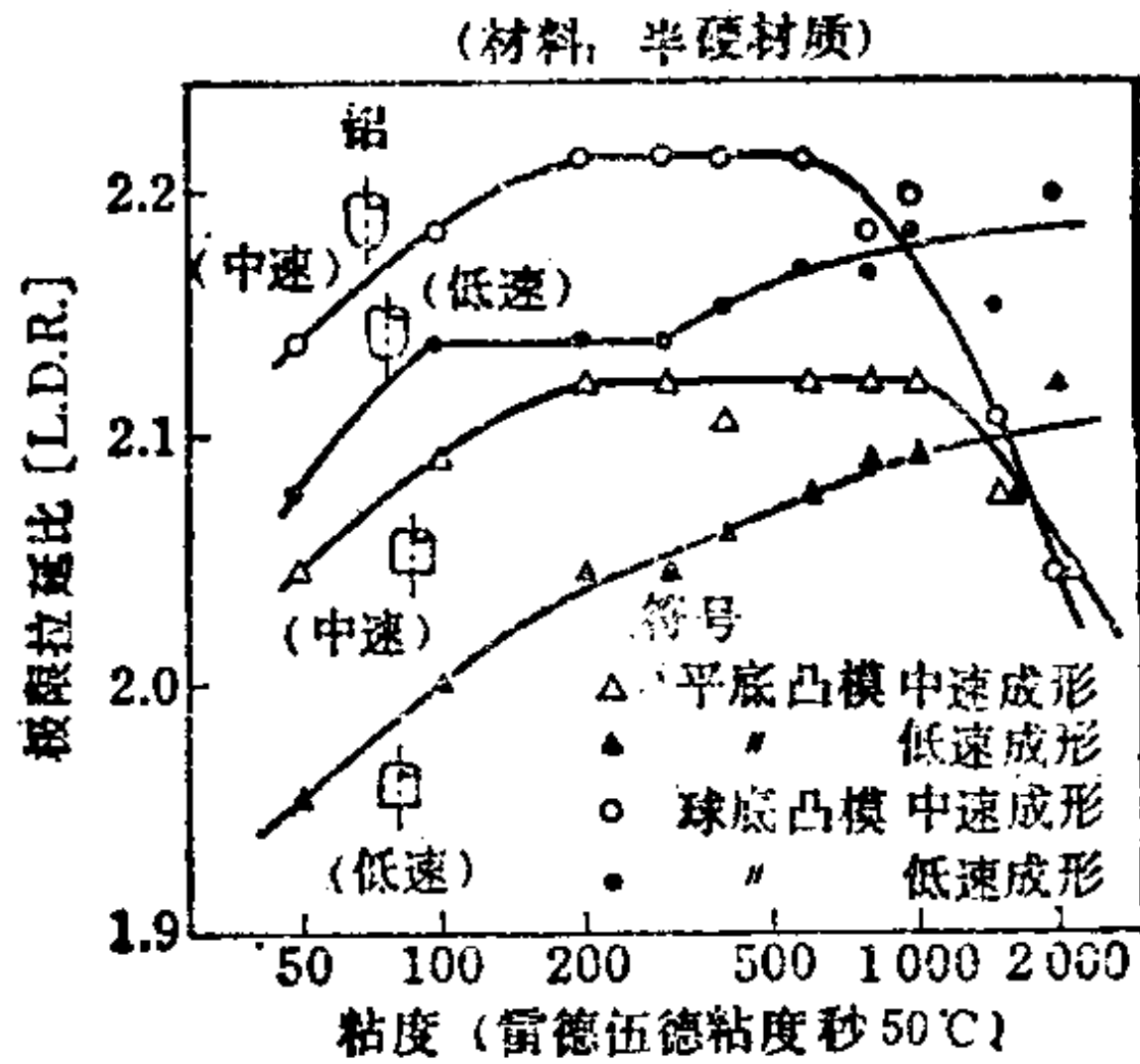


图4.51 用中性矿物油润滑时厚度 1.0mm 铝板的拉延极限[76]

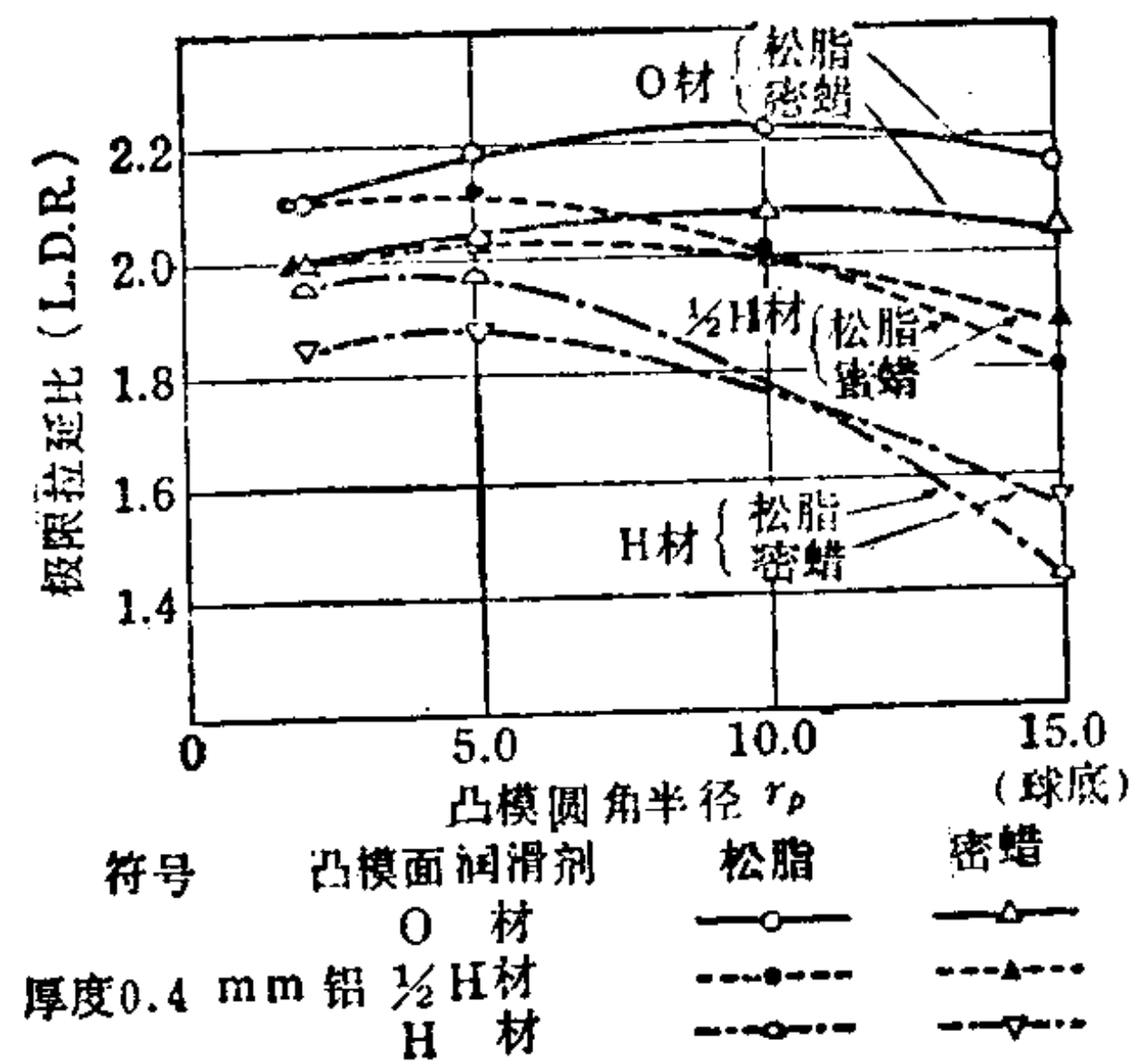


图4.52 凸模形状和润滑剂、材料种类等综合因素对拉延极限的影响

在进行再拉延时, 如坯料有明显的方向性时, 则在成形前容器已出现突耳, 可能在突耳高的部分出现如图 4.53 所示的纵弯曲而形成拉延缺陷, 因此应预先进行变薄拉延使材料厚度均匀, 或者变换材料。

(xiii) 带凸缘的容器 用 L. D. R. (极限拉延比) 以内的板

坯直径进行拉延时，如不用落料-拉延亦可得到带凸缘的容器。在用落料-拉延加工时应使板坯的外边缘搁置在凹模口之外，以防止凸缘的残缺不全。

c. 拉延-胀形复合成形（带凸缘容器的成形）

(i) 成形极限 成形极限和胀形一样，通常用不发生破裂的最大成形深度来表示。成形深度由凸模底部的胀形和从凹模面拉入的材料所构成，因此在这种场合，凡能从材料和成形形状等各方面去提高胀形极限和拉延成形极限的手段都适用。为了提高成形极限，增加变形中的拉延成分其效果是明显的，而从成品形状的稳定性和材料利用率的角度来看，则提高胀形的成分更为有利。

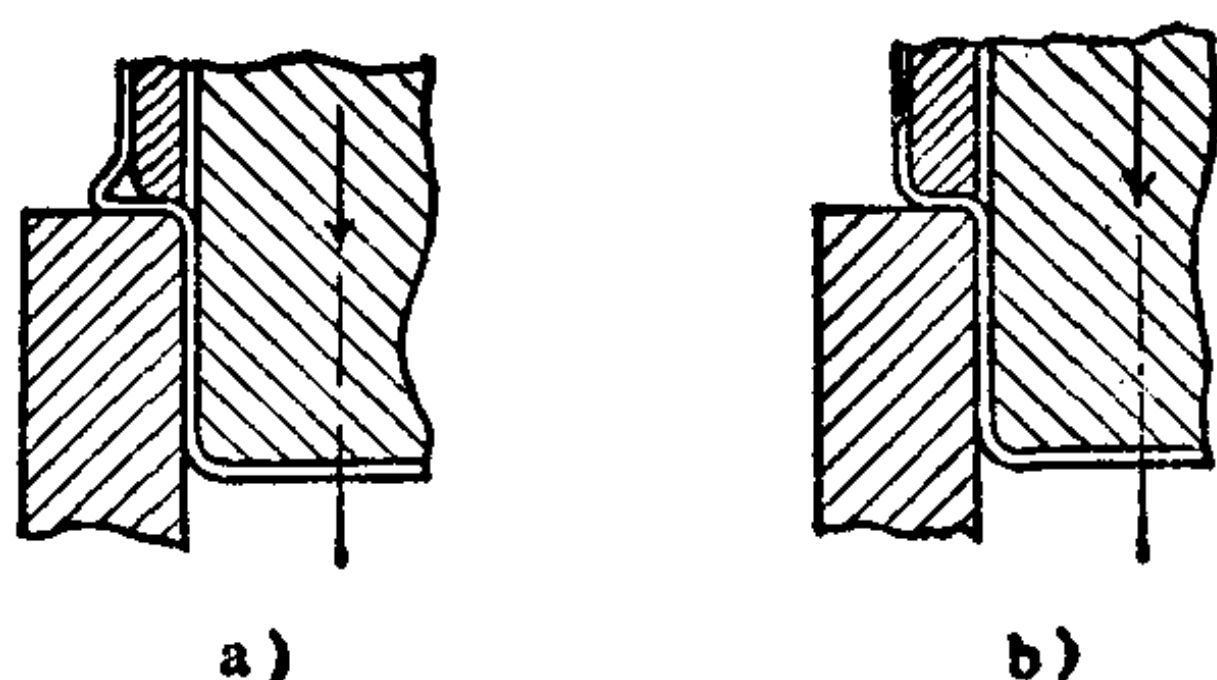


图4.53 有突耳的容器再拉延时产生的纵弯曲起皱

a) 突耳高的部分 b) 突耳低的部分

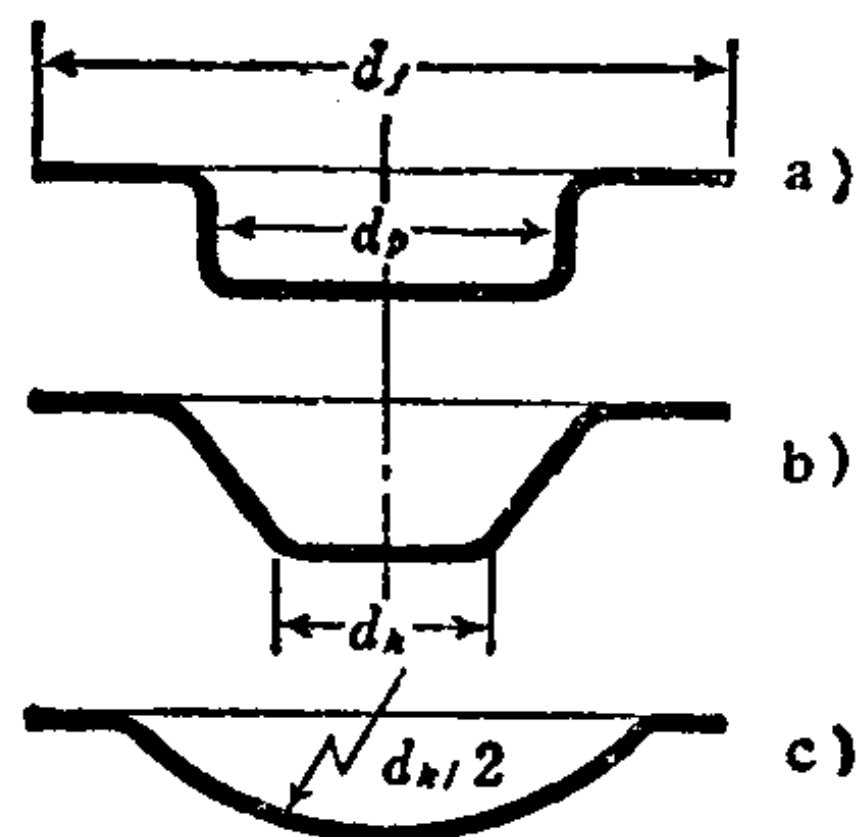


图4.54 成形形状〔80〕

(ii) 成形力 P_{max} 成形力在成形极限时出现最大值。当采用如图 4.54 a) 所示的圆柱形凸模时，成形力可按下式确定：

$$P_{max} = \pi d_p t_0 \sigma_b K_F$$

当采用图 4.54 b)、c) 所示的圆锥形和球形凸模加工时， P_{max} 值由下式确定：

$$P_{max} = \pi d_k t_0 \sigma_b K_F$$

式中 K_F ——系数。其值由表 4.17 确定。

(iii) 成形极限深度 h_{max} 纯胀形的极限深度最小，凸缘越小则成形极限深度将越增加。钢板成形时，由实验求得的极限深度见表 4.18。另外，同样的钢板建议采用的最佳拉延系数，见表

表4.17 对于钢板, 系数 K_F 值〔80〕

d_f/d_p	拉 延 系 数 d_p/D_0										
	0.35	0.38	0.40	0.42	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75
3.0	1.0	0.9	0.83	0.75	0.68	0.56	0.45	0.37	0.30	0.23	0.18
2.8	1.1	1.0	0.90	0.83	0.75	0.62	0.50	0.42	0.34	0.26	0.20
2.5		1.1	1.0	0.90	0.82	0.70	0.56	0.46	0.37	0.30	0.22
2.2			1.1	1.0	0.90	0.77	0.64	0.52	0.42	0.33	0.25
2.0				1.1	1.0	0.85	0.70	0.58	0.47	0.37	0.28
1.8					1.1	0.95	0.80	0.65	0.53	0.43	0.33
1.5						1.1	0.90	0.75	0.62	0.50	0.40
1.3							1.0	0.85	0.70	0.56	0.45

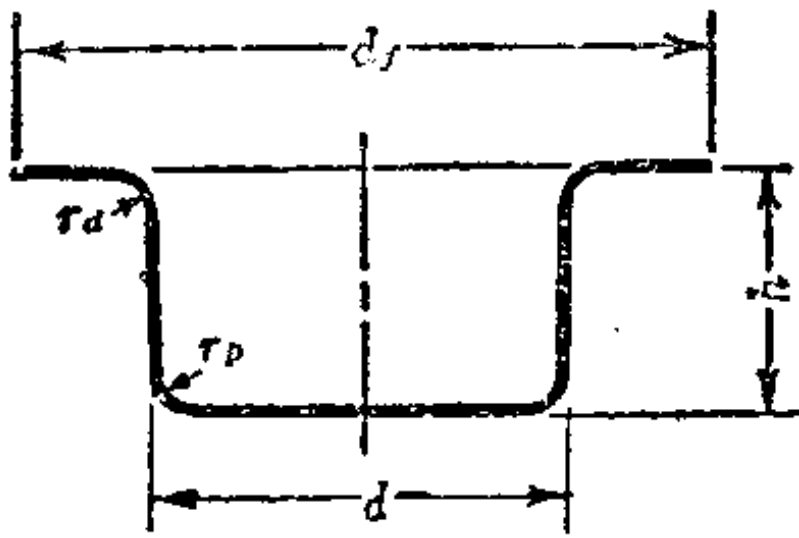
注: 在凸缘部加压边圈时, 该值应增加10~20%。

4.19。

此时, 板坯直径 D_0 可按下式确定:

$$D_0 = \sqrt{d_f^2 + 4dh - 3.44r_d} \quad (r_p = r_d)$$

表4.18 钢板的相对拉延深度 h/d 〔81〕



相对凸缘直径 d_f/d	相对板厚比 t/D (%)				
	2~1.5	1.5~1.0	1.0~0.6	0.6~0.3	0.3~0.15
< 1.1	0.90~0.75	0.82~0.65	0.70~0.57	0.62~0.50	0.52~0.45
1.3	0.80~0.65	0.72~0.56	0.60~0.50	0.53~0.45	0.47~0.40
1.5	0.70~0.58	0.63~0.50	0.53~0.45	0.48~0.40	0.42~0.35
1.8	0.58~0.48	0.53~0.42	0.44~0.37	0.39~0.34	0.35~0.29
2.0	0.51~0.42	0.46~0.36	0.38~0.32	0.34~0.29	0.30~0.25
2.2	0.45~0.35	0.40~0.31	0.33~0.27	0.29~0.25	0.26~0.22
2.5	0.35~0.28	0.32~0.25	0.27~0.22	0.23~0.20	0.21~0.17
2.8	0.27~0.22	0.24~0.19	0.21~0.17	0.18~0.15	0.16~0.13
3.0	0.22~0.18	0.20~0.16	0.17~0.14	0.15~0.12	0.13~0.10

注: 表中是在 $t/D = 2 \sim 1.5\%$ 时 $r_d = (10 \sim 12)t$ 和 $t/D = 0.3 \sim 0.15\%$ 时 $r_d = (20 \sim 25)t$ 的范围内, 给出 r_d 时的结果。 r_d 越大则 h/d 也大, 但 $r_p = r_d$ 。

表4.19 钢板的最佳拉延系数 m [81]

相对凸缘直径 d_f/d	相对板厚比 t/D (%)				
	2~1.5	1.5~1.0	1.0~0.6	0.6~0.3	0.3~0.15
< 1.1	0.51	0.53	0.55	0.57	0.59
1.3	0.49	0.51	0.53	0.54	0.55
1.5	0.47	0.49	0.50	0.51	0.52
1.8	0.45	0.46	0.47	0.48	0.48
2.0	0.42	0.43	0.44	0.45	0.45
2.2	0.40	0.41	0.42	0.42	0.42
2.5	0.37	0.38	0.38	0.38	0.38
2.8	0.34	0.35	0.35	0.35	0.35
3.0	0.32	0.33	0.33	0.33	0.33

(iv) 板坯直径 D 。采用胀形性能良好的材料,板坯的直径可以小些;用深拉延加工成形时板坯直径要大些。如果板坯直径达到凸模直径 3~5 倍以上时,则坯件外周材料很少参与变形。即可以认为成形基本上属于胀形。

(v) 再拉延 要求带凸缘的圆筒形件的深度更深而凸缘部外径保持不变时,需进行再拉延。其工序的设计示例见图4.55。

再拉延系数的合理值,参见表 4.20。

d. 圆筒形容器的变薄拉延 用拉延后的圆筒形容器再进行变薄拉延加工,是为了使其侧壁部分的壁厚减少而容器的深度增加,尺寸精度有所提高。另外,如果作为进行再拉延的前工序进行变薄拉延,则能使再拉延加工极限值有所提高。

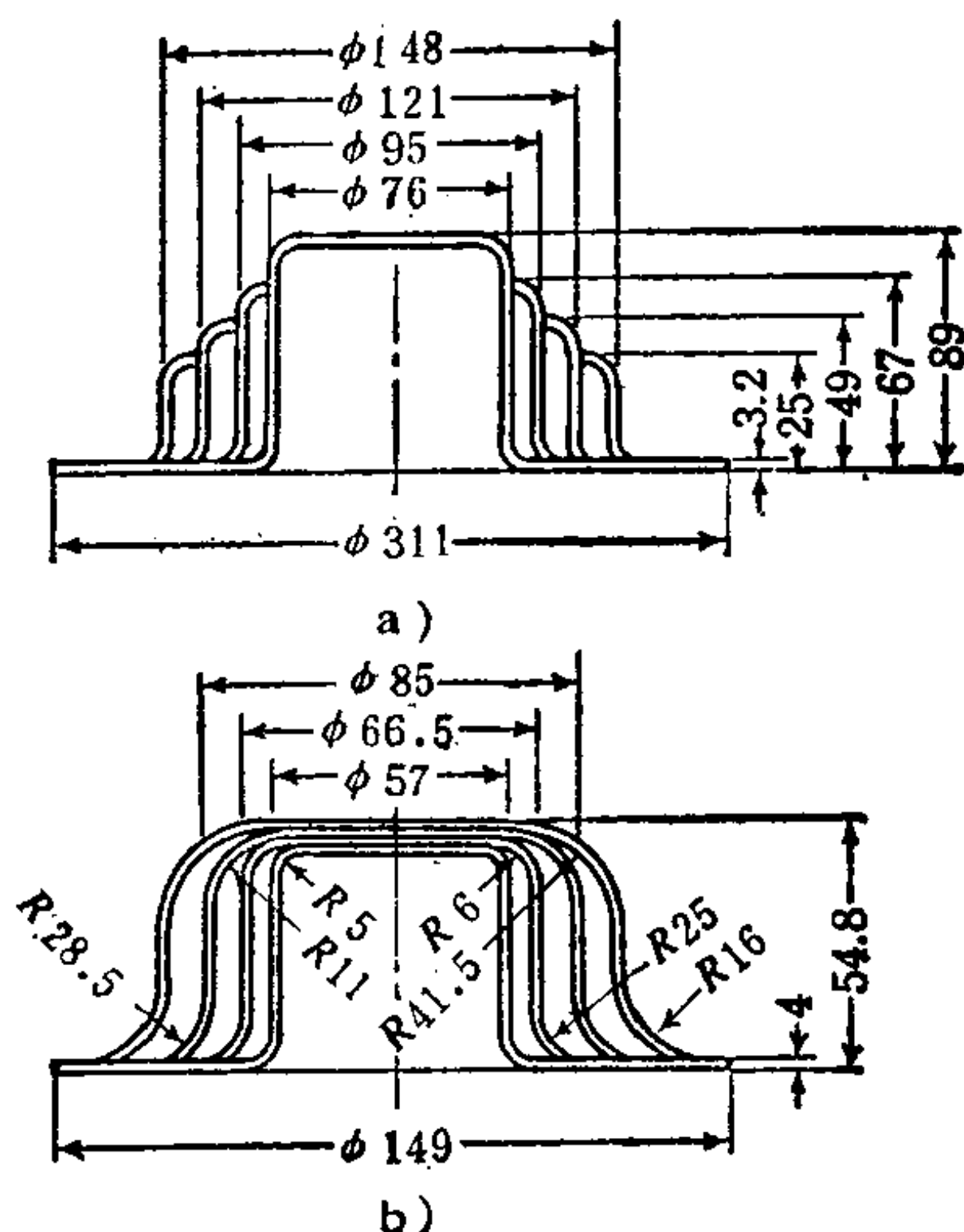
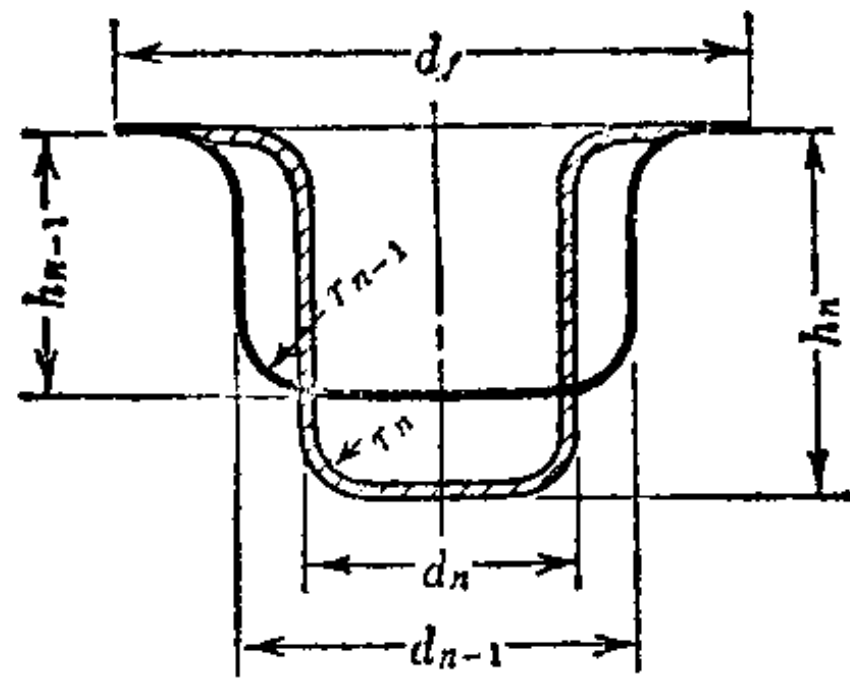


图4.55 带凸缘容器的再拉延工序示例[82]

表4.20 再拉延工序的再拉延系数〔88〕



$$h_n = \frac{d_{n-1}}{d_n} h_{n-1} - 0.86 \times \frac{d_{n-1} r_{n-1} - d_n r_n}{d_n}$$

再拉延系数 $m_n = d_n / d_{n-1}$	相对板厚比 $t/D(\%)$				
	2~1.5	1.5~1.0	1.0~0.6	0.6~0.3	0.3~0.15
m_2	0.73	0.75	0.76	0.78	0.80
m_3	0.75	0.78	0.79	0.80	0.82
m_4	0.78	0.80	0.82	0.83	0.84
m_5	0.80	0.82	0.84	0.85	0.86

(i) 变薄拉延极限 变薄拉延极限用变薄率或最大断面减缩率表示。以原始壁厚为 t_0 ，变薄后的壁厚为 t_1 ，则变薄率用 $\frac{t_0 - t_1}{t_0} \times 100\%$ 表示。表 4.23⊖ 所示为用凹模半角为 $7^\circ \sim 8^\circ$ 的圆锥形凹模对各种材料进行试验的结果。实际上进行变薄加工时其变薄量不超过 $30 \sim 40\%$ 。在采用串连式（阶梯式）连续变薄拉延时，每道工序可取 $3 \sim 5\%$ 的变薄率。串连式凹模变薄拉延的实例如图 5.56 所示。当加工力等于工件破裂的凸模力时则作为加工极限。工件破裂时的凸模力 P_m 可按下式估算：

$$P_m \approx \pi (d_p + t_2) t_2 \sigma_b \quad (\text{kgf})$$

式中 d_p ——凸模直径 (mm)；
 t_2 ——加工后的板厚 (mm)；
 σ_b ——材料的抗拉强度 (kgf/mm^2)。

(ii) 加工力 变薄拉延加工所需的力 P 按下式确定：

$$P \approx \left(\frac{1}{1000} \right) \pi d_p t_2 2\tau_s (1 + \mu \cot \alpha) \log_e (t_1/t_2) \quad [85]$$

⊖ 原文如此，似误。——译注

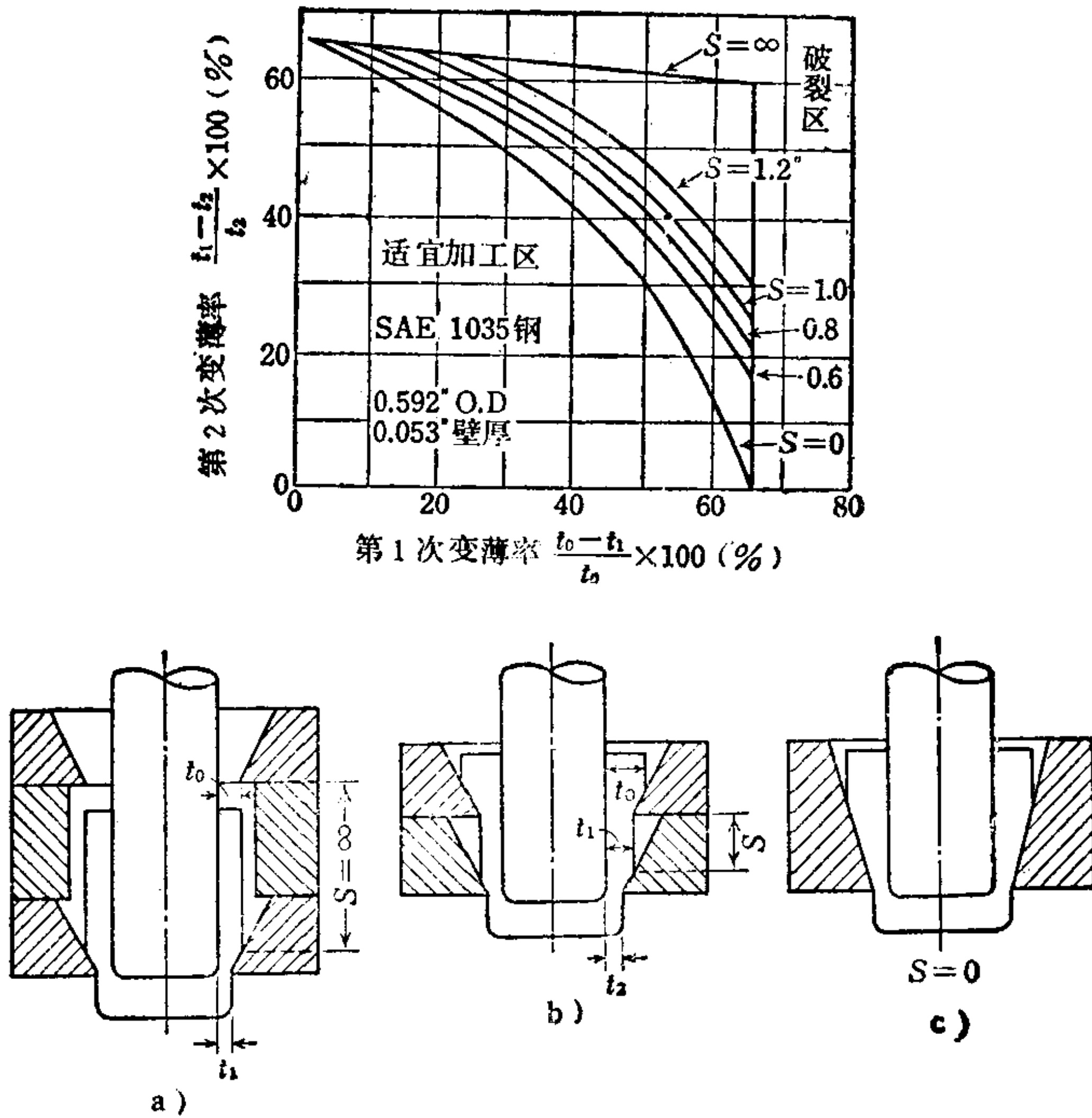


图4.56 串连式变薄拉延的极限变薄率[84]

- 式中 d_2 ——变薄后容器的平均直径 (mm);
 τ_s ——材料的剪切屈服强度 (kgf/mm^2);
 μ ——材料与模具之间的摩擦系数;
 t_1, t_2 ——变薄拉延加工前后的壁厚 (mm);
 θ ——凹模半角。

$P = P_m$ 时达到加工极限。另外，在材料与凹模之间进行润滑时加工力将减少。

(iii) 润滑 作为变薄拉延用的润滑剂有：大豆油、加耐压添加剂的混合油、矿物油 + 石墨、二硫化钼等固体润滑剂、硫化性被膜以及镀 Pb、Cu 等的金属被膜等。在凹模一面进行润滑是有效的，而在凸模一面还是有摩擦为好。然而，为了加工后成形

件的卸料，在凸模一侧进行少量润滑也是必要的。

(iv) 变薄深拉延 如减小拉延凹模和凸模之间的间隙使之小于料厚，则在拉延的同时又进行了变薄加工。这时，拉延所需的力的一部分由被强迫压在凸模侧面部分的材料所承受，当间隙取为料厚的90%时，极限拉延比将有所提高。但间隙

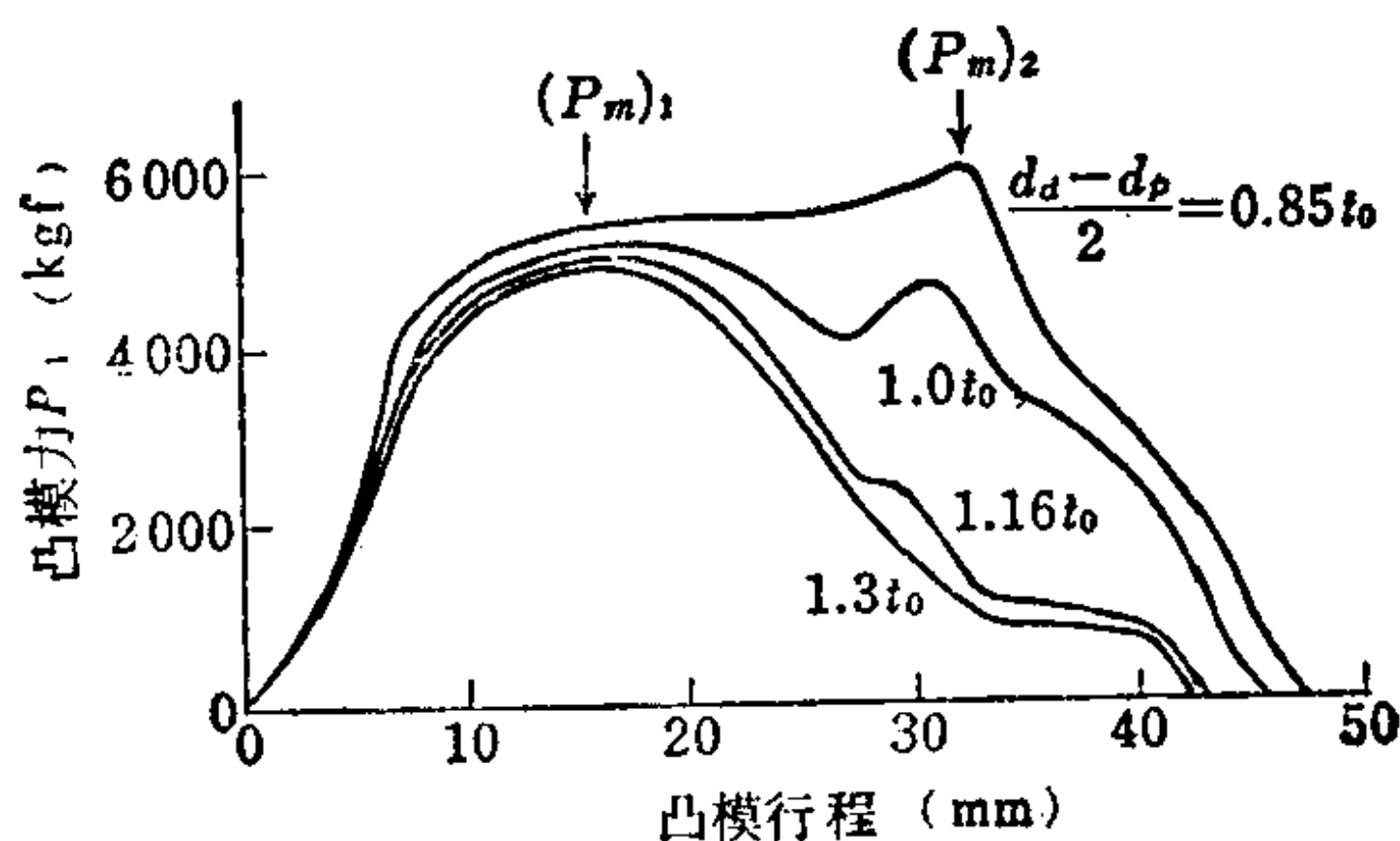


图4.57 变薄深拉延时凸模力—行程曲线〔86〕

材料：软钢 $t_0 = 0.8\text{mm}$, $2r_0 = 90\text{mm}$,
 $d_d = 50\text{mm}$

过小随着变薄率的增加，则极限拉延比即急剧下降〔85〕。

变薄深拉延时凸模力和行程的关系曲线，如图4.57所示。由于附加变薄加工出现了凸模力的最大值 (P_m)。

表4.21 K值

d_p/t_0	K
>60 ①	1.0
40~60	1.0~1.03
20~40	1.03~1.08
<20	1.08~1.24

① 原文似误为小于60。——译注

e. 伸长类翻边 (扩孔)

(i) 成形极限 用平底、球底及圆锥底凸模成形时扩孔极限的代表例子，如图4.58所示。

由图可知，由于凸模形状的不同，扩孔极限有很大的不同，其中以圆锥角小的圆锥底凸模的扩孔极限为最高，球底凸模次之，平底凸模最差。在弯曲圆角半径小且直角弯曲时翻边高度 H 按下式确定：

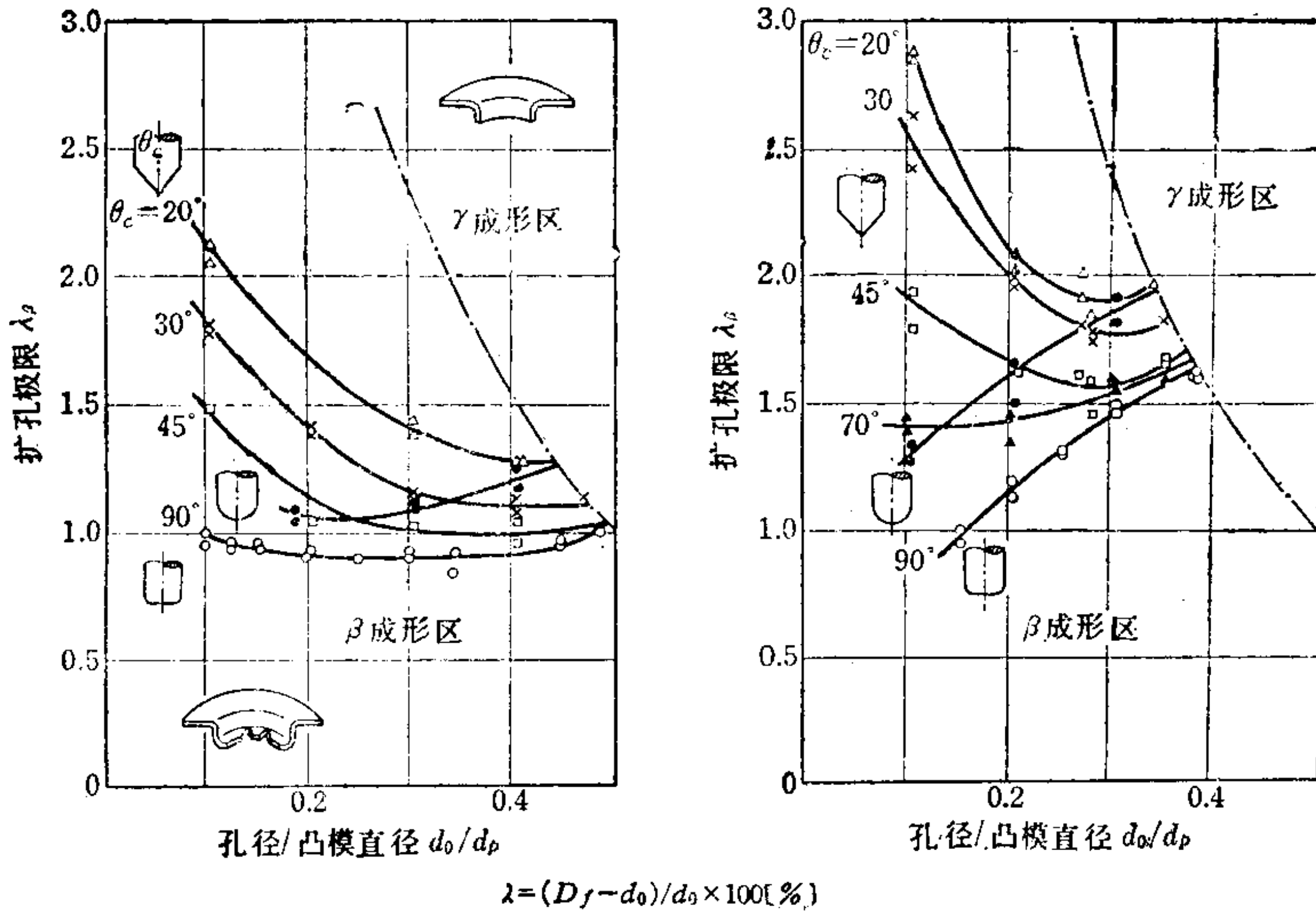


图4.58 用圆锥底、球底及平底凸模成形时扩孔极限的比较〔87〕

$$\lambda = \frac{D_f - d_0}{d_0} \times 100 (\%)$$

$$H = K(d_p - d_0)/2$$

式中 K ——系数， K 值由表 4.21 给定。

(ii) 底孔的加工〔88〕 由冲出的孔直接进行扩孔加工，由于孔边的毛刺和塌角而使扩孔极限降低。在冲孔后用钻头或铰刀去除毛刺或进行退火处理以减轻冲孔加工的硬化影响时，则能提高扩孔极限。一般切削加工的孔比冲出的孔好。为此，建议采用冲孔之后进行切削类型的冲裁，如二次冲裁法。冲裁模的间隙和扩孔极限的关系，如图 4.59 所示。由图可知，存在着对伸长类翻边最不利的模具间隙值。

(iii) 成形力 成形力比胀形所需的力要小得多，孔径越大则成形力越小。

(iv) 润滑 在凸模和板坯之间进行润滑会使成形力减小。另外，在用平底凸模翻边且孔小时，则将在凸模肩部相应处出现

破裂 (α 破裂), 如进行充分的润滑将变为伸长类型翻边破裂 (β 破裂) (参照 4.1.2)。

4.4.2 盒形件的成形

a. 纯胀形

(i) 成形极限 如果盒形断面的对边距离相同, 若拐角部圆角半径 r_1 越大则极限深度 h_{max} 值越大。其它成形尺寸的影响和圆筒形件成形时相同。但是在盒形件成形时, 模具的间隙过大则制件的侧壁将出现纵弯曲、起皱及松弛等形状缺陷。

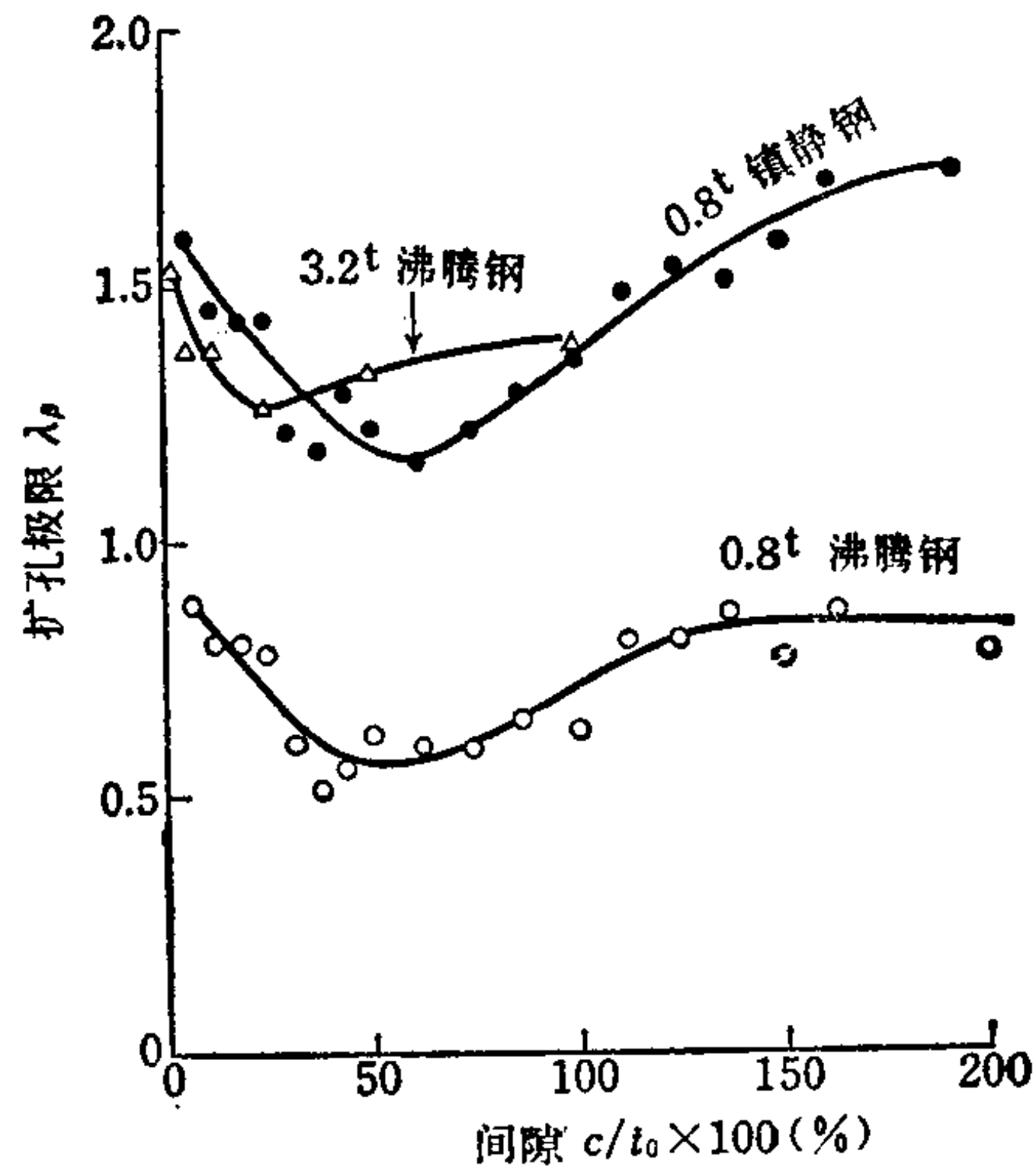


图4.59 冲底孔模具的间隙和扩孔极限的关系〔89〕

如图4.60所示, 在凹模面上设置阻止材料移动的拉延筋时, 在成形圆筒形件时其极限深度 h_{max} 值随拉延筋设置位置距凹模口越远而有所增加, 而在成形盒形件时, 如制件的转角处圆角半径 r_1 相对直边部长度 L_1 越小则上述拉延筋设置过远则影响越小。在 $r_1/L_1 = 0.05$ 时, 拉延筋布置得离凹模口越近则 h_{max} 越大。这现象在凸模底部有润滑时更为明显。

成形极限的实验公式〔90〕(各部分形状的尺寸参数见图4.61) 如下:

$$h_{max} = [0.0031(e_B - \sigma_s) + 0.017K + 0.39]l_2/2 \\ + 0.016r_2 - 0.44(l_1/2) + 0.039r_1 \\ + 0.53r_p + 0.89r - 2.47〔90〕$$

式中 e_B ——材料的最大延伸率 (%) ;

σ_s ——材料的屈服点 (kgf/mm^2) ;

K ——润滑指数, 取 1 (润滑程度低时) ~ 2 (润滑程度高时)。

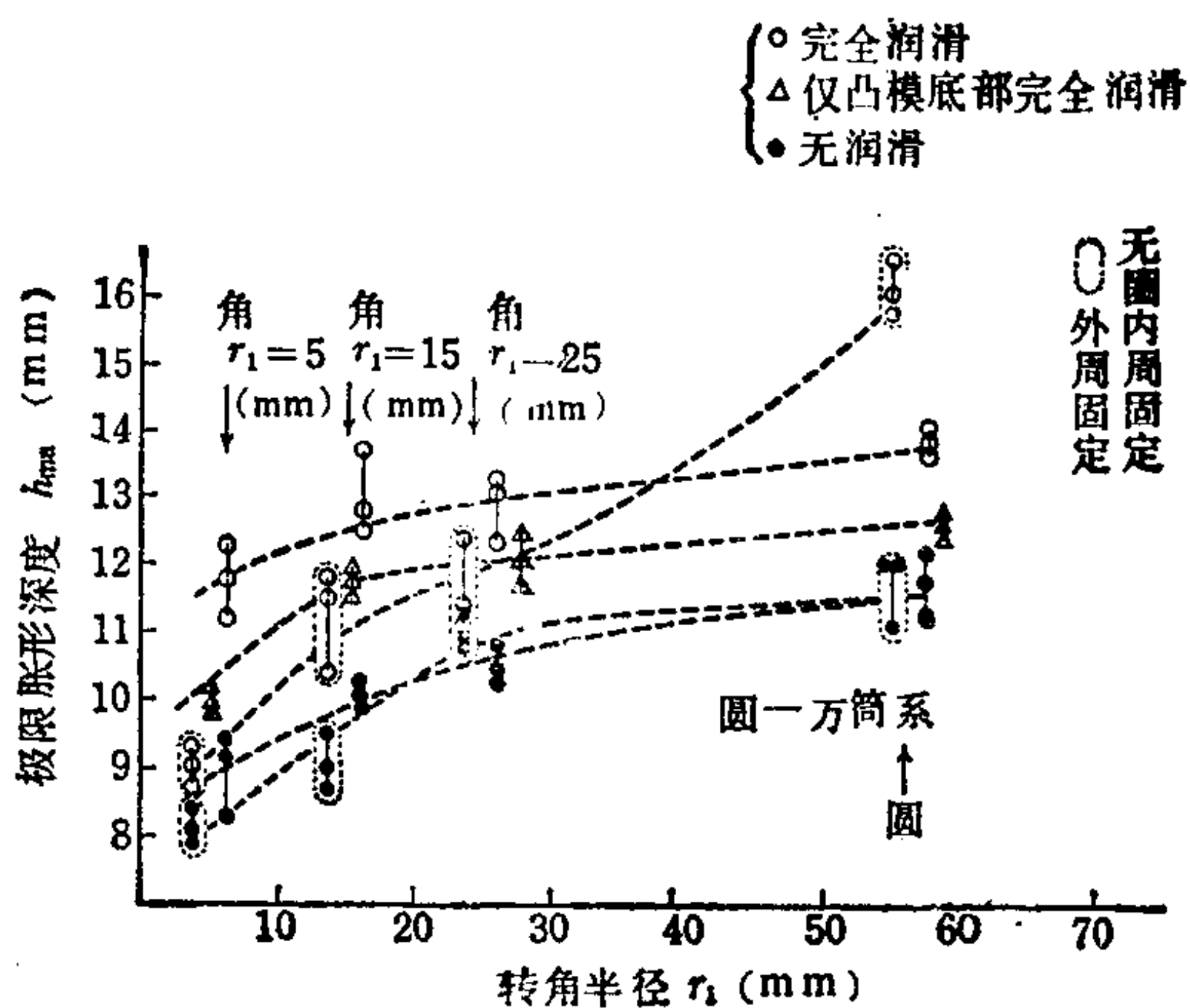


图4.60 极限胀形深度[91]

外周固定：在几乎无限远处有筋 内周固定：离凹模孔10mm处设筋
 (材料：厚度为0.09mm软钢板)

包括盒形在内的多边形平底容器，其胀形的难易程度，一般可按下列方法判定。

(1) 无润滑或润滑不良的场合 大致可按与制件转角半径相同的圆形平底凸模的胀形极限来考虑。这是安全的。

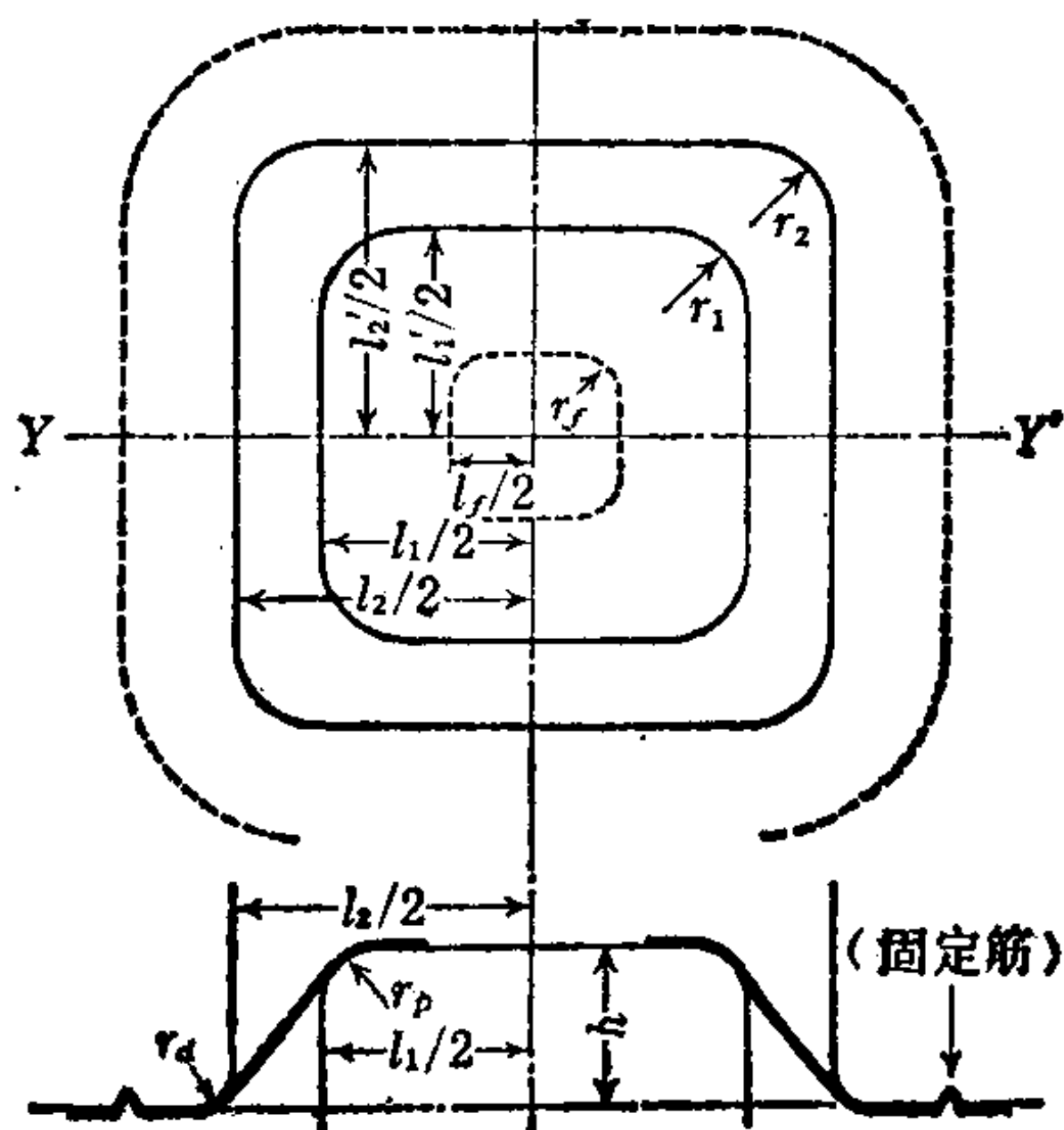


图4.61 模具尺寸参数的符号说明[90]

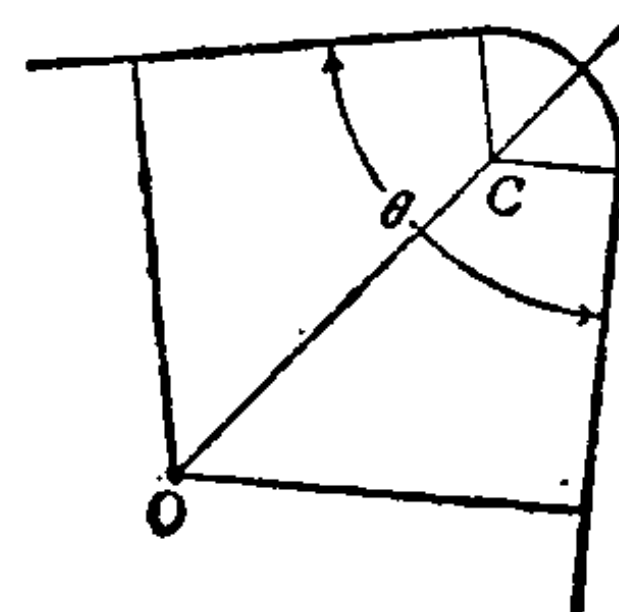


图4.62 胀形时整体变形中心(无位移点)和局部变形中心的关系[92]

O：无位移点 C：局部变形中心 θ ：整体形状的夹角

(2) 润滑良好的场合 如图 4.62 所示与转角部分相邻的直边部分越大 (换言之, 即在胀形时, 从变形中心到转角部位的中心的长度越大), 并且相邻部分的夹角 θ 越大时, 其成形极限比用转角部相当的平底圆柱凸模时的成形极限要大。矩形容器的成形极限和相当于短边的正方形容器的成形极限大致相同或略深 (不大于 10~20%)。

(ii) 成形力 近似计算的最大胀形力可用下式。如凸模底部越近于无润滑状态, 则实际力将越小于计算值。

$$P_{max} = \sigma_b t_0 [2\pi r_1 + 4(l_1 - 2r_1)]$$

b. 拉延

(i) 下料 使拉延后方形容器的各处深度趋于一致的下料方法, 如图 4.63 所示。 $R_0 = K\sqrt{r_1^2 + 2r_1h}$ 。 K 是考虑到材料从

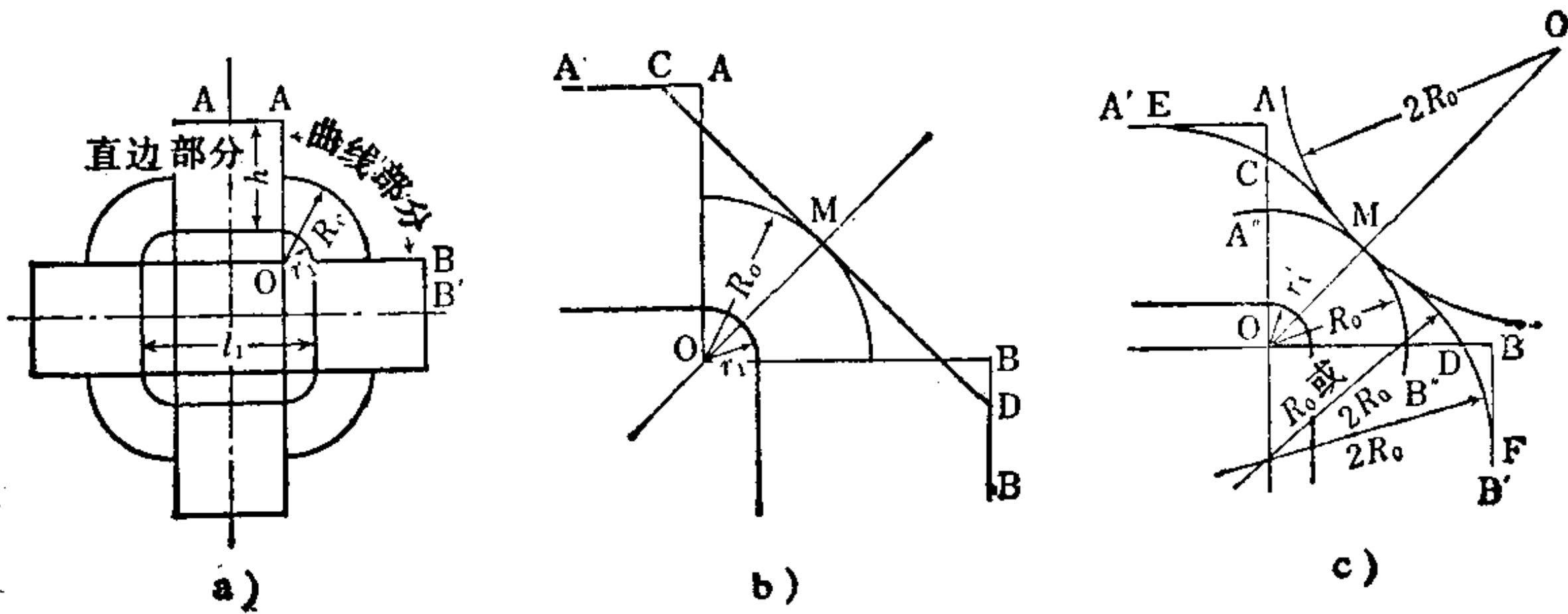


图4.63 盒形容器的下料形状和尺寸[93]

转角处向直边部位流动的修正系数, 图 4.64 所示为 K 和凸模形状的关系。简单的

下料形状尺寸如图 4.63 b) 所示, 坯料形状是一个八角形。使成形深度一致的带圆角的坯料如图 4.63 c) 所示, 可通过作图画

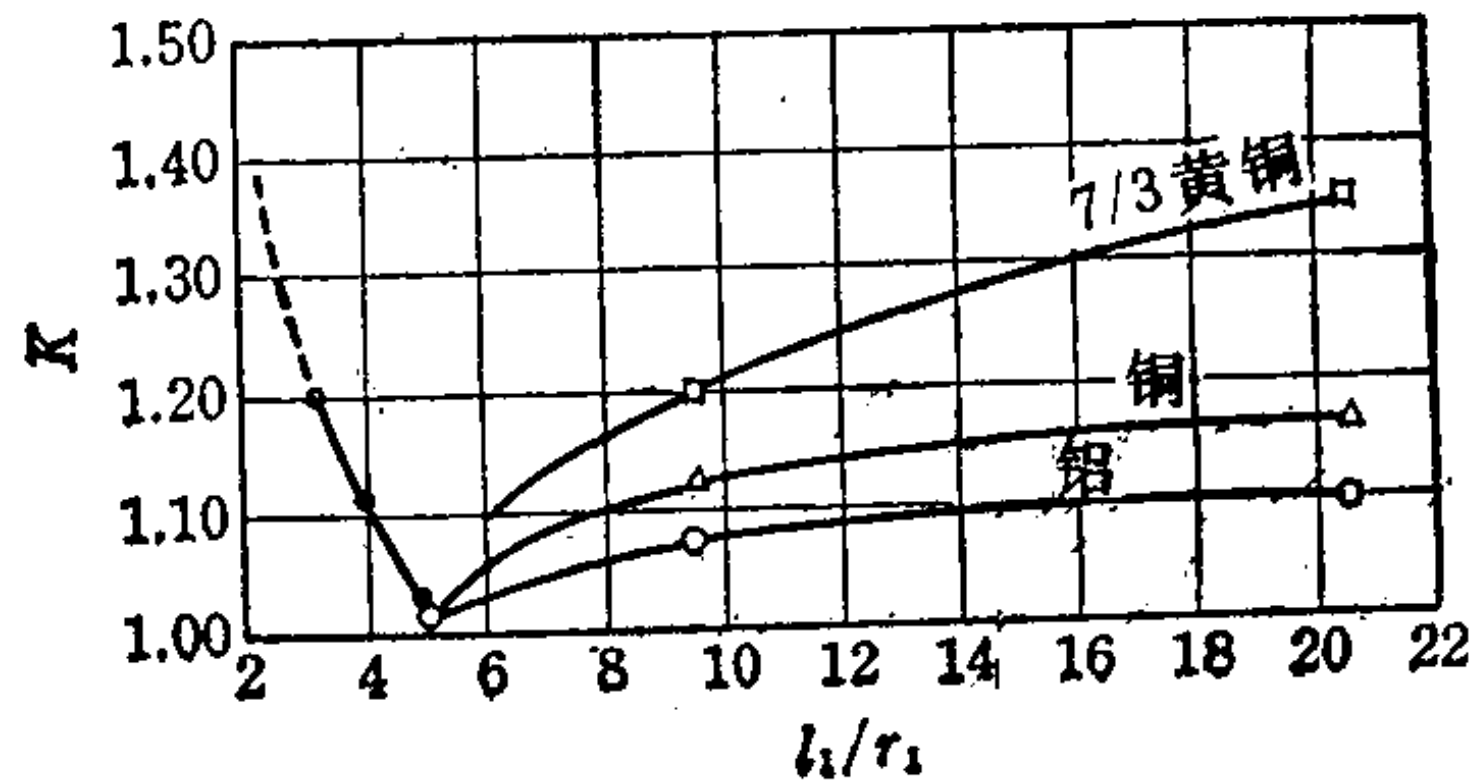


图4.64 下料半径的修正系数[94]

出,先画一个以 O' 为中心, 半径为 $2R_0$ 的圆弧, 取 $A''C$ (或 $B''D$) = $2AC$ (或 BD) 定出 C 点和 D 点, 再分别画出通过 C 和 M 点及 D 和 M 点半径为 R_0 或 $2R_0$ 的圆弧, 通过 C 点和 A' 点、 D 点和 B' 点分别以 $2R_0$ 为半径作圆弧, 然后进行修正使各接点光滑过渡。

(ii) 成形力 最大拉延力 P_{\max} 可由下列实验式近似确定〔94〕:

$$P_{\max} = 6(\sigma_b + \sigma_s) \left[m_1 \left(R_0 - r_2 - \frac{r_d}{2} \right) t_0 + m_2 \frac{1}{r_d} t_0^2 l \right]$$

式中 R_0 ——坯料的转角半径(参照图4.63 b);

r_2 ——凹模孔的转角半径;

r_d ——凹模圆角半径;

l ——凹模直边之间的距离;

t_0 ——板厚; $m_1 = \left(\frac{l}{2r_1} \right)^{0.2}$;

$$m_2 = \frac{1}{20} \sim \frac{1}{30}。$$

更简单的有 $CRAN$ 的实用公式〔95〕:

$$P_{\max} \approx \sigma_b t_0 (2\pi r_1 C_1 + l' C_2)$$

式中 r_1 ——容器的转角半径;

l' ——凹模直边部分全长;

$C_1 = 0.5$ (极浅制件成形时) 或者 $C_1 = 2.0$ (制件深度为 $(5 \sim 6) r_1$ 时);

$C_2 = 0.2$ (具有足够的模具间隙, 并不用压边圈时) 或 $C_2 = 0.3$ (在压边力达到 $P_{\max}/3$ 时) 或 $C_2 = 1.0$ (在非常难于拉延时)。

(iii) 成形极限 对边距离一定时, 不同转角半径的方形容器的拉延极限, 如图4.65所示。图4.65 a) 所示为极限坯料尺寸, 图4.65 b) 所示为最大拉延深度〔96〕。

(1) 减小盒形件的转角半径, 使转角处坯料凸缘的压缩变

形更趋于严重，但拉延极限值并不一定下降。特别是软钢在 $r_1/l_1 = 0.15$ 左右时拉延极限达最大值。当 $r_1/l_1 < 0.05$ 时，深拉延极限急剧下降。软钢的矩形盒形件的实用拉延深度见表 4.22。

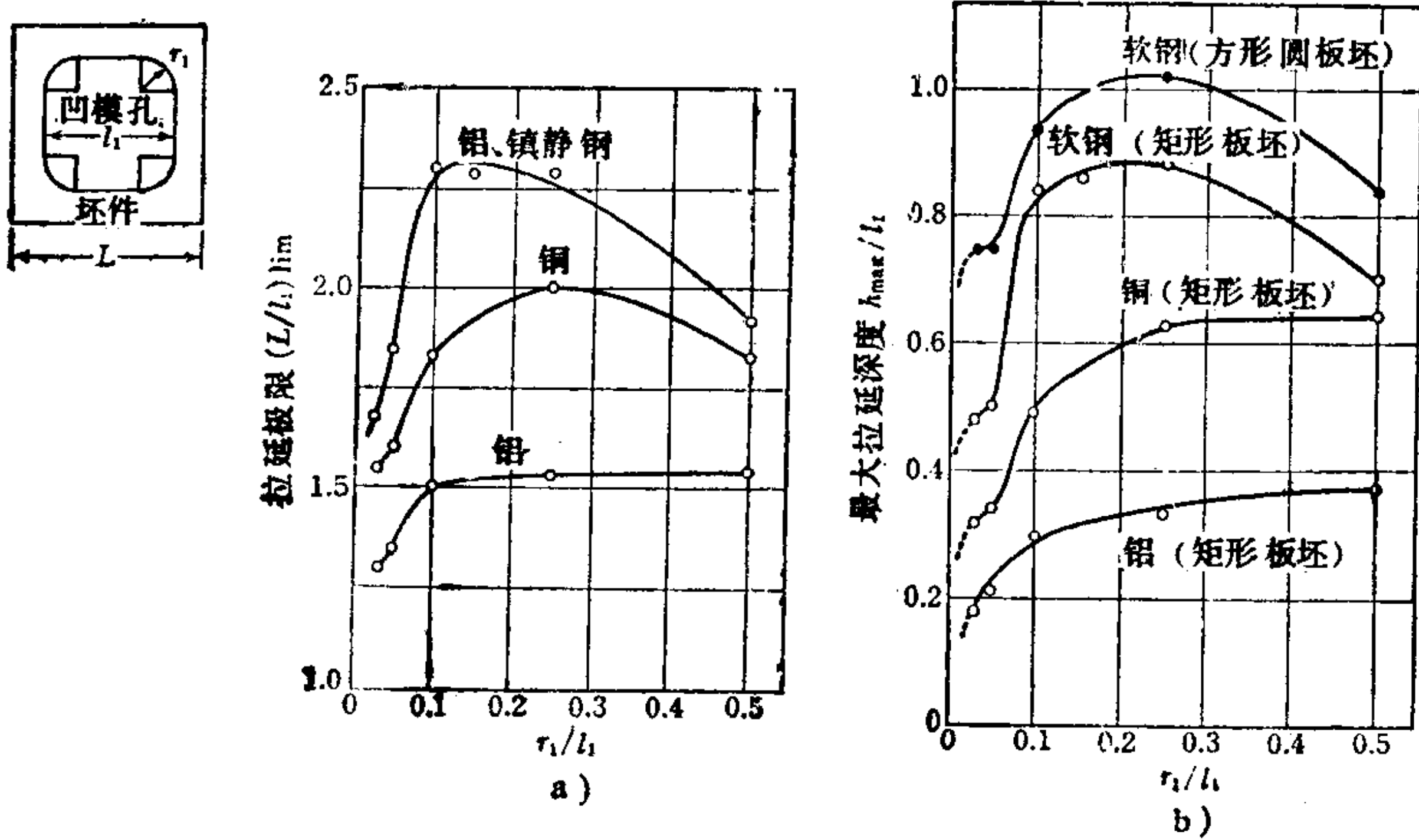


图1.65 方形容器的拉延极限[96]

- a) 不同材料的拉延极限的比较 (板厚0.8mm的方形板料)
- b) 拉延极限时的最大拉延深度

表4.22 一次拉延盒形件的最大拉延深度
(软钢: 厚0.8~1.0mm)

转角半径 r_1 和对边距离 l_1 的关系	最大拉延深度 h_{max}
$r_1 \leq 0.05 l_1$	$h_{max} = (0.4 \sim 0.6) l_1$
$r_1 = (0.1 \sim 0.2) l_1$	$h_{max} = (0.8 \sim 0.9) l_1$
$r_1 = (0.2 \sim 0.3) l_1$	$h_{max} = (0.9 \sim 1.0) l_1$

(2) 对于在凸模肩部破裂 (α 破裂) 的材料，坯料的形状对提高拉延极限来说，以角圆形或圆形为最有利，八角形次之，正方形为最差。

(3) 对于镇静钢板等 r 值大的软钢板，在容器转角处的侧壁容易发生破裂。为防止发生侧壁的破裂，坯料采用八角形比正方形更为优越。

(iv) 润滑 凸模底部不进行润滑时, 拉伸极限比较高。作为例外, 当 $r_1/l_1 \leq 0.05$ 时即盒形件转角半径小时, 同时并用聚乙烯薄膜和高粘度油润滑凸模底部, 这种近乎完全润滑的条件比其它润滑条件能得到更高的拉伸极限〔98〕。

(v) 关于冲模形状设计时应注意的事项 作为有关提高拉伸极限的其它注意事项是: (1) 转角处的凹模肩部圆角半径应作得大些, 相邻的直边部位的凹模肩部圆角半径可以相应减小些。

(2) 坯料在转角处因压缩变形而使板料厚度显著增加, 所以转角处的间隙应比拉伸圆筒形件时的间隙略大些。

(3) 在模具直边部位设置了拉伸筋时, 一般能得到良好的效果。这时, 用八角形坯料亦比正方形坯料更好〔99〕。

(4) 矩形盒形件成形时, 当长边长度为短边长度的 1.5~2 倍以上时, 则长边的影响可不予考虑。这时, 拉伸深度可比边长等于短边长度的方形盒形件的深度增加 20~30%。

c. 复合成形 (拉伸—胀形或复合胀形)

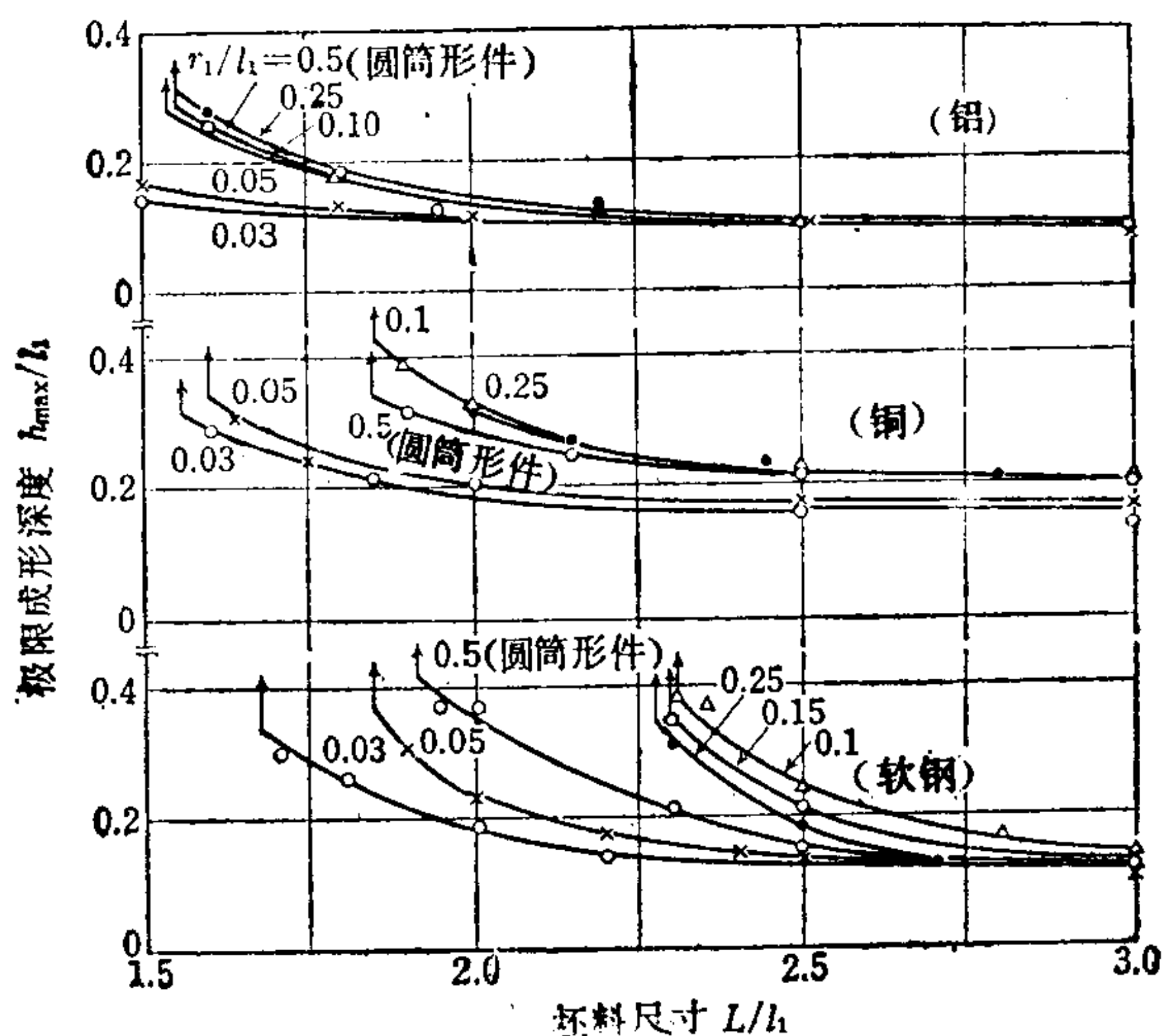


图4.66 盒形件复合胀形时坯料尺寸和极限成形深度的关系〔100〕 (符号和图4.61相同)

(i) 成形极限 坯料尺寸和极限成形深度的关系见图 4.66, 盒形件的横断面形状和极限深度的关系见图 4.67。不同材质在不同的 r_1/l_1 值时能得到最深的容器的条件是: 当坯料取得略大于拉伸极限时软钢是在 $r_1/l_1 = 0.1$ 时, 铜是在 r_1/l_1 为 0.15 时, 铝等软质材料是在 $r_1/l_1 = 0.2$ 左右时可得到最深的容器, 这和图 4.65 b) 所示的最大拉伸深度的倾向是不同的。在坯料取得比拉伸极限值大, 坯料成形时在凸模肩部处破裂的场合, 则圆形坯料比方形坯料要好些。在润滑条件不良时两者的区别更明显。

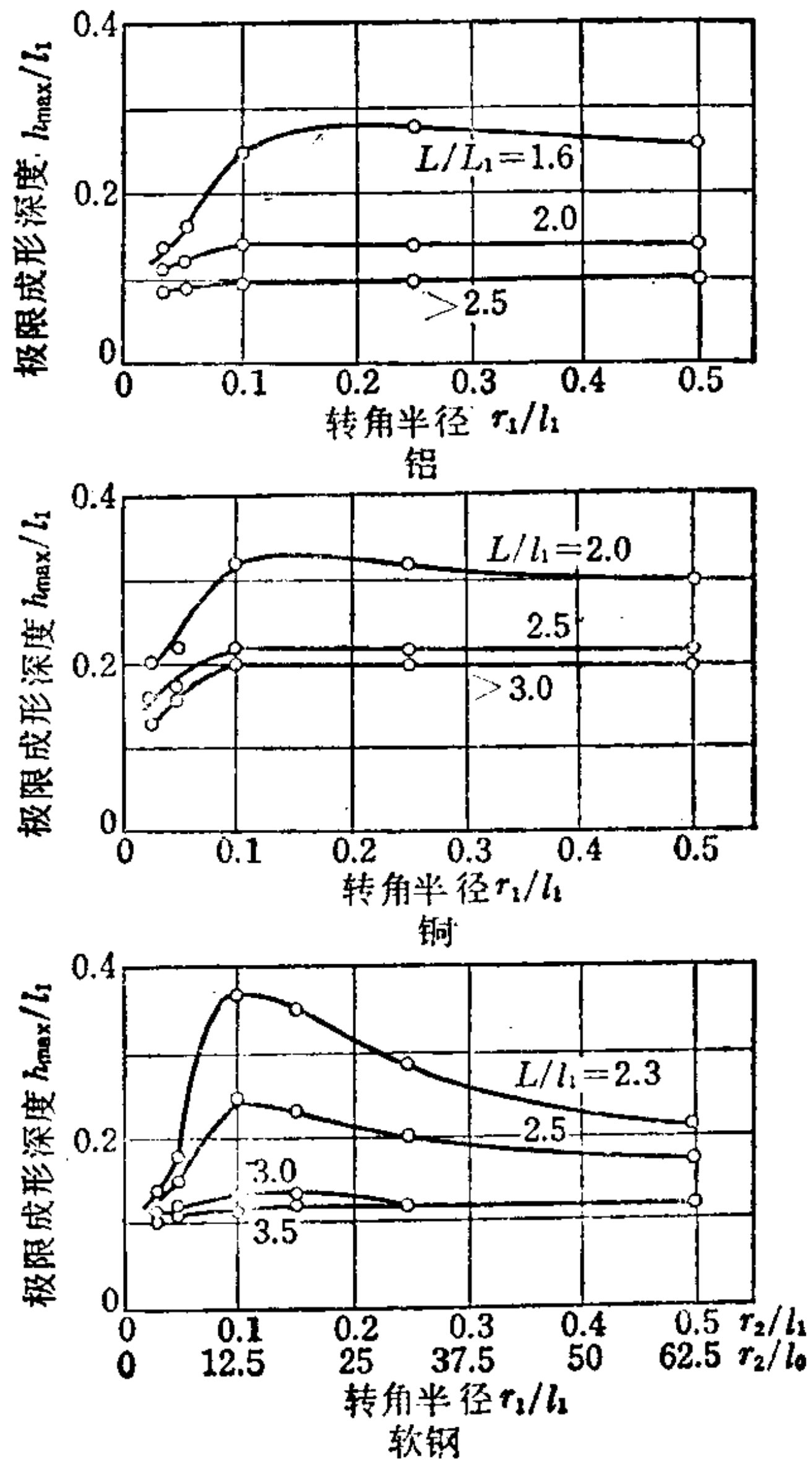


图4.67 盒形件复合胀形时, 横断面形状和极限成形深度的关系 [100] (符号和图 4.61 相同)

关于提高成形极限的其他注意事项: 选择对拉伸和胀形均有利的成形条件, 对于那些有矛盾的条件, 应认真探讨其得失进行选定。

d. 翻边

(i) 破裂的行为 平底盒形件类似于U形和L形工件的伸长类翻边, 因为在成形过程中孔的形

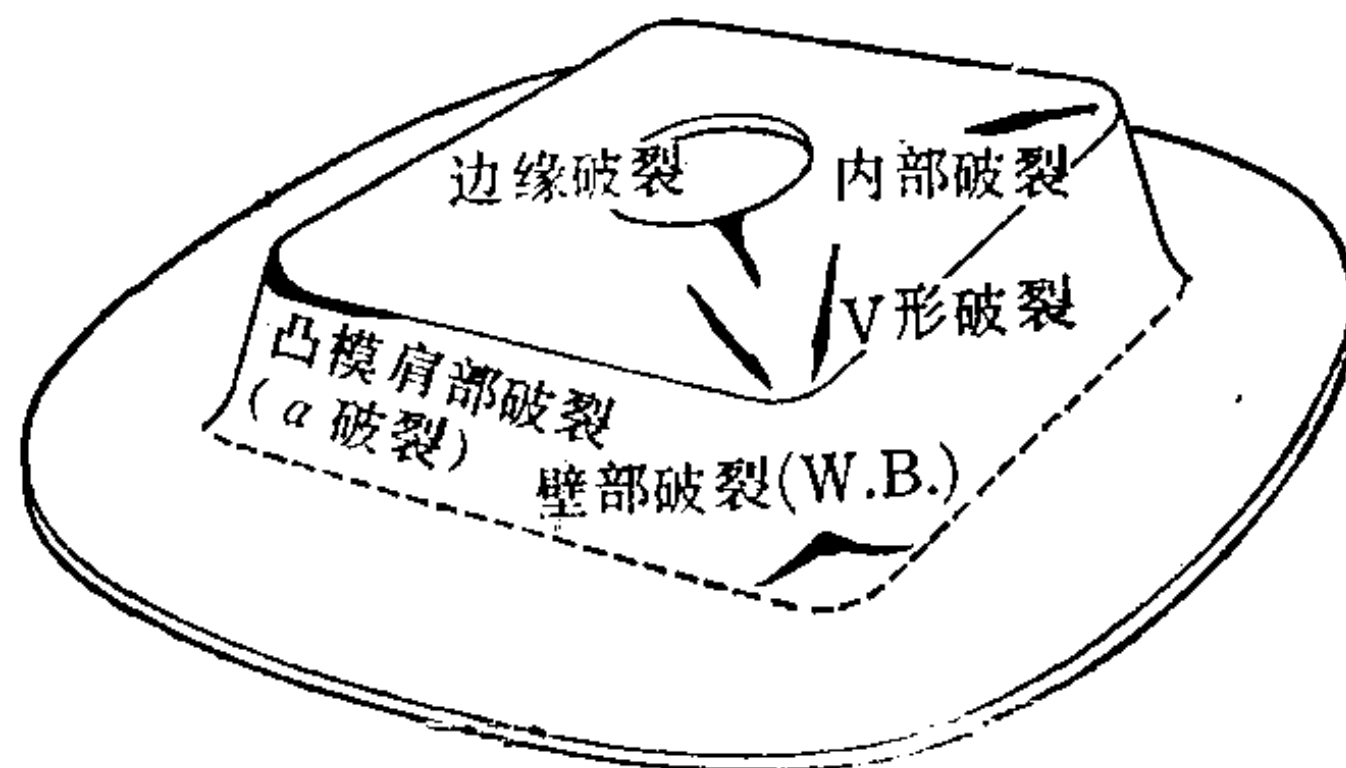


图4.68 用平底方形凸模进行伸长类翻边时的破裂情况 [101]

状是变化的，所以严格地说很难用扩孔系数来表示。为此，根据零件的使用目的，以成形件的深度表示成形极限是方便的。用这样的非旋转体对称形状的凸模进行扩孔时，因为变形不均匀，而集中于特定方向，所以其平均扩孔系数比圆筒形件的低得多。

用平底方形凸模进行扩孔时，其破裂的方式和分布随不同的孔径而变化，如图 4.68 的模式所示。孔的形状不是圆形时，各种变化的情况如图 4.69 所示。凸缘角部半径 r_f 小时，则从角部的凸缘破裂。凸缘宽度 f 小而 r_f 大于某一定值时，则产生 V 形破裂。 f 大时，则在凸模肩部附近破裂。在中间状态时，即 f 和 r_f 都比较大时，则在角部产生内裂。

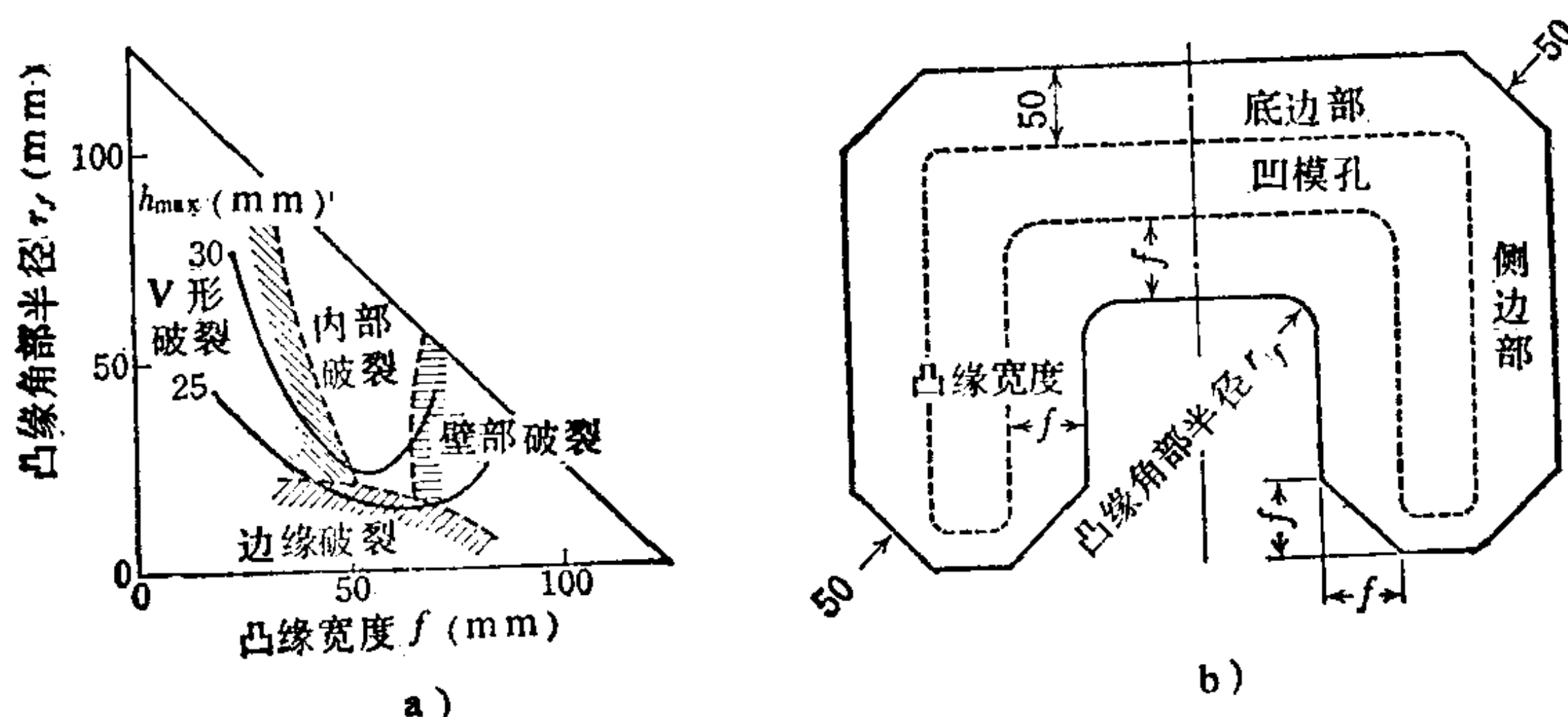


图4.69 U型翻边的破裂区〔102〕

(ii) 成形极限 伸长类翻边时的破裂是在边缘还是内部，可由下列公式判别〔103〕：

$$Q_1 = r \left[r_1 + 4 \left(\frac{l_1}{2} - r_1 \right) / \pi \right] \left\{ r_f \left[r_1 + 4 \left(\frac{l_1}{2} - r_1 - \frac{l_f}{2} + r_f \right) / \pi \right] \right\}^{0.5}$$

$$Q_2 = \left[r_f + 4 \left(\frac{l_f}{2} - r_f \right) / \pi \right] (4r_1 r_p)^{0.5}$$

r 为 r 值，其它符号如图 4.61 所示。

$Q_1/Q_2 \geq 0.8$ 时，产生内部裂纹。

$Q_1/Q_2 \leq 5.7$ 时, 产生边缘破裂。

此时的成形极限推导如下: 首先计算 W 及 A 值:

$$W = l_1/2 - l_f/2 + r_f$$

$$A = r_1 + 4 \left(\frac{l_1}{2} - \frac{l_f}{2} + r_f - r_1 \right) / \pi$$

用 W 及 A 值可进一步计算产生边缘破裂时的平均扩孔系数:

$$\bar{\lambda} = \lambda_0 \left[1.61 \left(\frac{r_1}{W} \right)^{0.25} - 1.10 \left(\frac{r_f}{W} \right)^2 - 0.288 \right] \\ + 0.178 \left(\frac{l_f}{2} - r_f \right) / \frac{l_1}{2} + 11.41 \left(\frac{W+1}{W} \right)^{0.5}$$

对于产生内部破裂时:

$$\bar{\lambda} = \lambda \left\{ 1.16 \left(\frac{r_1}{W} \right)^{0.25} - 0.75 \left(\frac{r_f}{W} \right)^{1.5} + 0.308 \left[\left(\frac{l_f}{2} - r_f \right) / \frac{l_1}{2} \right]^{1.75} - 0.293 \right\} + 13.09 \left(\frac{W+1}{W} \right) - 12.92$$

其成形极限深度为 [104]

$$h = \left[(1 + \bar{\lambda})^2 r_0^2 + (A^2 - r_0^2) (1 + \bar{\lambda})^{0.4} - A^2 \right] \\ / (2A) + 0.43(r_p + r_d)$$

e. 再拉延

各道工序的形状如图 4.70 所示, 开始是圆筒形拉延加工, 其后每次拉延都减小角部转角半径, 直至得到所需的成形件。减少拉延次数最好是从第一道拉延工序着手。

4.4.3 椭圆筒形件的成形

a. 纯胀形

(i) 成形极限 在成形件横断面积一定的条件下改变椭圆形状时, 长轴方向转角半径 r_1 和 h_{max} 的关系, 如图 4.71 示例。

(1) 即使 r_1 减小, h_{max} 并不一定单纯地减小。在两面完全润滑、拉延筋设置在凹模孔附近、内周固定时 h_{max} 几乎不变, 而仅在凸模底部完全润滑时有时 h_{max} 反而增大。(2) 在润滑不良的情况下, 拉延筋位置不同, 对 h_{max} 的影响不大, r_1 减小则 h_{max}

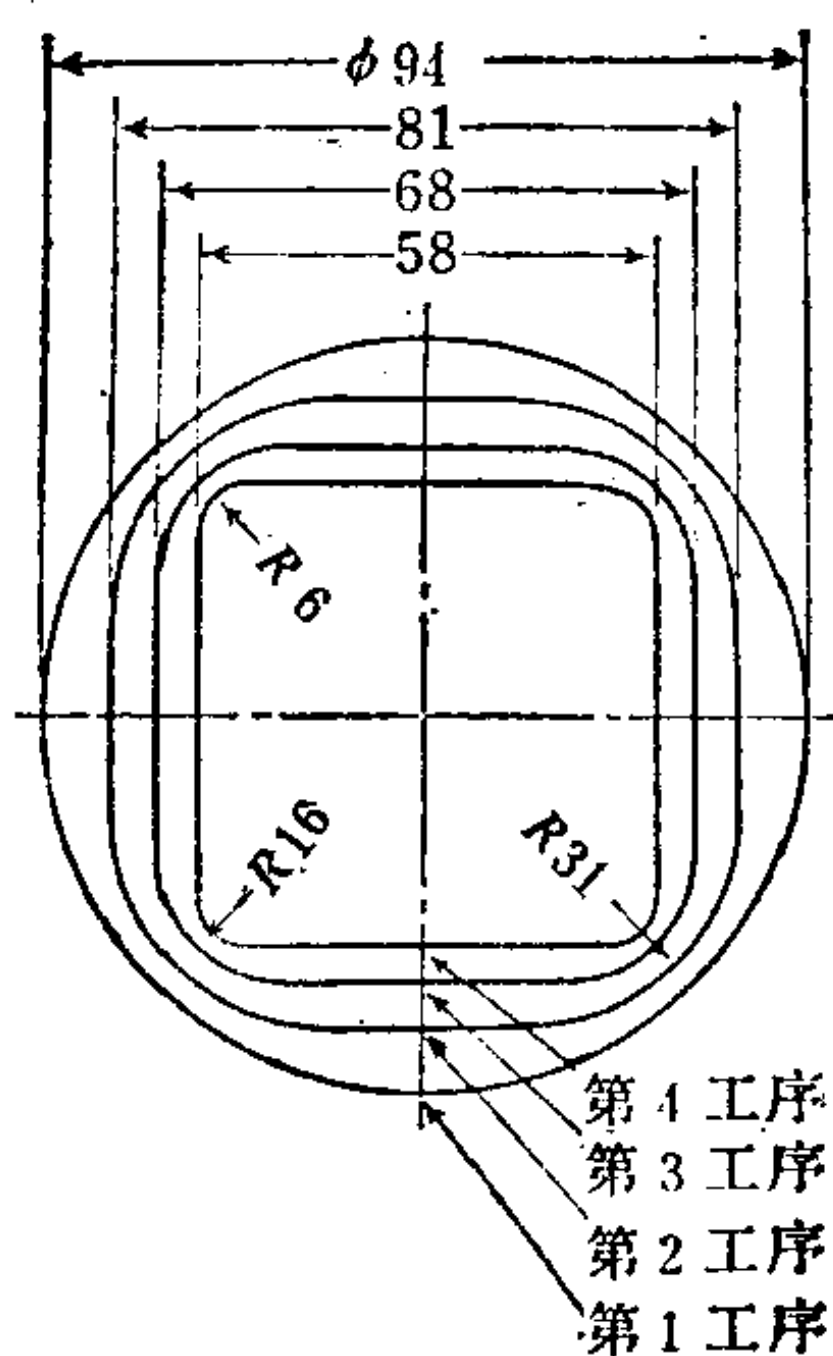


图4.70 盒形件再拉延时各工序的尺寸形状示例[105]

(i) 成形限界

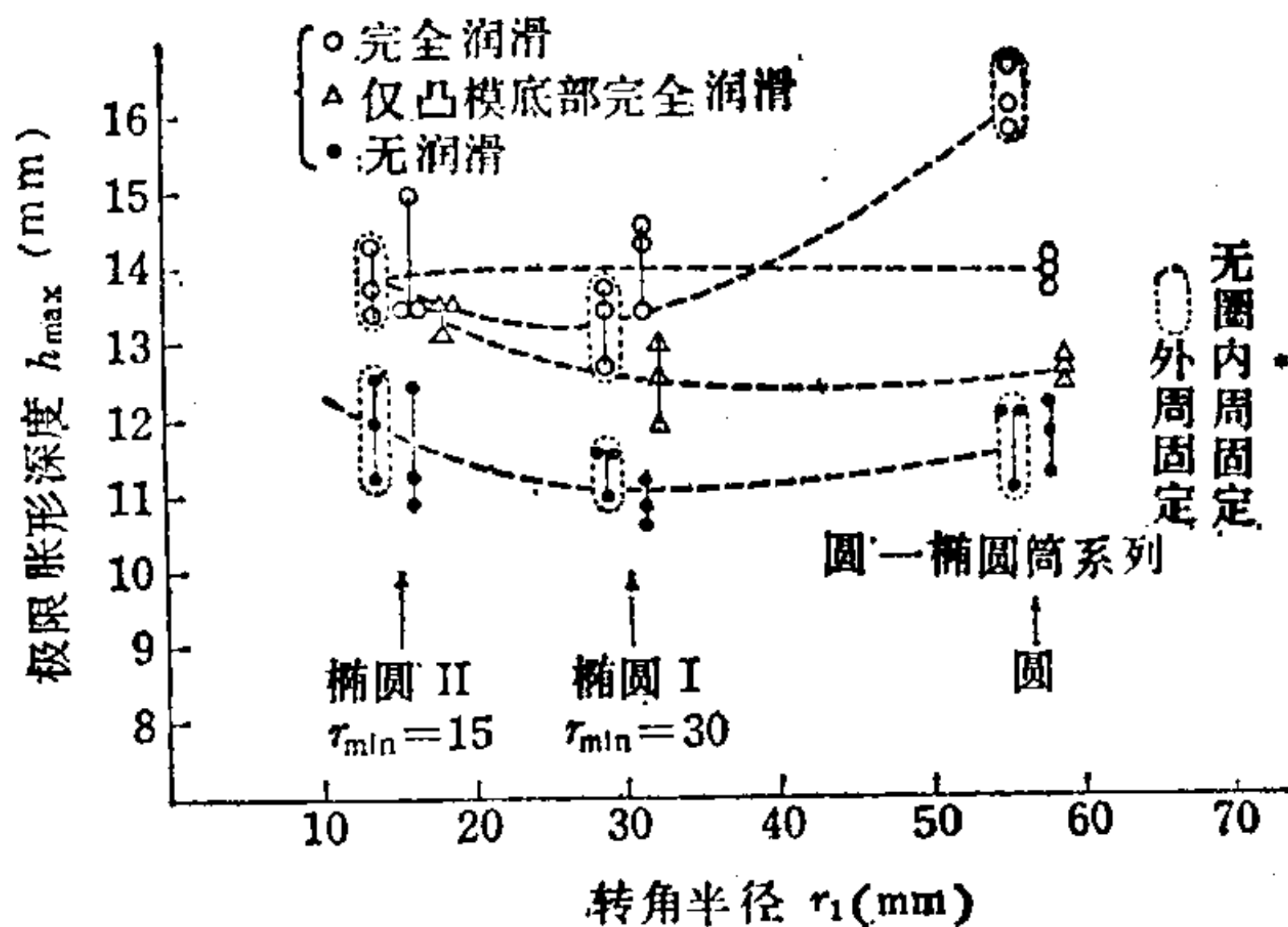


图4.71 椭圆筒形件的纯胀形极限和长轴方向的凸模转角半径的关系[106] (参照图4.60)

有增大的倾向。(3) 椭圆形状以 (长轴长度/短轴长度) 之比来表示, 轴长比约为 2.5 时, h_{max} 为最大。(4) 在和转角半径及横断面积都大致相同的盒形件相比, 除特别细长的工件外, 一般是椭圆筒形件的 h_{max} 较大。这种倾向在无润滑条件下尤为显著。(5) 对于轴长比很大的椭圆筒形件或用窄扁形 (二边形) 的凸模时, 其变形剧烈的长轴方向的转角部位, 可按相当于圆筒形件胀形的情况来考虑。

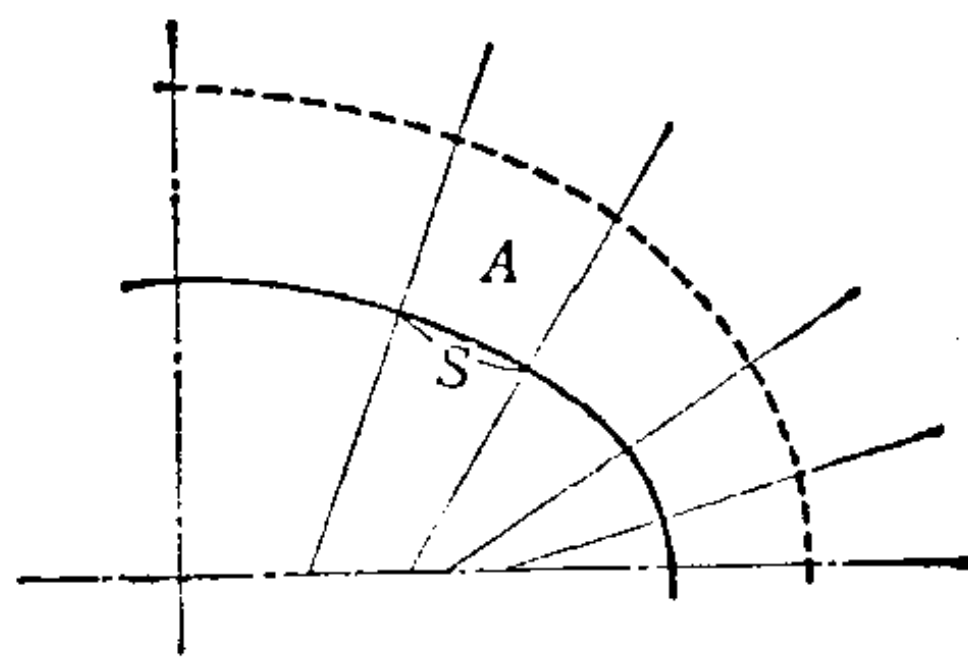


图4.72 椭圆筒形件的下料形状

(ii) 成形力 近似的最大成形力可和圆形件成形时考虑一样, 即

$$P_{max} = \sigma_b t_0 S \text{ (kgf)}$$

式中 S —— 椭圆形周长 (mm);

t_0 ——板料厚 (mm);

σ_b ——材料的抗拉强度 (kgf/mm^2);

b. 拉延

(i) 下料形状和尺寸 为了使各部分的拉延深度大致相等, 如图 4.72 所示, 在横断面轮廓上作垂直线, 把压缩的凸缘部位以适当的间隔分割, 使分割的各部分的 A/S 比相等 (A —分割单元的面积; S —单元的周长), 然后使各接点光滑过渡。这样得到的坯料形状, 和盒形件的情况一样, 由于受周向的材料流动的影响, 实际上对坯料应作必要的修正。

(ii) 破裂的规律 在椭圆筒形件拉延时, 比盒形件拉延更容易发生壁部破裂。但是和盒形件的情况一样, 对于非铁金属, 特别是 n 值大的 7/3 黄铜, 不易产生壁部破裂。在更深的拉延时, 出现凹模肩部附近的破裂, 或者在压缩类变形的转角部位和相邻区之间产生剪切破裂〔108〕。

(iii) 成形极限 和圆筒形件成形相比, 存在着较大的尺寸效应。坯料大时很容易产生拉延破裂, 而坯料小时亦常有拉破的情况 (参照复合成形章节)。为提高拉延极限, 从下料的形状尺

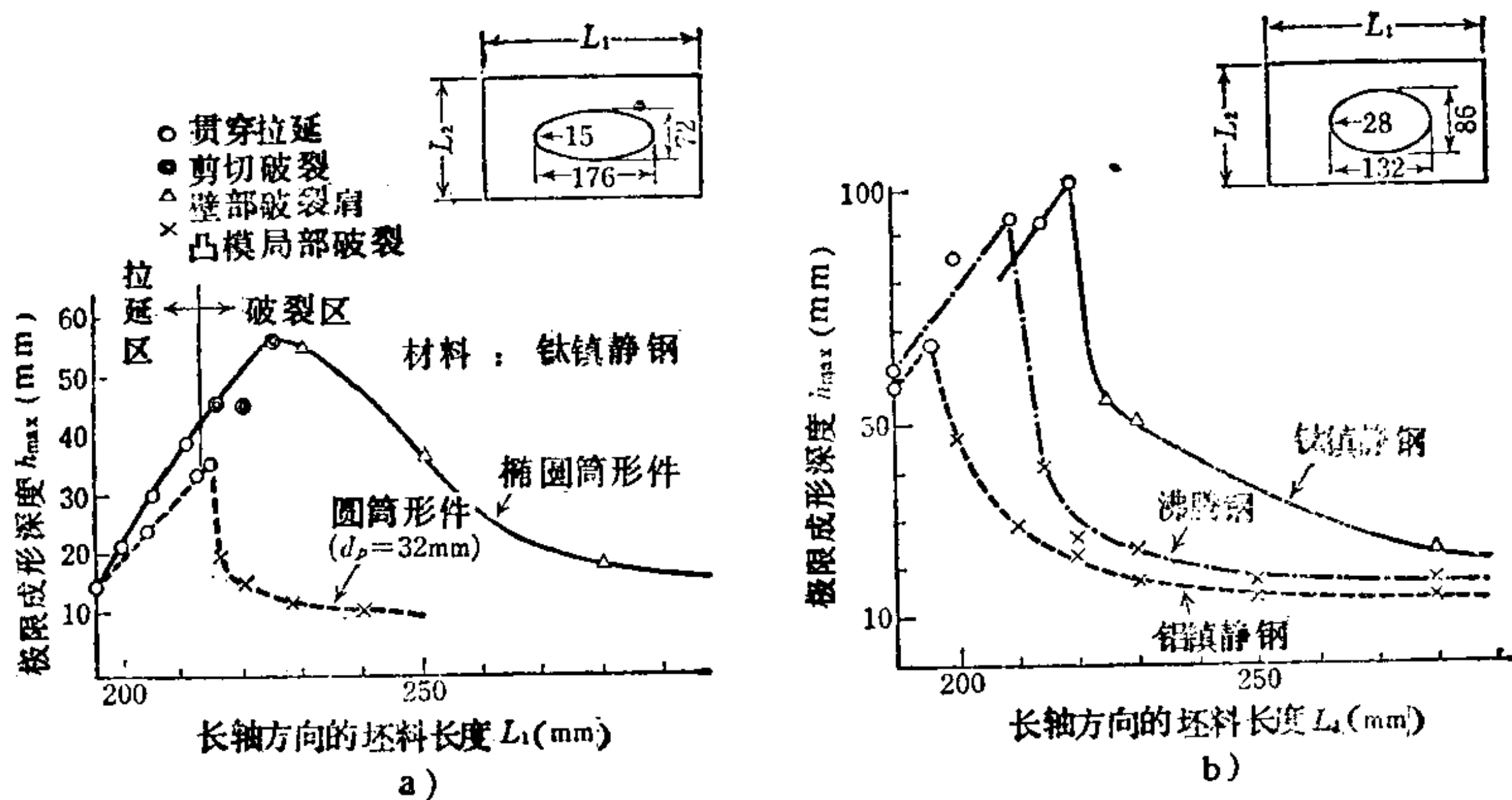


图4.73 椭圆筒形件复合胀形时长轴方向的坯料长度和成形深度的关系〔109〕

寸来看, 圆形和八角形要比矩形或正方形的好些。特别是容易产生壁部破裂的钢板这种倾向更厉害。

c. 复合成形 (拉延-胀形或复合胀形)

(i) 成形极限 由于长轴方向和短轴方向的坯料尺寸的不同, 将产生不同的影响。如图 4.73 所示为长轴方向的长度和极限成形深度的关系。对于轴长比小的近于圆的椭圆筒形件, 其成形和圆筒形件的复合胀形非常相似。而对于细长的椭圆筒形件, 即使以拉延时容易破裂的情况相比出现剪切裂纹和壁部破裂之前可得到更大的成形深度。

椭圆短轴方向的坯料长度和成形极限的关系, 如图 4.74 所示。轴长比小时和圆筒形件的成形相似, 轴长比增大时用小的坯料易产生破裂, 则取较大的坯料使相似于拉延用坯料的形状尺寸。

(ii) 坯料形状 为了提高成形极限, 关于下料形状尺寸, 在轴长比约为 1.5 时, 和圆筒形件成形一样, 将坯料尺寸适当减小, 则能增加成形深度。轴长比大于 2.0 时, 适当加大短轴方向的坯料尺寸可以防止破裂, 因此适当决定长轴和短轴两方向的坯料尺寸是很重要的。

由于下料的限制, 在坯料形状和在短轴方向不能呈狭长的长方形时, 则在短轴侧向的压缩凸缘处 (平行于长轴) 设置拉延筋有同样的效果。

d. 伸长类翻边

(i) 成形极限 在椭圆筒形件底部伸长类翻边时, 一般易产生如图 4.75 所示的破裂。由圆孔扩成椭圆孔时, 从平均扩孔极限来看有比盒形件略低的倾向。

在椭圆筒形件成形时利用伸长类翻边成形, 即椭圆形容器成形时对其底部开有预孔。在这种情况下, 如图 4.76 所示的设计二个孔比在中心设计一个孔要好。为避免把凸缘上的裂纹扩展到成形件有用部分以及保证凸缘的平整度, 可开出如图 4.77 所示的泡形孔, 在成形的末期在中央产生裂纹而连接起来。

e. 再拉延

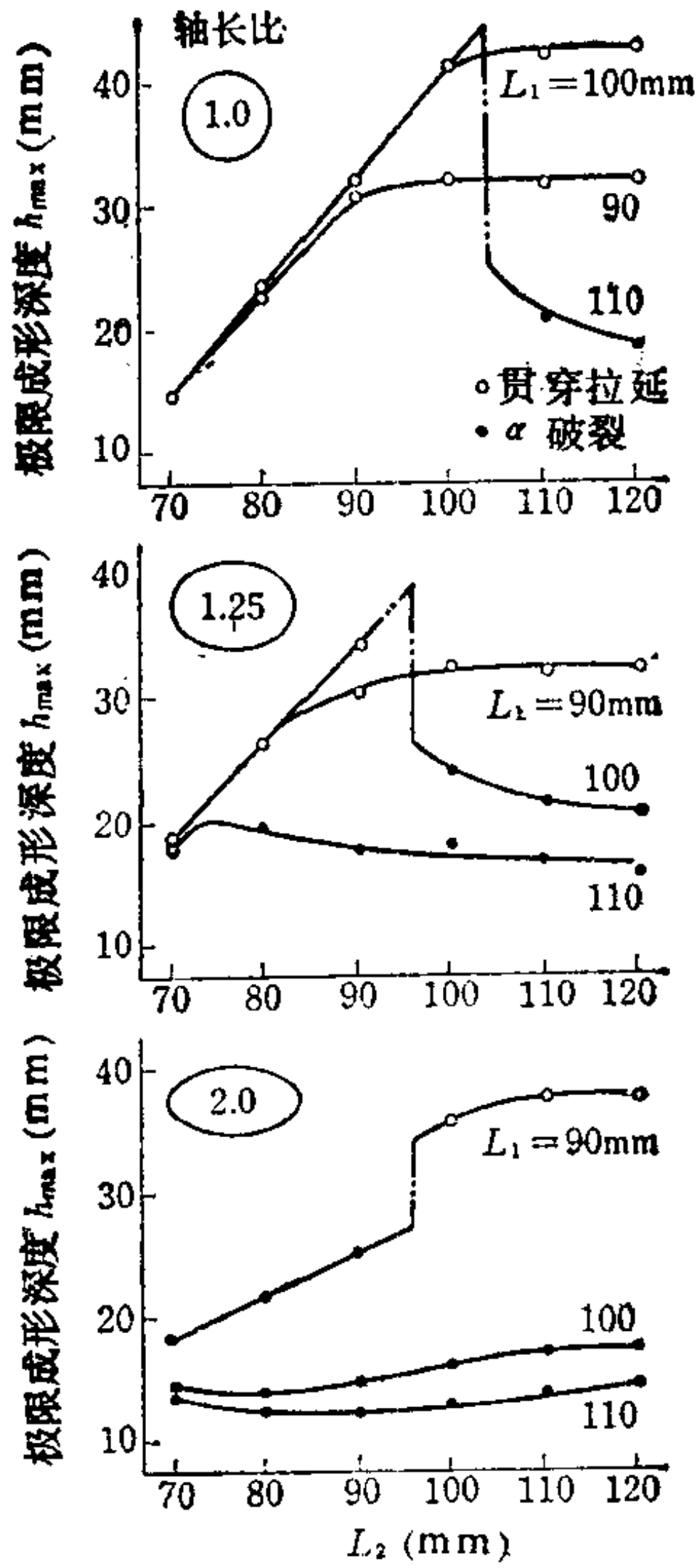


图4.74 椭圆筒形件复合胀形时短轴方向坯料长度 L_2 和极限成形深度 h_{max} 的关系[110]

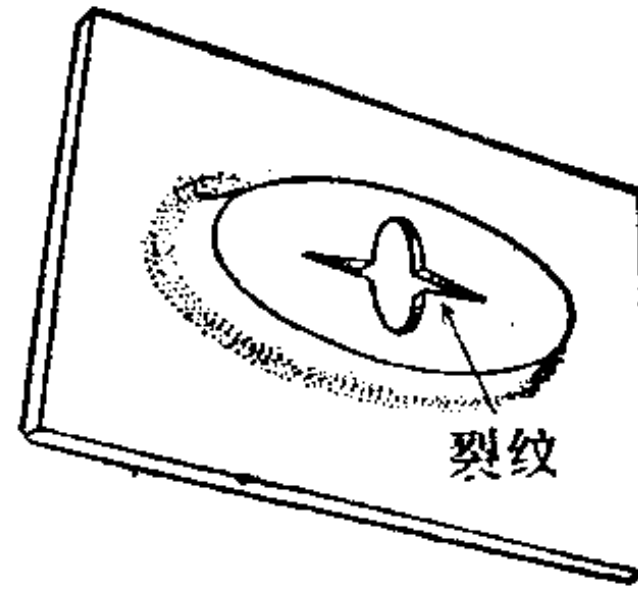


图4.75 椭圆筒形件翻边成形的破裂

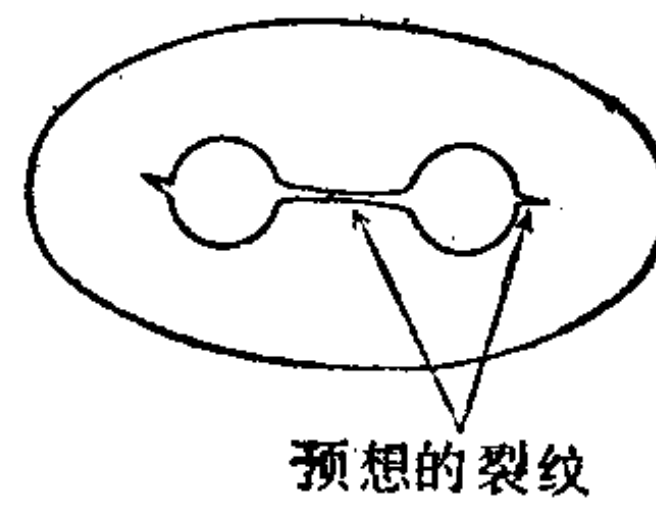


图4.76 椭圆筒形件翻边的底孔的布置

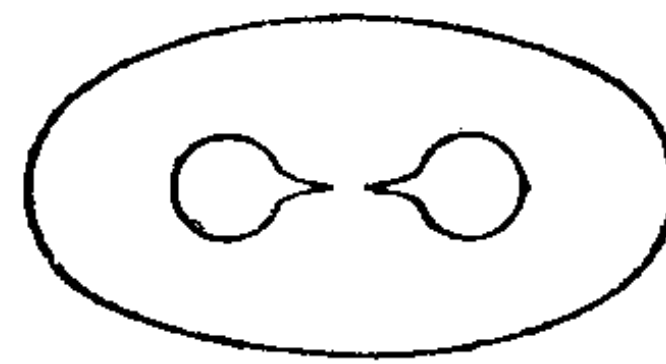


图4.77 泡形孔

(i) 各道拉延的形状 和盒形件的成形一样, 如图 4.78 所示, 从圆筒形件开始逐渐地过渡成形出最终的椭圆筒形件。

4.4.4 带凸缘件的成形

a. 成形的分类 设计制件凸缘的目的是, 除用于制件的装饰和提高刚性等以外, 还用于和其他零件连接。在这种场合时, 凸缘成形有时会使零件本体的形状扭曲, 或者因凸缘尺寸精度的不良而使连接强度和密合状态恶化, 严重时会使由于和其他零件连接的结果而使制件本体的尺寸精度下降。

在拉延等成形时，有在拉延中途停止而保留所需的凸缘的情况，也有单独进行凸缘成形的情况，后者通常称为翻边。其形状如图 4.79 所示，大致可分为四类：a) 直线翻边；b) 伸长类翻边；c) 压缩类翻边；d) 台阶形翻边。

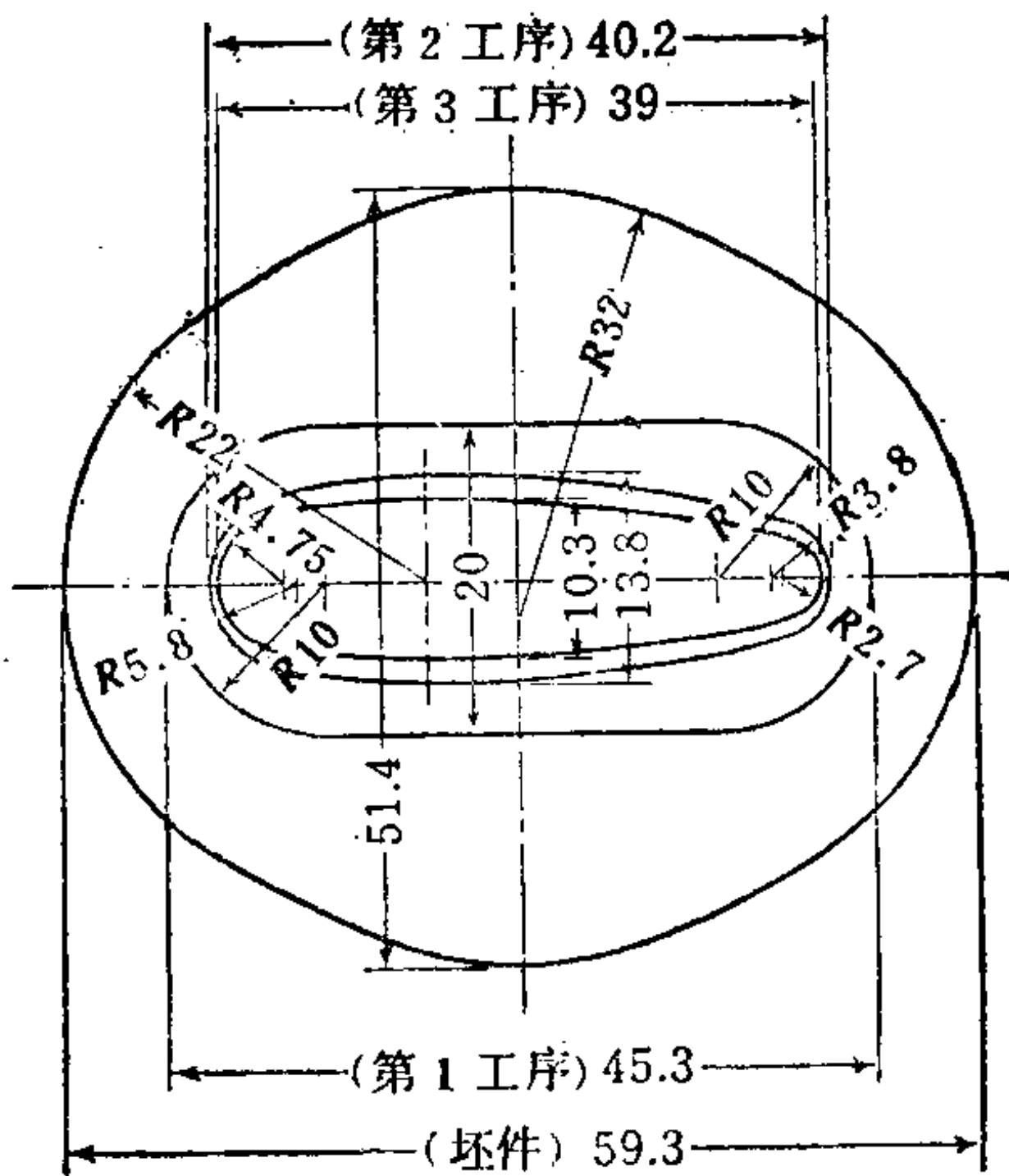


图4.78 椭圆筒形件的再拉延示例[111]

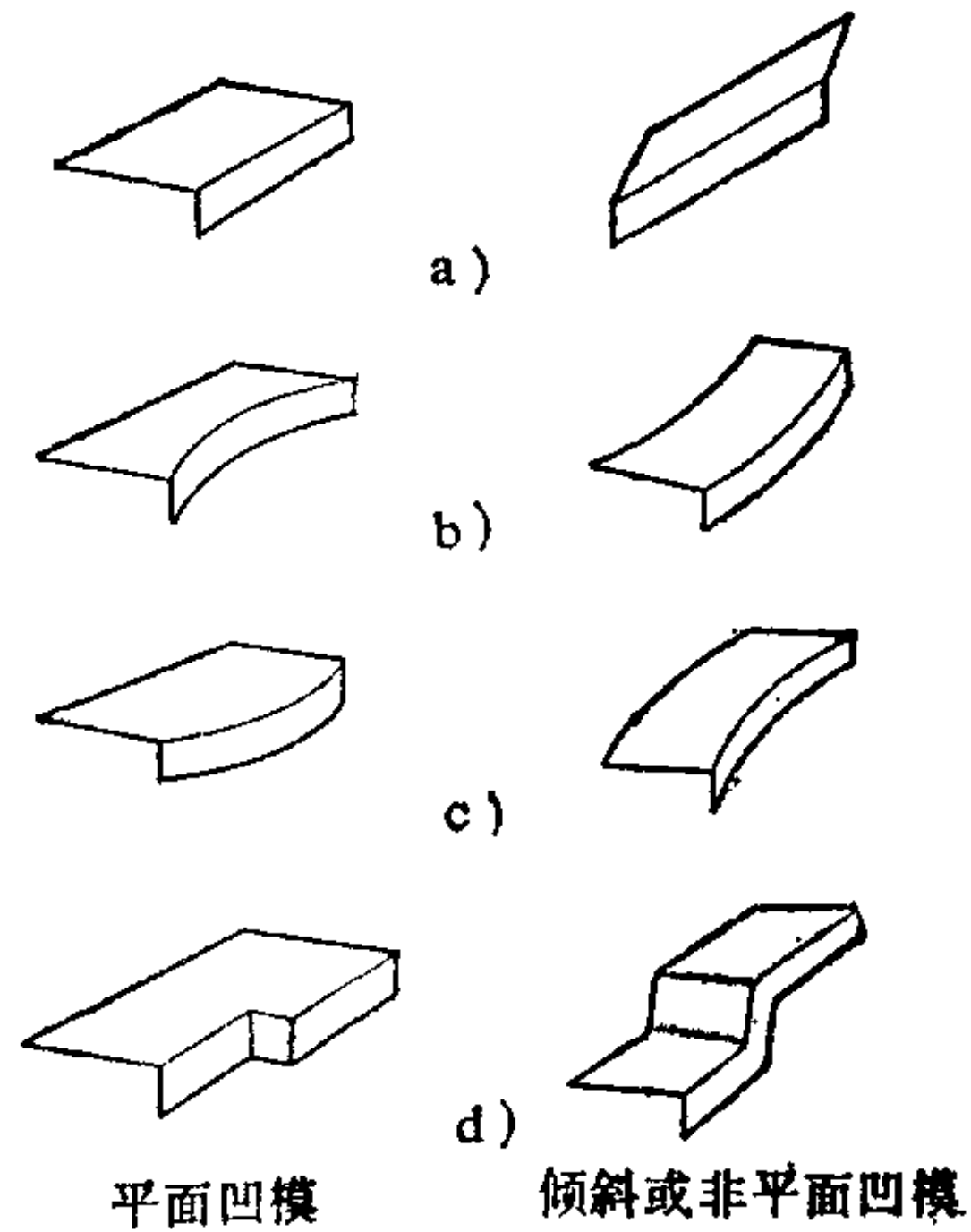


图4.79 翻边分类

- a) 有线翻边
- b) 伸长类翻边
- c) 压缩类翻边
- d) 台阶形翻边

关于翻边时出现的缺陷现象是：对于凸缘宽度不特别大，不致于破裂的则主要问题是回弹、扭曲以及由它们引起的零件本体的形状缺陷。

在台阶形翻边使本体有急剧的形状变化时，即使凸缘宽度很小，也易产生破裂和起皱，因此如有可能尽量避免为好。

b. 直线翻边 直线翻边只是弯曲变形。根据制件本体的形状、凸缘的位置和使用的目的等不同，可适当选用模具弯曲、加压弯曲、附加变薄的弯曲等（参照 3.1 和

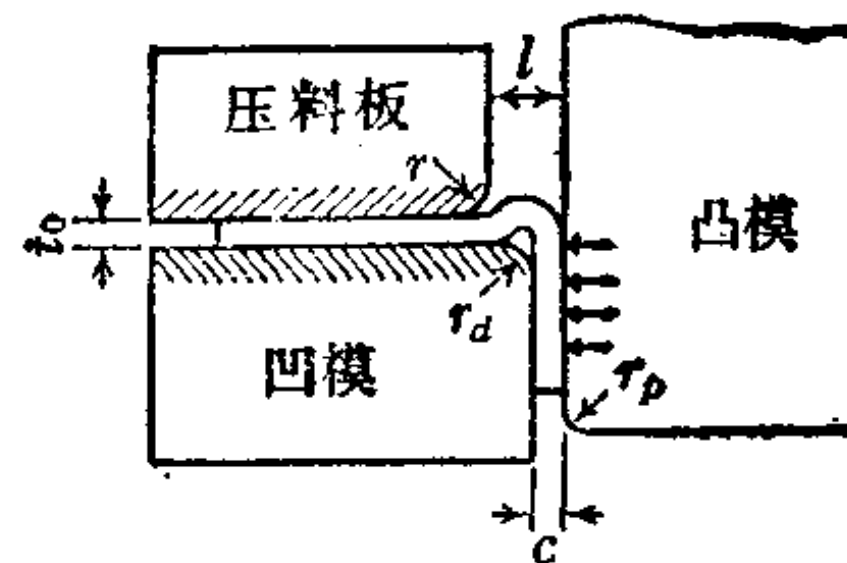


图4.80 直线翻边时的缺陷示例[112]

3.2)。图 4.80 所示为典型的翻边示例， l 大时变薄率可达 20% 以上，并且如果润滑不良，在凸模回程时将产生如图所示的局部翘曲。在一般情况下翻边的回弹如图 4.81 所示，变薄率越大则回弹越小。

c. 伸长类翻边 由于在翻边弯曲时在翻边周向有拉伸变形，有可能产生如图 4.82 所示的形状缺陷和伸长类翻边破裂。图 4.82 b) 中，在 A 点附近的鼓胀是在压料力不足时产生的。回弹在凸缘的中间 (A 点附近) 为最大，而两端处最小。由于变薄回弹量减小，当变薄率达 50% 左右时将不产生回弹。凸缘边附近的弯曲由于变薄也有所改善。

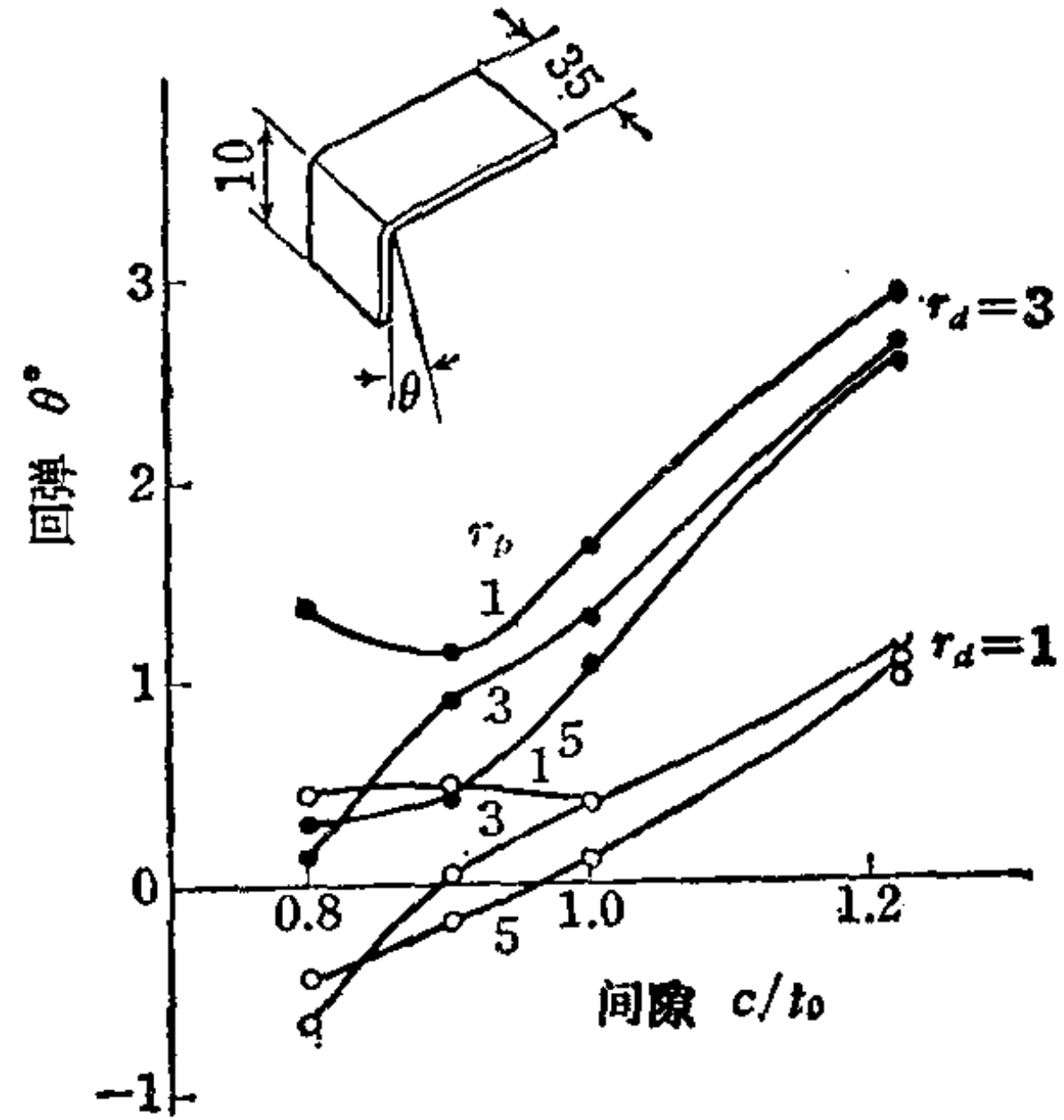


图4.81 间隙和回弹的关系[113]

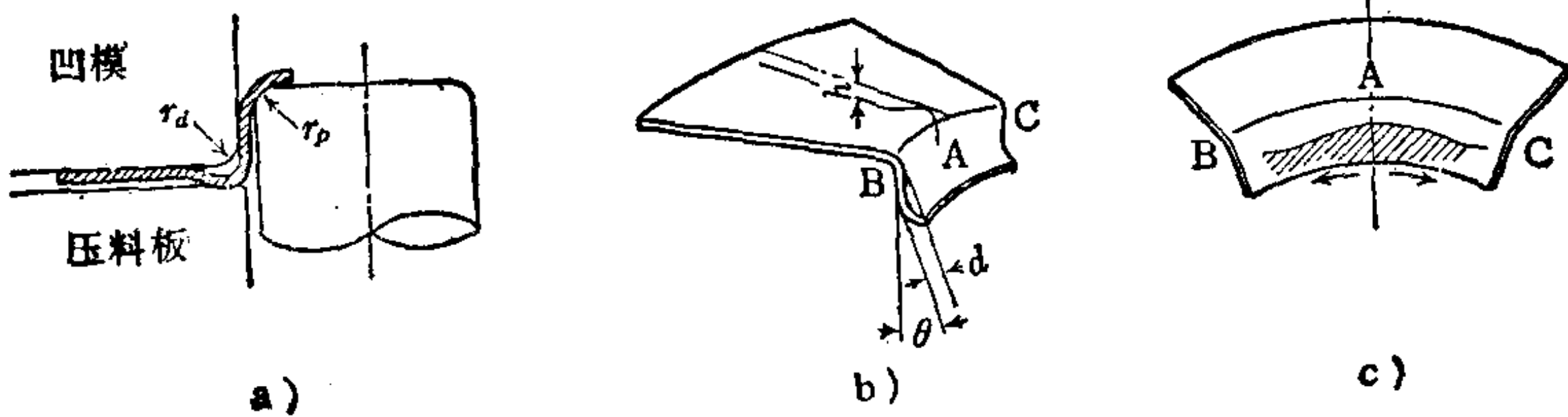


图4.82 伸长类翻边时的缺陷示例[114]

d. 压缩类翻边 在翻边时由于周向压缩应力作用的结果，成形极限决定于板料的压缩纵弯曲。图 4.83 是压缩类翻边的缺陷示例。(坯料直径 D_0 /凸模直径 d_p) 的比值越大则越易起皱。

另外，如图 4.84 所示，加大凹模肩部圆角半径 r_d 则不易起皱。为了防止由于翻边的回弹引起制件本体在凸缘两端附近产生扭曲，在压缩类翻边时应施加强力压边以压住制件本体的表面。

和其它翻边一样，通过采用变薄和强力压边，由于附加了拉

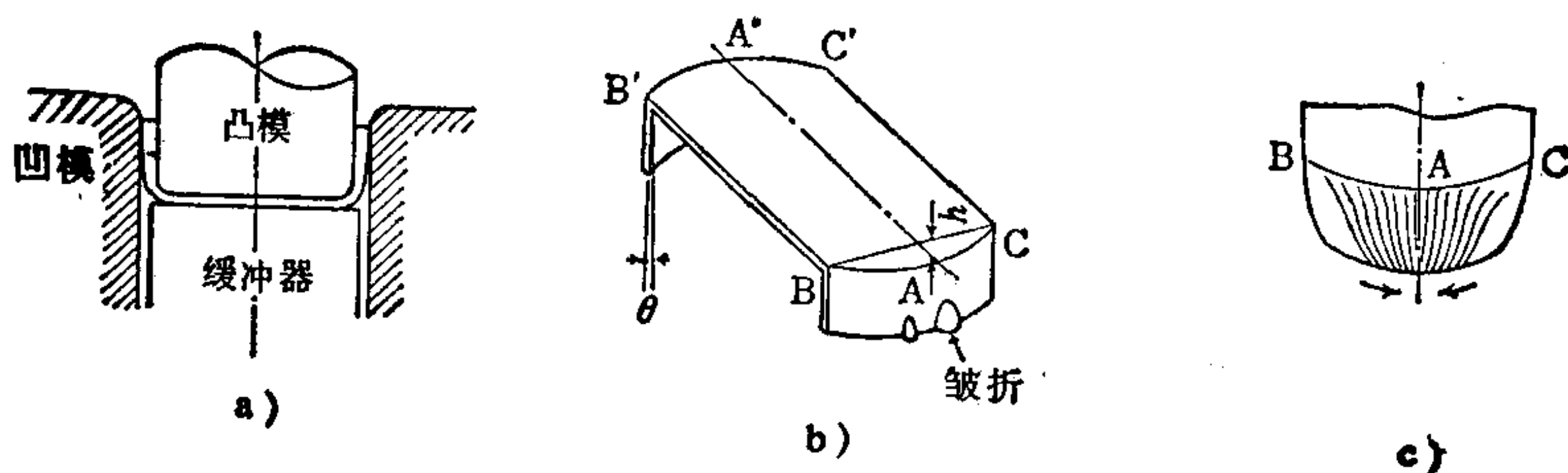


图4.83 压缩类翻边的缺陷示例[115]

伸力，其尺寸精度将会有所提高。

e. 台阶形翻边 在成形如图 4.85 所示的形状时，容易产生伴有胀形的弯曲破裂（图 4.85 a），

因材料流动不均匀，引起的纵弯曲（图 4.85 b）和翻边回弹（图 4.85 c）。

为了防止和消除上述的缺陷，可适当选择或组合采用在其他翻边中针对翻边缺陷所采用的措施。

图 4.86 是在角钢上加工台阶时的成形极限示例[118]。关于其发生破裂时的成形极限是：

$$D/L = \sqrt{\epsilon_B(\epsilon_B + 2)}$$

式中 ϵ_B ——采用 Norwood 法的局部破裂延伸率，其试件的标距为 0.02 英寸（1mm）。

关于纵弯曲极限，弹性纵弯曲为：

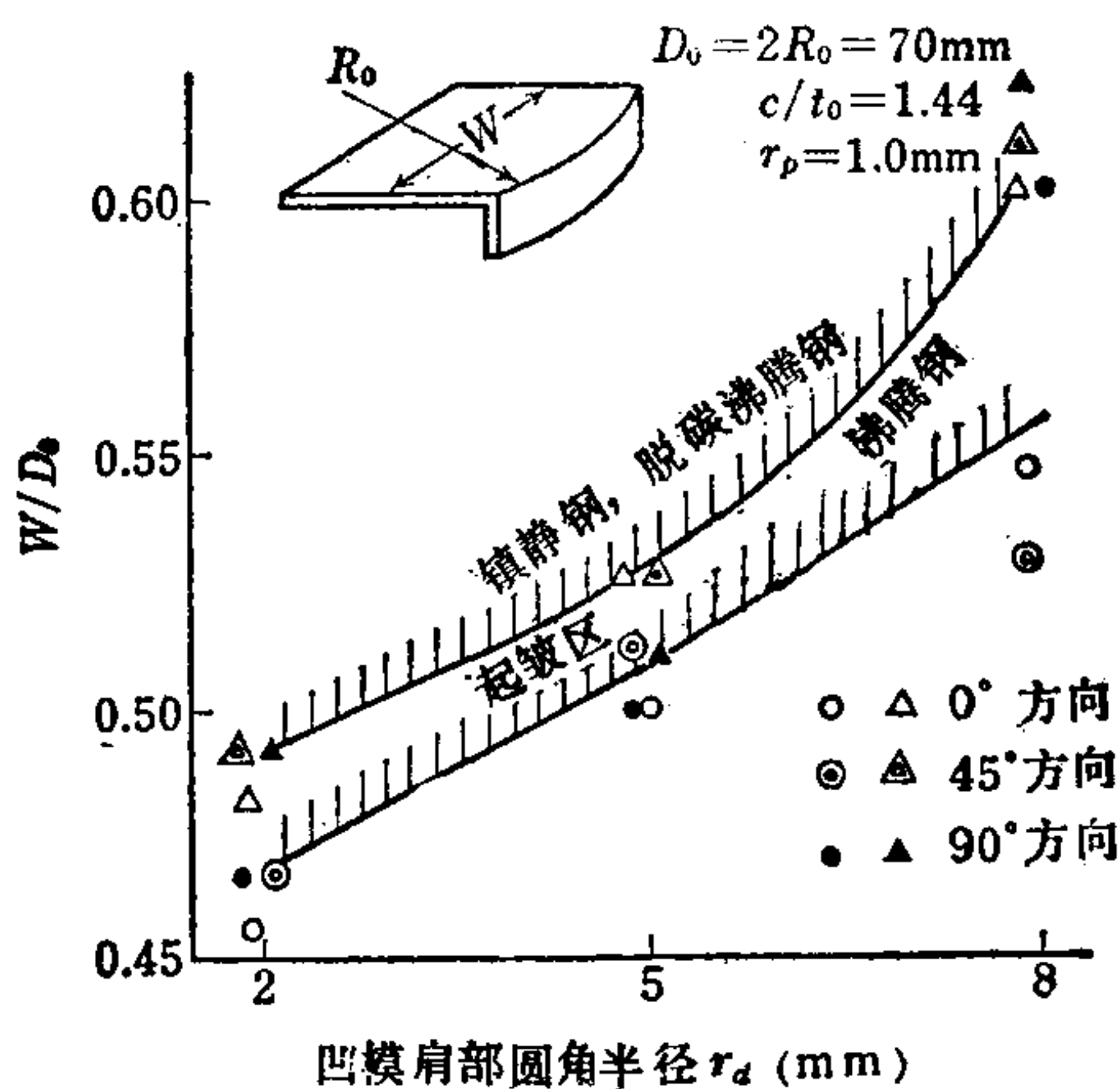


图4.84 取决于凹模肩部圆角半径和翻边宽度的皱折产生条件[116]

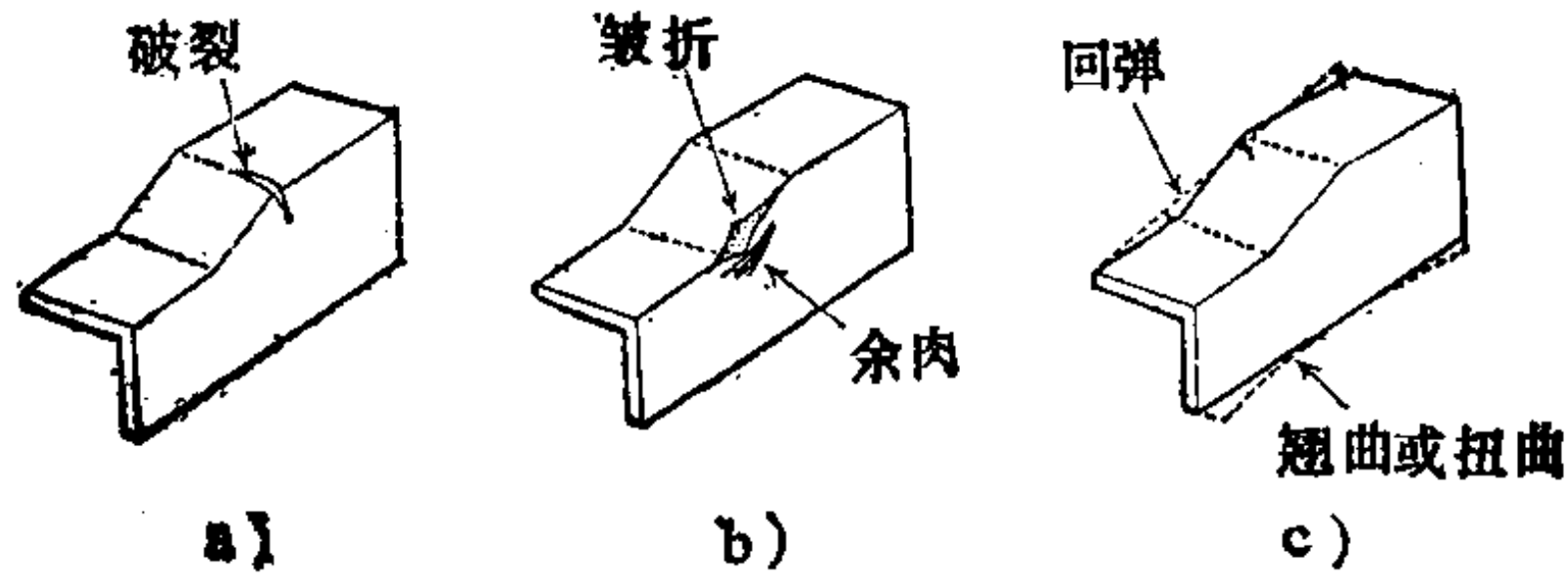


图4.85 台阶形翻边的缺陷例[118]

a) 破裂 b) 纵弯曲 c) 回弹

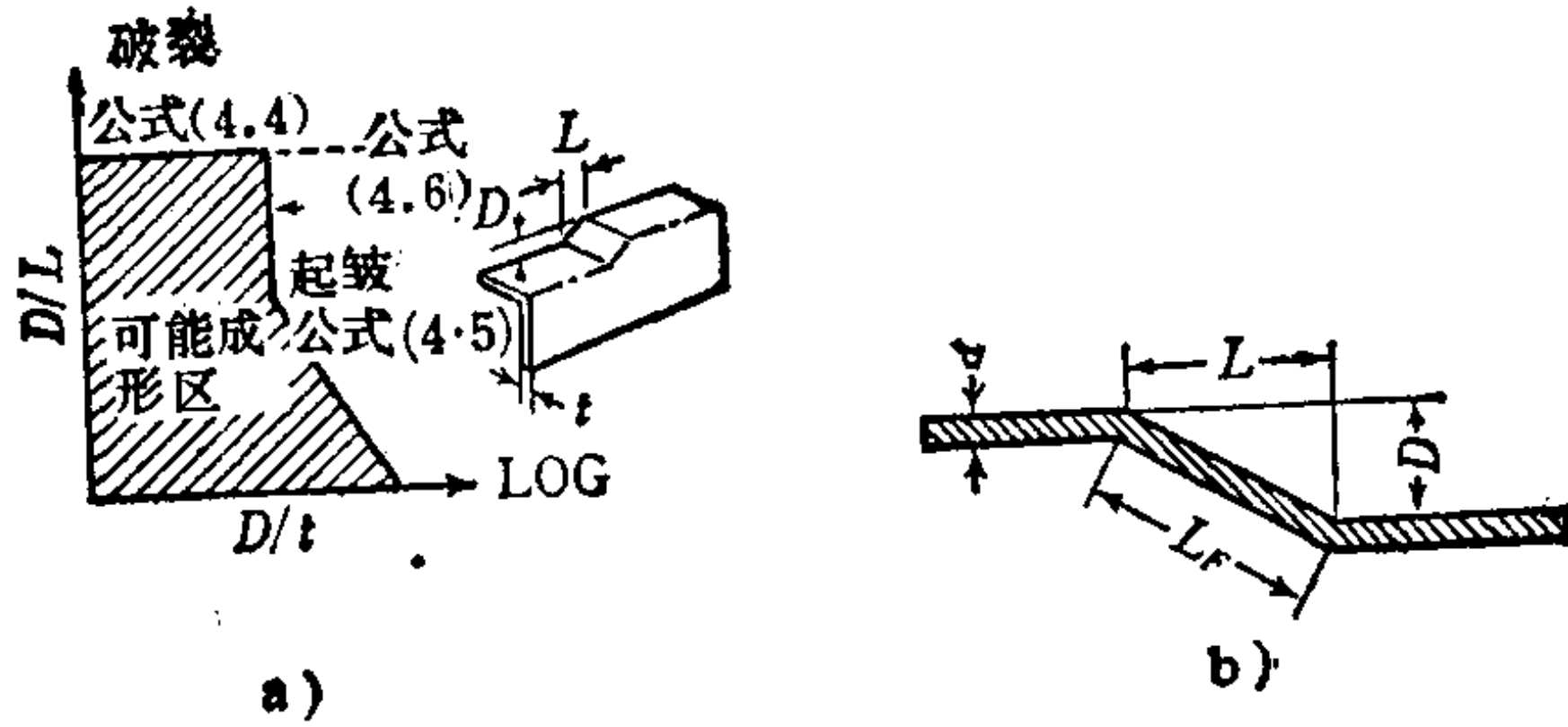


图4.86 成形极限[117]

a) 成形极限 b) 台阶成形的尺寸参数

$$D/L = \frac{E}{\sigma_{cy}} \left(\frac{0.0050625}{(D/t)^2} \right)$$

塑性纵向弯曲为

$$D/t = \left(\frac{0.0118\epsilon_c}{\sigma_{cy}} \right)^{2/5}$$

式中 E ——材料的压缩纵弹性模量；

σ_{cy} ——纵弯曲屈服应力；

ϵ_c ——弯曲屈服时的应变。

4.5 连续模

4.5.1 连续模的一般特征

需要几道工序才能完成零件的加工时，将此几道工序按一定的步距排列，坯料按步距间歇移动，这种连续完成几道工序的模具称为连续模。

按工序组合的方法分为一次完成两种以上工序的复合模；将经下料分离的坯料一面加工一面送到下个工位的多工位模。因各有优缺点，必须选用适当的方法。其最显著的特征归纳在表 4.23 中。

表4.23 工作特征

项 目	连续模	复合模	多工位模	备 注
送进方法	跟带料送进	一次行程切 离	脱离后送进	
材料利用率	不高	高	高	连续模送进需有搭边
高速化	可能	稍难	困难	
模具加工	困难	稍难	容易	
模具的修复、维 护	困难	稍难	容易	
工位数的增加	可能	有限度	可能	
侧面的加工	困难	不能	可能	
工序间的尺寸精 度	稍差	正确	差	除复合模外，很大程 度由送进装置和模具结 构决定
工作的稳定性， 模具的安全	中	小	大	工序分得越合理越稳 定
复杂弯曲加工	可能（有限 制）	不能	可能	
翻转，变更方向	不能	不能	可能	
最佳工作	冲裁	内外同时冲 裁，冲裁拖延	深拉延	

综合上表，为达到下列目的，连续模是优越的。

- 1) 为提高生产率，将几个工序组合时。
- 2) 为将复杂的形状分开加工。
- 3) 为将超过极限的大变形量加工分成小变形量加工。
- 4) 由于模具强度限制而需分开时。
- 5) 为使模具加工容易而分开时。

然而，不仅是掌握使用连续模的技术水平，而且连续模的制造到修理能力都成为发挥连续模效率的必要条件。连续模除能完成冲裁工序外，还包含能完成拉延、弯曲等其他工序在内。

a. 冲裁连续模 以电机转子、定子和集成电路主框架 (IC leadframe) 等为例。由于具有非常窄的桥部、小孔和切口, 受模具强度或加工能力的限制, 不能在一个工位上完成全部加工, 因而采用分工序的连续模。要求将原来一次冲裁模的相关精度提高。

因此, 着重于使制件获得必要的精度, 提高材料利用率, 提高生产率。为提高精度, 要求相关尺寸同时冲裁, 合适的导料方法和提高送进步距精度。为提高材料利用率, 可采用多列排样, 转子、定子的组合排样, 无废料排样 (无废料化) 等主要方法。为提高生产率, 要求多列排样, 多个排样, 提高设备转数, 快速换模以提高设备利用率, 条料化, 材料质量稳定及防止模具损坏等。

由上可见, 虽然条料的排样合理化非常重要, 但是也应注意到其他因素也是影响发挥连续模能力的关键。即具备对这些问题的处理能力, 可以说是应用连续模的必要条件。

b. 包含拉延的连续模 由于要求确保防皱压边面积和压边力, 以及随着拉延时凸缘直径减小使步距变化和每一工序的深度变化及防皱压边力不均等因素, 因此其条件变化比冲裁模时大。模具设计时要全部预测这些因素再决定尺寸有困难, 希望在结构上能考虑某些尺寸在装配或试验调整阶段还能变动。

连续模与单工序冲模相比, 加工条件有很大的差别。单工序冲模由于前一工序产生的温升几乎完全冷却, 即经过相当时间之后再行进行下一工序。对于连续模, 不等完全冷却就进行下道的拉延, 因此对材料的特性极为有利。作为减少材料宽度的措施, 带料排样以及前述的各种办法都可试试。例如, 用切口位置不同的二重圆冲裁的兰斯·史勒特法, 虽可使带料宽度和进距不变, 但由于材料利用率低, 可能限制了这一方法的应用。

c. 包含弯曲的连续模 对由于形状关系易产生变形的件、弯曲方向与凸模动作难以处理的件、易引起送进的件等, 应从带料的排样和安排加工顺序上去想办法。通讯设备用的弹簧等大多

采用多个排样以获得高的生产率。对弯曲件应特别着眼于弯曲精度，一般必须考虑有精度要求部位的弹性回复最终控制的可能性。

4.5.2 连续模实例[⊖]

a. 实例 1 单列冲裁，转子、定子片冲裁连续模 图 4.87 a 所示为单列冲裁模的标准形式。首先将转子槽一次冲出，然后冲定子槽、转子落料，再定子落料。即从定子的内侧套料出转子。

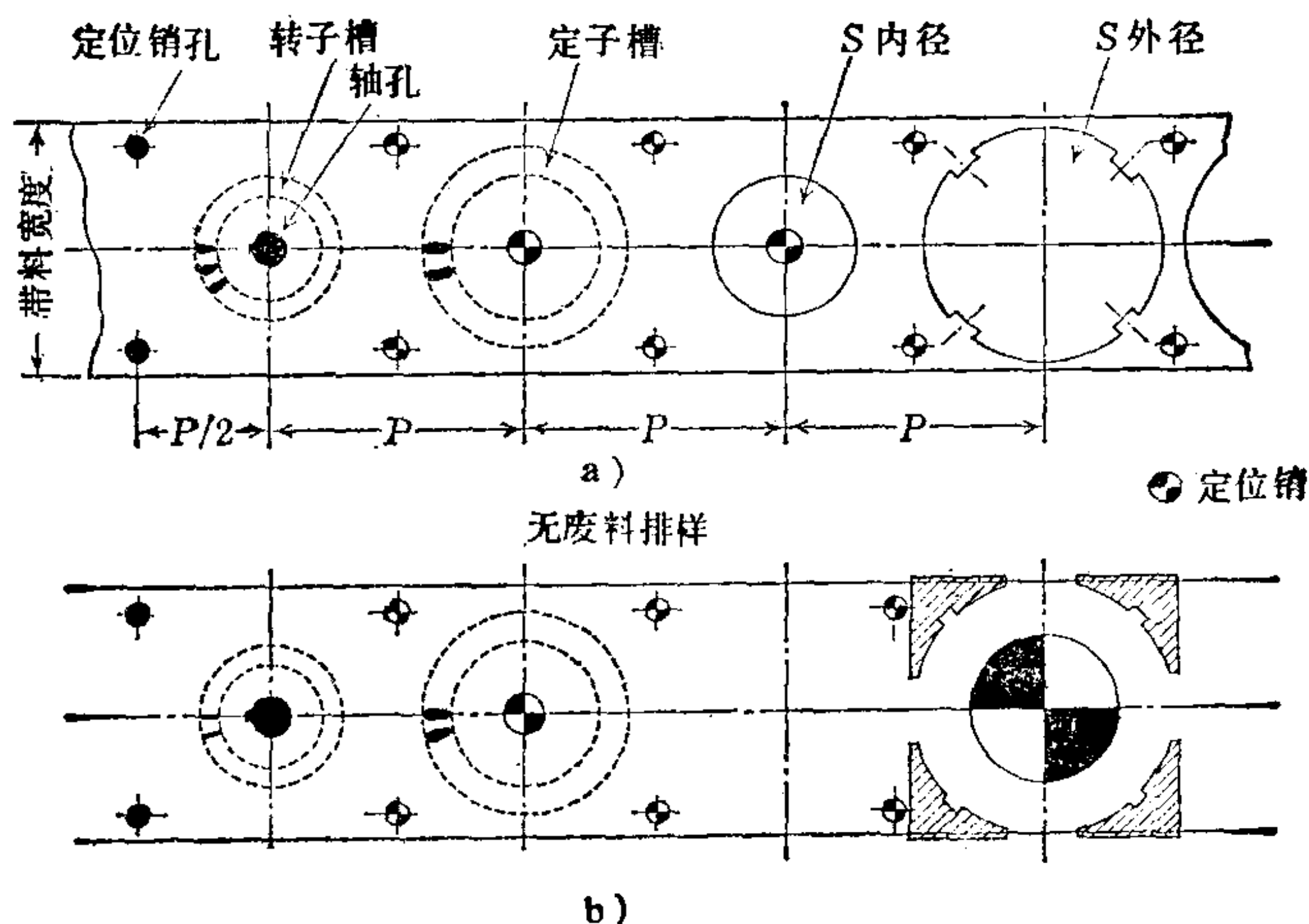


图4.87 单列转子、定子片冲裁连续模排样图

图 4.87 b 所示为定子不冲压全周，四角最后冲切，制件四周仍保留直线形。这是废料最少和磁性特性降低最少的方法，材料利用率提高，图 4.88 所示为图 4.87 a 所示的连续模装配图。

图 4.89 所示为双列转子、定子片冲裁连续模，为提高材料利用率而采用双列，为使冲裁力平衡和模具强度上的原因，定子

⊖ 连续模实例执笔者：杉村俊雄，三浦三男，辻秀志，足立达也，岩松 繁，福田正次，两田幸雄，真利子 诚，塚田盛久，永井英夫。

和转子槽的冲裁顺序有改变。这时需要采用特大型自动压力机。必须考虑制件和废料的取出方法。

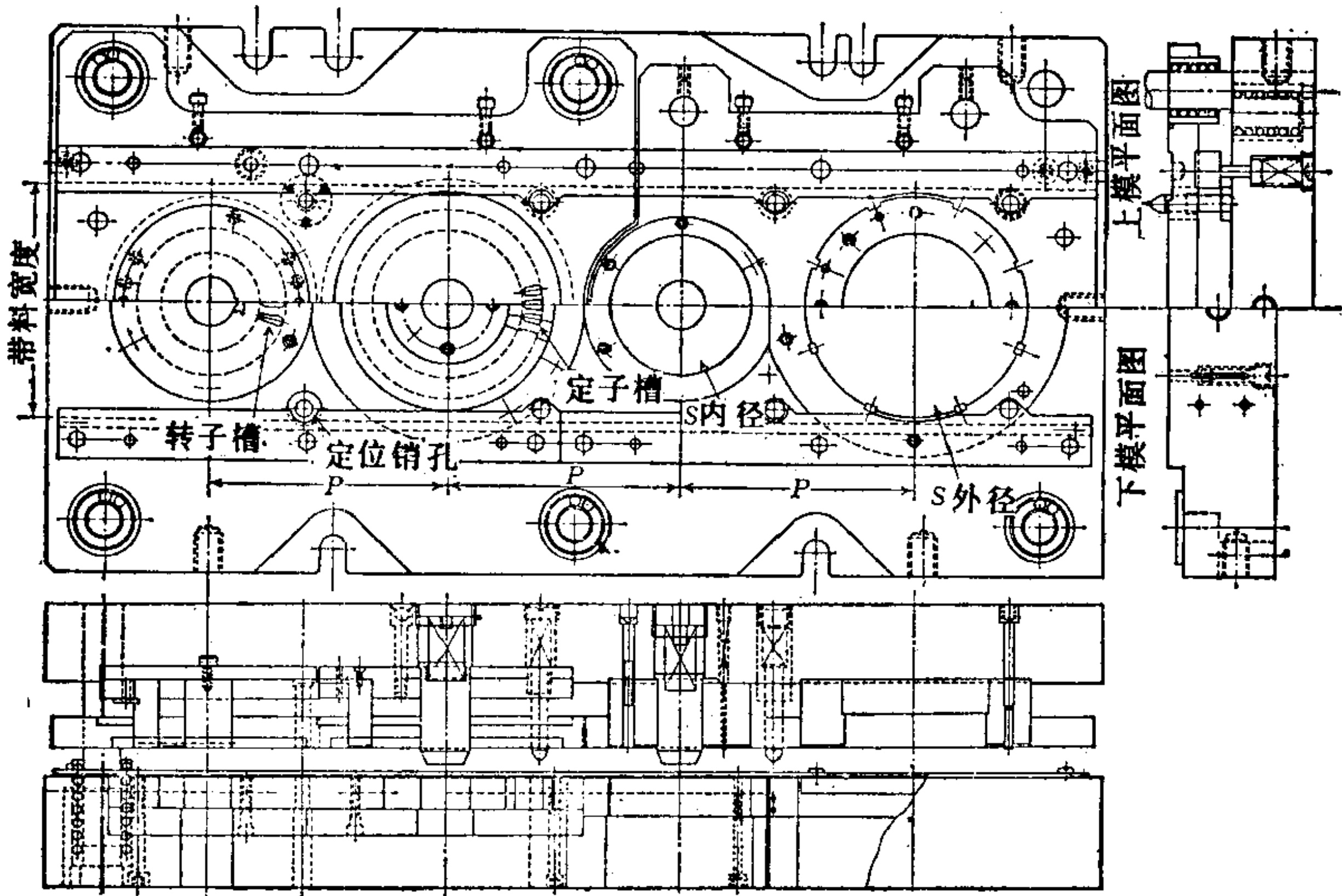


图4.88 单列4工位转子、定子片冲裁连续模装配图

冲裁模的精度必须注意，特别是槽部、切刀刃口部分都需进行研磨，以达到超高尺寸精度。模具的组合需预先计算过盈量和设定变形量，使用锥形套、热压合等。

b. 实例2 拉延连续模（图4.90~图4.92） 这是拉延连续模的标准形式。一般先冲裁工艺切口，使坯料呈三角形连接，为使步距缩短，提高材料利用率，在下一工位将工艺切口拉开。

c. 实例3 异形件拉延连续模（图4.93~图4.94） 因异形细长，送料不易安定。升降销、导板的位置应特别予以注意。导正凸模带有顶出器。

d. 实例4 罩的拉延弯曲连续模（图4.95~图4.97） 因要求罩不变形，因此材料利用率不高。工件在压板中能浮动。最后工序为切离和成形，在上模切断器中间装有切断凸模，用卸料

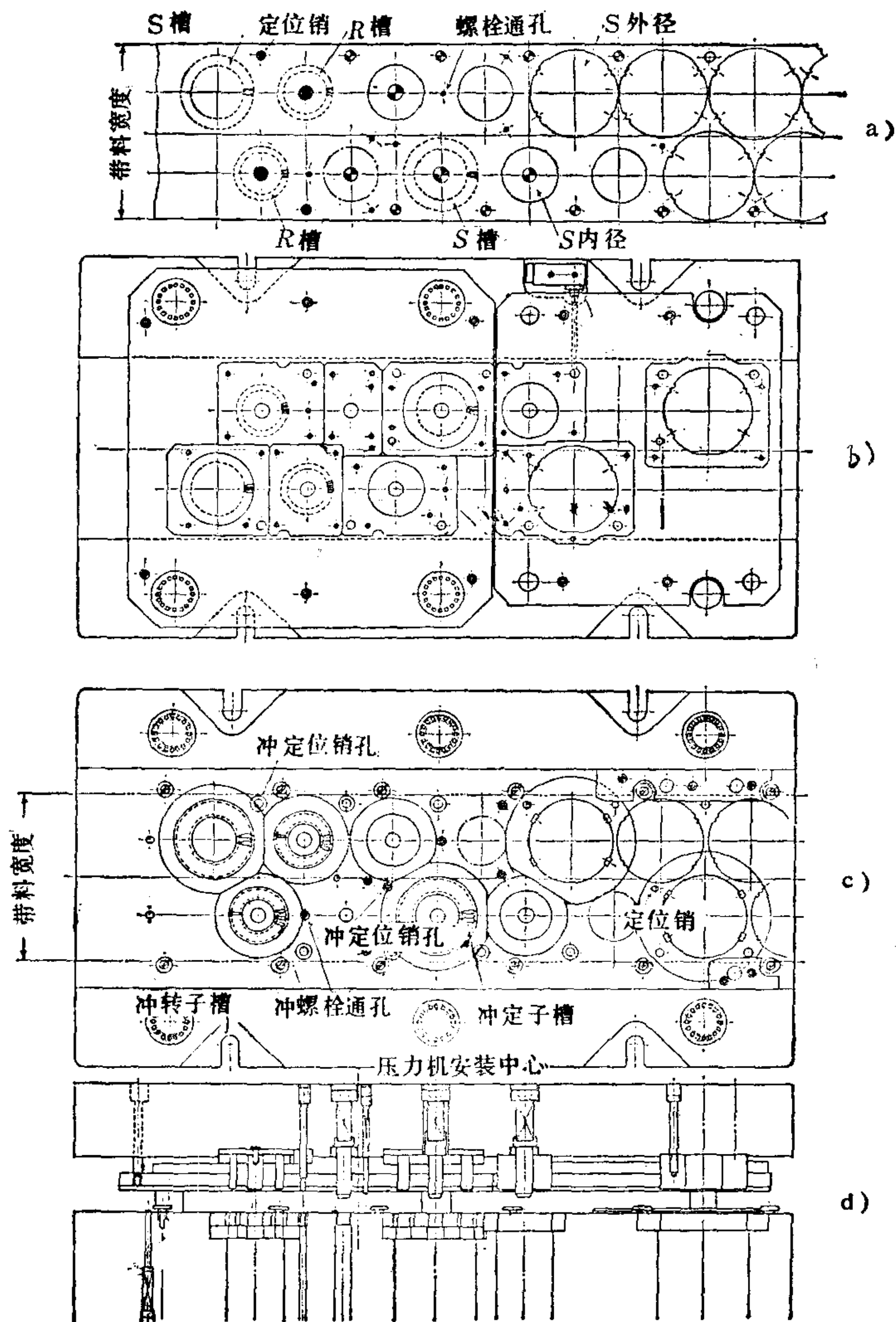


图4.89 双列转子、定子片冲裁连续模装配图

a) 带料排样 b) 转子、定子片冲裁连续模上模平面图 c) 转子、定子片冲裁连续模下模平面图 d) 转子、定子片冲裁连续模侧面图

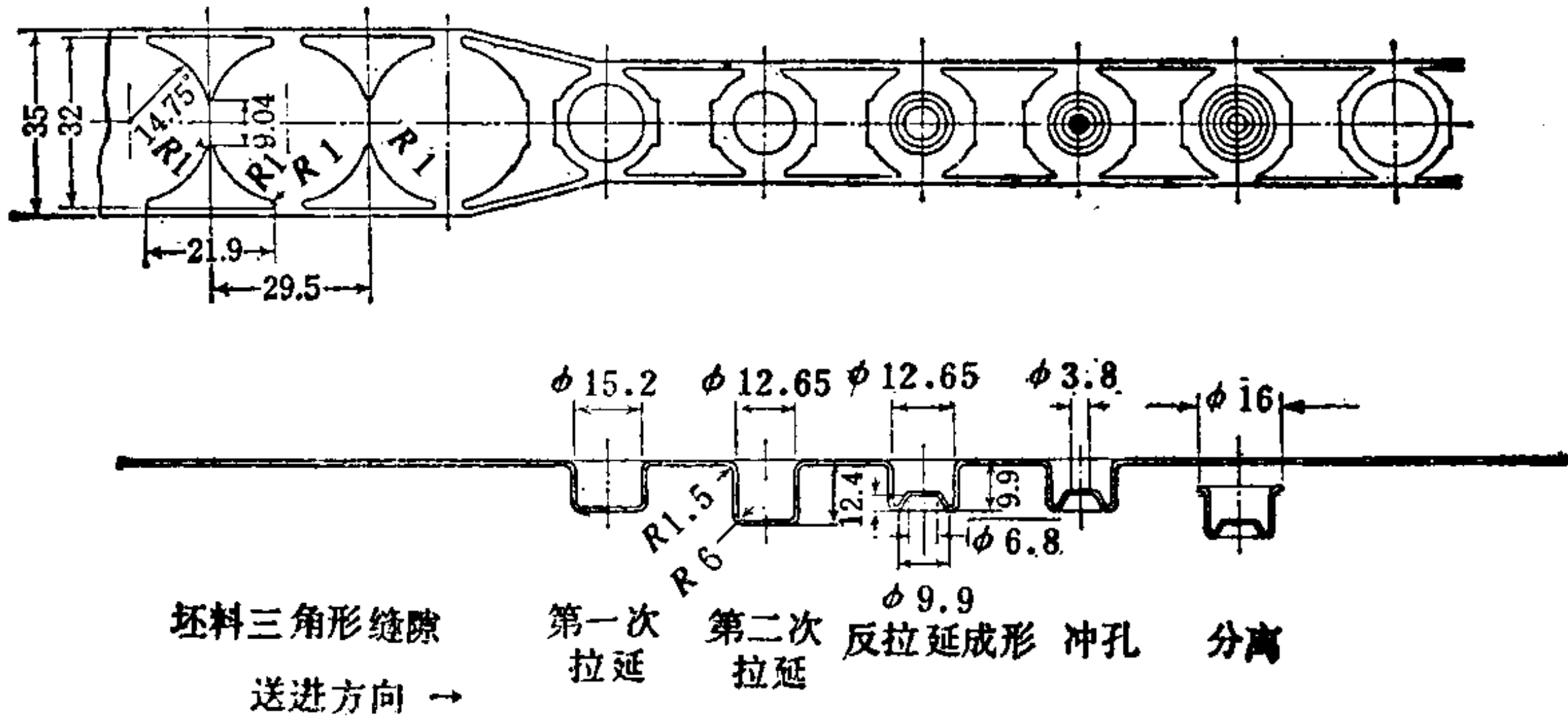


图4.90 实例 2 排样图

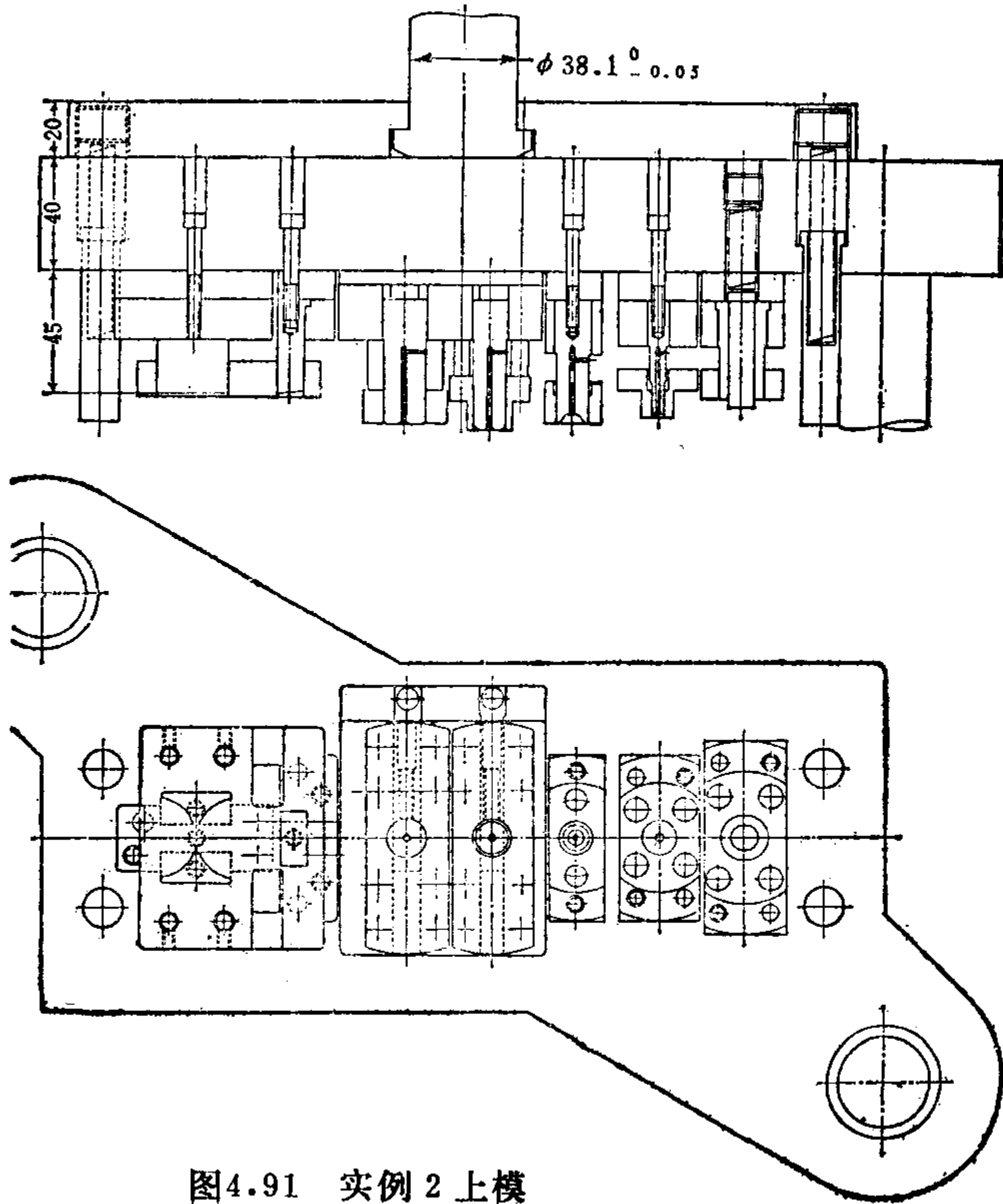


图4.91 实例 2 上模

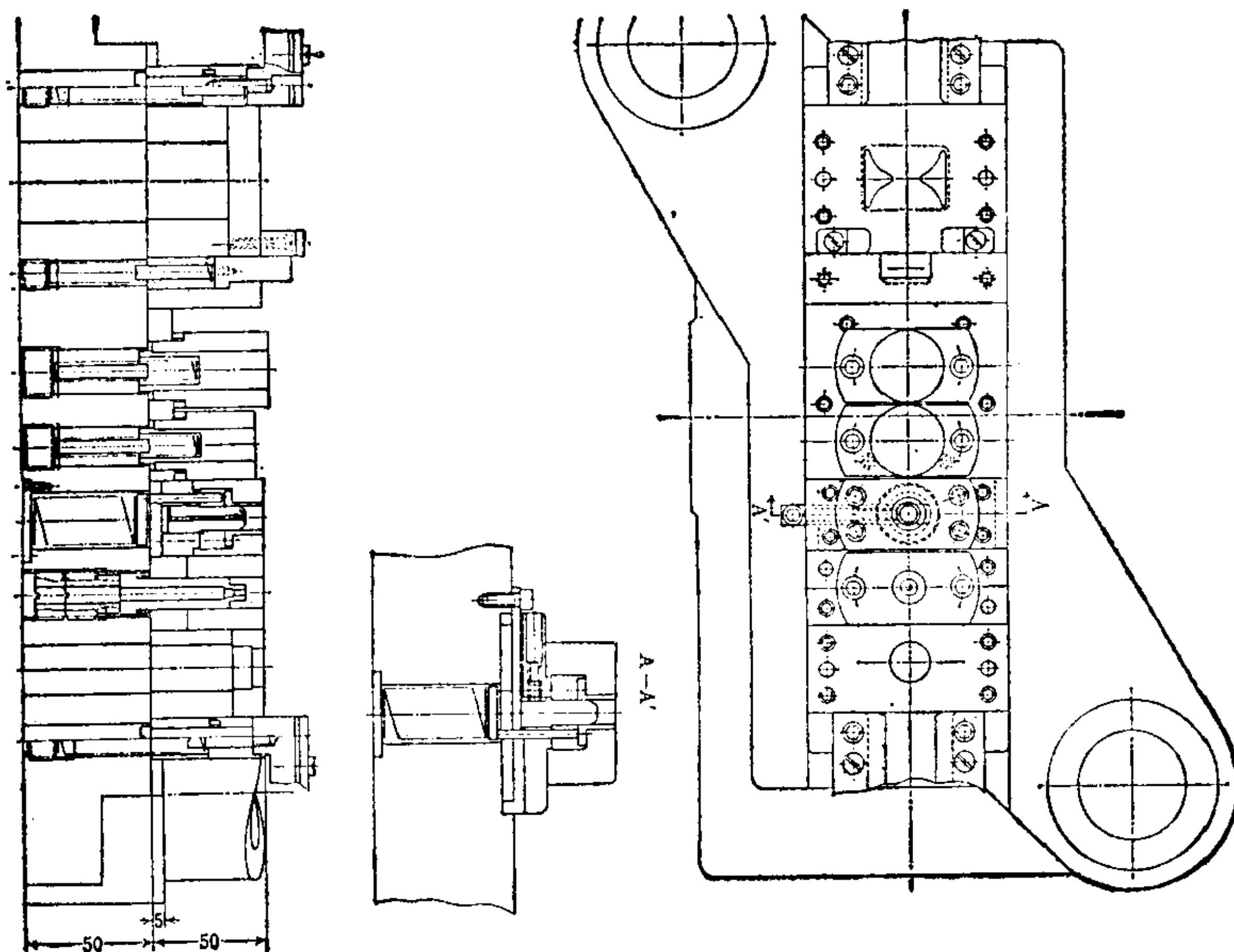


图4.92 实例3下模

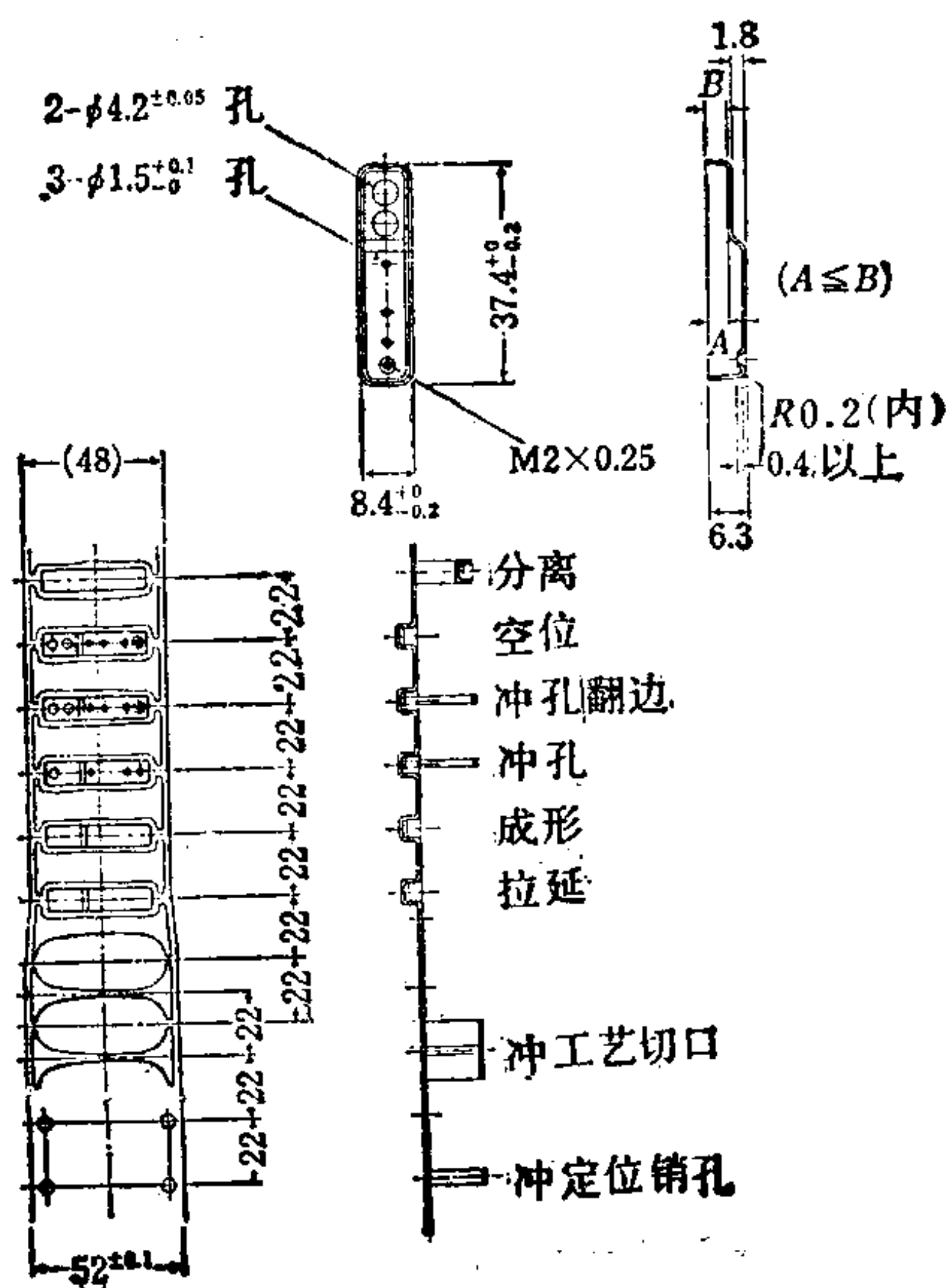


图4.93 实例3排样图
零件：壳体 材质：BsP3-0
材料厚度：0.6mm

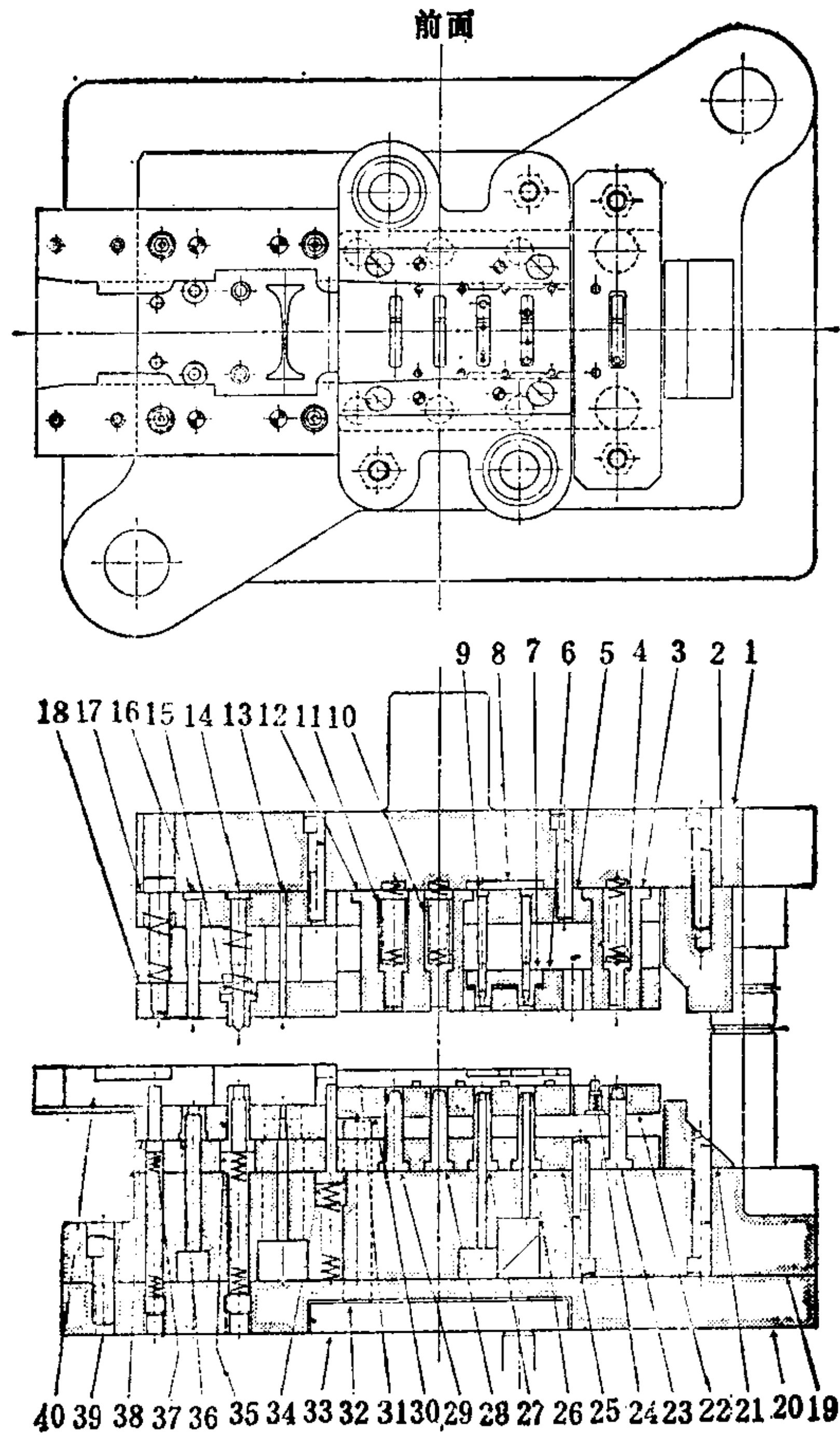


图4.94 连续模装配图

- 1—凸模座 2—上模废料切刀 3—修边模 4、10、11、15—顶出器 5、17、25—凸模固定板 6—模板 7—卸料器 8、39—垫板 9—冲孔凸模 12—拉延模 13—冲异形槽凸模 14—导正凸模 16—冲孔凸模 18、22—卸料板 19—下模板 20—垫板 21—下模废料切刀 23—修边凸模 24—升降销 26、27、36—冲孔凹模 28—成形凸模 29—拉延凸模 30—坯料台 31—导板 32—缓冲垫销 33—缓冲垫板 34—提升器 35—导正衬套 37—升降销 38—凹模固定板 40—导板

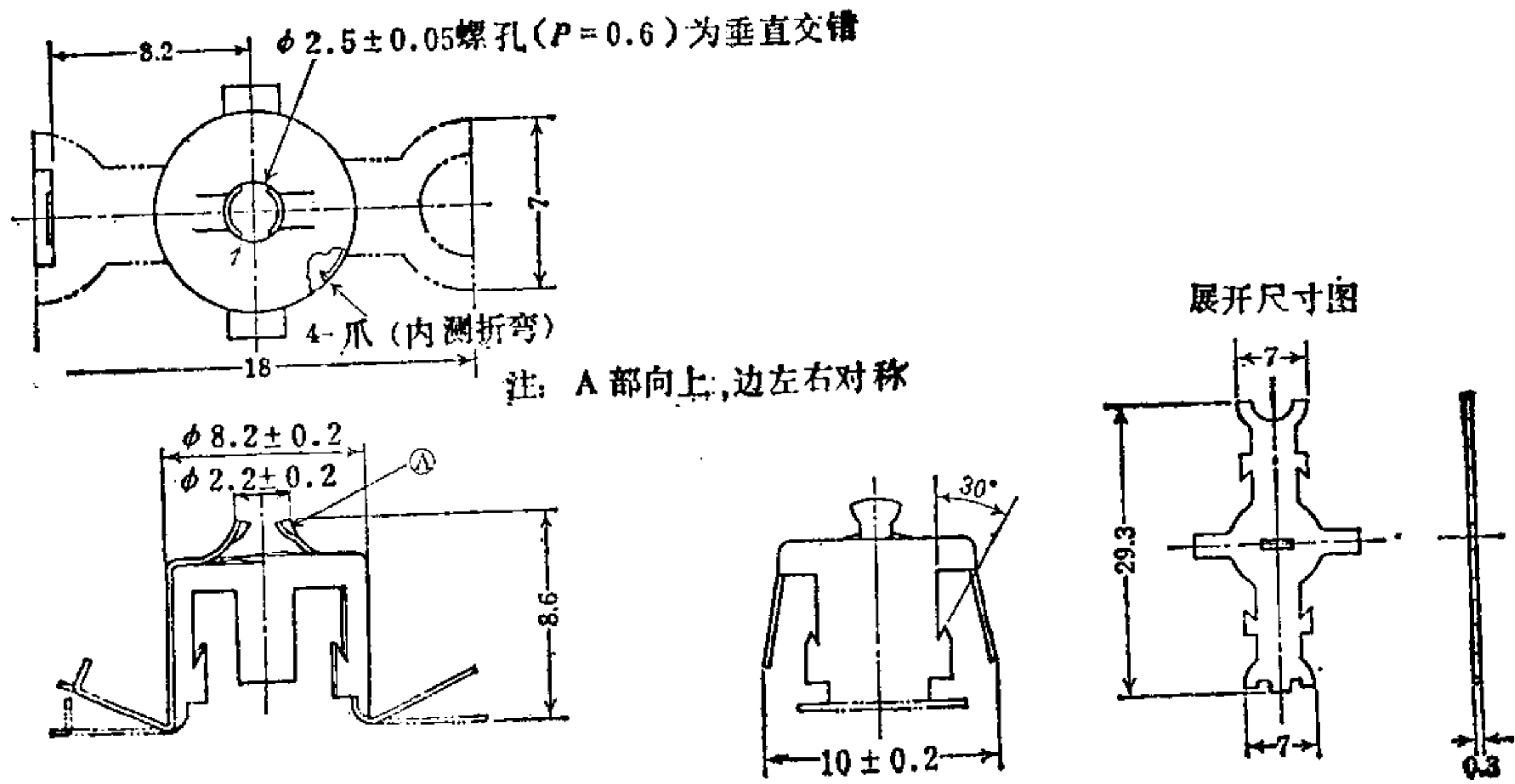


图4.95 实例4制件图

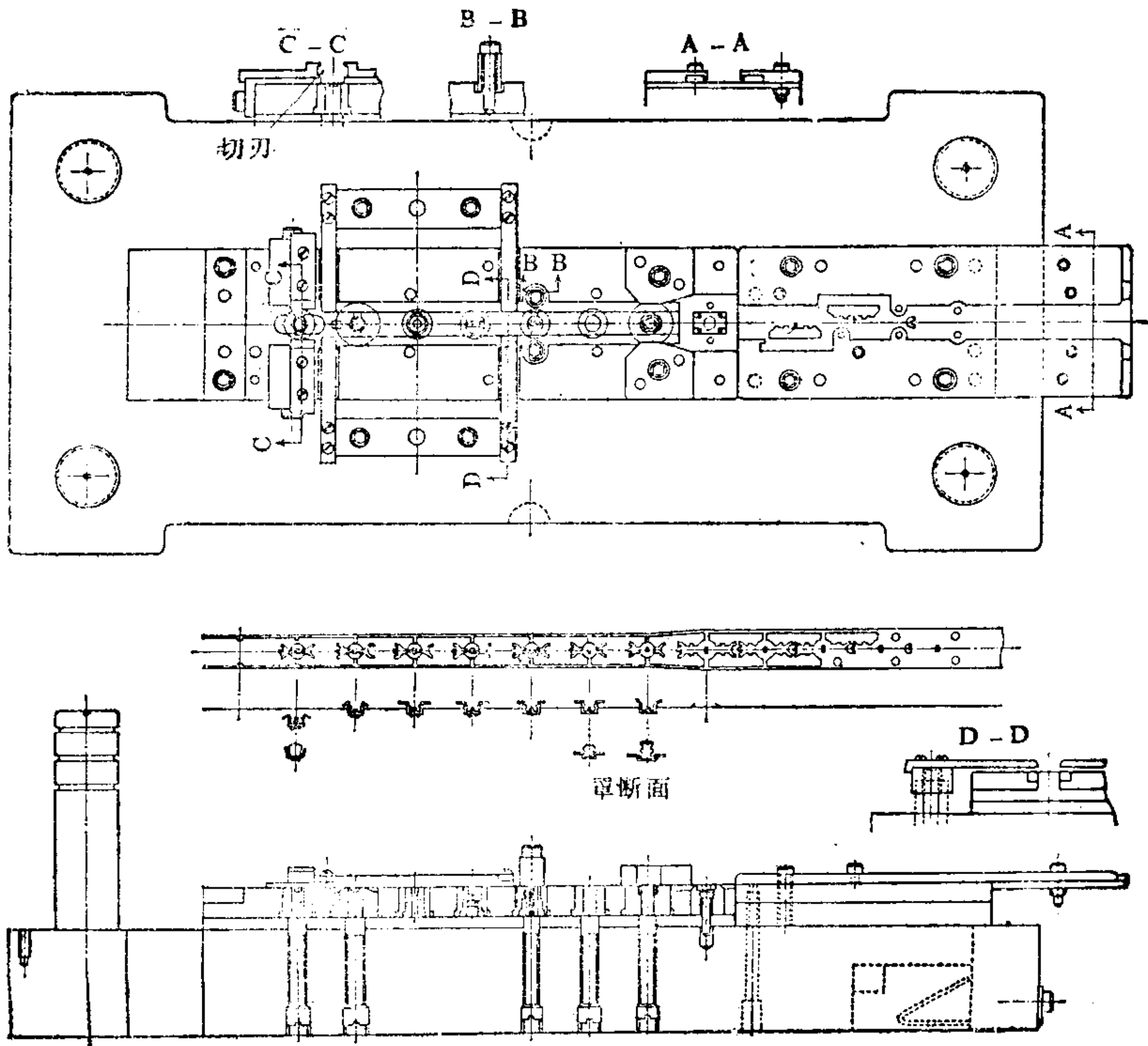


图4.96 实例4下模

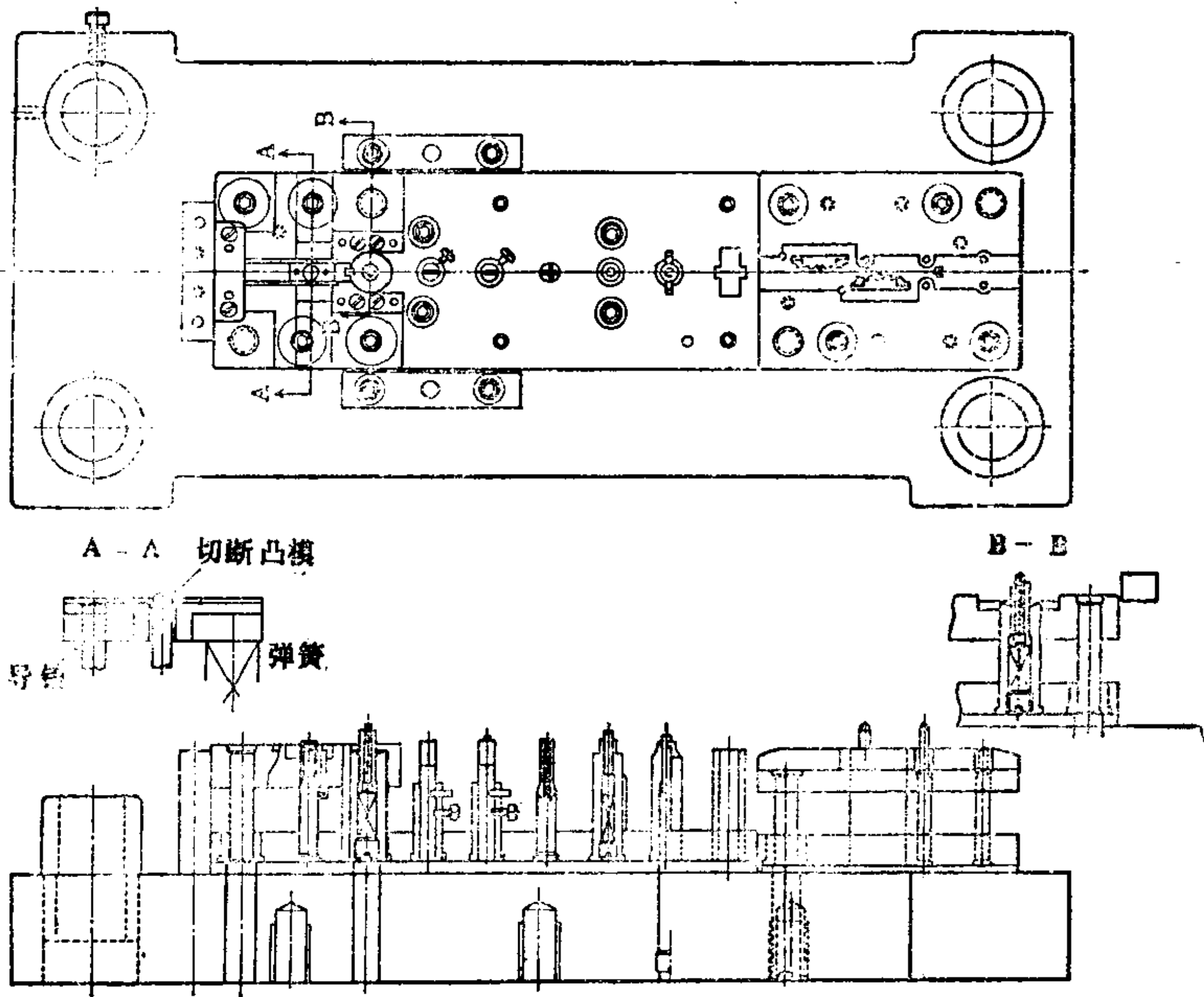


图4.97 实例4上模

弹簧力切断，用装有导正销的成形凸模进行成形。为便于安装调试，采用能拔出的阶梯凸模，以缩短凸模高度的调节时间。

e. 实例5 拉延连续模 (图 4.98~图 4.100)

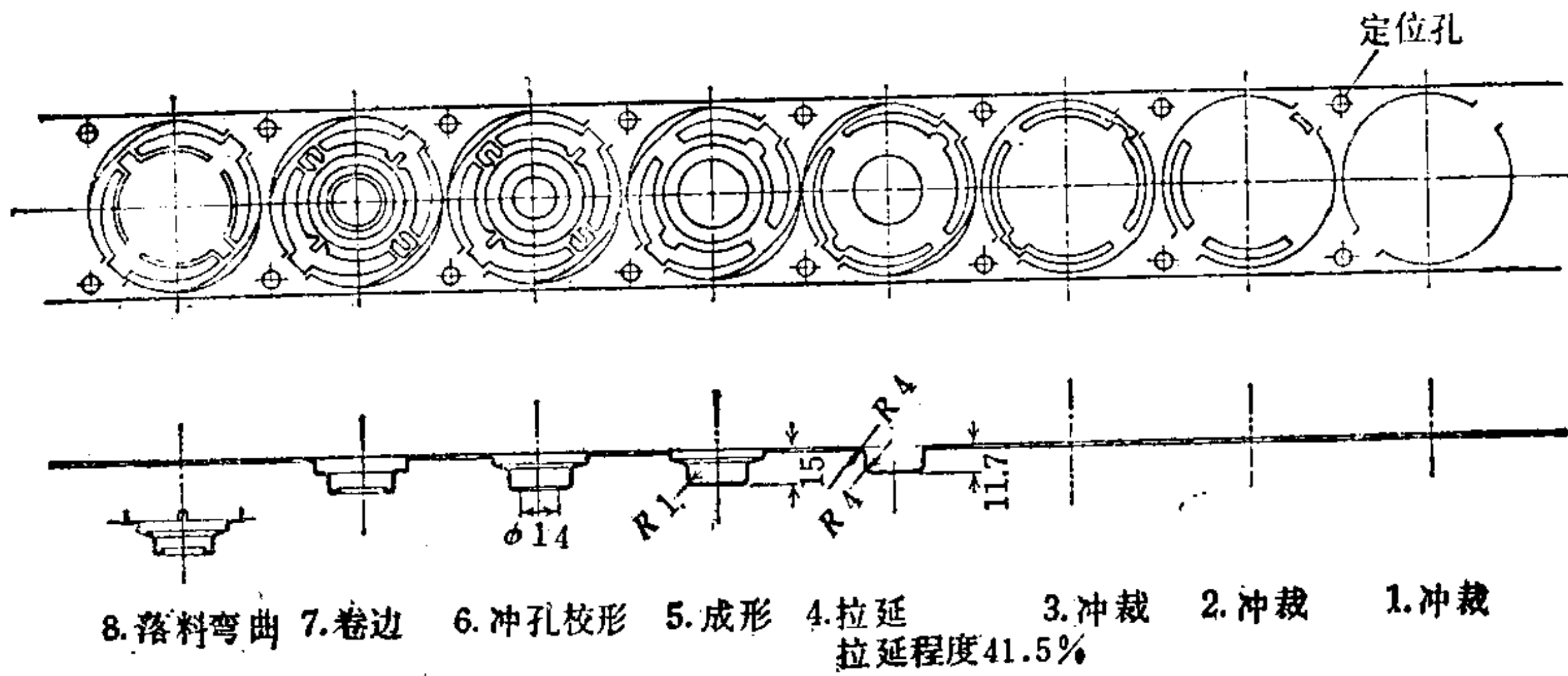


图4.98 实例5排样图

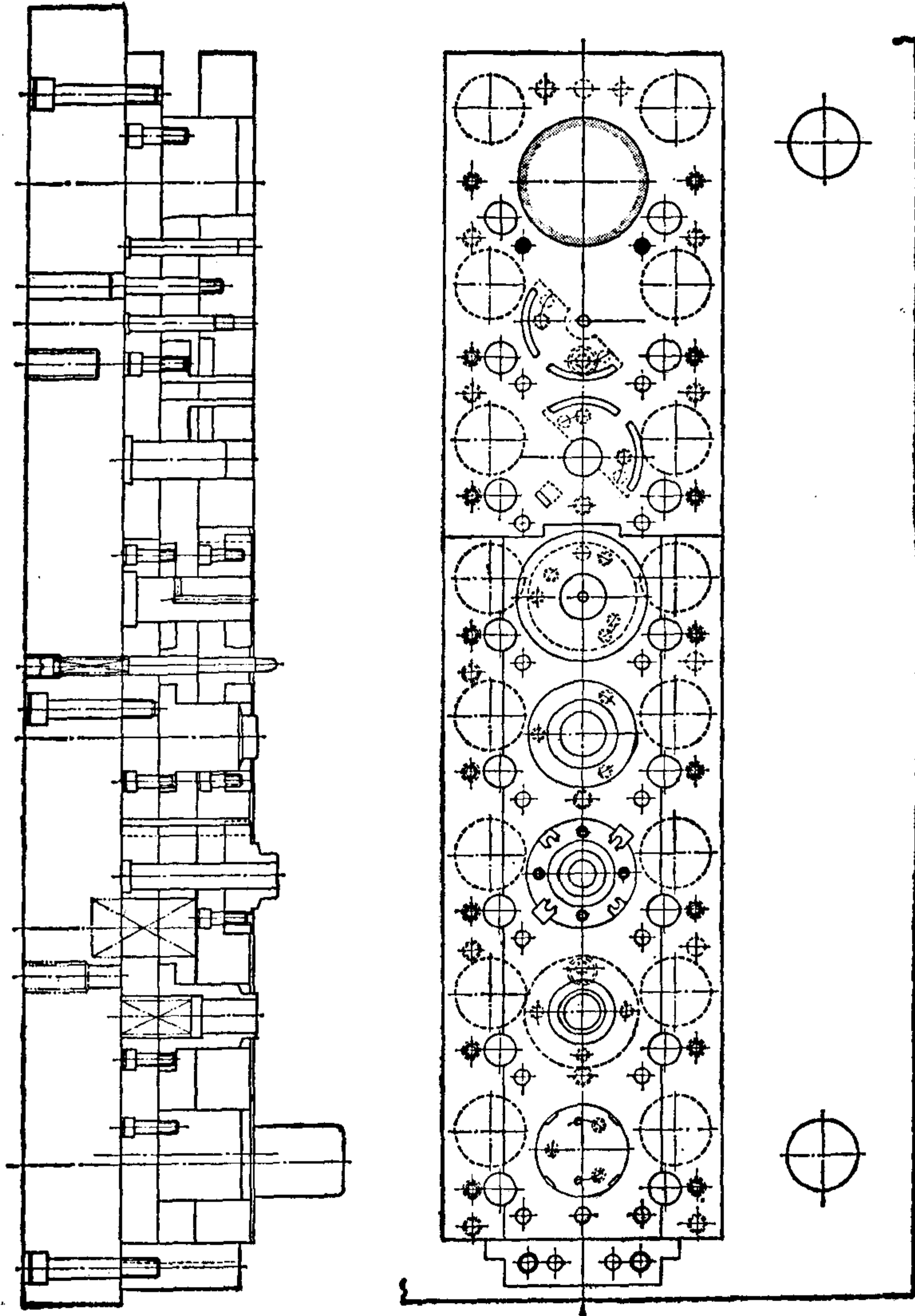


图4.99 实例5上模

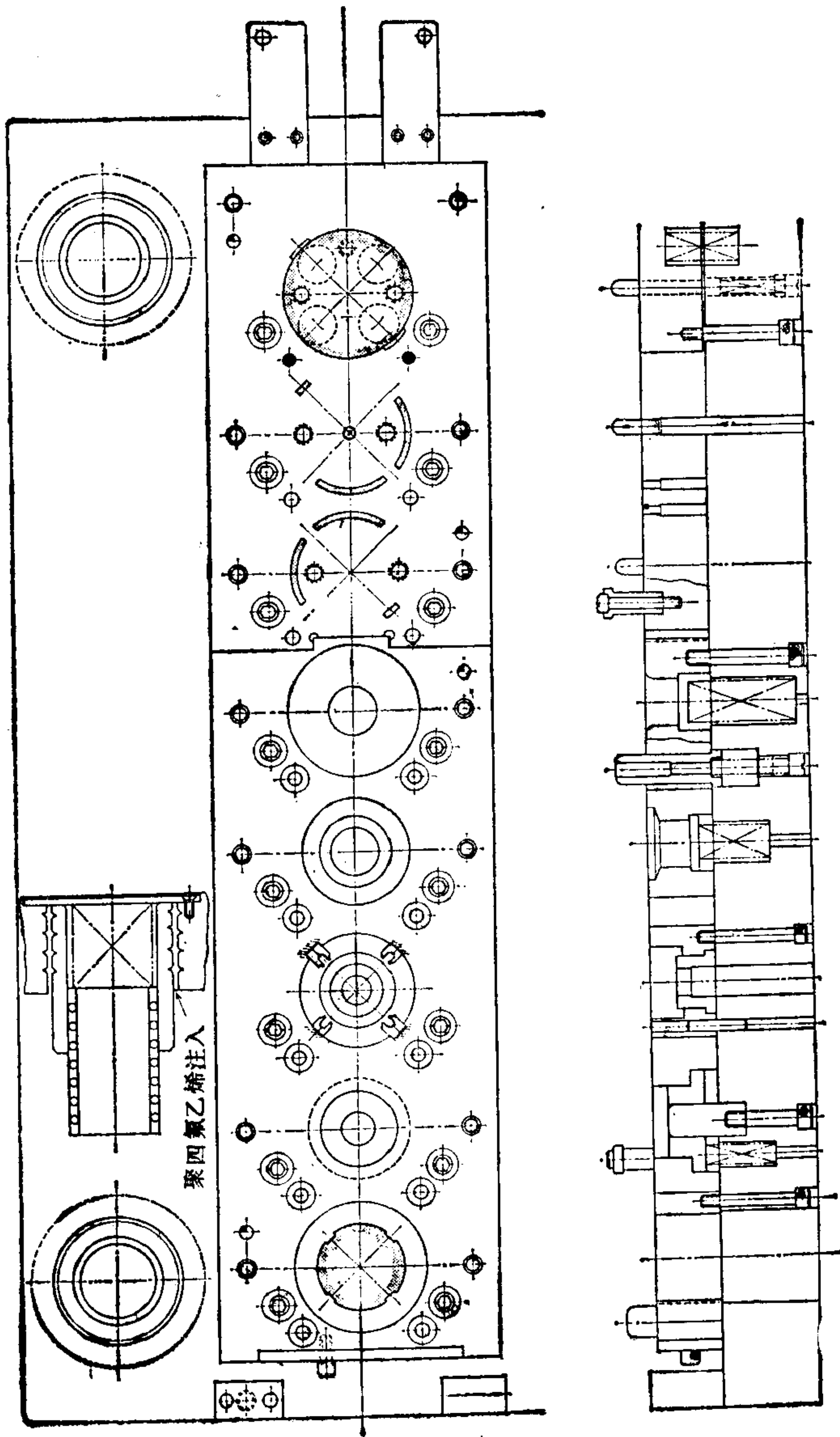
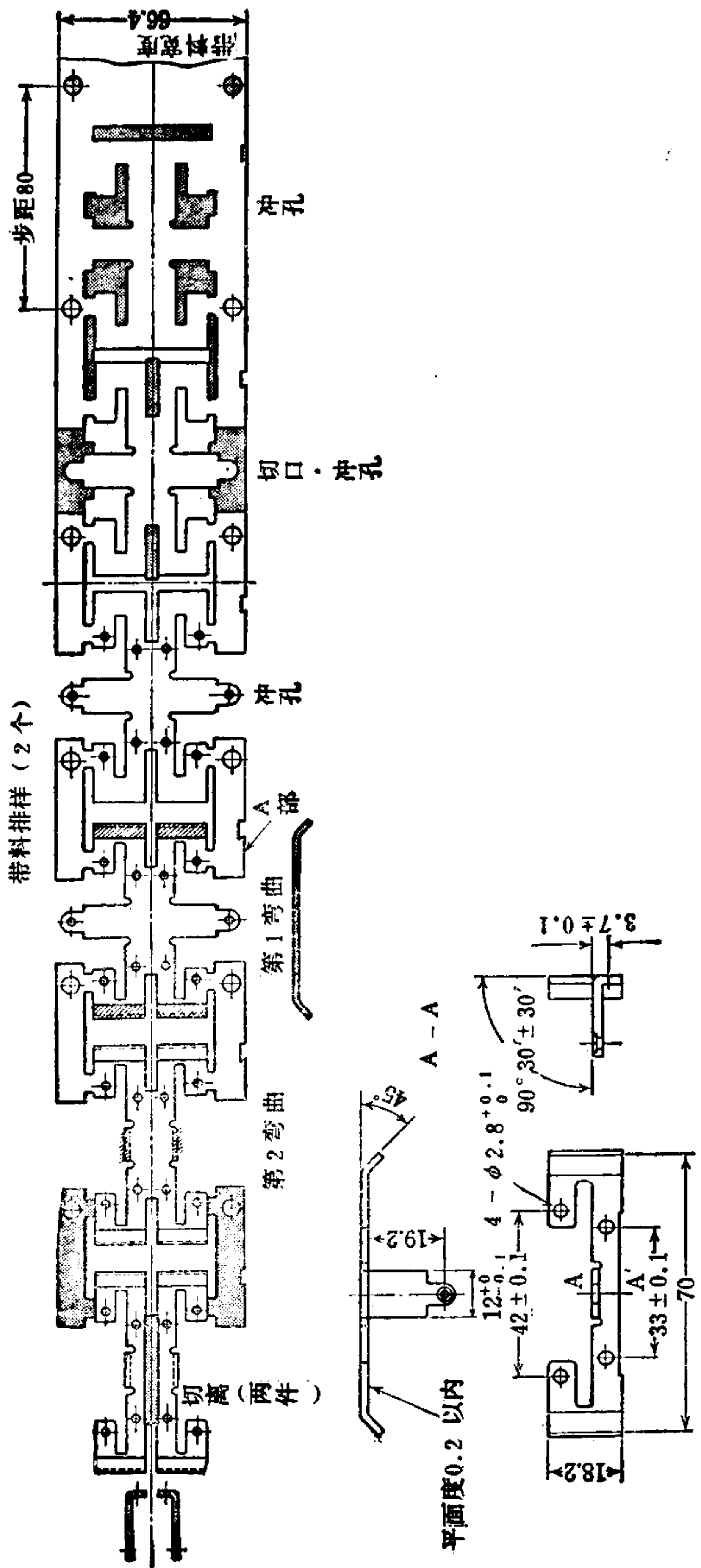


图4.100 实例5下模



制件图 材料 SPM-BK
21 ± 0.05

图4.101 实例6制件图, 排样图

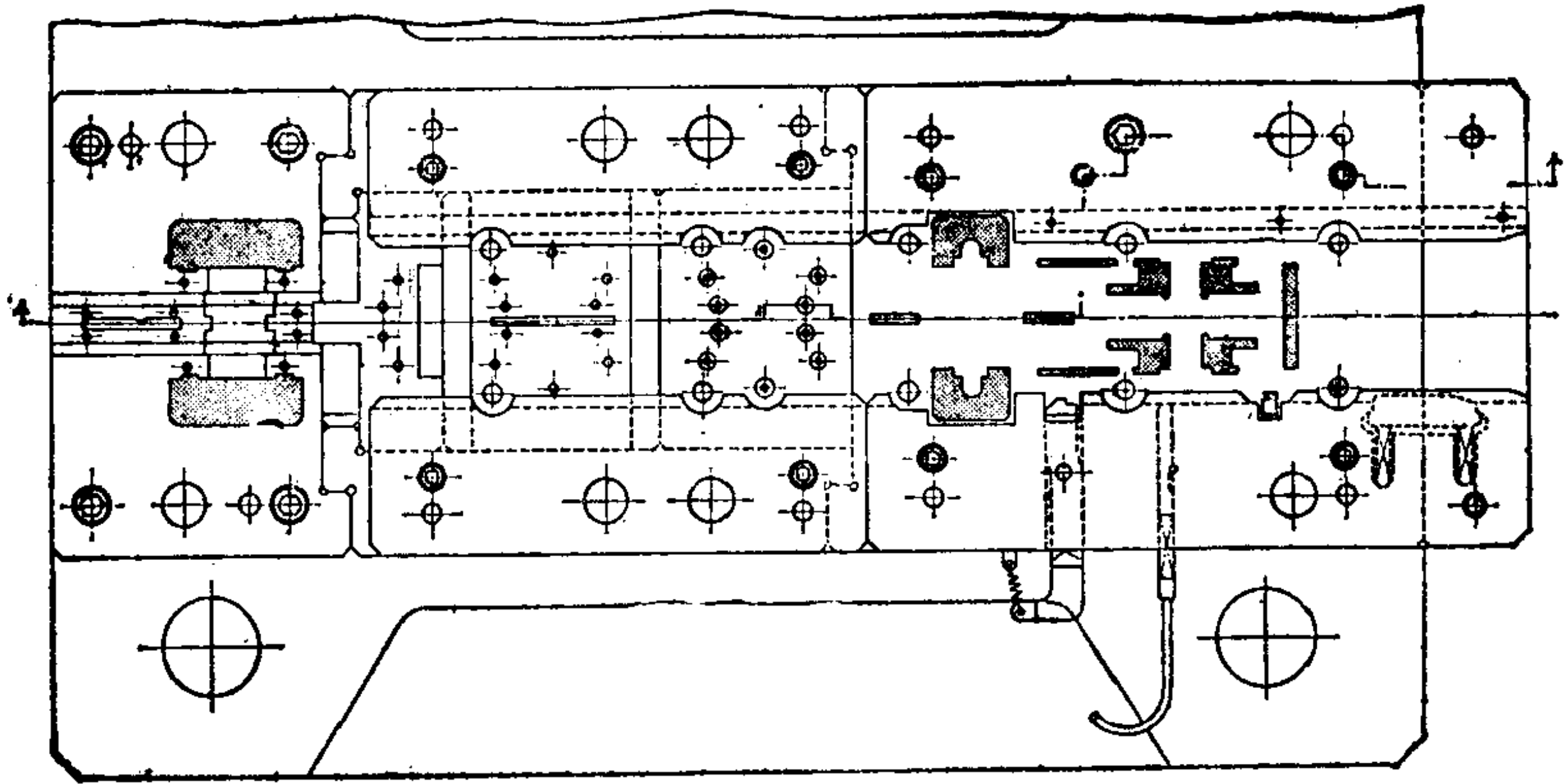


图4.102 实例6下模平面图

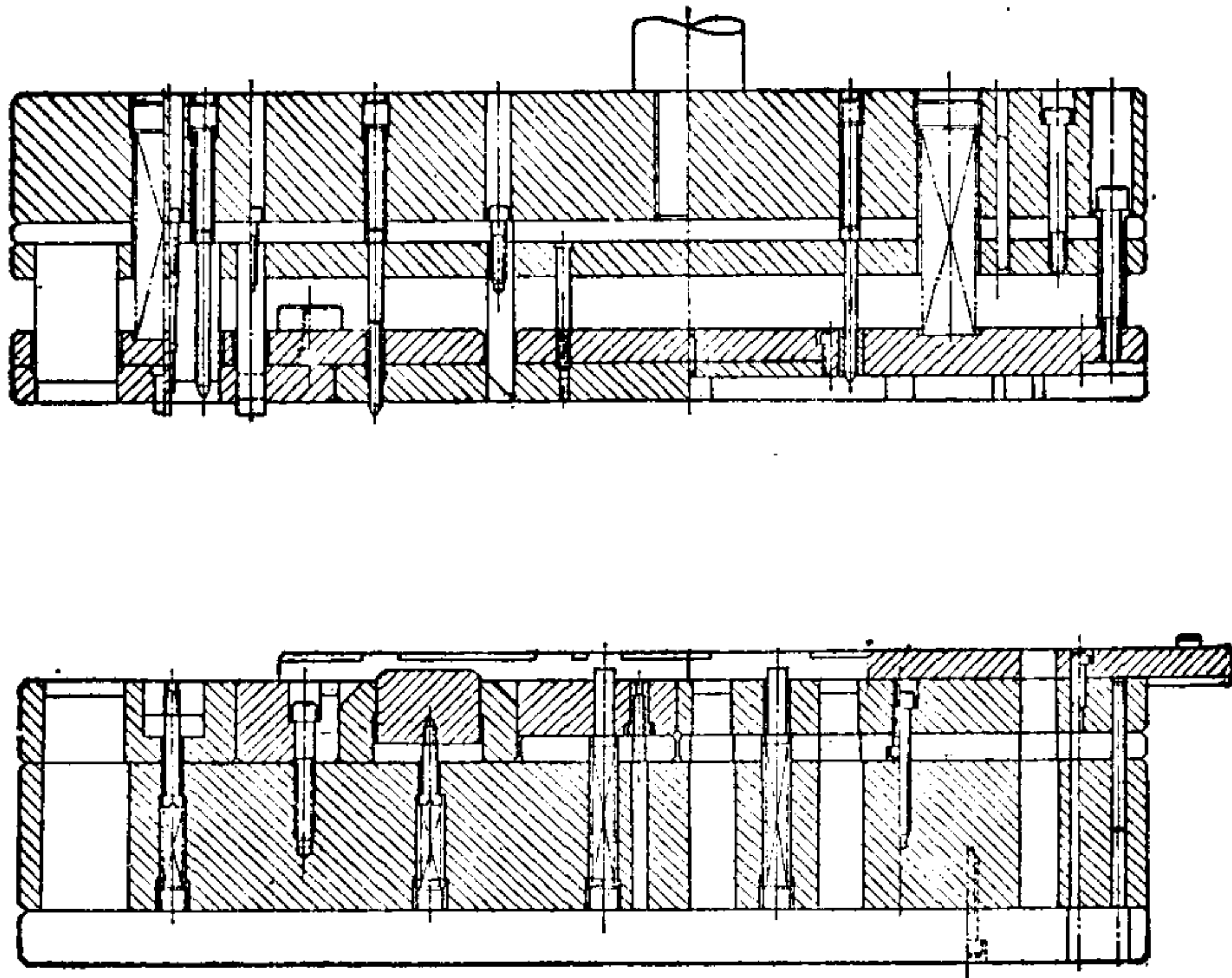


图4.103 实例6纵剖面图

f. 实例6 双列弯曲连续模（图4.101~图4.103）为防止弯曲时变形，A部设有工艺余料。

g. 实例7 弯曲台阶的连续模（图4.104~图4.106）包含为了得到弯曲台阶部分平行度和A面平直度的成形工序。

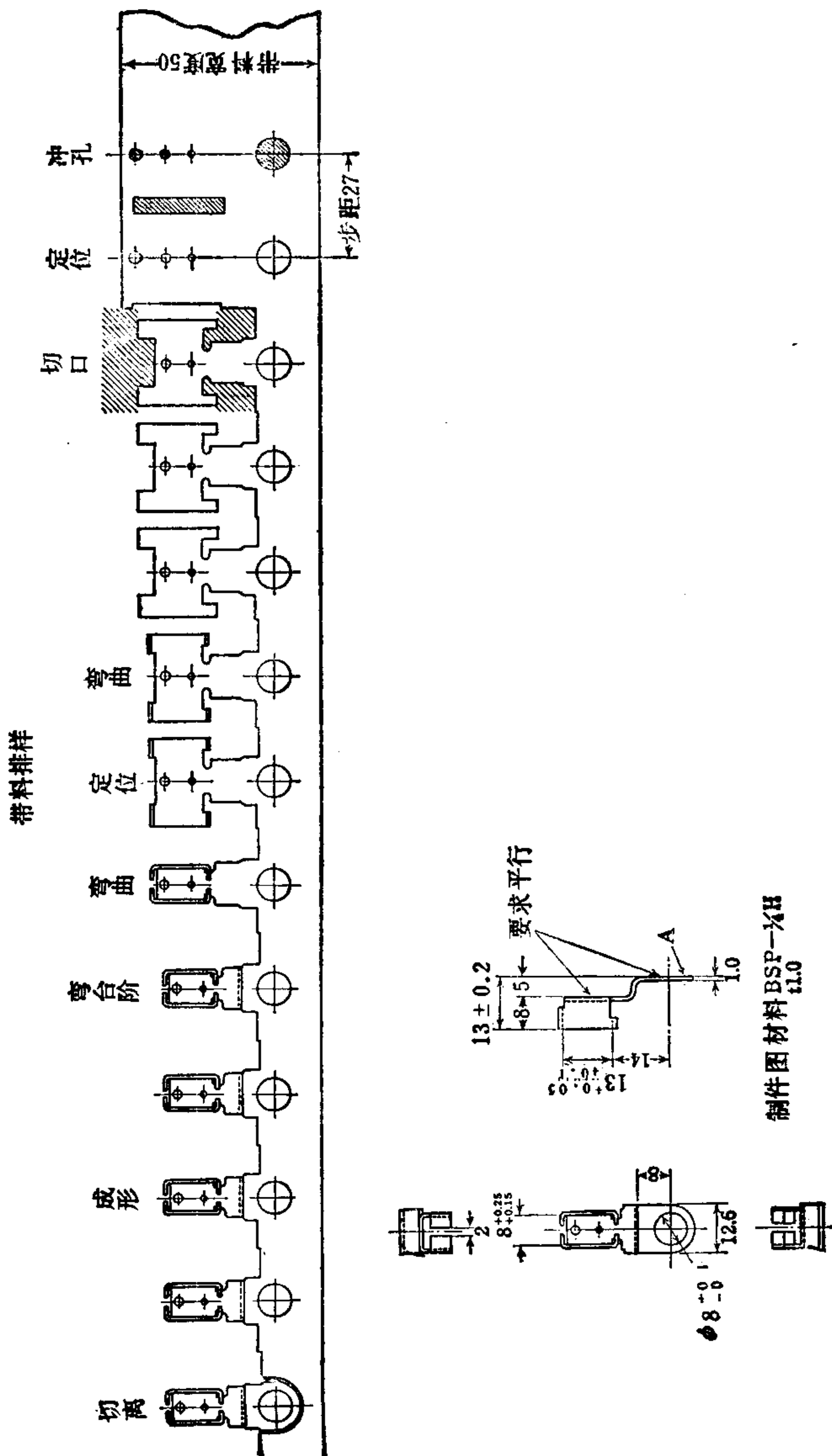


图4.104 实例7 制件图, 排样图

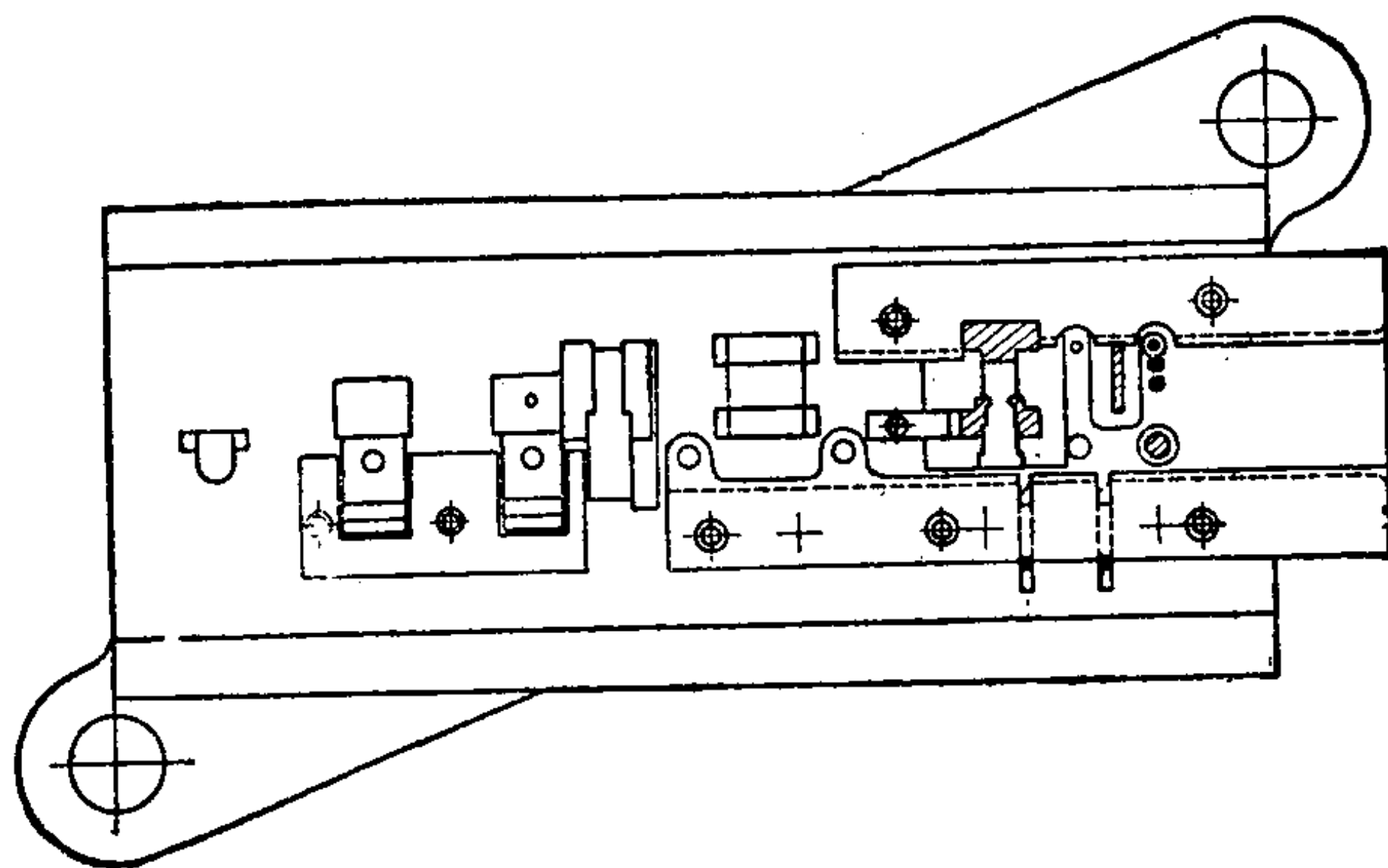


图4.105 实例7 模具平面图

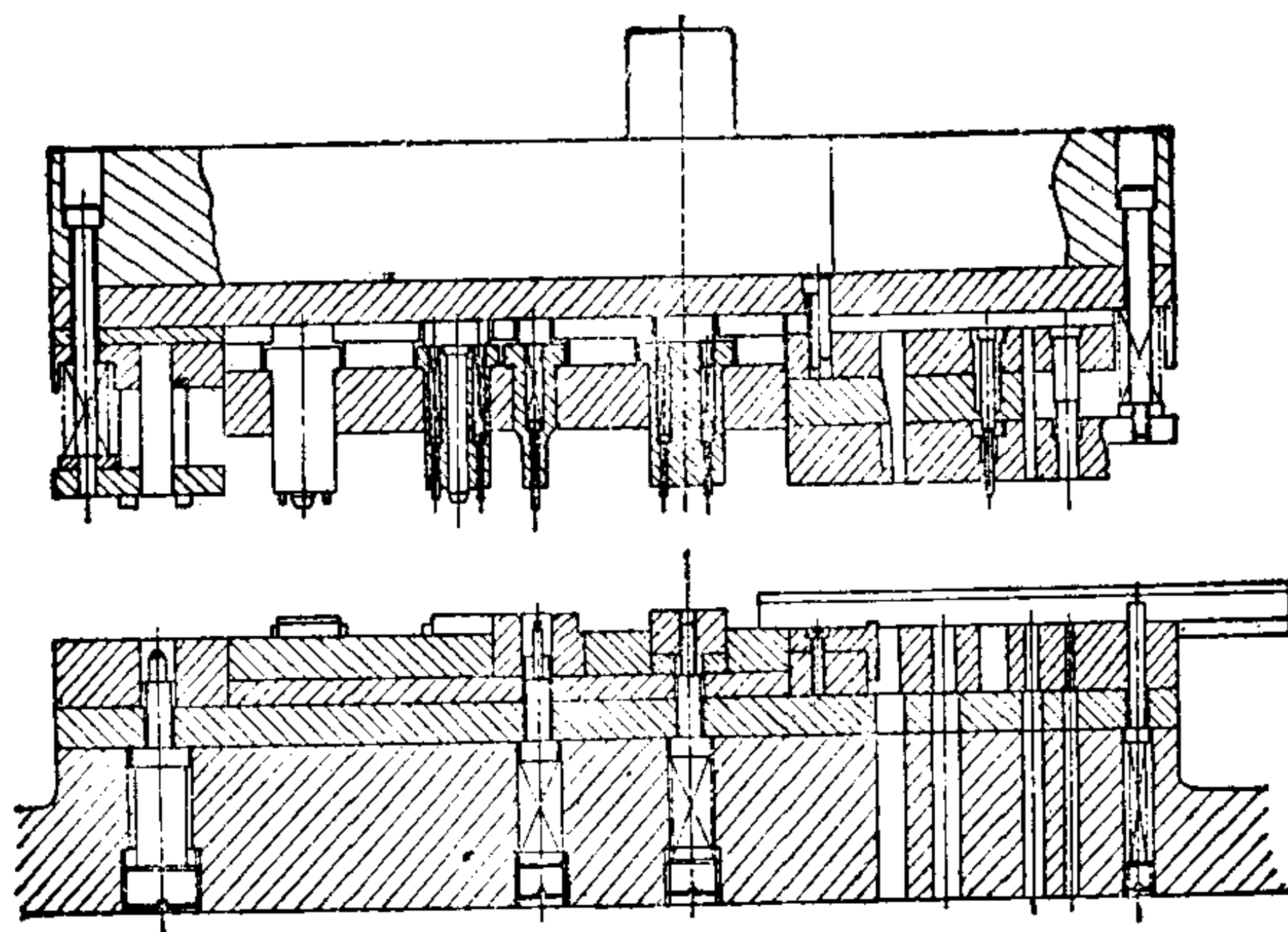


图4.106 实例7 模具纵剖面图

h. 实例8 攻丝装置 (图 4.107~图 4.109) 作为带有攻丝工序的连续模示例, 图 4.107 所示为其排样图, 图 4.108 所示为攻丝装置的装配图。

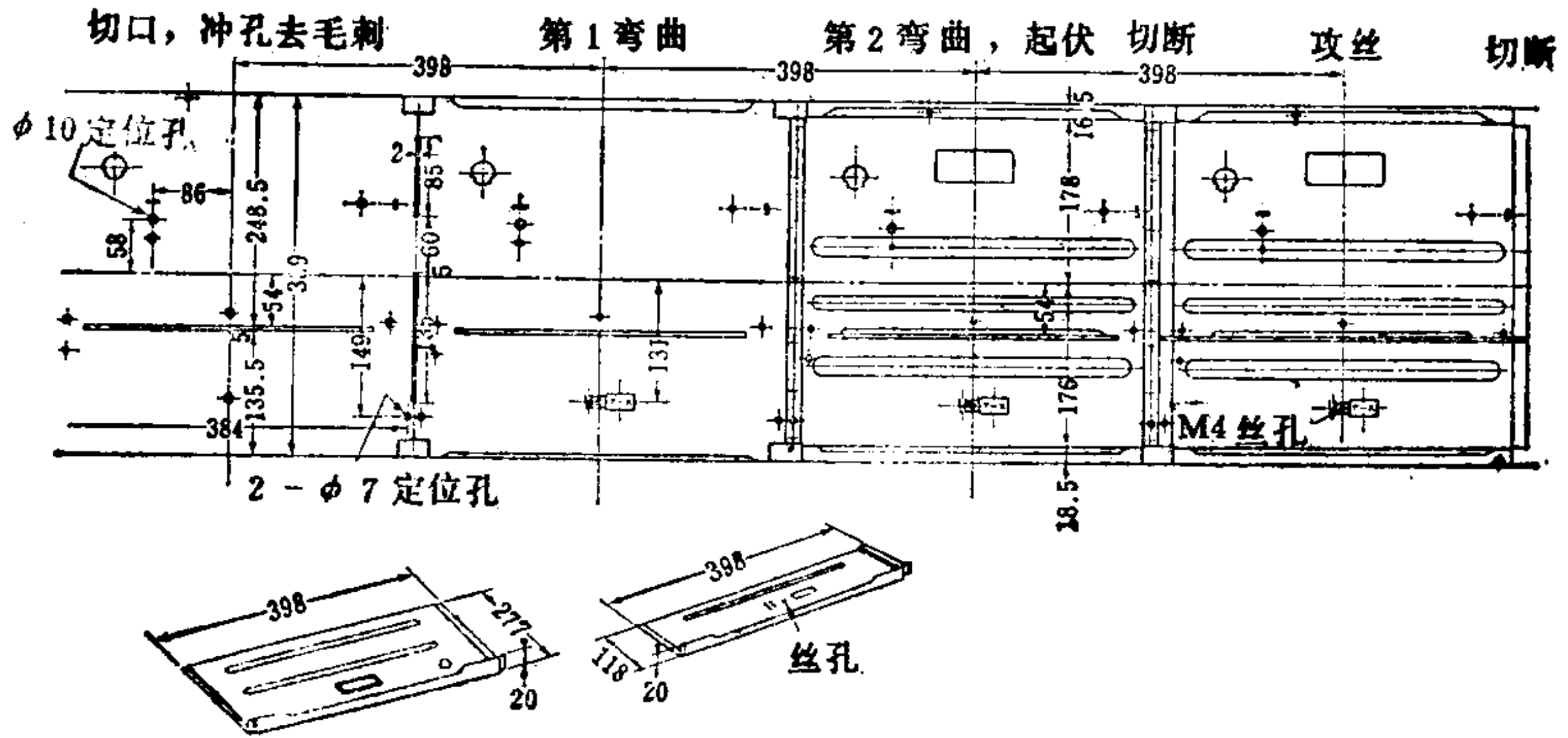


图4.107 实例 8 排样图

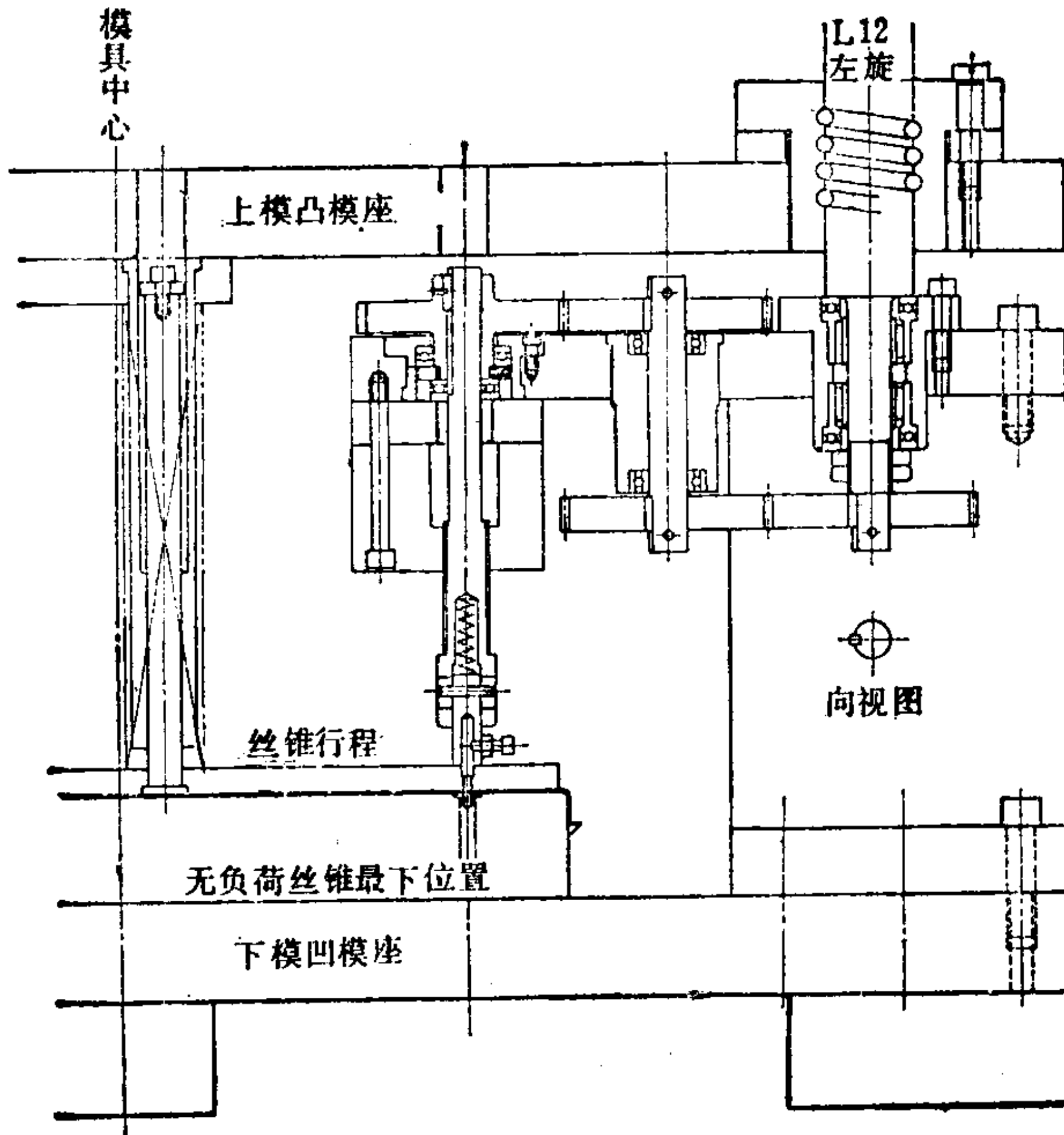
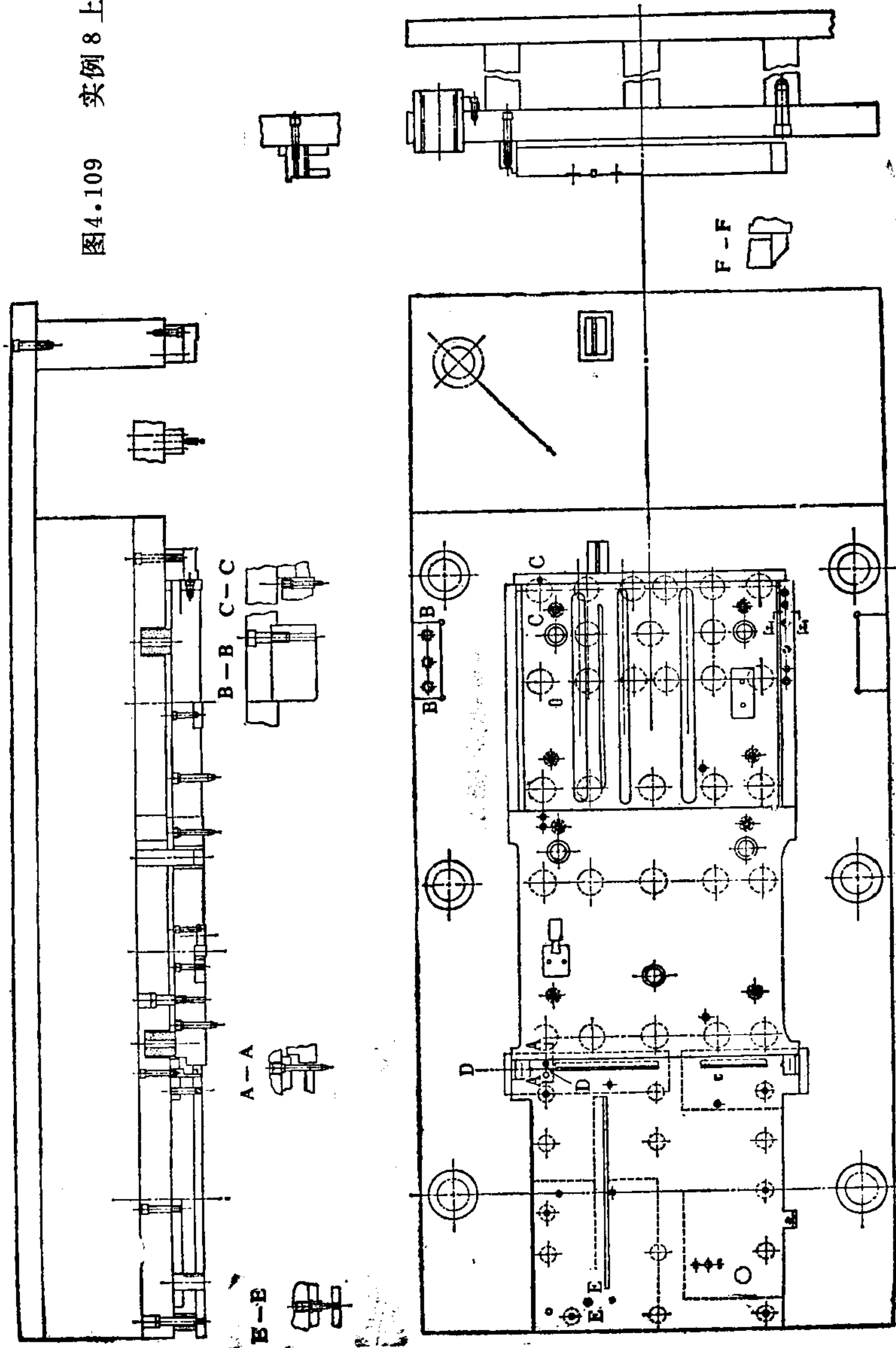


图4.108 实例 8 攻丝装置装配图

图4.109 实例 8 上模



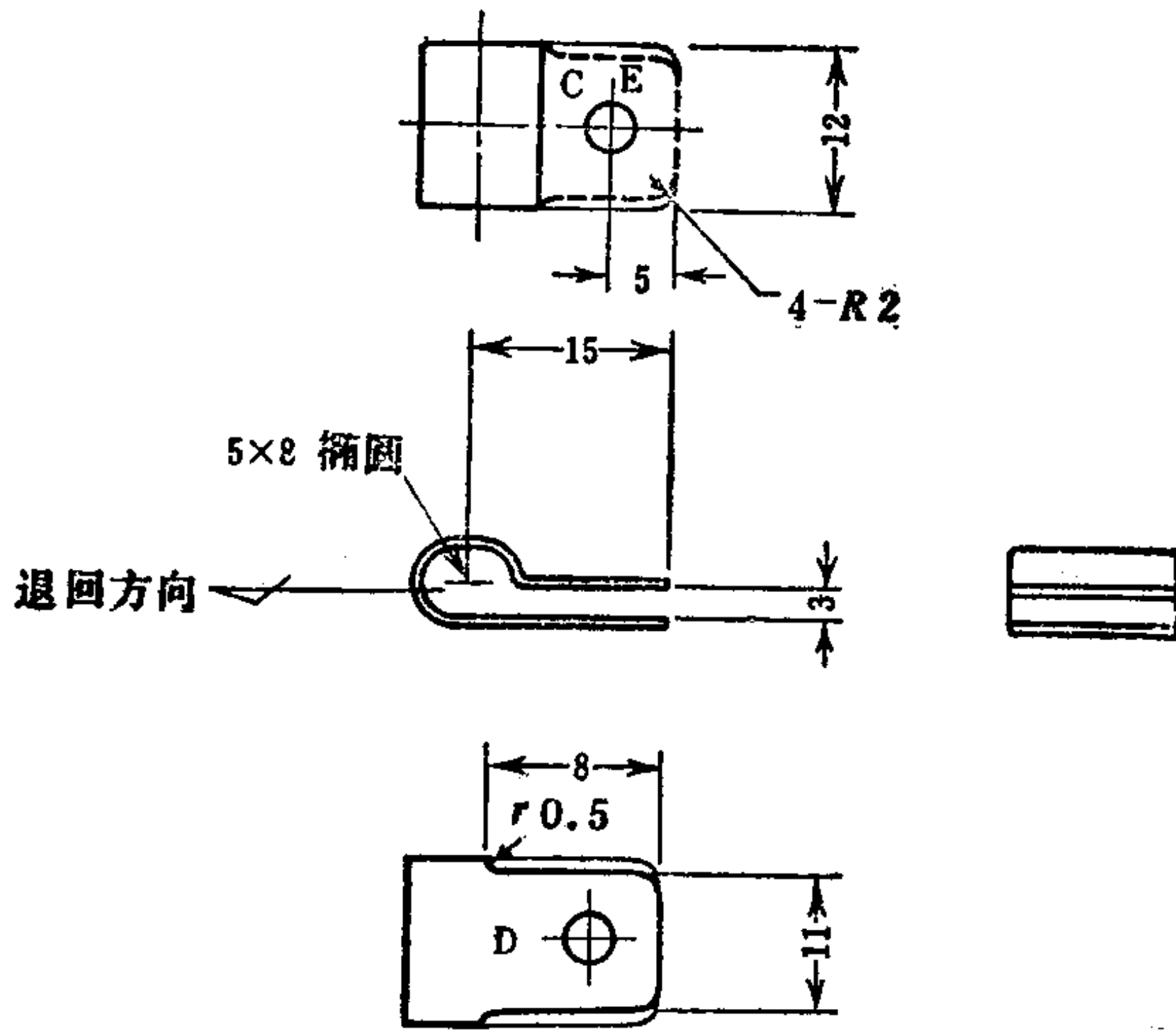


图4.110 实例9制件图

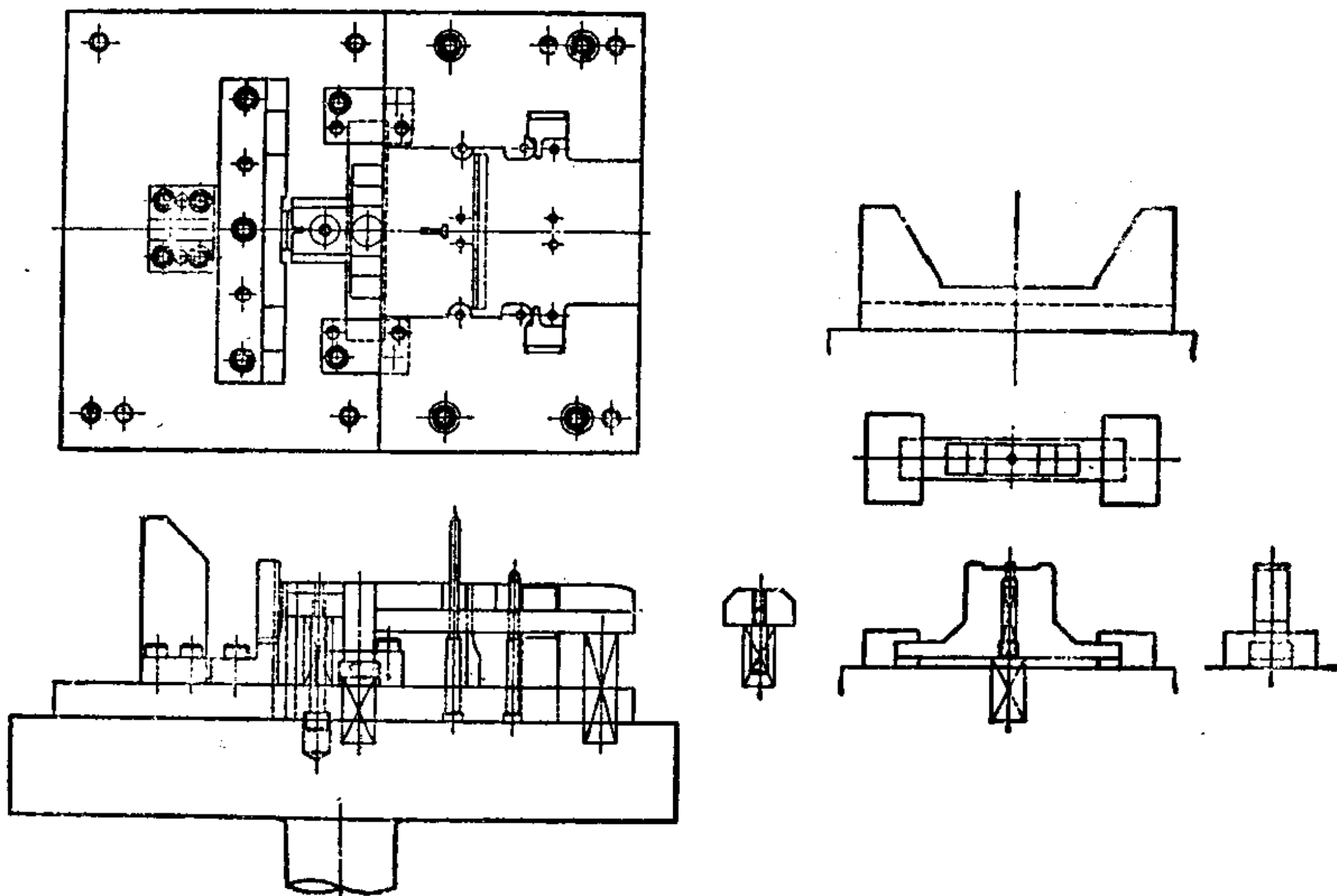


图4.112 实例9上模

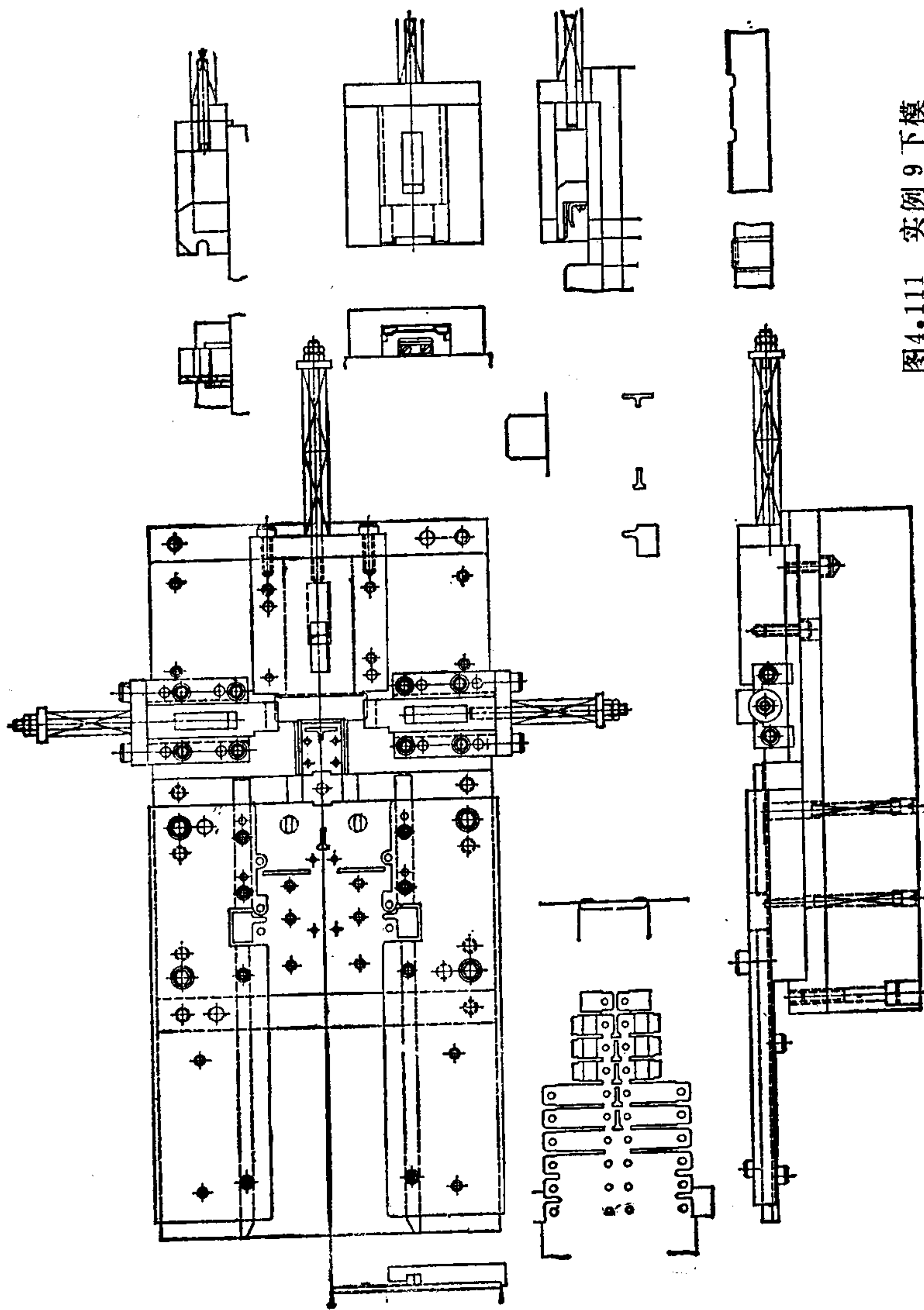


图4.111 实例9下模

i. 实例 9 使用推板的模具 (图 4.110~图 4.112)。

j. 实例 10 多件弯曲模 (图 4.113~图 4.115) 对毛刺方向、弯曲方向有要求的制件要预先估计回弹。采取利用上模的推板从模具的前方向后方压出的方式。

k. 实例 11 冲裁、拉延、弯曲连续模 (图 4.116~图 4.117) 送进采用回推板。回推板高出刃口 0.3mm, 在送进中不落下。

l. 实例 12 5 列连续模 (图 4.118~图 4.120)。

m. 实例 13 弯曲连续模 (图 4.121~图 4.123)。

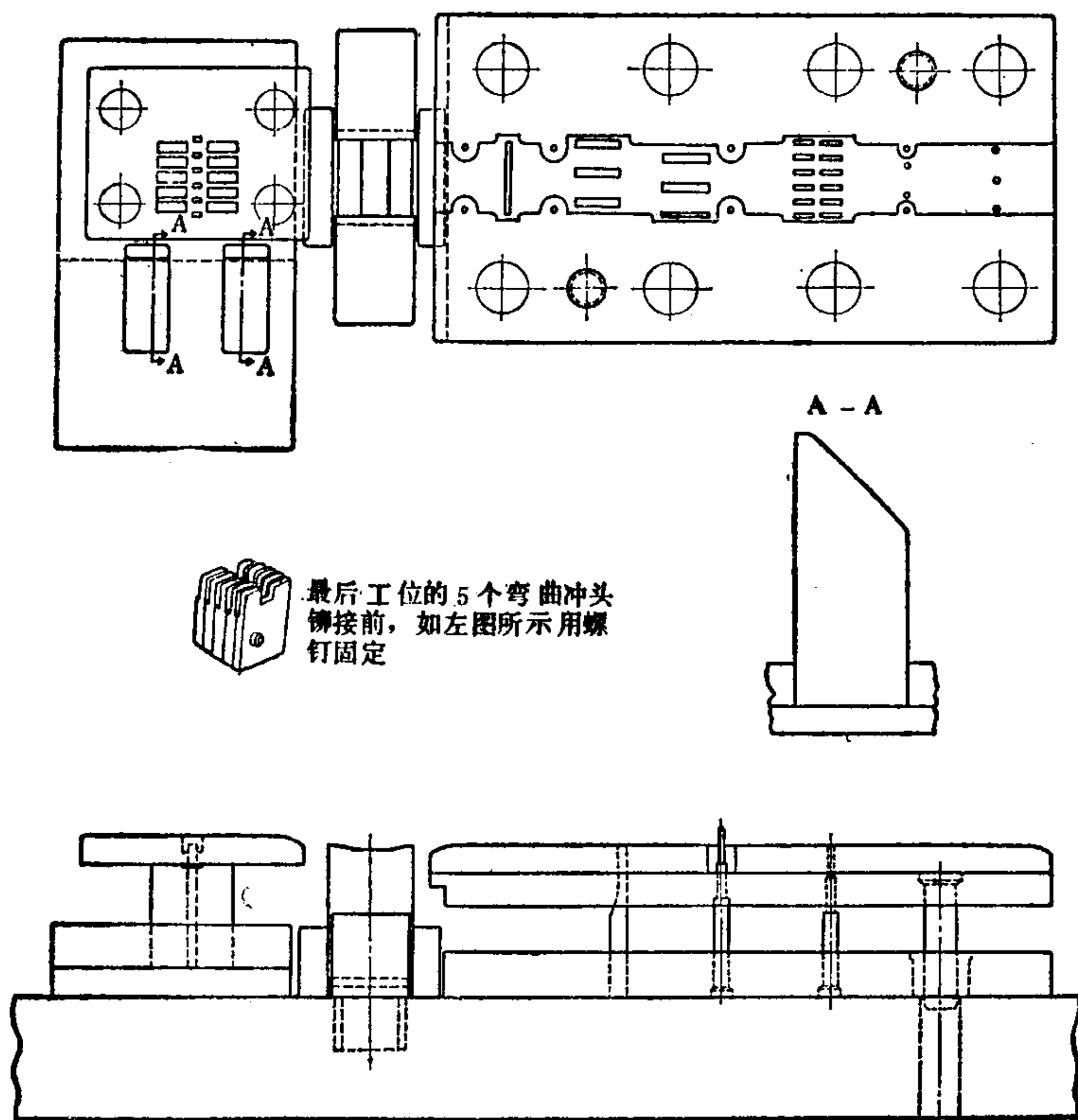


图 4.115 实例 10 上模

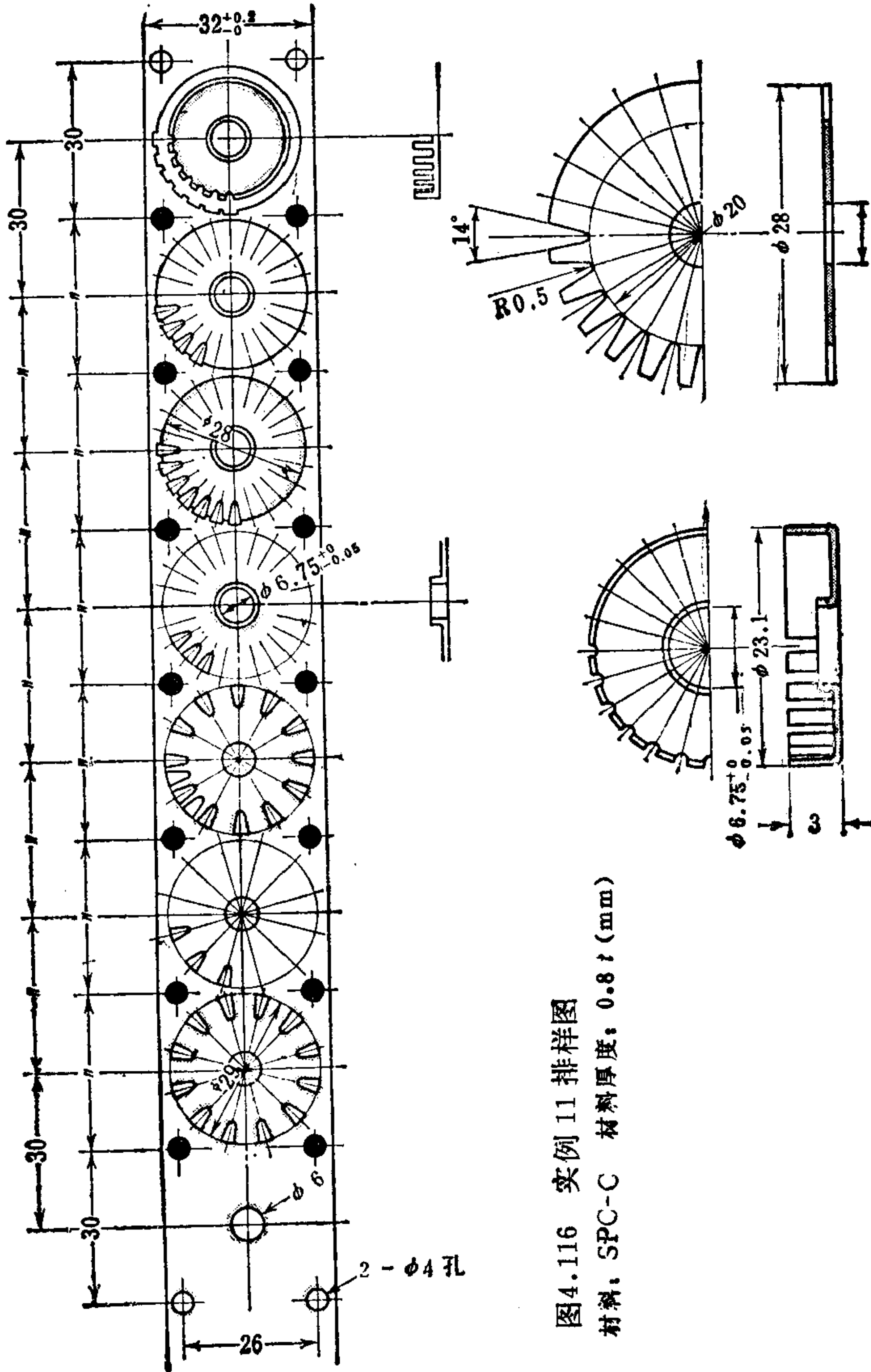


图4.116 实例 11 排样图
材料: SPC-C 材料厚度: $0.8t$ (mm)

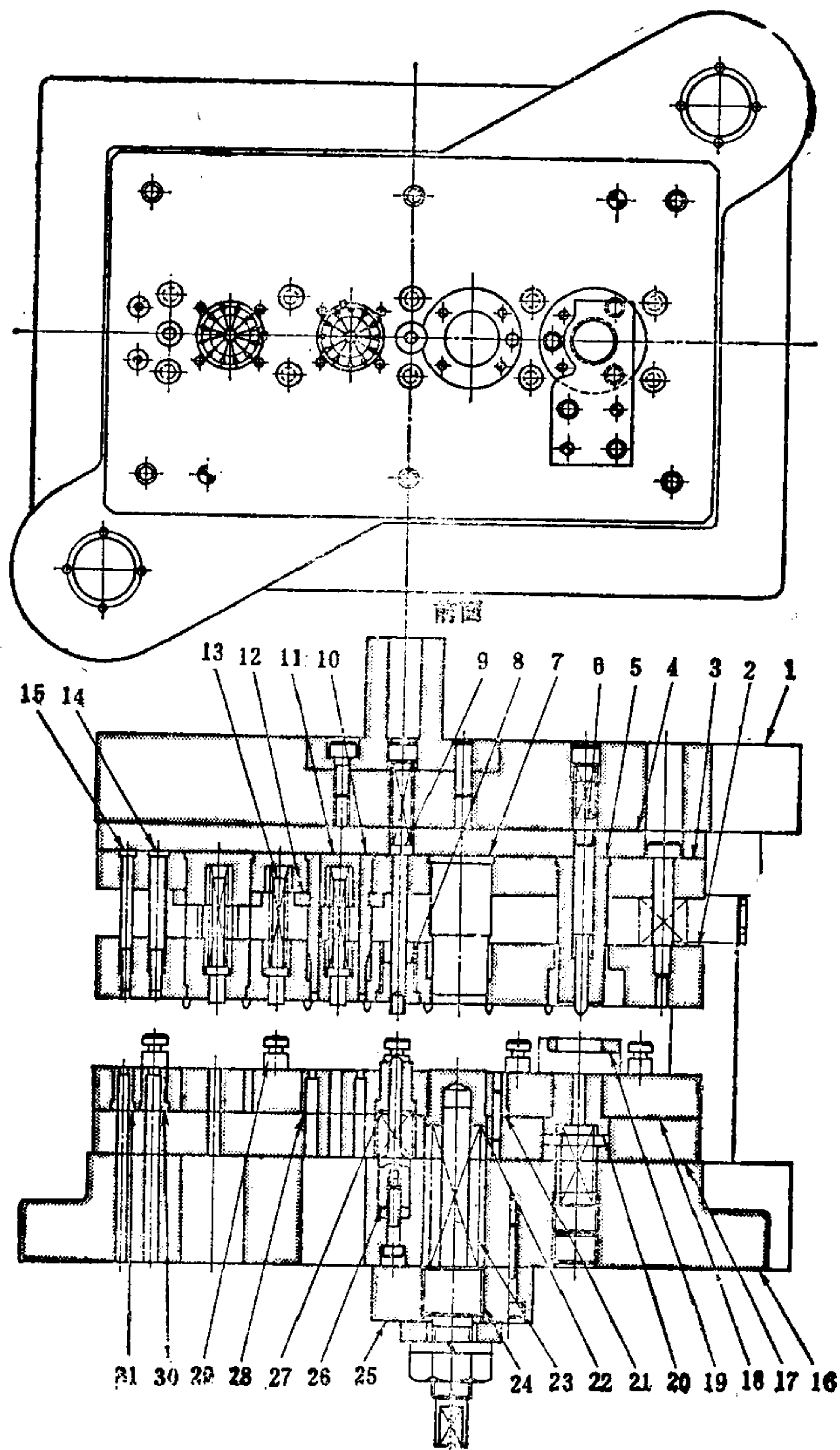
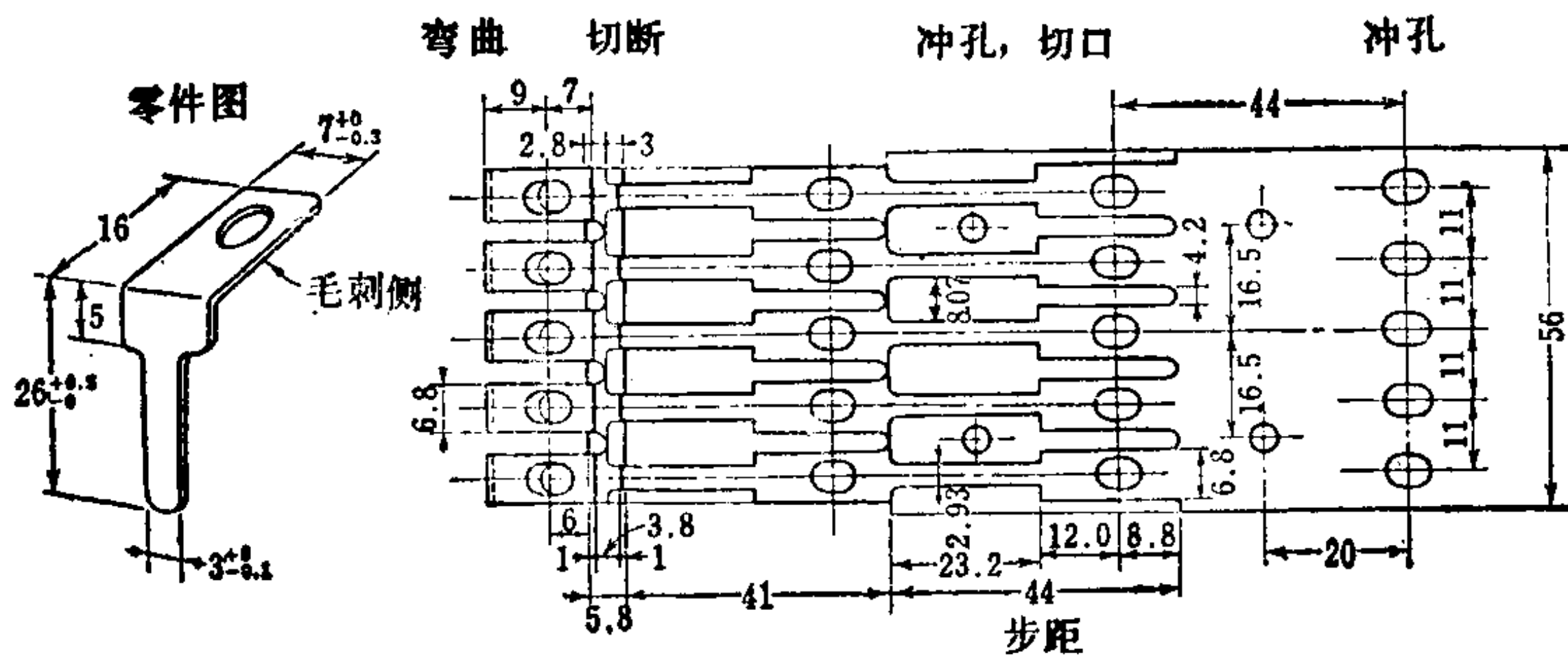


图4.117 实例11模具图

- 1—凸模座 2—卸料板 3—凸模固定板 4、17—垫板 5—弯曲凸模 6—导正凸模
 7—落料凸模 8—翻孔模套 9、13、20、27—顶出器 10、14、15—冲孔凸模
 11—套筒 12—挡块 16—模座 18—模板 19—卸料器 21、30、31—模套
 22—回推板 23—碟形弹簧 24—调整螺栓 25—调整螺栓安装板 26—翻孔凸模
 28—套筒 29—导向提升器



SPGAP90 1.2 t

图4.118 实例 12 排样图

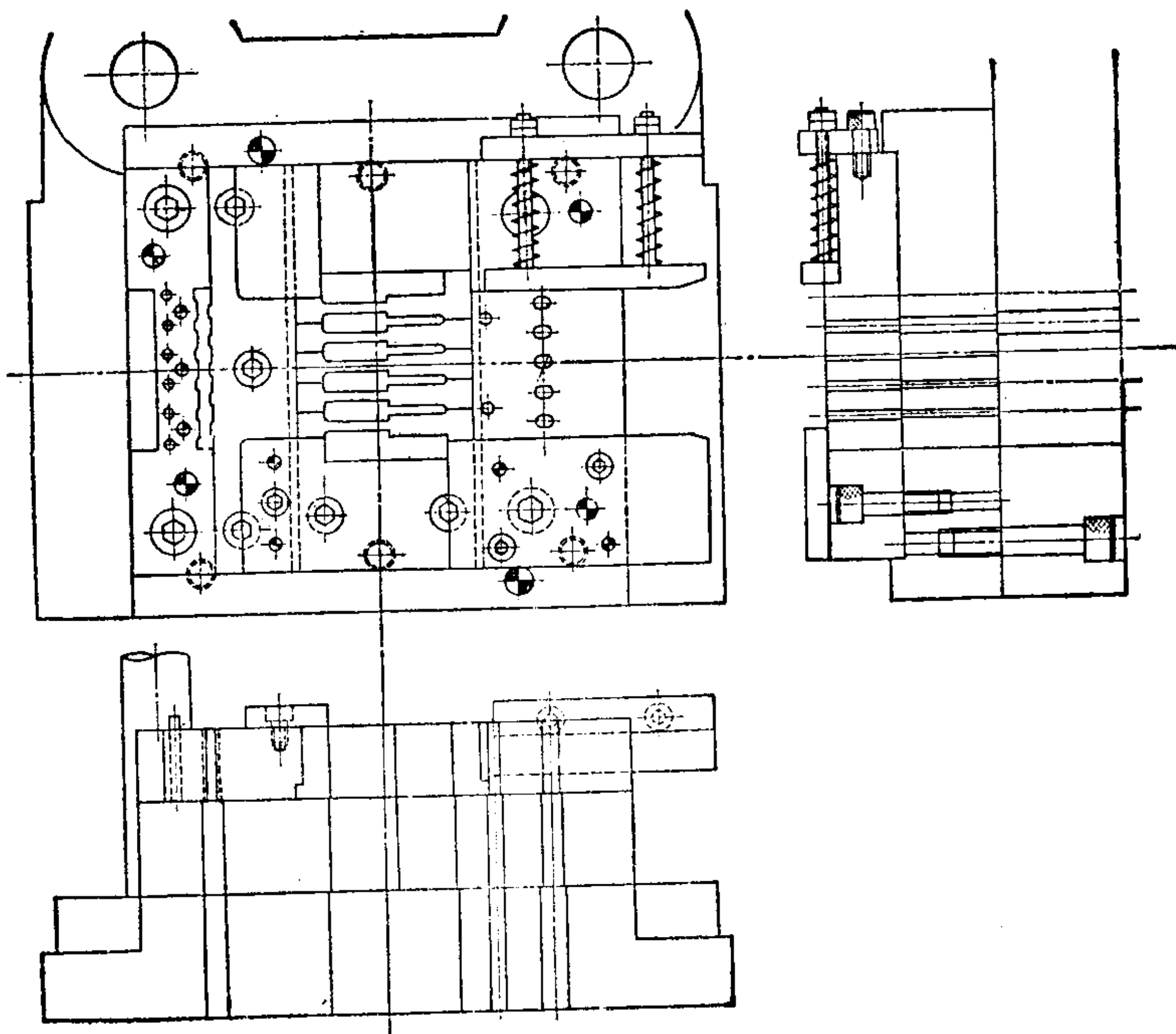


图4.119 实例 12 下模

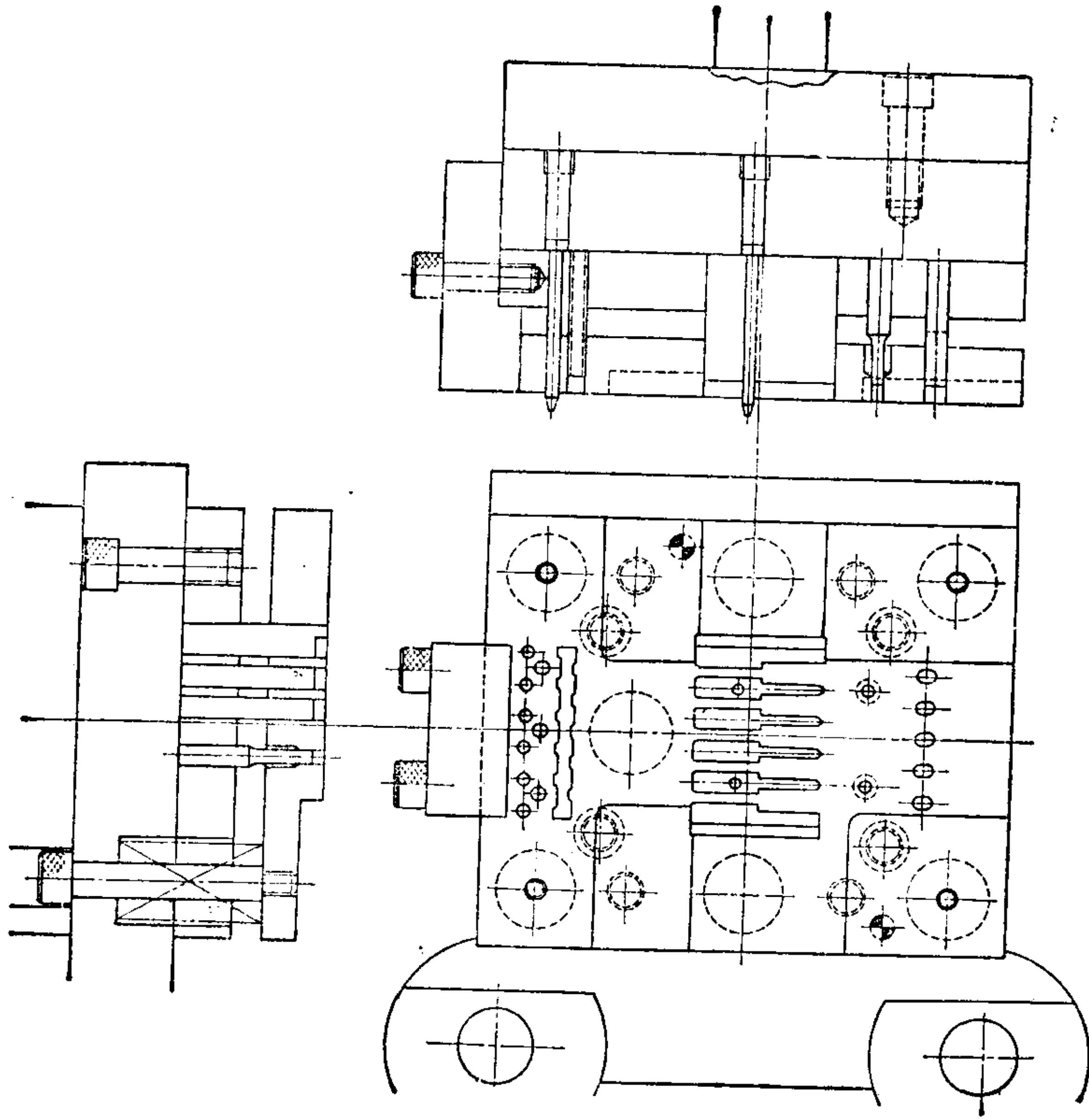


图4.120 实例 12 上模

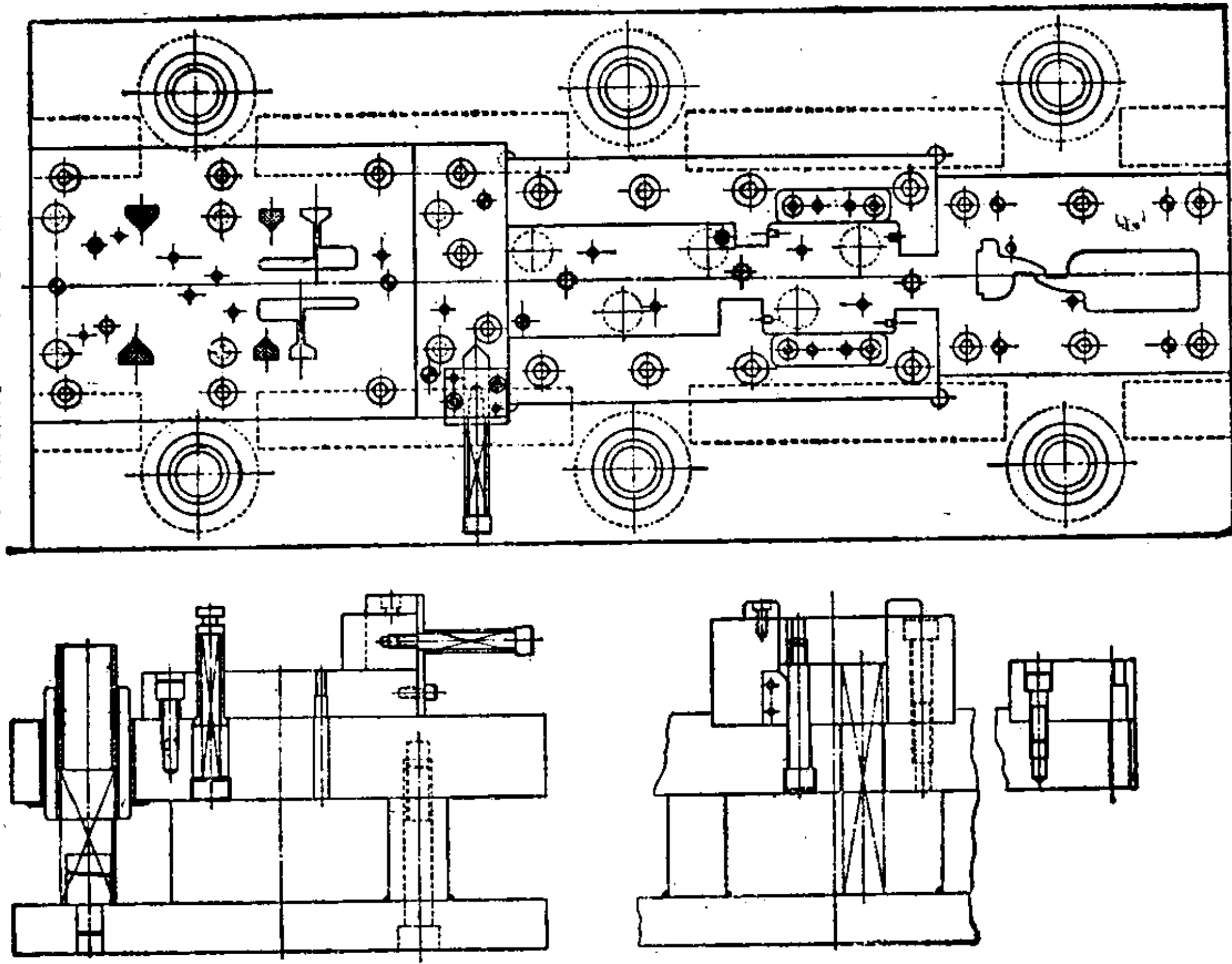


图4.122 实例 13 下模

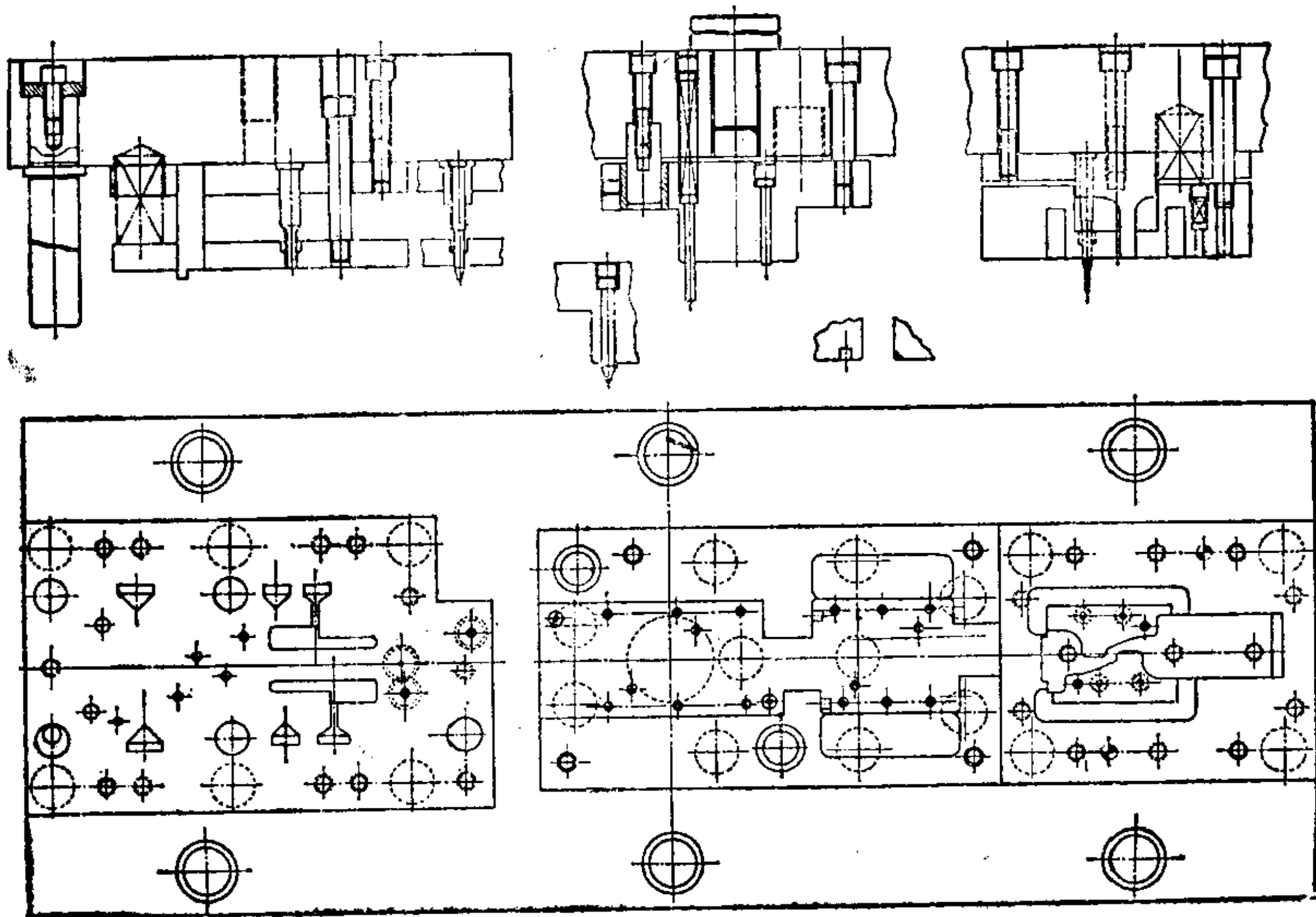


图4.123 实例 13 上模

4.6 中型零件的成形

中型零件的成形是指属于大型零件（如汽车覆盖件）和小型零件（如电子零件）之间的成形，设计要考虑的内容非常广泛，包括制件要求的质量（形状、尺寸、精度和表面加工状态）、强度、产量、成本、生产准备周期及生产设备等。

因此，为了既满足产品设计者提出的性能、外观要求，又能满足冲压成形件的生产要求，工艺设计程序应包括图 4.124 所示的几个阶段，对于冲压作业的基本要素，如压力机、模具、使用材料和制件要求的质量、产量及成本等有关资料都要充分了解，并确定其每项内容。

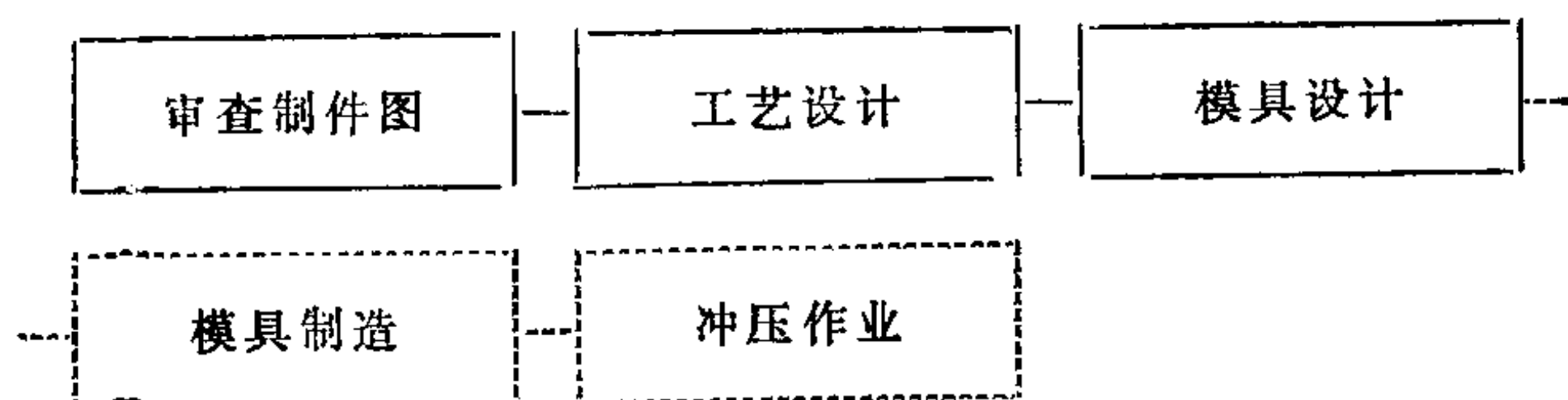


图4.124 工艺设计程序

4.6.1 制件图的研究

制件设计者在制件图上用大小、形状、材质等方式表示某种制件要求的质量和性能，所以在本阶段必须从进行冲压加工的观点出发，对照冲压加工的原则研究图上那些重要的地方。

制件要求的质量分为用大小、形状表示制件精度和由表面缺陷或表面状态表示外观质量的两个方面。

(i) 制件精度 （要掌握支配制件精度的尺寸，在以后工艺设计中它是作为确定工艺顺序、内容和各种设备、定位方法等的指导因素，所谓重要尺寸系指下列各类尺寸。

(a) 制件上必须严格保持公差的尺寸。

(b) 作为制件尺寸基准线的尺寸。

(c) 决定制件几何形状(平面度、垂直度……等)的尺寸。

(d) 影响制件强度的尺寸。

(ii) 外观 在制件精度中也包含这方面的要求,但外观是根据观察整个制件的表面状态、有无缺陷等来决定的。在以后工艺设计中,外观是作为选定使用材料的级别,选择成形的方向或者需要进行均匀变形工序、必要时进行局部变形工序及其选定模具结构,模具形式及模具材料等的指导因素。

而且对制件表面上出现粘瘤,松弛,油壶效应,皱折、破裂或者拉延伤痕,表面粗糙及颤动伤痕等应采取相应的措施。

4.6.2 工艺设计〔120〕

工艺设计是在确定冲压件的形状,精度和材料之后,着手设计模具之前的一个阶段,在此阶段要拟定制件的冲压加工工艺和有关工艺的顺序,并研究如何具体实现符合生产要求的质量控制,经济性、产量及生产开始时间等问题。

工艺设计中应考虑的因素列举如下:

(a) 使用材料 材料的种类和质量、板厚及表面状态。

(b) 制件的质量 制件精度、外观。

(c) 模具和辅助工具 模具结构、模具形式、模具材料、模具精度、定位装置、模具车间的设备、能力及模具制造的预算。

(d) 冲压作业 生产速度、压力机的构造、能力、精度、材料和制件的送进取出,润滑油的种类、涂覆的方法及校平机等附属装置。

(e) 有关作业 机械加工、清洗、热处理及表面处理等等。

(f) 产量、制件成本、生产开始时间等。

下面举例说明冲压件的工艺设计。

〔例1〕 宽凸缘有底容器的工艺设计分为下面5个阶段〔121〕。第一阶段决定凸缘尺寸,第二阶段根据已知板的材质和厚度决定

合适的拉延系数（由圆筒拉延系数求得），求各道拉延工序中容器的直径。第三阶段给定容器底部圆角半径、凸缘肩部半径，决定各阶段容器的深度。为了不引起破裂、发生皱折或引起板厚的急剧变化，容器底部和凸缘肩部的圆角半径在第一道拉延工序中要尽可能大些，以后各道工序应逐道减小这些半径，最终一道工序和制件图上的一致。第四阶段，使用以上的数值决定各道拉延工序中容器的形状、尺寸。第五阶段记下后面模具设计中必需的事项。

特别是拉延件的变形程度很大时，要用上面的顺序决定各道工序中容器的形状和尺寸，依次进行多次拉延，但在这方面可有两种方法。第一种方法是减小容器的直径而增加其高度，这种方法用于把相对厚度薄的材料拉延成较深的容器的情况（图 4.125a）。第二种方法使用曲率半径大的凹模和凸模，拉延成比预定的深度稍深一些，再拉延加工时减少容器直径，由于同时引起拉延和胀形，比起第一种方法来，其优点是可以减少拉延的次数，这种方法使用于相对板厚较厚的材料（图

4.125b)。

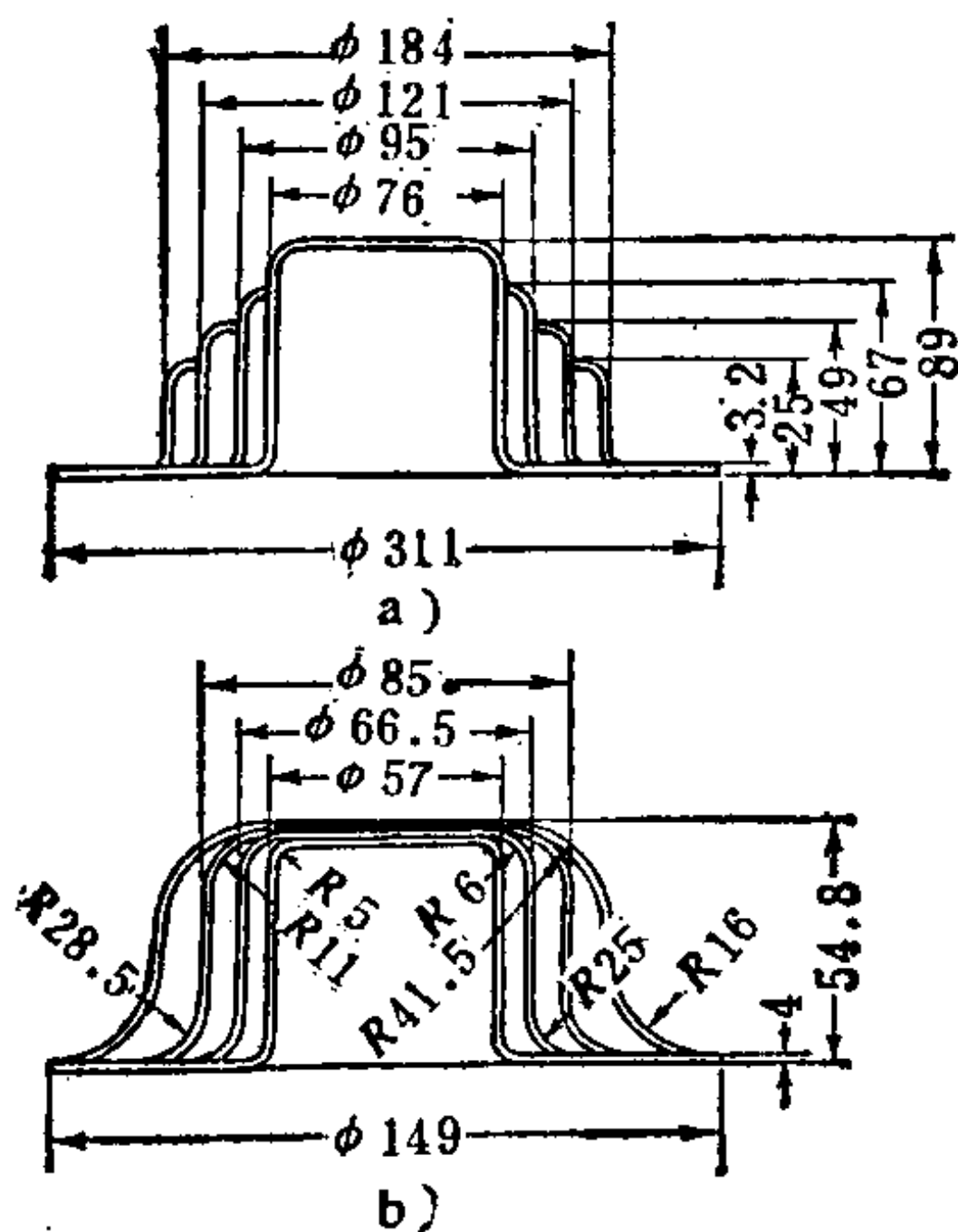


图4.125 带凸缘容器的
多次拉延法

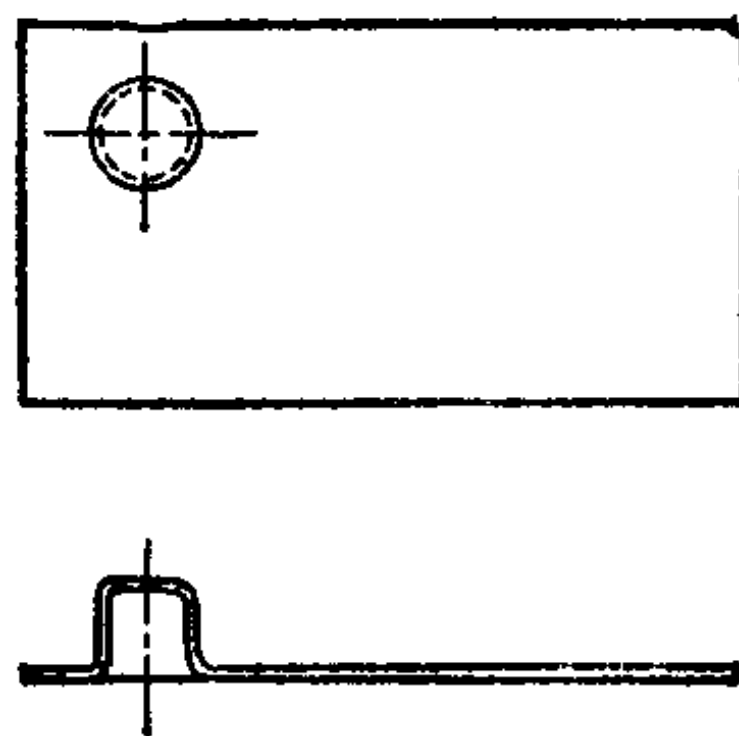


图4.126 拉延部分在板
角上的例子

图 4.126 是在板的角上拉延的例子，这时，板不是从四周被

拉入，材料只能从一侧或者二侧被拉入。这样的拉延一般是非常困难的，例如用 3mm 以上的厚板，拉延深度若在直径的 $\frac{1}{3}$ 以下，可成形的拉延系数为 0.4。再拉延可用第二种方法进行。

〔例2〕 图 4.127 为用厚度为 0.8mm 的冷轧钢板成形圆筒容器的例子，各道工序的拉延系数是：第一道 $m_1 = 0.56$ ，第二道 $m_2 = 0.80$ ，第三道 $m_3 = 0.81$ ，第四道 $m_4 = 0.82$ 。在第一道中容器壁部没有局部的变薄伸长，凹模和压边圈之间的间隙应与板厚相等。而在接近全部拉入的状态之前不能留下较大的凸缘。这是由于在第二道拉延时第一道剩余的凸缘部分受到拉延就会产生大的折皱。在第二道至第四道工序中，为了由输送装置稳定地送进，凸缘外径不变。第四道的阶梯拉延，一次达不到尺寸，在第六道再进行一次整形。为了使制件高度稳定，这个第六道整形工序（边的校直）特别安排在第五道修边工序之后进行。

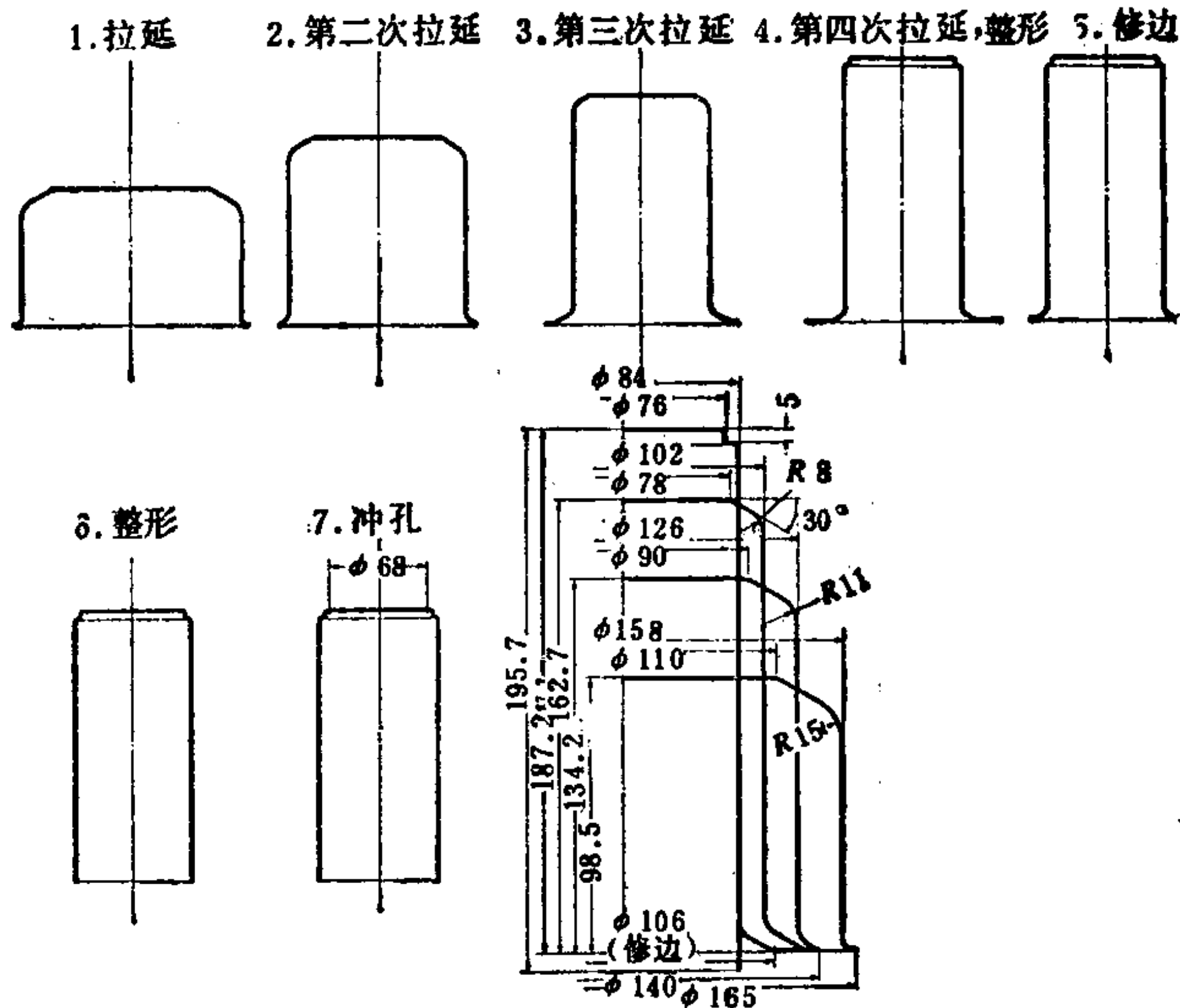


图4.127 圆筒容器的工序设计实例（冷轧钢板0.8 t）

润滑兼模具冷却由上模上部强制供给润滑油。

〔例3〕 图 4.128 为将厚度为 1.6mm 的热轧钢板成形为带中

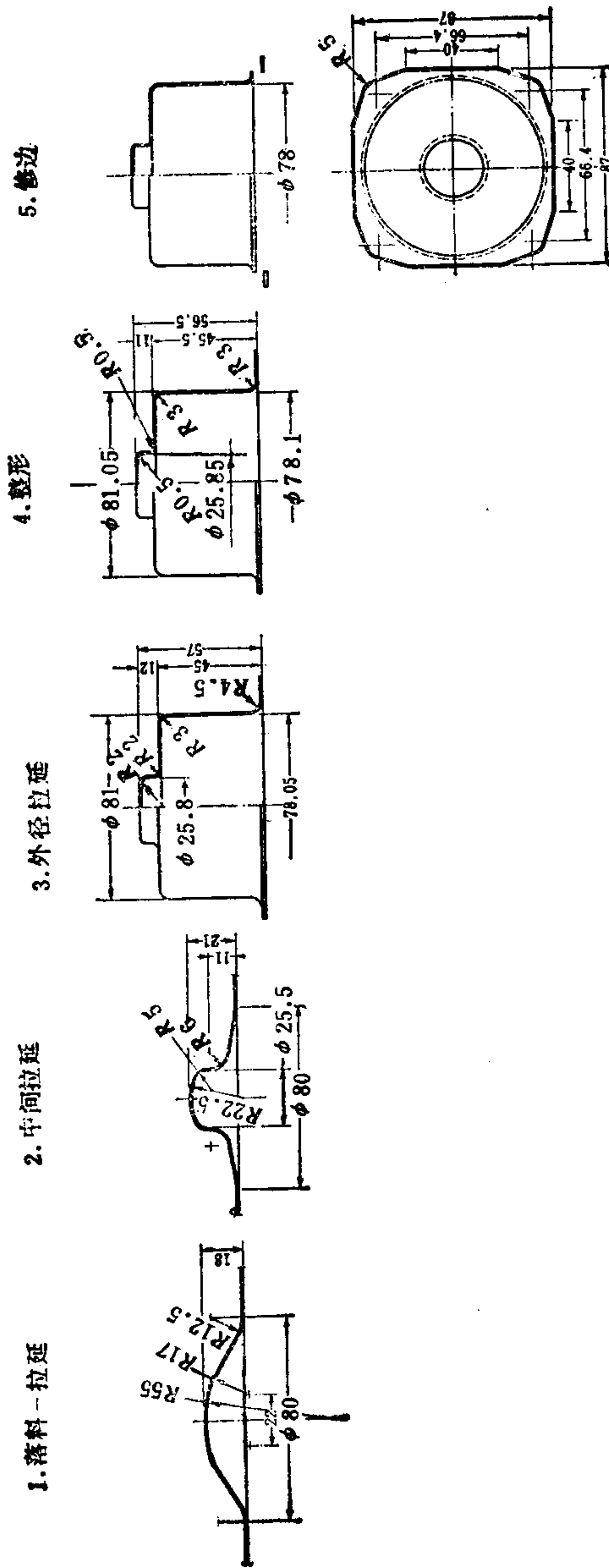


图4.128 中心带凸部的圆筒容器工序设计实例 (热轧钢板1.6 t)

心凸部的圆筒容器的例子。这个容器拉延时必须尽力避免中心内径 $\phi 25.8\text{mm}$ 的圆筒部分侧壁产生厚度不均匀减薄或者缩颈。因此，成形工序取为四道：第一道工序用大的凸模半径 R 浅拉延、第二道工序采用缩小凸缘的成形方法使板厚变化均匀。这个第二道工序的凸部要估计到第三道工序的中心凸部的成形形状，使两者的表面积大体相等。第三道工序为外径拉延和中心凸部成形使制件接近成品形状，外径拉延系数是 0.54。这时若第二道工序的凸部的成形量过大，①面处会出现环状的凹凸不平，若这个成形量过小，可以在第四道整形工序中修正。

〔例4〕图 4.129 是用厚度为 1.2mm 的冷轧钢板成形具有中心凹部的圆筒容器的例子。最初考虑外径 $\phi 87.05\text{mm}$ 和凹部 $\phi 30\text{mm}$ 同时成形，但因为中心部分的反拉延（凹部）比较深，所以在内侧的伸长类成形处会产生破裂。因此这部分就分在第二道工序中成形。

第一道工序是拉延系数为 0.54 的拉延加工，容器头部加工成为圆滑的凸部。这个凸部是作为第二道反拉延中心部分工序的预成形。这个预成形的量按照与后者的表面积相等计算而得。但是如果这个预成形量过少则产生破裂，过大则在②面留下环状凹凸皱纹。

第三道工序为冲中心孔和定位孔（ $\phi 10\text{mm}$ ）。这个 $\phi 10\text{mm}$ 的定位孔冲在凸缘的修边余量部分，供第四道工序以后定位之用。

〔例5〕图 4.130 是用厚度为 0.5mm 的不锈钢板成形异形容器的例子。这个容器是具有局部锥形的椭圆筒，其上部偏心位置有 $\phi 23\text{mm}$ （等于 ϕA ）的圆筒，所以是圆筒拉延和锥形拉延及球形拉延的复合，在成形过程中，为了使坯料从凸模和凹模上脱下来，由于预计到可能产生悬臂支承状态，所以工序设计颇为复杂。这里采取 5 道工序。

首先在第二道、第三道工序成形 $\phi 23\text{mm}$ 的圆筒部分。因为相对板厚较薄，所以用图 4.125a 所示的多次拉延法，在第二道工序拉延出带凸缘的容器。这时拉延系数为 0.44，当拉延高度

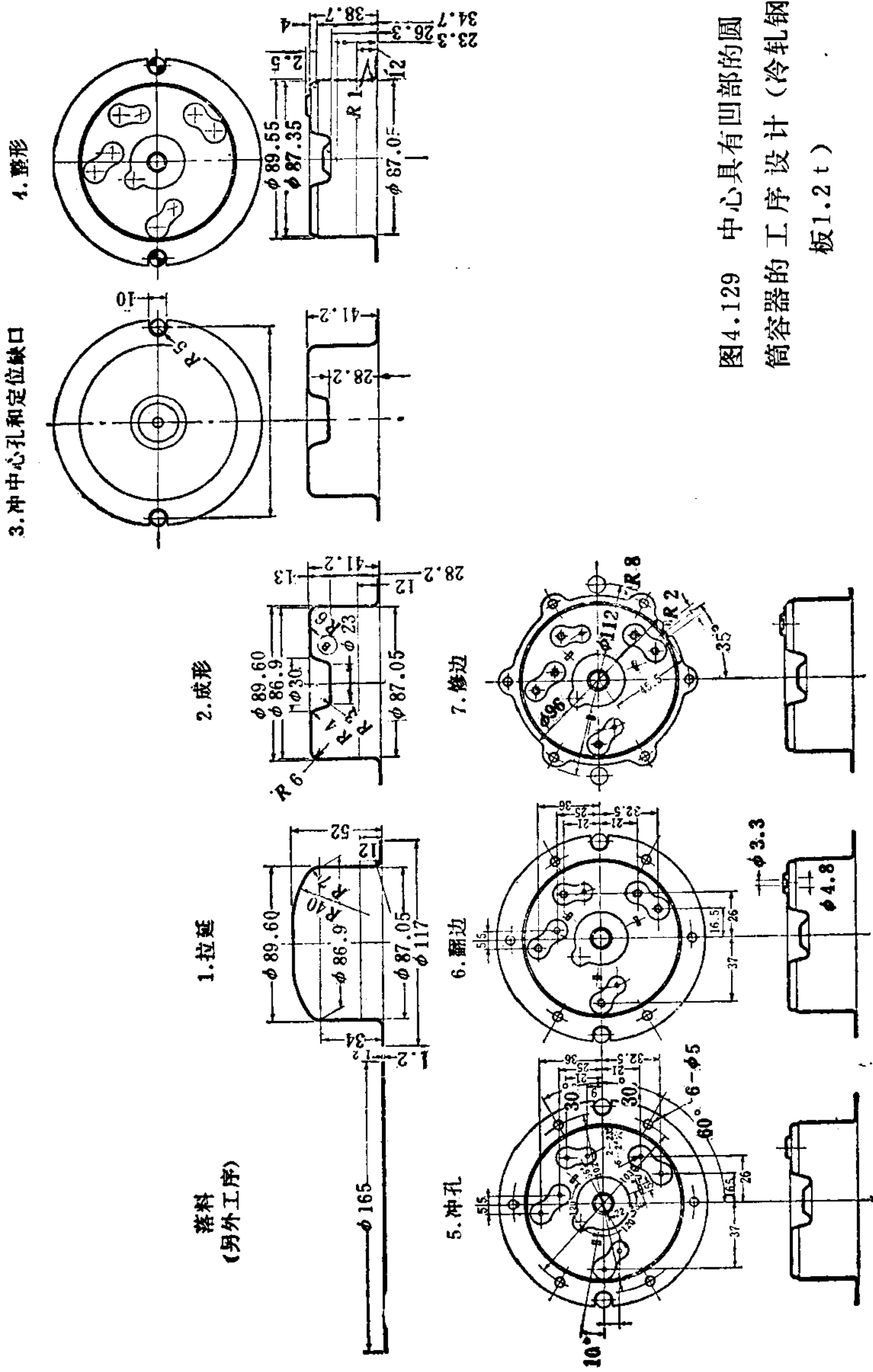


图4.129 中心具有凹部的圆筒容器的工序设计 (冷轧钢板1.2t)

近于拉延直径的 $\frac{1}{3}$ 时，不锈钢材料可以拉延出来。在第三道工序中，采用减小容器直径、增加高度的方法，完全只用拉延来成形，尽力防止容器的壁厚减少，其再拉延系数为0.74。

第四道、第五道工序拉延椭圆筒和锥形。首先正确计算椭圆筒部分和锥度部分的表面积，明确第四道、第五道工序的容器形状、尺寸关系。然后在第四道工序中拉延出带浅锥形的椭圆形容器，在第五道工序中完成近于规定形状尺寸容器的拉延。

第六道工序是在 $\phi 23\text{mm}$ 圆筒上面，成形出 $R16\text{mm}$ 的球形，完成带锥形椭圆筒容器的成形。这个 $R16\text{mm}$ 的球形成形，要尽力防止采用伸长类变形而采用以压缩类变形为主的成形。

另外，这个工艺设计是以多工位加工作为对象的，因此，各道工序都必须考虑残留有凸缘，同时凸缘部分要使之平坦。再则压力机速度采用 $40\sim 60\text{spm}$ 。采用强制给油方式（垂直接触）润滑，润滑油加有极压添加剂并兼作模具冷却液。

为了防止粘模，模具材料使用钢结硬质合金或超硬材料。

〔例6〕圆锥形容器或带深斜度容器的工序设计，由两种工艺组成：一是阶梯拉延等预拉延加工；另一是达到形状和尺寸要求的拉胀成形加工。即首先拉延出具有二个或二个以上直径的阶梯形圆筒容器，阶梯的数目根据容器的尺寸和锥形大小选择，然后把它拉胀成形，最后进行整形，加工出最终尺寸和形状。这时如果有产生皱折的危险，再拉延系数必须取得比圆筒容器拉延时大，而拉延深度浅时则可取得稍小一些。图4.131即为这类圆锥形容器拉延工序的一个例子。

〔例7〕图4.132为成形带小斜度的矩形容器（不锈钢板厚度为 1.2mm ）时说明防止油壶效应的工序设计例子。首先，第一道拉延的容器底部圆角半径在四个角部为 19mm ，在长边的中间是 25mm （图4.133）。然后第二道拉延容器底部圆角半径，在全部周边上为 19mm 。因而在第二道拉延中容器四周在深度方向受拉伸，同时由于长边中间部分的底角变化，材料产生拉胀变形

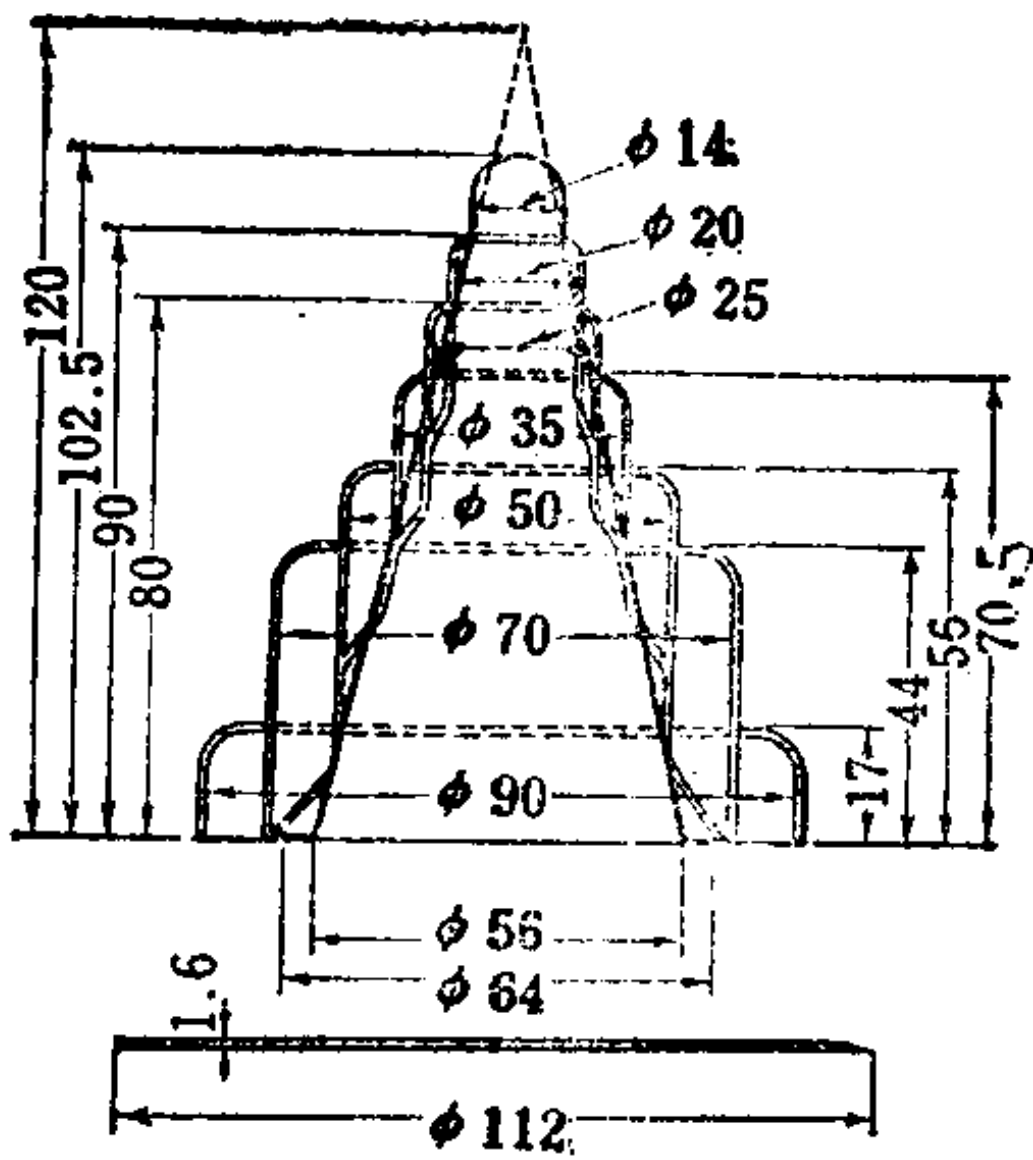


图4.131 圆锥形容器的拉延工序

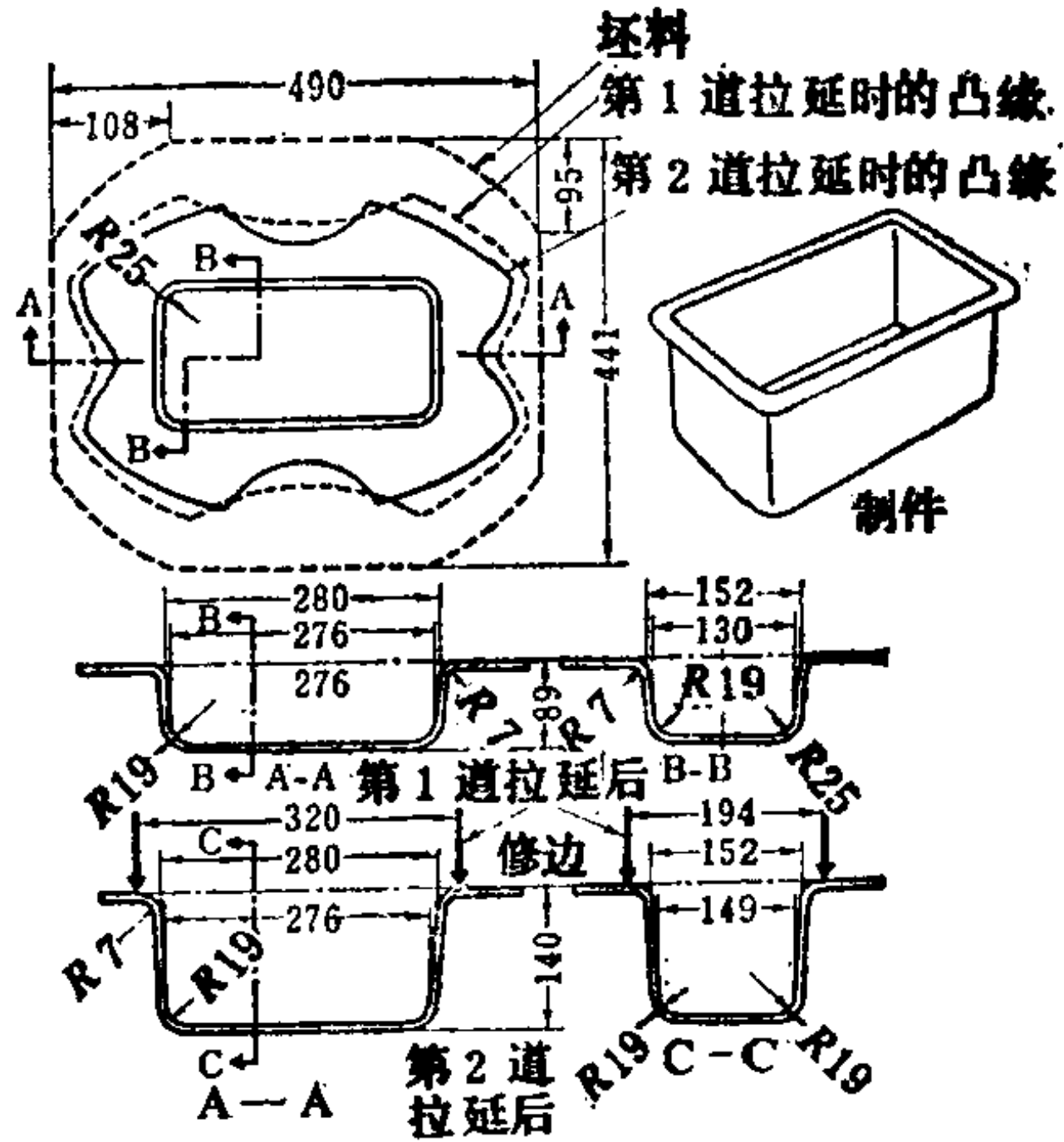


图4.132 带小斜度的矩形容器的工序设计〔122〕(不锈钢板1.2t)

(图 4.134), 由于这个深度方向的拉伸变形, 防止了多余材料的产生。

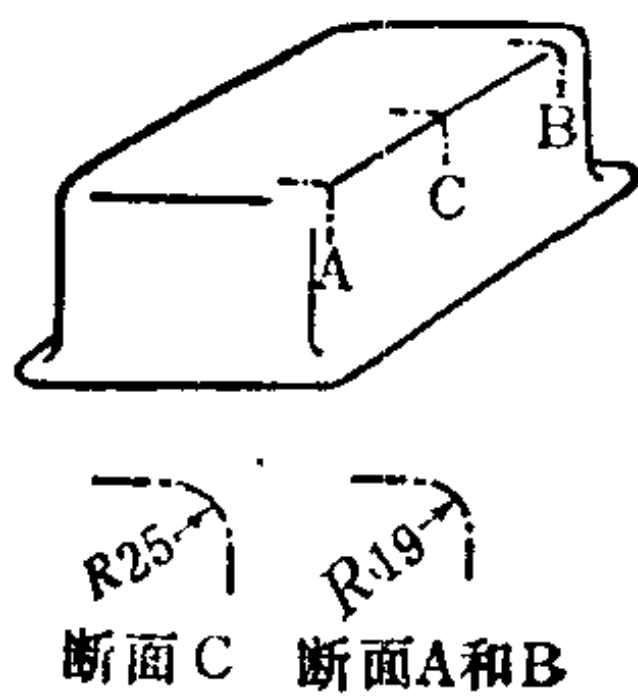


图4.133 容器(图4.132)底部圆角半径〔122〕

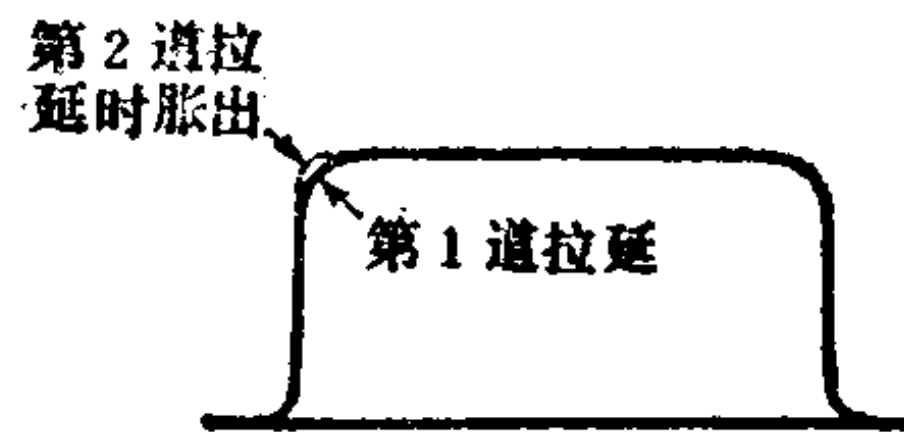


图4.134 长边中间部分的底部圆角半径的变化使材料胀出〔122〕

这就说明了防止油壶效应的基本方法有两种: 一种是在最终拉延之前使容器底部圆角半径比四个角的底部圆角半径大; 另一种是最终拉延时在深度方向上拉伸。

4.6.3 模具设计

模具设计是根据工艺设计文件进行的, 当设计模具时特别要考虑的事项列举如下:

- (a) 交货期和模具制造预算。
- (b) 模具车间的设备能力。
- (c) 使用的压力机形式、规格、精度和构造。
- (d) 公差严格的地方和较松的地方。
- (e) 模具结构、模具形式和模具材料的正确选择（考虑对于粘瘤、翘曲、破裂、拉延伤痕等所采取的措施）。
- (f) 装配时和有关部件的关系。
- (g) 选择适应于产量的模具结构、模具形式和模具材料。
- (h) 材料和制件的送进和取出方法、废料处理方法。
- (i) 考虑到便于模具维修。
- (j) 考虑模具的装卸方便。
- (k) 润滑油的供给方法。
- (l) 考虑压力机操作的安全性。

下面用实际加工例子说明

〔例1〕 圆筒容器（图 4.127）的多工位模具如图 4.135，图 4.136，图 4.137 所示。图 4.135 是正视图，图 4.136 是顶视图，图 4.137 是移送拉延容器用的机械手。在别的设备上落料下来的圆形板坯，用机械手送入，送到第一道工序进行拉延。拉延完毕上模上升，同时压边圈上升到送进线的位置，把容器的凸缘面举升到送进线，然后用机械手送到第二道工序。第二道工序以后、加工一结束、同样压边圈和提升装置上升到送进线位置，由机械手把容器送到下一道工序。

图 4.135 中，1 是加工过程中压住容器防止移动的滑柱；2 是防止工件由于润滑油等原因粘在上模上的推杆；3 为顶出器；4 为凸模；5 为凹模（这里镶有硬质合金的拉延环）；6 为压边圈；7 为提升装置（译者注）；8 为气垫顶杆；9 为压边圈；10 为排气孔。

〔例2〕 图 4.138 所示为圆筒状盒形件的多工位模冲压工序，模具示于图 4.139、图 4.140、图 4.141 上。图 4.139 是顶视图，图 4.140 是正视图，图 4.141 是容器移送用的机械手。先用卷料

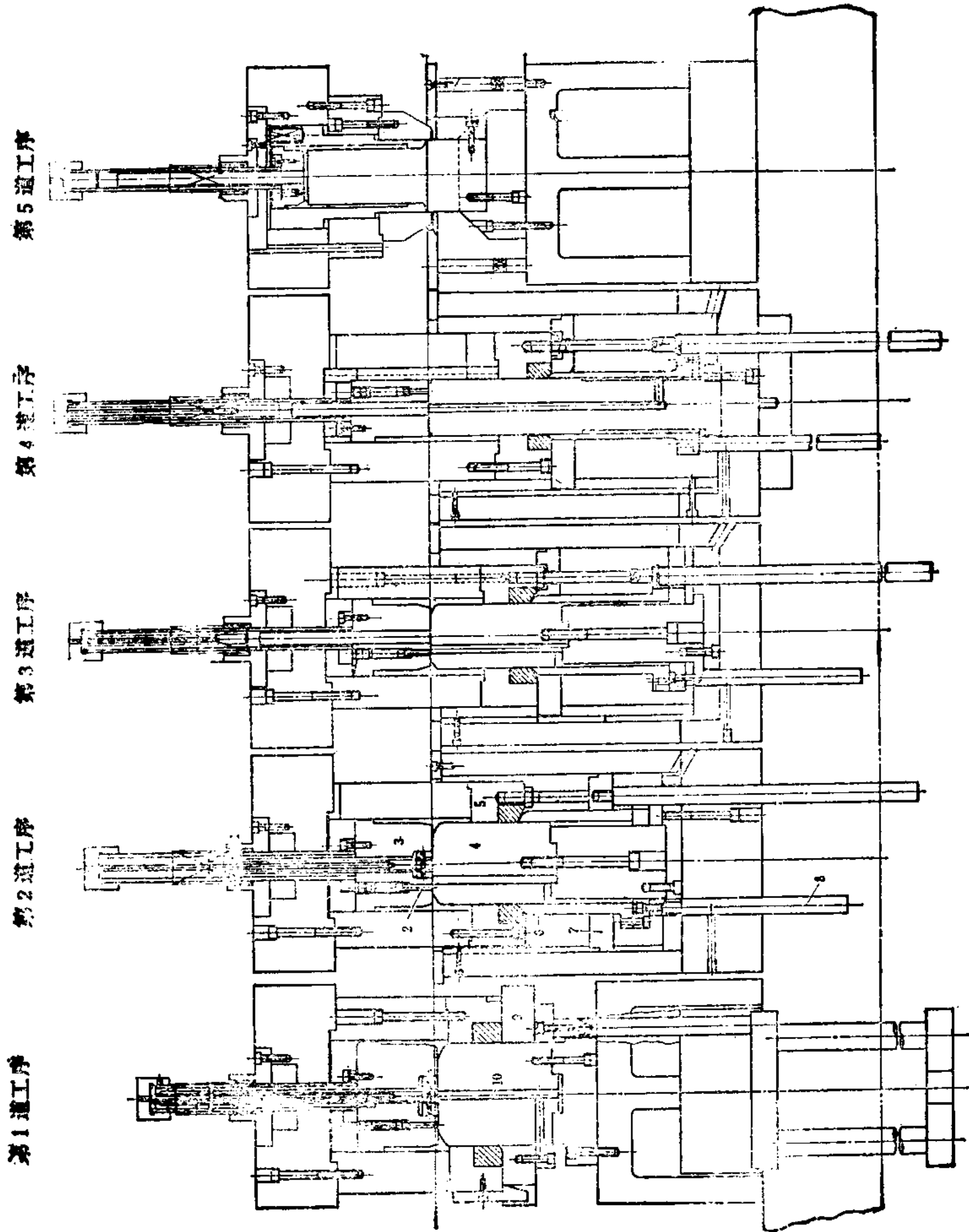


图4.135 圆筒容器的多工位模 (正视图)

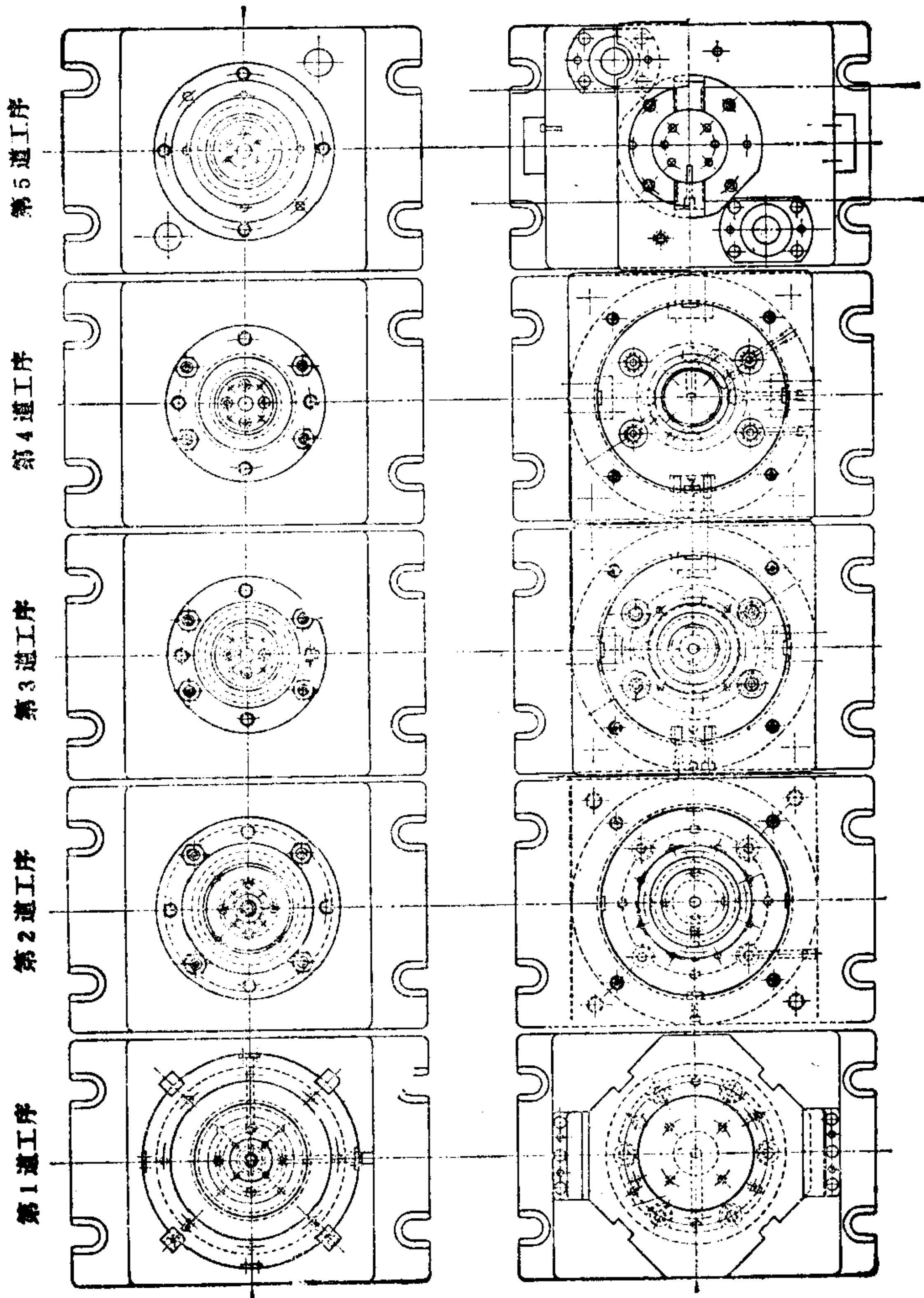


图4.136 圆筒容器的多工位模（顶视图）

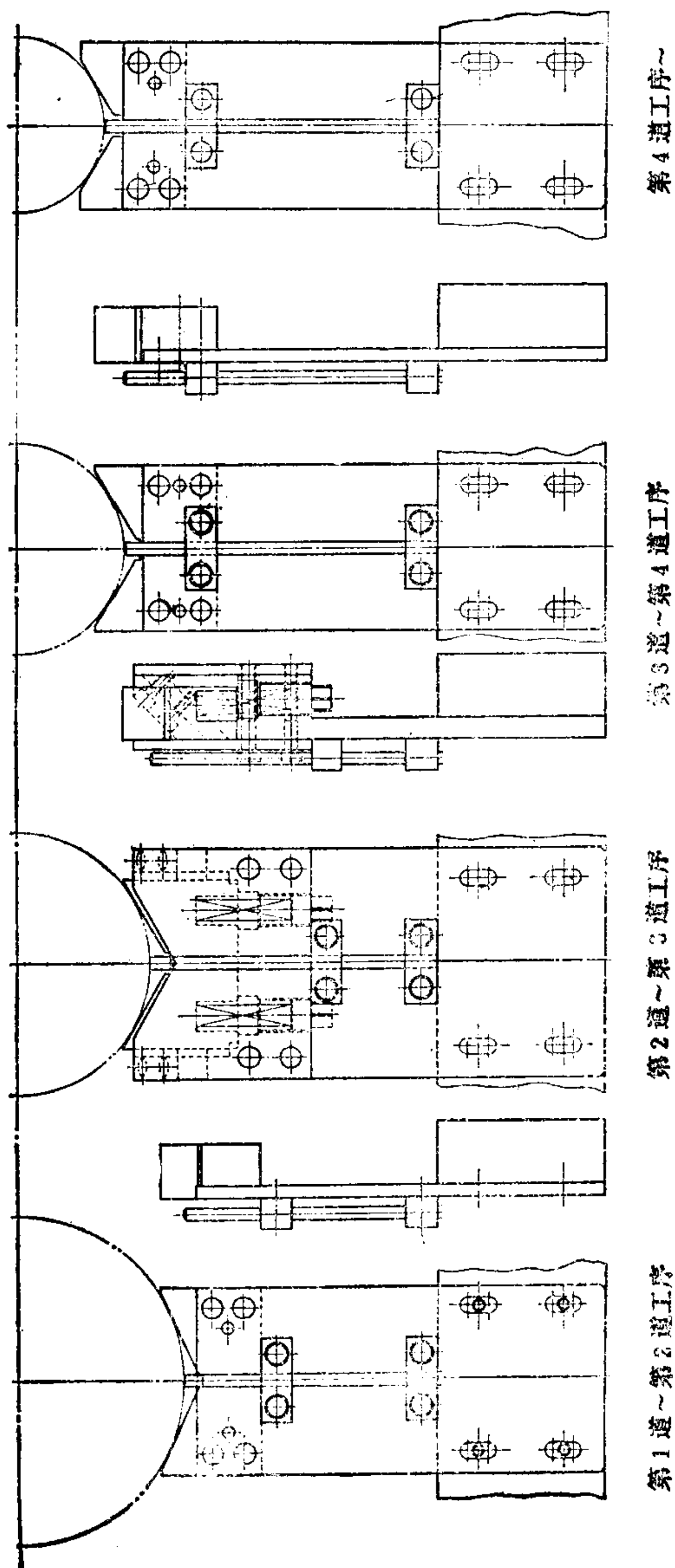


图4.137 机械手

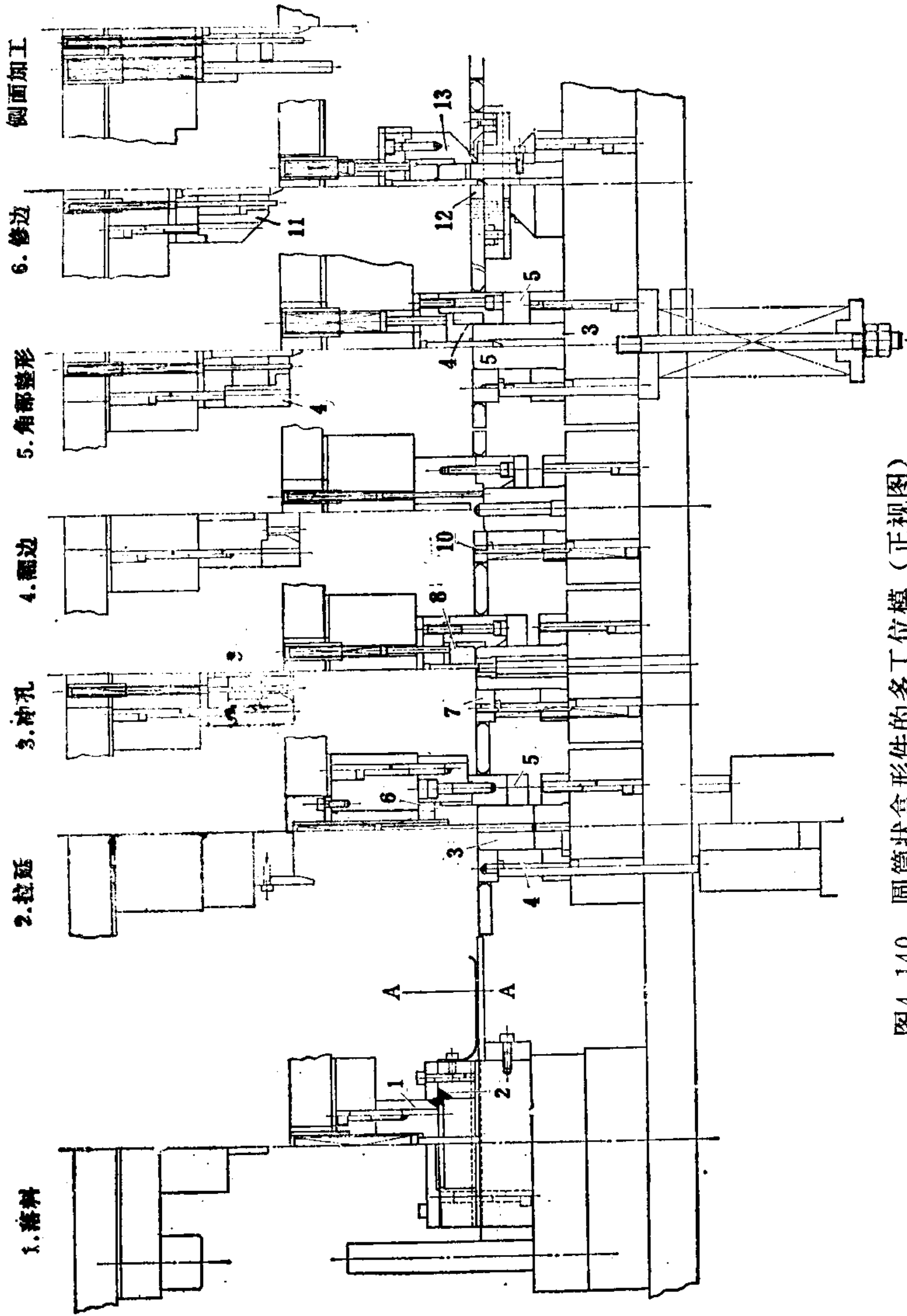


图4.140 圆筒状盒形件的多工位模（正视图）

冲压件的图纸要求和性能要求，并符合生产要求，从安全和经济性方面考虑也要对生产最有利。因为这项设计的优劣对零件质量、生产性、成本影响很大，所以在这个阶段仔细研究是非常重要的（参照6.7节）。

4.7.1 工艺设计前的准备

(i) 工艺设计时必须查阅的资料一般有如下几项：

(1) 零件图或者实物图。(2) 冲压件的公差。(3) 产量和要求的时间。(4) 压力机的参数和附属装置。(5) 类似零件的成形性，作业性有关资料，(6) 关于钢板材料的有关资料。(7) 各种模具设计的标准和模具零件的规格。(8) 有关压力机生产率的资料。

(ii) 制件图的研究 应该了解这种制件具有什么样的机能，所要求的单个零件的强度，表面质量以及和相关零件之间所要求的相关精度。制件图研究阶段要确定下列事项：

(1) 没有成形困难的形状，没有形状急剧变化的部分，没有负角面。(2) 这种零件的重点是什么？(3) 钢板材料的利用率好否？(4) 和有关零件的焊接面、装配面、镶嵌面在何处？

(5) 焊接、装配的基准面和孔在何处？(6) 孔的精度（直径、位置）、孔和孔的间距的要求，这些孔的位置在何处（平面部分、倾斜部分、侧壁部分）？(7) 各个凸缘精度允许达到什么程度（包括长度、凸缘面的位置、回弹）。

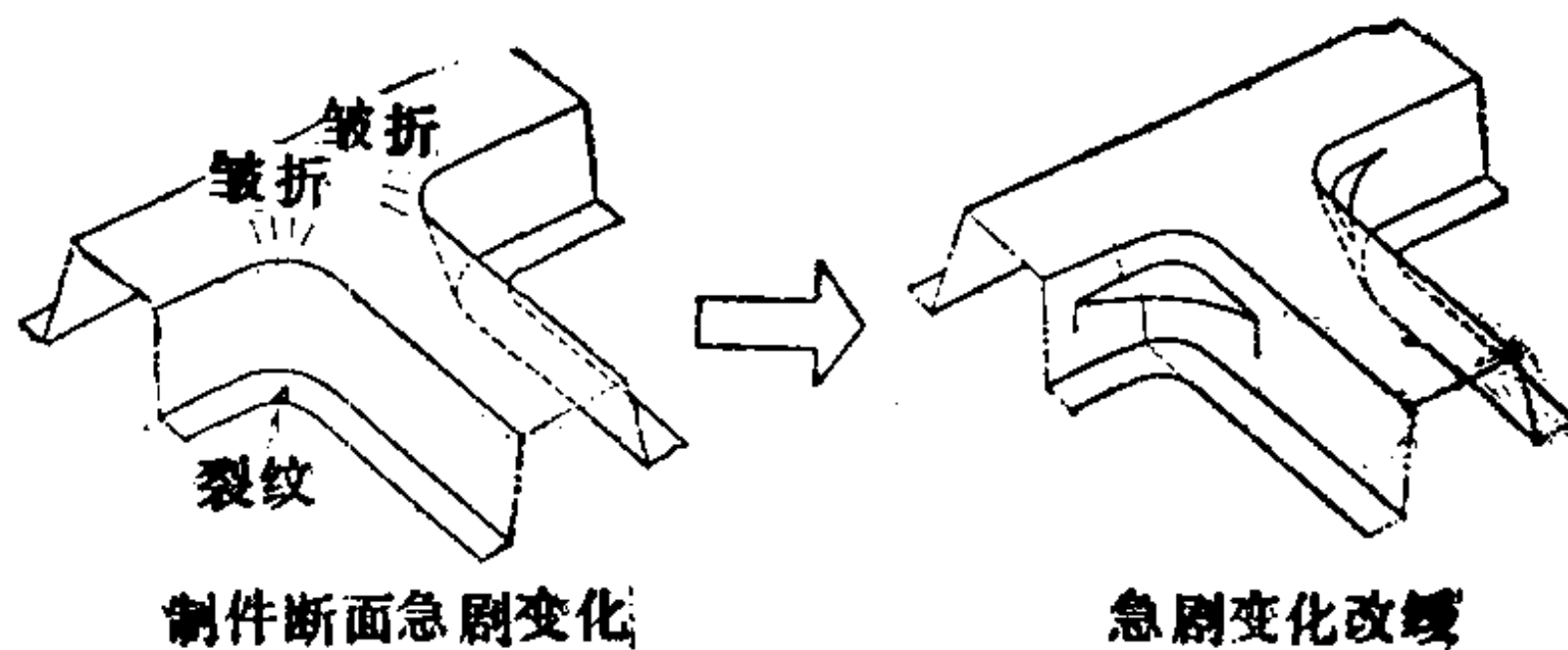


图4.142 使制件断面急剧变化处改为缓和过渡的例子

根据制件图研究零件的成形性，冲压工艺，在模具设计或试验阶段都有可能要改变制件的形状，且必须按制件的设计部署改变设计。图 4.142 就是为了既满足使用要求又避免产生缺陷而改变制件图的一个例子。

4.7.2 工艺设计

a. 工艺设计的进行方法 研究确定制件图及其公差后就进行工艺设计，其进行方法示例如下：（1）研究冲压成形性及加工方法、加工性能。（2）设计既满足零件机能要求而又工序最少的方案（加工方法和加工方向）。（3）根据模具结构研究模具强度、寿命。（4）根据制件的大小。冲压力、必要的工序数等决定所使用的设备。（5）以冲压作业性为主重新评价工艺设计。

（6）研究经济性（工序数、模具构造、板坯尺寸及自动化装置等）。（7）各工序的加工范围是否适当。

上述讨论在实际中互有联系，不能单独分开研究，一般有联系者就同时进行。这里经济性的讨论很重要，工艺、模具结构及自动化方案都必须适应生产量。所以，确定工艺方案时应该经常考虑有关经济性问题。

b. 成形性的讨论 根据制件图确定某一部分用什么方法成形，是拉延还是胀形或者两者的某种组合。虽然对圆筒和方筒等基本形状已经发表过很多资料，但对不规则形状的制件，根据前述那些资料有可能对局部的地方予以某种程度的判断，但不可否认由于形状边界条件不同，这类判断是不确切的。因此最好是参考过去类似零件的数据，这些数据中最有价值的是根据划圆形网格试验得到的数据，所以应该将网格试验数据和制件形状、尺寸对应起来加以整理。

在图 4.143 上采用了常用的延伸率 α 值作为判断这种不规则形状的大尺寸覆盖件的成形性的例子。即在包括最深部分处取间

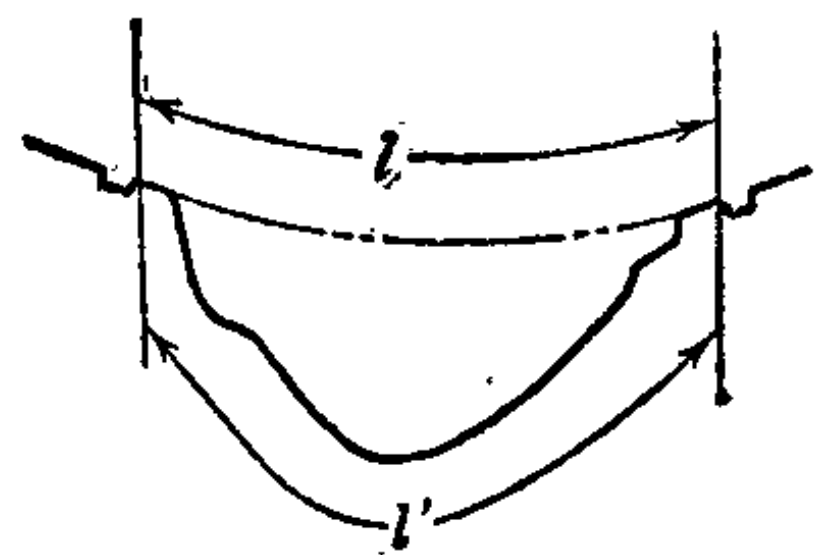


图4.143 成形性的研究

$$\alpha \text{ (成形度)} = (l' / l - 1) \times 100$$

l 为成形前的坯料长度
 l' 为成形后的坯料长度

距为 100~50mm 的纵向断面，用表 4.24 所示数据，首先判断能否实现胀形。当以破裂为限度而 α 值必须取得比表 4.24 中的值还大时，若 α 的平均值超过 30% 或者最大的 α_{max} 超过 40%，则即使应用拉延的方法允许凸缘部分材料流入成形处，还是应该判断成形是属于危险的。 α 是单轴方向的值，当必须考虑两轴方向时，根据拉伸压缩情况，即根据属于两向胀形还是两向压缩类变形， α 值将多少有些变化。

表 4.24 不规则形状大尺寸覆盖件的成形难易判断值
(根据吉田)[205]

α 判断值	用 α 判断的项目
2%	α 的全部平均值不超过该值时要获得良好的固定形状是困难的
5%	50~100mm 间距上相邻纵向断面的 α 值之差超过该值时容易产生皱折
5%	α 的全部平均值超过该值时，只用胀形是困难的，必须容许用拉延法
10%	α 的最大值超过该值时，只用胀形成形是困难的，必须允许用拉延法

注：这些判断数据适用于如图 4.142 所示那样的纵断面形状（例如汽车的档泥板），对于汽车顶盖及车门那样的零件，随着凸模端部变得平而浅时，则只取表列数据的 2/3 ~ 1/2。

c. 加工工艺和工序的设计 根据制件图上从冲压加工看来具有代表性的断面和各个拐角部分的成形要求，并在确保制件精度的情况下来依次设计必要的工序。这时应该对零件从机能来说是重要的和不重要的部分区别对待。一般应该注意下列事项：

(1) 一般用作外表的钢板件，喷涂装饰以后表面质量有特别要求的，同一曲面应一次成形。如果分两次成形，其交接处会残存不连续的面，表面质量明显恶化。因此需要选择合适的冲压方向。

(2) 焊接面存在皱折一般就焊接不好，有回弹则表面位置不准，装配困难或者出现装配后精度不良的情况，所以不规则的形状只能用拉延工序把焊接面制作出来。当焊接面用弯曲工序做出来时应该选择没有变薄的冲压方向。

(3) 作为加工基准用的孔，如在冲压工序的早期就冲出

来, 当工序进行下去时孔会变形和偏移, 所以在成形之后冲孔。有关冲孔方面应注意下列事项:

(a) 大孔和小孔接近时, 先冲大孔。这是因为怕加工大孔时小孔会变形。

(b) 孔和孔、孔和边缘的最小距离受工件翘曲, 孔边变形的限制, 所以是加工工艺要研究的问题。

(c) 孔位于弯曲线的附近时, 孔在弯曲工序之后加工。

(d) 冲孔的方向只能取垂直于板面的方向, 不得已的情况下才在倾斜面上加工, 但这样做仅限于制件使用上不要求孔精度的情况。图 4.144 为冲圆孔时直径和倾斜角度的一般关系的一个标准。特别是冲小孔时, 倾斜角度若不取小的值, 就容易产生凸模折断、凹模损坏及磨损等事故, 所以选择冲压的方向时应十分注意。

(e) 弯曲凸缘部分有孔时, 冲孔在凸缘弯曲工序之后进行。但是不要求精度的孔, 如果孔的位置离凸缘边缘或者凸缘曲线部分有足够的长度, 不妨在弯曲加工之前冲孔。而必须采用变薄的弯曲时, 即使不要求精度的孔最好在弯曲工序之后加工。

(f) 相关联的孔在同一工序中冲出。相关联的孔太多, 由于模具强度及冲压方向的原因在同一工序中不能全部冲出时, 要充分注意制件的加工基准, 必须考虑保证公差措施。

d. 工艺设计注意事项

(i) 拉延工序

(1) 冲压方向 在拉延方向要注意制件有没有负角部分, 如果有, 则在后道工序中要有能够容易地加工出来的措施 (图 4.145), 和压边面的关系方面, 在拉延加工开始时拉延凸模和材料接触应均衡, 以防止发生局部拉伸。

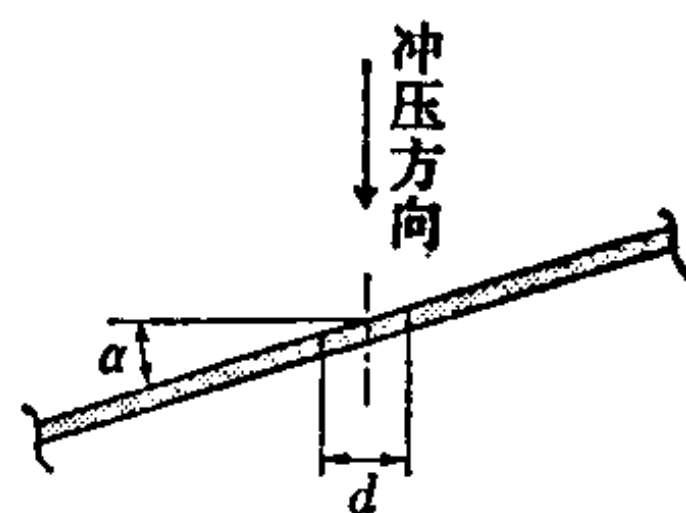


图 4.144 冲头直径和倾斜角度的关系

$$d \leq \phi 5 \text{ 时 } \alpha < 5^\circ$$

$$\phi 5 < d \leq \phi 15 \text{ 时 } \alpha < 15^\circ$$

$$\phi 15 < d < \phi 20 \text{ 时 } \alpha < 20^\circ$$

$$d \geq \phi 20 \text{ 时 } \alpha < 25^\circ$$

$$(\alpha_{\max} = 30^\circ)$$

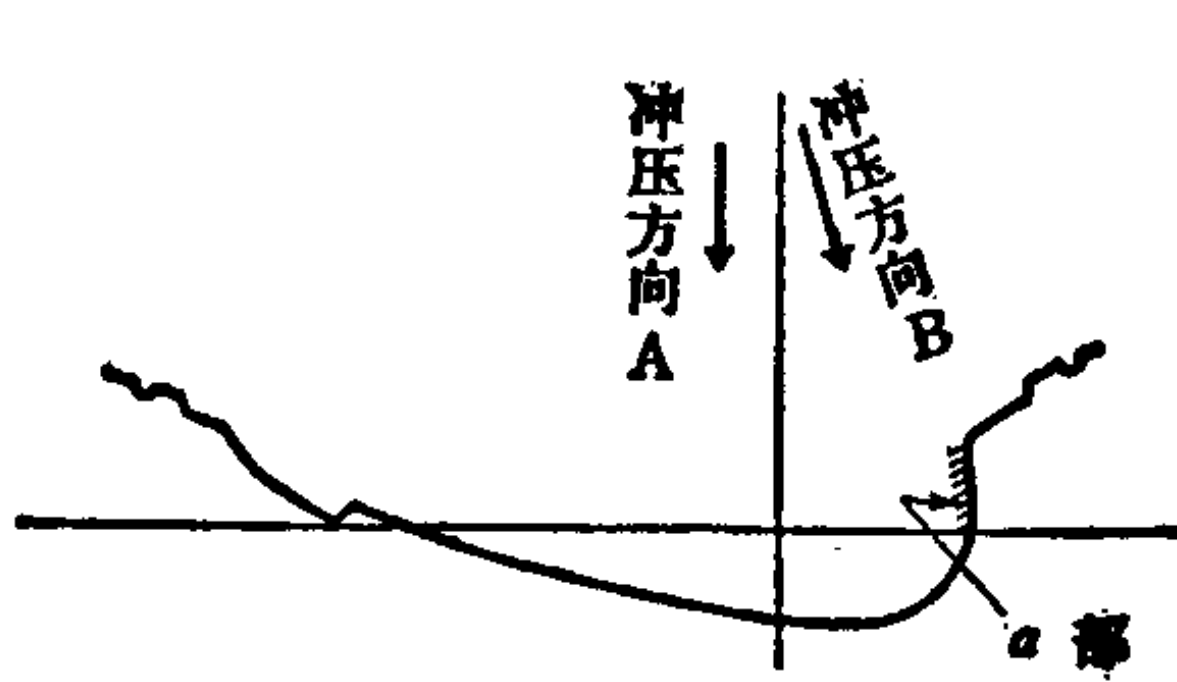


图4.145 拉伸方向

冲压方向为A时斜线 α 部成为负角，所以这时冲压方向必须是B冲压方向为B时希望 α 部壁的开启角度为 10° 以上

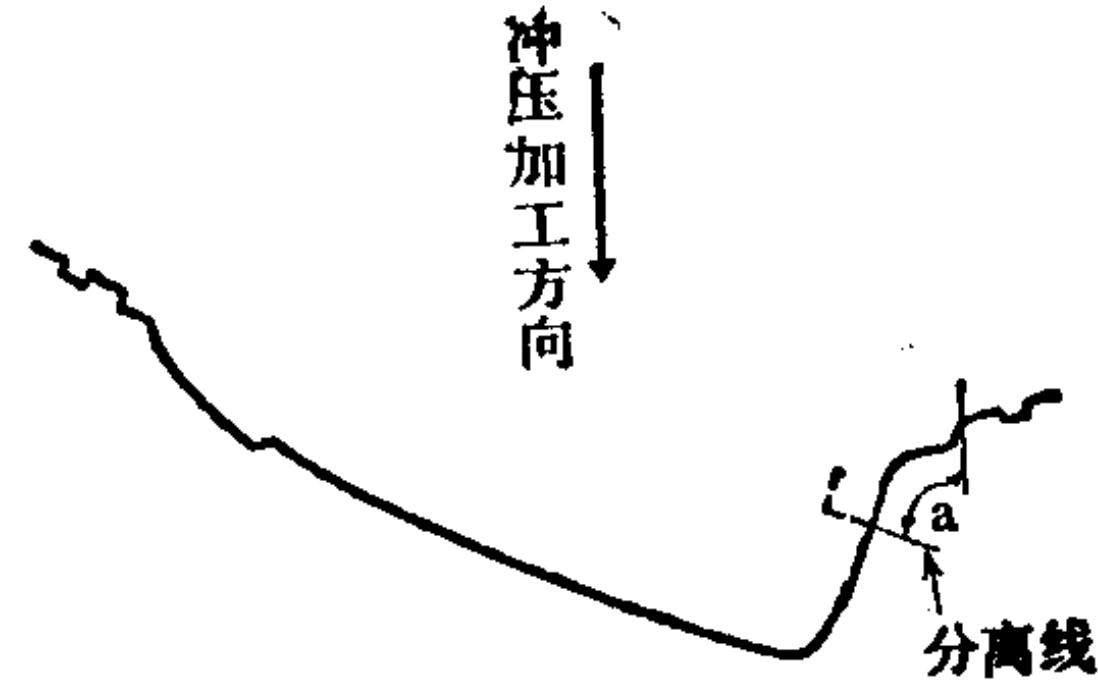


图4.146 消除颤动痕的措施实例尺寸 a 根据过去实践比估计的拉入长度还大些

(2) 压边面 虽然压边面是在模具设计阶段决定的，但是在工艺设计时也要根据典型断面对凹凸不平的压边面作出考虑。对于复杂形状的制件，使用模型就易于判断材料的固定状态，延伸率的分析以及用压料板压住时变形状态的控制等等，而且能恰当地处理。这时分析出来的延伸率要和表4.24的标准数据相对照，也有可能要对压边面进行修正和加上敷料。

(a) 考虑放置坯料时坯料的稳定。

(b) 考虑不在某一方向产生很大的侧向推力。

(c) 用压边圈压住后坯料上不产生皱折、扭曲。

(d) 拉伸凸模的外形轮廓内材料的延伸率取5%作为大体的基准。

(e) 成形过程中要注意凸模和坯料的接触部位，避免局部接触。

(f) 在外表用的板面上，不应有颤动痕迹。图4.146为免制件面上有颤动痕迹的措施实例，尺寸 a 比估算的滑入长度还要大些。另外阶梯拉伸也是一种方法。

这些注意事项在工艺设计阶段要研究，希望加以指明。当然，关于详细的情况应该用拉伸线图、拉伸模型加以充分研究。

(3) 送进方向 坯料送进方向随着坯料形状、压边面形状及制件形状的不同而可能受到限制，所以要加以注意。为了相对于

坯料的拐角和按送进方向压边面能压上，所以当拉延模的内表面和坯料发生干涉时，就有必要在模具内设置导向装置。另外，要注意是否要在拉延工序后的加工中把制件翻转 180° 或 90° 。

(4) 考虑外形修边工序的定位。在制件形状是平滑的曲面时，只有和形状贴紧时才能定位，因此采用下列办法。

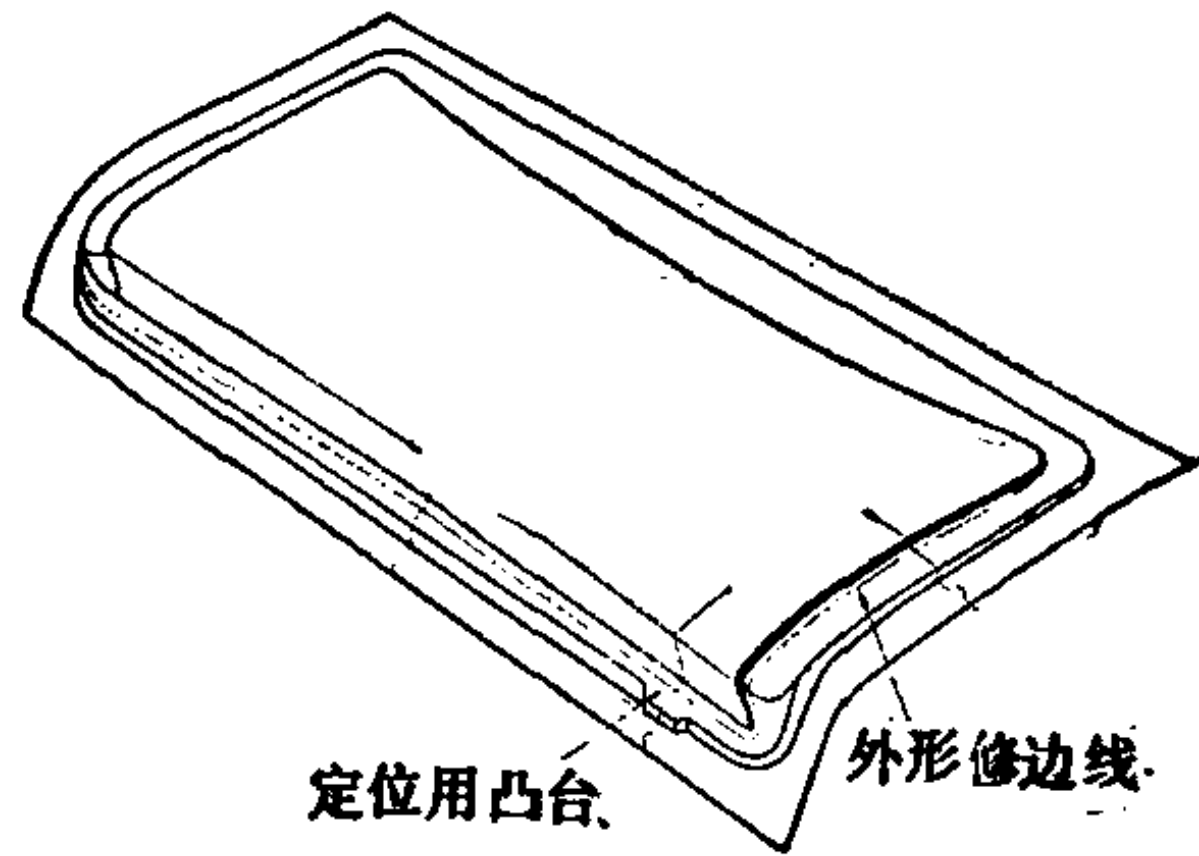


图4.147 定位用凸台

(a) 在制件不要的部分拉延出凸台以用来定位 (参考图4.147)

(b) 设置定位孔，这是在接近拉延结束时，用安装在模具上的凸模冲出 (参照图4.148)。

(5) 考虑外形修边工序的切刃强度、磨损及缺损。

(a) 图4.149 a) 所示为切刃强度不好的例子。图4.149 b) 所示为其措施和一种标准数值。

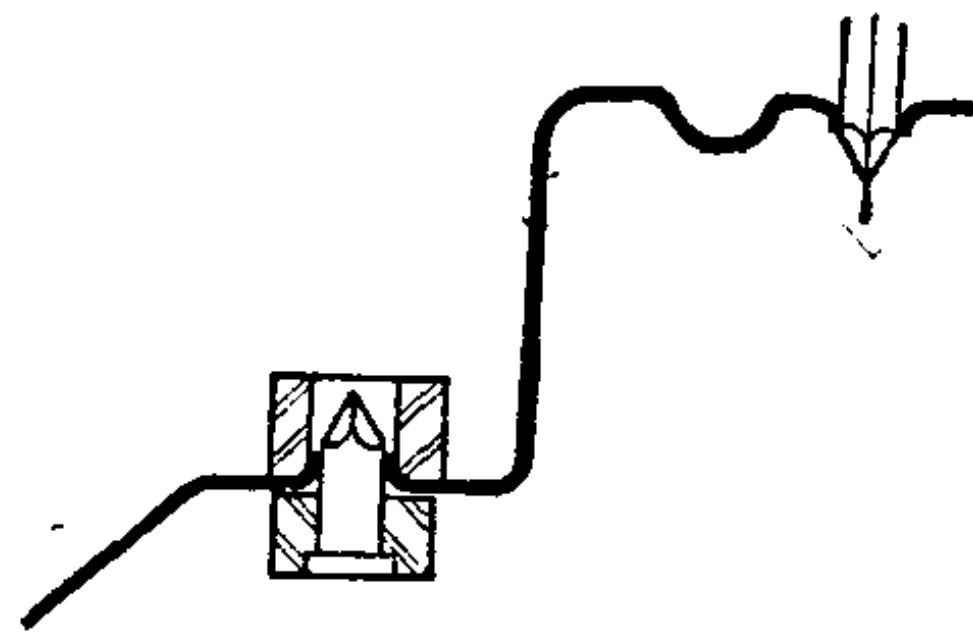


图4.148 冲定位孔的方法

(b) 图4.150所示为废料刀刃处呈喇叭形，以避免垂直切割时防止刀刃磨损示例。

(c) 要考虑外形修边的冲压方向的加工形状。图4.151的例子表示由于冲孔的关系使拉延方向和外形修边方向的角度有所不同。如果冲切刃口变成锐角就容易磨损或崩刃，因而在拉延加工时就要考虑在外形修边的方向制成一个面，作为加强冲切刃口的措施。

(6) 回弹 如果考虑零件可能产生回弹，就要标示制成过凸 (over crown) 一类的情况。

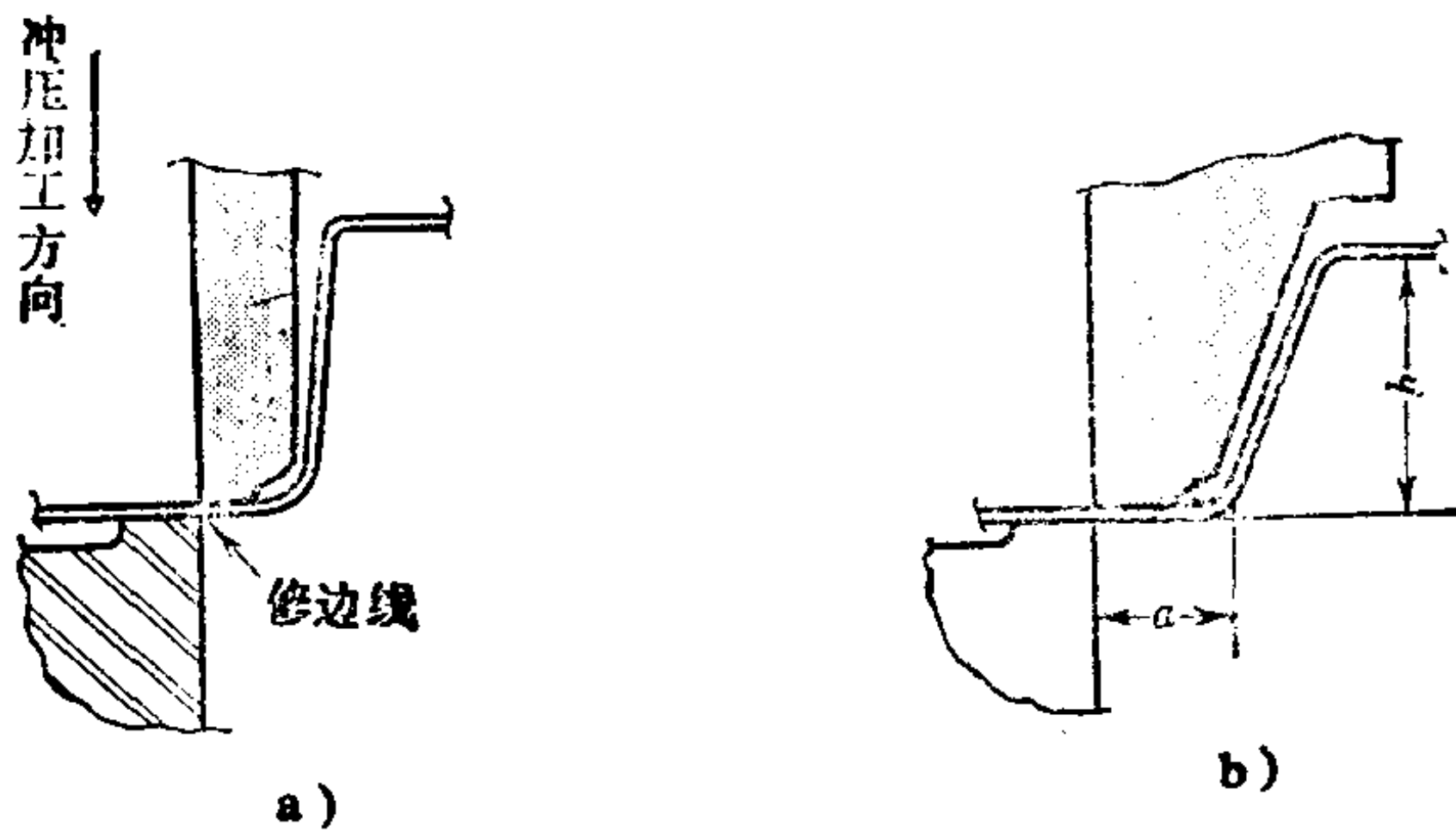


图4.149 考虑修边刃口强度的拉伸形状实例
 a) 上模刃口强度不好 b) 提高上模刃口强度的措施
 ($a_{min} = 10mm, a > 1/2 b$)

(7) 在零件中部有可能发生裂纹的胀形部分需要冲切口时，要标示在不属于成品的部分冲切口。但是一般来说应尽量避免冲切口，而希望设计出无切口就能成形的形状(参照图4.152)。

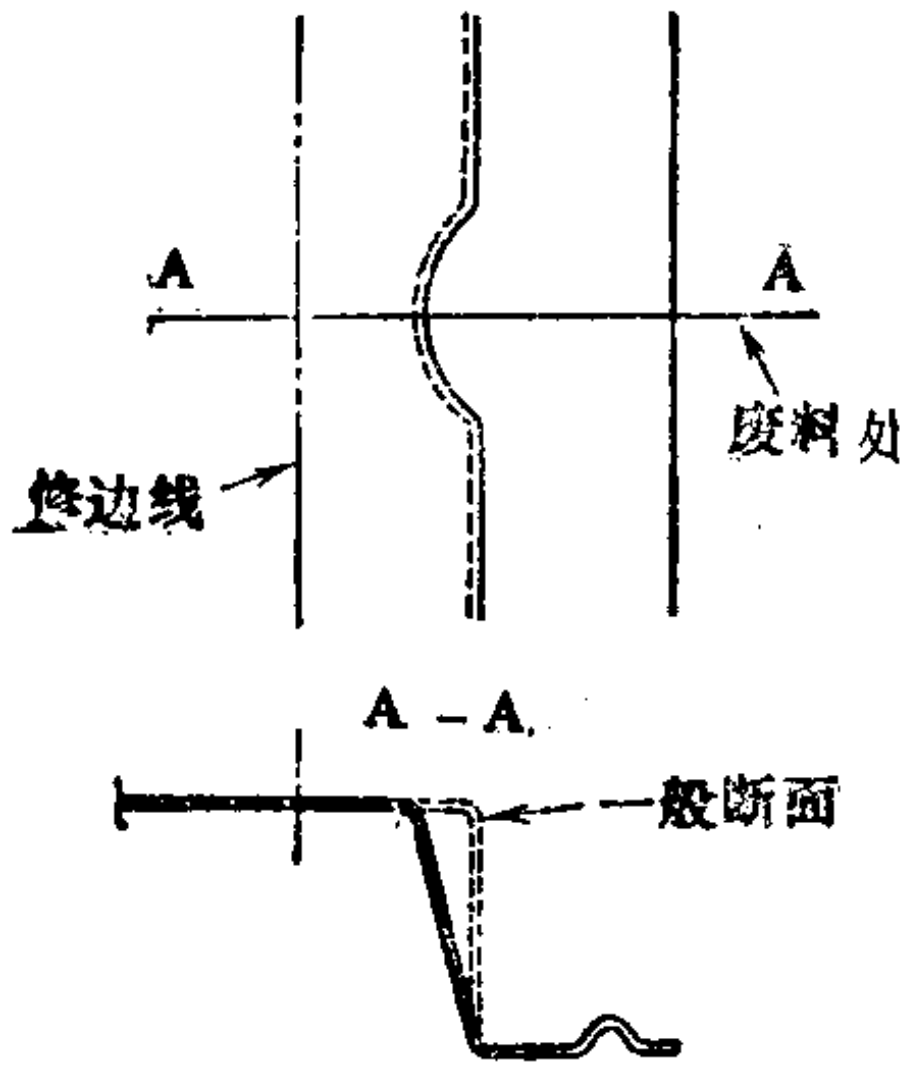


图4.150 废料切割处呈喇叭形示例
 (由于冲孔的关系，拉伸方向和外形修边方向的角度不同的例子)

(ii) 外形修边工序和冲孔工序

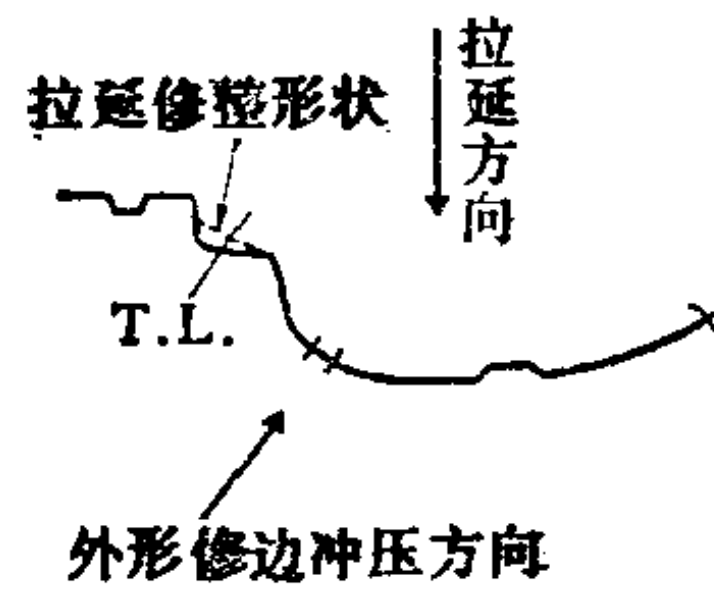


图4.151 考虑外形修边的冲压方向

(1) 在冲压方向上冲切刃口是否有构成锐角或钝角的地方。

(a) 如果修边线是直线或者近似直线，就可以把它与冲压方向构成的最大倾角以 $20^\circ \sim 25^\circ$ 为基准进行考虑。

(b) 修边线在倾斜面上急剧变化时，最大倾角可以 15° 为

基准进行考虑。

(c) 在最大倾斜角度需要大于上述角度时, 就要采取以下的措施: 重新研讨冲压方向或改变拉伸形状, 或将冲压工序分为两道工序, 或者采用具有换向凸轮(或斜面——译者)结构的模具。

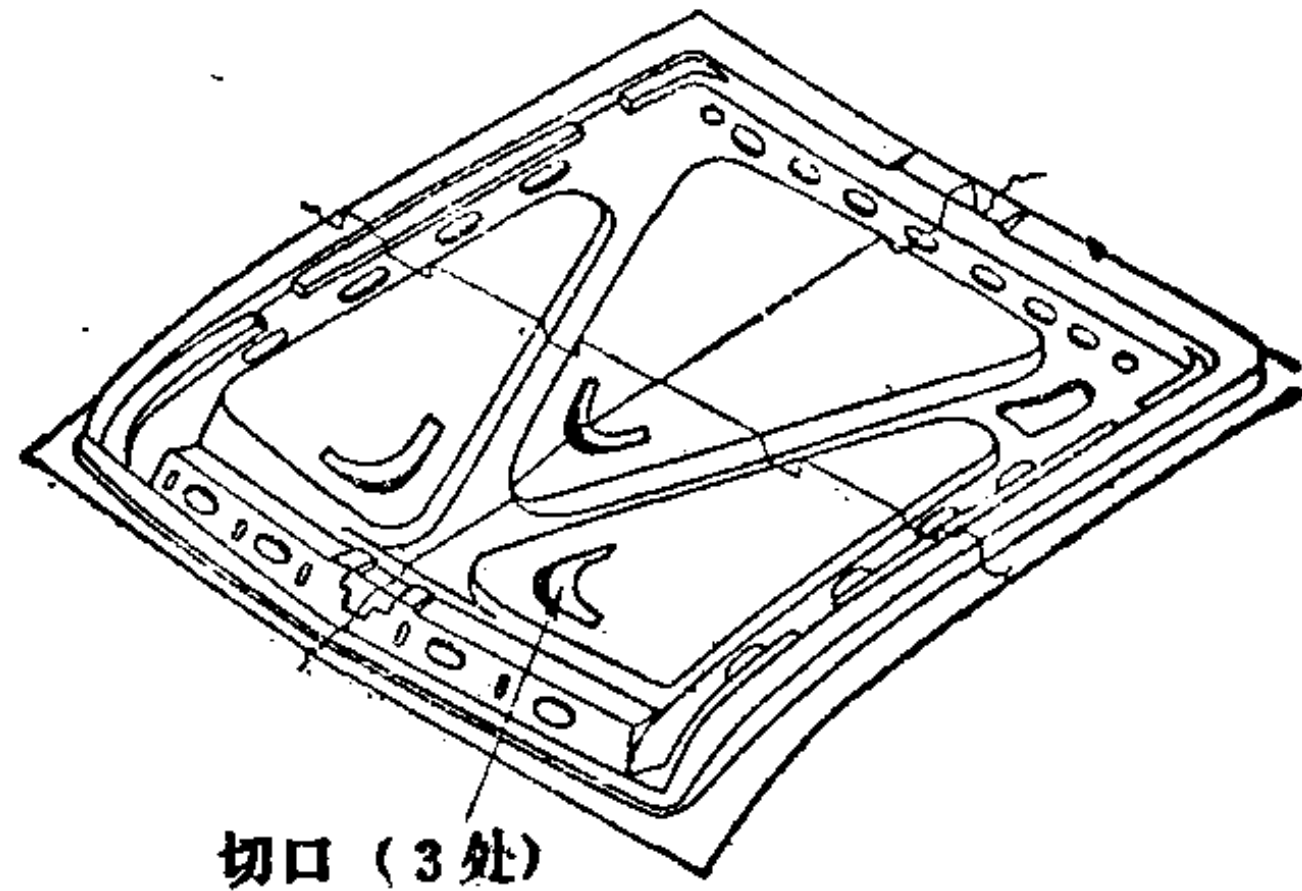


图4.152 在拉伸模上带冲切口的例子

(2) 在冲切刃口上是否有强度不足的地方。

(a) 在同时冲孔和外周修边时, 要注意冲切刃口壁厚的强度和耐疲劳性能。

(b) 在有许许多多互相接近的细缝时, 要考虑模具强度和处理废料的问题, 分成几道工序进行冲压。

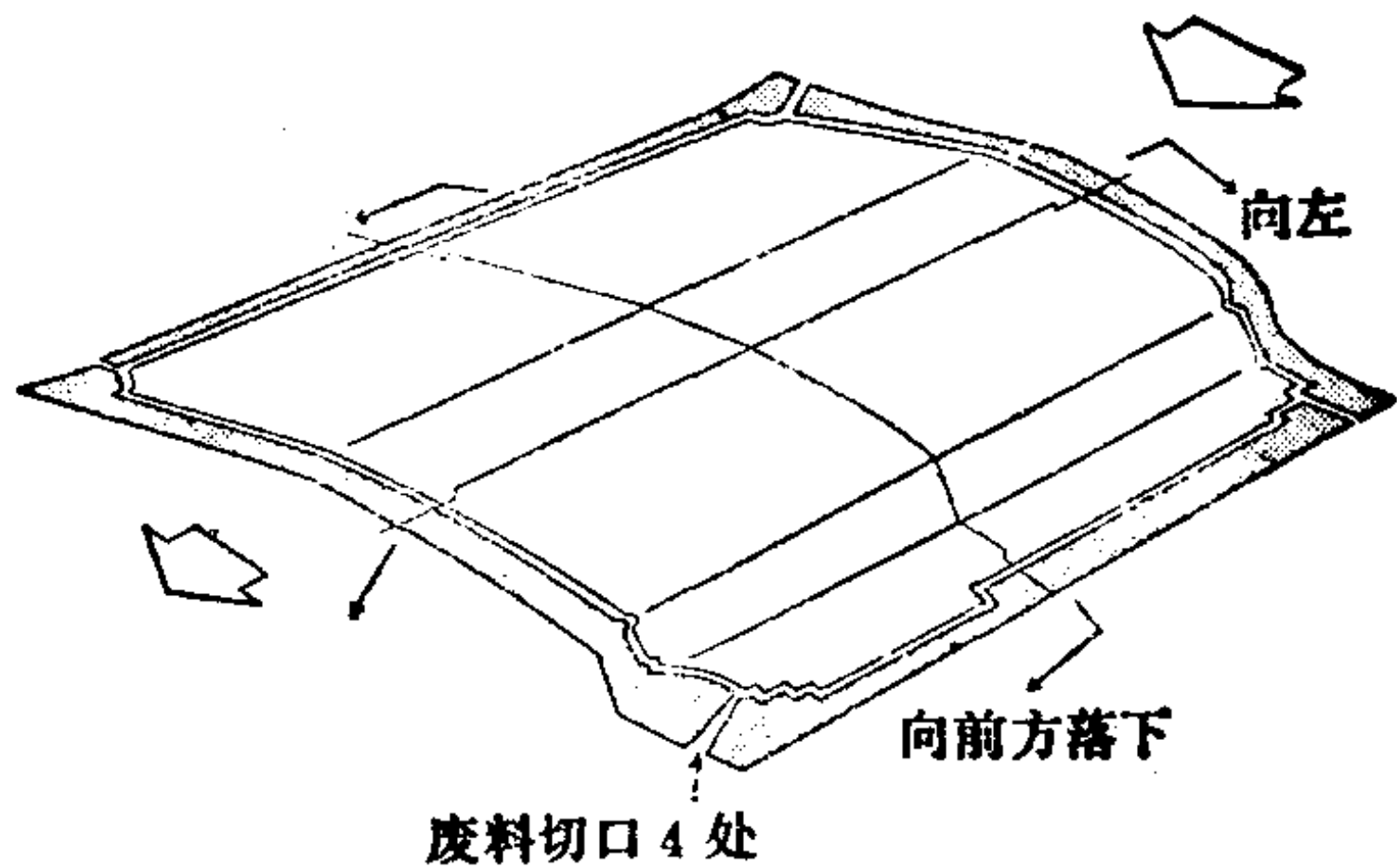


图4.153 外形冲压废料处理指示图

(3) 废料处理 废料处理的好坏对冲压作业速度有很大影响, 因而要在工艺设计和模具设计时进行充分研究。

(a) 废料处理要注意以下几点:

1) 不要使废料的形状形成L形或U形。
2) 不要把废料刀平行配列, 要考虑废料的流动方向应张开 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ (参照图4.153)。

3) 废料的分割不要过细, 形状较大的每一边的长度以400~700mm为宜。

4) 废料溜槽的安装角度以 30° 为宜, 要使废料能落到工作

台外边。

5) 在半自动生产线上决定废料流动方向时, 要注意不要妨碍工人的操作。

6) 在废料自动落下有困难时, 要考虑安装顶出器或弹性卸料装置。

(b) 在冲大孔时处理废料应该注意的问题:

首先要同其他工序结合起来探讨模具结构是否可靠, 有无剖分的必要。冲下的大孔废料要卸到模具的外侧, 因而必须充分注意下模的强度。冲大孔时废料的卸出方向, 要选择模具排屑槽少的方向。其次是如果大的废料能用作板厚相同的小零件, 就应该在模具刚性容许的范围内进行整体冲压, 以便提高材料利用率。如图 4.154 所示, 为了考虑模具的刚性, 将大孔分成几个部分冲压的例子。

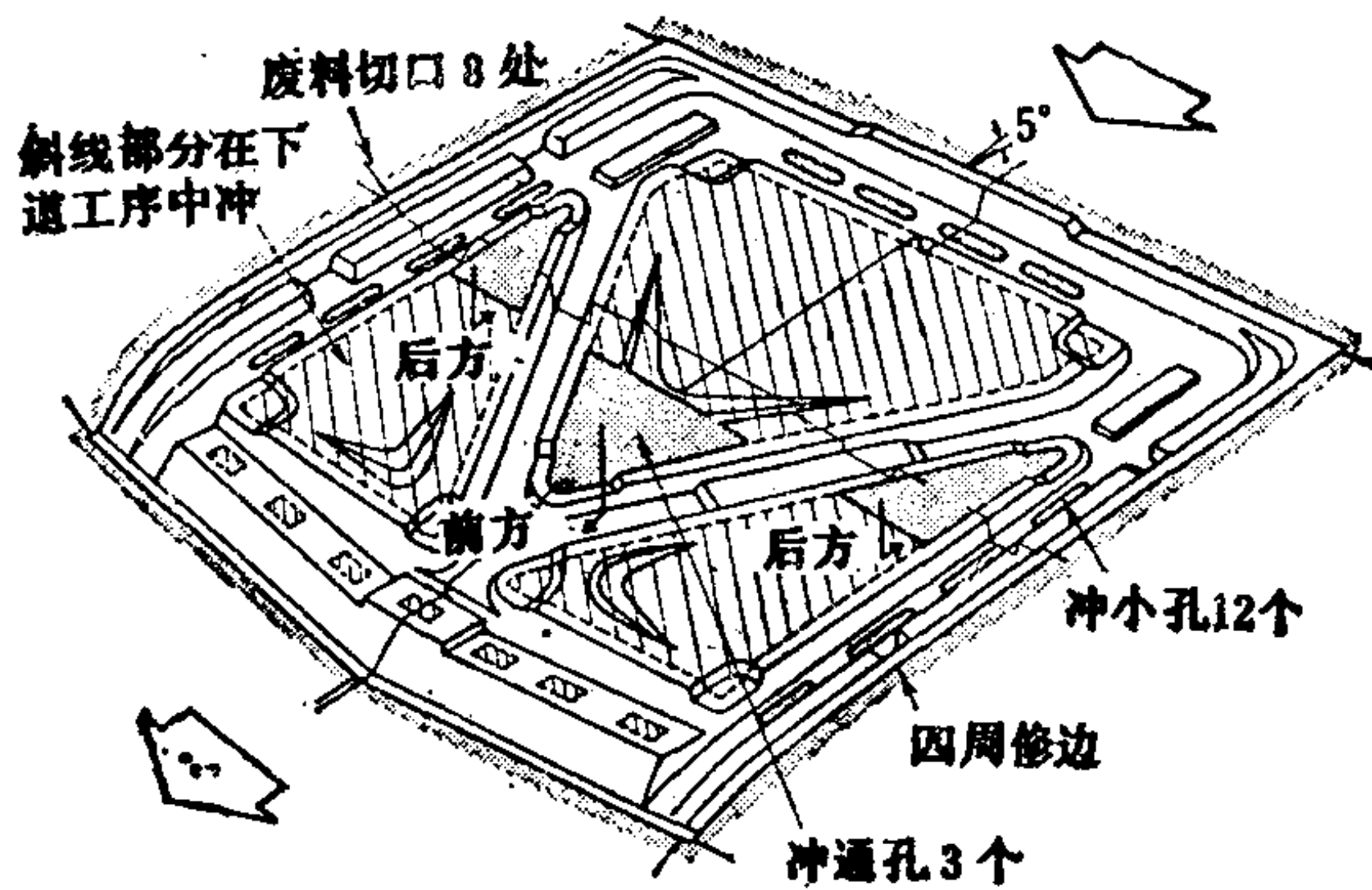


图 4.154 将大孔分成几部分冲压的例子

(c) 冲小孔时处理废料应该注意的问题

要尽量使废料往下落。如图 4.155 所示, 在同时冲 A、B 两个孔时, 如果尺寸 l 小, 尺寸 m 不够大, 冲孔时就有发生干扰的危险, 因而需要改变孔的位置使尺寸 l 加大, 或者用别的工序加工。

图 4.156 的场合也是同样的, 但是如果 $W = d_1 + d_2 + 40\text{mm}$

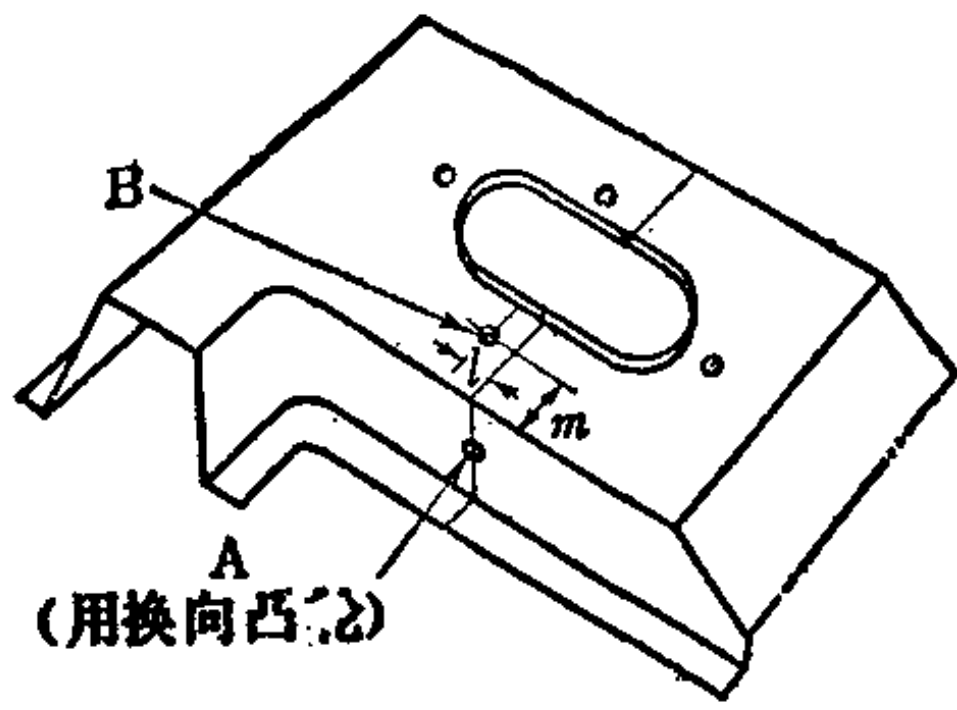


图4.155 废料处理应注意的问题

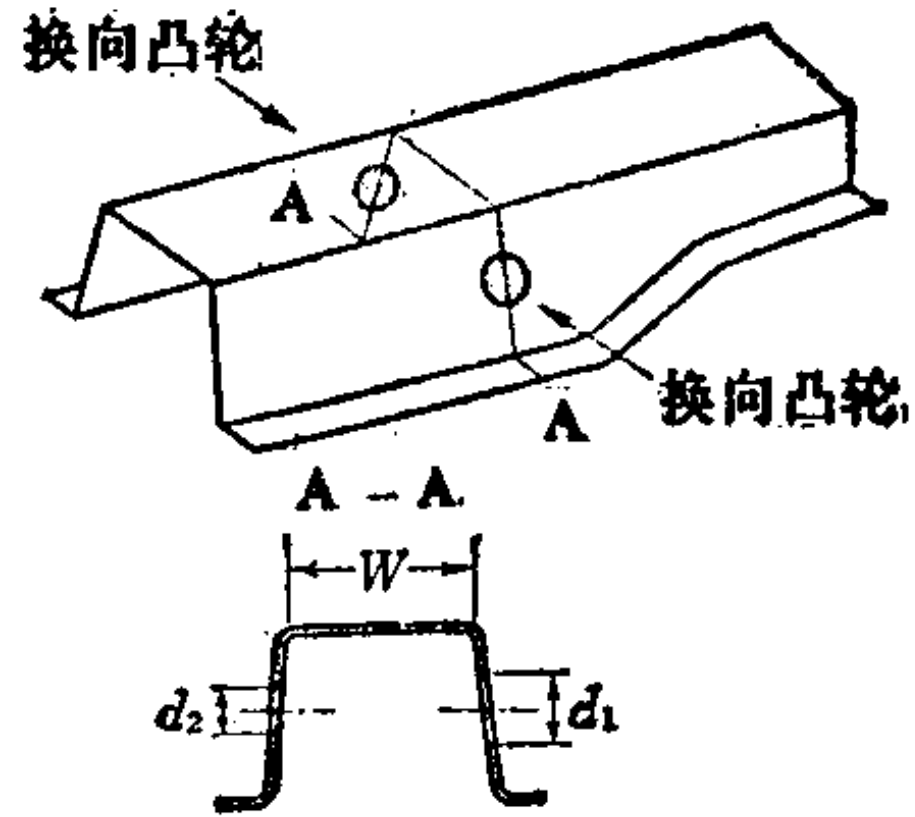


图4.156 废料处理应该注意的问题
板厚为 1 mm 时, 以 $W \geq d_1 + d_2 + 40\text{mm}$ 为标准

(板厚为 1mm) 时也可以在同一道工序中冲两个孔。但值 40mm 是根据板厚变化的。

(4) 互相有关连的孔要在一道工序上冲压。

(5) 冲切时要校验需要的冲裁力, 当冲裁力超过压力机的能力时, 就要规定在切刃上制成剪切角。

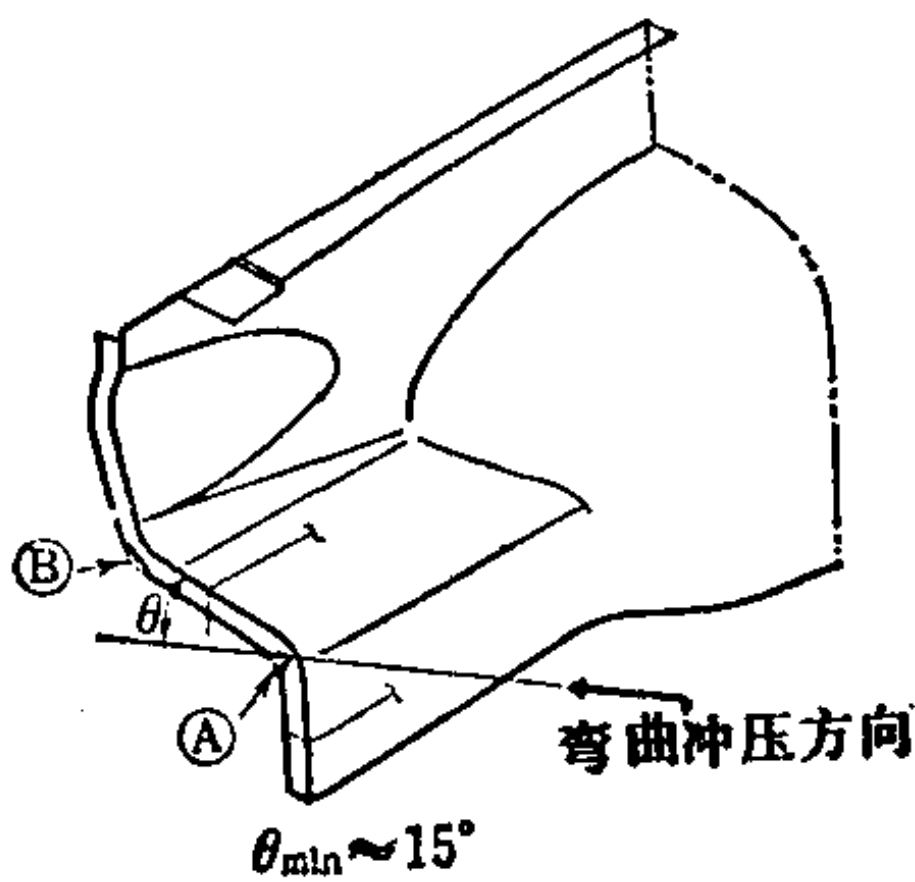


图4.157 弯曲冲压方向

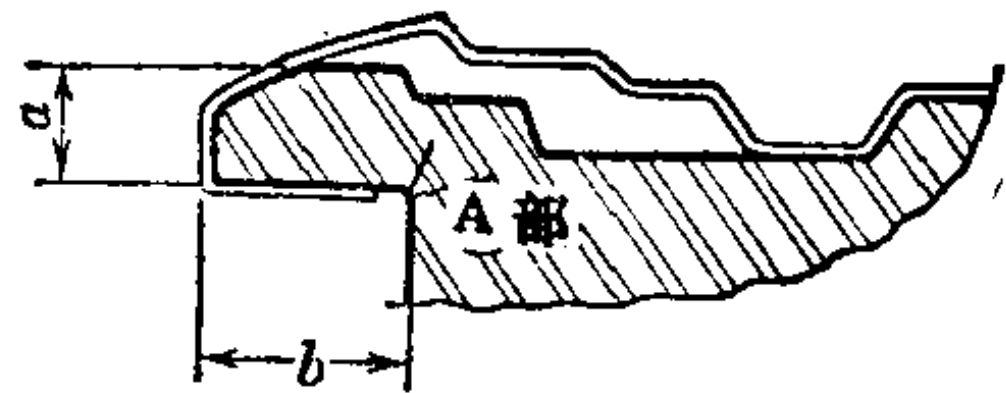


图4.158 弯曲刃口强度应该注意的问题

(6) 要考虑作业性, 对于半自动生产线特别要考虑卸料的问题, 要检查是否有安装顶料装置或提升杆的空间。

(iii) 弯曲工序

(1) 冲压方向

(a) 在需要估计回弹时, 就要把预计的弹性回复从冲压方向考虑进去。

(b) 弯曲方向, 要尽可能地从垂直于凸缘弯曲面的方向进

行加工。图 4.157 中的 θ_{\min} 大致以 15° 为基准。

(c) 在研讨弯曲凸缘与冲压方向是否成负角时, 特别是当弯曲线在平面上弯曲时, 必须注意到冲压方向, 一旦倾斜就会产生负角。

(d) 在使用换向凸轮时, 可在换向凸轮的方向上进行研讨, 同时应指明它的方向。此外, 应考虑到便于装卸制件和不发生精度分散之类的问题。

(2) 弯曲刃口的强度是否充分耐久。

(a) 要特别注意弯曲加工后从模具中取出制件所需要的退让空间。图 4.158 所示为某一断面。在这种情况下存在着从 A 部发生断裂的危险, 所以必须对尺寸 a 和 b 的关系进行充分探讨。

(b) 在采用双凸轮机构时, 要考虑到沿凸轮运动方向上是否会对制件的凹部产生干涉。还有, 在变薄弯曲时需要足够的刚性, 因而必须探讨加工范围是否合适的问题。

(3) 在伸长类翻边或压缩类翻边时对裂纹和皱折所采取的措施是否合适。

(4) 在凸缘方向和冲压方向相反时, 要规定使用机械缓冲器或者用弹簧、橡胶等模具内的缓冲器。

(5) 制件的定位是否合适, 特别在使用双凸轮时要采用粗定位。还有, 在利用凸缘顶杆兼作定位时, 其位置和数量以及行程等如果不合适, 就会使凸缘产生变形, 因而必须注意。

(6) 采用凸轮结构进行弯曲时, 作为从模具中取出制件的方法, 有利用油缸的方法和采取双凸轮结构的方法。但采用哪种方法要在设计图中加以规定。

(7) 在后工序进行卷边的凸缘部分, 要估计到卷边时的收缩留量并加以标注。

(iv) 压力机的选定及经济性的探讨以及其他事项

(1) 在选择压力机时应注意的事项

(a) 根据制件的尺寸形状和压力机的能力、行程、闭合高度及其调整量, 来研讨制件成形时所需要的加工力、制件的拉延

深度和行程，即取出制件时制件是否与上模发生干涉的问题。

(b) 必要的工序数和压力机台数与布置的关系。

(c) 根据生产量研讨每一台压力机的负荷时间。

(d) 根据生产量和制件形状研讨究竟应该采用通用压力机还是多工位自动压力机。在选定多工位自动压力机时，由于机械的各部分或进给装置不同，在工序设计上当然要受到某些限制。

(2) 经济性的探讨

(a) 与生产量相适应的加工工序 应该确定模具结构和自动化的计划，在把这些计划纳入工序计划时应该确定基本方针。

(b) 材料费的节约 钢材的利用率取决于制件形状，因而在探讨制件图纸的阶段，就要努力消除引起材料利用率下降的因素，设法提高材料利用率。另外，在设计模具时要尽量设法使拉延深度浅些，并减小拉延的截面。也可以通过对拉延筋的形状和位置等采取适当措施来提高材料利用率。此外，还要对对称制件的组合或同一制件的组合等进行研究。这时当然要尽量减少切割留量。

其他，还有从冲压作业性方面进行研究的，这时要尽量避免制件在工序之间的回转或反转；在制件没有刚性或往下道工序传送有困难的加工工序，应该放在最后一道工序进行加工；并且设法使每道工序从装料到卸料之间的作业时间均等。

4.7.3 应记入工艺卡的事项

- 1) 冲压工序数和工艺顺序
- 2) 单位时间的生产数和工人数以及工人的位置
- 3) 钢板的材质、板厚和坯料尺寸
- 4) 各工序使用的自动化装置（模具内的和模具外的）
- 5) 各工序的制件投入和取出的方向
- 6) 各工序的冲压加工形状和加工部位
- 7) 各工序的冲压加工方向
- 8) 各工序的加工基准
- 9) 各工序的模具高度

- 10) 模具结构的类型
- 11) 为确保制件精度规定的事项
- 12) 其他在设计中必须注意的事项

4.7.4 大型零件的模具设计

a. 作拉延线图时应注意的事项

工艺卡中要制定冲压加工方法，在设计模具时则要根据冲压方法确定拉压成形的形状。为此要制作拉延线图，并对拉延成形性能、冲压方向以及同后续加工工序之间的关系等工艺卡中的所有项目进行深入推敲。图 4.159 所示为拉延线图。在这种线图中，因防皱压料面（压边面）为三次曲面，利用线图决定压边面是有困难的，所以压边面的形状要通过制作模型来最后确定，但拉延线图可供制定设计书、制造木模和模型的参考。为此应指出拉延成形所需要的延长面、截面形状、压边面和拉延筋的位置等。

拉延线图中应确定的事项

- (1) 规定截面内材料的合理拉伸量。
- (2) 确定拉延方向，以使拉延凸模和材料的接触在拉延初期不产生不平衡现象。
- (3) 要使拉延成形尽量接近制件的形状，以减少后续工序的成形量。
- (4) 使拉延截面尽可能安排在有限的范围里，并考虑材料利用率的提高。
- (5) 为使颤动痕不进入制件表面，要确定出拉延深度和拉延筋位置。
- (6) 压边面的形状，在它压紧毛坯到支承板时，应能防止材料发生扭曲或折弯。
- (7) 制件在拉延方向上不得出现负角部分。当不得已出现负角部分时，其形状应使后续工序易于加工。
- (8) 对过凸、回弹和收缩等应确定是否需要估计留量。
- (9) 计算坯料尺寸，应尽可能用标准的材料成形出来。

b. 确定模具结构时应注意的事项

- (1) 能否依靠现有设备能力进行加工。
- (2) 制件的定位是否适合于冲压作业。
- (3) 模具结构是否能满足处理冲压成形时所预料的故障要求。
- (4) 模具的大小是否符合所用机床的加工范围。
- (5) 模具零件装配部位承受偏心载荷的问题是否作过考虑。
- (6) 模具的材质是否适合强度和磨损的要求。
- (7) 模具的结构是否考虑到减少制造工时的问题。
- (8) 是否考虑到安全作业。

检查模具结构方案，就是重点落实上述问题，并把解决成形性能、作业性能和制造上的障碍作为课题。模具的标准零件和基本结构的使用范围要标准化，还应根据生产量确定模具结构。

c. 模具设计上的注意事项

图 4.160、图 4.161 和图 4.162 都是具有平滑曲面部分的加工图。图 4.163、图 4.164 和图 4.165 为不同工序的模具结构方案图。象这样具有宽幅而平滑曲面的零件，在其中部容易发生张

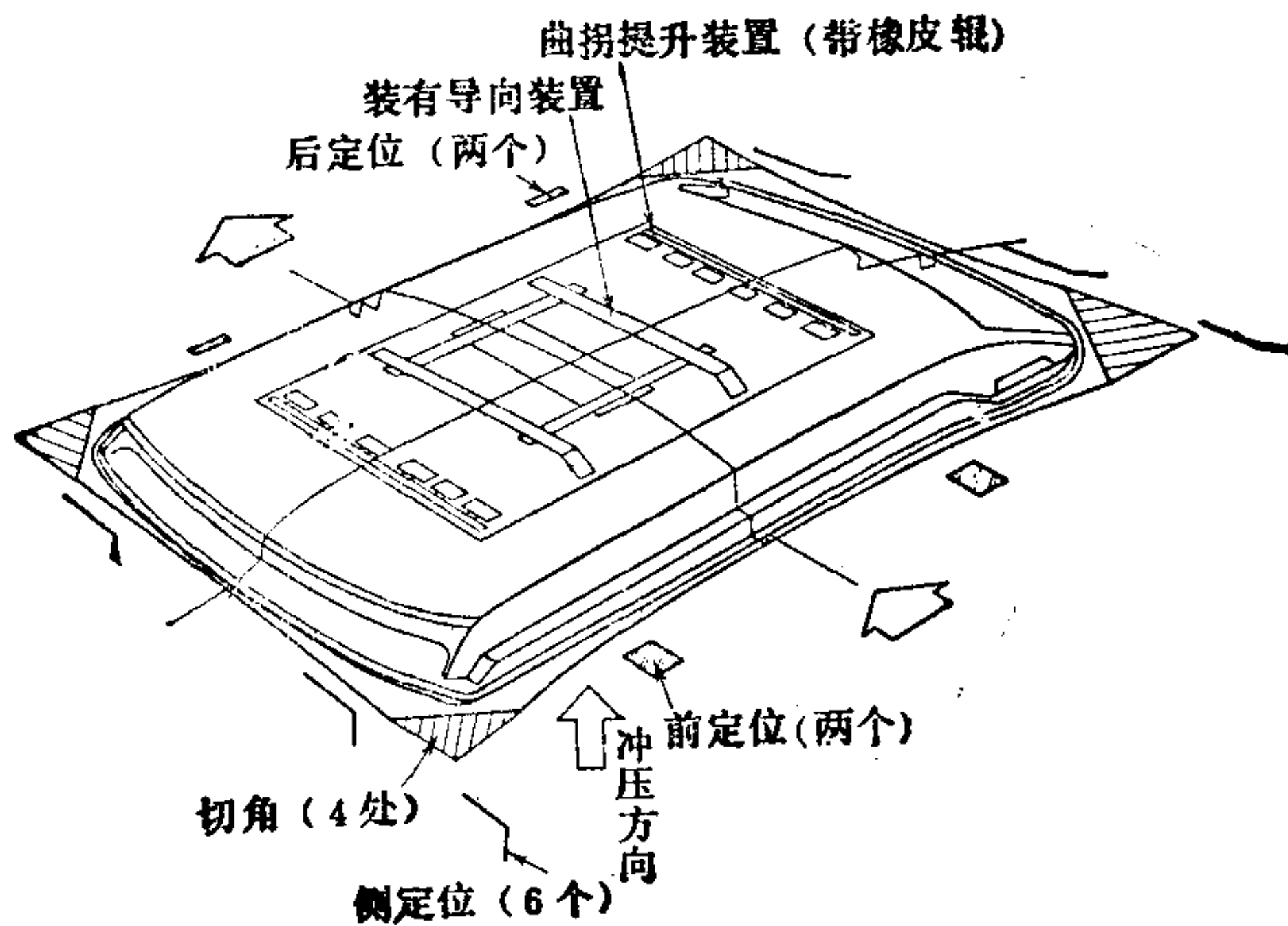


图4.160 拉延工序

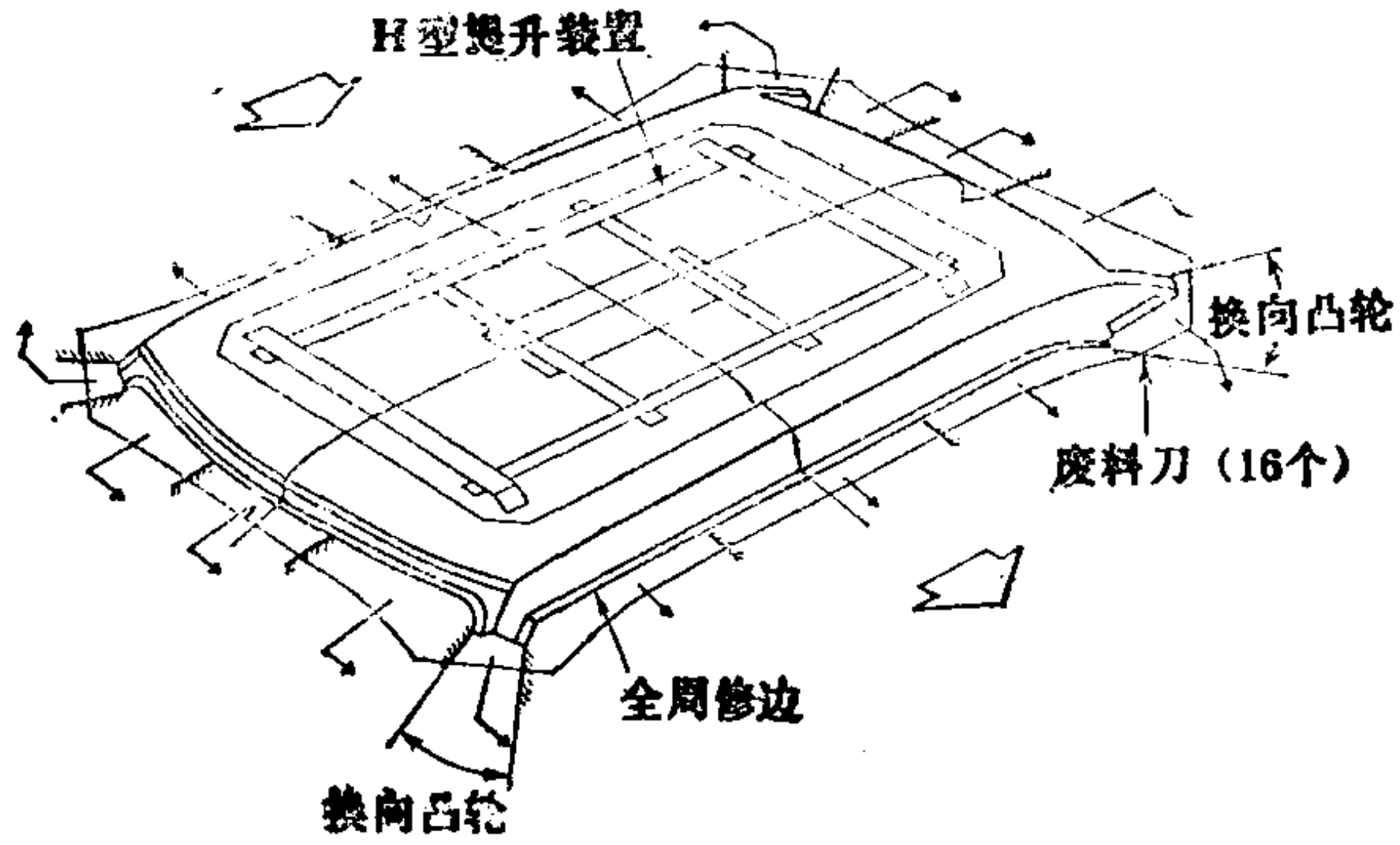


图4.161 外形修边工序

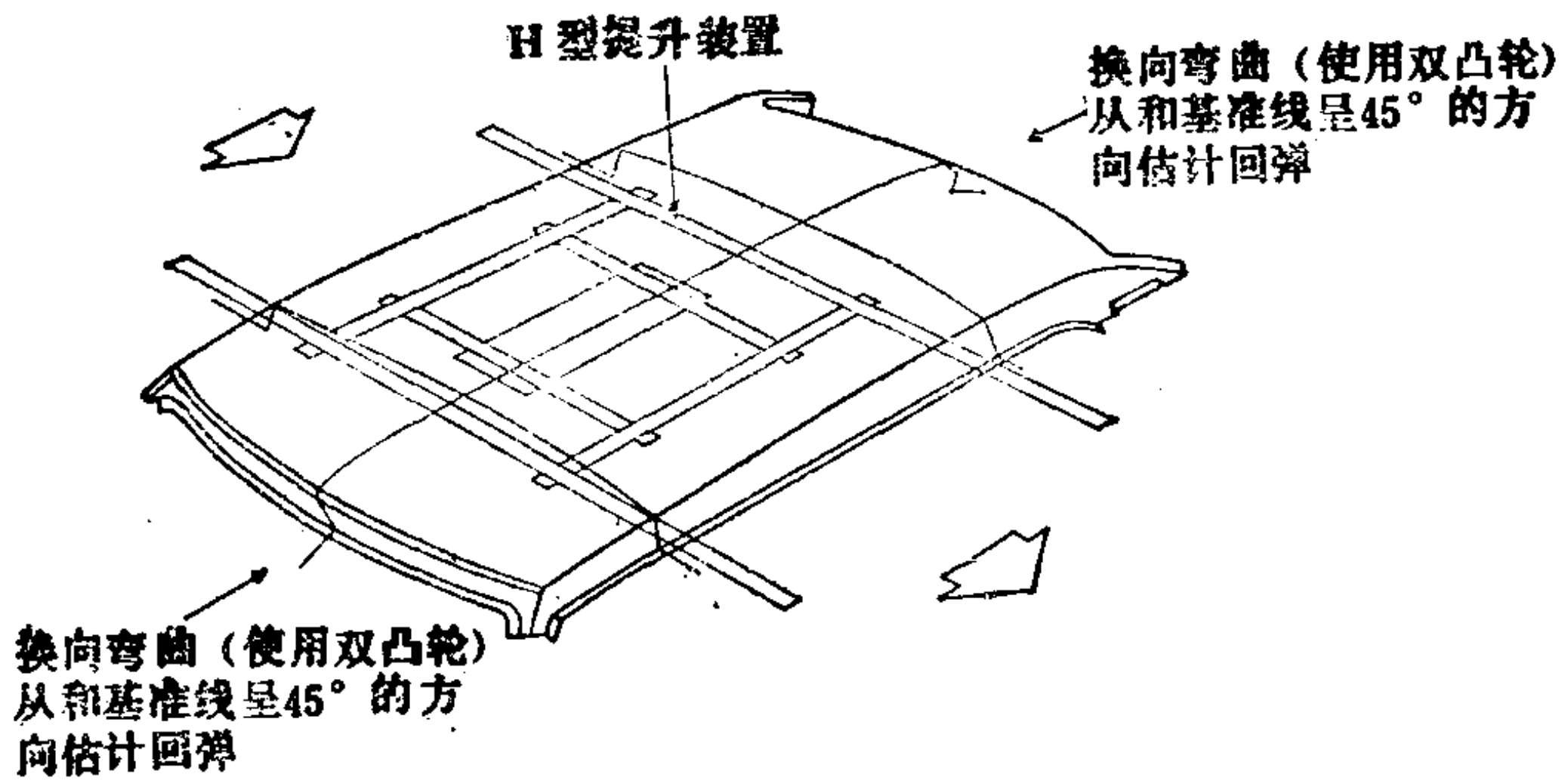


图4.162 换向弯曲工序

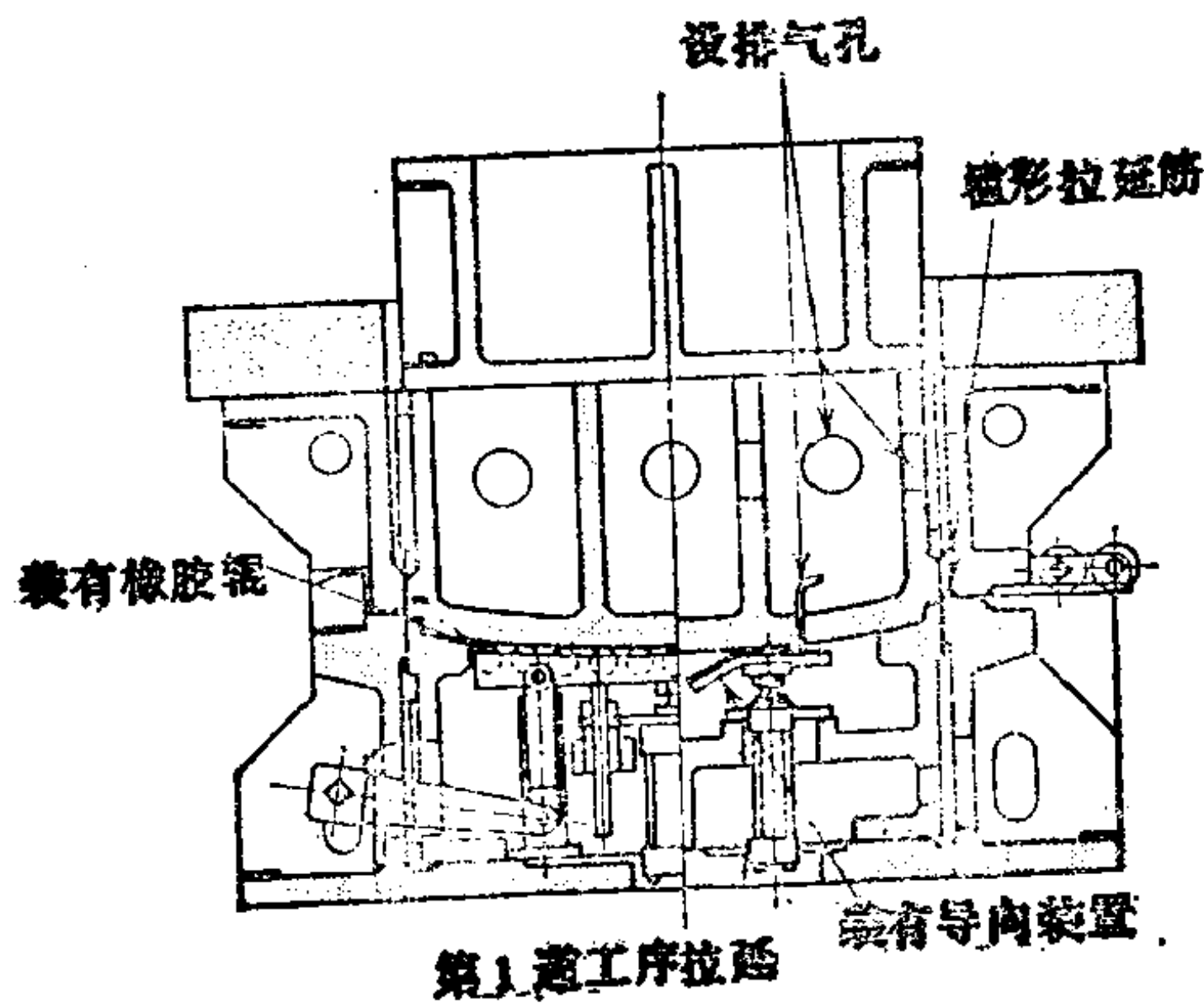


图4.163 结构方案图 (1)

拉刚性不足的问题。另外，在拉延成形时还易引起真空现象（图4.147和图4.153所示零件的情况亦如此）。在设计这类零件的模具时，应考虑有关成形性能的问题，对此应在制定成形工艺时加以探讨，具体内容如下。

（1）为防止发生张拉刚性不足，要考虑到拉延深度和拉延筋；为减少材料的滑入可采取分段拉延，而拉延筋则应采用槛形拉延筋。

（2）为防止发生真空现象，可在凸模上设置排气孔。另外，为使上模的加强筋座内部也成为通气式的，可设置通气孔。

（3）图中所示在拉延成形中左右负角部分的形状，应保证在换向弯曲加工时的弯曲成形量最小。

（4）负角凸缘的换向弯曲成形要估计到回弹问题。

另外，在模具结构和自动化的关系上应考虑下列事项：

（1）切去坯料的四角，以便于外形修边工序的进料；确定废料处理的滑槽和下落方向。

（2）由于前后轮廓间隙大，为便于插入薄板应使用大型导向装置。

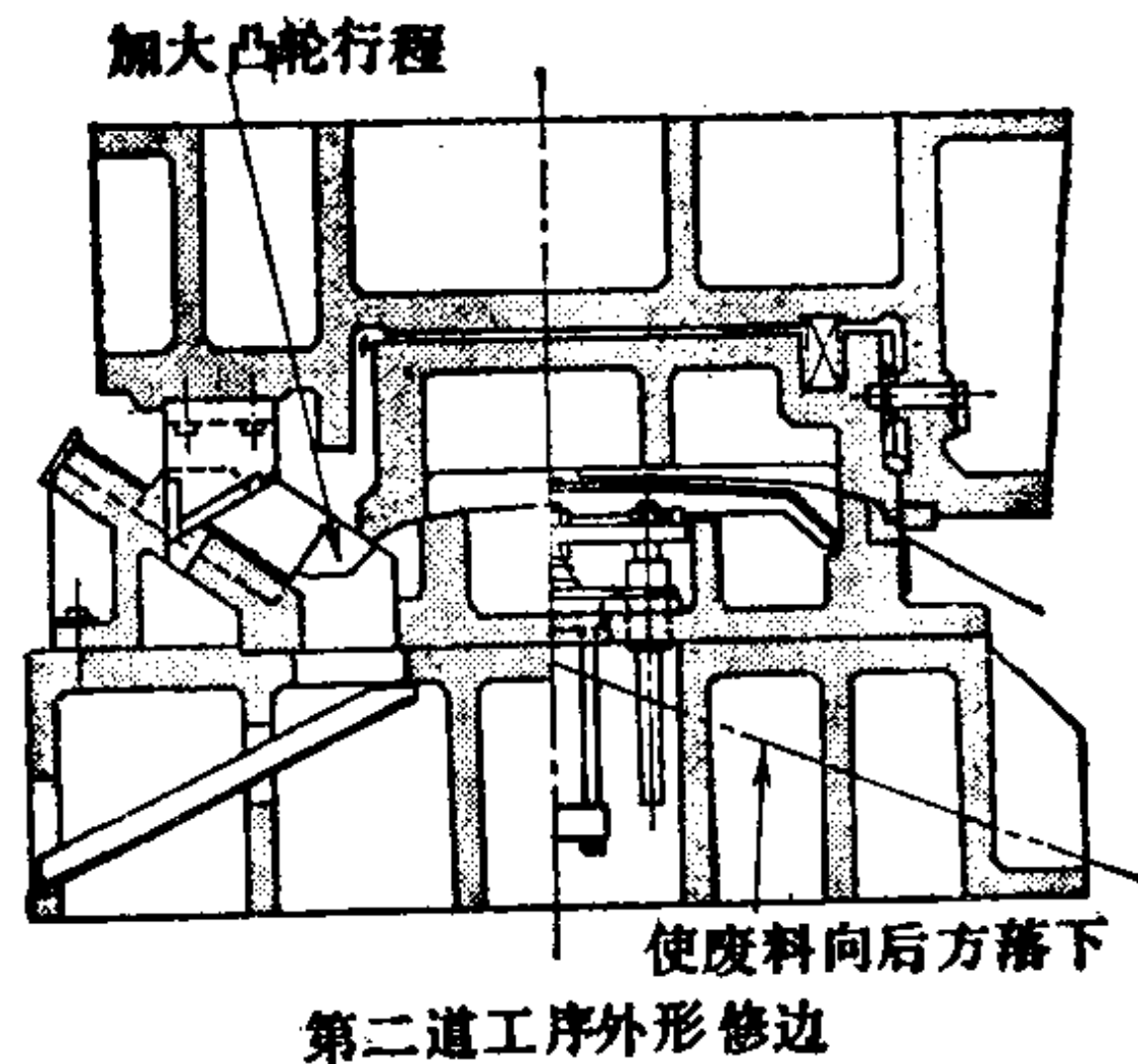


图4.164 结构方案图（2）

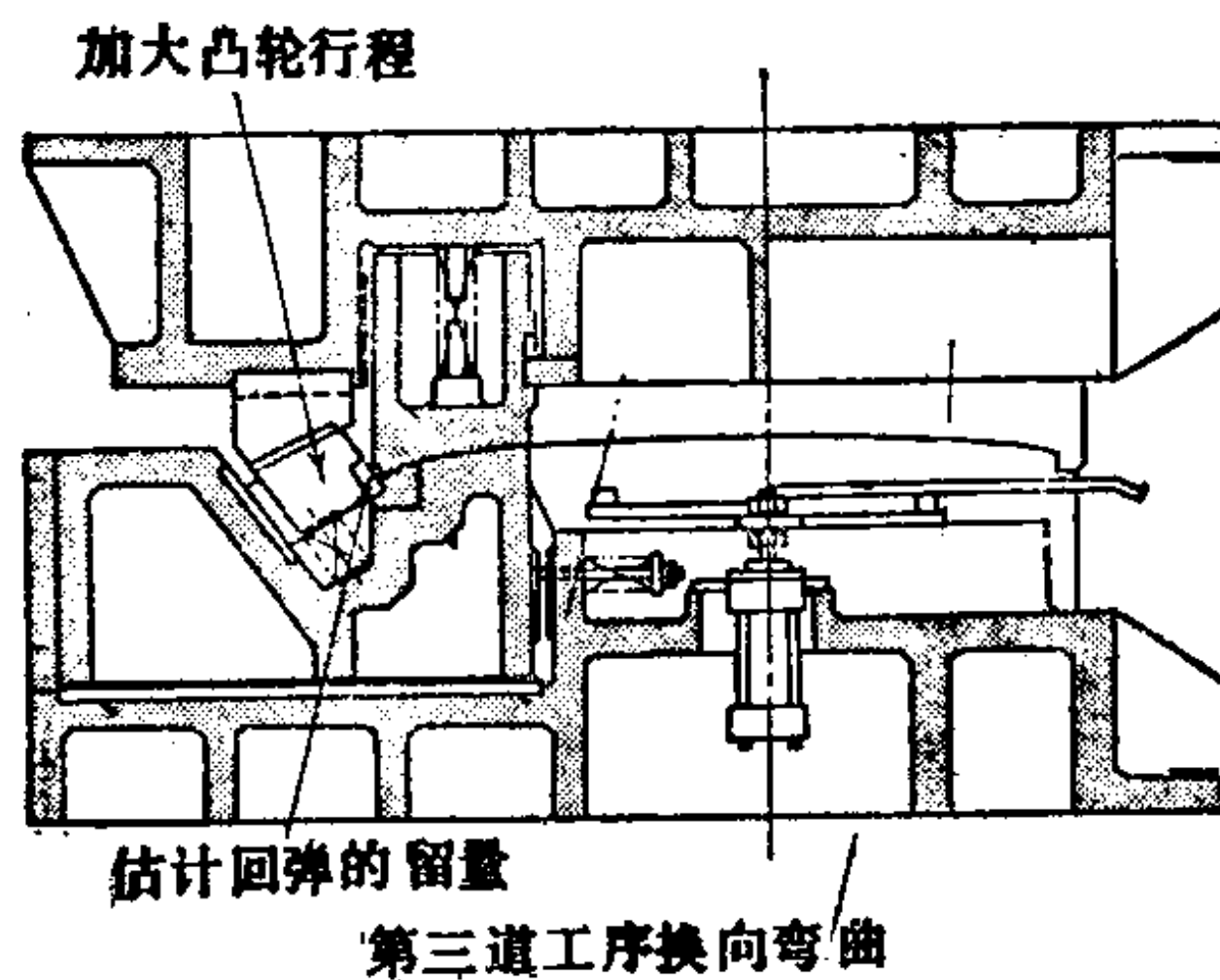


图4.165 结构方案图（3）

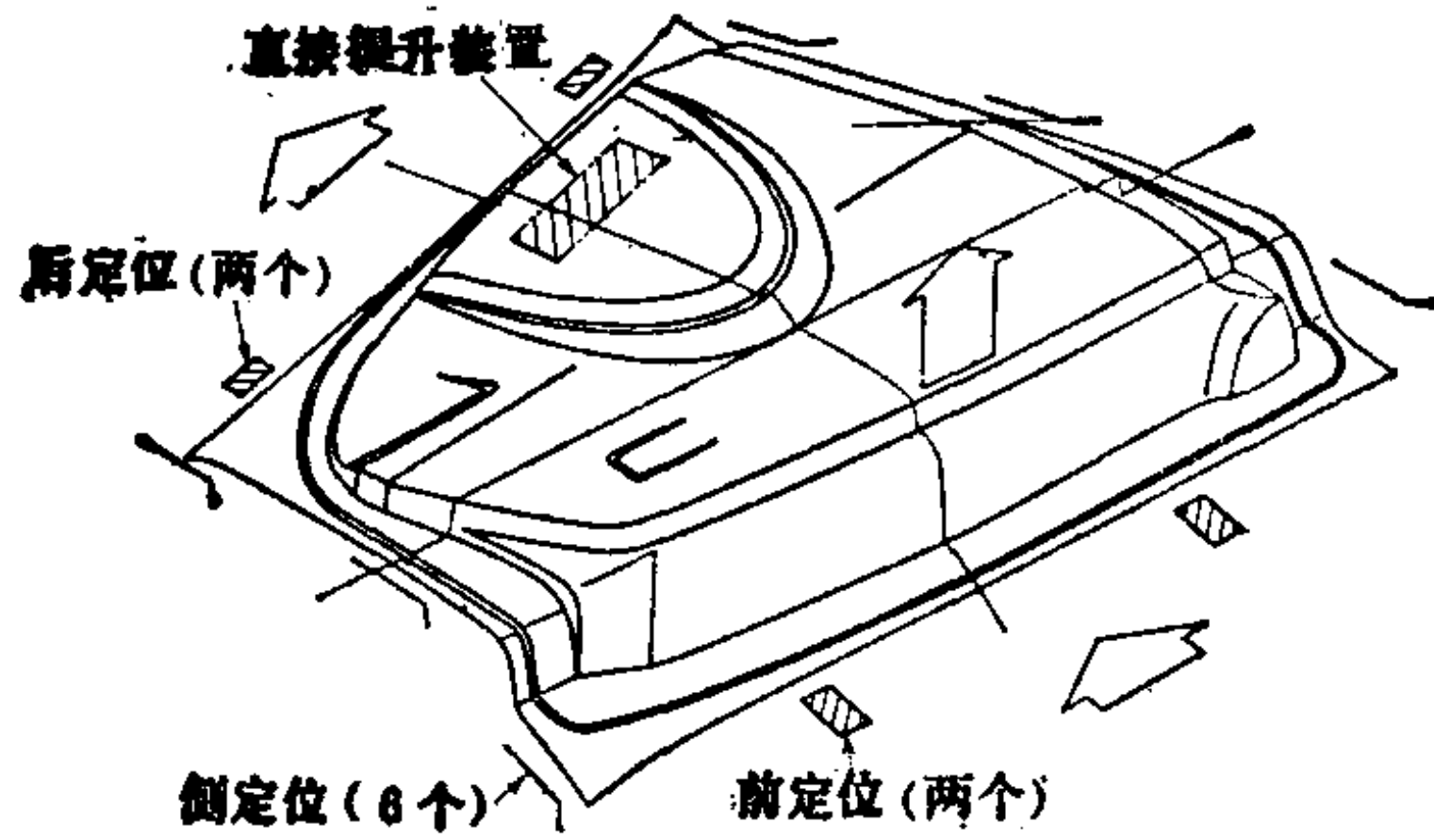


图4.166(a) 前护板的冲压作业图
1/6拉延

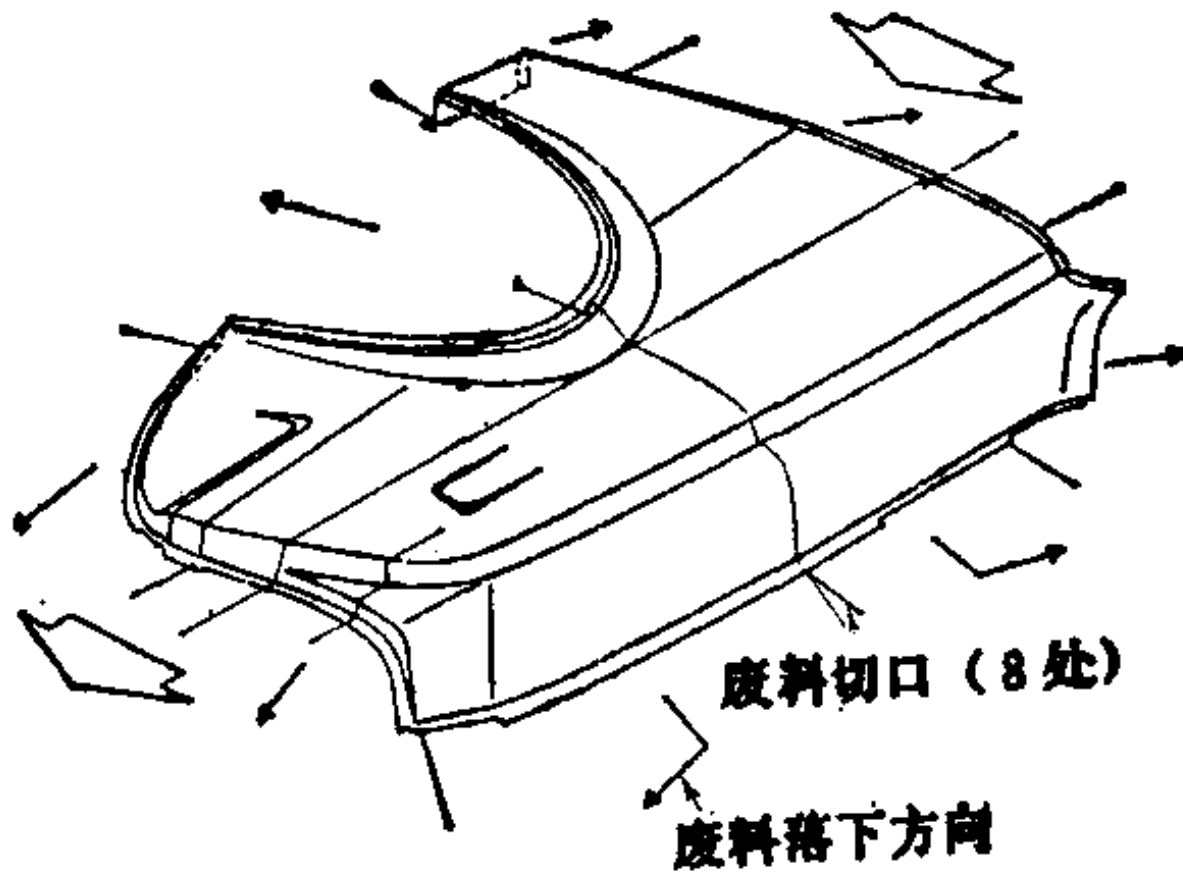


图4.166(b) 前护板冲压作业图
2/6外形落料

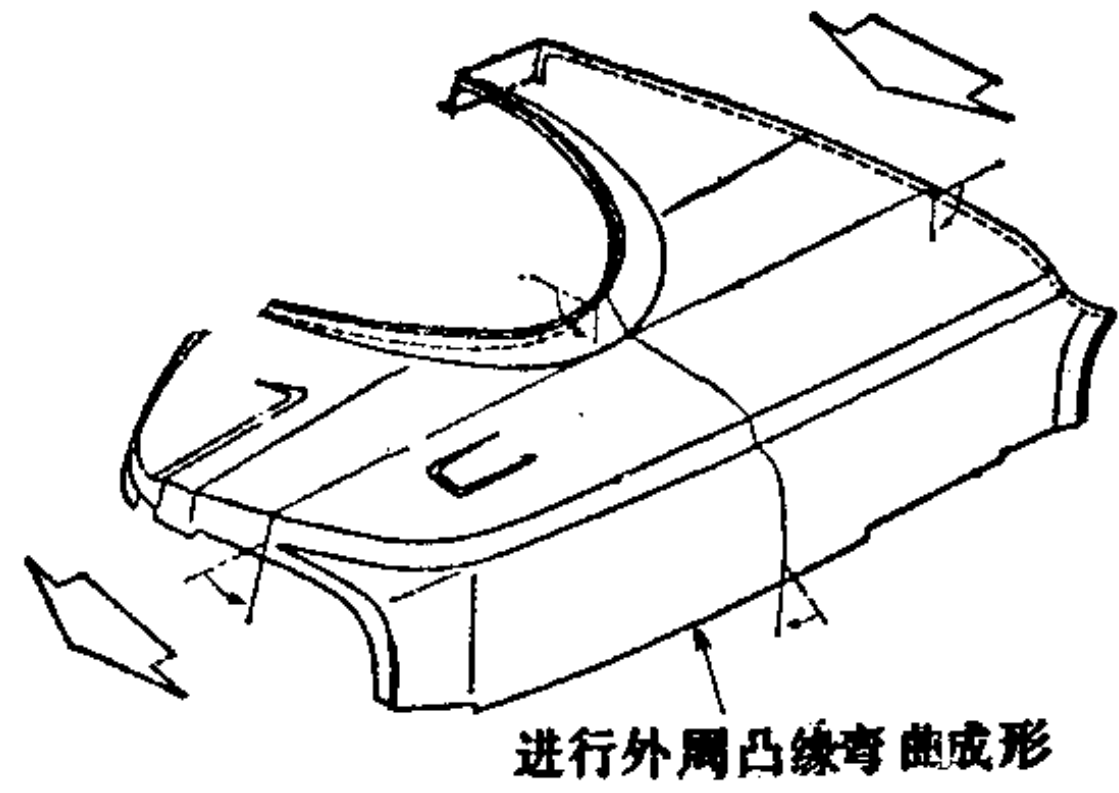


图4.166(c) 前护板冲压作业图
3/6弯曲

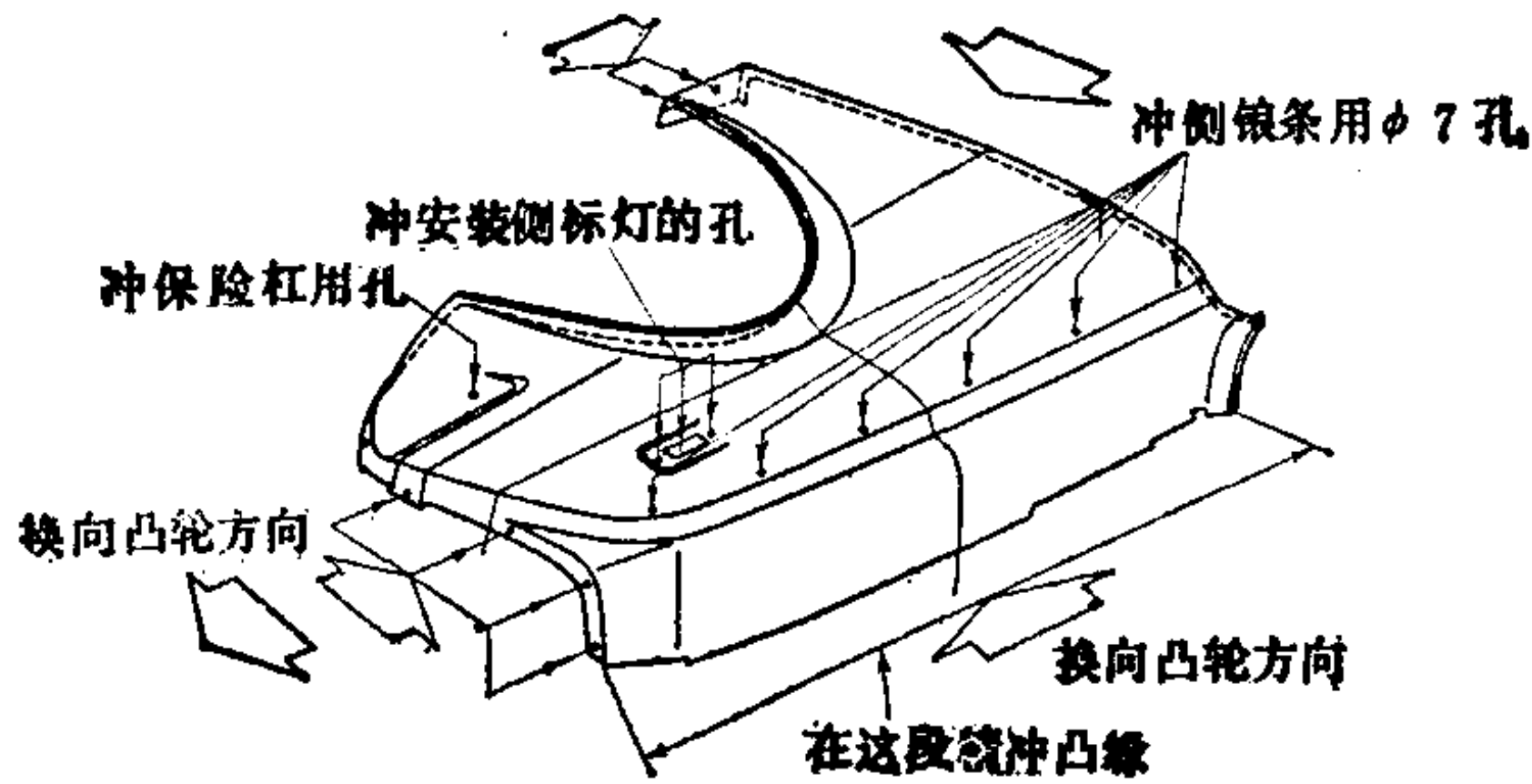


图4.166(d) 前护板冲压作业图4/6冲孔

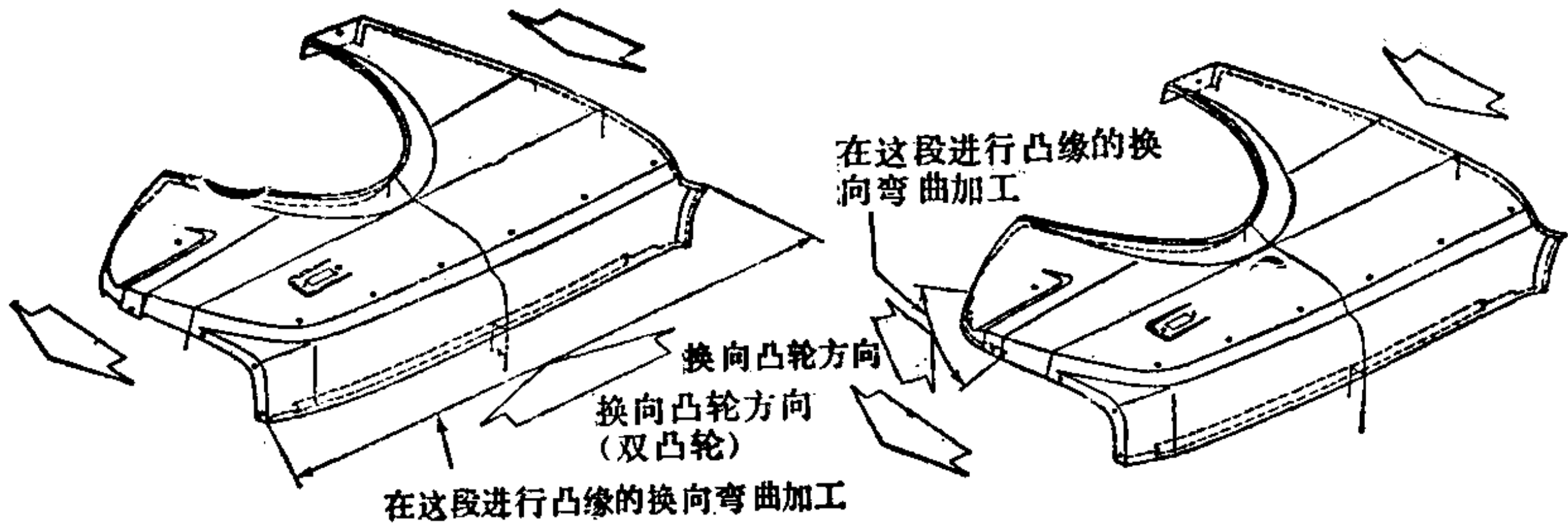


图4.166 (e) 前护板冲压作业图 5/6换向弯曲 图4.166 (f) 前护板冲压作业图 6/6换向弯曲

(3) 为提升张拉刚性较弱的部分，拉延工序的提升装置应使用能防止变形的橡胶辊。

(4) 在外形修边工序中，模具的结构应能使废料从后方落下。

(5) 在换向弯曲工序中，凸轮的行程应根据装料和卸件的情况尽可能加大。

在设计其他大小尺寸零件的模具时，重要的是从尺寸方面更加仔细地研究记入工艺方案的所有项目，不仅考虑一道工序，而且要经常考虑前后工序之间的关系来进行模具设计。图4.166所示为前护板的冲压作业顺序。

4.7.5 模具的试验

制成的模具在投入大批量生产以前，要通过试冲压力机或大量冲压用压力机进行试验。

a. 试验的目的 模具试验是为了探讨后述一些项目，修正不合适的地方和积累资料等，以及估测大量生产开始后的生产稳定性。

(i) 制件设计 模具设计和质量管理标准中给定了加工条件和产品质量标准等，模具试验就是对照这些特性，鉴定制件质量和模具的各种功能以及修正其不合适的地方。

(ii) 确认冲压作业的作业特性 (模具安装, 设备及制件的装卸, 以及同与此有关的机械化装置之间的关系) 和安全性 (操作者、设备、模具)。

(iii) 确定选材 (确定钢材品种和板坯形状)

(iv) 确认作业顺序 (制订作业顺序表) 和生产率及生产成本。

(v) 确认模具的PM (预防维修) 所需的项目和PM的准备工作。

(vi) 整理上述各项工作的有关资料, 回送给各有关部门作为下次设计和制造模具的参考。

b. 试验的准备

(i) 试验人员的准备 试验人员的一项重要工作是, 根据模具设计计划书充分了解模具设计者的意图, 研讨加工工序、模具结构、所需压力和压边力、所需气垫力、其它附加拉力和润滑条件等加工条件, 进而确认定位、装卸料用的机械化装置、废料处理方法和前后工序的连接方法, 决定工作顺序方案。然后, 研讨气动锁紧装置和返回装置等机床附属装置的使用问题。最后定出在模具试验中鉴定该模具的有关事项。

(ii) 模具的准备 模具的最后加工和检查, 一般在修模压力机上进行。因此, 关于模具的重量、尺寸、形状 (特别是间隙的精度、凸模和凹模的表面加工精度、 r_p 、 r_d 的加工精度等) 以及各种设备的检查结果, 均可预先通过模具设计计划书、一般检查记录表和修模压力机的记录等来加以确认。此外, 还要确认安装模具所必需的缓冲销、螺栓、U形夹板和衬垫等。

(iii) 材料的准备 材料的尺寸形状和钢种, 首先要在模具设计阶段参考整体形状和局部形状的成形难易程度加以选定, 但在试验时要准备两种材料。并在所准备的不同钢种的板材上, 一定要画上小圆圈, 以此来鉴定局部形状成形的难易程度和变形过程, 这样处理有助于缩短试验时间和便于定量分析试验过程〔1〕。

为观察板坯的变形状态, 在板坯的表面上用划线或其他方法

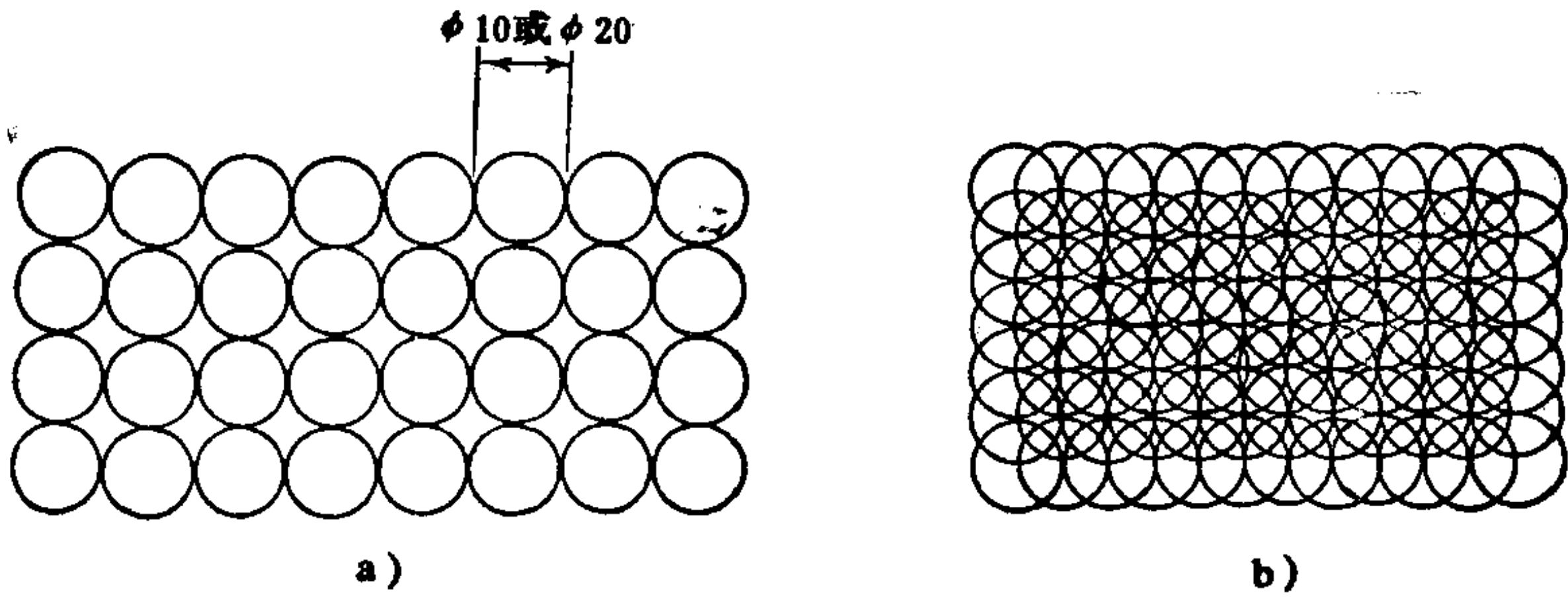


图4.167 小圆制作格式示例

a) 外切形 b) 搭接形

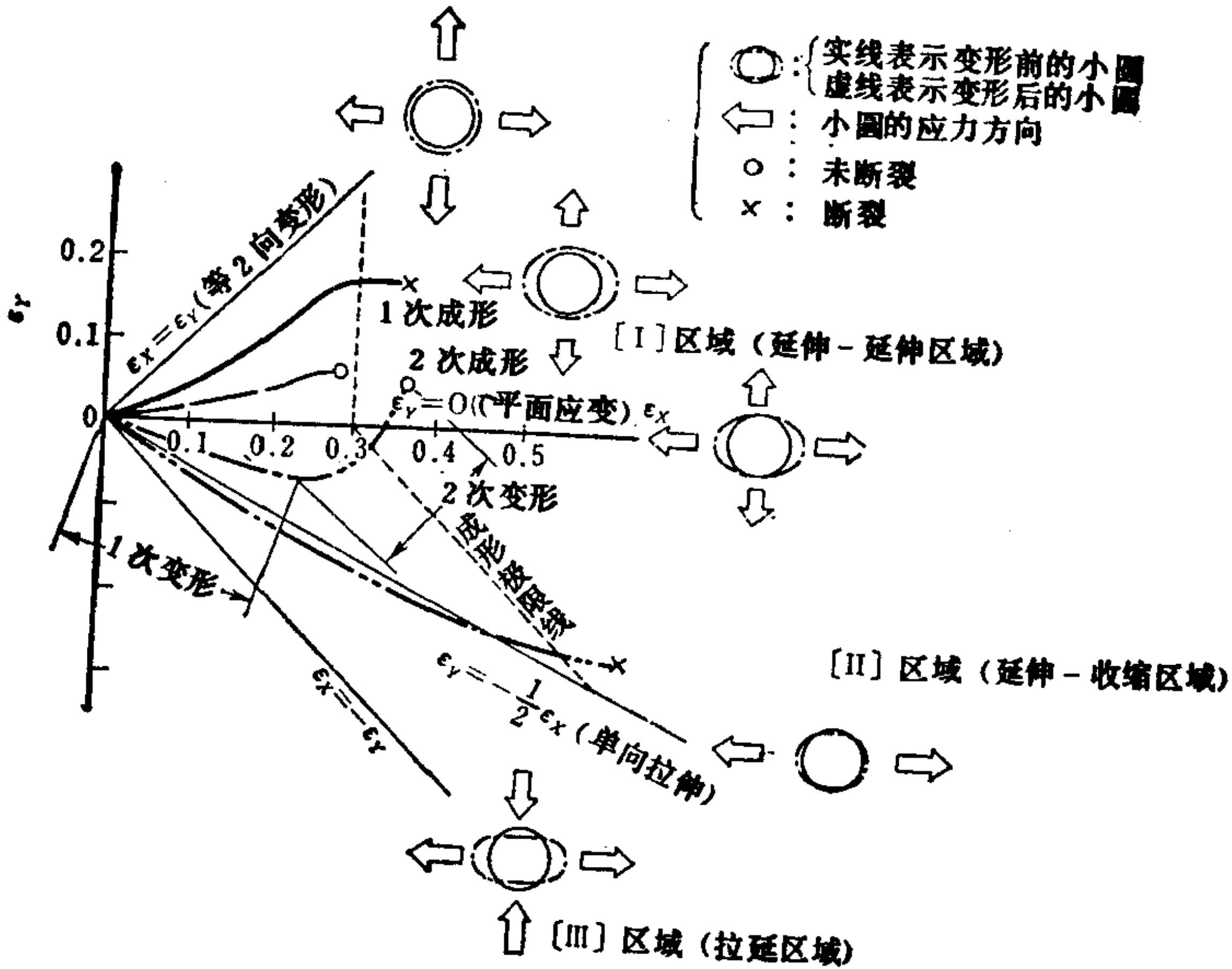


图4.168 分析小圆产生的变形量 (所划小圆的双向值表示变形路径成形极限等)

划上方格或圆圈，这就是所谓的划线板坯，最多的划线板坯有如图 4.167 所示的画有一系列小圆圈的板材。其制作方法有：①划线；②感光复制；③印刷；④电蚀等。

(iv) 变形路径 变形状态的探讨是通过下列步骤进行的，即将压力机的行程分为几段，对划有 $\phi 10\text{mm}$ 或 $\phi 20\text{mm}$ 圆圈系的板坯进行成形，测定断裂部分或有断裂危险部分的变形量，然后通过变形路径和变形量与材料断裂极限的对比，来探讨成形的严密性。

图 4.168 所示为其一例。用上述方法可以观察到成形形状和变形路径之间存在的一定倾向，其情况如图 4.169 所示。

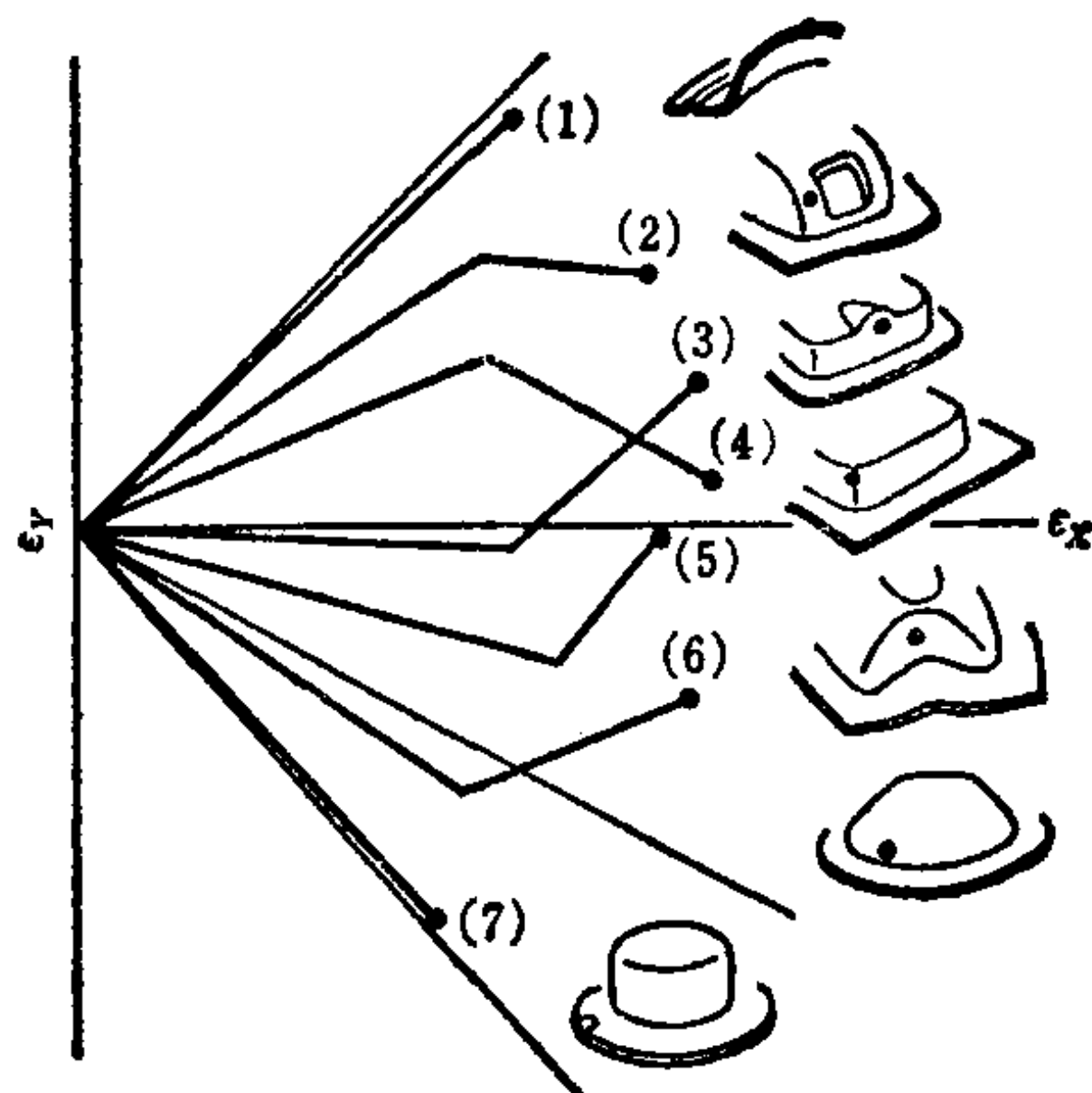


图4.169 成形形状和成形路径的一般倾向

图 4.170 为用变形状态图表示某断面变形路径的例子，据此即可研讨变形传播的情况。图 4.171 表示变形状态图的基本类型。

(v) 设备的准备 对照模具情况和加工条件鉴定设备的加压能力、气垫能力、工作台和滑块的面积、行程、闭合高度以及其他附属装置等，从而选定适当的压力机，同时还要鉴定压力机的精度。

(vi) 润滑油的准备 从一般的机械油到高性能的压力机工作油都要备齐，并确定润滑部位。

(vii) 检测工具的准备

c. 试验顺序和鉴定项目 冲压作业是由准备（把模具安装在压力机上的作业）、调整（通过试压几张板坯，确认压力机的状态、模具状况和制件质量等，同时调整和鉴定加工条件以进行大量生产的作业）、加工和分解（加工完了把模具从压力机上取

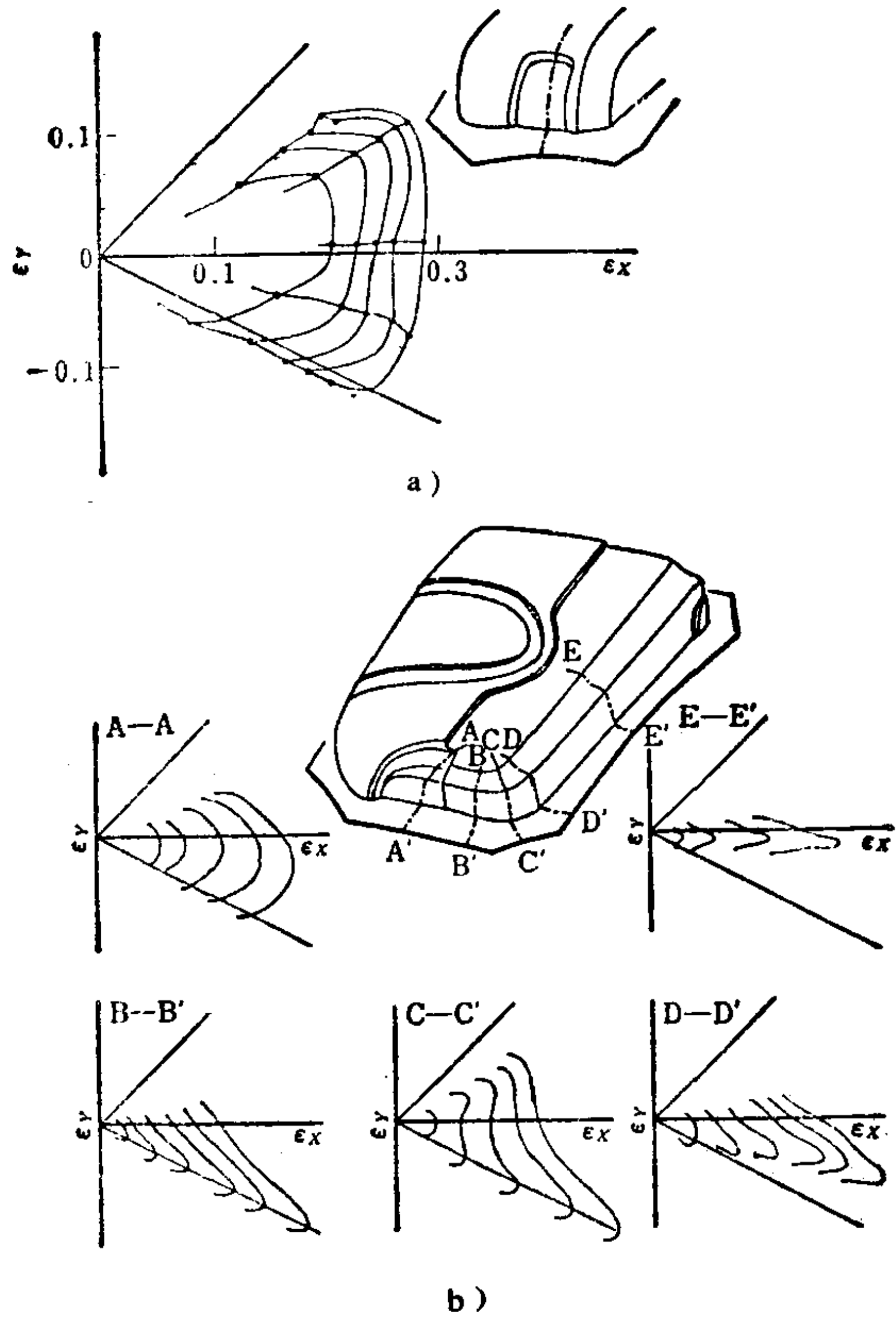


图4.170 试冲时由修正局部形状引起的SCV变化示例
 a) 后护板的变形状态图 b) 按零件部位和形状差异的变形状态图示例
 (SCV为变形状态图。——译注)

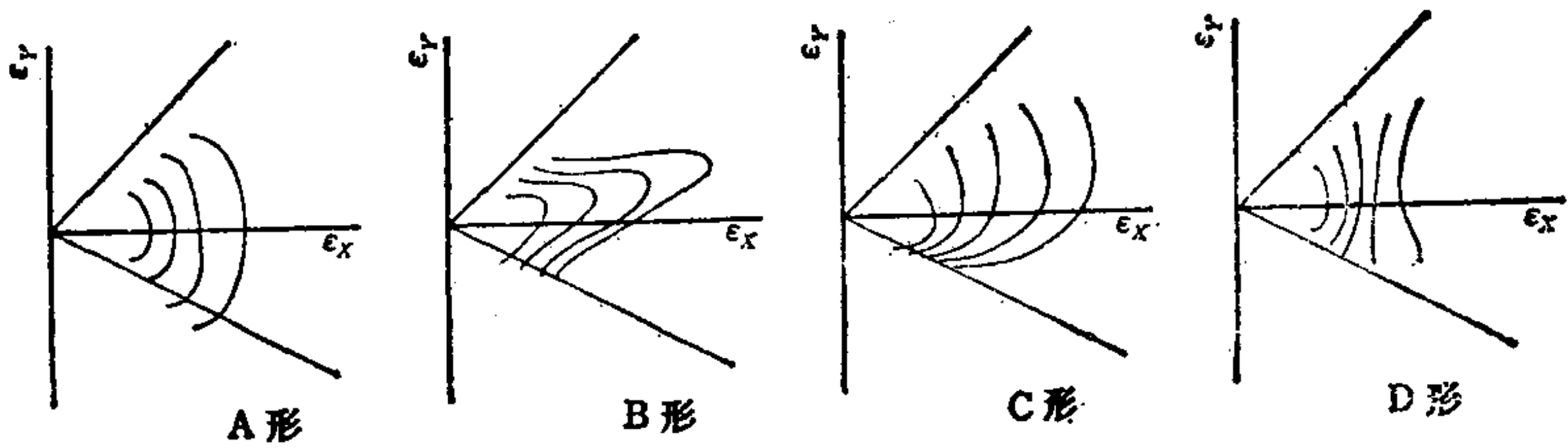


图4.171 变形状态图的基本类型

下的作业) 这样四项作业构成的, 因而模具的试验也应在这些作业顺序中分别进行。另外, 冲模试验一般包括考察每种加工件的成形性和作业性的单个模具试验和串通所有工序的生产线试验。

(i) 准备 冲压作业的准备时间比每一个制件的加工时间长得多, 缩短准备时间无疑对提高生产率有很大影响。为此, 在试验时必须对准备工作的难易及其作业顺序进行充分研究。另外, 由于模具重量大, 有的上模和下模合起来甚至超过 20 吨, 对此如果在准备或分解时不注意操作或准备不充分就会引起重大事故, 所以事先必须对吊装工具、模具吊挂位置和吊钩等进行充分研讨。

为了使换模方便, 广泛采用了可动式工作台。模具虽然用起重机或换模操作机、提升机等安放在预定的工作台上, 但在这时仍要检查模具安装用的模具凸缘部分的固定孔或切口等的位置。使用气垫销的模具, 要在工作台规定的位置上预先插入气垫销。这种情况下的重要工作是在确认气垫销长度和根数的同时, 要检查气垫销插入后的高度, 并确认装模后与气垫销的接触是否均匀。此外, 还要围绕压力机进行以下工作: 按照模具说明书操纵滑块调整装置来调整闭合高度、调整平衡装置的压力、调整超载保护装置、调整液压坯料夹持器以及鉴定安全装置等。

其次, 要遵循作业顺序, 预先筹划好安装模具用螺栓的长度与安装位置, 以及要使用的衬垫、U 型夹和辅助衬垫等, 推敲实际作业方面的不当之处, 还要在确定作业顺序的同时, 修正准备工作中发现的模具不当之处。

此外, 还要测定这种情况下的实际工时, 用来作为制定标准作业时间的参考资料。

(ii) 始动和调整

(1) 把模具安装在压力机上并确认螺栓拧紧后, 使滑块上升至上死点停止。确认安全装置的动作, 根据 (b, i) 和 (b, ii) 项中准备的资料通过目测或简单工具, 确认上下模具各部的加工状态、附属装置的功能和拧在各部的螺栓的拧紧情况, 如有

必要还得往滑动部分加油。

(2) 操纵微动点动装置使滑块上下动作一两次, 确认上下模具的接触以及凸模导轨、导柱和侧挡块等的接触情况。

(3) 根据模具设计书的指示条文, 首先调节施加的压力、压边力和气垫压力等。在有模具气垫行程调整装置的情况下, 还要调整气垫销的高度。

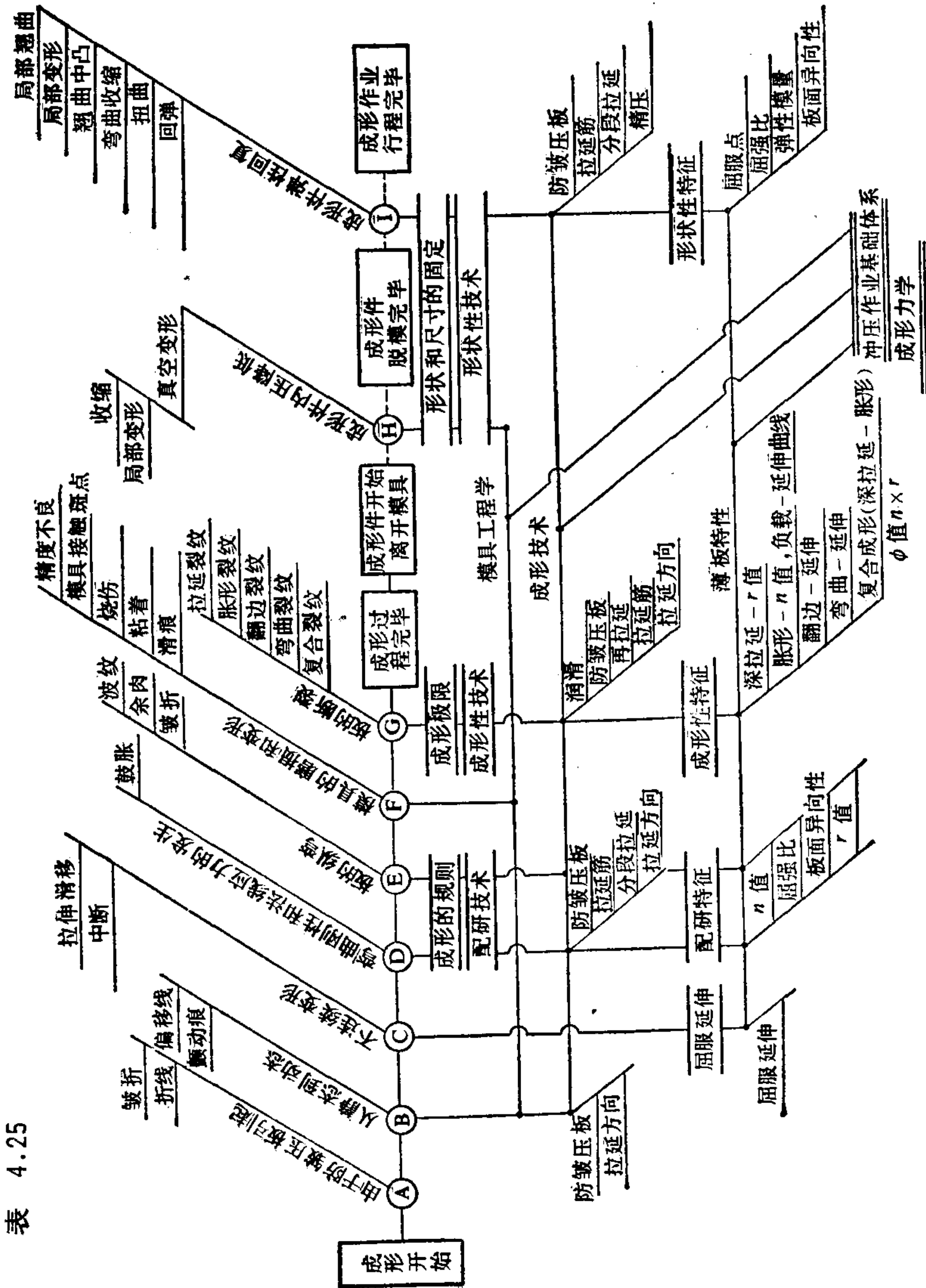
(4) 而后操纵压力机进行微动、点动和安全行程等的变换并做几次空冲动作。在此过程中进一步鉴定(2)项指出的接触情况。

(5) 最后放进材料进行第一次试压, 但这时要作拉延深度为 $5\sim 10\text{mm}$ 的浅拉延, 并且必须防止不测事故对模具的损坏。根据试压结果再次调整滑块, 一面反复进行试压、一面考查模具的成形性能和作业性能, 并对模具和加工条件的不当之处加以修正。最后给定上模与下模的相对位置。

(iii) 成形性的研讨

模具试验中的主要问题是由工件上的断裂、皱折、精度和表面形状等方面的缺陷〔2〕来暴露的。例如表4.25所示, 这些不良现象发生于成形加工的进程之中。它们是: “裂纹”、“皱折”、“波纹”、“余肉”、“颤动痕”、“偏移线”、“滑痕”、“粘着”、“模具接触斑点”、“真空变形”、“局部变形”、“扭曲”、“松弛”、“回弹”、“局部翘曲”、“张拉刚性不足”等等。因此, 修正试验中暴露的模具不当之处也要借助于分析其制件上反映出的缺陷。

对于大型零件的成形, 一般通过拉延和胀形的复合成形来实现。例如在双动压力机上的成形加工, 就是通过外滑块的下降利用防皱压板先把板坯压在凹模面上, 接着通过内滑块的下降利用凸模侧部(r_p)和凹模侧部(r_d)以及凸模底部使其先进行弯曲变形, 随后进行胀形, 进而随着内滑块的下降而凸模压力逐渐增加, 迫使板坯从凹模面流进模腔, 结果以拉延与胀形的复合成形形式直至下死点而完成成形。大型零件的成形是由凸模通过板坯来传递成形力的。因而在成形过程中的板坯各部会出现由防皱压边力和



拉延筋等引起的约束外周的附加拉力、因模具形状影响而在各个部分产生的互不相同的成形力，以及各种应力状态和变形状态。如果不能对这些受力状态进行充分调节，材料就会余出而产生皱折，另一方面，当成形力超过板坯断裂力后则会产生裂纹，通过以上事实研讨成形性能时要考虑以下事项。

(1) “裂纹”和“皱折”的研讨 关于裂纹问题，当板坯的主要变形是压缩凸缘变形时，可通过减少防皱压边力、使用润滑剂、增大 r_d 等方法加以解决；当板坯的主要变形是胀形变形时，可通过增大 r_p 和调节凸模头部的润滑条件来防止。

此外，还有利用划小圆的方法认识其变形路径和变形状态等的差异进行调整的。图 4.172 就是通过修正形状来防止断裂的例子。

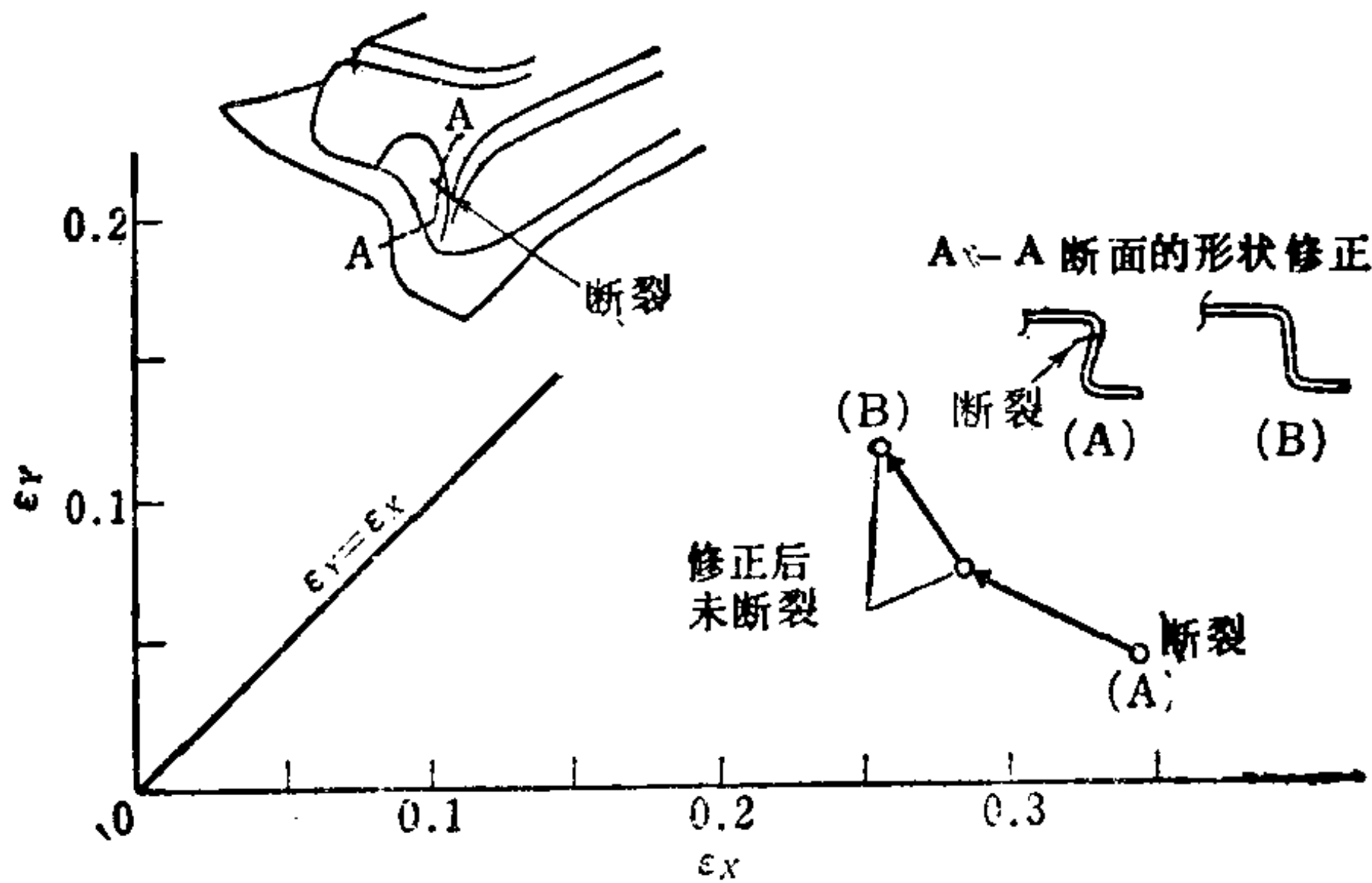


图4.172 试验中因修正局部形状引起的SCV变化示例(小林)

关于“皱折”问题，是指用复杂多曲面模具支持板坯时，由局部拉延或折曲作用所产生的缺陷，也指成形中发生在板坯上的压缩或剪切应力引起的塑性纵弯曲所产生的缺陷。对于前种情况，或将板坯放进模具前先施以预弯曲，或改变拉延筋的配置试一试，对于极特殊的情况则要进一步研究防皱压边面的形状、加工方向、凸模形状和凹模孔轮廓形状等模具问题。对于后一种情况，应根据防皱压边力的增大和板坯尺寸及形状的变更等情况，

或通过使用良好的润滑剂来提高防皱压边力，或考虑采取局部涂抹润滑剂、合理安排拉延筋等措施。采用这些办法将增大附加拉力、降低压缩应力、并使拉力均匀，由此将会导致剪应力下降，而达到防止皱折的目的。此外，周边变形大的那部分材料会转移到零件的某一部分而产生纵弯曲，形成“余肉”缺陷，皱折是非常轻微的而且是波距大波幅小的“波纹”。对于这些缺陷，除采取上述措施外，还要设法采用适当间隙以及能吸收和集中皱折的凸模形状等来加以防止。

(2) “颤动痕”和“偏移线” 两者产生于从凸模接触板坯开始发生变形直到成形完毕之间，皆因板坯变位所致。所谓颤动痕，是指成形初期由于 r_d 部分静摩擦状态的拉伸弯曲作用，使板厚减少和该部的弯曲刚性增加，致使在成形后的侧壁部分留下线状痕迹而言的。所谓偏移线，是指在成形完毕以前的期间，当作用于板坯上的力不能使变位在凸模底面上某棱线两侧均衡时，板坯的一侧就要越过棱线被拉移到另一侧，从而在加工面上留下了初始棱线的残迹而言的。防止前者的措施有：提高凹模或凸模面与 R 部连接部分的精度，或调整拉延筋到板坯外周以及凹模肩部的距离来调整拉延筋的有效时间，调整防皱压边力使其在行程后期起作用等。有时也通过改进防皱压料板板面的形状，增大轮廓半径和采用圆锥面等办法来变更其轮廓部分的形状，或者分工序加工并研究第一和第二道工序的 R 分配问题。也有通过大幅度修正模具来使颤动痕退避到制件成品以外的。

防止后者的办法是：在加工开始前先防板坯弯曲，在成形中途或成形后期可加进工艺孔或切口使棱线变化量保持平衡，采用增加拉延筋、附加分段拉延等也是可行的，或通过限制 r_d 部分的材料滑入量来加以防止。

(3) “滑痕”、“粘着”、“模具接触斑点” 这些缺陷都是由于板坯和模具的摩擦以及模具本身的变形引起的。这时应对间隙和模具的加工精度再行调查研究，如果合适则可使用含有耐高压添加剂的润滑油，或去除板坯的毛刺和粘在板坯上的尘埃，或使

用经过表面处理的板坯。另外也有采用在模具表面上镀铬的方法。

(4) “真空变形” 在成形结束后, 由于板坯与模具脱离时产生的真空状态使制件在大气压力作用下发生变形, 这就是“真空变形”。防止这种变形的的方法是合理搭配排气孔的尺寸与位置, 如有必要可降低凸模上升的速度, 在使用单动压力机成形时, 还可考虑采用锁紧装置等。

(5) 其他不良现象 有的零件处于凸模底面下方的那部分容易产生“鼓胀”, 有的零件具有倾斜侧壁, 在使用开式模具成形这些零件时会产生侧壁“鼓胀”, 皆因弯曲刚性不足和发生法线应力所致; 成形中产生在板面内的应力分布不均匀会引起成形后的弹性变形, 而该变形又使整个零件发生“扭曲”变形; 能引起零件局部变形的“松弛”和“收缩”等缺陷的原因也如此; 同样, 板厚内的应力和应变分布不均匀会使成形后的曲率半径和角度出现复原而引起“回弹”或“局部翘曲”; 当零件刚性不足而在其成形后又将法向压力加于板面上时, 则会产生能导致显著弹性变形的“局部变形”。这些不良现象都可以通过研讨板坯的尺寸、增大拉延筋和防皱压边力、附加分段拉延等方法增加附加拉力或增加气垫等来加以防止。

(6) 附加拉力的调整和材料的选定 如上所述, 许多不良现象均可通过调整附加拉力加以消除, 而调整附加拉力可根据经验采用以下方法进行: 变更板坯形状, 增减防皱压边力, 修正 r_d 和 r_p , 配置拉延筋, 修正气垫销位置等等。例如在防皱压料面上放进纸张部分地改变附加拉力或研讨能否增加拉延筋等都是行之有效的。关于模具的刚性, 在这个阶段也要进行充分探讨。

在修正附加拉力时, 如使用划小圆的钢板来预先掌握应变的分布、拉延的份量和胀出的份量, 以及了解材料的流入方向和变形过程等, 并以此作为调整附加拉力的方针, 那末就可以尽快估计出提高材料等级或降低材料等级的大致标准。

从提高材料利用率的角度来看, 在设计容许的范围内, 胀出

成形的比例越大越有利，因此应该充分利用材料所具有的成形能力进行成形，这时确定附加拉力则成为一个重要问题。在材料确定以后，用低一级的材料进行加工，并保存其加工记录也是有效的方法。这是因为要检查在大量生产开始之后，在模具磨合达到某种程度的阶段里降低材料等级可能性的缘故。

(7) 制件精度的验证 关于模具，要验证其他加工基准处的妥善性，以及制件在取出作业中所处位置是否妥当。此外，还要利用检查工具检查制件尺寸和形状精度，修正凸模和凹模轮廓部分的不良处，验证各部分的精度在检查标准容许的范围内。

(iv) 作业性的研讨 与研讨模具成形性并行的还要研讨冲压加工的作业性。研讨顺序如下：

(1) 研讨模具的各种附属装置 最近为了实现自动化而在模具中配置了各种装置。例如，装料装置有坯料导板和隐式定位装置，卸料装置有提升器、推料杆、抛掷器和上升溜槽等。因此，要充分利用这些装置的功能，尤其要经常反复调整其动作程序。

此外，还要充分研讨操作者的作业动作、作业位置和模具之间的关系是否妥善等。在装料、加工和卸料等有节奏的操作循环中，事先消除能引起撞击伤痕的因素也是很重要的。

(2) 安全的确认 大型冲压作业往往需要两人以上共同操作，因而必须充分确保作业的安全。为此要研讨模具和操作动作以及光电管安全装置之间的关系；检查双手按钮装置的操作和操作者相互之间的安全，操作者的配置等的关系；选定压力机的操作规范（安全——行程，时限联结等）和作业周期等等。不单要考虑分析该工序的安全问题，也要研讨后面述及的冲压生产线的安全性。

(3) 研讨模具的维修保养 一般来说，冲压加工每一批的生产量都是很大的，如果模具质量不好会使成批产品全部不佳而造成很大损失。还有如在加工中损坏模具就会使设备的开动率显著降低，因而模具的维修保养必须充分保证。为此，在模具试验中必须研讨它在修理时的拆装或更换零件的难易程度，并制订出

模具维修计划。

(v) 全自动或半自动冲压生产线的试验 最近的冲压作业大多是由串成线的压力机和由机械手、传送带、翻转机构和步进式送料器等所组成的半自动或全自动生产线进行的。因此,最终的模具试验必须在从薄板装料机到制件托出的整个生产线上进行试验。这时应该确认的事项是:整个生产线的动作程序 and 安全性,决定包括操作者、搬运装置和辅助工具等在内的生产线的构成。

d. 试验结果的总结 模具试验结果,要进行归纳、综合和记录,分别送给有关生产部门作为模具的附加资料,送给模具设计部门和制造部门作为技术资料。

(i) 关于加工条件和作业顺序 明确最终试验制件的检查成绩和加工压力、防皱压边力、气垫压力、润滑条件等加工条件以及 r_d 、 r_p 和拉延筋等相对于模具图纸上的尺寸的修正量,并且要把这些内容和所定的板坯形状、尺寸及钢种等与材料有关的内容汇总成资料。另外,还应归纳有关准备、加工和拆卸的作业顺序,以及所需时间、作业组成和工作地布置等与作业顺序有关的资料。

(ii) 关于技术资料 作为下次设计和制造类似模具的技术资料,除了要做好(i)项所列的工作以外,还要整理试验经过——产生缺陷以及克服这些缺陷的经过情况(特别是由修正附加拉力所产生的影响)。这时,利用划小圆的钢板对冲压成形进行分析是一种有效的手段。根据材料收缩量与胀出量的测定值、应变分布和变形路径等对主要成形所作的分类,以及对成形难易程度的判断等,都是有关总体形状和局部形状的重要资料。整理这些资料,希望既有多种试验用钢材的、也有最后决定在大量生产中所用钢材的。此外,还应附上材料的机械性能试验数据和材料余量等,一并送交模具设计和制造部门。

4.7.6 大型零件的装置

冲压加工的作业过程大体上可分为以下四个主要步骤:(1)送入材料或半成品;(2)冲压加工;(3)取出半成品或成品;(4)输送给下道工序或装载在托盘上。因此,以降低加工成本为

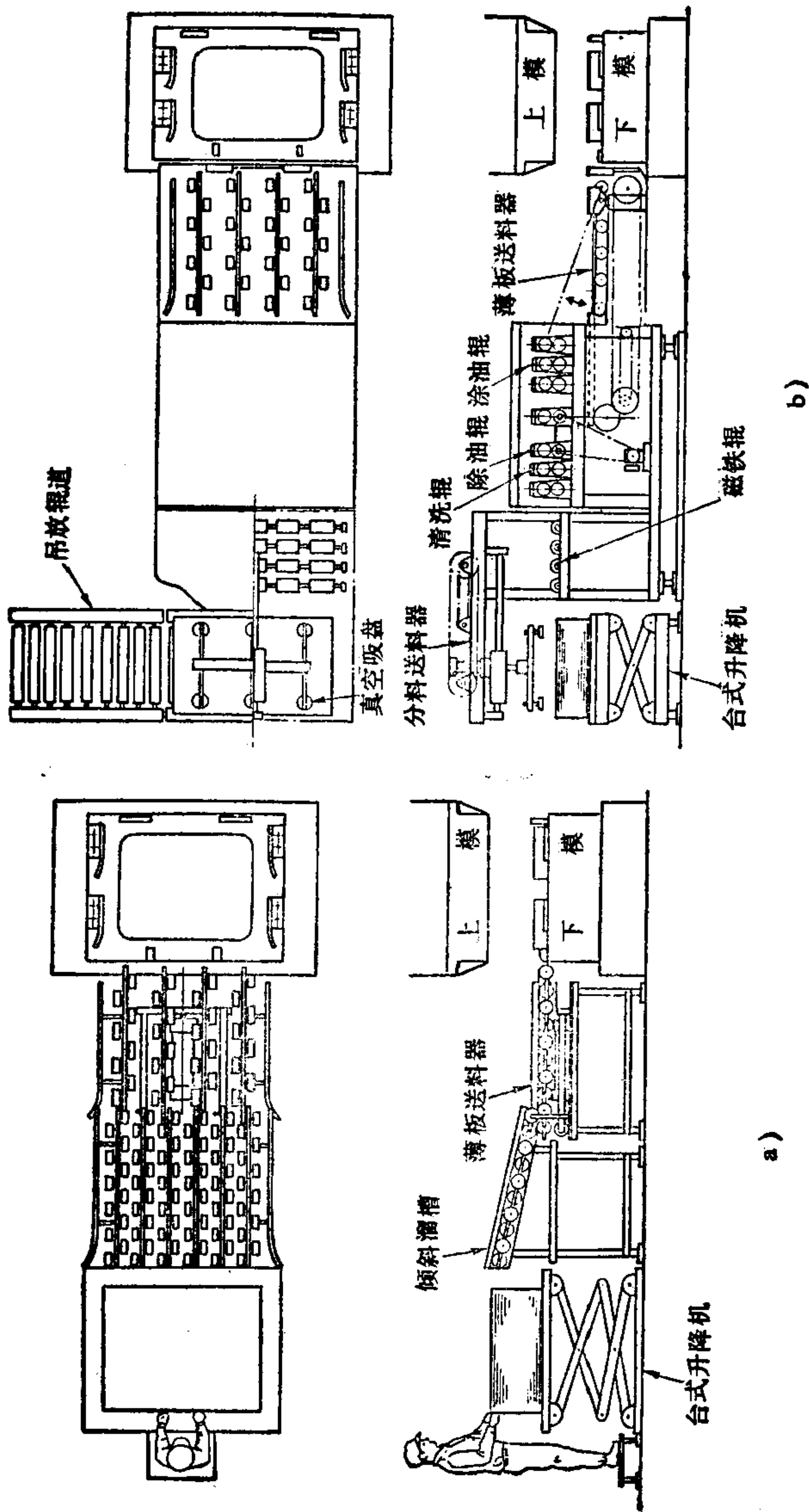


图4.173 板材送进装置
 a) 简单的板材送进装置 b) 自动化的板材送进装置 (附有吊放辊道和洗涤装置)

冲压加工的目标而提高生产率、设备开动率以及节省人工费用所需要的自动化或机械化装置，都要设置在以这四种作业（即加工）为中心的前后送进作业上。特别是大型零件的冲压加工，由于其形状特殊且又大又重，加工前后的送进作业时间比纯加工时间长，因而这些送进装置正在逐渐提高水平。

a. 送进装置

(i) 材料送进装置 材料的送进装置有从简单到复杂的各种形式。图4.173a)所示为简单装置，它是把台式升降机和辊式滑槽联合起来通过手动完成送料的；同图4.173b)所示为薄板输送机由两部分组成：其一为分送器——借助真空吸盘和磁铁辊将板料一张一张地从料堆上吸起、分离再行输送；另一部分为薄板送料器——借助推料杆与辊式滑槽完成送料，当在该装置上加进防止材料回堆等待的吊放辊道和清洗涂油装置后，它就成为自动化的复杂送进装置。该装置上的重要机构是能检出吸取两张板材的装置。

(ii) 半成品送进装置 用手动方式送进中间工序的半成品或用两人操作送进大件时，一般将加工件的一端先置于辅助传送带上，再由一人操作送到模具内。但在全自动生产线上使用步进式送料器时，就可利用装在该送料器上的送料杆或夹爪送料（图4.181）。

(iii) 关于模具问题 在使用送进装置时，必须充分研究送入模具内的材料或半成品的前后左右定位机构。一般除了使用定位销或导轨以外，有时还采用如图4.174所示的隐式定位装置，该装置在送进材料时才现露，而在取出工件时则缩回。

也可采用在压边圈上安装板式导正器等方法。在冲压大型工件时，为了防止材料端部与凹模棱边接触或在凹模型腔中下垂，有时也采用如图4.175所示的将坯料导向装置装入模具中的方法。

b. 取出装置 取出装置有：(a) 装在模具中的；(b) 从模具外部进行工作的。

(i) 装在模具中的取出装置 在取出象车门内外板那样大

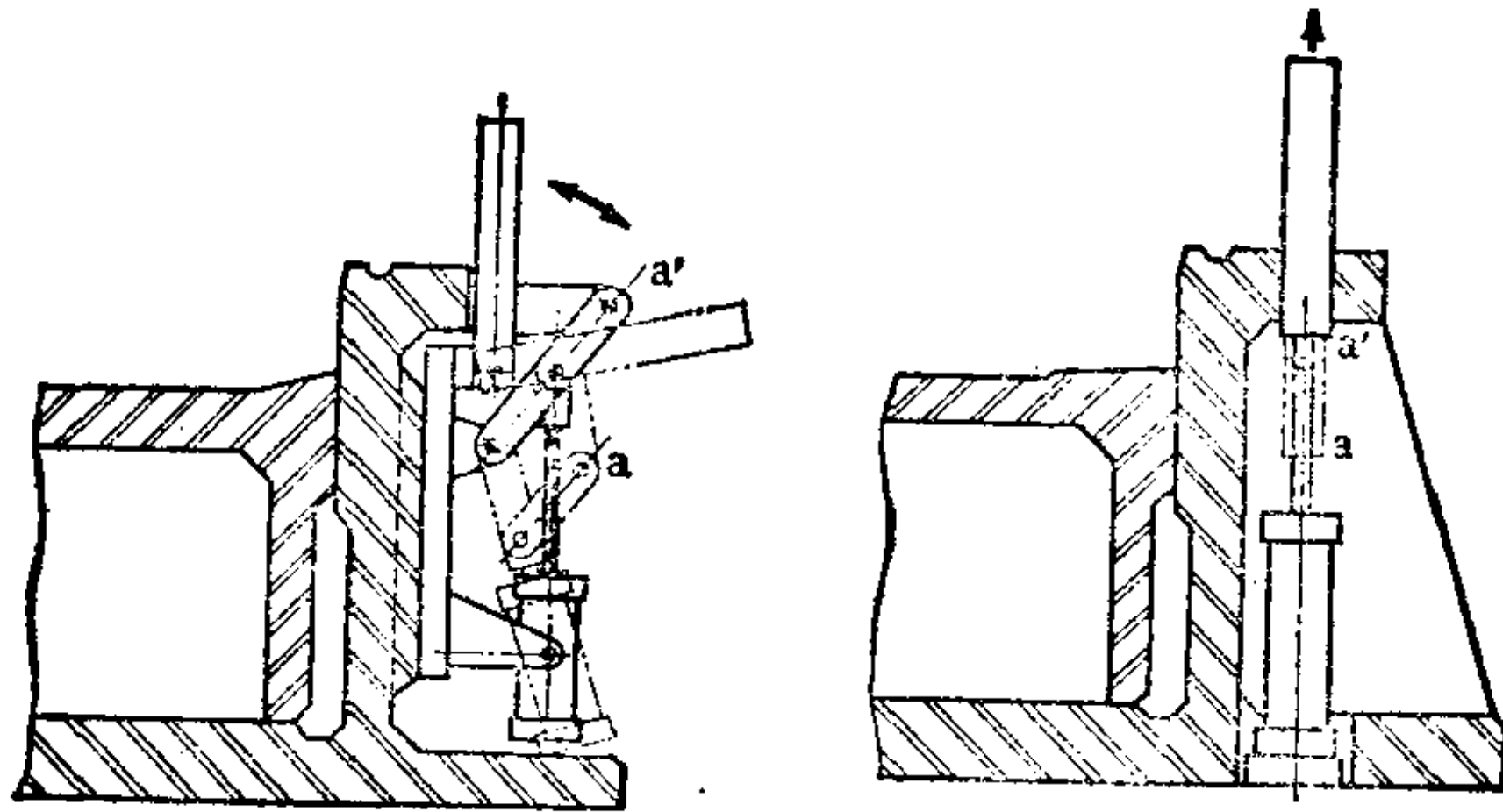


图4.174 隐式定位装置

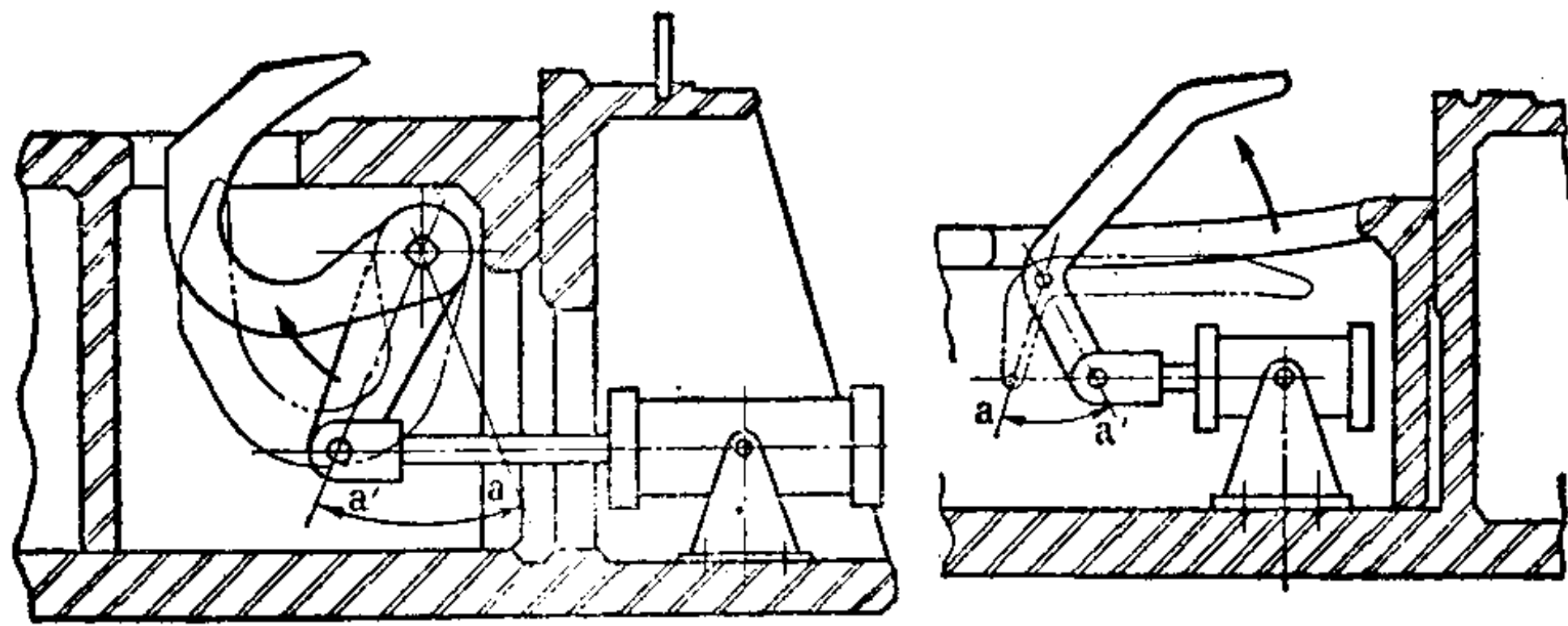


图4.175 坯料导向装置

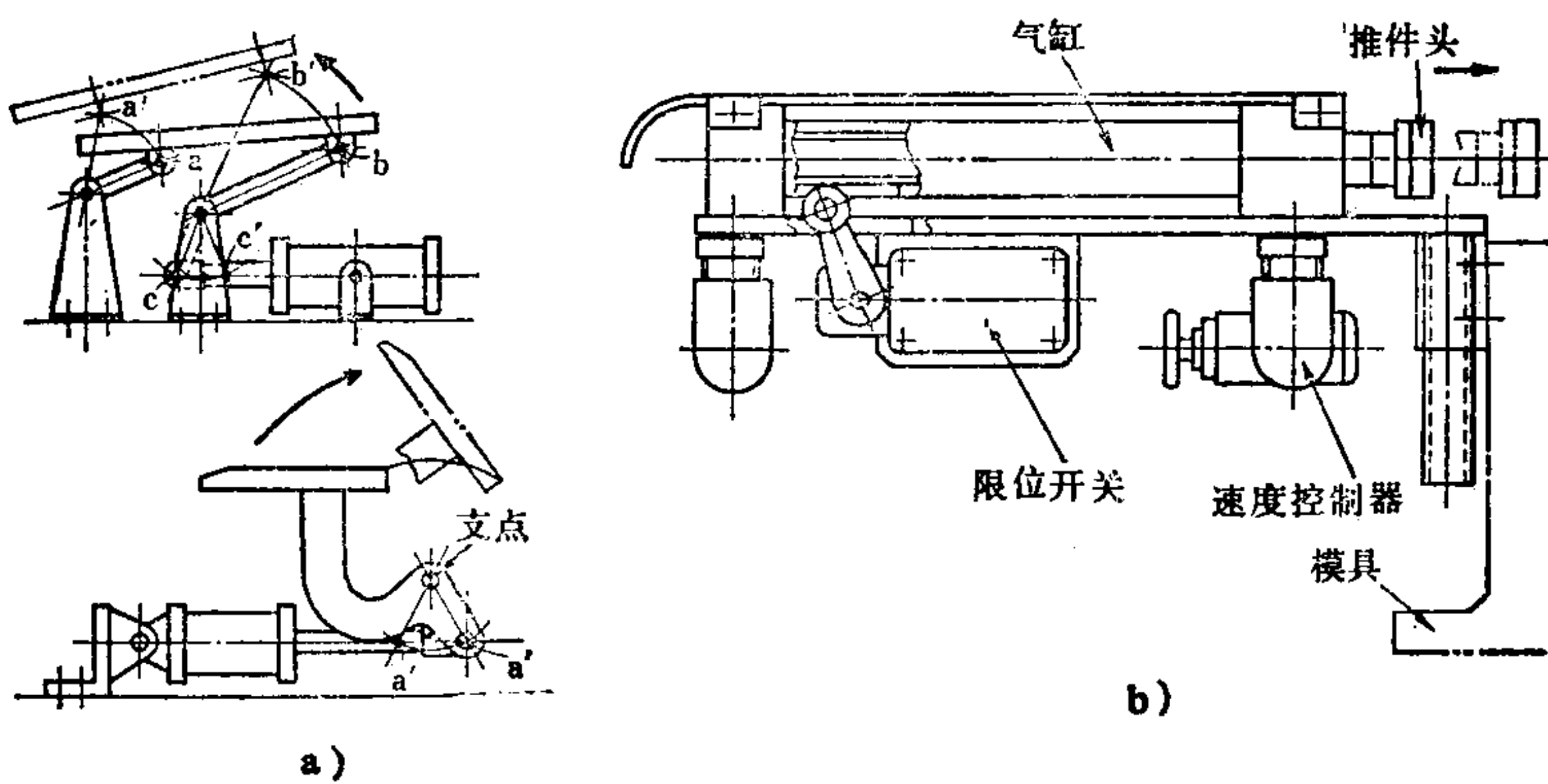


图4.176 抛掷器与推出器 (例)

a) 抛掷器 b) 推出器

小的零件时,在模具中安装取出装置能便于操作,这种装置有如图4.176所示的抛掷器和推出器等。抛掷器是把加工完的制件用机械方法从下模中抛出的装置,它是凭借以其一点作为支点进行旋转的杠杆,通过与压力机连动的工作气缸和连杆把制件从模具中扔出去,或者举起来抛掷给搬运装置。这种装置采用的形式取决于模具的形状和制件的大小、形状及作业周期。推出器是利用气缸把制件从模具中顶出的装置。当推件头碰上制件时,一般来说冲击较大,有时会损伤产品,因而使用范围受到限制,但在制件较小和模具工作面的形状简单时,这种装置又有设备费用少,调整简便,周期短等优点。

(ii) 从模具外进行工作的取出装置 大型零件的取出一般都采用机械手。机械手有安装在压力机上的悬臂型和单独设置的直臂型两大类。生产较大的零件时,在其产量大而品种较多的情况下前者为宜,在与此相反的场所,则以能装入其他自动输送装置中(例如步进式送料器)使用的后者为宜。无论那种场合都要根据制件的形状和状态分别准备各种夹紧装置,如标准夹爪、垂直凸缘式夹紧装置,凿子式夹紧装置,真空吸盘等。

(iii) 关于模具 无论设置什么样的取出装置,其前提条件都是要先把加工好的制件从下模提升到规定的位置。这种动作如果不能准确而迅速地进行,机械式的取出作业就会变得非常困难。这种提升制件用的提升装置装在模具上,一般采用如图4.177所示的顶销方式、气缸方式和气垫方式等。这些方式都是为了取出制件,并尽可能敏捷而准确地把制件提升到正确的高度和保持正确的姿态所必需的,而且必须能够反复提升几次不出问题,因而在设计上要给予足够的考虑。

图4.178所示为安装在拉延模和单动压力机模具上的自动化装置示例。

c. 搬运装置 冲压工序间的搬运,一般都使用耐油橡胶皮带输送机。在与取出装置的连接上,要在输送机的前后同时设置辊式输送机或滑槽作为辅助装置,使其具有通用性,但必须根据

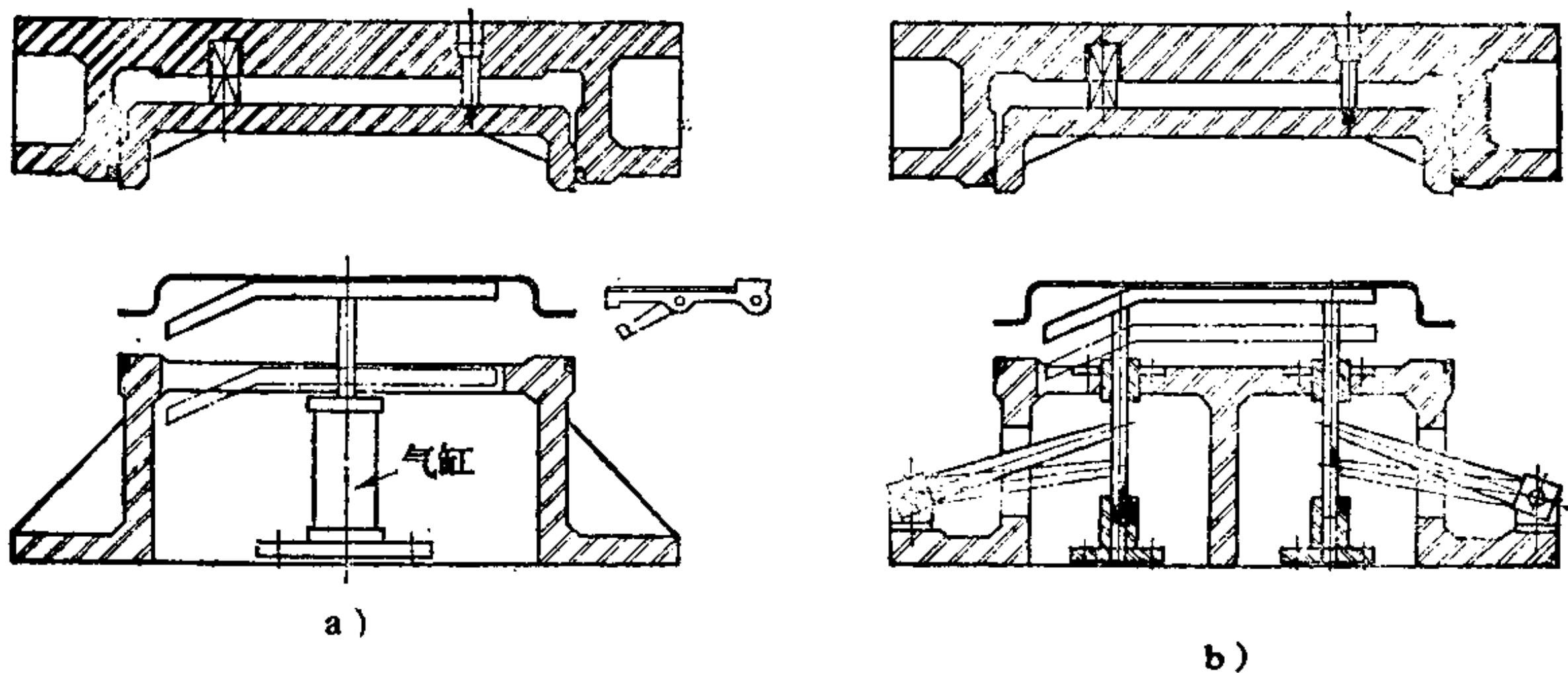


图4.177 提升装置(例)

a) 直接升降式(修边模示例) b) 直角杠杆式(修边模示例)

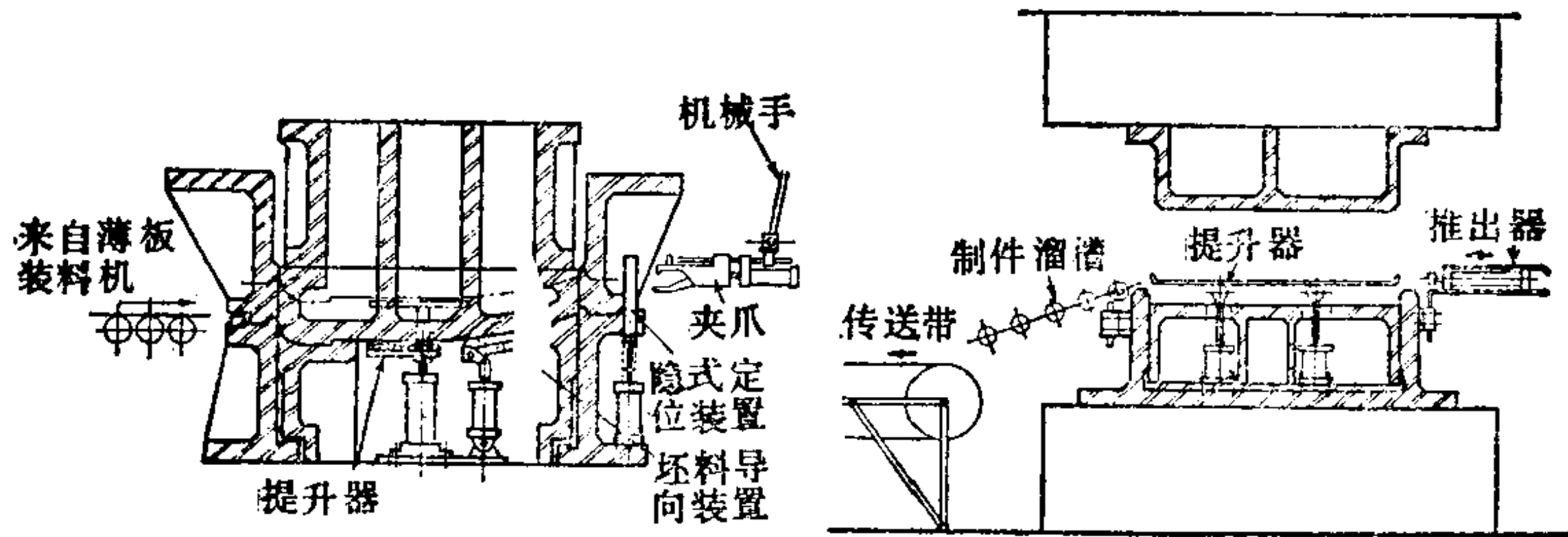


图4.178 安装在拉伸模和单动压力机用模具上的自动化装置示例

需要附加上进给速度和上下高度的调整装置。另外，在输送中间制件需要翻转或改变 180° 方向时，还要附加翻转装置或旋转机构。图4.179所示为翻转装置的代表例，但象汽车外板那样怕碰伤的零件要使用簧片式或真空式的翻转装置，而一般使用的多为降落式翻转装置。

使取出、搬运和送入等一连串作业自动化进行的进给装置有步进式送料器。这种送料器主要在全自动生产线上使用，这时也要装上翻转装置(参照图4.181)。

d. 废料处理 修边工序的废料处理特别费时间。一般利用自然下落法从模具中取出废料。为此把滑槽装在模具上。这样一来模具的高度就要增加，因此在新设计压力机时必须充分考虑闭

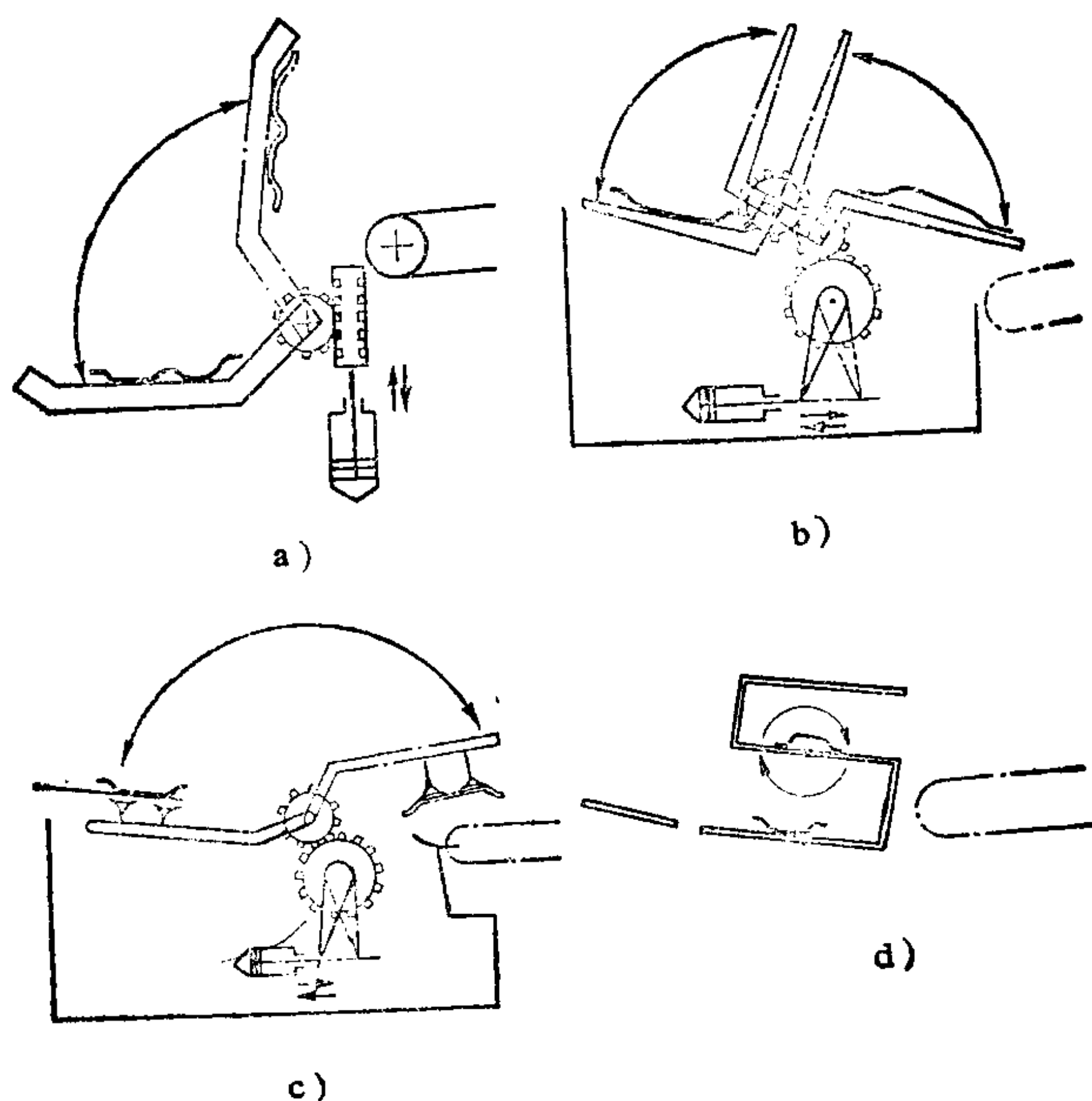


图4.179 翻转的方式

a) 降落式 b) 簧片式 c) 真空式 d) 旋转式

合高度。在废料自然下落困难时，可利用压力机滑块的动作或使用抛掷器把废料从模具中弹射出来，也有在工作台上安置小型辅助输送机把废料向左右方向排除的。

e. 冲压生产线上送进装置的组合 拥有大型压力机群的车间布置，从各种压力机的单独布置开始发展到5~8台压力机联成一条生产线，构成直线排列的冲压生产线的机群布置。其目的是提高生产率、稳定质量和减少在制品等。

对于这种冲压生产线，要考虑其生产规模、制件形状、工序数量和成形程度等，还要考虑生产周期的全线平衡，以及组合各种送进装置并估计自动化程度。这种生产线的构成形式大体上可分为以下三类：(a)手动生产线；(b)半自动生产线；(c)全自动生产线。

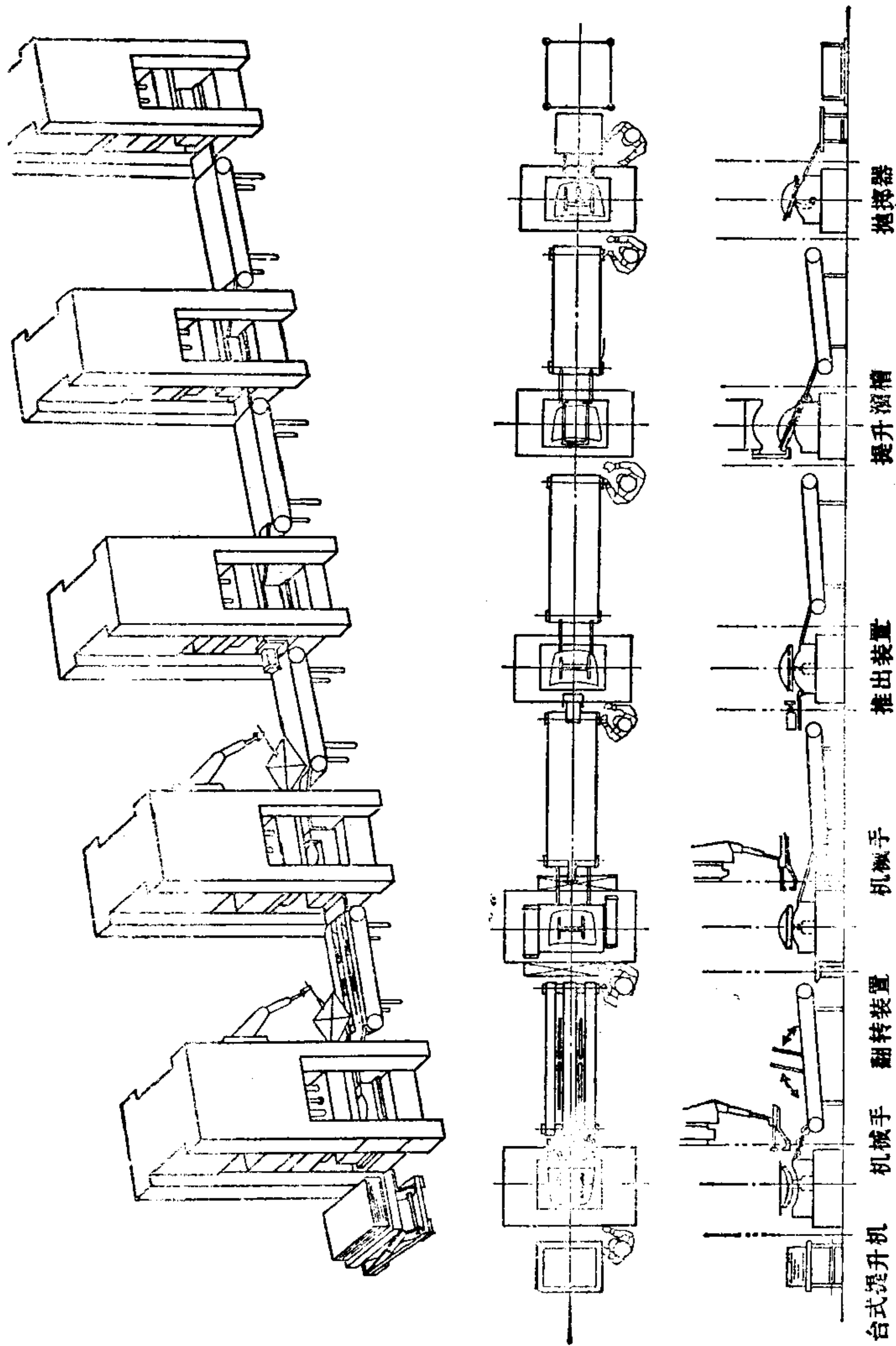


图4.180 半自动生产线

(i) 手动生产线 这种生产线利用手动方式进行送进和取出作业。压力机之间的搬运作业主要靠皮带输送机, 可进行多品种、小批量生产或冲压较小的零件。

(ii) 半自动生产线 这种生产线主要由自动化取出作业和搬运作业以及手动送进作业组成。多数情况下都包括材料的送进装置。它是在考虑到制件形状和大小以及作业周期等因素的基础上, 把上述各种送进装置配备在各工序上构成半自动生产线。各送进装置的动作可通过压力机的回转凸轮与加工行程连动。图4.180所示为半自动生产线的一例。加工、取出和搬运的全部作业组织在一条生产线上自动进行, 适合于同类型零件的大量生产, 但目前尚未大量采用。控制方式有两种: 一种是由电机分别驱动压力机和送进装置, 再用电气系统连接两者进行控制; 另一种是用同一驱动源(例如选取压力机的主动齿轮到驱动轴这一段)操作压力机与各装置进行机械控制。图4.181示例为前一种方式, 它是以步进式送料器为主体的全自动生产线。

f. 进给装置的一般注意事项

(i) 进给装置的选定 应该考虑零件形状、生产规模和生产周期以及通用性等, 但也要注意降低生产成本和节约设备费用。

(ii) 送进装置和模具一样, 要求能承受十几万次反复作业的冲击, 因此必须首先对其各种机构的耐久性作充分研究, 与此同时还要考虑到便于保养维修。再者特别要求各种送进装置的动作能经常保持正确位置。随着压力机的高速化, 作业周期也跟着缩短, 因而也要求送进装置的动作敏捷。这时最重要的问题是在其停止时能够及时吸收它工作中产生的惯性力而停在正确的位置上。此外, 为缩短准备工作时间还希望送进装置易于调整。

(iii) 送进装置要能满足模具的条件, 例如满足定位、提升和工作面高度等要求之后才能发挥其功能。因此, 重要的问题是考虑送进装置所必需的模具条件。特别是把送进装置及其辅助装置安装在模具上的场合, 必须充分考虑模具的刚性和便于保养维修的问题。

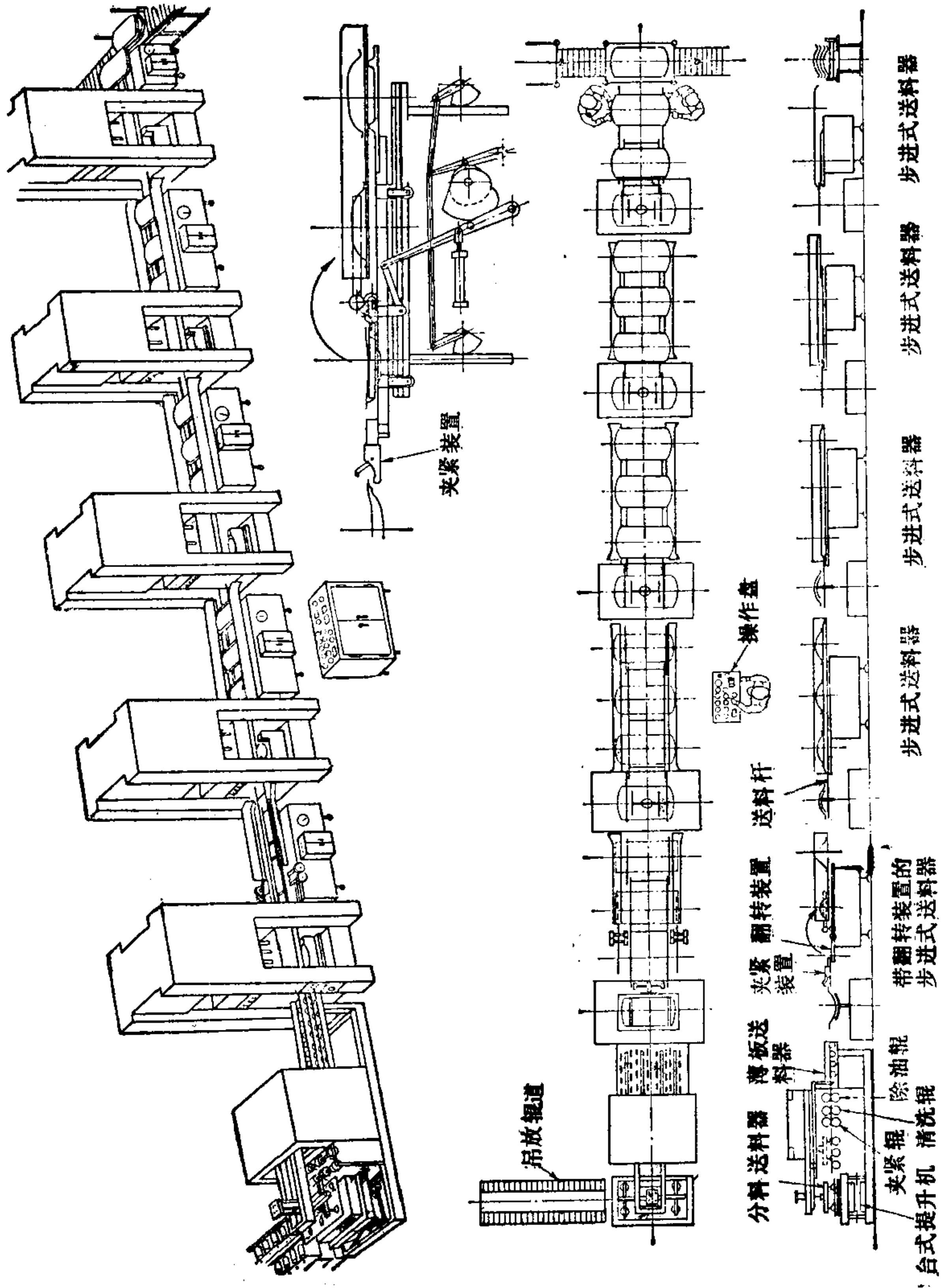


图4.181 全自动生产线

(iv) 冲压零件容易碰伤或擦伤, 因而送进装置的支承部分和滑动部分, 必须用耐油橡胶、塑料和绝缘胶木板等充分保护起来。

(v) 各种搬运装置和装在模具上的自动化装置等, 虽是在设计阶段作过充分研讨的基础上制造出来的, 但为了更有效地使它们发挥作用, 还必须在现场积极努力地改革和完善它们。

4.7.7 冲压车间及其管理

a. 冲压车间(大量生产)的构成

(i) 冲压线的构成

(1) 冲压的成形 冲压的成形一般有五道工序:

- ① 下料
- ② 拉延
- ③ 外形修边
- ④ 弯曲
- ⑤ 冲孔

但是拉延加工、弯曲加工和修边加工往往需要进行两次以上, 因而成形必须有数道工序。

(2) 冲压加工和生产线的构成 表4.26所示的实例为月产5万台以上的冲压车间的冲压工序和适应该加工的生产线组成方式以及车间生产线构成比。

(3) 自动化的动向 从劳动费用的上升、劳动力的缺乏和生产速度的提高等多种因素的综合情况来看, 冲压工厂的自动化将必然出现急剧发展的新局面。

作为冲压加工, 一般的方式都是用人工将材料投入压力机, 从压力机取出, 再送给下一台压力机的。但也有与这种方式不同的方法即自动化的冲压加工, 从目前来看可举出如下的典型例子。

1) 全自动线 从材料投入到冲压完成的所有工序完全自动化的加工线。它能大幅度节省作业工时, 并且生产速度为单独冲压的2~3倍。这是全自动线的优点。

2) 可变自动线 全自动线换品种时, 花费在调整上的时间多达数小时, 而且设备相当昂贵, 因而只在投入坯料和从压力机

表 4.26

区分①	工作台面积 (左右×前后)	零件名称 (例)	项目	冲 压 工 序 ②						大量的生产 冲压车间 构成比
				I	II	III	IV	V	VI	
A级冲 压生 产 线	4000×2000	汽车挡泥板 汽车板 汽车顶盖	工序	拉延	外形修边	弯曲	切头	换向弯曲	二次换向弯曲	1
			能力(t)	800/ 500	800	800	600	600	600	
B级冲 压生 产 线	2500×1700	车门车 轮罩	工序	拉延	二次拉延	外形修边及冲孔	弯曲	换向冲孔	换向修边及弯曲	2
			能力(t)	500/ 400	400	400	400	400	400	
C级冲 压生 产 线	2150×1500	支柱 构件 仪表板	工序	拉延	外形修边及冲孔	弯曲和冲孔	切头和弯曲	换向修边及弯曲	换向冲孔	3
			能力(t)	400/ 520	400	400	350	350	350	

① ABC级冲压线的区分标准只是一个实例。

② 能力表示例：

○—○：双动压力机（因有压料装置，可用于深拉延）；

○：单动压力机（适用于浅零件的拉延、弯曲和修边）。

上取出制件时采用自动化的方式，而往中间压力机的投入和定位则由人来进行。

3) 多工位压力机 象加工吊臂那样形体不太大、产量又多、工序又长的制件时，可采用带有自动送料装置的多工位压力机。这种压力机有两种类型，一是用自动送料装置将小型单独压力机结合起来，另一种是在一台大型压力机内装上几道工序的送料装置。

(ii) 冲压车间的平面布置

(1) 冲压车间的构成 冲压车间大致由下列部分构成。

①领料场及下料工段，②主冲压生产线，③小型冲压线，④废料处理工段，⑤模具制造及其修理工段，⑥模具仓库。

(2) 冲压车间的平面布置 冲压车间的平面布置从长远来看，要能够进行反复改装。图 4.182 为目前冲压车间平面布置的

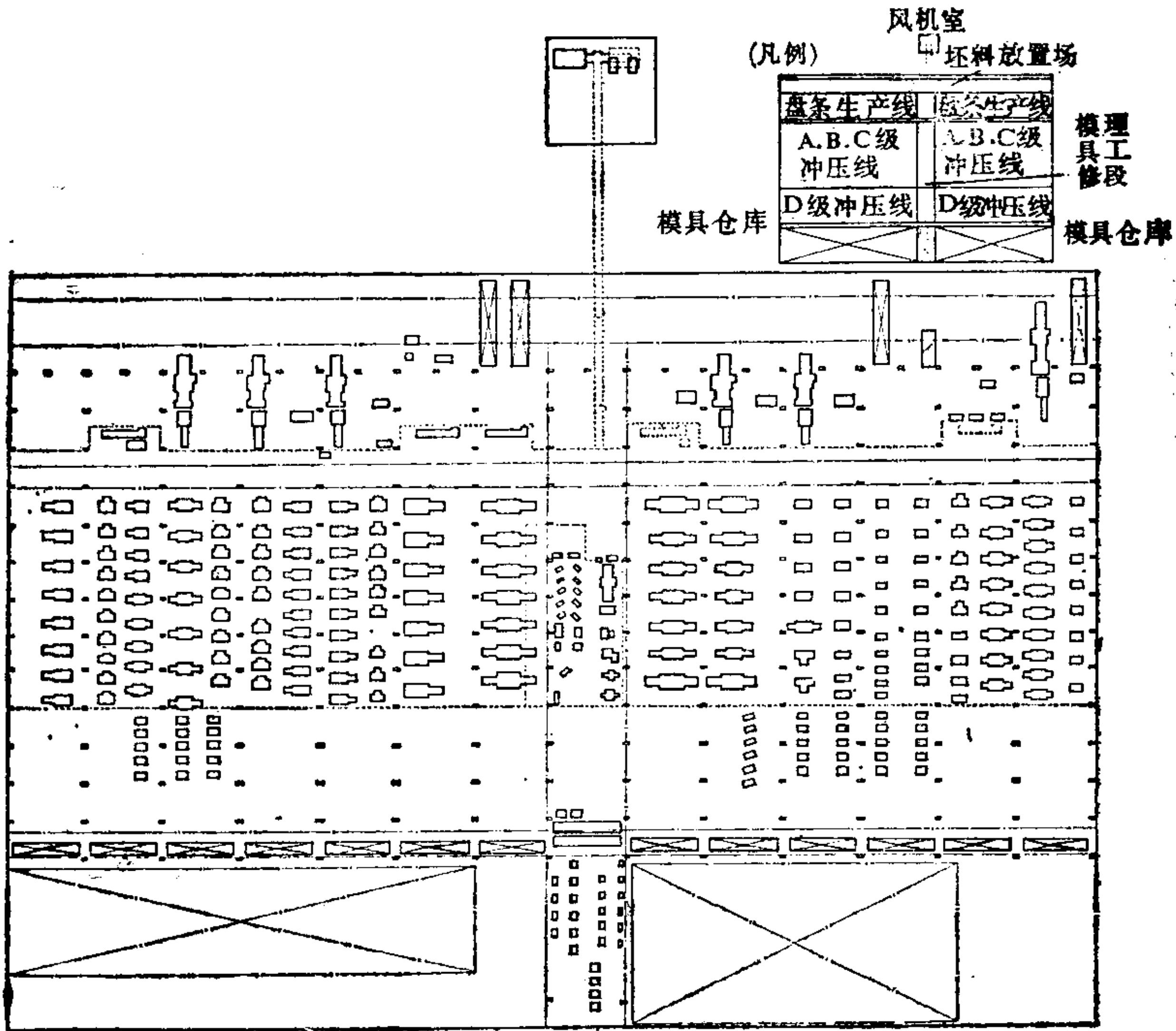


图4.182 冲压车间平面布置示例

基本形式略图。

b. 冲压车间的管理

(i) 冲压车间的特点

(1) 压力加工产品质量的好坏，取决于模具的质量。

冲压件的质量，尽管会受到加工件类别或处理材料情况不同的影响，但从总体来看受模具质量的影响非常大。

图 4.183 为小轿车冲压件的例子，从返修的不良内容或后续工序的问题来看，由于模具不好造成的质量问题占半数以上，从而揭示出模具管理的重要性。

(2) 冲压件的成本构成，材料费占很高的比例，例如轿车车身的材料费约占总成本的60%。

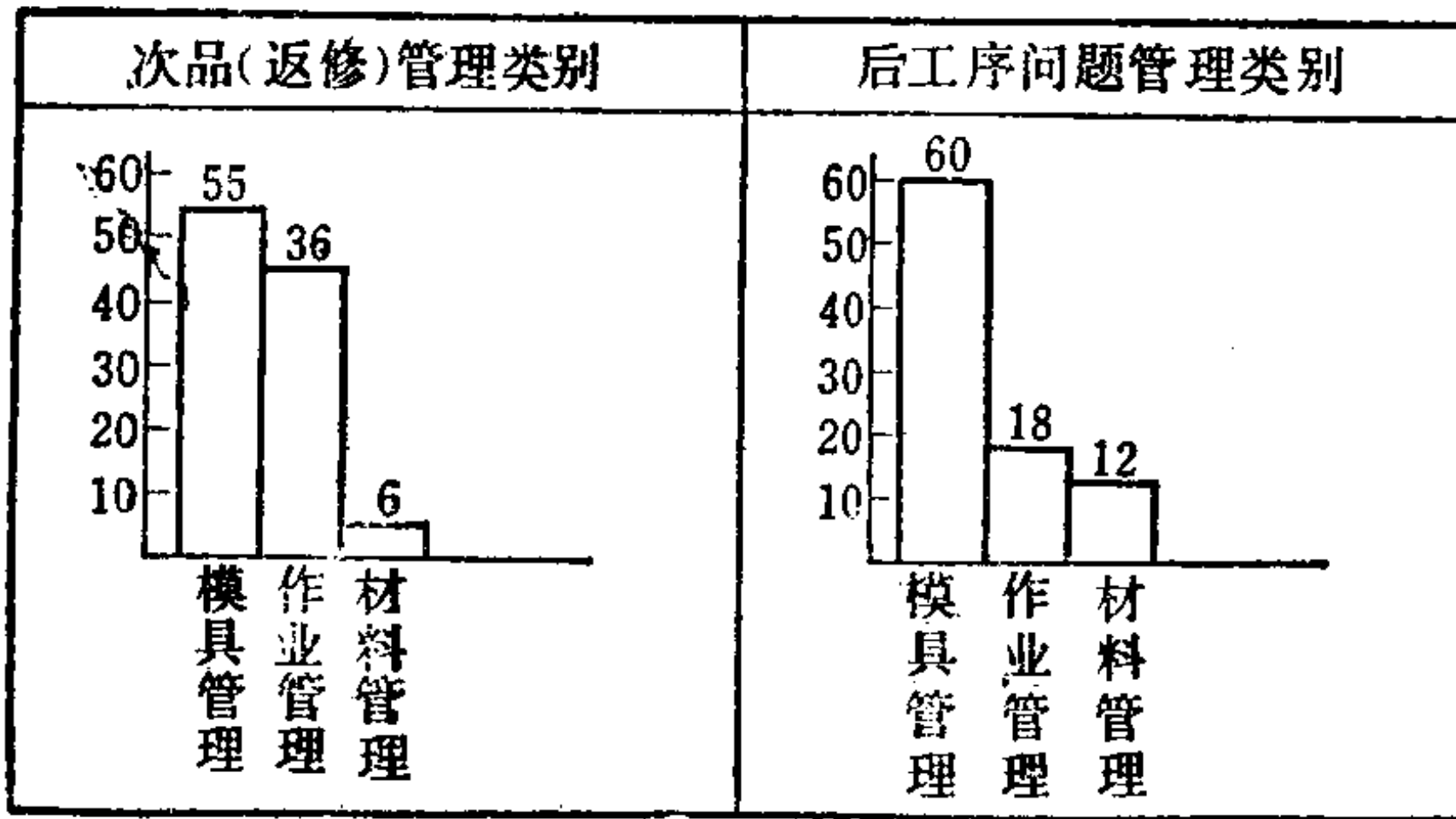


图4.183 小轿车冲压件示例

材料费取决于成品的材料利用率和材料的等级，因此成本管理上的重要因素是提高材料利用率和采用低等级的材料。

(3) 生产方式为成批生产。

汽车工业的生产方式以流水作业为特点，但是冲压加工因要在设备上安装和更换模具而往往采用成批生产方式。

为此，每天都要以一定的程序专门重复同样的事情，并且要想到会发生不同于其他作业的问题。

在成批生产中，为了确保制件质量能维持在一定水平上，因此在将作业标准化的同时，还应使构成其前提的设备、模具和材料等稳定化和标准化，这也是重要的。

(ii) 冲压车间管理的重点

(1) 模具管理 (以作业现场为主体)

1) 关于模具的维护 因为冲压是成批生产，模具要从设备上卸下来作闲置保存。在模具闲置期间，基本上要用如下方法保存。第一，为了能加工一定数量的优质产品，要检查模具是否能充分保证出产合格品，并根据检查结果进行彻底修理。

第二，即使是按照图纸制造和修理模具，但冲压制件未必能达到图纸要求。因此，修理后要鉴定，通过试用(定位、找正和试冲)来修正。

2) 模具准备 模具的准备包括放入模具、安装模具和取出

模具，对于这些工作都要安全而正确地进行。把模具装在设备上以后，每加工一批工件都要调整一次模具，使其再现最良好的状态。

(2) 材料管理 一般冲压加工用材料以低碳钢薄板为主，这种薄板分为热轧钢板和冷轧钢板。

为了提高冲压件的质量和谋求其稳定化，也要彻底搞清材料的机械性能和由时效产生的变化。

(3) 减少工时和实现自动化 在制订设备计划时，要使其高度自动化和尽量减少工时，而在给定的生产结构中也要不断努力以最少的工时加工出优质的冲压件。

(4) 安全管理 冲压车间的事故特点，一是可能会发生重大灾害——因设备和模具都是笨重物品，另一个则是容易发生切伤人体——因使用薄钢板(0.7~1.0mm)所致。

因此，在设法使设备安全化和规定有关安全的各项标准时，还要把如何严格遵守标准、确保安全作为管理的一个重要项目。

4.8 张拉成形

4.8.1 张拉成形的基础

a. 特征 张拉成形加工也叫张拉弯曲加工或张拉模压成形加工。这种加工方法既可使薄板成形为单曲面或复合曲面，也可使各种断面的型材或管材弯曲，但在加工中除对材料施加弯曲力矩以外还须附加以拉力。

虽由于坯料的性质、断面形状(长方形、型材、管材)和尺寸，以及拉力大小和附加拉力的时间而有所区别，但这种成形方法的优点可概述如下。

(1) 回弹极小，可得到形状精度优良的制件。(2) 即使在成形复合曲面或者使型材弯曲时，也能在很大程度上防止皱折发生。(3) 能使成形件的抗拉刚性增大^[123]。(4) 根据材料的不同，可防止拉伸滑移的发生。(5) 模具，原则上只采用凸模即可。因而不需要象旧式成形那样花费很多时间去调整模

具，即使板厚多少有些不同也不会使成形困难。(6) 加在模具上的单位压力比一般的冲压模具小，因而对模具不要求有严格的硬度和耐磨性。因此有可能采用廉价的轻质材料制造模具。

但是也有如下一些缺点。

(1) 因为它是使用夹头的成形方法，作业效率低是难免的。并且要求材料有供夹持的余量，因而这部分材料也就损失了。

(2) 即使利用凹模或辅助工具也很难进行复杂复合曲面的成形。

由于这种成形方法具有上述特征，因而无论是使薄板成形为具有曲率半径变化不大的复合曲面，还是使小断面的型材进行正确的弯曲，都能发挥最大的效果。

b. 附加拉力和弯曲精度 首先从弯曲加工的基本知识(参照3.1)出发，阐述与张拉成形特别有关的事项。长方形断面均匀弯曲(参照图4.184)时，如果利用纯理论把拉伸和压缩的应力应变关系近似表示为：

$$\sigma = \pm F |\varepsilon|^n \quad (4.1)$$

(式中的正号表示拉伸，负号表示压缩， F 为塑性模量， n 为加工硬化指数， F 和 n 都是材料常数)，那末弯曲力矩即为下式：

$$M = \frac{2bF}{n+2} \left(\frac{t}{2}\right)^{2+n} \left(\frac{1}{\rho}\right)^n \quad (4.2)$$

如果卸掉弯曲力矩则 ρ 值略为变大成为 ρ' ，假如用 $\Delta(1/\rho)/(1/\rho) = 1 - \rho/\rho'$ 表示回弹，则下式成立：

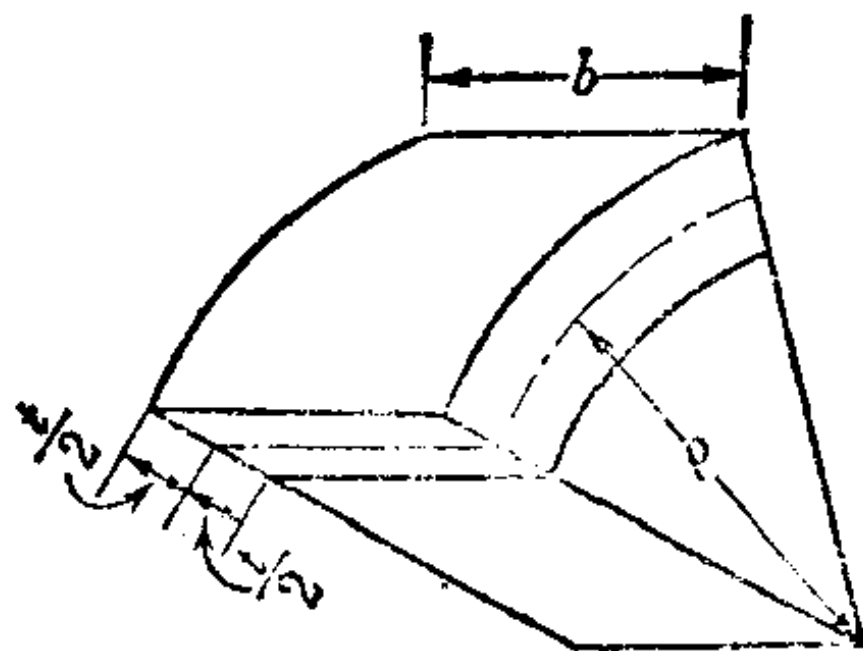


图4.184 均匀的弯曲

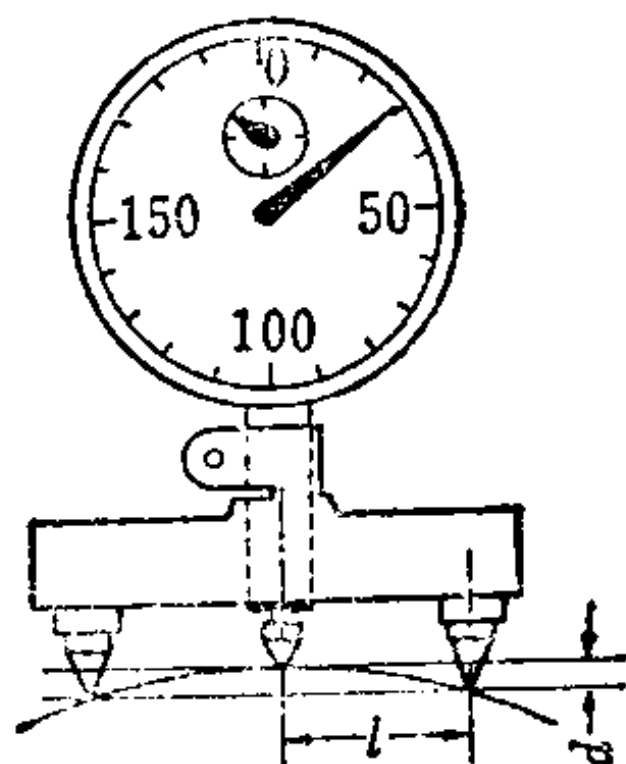


图4.185 曲率半径的测定法

$$\frac{\Delta(1/\rho)}{1/\rho} = \frac{3F}{(2+n)E} \left(\frac{2\rho}{t} \right)^{1-n} \quad (4.3)$$

式中 E ——纵向弹性模量。

因为普通的金属材料, $0 < n < 0.5$, 由公式 (4.1) 可知, 当材质相同而板厚越薄或曲率半径越大时, 回弹也越大。因此, 在把薄板弯曲成平缓曲面时,

弯曲精度就特别成问题。曲率半径可按图 4.185 所示的原理, 由 $\rho = l^2/2d + d/2$ 算出。在用圆弧形模具进行弯曲加工时, ρ 值可用模具的圆弧半径来表示。弯曲角度和弯曲半径的关系, 如图 4.186 所示,

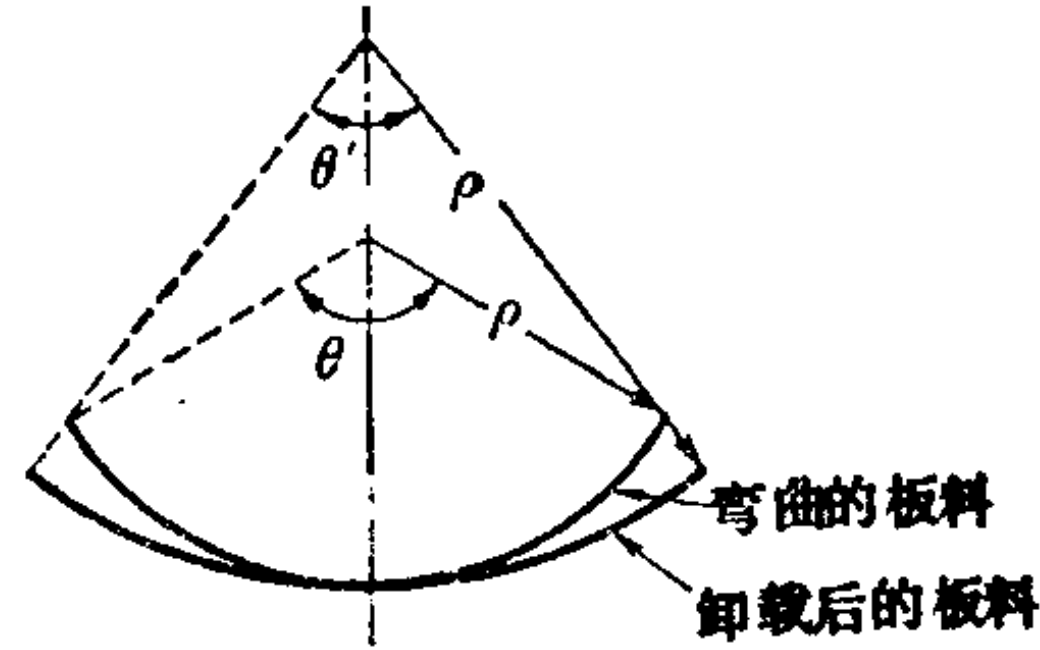


图 4.186 均匀弯曲的弯曲角度和弯曲半径

可由 $\Delta(1/\rho)/(1/\rho) = \Delta\theta/\theta$ 式求得, 通过角度还可求出回弹值。当 b/t 大(约 10 以上)时, 板宽方向的变形就要受到约束, 这时如采用平面应变条件并应用剪切应变能的理论进行研究, 那末应力应变关系就变成公式 (4.2) 右边乘以 $(2/\sqrt{3})^{1+n}$ 的形式, 弯曲力矩和回弹值也分别成为公式 (4.2) 和公式 (4.3) 乘以常数所得的值。

以下通过薄板的张拉成形, 叙述把薄板弯曲成圆弧状(单曲面)时的张拉力的效果。张拉成形的的方法基本上可分为以下两大类。即, (1) 弯曲后方施加张拉力的张拉成形(以 $M-P$ 简略表示, 参照图 4.187 a)。(2)

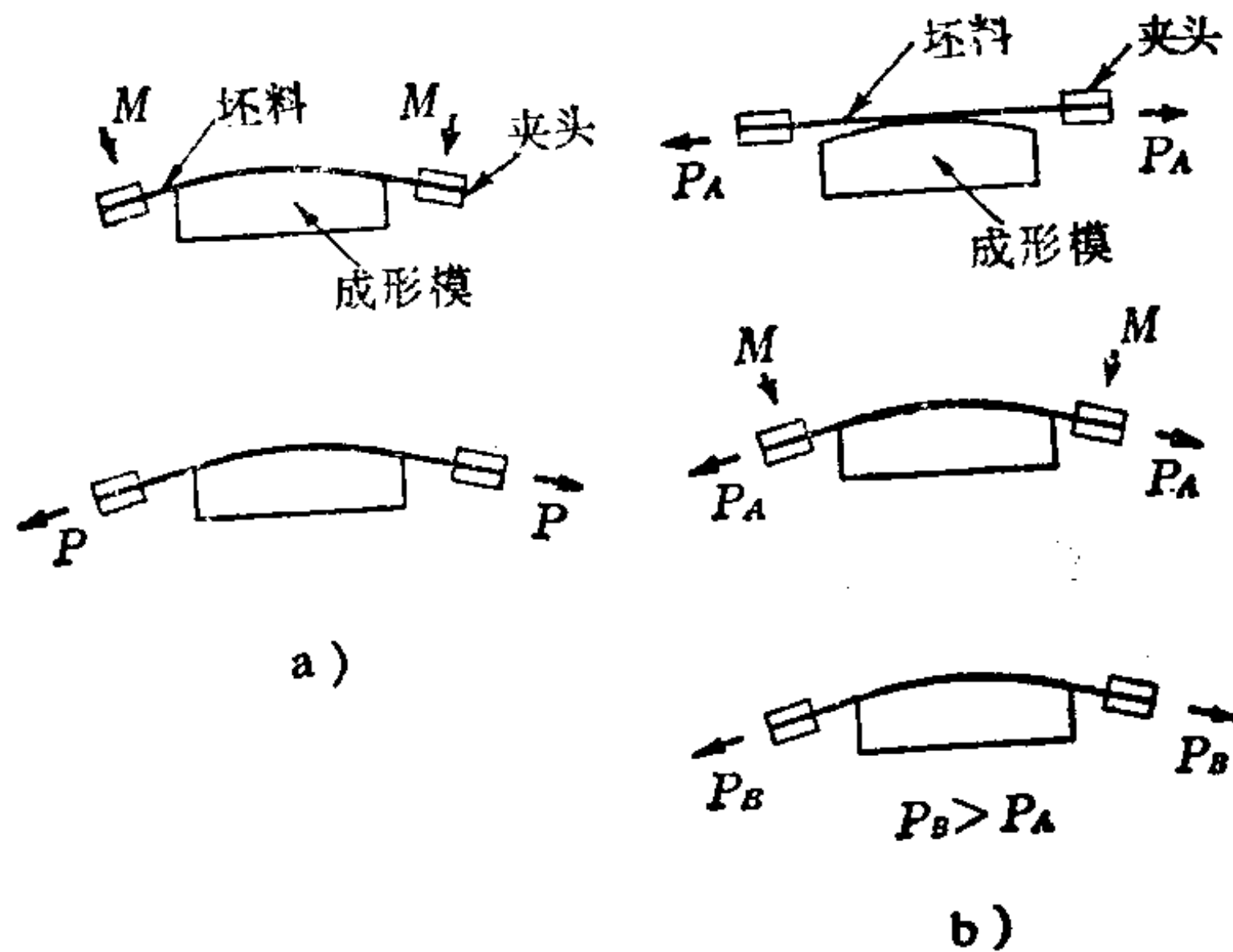


图 4.187 加张拉力和弯曲力矩的顺序
a) $M-P$ b) P_A-M-P_B

在施加张拉力的状态下弯曲，在弯曲过程中进一步增加张拉力的张拉成形（以 P_A-M-P_B 简略表示，参照图4.187(b)）。改变施加张拉力和弯曲力矩的顺序，板厚内的应力状态和分布就要发生变化，回弹值也有所不同〔124〕。

(1) $M-P$ 的场合 (图4.188 a) 因为初始变形只是弯曲，应力分布当然是以中心轴为分界线，形成一侧为拉伸和一侧为压缩。如果在这种状态下施加张拉力，则可认为整个断面的应变变化量都相同，因而拉伸一侧的纤维全都继续处于拉伸状态，其应

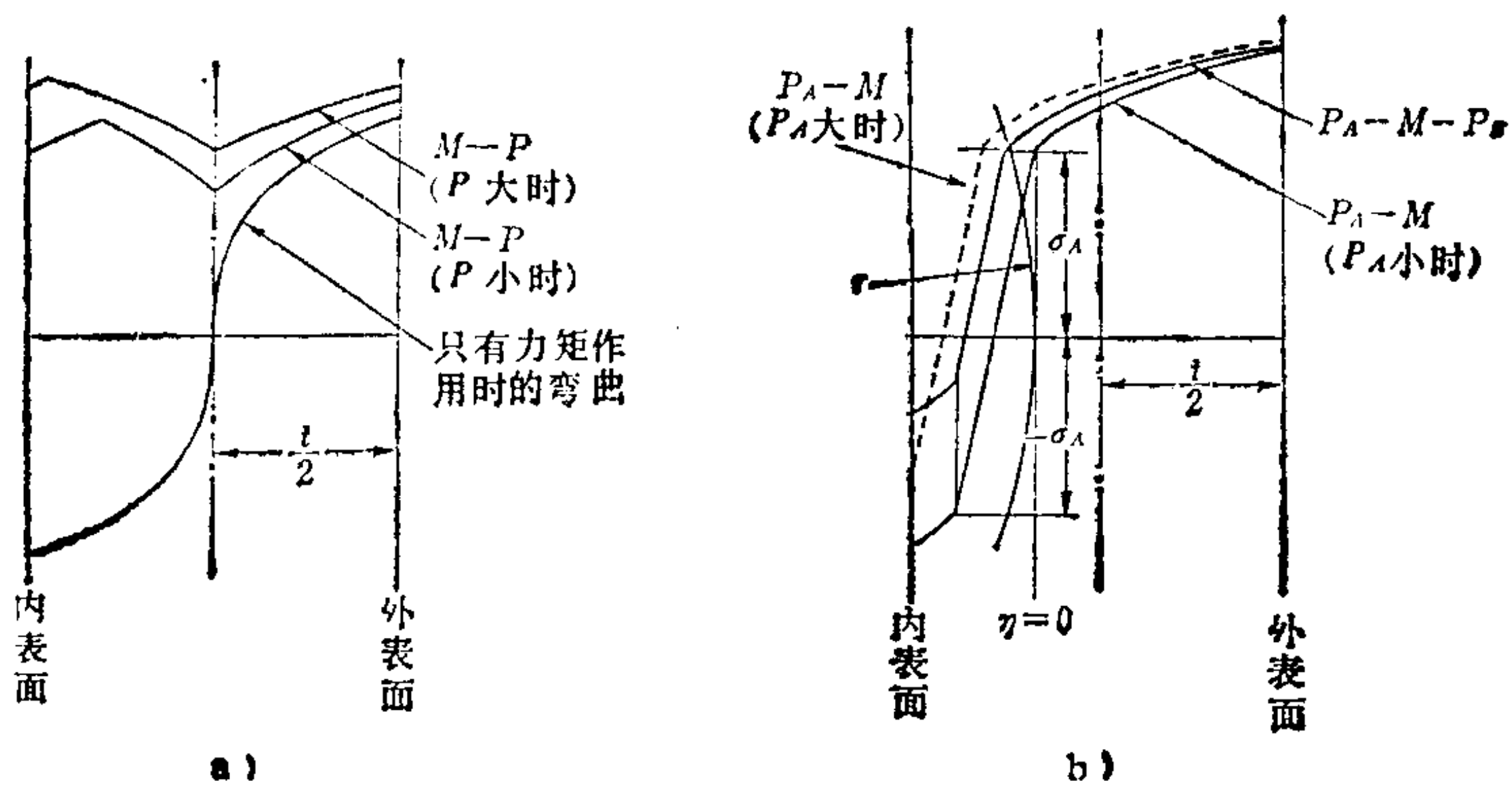


图4.188 张拉弯曲断面的应力分布

a) $M-P$ b) P_A-M-P_B

力应变关系可用公式 (4.1) 表示。可是在压缩一侧的纤维，由不同压应力经弹性回复而转为拉应力。这样，板厚内的应力分布，在张拉力小时存在着弹性区域，而在张拉力大时就转变成塑性区域，并且以中央面为界的左右两边应力分布形状接近于相同，应力梯度也随之减小。随着张拉力的增加回弹减少 (图4.189)，这是因为在这样的状态下，板厚内的应力分布接近均匀的缘故。

(2) P_A-M-P_B 的场合 (图4.188 b) 因最初只有张拉力 P_A 的作用，在板厚内当然产生均匀的应变 ϵ_A 和应力 σ_A ，但如在这种状态下弯曲，则应力 σ_A 的作用面就由中央面移到内侧，板厚

内的应变分布就变成 $\epsilon = \epsilon_A + \eta/r$ 。板厚内的应力在 $\eta > 0$ 的区域，继续进行拉伸塑性变形。在 $\eta < 0$ 的区域，由于拉伸后又受压缩，因而由拉伸跨到压缩领域（应力应变关系为一直线），且其内侧成为压缩塑性变形领域。随着 P_A 的增大，应力 σ_A 的作用面越发接近内表面，因而压缩塑性变形的领域也就消失。但是无论 P_A 如何增大，应力 σ_A 的作用面总是在板厚内，所以应力的直线领域仍留在板厚以内。也就是说， P_A-M 状态下的板厚内的应力梯度比 $M-P$ 的应力梯度还要大。在张拉力相等的地方比较两者的回弹，前者为大（图4.189），原因就在于此。

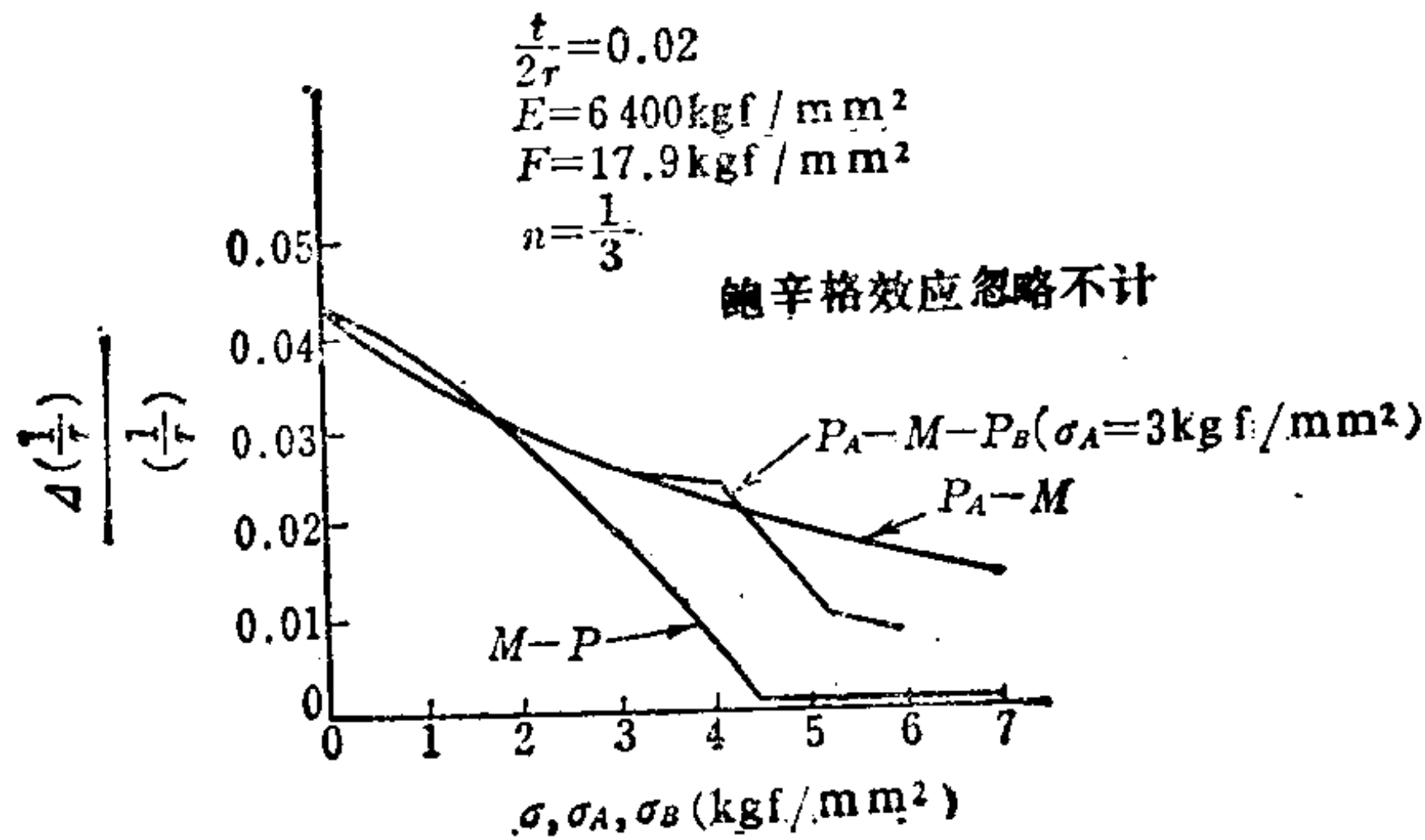


图4.189 张拉力对回弹的影响效果[124]

弯曲后把张拉力增加到 P_B 时，对应于其值大小的应力 σ_A 的作用面移向内侧，同时 $-\sigma_A$ 的作用面移向拉伸一侧。如果进一步增加拉伸力 P_B ，则应力的直线领域消失而完全变成拉伸领域，应力梯度也逐渐减小。因而在 P_B 增大的同时，回弹也在减少（图4.189）。但是，在这种张拉力的附加条件下，如果 P_A 值不等，即使 P_B 值相等，回弹也不相同。

由此看来，如果施加张拉力的时期不同，即使其大小相等，但张拉力的效果，即回弹也不相同。由于金属材料一般都有鲍辛格效应，所以实际的应力分布与图4.188多少有些出入，回弹的分布也与该图所示略有变化。

c. 成形的基本方针 除了上述的张拉力和弯曲精度的关系

之外，还要考虑材料、摩擦条件及装置等实际成形时的各种条件。下面就是考虑了这些条件后确定的张拉成形基本方针。

(1) 在板材下料时，除了要考虑必要的供夹持的余量外，还必须把模具和夹头之间的若干自由变形部分估计在内。应该避免怕增大材料损失而过分缩短自由变形部分。这是为了在最初夹紧坯料时便于操作，防止因夹紧引起的应力集中影响到成形部分，以及为防止在弯曲过程中夹头和成形模的边缘接触。另外，薄板有各向异性，为了更有效地利用这种性质应该使板的轧制方向与张拉方向相一致。由于板料下料的关系，如果使轧制方向与张拉方向一致有困难，也要尽量减小两个方向所构成的夹角。

(2) 板宽与板厚或板的自由变形部分长度相比，板宽越大则板的变形状态就越接近平面应变条件。此外，因为存在着板材与成形模的摩擦影响和弯曲影响，所以张拉成形的均匀延伸率和应力应变的关系，与通常的薄板拉伸试验（使用JIS13号试样^[125]进行试验）所得到的结果有所不同。因此要对使用的坯料预先求出延伸率和应力应变的大致数值以及它们之间的关系，以此作为资料来选定张拉力或延伸量，并估算张拉用液压机的滑块行程，或确定坯料的正确下料尺寸等。普通薄板张拉成形时的均匀延伸率，比通常的拉伸试验低50~70%。

(3) 虽然板坯的性能不可一概而论，但是如果预先将板坯拉伸到屈服点以上，即如果采用 P_A-M 或 P_A-M-P_B 的成形条件，就能防止产生拉伸滑移。

(4) 在弯曲后施加张拉力时，由于坯料和模具之间有摩擦，所以拉伸负载不能全部有效地起作用。因而在越接近成形材料中间部分的断面上产生的拉伸应力就越少，板的宽度和弯曲精度也都不一致。为了解决这问题，必须通过改善润滑条件等办法尽量减小摩擦系数。可是，如后所述，在复合曲面成形时，材料与模具的相对滑动不是单纯的滑动，因而需另外考虑润滑方法。

(5) 基于上述理由， P_A-M-P_B 的张拉力附加方式最为合适。如果按照单位面积来考虑， P_A 值要比屈服点稍微高一些。 P_B

值原则上介于屈服点和抗拉强度的中点左右，但当重点放在弯曲精度上时， P_b 值要取得略高于上述水平。但是，如图4.189所示，即便使 P_b 值在某个数值以上，回弹也不会有很大减少。可是一旦达到接近破损的塑性变形领域，板的变形即板宽或板厚的减少率就增大，成形材料的抗拉刚性也要下降，作为制件是不理想的。

4.8.2 复合曲面的张拉成形

a. 变形样式 所谓复合曲面一般是指曲率位置和方向各不相同的面，这种曲面的成形应该采用最适宜的成形方法（深拉延加工、弯曲加工、张拉成形、旋压加工及其他）和成形条件（模具的形状、外力的大小与施加方法等）。但是，如果形状复杂，无论采用什么样的方法成形都有困难，而且工时也要增加，此时就要采取把制件分成几个部分成形，然后再连接起来的方法。张拉成形法适合于曲率半径较大的形状的成形，但是能成形双凸面(图

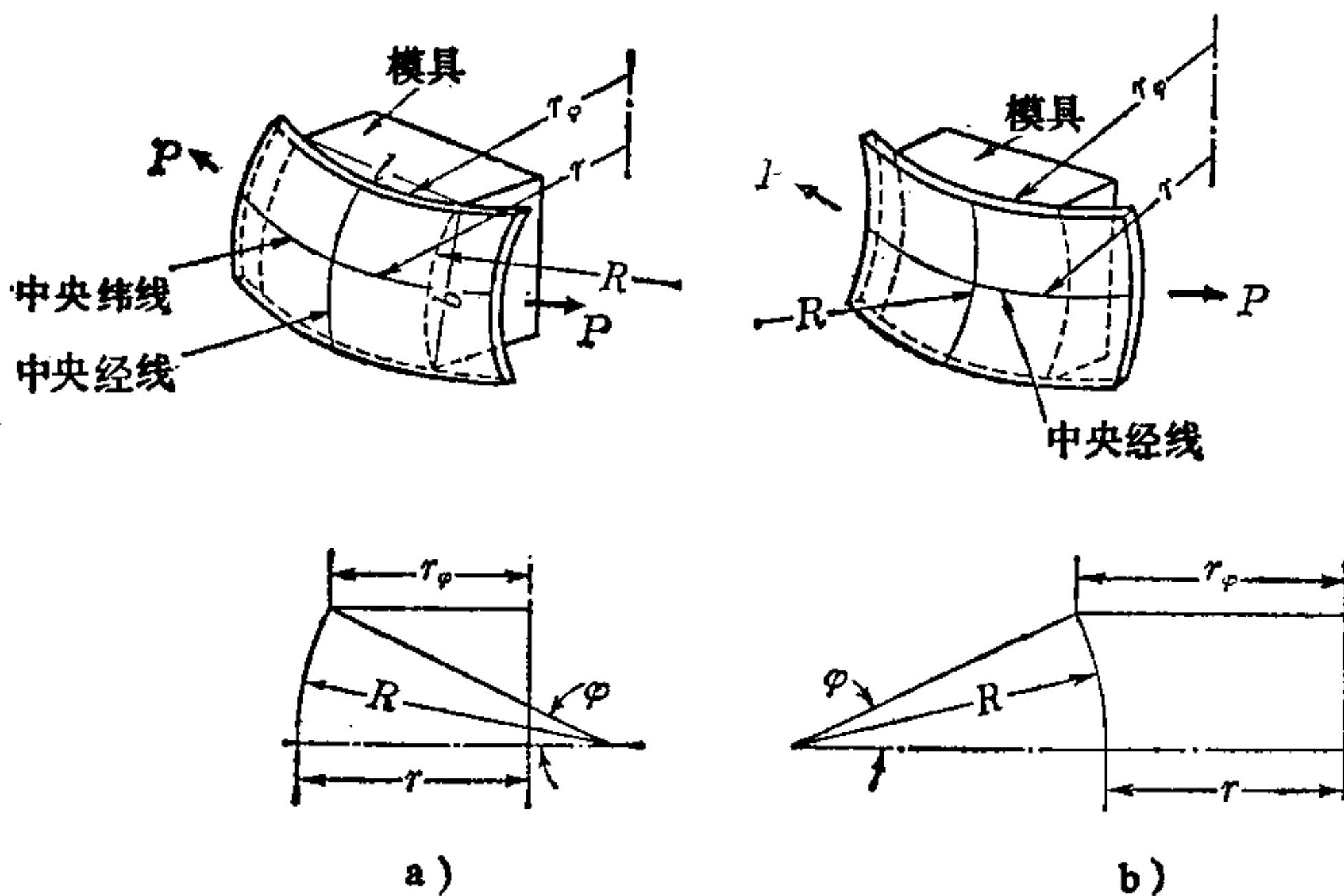


图4.190 圆弧旋转体的双曲面

a) 双凸面 b) 鞍形面

⊖ 在材料力学中（例如 S. Timoshenko, S. Woinowsky-Krieger. *Theory of Plates and Shells*, McGraw-Hill Co. 433）经常出现的回转对称体中是经线构成圆时的面。

4.190 a) 的极限目标, 通常规定为: 所用材料的均匀延伸率为30%左右, 相对于 $R/b = 0.5$ 时的 r_0/l 定在1以上[126]。这是不发生断裂的成形极限。如果要求形状精度高, 此法成形的曲面只应是更加平滑或纵横尺寸都较小的曲面。关于典型的双凸面和鞍形面(假设两种曲面都是圆弧旋转体 \ominus , 并以其纬线方向作为张拉方向, 参照图4.190), 当附加张拉力采取 P_A-M-P_B 方式(参照图4.187 b), 而夹头为直线时的变形样式[128]如下所述[127, 128]。在双凸面的场合[127, 128], 如在成形面上加上自由变形部分, 从几何学来看当然是中央纬线的长度最大(参照图4.191)。这种

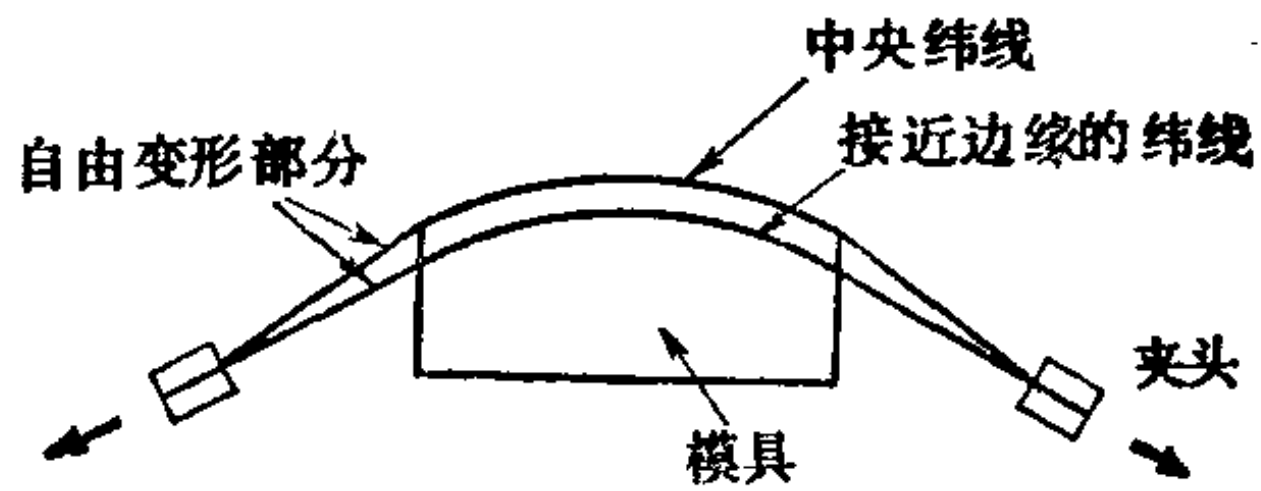


图4.191 双凸面的几种纬线
a) 双凸面 b) 鞍形面

倾向原来反映在双凸面领域里的延伸应变的分布中, 而且中央纬线的延伸无论在什么样成形条件下都最大(图4.192(a))。关于宽度方向的曲率半径, 成形初期在自由边缘附近大于模具的曲率

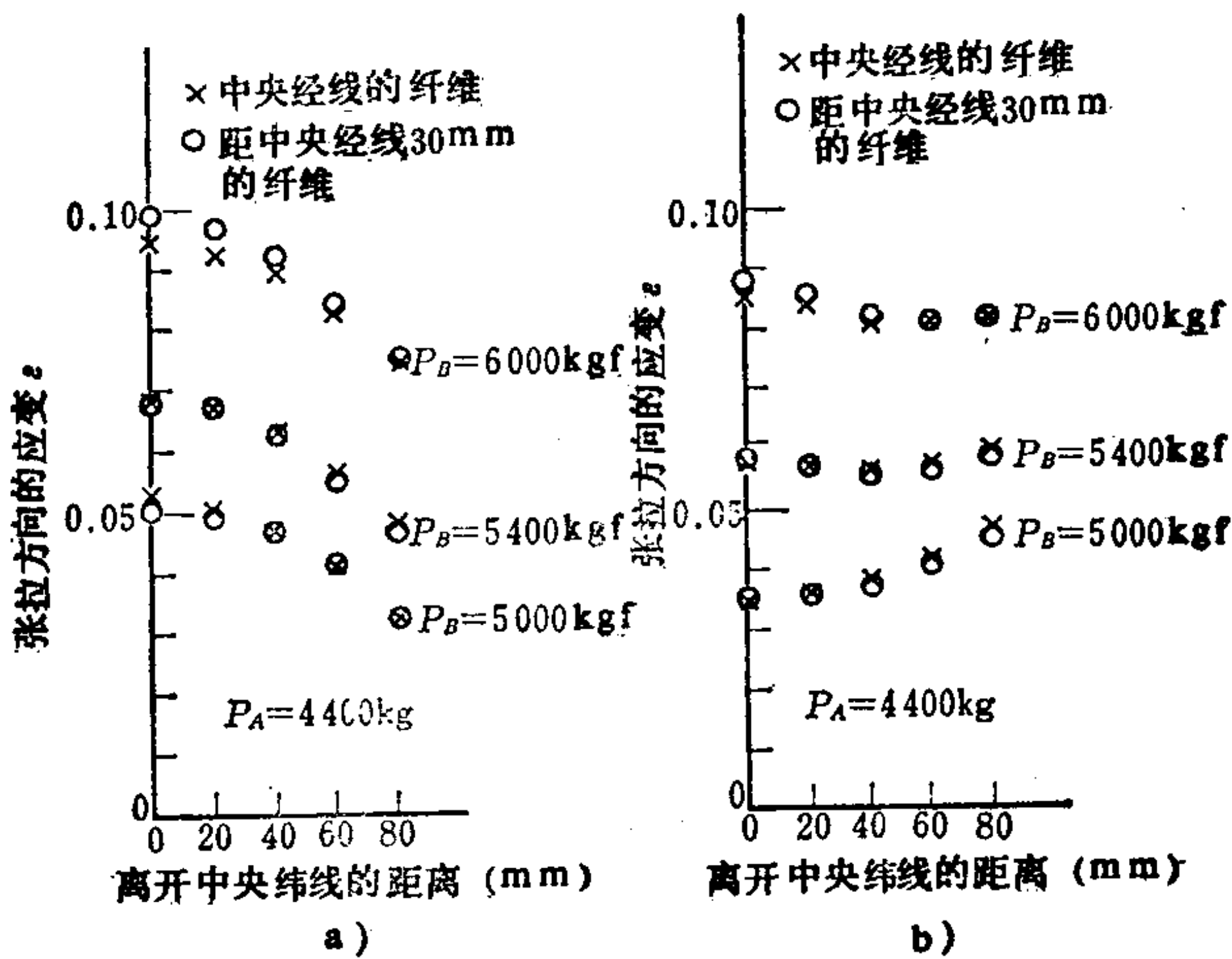


图4.192 应变的分布 [127]
a) 双凸面 b) 鞍形面

半径，而在中央纬线附近则与此相反，表现为负回弹(Spring go) (参照图4.193)。如在弯曲后增加张拉力，则变成为全面的负回弹。这是板料完全贴合于模具作高精度弯曲时双凸面宽度方向上的形状特点。关于中央经线的纤维，如果假定张拉力方向上的应力不变，板均匀地贴合在模具上，自由边缘宽度方向(经线方向)上的应力为零，则宽度方向上的应力分布如图

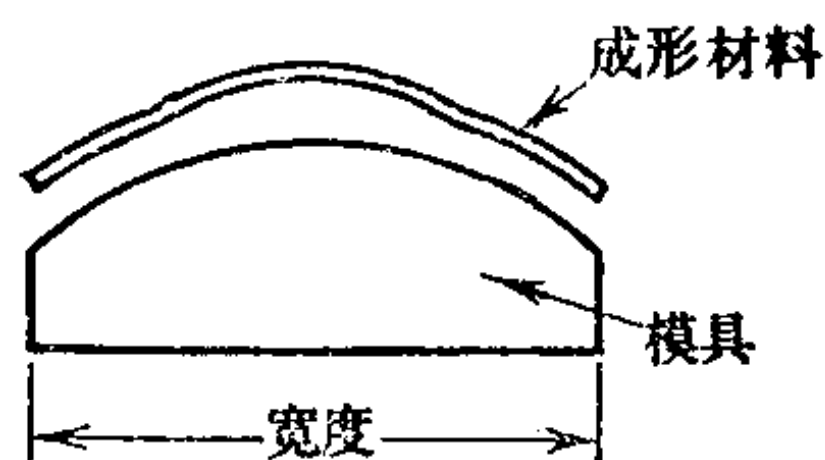


图4.193 双凸面成形初期在宽度方向上的断面

4.194 a) (r 、 R 及横坐标轴 φ 参照图4.190)所示，越接近板的中央部分或者摩擦系数越大，拉伸应力越是增加对于成形越是有利。

另一方面，在鞍形面上〔127, 129〕把自由变形部分加上，其纤维长度是与双凸面对称的，当然中央纬线处的纤维长度最短。成形初期鞍形面内的拉伸应变分布，照样显示出这种倾向，但是如果增大弯曲后的张拉力，则中央纬线处的纤维反而有大的伸长(参照图4.192 b)。其结果：即使是同一条纬线，成形部分和自由变形部分的变形量也会产生很大差别。另外，当摩擦系数变小时，宽度方向上的应力随之减少并转为压缩(图4.194 b)而成为发生皱折的原因。这样，双凸面和鞍形面同模具的接触状态或延伸变形量就不是对称的，而后者的变形也是不均匀的。

b. 成形技术 这里介绍的复合曲面成形的实际方法，也包括曲率半径小的情况。

(1) 即使制件的平面形状不是长方形的，在板材下料时也要取为长方形，待成形以后，再修边成规定的形状。原则上应使张拉方向与曲率半径小的方向一致。另外，虽然由于板材下料的关系也可能有困难，但如能使板材的轧制方向与张拉方向一致效果更好。

(2) 要求的复合曲面形状越是复杂，各部分变形量的差别一般越大。这是发生皱折或裂纹的最大原因，所以对成形技术来说，就是要设法尽量使各部分的变形量均匀。如果使用直线夹头，

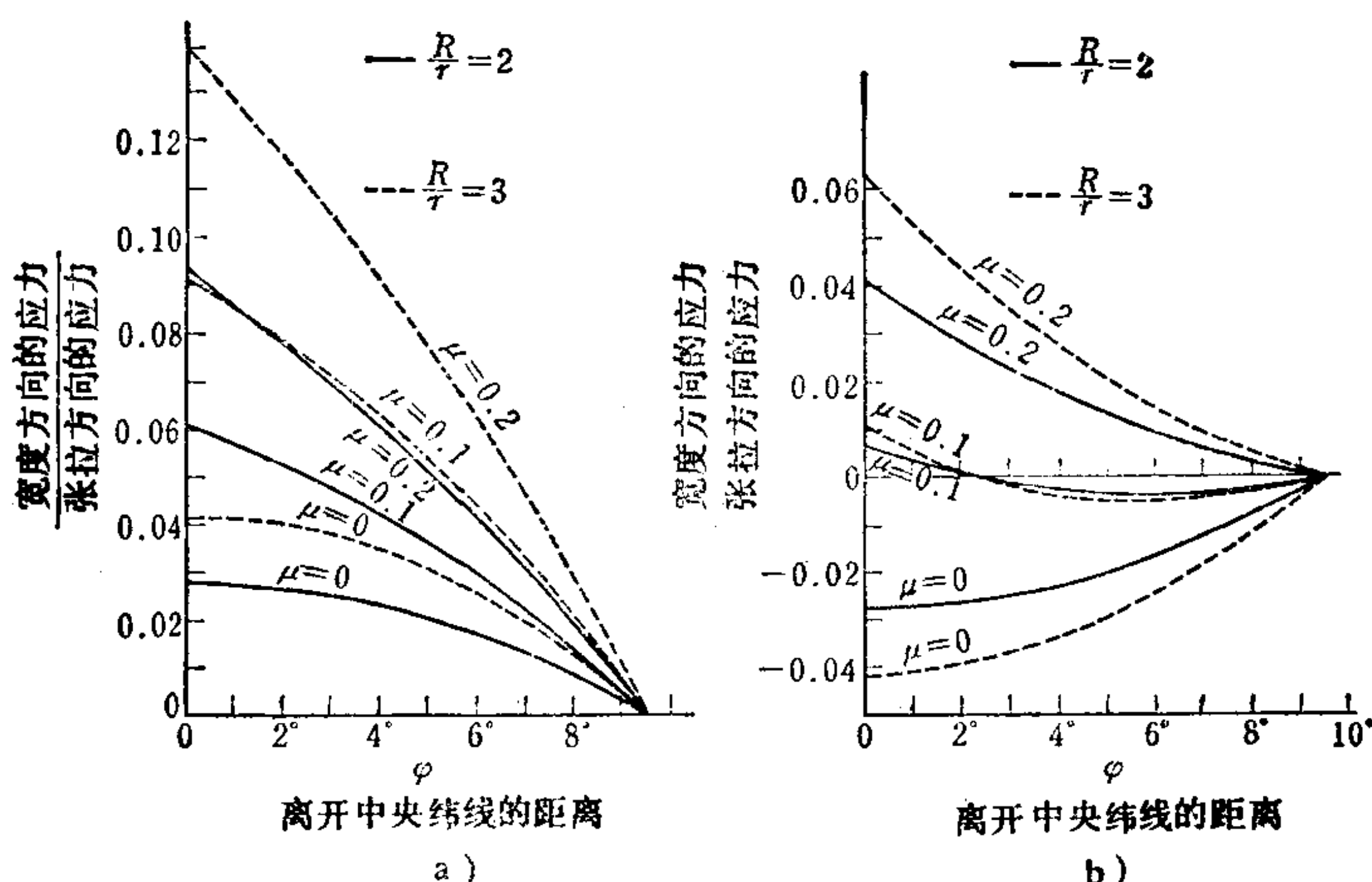


图4.194 宽度方向应力的分布〔127〕

a) 双凸面 b) 鞍形面

则随着成形的进展相邻的纤维延伸量的差别也增大。如果增加板坯的长度以增大自由变形部分，就能避免这部分变形量的差别的加大，但这样一来难免要增加材料损失或引起装置的大型化。使用曲线夹头对解决这个问题相当有效，但还有一个更重要的功能，就是在板坯弯曲以后增加张拉力时能够防止板的弯曲回复。用直线夹头成形双凸面时，板的两侧自由边缘附近的纤维会有弯曲回复，或者板的中央附近的纤维在模具边缘发生激烈的弯曲（图4.195）。鞍形面的情况与此相反。曲线液压夹头机构（参照图4.196）是把单个小型直线液压夹头用销钉连接起来，分别以销钉作为回转轴，借助液压柱塞及其对面的挡块在限定的角度内回转。可是为了有效地使用曲线夹头，必须制造一种能与液压柱塞动作相协调的机构，以便在从板的一部分与模具开始接触直到成形结束的整个期间，能使夹持线逐渐从直线状态转变到规定的曲线状态。另外，如果相邻各个夹头的间隙（销钉处的）过大，这部分材料就要发生皱折，因而必须在机构允许的限度内尽量缩小间隙。

(3) 成形模具的形状，原则上与制件形状相同，这是本成形法的一个特征。但成形弹性回复较大的大型制件时，就要预先研究弹性回复如何引起制件形状的变化，然后根据变化情况估计模具形状进行设计。设计模具时除了考虑弹性回复以外，还要考虑成形后的冲孔或修边等后续加工引起的形状变化（整体的或部分的）。另外，成形模具的外缘，原则上应制成5mm左右的圆弧，以防止切损或避免操作上的危险。可是，为了使各处纤维的变形量均匀化，也有减去模具的外缘，而将其制成平缓曲面的。

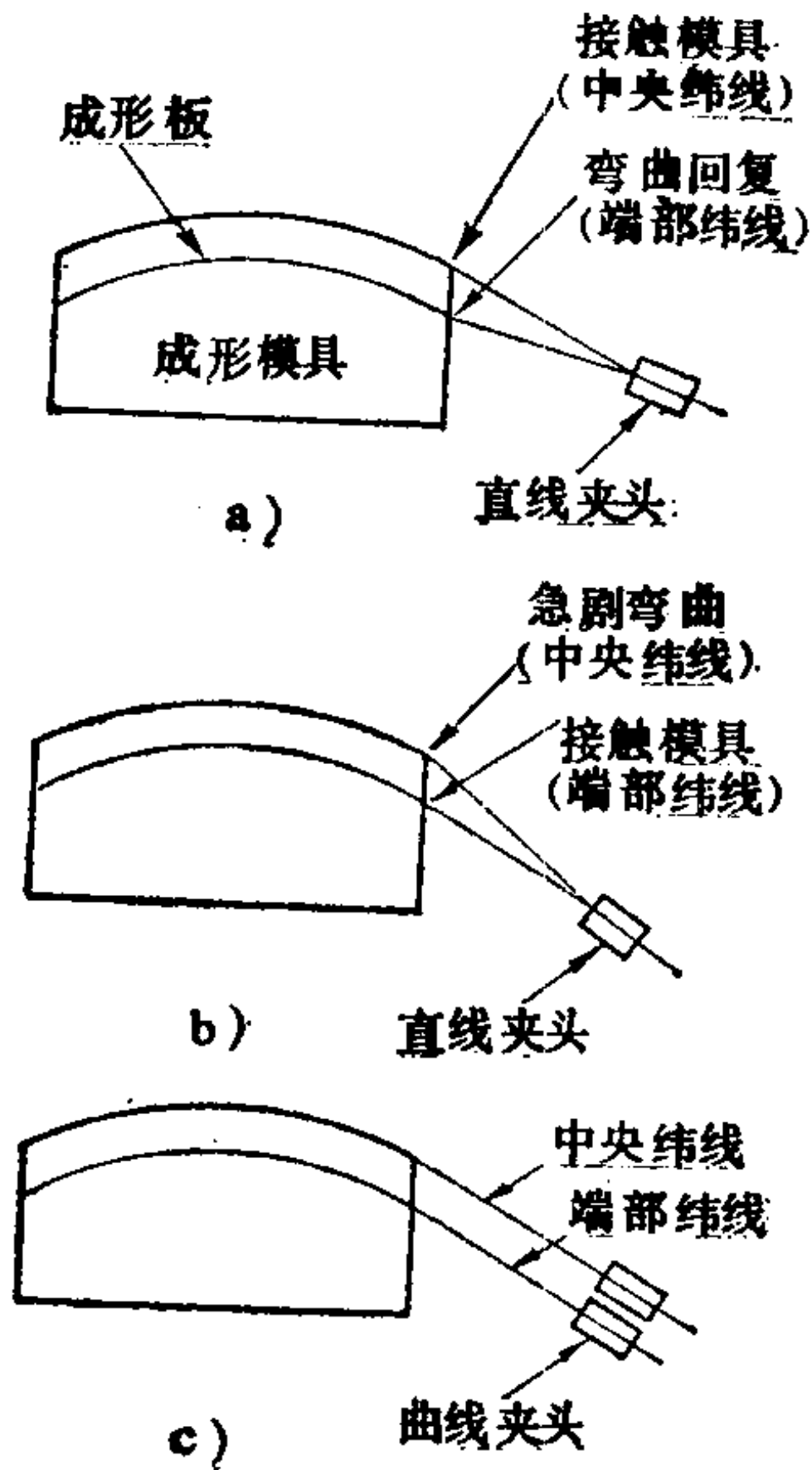


图4.195 双凸面模具边缘处板的行为

以防止切损或避免操作上的危险。可是，为了使各处纤维的变形量均匀化，也有减去模具的外缘，而将其制成平缓曲面的。

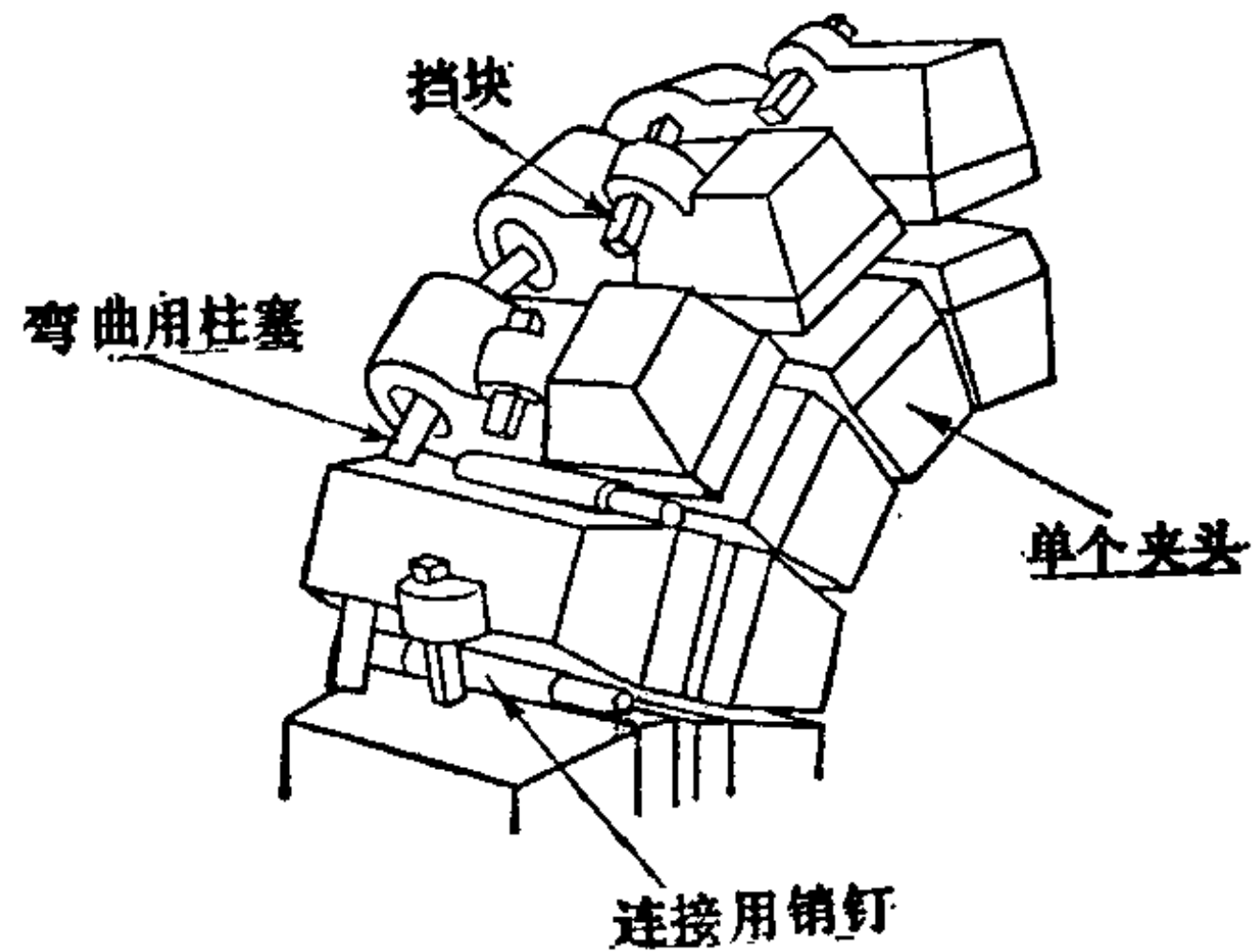


图4.196 曲线液压夹头

(4) 成形在张拉方向的曲线具有转折点的凹面时（图4.197），需要有和凹模相适应的辅助工具。成形半径较小的鞍形面时也可使用这种工具。若凹面小，要先进行弯曲加工，再施加张拉力 P_b （不能太大），然后使用辅助工具，而且只有在允许其周围发生局部变形时才能成形凹面。可是在凹面大时，由于凹面引起的变形涉及范围较广，因而施加张拉力 P_b 有困难，只好在弯曲加工中或弯曲加工后立即进行凹面成形。利用张拉成形制造这种形状，其目的与其说是提高局部形状的精度倒不如说是为了提

高整体的平缓曲面的形状精度。

(5) 关于板坯的宽度，在双凸面的场合只要多估计一些收缩余量即可，而在鞍形面的场合板坯的宽度关系到成形的成败，是个非常重要的问题。也就是说，如果使板的宽度大于模具宽度（图4.198），就要妨碍板在宽度方向的收缩，这对防止皱折虽然有效，但板的中央部分不易与模具贴合，不能得到规定的曲面。

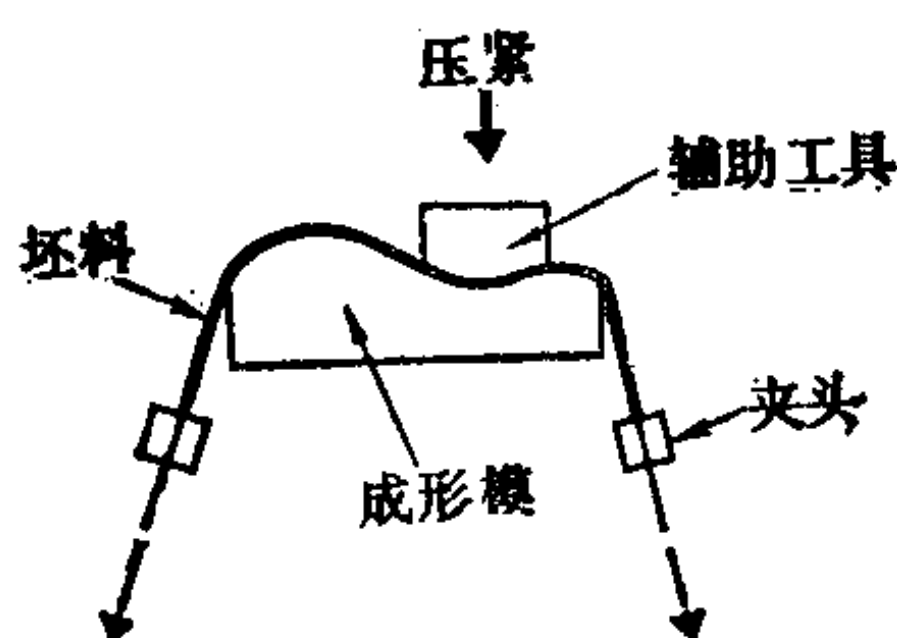


图4.197 辅助工具

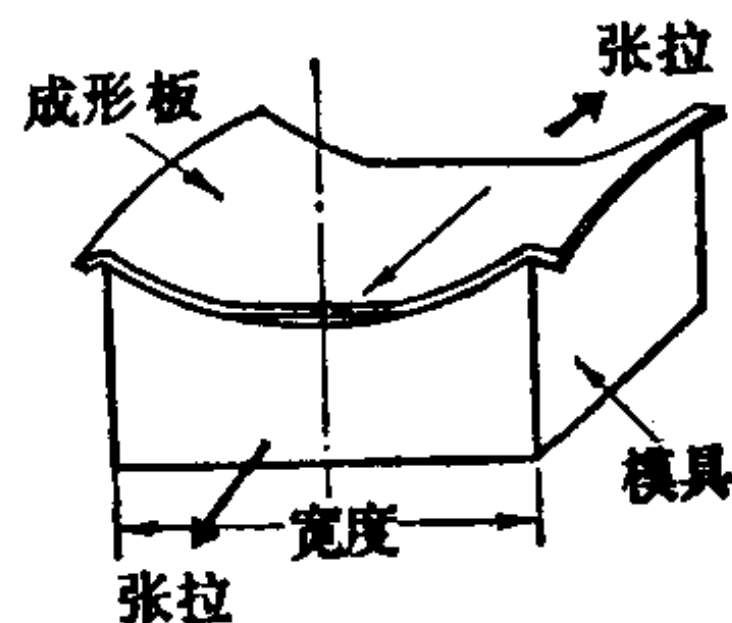


图4.198 在鞍形面张拉成形中板宽的影响

在极端的情况，可能仍然残留有原来的平面状态。如果增大张拉力强制成形，则其他部分将会断裂。因此应该充分考虑成形的程度、材料的利用率和润滑条件等多方面的因素来决定板的宽度。除此之外当然还要考虑其他一些因素，例如成形后要进行修边或要同其他零件连接时，也要将这部分的留量考虑进去加大板的宽度，以便于进行后续加工。

(6) 在生产过程中检查复合曲面形状精度的简单方法是按规定的曲线形状准备样板，将此样板与对应的成形面对合，通过观察其有无间隙来判断形状精度。

4.8.3 型材和管材的张拉成形

和薄板相比，从外观上来看只是断面形状有些差别，但在成形技术方面却有某些不同之点。它没有相当于薄板复合曲面那样的成形，只需考虑单曲面的成形。夹头（参照图4.199）当然要使用适应于该断面形状的专用夹头。因为断面高度比薄板厚度大好几倍，所以内侧和外侧有很大的应变差，成为皱折和裂纹早期发生的原因。因此，在弯曲进展的同时，断面形状要产生变形或扭

曲（图4.200），成形圆管时会变成椭圆。防止发生皱折和断面形状的变化，对维持制件价值是极端重要的。因此要尽量以均匀的压力压紧坯料内外两面。即，对于外侧，在使用包括凸模压板在内的剖分式模具的同时，还要使用与外径尺寸相同的带有沟槽的辅助工具；对于内侧，要使用挠性芯子（图4.201）。挠性芯子可用木材、树脂、锌合金和钢等制成。即制造芯子的材料要比被加工的材料软些，以免划伤材料。

另外，为使芯子容易拔出，其断面形状应比坯料略小一些。这样，由于有薄板成形时所没有的各种制约，因而在弯曲半径小或断面形状复杂的场合，决定张拉力的方法不需要象加工薄板那样严格。即弯曲加工后的张拉力 P_B 不要象加工板材时那么大，有时甚至完全不需要附加这种张拉力。另外，最近发

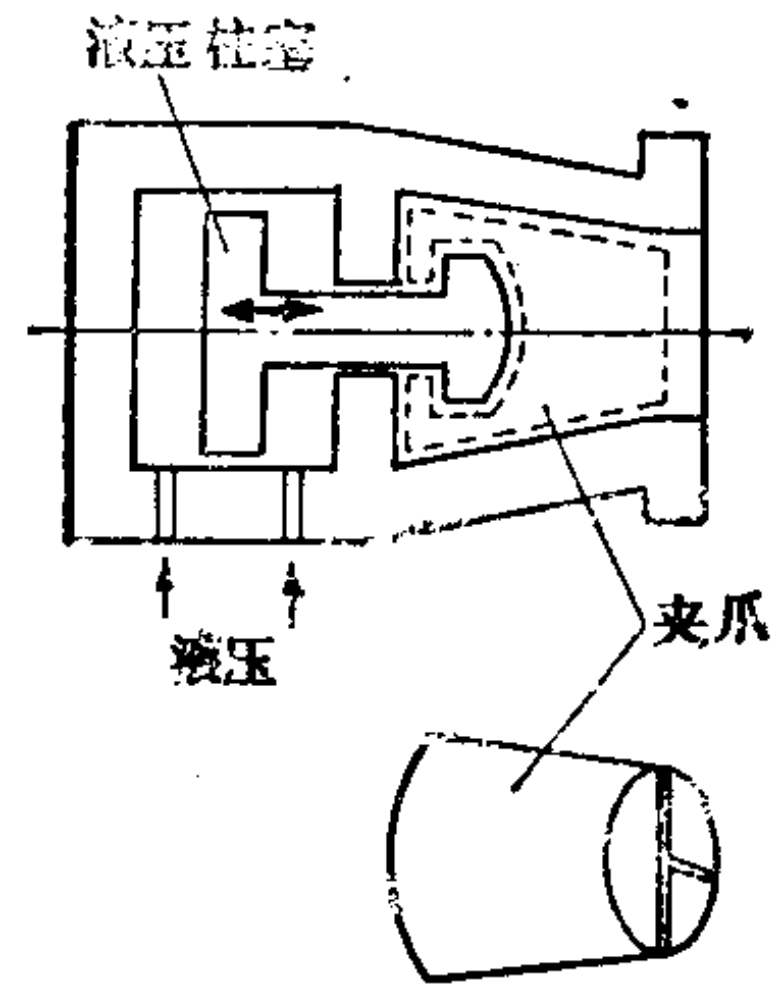


图4.199 型材用
液压夹头

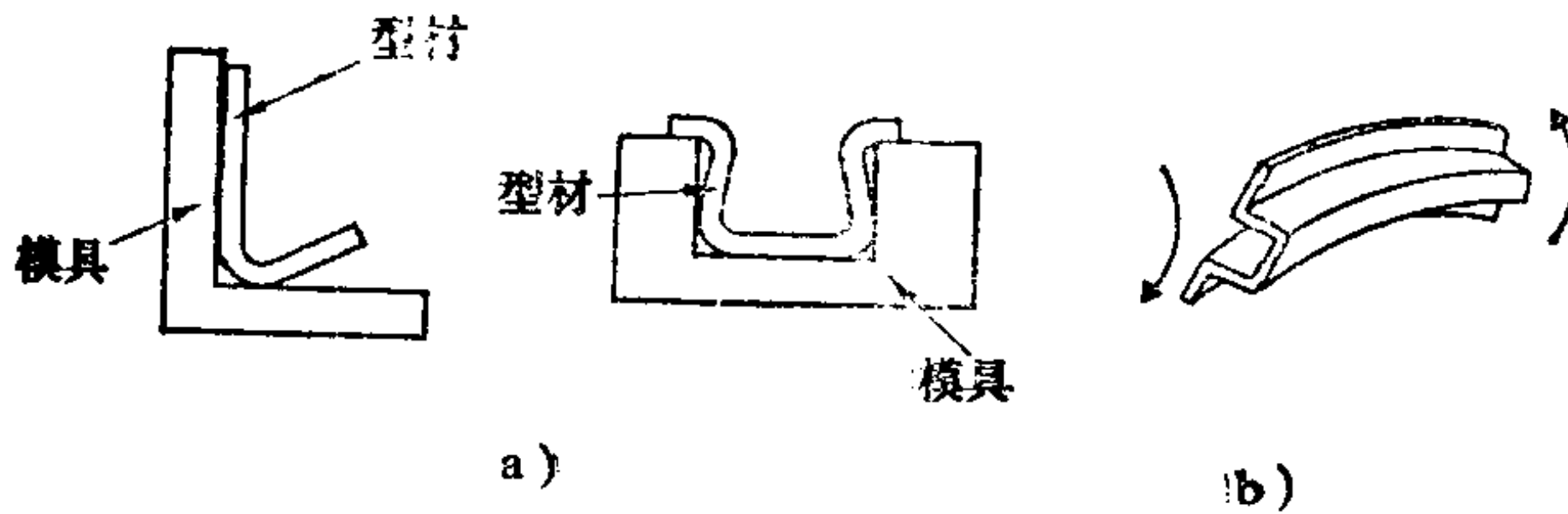


图4.200 型材成形的缺陷
a) 断面形状的变化 b) 扭曲

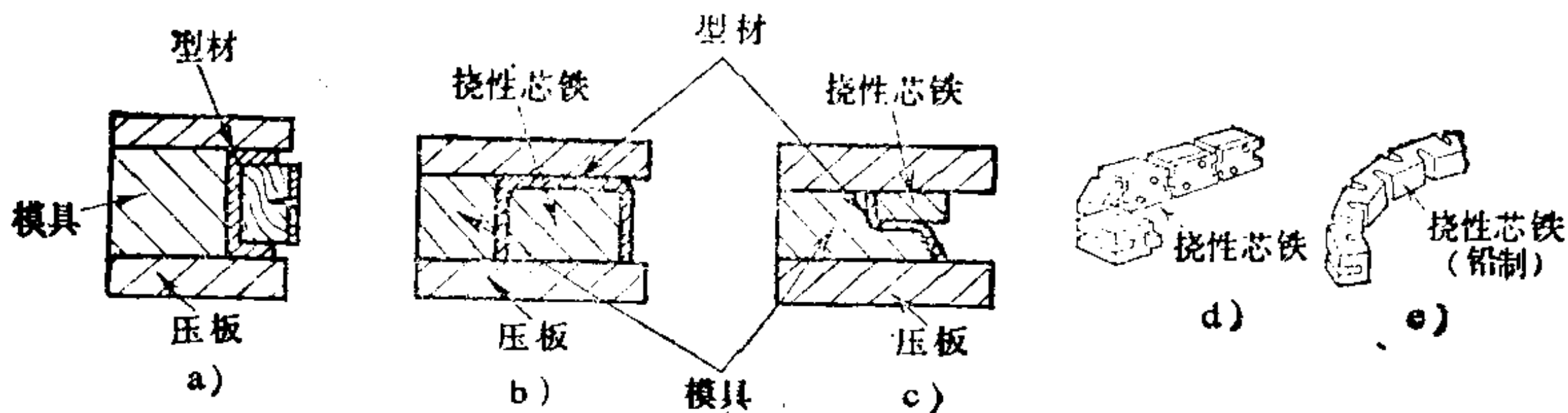


图4.201 型材成形用的辅助工具

展了给定伸长量的方式以代替给定张拉力（参照图4.207）。

4.8.4 张拉成形法（设备）

从张拉成形机的结构和功能等方面来看，正如本节所介绍的，基本上可分为五大类。采用哪种设备和成形方法，取决于坯料的断面形状（长方形或型材等）、尺寸及曲率半径的大小和要求的弯曲精度。另外，成形设备既有通用性广泛的，也有接近于专用的。

a. 两端固定式张拉成形法

这种成形法的历史最长，是用于薄板成形的。其结构如图4.202所示，立式凸模通过油压向上移动，夹头（利用油压或气压动作）是固定的。夹头的方向可从水平变化到接近于垂直。坯料的安装方法，一般是一边用手强制

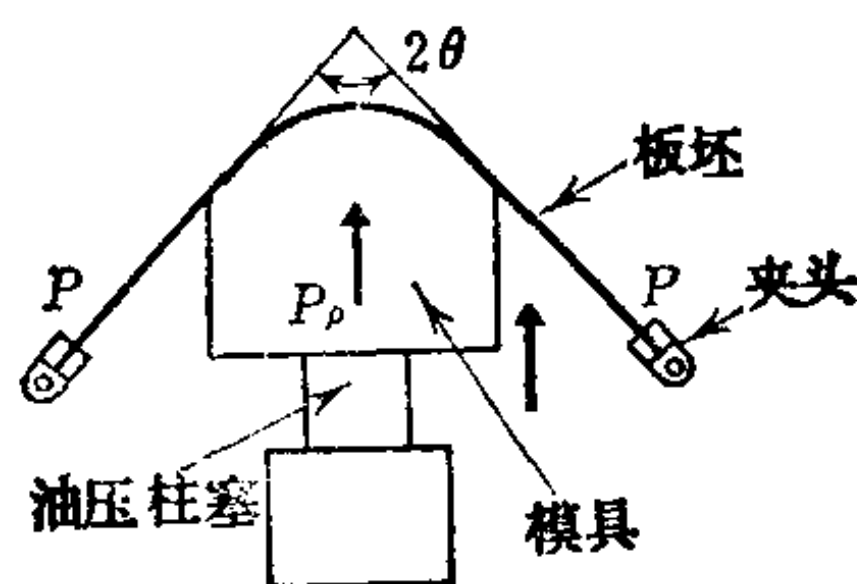


图4.202 两端固定式张拉成形

弯曲一边插入夹头。但是在弯曲半径小时，要预先用三辊弯板机或手动弯板机将板坯弯曲到接近制件的曲率半径，而弯曲半径大时也有将板坯处在原有状态就夹紧。当板坯被弯曲时，整个板面几乎同时与模具接触，在模具上升的同时附加张拉力，而且张拉力逐渐增大，因此张拉力的附加过程大体上属于4.8.1的M-P方式。当板坯为平面，在模具凸部与板坯的一部分接触的同时附加张拉力，模具上升直到其全部与板贴合之前张拉力逐渐增大，如果模具进一步上升，张拉力就急剧增加。因此，这种方式是先同时施加弯曲和张拉力以后只增加张拉力，严格地说，这是不同于M-P的变形方式。总之，在弯曲加工前不能施加张拉力，也不能正确给定弯曲加工后的张拉力P。即尽管存在着 $P_p = 2P \cos \theta$ 的关系（图4.202），但因 θ 是时刻在增加的变量，要想同时正确地给定 P_p 和 θ 是困难的。在板坯较大需要大的容量时，可将两个油压柱塞并联，以防止把过大的弯矩加在凸模上。这种成形法适用于弯曲半径小的曲面成形，也可用于成形简单的复合曲面。

b. 张拉卷曲成形法 有卧式与立式两种形式〔130〕,对薄板和型材均能成形,富于通用性。典型的卧式成形机如图4.203所示,凸模是固定的,油压系统由可供张拉、弯曲和夹紧用的三个分系统构成。该图所示为张拉力附加过程为 P_A-M-P_B 。(图4.187

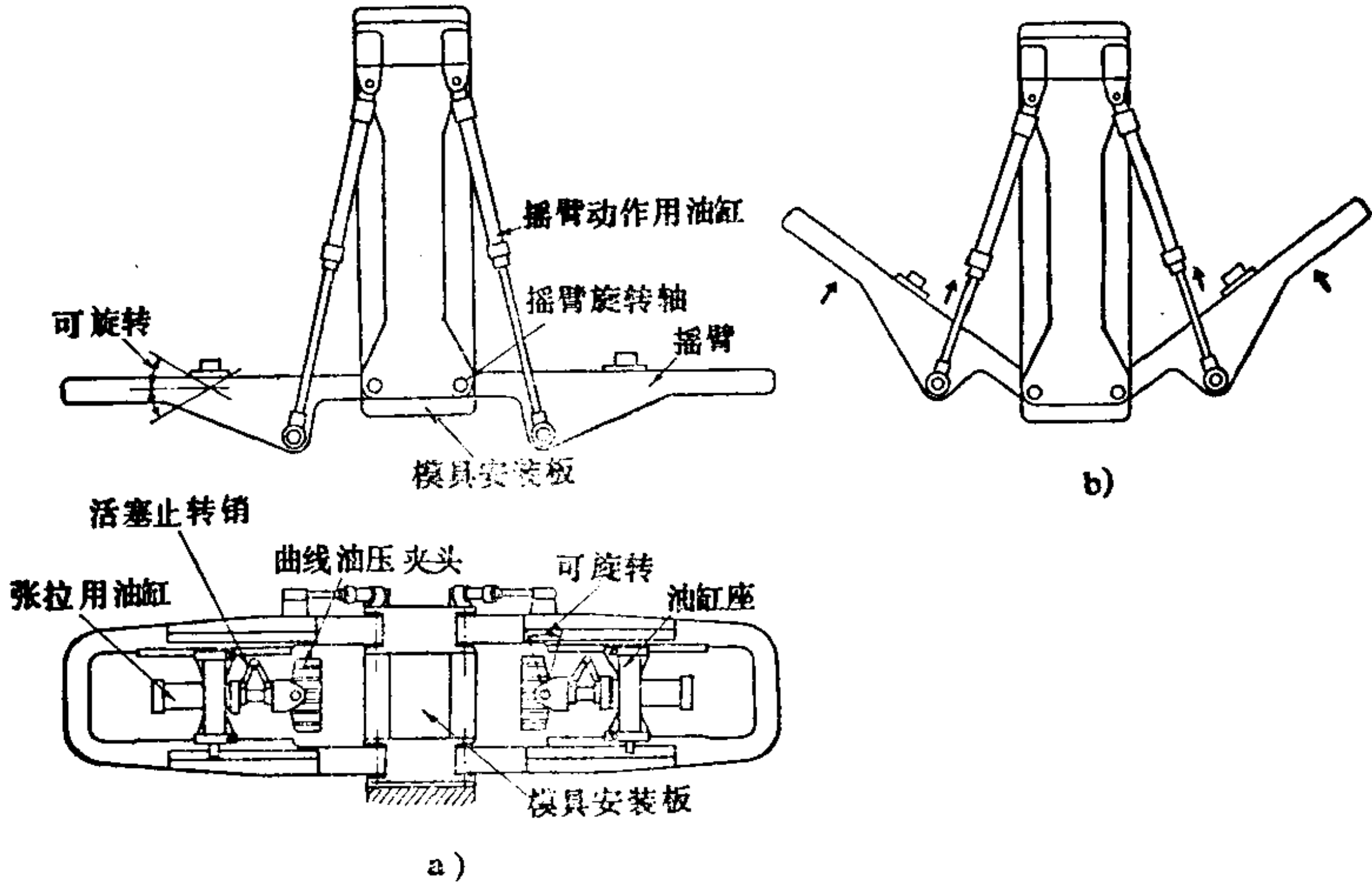


图4.203 张拉卷曲成形

a) 成形前的状态 b) 成形中间的状态

b) 时本成形机的基本作业顺序。(1) 首先决定张拉用油缸座的位置,但也要根据板坯长度及其规定的延伸量决定从模具中心到夹头的距离,并决定张拉用活塞的移动量。另一方面,在弯曲过程中必须保持张拉用的油压不变,因而在这一过程中活塞要对油缸作相对移动,其方向和移动量取决于凸模形状和摇臂旋转轴位置等机械结构的几何关系。应事先通过整个成形过

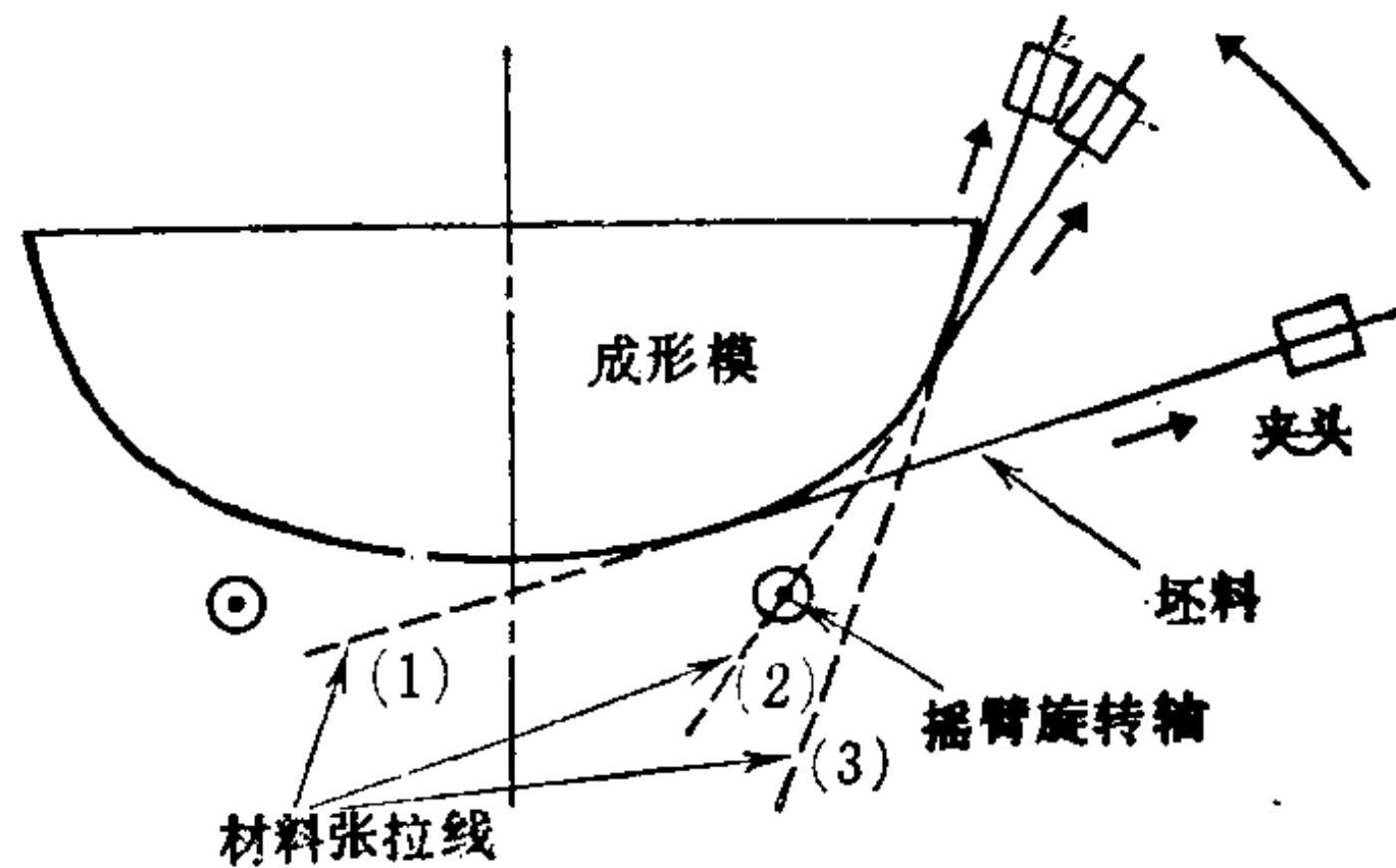


图4.204 材料张拉线和摇臂旋转轴的关系

程研究这种关系,在能避免活塞冲撞油缸前壁或后壁的前提下,决定油缸即油缸座的位置。(2)在板坯的中心预先作好记号,然后把凸模安装在稍微接近于板坯张拉线的位置,并在其表面涂上润滑剂。将板坯的一端夹紧,在将其中心与模具中心对准以后夹紧另一端。(3)施加张拉力 P_A 。在这个过程中板坯同模具略有接触。

(4)给驱动摇臂用的油缸加压使摇臂向后方张拉,并使张拉用油缸旋转。从而使板坯与模具贴合并弯曲。应在事先调整使张拉用油缸的中心线相对于摇臂中心线能作少许旋转,还要防止板坯的夹紧边缘处被强制弯曲。张拉力 P_A 要保持不变。在这个过程中,开始时材料张拉线在摇臂旋转轴的内侧,接着通过摇臂旋转轴,最后移动到摇臂旋转轴的外侧(图4.204)。摇臂的角速度,在通过摇臂旋转轴时可以快点,但在其前后必须要慢。即在使用小型模具时,摇臂的角速度如果太快,张拉用的油压跟不上而使张拉力逐渐减低,也就是说弯曲是在张拉力 P_A 减低或完全没有的状态下进行的。为了使张拉用的油压保持不变,必须以与该油泵流量相应的角速度使摇臂动作。对于这种情况,在使用大型模具时如果摇臂的角速度太快,则与上述的情况相反,张拉用的油压会急剧上升,结果造成加在板坯上的力超过最初张拉力 P_A 。这时也必须降低摇臂的角速度。另外,对于抗拉强度大的一类材料也要减慢摇臂的角速度。(5)如果能预先改变左右弯曲用油压柱塞的速度,或者使其一方停止(图4.205),就能进行左右不均一的成形。另外,如果是经常进行左右对称成形的专用机,就要把驱动一个摇臂用的油缸放在凸模后方,并从该柱塞引出一组左右连杆与摇臂连接。(6)当板坯被卷曲在模具上而弯曲完成时,就要操纵压力调整阀使张拉力由 P_A 增加到 P_B 。(7)在 P_B 卸载后即松开夹头取出成形件。使摇臂前进回到原位。

在本成形法中,也能采用 $M-P$ 的成形方式(参照图4.187a,在弯曲过程中要使张拉力准确地为零是困难的,但有可能使其成为极小值,如保持在弹性极限以下的一定值)。与a节所述的两端固定式相比,本法虽增加了油压系统,机构也复杂化了,但是可

以控制张拉力，这是一个很大的优点。大容量的设备也有在上下两方都装备摇臂动作油缸的。

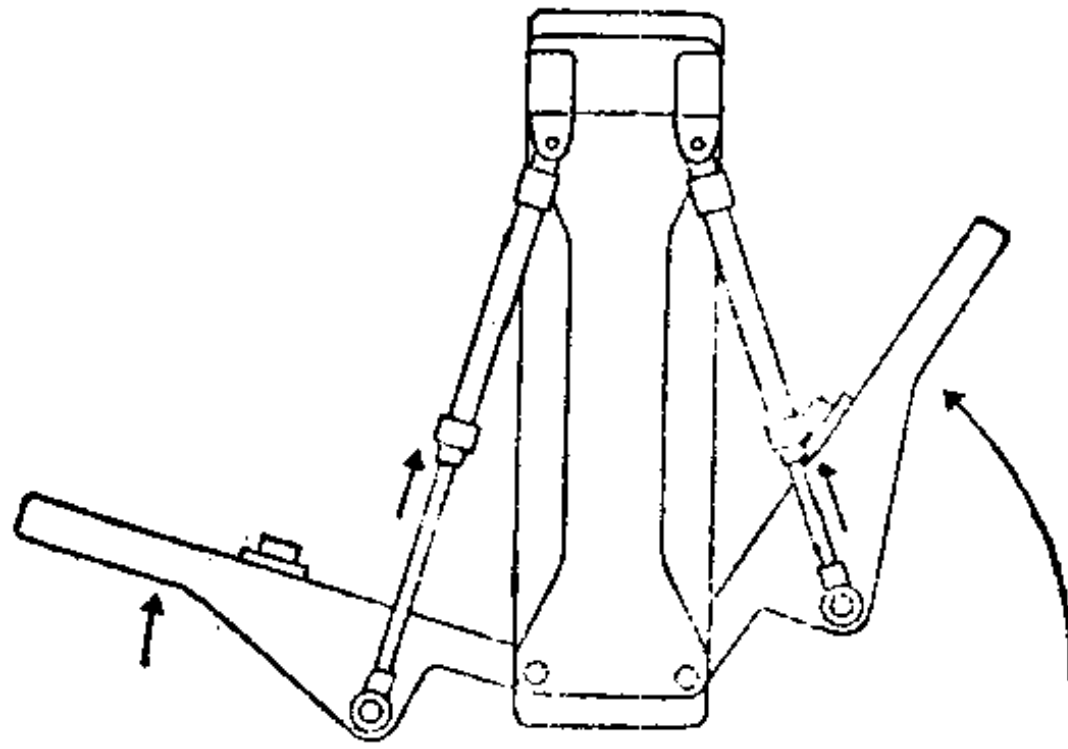


图4.205 左右不均一的张拉卷曲成形

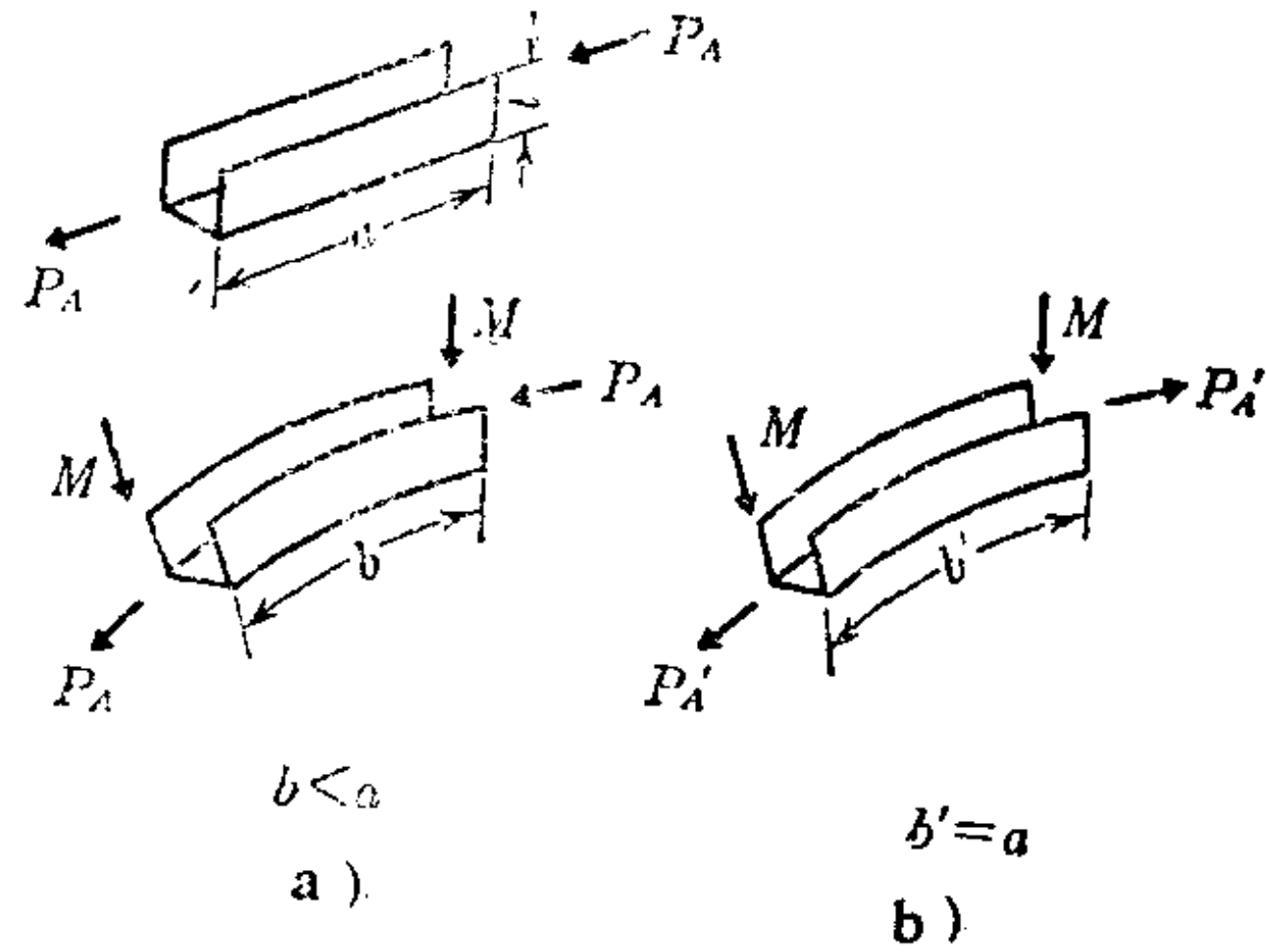


图4.206 型材的张拉成形
a) 压力一定的场合 b) 位移一定的场合

上面所叙述的张拉卷曲成形法，是通过直接控制张拉用油压加载张拉力的方法。因此，是在一定张拉力 P_A 的作用下完成弯曲的过程，由图4.188 b) 可知，坯料内侧的纤维一度伸长后又收缩。在薄板成形时该收缩量很小，但在成形型材时（图4.206），因为 t 大，致使 b 变得比 a 小即出现收缩，在这个过程中要产生皱折。如果能使 $b' = a$ 则不会产生皱折。换言之，不是保持 P_A 不变，而是保持 $b' = a$ 。位移控制式张拉卷曲成形机^[131]就是合乎这个目的的设备，这种方式即使在弯曲加工中也能使成形材料的位移量（这里指的是型材内面的长度）保持给定值。这种成形机是在张拉卷曲成形机（特别是通过油压使成形模前后移动的）上安装了伺服机构的一种设备，伺服机构包括同步控制变压器、同步信号发生器、伺服放大器和伺服阀等（图4.207）。在成形模上方装有与成形模曲面相同的样板，钢带把样板中心和同步控制变压器连接起来。下面介绍弯曲加工中伺服机构的作用。在施加张拉力的状态下，当成形材料被卷曲在模具曲面上时钢带也就被卷曲在样板的曲面上，其长度与成形材料的长度（内表面长度）相等。例如，当油压增加型材伸长时，同步变压器的转子作相应于该伸长量的转动。另一方面，由同步信号发生器给出一定的数

值，并以此值同上述的转动角位移进行比较，经过放大器传给伺服阀，来调节张拉用油压柱塞的流量，直至使偏差为零。因此，即使在弯曲进行过程中，成形材料的伸长量即长度能经常保持一定（给定的值）。

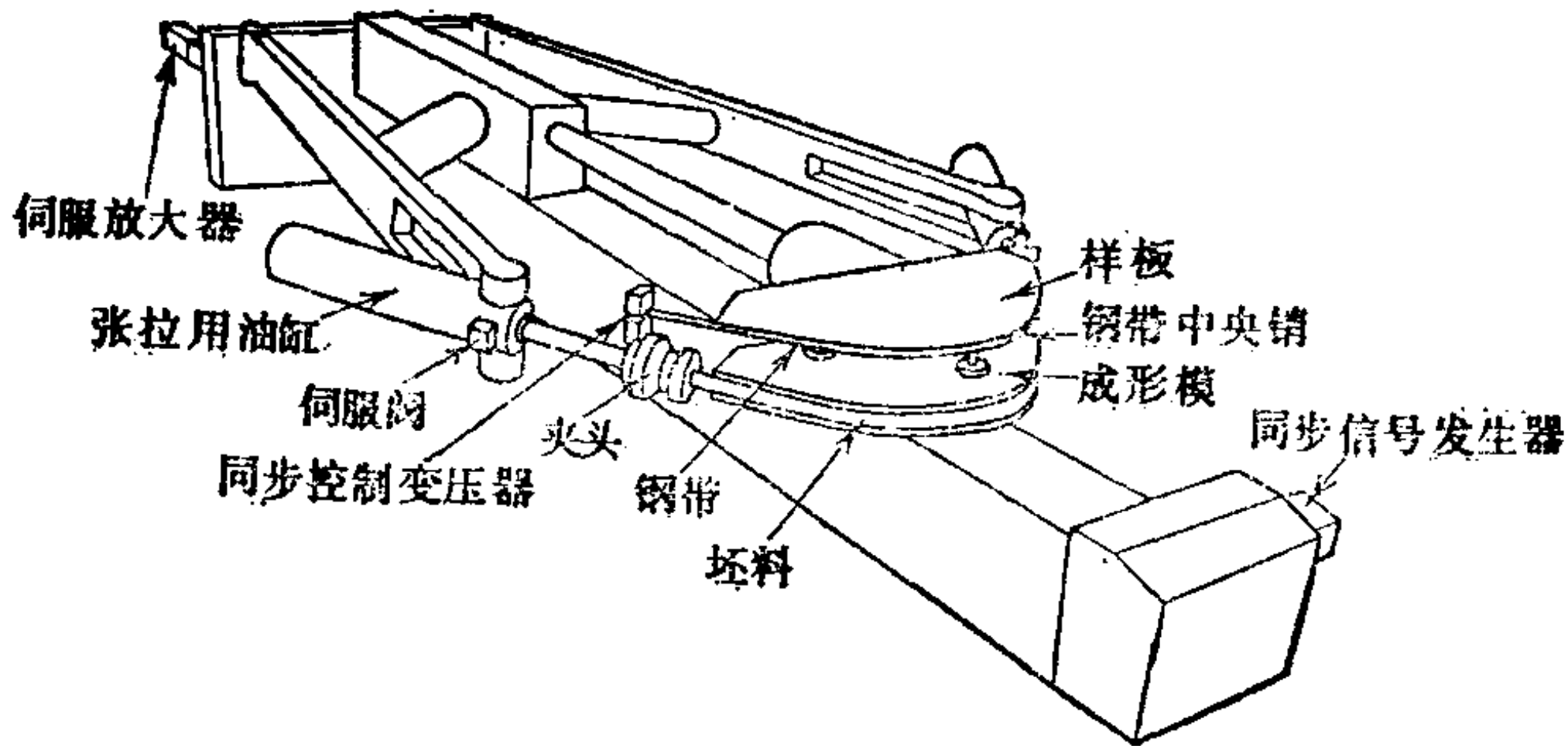


图4.207 位移控制式张拉卷曲成形

即使油泵发出的压力有所变动或者坯料的材质不均匀，位移控制方式也能使成形材料的变形量经常保持与给定值接近。一般，在薄板的塑性领域里，因为应变增加率大于应力增加率，所以即使是薄板的张拉成形也能利用这种方式获得形状精度良好的制件。

c. 旋转张拉成形法 成形机的原理如图 4.208 所示，模具和一个夹头装在旋转工作台上，另一个夹头装在张拉用油压柱塞的端部。张拉力附加方式采用 P_A-M-P_B （参照图 4.187 b）时的标准成形顺序是：首先，如图 4.208 a）所示将坯料夹紧，由张拉用油压柱塞给出规定的张拉力 P_A 。然后，如图 4.208 b）所示使工作台旋转进行弯曲加工。

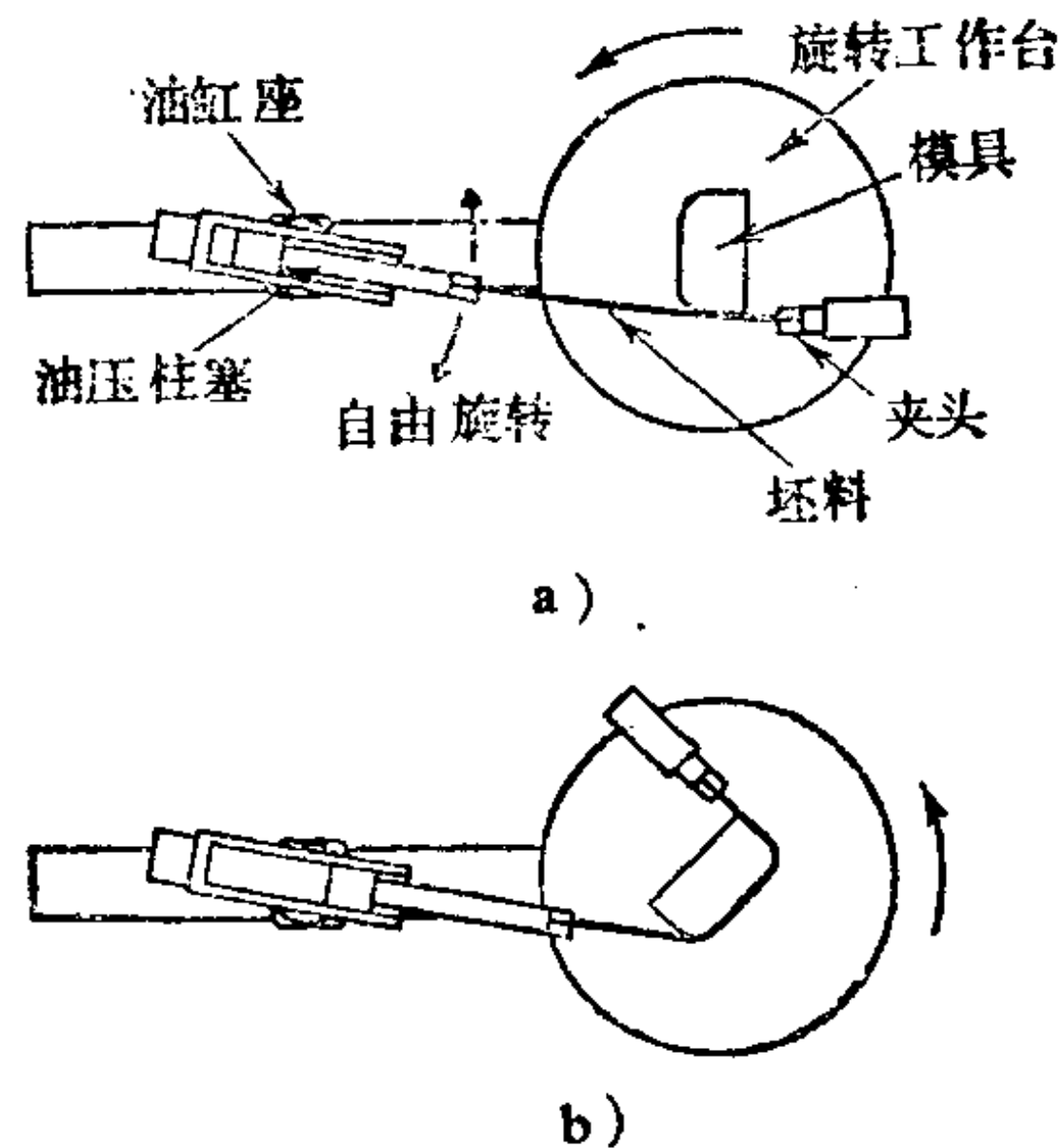


图4.208 旋转张拉成形

a) 成形开始的状态

b) 成形中间的状态

在后一个阶段，使张拉用的油压保持不变。弯曲加工完成后使工作台停止旋转并加以固定，同时使张拉力增大到 P_b 。另外，减小 P_k 也可以进行类似于 $M-P$ 方式的成形。

这种成形法基本上与张拉卷曲成形法相似，但也有下列的主要不同点。（1）因限于卧式，在结构上高度受到限制，所以加工坯料限定为型材和管材。由于弯曲半径必然要小于工作台的半径，故以 1 m 左右为限。（2）张拉用油压柱塞只有一个，所以操作比较简单。但是，这种方法是通过模具旋转进行弯曲加工的，因而在弯曲加工中张拉用油压柱塞要在油缸内前进，前进行程相当于坯料和模具接触长度。因此，油缸的长度也要相应加长。此外，还要考虑坯料的长度和给定的延伸率大小来决定油缸的位置。（3）当弯曲完成后使张拉力增大到 P_b 时，成形材料在与弯曲过程中相反的方向上受到张拉。材料相对模具在一个方向上滑动，一般比对称于模具中心左右进行滑动的张拉卷曲成形法的滑动量大。因此，旋转张拉成形法的摩擦损失较大，有效张拉力相应地降低。

d. 张拉拉延成形法 同从 a. 到 c. 所叙述的张拉成形法相比，本成形机的特征〔132, 133〕是在立式单动压力机上装有张拉用的附件，而且是用凸模和凹模两者进行成形的。成形的坯料只限于薄板，成形的顺序如下（图4.209）：（a）将坯料插入一个左右成对的张拉用附件之间并将其两端夹紧，利用油压在水平方

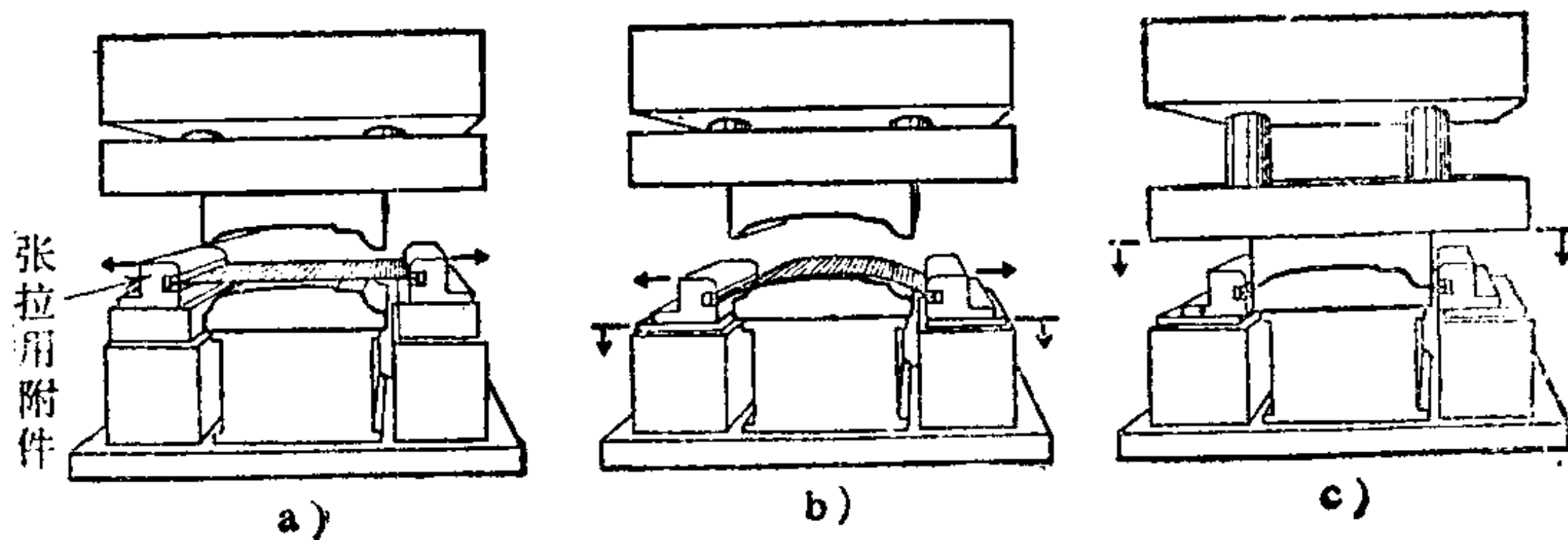


图4.209 张拉拉延成形

向进行张拉。该张拉力取为稍高于材料的屈服点。(b) 通过另外的油压柱塞使张拉用附件全部下降, 将处于张拉状态的薄板压在下模(凸模)上来进行某种程度的成形。在这个过程中因为张拉力保持一定, 所以随着板坯与模具的贴合, 左右夹头的直线间隔相应地缩短。(c) 当左右夹头达到规定位置时, 上模(凹模)下降, 在上下模之间进行成形。成形完成之后就按照同上述顺序相反的程序动作, 最后取出成形件。

这种成形法与原来的张拉成形法相比, 有如下不同点: (1) 由于使用上模和下模进行成形, 所以制件即使带有凹凸的形状, 只要不太复杂都能进行成形。另外, 如果改变左右夹头的下降量或者在模具的前缘或后缘加上拉延筋, 就能成形汽车的挡泥板、车门、壁板和减震器等。但这种成形法和张拉成形法一样, 适合成形单方向(张拉方向)的伸长变形量在相邻纤维之间变化不太大的形状。(2) 由于设备是立式的而且夹头的方向是水平的, 所以板坯的插入和制件的取出简便。使用机械压力机再附加上适当的送进装置, 可进一步缩短循环时间。(3) 弯曲加工后不能再增加张拉力。因此弯曲精度的提高, 不能依靠板面方向的拉伸力 P_B (图 4.187 b 的 P_B), 而是要依靠加给板面的垂直压缩力 (由于是由模具给与的, 在原理上与 P_B 的效果相似, 但其大小和摩擦的影响等不如 P_B)。

另外, 这种成形法与原来采用防皱压边圈的双动压力机方式相比, 有如下不同之点: (1) 成形设备采用单动压力机即可, 为了成形同样的板材, 单动压力机的能力只要有双动压力机拉延力(不包括防皱压边力)的 $1/3$ 左右就够了。并且这时张拉用附件的张拉和下降能力的总和, 有防皱压边力的 $1/3$ 左右也就够了。(2) 因此, 模具所受的压力减小, 对模具的耐压要求也就相应地减低, 更换模具也比较方便。(3) 因为这种成形法只需要左右一对夹头留量, 与周围都需要防皱压边的双动压力机方式相比, 材料损失少。但是双动压力机成形方式可以成形更为复杂形状的制件。(4) 为了减轻构件的重量和节约原材料, 最近采用

的成形用薄板逐渐变薄。

因此，要求有相当程度的张拉刚性。由于本成形法在成形加工之前要给与张拉力，使材料产生均匀的加工硬化，所以一般来说制件的张拉刚性增大。

e. 扩展成形法 本成形法〔134〕是通过缝焊法把预先弯好的薄板两端焊接起来，以这种圆筒形的半成品作为坯料。先将圆筒形坯料套在凸模（拼分模）的外侧，接着利用楔形工具外侧压扩凸模使坯料在圆周方向扩展而成形（图4.210）。变形的机理可以认为与4.8.4中a节所述的两端固定式张拉成形法相同。因此，不能在弯曲加工前施加张拉力，也不能控制弯曲加工后的张拉力。凸模由两块或四块拼合而成。利用这种方法成形的制件形状，可大体上分为以下两类：（1）把整个坯料成形为一个制件，因坯料是筒状，实际上成为胀形加工。利用液压或在液体中放电产生的压力进行胀形是只使用凹模的成形方法，而本成形法是使用凸模的成形方法。胀形加工法是以直径较小的圆管本身作为坯料，适合于波纹管 and 带阶梯的空心轴一类的轴对称件或管接头的成形，而本成形法适合于将薄壁的大圆筒成形为方筒（边的曲率半径大）。多少有些凹凸形状的圆筒也能利用凸模和凹模进行成形，但是调整模具需要相当熟练的操作技术，工作效率也较低。（2）在成形结束时利用装在凸模上的分离切刀将筒形件切断，切成两块或四块曲面板。这种成形法与4.8.4中d节以前所述的张拉成形法相比，其优点是不需要夹头留量而且能同时加工出几个制件。但不足之处是焊接或切断等工序需要工时而且所需的设备也较大。

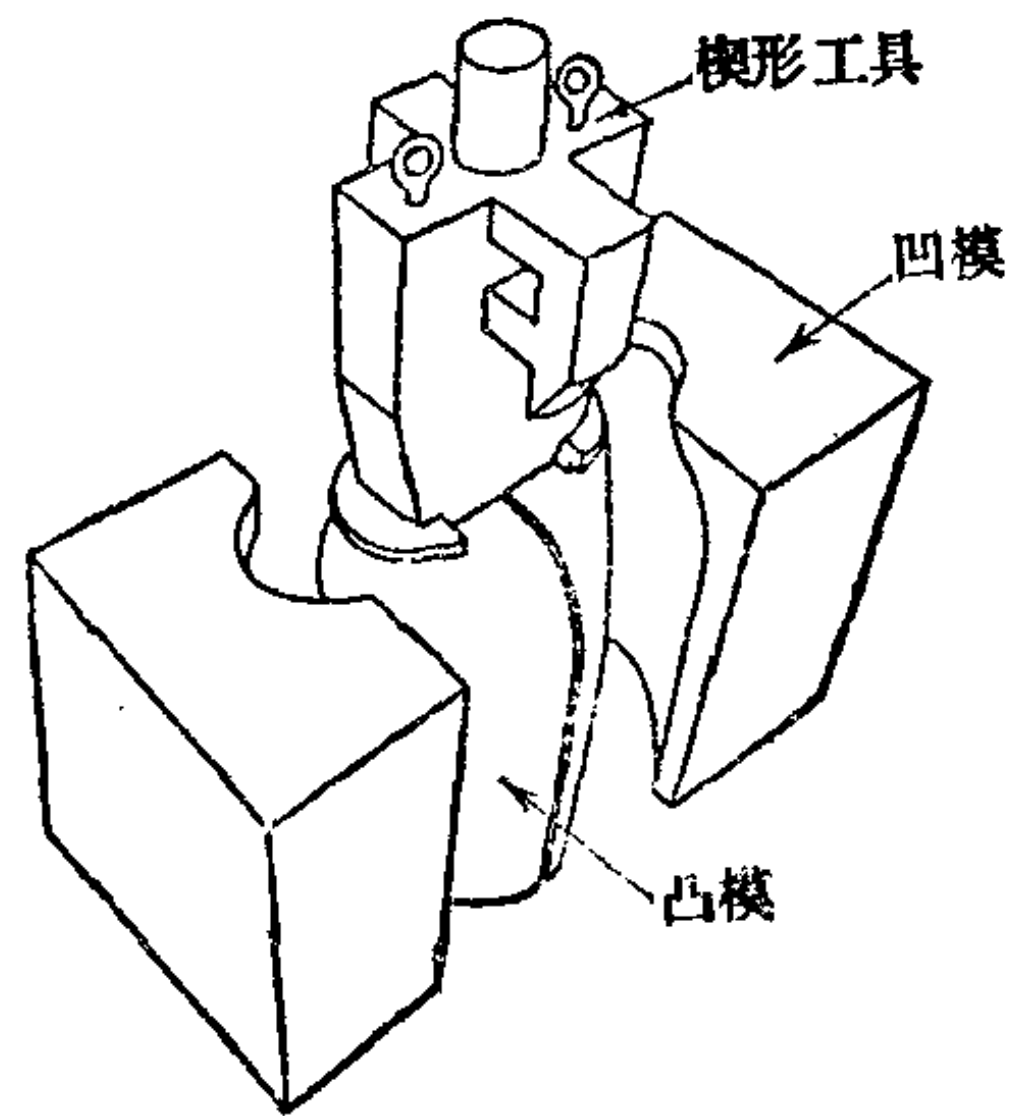


图4.210 扩展成形

表 4.27 所示为上述各种张拉成形法的特点。

表4.27 各种张拉成形法的特点

成形的形式	容量	坯料种类	弯曲半径	弯曲精度	作业效率	特 征
两端固定式张拉成形法	中、小	薄板	中、小	普通	普通	—
张拉卷曲成形法	大、中、小	薄板、型材、管材	大、中	良好	普通	通用性
位移控制式张拉卷曲成形法	大、中	型材、薄板(窄幅)	大、中	良好	普通	—
旋转张拉成形法	小	型材、管材	小	良好	普通	—
张拉拉延成形法	大、中	薄板	大、中、小	普通	良	可成形复杂曲面
扩展成形法	中	薄板	中	普通	劣	可进行筒的胀形

4.8.5 成形加工的张拉力

在薄板成形加工中，除了弯曲外也需附加张拉力的情况相当多。例如在圆筒深拉延时，如果只着眼于通过凹模肩部半径的部分，就要利用防皱压边圈来附加张拉力。其目的是为了抑制皱折的发生和防止板的厚度增大。在半球形拉延的场合也是利用防皱压边圈给球面附加张拉力，而在薄板的液压胀形加工中则是通过固定其周边附加张拉力。

但是，由于它们的多数情况是在局部或在变形过程中施加张拉力，而且又不能控制，所以不能叫做张拉成形法。

图 4.211 所示为厚板弯曲加工中只在弯曲半径大的部分附加张拉力的一例。成形的方法是把坯料放在由三块组合的拼分式凸模上并将其中央压紧，利用设在左右的一对辅助工具使坯料与凸

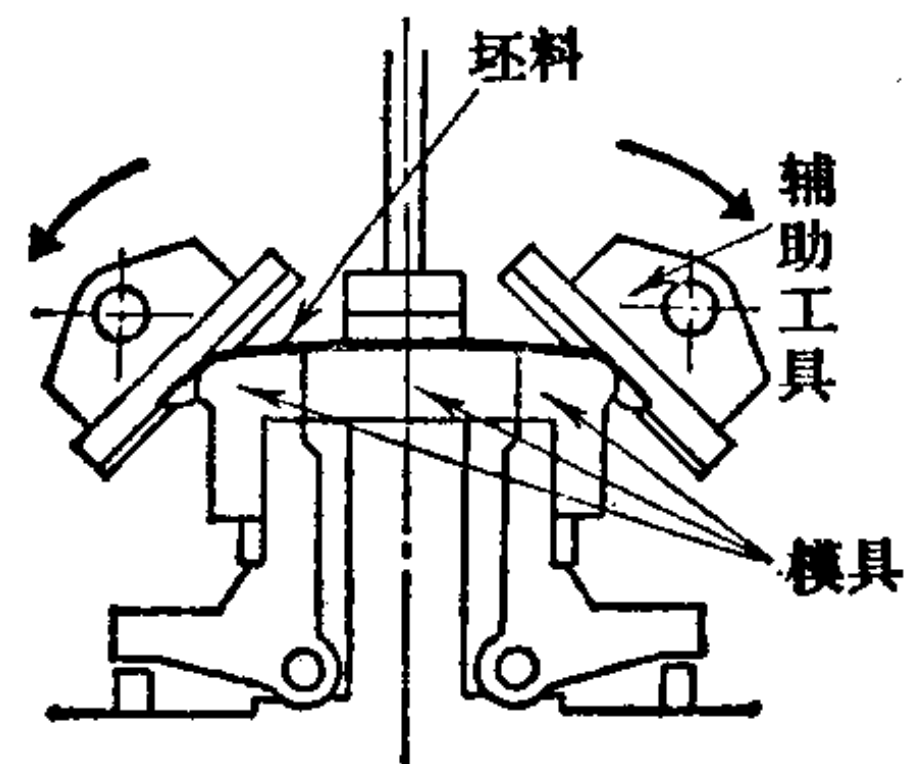


图4.211 厚板成形中附加张拉力的例子

模贴合并将其两端卷曲在模具上。随后使拼分模中的左右两块张开，给成形材料施加张拉力。

4.8.6 模具和润滑剂

对模具的要求是，即使加上压力也能保持其原有形状而且耐磨。本成形法由于坯料和模具的接触面积大于坯料的断面积，所以即使所加张拉力大，作用在模具上的单位压力也比弯曲模或拉延模小得多。因此对模具的硬度、耐磨性和耐冲击性等的要求并不苛刻，有可能采用廉价而轻量的材料制造模具。基于这些理由，本成形法也适合于试制件的成形和多品种小批量生产。

模具的材料〔135〕除钢材以外，还可以采用木材、合成树脂、混凝土和锌合金等。用木材制造的模具不仅重量轻而且容易修整。如果用金属制造这种模具的骨架并使硬质木材的端面与模具面方向相同，就能很好地承受压缩力，也可以在木材表面粘贴金属板（可贴上最初制造的产品）来加固。合成树脂的最大特点是价钱便宜而且重量较轻。本成形法往往以大尺寸薄板为对象，因而要尽量设法减轻模具重量，从这一点来看，用木材或合成树脂制造模具是最合适的。混凝土的价钱便宜而且耐压力较强，所以也有用它来制造模具的，但待干燥以后要在其成形面上涂以合成漆使之平滑。用锌合金制造的模具适用于复合曲面的成形。其制造方法是首先用石膏制成凹模的模型，以此为基础制造砂型，再将锌合金浇入砂型。在大批量生产或制件尺寸精度要求特别严格的情况下，则需要采用钢制模具。对于大型模具，为了减轻重量可制成空心的并用加强筋加固。对于模具的成形面要进行研磨，应尽量防止因坯料同模具相对滑动引起的表面划伤。

在本成形法中除了采用上述的模具以外，对于复杂的复合曲面成形还要采用如图 4.197 所示的辅助工具，对于型材或管材的成形则需采用如图 4.201 所示的压板和挠性芯子等。

在各种板金成形法中，本成形法的特征是模具的单位压力小，但为了使张拉力更有效地起作用，必须在模具的工作面涂以各种深拉延用的润滑剂或机器油进行润滑。对于复合曲面或型材

的成形，在局部高压的地方或坯料与模具相对滑动量大的地方，要特别注意润滑问题，要设法使各部分的变形量尽可能地均匀。如果只是为了这个目的而在局部涂上过厚的润滑剂，就会使润滑剂没有排出的地方而产生鼓胀，有降低产品质量的危险。另外，在复合曲面成形时，如果润滑过份良好，反而会助长滑动超过需要，而成为发生皱折的原因。

4.9 回转成形

4.9.1 概述

a. 回转成形的分类 使板材或壳形件作回转运动，用辊轮作为工具所进行的成形总称为回转成形。板材成形时，是把坯料安装在成形模上用辊轮压挤出同成形模相同的形状，它有减小圆板坯料外径的旋压法（图 4.212 a）和不改变外径而以减少板厚为主的强力旋压法（图 4.212 b）。成形模可以选用各种回转对称的形状，坯料不仅可用板材而且还可采用冲压、锻造、铸造和切削的半成品，因此这是一种非常有用的加工方法。对管坯进行回转变薄拉延，即使管坯和成形模一起回转，用辊轮使壁厚减少，以此得到长度增加的制件。

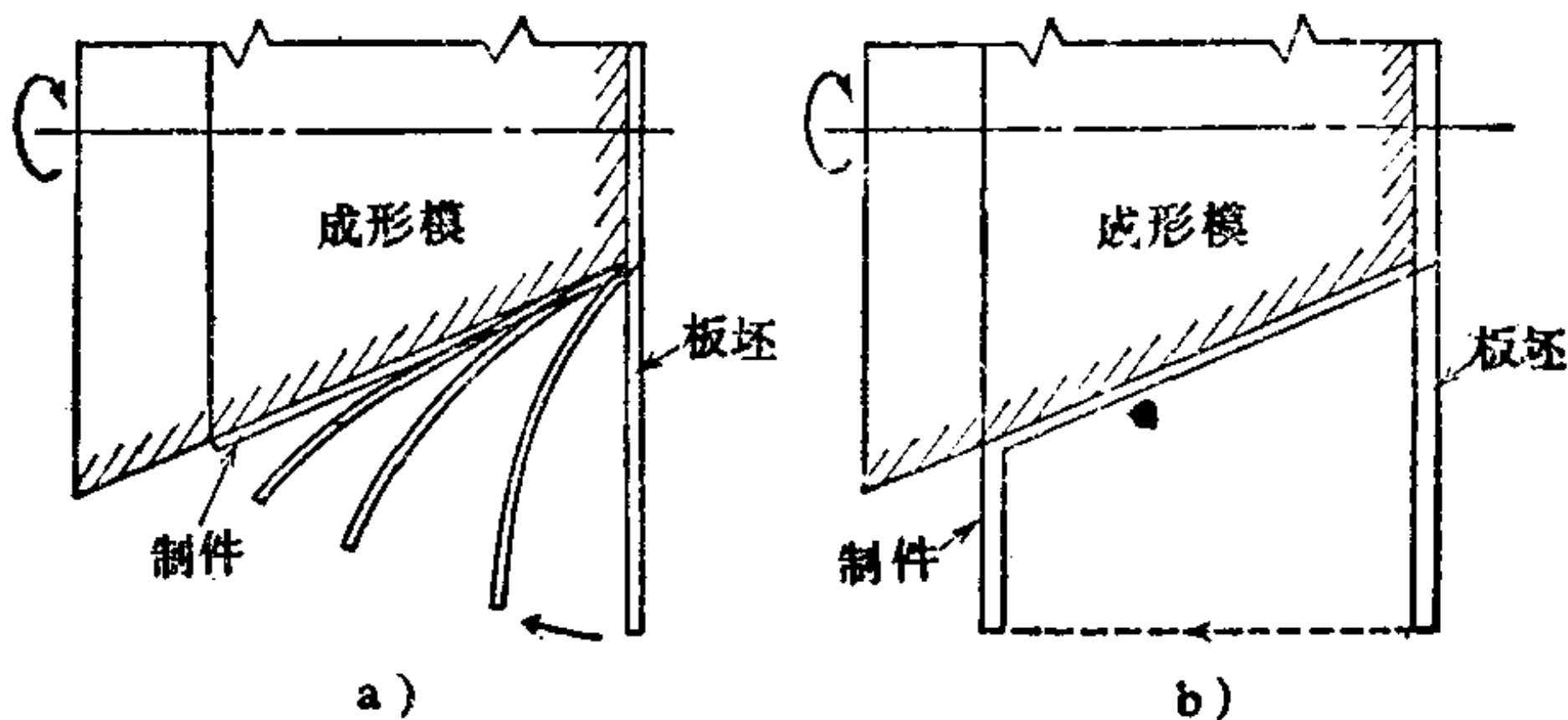


图 4.212

a) 旋压 b) 强力旋压

此外，旋转经冲压和上述方法制作的壳形制件，用辊轮作为工具使其一部分弯曲（翻边）、挤压展宽（胀形）、成形成波纹（起伏）、使制件结合（卷边接缝）、边缘倒圆（卷边）、边缘修整

压，并能改善其性能。

8) 节约模具费用。与深拉伸成形同一制件相比，模具费为其1/10。由于是局部加工，模具的磨耗和损伤少，寿命长。

9) 缩短加工时间。

10) 用自动机时，不需要高超的操作技术。手工旋压需要进行试操作，但强力旋压几乎无此必要。

11) 有助于减轻所设计零件的重量。因此飞机的机身和发动机零件用此法加工的例子很多。

12) 批量生产形状比较复杂的零件是经济的（参照图4.217）。

虽除上述之外还可能有一些优点，但有如下缺点：

1) 只限于加工回转对称形状的制件和机械零件。比不上能进行异形加工的冲压方法。

2) 由于制件的延性减少，存在残余应力，旋压焊接件时要注意。

3) 批量生产简单形状制件时，加工速度不及冲压。但是，少量或批量生产圆锥形状制件比冲压有利。旋压可以说是一种适

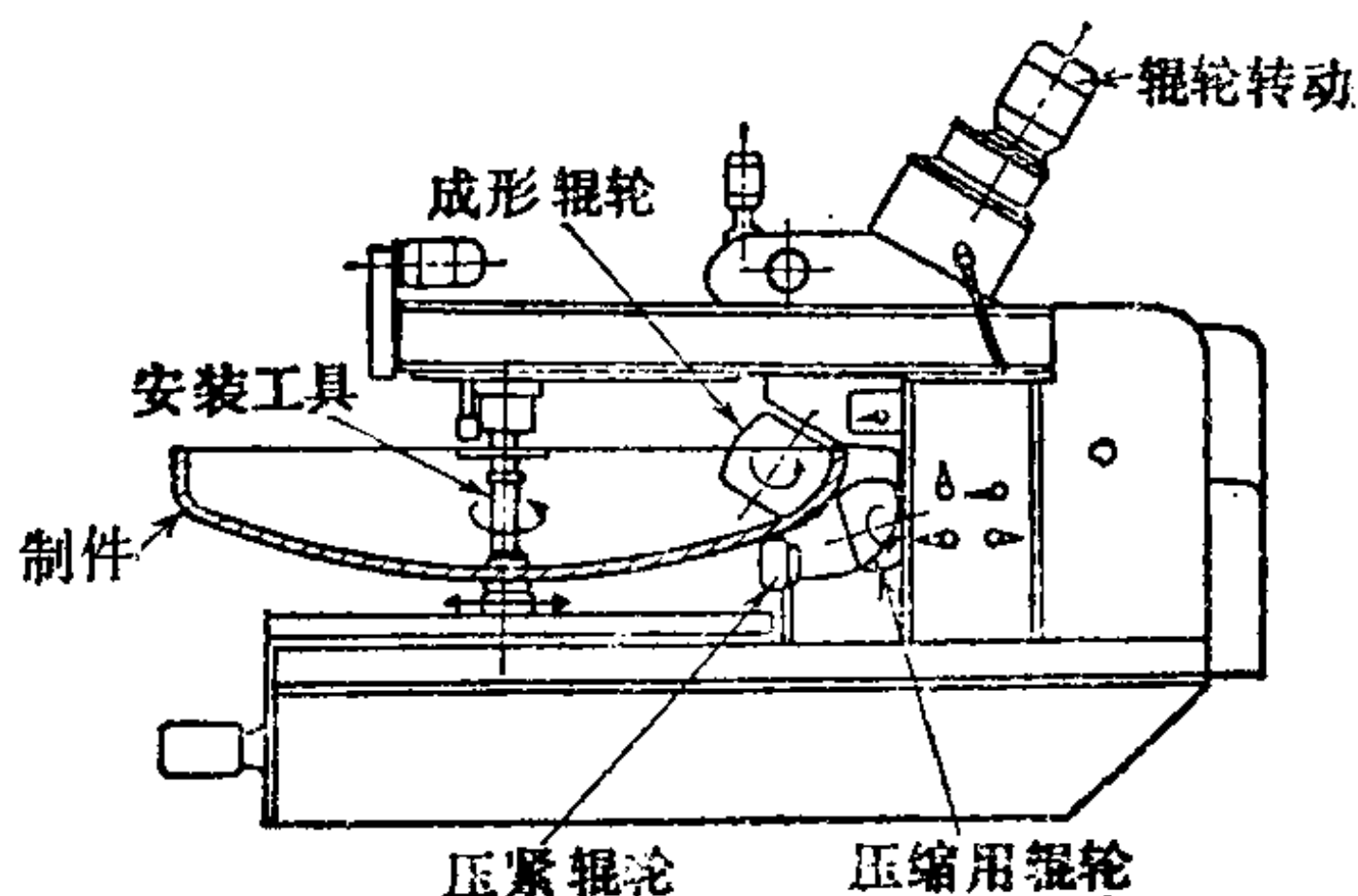


图4.215 外缘翻边机

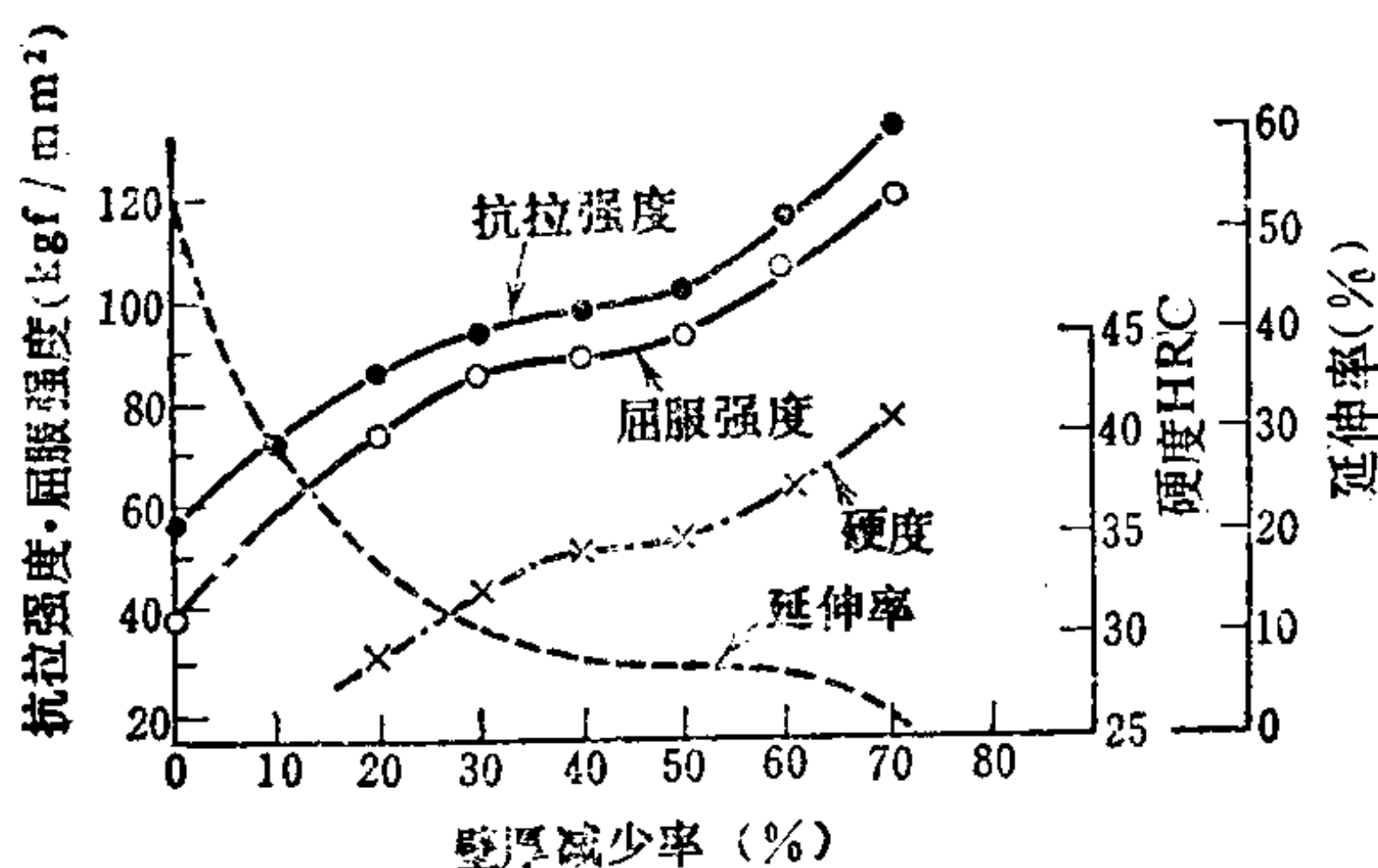


图4.216 强力旋压后材料的性能
(18-8不锈钢)

合于多品种、小批量生产的加工方法。

d. 能加工的制件形状示例 图 4.217 所示为用板材及其他中间制成品回转成形出的制件的典型形状。与此类似的形状或稍有变化的制件几乎都能加工。如果要举三两个实例的话, 则有家用容器、器具、装饰品、工艺品、电气照明、电气和通讯器具、零件 (雷达用抛物面天线等)、化工容器 (锅炉板、各种封头、料斗、贮藏器、油罐、导管装置等)、酿造设备零件、轻型农具器具、食品工业 (装置、电炉容器、烹调器具等)、机械工业用品 (发动机零件、压缩机罩、喷管、汽轮机轴等)、飞机机身和其他零件、火箭零件、驱动装置零件等。

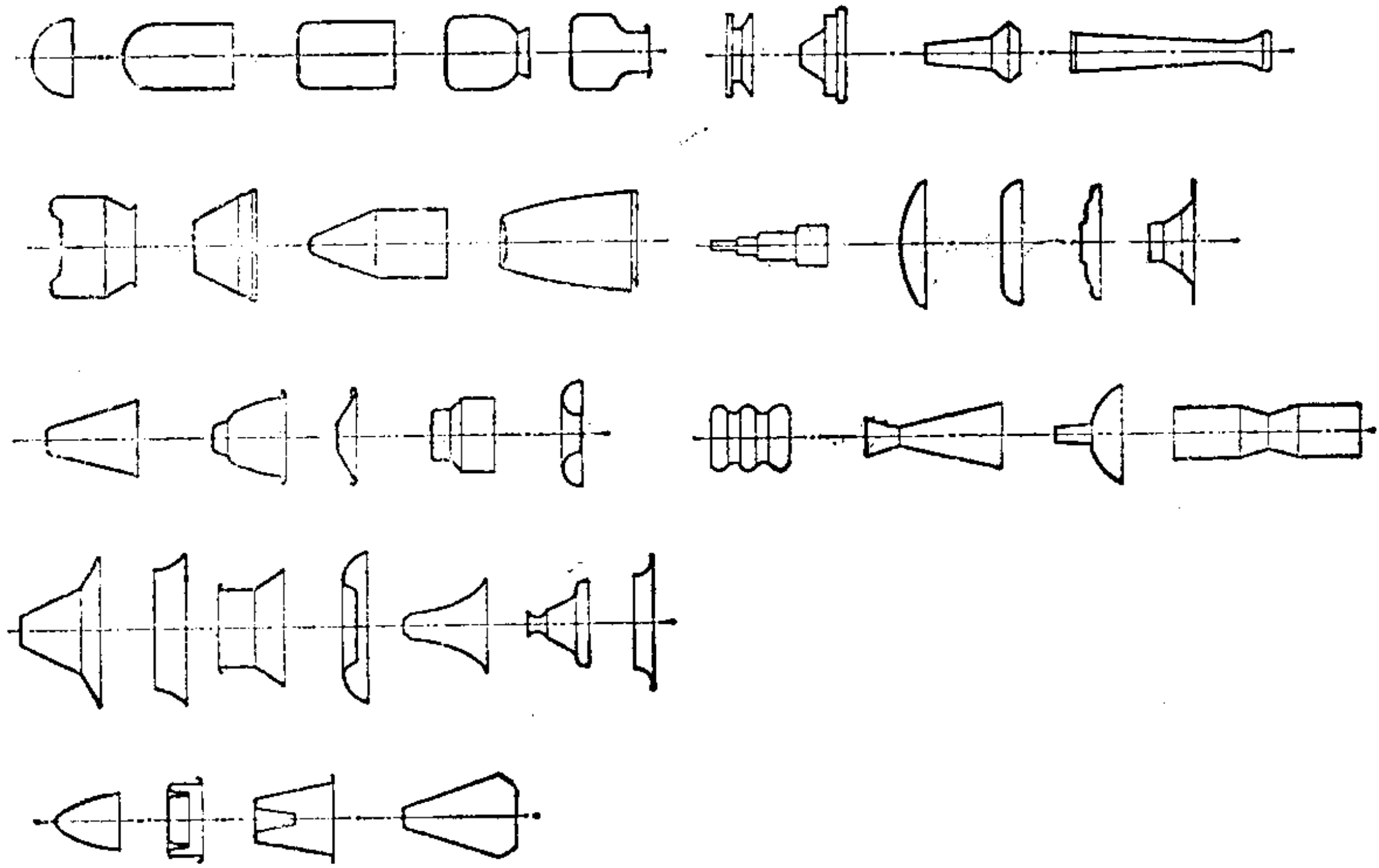


图4.217 回转成形制件的形状示例

倘若把图 4.250 所示的机械零件也加以考虑, 那末可以认为旋压加工会得到更广泛的应用。

4.9.2 旋压加工

a. 旋压的基本作业

(i) 加工条件 由板料制成圆筒形制件是最基本的作业。图 4.218 为用赶棒旋压的制件示例, 由于加工过程中赶棒仅和板

料的一部分接触，容易产生皱折，因此要按经验将板坯旋成(I)那样的带有和加工方向相反的翻边凸缘形状。

图 4.219 所示为在自动机上对它实施旋压的情况。即上下两个靠模板中，上靠模板为固定的，其轮廓和成形模相同，下靠模板根部由支点固定，为可动的。仿形触头沿着可动靠模板移动，由于辊轮作和触头同样的运动，因此辊轮的形状、送进速度 v mm/rev 和移动螺距 P (mm) 成为该作业的重要加工条件。辊轮多为工具钢淬火制成，形状如图 4.220 所示。拉延旋压操作时主要用 a、b 型辊轮，其圆角半径 ρ_R 、直径 D_R 根据

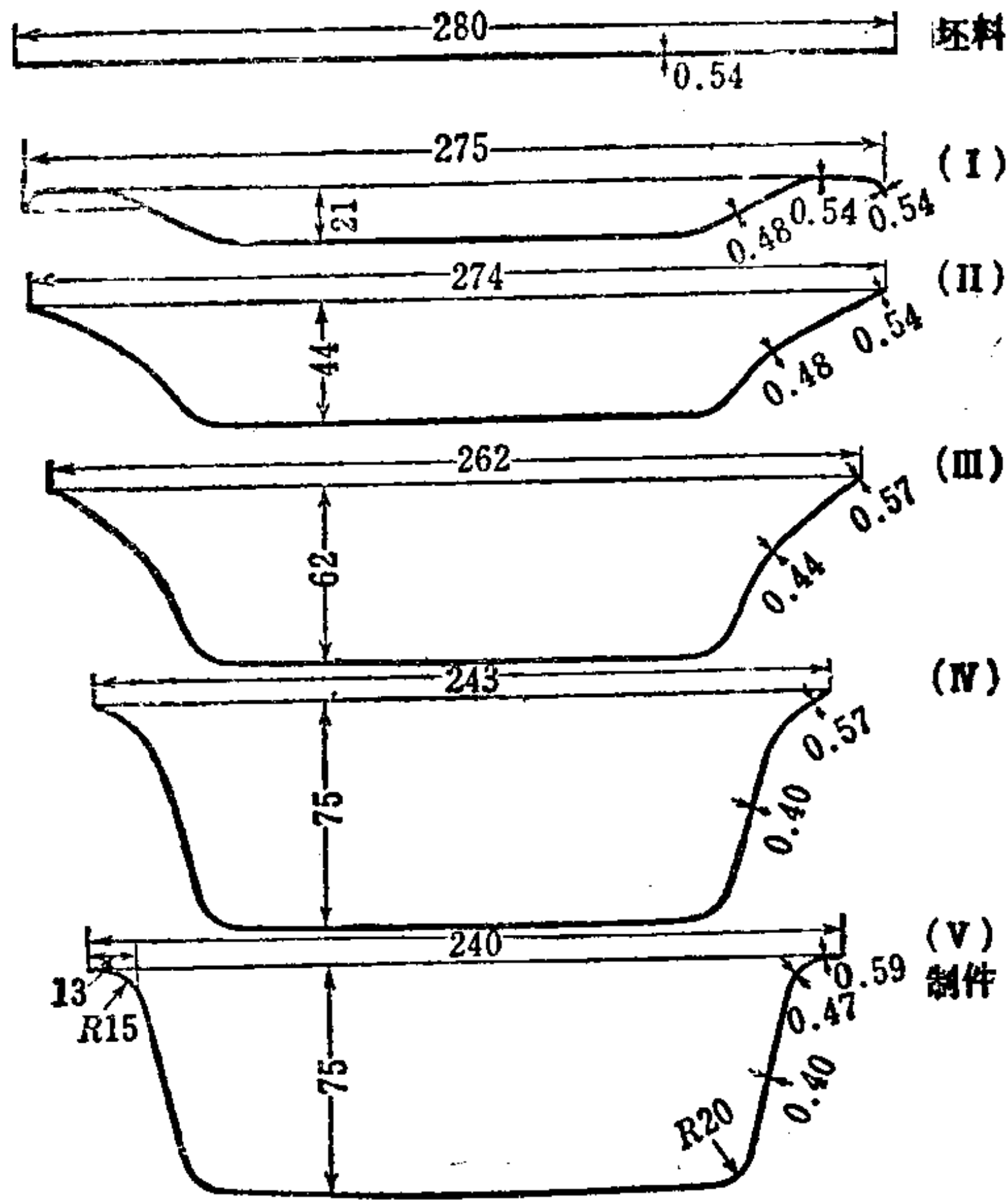


图4.218 旋压制件示例 (坯料直径280mm, 板厚0.54mm, 旋压比约1.2)

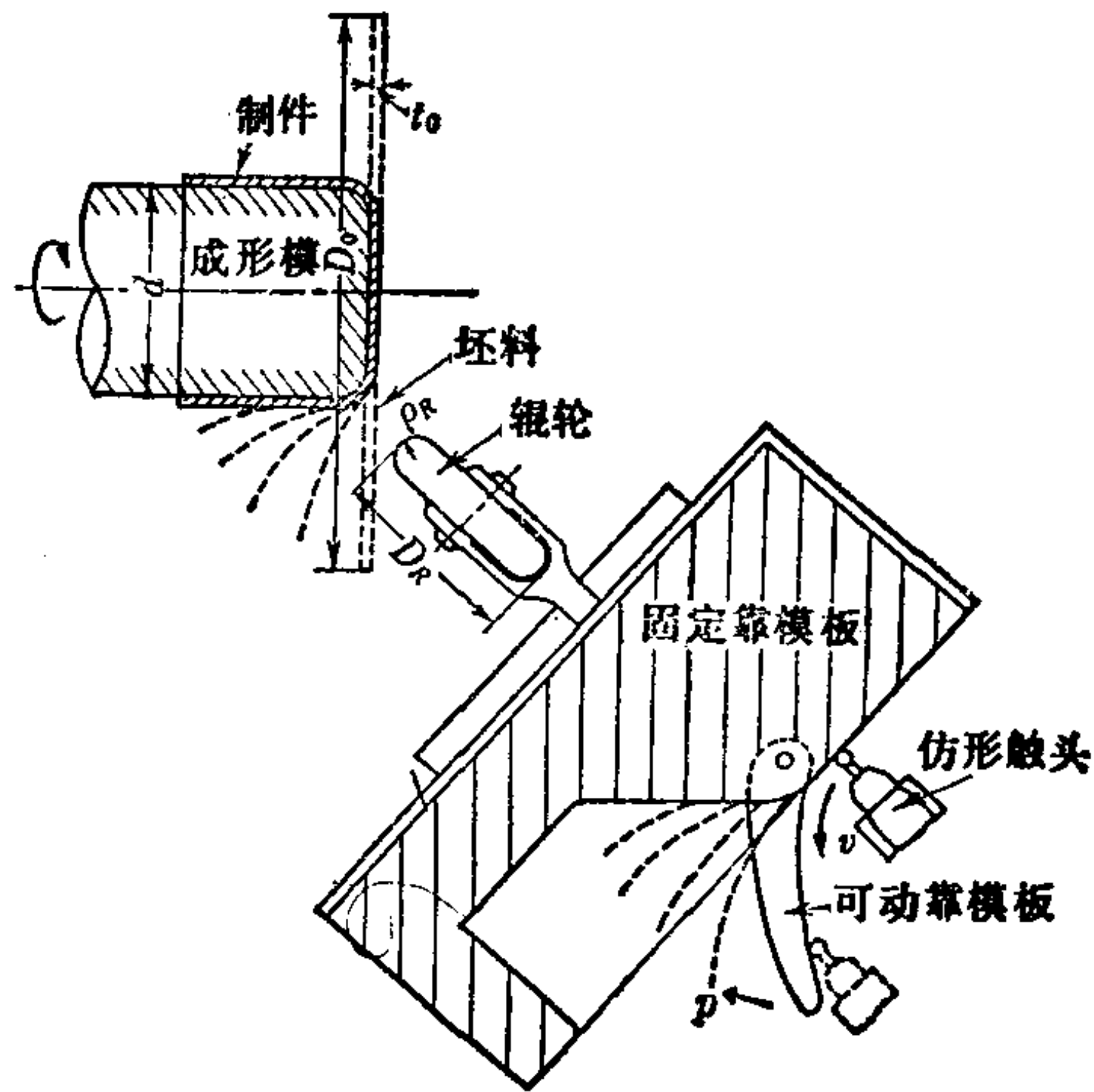


图5.219 自动旋压机旋压

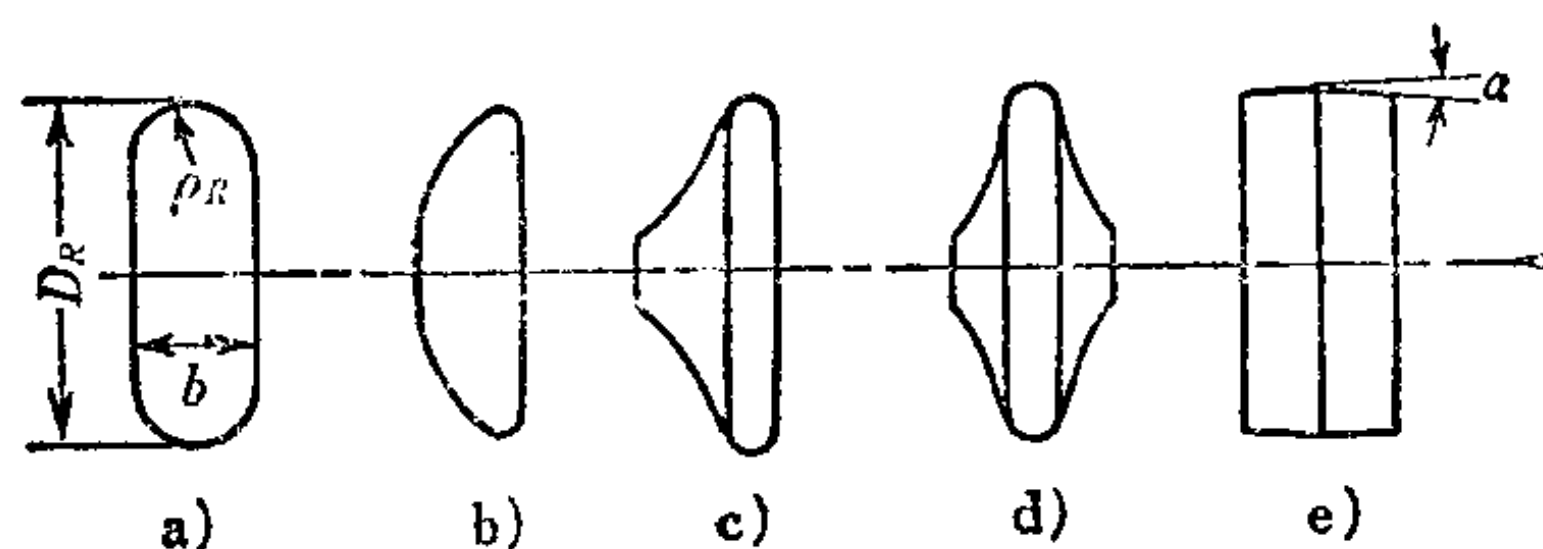


图4.220 辊轮的形状

a) 旋压用 b) 旋压、强力旋压用 c)、d) 缩口, 辊波纹用
e) 表面加工用

表4.30 辊轮尺寸 (参照图4.219)

辊轮直径 D_R (mm)	辊轮宽度 b (mm)	辊轮圆角半径 ρ_R (mm)				
		a	b	c	d	e (α°)
140	45	22.5	6	5	6	4 (2)
160	47	23.5	8	6	10	4 (2)
180	47	23.5	8	4, 8, 10	4, 8, 10	4 (2)
200	47	23.5	10	10	12	4 (2)
220	52	26	10	10	12	4 (2)
250	62	31	10	10	12	4 (2)

表4.31 坯料的回转速度 (铝板)

坯料直径 (mm)	坯料厚度 (mm)	坯料回转速度 (rpm)
<100	0.5~1.3	1100~1800
	0.5~1	850~1200
100~300	1~2	600~900
	1~2	550~750
300~600	2~4.5	300~450
	1~2	450~650
600~900	2~4.5	250~550

使用要求选取, 表 4.30 所示为一个标准的例子。表 4.31 为旋压铝板时坯料的回转速度标准, 尺寸越大回转速度越低。

靠模板的形状, 除直线、圆弧外, 渐开线也能获得良好的结果〔137〕。当基圆半径为 a 时, 即可得到图 4.221 中的渐开线 PQ, 可由

$$x = a (\cos \theta + \theta \sin \theta)$$

$$y = a (\sin \theta - \theta \cos \theta)$$

表示。 a 按成形直径 d 的尺寸来决定。希望 $d/a > 0.3$ 。设回转中心的位置为 P ，距成形模端面为 x_0 ，距侧面为 y_0 ， y_0/a 固定在 $0.07 \sim 0.08$ 左右，再按如下的分析来选定 x_0/a 。图4.222 a)为 x_0/a 过小的情况，从A点

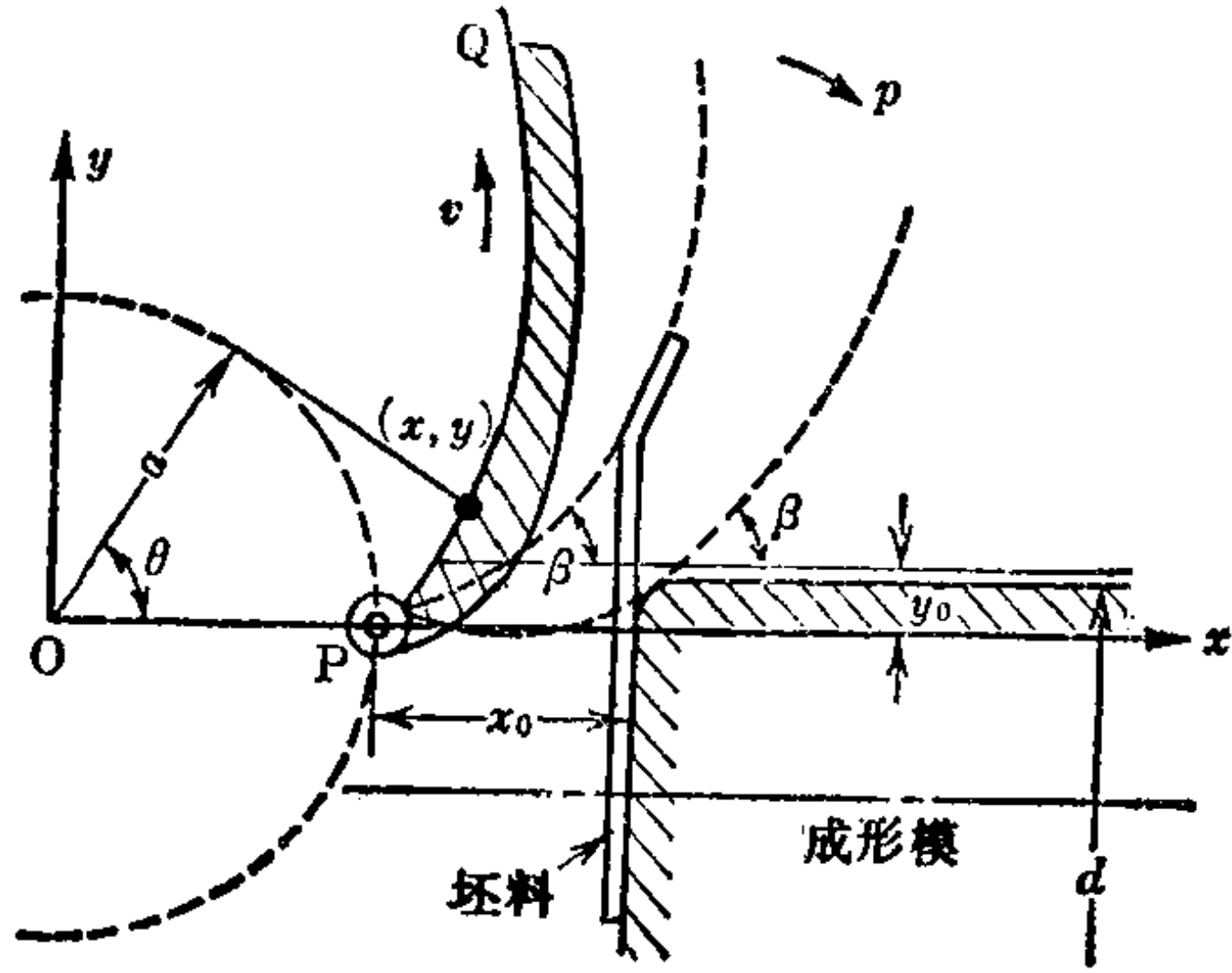


图4.221 渐开线靠模板

开始旋压(所谓底部旋压)， p 增大时容易破断，使旋压道次增多。如图4.222 c)为过大情况，必须从 A' 点开始旋压(所谓外周旋压)。和底部旋压相比，外周旋压不稳定， p 值的选取必须注意。因此，如采用图4.222 b)所示的 x_0/a 值——从A点开始旋压得到的极限值，那末加工起来就比较容易。图4.223所示为在 $x_0/a = 0.06$ 时所采用的 v 与 p 和制品高度的关系曲线。即使进行图(c)那样的外周旋压，因旋到A点后旋压变易，也可得到比图(b)高度低的制品。 v 越大、 p 越小及 x_0/a 越大

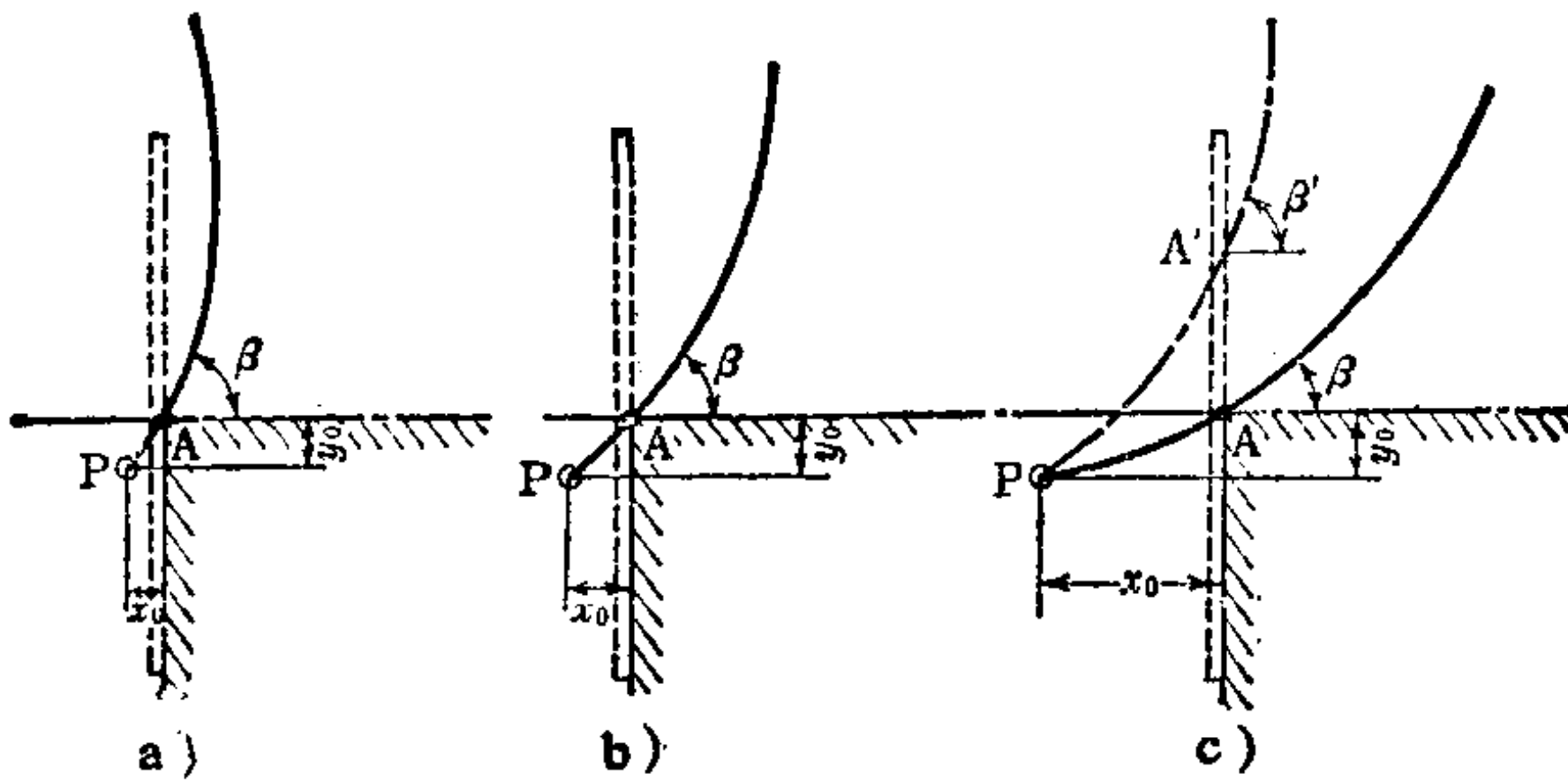


图4.222 靠模板的设定位置 x_0 的决定

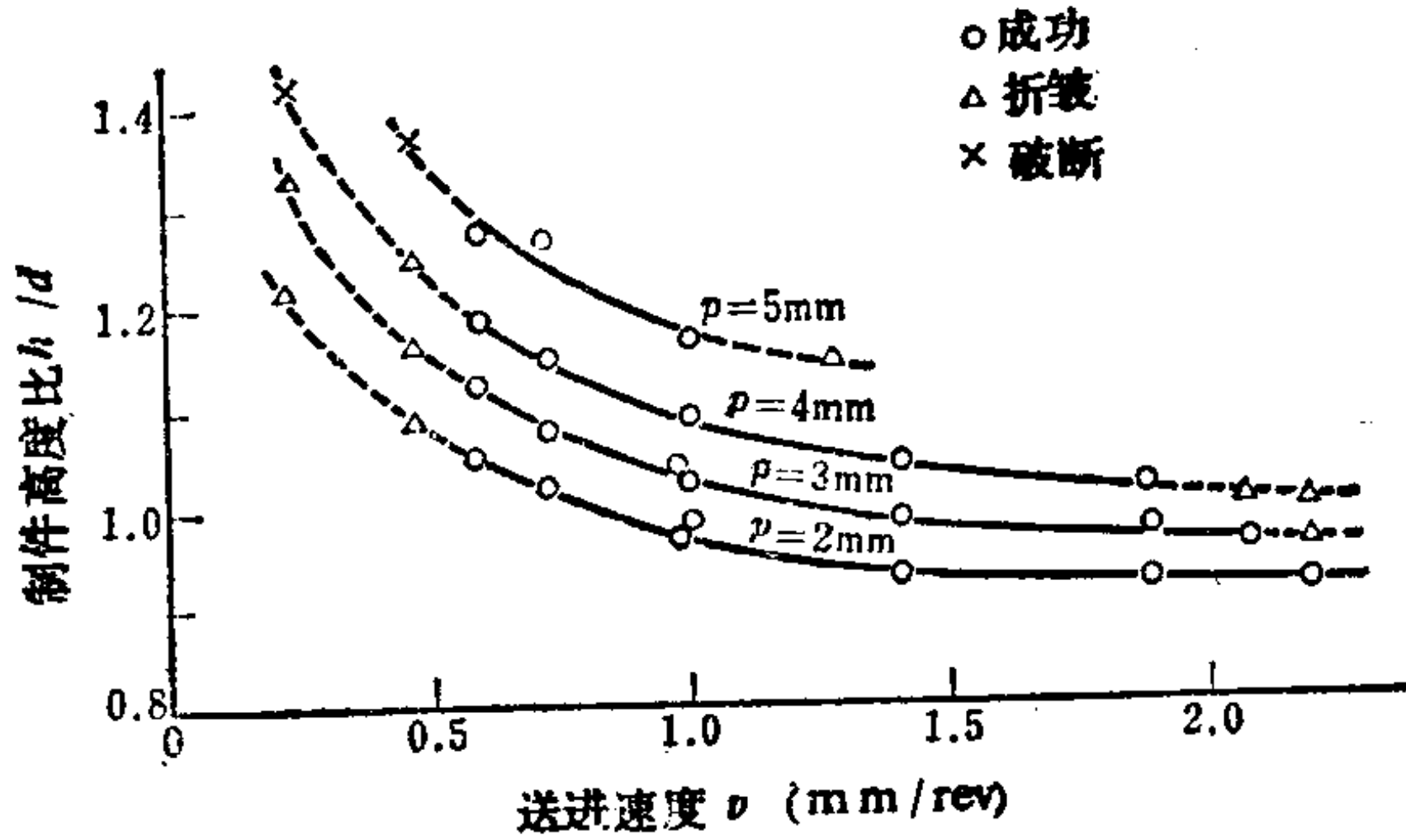


图4.223 制件高度和送进速度与螺距的关系 ($\alpha_0/a = 0.06$)

制件的高度越低。在成形过程中出现的皱折如不达到法兰的外周，则在以后道次中可以消除。这时，通过辊轮和在对侧的防皱辊来强制压平是有效果的。

(ii) 加工极限 旋压时，以皱折和破断来确定加工极限。图 4.224 所示为 D_0/d 和 t_0/d 的关系 [137]。1 道次的最高旋压比为 1.8，比深拉延低。然而如用前述方法在选择自由度大的加工条件下 (标有○印记) 进行旋压，可提高旋压比。如 (4.14) 式所示，因旋压皱折受辊轮向坯料的压入量 Δz 支配，选定 v 和 p 的值时须特别注意。

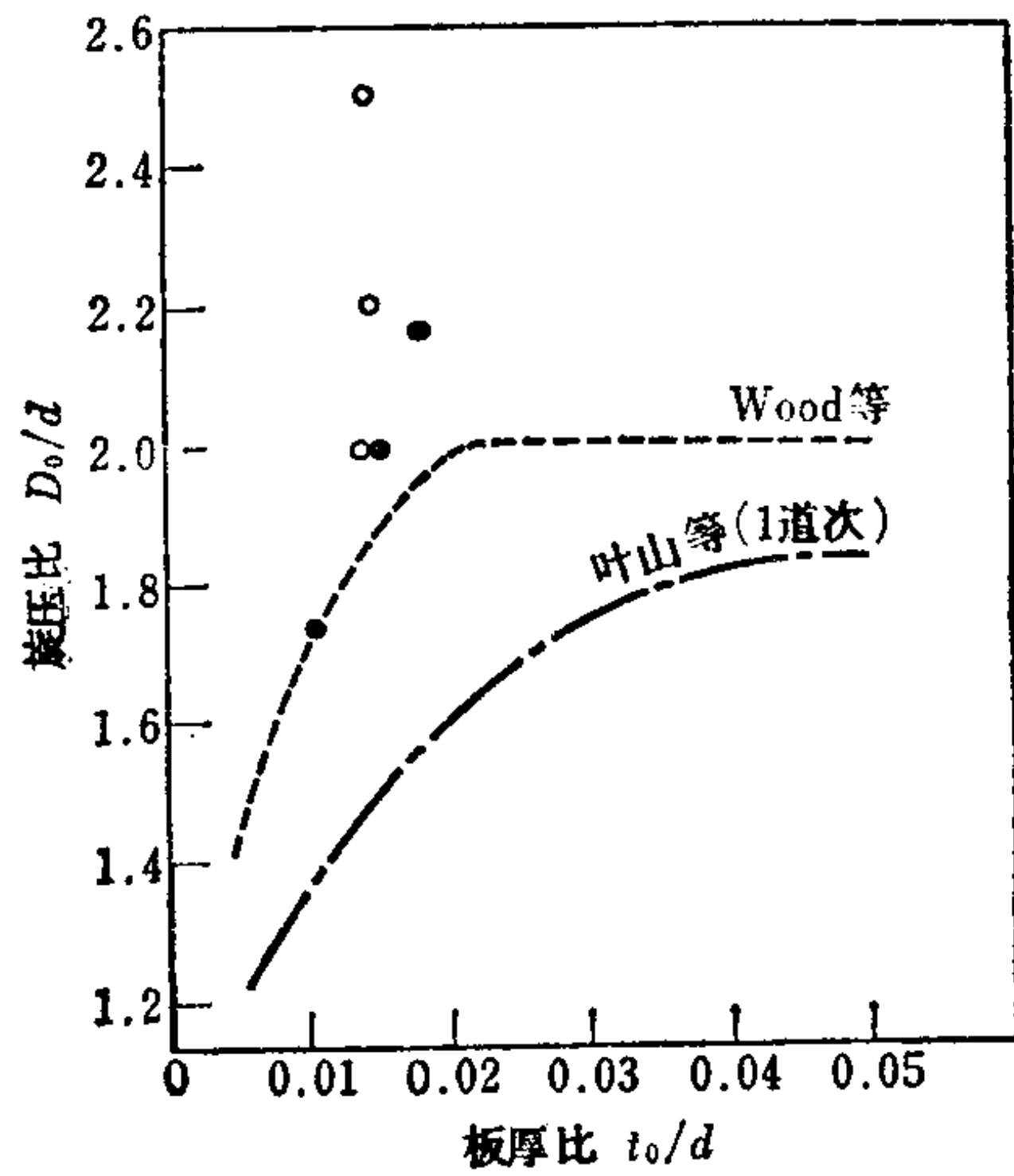


图4.224 旋压的加工极限

- 圆弧底部移动方式
- 渐开线靠模板回转方式

b. 各种旋压作业 圆锥体和椭圆体等各种回转对称形状的旋压作业与圆筒的基本作业相同。因此将图 4.225 的旋压缩口

(缩径)作业作为例外的旋压作业来处理。坯料的回转速度比表 4.31 所示的快, 对于厚度为 2mm 的坯料以表 4.32 为标准, 送进速度按表 4.33 选取。制件长度的增大和壁厚变化受加工条件支配。辊轮移动方法有如图 4.225 c) 所示的三种, 如采用(3)的交互移动法, 口部的壁厚能作相当调整。旋压铝、铜时可采用宽度大的旋压辊轮, 旋压钢和不锈钢时采用宽度窄的辊轮。可动靠模板的移动螺距 p 和辊轮的送进速度 v 按壁厚和材质选定, p 过大产生局部变薄, 辊轮移动的阻力大会引起破断, 或使未加工部分产生纵弯曲。并且, 如不注意作业开始时的压入, 发生振动即成为产生皱折的原因。实际工作中按制件形状、种类选取如下的加工方法。

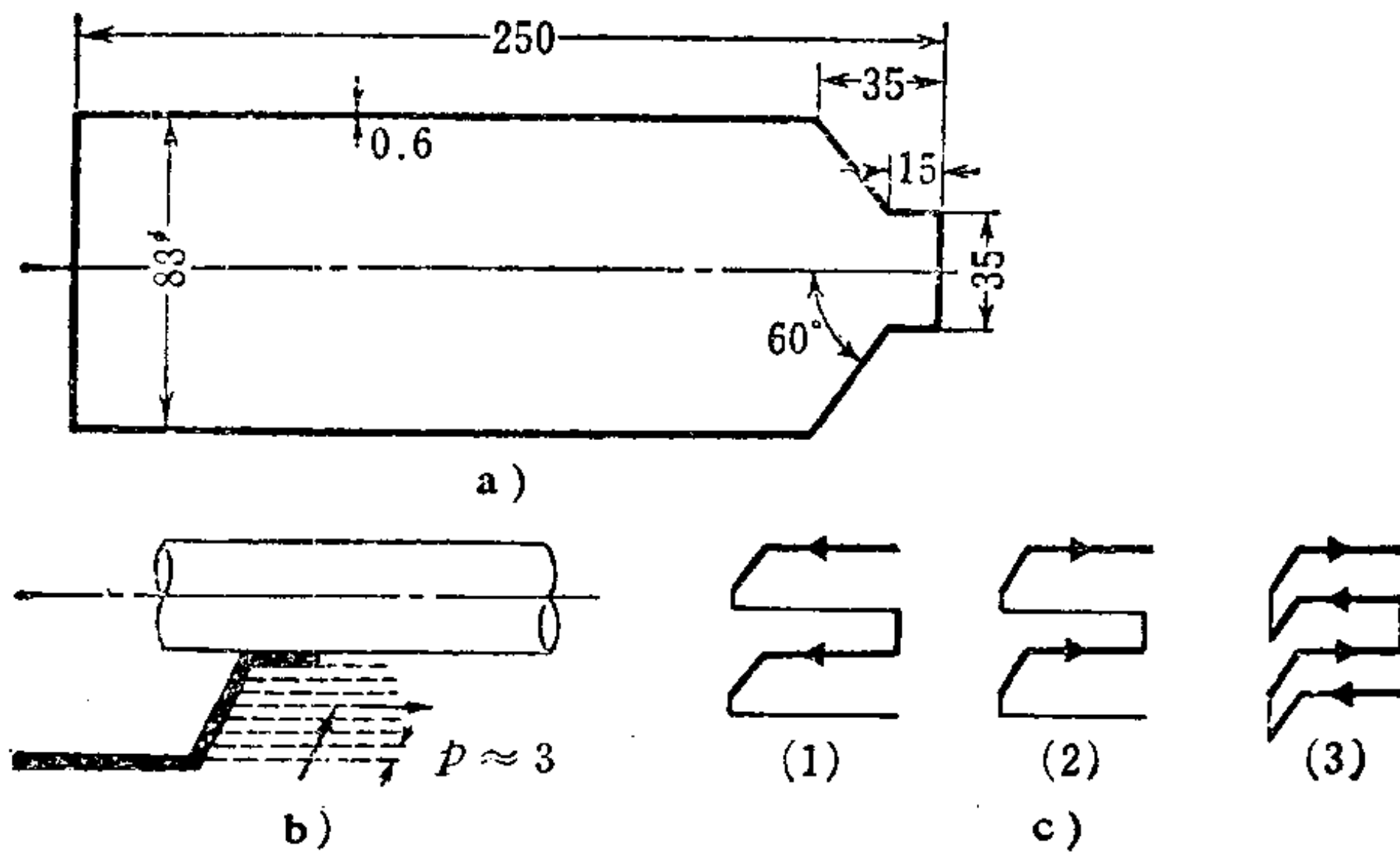


图4.225 旋压缩口作业

a) 铝管的旋压缩口 b) 颈部详图 c) 辊轮移动方法

(i) 使用分离模具情况 为了旋压缩颈中空件的一部分, 可在所旋形状的最小部分使用分成两半的模具 (图 4.226)。若将中空件支持在弹簧式的压紧圈上, 作用于轴线方向的压应力会起防止产生皱折的作用。图 4.258 也是分离模具的例子。

(ii) 使用拼分模的情况 如图 4.227 所示为旋压容器一端的口部时, 使用拼分模。拼分模由具有正确的制件形状的一组扇

形块和固定轴组成，扇形块能从加工后的制件中取出，按制件尺寸设计成7~11块。

表4.32 旋压缩口时坯料的回转速度

制件直径 (mm)	回转速度 (rpm)
<50	3000~3500
50~100	2000~3000
100~200	1500~2000
200~300	1200~1500
300~400	800~1200
400~500	600~800
500~700	300~600

表4.33 旋压缩口时辊轮送进速度

材 质	辊轮送进速度 (mm/min)
铝	1000~1200
铜	1200~1400
钢	800~1000

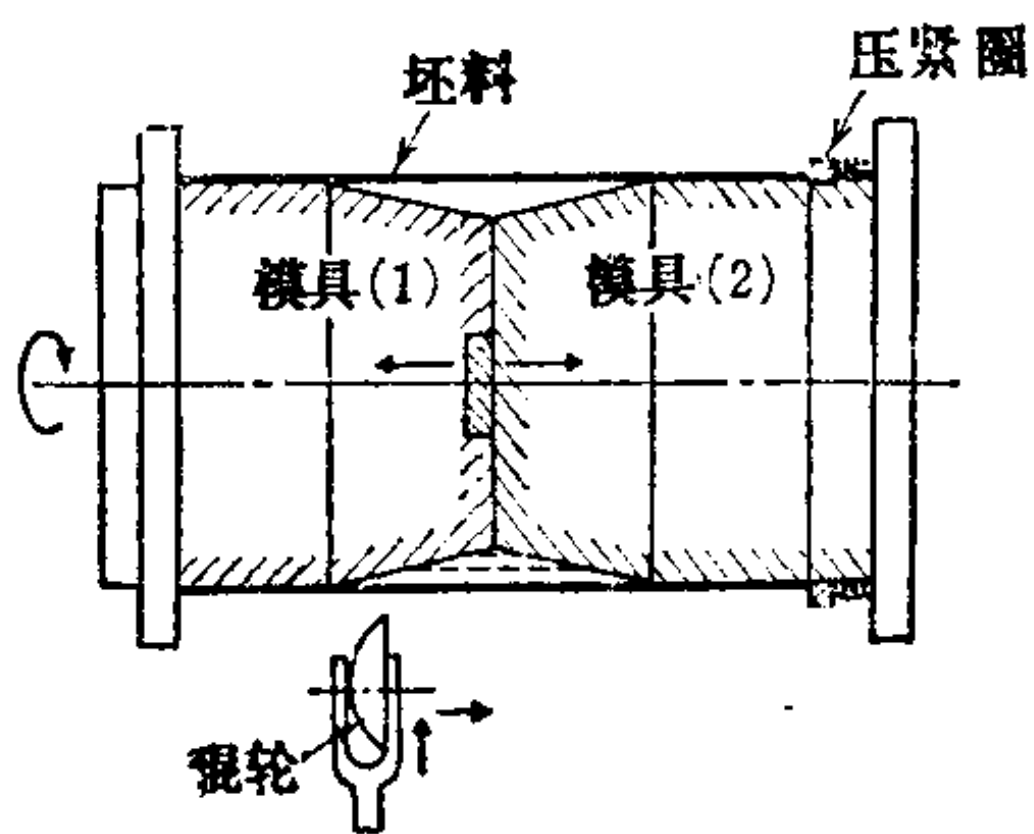


图4.226 用分离模具的旋压缩径

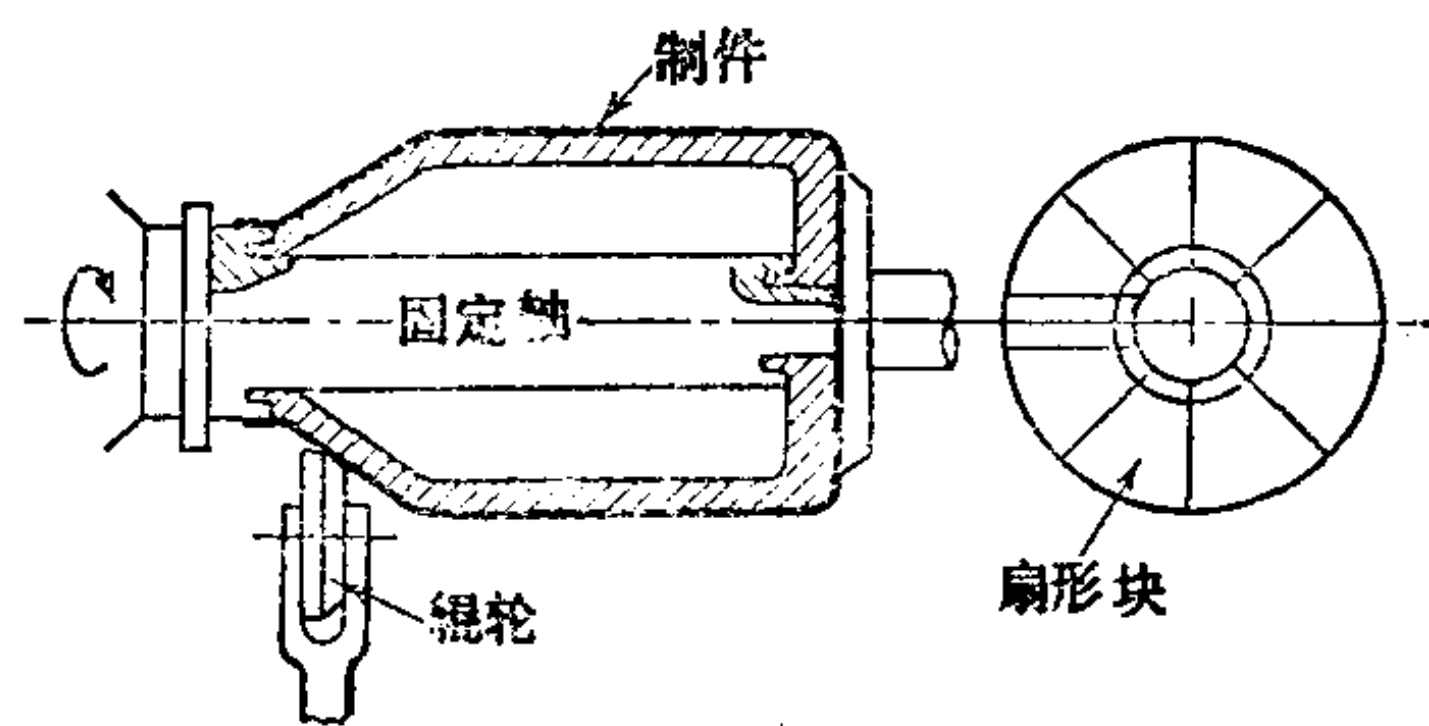


图4.227 用拼分模的旋压缩口

(iii) 使用偏心模的情况 底部尺寸较大的中空件，其直径变化不大时可用如图4.228所示的内置偏心辊轮。和拼分模相比，加工时间可缩短。

(iv) 不用模具的空间旋压情况 小件、小尺寸的瓶状制件可进行空间旋压。如图4.229所示，若用靠模板则可获得较高的

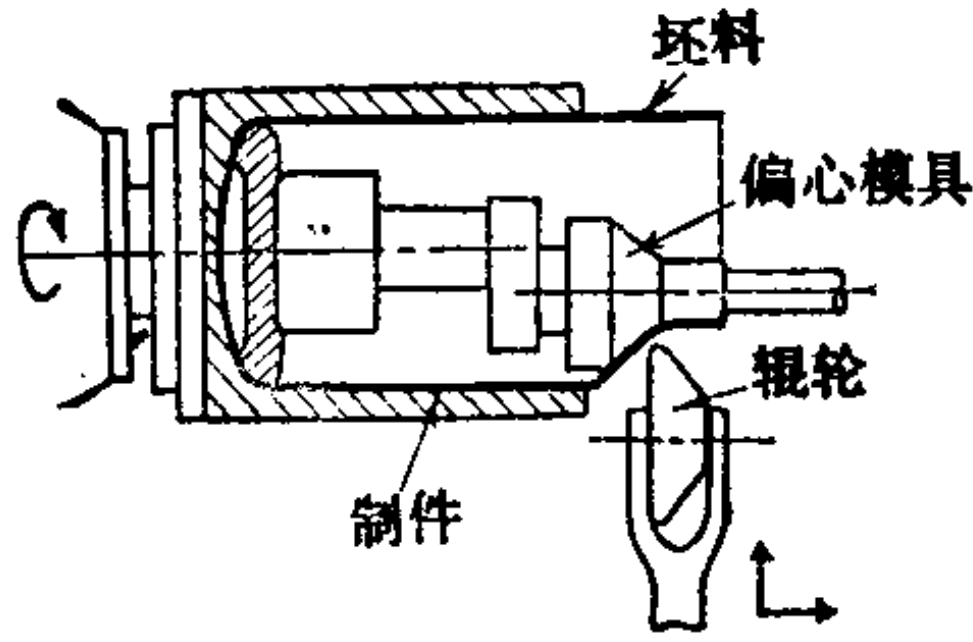


图4.228 用偏心辊轮的旋压缩口

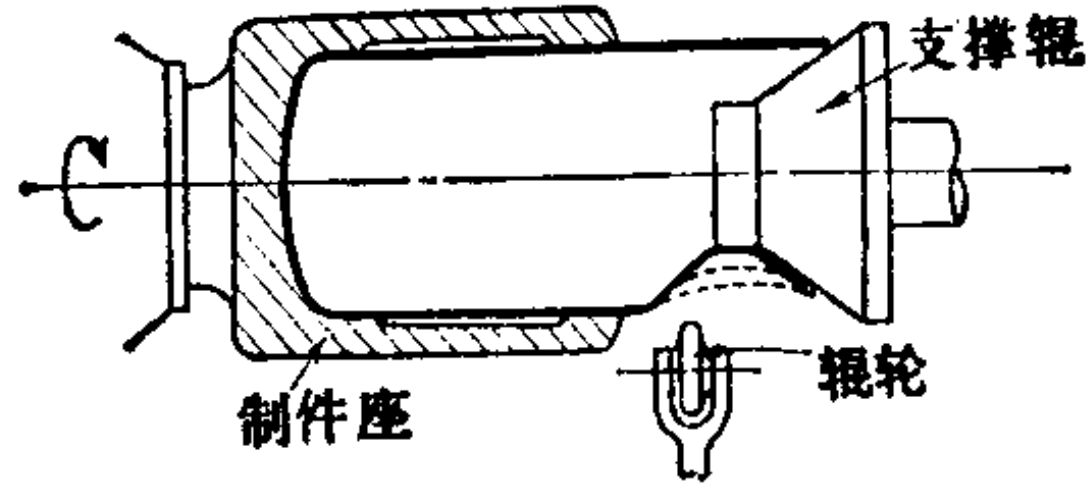


图4.229 不用模具的缩口

尺寸精度。此外，也有用平辊轮对管坯的一端进行热旋压，制造高压气瓶的情况。

(v) 使用多辊轮的情况
配置如图 4.230 所示的三个辊轮沿管轴方向压入，是将管坯旋压成圆弧状的另一方法。尺寸大或壁厚大时用热旋压。使用同样的方法将管端压紧在带槽的模具上，然后利用其摩擦热进行旋压，也属这类旋压方法。

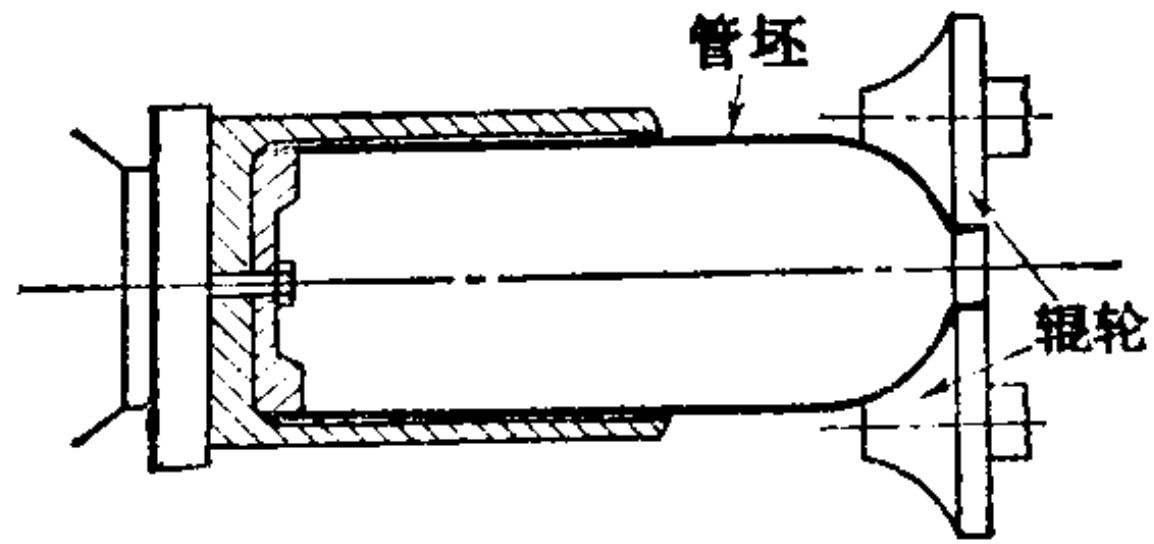


图4.230 用多辊轮的旋压缩口

4.9.3 强力旋压加工

a. 概要 如图 4.212 b) 所示的圆锥体强力旋压，由于坯料的外圆不变，壁厚 t 变成原始板厚 t_0 的 $\sin \alpha$ 倍（称为正弦法则）。可旋压的 α 范围大致为 $10^\circ \sim 80^\circ$ 。通过调整辊轮和模具的间隙，或使加到板上的压力为最小必要值，并经 1 道次完成加工，其技术问题少。如用仿形装置，可成形任意的回转对称体，从其轮廓引出的切线和模具轴线所构成的角为 α 角，其值决定壁厚。因板的成形性能或旋压机容量经 1 道次旋压到 α 有困难时，可作成角度为 β 的中间坯料，经两道次完成。如取两道次的变形率相同，则 $t_\beta = \sqrt{t_0 t_\alpha}$ ，即按 $\sin \beta = \sqrt{\sin \alpha}$ ($\beta > \alpha$) 来选取 β 。 α 为 10° 时 β 取 25° 。

b. 加工条件 决定制件形状的成形模，最好用铸铁经切削

后热处理制成。但小型、中型的成形模都使用工具钢热处理到HRC60~63，并于研磨后经消除内应力处理。特别是长径比大的成形模和直径小的成形模必须注意。辊轮使用图4.220的形状时，直径 D_R 以150~300mm，圆弧半径 ρ_R 以1.5~20mm为标准， ρ_R 取和板厚相等，对于轻金属倾向于取稍小为好。材质最好用工具钢，考虑表面加工也有使用增强塑料的情况，坯料的转速 N (rpm)和辊轮的送进速度 v 的选定主要根据经验。坯料表面速度 U 即 $2\pi N r_m$ (mm/min)(r_m 为坯料的接触平均半径)，大致为300~600mm/min较好。因此，决定 N 时需兼顾制件的大小 r_m ，一般 N 取200~500rpm，也有增大到1000rpm的。送进速度是重要的加工条件，由于在表面上要留下进给的痕迹，表面质量要求高时取0.05~0.15mm/rev，不要求很光滑时取0.8~1.5mm/rev。因为 v 增大旋压力增大，故以0.1~2mm/rev为其标准。不使用润滑剂虽然也可以，但 N 和 v 大时材料会和辊轮表面粘着[138、139]。因而可借适当的润滑来防止成形中的发热。延性大的金属薄板成形压力低时，水溶性油可满足冷却和润滑两个目的，压力高和难成形材料成形时，涂布高比热和防锈的水溶性油作冷却用，而润滑用胶体锌、二硫化钼糊剂、约翰逊石腊。加工条件严格时作磷酸盐被膜处理。

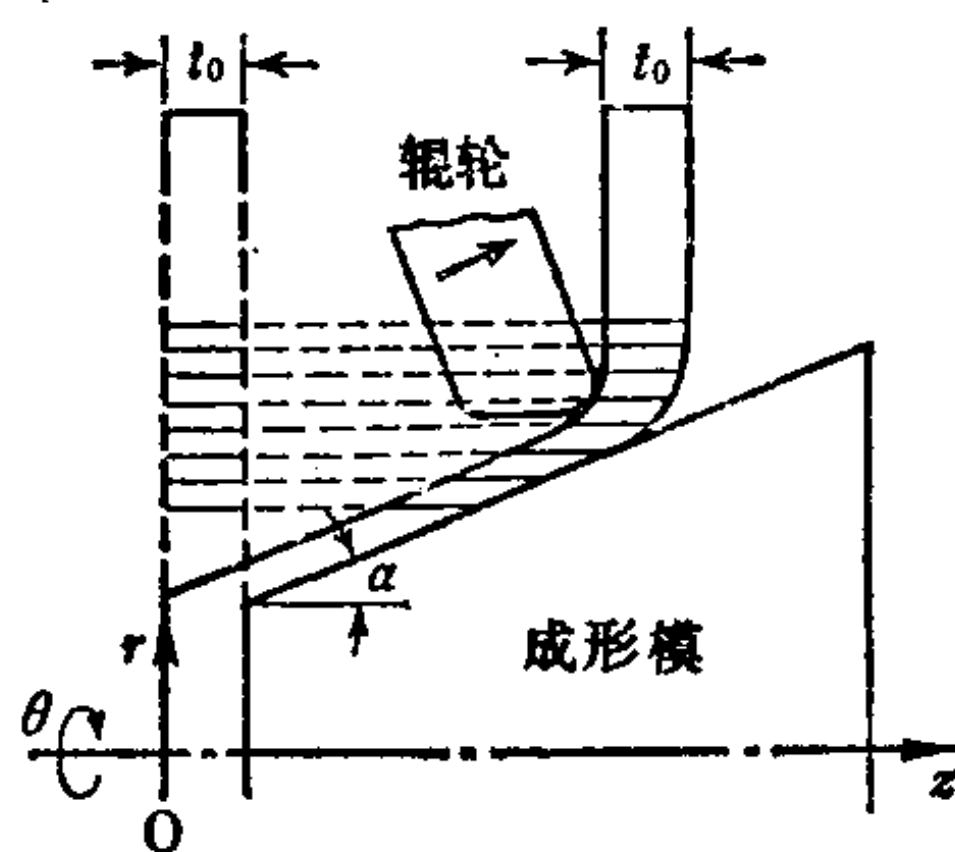


图4.231 基于纯剪切模型的变形机理

c. 变形机理和加工力 从单纯剪切来考虑，是最简单的变形机构，即如图4.231所示那样的重叠的薄片沿同心圆滑移成为圆锥壁部的一部分，切应变 γ 为 $\cot \alpha$ 。但是在实际加工中，由于如图4.232所示那样，辊轮在A位置成形完的坯料a转一周时，辊轮移动到B位置，坯料从a移至b，这时一面重复c部受局部弯曲变形造成a c b的移动，一面进行成形。

和切削加工一样，加工力可分为三个分力，设回转方向的分

$$P_0 = \bar{\sigma} t_0 (v / \sqrt{3}) \cot \alpha \tag{4.4}$$

而考虑弯曲变形时为,

$$P_0 = \bar{\sigma} t_0 v \cos \alpha \int d\bar{\epsilon} \tag{4.5}$$

而 $\int d\bar{\epsilon}$ 按下式计算〔141〕。

$$\int d\bar{\epsilon} = \frac{\cot \alpha}{\sqrt{3}} (v_1 + \sqrt{1 + v_1^2 + v_2^2}) \tag{4.6}$$

其中

$$v_1 = \frac{t_0}{(r_m \theta_m)^2} \rho_R \left(\frac{1 - \sin \alpha}{\cos \alpha} \right),$$

$$v_2 = \frac{2 \sqrt{1 - m}}{r_m \theta_m} \rho_R \left(\frac{1 - \sin \alpha}{\cos \alpha} \right)$$

式中 r_m, θ_m ——辊轮和坯料的平均接触半径和接触角;
 m ——表示接触状态的未定系数(参照图 4.232 b)。

图 4.234 的虚线和改变 m 的实验值比较时, 比公式(4.4)(实线) 虽有改善, 但 m 仍是未知数不能表示出其正确值〔142〕。可是最近已有决定 m 的方法发表〔143〕、〔144〕。

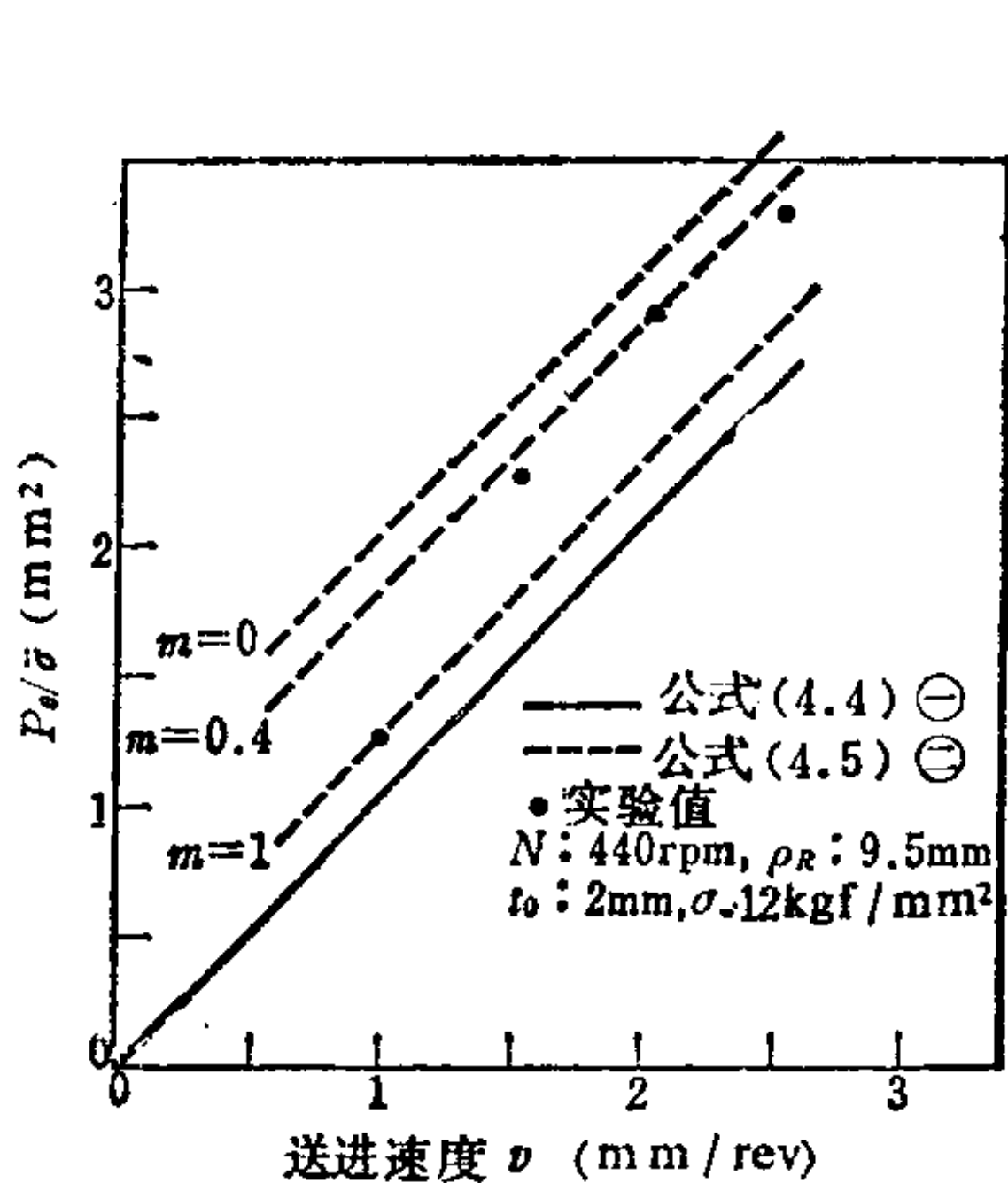


图4.234 圆周力的实验值和理论值的比较

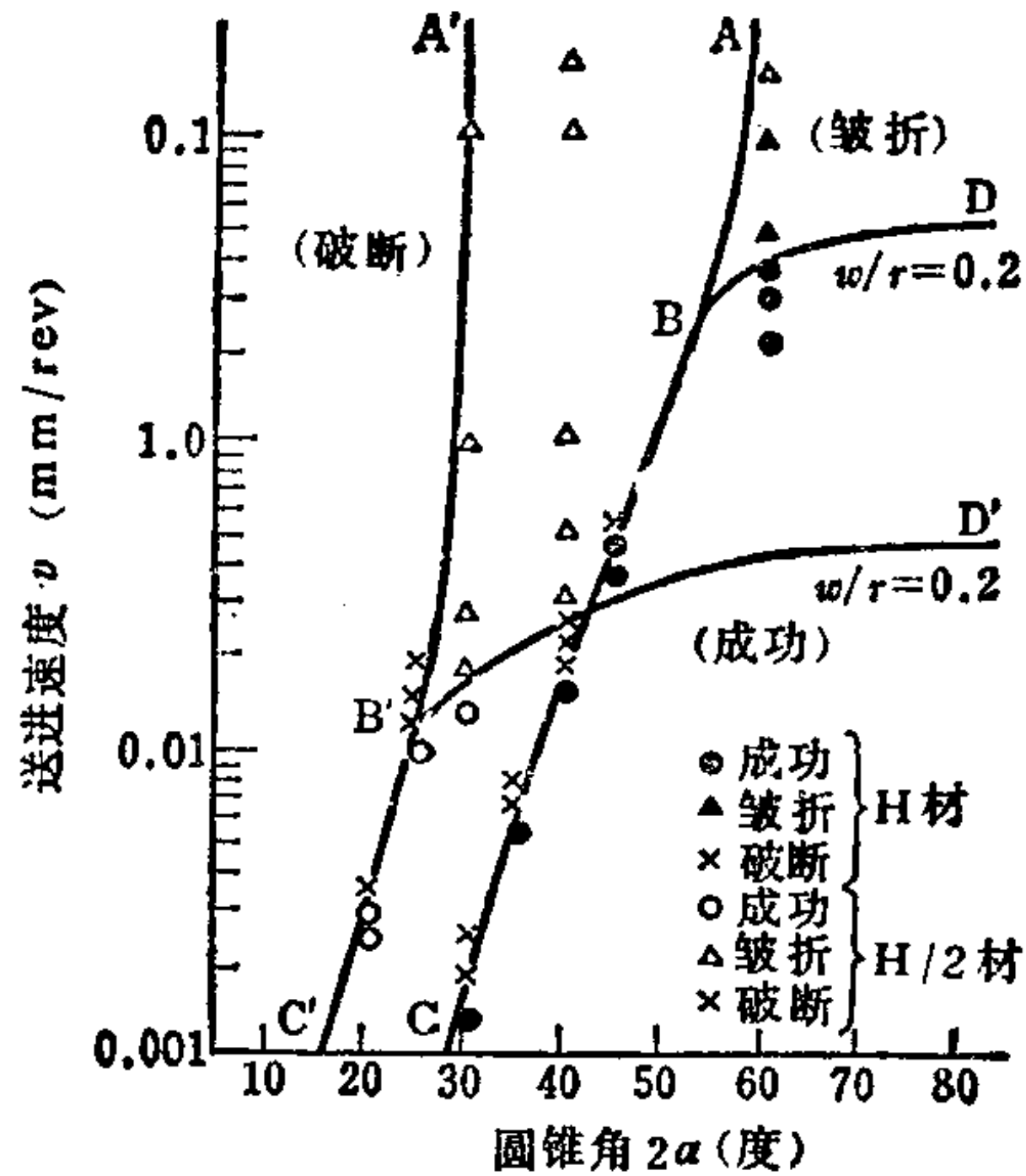


图4.235 支配加工极限的送进速度

⊖ 原文图中误为公式 (4.11)。
 ⊕ 原文图中误为公式 (4.12)。——译注

d. 加工极限 由送进力 P_z 引起的壁部应力 σ_w 超过一定值并作用在某一定的宽度 l_w 时, 壁部产生破断。即存在极限变薄率。圆锥体成形时, 由于 σ_w 和 l_w 一起随着 v 的增加而增加, 产生如图 4.235 那样的极限送进速度〔145〕。该图虽是对 1 mm 的铝制件而言, 但也受到板厚的影响。表 4.35 所列为实用极限变薄率〔146〕, 但根据选定的 v , 对于铝 $\alpha = 10^\circ$, 对于不锈钢 $\alpha = 15^\circ$ 的圆锥体的成形是可能的。椭圆体成形时, 以辊轮正下面的破断为主, 由破断位置的 α 求最大变薄率 ψ_{\max} 并作出图 4.236〔147〕。图中所示为 ψ_{\max} 和各种材料 (包括铝、铜、钢、不锈钢) 的拉伸试验的断面收缩率 q 的对应关系, q 在 50% 以下时, ψ_{\max} 和材料的延性有关, 而 50% 以上时, ψ_{\max} 约为 80%。然而, 由于表示出不受 v 、 ρ_R 、 N 等加工条件的影响, 前述的圆锥体和不同的椭圆体也可得到高的 ψ_{\max} 。此外, 已有报告称 ψ_{\max} 和拉伸试验的其它诸特性 (延伸率、加工硬化率、抗拉强度) 无关。

表4.35 实用极限变薄率 (%)

材 料	强 力 旋 压		管坯变薄旋压
	圆 锥	半 球	
4130钢	75	50	75
4340钢	65	50	75
18%Ni钢	65	50	75
17-7PH 不锈钢	65	45	65
H-11工具钢	50	35	60
铜	60	45	60
钛 (纯)	45	—	65
2014铝	50	40	70
6016铝	75	50	75

薄板强力旋压时, 凸缘有时要产生皱折。如图 4.232 所示, 坯料每转一周承受 Δz (约 $v \cos \alpha$) 的压入量, 将因弯曲、弯曲回复和逆弯曲以及局部的压应力作用而产生纵弯曲。图 4.237 所示为 $\Delta z/t$ 和凸缘宽比 w/r 的关系, 显示出皱折的发生明显地

受 v 的影响〔148〕。值得注意的是由于在除辊轮直径之外的加工条件变化不大的情况下，其极限线是直线，在进行加工时，沿直线减少 v 能不发生皱折而成形。因此，旋压的皱折发生的条件为：

$$\Delta z / t_0 = (w / r) c$$

图 4.235 中的 ABD, A'B'D' 所示为其皱折发生的领域。

4.9.4 管坯变薄旋压加工

a. 概要 使管

坯壁厚减少而轴向伸长的旋压为管坯变薄旋压，如图 4.238 a) 所示，材料流动和辊轮的进给方向相同的称为正旋法，相反的称为反旋法（图 4.238 b）。壁厚减少率（变薄率）和制件的长度可以按体积不变条件计算。在滑座上设置有一个乃至两个或如图 4.239 所示的三个辊轮的旋压机上进行作业。图 4.240 为从辊轮上想办法旋压要求侧壁非连续变化的制件的例子。辊轮的 A 部用来开槽，B 部用来旋压，用 B 部重复加工来旋出不规则的壁厚。制件密贴在成形模上，内径精度高，由安装在成形模中心的顶杆将制件取出。圆筒的侧壁厚度可得到 $\pm 0.005\text{mm}$ 的公差。图 4.241 为用铝及其合金的板坯进行旋

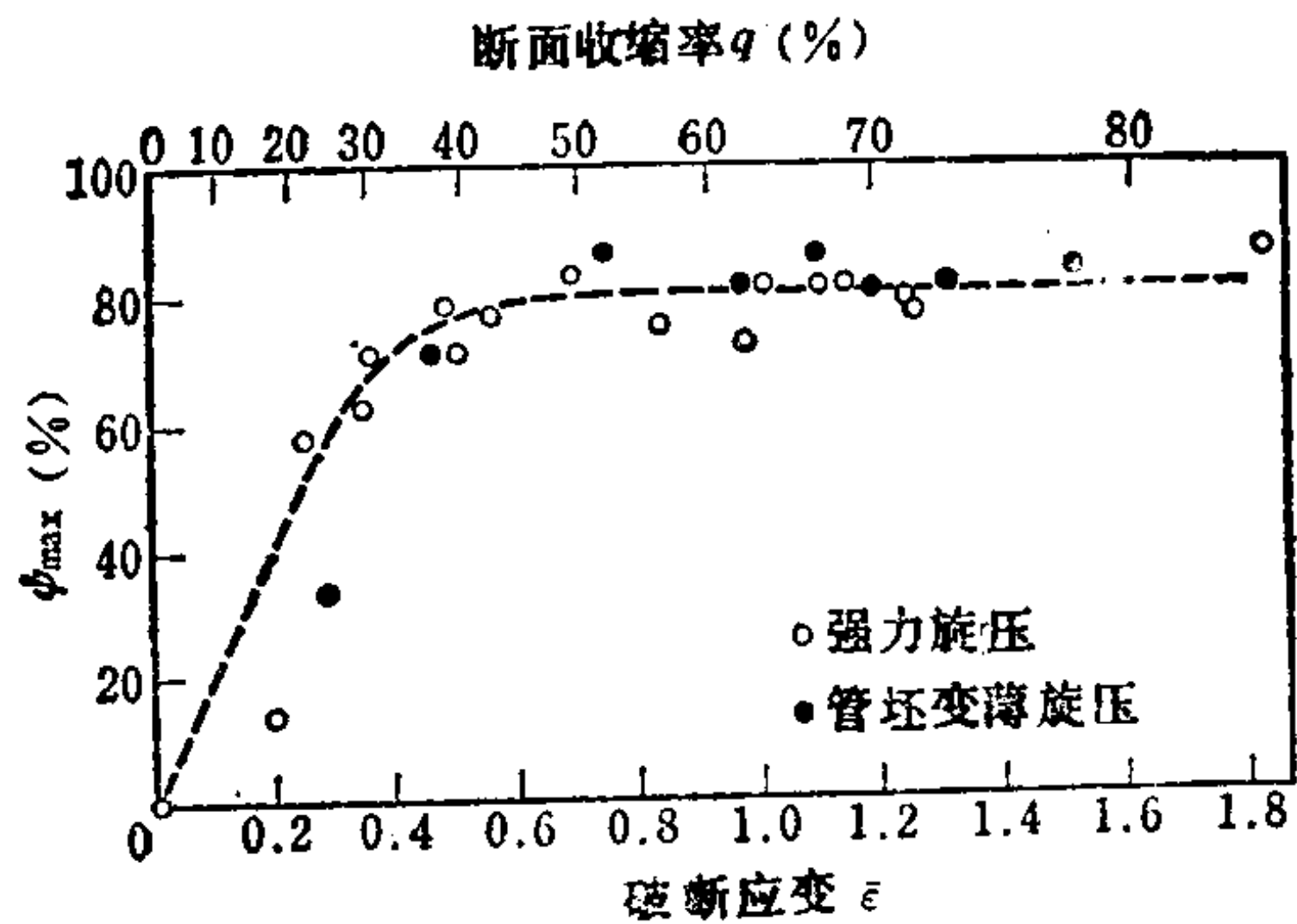


图 4.236 椭圆体成形时最大变薄率 ψ_{\max} 和断面收缩率 q 的关系

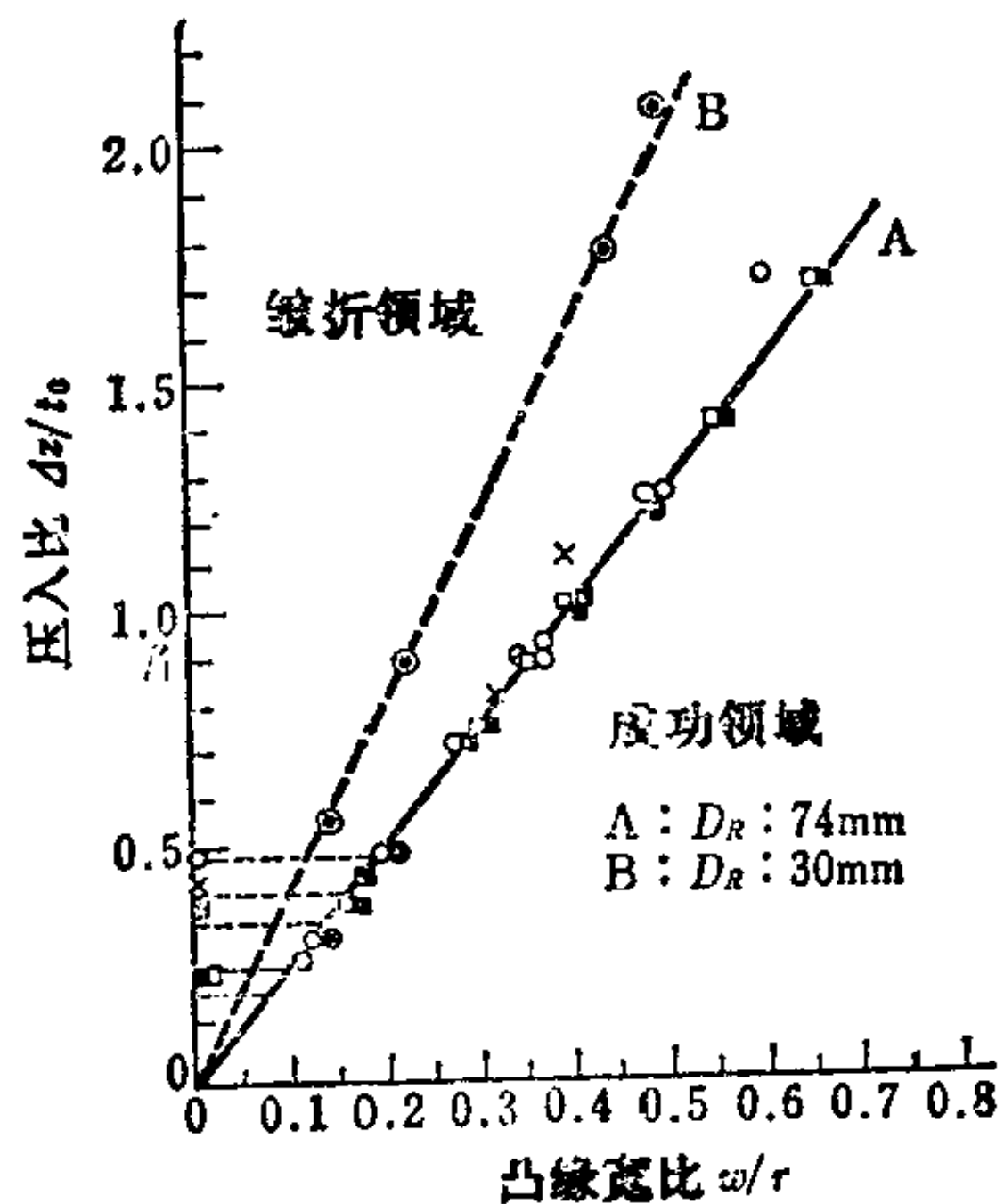


图 4.237 按轧轮压入量确定的皱折发生极限

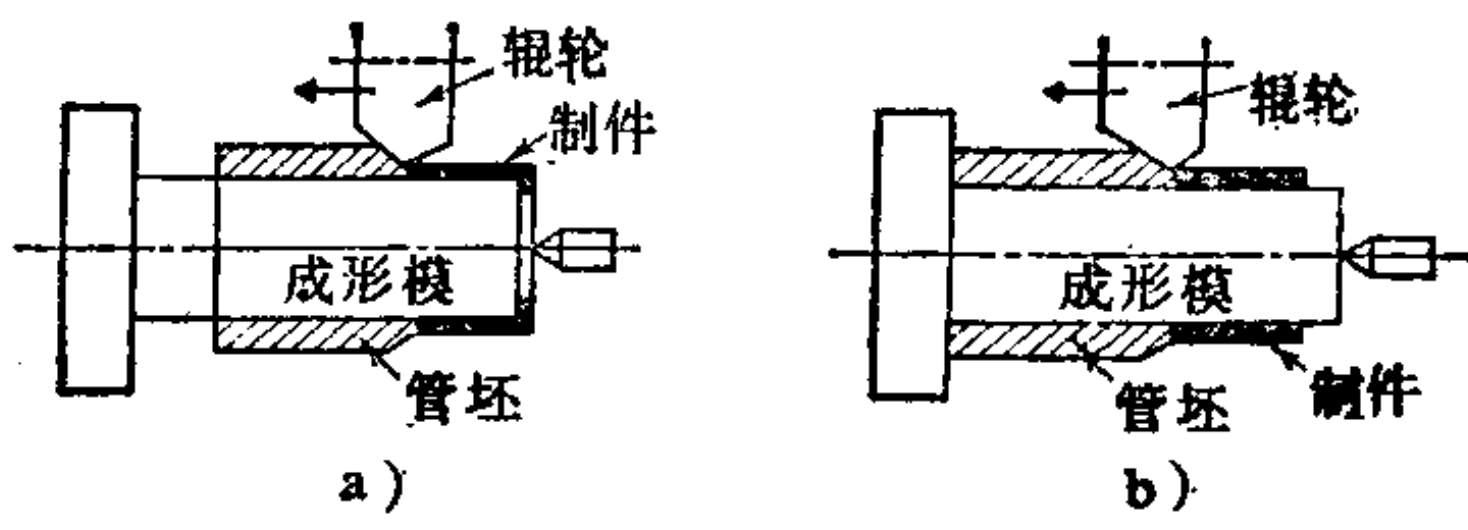


图 4.238
a) 正旋法 b) 反旋法

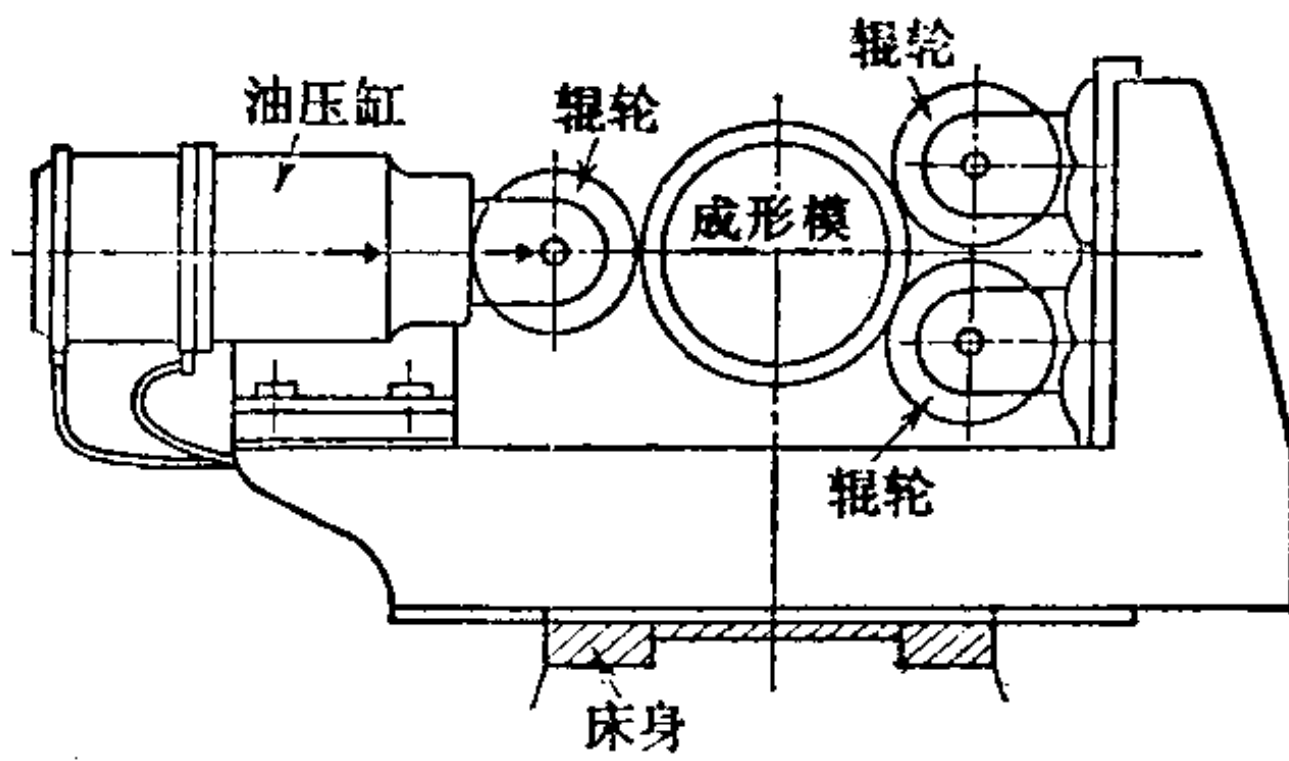


图4.239 具有3个辊轮的滑座

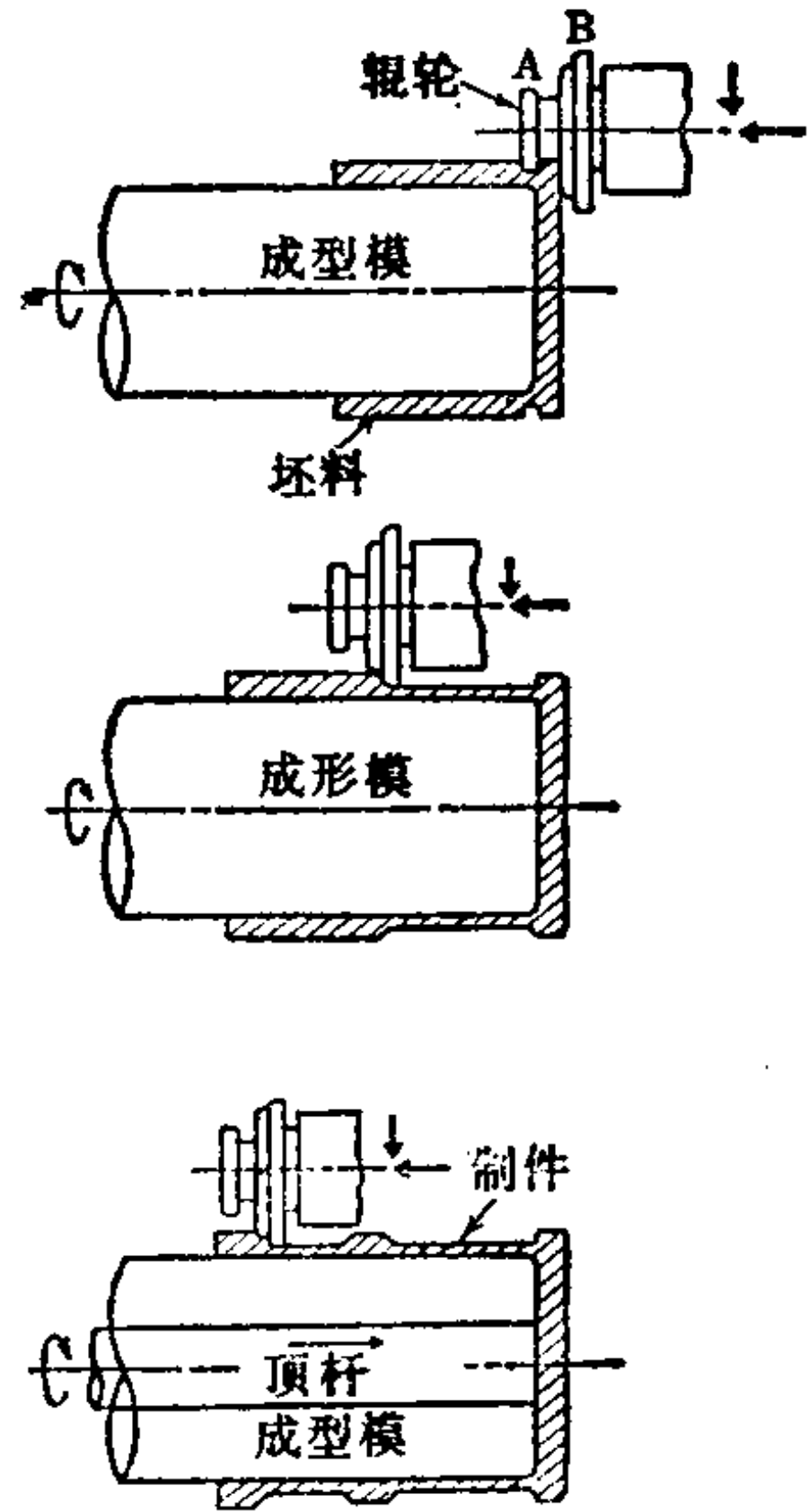


图4.240 壁厚不连续制件的制作示例

压并 同时进行管坯变薄旋压的例子。由于旋压比小，可 1 道次旋压成形，并因长度短，可从 6 mm 厚旋到 1.3mm，变薄率约为 80%。

b. 加工条件 管坯变薄旋压所用辊轮的形状虽可按图 4.242 a) 或 b) 设计，但由于在辊轮前方坯料的局部隆起，在实际生产中有用如图 4.242 c) 那样的具有压紧部分的辊轮。当用

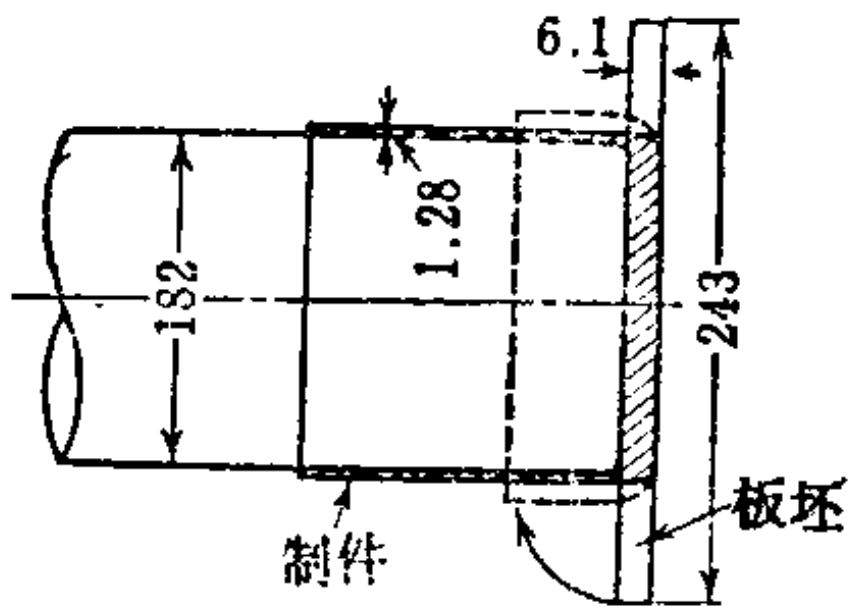


图4.241 旋压和管坯变薄旋压的复合示例

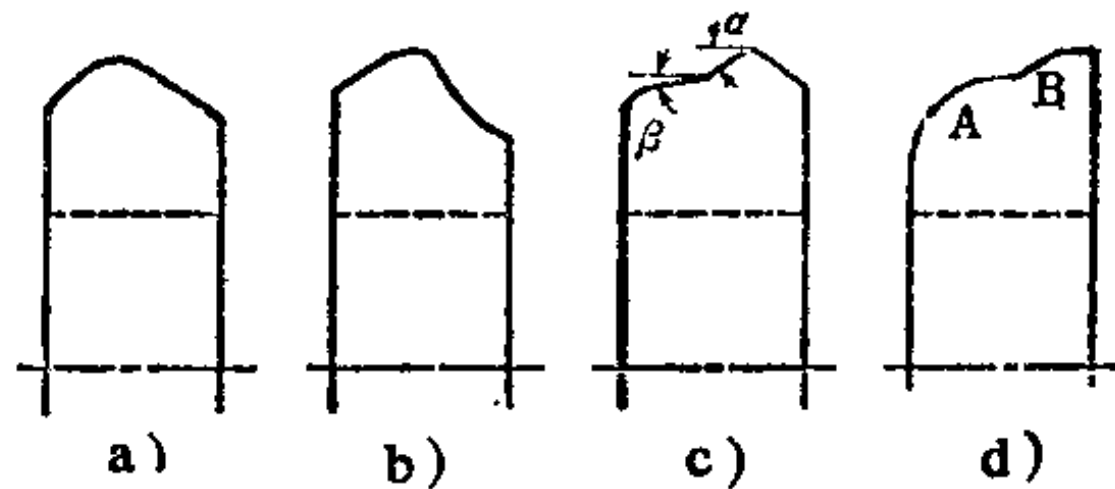


图4.242 管坯变薄旋压用辊轮形状

三个辊轮先旋压再进行变薄旋压时，可用如图 4.242 d) 所示辊轮，其圆弧 A 部分用作旋压，B 部分作变薄旋压，可在一道次中进行成形。产生如图 4.243 所示那样的隆起，其原因是材料轴向

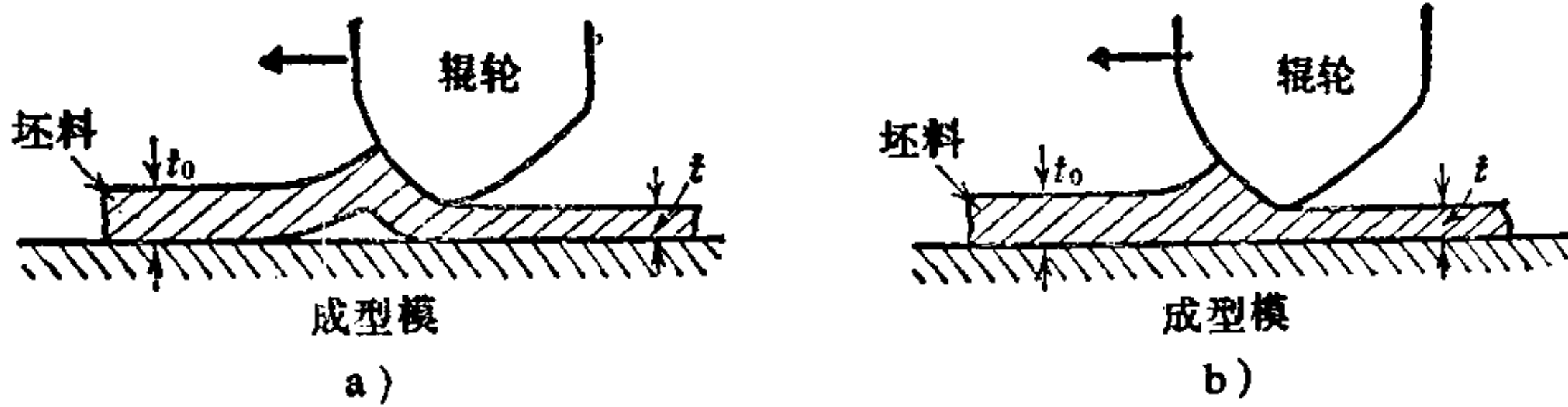


图4.243 材料的隆起

移动所引起的压应力，辊轮的送进速度和壁厚减少率达到某一极限以上，隆起就急剧增大〔149〕。因而应该选定能增加径向压缩力的辊轮，将辊轮安装成如图 4.244 所示那样相对于成形模轴线倾斜，也能产生这种效果〔150〕。

c. 加工力 由于辊轮施加的力非常大，一般用对称设置的辊轮来成形。加工力的评价是重要的，假设和辊轮接触部分是平面变形，用下列公式可进行旋压时的 3 个分力的计算〔151〕。

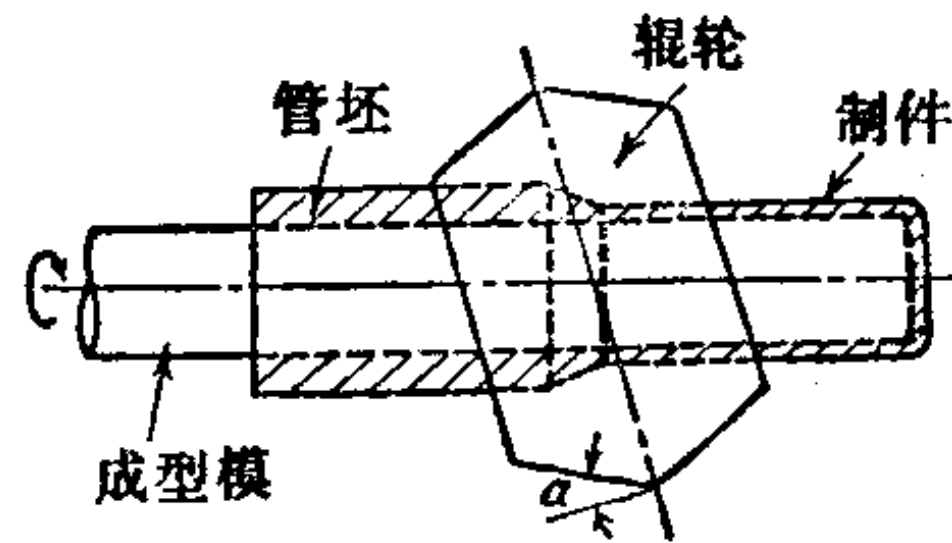


图4.244 辊轮倾斜安装

$$\begin{aligned}
 P_0 &= \sigma_m t_0 v k \\
 P_r &= \sigma_m t_0 \sqrt{D_R v \cot \alpha} k \\
 P_z &= \sigma_m t_0 \sqrt{D_R v \tan \alpha} k
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

式中的 k 值，对正旋法， $k_F = 2.44(1 - t/t_0) - 1.16A\{1 - t/t_0 + (t/t_0)\ln t/t_0\}$ 。而对反旋法， $k_B = 2.44(1 - t/t_0) - 1.16A\{1 - t/t_0 + \ln t/t_0\}$ 。其中， t_0 为管坯壁厚， t 为成形后管的壁厚， A 为反映摩擦状态的常数。

$$A = 1 \mp m \cot \alpha \mp 0.5 m \tan \alpha \quad (1 \geq m \geq 0)$$

式中的负号适用于正旋法，正号适用于反旋法。图 4.245 为对应

于断面减少率的实验值和公式 (4.7) 的计算结果的比较,其倾向比较一致。

d. 加工极限 对如图 4.246 那样的管坯作变薄旋压使管壁逐渐变薄,由破断时的壁厚求出最大壁厚减少率 ψ_{max} ,其结果用 ● 印记标入图 4.236 中〔152〕,表明和 4.9.3 的强力旋压具有相同的倾向。这时, ψ_{max} 随送进速度 v 的增大而减少(图 4.247),表明 v 是旋压中的共性问题。圆角半径 ρ_R 和辊轮角度 α 的大小影响不大。先经过旋压的件最后的壁厚减少率和一道次旋压的相同。若用和拉拔加工类似的方法求 ψ_{max} ,则 $\psi_{max} = 1 - e^{-1/k}$ 。式中 k 为反映加工硬化的系数,对实际材料如取为 0.75~0.85,则 ψ_{max} 等于 70~75% 左右。在图 4.236 中, ψ_{max} 约为 80%,图 4.246 的特别判定法和实际也有差异,一般低于 80%。 ψ_{max} 超过 80% 的制件要进行多道次加工。

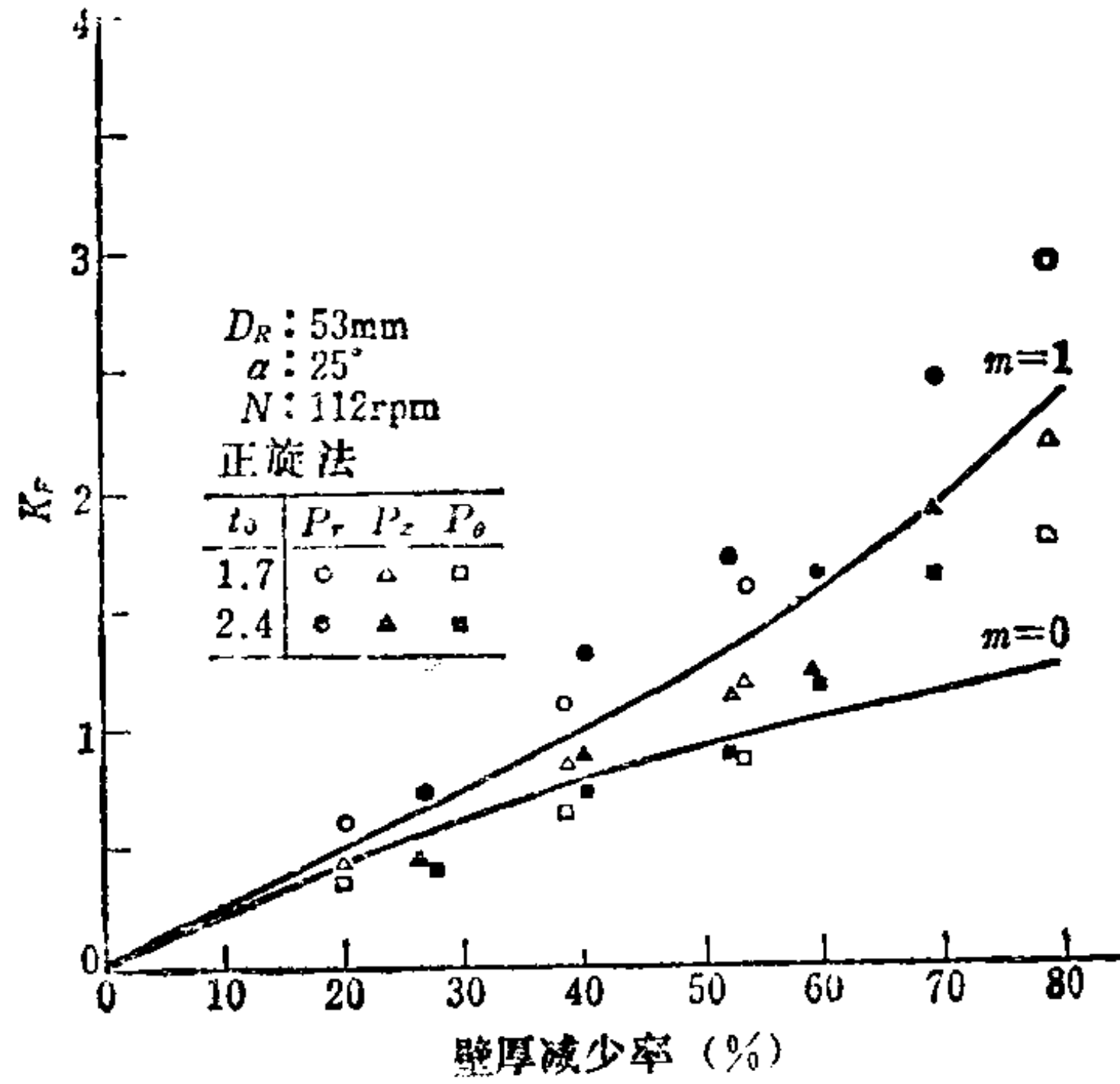


图4.245 正旋法的K值(公式4.7)和断面减少率的关系

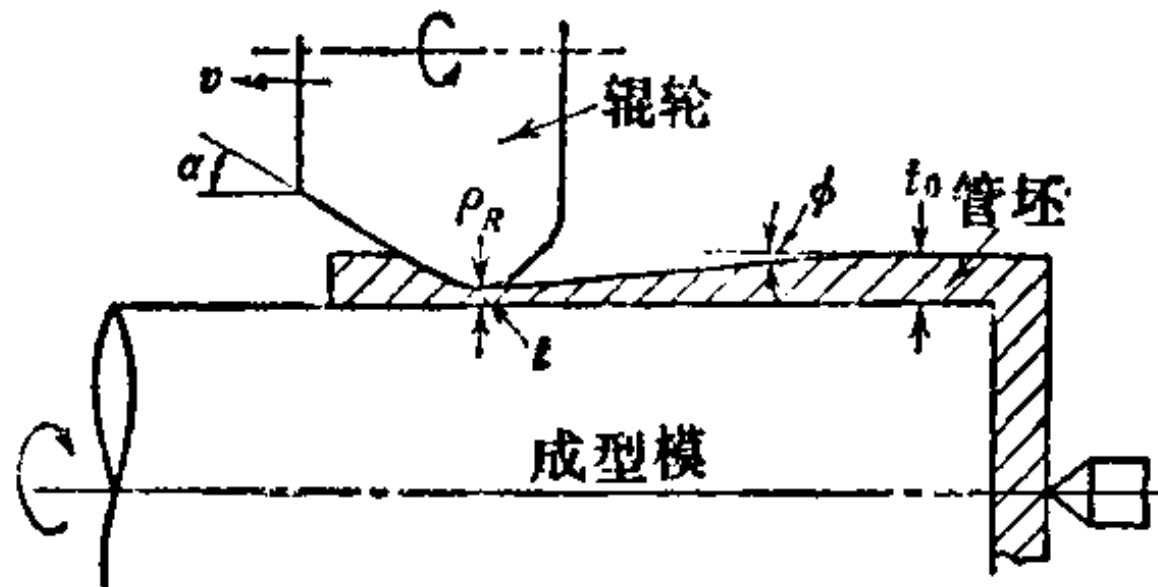


图4.246 管坯变薄旋压的最大变薄率决定法

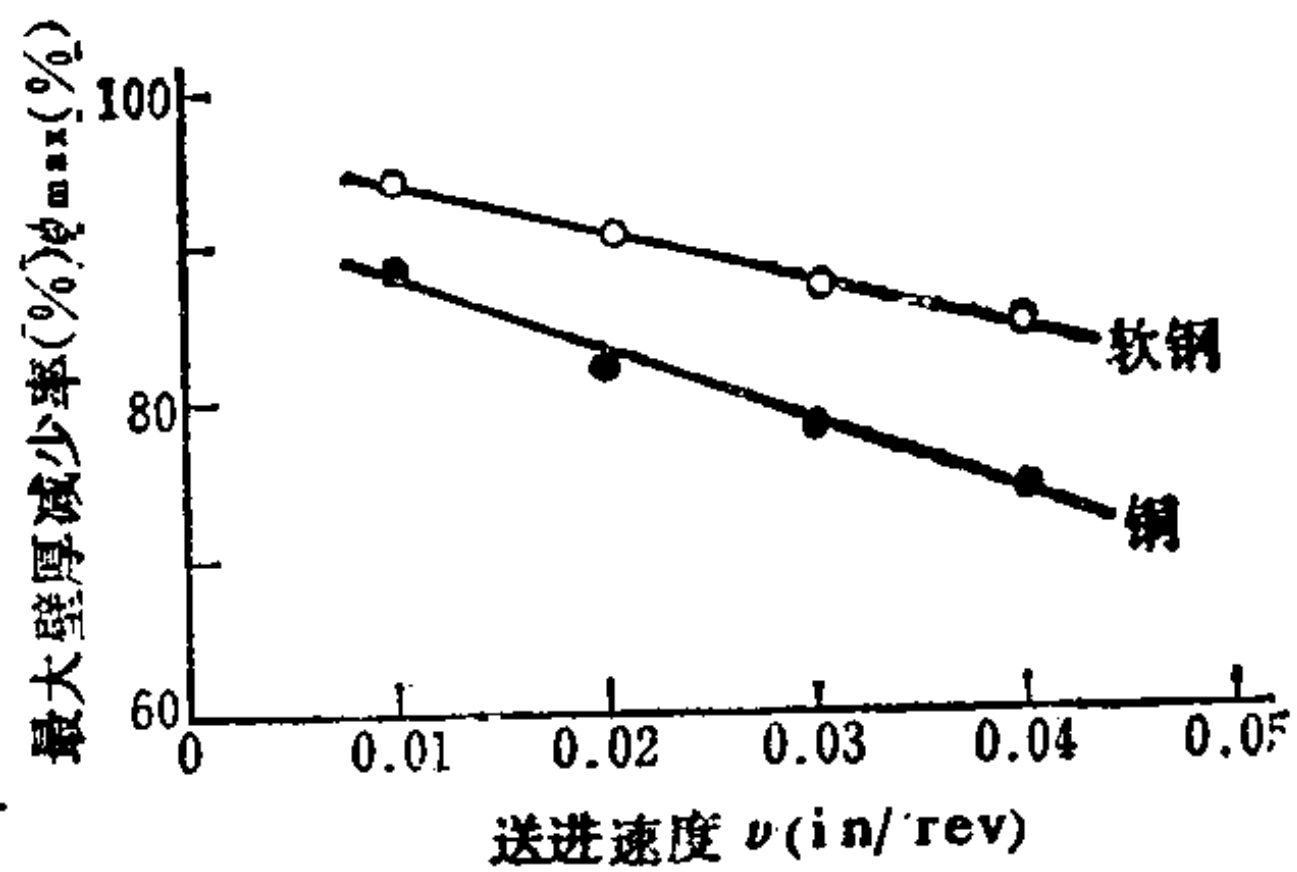


图4.247 辊轮送进速度和最大壁厚减少率的关系

4.9.5 旋压、强力旋压和复合旋压的加工示例

上述的基本工艺可分别单独进行或按多种方式组合进行。图 4.248 为以强力旋压为主的例子。图中的汽轮机轴由直径为 $\phi 480$ mm、长度为 280mm 的锻件经两道次旋压制成。图 4.249 所示的轴承罩，采用经过压印的坯料（图 4.249 b），通过图 4.249 c）、

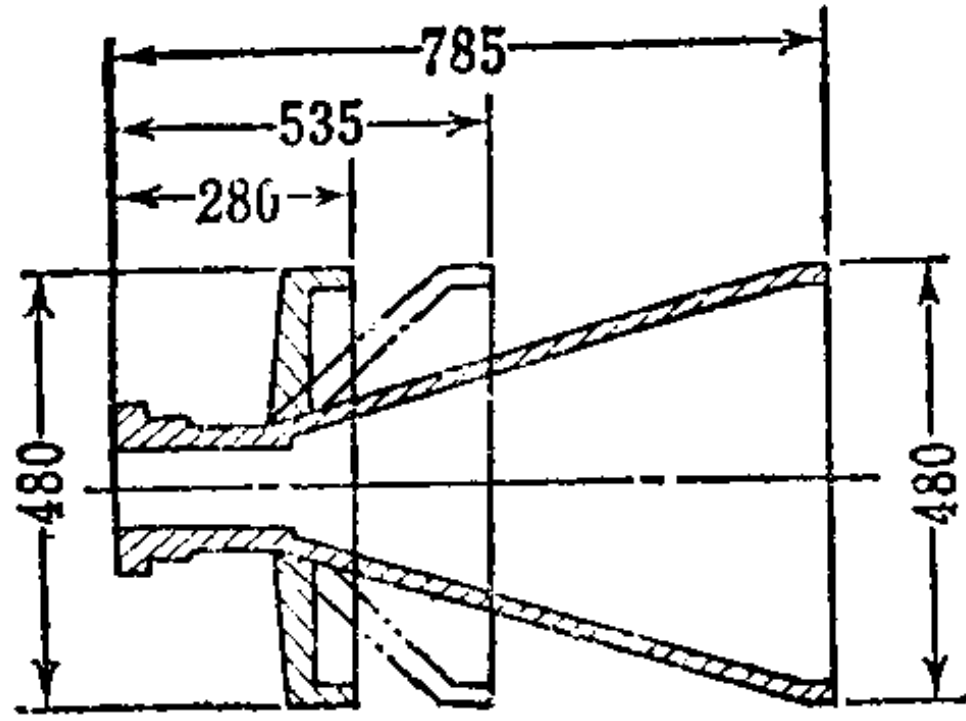


图4.248 汽轮机轴强力旋压示例

a) 锻造、切削加工情况 b) 坯料
c) 第1道次 d) 第2道次

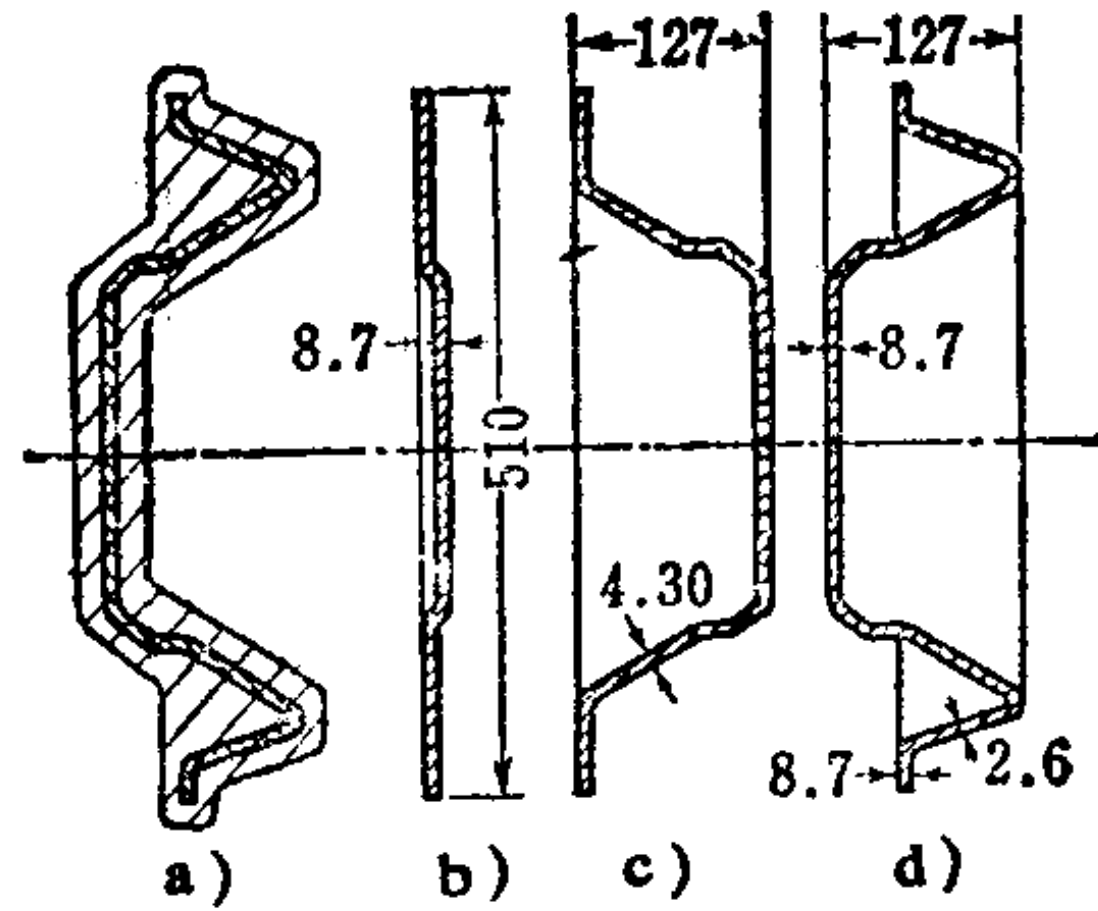


图4.249 轴承罩强力旋压示例

a) 锻造切削件 b) 坯料
c) 第1道次 d) 第2道次

d) 两道次的不同方向的旋压而得到。图 4.250 对切削加工件（图 4.250 a）的壁部施行管坯变薄旋压，第 1 道次旋成（图 4.250 b），第 2 道次旋出（图 4.250 c）那样的长制件。以上为在机械零件制造中应用的例子。图 4.251 为用预先旋压成形的坯料（图 4.251 a）旋压出（图 4.251 b）那样较复杂形状的制件的例子。首先用中心压紧座压紧头部的极小部分并同时预压成形，随后强力旋压出 25° 圆锥角部分。制件的圆锥部分到圆筒部分过渡的 R 部分是和预先成形的坯料（图 4.251 a）的 R 部分相对应，圆筒部分为用管坯变薄旋压法加工出来的。图 4.252 所示为类似的例子。图 4.253 为用板坯经强力旋压以及管坯变薄旋压法制作电缆套的例子，气体发火管、真空缸等也类似。由图示的尺寸精度可知，能获得颇精密的制件。

可是从要求形状和壁厚这点出发，往往用旋压和变薄旋压复合成形。图 4.254 为 15 英寸扬声器的制作示例。预先通过拉延方

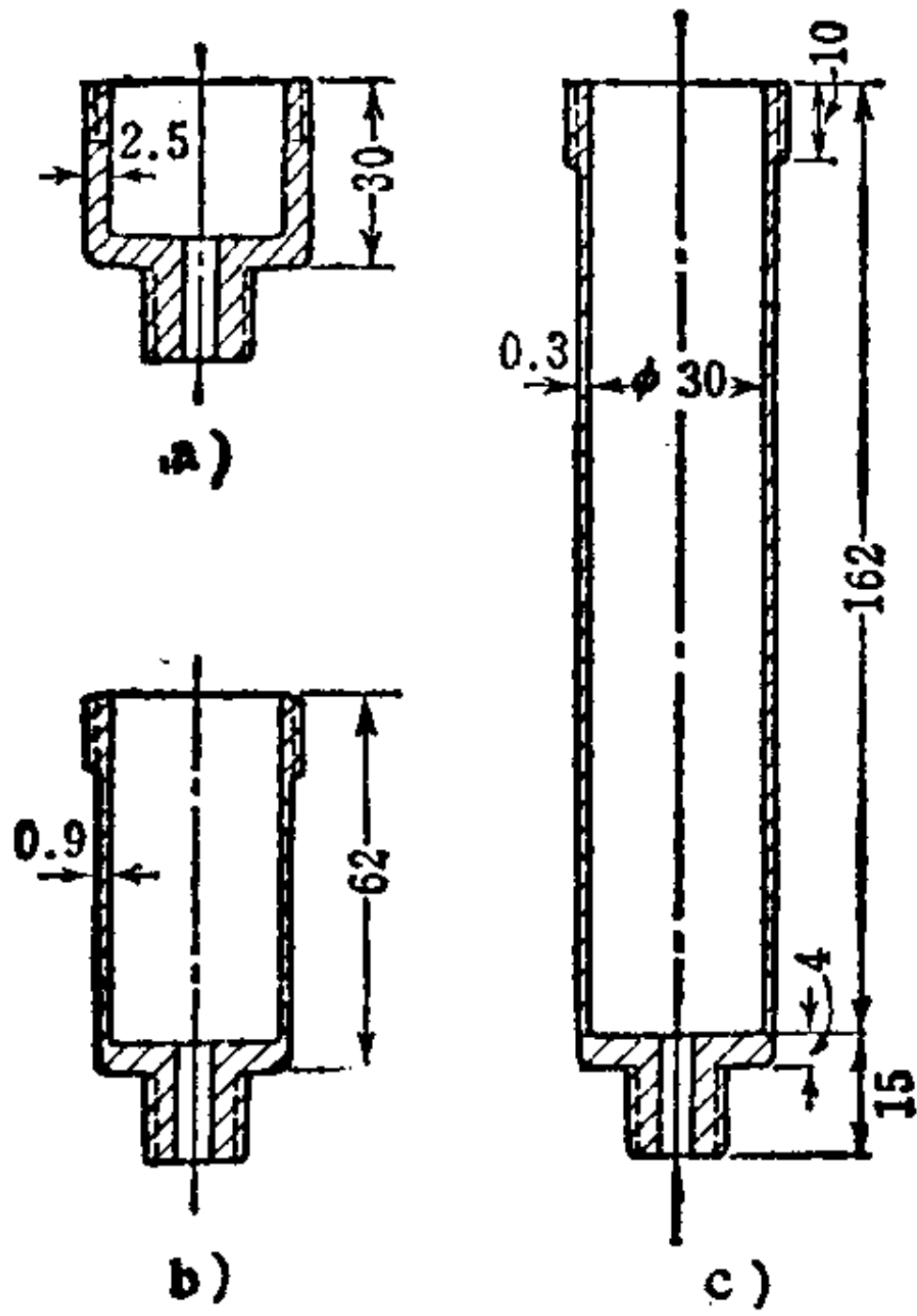


图4.250 机械零件的管坯
变薄旋压例
a) 切削件 b) 第1道次
c) 第2道次

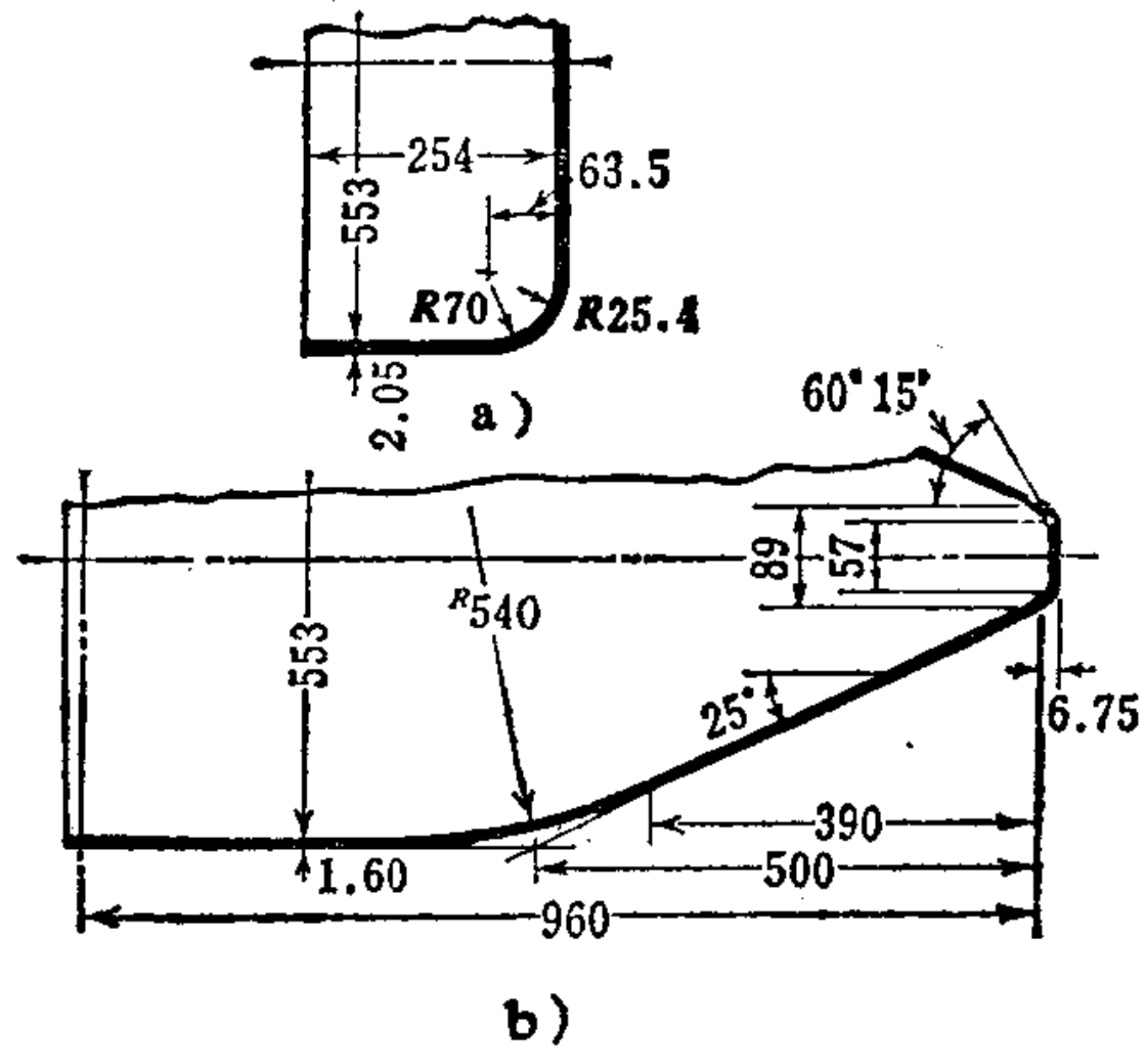


图4.251 复杂形状
旋压示例

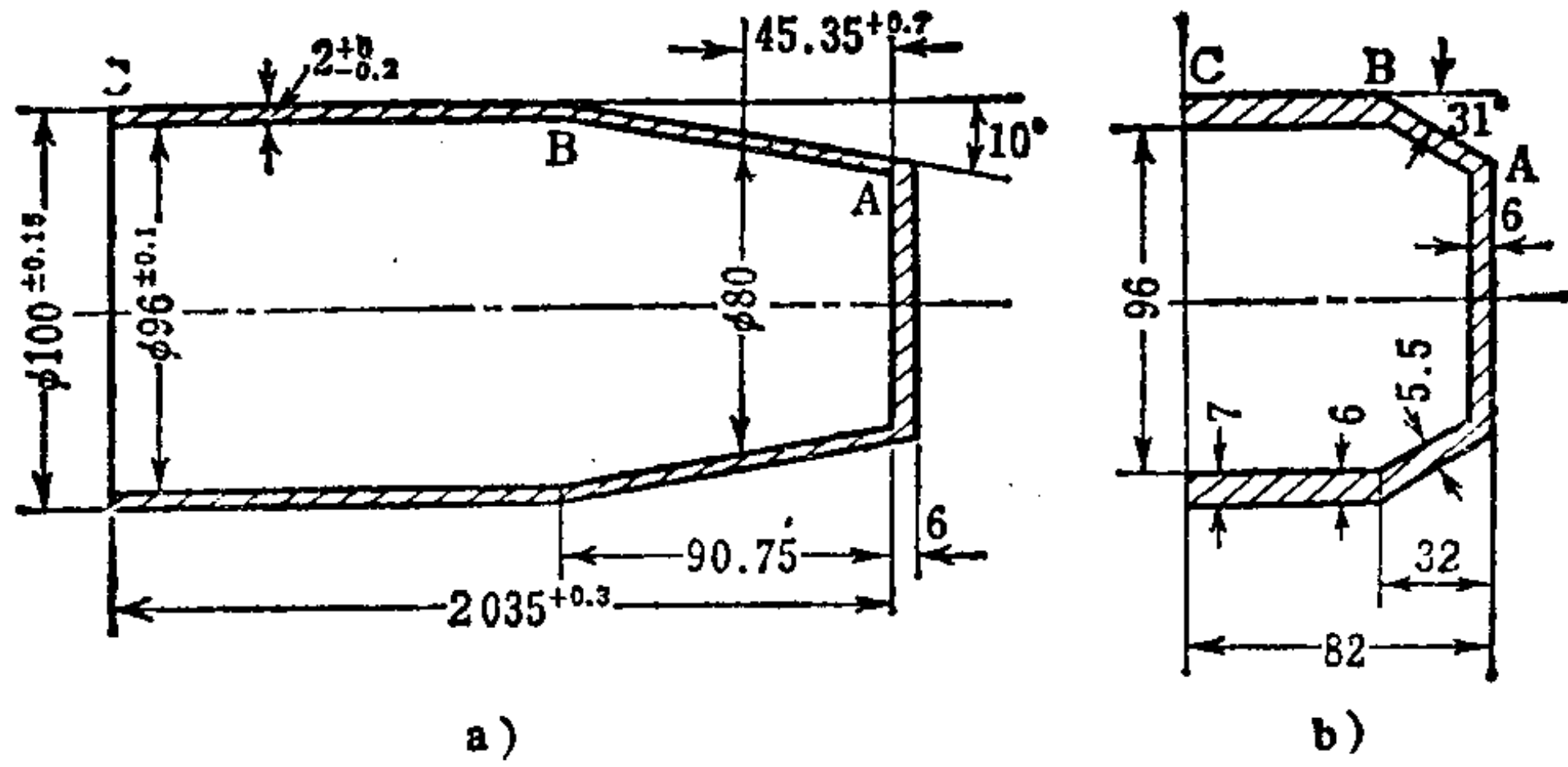


图4.252 为提高材料利用率的旋压加工示例
a) 制件 b) 坯料

便地得到如图 4.254 b) II 形状 ABC 的拐角, 然后由 I 形状旋压出 IV 的形状。当旋压比为 1.2 时加工容易, 但还必须注意旋压时辊轮送进速度 v 和移动螺距 P 的配合。当采用 $v = 5$ (mm/rev), $P = 5$ mm 时会得到成功。制件经强力旋压看来只需一道次就可旋出, 但由于 CD 部分的倾斜角 α 小, 为确保这部分的壁厚 (1.4 mm) 而要进行旋压。此后, 由 IV 到 V 形状经强力旋压而完成制

件。图 4.255 所示的过滤器为类似的例子。材料为 SPC-1，其厚度为 1 mm，由于 BC 部分的倾斜角为 15° ，壁厚变薄到 0.27 mm 时使用上不理想。因此，从 I 到 II 形状进行空间强力旋压 ($v = 0.19\text{mm/rev}$)，然后进行旋压 ($v = 3.7\text{mm/rev}$)，最后在成形模上用熟悉的精旋压 ($v = 0.19\text{mm/rev}$) 可得到良好的制件。图 4.256 为类似灯罩的制件的制作例，由于 I 到 II 形状为角度 α 等于 18° 的剧烈的变薄旋压，如标出的那样油压较高。II 形状以后进行半自动旋压，这时的油压变化如图标示。图 4.257 为直径 1600mm 的大型容器封头，由于其尺寸大，用 $N = 90\text{rpm}$ ， $v = 4.2\text{mm/rev}$ 的大型旋压机加工。材料为不锈钢时，箭头部分最好经过中间退火。

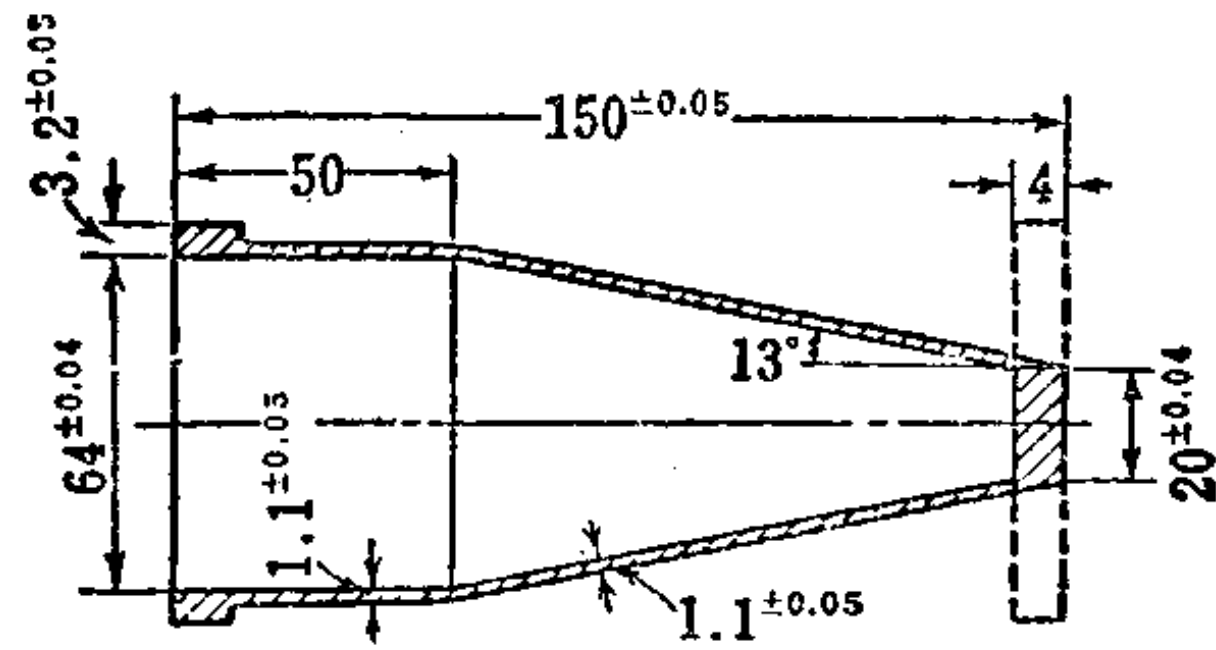


图4.253 电缆套的加工尺寸精度

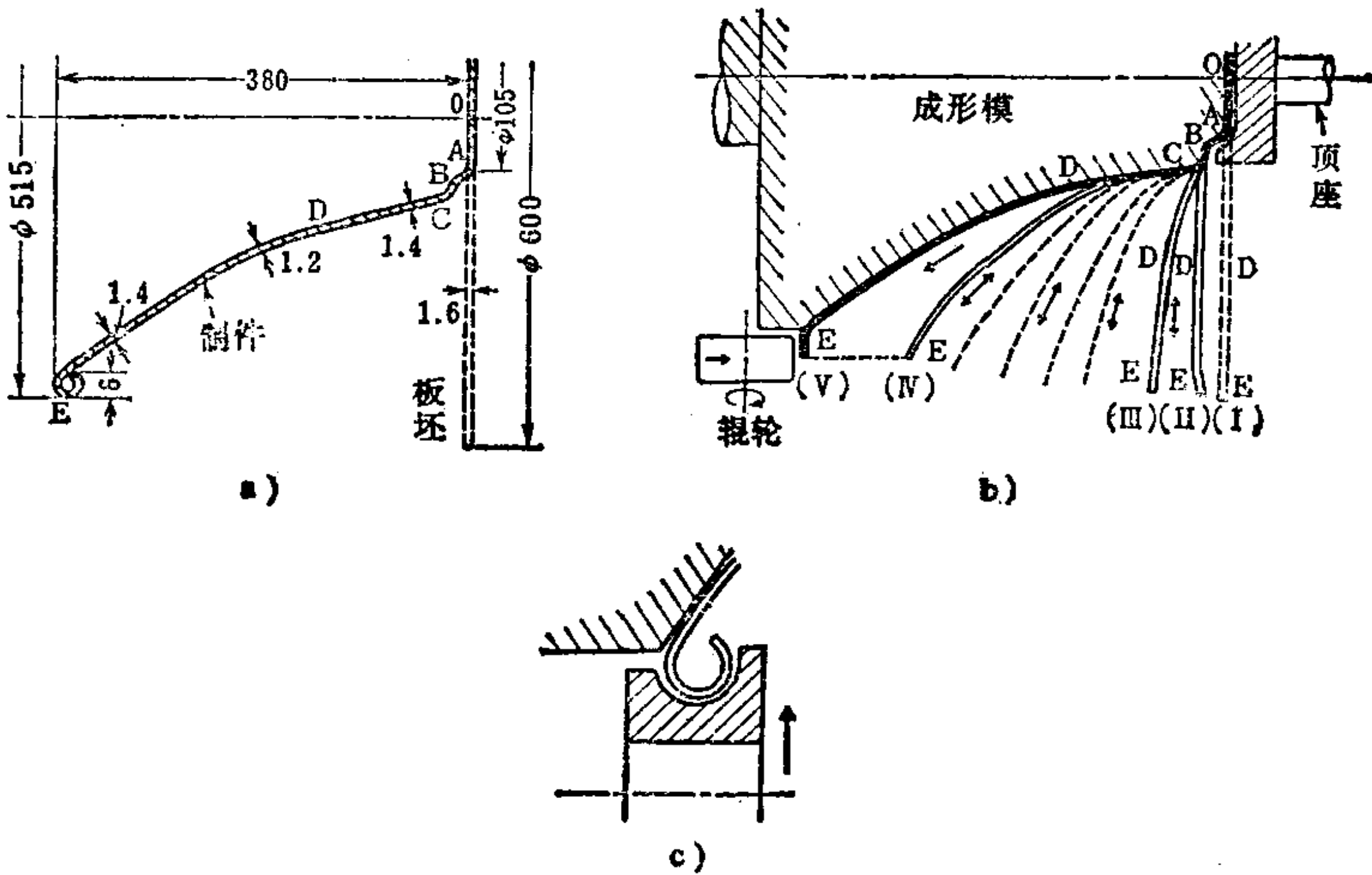


图4.254 15英寸扬声器制作示例

a) 制件的壁厚等尺寸 b) 制作法 c) 卷边

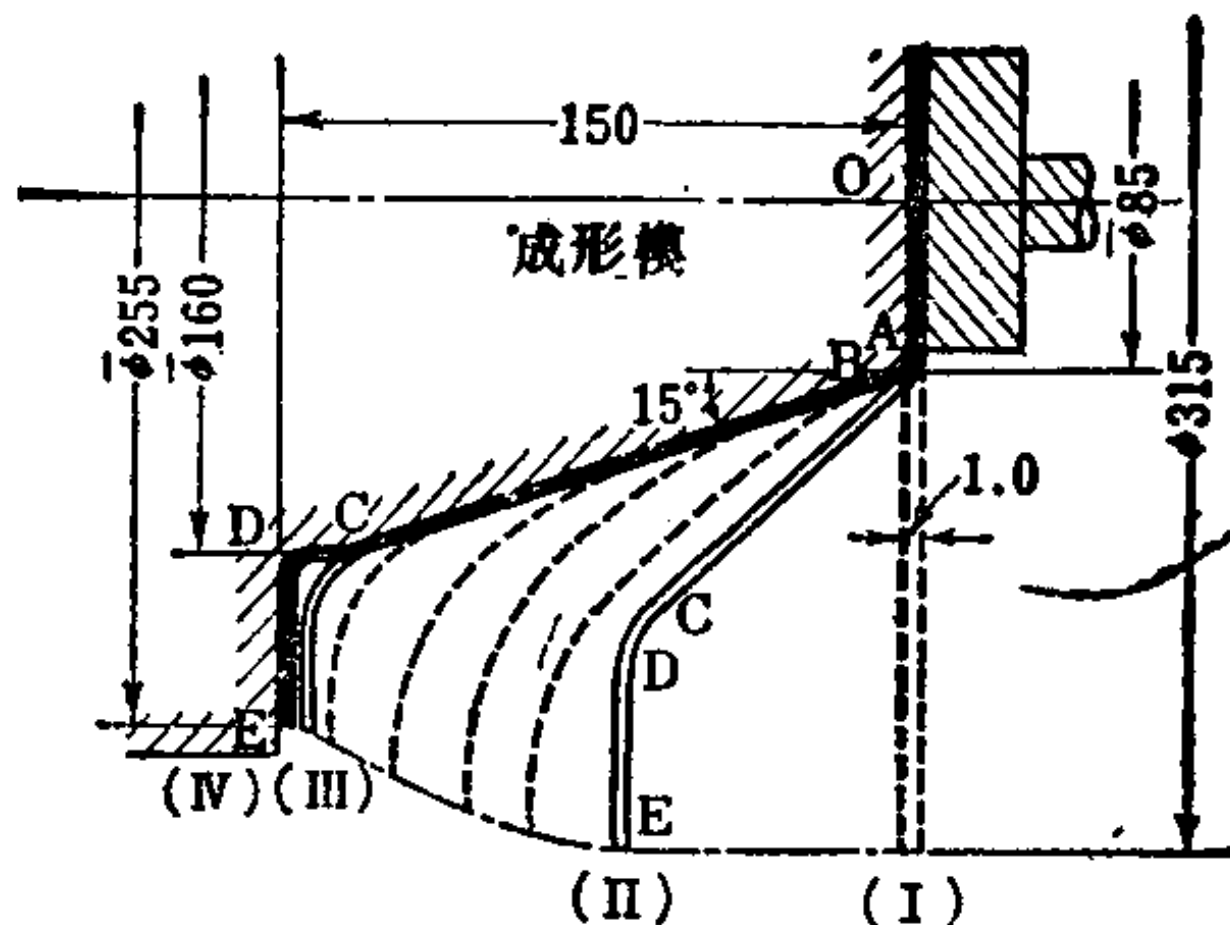


图4.255 过滤器盖的制作例

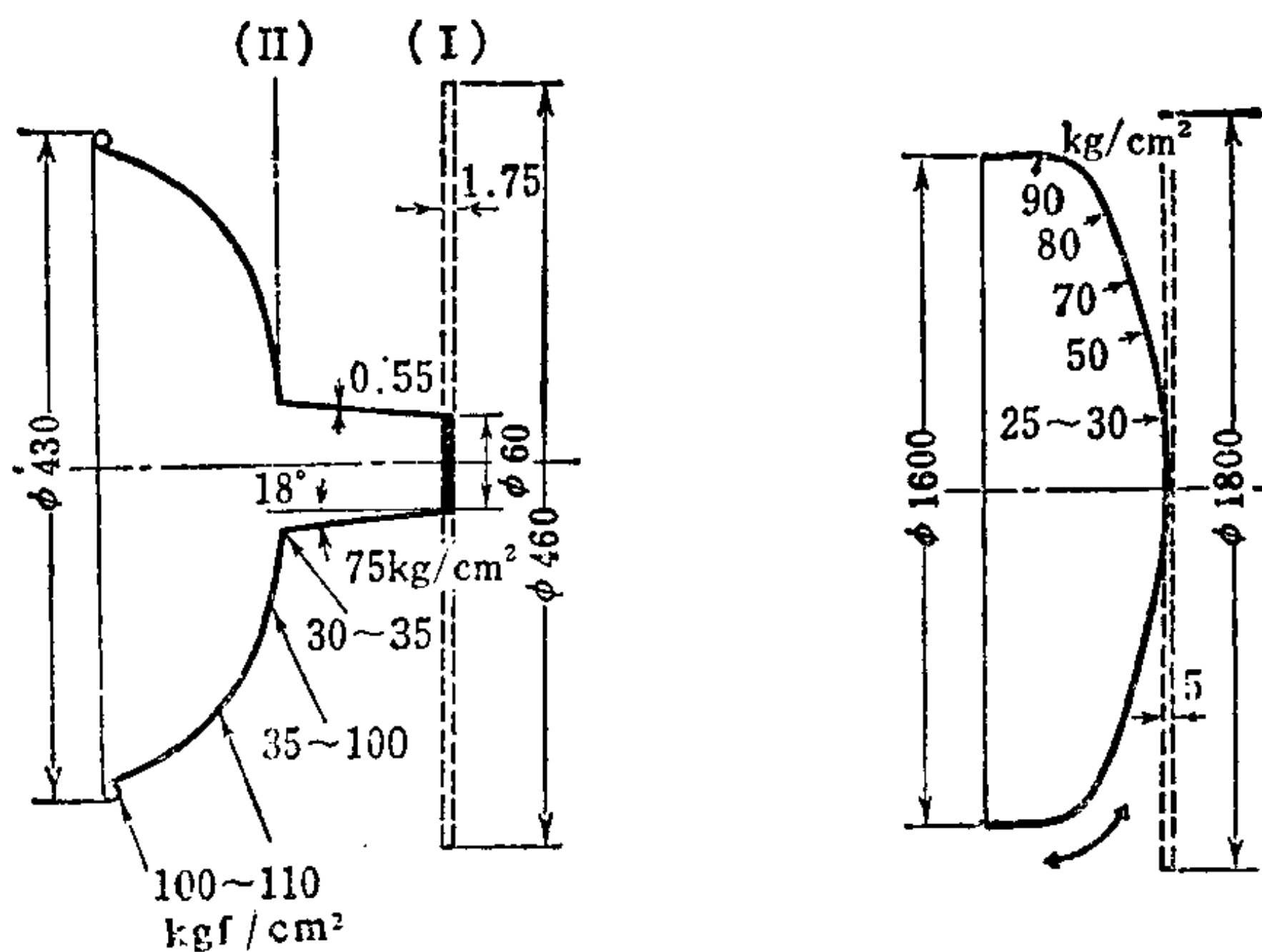


图4.256 灯罩形制品的制作示例

图4.257 封头的制作示例

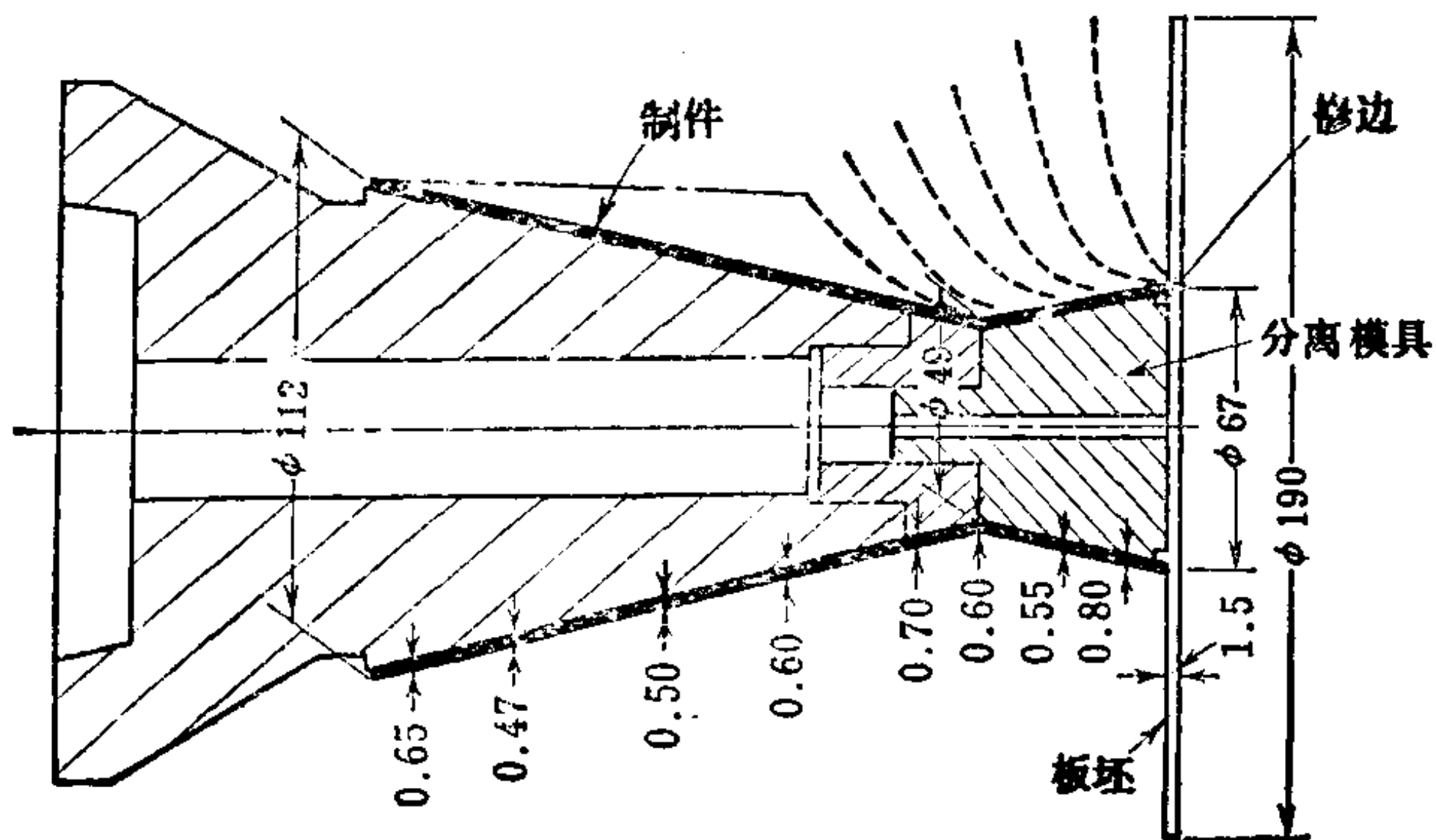


图4.258 制作示例 (1)

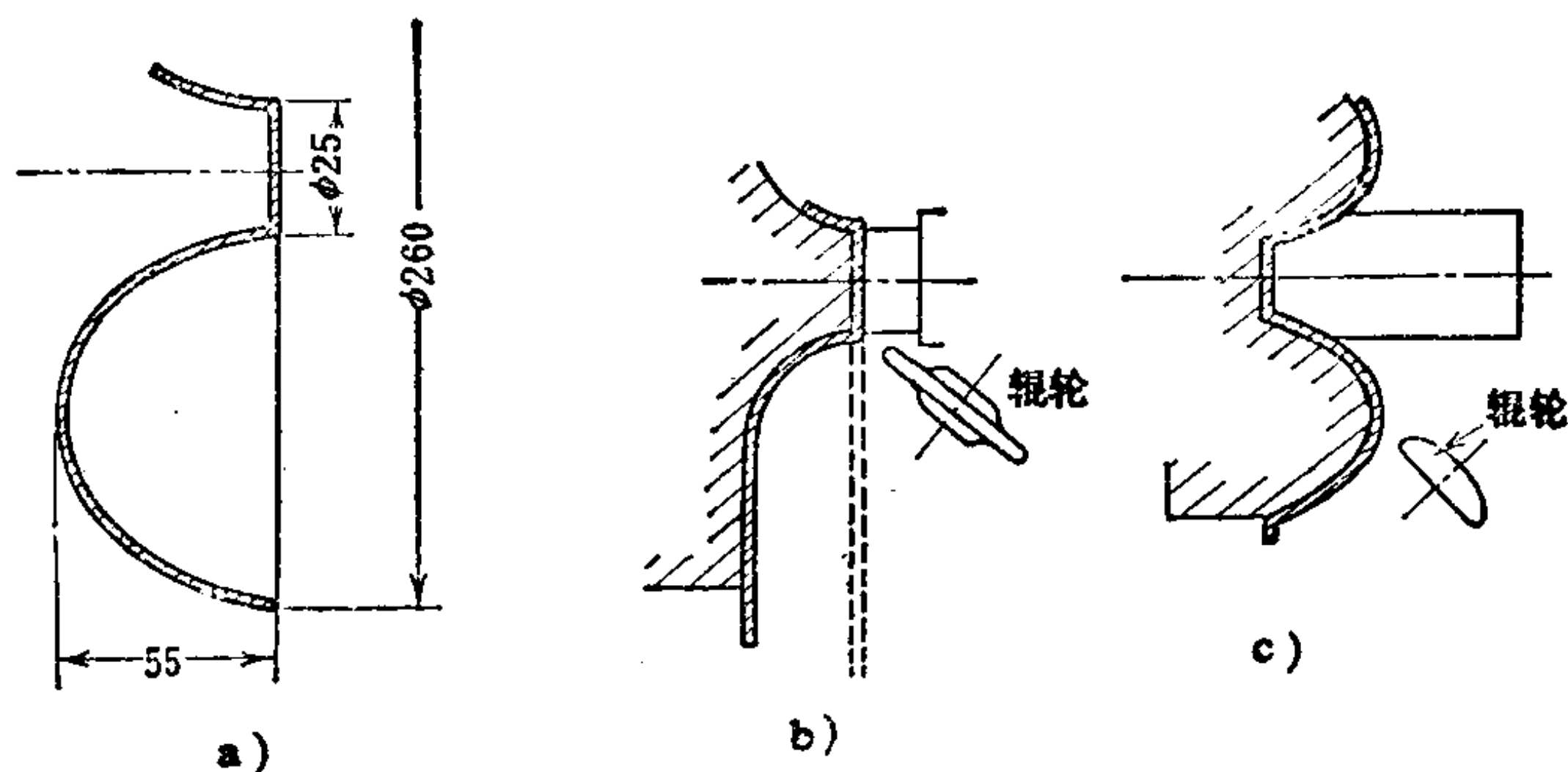


图4.259 制作示例(2)

a) 制件 b) 第1道次 c) 第2道次 材质SUS 304, 坯料直径 $\phi 275$ mm, 板厚1mm, 转速 b) 1084rpm c) 542rpm 送进速度 100mm/min, 辊轮压力70~80kgf/cm² 油泵压力40kgf/cm² 加工时间 b) 0.5min c) 0.5min

此外, 制作例子还很多, 再举其中的二、三例如图 4.258~图 4.260 所示, 同时附有其加工数据。制件的形状可参照图 4.217。

4.9.6 其他回转成形

a. 胀形 和缩口相对应的胀形也可用成形模和辊轮来进行。图 4.261 所示的容器由于受拉应力, 能得到的每次加工量比缩口时大。加工极限用抗拉强度进行比较评价。图 4.261 中圆周变形量为 16% 而不需经中间退火, 单面(半径)增加 35mm, 螺距 P 为 12mm 时, 旋压三道次的加工时间为 1 分 40 秒。图 4.262 为流体节流部分、

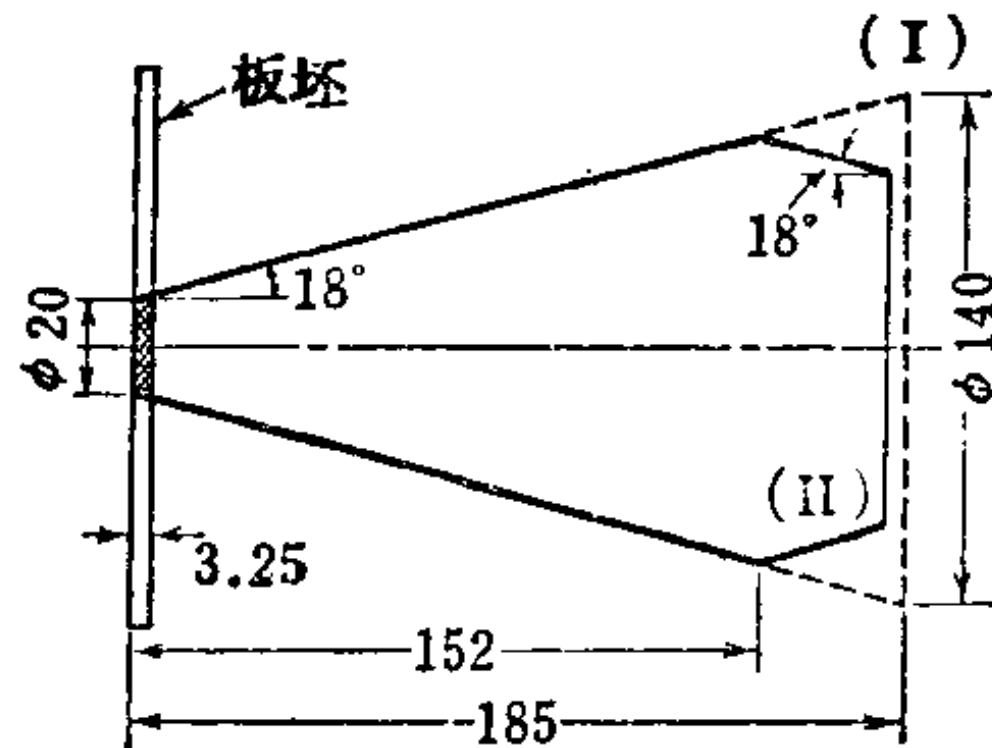


图4.260 制作示例(3)

材质铝坯料直径 $\phi 140$ mm, 板厚 3.25 mm, 转速 (I) 216rpm (II) 399rpm, 送进速度 (I) 320mm/min (II) 300~900mm/min, 辊轮压力 (I) 90 kgf/cm², (II) 38kgf/cm², 油泵压力 40 kgf/cm², 加工时间 1 min

喷嘴、轮缘等的适用例, 将打孔的圆板外缘固定经 3~4 道次成形。要求用特殊形状辊轮作内缘翻边时, 加工力是一个问题。

b. 滚波纹 为提高薄板的强度, 使板的一部分具有带状隆

起或凹陷以补强，可得到相当于2倍板厚时的刚性。滚筒、油槽、白铁皮管等容器大多采用滚波纹以作补强。滚波纹除用作补强外，也可用来结合制件。容器固定在主轴上的模具中，使用包括内辊轮和外辊轮的滚波纹工具在旋压机上加工。为了滚出向外侧胀出的波纹，内辊轮为凸形，外辊轮为与其相对应的凹形，图4.263为用手动加工的例子。对于厚壁件则采用液压驱动。并且能内外同时滚出两个以上的波纹。滚波纹时，因为必须从其他部分流入必要的材料，滚到某一深度以上要受材料的抗拉强度、延伸率的限制。因此，波纹的深度受宽度和形状的影响，目前是靠经验来决定其限度。例如，滚圆弧波纹时，深度约为波纹宽度的1/3左右。

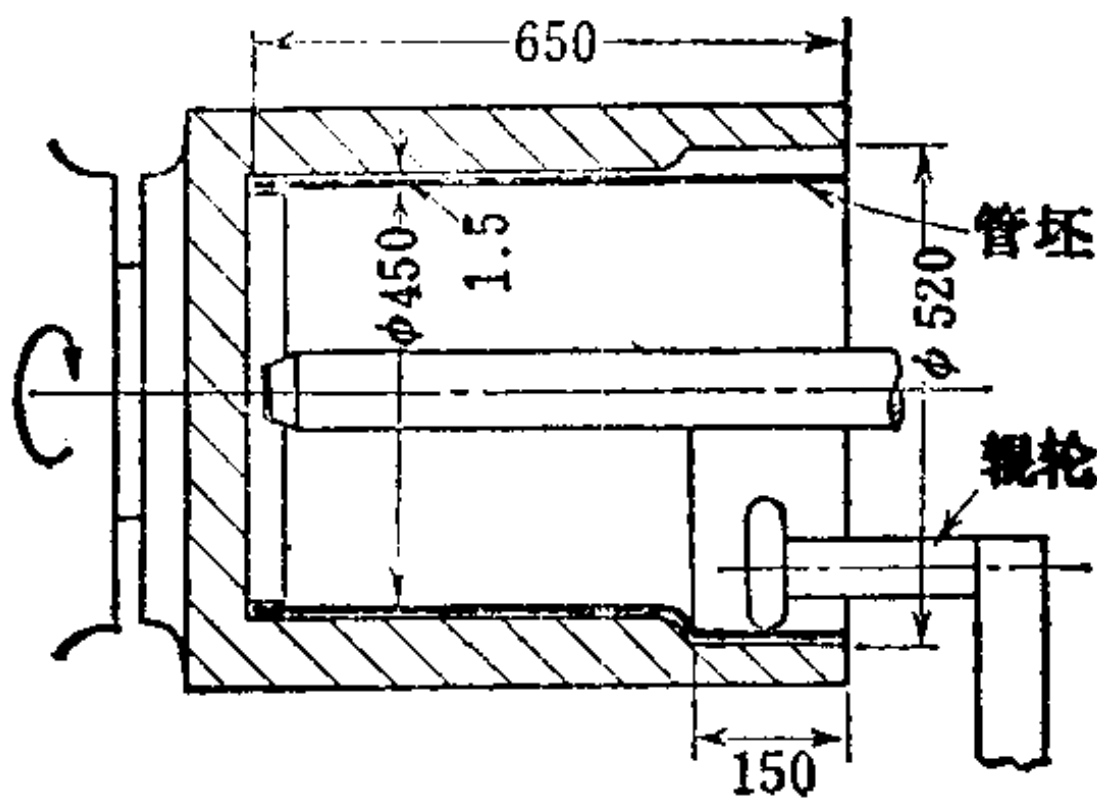


图4.261 胀形(1)

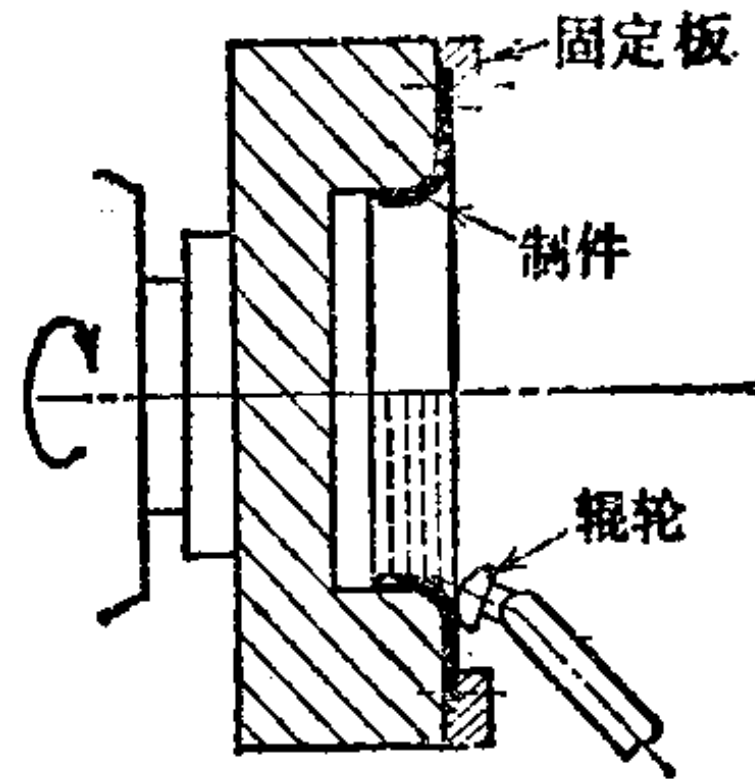


图4.262 胀形(2)

c. 卷边接合 它是通过辊轮使弯曲成直角的工件边缘接合的方法。图4.264为用普通辊轮滚压，进行直线状卷边接合的例子。其接合度不太强。要求强的接合时，选用圆形卷边接合。这时要使用凹形的卷边接合辊轮，且辊轮的压力比前者要高（图4.265）。要求更大的接合强度时，可采用图4.266那样的双重卷边接合。卷边接合时的板厚，可根据制件直径选取，一般为0.25~2.5mm，在下限0.25mm以下时，必须考虑产生皱折的问题。而在上限2.5mm以上时，会产生始于边缘的破断问题，此乃由卷边引起。钢材为小于0.7mm，铝材为小于1mm左右的虽可用手动进行，但更希望用油压驱动。

罐头等制罐操作中，将板坯卷成的圆筒在压力机上卷边接

缝，在其上装上罐头盖时，在自动卷缝专用机上进行双重卷边接合，关键在于卷边接缝辊轮的形状。不过其原理和上述的相同。

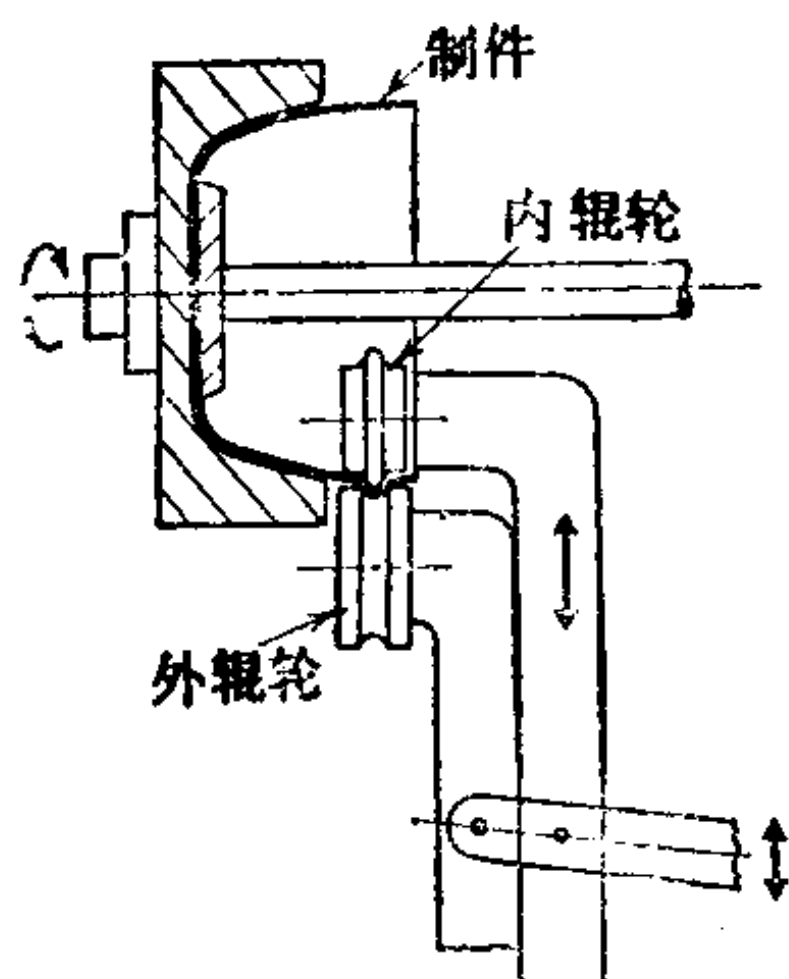


图4.263 滚波纹

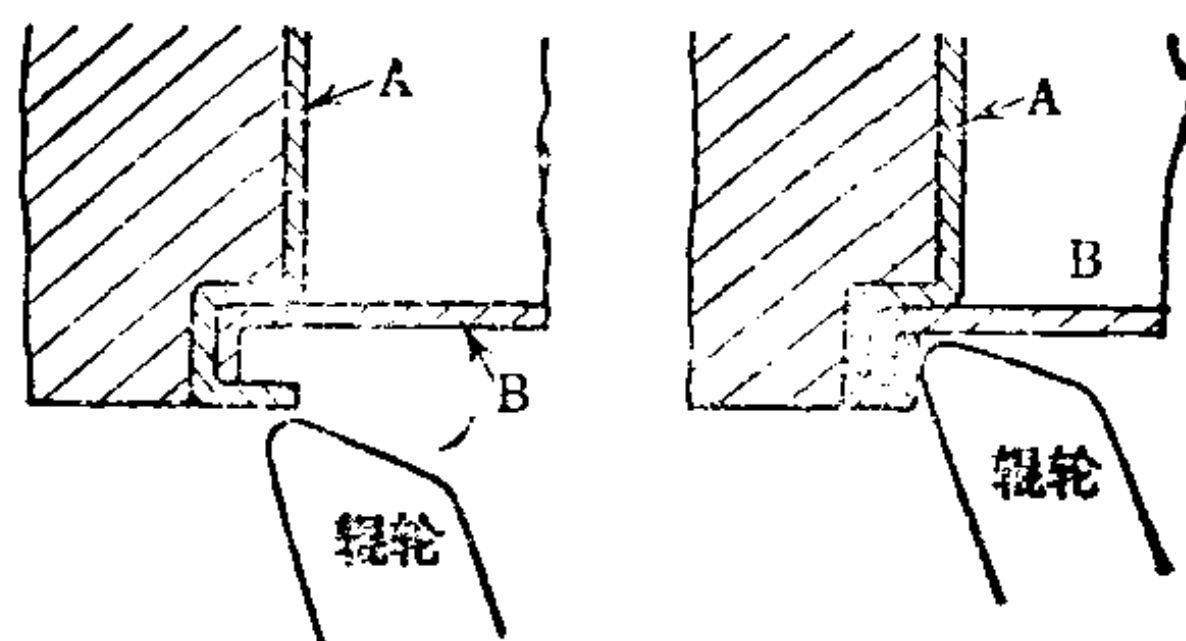


图4.264 直线状卷边接合

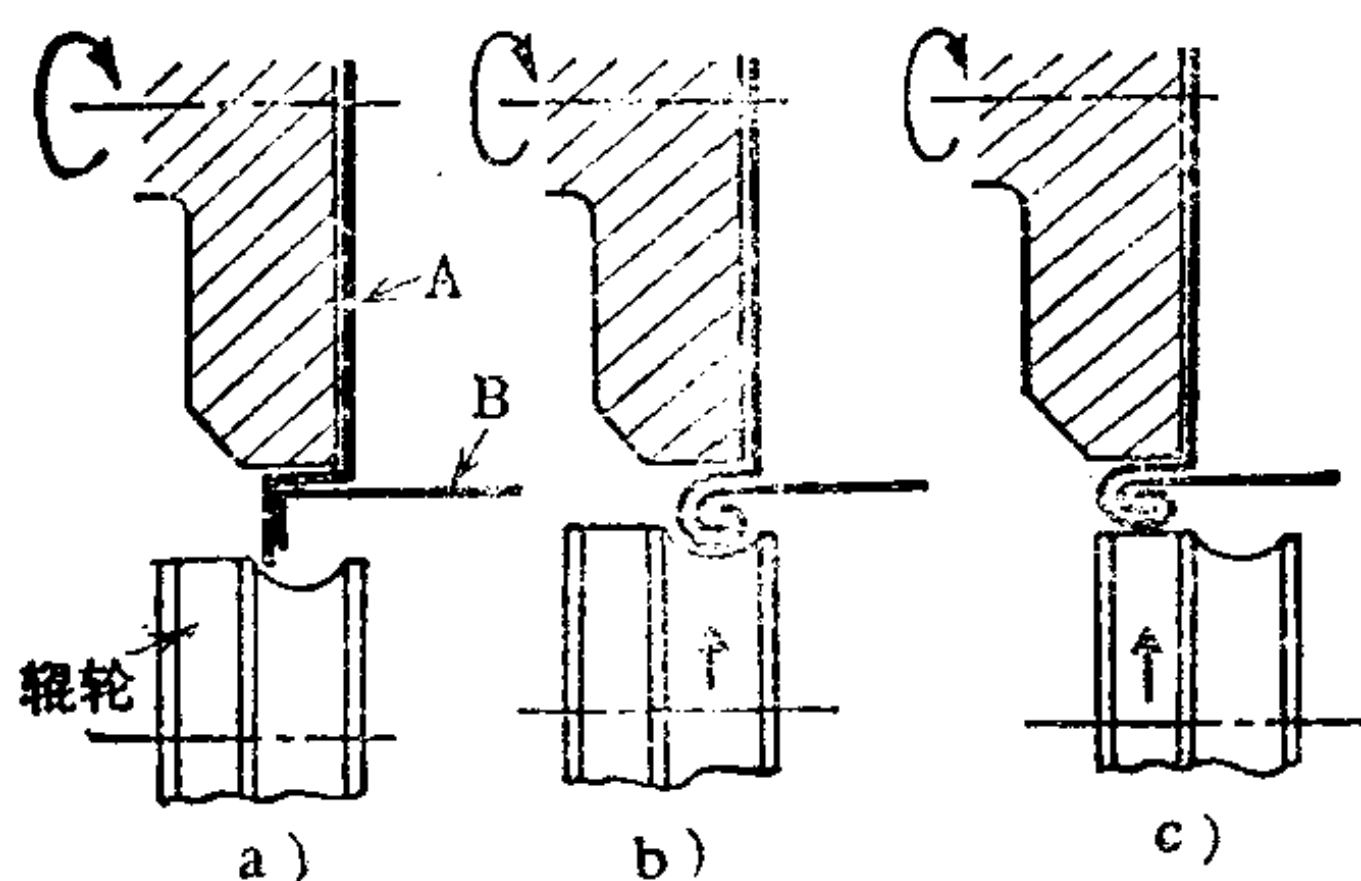


图4.265 圆形卷边接合

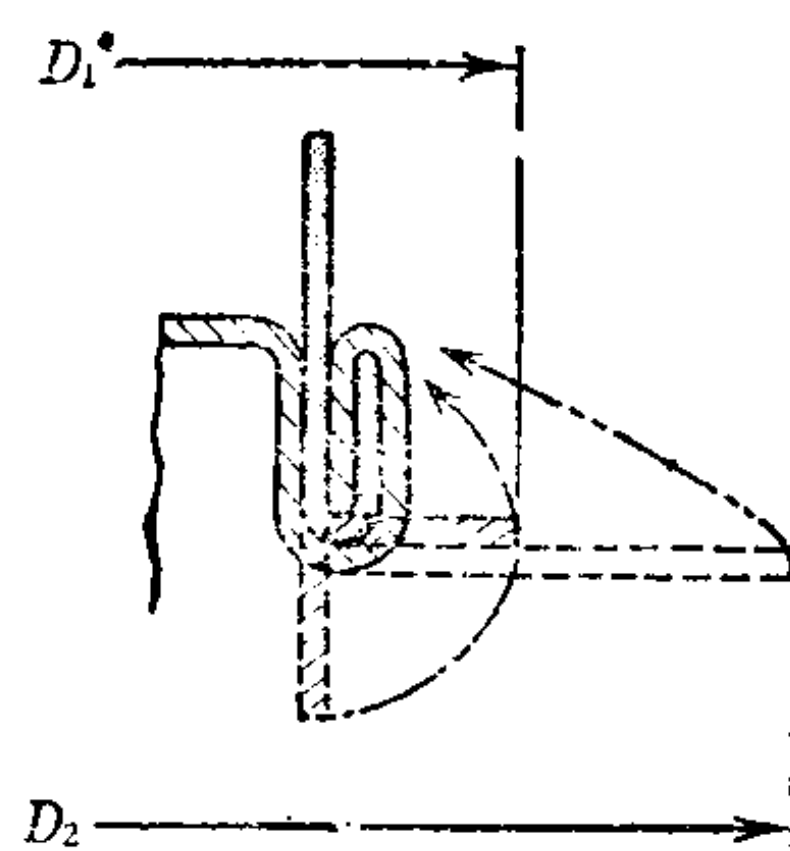


图4.266 双重卷边接合

d. 卷边 薄壁回转体的卷边是针对纵弯曲和破坏的一种补强方法，要用特殊的卷边工具。为进行卷边，必须设法从容器上制备出小的凸缘部分（图 4.267 a）。按使用目的可进行开式、闭式和复式卷边，卷边的适用范围，由于和卷边接合同样的理由，板厚限制在 0.3~4mm 内。按经验卷边尺寸的最佳值列于表 4.36。还有，罐头等圆形罐盖等的卷边用专用机。

e. 修边和切断 进行以上的边缘加工时，为使边缘整齐，要经修边把不齐的部分切去。一般用两个具有修边刃口的小切断辊轮对边缘进行修边，和在压力机上剪断一样，由于会产生塌边，按使用目的来决定移动辊轮是外辊轮或是内辊轮。图 4.268

所示如外辊轮移动，则塌边向内侧。图 4.269 所示为用和成形模轴线平行设置的辊轮切断纵向凸缘的方法。修边一般以 1.5mm 左右板厚为限，超过 1.5mm 时，用上述的切断辊轮是不合适的，要使用特殊的修边装置。

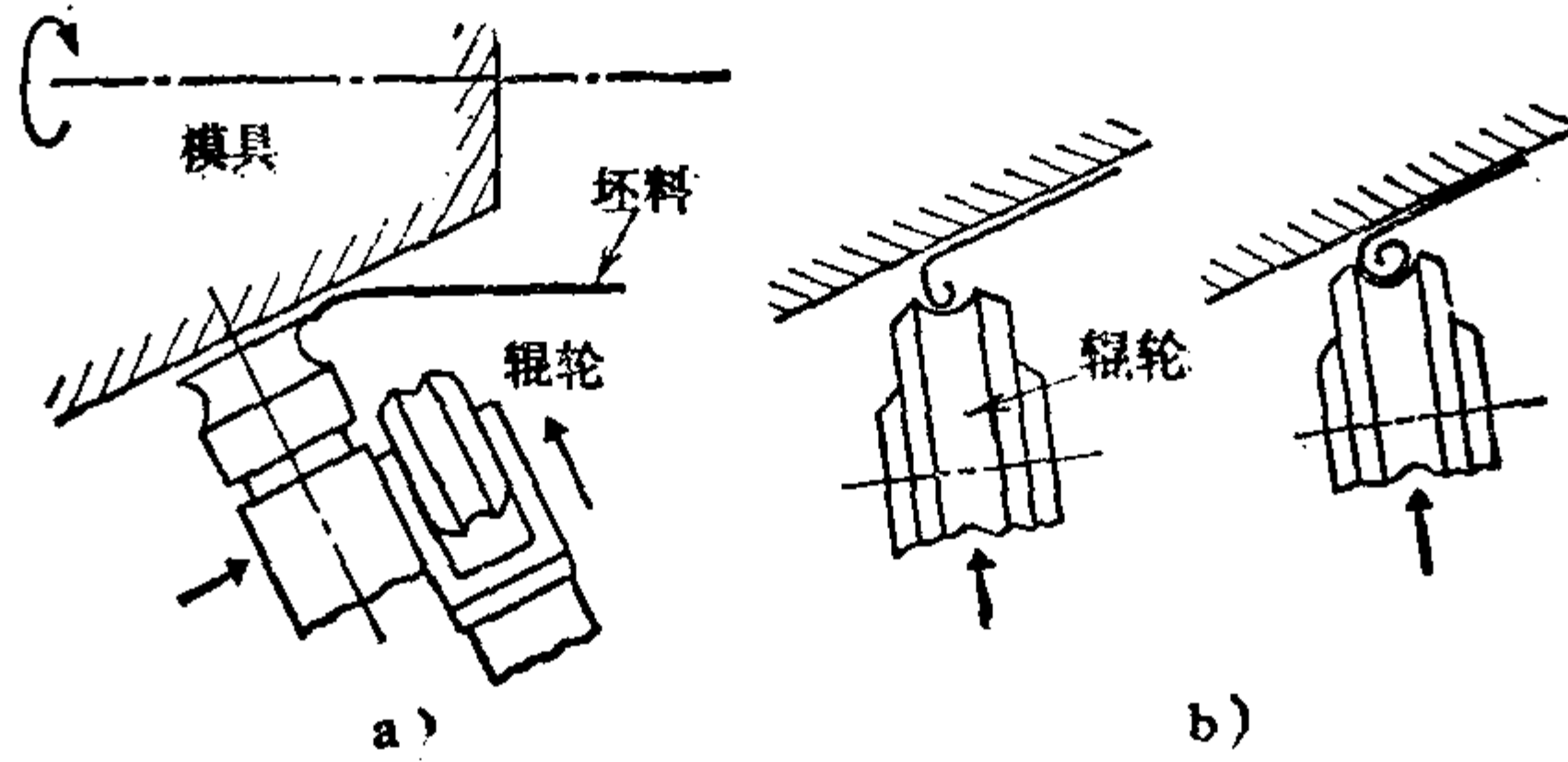


图4.267 卷边

表4.36 板厚和卷边尺寸 (mm)

板 厚	卷 边 直 径
0.3	1.5~2.5
0.5	2.5~3.5
1.0	4~8
1.5	5~14
2.0	8~18
2.5	14~22
3.0	18~24
4.0	20~30

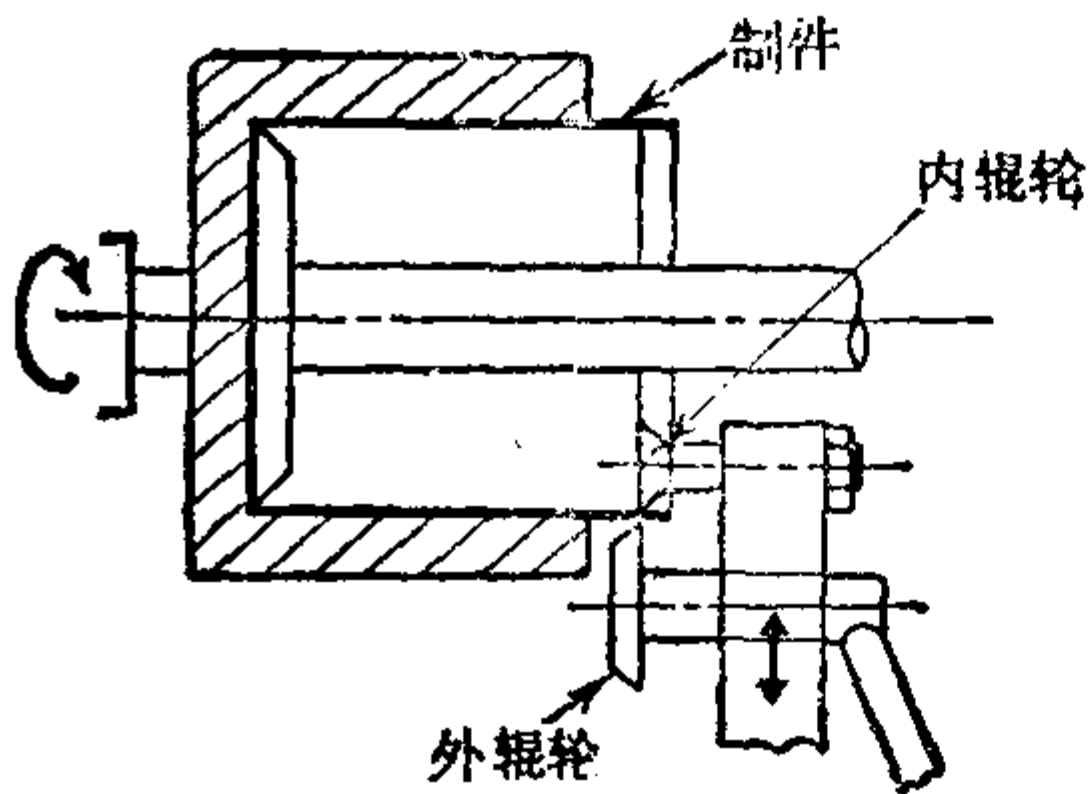


图4.268 修边

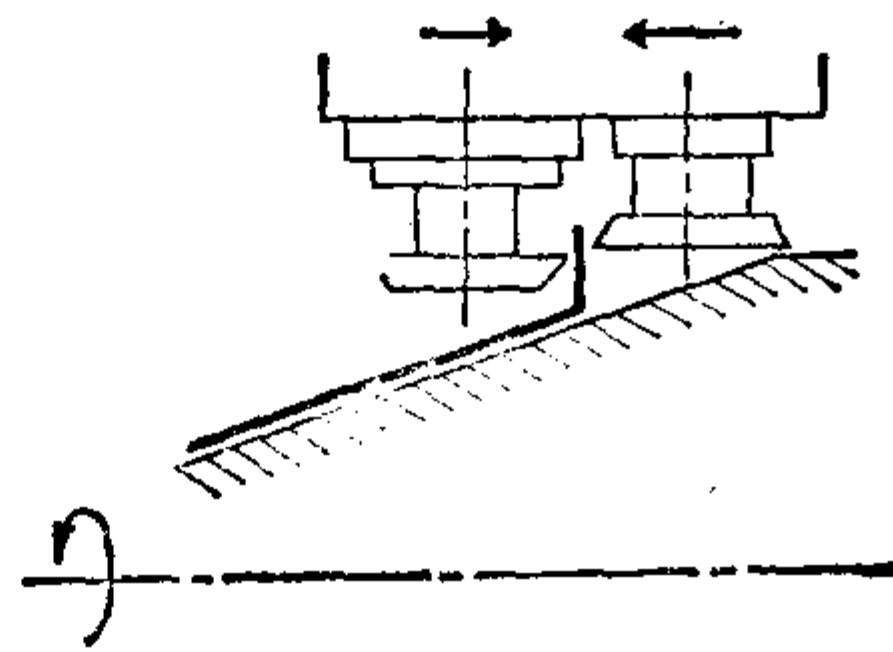


图4.269 纵向凸缘的修边

f. 表面精整加工 板材回转成形中, 当有表面伤痕或形状不正确时, 须进行表面精整加工。旋压加工时, 如不用润滑剂虽可获得光亮表面, 但回转速度和送进速度大时会产生粘着现象, 因此选用粘度较低的润滑剂, 注意使不丧失光亮。然而如送进速度大, 制件不可避免地会出现走刀痕迹。用粘度大的润滑剂 (如肥皂) 时, 虽能消除走刀痕迹, 但使制件表面暗淡无光。因此, 在对制件外表面或内表面的质量有严格要求时, 可用具有一定宽度的辊轮对制件作辊压后进行研磨。图 4.270 所示为椭圆形制件的整形和研磨, 即使研磨具有凹凸面的制件也希望辊轮面和制件面垂直。虽辊压力过大会引起振动, 但宁可使材料受拉伸, 最好还是根据表面质量来选定送进速度、回转速度和辊压力等, 这些数据比较容易决定。

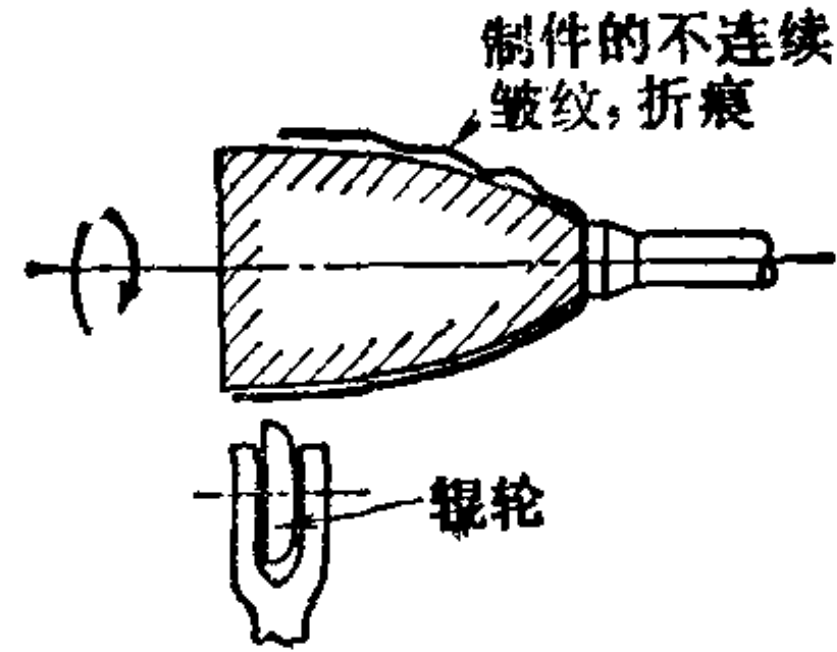


图4.270 表面精整加工

4.10 树脂成形和液压成形

4.10.1 树脂成形

利用天然橡胶或人造弹性物质在加压时所表现出来的高粘性流体的性质, 把它们作为凸模或凹模可进行板金加工。天然橡胶价钱便宜, 机械性能也好, 但在要求耐油、耐磨和耐天候性时, 可采用合成橡胶或聚氨基甲酸乙酯橡胶, 后者对上述要求具有优越的性能。

为了充分利用橡胶的特性进行有效的成形, 橡胶的硬度要合适。一般, 对于压缩率相同的橡胶, 其硬度越大所得到的压力就越高。因此, 对于需要局部压力高的冲裁, 可使用肖氏硬度60~85的橡胶, 而在希望给橡胶以较大变形从而得到高压进行成形时, 可使用肖氏硬度45~60的软橡胶。聚氨基甲酸乙酯橡胶的硬度越大弹性恢复越好, 因而要使用比天然橡胶硬度高的橡胶。

a. 格林(Guerin)法〔153~156〕 这是在钢制护套中装入橡皮作为万能模具进行各种成形的方 法(图 4.271),而护套的断面必须能承受由于橡皮弹性变形引起的作用力。橡皮厚度为压力机台面上的模具的最大高度的 4~5 倍,橡皮可以是护套深度 2/3 左右的整体,或是几层厚度为 25mm 左右的橡胶板。护套安装在压力机滑块上,压力机工作台上装有能插入护套的凹模座。凹模座与护套内壁之间留有 1.5~3mm 的间隙。凹模往凹模座上安装不需要特别牢固,用销钉简单地固定即可。加在橡皮上的平均压力一般为 70~100kgf/cm²,但高压模的压力要达到 200~300kgf/cm²。

(i) 冲裁 冲裁的边缘为直线或较大曲率半径时,如图 4.272 所示的 f 部分由于摩擦阻力的作用不能靠近凹模,因而在板坯上必需留有成为废料的长度 l 。板厚 t_0 和凹模厚度 h 越大 l 也越大,其尺寸大体上可由下式给出。

$$l = 2h + (20 \sim 30)t_0$$

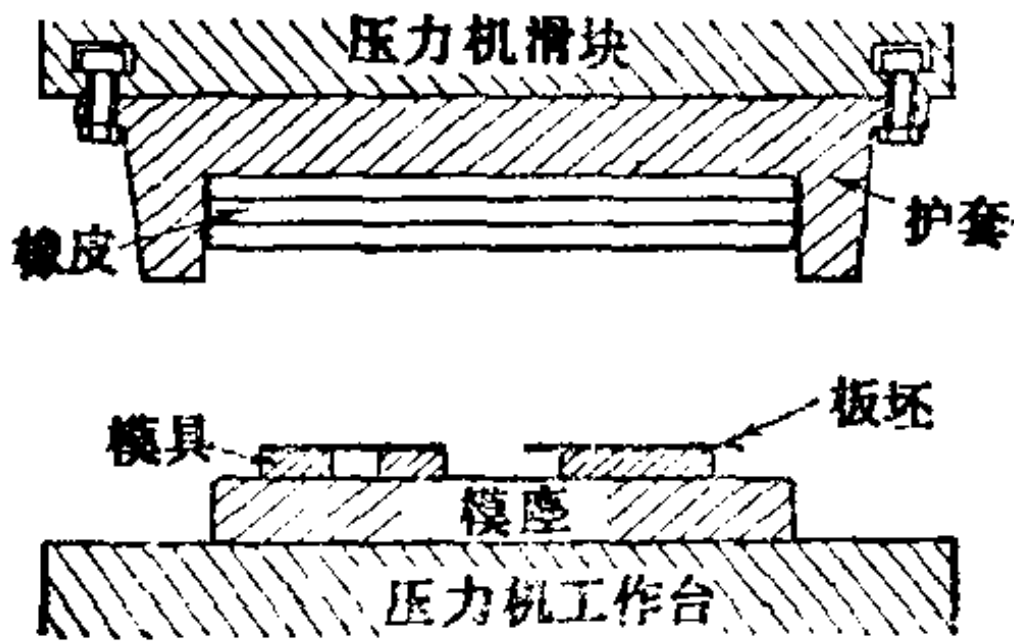


图4.271 格林法的成形装置

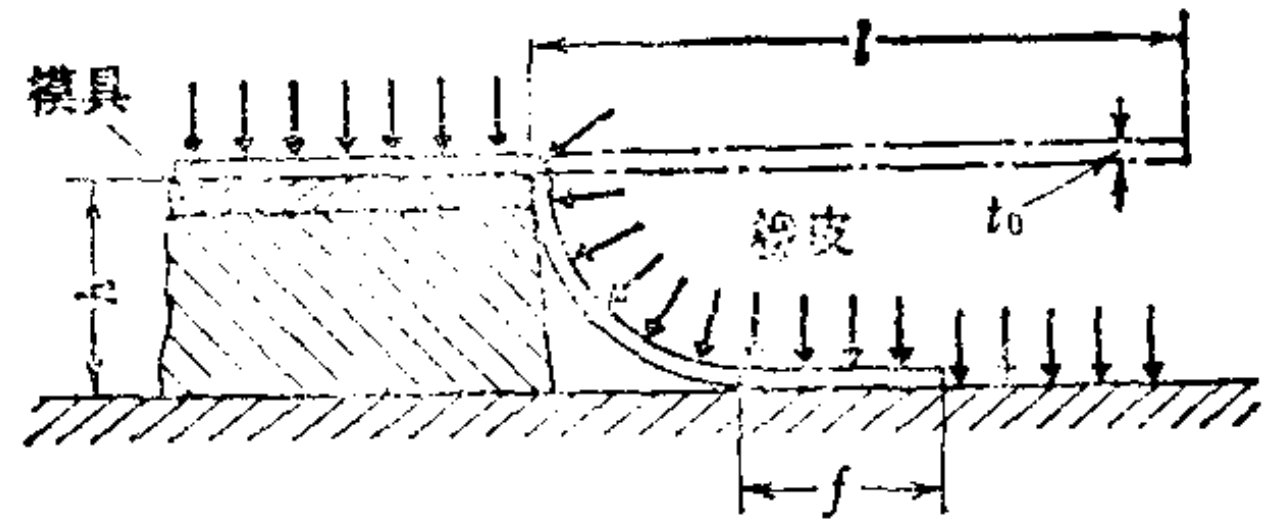


图4.272 直线刃冲裁

凹模高度 h 以取板厚的数倍到 10 倍左右为宜。为提高冲裁边缘的压力,增加作用在该部分的拉力,可采取如图 4.273 所示的措施,即采用叫做制动环或固定板的辅助模具,便可减少变成废料的板的长度。

要使所冲裁的圆孔或各种形状孔的质量好,就得考虑材质、板厚、孔的尺寸、与其他孔的距离以及板的边缘与孔的边缘的距离。在冲圆孔的场合,当模具厚度为板厚的几倍时,孔径越小板厚越厚所需的冲裁压力越高,而且这个压力与材料的剪切强度成正

比。与其他孔的边缘距离应是板厚的10~20倍,与板的边缘距离要在板厚的10倍左右或孔径的一半以上。低压模的格林法,其板厚与最小孔径的关系如图4.274所示。这时为了使压力集中于冲裁边缘,如果将厚度为20~30mm的橡皮辅助垫板在孔的附近进行加工,就能象虚线所示的那样,可冲出小直径的孔。在用聚氨基甲酸酯橡胶作垫板把加工压力提高到500kgf/cm²左右时,冲裁圆孔的最小冲裁半径可取板厚的10~20倍,但方孔等的拐角半径应以板厚的3~5倍为限。

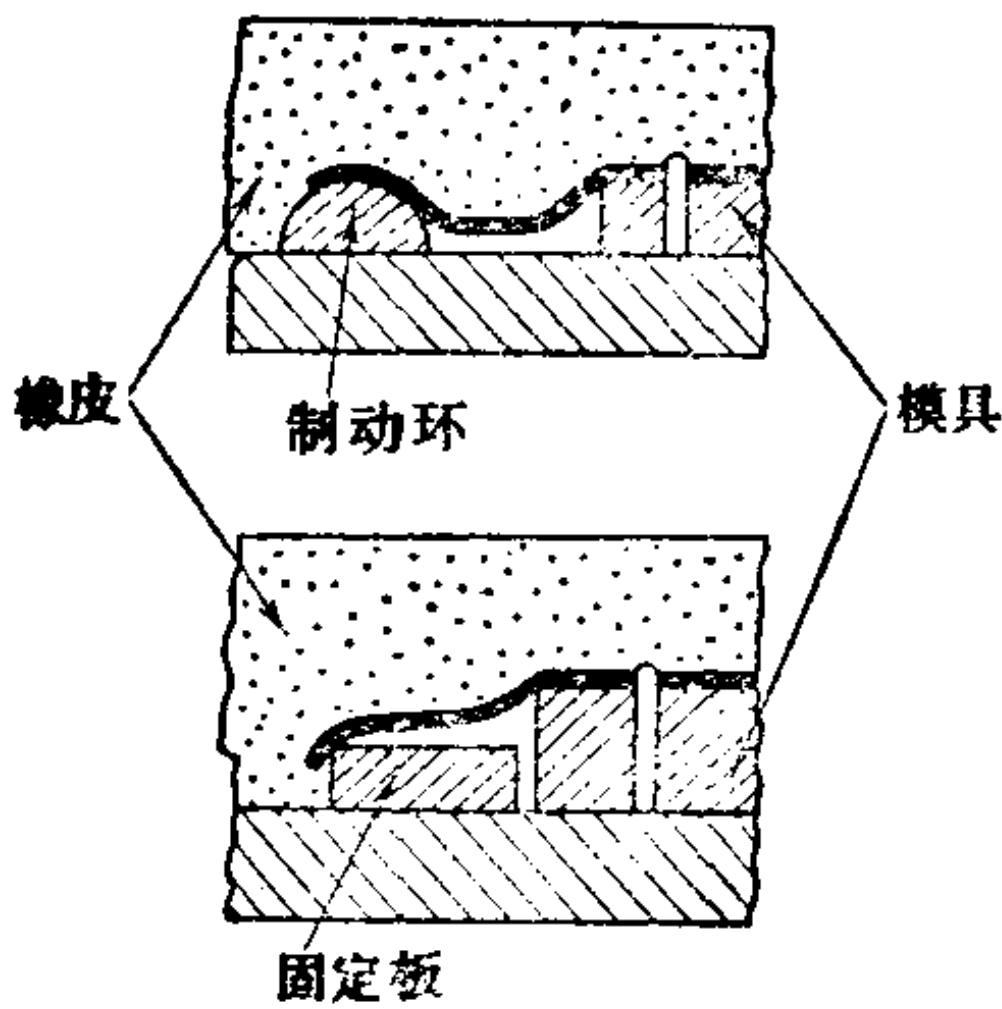


图4.273 减少冲裁废料的方法

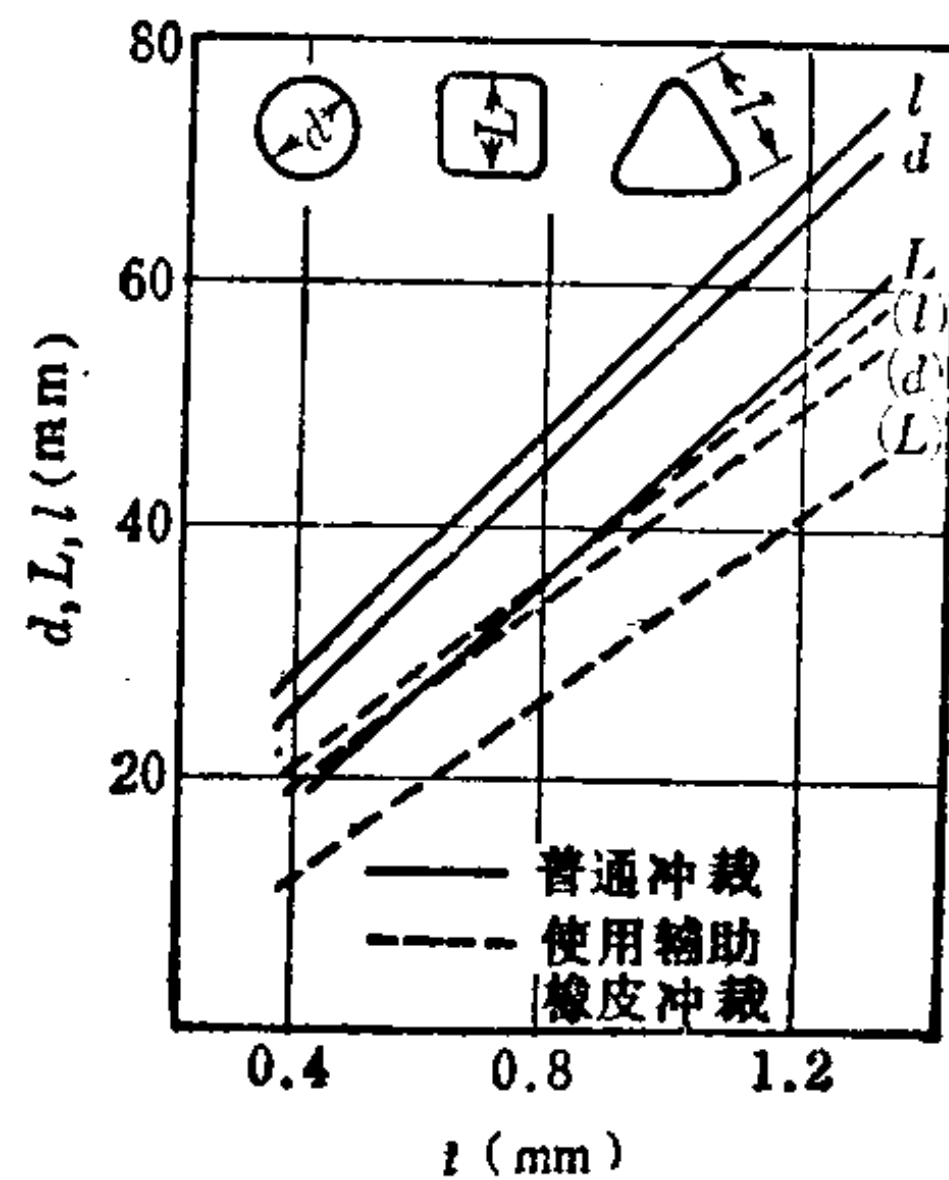


图4.274 A 2017 P板的厚度与最小冲孔径的关系

冲裁断面的质量,当板厚为1.5mm以下时较为光洁,而在板厚超过1.5mm就不光洁。利用橡皮进行冲裁与利用金属模冲裁相比,一般塌角大,但是基本上没有毛刺。使用能够得到光洁冲裁断面的模具进行冲裁,所需的压力增大,图4.275 a)所示的冲裁法最为理想。图4.275 b)的方法虽然所需的压力小,但冲裁面不光洁。图4.275 c)的方法获得的断面象被撕裂似的,因而也不理想。冲裁工具由剪切刃和底板组成,如图4.276所示,切刃由工具钢或不锈钢板等制成,厚度为2~3mm。底板使用木材、铝或锌合金等制成。底板的形式有图4.276 a)和 b)两种,一般都采用图4.276 a)的形式。在冲裁中如果板坯与底板倾斜的

侧面接触使加工困难时,可采用图 4.276 b) 的形式,但取出废料不方便。

(ii) 弯曲和凸缘加工 在直线形凸缘弯曲中,由加在凸缘面上的橡皮压力产生弯矩,利用该弯矩进行弯曲加工。

因此,如果橡皮压力已确定,剩下的问题就是弯曲所需的最小凸缘宽度。

在采用低压格林法时,最小凸缘宽度,当材料为

A2024P-O或A7075P-O时为 $1.6\text{ mm} + 2.5t_0$; 材料为A2024P-T 时为 $5.0\text{ mm} + 4.5t_0$ 。当凸缘宽度小于上述数值时,可采取如图

4.277 所示的手段,以提高局部成形压力等进行成形,就能改善被弯曲的凸缘部分的形状。由于板坯在接近模具圆弧拐角部分的面上滑动所引起的变形,可在模具上放置厚度为 6~10 mm 的压板加以防止。弯曲模的高度要比凸缘深度高 3~5 mm。在图 4.278 所示的直线形凸缘弯曲中,凸缘圆角半径 r_f 取决于橡皮压力、板的厚度和凸缘宽度。成形具有 V 形弯

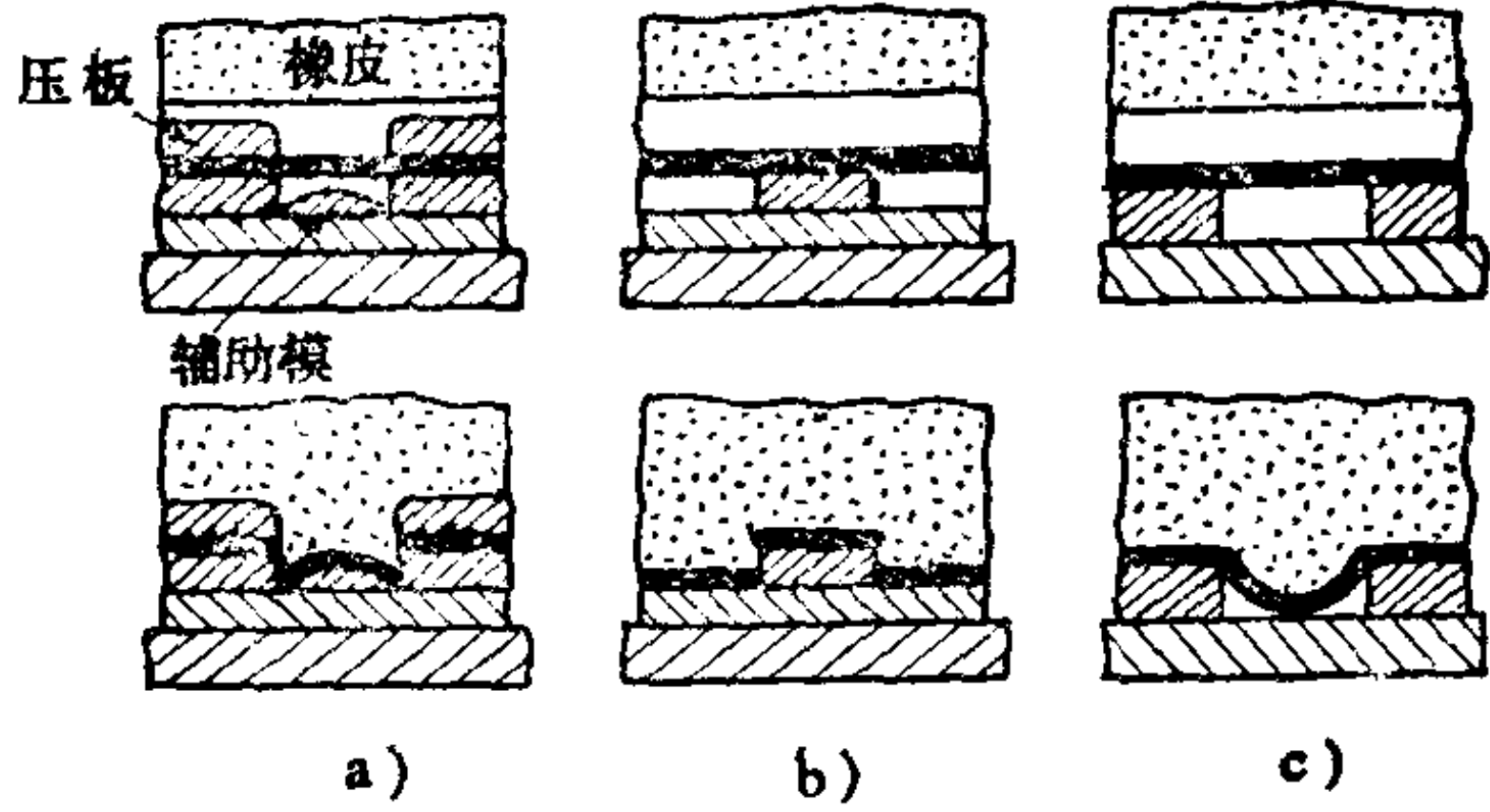


图4.275 冲裁方法与冲裁断面
a) 冲裁断面良好 b) 冲裁断面不好
c) 冲裁断面不好

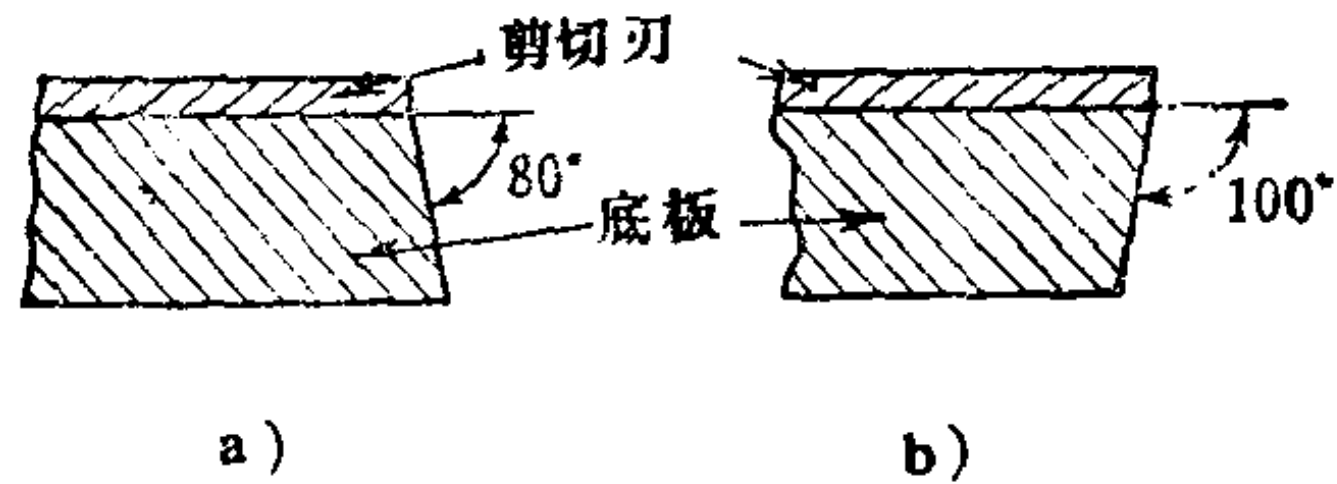
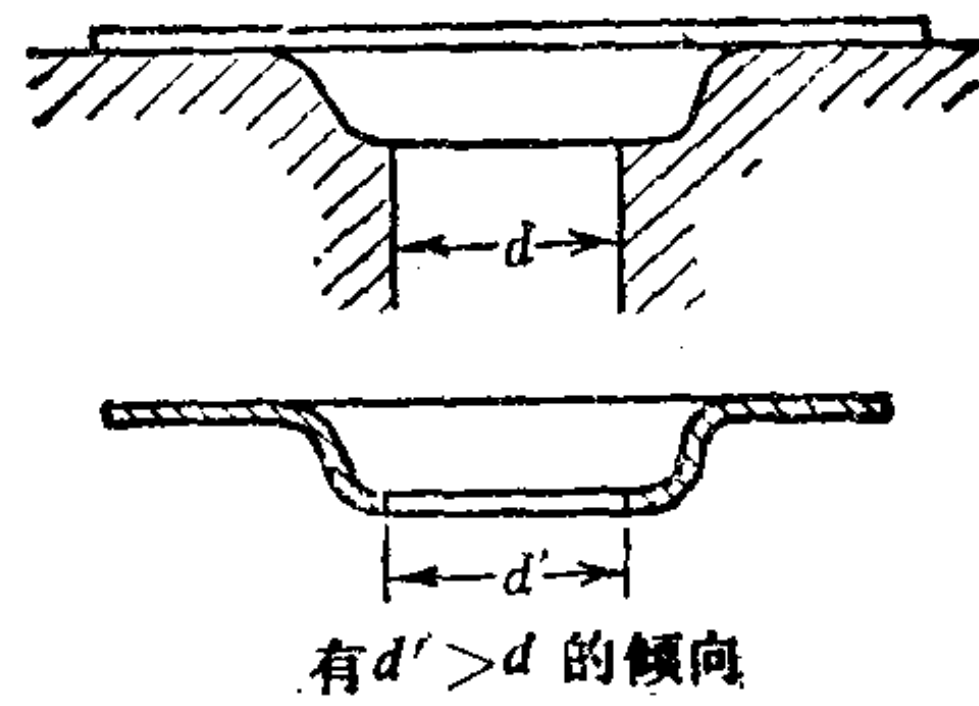


图4.276 剪切模具的结构
a) 易取出冲裁废料 b) 难取出冲裁废料

在图 4.278 所示的直线形凸缘弯曲中,凸缘圆角半径 r_f 取决于橡皮压力、板的厚度和凸缘宽度。成形具有 V 形弯

曲或V形突起的制件时,如图4.279 a)所示,利用内压对其顶部进行成形,同样也能看到达不到规定的圆角半径,因而这时应按照图4.279 b)所示利用外压进行成形。

弯曲边缘的曲率半径 R 大而凸缘窄的外缘翻边(凸形)和内缘翻边(凹形)的成形极限,对于软质金属,同直线形凸缘成形基本上相同,但是外缘翻边是 R 越小宽度越大,而且板厚越薄就越容易产生皱折(参照图4.280)[157]。产生的皱折要便于在成形后进行修整。或者为了消除皱折可采用图4.277所示的辅助工具或如图4.281所示在凸缘部分制出切口或设置沟槽。图4.281所示的沟槽间隔对软合金为 $S = R/10$,对于低碳钢为 $S = R/30$ 。即使是内缘翻边,也是凸缘宽度大和板的厚度薄时,由于在成形后的凸缘部分所产生的残余应力的作用,会产生平缓的波状

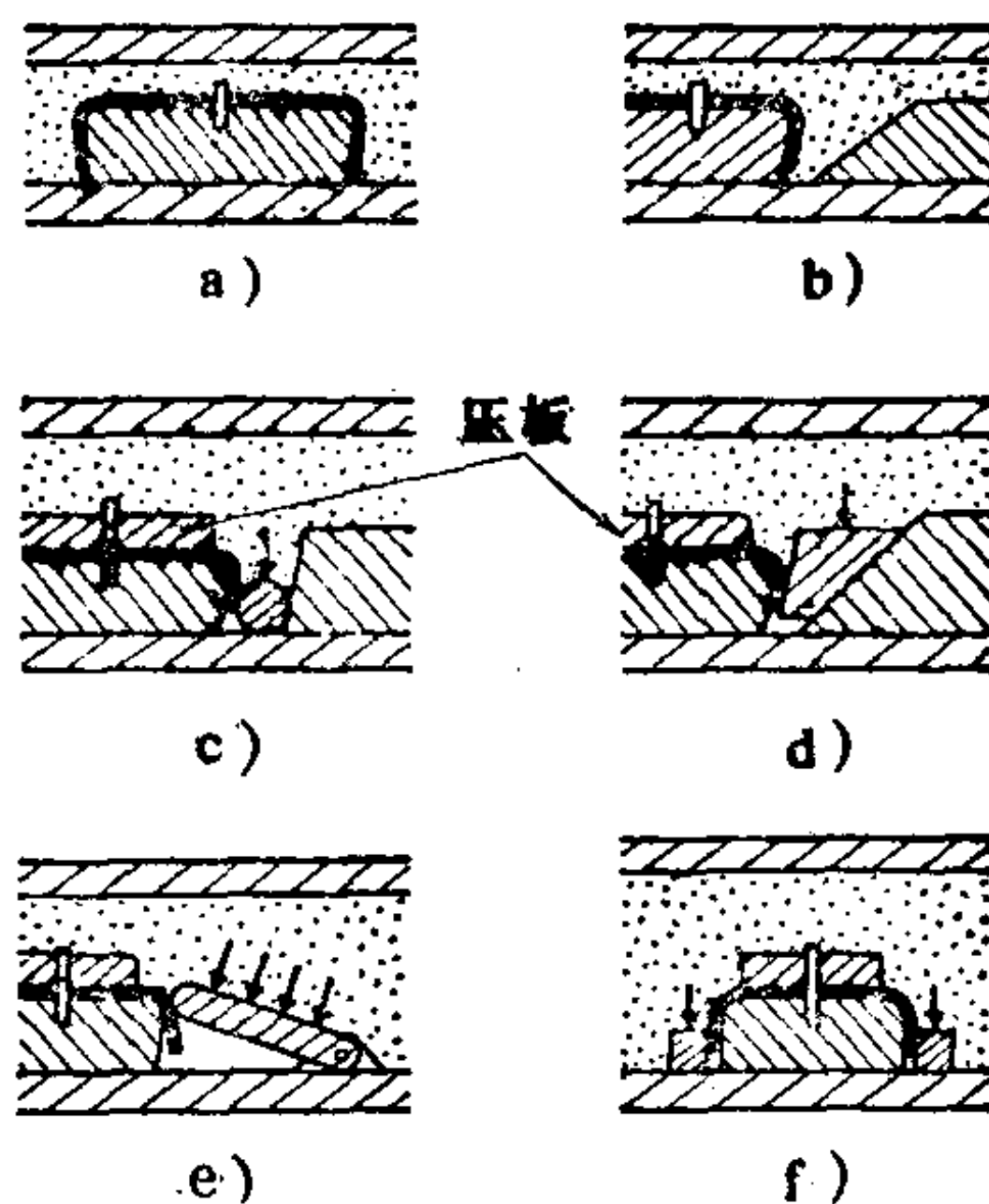


图4.277 为使宽度窄的凸缘进行弯曲所采用的辅助工具
 a) 一般用的模具 b) 升压用沟槽
 c) 拉伸棒 d) 楔 e) 摩擦用合板 f) 拉伸环

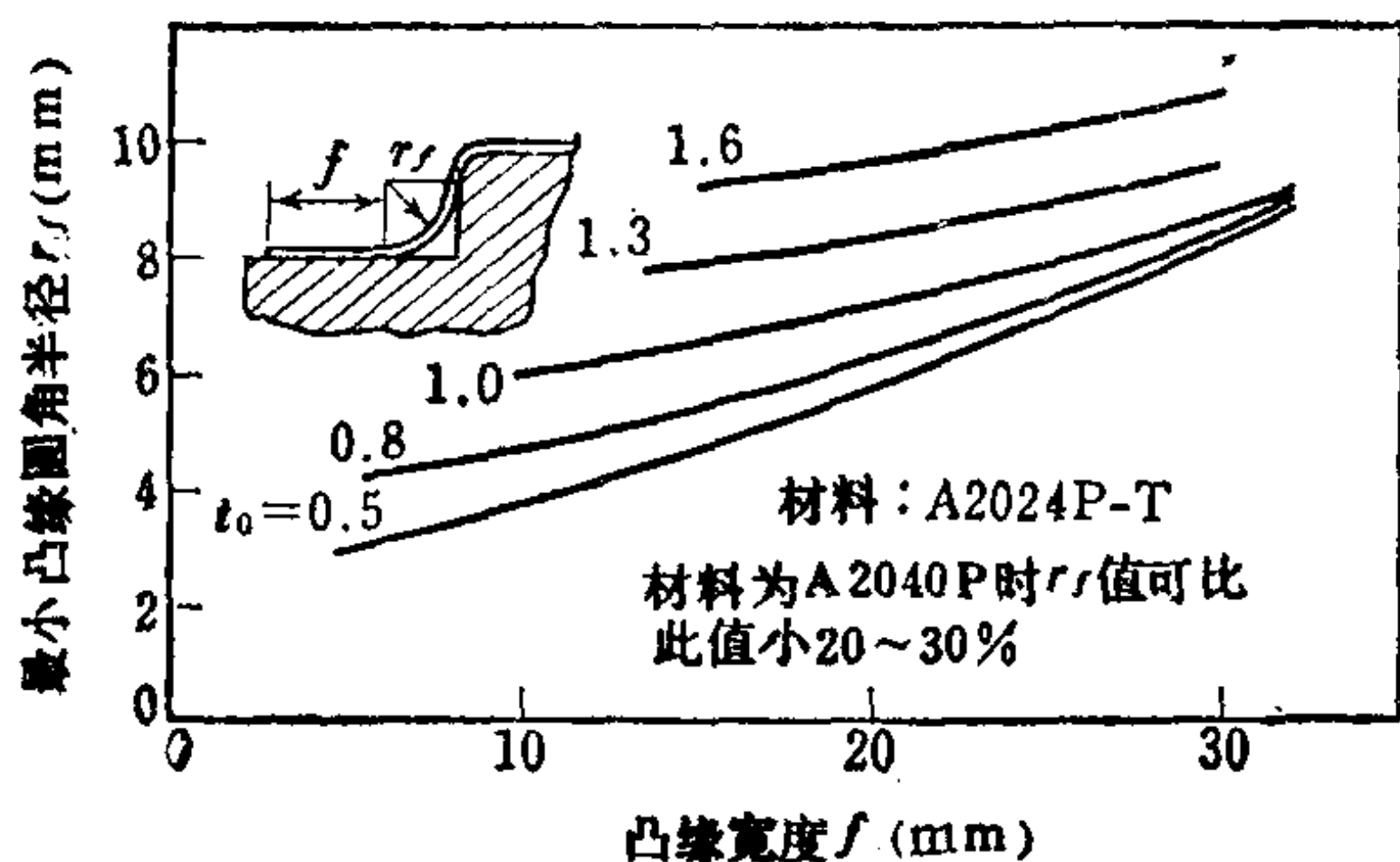


图4.278 凸缘宽度和最小凸缘圆角半径的关系

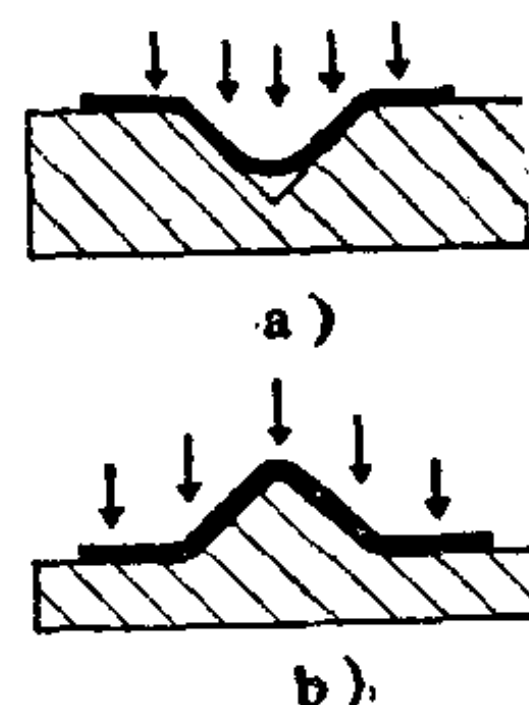


图4.279 内压和外压成形
 a) 内压成形
 b) 外压成形

皱折,对此要进行修整。另外,当 h/R 增大时,在凸缘端部会产生拉伸断裂(图4.282)。如图4.283 a)所示的曲折部分的成形,成形的可能尺寸是 $b \geq (4 \sim 6)a$,板的厚度越大材料的抗拉强度越高, b 就越要大。最大曲折深度,对于板坯厚度为0.8 mm左右的软质铝合金板为9 mm;对于硬质的或者是经过热处理的则为6 mm左右,但是当板坯的厚度在1.8 mm以上时,就要将曲折部分制成如图4.283 b)或c)所示的形状。

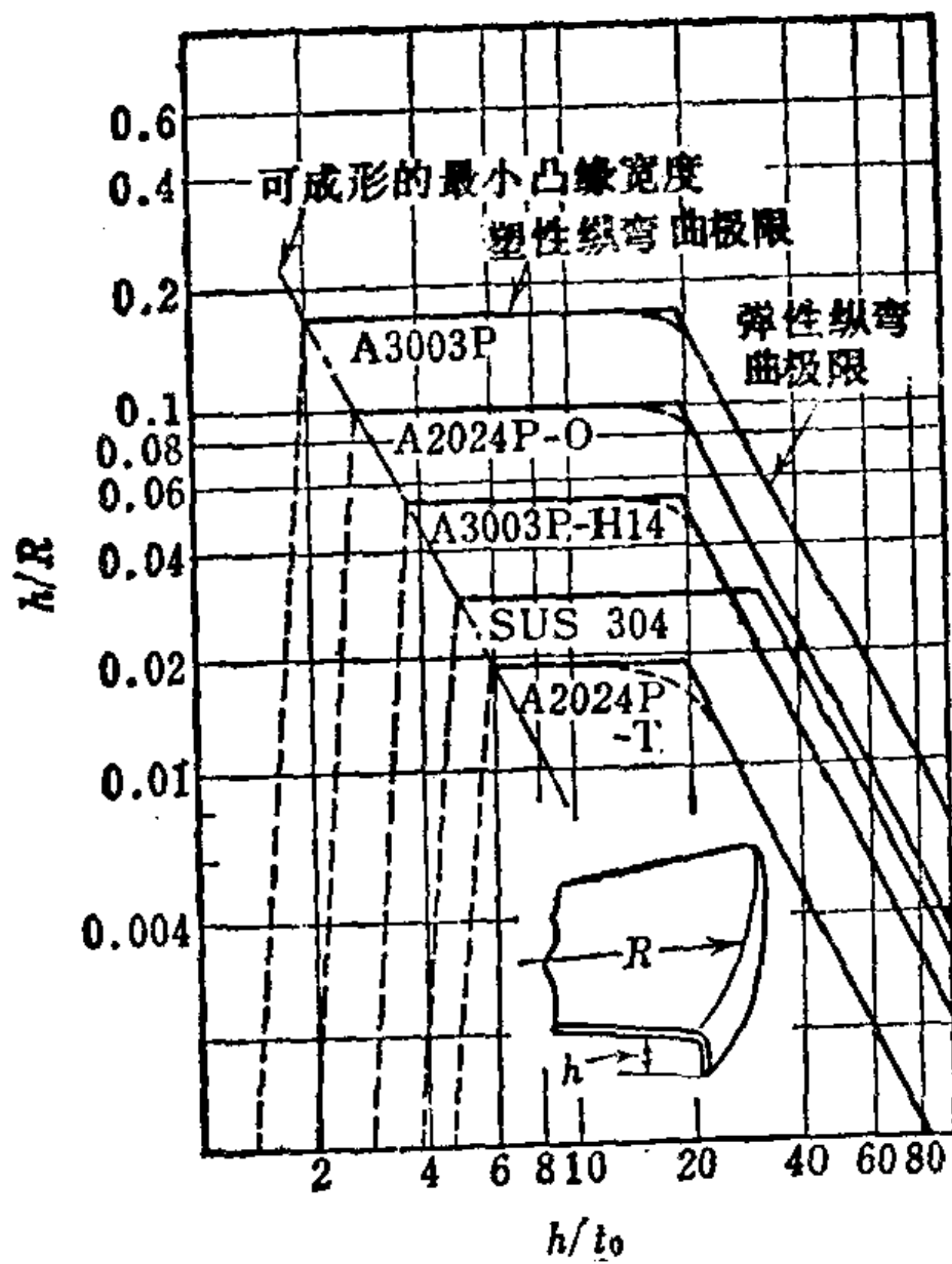


图4.280 外缘翻边的皱折极限

在用聚氨基甲酸酯橡胶作为凹模进行弯曲时,如图4.284所示的成形加工,即使不把橡胶封闭起来也能得到有效的压力,因而装置简单,与采用金属模进行弯曲相比,回弹量较小[158]。这种场合,如图4.285所示,在橡胶模上设置适当形状的退让槽,能延长橡胶的寿命,而且也是减小回弹量所需要的。凸模对聚氨基甲酸酯橡胶的压入量,在V形弯曲加工时取 $5t$ 。加以凸模肩部圆角半径的2倍;U形弯曲加工时取 $4t$ 。加以凸模肩部圆

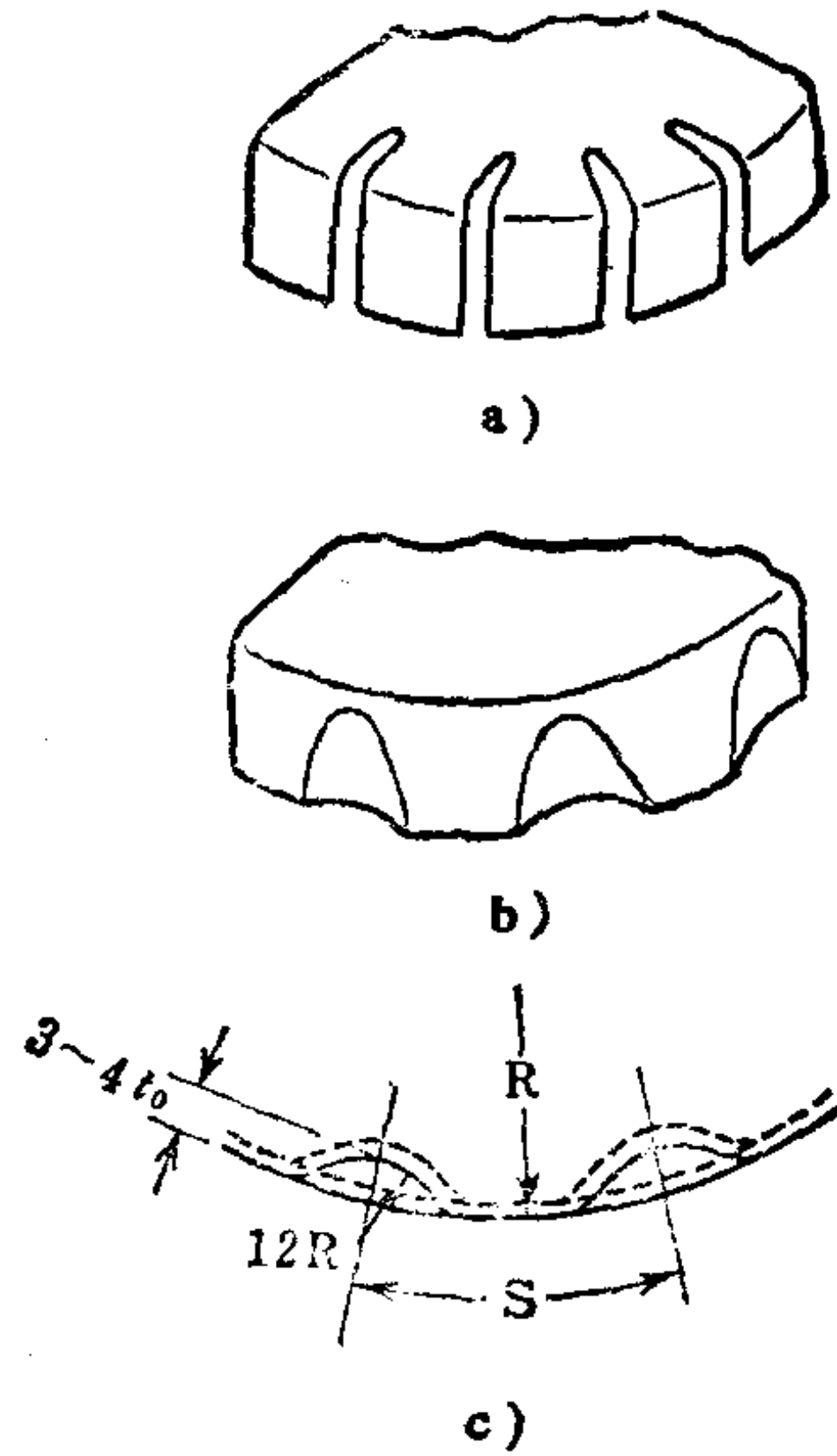


图4.281 外缘翻边的皱折防止法

- a) 在板坯的凸缘部分制出切口
- b) 在凸缘部分设置沟槽便于材料流出
- c) 在凸缘部分设置沟槽的尺寸

角半径的 2 倍，当凸模底部完全是圆弧时，可取 $4t$ 。再加凸模圆角半径值。格林法所使用的模具，在中小批量生产中用合成树脂、铝合金或锌合金等制成，在大批量生产中用铸铁或钢制成。

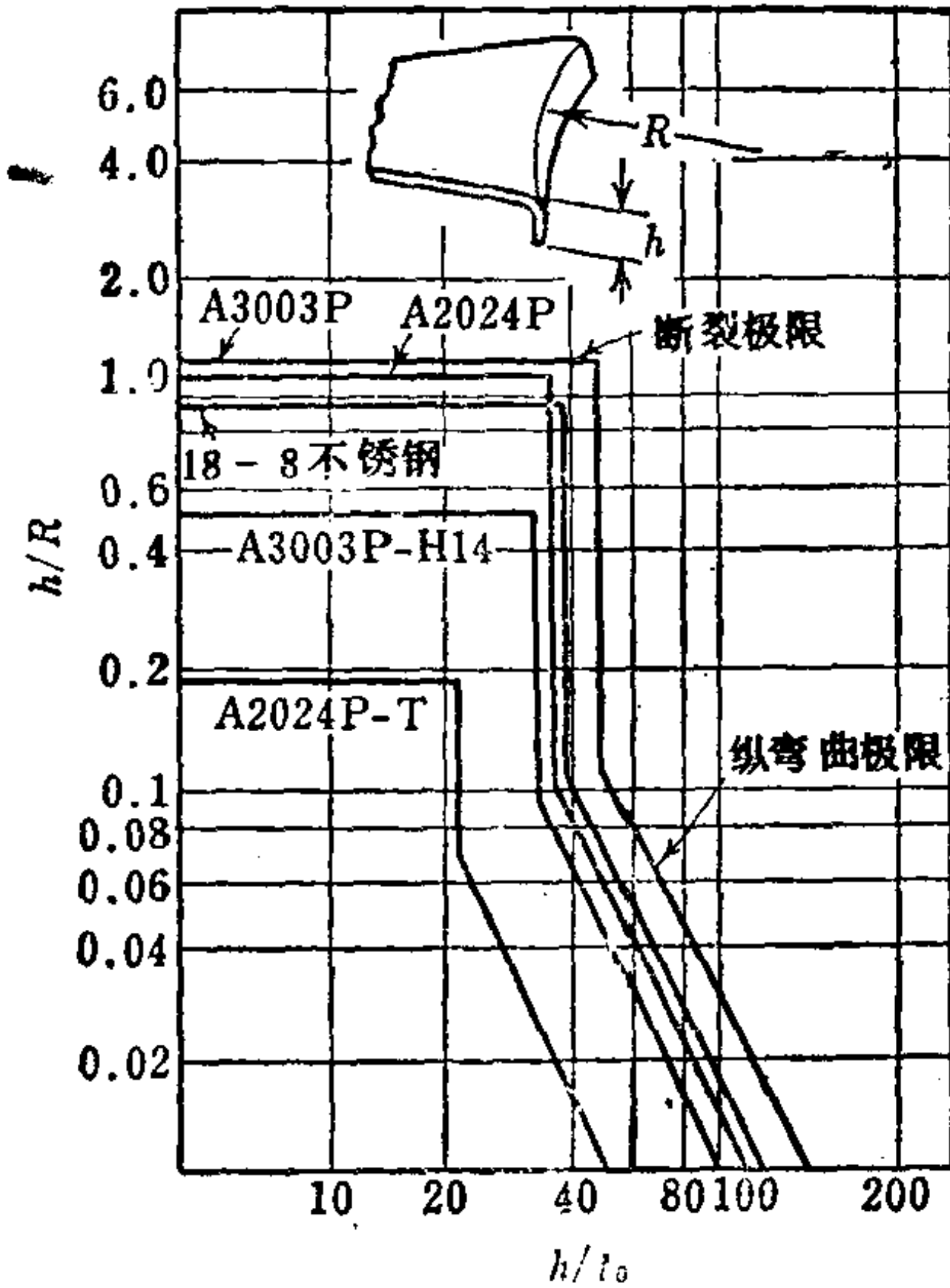


图4.282 内缘翻边的皱折极限

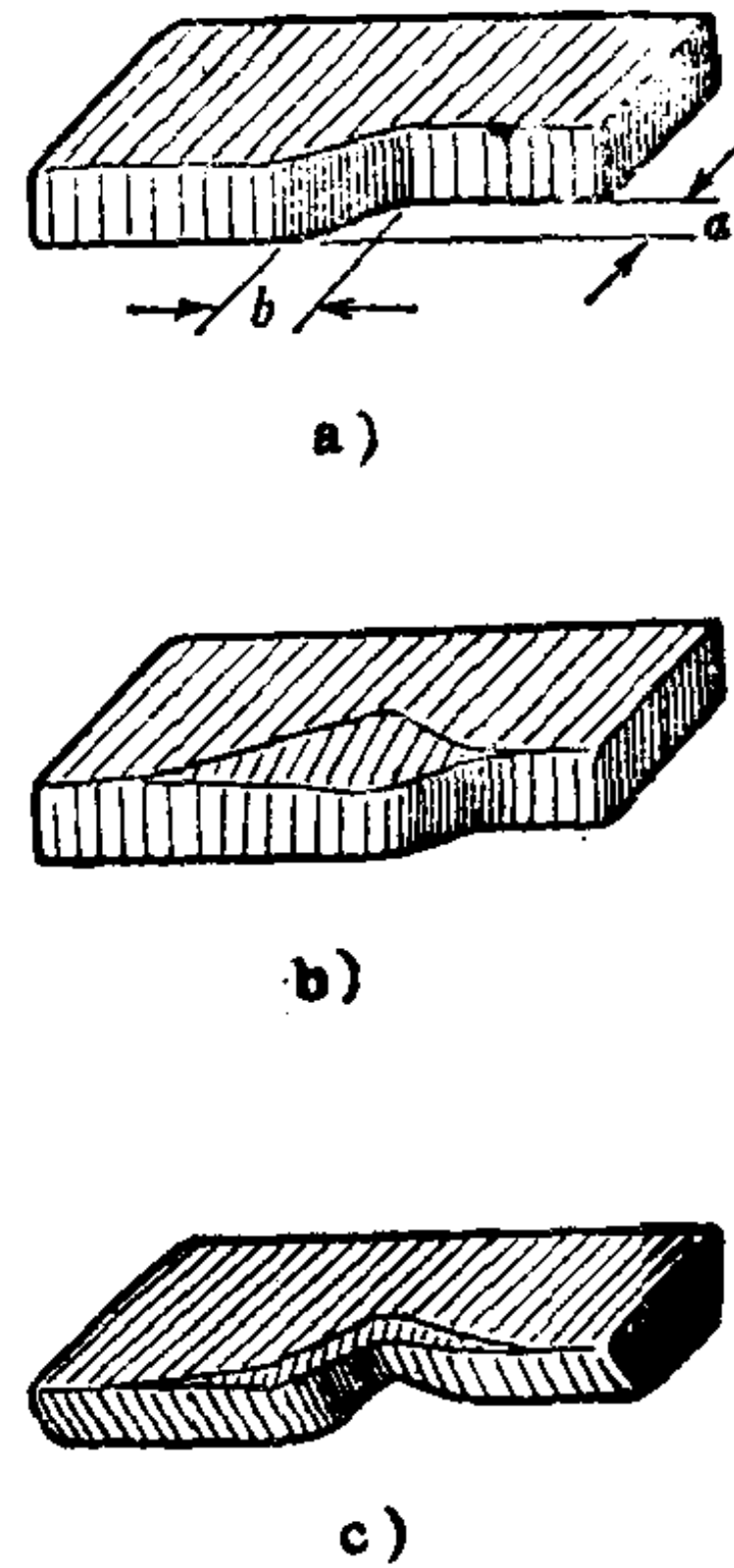


图4.283 曲折部分的成形

a) 普通曲折部分 b) 将曲折部分的肩部切成斜面
c) 将曲折部分切进去并将肩部切成斜面

(iii) 其他方式的成形 成形加强筋有如图 4.279 所示的利用外压成形和利用内压成形两种方式。外压式因加工部分的压力高可进行严格的成形，但从加强筋附近流入的材料多也是一个缺点(表 4.37)。格林法虽然也能进行胀形和拉伸成形，但并非上策。

b. 无凸模拉伸法〔159、160〕 这是在放入护套中的环状橡皮垫上放置板坯，通过压缩环和凹模加压，在橡皮环被压缩伸向内侧时，利用它和板坯之间的摩擦力以及加在板坯外周的压力进行拉伸的方法(图 4.286)。成形所需要的橡皮的平均压力，对于板厚为 0.8 mm 的软钢板大约是 $600 \sim 700 \text{kgf/cm}^2$ ；对于板厚为 1.0 mm 的软质铝板是 $300 \sim 400 \text{kgf/cm}^2$ 。橡皮的压力也起压边作

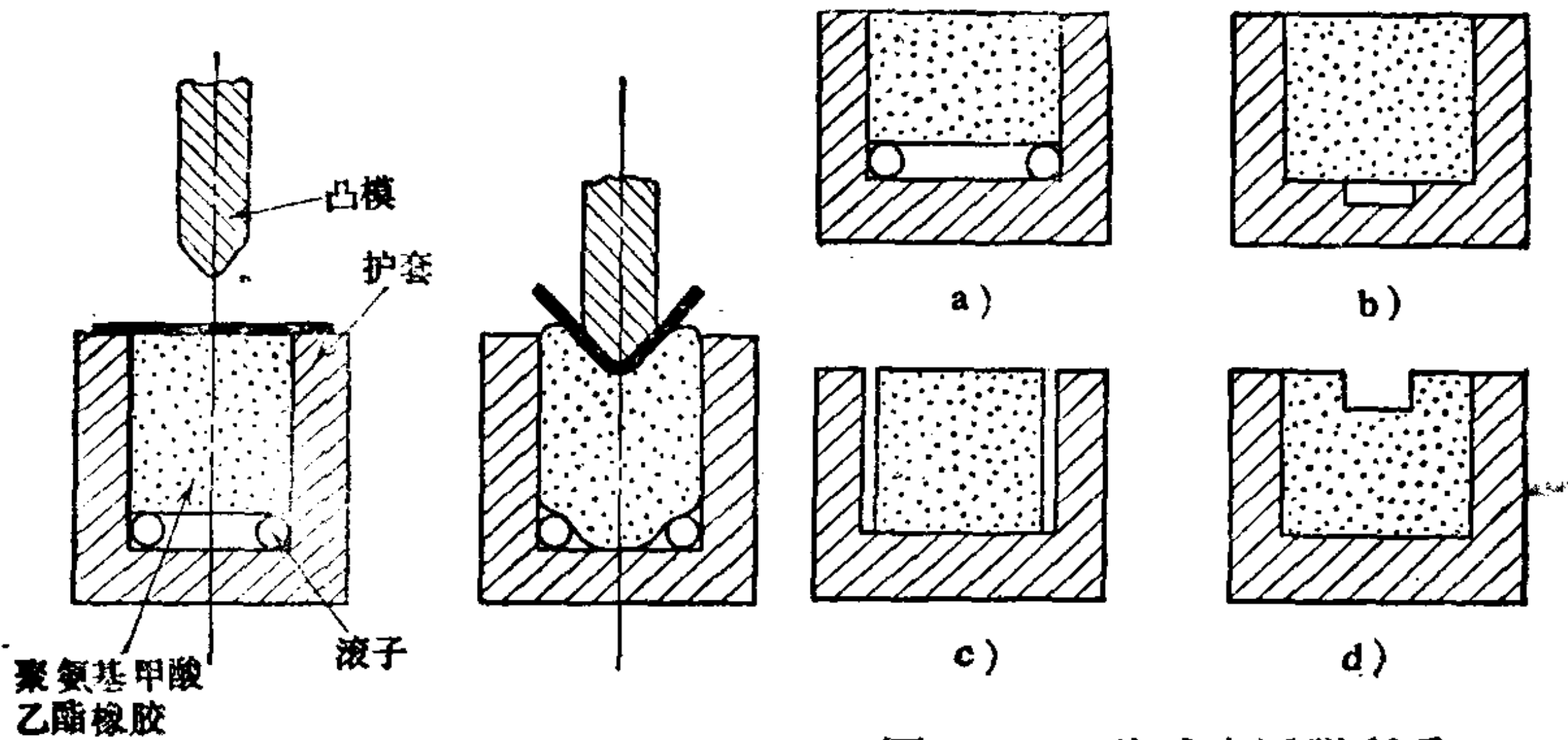


图4.284 利用聚氨酯甲酸乙酯橡胶进行弯曲用的模具

图4.285 为减少回弹所采用的橡胶凹模的形状

a) 在底部放入滚子 b) 在底部开退让槽
c) 在侧壁开退让槽 d) 在上部开退让槽

用，因而在行程初期也必须有一定程度的压力。由于橡皮环的厚度只能被压缩 5~10 mm 左右，故每一次加压所能得到的拉伸深度较小。以上述压力加工软钢板时，经过 7 次加压可进行拉伸比为 1.8 的圆筒拉伸，加工软质铝板时，经过四次加压能进行拉伸比为 3 的圆筒拉伸。

表4.37 加强筋的外压成形和内压成形的比较（材料为高强度铝的退火和淬火材料，橡胶的平均压力为 80kgf/cm²）

	外 压 方 式	内 压 方 式
深 度	3~15mm	3~10mm
宽 度	深度的 4 倍以上	深度的 5~6 倍以上
长 度	宽度的 2 倍以上	宽度的 3 倍以上
平行加强筋的中心距离	深度的 8 倍以上	可比外压方式窄
板的自由端与平行加强筋的间隔	距自由端 15~50mm 以上	10~15mm 以上
带凸缘的边与平行加强筋的间隔	20~130mm	可比外压方式近
从端部带有纵向加强筋时	端部为深度的 2~3 倍	可更加接近端部
加强筋的边缘半径	3 mm 以上	3~4 mm 以上

c. 橡皮模压制成形法 (Marform法) [161] 这是在格林法

的装置上,附加压边圈和控制其压力的装置的一种双动式装置,主要进行包括拉延、胀形以及包含凸模底部反向胀形的成形等的加工方法。这种方法采用的护套,其深度比格林法的护套深,橡皮分为几层填装,根据最下层橡皮的磨损或破坏情况加以调换。在该护套的下方设有大致等于护套内径的压边圈,凸模固定在压力机台面上(图 4.287)。

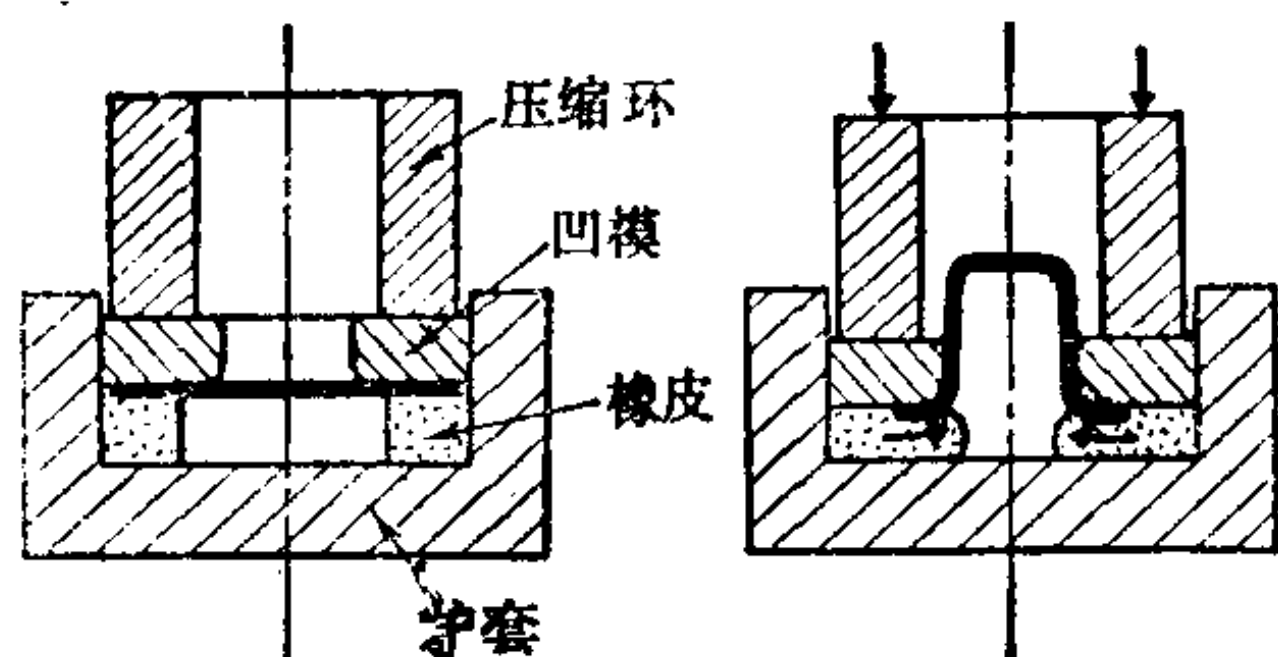


图4.286 无凸模拉延法

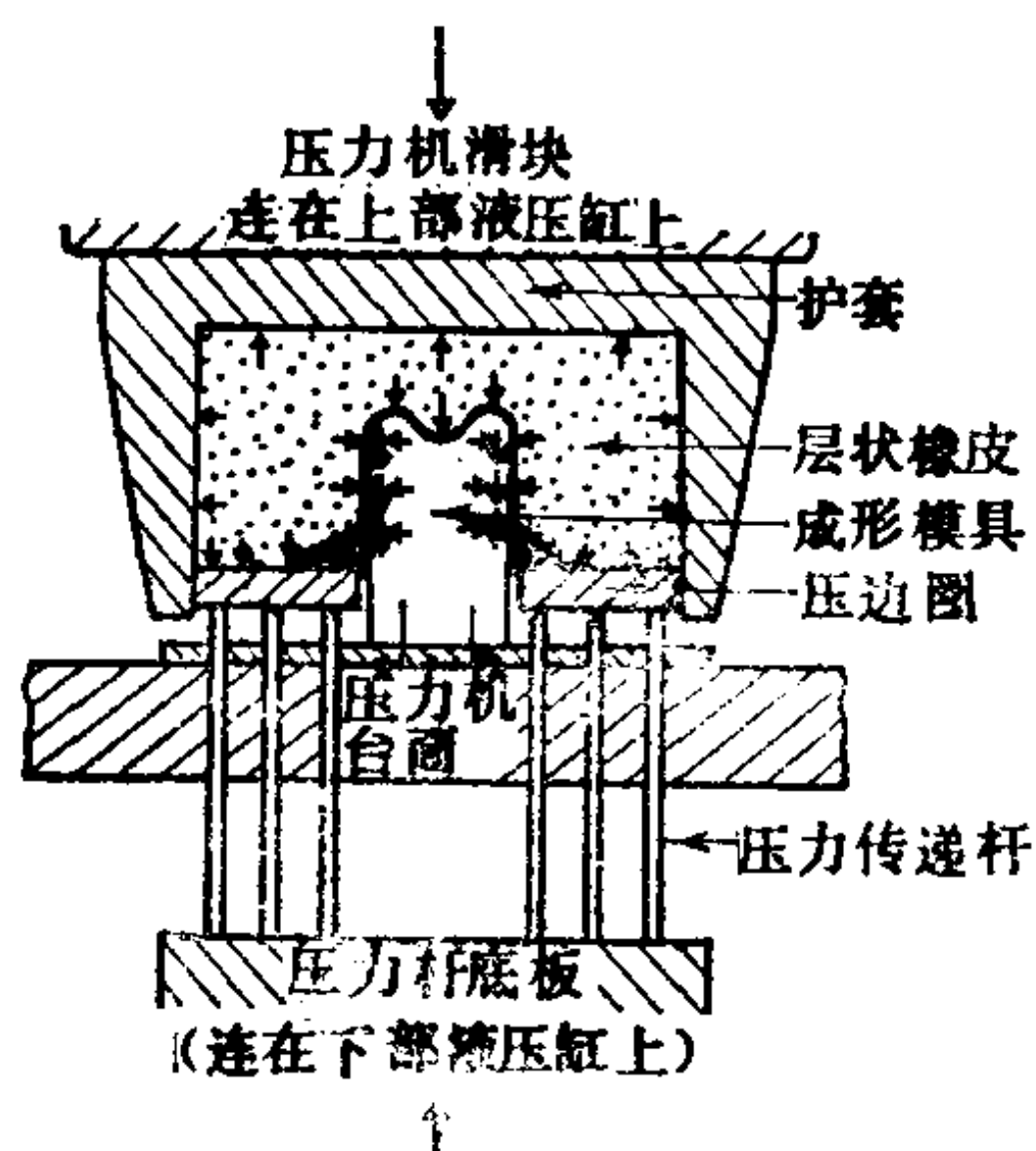


图4.287 橡皮模压制成形装置简图

(i) 成形工艺和成形法的特征 成形作业时,首先使压边圈处于与凸模上表面同一平面上,再把板坯放上去(图 4.288 a)。然后使护套下降,由橡皮和压边圈面压紧板坯。此时的压边力,可由与压边圈相连接的液压装置来调节。进而使护套下降,凸模就把板坯压进橡皮,于是橡皮就成为凹模而开始成形。这时橡皮的压力随着成形的进行而增加(图 4.288 b)。在这种成形方法中,利用和压边圈相连接的液压装置调节橡皮压力特别重要,图

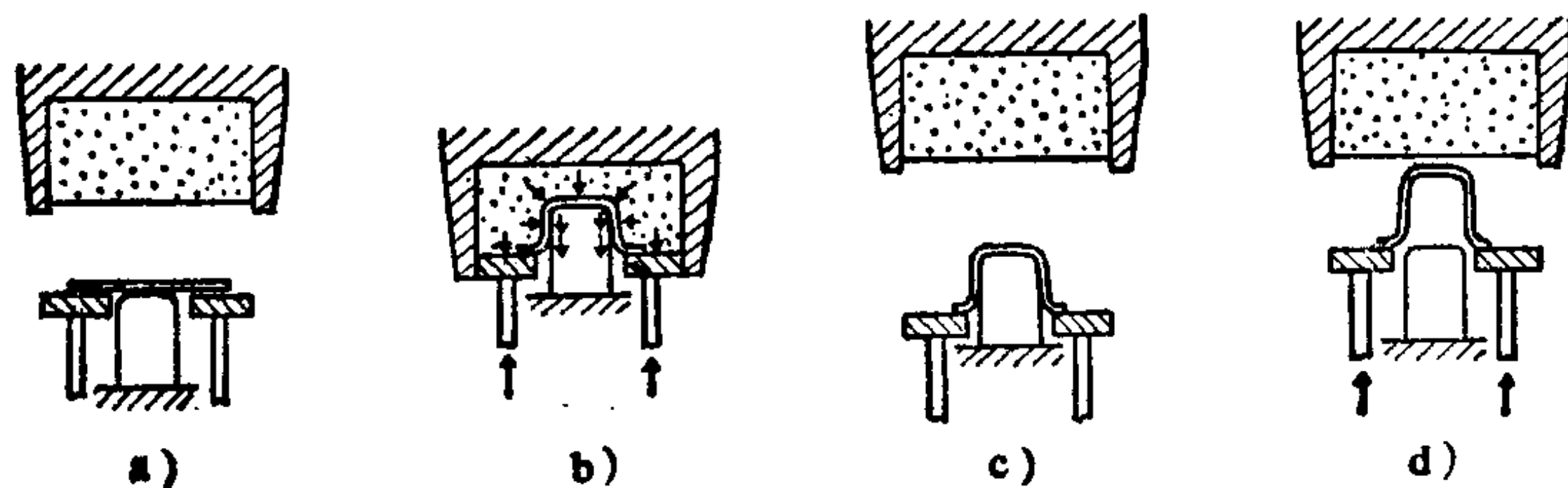


图4.288 橡皮模压制成形法的成形工艺

4.289 所示为橡皮压力与拉延深度的关系的一例，但每种成形作业往往都要经过试验来确定橡皮压力。成形完毕后护套回到原来的位置(图 4.288 c)，接着把压边圈顶到开始的位置，同时取出制件(图 4.288 d)，成形工序就此结束。在这种成形方法中，相当于凹模肩部圆角半径的成形圆角半径，在凸缘部分较大，压力低的成形初期阶段比较大，而随着成形的进行凸缘变小压力增大时则减小，即在板坯的断裂危险性大的时期，成形圆角半径大，从而增加了对于断裂的安全性。另外，由于加在板坯上的压力大致是均匀的，以及因成形的侧壁和凸模侧面之间的摩擦作用，可以缓和凸模肩部圆角半径部分的应力集中。因此，与使用金属凹模的场合相比，有可能利用一道工序进行更深的拉延加工，而且制件精度也较高。还有，因为材料是与橡皮接触成形的，所以制件的表面光洁，除了适于加工已涂复的板料外，成形后的表面处理也很方便。

(ii) 成形的例子 利用 400kgf/cm^2 的橡皮压力对各种材料进行加工时，其容易加工的深度、板的最小厚度和容器直径的关系以及这时所得的最小成形圆角半径示于表 4.38。凸模肩部的圆角半径以超过表 4.39 所示的数值为宜。作为模具材料，压边圈选用铸铁或钢等，而凸模则应考虑板坯的种类、生产数量和制件形状等选择硬木、合成树脂、锌合金、铸铁和钢材等。

d. 惠龙橡皮模液压成形法(Wheelon法)^[162] 惠龙法与格林法的原理相同，但这种方法是通过橡皮液压囊把压力直接加给橡胶板使板坯变形(图4.290)的。液压囊中给定的压力范围为 $400\sim 700\text{kgf/cm}^2$ 。成形模放置在工作台上并使其能在水平方向拉出，所以机械装置的结构简单。此外，虽然还有霍姆俄茹法^[163]

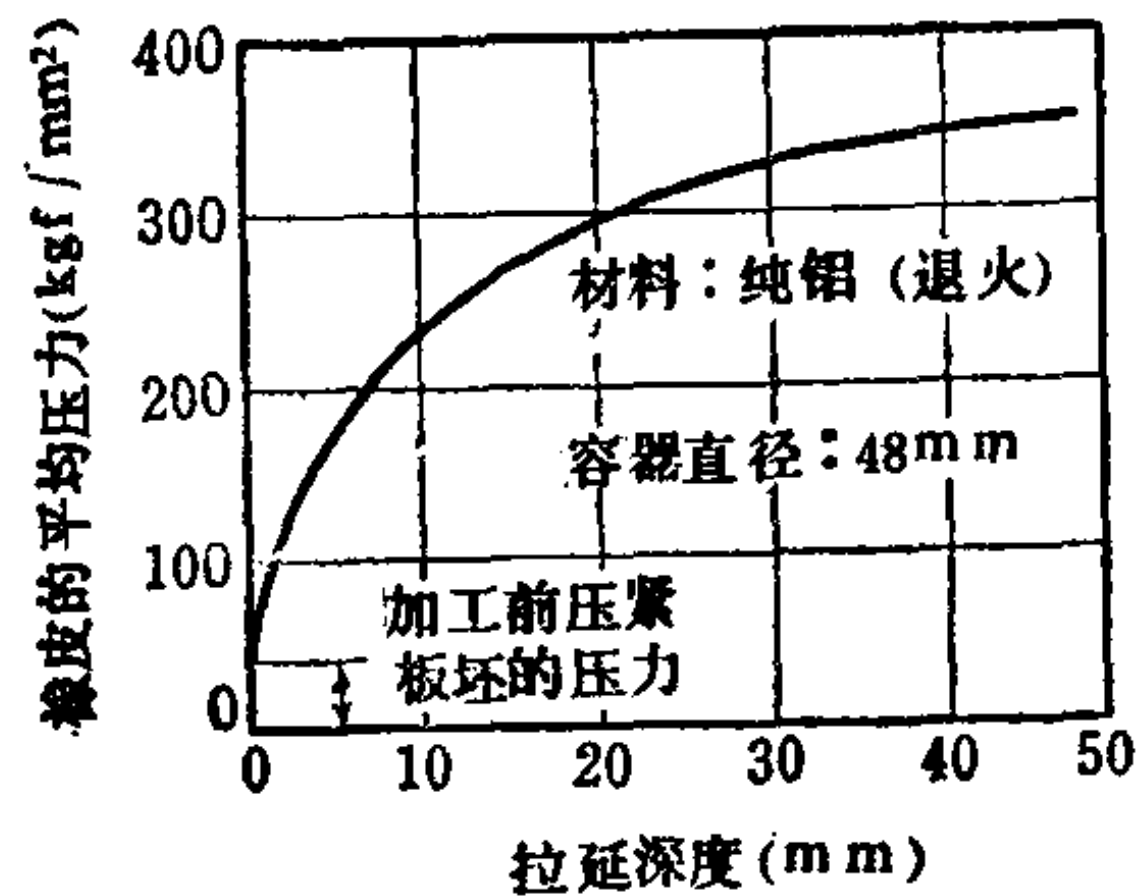


图4.289 拉延圆筒形容器时必要的橡皮压力和拉延深度的关系

表4.38 关于各种材料的成形深度最小板厚和最小成形圆角半径

材 料	相对容器直径的深度 (%)	相对容器直径的最小板厚 (%)	最小成形圆角半径 (t_0 为板厚)
纯 铝	100	1.0	$1.5 \sim 2.0 t_0$
高强度铝合金	50	0.5	$3 t_0$
	75	1.0	
拉延用钢板	38	0.5	$4 t_0$
	75	0.5①	
不 锈 钢	38	0.25	$8 t_0$
	33	0.5①	

① 成形压力为 400kgf/cm^2 时，拉延用钢板或不锈钢板的厚度若超过表中值，则会因压力不足而不能加工，但是如果提高压力则能进行和纯铝同等程度或超过纯铝的加工。

表4.39 凸模肩部半径的最小值

拉延深度/容器直径	拉延用钢板	不锈钢板	纯 铝	高强度铝合金
1/4	$0.5 t_0$	$2.0 t_0$	$1 t_0$	$2 t_0$
1/2	$1.0 t_0$	—	$2 t_0$	$3 t_0$
3/4	$2.0 t_0$	—	$3 t_0$	$4 t_0$
1	—	—	$4 t_0$	—

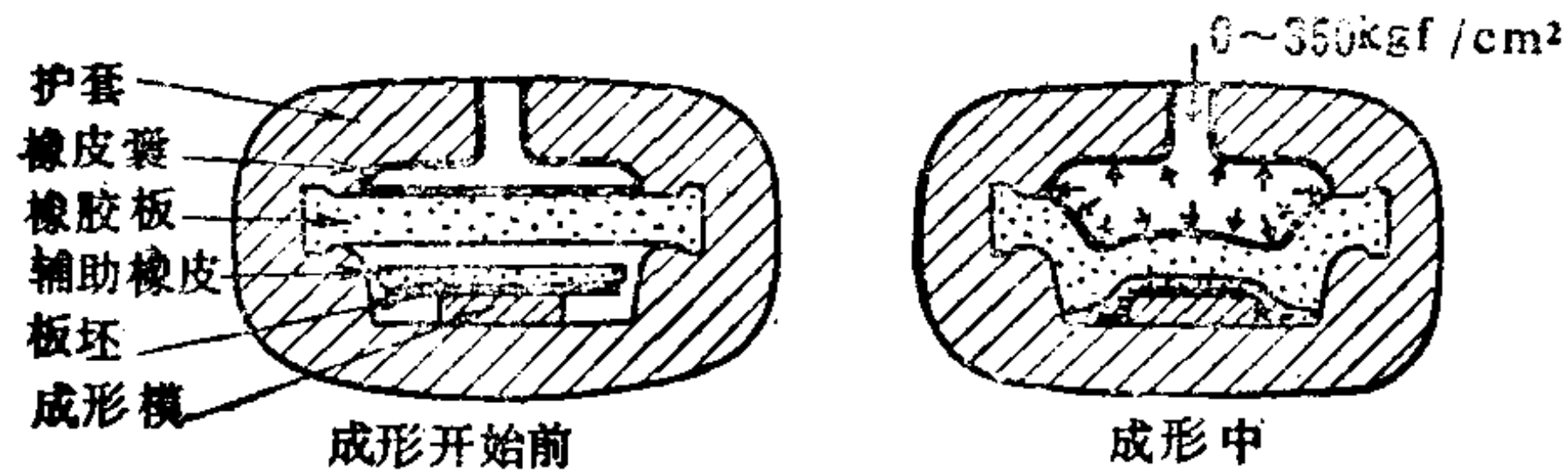


图4.290 惠龙法的成形部分简图

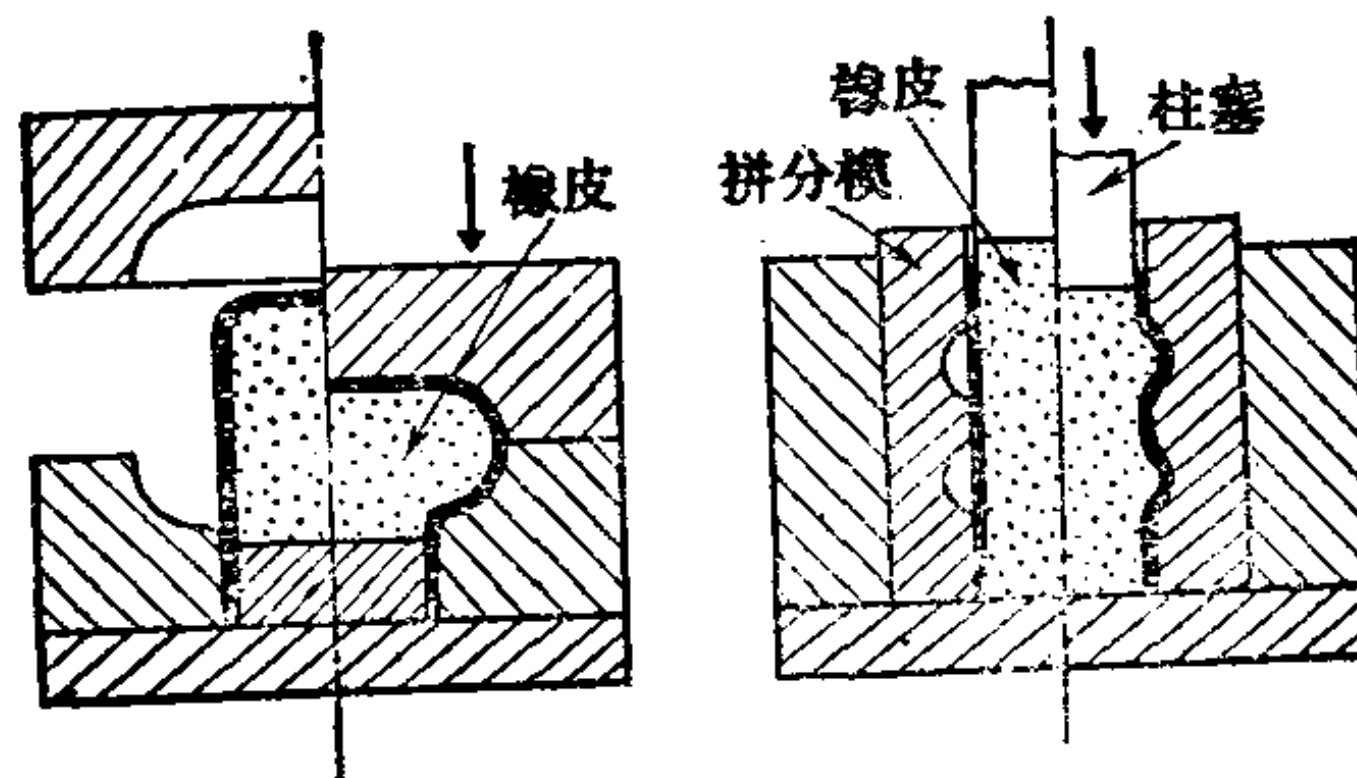


图4.291 用橡皮作为软体凸模的应用

和流体成形法〔164〕等,但这些方法都与格林法或橡皮模压制成形法相类似。

e. 利用橡皮的其他成形法 如果利用橡皮作为软体凸模进行圆筒容器和薄壁管的胀形加工,就能使模具结构大大简化(图4.291)。在这种场合,聚氨基甲酸乙酯橡胶比天然橡胶优越,因为它能比较容易地获得足够的压力,弹性恢复也较好。

4.10.2 液压成形

这种成形方法是只使用由金属等刚性物质制造的凸模或者凹模,利用液体的压力将板料或管料等坯料压入模具中进行成形的。当把液体作为凹模使用时,可用橡皮膜等进行密封。把液体作为凸模使用时,被加工件起到密封液体的作用。液压成形法与橡皮成形法相比,其优点是容易得到较高的压力,而且压力作用均匀,其控制也比较容易,因而可以成形形状更复杂的制件。

a. 液压室法〔165~166〕 这种方法是在相当于液压机滑块部分设置液压室,以此作为万能凹模对薄板进行成形加工的。液压室内的液体用橡皮膜密封,橡皮膜采用双层结构,当下层橡皮膜磨损或破坏时可以更换。压边圈固定在台面上,凸模由设在台面下边的液压缸进行上下驱动(图4.292)。

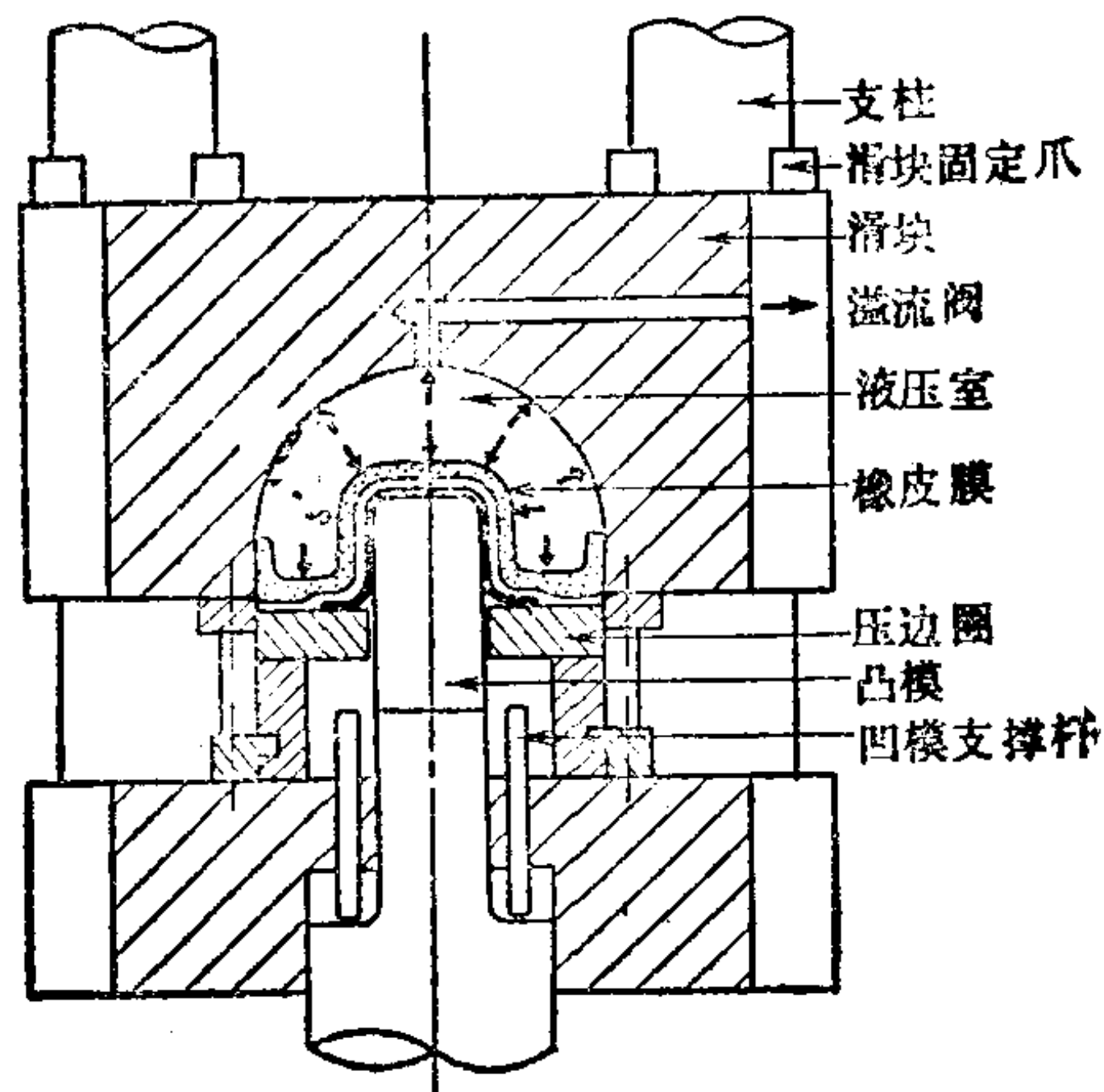


图4.292 液压室法的成形部分

在成形时要使凸模上面与压边圈面处在一个平面上,并将板坯放在凸模上。当压力机滑块下降使液压室下边的橡皮膜与板坯相接触后,在成形中为不致因作用于液压室的背压将滑块顶回,而将滑块固定在支柱上。然后把液压室的压力提高到足以防止板坯

发生皱折的程度。该压力可由液压泵给出,最大约为 560kgf/cm^2 。凸模上升则液压室中的液体受到压缩,压力上升,使板坯压紧在凸模上同时进行成形。液压室中的压力由溢流阀进行调整,最大可达到 1000kgf/cm^2 。成形结束后,就要卸除液压室中的压力,把固定的滑块松开使之上升返回原位。随后使凸模退至开始的位置,取出制件。成形的过程基本上与橡皮模压成形法相同,但在成形中的压力分布更为均匀,成形结束后压力保持不变,凸模仅下降必要的量,从而可减小制件的成形圆角半径,这是液压室法的优点。成形时液压室中必需的压力,因板坯的材质、大小和板厚等的不同而异,圆筒拉延时所需的成形压力与拉延深度的关系见图4.293。在成形行程的初期,如果压力过高就会在与凸模圆角半径接触的部分发生板坯断裂,如果压力过低,对于薄板成形就会使其成形圆角半径增大,并在这部分产生筒体皱折。如果使用的压力在这两极限压力之间,无论采取什么样的加压过程都可能成形,但是这种压力范围越接近,拉延极限就越窄。利用 1000kgf/cm^2 的最大压力,可成形的板坯厚度范围相当广,从厚度 0.5mm 的铝板到厚度 10mm 的低碳钢板均能成形。另外,现已制造出能够加

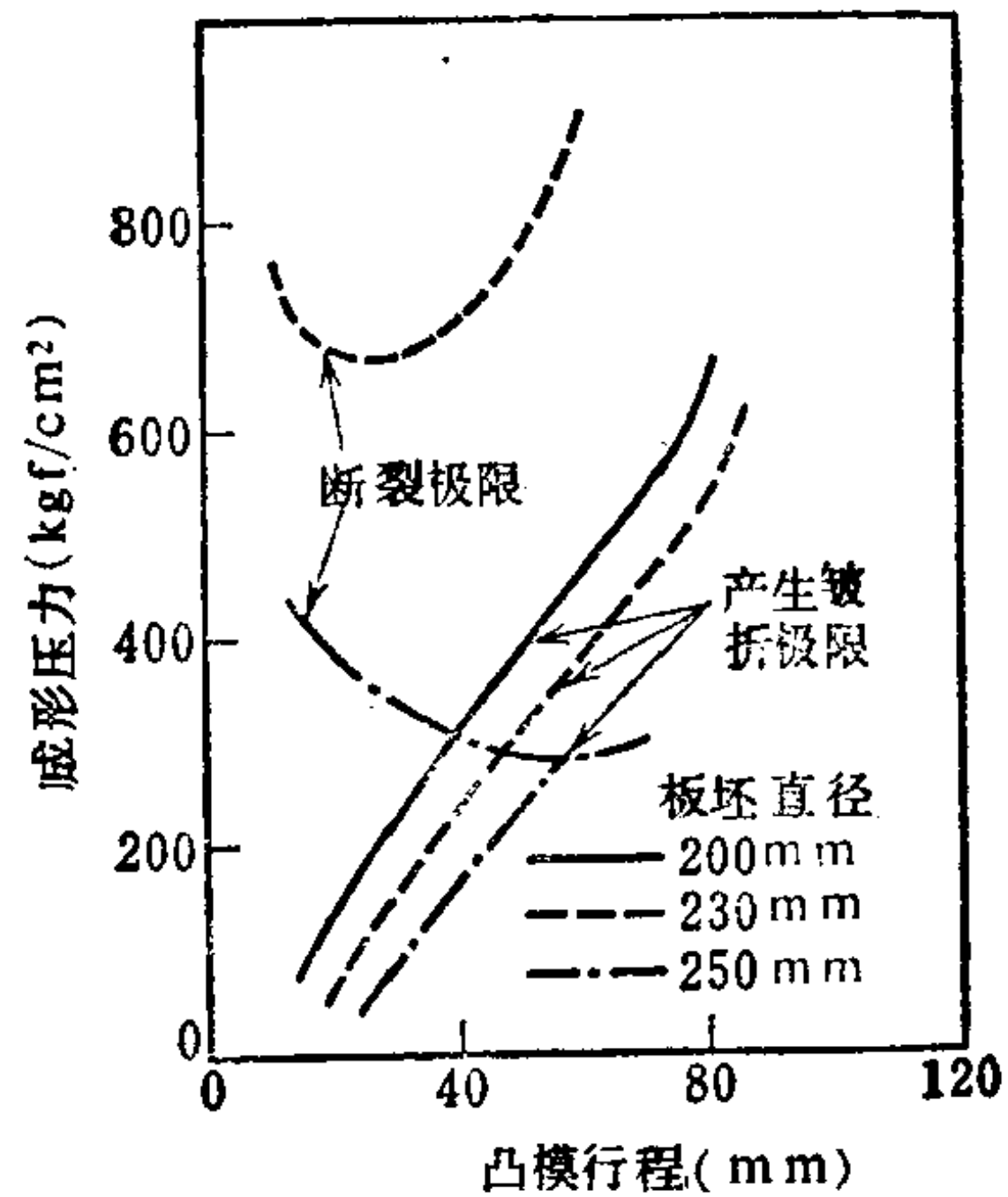


图4.293 液压室法的成形压力与拉延深度的关系

(材料: 低碳钢 $t_0 = 1.0\text{mm}$, 凸模直径 98mm)

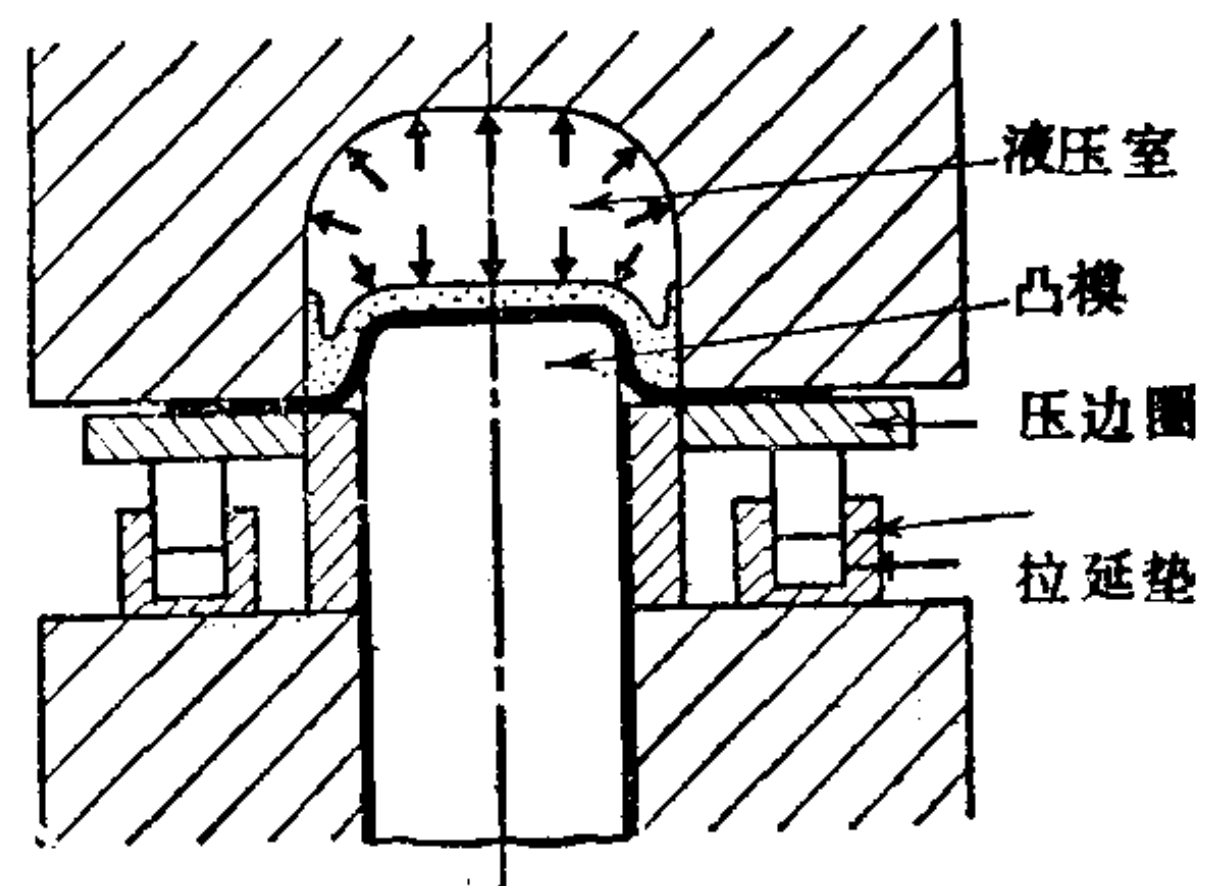


图4.294 双动式液压成形法

工最大板坯直径达 800 mm 的成形设备。在利用液压室法成形时所加的压力，与通常利用刚体工具成形时的压边力相比是非常大的。因此，如果板厚比坯料尺寸小得多时，则由于凸缘部分摩擦阻力增加所产生的影响，要胜过作用在板坯外周的径向压应力和断裂抗力的增加等带给成形的有利影响。拉延力会增加，成形极限将会恶化。在这种场合，如果采用如图 4.294 所示的双动液压成形法〔169〕，即用与刚体工具法中相同的压边装置来压紧板坯的凸缘的方法，就能在不降低成形极限的情况下对大尺寸的板坯进行成形，成形设备的容量也可以减小。

b. 全液压法〔170〕 这种方法是以液体作为凸模与同制件外形相一致的凹模进行成形的方法(图4.295)。在板坯的凹模一侧也要充满液体，在成形中可调节溢流阀使凹模一侧的压力 p_2 低于凸模一侧的压力 p_1 。利用这个压力差 $\Delta p = p_1 - p_2$ 进行成形。必要的压力差 Δp 因制件形状、材质和板厚等的不同而有差别，但一般如图 4.296 所示，可以用制件断面积除以拉延力所得的值作为大致的基准。这种方法由于是利用相对压力 Δp 的作用，因而对于极薄板的成形也不会产生筒体皱折，同时板坯的局部变形减小，也增大了材料的断裂应变量，这些都是它的优点。

c. 液压胀形 利用液体作为软体凸模进行薄板胀形，一般被用作所谓液压胀形试验来试验成形性能，但在成形行程的适当阶段使金属凹模动作也可进行成形加工〔171〕(图4.297)。这时的成形压力 p ，可由 $p \approx 2\sigma_b t_0 / \rho$ 求得，式中 σ_b 为板坯的抗拉强度， ρ 为成形件主要面的曲率半径， t_0 为板厚。管的胀形是把管坯放入剖分

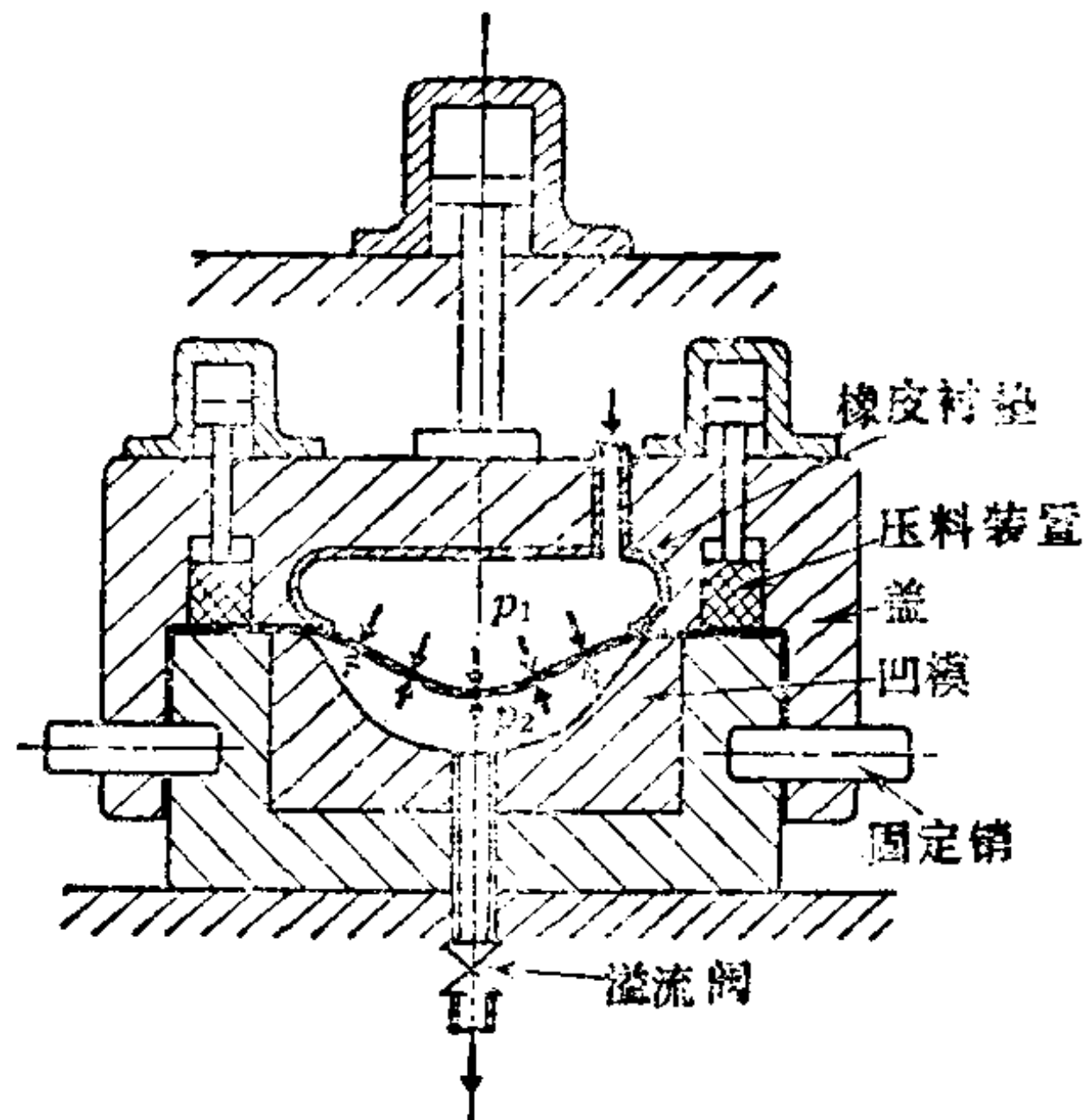


图4.295 全液压法的成形部分

的组合模中，由适当的液压装置把压力液体导入管内进行成形(图4.298)[172]。胀形高度大时，还需要利用活塞附加以轴向压缩。在如图4.298所示的情况，成形所需的压力，对于成形钢管约为700kgf/cm²，成形A6063T-E铝合金时约为160kgf/cm²。

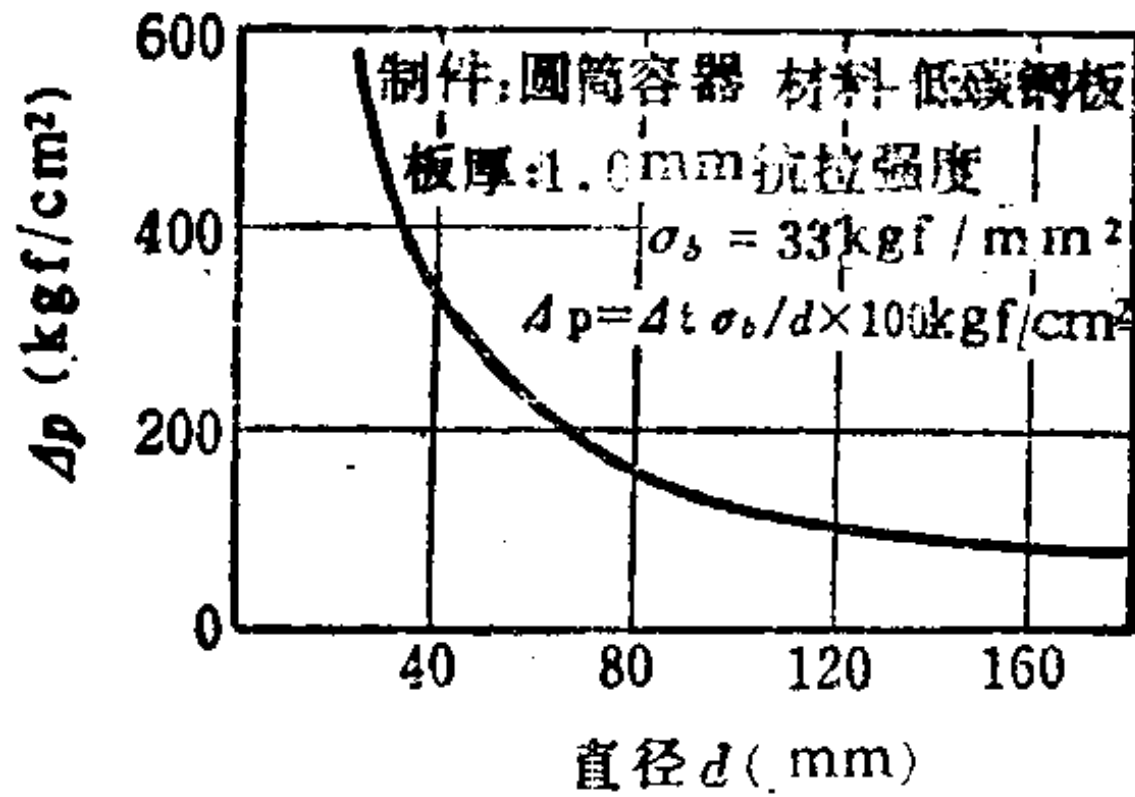


图4.296 压力差与圆筒容器直径的关系 (压力差不得超过图上的数值)

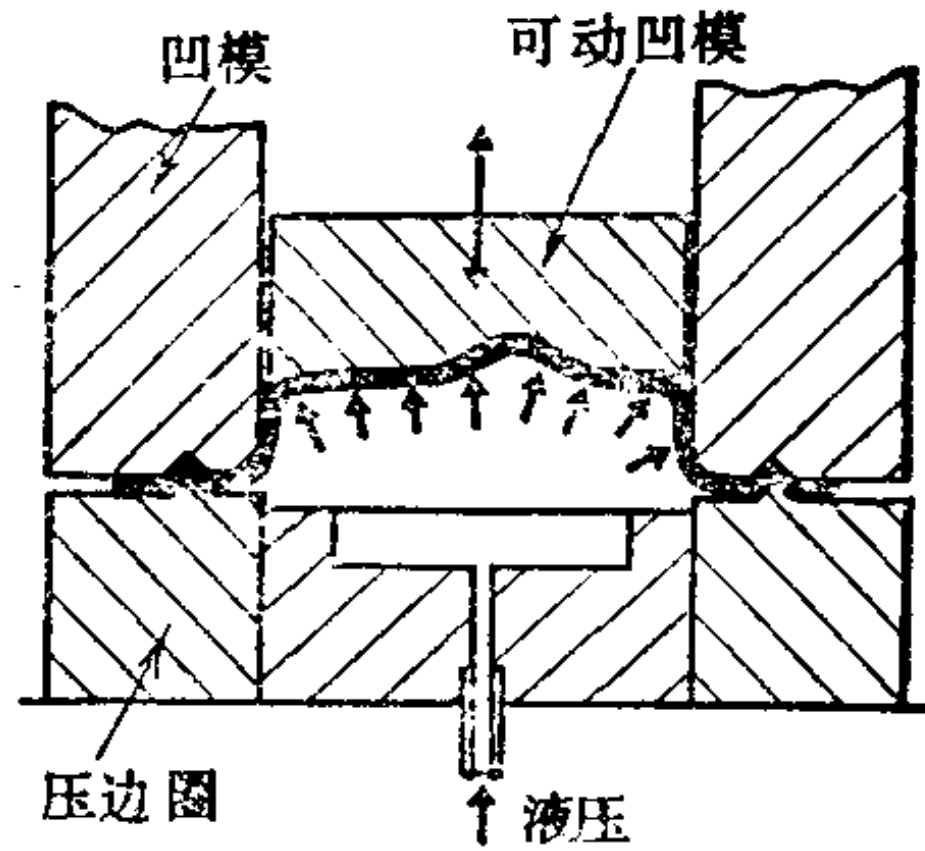


图4.297 液压胀形

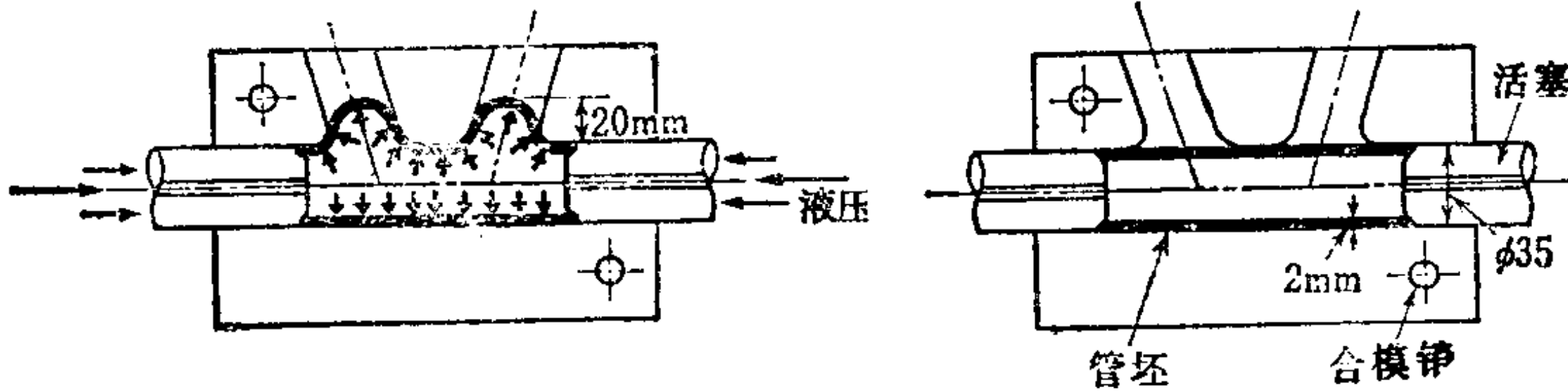


图4.298 利用液压进行管材胀形

4.11 高能高速加工

4.11.1 概述

以钛(Ti)、钽(Ta)、钨(W)、钼(Mo)、铌(Nb)等合金及不锈钢为主体的所谓耐热合金，用普通方法是很难加工的。所谓高能高速加工可以理解为“能量释放速度快的加工方法”。这种加工方法包括：利用惰性气体压力使锤头高速运动来产生动能的高速锻造；利用火药爆炸压力产生的化学能的爆炸成形；利用电能的放电成形和利用强磁场的电磁成形等。把加工外力产生的能量加给试料的效率，一般用单位面积和单位时间作为评价基准。即

使全部能量相等，在比较长的时间里把这些能量加给试料和在极短时间里放出这些能量，对试料的影响有很大差别。高能高速加工时无论哪一种外力都是以冲击的方式作用在试料上，最初作用的外力可在 10^{-3} 秒以内达到一定值，因而就连用过去那种变形速度低的加工法无法成形的坯料也能容易地使其成形。

所谓根本性的冲击加工，是指通过剧烈的脉冲负载使试料进行高速变形而言。象高速轧制或拉丝那样经过长时间的加速，最后进行高速变形的也不能叫做冲击加工。高速高能加工也可称为产生大能量的冲击加工。这里所说的脉冲负载是指载荷上升曲线在 10^{-3} 秒以内达到一定值的变形力。实用上为了方便也有作如下分类：将应变速度 $0 \sim 0.003/s$ 的变形叫做静态变形；把应变速度 $0.003 \sim 10^2/s$ 的变形叫做中速变形；把应变速度 $10^2/s$ 以上的变形叫做高速变形。

4.11.2 高能加工的特征

原有的加工法和高能高速加工法的加工速度比较示于表4.40〔173〕。高能高速加工的速度与质量之比示于表4.41〔174〕。表中速度和质量之比大，意味着采用了具有大能量的小型加工设备或加工方法。例如，迪纳帕克(Dynapak)高速锤，若令锤头活塞截面积为 A 、气体压力为 P 、打击前锤头的全行程为 S ，则在锤头速度 v 和锤头全部质量 m 之间，存在如下关系：

$$v = \sqrt{\frac{2PAS}{m}}$$

为使图 4.299 上的锤头具有一定能量，如果 v 大即使 m 非常小也可以，这必然导致设备的小型化和轻量化〔175〕。

表 4.42 所示为现行的高能高速加工法的比较〔176〕。

另外，受冲击负载作用的坯料，其动态应力-应变曲线对加工速度的依存性，可以设想如图4.300 a)、b)所示。图4.300 a)中的曲线表示加工铜和铝材的情况，图4.300 b)中的曲线表示加工钢的情况〔177〕。但是当负载方式为爆炸载荷时，表示材料的动态屈服应力和各种材料的硬度及延性变化的实验值，分别列于表

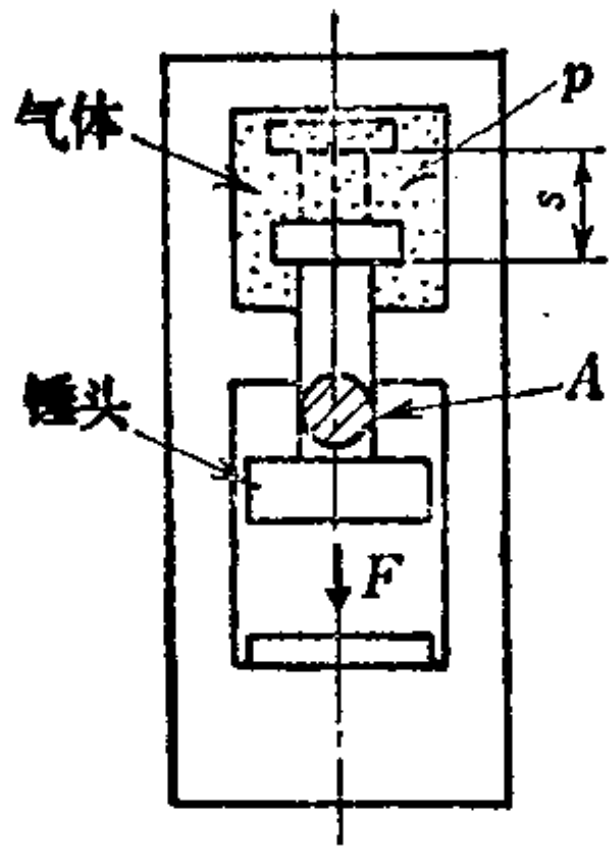


图4.299 气压驱动式高速锤的原理

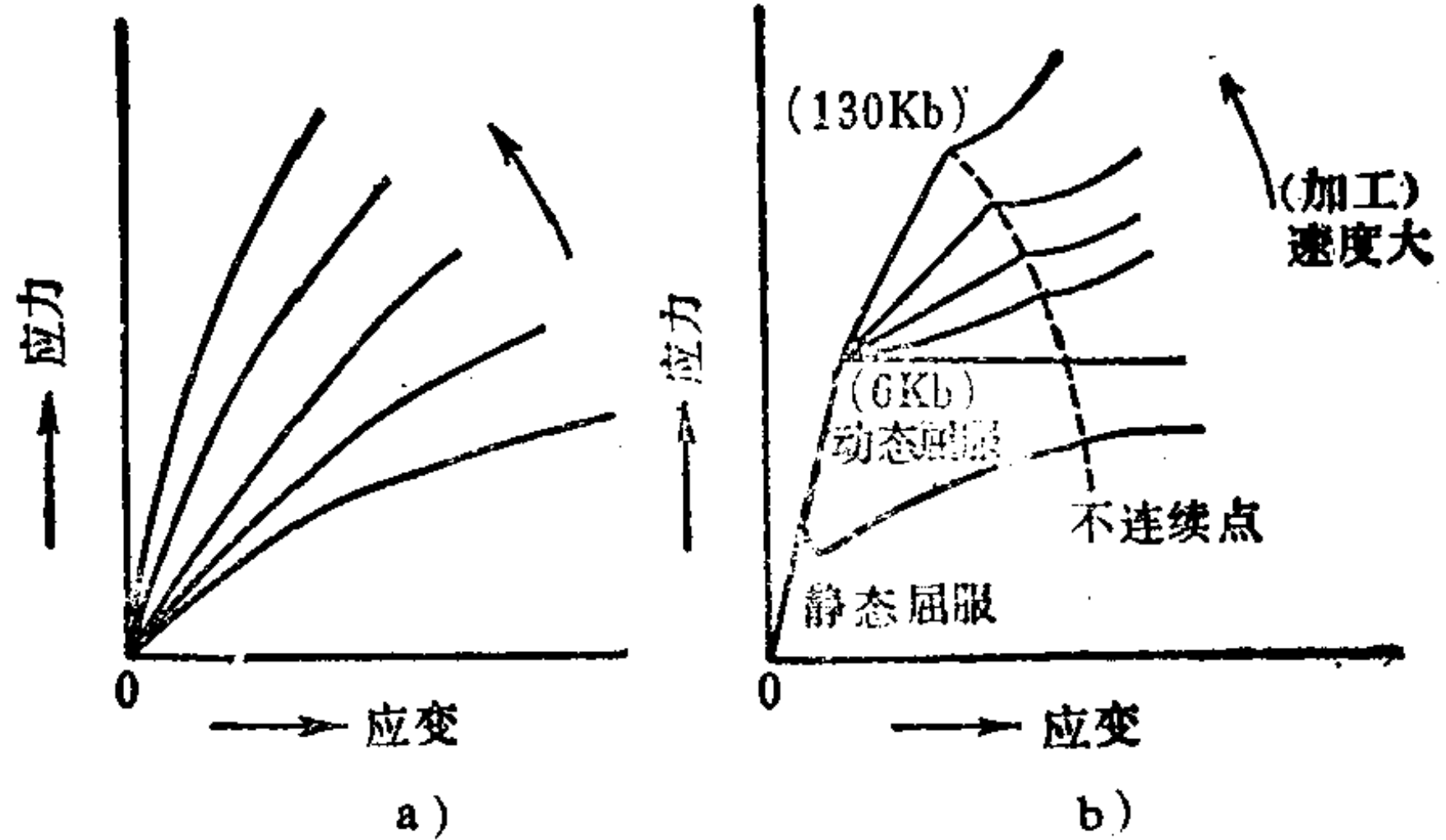


图4.300 在高速加工中试样的应力-应变曲线对速度的依存性设想图
a) 铜、铝 b) 钢

4.43 [178] 和表4.44 [178]。

4.11.3 材料的变形行为

如果利用高速照相机来研究加工件的动态，就能发现静态加工和高能高速加工在材料成形过程中的断面变化有很大不同。图4.301表示利用爆炸成形和油压成形法对边缘固定的薄板进行成形的过程。在爆炸成形的场合，由于塑性波是从材料边缘传到中央部分的，因而其断面以梯形的状态进行变形，变形结束后的形状是载荷压力的时间越短越接近于圆锥形，如果时间长就接近于

表4.40 原有的成形法和高能高速成形法加工速度的比较

成形方法		速度				
		log [ft/s]				
		0.1	10	100	1000	
原有的方法	弯曲压力机	—				
	橡皮模压力机	—				
	水压机	—				
	机械压力机	—				
	落锤		—			
高能高速成形法	空压式成形法			—		
	低速爆炸成形			—		
	爆炸成形			—		
	高速爆炸成形			—		
	水电成形			—		
	电磁成形			—		

表4.41 高能高速加工中速度和质量之比^[178]

加工方法	质量 (kg/g)	(速度) ² (m/s) ²	$\frac{(\text{速度})^2}{\text{质量}}$
落 锤	143	37.2	0.26
迪纳帕克高速锤	4.54	0.93×10^4	0.20×10^4
爆炸成形 (空气中)	4.54×10^{-3}	0.84×10^5	0.19×10^9
爆炸成形 (水中)	9.07×10^{-2}	0.47×10^5	0.52×10^6
放电成形	9.07×10^{-2}	0.47×10^5	0.52×10^6

球形（油压成形时的变形）。爆炸成形由于加工条件不同，在成形过程中有时会产生负压，在产生负压的一瞬间圆形试料的中心部分会暂时凹陷。水中爆炸成形，在中心凹陷以后因有流体压力和气体气泡压力同时作用，所以凹陷部分得到恢复使变形继续进行。另外，在水中爆炸成形或放电成形时，试料并非只受一次冲击压力的作用，首先受到由火药爆炸或放电产生的冲击动量作用，该冲击动量 = 冲击波 + 喷射流产生的流体压力，其次是受到由于化学反应或电气反应产生的气体气泡膨胀或收缩所引起的冲击压力的多次反复作用（图4.302）。这些压力的强度因加工条件

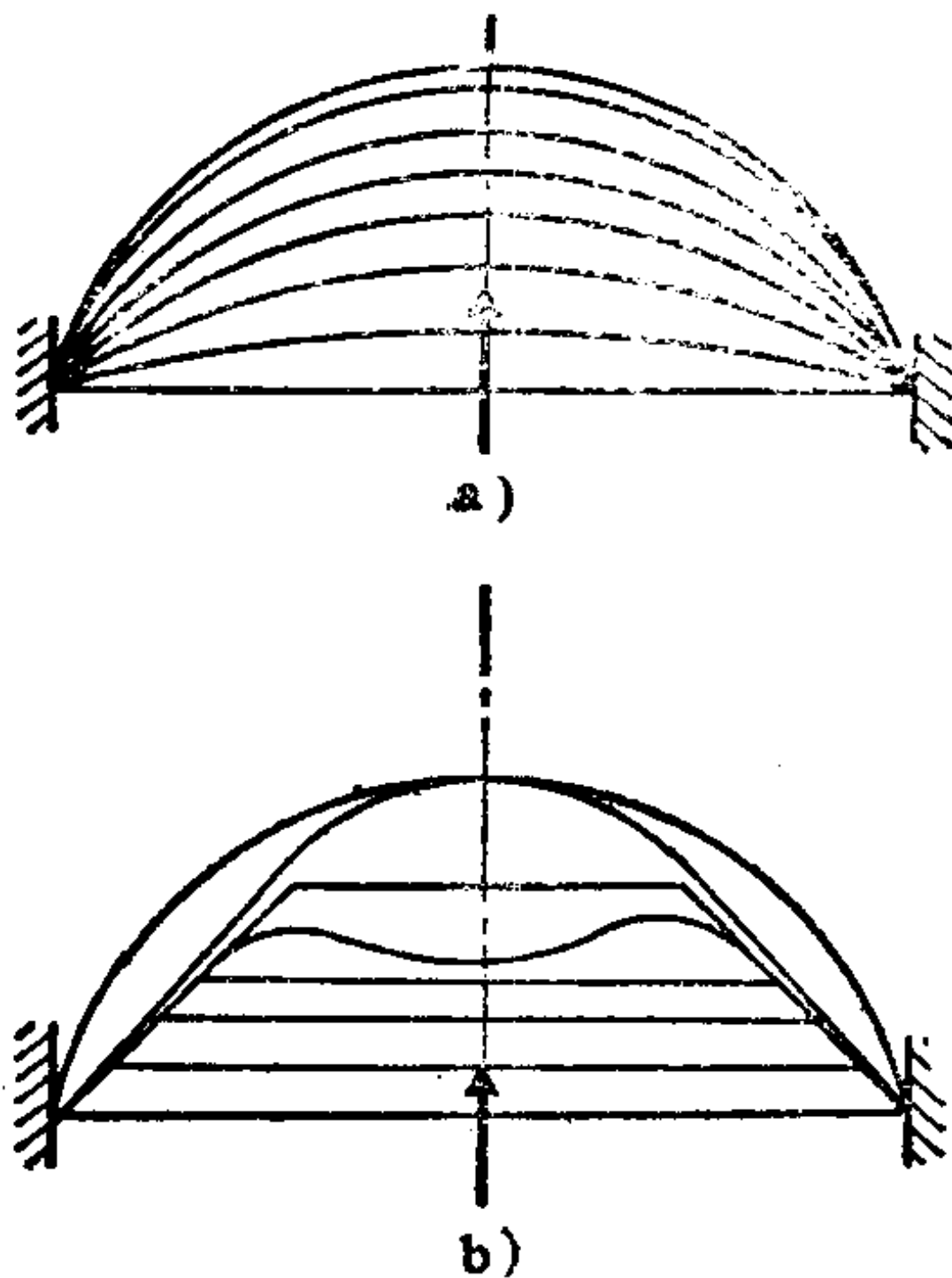


图4.301 成形中的变形过程
a) 液压成形 b) 爆炸成形

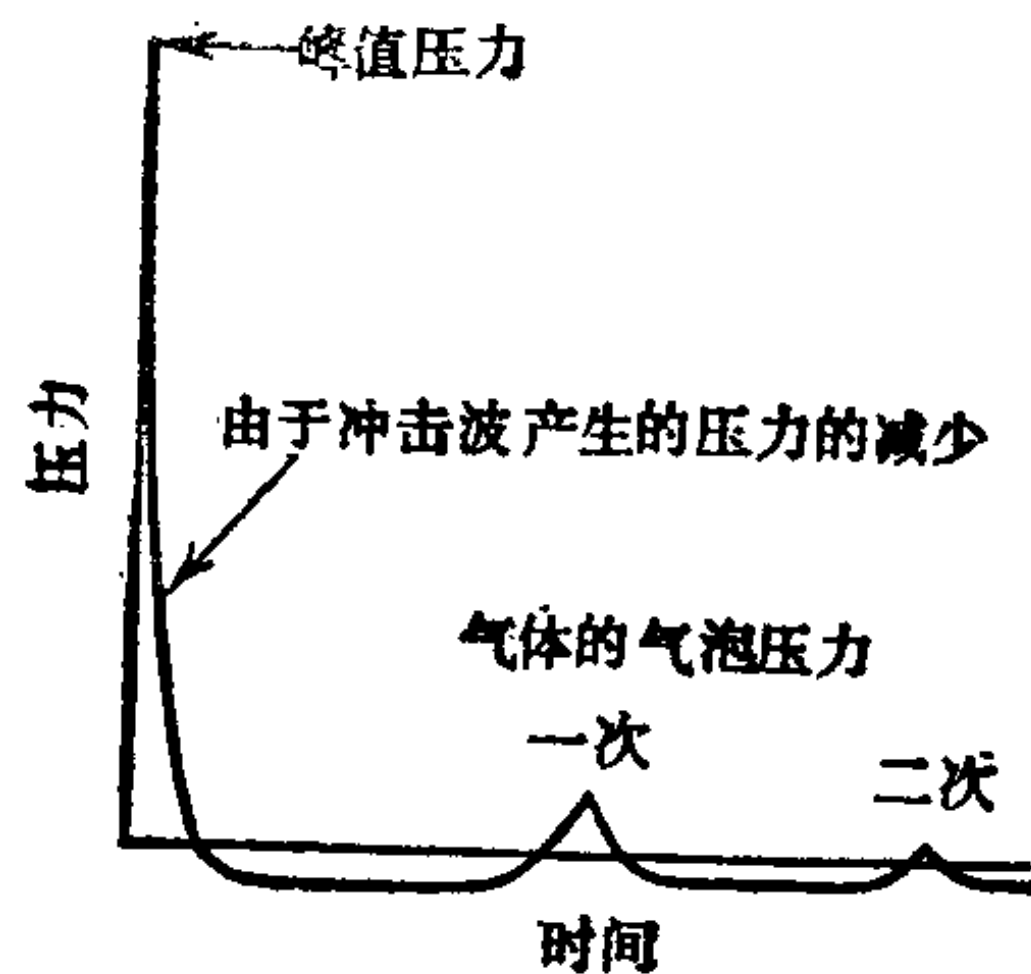


图4.302 水中爆炸成形的负载压力-时间曲线

表4.42 各种高能高速加工法的特征〔4〕

名称	爆炸成形			高压气体活塞加工			放电成形			电磁成形		
	炸药法	火药法	气体混合法	高压气体法	金属线爆炸法	火花放电法	介质离子化	线的蒸汽法	水、空气	水、空气	3000~6000	10 ⁻⁸
能量释放法	烈性炸药	水、空气	燃气	阀门开关	水、空气	水、空气	水、空气	水、空气	水、空气	水、空气	水、空气	水、空气
能量介质	化学的爆炸	水、空气	燃气	锤头活塞	水、空气	水、空气	水、空气	水、空气	水、空气	水、空气	水、空气	水、空气
压力波速度(m/s)	1200~7000	200~300	200~300	1.5~60	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000
压力波时间(s)	10 ⁻⁶	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
设备场所	远距离	分	分	无限制	分	分	分	分	分	分	分	分
成形极限(φm)	5	2	2	现在 0.5 将来 1	1.5 3	1	1	1	1	1	1	1
形状变化	良好	良好	不好	非常优秀	良好	良好	良好	良好	良好	良好	良好	良好
应用	落料 精压 切压 压扩 折边、翻边 硬化 包校 校正 延伸	胀形 压校	胀形 延伸 校正	压实 挤压 锻造 锻	胀形 延伸 校正	胀形 延伸 校正	胀形 延伸 校正 精压 压扩	胀形 延伸 校正	胀形 延伸 校正	胀形 延伸 校正	胀形 延伸 校正	胀形 延伸 校正
主要优点	大件成品	小件成品	压力控制	精密锻造	再现性	操作容易	模	模	模	模	模	模
设备费	低~中	低	中	中~高	中~高	中~高	中~高	中~高	中~高	中~高	中~高	中~高
工具费	低	低~中	高	中	中	中	中	中	中	中	中	中
操作费	高	低~中	高	低	中	中	中	中	中	中	中	中
能量费	低~中	中~高	非常低	低	高	高	高	高	高	高	高	高
一道工序的时间	长	中	长	少	长	中	中	中	中	中	中	中
将来	中	中	长	非常短	短	非常短	非常短	非常短	非常短	非常短	非常短	非常短
安全程度	只有经过训练的人可操作	只有经过训练的人可操作	一般的注意	不要接近一切高压电压的装置, 安全程度有限制	一般的注意	不要接近一切高压电压的装置, 安全程度有限制	一般的注意	不要接近一切高压电压的装置, 安全程度有限制	一般的注意	不要接近一切高压电压的装置, 安全程度有限制	一般的注意	不要接近一切高压电压的装置, 安全程度有限制

不同而异, 受 Stand off (试料和爆炸源或放电源之间的距离) 和水的深度的影响较大。

表4.43 由爆炸压力引起的动态屈服应力 (Duvall)

材 料	研究者	静态屈服力 K_b	武格尼欧弹性极限 P_A K_b	动态屈服应力 $\sigma_r = \frac{P_A}{(1-2\nu)}$ $(1-\nu)$	动态屈服应力 静态屈服应力	应变速度 (s^{-1})
阿姆柯工业纯铁	Bancroft	1.91	6.8	4.0	2.1	
SAE1020钢	Minshall	2.85	11.4 ± 0.8	7.4 ± 0.7	2.6	>10 ⁴
低碳钢	Costello	2.15(纵) 2.28(横)	10.7 ± 0.6	6.5 ± 0.4	2.9	≥ 2 × 10 ⁴
SAE1040钢	Minshall	3.96	11.2	7.3	1.8	2.3 × 10 ⁸
Vibrac钢	Costello	9.28	23.3 ± 1.6	14.2 ± 1		
SAE1020 (退火)	Bancroft		11.4	7.4	2.5	
4340钢	Goranson	>6.8	15	9.7	<1.4	
2024 T4Al	Fowels	2.90 ± 0.07	5.4(1 ± 0.05)	2.8	0.96	≥ 6 × 10 ⁴
2024 T4Al (退火)	Fowels	1.0 ± 0.2	0.9(1 ± 0.2)	0.45	0.45	≥ 7 × 10 ⁸

表4.44 爆炸超高压负载引起的各种材料硬化和延展性的变化 (Dieter)

结晶构造	名 称	负载压力 (K_b)	硬 度 HV	屈服应力 (kgf/mm^2)	抗拉强度 (kgf/mm^2)	延伸率 (%)
体心立方金属 (b.c.c.)	阿姆柯工业纯铁 95	退火	64	13.6	21.8	68
		95	121	21.8	25.2	17
		220	250	75.8	86.4	16
	低碳钢 C 0.17%	退火	85	24.6	40.7	25
		95	160	43.5	50.6	10
		220	260	80.7	87.7	7
	钼	退火	120	19.7	25.9	22
		275	180	31.6	33.7	5
	钶(钨的旧名)	退火	68	18.5	30.9	25
		250	115	33.0	35.8	5

(续)

结晶 构造	名 称	负载压力 (K_b)	硬 度 HV	屈服应力 ($\text{kg} \cdot \text{f}/\text{mm}^2$)	抗拉强度 ($\text{kg} \cdot \text{f}/\text{mm}^2$)	延伸率 (%)
铁系面心立方金属	奥氏体系锰钢	退火	205	40.7	94.1	60
		70	300	80.7	126.5	54
		140	380	87.7	129.0	40
		260	450	94.8	133.5	38
		330	520	104.0	143.8	28
		420	580	119.3	154.5	19
		奥氏体系不锈钢	退火	165	25.3	75.8
	Cr16~18%	95	255	56.2	96.0	44
		250	330	75.2	108.0	48
	Ni 6~18%	340	363	91.3	100.5	24
		95 (低温处理)	385	81.2	122.0	24
	Cr18~20%	退火	145	23.9	63.2	82
		95	220	59.7	82.8	39
		250	305	75.8	96.0	37
		340	325	80.7	92.0	21
		95 (低温处理)	340	73.0	105.4	28
Cr16~18%	退火	145	32.3	63.2	63	
	95	225	56.8	67.4	37	
	250	310	86.4	91.3	12	
	340	335	83.4	89.2	9	
	95 (低温处理)	200	50.6	67.4	46	
面心立方金属	铜	退火	50	7.3	22.5	55
		220	96	33.0	34.4	
		350	109			
		425	132			
	α 黄铜	消除应力	85	19.0	37.7	54
		220	125	45.3	47.1	
		550	192			
	Au-Ag17%	退火	60	5.8	17.6	40
		340	108	14.6	22.8	6
	1100Al	退火		3.6	8.4	42
		冲击硬化		10.5	11.7	24
2024Al	固溶处理		30.9	49.2	24	
	冲击, 时效处理		44.9	53.4	16	
Ni	退火	125	23.9	42.5	37	
	100	183	41.4	44.6	13	
	265	208	59.7	61.2	10	
	460	263	91.3	92.7	7	
蒙乃尔合金 Cu30%	退火	120	20.4	52.4	44	
	265	250	70.7	75.0	10	
密排六方金属	钛	退火		37.2	48.4	32
		冲击硬化		72.3	86.3	25

4.11.4 加工后制件（试样）的行为及其物理性能与机械性能的变化〔179〕

爆炸成形时，若把几十万 kbar（千巴）的超高压加在金属材料的试样上，与其他加工方法相比，它会发生显著的硬化。美国等有利用这种方法，即用爆炸压力来冲击钢轨表面使之硬化以防磨损的事例。可是，象利用 6 号电气雷管成形小型试样那样，当压力等级在 1000kgf/cm^2 左右时，与利用其他加工方法成形的试样的硬度相比，基本上无变化。因此，为了使制件产生显著的加工硬化，有必要给以一定程度的超高压冲击负载。另外，用高能高速加工法时材料达到断裂以前的变形量与原有加工方法的相比，如表 4.45 所示。这种倾向也可通过材料流动所得到的位错数及其流动量和材料的滑移面以及滑移方向的数量加以解释。

表 4.45 不同加工法的变形量比较

加工方法	原有的加工法	高能高速加工法
f. c. c.	小 < 大	
b. c. c.	稍小 ≤ 稍大	
h. c. p.	大 > 小	

如果从宏观方面来考察爆炸成形等，就可以看到使用烈性炸药时加给材料的爆炸压力远远超过材料的屈服应力，或者在进行胀形时除给材料施加弯曲力矩以外还给予足够的拉应力，这是材料的回弹减少的原因。即使是使用象黑色炸药那种所谓低爆炸力的炸药，给材料以比较低的冲击动量时，坯料由于冲击作用而被金属模具表面所强化，使表面产生硬化或在成形时的变形过程中发生弯曲回复等，都认为是材料的回弹减少的原因〔180〕。

4.11.5 冲击源

在爆炸成形中，总希望利用同样数量的炸药产生完全相等的压力效果，并且期待着开发超高压和超高温的方法以及爆炸成形用的炸药。例如，希望制造各种阻抗的炸药，并且尽可能地减少爆炸声响，使冲击波带有方向性，还要能自由地控制爆炸速度和

爆炸压力的作用时间,研制出能把从一点发出的球面冲击波传到试料上变成平面波的补偿爆炸透镜。这些都需要通过把强弱大小不同的各种形式的炸药组合起来加以实现,而放电成形也需要通过选择电极的构造、形状和放电加工回路〔181〕等来调节其冲击动量。

4.11.6 其他,爆炸或放电后的能量转换机理

在这方面有许多问题需要研究解决,例如试料和凹模之间的摩擦与润滑、延长模具寿命的措施、在模具表面贴上乙烯薄膜控制坯料的回弹或负回弹、提高加工精度、缩短加工工序、节约模具费用、加工用生产设备的制造以及把生产纳入商业步调的问题等。

这些问题无论在基础理论还是在实际应用方面都有待于今后的研究开发,但是高能高速加工的最大长处是,对于利用其他加工方法不能加工的材料,或者即使能够加工而在实施上非常困难的材料,也能简单地进行成形。目前的问题是在大量生产时还不象人们所预想的那样,制件成本不可能降低。

4.11.7 加工条件

水中爆炸成形或放电成形,由于作为介质的水和试料的边界条件上的问题,而需要在试样和水之间设置空气层扩大其胀出量,或者设置缓冲材料使试样产生的变形平均化。试样两侧的压力差对加工难易程度有影响,对于试样来说,则希望根据其材质、板厚和能源性质来控制能源及受能源作用的方面,即试样和凹模之间的空间的真空度。另外,在小型试样成形的场合,由于加工时使用的容器尺寸特别是容器的壁面对成形有影响,因而有必要预先求出加在试样上的最大压力与容器几何尺寸之间的实验式,同时还要求出最大压力与试样距爆炸源或放电源的距离之间的实验公式。此外,把试样加热进行加工时的温度效应,变形速度的依赖性,在加工中给试样以振动或超声波等处理带来的影响,给试样加预应力以及加工中把与加工方向相反或方向不同的力加给试样之后的效果等都是今后值得研究的问题。

4.11.8 成形设备及成形方法

a. 高速锤〔182、183〕

(i) 概述 高速锤就象空气锤那样是利用气体压力使锤头上下运动，利用其动能进行塑性加工。这种设备在美国叫做 Pneumatic-Mechanical Forming Machine，在西德叫做 Hochgeschwindigkeitshammer。在日本以美国的商品名称 Dynapak 作为这种设备的代名词，而德国流派称为高速锤则也能简单地表现其内容。

高速锤的原理如 4.11.2 所述，但高速锻锤的容量是以能量单位 (tf·m) 表示，而不能象压力机那样用吨 (t) 来表示。这是因为压力机因其结构和强度关系，其最大输出是固定的，而高速锤可输出的力不能简单地确定，它还与加工距离有关。各种锻压设备的速度比较如表 4.46 所示。

表4.46 锻压设备的速度比较 (山口)

设备名称	速度 (m/s)
液压机	0.02~0.03
机械压力机	0.05~1.5
落锤	3~8
高速锤	15~30

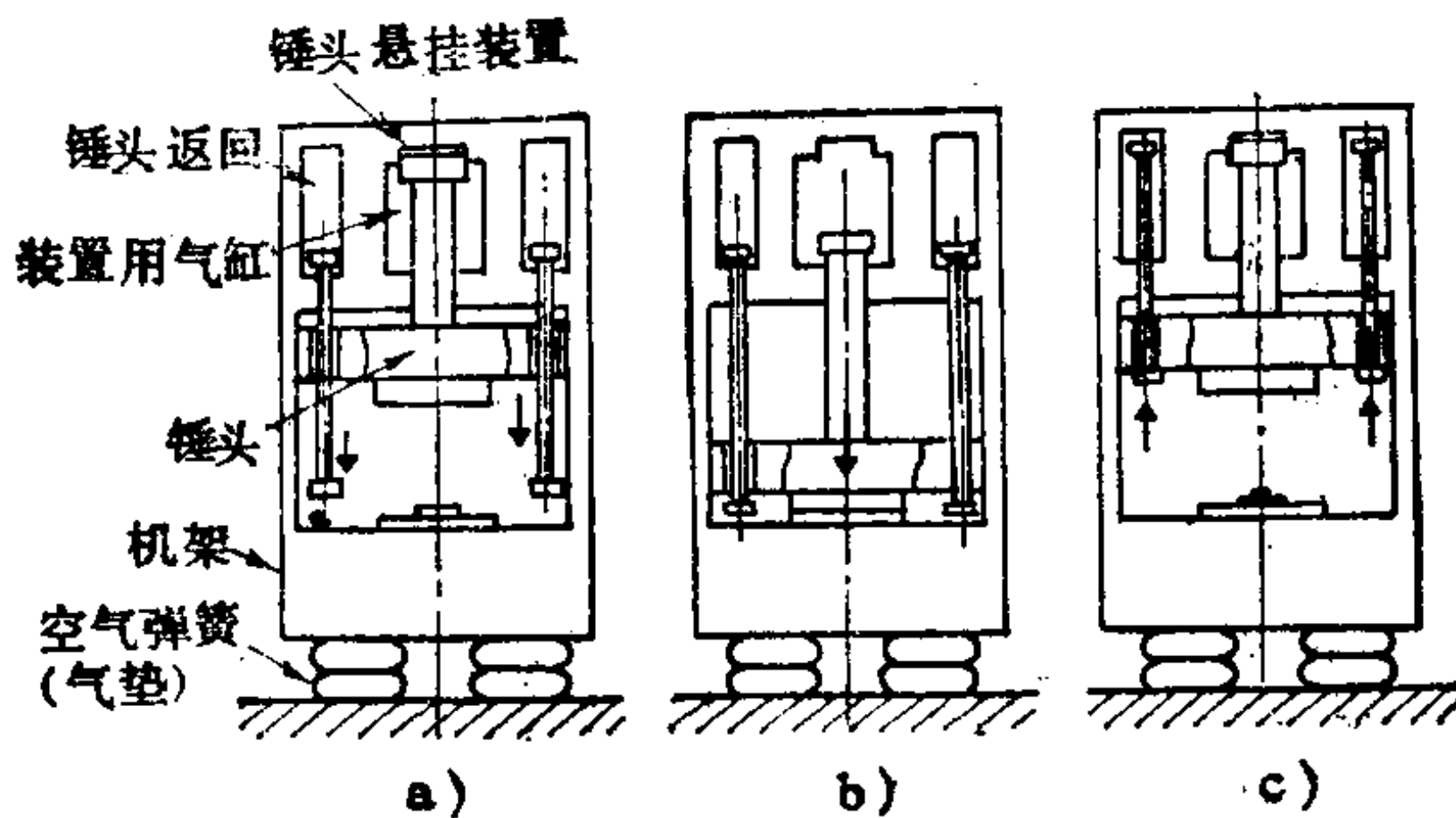


图4.303 Hi-Fonac的工作顺序

a) 锤头悬挂返回装置下降 b) 冲击加工 c) 返回装置上升锤头上升

(ii) 高速锤的结构 高速锤由机架、气缸、锤头和锤头返回装置等构成。图 4.303 所示为一种高速锤的工作顺序，由锤头回程活塞提升起来的锤头，靠锤头悬挂装置保持在上面位置。在把材料放置在下模上以后，使回程装置的活塞下降，当松开锤头悬挂装置时锤头就以高速下降，进行冲击加工。随后立即使返回装置工作，锤头随之上升而完成一个循环。图 4.304 所示为 USI 的高速锤，机架支承方式和打击方式的特长如表 4.47 所示。主要的高速锻锤结构如表 4.48 所示。

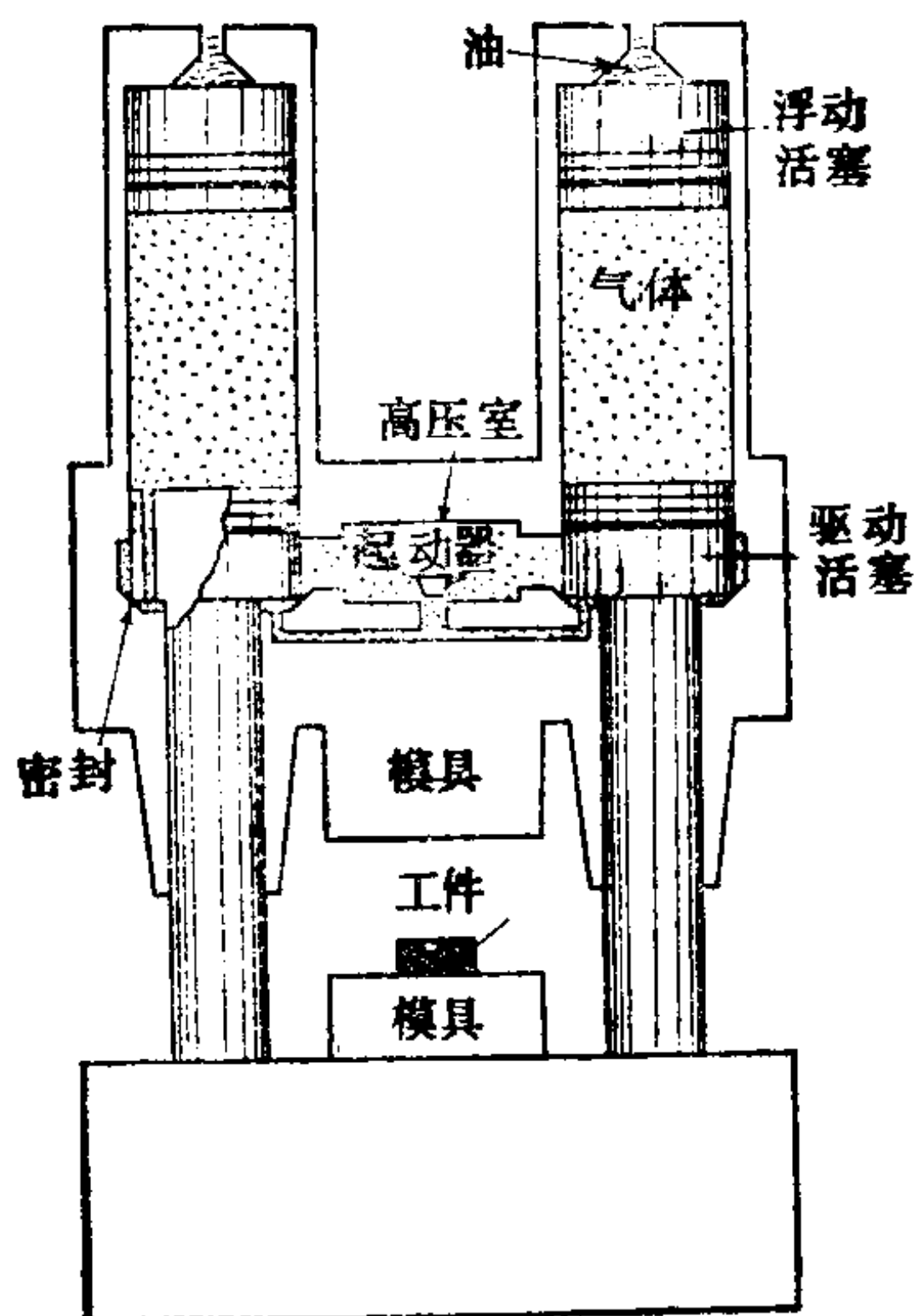


图4.304 USI高速锻锤

(iii) 优点和制件示例

(1) 材料的加工性能得到改善。因冲击载荷的作用，使材料（特别是 f.c.c. 和 b.c.c. 等金属材料）的加工性能变好。尤其在热锻时由于材料在尚未冷却时就加工完毕，材料可流到模具的细小部位，所以即使打击一次也能加工出高精度的制件。因而成品的表面状态极好，机械性能也有所提高（例如涡轮叶片的疲劳强度提高20%〔181〕）。另外，最佳加工温度范围窄的材料也能锻造。

(2) 能量损失少，而且比普通锻锤的效率 high。

(3) 本体结构形式不采用固定机架时，没有太大的力加在基础上，因而只要有简单的基础即可。甚至可不用基础。

(4) 因为是短时间的加工，所以在热锻时模具的温升小。另外模具的寿命长，生产成本也低。

(5) 能量的调节精度好。

(6) 因设有顶出装置，操作非常方便，模具的模锻斜度也

表4.47 各种机架支承方式及打击方式的特征 (山口)

	单击形式		对击形式	
	固定机架式	浮动机架式	对向气缸式	单向气缸式
效率	如砧座的重量不够大则效率低	良	根据条件不同效率稍差一些	良
基础	大	基本上不需要	简单	基本上不需要
基础的振动	不可避免	不传递	根据条件不同稍有传递	不传递
本体结构	非常简单	简单	复杂	复杂

表4.48 主要高速锤的结构 (山口)

制造厂	商品名	机架支承方式及打击方式	锤头悬挂装置	锤头返回装置
Gneneral Dynamics	Dynapak	单击形式, 浮动机架	气体排放式	液压式
US Industries	Hermes	对击形式, 单向气缸	等压活塞式	气压式
Krupp	—	对击形式, 对向气缸	气体排放式	液压式
Fairchild	—	对击形式, 对向气缸	机械式	液压式
日本制钢	—	单击形式, 固定机架	等压活塞式	气压式
神户制钢	HiFomac	单击形式, 浮动机架	气体自由膨胀式	液压式 机械式

(协作制造厂家未列入)

可以做得小些, 还可采用特殊结构。

因此, 高速锤的前景是很光明的。

表 4.49〔185、186〕所示为利用高速锤生产的制件示例。

b. 高速水击成形机 (水压冲床)〔187〕

这是利用冲击水压对金属材料进行高速塑性加工的一种成形装置 (图4.305), 是由东急车辆公司研制的, 现已出现工作能量为 2400kgfm, 锤头重量为 46.3kgf, 锤头速度为 32m/s 的大型装置。

这种成形法的目标是, 使用非常经济而危险性又小的一般压

压缩空气和以容易得到的廉价水作为介质，采用简单的结构能在短时间内反复发生较高的冲击水压，并以简单的密封防止水压泄漏，能在短时间里反复生产精度优良的成形件。操作由电气控制，通过操纵一个开关便可进行自动运转。通常，材料是按照外侧模具的形状，在几毫秒（ms）的时间内成形。因此，这种成形法在面向汽车零件和电机零件等大批量生产的同时，还往往能够用于一般认为以其他方法难以加工的制件的生产，能够成形出质量优良的廉价制件。另外，用过去的成形法需要几道工序加工成形的制件也能只用凹模在一道工序中成形完毕，因而也适于小批量试制件的生产。

但是目前为了降低零件的加工成本和提高生产率，需要设计适应加工对象的水压冲床。

表4.49 用高速锤加工的制件示例

制件名称	材 质	坯料尺寸 (mm)	重量 (kg)	加工温度 (°C)	能量 (tf·m)
转角加强用板	2014Al	38.1×19.1			1.2
电子管用的板极	Cu	38.1×12.7			
氧气喷嘴	Cu		4.1		3.9
枪栓	C 1118钢	31.8×6.86		室温	
法兰盘	347钢		1.8		4.6
法兰盘	17-9DL钢	50.8×19.1		1150	4.6
挠性隔膜	E-17, H-11	33.0×33.0	0.35	1090	3.0
云形板	8740钢	38.1×83.8	0.54	1180	1.3
齿轮	9310钢	40.6×116	1.2	1090	1.9
齿轮箱	410钢	140×140	1.6	1180	
转子法兰盘	8650	48.3×112	1.1	1200	3.9
带凸缘的轴	4350	91.4×33.0	1.6	1180	2.4
涡轮盘	VCATi			980	2.3
X射线靶	W	69.9×76.2		1670	6.0
钨制零件	Mo	38.1×38.1		600~1200	

c. 爆炸成形〔188、189〕

(i) 概述 广义的爆炸成形应包括下列内容：爆炸压接、

焊接、衬套、高速粉末成形加工、利用炸药气体的高速切削和加压锻造等，此外，还有在钢材组装与螺栓固定上使用爆炸铆钉或爆炸螺栓；在雷管等端部开V形缺口；利用纽曼效应进行厚壁钢材的冲孔及大型钢材的切割；通过几次爆炸冲击使原为六方晶系的ZnS结晶逐步变成正方晶系的结晶，使无定形的石墨变成结晶性的石墨，进而对这种石墨作位错加工而成金刚石；以及为了减少钢轨的磨损而利用爆炸法使其表面硬化等许多方法。但在这里将主要叙述所谓爆炸成形应用于板材拉延、胀形、复合弯曲、落料和压印等塑性加工时所产生的各种现象。

(ii) 优点 爆炸成形法与其他高能高速加工法相比，其最大优点是能够便宜地加工大型制件。直径10m以上的封头也能在海水中、水池或水槽中利用爆炸压力进行成形，将此加工的板材焊接起来也能制成大的压力容器或构件。但是，最近使用小型炸药基本上也能制出过去用放电加工法生产的小型制件。例如，波纹管等也是使管子轴线与引爆线的方向一致先制成波状管，然后再沿轴线方向压缩波峰的间距而成形的。另外，即使对于某些地方具有机械加工出的精细形状的薄板或零件，利用环氧树脂将其封固后也能进行爆炸成形，而且无损于零件形状。

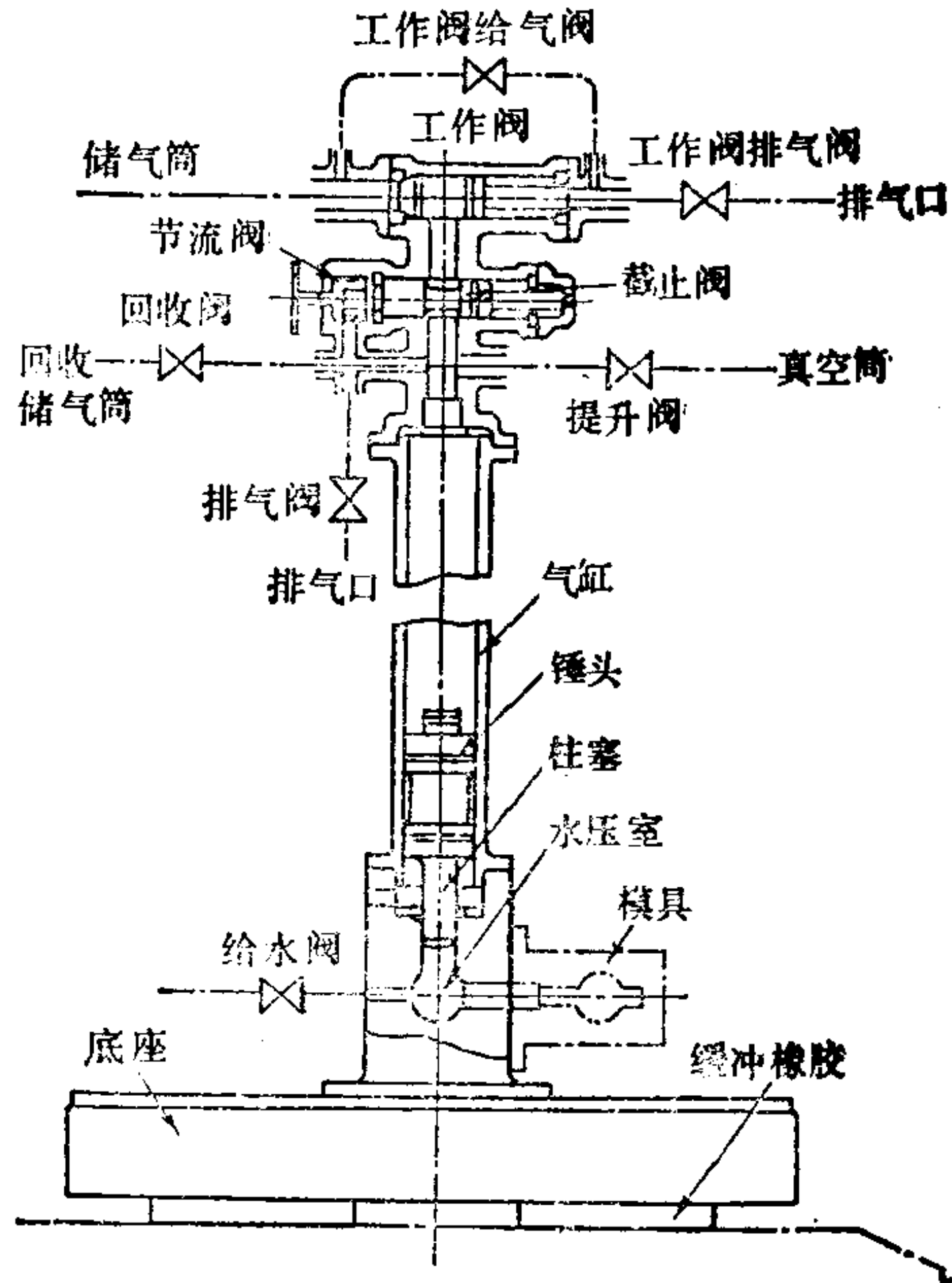


图4.305 HP150型水压冲床

(iii) 加工条件 爆炸成形的压力,除了与炸药的种类、尺寸和试样与炸药之间的距离有关以外,还要把试样与凹模之间的空间抽成适当的真空进行控制。

爆炸成形也和普通的加工方法一样,重要的是要按照试样的材质、制件的形状和尺寸大小来选择适当的加工条件。加在试样上的最大爆炸压力 P_m 值或总的能量,可以预先计算确定,适当地选择加工条件,控制爆炸压力使 P_m 达到最佳值。关于 P_m 的计算公式,可以利用下列的Kirkwood-Bethe的实验式。这是一种近似的公式,条件是水槽上方开放和使用球形火药。

$$P_m = k (W^{1/3}/d)^{1.15} \text{ 或}$$

$$P_m = 155 (W^{1/3}/d^{1.15}) \sqrt{D}$$

式中 W ——火药量;

D ——爆炸速度;

d ——试样和炸药之间的距离。

但在使用小型容器的场合,冲击在试样上的波不一定是平面波或球面波,也有来自壁面的反射或干涉,同实际并不完全一致。因此在使用小型容器时,要通过基础实验预先测定出该容器的特性,然后建立无量纲的数学公式和制成图表,据此选定最佳加工条件。表4.50所示为水中爆炸成形的速度。

表4.50 水中爆炸成形的速度

材 料	板厚 (mm)	使用炸药 (g)	炸药距离 (cm)	变形时间 (μ s)	变形速度 (m/s)	凹模直径 (cm)	应变速度 (s^{-1})
高强度铝	1.0	RDK5	10	170	300	15	—
铅	1.0	只用雷管	20~50	1030	89	8	26.9
不锈钢	0.8	TNT5	20~100	300	170	15	—
不锈钢	1.0	TNT2	20~78	100~200	30~200	11, 12, 14	$10^2 \sim 10^3$
5%铬钢	0.6	TNT1	7.6~ 25.4	400	85	15	46
		TNT6			153		237
		TNT10			137		329

板材自由成形时，试样的变形不均匀，其大致情况如图4.306 [190]所示。图4.307所示为用不同加工方法在板材上产生径向应变 ϵ_r 状态的比较。对这些应变的波动，可通过把缓冲材料放在试样上面的办法使之平均化（图4.308）。

图4.309、图4.310和图4.311都是ASTME发表的数据。图4.309是在胀形加工中发生破裂以前成形的圆顶深度（胀出高度）和变形速度（圆顶端部的移动速度）

的关系，图4.310所示为对各种合金试样（试样为圆顶、管形和拉伸试样）进行试验得到的最大应变（指破裂前的）状况。

图4.311所示为在室温下对各种合金进行试验求得的最佳加工速度。由图可以看出，6Al-4V 钛合金和 17-7pH 不锈钢在高

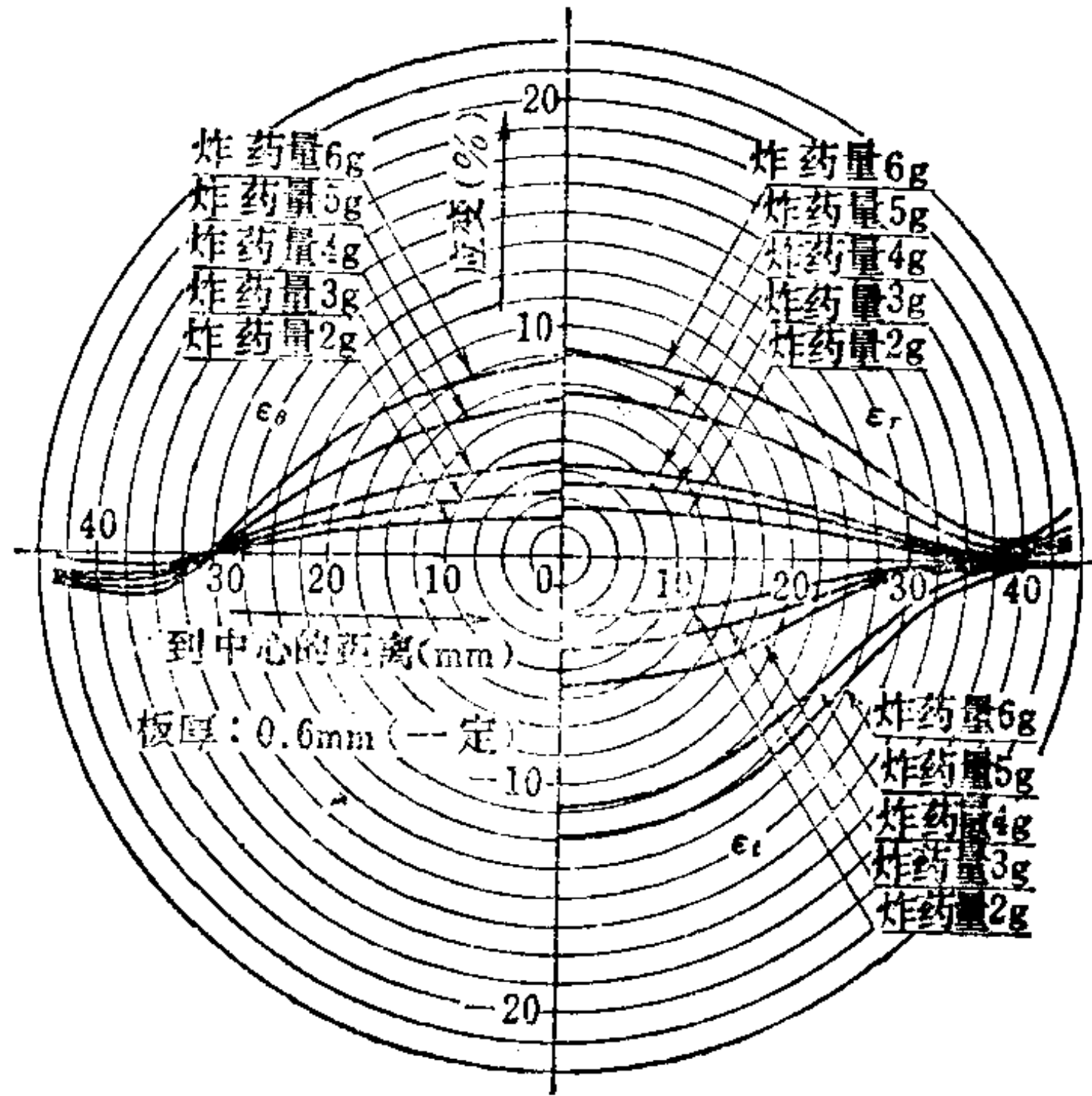


图 4.306

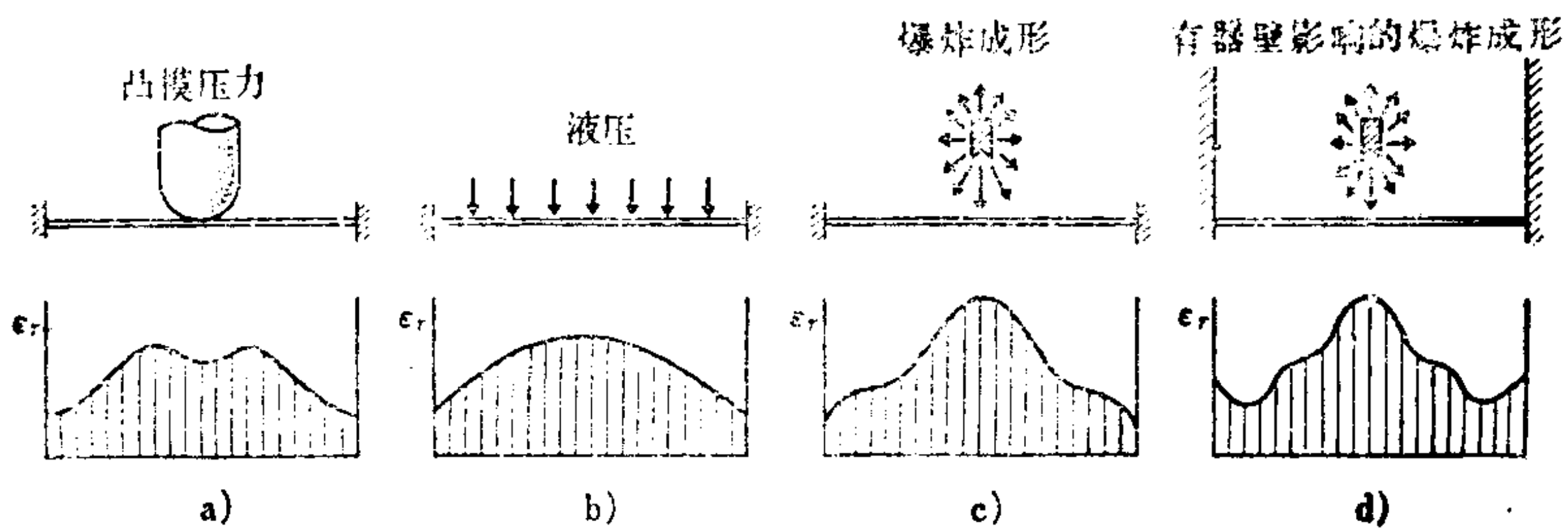


图4.307 应变分布模式的比较

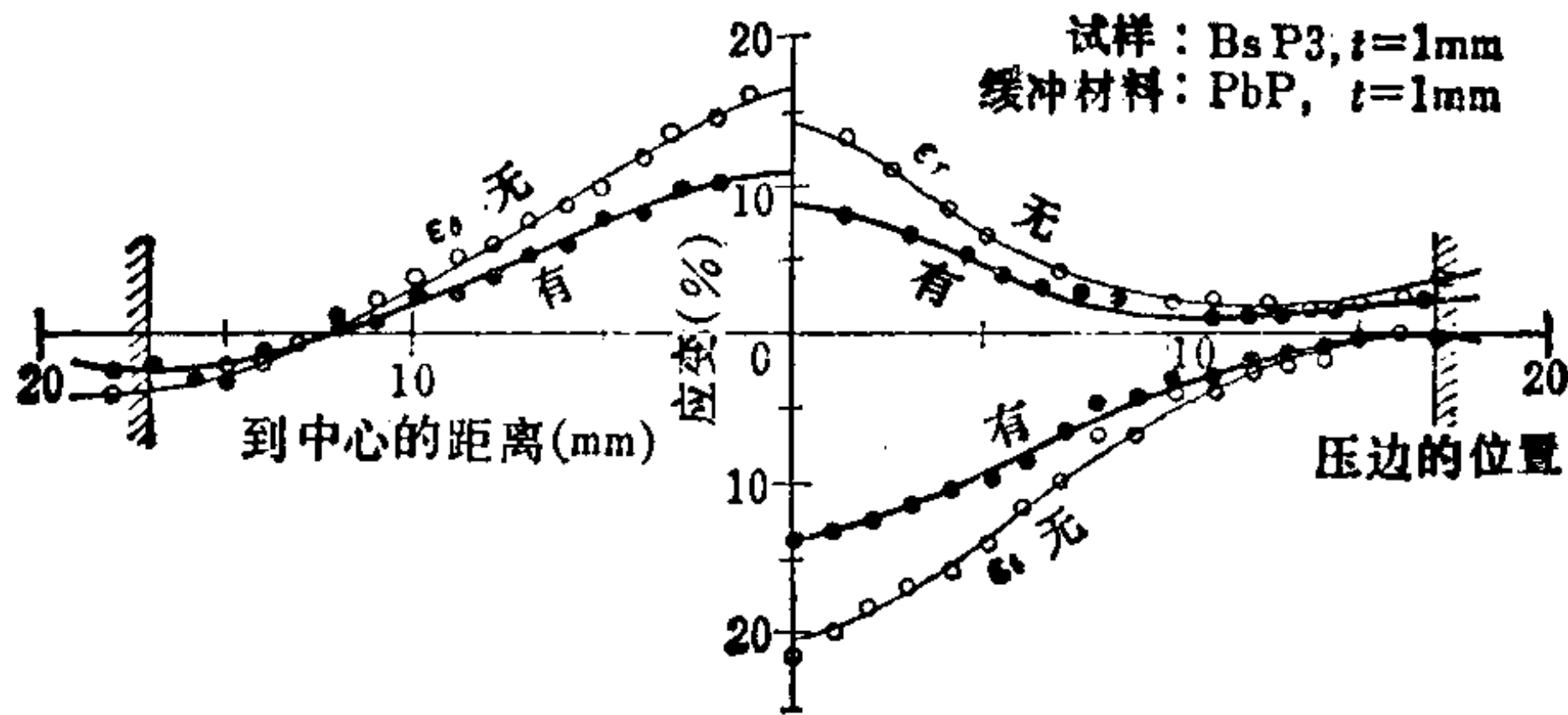


图 4.308

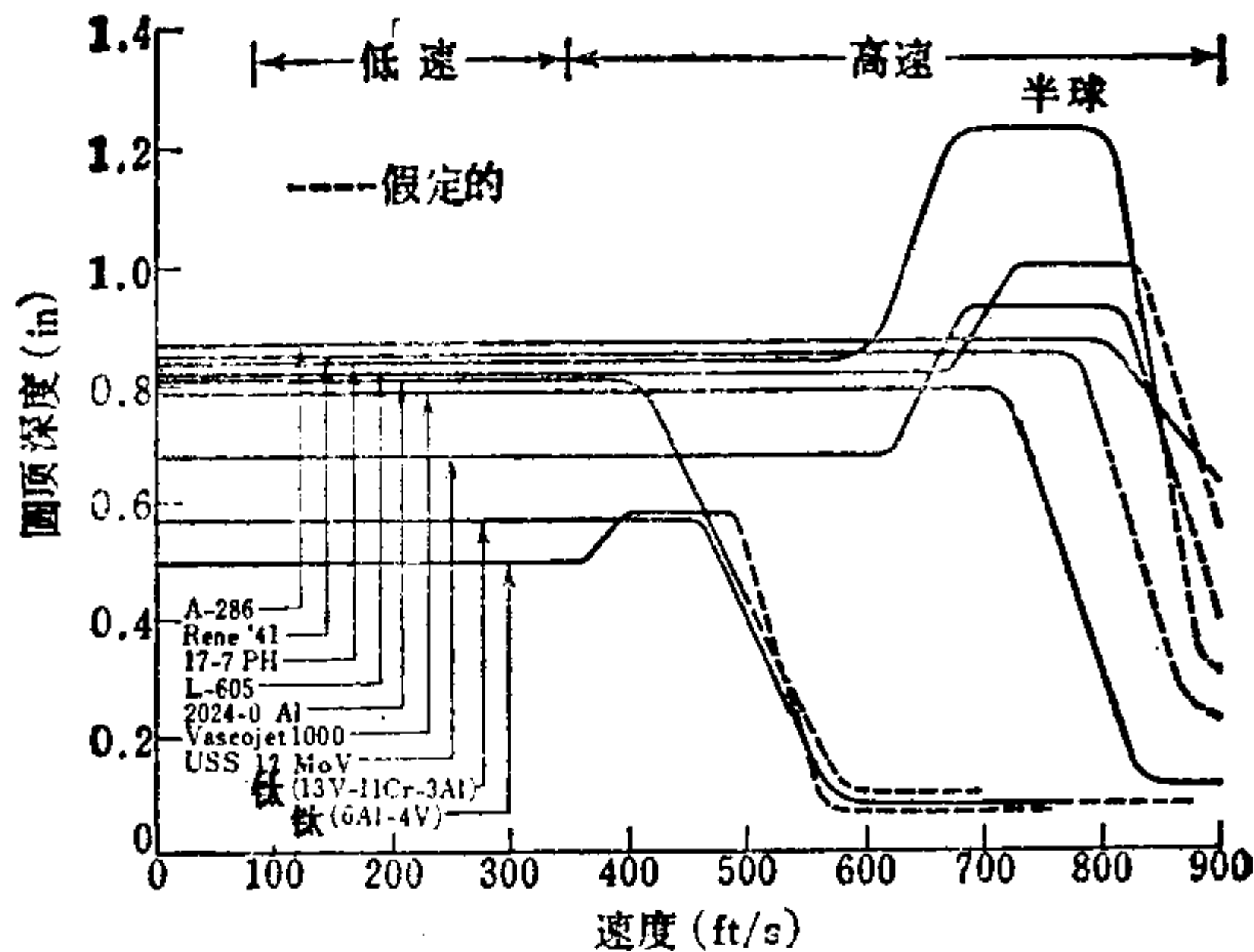


图4.309 圆顶深度和加工速度的关系

速爆炸成形、水中放电成形和电磁成形等高能高速加工领域中显示出最大的延展性。

d. 放电成形 [191~195]

(i) 概述 液中放电成形与水中爆炸成形有许多共同点, 例如加工机理和加工后对试料的物理性能及机械性能的影响等, 两者极为相似。早在 1938 年苏联的 Yutkin 就提出过把在水中放电产生的高压用到工业方面的方案, 到 1955 年才实现了黄铜管的胀形。此外, 在 1953 年由 Early 和 Dow 等人进行了铜板的冲裁, 1958 年以后研制出了实用化的设备, 可供广泛应用。

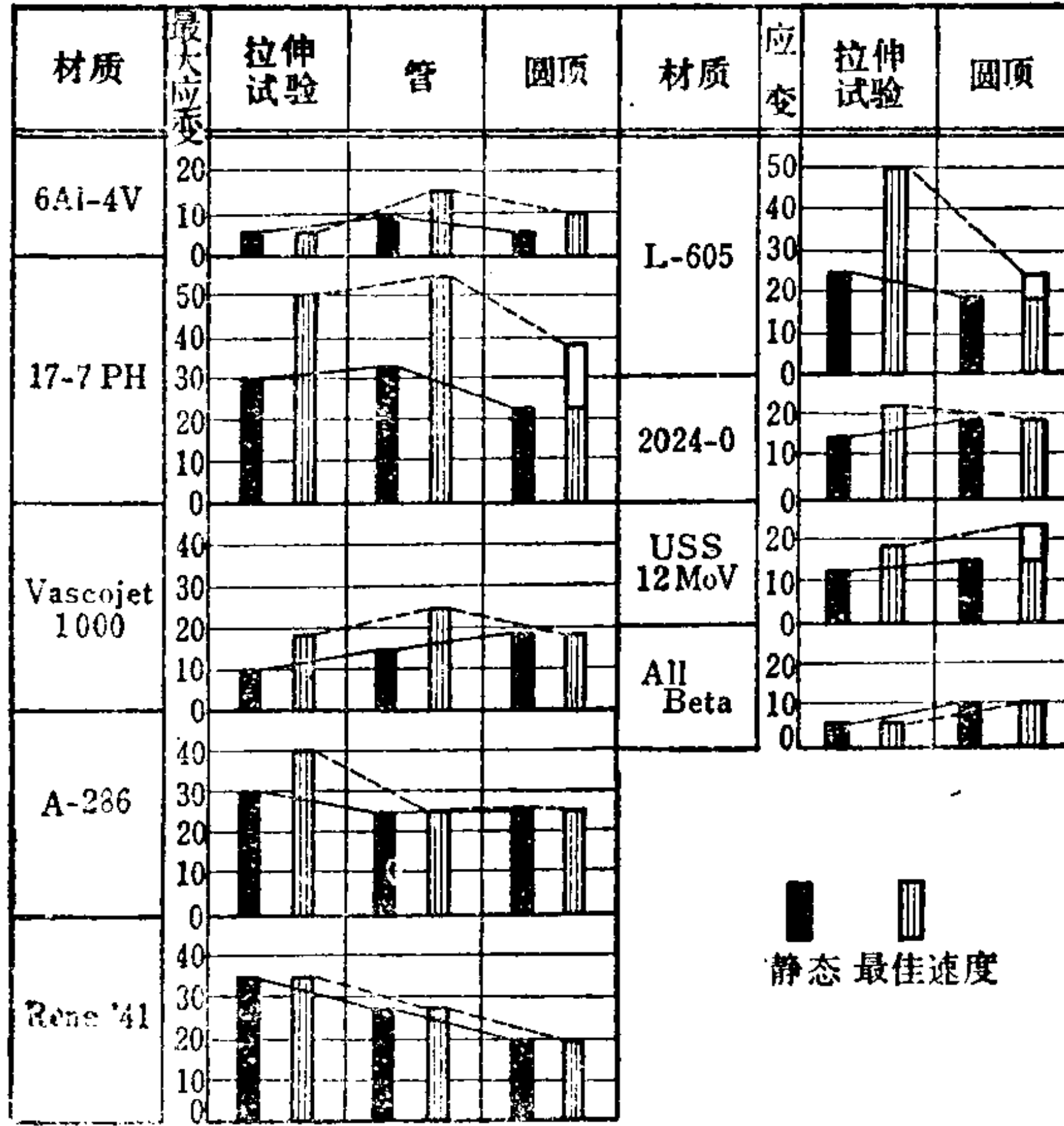


图4.310 对应于实验用试样的形状及材质的最大应变

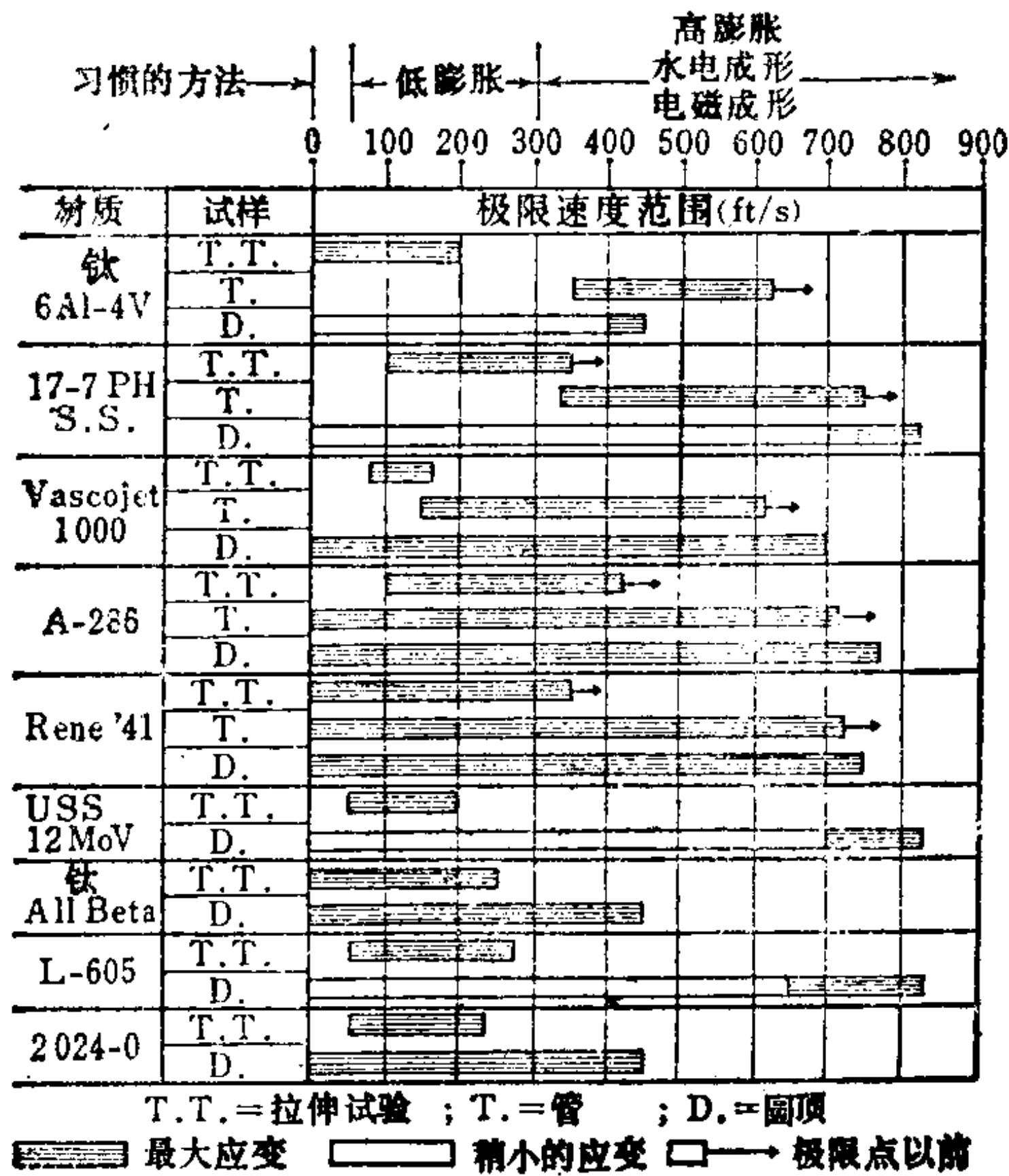


图4.311 在室温下的最佳速度范围

放电成形是利用储存在电容器中的电能作为能源代替爆炸成形中使用的炸药，使其在放电回路中进行瞬时放电。即使放置在液体中的电极之间产生火花放电，利用放电时发生的高压（由冲击波和喷射流产生的冲击能）和产生的气泡压力来加工试料。

优点：（1）压力的大小容易用电气方法来控制；（2）电极能达到的地方均可成为压力源；（3）用简单的方法即可得到非常大的压力；（4）无论什么样的形状均可一次成形等。

图 4.312 [196] 所示为放电电流 $I(t)$ 和放电电压 $V(t)$ (t 为时间) 的时间特性，图 4.313 [197] 为放电

$$能量 W = \int_0^t I(t)V(t)dt$$

的时间特性。放电能量主要转化为冲击波的能量 W_s 、热能 W_r 、辐射能 W_k 和化学变化能 W_i 。例如，在

$V_0 = 40kV, C_0 = 130\mu F$ 的条件下，放电初期各种能量的概算比值是： $W_s = 20.5\%$ ； $W_r = 31\%$ ； $W_i = 48.5\%$ ， W_k 可以忽略不计。在放电加工时主要是利用由 W_s 转变的机械能，因为 W_s 与放电电流上升率 $i = (dI/dt)$ 成正比，如果提高 i ，能率就可改善。为此可采取下列各种方法：减小放电回路的电抗；提高电压；增大放电间隔；将电极尖端磨尖减少放电面积；在电极间拉起细导

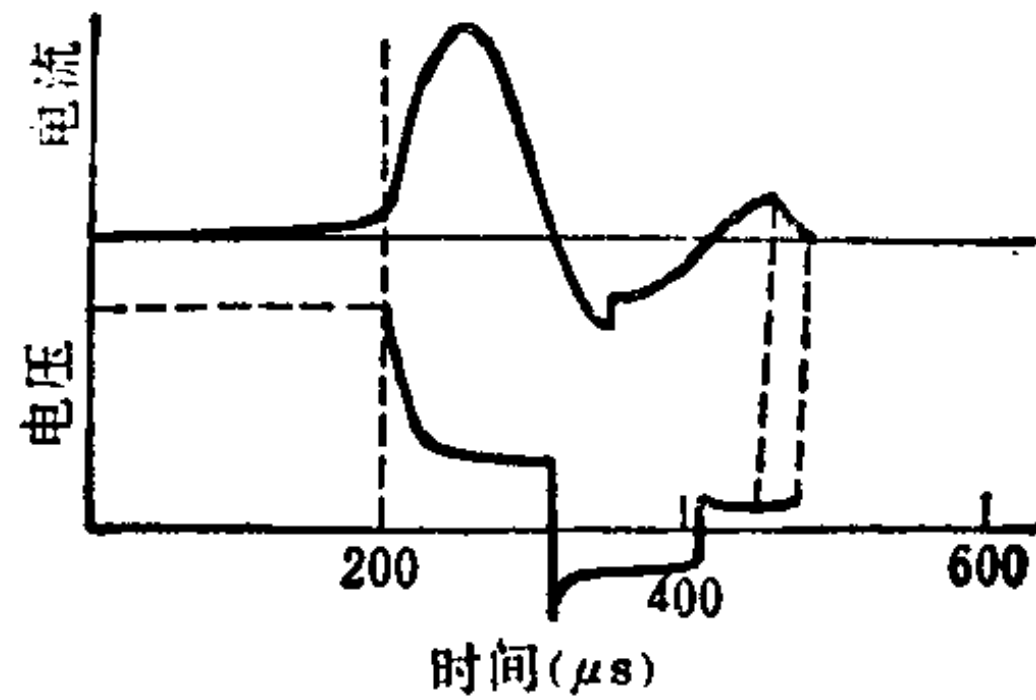


图4.312 放电电流和电压的时间特性

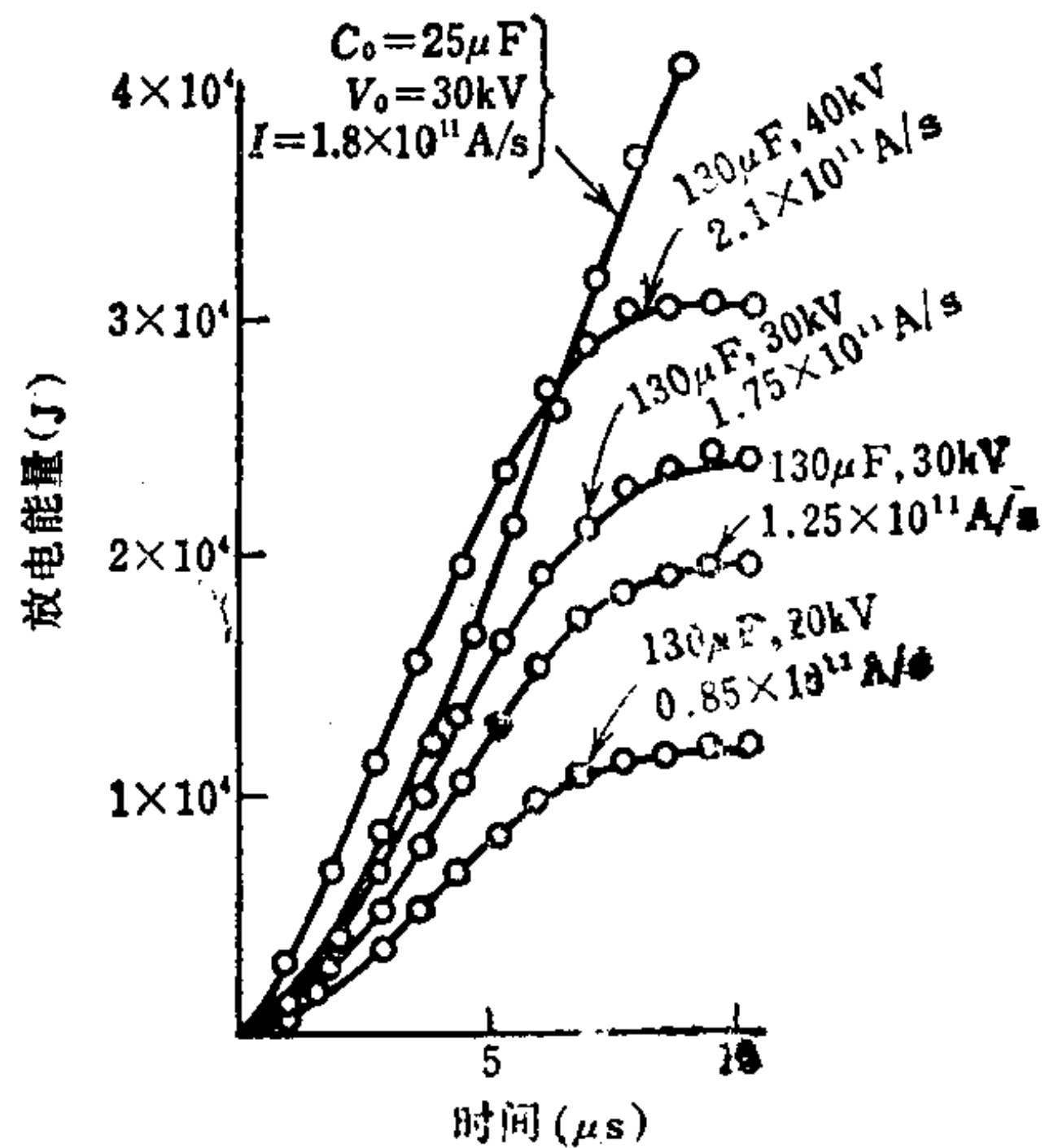


图4.313 放电能量的时间特性

C_0 : 电容器容量 V_0 : 放电电压
 $I = dI/dt$ I : 放电电流

线使放电电路容易构成；考虑选择液体的性能等。图 4.314~图 4.316〔198~200〕所示为几种放电加工的装置。

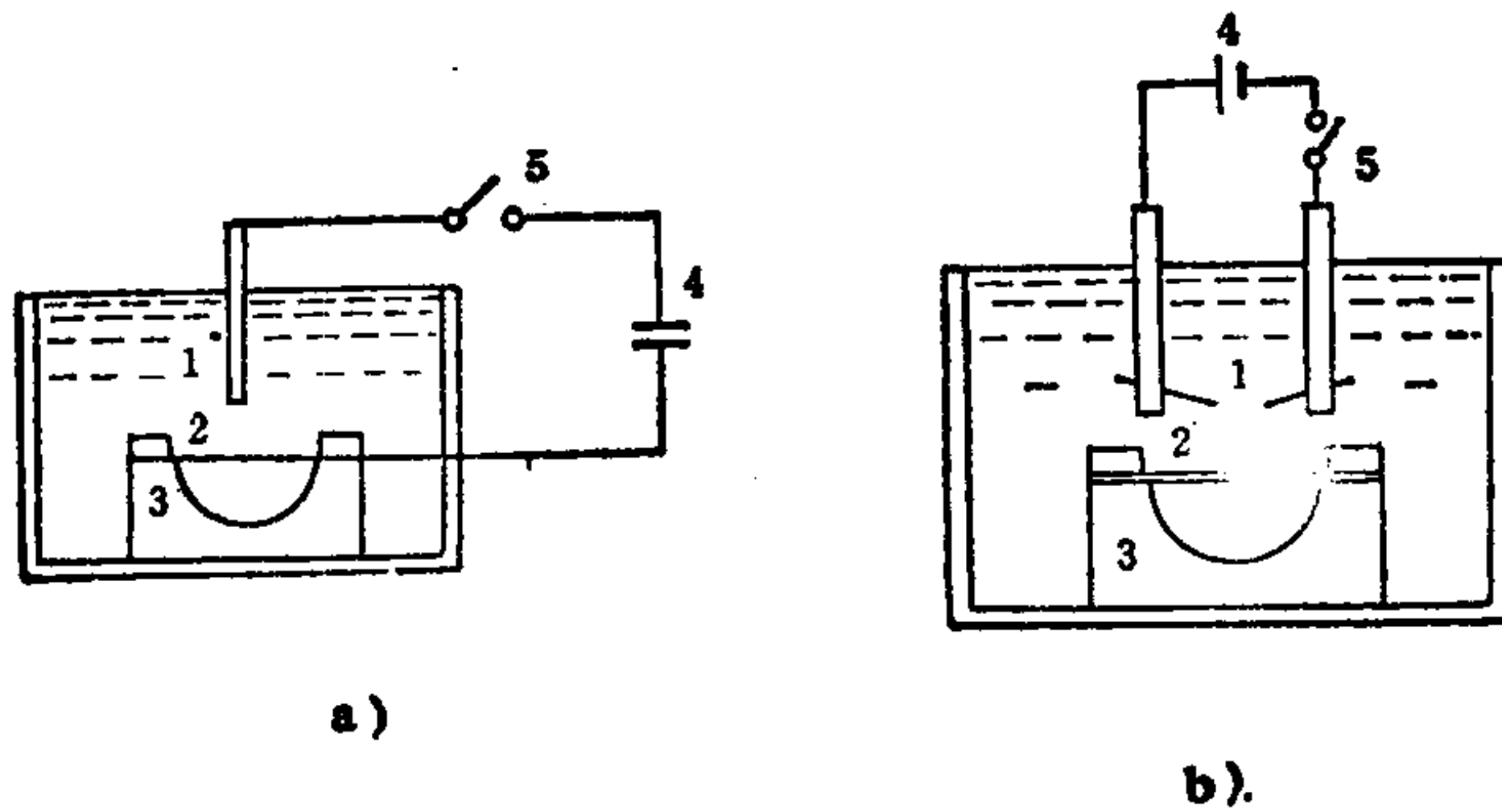


图4.314 放电成形的电极形式

a) 单极式电极 b) 双极式电极
1—电极 2—板坯 (兼作电极) 3—模具 4—电容器 5—开关

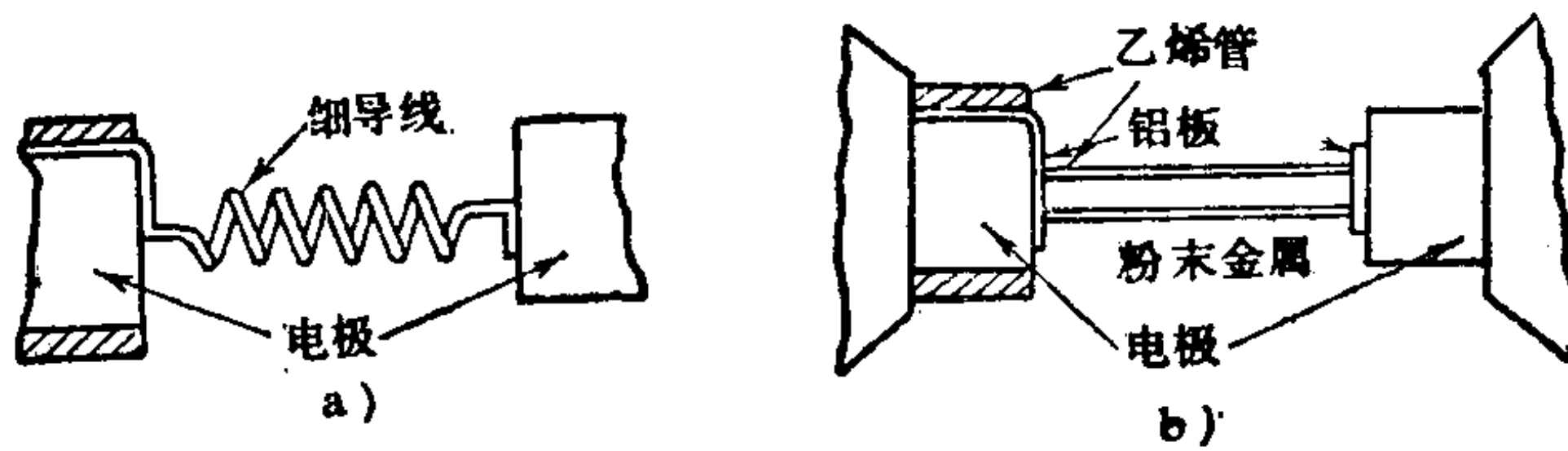


图4.315 导线及金属粉末放电法

a) 导线放电法 b) 粉末金属放电法

(ii) 放电成形机及其制件 现在日本已经有几家公司在市场上出售放电成形机。表 4.51 所示为具有代表性的放电成形机用的电容器规格。表 4.52 所示为美国各公司的放电成形机规格。

图 4.317~图 4.319 为利用这些放电成形机制造的制件示例。图 4.317 为波纹管 and 皱纹管,图 4.318 为蛇形泵的转子(SUS 304, 壁厚 3 mm), 图 4.319 为管状软轴(飞机零件)。此外还有作冲裁加工和管子衬里加工的。今后的问题将是怎样把这种成形机与大量生产方式结合起来。

e. 电磁成形〔201~203〕

表4.51 放电成形机电容器的规格示例

项 目	内 容
型 式	OBI-J 60AW
额定电压	30kV DC
额定试验电压	50kV DC
静电容量	5 μ F
残余电感	0.6 μ H以下
放电循环时间	2次/分
寿 命	10 ⁶ 次以上
端子绝缘电阻	3000M Ω 以上
端子外箱间绝缘电阻	5000M Ω 以上
使用温度	-10~40 $^{\circ}$ C
损 失	1.0%以下(1 kHz)

表4.52 美国各公司的放电成形机

公 司 名 称	电压 (kV)	能量 (kJ)	充电时间 (s)	形式
Cincinnati Shaper Corp.		24	18	立式
Electrohydraulic Corp.		121		
General Dynamica	(7.5 8.3	48	30	立式
General Electric		15		
Marshall Space Flight Center	35	30	5	卧式
Republic Aviation Corp.	27			
Rohr Corp.	30	240		
	(18 18	39		
		155		
	18.5			卧式

(i) 原理 电磁成形与水中放电成形一样, 是利用储存在电容器中的电能进行高能高速成形的一种方法(图4.320)。如果在空气中装上线圈代替水中的电极就能进行电磁成形。

当图4.320a)上的开关一旦闭合, 就有强大的瞬时电流流过线圈, 这时如果把电气绝缘物体放在线圈中, 线圈中就会产生均匀的强磁场。假如磁通密度是均匀的, 则磁场中单位体积的能量是 $B^2/8\pi\mu\text{erg}$ (μ 为导磁率), 因而在 $B = 1\text{MGauss}$ 时, 在空气中就能发生大约 $4 \times 10^4\text{kgf/cm}^2$ 的压力。

目录
正文