越星公司制作 请尊重作者版权

第6篇

焊接、切割与胶接

超星公司制作 请尊重作者版权

主编单位　机械工业部哈尔滨焊接研究所

编写单位　机械工业部哈尔滨焊接研究所　天津大学　哈尔滨工业大学　哈尔滨锅炉厂　成都电焊机研究所　河北工学院　西北工业大学　大连铁道学院　中船总公司洛阳725所　北京航空航天大学　沈阳金属研究所　冶金工业部钢铁研究总院　哈尔滨汽轮机厂　山东工业大学　广州有色金属研究院　中国有色金属新金属公司　湖南大学　清华大学　浙江大学

主　　编　夏丕旭

副 主 编　潘大吉

编 写 人　夏丕旭　张文钺　田锡唐　陈裕川
周大中　宁斐章　彭程强　李致焕
贺跃华　任希凡　郑恩贵　张振逵
庄鸿寿　郑笔康　尹士科　闵成德
李　彦　杨建华　张修智　刘士胄
王者昌　于尔靖　郝世海　虞觉奇
刘克非　包芳涵　牛济泰　益晓苏
钟国柱　殷树言　宋宝天　张金昌
孟昭光　李树贤　张志谦

主　　审　周振丰

能量公司制作请尊重作者版权

第1章 概 论[1][2]

1 焊接、切割与胶接在国民经济中的地位及作用

对金属材料而言，切割与焊接加工，人们普称是"钢铁裁缝"。据统计，占世界总产量50%～60%的钢都是经过焊接加工才投入使用的。在传统工业中，如机械制造、造船、能源、交通、石油、化工、核工业、航空、航天、建筑等制造领域，焊接与热切割作为一种最基本的加工手段，已获得极广泛的应用。没有这两种工艺手段的应用，现代化优质高效机械产品的生产已几乎是成为不可能。随着高新技术、新材料工业的发展，焊接技术已在微电子工业、表面工程及新材料工程中发挥着特殊的加工制作作用，被加工的对象也跨出了金属材料范围而扩大到了各种非金属材料领域。相应热切割技术，也在这些领域发挥了不可缺少的、配套的作用。

胶接与焊接、机械连接（铆接、螺栓、螺钉连接）统称为三大连接技术。随着非金属材料的发展，胶接正在日益广泛地发挥其独特的连接作用。

2 焊接、切割与胶接工艺方法原理、分类及适用范围

焊接连接是由于在被焊材料之间建立了原子间的联系而实现的。根据焊接过程中达到建立原子间联系所获能量来源的不同，把焊接方法又分成了熔焊、压焊及钎焊三大类，每大类方法的原理、工艺手段类别及其适用范围列于表6·1-1。

热切割（简称切割）是利用热能使材料分离的加工方法。根据采用热能种类及方式的不同，现已发展成多种热切割方法，采用这些方法，几乎可切割所有的工程材料（表6·1-1）。

胶接是利用胶粘剂通过化学或物理方法使其固化，以获得足够强度接头的一种连接方法。胶接接头为面际连接，应力分布均匀；接头密封性好，采用胶-焊、胶-铆、胶-螺等复合连接，可以提高接头承载能力和密封性。此外，接头还具有绝缘、防腐等特点。

表6·1-1 焊接、切割与胶接方法原理、分类及适用范围

类别	连接方法名称	方法原理	方法分类	特点及适用范围
焊接	熔焊	将焊件接头加热至熔化状态，不加压力以完成焊接的方法	气焊、手工电弧焊、埋弧焊、气体保护焊、电渣焊、等离子弧焊、电子束焊、激光焊等	机械制造业中所有同种金属、部分异种金属及某些非金属材料的焊接。是最基本的焊接方法，在焊接生产中占主导地位
	压焊	对焊件通过施加压力（加热或不加热），以完成焊接的方法	电阻焊（对焊、缝焊、点焊、凸焊）、摩擦焊、冷压焊、扩散焊、高频焊、爆炸焊、超声波焊等	电阻焊在压焊中占主导地位，主要用于汽车等薄板构件的装配、焊接；摩擦焊更适于圆形、管形截面工件焊接，正逐步代替闪光对焊
	钎焊	利用熔点比焊件低的钎料与焊件共同加热至钎焊温度（高于钎料熔点，低于焊件熔点），液态钎料润湿母材，填充接头间隙并与母材相互扩散以实现连接的方法	烙铁钎焊、火焰钎焊、电阻钎焊、感应钎焊、浸沾钎焊、炉中钎焊	适用于金属、非金属、异种材料之间的钎焊，可焊接复杂结合面的工件，焊接变形小
切割	气体火焰切割	利用火焰把金属表面加热到燃点打开切割氧，使金属燃烧并放出热量，同时将氧化熔渣从切口吹掉，从而实现金属的切割	气割、氧熔剂切割、火焰气刨、火焰表面清理、火焰净化、火焰穿孔	凡燃点低于熔点的金属，均可用氧进行火焰切割及表面清理，附加熔剂后可切割不锈钢、铸铁、其他合金或矿石

版权所有 重作者请勿制作公司

（续）

类别	连接方法名称	方法原理	方法分类	特点及适用范围
切割	气体放电切割	利用电弧或等离子弧迅速熔化金属，借助氧或空气立即吹掉形成切口以实现金属的切割	等离子弧切割、电弧—压缩空气气刨、电弧—氧切割	适于切割所有金属及非金属材料，电弧—气刨适于清除各类缺陷
	束流切割	利用束流能量排除被切物以形成切口，从而实现材料的切割	激光切割、电子束切割、水射流切割	适于切割所有金属及非金属材料，切口精度高
胶接		利用胶粘剂通过化学或物理方法使胶粘剂固化以获得足够强度以实现连接的方法	胶接、胶补、胶接—铆接、胶接—螺接、胶接—点焊	适于连接金属、非金属之间同种或异种材料

3　焊接、切割与胶接发展趋势

1. 焊接结构应用领域不断扩大　焊接作为一种具有很好柔性的制造工艺方法，它可以保证结构设计中先进构思的很好实现。可以采用不同类型的材料、设计、制造出各种类型的、各具使用特性的结构产品，其中包括对已采用焊接结构的老产品进一步改进设计和原来非焊接结构产品，合理改变为焊接结构产品（包括采用铸-焊、锻-焊、型材拼焊等复合工艺），从而减轻结构重量，提高结构效能，取得显著经济效益。

2. 发展配套焊接材料　优质、高效的焊接与热切割技术将得到迅速推广与进一步发展，必然相应发展配套的焊接材料。开发、推广气体保护焊、窄间隙焊、高效堆焊及电阻焊技术；开发、推广火焰精密切割及空气等离子切割；完善、提高经济型数控火焰切割，研究开发数控激光切割及数控等离子切割；发展多品种、规格的实心焊丝、药芯焊丝、自保护药芯焊丝、药芯带极及高效铁粉焊条、重力焊条等。

3. 焊接生产过程的机械化与自动化　这是提高焊接结构产品质量、生产效率及经济效益的必由之路。因此，常规焊接生产技术将被迅速改造，实现以专用焊接设备为主，包含一定柔性自动化装备内容的焊接生产过程“低成本自动化”；或根据生产规模，合理组织焊接生产线与采用焊接机器人，不断提高焊接机械化自动化水平。

4. 开发特种焊接技术及连接技术　随着高新技术、新材料工业的发展，需要研究、开发特种焊接技术及连接技术，开发研究焊接新能源、新材料、新工艺以及新的检测手段，使其得到配套发展，以适应对接头质量、经济性与可靠性提出越来越高的要求。

第2章　熔焊冶金特点[3][4]

熔焊冶金过程按反应的阶段可分为：液相冶金、凝固冶金和固相冶金。

1　液相冶金

1·1　液相冶金特点

电弧焊与一般炼钢液相冶金反应相比，具有反应区温度高（弧柱温度达6000～8000K）、熔化金属与气相、熔渣的接触面积（即比表面积）大、反应时间短等特点。钢焊接时液相冶金反应的某些物理条件如表6·2-1。

表6·2-1　钢焊接时液相冶金反应的物理条件

	比表面积 (m^3/kg)	温度 (℃)	相间接触时间 (s)
熔滴	$(1\sim10)\times10^{-3}$	1800～2400	0.01～1.0
熔池	$(0.25\sim1.1)\times10^{-3}$	1770±100	6～40
炼钢	$(1\sim10)\times10^{-6}$	1600～1700	$(1.8\sim9)\times10^{3}$

熔焊冶金反应时间虽短，但温度很高，各相间的接触面积大，加速了冶金反应，同时也增加了合金元素的

超星公司制作请尊重作者版权

烧损和蒸发。

一般认为，焊接冶金反应多数没有达到平衡，但很接近平衡，特别是气相中的反应，几乎达到平衡。

1·2　焊缝金属中的杂质及其控制

1·2·1　氢、氧、氮对焊缝金属的影响

焊接区内气相的成分，随着焊接方法、工艺条件、药皮或焊剂的种类不同而变化。各种反应的气相成分主要有 CO、CO_2、H_2、H_2O、N_2、O_2 等。其中对焊接金属产生不利影响的条件主要是 H_2、O_2 和 N_2。

1. 氢的影响及其控制　氢与金属的作用大体分为两类：第一类是形成稳定的氢化物金属，如 Zr、Ti、V、Ta、Nb、(ZrH_2、TiH_2、VH、TaH、NbH_2)等。第二类是不形成稳定氢化物的金属，如 Fe、Ni、Cu、Cr、Al 等，氢在这些金属中形成间隙固溶体而促使脆化。氢在 Fe、Ni、Cu、Al 中温度与溶解度的关系如图 6·2-1。

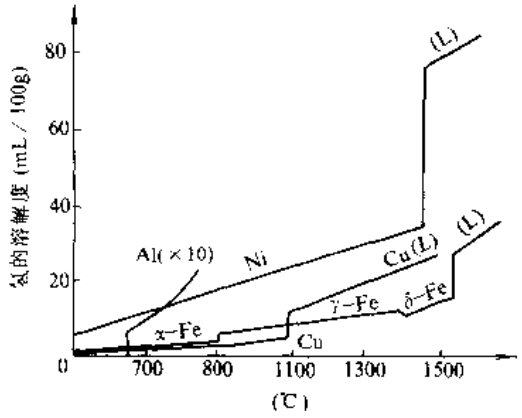


图 6·2-1　氢在各种金属中温度与溶解度的关系

氢的原子半径很小($r=0.053$nm)，即使在常温条件下，也能在金属中自由扩散，直至逸出金属表面，这部分氢称为“扩散氢”。残留在金属晶格中的氢称为“残余氢”。不同焊接方法及焊条焊接碳钢时，熔敷金属中的氢含量如表 6·2-2。

氢的有害影响包括以下四个方面：

a. 形成气孔　熔池结晶时氢的溶解度突降，使氢在焊缝中处于过饱和状态，并发生 $2[H]\rightarrow H_2$ 的反应。当氢来不及逸出时，残留在金属内部而形成气孔。

b. 形成白点　碳钢和低合金钢焊缝，如含有较多的氢，当焊后不久进行力学性能试验时，在试验断面常出现光亮圆形的白点，其直径 0.1～2mm。在某些情况下，白点的中心有夹杂(或气孔)，呈现鱼眼状，故又称“鱼眼”。

表 6·2-2　碳钢焊接时熔敷金属中的氢含量

(mL/100g)

焊接方法		扩散氢	残余氢	总氢量	备　注
手工电弧焊	纤维素型焊条	35.8	6.3	42.1	按GB3569—83测氢
手工电弧焊	钛型焊条	39.1	7.1	46.2	按GB3569—83测氢
手工电弧焊	钛铁矿型焊条	30.1	6.7	36.8	按GB3569—83测氢
手工电弧焊	氧化铁型焊条	32.3	6.5	38.8	按GB3569—83测氢
手工电弧焊	低氢型焊条	4.2	2.6	6.8	按GB3569—83测氢
埋弧焊		4.40	1～1.5	5.90	在 40～50℃停留 48～72h 测定扩散氢；真空加热测定残余氢
CO_2 气体保护焊		0.04	1～1.5	1.54	在 40～50℃停留 48～72h 测定扩散氢；真空加热测定残余氢
氧-乙炔焊		5.00	1～1.5	6.50	在 40～50℃停留 48～72h 测定扩散氢；真空加热测定残余氢

白点和氢气孔的成因均与氢的扩散和聚集有关。白点对焊缝强度影响不大，但对塑性、韧性有较大的影响。

c. 形成氢脆　氢在室温附近使钢的塑性发生严重下降的现象称为氢脆性。一般认为是原子氢扩散聚集在金属晶格缺陷内(如位错、空位等)，结合成分子氢，造成局部高压区，阻碍塑性变形而造成氢脆。在较高温度下，氢可迅速逸出；在很低温度下，会抑制氢的扩散，都不会引起氢脆。只有室温或稍低于室温的情况下才发生氢脆。

d. 形成冷裂纹　氢的有害作用给焊接生产带来很大的困难，特别是冷裂纹会造成灾难性事故。因此，必须采取降氢措施，如采用低氢的焊接方法(如 CO_2 气体保护焊)，选用低氢焊接材料(如低氢型焊条)，焊条、焊剂充分烘干、焊前预热、焊后热处理(或脱氢处理)以及焊件和焊丝仔细清理等。

2. 氧的影响及其控制　氧在焊缝中多以 FeO 和硅酸盐夹杂物的形式存在，对焊缝金属有许多不利的影响，如降低焊缝的强度、硬度、塑性(特别是韧性)，引起冷脆、热脆，时效硬化，提高脆性转变温度。此外，还降低焊缝的耐蚀性、电导性和磁导性，焊接时易造成飞溅，形成不溶于金属的 CO 和 H_2O 而产生气孔。碳钢及低合金钢焊接时焊缝中的氧含量如表 6·2-3。

表 6·2-3　用各种方法焊接时焊缝的氢含量

材料及焊接方法	平均氢的质量分数(%)	材料及焊接方法	平均氢的质量分数(%)
低碳钢埋弧	0.003～0.008	纤维素型焊条	0.30
低碳钢埋弧	0.010～0.029	氧化铁型焊条	0.122
H08焊丝	0.01～0.02	铁粉型焊条	0.093
H08光焊丝	0.15～0.30	埋弧焊	0.03～0.05
低氢型焊条	0.02～0.03	电渣焊	0.01～0.02
钛铁矿型焊条	0.101	气焊	0.03%～0.05
钛钙型焊条	0.05～0.07	CO_2气体保护焊	0.02～0.07
钛型焊条	0.065	氩弧焊	0.0017

控制焊缝氢含量的一般措施：

(1)采用无氢焊剂、无氢焊条，采用惰性气体保护焊或在真空中焊接。有些情况下则要求采用高纯度的母材和焊丝。

(2)焊件和焊丝要仔细清理，施焊时尽量采用短弧，提高保护效果。

3. 氮的影响及其控制[3]　碳钢焊缝中含氮量较高时会使强度增高、塑性、韧性下降，甚至引起氮气孔。氮在铁素体钢中溶解度很低(0.001%)，多余的氮主要以Fe_4N的形式存在。在正常情况下，焊缝的氮含量都很低，不会起有害作用。焊接碳钢和低合金钢时，焊缝中的氮含量如表6·2-4。

表 6·2-4　用各种方法焊接低碳钢时焊缝的氮含量

焊接方法		N的质量分数(%)	焊接方法	N的质量分数(%)
手工电弧焊	光焊丝	0.08～0.228	埋弧焊	0.002～0.007
	纤维素型焊条	0.013	CO_2气体保护焊	0.008～0.015
	钛型焊条	0.015	气焊	0.015～0.020
	钛铁矿型焊条	0.014	氩弧焊	0.0068
	低氢型焊条	0.010	药芯焊丝明弧焊	0.013～0.04
			实心合金焊丝自保护焊	<0.12

1·2·2　硫、磷对焊缝金属的影响

1. 硫的影响及其控制　硫在焊缝中会增加热裂纹倾向，同时降低韧性和耐蚀性。焊缝中碳含量高时，加剧硫的偏析而使热裂纹倾向增大。锰能抑制硫的有害作用，提高渣的碱度也有利于脱硫。

2. 磷的影响及其控制　磷能提高铁素体钢焊缝的脆性转变温度，增加钢的冷脆性。除在钢焊缝中，特别是铬镍奥氏体钢及合金的焊缝中，也同样增加热裂纹倾向。焊接时利用冶金反应脱磷的效果不显著，主要是限制母材、焊丝、焊条、焊剂中的含磷量，以防止磷的有害作用。

近年来由于冶炼技术的进步，开发出许多精炼钢(如CF钢[㊀]、平台钢等)，硫、磷的质量分数均可控制在0.01%以下，因此硫磷的有害作用已得到有效地控制。目前一般的低碳钢、低合金钢和相应的焊接材料用钢，硫磷的质量分数也控制在0.03%以下。

2　凝固冶金

2·1　焊接熔池结晶的特点

焊接熔池结晶与一般钢锭的结晶相比有以下特点：在手工电弧焊的条件下，由于熔池的体积小，而周围又被冷金属所包围，所以熔池的冷却速度很快，平均约为4～100℃/s。而钢锭的冷却速度，约为$(3\sim150)\times10^{-4}$℃/s，两者相差10000倍左右。第二个特点是熔合线上局部熔化的母材晶粒成为熔池的结晶核心，形成焊缝金属与母材金属长合在一起的"联生结晶"，见图6·2-2。伴随熔池结晶，焊缝中产生枝晶偏析和区域偏析。此外，在熔池结晶过程中，非金属夹杂物和气泡来不及完全浮出时，有可能产生夹杂和气孔。第三个特点是熔池在运动状态下结晶，晶粒在成长过程中有停顿现象。这种断续结晶将导致焊缝中出现层状结晶组织，从焊缝表面上看呈鱼鳞状的波纹。

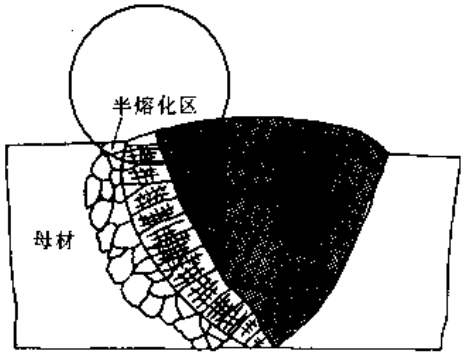


图 6·2-2　熔合区的联生结晶

焊缝中如有少量细化晶粒元素，如Ti、V、Mo、Nb、Al、N等可形成弥散的结晶核心，从而使焊缝晶粒细化，提高强度和韧性。

采用多层焊会使每层之间具有依次热处理的作用，因而改善了二次组织。

㊀　无裂纹钢。

熊星公司制作 请尊重作者版权

超星公司制作 请尊重作者版权

此外，机械振动、超声振动(2 万次/min 以上)，锤击焊缝表面及电磁搅拌作用等均程度不同地细化焊缝晶粒。

2·2　热裂纹

热裂纹是焊接时高温下产生的，故又称高温裂纹，其特征是沿原奥氏体晶界开裂。根据所焊的金属材料不同(碳钢、低合金钢、不锈钢、铸铁、铝合金和某些特种金属等)，产生的热裂纹形态、温度区间和主要原因也各有不同。按目前比较普遍的分类可分为：结晶裂纹、热影响区或层间液化裂纹和多边化裂纹。

2·2·1　结晶裂纹

结晶裂纹是热裂纹中最常见的一种，发生在焊缝金属结晶过程中的固相线温度附近，具有晶间破坏的特性。在焊缝结晶过程中，由于凝固金属的收缩，残余液态金属不能及时补充，在应力作用下发生沿晶开裂。

结晶裂纹主要发生在含杂质较多的碳钢、低合金钢焊缝中(含 S、P、C、Si 偏高)和单相奥氏体钢、镍基合金以及某些铝合金的焊缝中。在结晶后期，含杂质较多的低熔液相被排挤在晶界上，形成液态间层，如图 6·2-3。在液态间层存在的温度区间内，当拉伸变形超过了晶界液态间层的变形能力，又得不到液相的补充时，就可能沿此薄弱地带形成结晶裂纹。

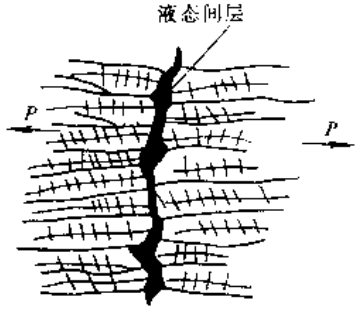


图 6·2-3　液态间层示意图

防止结晶裂纹的措施主要是限制原材料(包括母材、焊丝、焊条、焊剂、保护气体等)中有害杂质的含量，特别是硫、磷、碳，其次是硅、铅、锌、铜等。适当地增加锰，对防止结晶裂纹是有效的。

2·2·2　液化裂纹

某些含较多低熔共晶的被焊金属，在焊接热循环的作用下，近缝区或多层焊的层间会重新熔化，在拉伸应力的作用下沿晶界发生开裂。液化裂纹主要发生在含杂质较多的高强钢、奥氏体钢，以及某些镍基合金的热影响区或多层焊的层间部位。

2·2·3　多边化裂纹[5]

某些纯金属和单相奥氏体合金焊接时，焊缝或热影响区在固相线稍下的高温区间，由于刚凝固的金属中存在许多晶格缺陷(位错和空位等)及严重的物理和化学不均匀性，在一定温度和应力作用下，由于这些晶格缺陷迁移和聚集，形成了二次边界，即多边化边界。因在该边界上堆积了大量的晶格缺陷，所以其性能很差，高温时的强度和塑性都很低，只要有轻微的拉伸应力，就会沿多边化的边界开裂，产生多边化裂纹。

母材和焊缝中含有能提高多边化激活能的元素(如 Mo、W、Ti、Nb、Ta 等)，则可有效地阻止多边化过程，从而降低多边化裂纹倾向。

2·3　气孔及其防止

气孔是熔焊中比较常见的缺陷。气孔的类型也比较多，有表面气孔、内部气孔，有时单个分布，也有时成堆密集，还有时弥散分布。产生气孔的根本原因是由于高温时金属溶解了较多的气体(氢和氮)。另外，冶金反应时又产生了较多的气体(如 CO、H_2O 等)，这些气体在焊缝结晶过程中来不及逸出时就会产生气孔。

由氢和氮引起的气孔称为第一类气孔，这类气孔多在焊缝表面上出现，且呈圆喇叭口形，气孔的断面有如螺钉状。氮气引起的气孔常在表面上成堆出现，呈蜂窝状。由 CO(或 H_2O)引起的气孔称为第二类气孔。这类气孔多出现在焊缝内部，气孔的断面有如条虫，表面光滑并沿结晶方向分布。

防止气孔的方法：对于氢气孔应减少氢源和适当增加氧化性；对于 CO 气孔应在熔池中适当增加脱氧元素。生产上比较有效的措施是仔细烘干焊条、焊剂，焊前仔细清理焊件表面和焊丝的油污铁锈。另外，注意施焊环境的湿度、焊接规范稳定和运条适当摆动等均有助于防止气孔。

3　固相冶金

焊接固相冶金是研究焊缝完全凝固以后，经过组织转变的焊接接头组织性能和产生缺陷的有关规律，也称为物理冶金。

3·1　焊接热影响区

熔焊时在热源的作用下，焊缝两侧发生组织性能

超星公司制作请尊重作者版权

变化的区域称为“热影响区”或称“近缝区”。由于焊接时热影响区距熔合线的远近不同，所以各点所经历的焊接热循环不同，这就会出现不同的组织，因而也就具有不同的性能，故焊接热影响区的组织性能是不均匀的。

3·1·1　焊接热影响区的组织分布

母材的化学成分和热处理状态对焊接热影响区的组织分布有重要影响。对于一般常用的低碳钢和某些低合金钢（如16Mn、15MnV等），焊接热影响区的组织可分以下四个区（如图6·2-4）。

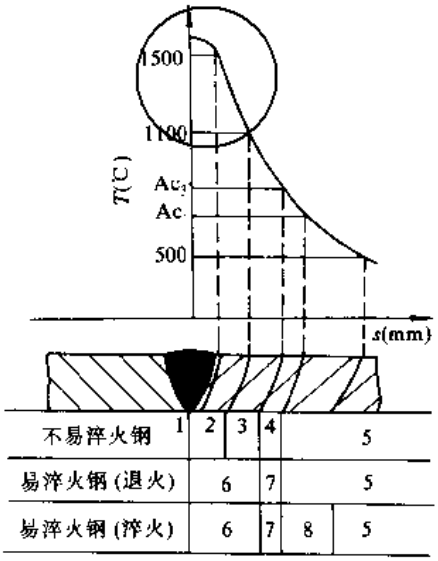


图6·2-4　焊接热影响区的组织分布

1—半熔化区　2—过热区　3—相变重结晶区　4—不完全重结晶区　5—母材　6—淬火区　7—部分淬火区　8—回火区

1. 半熔化区　焊缝与母材相邻的部位，温度处于固液相线之间。

2. 过热区　此区的温度范围处于固相线以下到1100℃左右，金属处于过热状态，奥氏体晶粒发生严重的长大，故又称粗晶区。

3. 相变重结晶区　焊接时母材被加热到Ac_3稍高的温度，将发生重结晶，然后在空气中冷却，将会得到均匀而细小的珠光体和铁素体，相当于热处理时的正火组织，故又称正火区。

4. 不完全重结晶区　焊接时母材被加热在Ac_1～Ac_3之间的范围内，就是属于不完全重结晶区。在该温度范围内只有一部分组织发生相变重结晶，成为细小的铁素体和珠光体，而另一部分（即未发生重结晶部分），成为粗大的铁素体。所以此区特点是晶粒和组织不均匀。

以上这四个区是低碳钢、低合金钢焊接热影响区中主要的组织特征。

焊接热影响区的大小受许多因素的影响，如焊接方法、板厚，线能量，以及不同的接头型式和施工工艺等。不同焊接方法焊接低碳钢时热影响区的平均尺寸[5]见表6·2-5。

表6·2-5　不同焊接方法热影响区的平均尺寸

(mm)

焊接方法	过热区	相变重结晶区	不完全重结晶区	总　宽
手工电弧焊	2.2～3.0	1.5～2.5	2.2～3.0	6.0～8.5
埋弧自动焊	0.8～1.2	0.5～1.7	0.7～1.0	2.3～4.0
电渣焊	18～20	5.0～7.0	2.0～3.0	25～30
CO_2气体保护焊	1.5～2.0	2.0～3.0	1.5～3.0	5.0～8.0
TIG焊	1.0～1.5	1.5～2.0	1.5～2.0	4.0～5.5
真空电子束焊	—	—	—	0.05～0.75

对于焊接易淬火钢的正火钢或调质钢，其热影响区的组织分布更为复杂，见图6·2-4。

3·1·2　焊接热影响区的力学性能

采用焊接热模拟试验，化学成分相当于16Mn钢，热影响区不同部位的力学性能如图6·2-5。当峰值温度Tm超过Ac_1时，随着Tm增高，强度(σ_b,σ_s)和硬度HV也随之增高，而塑性(δ,ψ)下降。

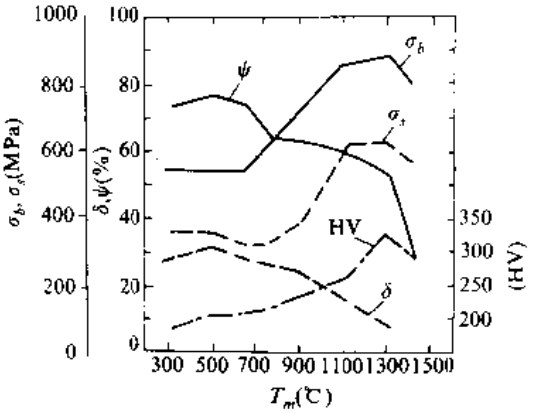


图6·2-5　热影响区不同部位的力学性能

(C、Mn、Si的质量分数分别为0.17%、1.28%、0.40%)

3·2　焊接冷裂纹

3·2·1　冷裂纹的特征

冷裂纹是焊接中高碳钢、低合金高强钢、某些超高强钢、工具钢、钛合金以及铸铁等材料易出现的一种工

超星公司制作 请尊重作者版权

艺缺陷。

焊接冷裂纹有时在焊后冷却到某一温度(一般在Ms点至100℃左右)立即出现,但有时要经过几小时、几天、甚至更长时间才出现。所以冷裂纹具有一定的延迟特征,又称延迟裂纹。冷裂纹多数出现在焊接热影响区,但一些厚大焊件和超高强钢及钛合金也出现在焊缝上。

焊接冷裂纹的类型和分布位置如图6·2-6。

冷裂纹的微观走向有穿晶的,也有沿晶的。但也有时晶间起源,而裂纹扩展是穿晶的,形成了既有穿晶,又有沿晶混合走向的冷裂纹。

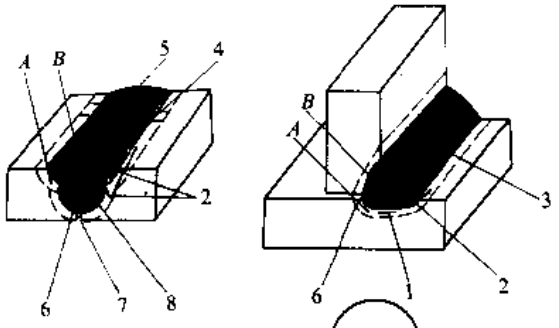


图6·2-6 焊接冷裂纹的类型及分布

A—热影响区 *B*—焊缝金属

1—焊道下裂纹 2—焊趾裂纹 3—焊缝纵向裂纹 4—热影响区横向裂纹 5—焊缝横向裂纹 6—热影响区根部裂纹 7—焊缝根部裂纹 8—过渡区裂纹

3·2·2 冷裂纹的成因

钢种的淬硬倾向,焊接接头的氢行为和接头所承受的应力状态是产生冷裂纹的三大因素。它们之间在一定条件下是相互联系和相互促进的。

1. 淬硬倾向对产生冷裂纹的作用 钢种的淬硬倾向主要决定于化学成分和冷却条件。一些淬硬倾向较大的钢种,焊接时近缝区的加热温度很高(达1350~1400℃),使奥氏体晶粒发生严重长大。当快速冷却时,粗大奥氏体将转变为粗大的马氏体,是一种脆硬的组织,只消耗较低的能量即可发生断裂。因此,焊接接头出现淬硬的马氏体时,就易于产生冷裂纹。

组织对裂纹敏感性的影响大致按下列顺序增加:铁素体(F)或珠光体(P)—— 下贝氏体(Bl)—— 低碳马氏体(Ml)—— 上贝氏体(Bu) —— 粒状贝氏体(Bg)—— 岛状M-A组元(M-A)—— 高碳马氏体(孪晶)(Mh)。

2. 氢对产生冷裂纹的作用[6] 焊接时,焊缝中氢的来源主要是:焊条、焊丝、焊剂及保护气体中的水分,母材上的油污、铁锈以及大气中的水分。在焊接电弧的高温下,水分分解进入熔池。冷却过程中,由于温度及组织转变,氢在焊缝中处于过饱和状态,氢便向周围和热影响区扩散。

焊接接头处于非均质状态,包括微观缺陷(位错与空位)和缺口效应造成的应力集中,因此,氢极力向这些部位扩散并聚集,造成了这些部位易于开裂的条件。当氢的浓度聚集到某一临界值时,在一定应力的作用下,便产生裂纹,此值称为产生裂纹的临界氢含量$[H]_{CR}$。

焊接结构产生冷裂的$[H]_{CR}$值是不同的,与钢的化学成分、板厚、预热和后热温度,以及冷却条件等有关。

钢中的氢含量分为两部分,即残余氢和扩散氢。残余氢量很少,且基本不变,而扩散氢对冷裂纹的起源和扩展起了决定性的作用。由于冷裂纹一般都在Ms点以下产生,可以认为在较高温度下的扩散氢可以从金属中逸出,实际上不会起致裂的作用,只有在较低温度下的扩散氢在局部地区发生聚集后才会起致裂的作用。这部分氢可以称为残余扩散氢$[H]_R$。产生冷裂纹并不是熔敷金属中的所有扩散氢,而只是焊缝冷却到某一较低温度(一般规定为100℃)下的残余扩散氢$[H]_{R100}$。

3. 焊接接头的应力对产生冷裂纹的作用 一般作用在焊接区的应力有以下三种应力:

(1)焊缝和热影响区在不均匀加热和冷却过程中所产生的热应力。

(2)由于焊接接头不均匀组织转变所引起的组织应力。

(3)焊接接头受焊件刚度拘束所引起的拘束应力。

3·2·3 冷裂纹的防止措施

(1)严格控制氢的来源,选用低氢型焊条或碱性焊剂,以及低氢型的焊接方法,如气体保护焊,合理选择焊缝金属的合金成分,从而提高焊缝的塑性储备及抗裂能力。

(2)严格控制焊接线能量,控制$t_{8/5}$(或$t_{8/3}$)。焊前预热,焊后保温缓冷或后热,并控制层间温度,这样会改善组织,有利氢的扩散逸出。

(3)选择合理的焊接顺序,减少焊接内应力。改进焊接接头的设计,降低拘束度,避免应力集中。

3·3 焊接接头的再热裂纹[6][7]

一些重要的大型焊接结构,如核电站的压力壳、厚

超星公司制作 请尊重作者版权

壁容器和潜艇结构等，焊后不可避免地存在不同的残余应力，这些结构在焊后并未出现裂纹，而在热处理或高温服役过程中产生了裂纹，即再热裂纹。

3·3·1 再热裂纹产生的条件及特征

(1)再热裂纹都是产生在焊接热影响区的过热粗晶部位，并且有晶间开裂的特征。

(2)消除应力处理前，焊接区存在较大的残余应力，并有不同程度的集中，二者还需同时存在，否则不会产生再热裂纹。

(3)含有一定沉淀强化元素的金属材料(包括低合金钢、珠光体耐热钢、沉淀强化高温合金以及某些奥氏体不锈钢等)，才具有产生再热裂纹的敏感性。

(4)产生再热裂纹与再热的温度和再热时间有关，存在一个最易产生再热裂纹的敏感温度区间，对于一般低合金高强钢，约在500～700℃之间，随钢种的不同而变化。

3·3·2 再热裂纹产生的机理

焊后再热处理(或高温运行)残余应力松弛过程中，粗晶区应力集中部位的晶界塑性变形量超过了该部位的塑性变形能力，就会产生再热裂纹。

3·3·3 防止再热裂纹的途径

防止再热裂纹的方法一般多采用工艺上的措施：

(1)选用合理的焊接工艺，减小热影响区的过热，细化奥氏体晶粒的尺寸。

(2)减小残余应力和应力集中，如适当提高预热和后热温度，防止各类焊接缺陷造成的应力集中，尽量保持焊缝平滑过渡。

(3)选用合适的焊接材料，提高焊缝金属在消除应力处理温度时的塑性，以提高承受松弛应变的能力。

3·4 层状撕裂[6][7]

大型厚板结构在焊接过程中常在板厚方向承受较大的拉伸应力，对于一些含杂质较多的钢板，沿轧制方向出现一种台阶状的裂纹，一般称为层状撕裂。

3·4·1 层状撕裂的特征

层状撕裂常出现在T形接头、角接头和十字接头中，如图6·2·7。一般对接接头很少出现，但在焊趾、焊根部位由于冷裂纹的诱发也会出现层状撕裂。

层状撕裂与冷裂不同，其产生与钢种的强度无关，主要与钢中的夹杂物及分布形态有关。

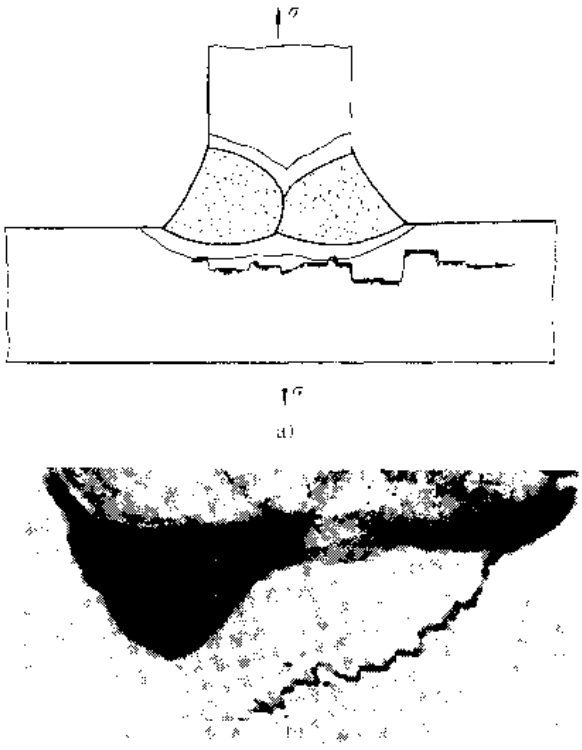


图6·2·7 T型接头的层状撕裂

3·4·2 层状撕裂的成因

焊接厚板结构时，在刚性拘束的条件下，焊缝收缩时会在母材厚度方向产生很大的拉伸应力和应变。当应变超过母材金属的塑性变形能力(沿厚度方向)时，夹杂物与金属基体之间就会发生分离而产生微裂，在应力的继续作用下，裂纹尖端沿夹杂所在的平面扩展，就形成了所谓"平台"。与此同时，凡平行于轧制方向的夹杂处都可能产生大小不同的平台，在相邻两个平台之间，由于不在一个平面上而发生切应力，发展到一定程度，就会造成剪切断裂，形成"剪切壁"。连接这些平台和剪切壁，就构成了层状撕裂所特有的阶梯形态。

3·4·3 层状撕裂的防止措施

(1)选用具有抗层状撕裂的钢，如Z向钢、平台钢等。

(2)应尽量避免单侧焊缝，改用双侧焊缝，并采用焊接量少的对称角焊缝代替焊接量大的全熔透焊缝，以避免产生过大的Z向应力。

(3)对于T形接头，可在横板上预先堆焊一层低强的焊接敷层，以缓和焊接应力。

熔星公司制作请尊重作者版权

4　金属焊接性

金属焊接性是指被焊金属在一定的焊接方法、焊接材料、工艺参数和结构型式的条件下，获得优质焊接接头的难易程度。同一金属，采用不同焊接方法或材料，其焊接性相差很大。焊接性可分为工艺焊接性和使用焊接性。

工艺焊接性主要指某种焊接工艺条件下，焊接接头出现各种裂纹的可能性。

使用焊接性主要指焊接接头在使用中的可靠性，包括焊接接头的力学性能（强度、韧性、冲击及断裂韧度等）和其他特殊性能（如耐热、耐蚀、耐低温、耐疲劳、抗时效等）。

金属焊接性一般通过碳当量公式的估算和焊接性试验评价。

4·1　用碳当量评价焊接性[7]

碳当量法是根据化学成分对钢焊接热影响区淬硬性的影响程度粗略地评价焊接时产生冷裂纹倾向及脆化倾向的一种估算方法。

碳钢及低合金钢常用的碳当量公式：

1. 国际焊接学会（IIW）推荐的公式

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

根据经验：当 $C_{eq} < 0.4\%$ 时，钢的淬硬倾向较小，焊接时可不必预热。当 $C_{eq} = 0.4\% \sim 0.6\%$ 时，钢材有一定的淬硬倾向，需适当预热。当 $C_{eq} > 0.6\%$ 时，淬硬倾向大，属于难焊的钢材，需采用较高的预热温度和严格的工艺措施。

2. 化学成分冷裂纹敏感系数 P_{cm} 公式

低合金钢与碳钢和碳锰钢不同，主要采用低碳添加多种微量合金元素，这类钢的强度和硬度虽高，但仍具有较好的塑性和韧性。如此时仍采用 C_{eq} 公式就难以适应，故建立了 P_{cm} 公式。

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

在 P_{cm} 的基础上考虑 $[H]$（mL/100g）和板厚（刚度）h（mm）对冷裂敏感性的影响，建立了冷裂纹敏感系数 P_w 公式：　$P_w = P_{cm} + \frac{[H]}{60} + \frac{h}{600}$

利用 P_w 可以求出所需的预热温度。

$$T = 144P_w - 392\,^{\circ}C$$

4·2　抗裂性试验法[5][7]

4·2·1　小型定性抗裂性试验法

这类抗裂试验法试件尺寸较小，应用简便，能定性评定一般条件下焊接接头产生裂纹的倾向，常用的一些小型抗裂试验方法见表 6·2-6。

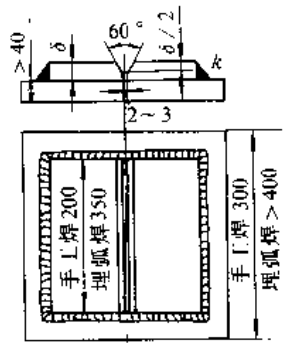
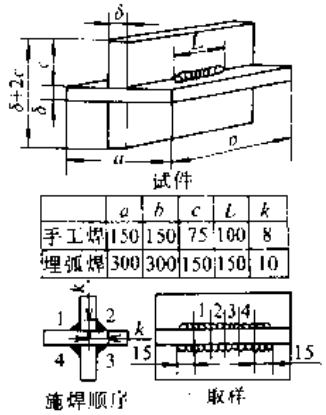
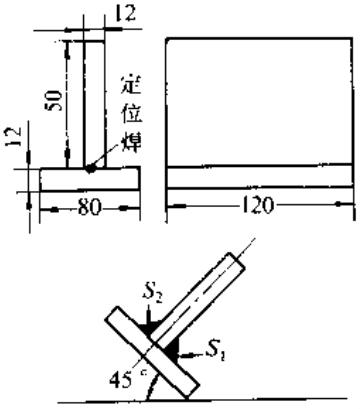
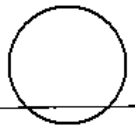
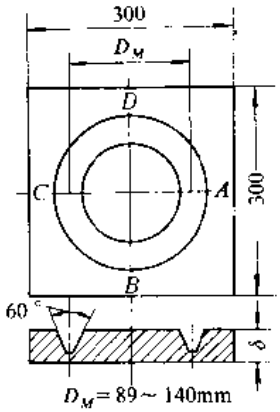
表 6·2-6　常用的小型焊件抗裂试验法

名称	试件简图	评定方法	试验条件及步骤	适用范围
Y 形坡口试验法（小铁研法）GB4675.[1]—84	试验焊缝 57　80　57 3　3 200 两种坡口形式 60 2 60	表面裂纹率 $= \frac{\Sigma l}{L} \times 100\%$ L – 焊缝长度 Σl = 裂纹总长度 H = 焊肉厚度 Σh = 裂纹总深度 断面裂纹率 $= \frac{\Sigma h}{\Sigma H} \times 100\%$	单道焊，焊条直径 ϕ4mm 工艺参数： I=170A，U=26V v=150mm/min 焊后停留 24h 后用肉眼或磁粉检查表面裂纹，然后沿垂直焊缝方向取 5 个横截面，检查内部裂纹	适用于板厚 ≥ 12mm 的裂及再热裂纹抗裂性能

[1] 公式中 C、Mn、Cr 等元素皆为这些成分的质量分数，按国标应分别用 w_C、w_{Mn}、w_{Cr} 等表示。

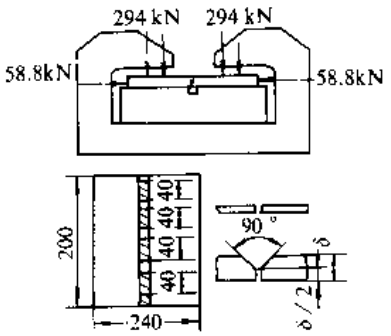
[2] 情况同[1]。

（续）

名称	试件简图	评定方法	试验条件及步骤	适用范围
刚性固定对接试验法	 $k=\delta$（当 $\delta<12$mm） $k=12$（当 $\delta>12$mm）	裂与不裂或测定裂纹率	焊完四周固定焊缝后，以一定的焊接规范及层间温度进行单层或多层焊，焊完后停留24h，从垂直焊缝方向取出厚度15mm的磨片，进行低倍放大的裂纹检验	冷裂、热裂及再热裂纹抗裂性能
十字接头试验法	 a b c L k 手工焊 150 150 75 100 8 埋弧焊 300 300 150 150 10	热影响区裂纹率 $=\dfrac{\Sigma l}{4\times 8\times k}\times 100\%$ Σ=四个磨片断面上热影响区裂纹总长度 焊缝裂纹率 $=\dfrac{\Sigma l'}{4\times 4\times k\sqrt{2}}\times 100\%$ $\Sigma l'$=四个磨片断面上焊缝裂纹总长度，一般以裂或不裂为标准	按图示1-2-3-4次序及同一方向进行焊接，每道焊缝冷却至室温后再焊下一道焊缝。焊后停留48h，用机械切割法按图取厚度为14mm的试样四片，进行宏观与微观裂纹检验	抗冷裂性能
T形热裂纹试验法 GB4675.3—84		裂纹率 $=\dfrac{\Sigma l}{L}\times 100\%$ L=焊缝总长度(mm) Σl=裂纹总长度(mm)	固定焊缝(S_2)焊完后(船形位置)立即焊试验焊缝(S_1)，焊脚 $S_1>S_2$。完全冷却后检查并测出裂纹总长度 Σl 	抗热裂性能
环形镶块抗裂试验法	 $D_M=89\sim 140$mm	裂与不裂	坡口形状及尺寸按实际生产使用的选定。板厚<12mm。试件应压紧在平台上，施焊顺序为 A-B-C-D(270°)然后 A→D(90°)	厚板、薄板均适用；抗冷裂及热裂性能

能量公司制作请尊重作者版权

（续）

名称	试件简图	评定方法	试验条件及步骤	适用范围
压板对接试验法 GB4675.4—84		裂纹率 $=\frac{\Sigma l}{L}\times 100\%$ Σl=裂纹总长度 L=4 条焊道总长度	试板放在夹具上，垂直方向有 14 只螺钉、横向有 4 只螺钉，分别以 294kN 和 58.8kN 负荷把试板压紧。在试板焊缝坡口内施焊长度为 40mm 的焊道 4 条（间隔 10mm）。冷却至室温后，取下试板检查表面裂纹	适用于板厚 1～40mm，抗热裂性能

4·2·2　定量的抗裂性试验方法

这类试验方法能够获得某种工艺条件下，避免裂纹的临界温度（或临界拘束度）、临界冷却时间、临界含氢量、临界应变速率(CST)等。从而可以定量改善焊接工艺条件（如降氢，调整预热温度，调整 $t_{8/5}$、t_{100} 等）防止产生裂纹。

几种定量的抗裂试验方法如表 6·2-7。

表 6·2-7　几种定量抗裂性试验方法

试验方法	适用范围
焊接热/模拟试验法	热裂纹、冷裂纹、再热裂纹，热影响区组织再现
插销试验法（GB9446—88）	冷裂纹、再热裂纹
拉伸拘束裂纹试验法（TRC）	冷裂纹
刚性拘束裂纹试验法（RRC）	冷裂纹
横向可变拘束试验法	热裂纹
不等温应力松弛试验法	再热裂纹

4·2·3　使用焊接性试验法

这类试验主要考虑焊接接头在使用情况下（包括环境温度、腐蚀条件等）一些力学性能及裂纹扩展情况，常用的使用焊接性试验方法，如表 6·2-8。

表 6·2-8　常用的使用焊接性试验方法

名　称	试 验 内 容
常规力学性能试验	高、低、常温拉伸、冲击、弯曲、疲劳等性能
V 形缺口冲击试验	脆性转变温度、低温韧性
落锤试验	无塑性转变温度(NDT)
宽板拉伸试验	低应力破坏转变温度
爆炸膨胀试验	弹性转变温度(FTE)、塑性转变温度(FTP)
断裂韧度试验	K_{Ic}、COD(δ_c)、J_{1c}
T 形弯曲试验	热影响区韧性
悬臂梁式定载试验	焊接接头应力腐蚀(SCC)试验

熔星公司制作 请勿重作者版权

超星公司制作 请尊重作者版权

第3章　焊接应力与变形[8]～[10]

焊接时一般采用集中热源在局部加热，在焊件上产生不均匀温度场。这种温度场在绝大多数情况下是非线性分布的。不均匀温度场使材料不均匀膨胀，处于高温区域的材料在加热过程中的膨胀量大，但受到周围温度较低、膨胀量较小的材料的限制而不能自由地进行。于是焊件中出现内应力，使高温区的材料受到挤压，产生局部压缩塑性应变。在冷却过程中，经受压缩塑性应变的材料，由于不能自由收缩而受到拉伸，于是焊件中又出现一个与焊接加热时方向大致相反的内应力场。采用非集中热源的焊接过程如钎焊和真空扩散焊等焊接异种材料时，虽然在焊接时不产生不均匀温度场，但由于材料热膨胀系数的差别，仍可能产生焊接应力和变形。

在焊接过程中，随时间而变化的内应力为焊接瞬时应力。焊后当焊件温度降至常温时，残存于焊件中的内应力则为焊接残余应力。焊后残留于焊件上的变形则为焊接残余变形。焊接应力和应变是形成各种焊接裂纹的重要因素，又是造成热应变脆化的根源。焊接残余应力和变形在一定条件下还会严重影响焊件的强度、刚度、受压时的稳定性、加工精度和尺寸稳定性等等。

焊接应力和变形的分布和大小取决于：材料的线膨胀系数、弹性模量、屈服强度、焊件的形状、尺寸和温度场。而温度场又与材料的导热系数、比热容、密度以及焊接工艺参量和条件密切相关。由于焊接过程的温度变化范围大，上述材料系数有很大的起伏，特别是牵涉到材料的相变时，可能引起焊接应力的变化。这些情况使焊接应力变形问题十分复杂，因此在实践中往往采用理论和数值分析与实验相结合的方法来掌握焊接应力变形的规律和影响因素，最终达到预测、控制和调整它们的目的。

1　焊接残余应力

1·1　残余应力的分布

厚度不大的焊接结构中，残余应力基本上是双轴的，厚度方向的残余应力很小。只有在大厚度的焊接结构中，厚度方向的应力才达到较高的数值。

1. 纵向(沿焊缝方向)残余应力 σ_x　低碳钢、普通低合金钢和奥氏体钢焊接结构中，焊缝及其附近的压缩塑性变形区内的 σ_x 为拉应力，其数值一般达到材料的屈服点(焊件尺寸过小时除外)。图6·3-1为长板对接焊后横截面上 σ_x 的分布。

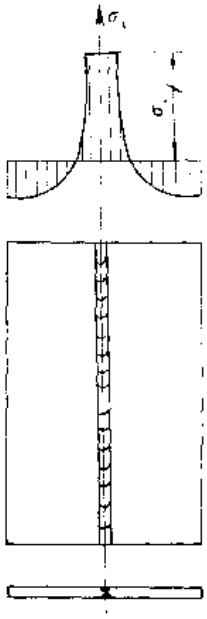


图6·3-1　长板对接焊后横截面上的纵向应力 σ_x 的分布

自由状态下在焊接的钛合金和铝合金构件上，σ_x 与焊接规范有关，一般约为 $0.5\sim0.8\sigma_s$。

圆筒环焊缝所引起的纵向(圆筒的切向)应力的分布规律与平板直缝有所不同。其数值取决于圆筒直径、厚度以及焊接压缩塑性变形区的宽度，环缝上的 σ_x 随圆筒直径的增大而增加，随塑性变形区的扩大而降低。直径增大，σ_x 的分布逐渐与焊接平板接近。在图6·3-2中所示为平均应力。

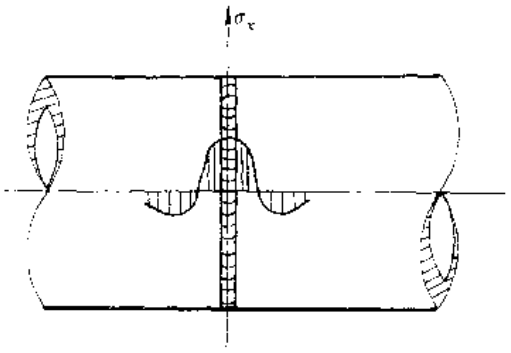


图6·3-2　圆筒环焊缝的周向应力 σ_x 的分布

2. 横向(垂直焊缝方向)残余应力 σ_y　σ_y 由焊缝及其附近塑性变形区的纵向收缩所引起的 σ_y' 和焊缝及其附近塑性变形区横向收缩所引起的 σ_y'' 合成。

平板对接时，焊缝中心截面上的 σ_y' 在两端为压应力，中间为拉应力。σ_y' 的数值与板的尺寸有关(图6·3-3)。

熊星公司制作 请尊重作者版权

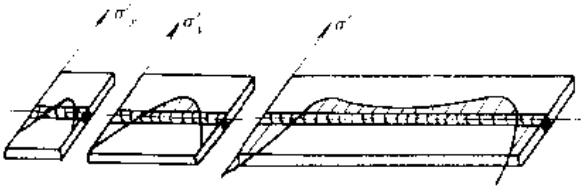


图 6·3-3 不同长度平板对接时 σ'_y 的分布

σ''_y 的分布与焊接方向和顺序有关(图 6·3-4)。图中箭头为焊接方向。σ_y 为 σ'_y 及 σ''_y 两者的综合。图 6·3-5为两块25×910×1000(mm)板对接后的σ_y分布。自动焊与手工直通焊的 σ_y 分布基本相同。分段焊法的 σ_y 有多次正负反复,拉应力峰值往往高于直通焊。

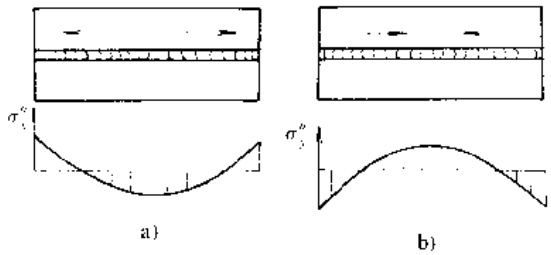


图 6·3-4 不同焊接方向时 σ''_y 的分布

a)由中心向两端焊 b)由两端向中心焊

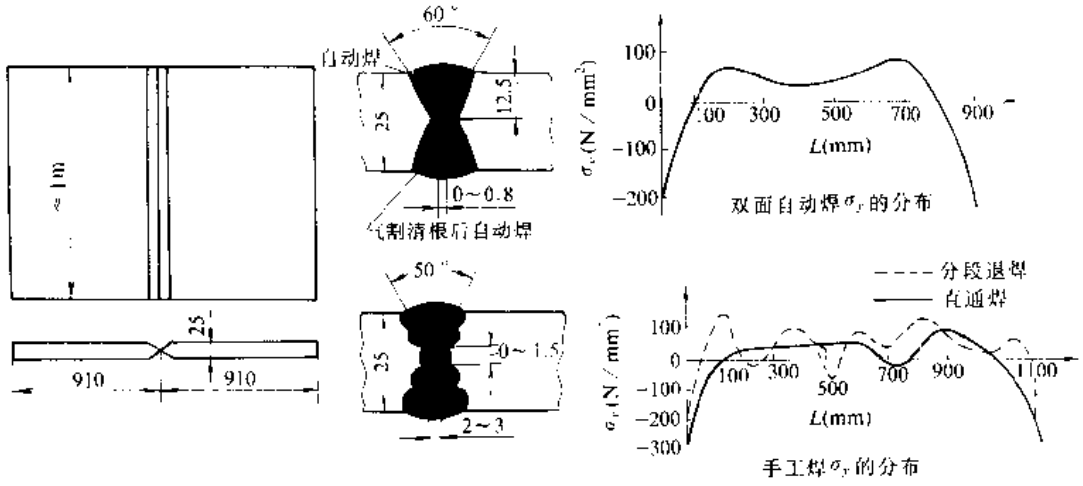


图 6·3-5 平板对接的横向应力 σ_y

3. 厚板中的焊接残余应力[10] 厚板焊接接头中除纵向和横向残余应力外,还存在较大的厚度方向残余应力 σ_z,其在厚度上的分布不均匀,分布状况与焊接工艺方法密切相关。

图 6·3-6 为 240mm 厚电渣焊缝中心的应力分布。σ_z 为拉应力,在厚度中心最大,达到 180MPa。σ_x 和 σ_y 的数值也以厚度中心部位为最大,焊缝中心出现三轴拉应力。σ_z 随板厚的增加而增加。与此相反,在多层焊时,焊缝表面上的 σ_x 和 σ_y 比中心部位大。σ_z 的数值较小,可能为压应力亦可能为拉应力。

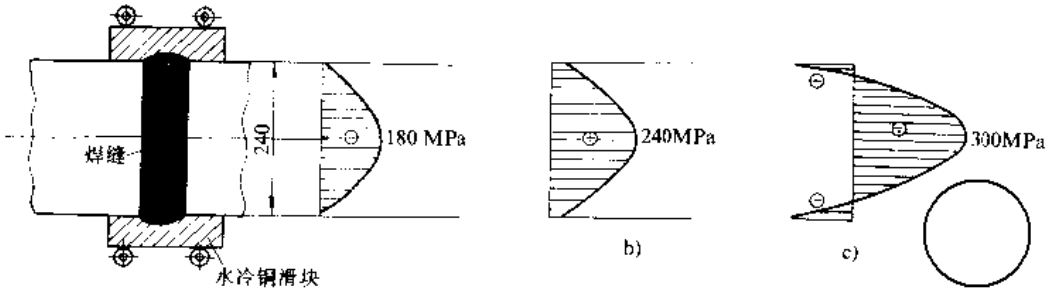


图 6·3-6 厚板电渣焊中沿厚度上的内应力分布

a)σ_x 在厚度上的分布 b)σ_y 在厚度上的分布 c)σ_z 在厚度上的分布

图 6·3-7 为 80mm 低碳钢厚板 V 形坡口多层焊焊缝残余应力的分布。σ_y 在焊缝根部大大超过屈服点。这是由于每焊一层,产生一次角变形,在根部多次拉伸塑性变形的积累造成应变硬化,使应力不断上升所致。

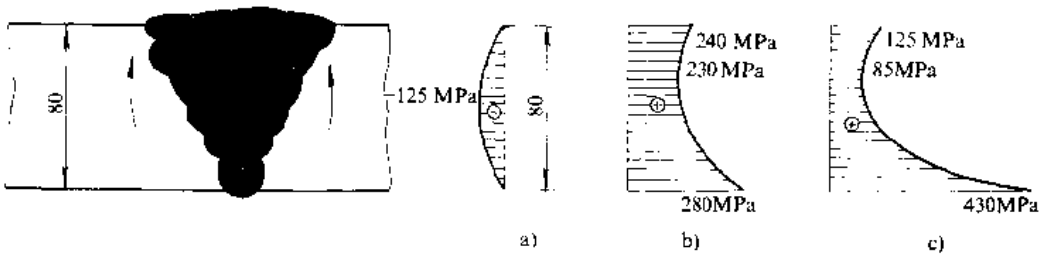


图 6·3-7 厚板多层焊中沿厚度上的内应力分布

a)σ_t 在厚度上的分布 b)σ_r 在厚度上的分布 c)σ_y 在厚度上的分布

严重时，甚至因塑性变形耗竭导致焊缝根部开裂。如果焊接时，限制焊缝的角变形，则根部可能出现压应力。σ_y 的平均值与测量点在焊缝长度上的位置有关，但其表面或近表面大于中心的分布趋势是相似的。

4. 在拘束状态下焊接的残余应力 与自由状态不同，如图 6·3-8 中间杆件对接焊缝的横向收缩因受到框架的阻碍，在此拘束状态下将出现附加的横向应力 σ_f，这部分应力并不在中间杆件内部平衡，而在整个框架上平衡，故亦称之为反作用内应力。反作用内应力 σ_f 与 σ_y 相叠加形成一个以拉应力为主的应力场。

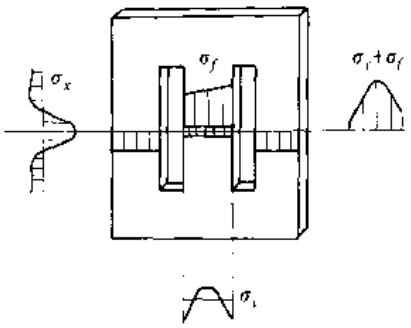


图 6·3-8 拘束状态下的焊接内应力

5. 封闭焊缝所引起的残余应力 板壳结构上的接管，镶块等的封闭焊缝，拘束度大。内应力的大小与焊件和镶入体本身的刚度有关。刚度越大，内应力越大。图 6·3-9 为圆盘中焊入镶块后的残余应力分布。纵向应力(切向应力 σ_t)在焊缝附近为拉应力，最高可达屈服点。横向应力(径向应力 σ_r)为拉应力。

镶块心部 σ_r 与 σ_t 相等，有一个均匀的双轴拉应力场。镶块直径越小，圆盘对它的拘束越大，这个均匀双轴应力值也越高。

6. 相变应力 焊接高强度钢时，热影响区和焊缝金属(如果采用化学成分与母材相似的焊缝金属)中发生奥氏体转变为马氏体的相变，比容增大。由于相变温度较低，此时材料已处于弹性状态，焊件中将出现相变应力 σ_{mx}，与 σ_x 相叠加后，在相变区的残余应力可能为压应力。

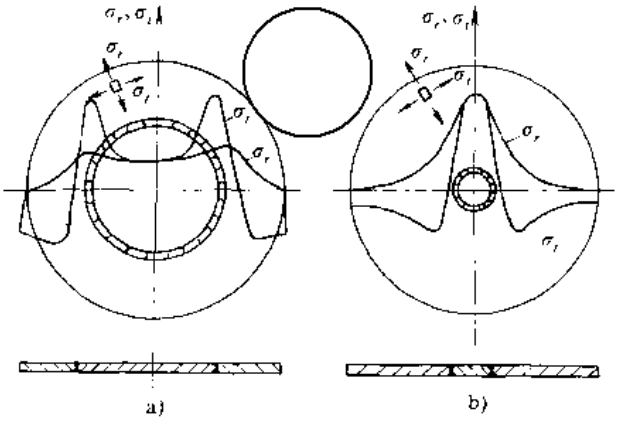


图 6·3-9 圆盘镶块封闭焊缝所引起的内应力

a)大镶块 b)小镶块

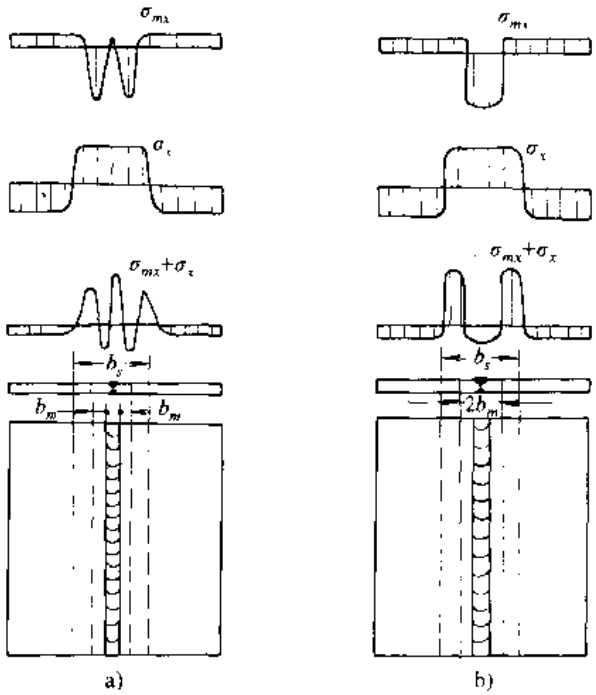


图 6·3-10 焊接相变对残余应力的影响

a)焊缝金属为奥氏体钢 b)焊缝成分与母材相近

σ_{mx}—相变应力 σ_x—不均匀塑性变形引起的焊接应力 $\sigma_x+\sigma_{mx}$—最终的残余应力 b_m—相变区的宽度 b_s—塑性变形区宽度

版权所有 侵权必究

超星公司制作请尊重作者版权

图 6·3-10 为焊接相变对残余应力分布的影响。相变时的体积膨胀不单在长度方向可以引起纵向压缩相变应力 σ_{mx}，还可以在厚度方向引起压缩相变应力 σ_{mz}。这两个方向的相变膨胀，可以在某些部位引起相当大的横向拉伸相变应力σ_{my}。它是产生冷裂纹的因素之一。

7. 表面堆焊产生的残余应力[12][13] 压力容器制造中，在结构钢表面广泛采用耐腐蚀堆焊层，此外在一些构件上也常堆焊一些具有特殊性能如耐磨损、抗气蚀堆焊层。堆焊层与基体材料性能相差比较悬殊，焊后及热处理后的残余应力分布情况受到人们的关注。图 6·3-11 为在 86mm 厚低合金结构钢上用带极埋弧焊堆焊两层高 Cr-Ni 钢后和热处理后在堆焊层及附近基材中的纵向和横向残余应力分布图。从图中可以看出，由于基体与堆焊层材料热膨胀系数的差异，600℃、12h焊后退火并不能降低堆焊层中的残余应力。

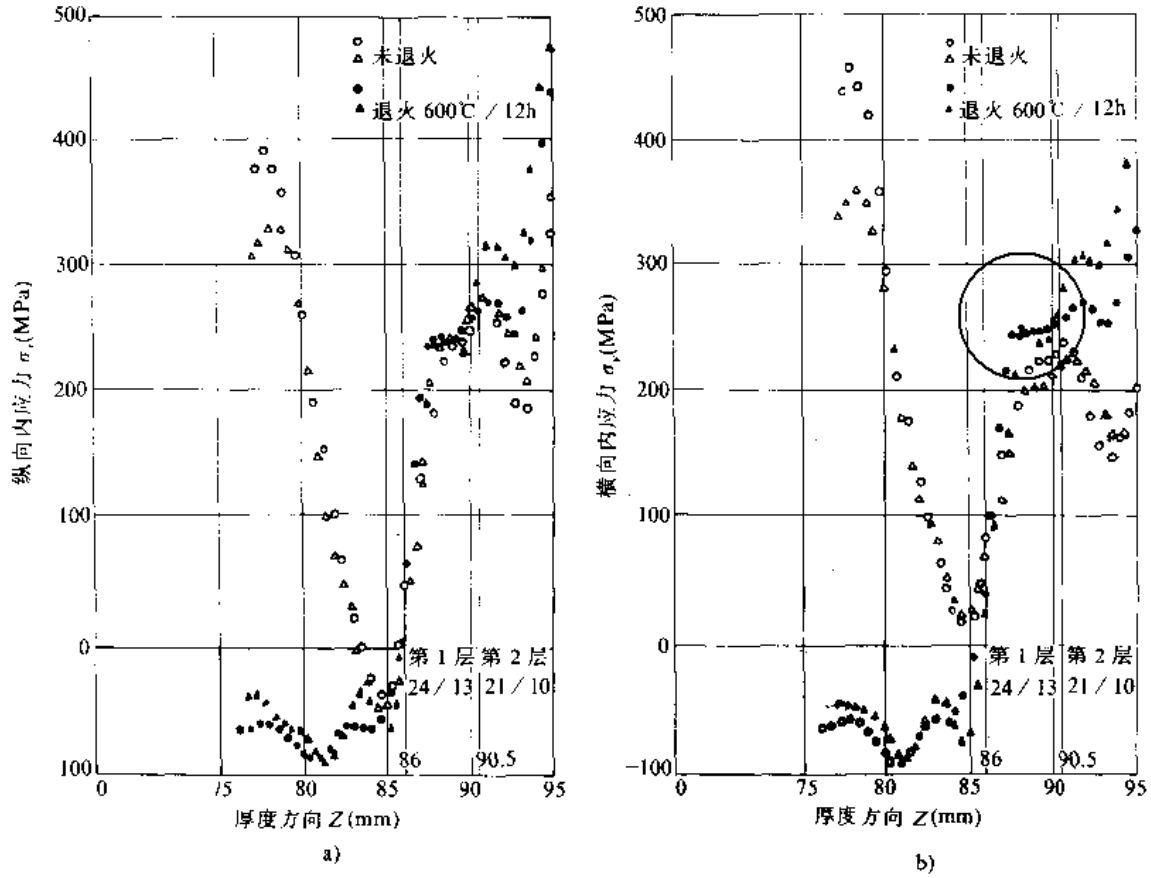


图 6·3-11 堆焊件残余应力分布图

a)纵向残余应力沿厚度上的分布 b)横向残余应力沿厚度上的分布

(在 86mm 厚 22NiCrMo 低合金结构钢上堆焊两层 4.5mm 厚的高 Cr-Ni 钢，第一层为 Cr24Ni13，第二层为 Cr21Ni10 后和 600℃12h 退火后的残余应力分布)

1·2 残余应力的影响

1. 对结构刚度的影响 当外载产生的应力 σ 与结构中某区域的内应力叠加之和达到屈服点 σ_s 时，这一区域的材料就会产生局部塑性变形，丧失了进一步承受外载的能力，造成结构的有效截面积减小，结构的刚度也随之降低。

受弯曲时，内应力对刚度的影响，与焊缝的位置有关，焊缝所在部位的弯曲应力越大，则其影响也越大。

结构上有纵向和横向焊缝时(例如工字梁上的肋板焊缝)，或经过火焰校正，都可能在相当大的截面上产生拉应力，虽然在构件长度上的分布范围并不太大，但是对刚度仍能有较大的影响。特别是采用大量火焰矫正后的焊接梁，在加载时刚度和卸载时的回弹量可能有较明显的下降，对于尺寸精确度和稳定性要求较高的结构是不容忽视的。

超星公司制作 请尊重作者版权

2. 对受压杆件稳定性的影响[14] 当外载引起的压应力与内应力中压应力叠加之和达到 σ_r，这部分截面就丧失进一步承受外载的能力。这样就削弱了杆件的有效截面积，并改变了有效截面积的分布，使稳定性有所改变。

如果翼板是用气割加工的，或者翼板由几块板叠焊起来的则可能在翼板边缘产生拉伸内应力，其失稳临界应力 σ_{cr} 比一般的焊接 H 形截面高，图 6·3-12 为带气割边及带盖板的焊接杆件的内应力分布。杆件内应力影响的大小与截面形状有关，对于箱形截面的焊件，内应力的影响比 H 形小。

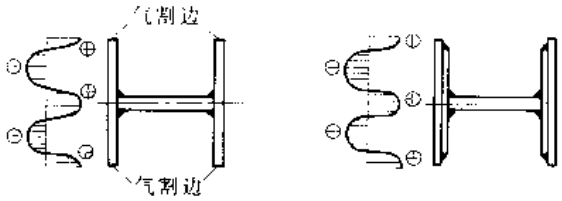


图 6·3-12 带气割边及带盖板的焊接杆件的内应力

3. 对静载强度的影响 没有严重应力集中的焊接结构，只要材料具有一定的塑性变形能力，内应力并不影响结构的静载强度。反之，如材料处于脆性状态，则拉伸内应力和外载应力叠加有可能使局部区域的应力首先达到断裂强度，导致结构早期破坏。

在实际结构上可能有由工艺或设计原因造成的严重应力集中，有可能同时存在着较高的拉伸内应力。许多低碳钢和低合金结构钢焊接结构的低应力脆断事故以及大量试验研究说明：在工作温度低于脆性临界温度（在此温度下光滑试件仍具有良好延性）条件下，拉伸内应力和严重应力集中的共同作用，将降低结构的静载强度，使之在远低于屈服点的外载应力作用下发生脆性断裂。

4. 对疲劳强度的影响 内应力的存在使变载荷的应力循环发生偏移。这种偏移只改变其平均值，不改变其幅值。结构的疲劳强度与应力循环的特征有关。当应力循环的平均值增加时，其极限幅值就降低，反之则提高。因此，如应力集中处存在着拉伸内应力，疲劳强度将降低。

5. 对焊件加工精度和尺寸稳定性的影响[15] 机械加工将一部分材料从焊件上切除时，此处的内应力也被释放。内应力的原来平衡状态被破坏，焊件产生变形，加工精度受影响。又例如齿轮箱上有几个需要加工的轴承孔，加工第二个轴承孔时必然影响第一个已加工好的轴承孔的精度，以及两孔中心距的精度。

6. 对应力腐蚀开裂的影响 应力腐蚀开裂是拉应力和化学腐蚀共同作用下产生裂纹的现象，在一定的材料和介质的组合下发生。应力腐蚀开裂所需的时间与应力大小有关。拉应力越大，应力腐蚀开裂的时间越短。

1·3 调节残余应力的措施

1·3·1 设计措施

(1)尽量减少焊缝的数量和尺寸。

(2)避免焊缝过分集中。焊缝间应保持足够的距离。

(3)采用刚性较小的接头形式。例如用翻边联接代替插入式管联接(图 6·3-13)，可降低焊缝的拘束度。

(4)在残余应力为拉应力的区域内，应该避免几何不连续性，以免内应力在该处进一步增高。

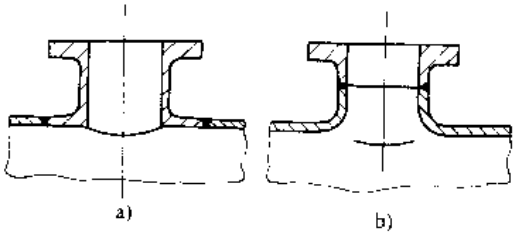


图 6·3-13 焊接管联结

a)插入式 b)翻边式

1·3·2 工艺措施

(1)采用合理的焊接顺序和方向。1)先焊收缩量较大的焊缝，使焊缝能较自由地收缩。如图 6·3-14，应先焊 1(对接焊缝)，后焊 2(角焊缝)。2)先焊错开的短焊缝 1,2，后焊直通长焊缝 3(图 6·3-15)，使焊缝有较大的横向收缩余地。3)先焊在工作时受力较大的焊缝，使内应力合理分布。如图 6·3-16 为在接头两端留出一段翼缘角焊缝不焊，先焊受力最大的翼缘对接焊缝 1，然后再焊腹板对接焊缝 2，最后焊翼缘预留的角焊缝 3。这样，焊后可使翼缘的对接焊缝承受压应力，而腹板对接焊缝有一定的收缩余地，同时也有利于在焊接翼缘对接焊缝时，采取反变形措施以防止产生角变形。有试验表明用这种焊接顺序焊成的梁疲劳强度比先焊腹板的梁高 30%。

超星公司制作 请尊重作者版权

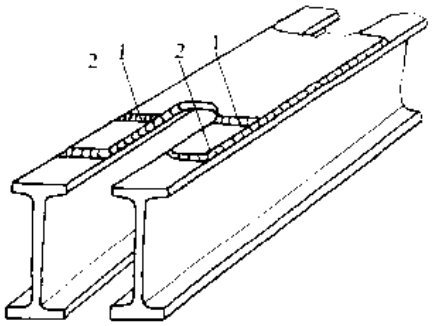


图 6·3-14 按收缩量大小确定焊接顺序

1—对接焊缝 2—角焊缝

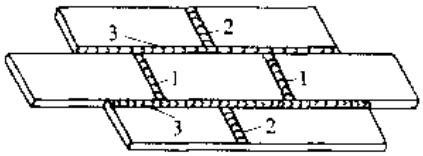


图 6·3-15 拼板时选择合理的焊接顺序

1,2—短焊缝 3—长焊缝

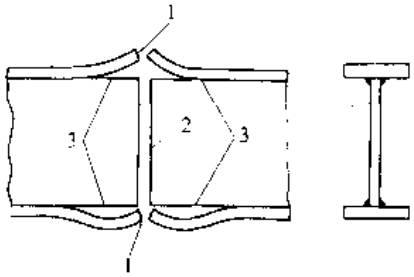


图 6·3-16 按受力大小确定焊接顺序

1—翼缘对接焊缝 2—腹板对接焊缝 3—角焊缝

(2)降低焊缝的拘束度。在焊接镶块的封闭焊缝或其他拘束度大的焊缝时，可采用反变形法降低焊件的局部刚度，从而减小焊缝的拘束度(图6·3-17)。

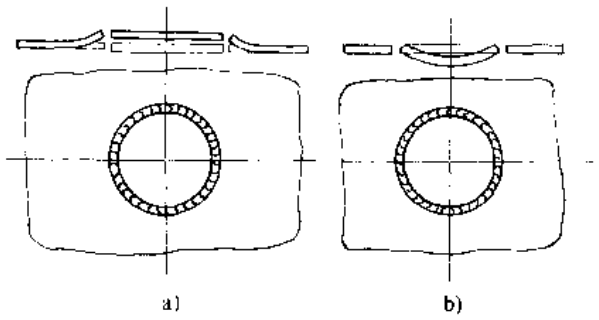


图 6·3-17 降低局部刚度减少内应力

a)平板少量翻边 b)镶块压凹

(3)锤击焊缝。可用头部带小圆弧的工具锤击焊缝，使焊缝得到延展，降低内应力，锤击应保持均匀适度，避免锤击过分，以防止产生裂纹。一般不锤击第一层和表层。

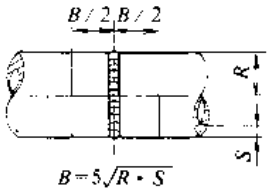
(4)局部加热造成反变形(加热减应区法) 在焊接结构的适当部位加热使之伸长，加热区的伸长带动焊接部位，使它产生一个与焊缝收缩方向相反的变形。在加热区冷却收缩时，焊缝就可能比较自由地收缩，从而减少内应力。

1·4 焊后消除残余应力的方法

1·4·1 整体高温回火(参见本卷第7篇第3章)

1·4·2 局部高温回火

本法只对焊缝及其附近的局部区域进行加热，其消除应力的效果不如整体处理。多用于比较简单的、拘束度较小的焊接接头，如长的圆筒容器、管道接头、长构件的对接接头等。为了取得较好的降低应力的效果，应保证有足够的加热宽度。圆筒接头加热区宽度一般采取 $B=5\sqrt{R\delta}$。长板的对接接头，取 $B=W$(图6·3-18)。



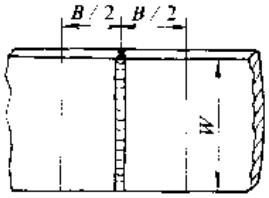


图 6·3-18 局部热处理的加热区宽度

a)环焊缝 b)长构件对接焊缝

R—圆筒半径 δ—管壁厚度

B—加热区宽度 W—对接构件的宽度

局部热处理可采用气体、红外线、间接电阻或工频感应加热等。

1·4·3 机械拉伸法[9][15]

对焊接构件进行加载，使焊接压缩塑性变形区得

到拉伸，可减少由焊接引起的局部压缩塑性变形量，使内应力降低。

消除掉的应力数值可按下式计算：

$$\Delta\sigma=\sigma_0+\sigma-\sigma_s$$

式中 σ_0——内应力（在焊接结构中一般 $\sigma_0=\sigma_s$，故 $\Delta\sigma=\sigma$）；

σ——加载时的应力；

σ_s——材料屈服强度。

焊接压力容器的机械拉伸，可通过液压试验来实现。液压试验采用一定的过载系数，所用试验介质一般为水。试验时，还应严格控制介质的温度，使之高于材料的脆性临界温度，以免在加载时发生脆断。采用声发射监测，对防止这类事故是有益的。在确定加载压力时，必须充分估计工作时可能出现的各种附加应力，使加载时的应力高于实际工作时的应力。

1·4·4 温差拉伸法（低温消除应力法）

本法在焊缝两侧各用一个适当宽度的氧-乙炔焰炬加热，在焰炬后一定距离处喷水冷却。焰炬和喷水管以相同速度向前移动（图6·3-19）。这样可造成一个

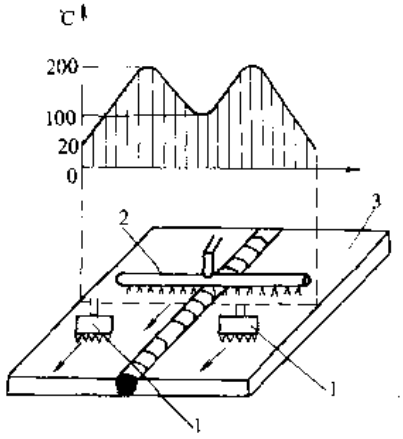


图 6·3-19 温差拉伸法

1—氧-乙炔加热炬 2—喷水排管 3—焊件

两侧高（峰值约为200℃）焊缝区低（约为100℃）的温度场。两侧的金属因受热膨胀对温度较低的焊缝区进行拉伸，使之产生拉伸塑性变形以抵消原来的压缩塑性变形，从而消除内应力。本法实质上属于机械拉伸法。如参量选用恰当则可取得较好的效果。本法对于焊缝比较规则，厚度不大（<40mm）的板、壳结构具有一定的实用价值。

1·4·5 振动法

本法利用由偏心轮和变速马达组成的激振器使结构发生共振所产生的循环应力来降低内应力。其效果取决于激振器和构件支点的位置、激振频率和时间。本法所用设备简单价廉、处理费用低、时间短，也没有高温回火时金属表面氧化的问题。

1·4·6 爆炸法[16]

本法是通过布置在焊缝及其附近的炸药带，引爆产生的冲击波与残余应力的交互作用，使金属产生适量的塑性变形，残余应力因而得到松弛。根据构件厚度和材料的性能选定恰当的单位焊缝长度上的药量和布置方式是取得良好消除效果的决定性因素。

2 焊接残余变形[10][11][17]

在焊接结构生产中，残余变形不仅影响结构的尺寸精度和外观且可能降低其承载能力。矫正变形费工、费时、提高成本，在矫正中或矫正后还会引起一些新的问题，因此，分析、测量、计算、预测并采取相应措施以控制和调整变形是十分重要的。

2·1 焊接残余变形的类型

1. 收缩变形 分纵向收缩及横向收缩两种（图6·3-20a）。

2. 弯曲变形 （图6·3-20b）。

3. 角变形 （图6·3-20c）。

4. 扭曲变形 绕构件轴线扭转（图6·3-20d）。

5. 失稳变形 平面外的波浪形变形（图6·3-20e）。

在实际结构中的残余变形常有多种同时存在，如带加强筋板的工字梁焊接后，即有收缩变形和弯曲变形，有时还伴随有扭曲变形、角变形和波浪变形。

2·2 焊接残余变形的影响因素

2·2·1 纵向收缩变形

细长构件如梁、柱等纵向焊缝所引起的纵向收缩 ΔL，一方面取决于焊缝及其两侧塑性压缩变形区的数值及其分布面积的积分即单位收缩量，另一方面取决于构件长度和截面积。前者与焊接线能量和焊接工艺有关。在同样焊接参量下预热会增加单位收缩量，使 ΔL 增大，只有在很高的整体预热下，才能使 ΔL 减少。

能量公司制作请尊重作者版权

越星公司制作 请尊重作者版权

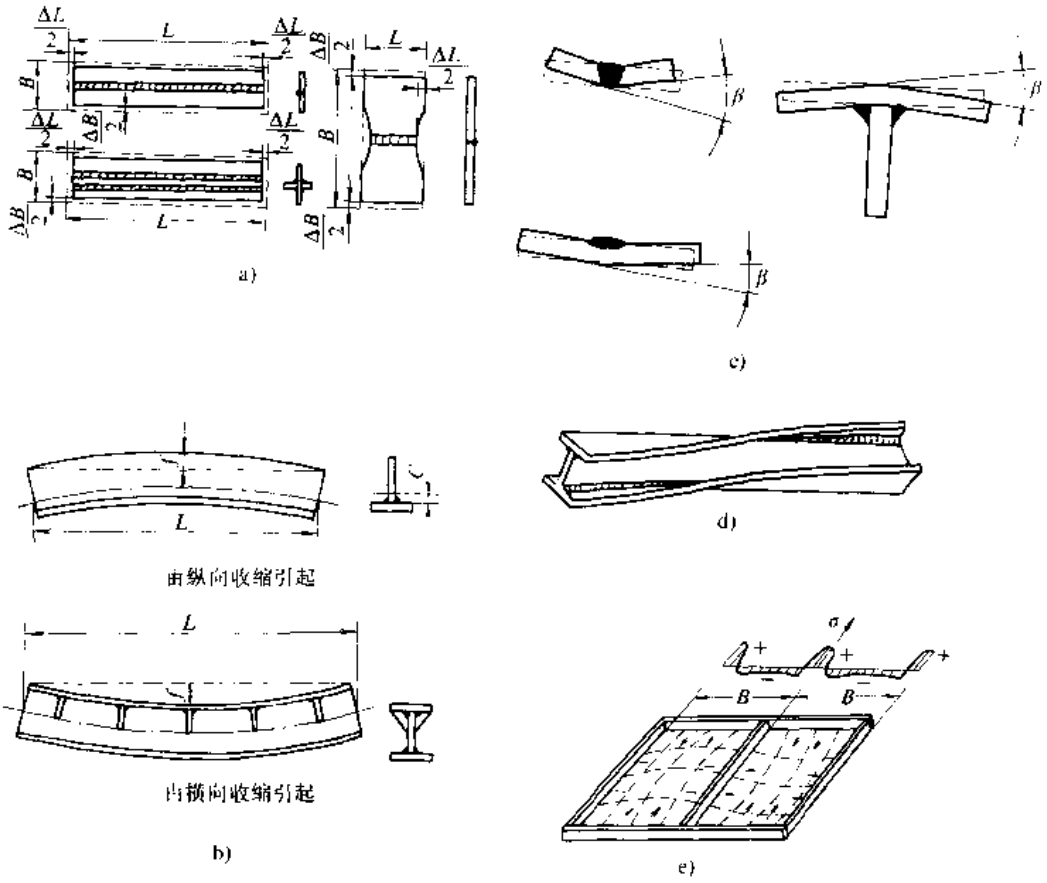


图 6·3-20 常见的焊接残余变形类型

a)收缩变形 b)弯曲变形 c)角变形 d)扭曲变形 e)失稳变形

2·2·2 横向收缩变形

对接接头的横向收缩量 ΔB_d 比角焊缝和堆焊缝的 ΔB_d 大。V 形坡口的 ΔB_d 比同厚度的 X 形坡口或双 U 形坡口对接接头大。坡口角和间隙越大 ΔB_d 越大。在同样坡口条件下，板厚 δ 越大，ΔB_d 越大。此外，气焊的 ΔB_d 值比电弧焊的大，手工焊的 ΔB_d 值比埋弧焊的大。高能量密度焊如电子束焊的 ΔB_d 远小于常用的熔焊。图 6·3-21 为 V 形、X 形和双 U 形坡口对接接头的 ΔB_d 与 δ 的关系曲线。

多道焊时，每道焊缝所产生的横向收缩量逐层递减。

T 形接头和搭接接头的横向收缩量 ΔB_d 随 K 的增加而增大，随 δ 的增加而降低(图 6·3-22)。

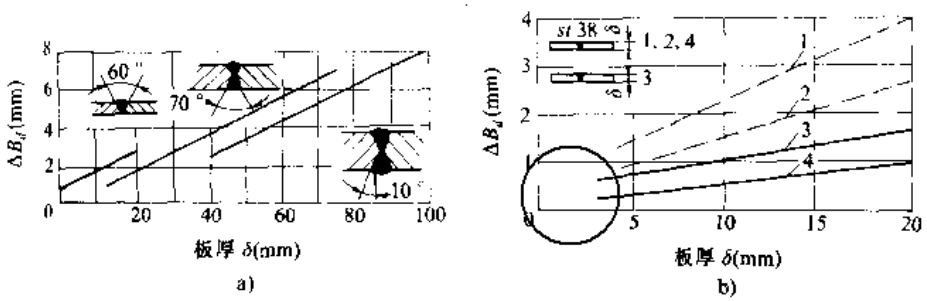


图 6·3-21 对接接头的横向收缩

a)不同坡口不同厚度钢板焊接 ΔB_d 的平均值 b)不同焊接方法不同厚度钢板焊接的 ΔB_d

1—气焊，60°V 形坡口 2—手工电弧焊，60°V 形坡口 3—埋弧焊，不开坡口 4—CO_2 保护焊，30°V 形坡口

St38—原西德钢号，相当我国 Q235 钢

超星公司制作 请尊重作者版权

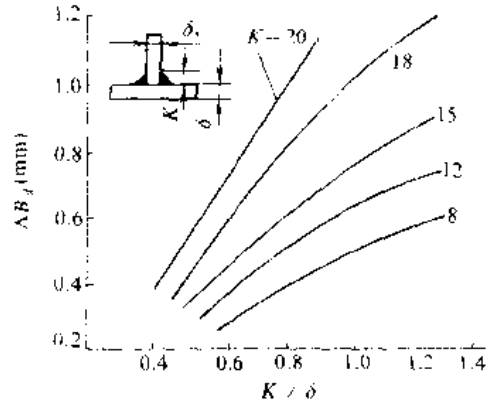


图 6·3-22　T 形接头横向收缩与 K/δ 的关系

2·2·3　弯曲变形

弯曲变形可由纵向收缩和横向收缩引起。

1. 由焊缝纵向收缩引起的弯曲变形　偏离构件截面中性轴的纵向焊缝不但引起构件的纵向收缩，还引起构件的弯曲(图 6·3-20b)。

2. 由焊缝横向收缩引起的弯曲变形　如果横向焊缝在构件上分布不对称，例如图 6·3-23 构件上的短筋板焊缝。每对筋板与翼缘之间的角焊缝的横向收缩以及每对筋板与腹板之间角焊缝的横向收缩都将使构件弯曲一个角度，从而引起构件产生弯曲变形。

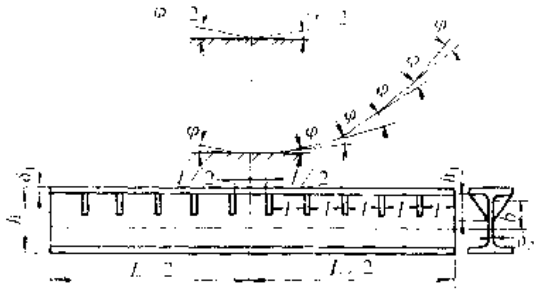


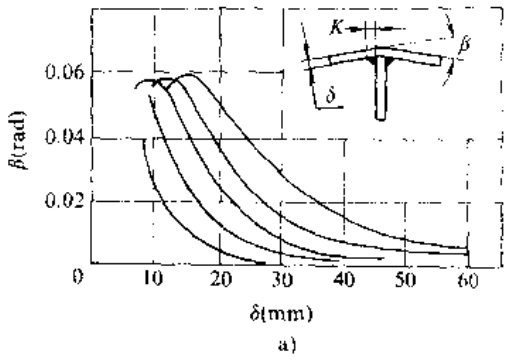
图 6·3-23　端筋板引起的弯曲变形

2·2·4　角变形

堆焊、搭接接头、对接接头和 T 形接头都可能产生角变形。前面三种接头角变形的根本原因是横向收缩在板厚度上的分布不均匀。带双面角焊缝的角变形还与最初焊接的角焊缝的收缩有关。

(1)对接接头的角变形 β 随坡口角度增大而增大。单层埋弧自动焊、电渣焊及电子束焊焊缝，β 都比较小。多层焊比单层焊的 β 大，多道焊(每层分成几道)比多层焊大。层数、道数越多，β 越大。焊接 X 形坡口，先焊的那一面的 β 大于后焊面的 β。

(2)T 形接头的角变形 β 取决于角焊缝的焊脚尺寸 K 和板厚 δ。低碳钢和铝镁合金 T 形接头的 β 与 δ 以及 K 的关系见图 6·3-24。



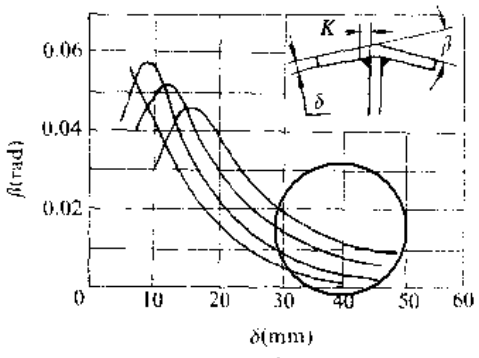


图 6·3-24　T 形接头的角变形

a)低碳钢　b)铝镁合金

(摘自参考文献[10]，370～371 页。)

2·2·5　扭曲变形

扭曲变形与角焊缝所造成的角变形沿焊接方向逐渐增大的现象有关。图6·3-25的焊接方向和顺序易引起扭曲变形，同时向同一个方向焊接 T 形接头的两个角焊缝或采用焊接夹具可防止扭曲变形。

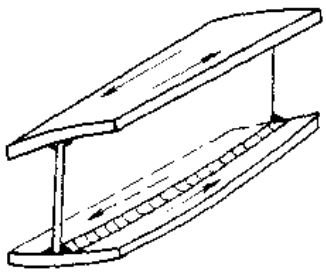


图 6·3-25　工字梁的扭曲变形

超星公司制作 请尊重作者版权

2·2·6 波浪变形(失稳变形)

在焊接内应力的压应力作用下,薄板可能失稳,产生波浪变形(图 6·3-26)。压应力越大,薄板的宽度与厚度之比 B/δ 越大,就越易失稳,产生波浪变形。压应力随焊缝尺寸和焊接线能量的增加而增加。角变形也会引起类似的波浪变形,但其成因与此不同。

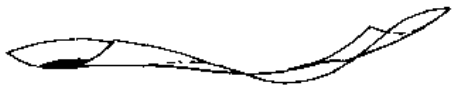


图 6·3-26 薄板受压波浪变形

2·3 控制焊接残余变形的措施

2·3·1 设计措施

(1)选用合理的焊缝尺寸和形状。在保证结构有足够承载能力的前提下,应采用尽量小的焊缝尺寸。对仅起联系作用的和受力不大、按强度计算尺寸甚小的角焊缝应按板厚选取工艺上可能的最小尺寸。

在薄板结构中采用点焊来代替熔焊缝可以减小变形和焊后校正工序。

(2)尽可能减少焊缝的数量。适当选择壁板的厚度,可减少肋板的数量,从而减省焊接和变形校正量。对自重要求不严格的结构,这样做即使重量稍大,还是比较经济的。采用压型结构代替肋板结构对防止薄板结构的变形十分有效。

合理选择肋板的形状和布置,可减少焊缝并有可能提高肋板的加固效果。例如图 6·3-27b 采用槽钢来加固轴承座,比图 6·3-27a 中的辐射形筋板效果更好,焊缝也较少。

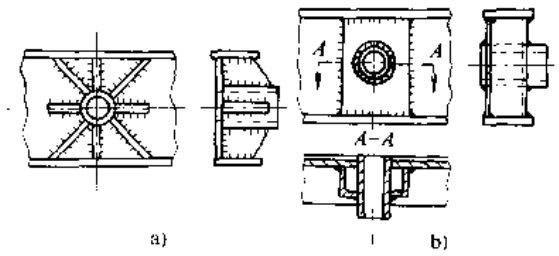


图 6·3-27 合理选择筋板形状和布置
a)不合理 b)合理

(3)合理安排焊缝位置。焊缝对称于构件截面的中性轴,或使焊缝接近中性轴,可减少弯曲变形。

图6·3-28a中的焊缝集中在截面中性轴下方,图 6·3-28b 中的安排则较为合理。

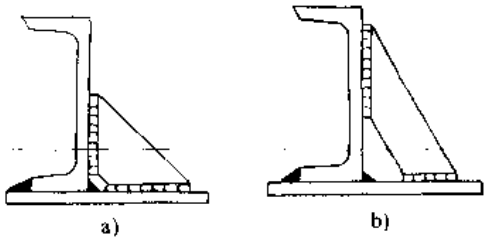


图 6·3-28 合理安排焊缝位置防止变形
a)不合理 b)合理

2·3·2 工艺措施

(1)反变形。图 6·3-29～图 6·3-31 为反变形在各种情况下的应用。当构件刚度过大(如大型箱形梁等),采用上述强制反变形有困难时,可以先将梁的腹板在下料拼板时作成上挠的,然后再进行装配焊接(如桥式起重机箱形大梁)。

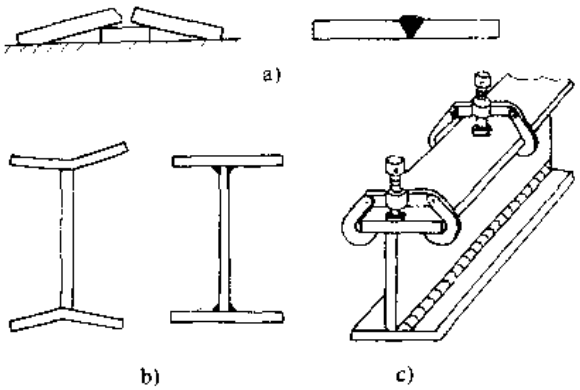


图 6·3-29 防止角变形的反变形措施
a)对接焊反变形 b)塑性预弯反变形 c)强制反变形

图 6·3-30 防止壳体局部凹陷的反变形
a)焊前 b)焊后

在薄板上焊接骨架时,对薄板采用加热(SH 法)、机械预拉伸(SS 法)、或者两者同时使用(SSH 法)使其伸长,然后在薄板上装配焊接骨架,薄板预拉伸和加热

超星公司制作 请尊重作者版权

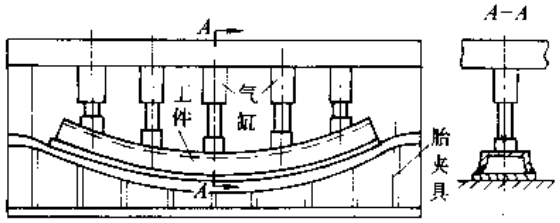


图 6·3-31　防止构件弯曲的强制反变形

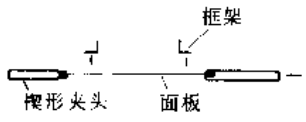
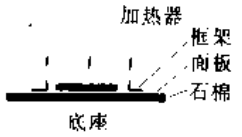
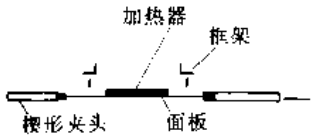
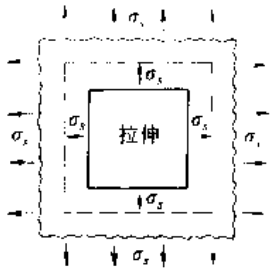
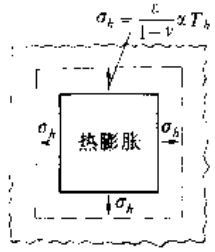
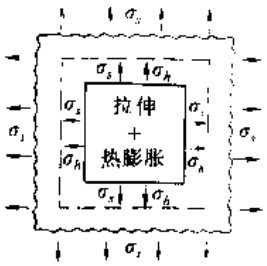
后再冷却所产生的拉应力可以有效地降低焊接应力防止波浪变形[118](表 6·3-1)。

在薄板对接时也采用在焊缝两侧一定距离处适当宽度上加热，使焊缝得到拉伸，从而减少压缩塑性变形，降低残余内应力，而消除波浪变形，此法即为低应力无变形法(LSND 法)。

(2)刚性固定法。对防止弯曲变形的效果远不如反变形法。但对角变形和波浪变形较有效。例如法兰面的角变形(图 6·3-32)。

焊接薄板时为防止波浪变形，在焊缝两侧紧压固定，加压位置应尽量接近焊缝并保持压力均匀。为此，可采用带一定挠度的压块或者采用琴键式的多点压块。

表 6·3-1　预防薄板焊接骨架波浪变形的方法

1. SS 法 拉伸矫直法	2. SH 法 加热矫直法	3. SSH 法 拉伸加热矫直法
		
		
$\sigma_r=\sigma_s-\sigma'$ 式中　$\sigma'=f(\sigma_m^a、\sigma_m^a\cdots\cdots)$	$\sigma_r=\dfrac{E}{1-\nu}\alpha T_h-\sigma'$	$\sigma_r=\left(\sigma_s\cdot\dfrac{E}{1-\nu}\alpha T_h\right)-\sigma'$

注：σ_r—拘束应力　σ_s—预拉伸应力　σ'—焊接引起的板内残余压应力　σ_h—热膨胀应力　E—弹性模量　ν—泊松比　α—线胀系数　T_h—预热温度

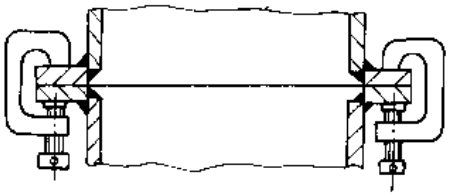


图 6·3-32　刚性固定防止法兰焊接变形

(3)选用合理的焊接方法和规范。选用能量比较集中的焊接方法，如 CO_2 保护焊、等离子弧焊代替气焊和手工电弧焊进行薄板焊接，可减少变形量。用真空电子束焊可焊接经过精加工的产品(如齿轮)，控制其变形量。

焊缝不对称的构件，可通过选用适当的焊接工艺参数，在没有反变形或夹具的条件下，控制弯曲变形。

(4)选用合理的装配焊接次序。把结构适当地分成部件，分别装配焊接，然后拼焊成整体，使不对称的焊缝或收缩量较大的焊缝能比较自由地收缩而不影响整体结构。

2·3·3　矫正

矫正方法有以下几种：

(1)机械矫正法。利用外力使构件产生与焊接变形方向相反的塑性变形，使二者互相抵消。图 6·3-33 为用加压机构来矫正工字梁的挠曲变形实例。

越星公司制作 请尊重作者版权

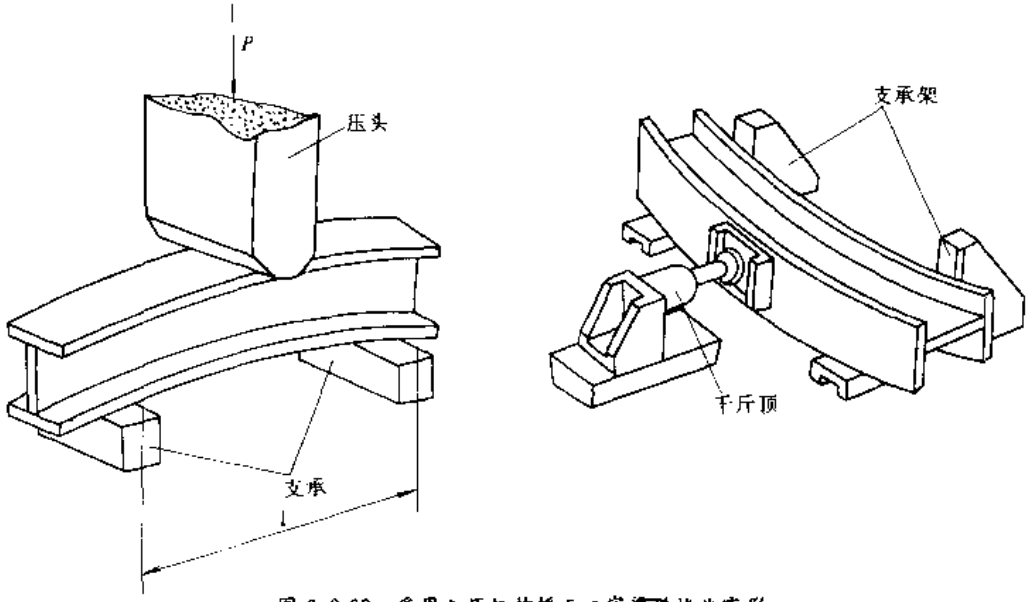


图 6·3-33 采用加压机构矫正工字梁的挠曲变形

除了采用压力机外，还可用锤击法来延展焊缝及其周围压缩塑性变形区域的金属，达到消除焊接变形的目的。这种方法比较简单，经常用来矫正不太厚的板结构。劳动强度大，表面质量不好，是锤击法的缺点。

当板壳结构的焊缝比较规则时（例如直焊缝或圆环焊缝），采用碾压法消除焊接变形效率高，质量好，具有很大的优越性。这个方法是利用圆盘形辊轮来碾压焊缝及其两侧压缩塑性变形区，使之伸长来达到消除变形的目的，见图 6·3-34。对于非规则的焊缝可以用沿焊缝逐点挤压的方法来替代辊轮碾压。

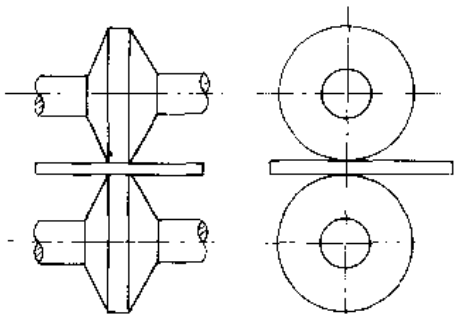


图 6·3-34 辊轮碾压矫形

(2)火焰矫正法。本法是利用火焰局部加热时产生压缩塑性变形，使较长的金属在冷却后收缩，来达到矫正变形的目的。火焰加热法采用一般的气焊焊炬，不需要专门的设备，方法简便，比较机动，不受构件尺寸的限制，因此在生产上广为应用。火焰矫正的效果好坏，关键在于正确地选择加热位置和加热范围。

图 6·3-35a 中非对称的 II 形钢的旁弯，可以采用在上下盖板的外弯侧加热三角形面积的办法来矫正。非对称工字钢的上挠变形（图 6·3-35b），可在上盖板上加热矩形面积和在腹板上部加热三角形面积来矫正。

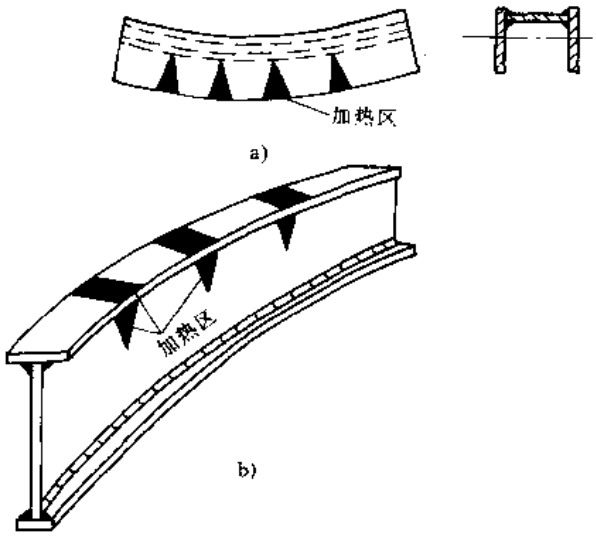


图 6·3-35 气体火焰矫形

a)II 形钢的旁弯 b)非对称工字形构件挠曲

图 6·3-36 中薄板的失稳变形，常常采用点状加热来矫正，加热点分布在产生波浪的部位。

加热薄板时，火焰的加热范围比较大，容易使薄板进一步向外拱，从而降低对加热点金属的压缩作用。在这种情况下，利用外力来限制薄板的外拱，对增强压缩作用有利。采用多孔板压住工件，然后通过小孔对工件加热，可以提高矫形的效率。也可以在进行加热的同时，在加热点周围喷水冷却来限制火焰加热的范围提高对加热点的挤压作用。但使用喷水法对具有淬硬倾向的钢材要慎重。

超星公司制作 请尊重作者版权

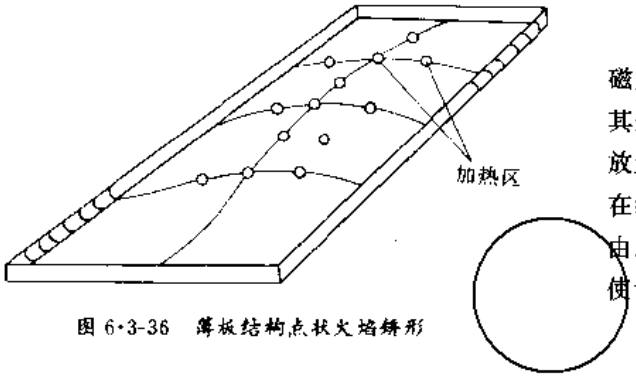


图 6·3-36 薄板结构点状火焰矫形

(3)强电磁脉冲矫正法(电磁锤法)。基本原理与电磁成形相同，不过反其道而行之，利用它来矫正变形，其过程如下：把一个绝缘的圆盘形线圈组成的电磁锤放置于待矫正处，由已充电的高压电容向其放电，于是在线圈与工件的间隙中出现一个很强的脉冲电磁场。由此产生一个比较均匀(与机械锤相比)的压力脉冲，使该处产生反向的变形。

第4章 熔 焊[19]～[23]

1 气焊

1·1 气焊特点

气焊的全称为氧-燃气焊接，是一种利用氧-燃气混合燃烧产生的火焰热量熔化母材和填充金属的焊接方法。气焊主要采用氧-乙炔火焰，故亦称氧-乙炔焊。

氧-乙炔焰的温度分布是不均匀的，焰心温度最高，如图 6·4-1。氧-乙炔焰有三种基本形式：中性焰，还原焰和氧化焰。这几种火焰的特征如图 6·4-2。

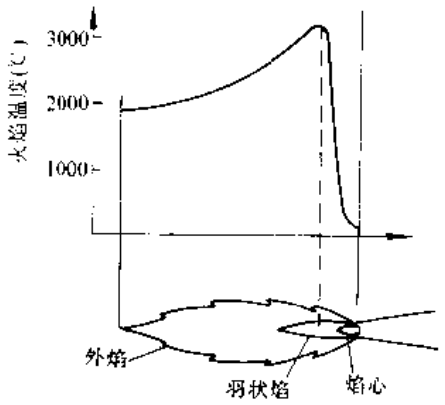


图 6·4-1 氧-乙炔焰各区的温度

气焊主要用于 6mm 以下的薄板、薄壁管和小直径管的焊接，也适用于维修焊接。其优点是机动、灵活和成本低，缺点是效率较低。

1·2 气焊设备与工具

焊炬是气焊的主要设备之一，其作用是混合氧气和可燃气体及调节通向喷嘴的气体流量。通用的焊炬有两类：即正压式(等压式)和喷射式(低压式)。正压式焊炬的燃气压力应>7kPa(表压)，氧气压力应大致相等。喷射式焊炬的燃气压力可<7kPa，而氧气压力大大高于燃气压力，即在 70～800kPa。常用的喷射式焊炬规格和特性参数见表 6·4-1。

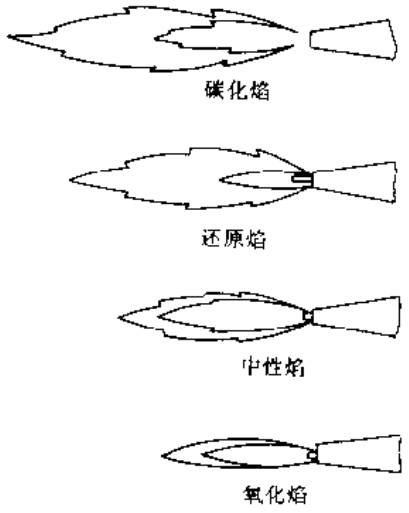


图 6·4-2 氧-乙炔焰的基本类型

减压器的作用是在调定的压力下稳定地输送氧气和燃气。减压器通常可分单级式和双级式，而双级式减压器比单级式工作更加稳定。

1·3 气焊工艺

1. 气焊接头和坡口形式 气焊大都用于薄壁焊件，其常用的接头和坡口形式示于图 6·4-3。坡口尺寸在 GB985—88 中作了明确的规定。接缝的装配间隙容

超星公司制作 请尊重作者版权

表 6·4-1 喷射式焊炬的规格和特性参数(GB5110—85)

型 号	氧气工作压力(MPa)					乙炔压力(MPa)	焊嘴个数	喷嘴孔径(mm)					焊炬总长度(mm)
	1#	2#	3#	4#	5#			1#	2#	3#	4#	5#	
H01-2	0.1	0.125	0.15	0.2	0.25	0.001~0.1	5	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	300
H01-6	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4			0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	400
H01-12	0.4	0.45	0.5	0.6	0.7	0.001~0.1	5	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	500
H01-20	0.6	0.66	0.7	0.75	0.8			2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	600

许在较宽的范围内变动。

2. 气焊焊接材料 低碳钢和结构钢气焊时，选用H08、H08A、H08Mn、H08MnA、H15Mn、H15MnA等焊丝，其中H08、H08A常用于强度要求不高的低碳钢构件。GB1300—77国家标准规定了上列焊丝的标准成分。气焊焊剂的作用是防止熔化金属氧化，去除氧化物等杂质并改善熔池金属的润湿性。铸铁、合金钢及各种非铁金属气焊时需使用焊剂，而低碳钢气焊时无需使用焊剂。常用的气焊焊剂的牌号，特性及用途列于表6·4-2。

表 6·4-2 常用气焊焊剂的牌号、特性及用途

牌号	名称	适用材料	基本特性
CJ101	不锈钢气焊焊剂	不锈钢及高合金耐热钢	熔点：≈900℃，润湿性良好，防止氧化，清渣容易
CJ201	铸铁气焊焊剂	铸铁	熔点：≈650℃，呈碱性反应，可去除硅酸盐和氧化物加速金属熔化
CJ301	铜气焊焊剂	铜及其合金	熔点：≈650℃，呈酸性反应，能溶解氧化铜和氧化亚铜
CJ401	铝气焊焊剂	铝及其合金	熔点：≈560℃，呈碱性反应，能破坏氧化铝膜，焊后须清渣

3. 气焊工艺参数选择 气焊工艺参数包括焊丝直径，火焰能率、焊嘴倾角和焊接速度等。焊丝直径按工件壁厚选择。碳钢气焊时焊丝直径可按表6·4-3选

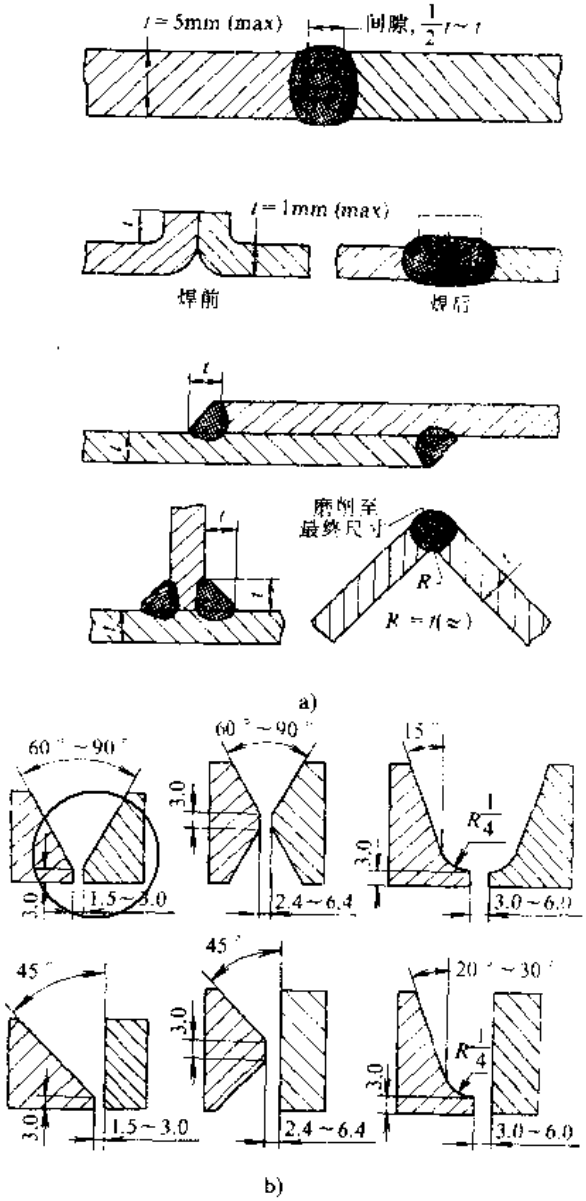


图 6·4-3 气焊接头和坡口形式
a)薄板气焊接头形式 b)厚板(5mm以上)气焊接头形式
1—对接接头(I形直边对接) 2—卷边对接
3—搭接接头 4—T形角接 5—直角对接

越星公司制作请尊重作者版权

定，火焰的能率取决于焊嘴的号码，同时应根据工件的厚度，材料的特性（熔点和热导性）以及焊接位置来选择。焊嘴的倾角可在20°～80°之间变化。焊件的厚度愈大，倾角应随之增大。

表6·4-3　工件厚度与焊丝直径的关系

工件厚度（mm）	1.0～2.0	2.0～3.0	3.0～5.0	5.0～10	10～15
焊丝直径（mm）	1.0～2.0	2.0～3.0	3.0～4.0	3.0～5.0	4.0～6.0

2　手工电弧焊

2·1　手工电弧焊特点

手工电弧焊通常指采用药皮焊条的手工焊接法。它是一种利用焊条与工件之间电弧产生的热量熔化焊条和母材而将被焊工件连接起来的焊接方法。

手工电弧焊是钢结构制造业中最通用的焊接方法之一。其焊缝成形过程如图6·4-4。

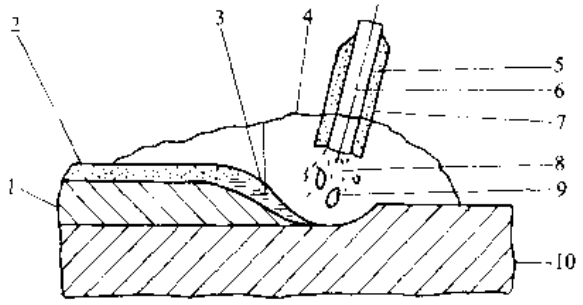


图6·4-4　手工电弧焊焊缝成形过程示意图

1—已凝固的焊缝金属　2—熔渣　3—熔化金属　4—焊条涂料燃烧产生的保护气体　5—焊接方向　6—焊条芯　7—焊条涂料　8—电弧　9—金属熔滴　10—母材

2·2　手工电弧焊设备

手工电弧焊设备包括焊接电源，电流调节器，焊钳和电缆线组成。现代的焊接电源均与电流调节器组合成一体。弧焊电源可分交流电源和直流电源两大类。直流电源主要有电机驱动式弧焊发电机，硅二极管弧焊整流器，晶闸管弧焊整流电源和逆变式焊接电源等四种。其中电机驱动弧焊发电机系高能耗机电产品，正在被逐步淘汰。硅二极管弧焊整流器由于输出的直流电波纹较大，电弧的稳定性较差，对网路电压的波动较敏感，其应用范围受到限制。

晶闸管（可控硅）弧焊整流电源由三相主变压器、晶闸管组、控制变压器、控制电路板、反馈系统和电参数指示仪表等组成。这种电源利用晶闸管的可控整流特性，将整流系统和电流调节系统合二为一。以三相半控桥，三相全控桥连接的晶闸管组通过改变其触发角相位来控制其输出电流的大小。这就大大简化了焊接电源的结构，减轻了质量，降低了能耗，应用范围正在不断扩大。

逆变式弧焊电源是最新一代的弧焊电源，由整流器、逆变器、高频变压器、二次整流器组、滤波电抗器等组成，其特点是反应速度快，直流输出电流波纹小，电弧稳定，质量小，体积小，能耗低（比晶闸管整流电源低20%～50%），是一种较为理想的手工电弧焊电源。

交流弧焊变压器的结构较直流弧焊电源简单得多。实际上是一台单相降压变压器，焊接电流是通过改变初级和次级线圈匝数或改变铁芯磁阻来调节。弧焊变压器的制造成本低廉，维护检修方便，应用面较广。其缺点是交流电弧燃烧不很稳定，必须采用药皮内含有稳弧剂的酸性药皮焊条。

2·3　手工电弧焊用焊条

2·3·1　焊条的分类

手弧焊用焊条按其用途可分成十大类。其中碳钢焊条，低合金钢焊条，不锈钢焊条，堆焊焊条，铝及铝合金焊条，铜及铜合金焊条及铸铁焊条等已纳入相应的国家标准。为方便起见，在工程上多半使用焊条的商业牌号。表6·4-4列出了国家标准中规定的型号与商业牌号的对照。

2·3·2　焊条药皮类型及特点

手弧焊焊条的药皮成分对焊缝金属的性能和操作工艺性起着决定性的作用。常用的焊条药皮类型已有十余种。在焊条的标准型号中，以最后的二位数字表示药皮的类型，在焊条的商业牌号中，以最后一位数字表示药皮的类型。各种药皮类型的名称，代号及主要特性列于表6·4-5。焊接重要的焊接结构用焊条，其药皮类型多选用低氢型或铁粉低氢型，而氧化钛钙型或铁粉钛钙型药皮焊条具有较好的操作工艺性。

超星公司制作 请尊重作者版权

表 6·4-4 焊条标准型号和商业牌号的对照表

国家标准分类			按焊条用途分类		
国标	型号	焊条类别	类别号	牌号	焊条名称
GB5117—85	E×××××	碳钢焊条	Ⅰ	J×××	结构钢焊条
GB5118—85	E××××-×	低合金钢焊条	Ⅱ	R×××	钼和铬钼耐热钢焊条
			Ⅲ	W×××	低温钢焊条
GB983—85	E×-×-××	不锈钢焊条	Ⅳ	G×××	铬不锈钢焊条
				A×××	铬镍不锈钢焊条
GB984—85	ED××-××	堆焊焊条	Ⅴ	D×××	堆焊焊条
GB10044—88	EZ×	铸铁焊条	Ⅵ	Z×××	铸铁焊条
GB3669—83	TAl×	铝及铝合金焊条	Ⅶ	L×××	铝及铝合金焊条
GB3670—83	TCu×	铜及铜合金焊条	Ⅷ	T×××	铜及铜合金焊条
			Ⅸ	Ni×××	镍及镍合金焊条
			Ⅹ	TS×××	特殊用途焊条

表 6·4-5 焊条药皮类型及其特性

标准型号	商用牌号	药皮类型	焊接位置	电流种类
E××00	××0	特殊型	不规定	交流或直流正、反接
E××01	××3	钛铁矿型	平、立、仰、横	交流、直流正、反接
E××03	××2	氧化钛钙型	平、立、仰、横	交流、直流正、反接
E××10	—	高纤维钠型	平、立、仰、横	直流反接
E××11	××5	高纤维钾型	平、立、仰、横	交流或直流反接
E××12	—	高钛钠型	平、立、仰、横	交流或直流正接
E××13	××1	高钛钾型	平、立、仰、横	交流、直流正、反接
E××15	××7	低氢钠型	平、立、仰、横	直流反接
E××16	××6	低氢钾型	平、立、仰、横	交流或直流反接
E××20	××4	氧化铁型	平角焊	交流或直流正接
E××22			平	交流或直流正、反接
E××23	××2铁	铁粉钛钙型	平、平角焊	交流或直流正、反接
E××24	××1铁	铁粉钛型		
E××27	××4铁	铁粉氧化铁型		交流或直流正接
E××18	××6铁	铁粉低氢型	平、立、仰、横	交流或直流反接
E××48			平、立、仰、立向下	
E××28	××6铁	铁粉低氢型	平、平角	交流或直流反接
E××08	××8	石墨型	平	交流或直流反接
—	××9	盐基	平、平角	直流反接

超星公司制作 请尊重作者版权

2·3·3 焊条的选用

手弧焊焊条的选用应遵循下列原则：

(1)对于受内压或受力的重要焊接结构，所选用焊条的强度和韧性应与所焊母材相当。对于受高温和化学侵蚀作用下工作的焊接结构，焊条的耐热性和耐蚀性应等同于所焊母材。对于一般钢结构中的联系焊缝，应以保证焊缝金属的工艺强度为前提，不必强求其等强性。

(2)对于加工过程中须经热加工或焊后须作各种热处理的焊件，应选择能保证热加工或热处理后焊缝强度及韧性的焊条。

(3)对于厚板及刚性结构应选用抗裂性较高的低氢型焊条，而对于薄板和刚性较小的结构，可采用工艺性较好的酸性药皮焊条。

(4)在保证接头综合性能的前提下，应尽量选用高效率的焊条。对于可在平焊位置施焊的大厚度角接焊缝或对致密性要求较低的对接焊缝可选用高效重力铁粉焊条，同时也减轻了焊工的劳动强度。对于通风不良的施工条件，应选用低尘低毒的药皮焊条。

(5)对于压力容器，管道对接焊缝的封底焊道可选择底层焊专用焊条，很易获得单面焊双面成形的封底焊道。

2·4 手工电弧焊工艺

手工电弧焊焊接工艺包括焊缝坡口准备、装配、规范参数和焊接操作技术。

1. 坡口准备与装配 焊缝坡口可采用直边对接，单面V形对接，X形对接，单面U形对接，双面U形对接，角接和T形接等坡口形式。坡口倾角和尺寸见GB985—88。为保证焊缝的质量，接缝的装配间隙必须符合规定的要求。

2. 焊接规范参数的选择 规范参数包括：焊条直径、焊接电流、电弧电压、焊接速度、焊缝层数等。其中最重要的参数是焊接电流和焊接速度。

a. 焊条直径 选择焊条直径时，主要考虑焊件厚度，接头形式、焊接位置、焊缝层数和容许的线能量等因素。最常用的焊条直径为4～5mm，立焊、仰焊和其他难焊位置的焊接，推荐采用直径3.2～4mm的焊条。小口径管对接焊缝和薄板接头的焊接应采用直径2.5～3.2mm的焊条。

b. 焊接电流 焊接电流的大小直接关系到焊接质量和效率。生产中主要根据焊条直径和焊接位置选择焊接电流。焊接电流与焊条直径大致为下列关系：

$$I=(30\sim50)d$$

式中 I——焊接电流(A)；

d——焊条直径(mm)。

30～50为系数，由焊条性质所决定，如不锈钢焊条应取较低的系数。立焊和横焊时，焊接电流比平焊要低10%～15%，仰焊的焊接电流比平焊低15%～20%。

c. 电弧电压 电弧电压由弧长决定。通常弧长应略小于焊条芯直径。使用低氢型焊条时，应尽量缩短电弧。对于某些酸性药皮焊条，焊接时应保持适当长的电弧，以使药皮充分燃烧，而获得良好的保护。使用低氢型碱性焊条时，电弧电压应控制在20～22V，而使用酸性焊条时，电弧电压的最佳范围应是25～28V。

d. 焊接速度 焊接速度主要取决于焊条的熔化速度，所要求的焊缝尺寸，接缝的装配质量和焊接位置等。焊接速度对焊缝及热影响区的组织和性能有一定的影响。在高强钢和不锈钢焊接时，通常要求采用焊接速度较高的窄焊道技术。

3. 焊接技术 操作技术对焊缝质量起决定性的作用。其中包括引弧、收弧、运条方式、焊条倾角和焊道接头方法等。

3 埋弧焊

3·1 埋弧焊特点

埋弧焊是一种利用焊剂层下燃烧的电弧热量，熔化焊剂、焊丝和母材而形成焊缝的焊接方法。埋弧焊的主要优点是：熔敷率高、焊接速度快；焊缝质量高，无金属飞溅，焊缝外表光滑美观；节省焊接材料和电能；由于采用焊剂保护，焊丝伸出长度短，可以采用大电流焊接，从而获得深熔的焊缝；30mm以下的焊件可不开坡口或开小坡口焊接，提高了生产效率；埋弧焊还容易实现生产过程的机械化和自动化。这种焊接法的缺点是设备占地面积较大、投资费用较高，并只适用于平焊位置的焊接。埋弧焊目前已成为工业上最常用的焊接方法之一，不仅可以焊接低碳钢，而且也能焊接低合金结构钢、高强钢、耐热钢和紫铜等。

埋弧焊可分成单丝、双丝并列、串列，热丝、多丝、带极、丝-带联用、单丝窄间隙和双丝窄间隙等工艺方法。单丝埋弧焊应用较普遍。埋弧焊的过程原理示于图6·4-5。

超星公司制作请尊重作者版权

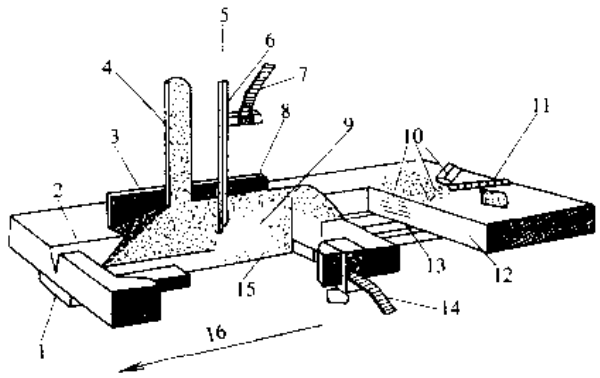


图 6·4-5 埋弧焊过程原理图

1—焊接衬垫 2—V形坡口 3—焊剂挡板
4—给送焊剂管 5—接自动送丝机构 6—焊丝
7—接焊丝电缆 8—颗粒状焊剂 9—已熔焊剂
10—渣壳 11—焊缝表面 12—母材
13 焊缝金属 14—接工件电缆(接地)
15—熔融焊缝金属 16—焊接方向

3·2 埋弧焊设备

埋弧焊设备有多种形式,可分小车式,操作机式,龙门架式和组合式。现代的埋弧焊设备已发展成由操作机、滚轮架(或翻转胎)、变位机和焊接机头等多机组合的焊接中心。埋弧焊机本身主要由焊接电源、机头、送丝系统,焊剂输送回收处理系统、行走机构(小车、横臂传动机构)控制系统、操作盘和指示仪表等组成。

1. 焊接电源 埋弧焊用焊接电源分两大类,一种是直流电源,另一种为交流电源,其容量比手工电弧焊电源大得多。生产中常用的埋弧焊直流电源有电机驱动式弧焊发电机,硅整流焊接电源和晶闸管弧焊整流电源三种。电机驱动式弧焊发电机由于能耗高,噪声大、维修困难,已逐步被后两种电源所淘汰。交流电源为大容量弧焊变压器,为使交流电弧更加稳定,已研制出输出电压波形为矩形波,每半波极性变换瞬间产生峰值电压的新型弧焊变压器。

埋弧焊电源的外特性可以是陡降的,也可以是缓降的。陡降特性的电源应与弧压反馈的送丝系统相配,而缓降特性的电源则应与等速送丝系统联用。

2. 送丝系统 埋弧焊设备的送丝系统有两种:即电弧自调节系统(亦称等速送丝系统)和弧压反馈系统(亦称变速送丝系统)。

a. 电弧自调节系统 该系统中,送丝速度调定后,焊接过程中保持不变。弧长靠电源的特殊外特性实现自调节。电弧自调节作用的强弱与焊丝直径和焊接电流大小有关。随着焊丝直径的增大或焊接电流的减小,电弧的自调节作用逐渐减弱。对于某一直径的焊丝,电弧自调节存在一个临界电流值,当焊接电流小于此临界值时,电弧自调节作用就会消失。焊丝直径小于4mm,其临界电流值较小,在实际使用的焊接电流范围内,均可实现电弧的自调节作用。焊丝直径超过4mm,临界电流值增大,等速送丝系统只适用于大电流密度范围。

b. 弧压反馈送丝系统 在弧压反馈送丝系统中,弧长的调节是通过专门设计的自动控制电路来完成的。这种电路是从焊接电弧的两端检测实际的电弧电压并与给定的电压相比较。当实际弧压高于给定值时,即加快送丝速度使弧压恢复到给定值;反之,送丝速度降低,使弧压回升。因此,弧压反馈系统应配用陡降外特性的电源,以使焊接过程中焊接电流保持恒定。

3·3 埋弧焊焊接材料

埋弧焊用焊接材料包括光焊丝、药芯焊丝、焊剂、陶瓷衬垫、金属粉末等。最常用的焊接材料是光焊丝和焊剂。

1. 光焊丝 碳钢,合金结构钢和不锈钢埋弧焊焊丝已列入国家标准GB1300—77。该标准规定了焊丝的牌号、代号、标准化学成分范围,焊丝直径及容许公差,制造技术条件和验收规则等。铜焊丝在JB2736—80的部颁标准中有相应的规定。埋弧焊常用的焊丝直径为2.0、3.0(3.2)、4.0、5.0和6.0mm。YB/Z11—76列出了某些合金钢焊丝的推荐钢号。表6·4-6列出几种最常用的埋弧焊焊丝牌号、代号和标准化学成分。

2. 焊剂 埋弧焊用焊剂有三大类:熔炼焊剂、陶质焊剂和烧结焊剂。工业生产上常用的焊剂主要是熔炼焊剂和烧结焊剂。熔炼焊剂的主要成分是Mn,Si,Ca,Mg,Al,Ba,Fe等金属氧化物和硅酸盐。在焊接过程中,焊剂在高温下与焊丝熔化金属及熔池金属产生冶金反应,共同决定焊缝金属的化学成分和力学性能。因此,焊剂与焊丝必须适当匹配。

熔炼焊剂的优点是:(1)化学成分均匀;(2)焊剂颗粒强度高,可多次重复回用;(3)吸潮性低,可简化焊剂的包装和贮藏方法。

熔炼焊剂的缺点是:(1)熔炼制造工艺能耗大、劳动条件差;(2)因熔炼温度高,难以在焊剂成分中加入还原剂和铁合金;(3)焊剂组分不能按焊接冶金和焊接工艺要求任意选配,而必须考虑各组分之间的互熔性。

超星公司制作 请尊重作者版权

表 6·4-6 几种最常用埋弧焊焊丝的标准化学成分

序号	焊丝		化学成分的质量分数(%)								
	牌号	代号	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	其他	S	P
1	焊 08 高	H08A	≤0.10	0.30～0.55	≤0.03	≤0.20	≤0.30	—	—	≤0.030	≤0.030
2	焊 08 锰高	H08MnA	≤0.10	0.80～1.10	≤0.07	≤0.20	≤0.30	—	—	≤0.030	≤0.030
3	焊 10 锰 2	H10Mn2	≤0.12	1.50～1.90	≤0.07	≤0.20	≤0.30	—	—	≤0.040	≤0.040
4	焊 08 锰钼高	H08MnMoA	≤0.10	1.20～1.60	≤0.25	≤0.20	≤0.30	0.30～0.50	Ti0.15(加入量)	≤0.030	≤0.030
5	焊 08 锰 2 钼高	H08Mn2MoA	0.06～0.11	1.60～1.90	≤0.25	≤0.20	≤0.30	0.50～0.70	Ti0.15(加入量)	≤0.030	≤0.030
6	焊 10 锰 2 钼高	H10Mn2MoA	0.08～0.13	1.70～2.0	≤0.40	≤0.20	≤0.30	0.60～0.80	Ti0.15(加入量)	≤0.030	≤0.030
7	焊 08 铬钼高	H08CrMoA	≤0.10	0.40～0.70	0.15～0.35	0.80～1.10	≤0.30	0.40～0.60	—	≤0.030	≤0.030
8	焊 08 铬钼钒高	H08CrMoVA	≤0.10	0.40～0.70	0.15～0.35	1.0～1.30	≤0.30	0.50～0.70	V0.15～0.35	≤0.030	≤0.030
9	焊 00 铬 19 镍 9	H00Cr19Ni9	≤0.03	1.0～2.0	≤1.00	18.0～20.0	8.0～10.0	—	—	≤0.020	≤0.030
10	焊 0 铬 19 镍 9	H0Cr19Ni9	≤0.06	1.0～2.0	0.50～1.0	18.0～20.0	8.0～10.0	—	—	≤0.020	≤0.030
11	焊 1 铬 19 镍 10 铌	H1Cr19Ni10Nb	≤0.09	1.0～2.0	0.30～0.80	18.0～20.0	9.0～11.0	—	Nb1.20～1.50	≤0.020	≤0.030
12	焊 0 铬 19 镍 11 钼 3	H0Cr19Ni11Mo3	≤0.06	1.0～2.0	0.30～0.70	18.0～20.0	10～12.0	2.0～3.0	—	≤0.020	≤0.030
13	焊 1 铬 25 镍 13	H1Cr25Ni13	≤0.12	1.0～2.0	0.30～0.70	23.0～26.0	12.0～14.0	—	—	≤0.020	≤0.030
14	焊 1 铬 21 镍 10 锰 6	H1Cr21Ni10Mn6	≤0.10	5.0～7.0	0.20～0.60	20.0～22.0	9.0～11.0	—	—	≤0.020	≤0.030

烧结焊剂的制造工艺较简单。首先将各种配料磨碎，再按一定的配方比例搅拌混合，并加粘结剂粒化，最后按焊剂组分的特性，在700～900℃温度范围内高温烧结而成。

烧结焊剂与熔炼焊剂相比，具有很多优点：(1)可按设计要求，将各种矿物质，还原剂和铁合金任意配方，使烧结焊剂既具有符合技术要求的冶金特性，又具有良好的工艺性能。便于研制有特殊要求的专用焊剂，如窄间隙埋弧焊用焊剂和高速焊剂等；(2)制造工艺简单，能耗低，易于实现流水线生产；(3)焊剂堆积量少、

超星公司制作 请尊重作者版权

渣壳薄，既利于脱渣，又降低焊剂消耗；(4)焊剂密度小，便于吸抽自动回收。其缺点是：(1)颗粒强度低，易于粉碎，降低了回收率；(2)吸潮性高于熔炼焊剂，使用前必须作高温焙烧。总的来说，烧结焊剂的综合技术经济指标优于同类型熔炼焊剂，目前已出现烧结焊剂逐渐取代熔炼焊剂的趋势。

对于埋弧焊焊剂已实行统一牌号。熔炼焊剂牌号以HJ表示。烧结焊剂牌号冠以SJ代号。碳素钢埋弧焊用焊剂已列入国家标准GB5293—85，该标准对焊剂型号，技术要求，检验标准和方法作了明确的规定。工程上常用的各种碳钢，低合金结构钢及不锈钢埋弧焊熔炼焊剂和烧结焊剂成分及适用范围列于表6·4-7。

表6·4-7 常用埋弧焊熔炼焊剂和烧结焊剂成分及适用范围

焊剂牌号	适用范围	化学成分的质量分数(%)									
		SiO_2	CaF_2	CaO	Al_2O_3	TiO_2	FeO	MnO	R_2O	S	P
HJ130	碳钢及低合金钢 交直流两用	35～40	4～7	10～18	12～16	7～11	～2.0	—	—	≤0.05	≤0.05
HJ230	碳钢及低合金钢 交直流两用	40～46	7～11	8～14	10～17	—	≤1.5	5～10	—	≤0.05	≤0.05
HJ250	低合金钢 直流反接	18～22	23～30	4～8	18～23	—	≤1.5	5～8	≤3	≤0.05	≤0.05
HJ260	不锈钢 直流反接	29～34	20～25	4～7	19～24	—	≤1.0	2～4	—	≤0.07	≤0.07
HJ330	碳钢低合金钢 交直流两用	44～48	3～6	≤3	≤4	—	≤1.5	22～26	≤1	≤0.06	≤0.08
HJ350	低合金钢 交直流两用	30～35	14～20	10～18	13～18	—	≤1.0	14～19	—	≤0.06	0.07
HJ431	碳钢，低合金钢 交直流两用	40～44	3～7	≤6	≤4	—	≤1.8	34～38	—	≤0.06	0.08
SJ101	低合金钢，窄间隙焊 交直流两用	$SiO_2+TiO_2=25$，$CaO+MgO=30$，$Al_2O_3+MnO=25$，$CaF_2=20$									
SJ301	碳钢、低合金钢 交直流两用	$SiO_2+TiO_2=40$，$CaO+MgO=25$，$Al_2O_3+MnO=25$，$CaF_2=10$									
SJ501	碳钢，低合金钢 交直流两用	$SiO_2+TiO_2=30$，$Al_2O_3+MnO=55$，$CaF_2=5$									

3. 焊接材料的选用 埋弧焊用焊接材料选用的原则是：(1)应根据对接头提出的强度、冲击韧性和耐蚀性等要求选择相应的焊丝；(2)按焊丝的化学成分选配焊剂，尤其要注意低硅(w_{Si}[⊖]<0.1%)焊丝，如H08A，H10Mn2等必须与高硅焊剂，如HJ431焊剂配用；而w_{Si}>0.2%的合金焊丝，则必须与中硅或低硅焊剂，如HJ350，HJ250或SJ101等焊剂相配；(3)应考虑加工工艺过程对焊缝金属性能的影响，例如要求焊后热处理的接头应选用合金成分较高一级的焊丝；(4)接头的拘束度也影响焊丝与焊剂的选配，高拘束度接头应采用碱度较高的焊剂，以提高焊缝金属的抗裂性；(5)对于一些特殊的应用场合，应选配满足相应要求的专用焊剂，例如厚壁窄间隙埋弧焊，必须选配脱渣性良好的焊剂，如SJ101烧结焊剂。几种常用碳钢，低合金

⊖ w_{Si}为Si的质量分数。

超星公司制作请尊重作者版权

钢和不锈钢埋弧焊焊材选用实例见表 6·4-8。

表 6·4-8 常用钢种埋弧焊焊接材料选用实例

所焊钢号	焊接材料	
	焊丝牌号	焊剂牌号
Q235、Q255 20、25、20g	H08A、H08MnA	HJ431 SJ501
16Mn、16MnCu 09Mn2、09MnV	H08MnA H10Mn2	HJ431 HJ230 SJ501
15MnV、15MnTi 15MnVCu、16MnNb	H10Mn2 H08MnMoA	HJ431、SJ301 HJ350、SJ301
12CrMo、15CrMo	H08CrMoA	HJ350、SJ301
12CrMoV	H08CrMoVA	HJ350、SJ301
1Cr18Ni9	H0Cr18Ni9	HJ260
00Cr19Ni11	H00Cr19Ni9	HJ260
0Cr19Ni11Ti	H1Cr19Ni10Nb	HJ260
0Cr17Ni12Mo2	H0Cr19Ni11Mo3	HJ260

3·4 埋弧焊工艺

埋弧焊工艺包括焊前准备，坡口加工，焊接规范参数，焊接技术和焊后检查。

1. 焊前准备和坡口形式 埋弧焊的接头形式主要有对接接头、T 形接头和搭接接头。典型的坡口形式有：直边对接，单 V 形和双 V 形坡口以及单 U 形和双 U 形坡口。这些坡口尺寸和装配间隙的要求已在国家标准 GB986—88“埋弧焊焊缝坡口的基本形式和尺寸”中作了明确的规定。尚未列入标准但在生产中已得到应用的窄间隙坡口形式及尺寸示于图 6·4-6。

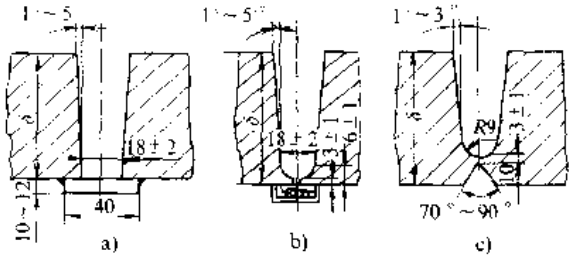


图 6·4-6 窄间隙坡口形式及尺寸

a)固定衬垫单面焊坡口 b)陶瓷衬垫单面焊坡口

c)背面封底的单面焊坡口

坡口边缘的加工，可采用热切割或机械加工方法。坡口加工精度对埋弧焊焊缝质量十分重要，若坡口角度和钝边尺寸超过公差范围，就可能产生烧穿和未焊透等缺陷。接缝的装配间隙和错边亦应严格控制，对于不加衬垫的对接接头，接缝装配间隙不应大于 1.5mm，错边不应大于 3mm。

2. 焊接规范参数 埋弧自动焊的规范参数有：焊接电流、电弧电压，焊接速度，焊丝直径和焊丝伸出长度等。

a. 焊接电流 焊接电流是影响焊接质量的主要参数之一，决定了焊丝的熔化速度及焊缝熔深。在其他参数不变的条件下，随着焊接电流的提高，熔深和余高增大。

对于普通低碳钢，焊接电流主要根据所要求的熔深选择。开坡口焊缝的填充层和厚板深坡口的多层焊缝，则应按焊缝的成形选择焊接电流。焊接不锈钢和高强度钢时，焊接电流主要根据所限定的线能量来选定。

b. 电弧电压 电弧电压主要影响焊缝的尺寸和形状。在其他规范参数不变的条件下，随着电弧电压的提高，焊缝的宽度明显增大，而熔深和余高略有减小。

为获得优良的焊道成形，电弧电压应与焊接电流相匹配。随着焊接电流的提高，电弧电压也应相应增大。

c. 焊接速度 焊接速度对焊缝的熔深和熔宽有一定的影响，当其他规范参数不变时，增加焊接速度，熔深、熔宽和余高都相应地减小。为使焊缝外观良好，焊接速度必须与所选定的焊接电流、电弧电压适当匹配。

d. 焊丝直径 焊丝直径的选择主要取决于所使用的焊接设备和所焊工件的形状和尺寸。半自动埋弧焊应采用直径 2mm 以下的焊丝，而自动埋弧焊机大多数使用直径 3mm 以上的粗丝。在大型厚壁焊件的焊接中，为提高效率，通常采用直径 4～6mm 的焊丝。

e. 焊丝伸出长度 焊丝伸出长度是指从导电嘴末端至电弧根部的一段导电的焊丝长度。焊丝伸出长度增加，这段焊丝的电阻随之增大，电流的加热作用也随之增强，使焊丝的熔化速度加快。在焊接电流不变的条件下，加长焊丝伸出长度可使焊丝的熔化速度提高 25%～50%，而熔深明显减小。

f. 焊丝偏移量 环缝埋弧自动焊时，焊丝与焊件中心垂线的相对位置对焊缝成形的影响如图 6·4-7。为获得良好的焊缝成形和适量的熔深，将焊丝逆焊件转动方向后移一定距离，以使焊接熔池在焊件转到中心垂线位置时凝固，避免液态熔池金属溢流和焊道外形的畸变。焊丝偏移量取决于焊件的直径、焊接速度和焊接电流。一般取 50～70mm。

超星公司制作 请尊重作者版权

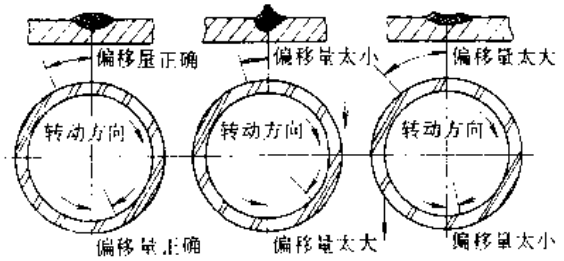


图 6·4-7 焊丝偏移量对焊缝成形的影响

3·5 埋弧焊焊接技术

埋弧自动焊的焊接技术主要包括焊前准备，引弧和收弧，焊接衬垫使用方法，焊丝端的对中和弧长的控制等。

1. 焊前准备 埋弧自动焊焊前应严格检查坡口尺寸和接缝装配间隙是否符合要求。坡口表面及接缝区应去除氧化皮，锈斑和油污。焊丝表面亦应除油，去锈。焊剂应按规定的温度烘干。纵缝对接焊缝应装一定长度的引弧板和收弧板。

2. 引弧和收弧技术 在埋弧自动焊中，引弧方法有钢绒球法，焊丝尖端法和焊丝回抽法。其中焊丝回抽引弧法最为可靠，但必须使用能在起动时回抽焊丝的自动埋弧焊机。通常先将焊丝与工件表面接触，然后撒上焊剂并接通电流。因焊丝与工件短接，电压接近于0，使送丝电机反转回抽焊丝而引燃了电弧。当电弧电压上升到给定值时，送丝电机改为正转，并以正常速度向下送丝，开始焊接过程。

埋弧焊的收弧技术也很重要。收弧时应先停住小车(或工件)行走，电弧继续燃烧 3～4s 后再熄弧，以便填满弧坑。纵缝焊接时，应在收弧板上完成熄弧操作。

3. 焊接衬垫使用技术 埋弧自动焊中，最常用的焊接衬垫有：(1)钢衬垫；(2)封底焊缝；(3)铜衬垫；(4)焊剂衬垫；(5)陶瓷衬垫；(6)柔性衬带。前两种衬垫是永久衬垫，并可能成为整个接头的一部分，其余四种是临时衬垫，焊后可以拆除。钢衬垫也可根据设计要求在焊后加工掉。几种衬垫的形状和装配方法如图 6·4-8。

4. 焊丝的对中 在薄板对接和厚板对接的根部焊道焊接时，焊丝中心线必须对准焊缝。如焊丝偏离焊缝，则很可能产生未焊透。焊接不等厚的对接接头时，焊丝端应适当向较厚侧偏移。在坡口内多层焊时，焊接侧壁焊道的焊丝离侧壁的距离应大致等于焊丝的直径。

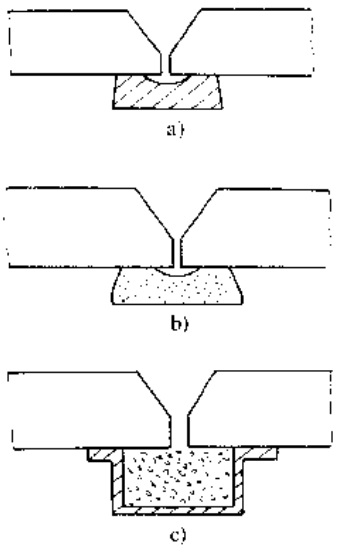


图 6·4-8 几种典型的埋弧焊用衬垫
a)钢衬垫 b)陶瓷衬垫 c)焊剂衬垫

3·6 各种接头的典型焊接工艺

3·6·1 对接接头典型焊接工艺

1. 薄板单面焊双面成形工艺 厚 12mm 以下的薄板对接接头，可不开坡口留一定间隙，压紧在焊剂垫或焊剂-铜衬垫上，采用表 6·4-9 所列的规范参数可以完成单面焊双面成型的焊缝。

表 6·4-9 薄板对接接头单面焊双面成形埋弧焊规范参数

板厚 (mm)	接缝间隙 (mm)	焊丝直径 (mm)	焊接电流 (A)	电弧电压 (V)	焊接速度 (m/h)	焊剂垫压力 (kPa)
5	2～2.5	4	500～550	28～30	40～46	80
6	2～3	4	600～650	28～30	38～40	80
7	2～3	4	650～700	30～32	36～38	80
8	2.5～3.5	4	700～750	32～34	34～36	80
10	3～4	4	750～800	34～36	32～34	100
12	4～5	4	800～850	36～38	30～32	100

2. 中厚板双面埋弧焊工艺 厚 14～30mm 的中厚板对接接头可采用不开坡口的双面焊或开 V 形和 X形坡口的双面焊工艺。典型的规范参数分列于表 6·4-10 和表 6·4-11。采用表列的规范参数可以保证两面焊缝底部相互重叠 3～4mm。有时为减小第二面焊缝的余高，焊前可用电弧气刨或火焰气刨开一定深度的坡口，如表 6·4-12。

熔星公司制作 请尊重作者版权

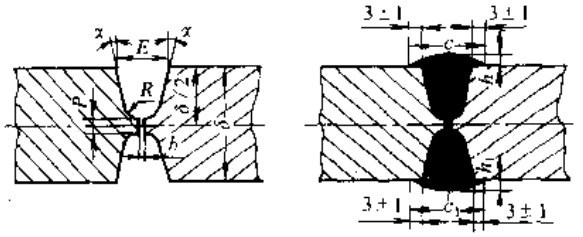
表 6·4-10 中厚板不开坡口双面对接埋弧自动焊规范参数

焊件厚度(mm)	接缝间隙(mm)	焊丝直径(mm)	焊道层次	焊接电流(A)	电弧电压(V)	焊接速度(m/h)
14	0.5～1	5	1	700～750	34～36	35～36
			2	750～800	34～36	30～28
16	0.5～1	5	1	750～800	34～36	34～35
				800～850	36～38	26～24
18	0.5～1	5	1	800～850	36～38	32～34
			2	850～900	38～40	26～24
20	1～2	5	1	850～900	38～40	30～32
			2	900～1000	40～42	26～24

表 6·4-11 中厚板 V 形和 X 形坡口对接埋弧焊规范参数

焊件厚度(mm)	坡口形式	焊丝直径(mm)	焊接电流(A)		电弧电压(V)	焊接速度(m/h)
			第一层	其余各层		
14～16	单面 V 形	4	600～650	700～750	34～36	22～25
		5	650～700	750～800	36～38	25～30
18～22	单面 V 形	4	600～650	750～800	36～38	22～25
		5	650～700	800～850	38～40	25～30
24～30	X 形	4	600～650	750～800	36～38	22～25
		5	650～700	800～850	38～40	25～30

表 6·4-12 中厚板双面埋弧焊坡口形式



焊接方法	坡口及焊缝尺寸(mm) δ	α(°)	b	P	R	焊接方法	坡口及焊缝尺寸(mm) δ	α(°)	b	P	R	E	c=c1	h=h1	图样标注符号	适用范围
埋弧自动焊	40～90	12±2	0～2	8±1	10^{+1}_{0}	手工电弧焊	30～90	6^{+2}_{0}	0～2	2±1	6^{+1}_{0}	22～33	29～39	0～3	Z	钢板拼接缝筒节纵缝
												32～43	38～49	0～3		
	85～160	10±2	0～2	8±1	10^{+1}_{0}		85～150	4^{+2}_{0}	0～2	2±1	6^{+1}_{0}	14～20	20～26	0～3	S	钢板拼接缝筒节纵缝
												17～22	23～28	0～3		

3. 厚板深坡口埋弧焊工艺 板厚≥50mm 的对接接头，纵缝应开双面对称的 U 形坡口，以减少焊接变形，而环缝可开表 6·4-13 所示的手工电弧焊封底或者加衬垫的单面 U 形坡口。典型的焊接工艺规范参数列于表 6·4-14。

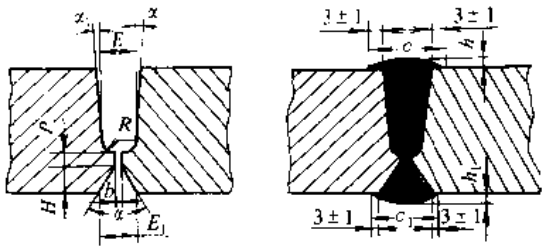
4. 厚板窄间隙埋弧焊工艺 窄间隙埋弧焊可以采用如图 6·4-9 所示的三种工艺方案。每层单道焊工艺方案通常适用于厚 70～150mm 的厚壁对接接头，而每层双道焊的适用厚度范围为 100～300mm。接头壁厚在 300mm 以上时最好选用每层三道焊的工艺。其典型规范参数见表 6·4-15。

3·6·2 角接接头典型焊接工艺

角接接头的埋弧自动焊可在船形位置和横焊位置下完成。当角焊缝焊脚尺寸大于 8mm 时，最好将工件放在船形位置焊接。横焊位置采用单丝焊一次行程可完成的单道角焊缝的厚度最大为 10mm。如角焊缝厚度大于此值则应采用多道焊。船形位置和横焊位置焊

超星公司制作 请尊重作者版权

表 6·4-13 手工电弧焊封底的单U形坡口



焊接方法	坡口及焊缝尺寸(mm)											图样标注符号	适用范围
	δ	a_1(°)	α(°)	b	P	H	R	E	c	c_1	$h=h_1$		
背手工电弧焊封底的埋弧自动焊	30～60	10±2	70^{-5}_{0}	0～2	3±1	10±1	10^{+1}_{0}	23～34	26～40	16～20	0～3	Z	筒身环缝
	65～90	8±2	70^{-5}_{0}	0～2	3±1	10±1	10±1	32～40	38～46	16～20	0～3		
	95～130	6^{+2}_{0}	70^{+5}_{0}	0～2	3±1	10±1	10^{+1}_{0}	34～48	40～54	16～20	0～3		
	130～200	5^{+1}_{0}	70^{+5}_{0}	0～2	3±1	10±1	10^{+1}_{0}	39～51	45～57	16～20	0～3		
双面手工电弧焊	30～60	6^{+2}_{0}	70^{+5}_{0}	0～2	2±1	10±1	6^{+1}_{0}	15～21	21～27	16～20	0～3	S	筒身环缝
	65～90	4^{+2}_{0}	70^{+5}_{0}	0～2	2±1	10±1	6^{+1}_{0}	19～22	25～28	16～20	0～3		

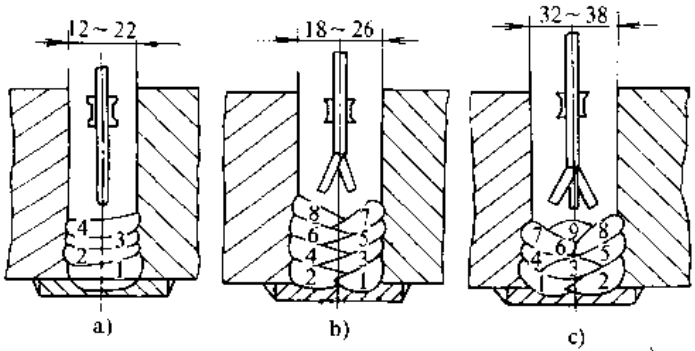


图 6·4-9 窄间隙埋弧焊工艺方案

a)每层单道焊 b)每层双道焊 c)每层三道焊

表 6·4-14 厚板对接单U形坡口埋弧焊规范参数

板厚(mm)	坡口倾角(°)	焊丝直径(mm)	焊接电流(A)		电弧电压(V)	焊接速度(m/h)
			封底层	其余各层		
50～70	8	4	700～750	650～700	34～36	25～30
		5	750～800	700～750	36～38	23～32
75～120	6	4	650～700	600～650	34～36	25～30
		5	700～750	650～700	36～38	28～32

表 6·4-15 厚板接头窄间隙埋弧焊典型规范参数

工艺方法	每层焊道数	焊丝		坡口宽度(mm)	坡口倾角(°)	电流种类及极性	焊接电流(A)	电弧电压(V)	焊接速度(m/h)
		根数	直径(mm)						
每层单道焊	1	1	3.2	12	3	交流	425	27	11
		1	3.2	18	3	交流	600	31	15
		2	3.2	18	3	交流	前置 600 后置 500	32 28	27
每层双道焊	2	1	3.0	18	2	直流反接	525	28	24
		1	3.0	18	0	交流	400～425	37～38	30
	2	1	3.0	20～21	1.5	直流反接	500～550	29～31	30
		1	4.0	22	1.5	直流反接	550～580	29～30	30
每层三道焊	3	1	5.0	35	1～2	交流	700	32	30

接角接接头时，焊丝与工件的相对位置示于图 6·4-10。典型规范参数分别列于表 6·4-16 和表 6·4-17。

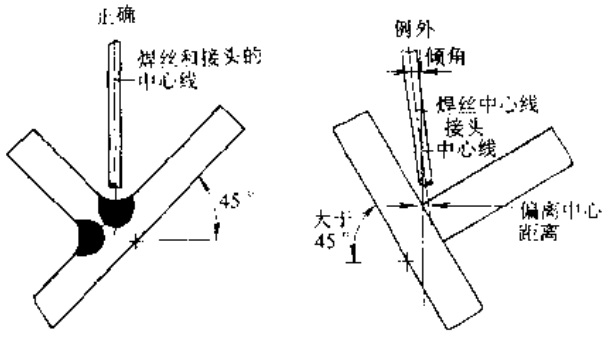


图 6·4-10 角接接头焊接时焊丝与工件的相对位置

表 6·4-16 角接接头船形位置埋弧自动焊接规范参数

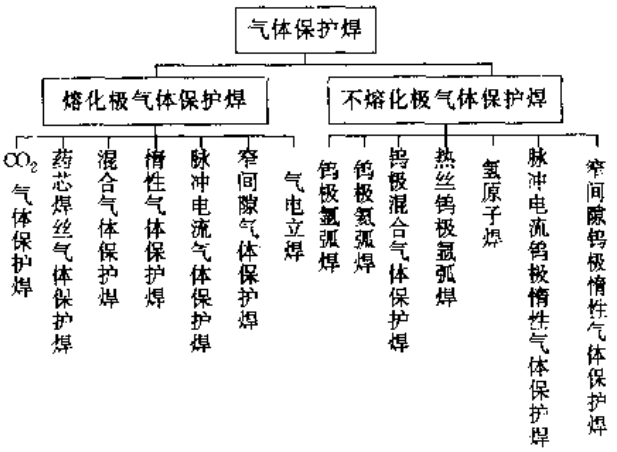
焊脚尺寸(mm)	焊丝直径(mm)	焊接电流(A)	焊接电压(V)		焊接速度(m/h)
			交流	直流(反接)	
8	3	550～600	34～36	32～34	28～30
	4	580～630	34～36	32～34	30～32
	5	650～700	35～37	34～36	30～32
10	3	600～650	33～35	32～34	20～23
	4	650～700	34～36	32～34	23～25
	5	720～760	35～37	34～36	23～25
12	3	600～650	34～36	32～34	12～14
	4	700～750	35～37	32～34	16～18
	5	780～820	36～38	34～36	18～20

表 6·4-17 角接接头横焊位置埋弧焊规范参数

焊脚尺寸(mm)	焊丝直径(mm)	电流种类	焊接电流(A)	焊接电压(V)	焊接速度(m/h)
4	3	直流反接	350～400	28～30	50～52
6	3	直流反接	450～500	30～32	45～50
	4	直流反接	500～550	32～34	52～54
8	3	直流反接	500～550	32～34	45～50
	4	直流反接	600～650	34～36	50～54

4 气体保护焊

气体保护焊是以气体作保护介质的各种电弧焊接法的总称，可分为两大类：熔化极气体保护焊（如MIG/MAG）和不熔化极气体保护焊（如 TIG）。在这两类气体保护焊中又可分成下列各种气体保护焊接法。



4·1 熔化极气体保护焊

熔化极气体保护焊是采用实心焊丝或药芯焊丝作电极，CO_2、Ar、CO_2+Ar 或 Ar+CO_2 作保护气体，以电弧为热源的熔焊方法。可以采用半自动或全自动焊接设备完成焊接过程。熔化极气体保护焊的作用原理如图 6·4-11。焊接时，焊丝连续向焊接熔池给送，保护气体连续从焊枪喷嘴喷出排除焊接区中的空气，保护电弧及焊接熔池不受大气污染，从而获得优质的焊缝。

熔化极气体保护焊的优点是：(1)与手工电弧焊相比熔敷率较高；(2)省去手工电弧焊的清渣，更换焊条的辅助时间，提高了焊接效率；(3)焊接材料的利用率较高；(4)电弧及熔池的可见度好，便于实现焊接过程的自动化；(5)工艺适应性强，可在各种位置下进行焊接；(6)焊缝金属的含氢量低、适宜于焊接对冷裂敏感的低合金钢；(7)焊接电源耗电量低，节能显著，因此熔化极气体保护焊是取代手工电弧焊的先进焊接法。缺点是设备比较复杂，维修费用较高，焊接区的气体保护易受外来气流的破坏，在现场施焊时，必须在焊接区周围加设挡风屏障。

4·1·1 工艺特点

熔化极气体保护焊因由平外特性电源供电并采用直径 2mm 以下的细丝，其过程特点与其他弧焊方法有很大的不同。这些特点集中表现在熔化焊丝金属的过渡形式上。按照所选用的焊丝直径、保护气体的种类和电规范参数（焊接电流、电弧电压），熔化的焊丝金属过渡形式基本上有四种：即短路过渡、大熔滴过渡、射流过渡和脉冲射流过渡，如图 6·4-12。

超星公司制作 请尊重作者版权

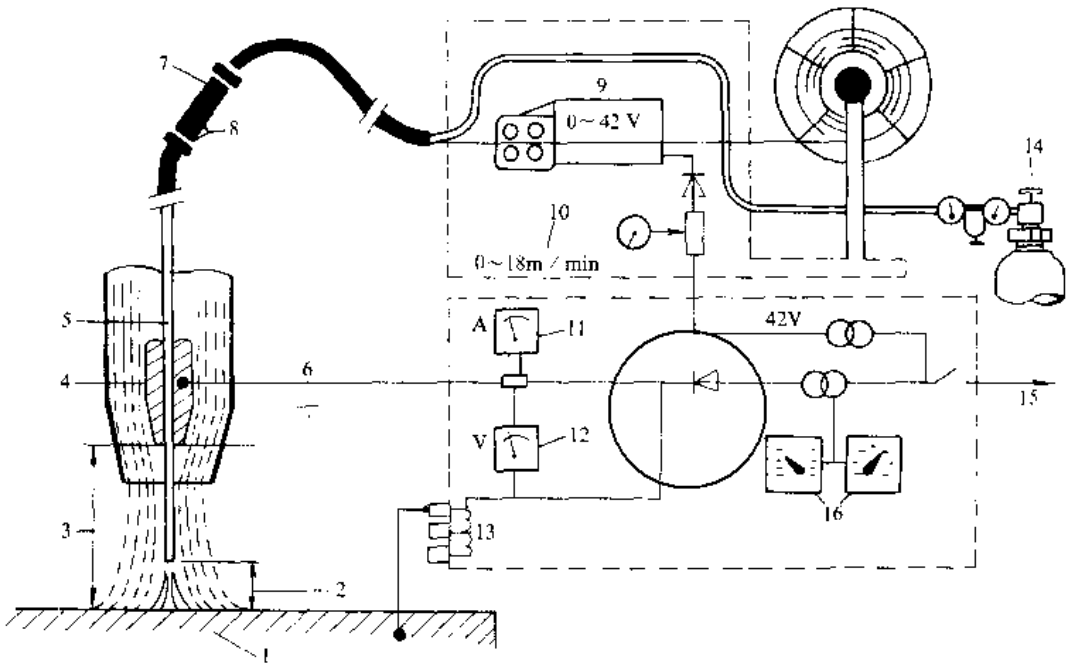


图 6·4-11 熔化极气体保护焊作用原理

1—工件 2—电弧长度 3—伸出长度 4—导电嘴 5—气体喷嘴 6—焊接电源 7—焊炬 8—开关 9—电动机 10—送丝速度 11—焊接电流 12—电弧电压 13—电感 14—气瓶 15—主电源 16—电压调节

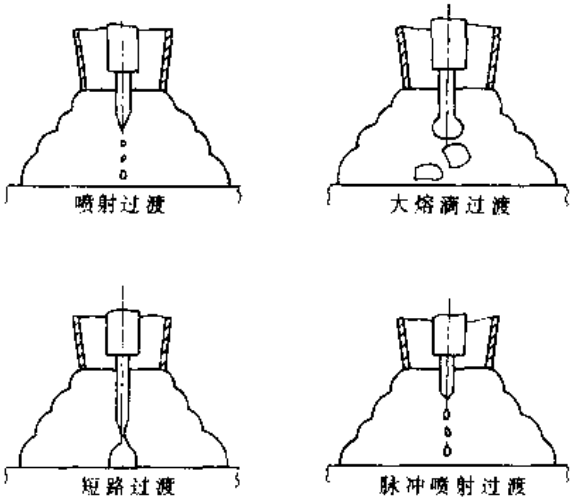


图 6·4-12 熔滴过渡的四种基本形式

1. 短路过渡 熔化焊丝金属的短路过渡是在采用直径 0.8～1.2mm 细焊丝和低电弧电压及焊接电流焊接时产生的。熔化金属只是在焊丝与熔池相接触产生短路的瞬间过渡，过渡频率约 20～200 次/s。

2. 大熔滴过渡 大熔滴过渡是在较低的焊接电流和较高的电弧电压下焊接时产生的。熔滴的尺寸在表面张力和阳极反作用力的影响下可能长大到焊丝直径的 1.5～2 倍，然后在电磁收缩力和重力的作用下向熔池过渡。

3. 射流过渡 在富氩混合气体(Ar 的质量分数 >80%)保护下焊接时，随着焊接电流和电弧电压的升高，熔化金属的过渡会转化为射流状。射流过渡是细熔滴的轴向过渡。熔滴的直径等于或小于焊丝直径，过渡频率最高可达每秒数百次。射流过渡是富氩保护气体对熔化焊丝端的收缩效应以及高电流下的电磁收缩力共同作用的结果。

4. 脉冲射流过渡 在脉冲电弧焊接中，焊接电流有规律地按一定频率在峰值电流和基本电流之间波动。如将峰值电流调整到超过射流过渡的临界电流值，则就可产生脉冲射流过渡这一特殊熔滴过渡形式。熔滴过渡只是在峰值电流周期内产生，即在每一个高电流脉冲时，过渡一个熔滴。常用的脉冲电源输出电流的频率为 100Hz，这样每秒钟可过渡 100 个熔滴。

利用上述四种熔滴过渡形式，形成了四种气体保护焊工艺方法。分别可称为短路、射流、大熔滴和脉冲射流焊接法。按其各自的工艺特性限定了它的适用范围。表 6·4-18 列出了这四种焊接方法与惰性气体保护焊的对比资料。

超星公司制作 请尊重作者版权

表 6·4-18 各种熔化极气体保护焊接法的工艺特性及适用范围

工艺方法	惰性气体保护焊	CO_2 大熔滴焊接法	短路过渡焊接法	射流过渡焊接法	脉冲射流焊接法
保护气体	惰性气体 Ar、He	CO_2	CO_2 或 CO_2+Ar	Ar+O_2 或 Ar+CO_2	Ar、He、Ar+O_2
金属过渡形式	多种形式	大熔滴	短路	射流	脉冲射流
可焊的金属种类	铝及其合金，不锈钢，镍及其合金，铜合金，钛	低碳钢，中碳钢，低合金高强度钢	低碳钢，中碳钢，低合金高强度钢，某些不锈钢	低碳钢，中碳钢，低合金高强度钢	铝，镍及其合金钢
可焊工件厚度	3～10mm 厚板可不开坡口，最大厚度不限	3～13mm 板材可不开坡口	1～6mm 薄板、厚板立焊、仰焊	6～13mm 板材可不开坡口，最大厚度不限	厚度不限
焊接位置	全位置	平焊、横焊	全位置	平焊、横焊 细焊丝全位置	全位置
主要优点	可焊大多数非铁金属，焊后清理工作量最小	成本低，焊速高深熔	可焊薄板材，焊根间隙搭桥性能好，后清理少	焊缝表面平滑深熔，焊速高	可使用粗焊丝
局限性	气体成本高	清除飞溅费时	焊厚板不经济	焊接位置受限制	电源价格高
焊缝表面成形	表面相当平滑、凸形	较平滑，有些飞溅	表面平滑，飞溅较少	表面平滑，飞溅最少	表面平滑
焊丝直径范围(mm)	0.9,1.2,1.6,2.4	1.2,1.6,2.0,2.4	0.8,0.9,1.2	0.9,1.2,1.6,2.4	1.6,2.0,2.4,3.0

4·1·2 焊接设备

熔化极气体保护焊设备分两大类，即半自动焊(手工操作焊接速度)及自动焊设备。半自动气体保护焊设备由四部分组成：(1)焊接电源；(2)送丝系统及控制器；(3)焊枪及其附件；(4)气瓶或送气系统。自动焊设备是在此基础上增加一套行走机构及相应的控制系统。

1. 焊接电源 熔化极气体保护焊用电源必须是直流电源。由于电弧的静特性是向上倾斜的，所以应配用平特性(即恒压电源)或缓降外特性电源。这种电源与等速送丝机构相配，电弧具有自身调节的作用。电源按送丝速度输出熔化焊丝所需的电流。

气体保护焊电源有：硅整流电源，晶闸管整流电源，晶体管整流电源和逆变式焊接电源。

2. 送丝机构及控制器 熔化极气体保护焊的送丝机构大多数是等速送丝型。送丝速度在焊前预先调定，焊接过程中不随其他规范参数变化。送丝机构共有三种形式：即推丝式，拉丝式和推拉丝式。推丝式送丝机构应用最广。拉丝式送丝机构只适用于直径 1mm 以下的细丝。焊丝盘，送丝电机和传动机构均装在焊枪上。只用于与额定焊接电流 200A 以下的焊接电源相配。推拉式送丝机构只有在送丝软管相当长的情况下才采用。

送丝机构由直流电动机，减速器或直接用步进电机，送进滚轮和校正滚轮等组成。直流电机采用可控硅调速器控制，可在相当宽的范围内无级调节送丝速度。为稳定而匀速给送焊丝，送丝滚轮上应加工出 V 形凹槽。用于药芯焊丝气体保护焊的送丝机构、送丝滚轮和压紧滚轮均需加工出与焊丝直径相配的 U 或 V 形凹槽。最好采用双主动送丝滚轮，并应装有可调整压紧力的机构。

3. 焊枪及其附件 熔化极气体保护焊用焊枪可分两类：一类是气冷式焊枪，可用于焊接电流小于 350A 的焊接。另一类为水冷式焊枪，主要用于大电流连续作业，这类焊枪带有水冷系统、结构较复杂，多半用于机械化和自动化焊接设备。气冷式焊枪的典型结构示于图 6·4-13。

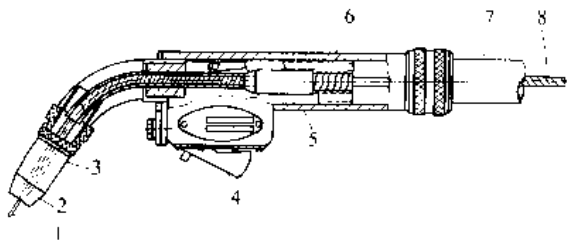


图 6·4-13 气冷式焊枪结构

1—焊丝 2—导电嘴 3—喷嘴 4—焊枪开关 5—焊枪手把 6—气体导管 7—复合电缆 8—焊丝导管

超星公司制作请尊重作者版权

4. 供气系统 保护气体的供气系统由气瓶、减压器，预热器和流量计等组成。在大量使用气体保护焊的车间，保护气体可由气体供应中心站通过专用管道直接输送到各焊接工位。工业上通用的氩气瓶最高充气压力为10MPa，液态CO_2瓶的最高工作压力为5MPa。因此，使用前应通过减压器将气压降至焊接所要求的数值。液态CO_2需用预热器加以气化。气体最后经流量计输送到焊枪中。

4·1·3 焊接材料

熔化极气体保护焊用焊接材料包括焊丝和保护气体。焊丝可分实心焊丝和药芯焊丝两种。焊丝的化学成分应与保护气体的种类相配。采用活性气体(CO_2，Ar+CO_2，Ar+O_2)作保护气体时，焊丝中必须含有Si，Mn，Al，Ti，Zr等脱氧元素。在惰性气体下焊接时，可采用与母材成分相当的焊丝。

1. 焊丝 熔化极气体保护焊焊丝的选择应考虑下列五个主要因素：(1)母材的化学成分；(2)对接头提出的性能要求；(3)所使用的保护气体种类；(4)接头的工作条件或相应的技术规程要求；(5)焊接接头类别、坡口形状和焊接位置。现行的CO_2气体保护焊用钢焊丝国家标准GB8110—87中仅列出H08Mn2Si和H08Mn2SiA一类两种焊丝。在工程上实际使用的几种气体保护焊钢焊丝牌号及成分列于表6·4-19。

表6·4-19 常用气体保护焊钢焊丝牌号及成分的质量分数 (%)

牌 号	C	Mn	Si	Cr	Mo	S	P	Cu	Ni	其他
H08Mn2SiA	≤0.11	1.8～2.10	0.65～0.95	≤0.20	—	≤0.03	≤0.03	≤0.5	≤0.30	—
H08Mn2Si	≤0.11	1.70～2.10	0.65～0.95	≤0.20	—	≤0.04	≤0.04	≤0.5	≤0.30	—
H10MnSiMoTiA	0.08～0.12	1.0～1.30	0.40～0.70	≤0.20	0.20～0.40	≤0.025	≤0.03	≤0.5	≤0.30	Ti0.05～0.15
H08Mn2SiMoA	0.06～0.10	1.6～2.0	0.7～0.9	≤0.20	0.45～0.60	≤0.025	≤0.03	≤0.5	≤0.30	—
H08CrMnSiMo	0.06～0.10	1.3～1.6	0.6～0.8	1.25～1.50	0.45～0.60	≤0.025	≤0.03	≤0.5	≤0.30	—
H08CrMnSiMoV	0.06～0.10	1.3～1.6	0.6～0.8	1.25～1.50	0.45～0.60	≤0.025	≤0.03	≤0.5	≤0.30	V0.15～0.35

铝及铝合金熔化极气体保护焊推荐采用含镁或硅及其质量分数约5%的铝合金焊丝。铜及铜合金焊接时可采用铜锡硅焊丝，铜硅焊丝和铜锡合金焊丝。

2. 保护气体 熔化极气体保护焊中，保护气体的主要作用是将空气从焊接区排除，防止熔化金属被氧、氮等污染；其次是稳定电弧，获得所要求的熔化金属过渡形式，焊缝形状及熔深。常用的保护气体主要有：Ar、CO_2、Ar+CO_2、CO_2+Ar、Ar+O_2、Ar+CO_2+O_2、Ar+He、Ar+H_2、Ar+N_2、Ar+He+CO_2。这些气体的特性及主要用途列于表6·4-20。

表6·4-20 熔化极气体保护焊用保护气体

保护气体成分及其质量分数	化学特性	主要用途
纯氩	惰性	适于焊接除碳钢、低合金钢以外的所有金属材料
纯氦	惰性	铝、镁和铜合金
Ar + He（20%～80%）	惰性	铝，镁和铜合金
纯氮	轻微氧化	铜及铜合金
Ar+N_2（25%～30%）	轻微氧化	铜及铜合金
Ar+O_2（1%～2%）	轻微氧化	不锈钢，合金钢，还原铜合金
Ar+O_2（3%～5%）	氧化	碳钢及低合金钢
CO_2	氧化	碳钢及低合金钢
Ar+CO_2（20%～50%）	氧化	各种钢的短路过渡焊接
Ar+$CO_2$10%+$O_2$5%	氧化	碳钢及低合金钢
He90%+Ar7.5%+$CO_2$2.5%	轻微氧化	耐蚀不锈钢
He60%～70%+Ar25%～35%+$CO_2$4%～5%	轻微氧化	耐热钢和低温镍钢
Ar+H_2(≈3%)	弱还原性	小直径薄壁管

超星公司制作 请尊重作者版权

保护气体的选择主要取决于被焊金属的化学特性、工件壁厚、工艺参数、质量要求及生产成本。在保证焊接质量的前提下，选择最经济的保护气体。

4·1·4 焊接工艺

熔化极气体保护焊中，影响焊接质量的规范参数有：焊接电流、电弧电压、焊接速度、焊丝直径、焊丝倾角、焊接回路的电感量等。规范参数的相互匹配对保证焊接过程的稳定性十分重要。

1. 焊接电流 焊接电流是最主要的规范参数之一，焊接电流取决于焊丝直径和送丝速度。送丝速度越快，焊接电流越大。

焊接电流的大小首先对熔滴过渡形式起决定性的作用，对焊缝形状亦有很大的影响。加大焊接电流，焊缝熔深明显增加，熔宽则略有增大，焊缝余高增加较大。如果增大焊接电流时，电弧电压和焊接速度未作相应调整，则会形成高而窄的、形状系数不利的焊缝。

2. 焊丝直径 焊丝直径按所焊工件厚度及所采用的工艺方法来选择。一般薄板均采用 0.8～1.0mm 的细丝焊接，中厚板则采用直径1.6～2.0mm的焊丝焊接。CO_2短路焊接通常采用细焊丝。在全位置焊接时，为便于操作，控制焊缝成形，亦推荐采用细丝。

3. 电弧电压 电弧电压是影响熔滴过渡形式，焊接过程稳定性的重要参数之一，对焊缝的成形也有较大的作用。电弧电压与所选用的焊接电流之间存在着严格的匹配关系。对于一定范围的电流，一般只有一个最佳电压值。

4. 电感量 熔化极气体保护焊过程的稳定性在很大程度上取决于焊接电源的动特性，而焊接回路的电感量对动特性起重要的影响。电感的作用在于：(1)熔滴短路时，降低了电流上升的速度，减少了焊丝端部熔化金属断开时出现的飞溅；(2)短路过渡时，延长了电弧的燃烧时间，提高了熔池的温度和流动性、改善了焊缝的成形。

5. 焊丝伸出长度 焊丝伸出长度是指从导电嘴端部到电弧根部的一段焊丝。由于这段焊丝是焊接回路的一部分，焊接电流对伸出长度产生预热作用。伸出长度愈长，预热作用愈大。因此，在相同的电流下，焊丝熔化得更快。如送丝速度不变，增加伸出长度，焊接电流略有减小，飞溅加剧。因此在焊接过程中应尽量使伸出长度保持不变。

6. 焊接速度 半自动焊时，焊接速度由焊工按焊缝成形掌握。自动焊时，焊接速度是决定焊缝形状的重要参数，应与焊接电流、电压相匹配。

4·1·5 焊接技术

熔化极气体保护焊中，焊接技术主要是指焊枪位置和焊接方向的操纵。按照焊枪倾斜的方向与焊接方向的关系可分为左焊法和右焊法两种操作技术。左焊法时，焊枪自右向左移动，焊枪的倾斜方向与焊接方向相反；右焊法时，焊枪自左向右移动，焊枪顺着焊接方向倾斜，如图 6·4-14。图中还示出两种不同焊接法对焊道成形的影响。采用右焊法时，对熔池的保护较好，电弧吹力将熔池金属向右推移，使电弧热量直接作用于母材，从而可获得较大的熔深。当焊枪的前倾角为25°时，熔深达到最大值。因此要求深熔时，通常采用右焊法。采用左焊法时，电弧吹力将焊接熔池向前推移，电弧热不能直接作用于母材，故焊缝熔深较浅，适用于薄板的焊接。

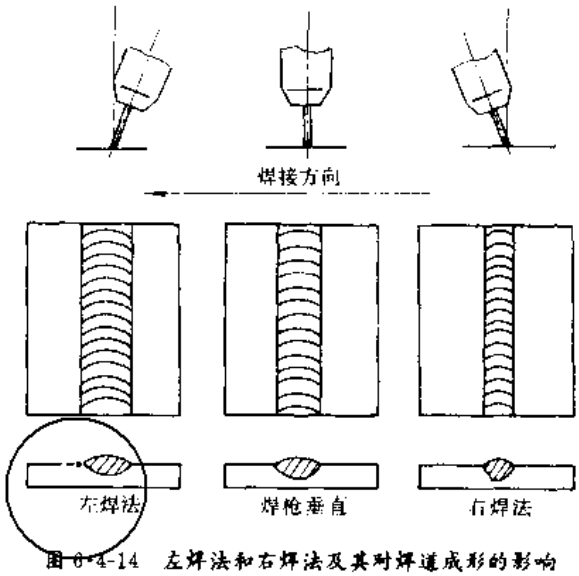


图 6·4-14 左焊法和右焊法及其对焊道成形的影响

在立角焊缝焊接时，可采用立向上和立向下的焊接方法。在这两种情况下，焊枪的位置显得十分重要，应使电弧始终保持在熔池的前沿，以保证焊缝完全熔透。

在平焊位置，为获得较高的效率，多采用射流过渡焊接法，而脉冲射流和短路过渡焊接法可用于所有的焊接位置。采用直径 1.2mm 以下焊丝的短路过渡和脉冲射流焊接法最适于全位置焊接。

对接和角接接头熔化极气体保护焊的典型规范参数分别列于表 6·4-21～表 6·4-23。

超星公司制作 请尊重作者版权

表 6·4-21 对接接头短路过渡熔化极气体保护焊规范参数

板厚 (mm)	焊接位置	坡口形式 焊缝层数	根部间隙 (mm)	钝边厚度 (mm)	焊丝直径 (mm)	送丝速度 (m/h)	焊接电流 (A)	电弧电压 (V)	焊接速度 (m/h)
3.0	平焊	直边对接	0.8	—	0.9	403～417	150～155	18～20	21～29
		单 层	0.8	--	1.2	227～245	160～165	18～19	21～29
	横 焊 立、仰焊	直边对接	0.8	--	0.9	335～350	130～135	17～18	18～29
		直边对接 1 层	0.8	—	0.9	335～350	130～135	17～18	18～29
5.0	平焊	直边对接 1 层	4.8	--	1.2	335～350	210～215	19～20	21～36
		45°V 形坡口	2.4	1.6	1.2	335～350	210～215	19～20	18～36
	横焊	直边对接 2 层	4.8	—	1.2	274～288	175～185	18～20	18～25
		45°V 形坡口	2.4	1.6	1.2	274～288	175～185	18～20	21～29
	立、仰焊	45°V 形坡口	2.4	1.6	0.9	306～320	120～125	17～18	14～18
6.5	平焊	45°V 形坡口 2 层	2.4	1.6	1.2	356～374	220～225	20～21	18～25
	横焊	45°V 形坡口 2 层	2.4	1.6	1.2	274～288	175～185	18～20	10～18
	立仰焊		2.4	1.6	0.9	306～320	120～125	17～18	7～10
9.5	横焊	45°V 形坡口 4 层	2.4	1.6	1.2	274～288	175～185	18～20	18～25
	立焊	45°V 形坡口 2 层	2.4	1.6	0.9	410～425	150～155	19～20	18～29
	仰焊	45°V 形坡口 3 层	2.4	1.6	0.9	443～457	165～175	19～21	14～21
13.0	横焊	X 形坡口 4 层	2.4	1.6	1.2	274～288	175～185	18～20	10～18
	立焊	X 形坡口 4 层	2.4	1.6	0.9	410～425	150～155	19～20	10～14
	仰焊	45°V 形坡口 5 层	2.4	1.6	0.9	443～457	165～175	19～21	10～18

表 6·4-22 对接接头射流过渡熔化极气体保护焊规范参数

板厚 (mm)	焊接位置	坡口形式及 焊缝层数	根部间隙 (mm)	钝边厚度 (mm)	焊丝直径 (mm)	送丝速度 (m/h)	焊接电流 (A)	电弧电压 (V)	焊接速度 (m/h)
6.5	平焊	直边对接 1 层 45°V 形坡口 2 层	4.8	—	1.6	280～295	310～320	26～27	10～18
			2.4		1.6	259～274	290～300	25～26	18～25
			2.4		1.2	608～648	320～330	29～31	25～32
9.5	平焊	45°V 形坡口 2 层 X 形坡口	2.4	—	1.6	327～342	340～350	26～27	18～25
			1.6	2.4	1.2	554～587	300～310	29～30	18～25
			1.6	2.4	1.6	259～274	290～300	25～26	14～21
13	平焊	45°V 形坡口 4 层	1.6	2.4	1.6	295～320	320～330	26～27	25～32
		X 形坡口 4 层	1.6	2.4	1.6	259～274	310～320	26～27	25～32
16	平焊	X 形坡口 4 层	1.6	2.4	1.6	295～320	320～330	26～27	25～32
20	平焊	X 形坡口 4 层	2.4	1.6	1.6	295～320	320～330	26～27	25～32

表 6·4-23 角接接头熔化极气体保护焊规范参数

板厚 (mm)	焊缝层数	焊丝直径 (mm)	送丝速度 (m/h)	电弧电压 (V)	焊接电流 (A)	焊接速度 (m/h)
6.5	1	1.6	356～374	27～28	360～370	21～29
	1	1.2	648～684	30～32	330～340	21～29
10	2	1.6	313～328	26～27	300～340	14～21
13	3	1.6	356～374	27～28	360～370	21～29
16	4	1.6	327～342	27～28	340～350	18～29
19	6	1.6	356～374	27～28	360～370	21～29

4·2 药芯焊丝气体保护焊

4·2·1 工艺特点

药芯焊丝气体保护焊是熔化极气体保护焊的一种，只是以药芯焊丝代替实心焊丝。利用填充在焊丝芯部的药粉燃烧和分解产生的气体和熔渣提供保护，外加 CO_2 气体仅起辅助保护作用。

药芯焊丝气体保护焊与实心焊丝焊相比具有下列优点：(1)焊缝质量高，外观均整平滑；(2)熔敷率高，焊接速度较快；(3)焊接材料利用率高；(4)工艺性灵活，便于机械化和自动化；(5)焊前清理要求较低，对焊件表面的污染适应性较强。因此，药芯焊丝气体保护焊的生产应用日益普及。这种焊接方法的主要缺点是，药芯焊丝的成本较高，焊接过程中烟雾较大。

4·2·2 焊接设备

药芯焊丝气体保护焊设备与实心焊丝气体保护焊设备相似，由焊接电源、送丝机构、控制器和焊枪等组成。焊接电源一般采用平特性电源，但也可采用下降外特性的焊接电源。在这种情况下，最好配用弧压反馈送丝系统。为保证稳定送丝，对送丝轮提出了特殊的要求，不应使焊丝压扁或折弯，为此，送丝轮上应开 U 形或 V 形槽口或挤压出花纹。对于直径小于 1.4mm 的焊丝最好采用双主动送丝轮送丝系统。焊枪亦分气冷式和水冷式两种。在半自动焊中多半使用结构紧凑且轻便的气冷焊枪，自动焊设备中多数配用水冷焊枪。

4·2·3 焊接材料

药芯焊丝气体保护焊用焊接材料有药芯焊丝和保护气体。保护气体一般只采用纯 CO_2。只有在一些特殊场合下，才采用 $Ar+CO_2$ 混合气体。药芯焊丝分两大类：一类是需用保护气体辅助药芯的作用，保护焊接电弧和熔池金属；另一类是自保护型药芯焊丝，只靠焊丝芯中药粉燃烧分解产生的气体和熔渣保护焊接熔池不受大气污染。在工程上，需气体保护的药芯焊丝应用较普遍，已研制出焊接碳钢、低合金钢、不锈钢和耐热钢的药芯焊丝。

药芯焊丝的制作过程是先将低碳钢带通过轧辊挤压成 U 形芯坯，紧接将按一定配比混合好的药粉填充到 U 形芯坯中，通过另一对轧辊将充满药粉的芯坯轧成圆形截面的管状芯坯，然后再通过多道拉模拉拔至所需规格的药芯焊丝。药芯焊丝几种常用的截面形式如图 6·4-15。

药芯焊丝中的药粉功用与手工电弧焊焊条的药皮相似。其主要作用是：(1)对熔池金属产生还原、净化和渗合金作用，使焊缝金属具有所要求的理化性能；(2)形成渣壳以保护正在凝固的焊接熔池免受空气的污染；(3)起稳弧剂的作用，以产生柔和的焊接电弧，减少飞溅；(4)起造气剂作用，产生保护气体。

CO_2 气体保护药芯焊丝的药粉有三种类型：(1)高二氧化钛型；(2)石灰-二氧化钛型；(3)石灰型。自保护药芯焊丝的药粉类型有四类：(1)萤石-铝型；(2)萤石-二氧化钛型；(3)萤石-石灰-二氧化钛型；(4)萤石-石灰型。CO_2 气体保护药芯焊丝组分含量及熔渣成分列于表 6·4-24。

表 6·4-24 CO_2 气体保护药芯焊丝药粉类型及其组分的质量百分数 (%)

药粉组分	高二氧化钛型		石灰-二氧化钛型		石灰型	
	药粉	熔渣	药粉	熔渣	药粉	熔渣
SiO_2	21.0	16.8	17.8	16.1	7.5	14.8
Al_2O_3	2.1	4.2	4.3	4.8	0.5	—
TiO_2	40.5	50.0	9.8	10.8	—	—
ZrO_2	—	—	6.2	6.7	—	—
CaO	0.7	—	9.7	10.0	3.2	11.3
Na_2O	1.6	2.8	1.9	—	—	
K_2O	1.4	—	1.5	2.7	0.5	—
CO_2	0.5	—	—	—	2.5	—
C	0.6	—	0.3	—	1.1	—
Fe	20.1	—	24.7	—	55.0	—
Mn	15.8	—	13.0	—	7.2	—
CaF_2	—	—	18.0	24.0	20.5	43.5
MnO	—	21.3	—	22.8	—	20.4
Fe_2O_3	—	5.7	—	2.5	—	10.3

版权所有 侵权必究

超星公司制作 请尊重作者版权

药芯焊丝的常用直径有1.2,1.4,1.6和2.0mm，成盘供应。批量生产的已有四种牌号的结构钢药芯焊丝，其焊缝金属化学成分和力学性能保证值列于表6·4-25。碳钢药芯焊丝已制定出相应的国家标准(GB10045—88)。

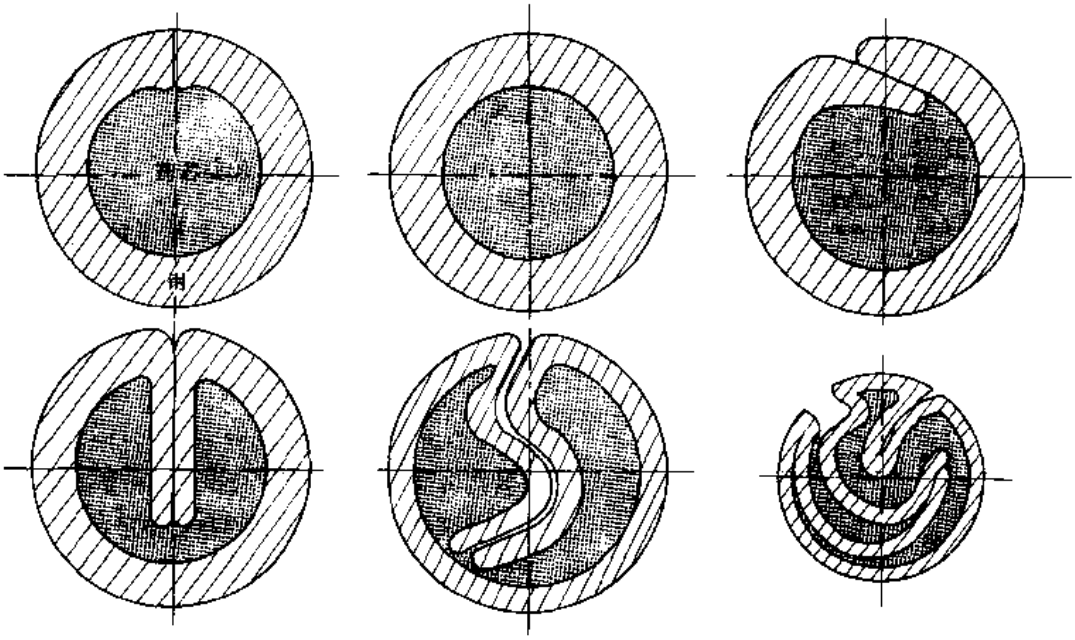


图6·4-15 药芯焊丝的截面形式

表6·4-25 结构钢药芯焊丝化学成分和力学性能保证值

焊丝牌号	化学成分的质量分数(%)					力学性能			
	C	Mn	Si	S	P	σ_b (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	δ_5 (%)	A_{KV} 0℃(J)
YJ502-1	≈0.1	≈1.2	≈0.5	≤0.04	≤0.05	≥490	—	≥18	27
YJ506-2	≈0.13	≈0.92	≈0.32	≈0.013	≈0.020	≥490	≥410	≥22	27 −20℃
YJ502-3	≈0.10	≈1.2	≈0.5	≤0.04	≤0.04	≥490	—	>20	>47
YJ506-4	≈0.10	≈1.2	≈0.5	≤0.04	≤0.04	≥490	—	>20	>47

4·2·4 焊接工艺

药芯焊丝气体保护焊时，按照所选定的焊接规范，焊丝的熔化特性与实心焊丝相似，只是产生短路过渡和射流过渡的焊接电流和电弧电压范围较宽。药芯焊丝气体保护焊因电弧燃烧稳定，熔池易控制，规范参数的匹配关系不像实心焊丝气体保护焊那样严格，焊工容易掌握。各规范参数的选择原则及其对焊缝质量的影响类似于实心焊丝气体保护焊。

4·3 气电立焊

气电立焊是熔化极气体保护自动焊的一种特殊形式。可采用实心焊丝和药芯焊丝在焊件垂直位置完成焊接过程。焊接熔池由水冷滑块或挡块保持。这种焊接方法分垂直送丝式，侧向送丝式和侧向送丝多层立焊等三种。已在石油储罐、船体及冶金设备现场施工安装中得到应用。实心焊丝和药芯焊丝气电立焊的方法原理相似，垂直送丝式焊接过程原理如图6·4-16。其差别在于药芯焊丝焊接时，金属熔池被一层薄熔渣所复盖，采用自保护药芯焊丝焊接时，可不加辅助保护气体。

焊接过程中焊丝由推丝式送丝机构经过导电嘴送入焊接区，并利用电弧的能量熔化焊丝和母材侧壁形成金属熔池，连接被焊工件。保护气体从滑块上部孔道通入焊接区，以保护焊接熔池金属不受空气污染，保护气体可采用 CO_2 和 $Ar+CO_2$ 混合气体。

气电立焊与电渣焊相比具有下列优点：(1)可以焊

超星公司制作 请尊重作者版权

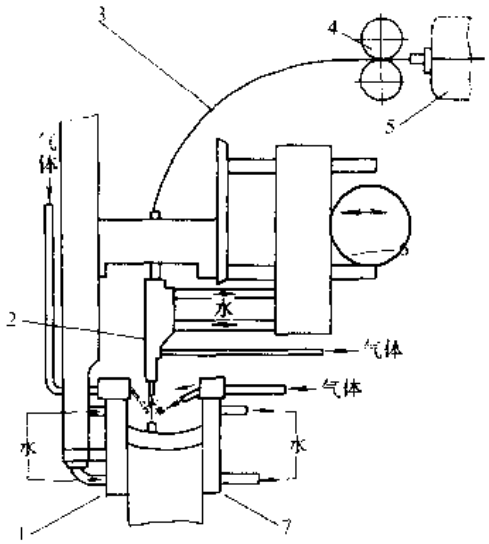


图 6·4-16 垂直送丝式气电立焊过程原理

1—固定档块 2—焊枪 3—导丝管 4—给送轮

5—焊丝矫直机构 6—摆动器 7—可移滑块

接板厚较薄的工件，最小可焊板厚为 10mm；(2)接缝间隙仅为 15～20mm，侧向送丝一次成形焊接法，接缝间隙可缩小到 6～8mm，故焊接速度高，焊接材料消耗相对减少；(3)焊缝金属和热影响区晶粒较细，焊后状态的力学性能较高，无需作细化晶粒处理；(4)引弧端未熔合区段较短，节约了引弧板用料。

实心焊丝气电立焊适用的焊件厚度范围为 10～100mm，最常用的厚度范围是 15～70mm。通用的焊丝直径为 1.6，2.0 和 2.5mm。气电立焊可焊接各种碳钢、低合金钢和不锈钢，大部分用于船舶部件，钢结构及压力容器。

4·4 窄间隙气体保护焊

窄间隙气体保护焊是气体保护焊的特殊形式之一，利用气体保护焊无熔渣的特点，可在间隙为 5～15mm 的深坡口内以多道焊的方式完成厚壁接头的一种焊接方法。

这种焊接法的特点是：(1)焊缝金属体积显著减少，平均可节约焊丝 50%～80%；(2)焊接线能量低，接头各区性能比其他高效焊接法明显提高；(3)充分利用了多道焊技术的层间焊接热作用，次道焊缝对前道焊缝产生一定的回火效应，因此在某些厚度范围内可取消焊前预热或焊后消除应力处理。目前已发展了多种窄间隙熔化极气体保护焊接法，图 6·4-17 为几种典型的窄间隙焊接法及其适用的壁厚范围。

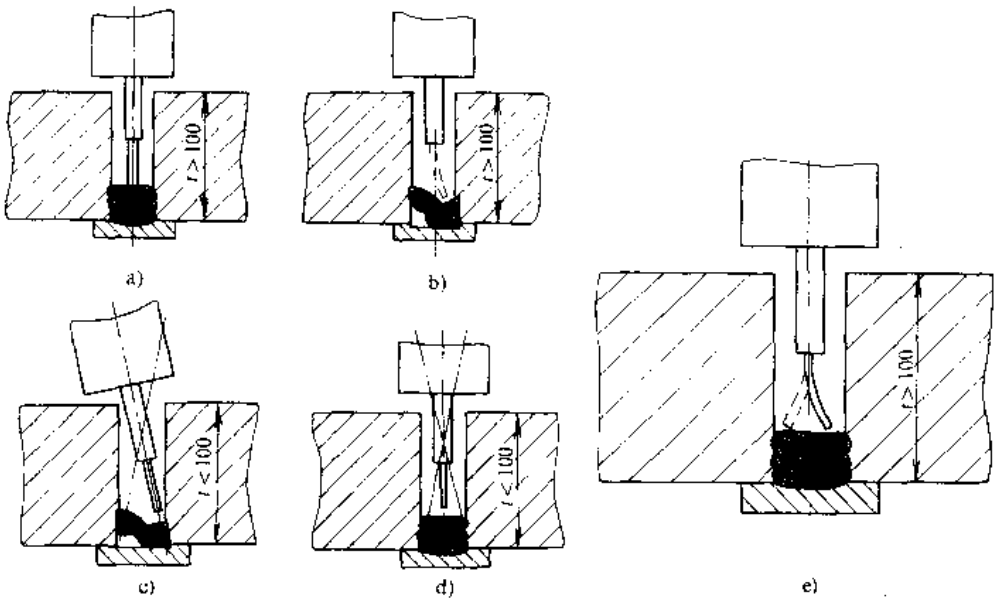


图 6·4-17 几种典型的窄间隙气体保护焊接法及其适用的壁厚范围

a)大电流单丝焊 b)小电流单根或两根弯曲焊丝焊 c)小电流双丝或多丝焊

d)小电流单丝焊——借助焊枪在间隙内摆动，实现电弧摆动 e)小电流单丝焊(焊枪位置固定，焊丝摆动)

窄间隙熔化极气体保护焊设备的大多数主要部件可利用常规的熔化极气体保护焊设备。其中焊枪必须按窄间隙焊特点重新设计。图 6·4-18 为一种典型的窄间隙焊焊枪结构，基本上满足了窄间隙焊的工艺要求。为保证在窄间隙内焊接过程的稳定性，最好采用直流脉冲电源和富氩混合气体。焊接机头的对中机构应

超星公司制作 请尊重作者版权

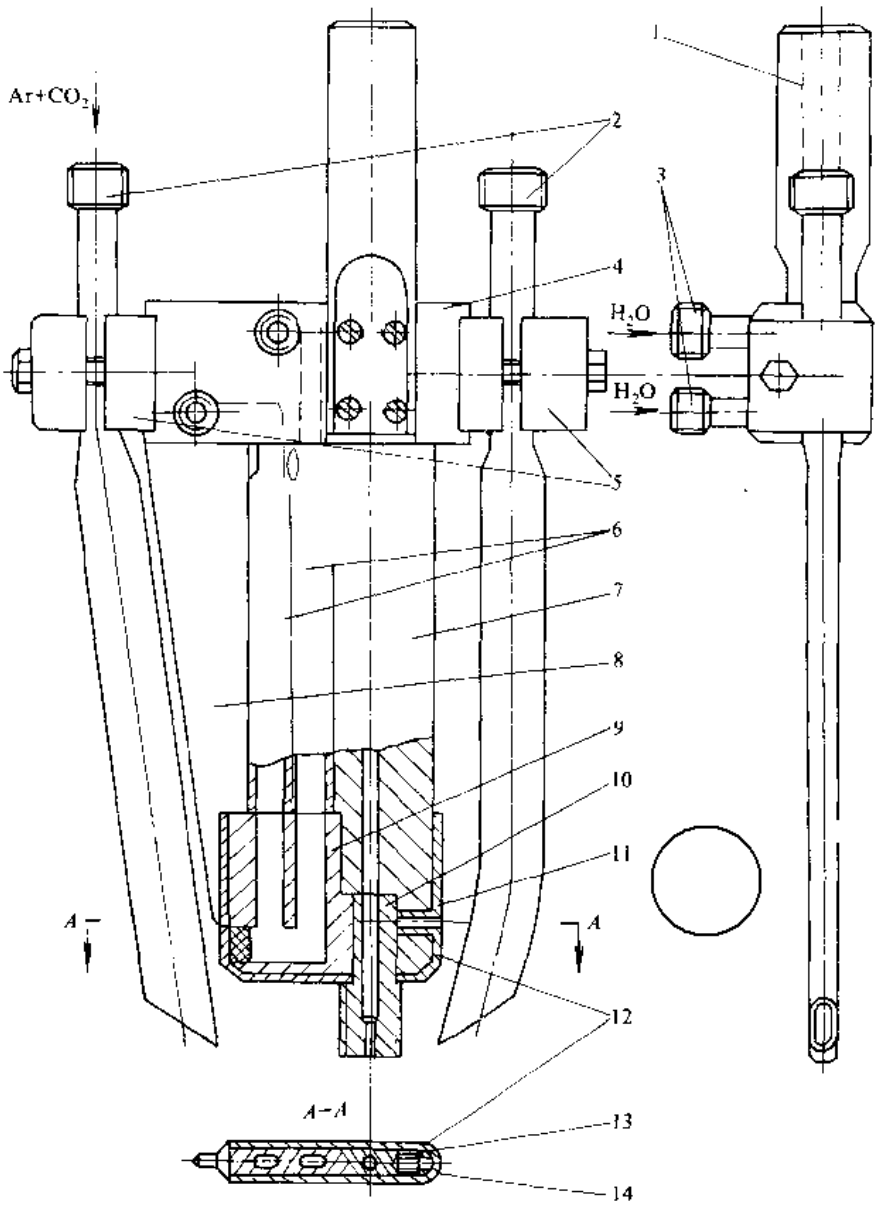


图 6·4-18 窄间隙焊焊枪的典型结构

1—导丝管 2—送气管 3—冷却水接头 4—导电块 5—塑料压板 6—冷却水管 7—导丝杆
8—支撑板 9—冷却块 10—导电嘴 11—螺钉 12—保护罩 13—板形导向块 14—导丝孔

装备自动跟踪系统，以保证焊丝在间隙内的精确对中。

窄间隙熔化极气体保护焊已在压力容器、钢结构、重型机械和核能反应堆部件制造中得到较广泛的应用并取得了较高的经济效益。

4·5 不熔化极气体保护焊

4·5·1 工艺特点

不熔化极气体保护焊亦称钨极惰性气体保护焊。由于惰性气体大多采用氩气，故工程上常称钨极氩弧焊。钨极惰性气体保护焊是利用钨极与工件之间的电弧热熔化母材和填充金属形成接头的一种熔焊方法，其焊接过程如图 6·4-19。氩气从焊枪喷嘴送入焊接区，对炽热的钨极、电弧、焊接熔池、填充金属和周围加热区加以保护，隔离了空气而形成优质的焊缝。

钨极惰性气体保护焊具有下列优点：(1)惰性气体与任何金属不起化学反应，熔池金属不发生冶金变化，简化了焊接材料的研制和选用，并可焊接几乎是所有的金属和合金；(2)电弧在惰性气体中燃烧相当稳定，即使在较低(10～30A)的电流下，电弧还能引燃和

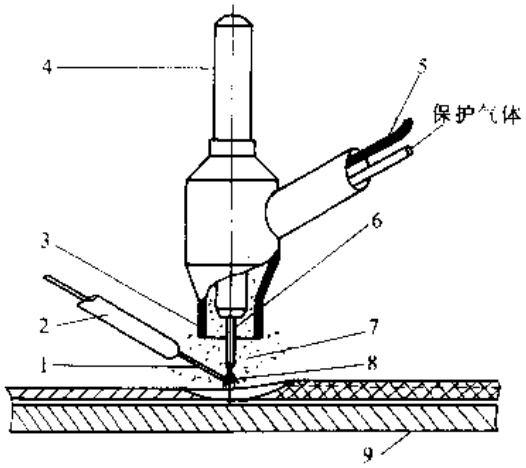


图 6·4-19　钨极惰性气体保护焊过程原理

1—焊接填充丝　2—焊接填充丝导管　3—气体喷嘴
4—行走方向　5—电流导体　6—W 极
7—保护气体　8—电弧　9—铜垫板

维持。故适用于薄板材料和各种难焊位置的焊接；(3)焊接过程中无熔渣形成，避免了多层焊缝中产生夹渣等缺陷；(4)焊缝平整光滑，焊后清理工作量较少；(5)电弧和焊接熔池清晰可见，便于焊工操作；(6)焊接电弧气氛中，氢含量极低，是一种超低氢焊接方法，适于焊接对氢致裂纹敏感的钢材。钨极惰性气体保护焊的缺点是钨极承载电流的能力较低，填充冷丝时，熔敷率较小，焊接效率低于其他熔焊方法；再则，惰性气体和钨极的价格较贵，焊接成本较高。

为克服上述缺点，已开发了热丝钨极氩弧焊，其熔敷率可与相同直径焊丝的熔化极气体保护焊相比。另处，还发展了可用于厚壁焊件的窄间隙钨极氩弧焊接法。

钨极惰性气体保护焊按所使用的电流种类可分直流、交流、直流脉冲电弧焊接法。按焊接过程的自动化程度可分手工、半自动、机械和全自动焊。按所采用的惰性气体种类可分氩弧、氦弧焊以及氩氦混合气体和氩氢混合气体保护焊。

4·5·2　焊接设备

钨极惰性气体保护焊设备分两大类：一类是手工焊设备，另一类是自动焊设备。手工钨极惰性气体保护焊设备主要由焊接电源、控制器，供气和供水系统、焊枪以及指示仪表等组成。自动钨极惰性气体保护焊机除以上组成部分外，还应有行走和送丝机构、或机头旋转机构。现代先进的钨极惰性气体保护焊设备还装有计算机程控装置和规范参数监控记录仪。用于精密焊接的设备均装备规范参数闭环控制系统。

1. 焊接电源　钨极惰性气体保护焊的工艺特点要求电弧电压的变化不致引起焊接电流的波动，这就必须采用外特性陡降或垂直陡降的焊接电源。图 6·4-20 为电源的外特性与氩弧静特性之间的关系。从中可见，垂直陡降的外特性对钨极惰性气体保护焊最为理想。使用这种电源时，焊接电流几乎不受弧长波动的影响。

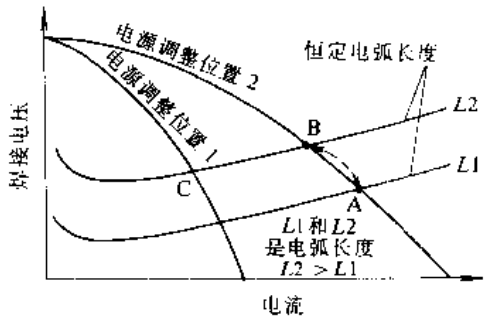


图 6·4-20　电源外特性与氩弧静特性的关系

钨极惰性气体保护焊直流电源主要有硅整流焊接电源、晶闸管焊接电源、晶体管焊接电源和逆变式焊接电源等。晶闸管弧焊电源的应用已较普遍，逆变式焊接电源由于技术特性先进已在焊接生产中应用。

交流电源可以采用与手工电弧焊相似的焊接变压器，但应选用较高的空载电压。采用氦气保护时，需使用空载电压高达 100V 的弧焊变压器。另一种稳定交流电弧的方法是外加一个与变压器串联的高频电压发生器，高频电压一般为几千伏，其频率达数兆赫。

2. 焊枪　焊枪是钨极氩弧焊机的关键部件。焊枪可设计成气冷和水冷两种。焊接电流在 150A 以下时可采用气冷焊枪，超过此极限电流时，应采用水冷焊枪，其最大焊接电流可达 650A。

4·5·3　焊接材料

钨极惰性气体保护焊所用的焊接材料有：钨极、填充焊丝和保护气体。

1. 钨极　钨极惰性气体保护焊用的电极有：纯钨极、钍钨极、铈钨极和锆钨极等几种。纯钨极的电流承载能力低且抗污染性能差。钍钨极和铈钨极的电子发射率高，电流承载能力高，寿命较长。但钍钨极的放射性较大。铈钨极的放射性很小，应用日益广泛。

2. 填充焊丝　除了硅含量的质量分数低于 0.1% 脱氧不完全的焊丝以外，所有适用于气焊，熔化极气体保护焊和埋弧焊的焊丝均可用于钨极惰性气体保护焊。但因在惰性气体保护下焊接时，熔池金属不发生氧

版权所有 翻印必究

超星公司制作 请尊重作者版权

化和还原反应，填充焊丝中的脱氧元素(Si、Mn、Al)和合金成分基本上不会被烧损，故不应选用硅锰含量过高的熔化极气体保护焊焊丝，其最合适的硅和锰的质量分数应分别在0.2%～0.4%和0.5%～0.7%的范围内。

对于手工钨极惰性气体保护焊，多采用的焊丝直径为2.5～3.0mm。对于机械或自动钨极惰性气体保护焊，适用的焊丝直径为0.8～1.2mm。

3. 保护气体 钨极惰性气体保护焊使用的保护气体主要是氩和氦。在不锈钢的机械化焊接时，在氩气或氦气中可添加少量的氢气，在焊接铜及其合金时，可添加适量氮气。

4·5·4 焊接工艺

1. 焊前准备 钨极惰性气体保护焊时，因无冶金反应，焊接区的清理工作特别重要。焊前必须仔细清理焊接区母材和填充金属表面的油脂、油漆、润滑剂、涂层、氧化膜及其他一切污染物。

接头坡口尺寸公差应严加控制，对焊缝质量影响较大。对要求全焊透的接头，钝边公差应控制在0.5mm以下。接缝的装配间隙，对手工焊，最大可放到3mm；对自动焊，一般不留间隙，最多不应超过0.5mm。

2. 焊接规范参数 钨极惰性气体保护焊的规范参数主要有：焊接电流、电流极性、电弧电压、焊接速度、钨极直径和尖端形状以及保护气体流量等。焊接电流主要按焊件的厚度和工件形状位置来选择。使用直流电时，极性有两种接法，即直流正接和直流反接。采用直流正接时，钨极接负极，焊件接正极，电子从钨极向焊件高速冲击，结果使70%的热量集中在焊件上而形成深而窄的焊接熔池，钨极的温度则较低，提高了钨极可承受的电流值。因此直流正接应用最普遍，并能焊接除铝、镁以外的所有金属和合金。采用直流反接时，电子从焊件冲向钨极，使钨极温度急剧增高，加剧了钨极的损耗，电弧不易稳定，焊件受热区较宽，温升较慢，及使熔深较浅。离子流对工件表面的轰击会产生铝和镁焊接所需的清理作用。

交流电弧的特性介于直流正接和反接之间，但在每次交变中，电压通过0点，电弧将会熄灭。为了在每半周中重新引燃电弧，必须在交流电上叠加高频电流。交流电与直流反接相似，具有去除金属表面氧化膜的作用。焊铝时，为合理利用正接不易烧损电极，反接能去除氧化膜作用的各自优点，新近发展了正、负半波比例可调的交流焊接电源，具有很明显的优越性。

焊接规范的其他参数以建立焊接区的良好保护和满意的焊缝成形为选择准则。

3. 操作技术 手工钨极惰性气体保护焊时，焊枪的轴线与焊件表面约成75°。添加填充焊丝时，填充丝与焊件表面成15°倾角，并缓慢地向焊接熔池给送。焊接结束时，应先将填充焊丝抽出熔池，但仍应放在气体保护区内，以防止填充焊丝加热端的氧化。准备灭弧时，应将电弧移至坡口边缘。对重要的焊件，灭弧前应将电流衰减，以消除弧坑。

采用钨极惰性气体保护焊作管道根部焊缝封底焊时，为获得满意的焊缝背面成形，可在管道内部通入成形气体。

不锈钢、耐热高合金钢和镍基合金焊接时，第一层焊缝的背面必须吹送保护气体，其作用是改善背面焊道成形，防止氧化。

4. 典型规范参数 碳钢和不锈钢对接接头手工钨极氩弧焊典型规范参数实例列于表6·4-26和表6·4-27。

表6·4-26 碳钢对接接头手工钨极氩弧焊典型规范参数

板厚 (mm)	焊接电流 (A)	电弧电压 (V)	焊接速度 (m/h)	填充丝直径 (mm)	钨极直径 (mm)	气体流量 (L/min)	接头形式
1.0	60～70	8～10	8～10	1.6	2.0	5～6	直边对接
1.5	80～90	10～11	10～12	1.6	2.0	5～6	直边对接
2.0	90～100	10～11	10～12	1.6	2.0	5～6	直边对接
3.0	100～110	11～12	10～12	2.5	2.5	6～7	直边对接
4.0	110～130	12～13	6～8	2.5	2.5	6～7	60°V形坡口

表 6·4-27 不锈钢对接接头手工钨极氩弧焊典型规范参数

板厚 (mm)	接头形式	焊缝层次	焊接电流 (A)	电弧电压 (V)	焊接速度 (m/h)	钨极直径 (mm)	焊丝直径 (mm)	气体流量 (L/min)
1.0	直边对接	1	50～70	8～10	6～7	1.6	1.6	5～6
2.0	直边对接	1	80～100	10～11	5～6	1.6	1.6	5～6
3.0	直边对接	1	100～120	10～11	5～6	1.6	2.5	5～7
	间隙 0.5～1mm							
4.0	60°V 形坡口	1	90～110	10～11	5～6	2.5	2.5	5～7
	间隙 2～2.5mm	2	120～130	11～12	6～7	2.5	2.5	5～7
5.0	60°V 形坡口	1	90～110	10～11	5～6	2.5	2.5	5～7
	间隙 2～2.5mm	2	120～130	11～12	6～7	2.5	2.5	5～7
		3	120～130	11～12	8～10	2.5	2.5	5～7

4·5·5 特种焊接方法

为扩大钨极惰性气体保护焊的应用范围，发挥其独特的优点，发展了多种钨极惰性气体保护焊方法。已在工程上普遍应用的有：脉冲电流钨极惰性气体保护焊，热丝钨极惰性气体保护焊和窄间隙钨极惰性气体保护焊等。

1. 脉冲电流钨极惰性气体保护焊 这种特殊焊接方法已成为薄板、小直径管和精密部件常用的焊接法。采用脉冲电流主要是为了控制线能量，提高焊接方法的工艺适应性。脉冲电流钨极氩弧焊与传统的直流钨极氩弧焊相比，具有下列优点：(1)可控制熔池尺寸和流动性、焊缝质量稳定性高；(2)焊缝熔深明显增大；(3)焊接变形小，易于保证焊件的尺寸。

脉冲电流是一种从峰值到基值，再由基值上升到峰值持续有规律交变的电流，如图 6·4-21。在脉冲峰

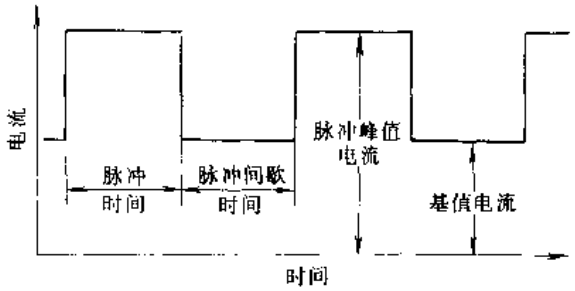


图 6·4-21 脉冲电流波形

值周期内，电弧加热对接缝并形成熔池；基值电流周期内，熔池进行冷却和凝固。在晶体管或晶闸管焊接电源中，借助晶体管开关电路很容易产生所要求的脉冲电流。在这种焊接法中，焊缝是由大量的焊点搭接而成，如图 6·4-22。

2. 热丝钨极惰性气体保护焊 热丝钨极惰性气体保护焊是将填充丝送入熔池之前预热至高温的焊接方法，通常用于机械或自动钨极氩弧焊。焊丝由送丝机构通过定向导电嘴向焊接熔池给送。焊枪喷嘴的保护气体应同时保护好热丝段和焊接熔池，其焊接过程如图 6·4-23。热丝钨极惰性气体保护焊的主要优点是熔敷速度比填充冷丝高 2～4 倍，几乎达到熔化极气体保护焊的熔敷率。为防止电弧偏吹，焊丝的预热采用交流电。热丝的直径一般采用 1.2mm 以下的细丝，加热电流可在焊接电流的 60%～100%之间选择。

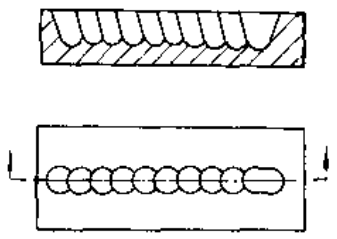


图 6·4-22 脉冲电流焊接时，焊缝形成过程

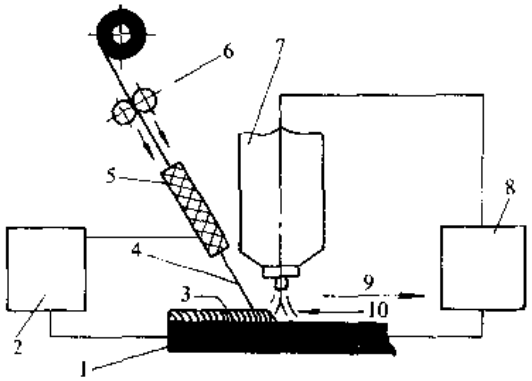


图 6·4-23 热丝钨极惰性气体保护焊过程原理

1—工件 2—交流热丝电源 3—焊缝 4—被加热焊丝 5—导电嘴 6—高速送丝装置 7—焊枪 8—直流 GTAW 电源 9—行走方向 10—电弧

3. 窄间隙钨极惰性气体保护焊 为提高钨极惰性气体保护焊的生产效率，利用其不产生熔渣、焊缝不易夹渣的优点，扩大在厚壁接头中应用范围，发展了可

版权

超星公司制作 请尊重作者版权

在7～9mm间隙内完成深厚焊缝的窄间隙钨极惰性气体保护焊。其中焊头设计成能使电弧在间隙内摆动。将钨极端部弯成20°～25°，以使电弧交替靠近坡口侧壁，达到完全熔合。电弧摆动的角度可在70°～160°之间变动，摆动角愈大，坡口侧壁熔深愈大。如在宽8mm的间隙内焊接时，选择160°摆动角，侧壁熔透深度可达1.2～1.5mm。这种窄间隙焊接法已成功地用于高强钢和钛及其合金厚板的焊接。填充焊丝可以是冷丝也可以是热丝。

在某些应用场合下，也可采用电磁偏转系统实现电弧的摆动或采用脉冲电流，相应提高电弧电压来保证侧壁的熔透。其适用范围已扩大到低合金钢、耐热钢、不锈钢和镍基合金等。可焊最大厚度已达100mm。

5 电渣焊

5·1 电渣焊特点

电渣焊是利用电流通过液态熔渣时产生的电阻热熔化焊丝与母材而形成焊缝的一种焊接方法，能将任何厚度的焊件在垂直位置以一次行程完成全厚度焊缝的焊接。电渣焊过程原理图见图6·4-24。电渣焊具有相当高的熔敷率。用单根焊丝焊接时，熔敷率达16～20kg/h，同时用三根焊丝焊接时，熔敷率高达47～61kg/h。因此电渣焊是一种高效焊接法。

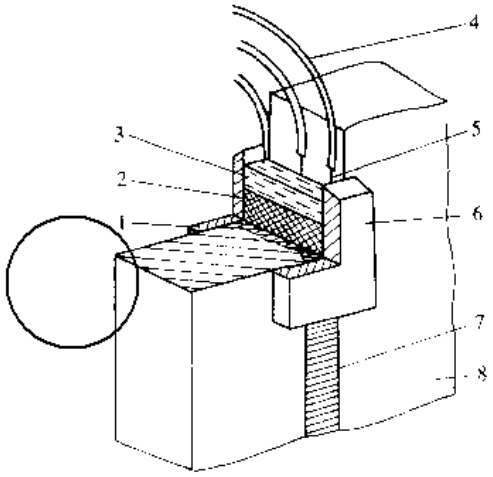


图6·4-24 电渣焊过程原理图
1—已凝固的焊缝金属 2—金属熔池 3—熔渣池 4—导电嘴 5—焊丝 6—水冷滑块 7—焊缝 8—母材

电渣焊按所使用的电极形式可分丝极电渣焊、板极电渣焊和熔嘴电渣焊。这三种电渣焊又可派生出图6·4-25和图6·4-26所示的各种工艺方法。电渣焊亦可用于表面堆焊，如图6·4-27。电渣焊可焊的接头形式示于图6·4-28。

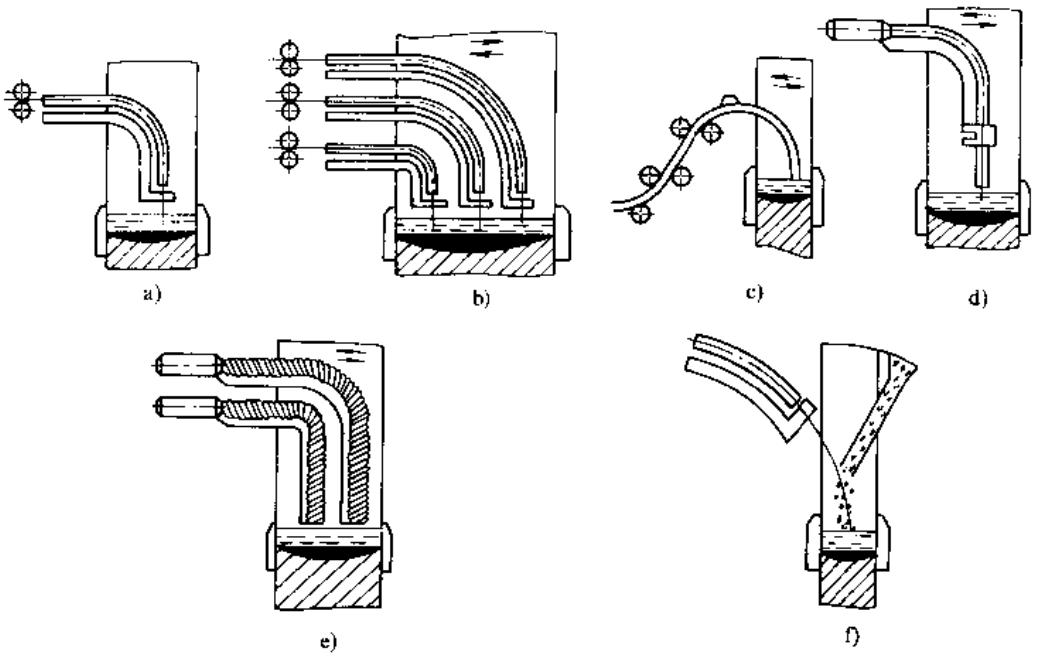


图6·4-25 丝极电渣焊方法
a)单丝电渣焊接法 b)三丝电渣焊接法 c)单弯丝电渣焊接法 d)单丝摆动电渣焊接法 e)螺旋焊丝电渣焊接法 f)加填充金属粉末电渣焊接法

超星公司制作 请尊重作者版权

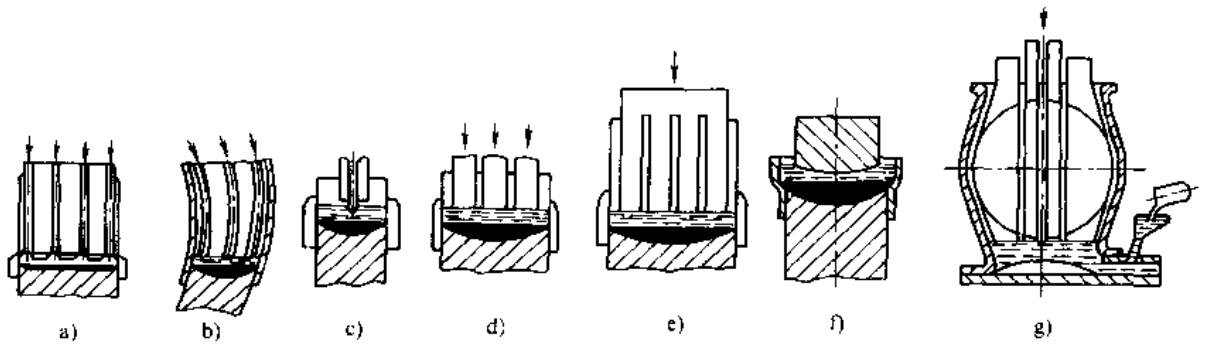


图 6·4-26 熔嘴和板极电渣焊方法

a)多熔嘴电渣焊 b)变截面电渣焊 c)单熔嘴电渣焊 d)多板极电渣焊
e)栅极电渣焊 f)棒状电极电渣重熔 g)板极电渣熔铸

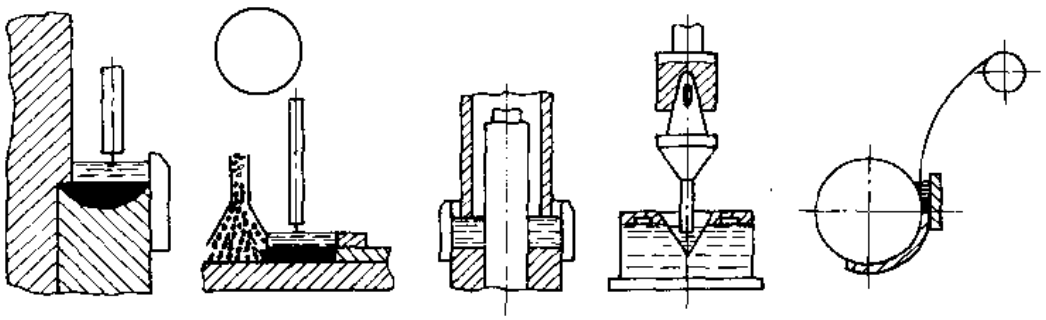
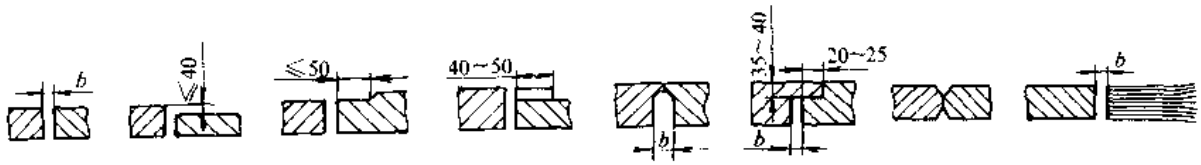


图 6·4-27 各种电渣堆焊过程原理



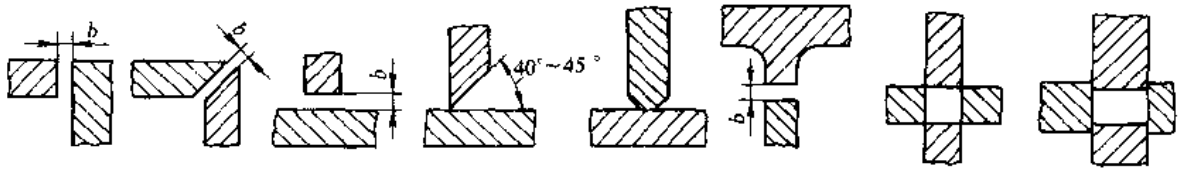


图 6·4-28 电渣焊接头的各种形式

a)对接接头 b)角接接头

电渣焊时，先在焊缝端部的引弧板上引弧，并添加适量的焊剂，电弧很快将焊剂熔化，当液态熔渣层到达一定高度后，电弧熄灭，转变为电渣过程。高温液态熔渣具有一定的导电性，焊接电流由焊丝经过渣池向焊件传递，在焊丝端部至金属熔池表面形成了温度高达1800～1900℃的高温锥，熔化了焊丝和接缝边缘的母材而形成液态金属熔池。随着焊丝不断地熔化填充，金属熔池逐渐上升，并在滑块强制冷却下凝固而形成焊缝。

电渣焊与其他熔焊法相比具有下列优点：(1)焊接效率高；(2)焊接热周期平缓，适于焊接淬硬倾向较高的低合金钢和中合金钢；(3)焊前坡口准备简单，焊接边缘用火焰切割成直边即可；(4)焊接熔池体积较大，冷却缓慢，不易形成气孔和夹渣等缺陷，同时熔池金属去气较完全，脱硫脱磷较充分，由此焊缝质量较高。缺点是熔池和近缝区在高温停留时间过长，一次结晶晶

超星公司制作 请尊重作者版权

粒粗大，促使焊缝金属和热影响区的韧性下降。因此，对接头韧性要求较高的焊缝，焊后必须作正火处理，以细化晶粒，提高接头的韧性。

电渣焊主要用于厚度 30mm 以上的厚板，丝极电渣焊机可焊的最大厚度为 400mm。厚度更大的焊件可采用板极电渣焊和熔嘴电渣焊。变截面焊件只能采用熔嘴电渣焊。电渣焊已在锅炉、压力容器、锻压机械、重型机械和船舶机械制造业中得到普遍应用，可以焊接各种碳钢、低合金钢、中合金钢、铬镍不锈钢和铝等。

5·2 电渣焊设备

丝极电渣焊机由电源，送丝与摆动机构，导电嘴、垂直行走机构、控制系统和滑块等组成。纵缝丝极电渣焊机构如图 6·4-29。

1. 焊接电源 电渣焊用焊接电源分直流和交流两种。一般多采用交流电源。电源在 100% 负载率下的

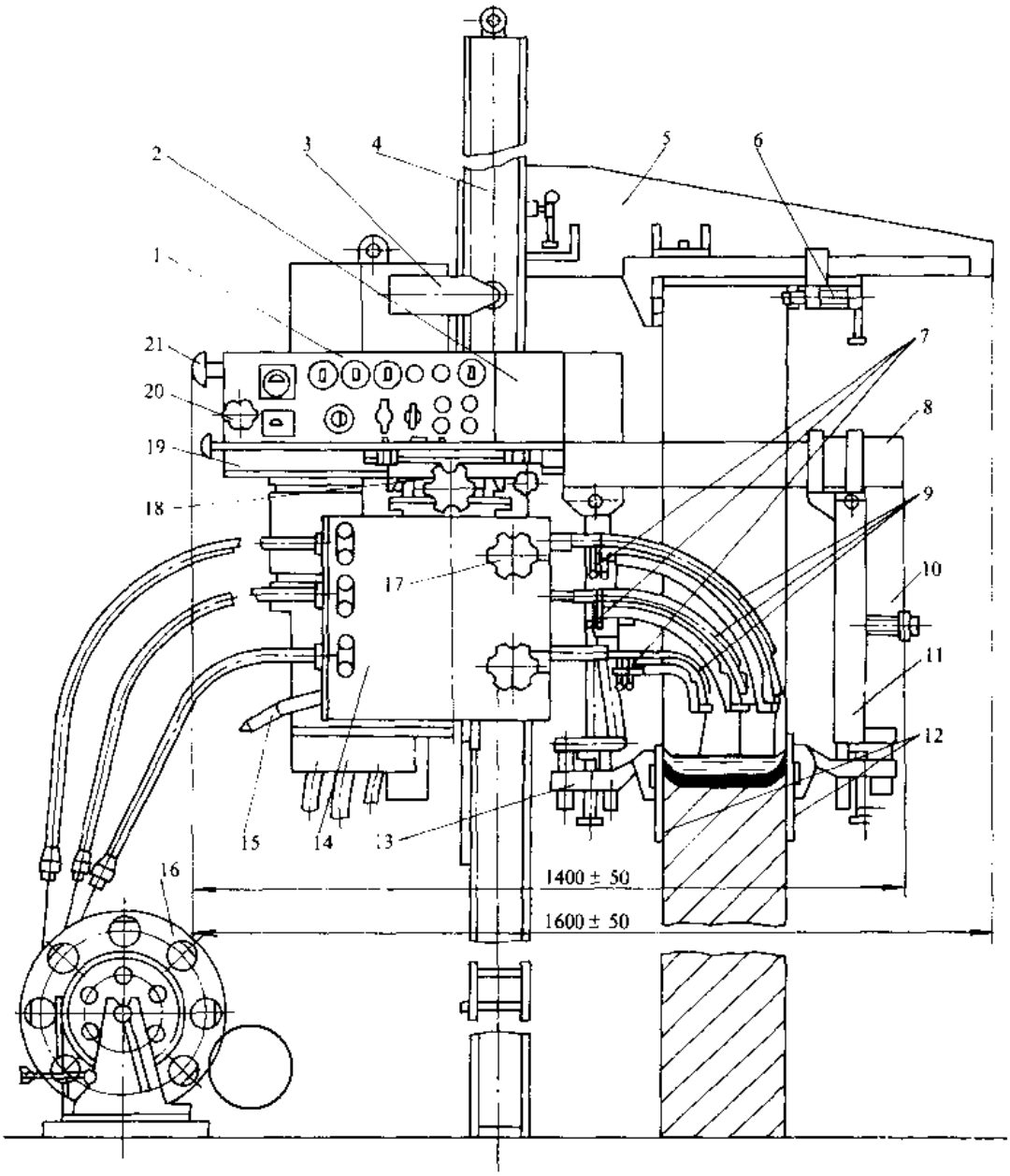


图 6·4-29 纵缝丝极电渣焊机结构

1—控制盘 2—滑板 3—导轮架 4—立柱 5—横梁 6 定位压紧螺钉 7—焊丝压紧调节器 8—滑块顶紧装置横臂 9—焊嘴 10—压紧螺钉 11—顶紧撑条 12—滑块 13—滑块顶紧器 14—焊丝校正器 15—离合器杆 16—焊丝盘 17—调节手轮 18—横向调节手轮 19—挡板 20—手轮 21—引线接头

超星公司制作 请尊重作者版权

额定电流不应小于750A，额定电流为1000A者居多。因电渣焊机通常配等速送丝机构，故要求电源具有平的外特性。

2. 送丝和摆动机构 送丝机构的作用是将焊丝从焊丝盘以恒定的速度经导电嘴送向熔渣池。理想的送丝机构最好由单独的驱动电机和给进轮给送单根焊丝。一般利用多轴减速箱由一台电机带动若干对给进轮给送多根焊丝。

当每根焊丝所占焊件的厚度超过70mm时，焊丝应作横向摆动。电渣焊机的焊丝摆动是由整个导电嘴的摆动完成的。

摆丝机构应能调节摆幅、摆动速度以及在两端的停留时间。在电渣焊机中，焊丝摆动机构的各参数都是采用电子开关线路调节的。

3. 行走机构 电渣焊机的行走机构用来带动焊头和滑块沿接缝作垂直移动。行走机构由直流电机、减速箱、爬行齿轮和齿条组成，齿条用螺钉固定在专用立柱上。

4. 导电嘴 丝极电渣焊机上的导电嘴是将焊丝导向送入熔渣池，并将焊接电流传递给焊丝的关键器件，对焊接的质量起重要的作用。导电嘴的结构要紧凑，工作可靠，并应有较长的寿命。

在熔嘴电渣焊中，导电嘴既起导丝和导电的作用，又在焊接过程中作为填充金属的一部分熔入熔池，故称其为熔嘴。熔嘴应采用与所焊母材成分相匹配的材料制成，并应略长于被焊接头。熔嘴导丝管通常采用外径16mm、内径3.2～4.8mm的厚壁管。对长度超过600mm的焊缝，熔嘴外层应加绝缘层，例如涂以焊剂，装上可熔绝缘环等，以防止焊接过程中与工件表面短路。几种典型的熔嘴结构如图6·4-30。

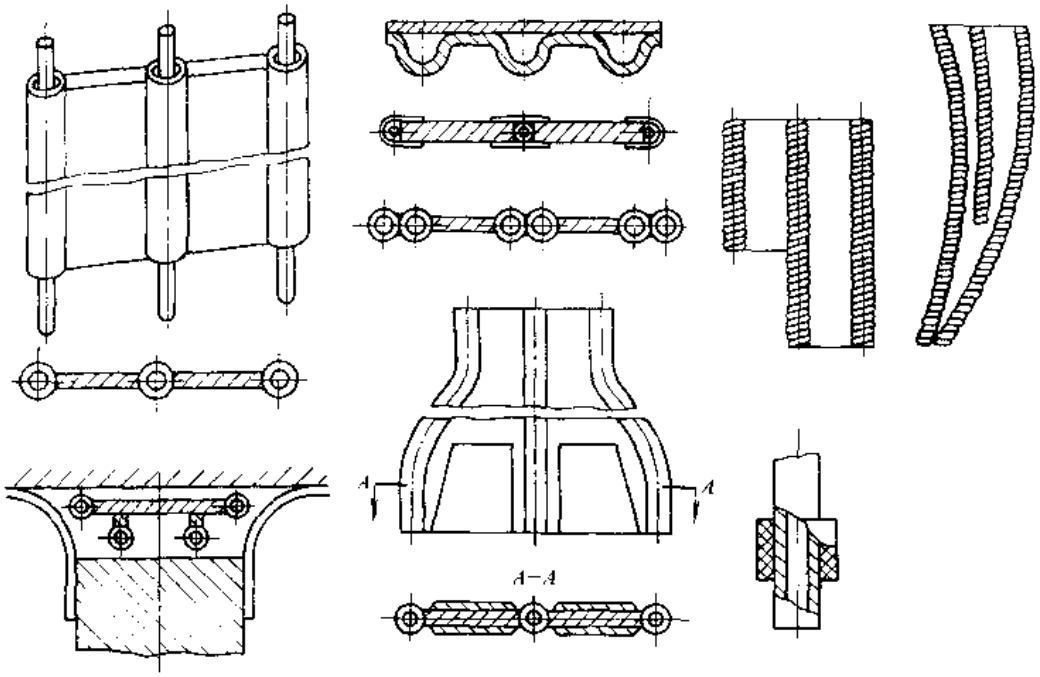


图6·4-30 熔嘴的各种典型结构

5. 滑块或固定挡块 冷却滑块和固定挡块的作用是保持熔渣池和金属熔池在焊接区内不致流失。由于电渣焊金属熔池的体积较大，冷却滑块或固定挡块都用循环水冷却并采用热导性良好的材料制成。

5·3 电渣焊用焊接材料

电渣焊所用的焊接材料有焊丝、焊剂、熔嘴及其绝缘材料。电渣焊焊缝的成分取决于填充金属成分、母材成分及其熔合比。可利用焊接材料来控制焊缝金属的最终化学成分和力学性能。

1. 焊丝 电渣焊用焊丝分两种：实心焊丝和药芯焊丝。实心焊丝应用较普遍，焊接合金钢时，药芯焊丝有一定的优越性。如药粉含量控制恰当，焊接过程中可不再添加焊剂就能保持所要求的渣池深度。

超星公司制作 请尊重作者版权

最常用的焊丝直径为2.4和3.0mm，但也可使用直径2.0和4.0mm的焊丝。碳钢和低合金钢的电渣焊可按表6·4-28选用焊丝。

表6·4-28 电渣焊焊丝选用示例

钢号	焊丝牌号	钢号	焊丝牌号
Q235、Q255	H10Mn2、	15MnV、15MnTi	H10MnMo
20、20g25	H10MnSi	15MnVN、16MnNb	
16Mn、	H08Mn2Si	18MnMoNb	
16MnCu			
09Mn2、	H10MnMo	14MnMoV	H10Mn2NiMo
09MnV		13MnNiMoNb	H10MnMoV

2. 焊剂 电渣焊焊剂对焊接过程的稳定性起重要作用。焊剂在熔化状态应具有一定的电导性，以产生足够的电阻热。熔渣的流动性应适宜，以保证渣池产生良好的循环流动，使渣池热量分布较均匀。焊剂的熔点应低于被焊金属的熔点，其沸点应高于渣池可能达到的最高工作温度。熔渣凝固后应易于脱离焊缝表面。碳钢和低合金钢电渣焊专用焊剂牌号为HJ360，这种焊剂的特性基本上满足了要求，其化学成分列于表6·4-29。HJ430、HJ431和HJ350等埋弧焊焊剂也常用于碳钢和低合金钢的电渣焊。

表6·4-29 电渣焊专用焊剂HJ360化学成分的质量分数 (%)

MnO	SiO_2	CaF_2	Al_2O_3	MgO	CaO	FeO	S	P
20～26	33～37	10～19	11～15	5～9	4～7	≤1.0	≤0.10	≤0.10

3. 熔嘴 由于熔嘴是焊缝金属的一部分，熔嘴的成分必须与母材的成分相匹配。熔嘴材料的选择应遵循焊丝的选择原则。熔嘴一般采用标准管材，碳含量不如焊丝中控制得那样低，因此应配用低碳焊丝。熔嘴绝缘层在熔池中熔化后不应与熔化金属产生不良的冶金反应。

5·4 电渣焊工艺

电渣焊工艺包括焊前准备，焊接规范参数的选择和操作技术。

1. 焊前准备 电渣焊焊前准备的主要工作是接缝坡口加工、焊件组装、引入板、引出板和Ⅱ形加筋板的装焊等。

焊件组装的关键是按工艺要求控制接缝的间隙。电渣焊中，间隙的大小是影响焊缝质量的重要工艺因素之一。间隙主要取决于焊件板厚，所焊钢材的碳含量以及所选择的焊接电流。碳含量越高，板厚越大，间隙应适当放宽。焊接长焊缝时，接头顶部的间隙应比底部放大3～6mm，以抵消焊接收缩量。生产中常用的间隙宽度为28～34mm。

电渣焊的工艺特点决定了每一焊件必须按图6·4-31所示的尺寸要求装焊引入板、引出板和Ⅱ形加筋板。引入板和引出板应采用与母材相同或相似的材料制作。Ⅱ形加筋板可采用普通碳钢制作，但必须具有足够的宽度和厚度，以保证所要求的刚性。

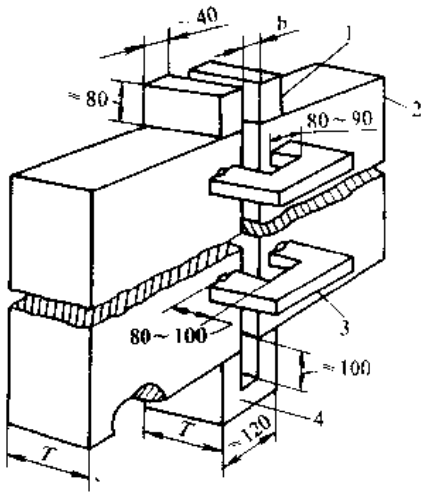


图6·4-31 电渣焊引入板、引出板和Ⅱ形加筋板装焊方式、尺寸要求

1—引出板 2—焊件 3—Ⅱ形铁 4—引入板

2. 焊接规范参数 丝极电渣焊的主要规范参数有：焊接电压、焊接电流、渣池深度、接缝间隙、焊丝伸出长度、焊丝根数和间距、焊丝摆动速度和在两端的停留时间。在熔嘴电渣焊中还应增加熔嘴数及其间距。

这些规范参数对焊缝质量起决定性的影响，规范参数的选择需考虑众多的因素。实际使用的电流范围为400～700A，每根焊丝上的焊接电压常用范围是34～45V。最佳渣池深度为50～70mm。接缝间隙通常取28～32mm，最常用的焊丝直径为3mm，单丝不摆动可焊厚度极限为80mm，板厚超过70mm，可采用双丝。焊件厚度超过120mm时，应采用三丝。

各种板厚纵缝丝极电渣焊和熔嘴电渣焊的典型规范参数分别列于表6·4-30和表6·4-31。

超星公司制作 请尊重作者版权

表 6·4-30　各种板厚纵缝丝极电渣焊典型规范参数

板厚 (mm)	接缝间隙 (mm)	焊丝根数	焊丝直径 (mm)	焊接电流① (A)	焊接电压 (V)	焊丝间距 (mm)	渣池深度 (mm)	焊丝摆动速度 (m/h)
30	28～30	1	3	450～500	42～44	—	50～60	—
40	28～30	1	3	500～550	42～44	—	50～60	—
50	30～32	1	3	500～550	44～46	—	50～60	—
60	32～34	1	3	500～550	44～46	—	50～60	38～40
70	32～34	2	3	450～500	38～42	40～45	60～70	—
80	32～34	2	3	500～550	38～40	50～55	60～70	—
90	34～36	2	3	500～550	38～40	50～60	60～70	38～40
100	36～38	2	3	500～550	40～42	50～60	60～70	38～40
120	38～40	3	3	500～550	40～42	45～50	60～70	38～40

① 每根焊丝的焊接电流

表 6·4-31　各种接头熔嘴电渣焊典型规范参数

接头形式	焊件厚度 (mm)	装配间隙 (mm)	熔嘴数	焊丝根数	焊接电压 (V)	送丝速度 (m/h)	渣池深度 (mm)
对接	50	28～32	1	2	36～38	120～150	40～50
	100	28～32	1	2	36～38	140～160	40～50
	350	32～34	3	6	38～42	60～63	35～40
丁字接头	100	28～34	1	2	35～45	700～850	35～45
角接接头	80	28～34	1	2	40～44	120～140	50～55

6　等离子弧焊[24]～[26]

6·1　等离子弧焊特点

等离子弧焊是一种用压缩电弧作热源的钨极气体保护焊接法。电弧经过水冷喷嘴孔道，受到机械压缩、热收缩和磁收缩效应的作用，弧柱截面减小，电流密度增大，弧内电离度提高，成为压缩电弧，即等离子弧。

等离子弧焊焊透母材的方式，有熔透焊和穿透焊两种。熔透焊主要靠熔池的热传导实现焊透，多用于板厚 3mm 以下的焊接。穿透焊又称"小孔法"焊，主要靠强劲的等离子弧穿透母材实现焊透，多用于 3～12mm 板厚的焊接。

根据焊接电流的种类和大小，等离子弧焊分为直流等离子弧焊、交流等离子弧焊、微束等离子弧焊以及等离子—熔化极气体保护焊(等离子—MIG 焊)。直流等离子弧焊主要用来焊接碳钢、合金钢、耐热钢、不锈钢、铜及其合金、镍及镍合金、钛及钛合金等。在充氩箱内还可焊接钨、钼、钽、铌、锆及其合金、镁及镁合金以及铍青铜等。微束等离子弧焊常使用 30A 以下的焊接电流焊接 0.01～1mm 厚的微小工件。等离子—熔化极气体保护焊可用来焊接碳钢、不锈钢、合金钢等，也可进行堆焊。

与钨极氩弧焊相比，等离子弧焊有如下特点：(1)等离子弧的能量密度大，弧柱温度高，弧流流速大，穿透能力较强，12mm 以下厚度的板材可不开坡口，一次焊透，双面成形。(2)焊接电流小到 0.1A 时，在有非转移弧同时存在的情况下，电弧仍能稳定燃烧，并保持良好的挺度与方向性。(3)电弧呈圆柱形，弧长变化对工件表面加热点的能量密度影响较小，弧长变化的允许偏差不十分严格。(4)钨极缩于喷嘴内，焊接可避免钨污染；钨极寿命较长。(5)焊接速度快，生产率高。(6)穿透焊时，焊件不开坡口，背面无衬垫，可一次穿透双面成形。(7)穿透焊接不适于手工操作，灵活性不如手工氩弧焊。(8)设备较复杂，只宜在室内焊接。

6·2　直流等离子弧焊

6·2·1　焊接设备

由焊接电源、控制系统、焊枪、焊接小车(或转胎或

超星公司制作请尊重作者版权

行走机构)、气路及水路等组成。

焊接电源应具有陡降或垂降特性，一般空载电压75V以上，多采用正极性。在焊接铝及铝合金的薄小件时，有时采用反极性，钨极在反极性时的许用电流是正极时的1/4～1/3左右。

控制系统应能完成图6·4-32所示的焊接程序。

常用的喷嘴形状有直道式和扩散式两种(图6·4-33：(1)直道式：压缩较强，许用电流较小，较易产生双弧；(2)扩散式：压缩较弱，能量密度稍弱，许用焊接电流较大，不易产生双弧。

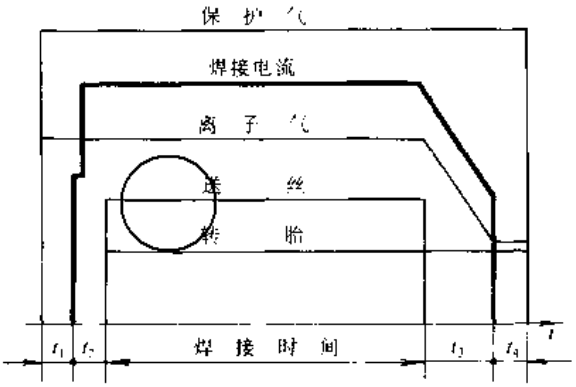


图6·4-32 等离子弧焊程序

t_1—预送气时间 t_2—引弧时间 t_3—电流衰减时间

t_4—滞后关气时间

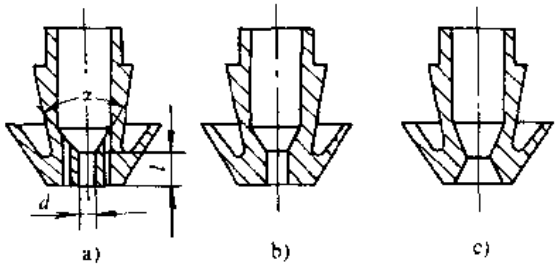


图6·4-33 常用喷嘴形状

a)、b)直道式 c)扩散式

6·2·2 焊接工艺

对接焊时，装配间隙与错边一般≤0.5mm，材料的表面张力越大，由装配间隙引起的焊漏可能性越小。要求焊缝有余高时，从焊接方向向熔池送直径0.8～1.2mm的填充焊丝，图6·4-34为"小孔法"等离子弧焊示意图。"小孔法"焊时的焊缝断面具有典型的"酒杯状"(图6·4-35)。

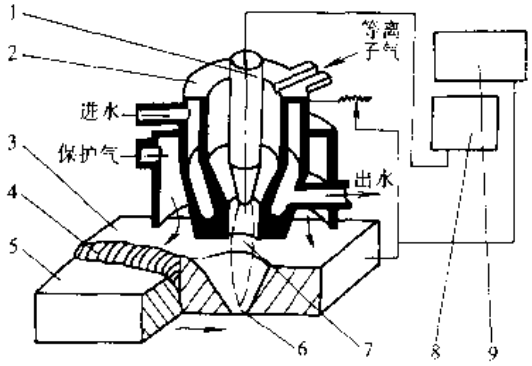


图6·4-34 "小孔法"等离子弧焊示意图

1—钨极 2—喷嘴 3—小孔 4—焊缝 5—母材

6—尾焰 7—等离子弧 8—高频振荡器 9—焊接电源

图6·4-35 "小孔法"等离子弧焊焊缝典型断面

不同材料适于焊接的厚度见表6·4-32。表6·4-33为焊接工艺参数实例。

表6·4-32 "小孔法"等离子弧焊适于焊接的厚度

(mm)

碳钢	合金钢	不锈钢	镍及镍合金	钛及钛合金	铜及铜合金
≤8	≤8	≤10	≤10	≤12	≈2.5

表6·4-33 大电流等离子弧焊工艺参数

焊透方式	材料	焊件厚度(mm)	焊接电流(A)	电弧电压(V)	焊接速度(mm/min)	离子气流量(L/min)		保护气流量(L/min)			孔道比	钨极内缩(mm)	备注
						基本气流	衰减气	正面	尾罩	反面	l/d (mm/mm)		
熔透法(焊)	低碳钢	1	105	—	700	2.5	—	7	—	—	2.5/2.5	1.5	悬空焊
		1.5	85		270	0.5		3.5			2.5/2.5	1.5	
		2	100		270	1.2		4			3/3	2	
		2.5	130		270	1.2		4			3/3	2	
	不锈钢	1	60	—	270	0.5	—	3.5	—	—	2.5/2.5	1.5	

航星公司制作请尊重作者版权

（续）

焊透方式	材料	焊件厚度(mm)	焊接电流(A)	电弧电压(V)	焊接速度(mm/min)	离子气流量(L/min) 基本气流	离子气流量(L/min) 衰减气	保护气流量(L/min) 正面	保护气流量(L/min) 尾罩	保护气流量(L/min) 反面	孔道比 l/d (mm/mm)	钨极内缩(mm)	备注
穿透法(焊)(小孔法)	低碳钢	3	140	29	260	3	—	14+1	—	—	3.3/2.8	3	保护气为 $Ar+CO_2$
		5	200	28	190	4		14+1			3.5/3.2	3	
		8	290	27	180	4.5		14+1			3.5/3.2	3	
	30CrMnSiA	3.5	140	28	326	1.7	2.3	17	8.4	—	3.2/2.8	3	喷嘴带两个 ϕ0.8mm 小孔，间距 6mm
		6.5	240	30	160	1.3	3.3	17			3.2/2.8	3	
		8	310	30	190	1.7	3.3	20			3.2/3	3	
	不锈钢	3	170	24	600	3.8	—	25			3.2/2.8	3	
		5	245	28	340	4.0	—	27			3.2/2.8	3	
		8	280	30	217	1.4	2.9	17			3.2/2.9	3	
		10	300	29	200	1.7	2.5	20			3.2/3	3	

当焊件厚度大时，可开坡口，用等离子弧"小孔法"焊接钝边(打底焊)，然后用其他焊接方法或等离子弧填丝焊焊满坡口。

6·2·3 脉冲等离子弧焊

一般采用方波或梯形波直流脉冲焊接电源。主要特点是：(1)可控制焊接线能量，在焊接薄壁构件和全位置焊接时，能控制金属熔池，使焊缝正反面成形良好；(2)焊接同样厚度的材料时，焊接线能量比非脉冲焊小，相应减小了热影响区、焊接应力与变形；(3)脉冲电流造成的热循环及对金属熔池的搅拌作用，有利于细化焊缝结晶、降低产生裂纹的倾向。适用于全位置焊接，薄壁构件的焊接及焊接性差的材料的焊接。成功应用的实例有钢管的全位置对接焊、锅炉及石油钢管的直管对接焊、碳钢及不锈钢薄壁容器的纵缝与环缝焊接、钢质弹药筒的纵缝与环缝焊接、低压容器的打底焊等。

6·3 交流等离子弧焊

主要用于焊接铝及铝合金。通常采用矩形波交流焊接电源。调整正、负半周的通电时间比，使阴极清理作用的强度及熔深可以控制，见图 6·4-36。

当铝焊件的氧化膜较易清除时，可使工件为负、钨极为正的时间尽可能短，即增长工件为正、钨极为负的时间。这样在保证阴极清理作用足够强的前提下，使母材获得更大的熔深，而钨极的寿命又得以延长。

交流等离子弧焊时采用钨钇或钨锆电极有较长的寿命和较好的稳弧性能。钨极的尖头为半球形。

对铝及铝合金进行交流等离子弧焊时，使用的离子气流量约是焊接碳钢时的 1/3 左右。离子气流量较大时，会形成表面凸凹不平的焊缝。考虑到钨极的冷却效果，离子气流量不宜太小，则可适当增加喷嘴的孔径。

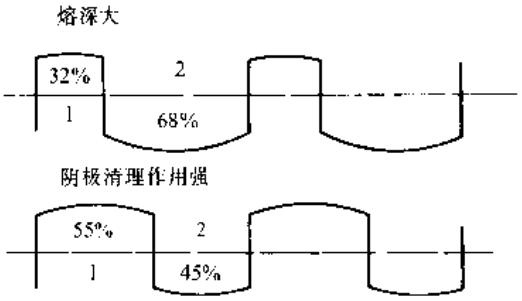


图 6·4-36 矩形波交流焊接电源中正负半周通电时间比的调节
1—钨极为正极 2—钨极为负极

在平焊位置，当铝及铝合金的厚度小于 3mm 时，可进行矩形波交流等离子弧熔透焊；当厚度为 3～6mm 时，可用穿透焊；厚度更大时，可用穿透焊封底，填丝等离子弧盖面焊接。在立焊位置，可穿透焊的厚度达 15.9mm。表 6·4-34 为 5083 铝合金板矩形波交流等离子弧焊工艺参数。

超星公司制作 请尊重作者版权

表 6·4 34 5083铝合金板矩形波交流等离子弧焊工艺参数

板厚 (mm)	焊透方式	焊接电流 (A)	焊接电压 (V)	离子气流量 (L/h)	保护气流量 (L/h)	喷嘴孔径 (mm)	钨极内缩 (mm)	孔道外弧长 (mm)	焊接速度 (mm/min)	送丝速度 (mm/min)
3	穿透	100～130	27～31	150	300	3	3.5	4	300	0
6	穿透	105～120	30～31	150	300	3.5	3	4	200	0
10（60°双V形坡口钝边3mm）	第一道穿透	150	31	150	300	4	4	4	180	0
	第二道填丝	220	28	100	300	4	4	4	180	250
	第二道填丝	230	30	100	300	4	4	4	180	250

6·4 微束等离子弧焊

6·4·1 特点

焊接电流一般为0.1～30A。通常用两个独立的电源，分别对燃烧于钨极和喷嘴之间的维弧及钨极与焊件之间的主弧供电（图6·4-37）。在采用短路引弧时维弧电源的空载电压应较高（100～150V），采用高频引弧时可较低。电源外特性以垂降为佳。当使用的最小焊接电流≥5A时，可以不用维弧电源。供电及引弧方法与前述直流等离子弧焊时相同。

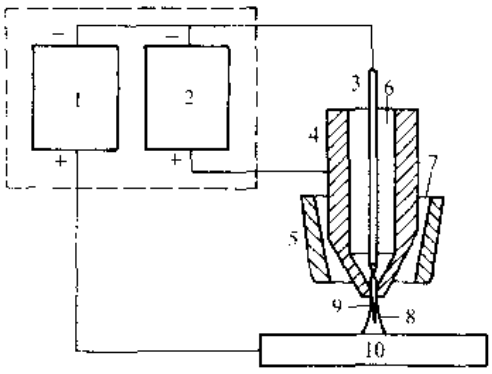


图 6·4-37 微束等离子弧焊示意图

1—主弧电源 2—维弧电源 3—钨极 4—喷嘴 5—保护罩 6—离子气 7—保护气 8—等离子弧 9—维弧 10—焊件

微束等离子弧的伏—安特性曲线在维弧电流≥2A时是平直的，和电源外特性曲线之间有稳定燃烧的交点。因此在电流小至0.1A的情况下仍能稳定燃烧并有良好的挺度和指向性。

焊接厚度<0.8mm时，必须用带有成形垫的卡具压紧工件。

6·4·2 焊接工艺

1. 接头形式 典型接头形式见图6·4-38。板厚小于0.3mm时，推荐卷边接头或端面接头。卷边高度推荐如下：

板厚 t(mm)	0.05	0.15	0.3
卷边高度 h(mm)	0.25～0.5	0.5～0.7	0.8～1.0

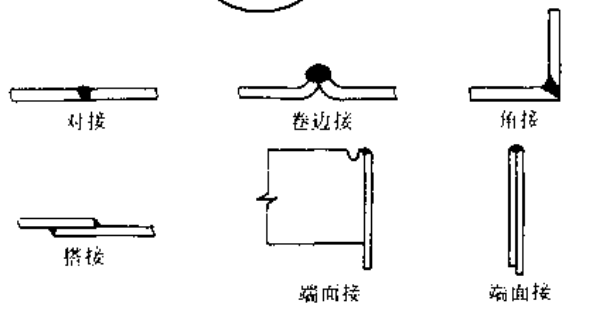


图 6·4-38 典型接头形式

板厚为0.3～0.8mm时，可采用对接接头，卷边接头或端面接头。

装卡精度要求见图6·4-39。对厚度<0.8mm时的构件，可进行全位置焊接，熔池重力影响不大。

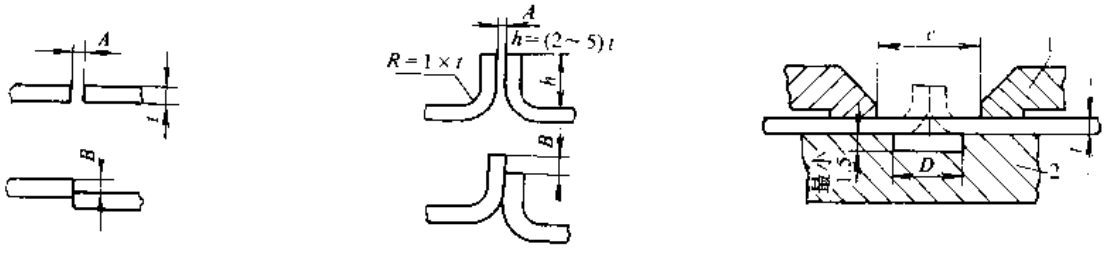
2. 工件的焊前清洗 工件越小、越薄，清洗越要仔细。

3. 焊接工艺参数的选定 几种金属材料的自动焊工艺参数见表6·4-35。

6·4·3 应用

微束等离子弧焊在工业上已用于焊接薄钢带、薄壁管、屏蔽套、薄壁容器、薄壁小球、波纹管器件、膜盒、电容器盒、硅管、排气管、导气管、汽车蒙皮、热电偶、筛网、灯丝组件等。还可用于汽轮机叶片、汽车排气

能量公司制作 请尊重作者版权



平头对接　　卷边对接　　装卡要求

$A \leqslant 0.2t$　　$A \leqslant 0.6t$

$B \leqslant 0.4t$　　$B \leqslant t$

图 6·4-39 对接及卷边接头的装卡要求

1—压板 2—垫板(可用不锈钢) 对于平头对接 $C=10t\sim20t$ 对于卷边对接 $C=15t\sim30t$ $D=4t\sim16t$

表 6·4-35 自动微束等离子弧焊工艺参数

材料	厚度 (mm)	接头形式	焊接电流 (A)	焊接速度 (mm/min)	焊接电压 (V)	离子气(Ar) 流量(L/h)	保护气流量 (L/h)	喷嘴孔径 (mm)
碳钢	0.3	对接	8	200	22	25	0	1.0
	0.8	对接	25	250	20	25	100	1.5
	1.0	对接	30	210	20	25	100	1.5
不锈钢	0.025	卷边	0.3	127	—	14.2	566(Ar99%+$H_2$1%)	0.8
	0.08	卷边	1.6	152	—	14.2	566(Ar99%+$H_2$1%)	0.8
	0.13	端接	1.6	381	—	14.2	566(Ar99%+$H_2$1%)	0.8
	0.25	对接	6.5	270	24	36	360(Ar)	0.8
	0.50	对接	18	300	24	36	660(Ar)	1.0
	0.75	对接	10	127	25	14.2	330(Ar99%+$H_2$1%)	0.8
	1.0	对接	27	275	25	36	660(Ar)	1.2
钛	0.08	卷边	3	152	—	14.2	566(Ar50%+He50%)	0.8
	0.2	对接	5	127	26	14.2	566(Ar50%+He50%)	0.8
	0.3	端接	15~20	240	—	16	150(Ar)	1.0
	0.55	对接	10	178	—	14.2	566(He75%+Ar25%)	0.8
镍铜	0.15	对接	5	300	22	24	300(Ar)	0.6
	0.08	卷边	10	152	—	14.2	566(He75%+Ar25%)	0.8

阀门密封面等的微小缺陷修补。

6·5 等离子-熔化极气体保护焊

单电源等离子-熔化极气体保护焊是一种等离子弧焊与枪内填丝的熔化极气体保护焊相结合的焊接方法。连续送进焊丝在钨极旁边进入等离子弧焊枪，在喷嘴孔道壁上的特定孔处离开焊枪，进入等离子弧柱中。焊丝与工件间产生熔化极电弧，钨极与工件间产生等离子弧。尚未熔化的焊丝端头及其熔化极电弧处在等离子弧的包围之中。一台陡降特性的焊接电源同时为等离子弧和熔化极电弧供电，见图 6·4-40。

单电源等离子-熔化极气体保护焊的焊接电流有等离子弧电流和熔化极电弧电流之分。熔化极电弧电流由焊丝电流和分流电流组成。调整连接于焊接电源负极与焊丝之间的可变电阻，可改变等离子弧电流与熔化极电弧电流的分配比例并可调节焊丝电流的大小。变动钨极尖与孔道中焊丝之间的距离，可调节分流电流的数值。控制上述电流的数值，可以改变金属熔滴的过渡形式，这种方法的熔滴过渡形式有短路过渡、滴状过渡和射流过渡几种。

单电源等离子—熔化极气体保护焊有等离子弧焊和熔化极气体保护焊的双重优点。焊接过程无飞溅，焊

缝余高可调且成形美观，焊接速度较快、效率较高。可用于碳钢、不锈钢等材料的焊接及堆焊。也可首先进行等离子弧焊打底焊，然后用同一焊枪进行等离子-熔化极气体保护焊填坡口焊接。表 6·4-36 为用这种方法焊接液化气钢瓶时的工艺参数。

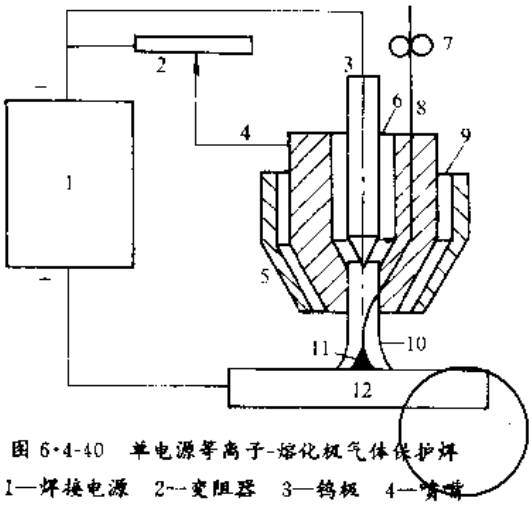


图 6·4-40 单电源等离子-熔化极气体保护焊

1—焊接电源 2—变阻器 3—钨极 4—喷嘴 5—保护罩 6—离子气 7—送丝轮 8—焊丝 9—保护气 10—等离子弧 11—熔化极电弧 12—焊件

表 6·4-36 单电源等离子-熔化极气体保护焊焊接液化气钢瓶的工艺参数

板厚	焊接速度 (mm/min)	焊接电流 (A)	焊接电压 (V)	送丝速度 (m/min)	保护气流量 (L/h)	离子气流量 (L/h)
3.5	400	350	35	7～9	200	400

注：1. 钨极直径 5mm，焊丝 08Mn2Si，直径 1.2mm

2. 离子气、保护气均为氩气。

7 电子束焊

7·1 电子束焊特点

利用高速、聚焦的电子流轰击金属工件表面，使其在瞬间熔化并形成焊缝的方法，称作电子束焊，焊接原理如图 6·4-41。通常，在真空中从炽热阴极发射的电子，被高压静电场加速和聚焦后，又进一步由电磁场会聚成高能密度的电子束（束径 0.25～100mm，能量密度≈5×10^6W/cm^2）。当电子束轰击工件表面时，由于受到金属原子的阻挡，电子的动能在瞬间变成热能，使金属加热、熔化、蒸发，并在工件表面下部产生一深熔空腔，电子束和工件相对移动时，使熔化金属向前转移，形成窄而深的大深宽比焊缝，见图 6·4-42。当电子

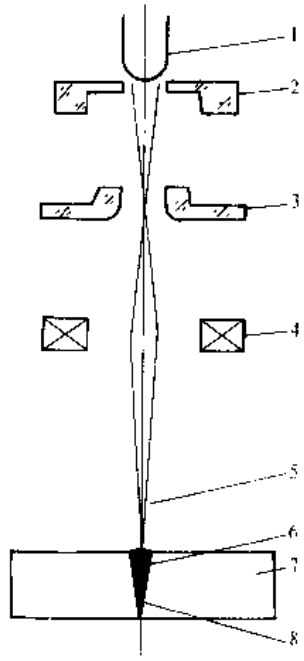


图 6·4-41 电子束焊接原理图

1—阴极（灯丝） 2—控制极（栅极） 3—阳极 4—电磁透镜 5—电子束 6—束焦点 7—工件 8—焊缝

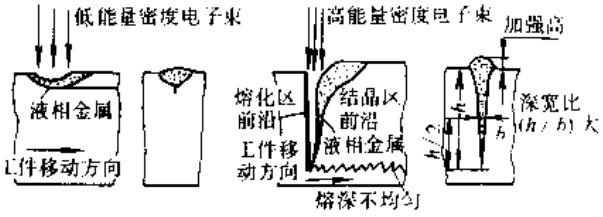


图 6·4-42 低能量和高密度电子束焊缝形成过程

束的能量密度不高时，金属的熔化过程和电弧焊相似，焊缝熔深也较浅。

电子束焊特点如下：

(1)热源能量密度高，焊接速度快，焊缝线能量小。焊缝深宽比大，最大可达 20∶1～50∶1。焊接热影响区小，工件变形小。(2)电子束可控性好，焊接规范调节范围宽且稳定，再现性好。单道焊接熔深 0.03～300mm。电子束可以脉冲调制、扫描和跟踪焊缝，容易保证焊接质量。(3)真空保护好，无金属电极污染，保证了焊缝金属的高纯度。6.666Pa 低真空中的有害气体杂质比纯度 99.99%的氩气中还少。(4)电子束焊节能、节材，在大批量或厚板产品生产中，焊接成本是电弧焊的 50%左右。(5)焊接设备复杂，造价高，焊件尺寸受真空室限制，使用维护技术要求高，需要注意防护 X 射线。

7·2 电子束焊机

电子束焊机是由电子枪、高压电源、真空系统、焊

机械工业出版社版权

超星公司制作请尊重作者版权

接工作室(包括行走机构、转胎和夹具)及控制系统等部分组成。电子枪是电子束的发生器，是最重要的部分。现在广泛采用三极型枪，其静电场由阴极(灯丝)、控制极(栅极)和阳极构成，有很好的聚焦和控制性能。按电子枪的加速电压又可分为低压(30～60kV)和高压(100～200kV)型。低压型电子枪可以装在焊接工作室内并沿几个轴运动。X射线容易防护。高压型枪束的能量密度高，工作距离和聚焦区长，容易获得深宽比大的焊缝。但是，高压绝缘和X射线防护要求高，设备造价高。电子束焊机的典型功率为：3，6，12～15，25～30，60及100～120kW。

电子束焊机按焊接工作室的真空系统可分为高真空、低真空、局部真空和非真空焊机，其特点及基本原理见表6·4-37和图6·4-43。高真空电子束的散射和损失很小，焊缝深宽比大，可达50∶1。焊缝金属污染少，质量好，适于焊接活性金属。但是，由于焊接工作室所需扩散泵的抽气时间长，生产效率很低。虽然真空电子束的散射较大，焊缝的深宽比仍可达到10∶1～20∶1，不仅可以满意地焊接钢、铜和铝，甚至能焊接吸气量少的难熔金属。低真空焊接工作室采用机械泵抽气，生产率高，扩大了应用范围。现在最大的焊接室体积达280m³。大生产中专用焊机的生产率为2000件/h。局部真空电子束焊是将焊接熔池放在小型低真空室内，并使真空室沿规则的焊缝移动。要得到稳定的真空度，需要强有力的抽气系统和复杂可靠的局部密封装置。非真空电子束焊是将电子束从高真空枪室内引到大气中，对放置在大气中的大型连续性工件和大批量生产的焊件进行电子束焊，克服了真空室的限制。焊接的最大厚度是50mm，焊缝的最大深宽比为5∶1。阻碍非真空电子束焊发展的关键是由于电子束进入大气中的散射，能量的损失和能量密度的降低。提高加速电压、束功率和能量密度、减小工作距离、采用小原子量惰性气体保护和改善电子束引出技术，是非真空电子束焊的发展方向。

表6·4-37　电子束焊机类型及特点

类　型	高真空型	低真空型	局部真空型	非真空型
焊接室真空压力(Pa)	1.333×10^{-2}～1.333×10^{-3}	13 333～1 333	13 333	101 325
真空室	真空室尺寸大于焊件	真空室尺寸大于焊件	真空室尺寸小于焊件	
真空室用真空泵	扩散泵、机械泵	机械泵	机械泵	
抽真空时间	1～15min	几秒～几分	几秒	
加速电压(kV)	30～150	60～150	60～150	150～200
工作距离(mm)	50～800	25～500	25～500	4～12.5
一次穿透不锈钢深度(mm)(25kW)	>100	100	100	20
注	需考虑材料各成分的蒸气压及蒸发问题	因电子枪需高真空，不能采用室内动枪	局部真空室和焊件间需特殊的密封结构	一般需保护气体

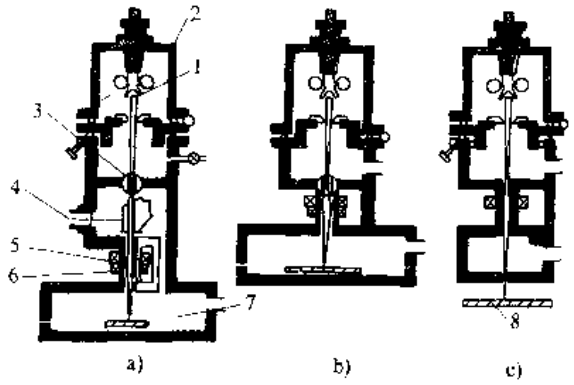


图6·4-43　电子束的基本类型

a)高真空　b)低真空　c)非真空

1—电子枪　2—上枪体　3—枪体阀　4—观察窗

5—电磁透镜　6—偏转线圈　7—焊接室　8—工件

一台控制系统完善的焊机除焊接工艺参数和真空操作能进行预整定和程序控制外，还应具备束点扫描，脉冲调制，光学和电视观察，自动对中和跟踪，自动聚焦和熔透等装置。同时，广泛采用计算机实现工艺观察和质量控制。焊接工艺参数的稳定度：加速电压、束流、焊接速度为1%，聚焦电流0.1%。为保证电子束特性的再现性，更换的阴极(灯丝)位置必须精确，可通过测量导流系数、电子束的焦点位置、束径及其能量密度分布来检查。

电子束焊机的选择应根据焊件的材料、形状、尺寸和熔深、质量、产量要求等确定。

7·3　电子束焊工艺

7·3·1　工艺参数及其影响

电子束焊的主要工艺参数有：加速电压、束流、焊

超星公司制作 请尊重作者版权

接速度，聚焦电流、工作距离和真空度等。加速电压和束流增加，焊缝熔深增大。电压和束流的乘积是束功率，当束功率不变时，焊接速度增大，焊缝线能量降低，熔深减小，其相互关系见图 6·4-44。当焊接线能量不变时，聚焦电流和工作距离取决于束焦点的位置、焊件表面上束直径的大小、能量密度及其分布。束焦点位置对焊缝形状的影响见图 6·4-45。上聚焦和过聚焦都不好，只有聚焦适当才能形成深宽比大的平行焊缝。

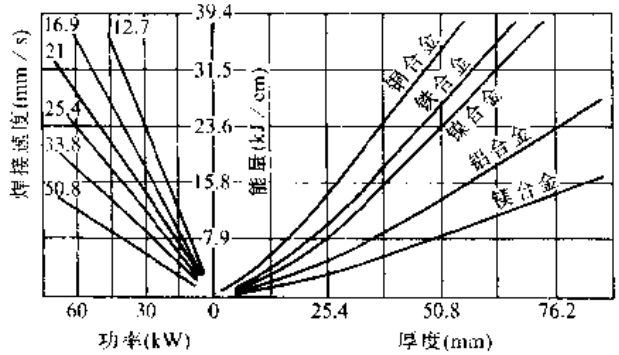


图 6·4-44 高真空下各种材料束功率、焊接速度、线能量和熔透深度的关系

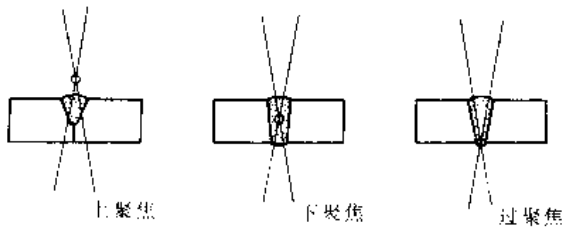


图 6·4-45 束焦点位置和焊缝形状的关系

电子束焊缝越窄，对工件焊前的加工及装配的要求越高。根据接头形状、尺寸及焊缝熔透深度的不同，装配间隙在 0.03～0.15mm 之间。对于易产生收缩裂纹的环形焊缝有时用过盈配合。焊接表面的清理可用化学或机械方法除去油污、锈、氧化皮等有害物质。磁性材料焊前要经去磁处理。厚度 10mm 以上，碳的质量分数分别大于 0.35%和 0.5%的工具钢和碳素结构钢厚板大刚度结构的焊接，需要考虑预热。

7·3·2 焊接缺陷及防止措施

1. 气孔 电子束在高能密度、高真空度及快速冷却条件下焊接含高蒸气压元素的材料时，容易产生气孔。提高母材的纯度，降低焊接速度，摆动电子束，填加含脱氧剂的焊丝可以减少气孔。

2. 裂纹 采用预热、后热和改善接头设计减小拘束度，用电子束摆动和散焦等办法可以防止裂纹。

3. 钉尖缺陷 常发生在不完全熔透的 V 形断面焊缝根部(图 6·4-46a)，能造成应力集中，使接头受力破坏。加垫板或采用梯形底接头，使缺陷排出受力部位，或改为全熔透焊缝。

4. 焊缝断面削弱 由焊缝金属流失或下塌所造成。可采用高速焊，加凸台或填丝来解决。

5. 焊缝偏移 由于电子束机械对中不好，或因材料残磁及焊接异种金属时，在熔池附近形成的杂散磁场也能使电子束偏移(图 6·4-46b)。清除方法是除调整对中外，在工件表面加磁屏蔽板或加反向磁场。

图 6·4 46 焊接缺陷
a)钉尖缺陷 b)电子束偏移

7·4 电子束焊的应用

宜用于：

(1)除含大量的高蒸气压元素的材料外，一般熔焊能焊的金属，都可以采用电子束焊。如铁、铜、镍、铝和钛及其合金。此外，还能焊接稀有金属、活性金属、难熔金属和非金属陶瓷。

(2)可用于焊接熔点、热导、熔解度相差很大的异种金属。

(3)可以采用单道不开坡口焊接厚板产品。

(4)可对连续性焊件和机器零部件进行高速焊接和精密装配焊接。

(5)焊接可达性差的焊缝，在真空中使用的器件，内部要求真空的密封器件。

(6)焊接微型器件或在宇宙的超高真空环境中进行焊接。

(7)用于表面热处理、熔化、合金化和堆焊，以及散焦后用于钎焊等。

电子束焊的典型接头型式见图 6·4-47，部分应用实例见表 6·4-38。电子束焊以 20 和 36.6m/min(非真空)的速度焊接了双金属锯条和不锈钢管纵缝，同时焊接了壁厚 100～150mm 的核电站高压容器。

超星公司制作请尊重作者版权

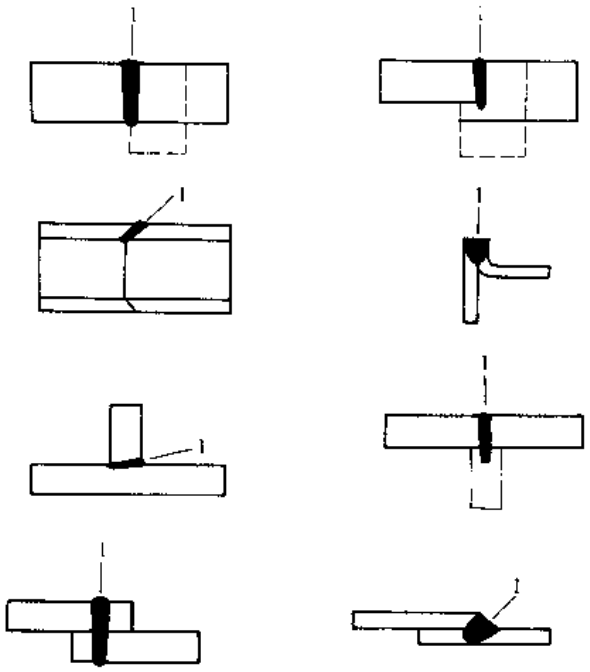


图 6·4-47　典型电子束焊接头型式

1—电子束焊接方向

表 6·4-36　电子束焊部分应用实例

工业部门	应　用　实　例
航　空	发动机喷管、定子、叶片、双金属发动机轮、导向翼、翼盒、双螺旋线齿轮、齿轮组、主轴活门、燃料槽、起落架、旋翼桨毂、压气转子、涡轮盘等
汽　车	双金属齿轮、齿轮组、发动机外壳、发动机起动器用飞轮、汽车大梁、微动减震器、扭矩转换器、转向立柱吊架杆、旋转轴、轴承环等
宇　宙	火箭部件、导弹外壳、钼箔蜂窝结构、宇宙站安装(宇航员用手提式电子枪)
原子能	燃料元件、压力容器及管道等
电子器件	集成电路、密封包装、电子计算机的磁芯储存器及行式打印机用的小锤、微型继电器、微型组件、薄膜电阻、电子管、钽加热器等
电　工	电动机整流子片、双金属式整流子、汽轮机定子、电站锅炉联箱与接管的焊接等
化　工	压力容器、球形油罐、热交换器、环形传动带、管与法兰焊接等
重型机器	厚板焊接、超厚板压力容器的焊接等
修　理	各种修补(修复有缺陷的容器，设计修改后要求的返修件)裂纹修补、补强焊、堆焊等
其　他	双金属锯条、钼坩埚、波纹管、焊接管道精密加工及切割等

8　激光焊

8·1　激光焊特点

激光焊是将具有高功率密度(10^6～10^{12}W/cm^2)的聚焦激光束投射在被焊金属材料上，通过光束和被焊材料相互作用，光能被材料吸收最终转变为热能，从而使金属材料熔化的特种焊接方法。

激光焊属于高能量密度束流焊接，焊接速度高，线能量小，因而具有焊点小或焊缝窄、热影响区小、焊接变形小，焊缝平整光滑等特点。加之聚焦激光束的指向性十分稳定，不受电、磁场及气流的影响，且光束的焦斑位置可预先精确定位，故激光焊特别适合于精密结构件及热敏感器件的装配焊接要求。

激光焊接设备的造价高，能量转换率低是其不足之处，但激光焊的高生产率及易于实现生产自动化的优点，在大规模生产中仍有可能使每件产品的焊接生产成本相对较低。在激光焊与传统焊接方法的生产成本相等或略高的场合，如果激光焊产品能获得更好的技术性能、更长的使用寿命、良好的产品外观，较少的焊后表面处理时间等，则采用激光焊仍然是合适的。对于那些非采用激光焊不可的热敏感器件及要求焊接变形极小的精密结构件，焊接生产成本的高低将不再是考虑焊接方法取舍的决定性因素。

为了提高激光焊能量利用率及工作效率，目前正在开发电弧强化激光新工艺。

8·2　激光焊设备

激光焊设备主要由激光器、高压激励电源、带有光学观察瞄准器的导光聚焦系统及附有传动装置的焊接工作台等部分组成。如图 6·4-48。

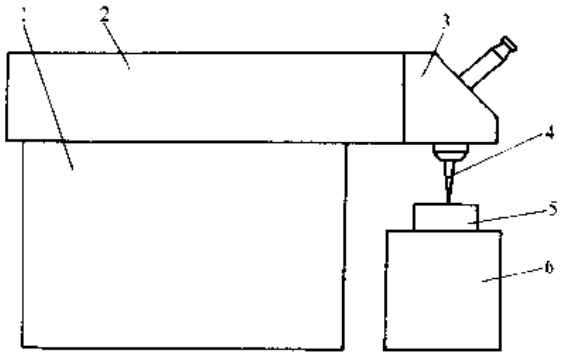


图 6·4-48　激光焊接设备示意图

1—激励电源　2—激光器　3—观察瞄准器及聚焦系统　4—聚焦光束　5—工件　6—工作台

超星公司制作请尊重作者版权

8·2·1 焊接用激光器及其激励电源

用于焊接的激光器应有较大的单个脉冲输出能量或较大的连续输出功率。焊接加工常用的激光器及其部分参数列于表 6·4-39。

表 6·4-39 焊接用激光器的部分参数

激光介质		工作方式	波长(μm)	光束发散度(mrad)	输出	效率(大约值)(%)
固体	红宝石	脉冲	0.69	1～10	1～20(J)	0.5
	钕玻璃	脉冲	1.06	1～10	1～20(J)	4
	钇铝石榴石	脉冲	1.06	1～10	1～50(J)	3
		连续	1.06	1～10	10～1000(W)	3
气体	二氧化碳	连续	10.6	1～10	100～20000(W)	10

固体激光器的激励电源通常是一套供脉冲氙灯用的脉冲触发电容充放电系统。电容器充电电压一般在500～2000V之间。脉冲放电持续时间一般在2～8ms之间。CO_2激光器分为纵向激励和横向激励两种类型，纵向激励采用高电压(数千伏至数十千伏)、低电流(数十至数百毫安)的变压器整流电源。横向激励的则采用低压(数千伏)、大电流(数安至数十安)变压器整流电源。

8·2·2 激光束的聚焦方式及焦点特性

波长为0.69和1.06μm的可见及近红外激光束，通常采用透射聚焦方式，如图6·4-49。制作透镜的材料为光学玻璃或石英玻璃。波长为10.6μm的CO_2激光束，依其输出功率等级的不同，分别采用锗、砷化镓、硒化锌材料制作的凸透镜进行透射式聚焦。此外，也可采用如图6·4-50所示的反射式聚焦。用球面反射镜聚焦时，镜片旬的相对位置应使光束在球面镜上的入射角θ不大于8°，才能获得较好的聚焦效果。

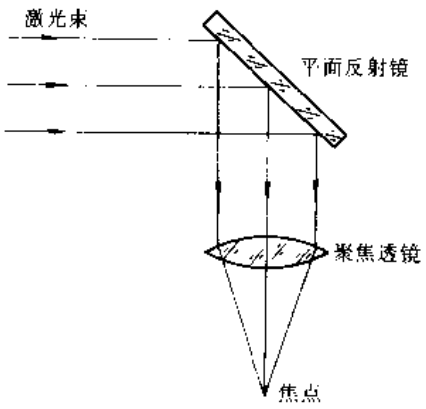


图 6·4-49 透射聚焦示意图

聚焦激光束的焦点特性见图6·4-51。

根据光的衍射理论，平行光束发散度(半角)θ：

$$\theta = 1.22\frac{\lambda}{D}$$

聚焦光束的最小焦斑直径d：

$$d = 2f\theta \quad (\text{mm})$$

焦点的焦深b：

$$b = 16\left(\frac{f}{D}\right)^2\lambda \quad (\text{mm})$$

焦平面上光束的平均功率密度P_0：

$$P_0 = \frac{E}{\pi f^2\theta^2 t} = \frac{W}{\pi f^2\theta^2} \quad (\text{W/cm}^2)$$

式中 λ——激光波长(μm)；

E——脉冲输出激光的能量(J/ms)；

t——脉冲激光输出持续时间(ms)；

W——连续激光输出功率(W)。

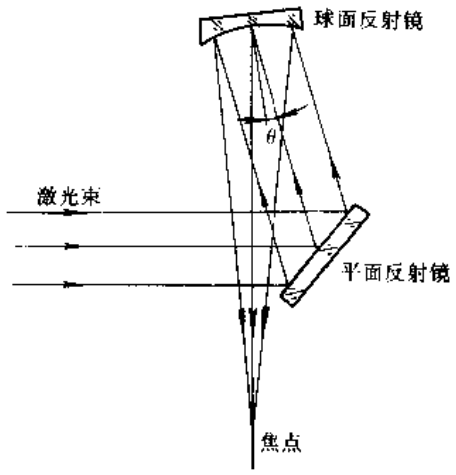


图 6·4-50 反射聚焦示意图

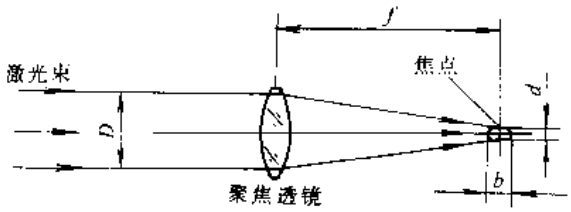


图 6·4-51 激光束焦点示意图

超星公司制作 请尊重作者版权

由上式可见，聚焦光束的最小光斑直径与聚焦透镜的焦距成正比。当激光束的参数一定时，为了获得较小的光斑尺寸或较高的功率密度，则应选择焦距较短的透镜。

8·3 激光焊工艺

按激光器的工作方式，激光焊分为脉冲激光点焊和连续激光焊两种。

8·3·1 脉冲激光点焊

脉冲激光点焊属于非接触式焊接，可焊接一般电阻焊因电极无法伸入或无法安置的焊点，焊接时工件不受外力作用，且无电极材料沾染工件之虑。由于加工用脉冲激光处于可见和近红外波段，因此尚有可能隔着玻璃壳体对其内部的工件进行焊接。

激光点焊的主要工艺参数除聚焦透镜的焦距外，便是单个脉冲能量和脉冲持续时间。前者主要影响金属的熔化量，后者主要影响熔深。适当调节上述两个参数，使被焊材料熔化便可达到激光点焊的目的。

表 6·4-40 脉冲激光点焊工艺参数

焊件接头形式	材料	直径或厚度(mm)	输出能量(J)	脉冲宽度(ms)
导线与导线的对接、搭接、交叉接及T形接	不锈钢	φ0.38	8	3.0
		φ0.76	10	3.4
	铜	φ0.38	10	3.4
	钽	φ0.64	11	3.6
	铜与钽	φ0.38	10	3.4
导线与金属薄板的搭接	镍铬丝与铜片	φ0.1	1	3.4
		0.45		
	镍铬丝与不锈钢片	φ0.1	0.5	4
		0.145		
	硅铝丝与不锈钢片	φ0.1	1.4	3.2
		0.145		
薄板与薄板的搭接	镀金磷青铜与铝	0.3	3.5	4.3
		0.2		
	磷青铜与磷青铜	0.145	2.3	1
		0.145		
	不锈钢与不锈钢	0.145	1.21	3.7
		0.145		
	紫铜与紫铜	0.05	2.3	4
		0.05		
	不锈钢与紫铜	0.145	2.2	3.6
		0.08		

利用激光点焊可对很细的金属线材进行搭接、对接、端接、十字交叉接和丁字接等接头形式的焊接。当使焊点部分重叠时，可对很薄的金属板材进行有密封要求的搭接、对接、角接和端接焊。部分典型的激光点焊工艺参数列于表 6·4-40。

激光点焊除可焊接一般金属材料外，尚可焊接钨、钼、钽、锆等难熔金属。此外，激光点焊可对多种金属实现异种金属焊接(异种金属采用激光点焊的焊接性与电子束焊相近)。

由于脉冲激光点焊的加热过程通常以毫秒计，熔斑直径仅数十至数百微米，焊点定位误差不超过数十微米，焊接热影响区仅数十微米，因而脉冲激光点焊时，焊件几乎没有温升，焊接变形极微。因此脉冲激光点焊广泛用于微电子学元器件及仪器仪表制造业中，如焊接集成电路的内外引线、带玻璃绝缘子插脚的微型继电器外壳、阴极射线管中的电子枪组件、彩色显象管中的阴罩、磁控管中钨钼材料的灯丝组件、汽车发动机用火花塞中心杆、小直径铠装热电偶及仪表游丝组件等。

8·3·2 连续激光焊

连续激光焊主要使用 CO_2 激光器，其输出功率从数百瓦至数千瓦乃至一二十千瓦不等。千瓦级 CO_2 激光束可快速焊接毫米级薄钢板，10～20kW CO_2 激光束可快速焊接5～10mm不锈钢板。图6·4-52及图6·4-53分别给出了百瓦级和千瓦级 CO_2 激光焊接参数间的关系。

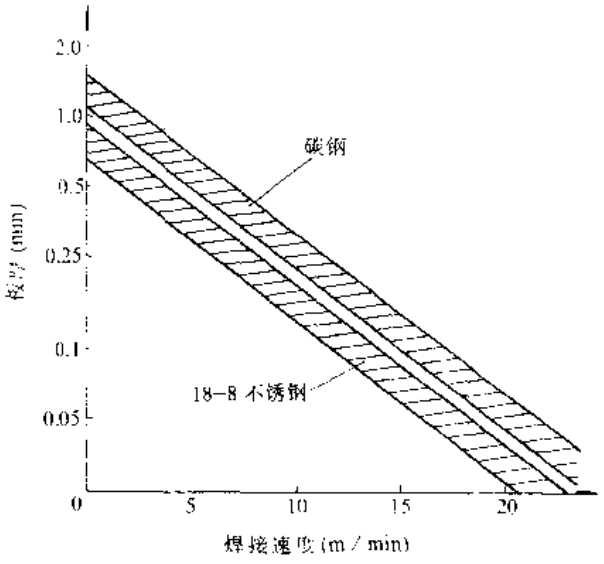


图 6·4-52 采用 375W CO_2 激光束焊接碳钢和18-8不锈钢时，板厚和焊接速度的关系

超星公司制作请尊重作者版权

大功率连续激光焊因其光束焦斑小，功率密度高，故比氩弧焊及等离子弧焊的焊接速度高、焊缝窄、热影响区小、变形小，能像电子束一样对材料进行穿透型焊接，焊缝的深宽比 5∶1～6∶1，与电子束焊相比，激光焊可在大气中进行而不需真空条件，且不产生 X 射线是其优点。但在相同的束流功率条件下、激光束的穿透能力不及电子束强，且能量转换效率也明显偏低是其不足之处。

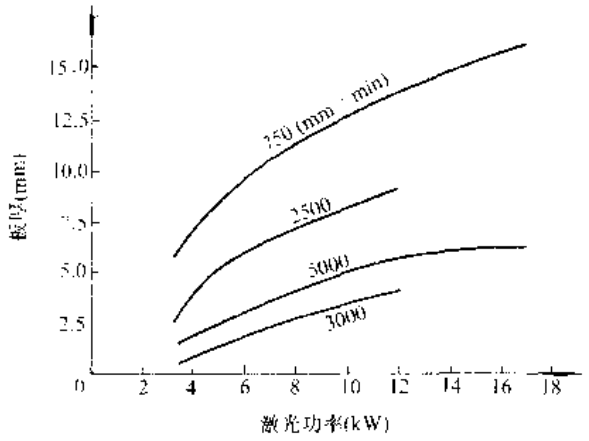


图 6·4-53 在给定焊接速度下焊接 18-8 不锈钢时，板厚与激光功率的关系

连续激光焊可对金属板材进行对接、搭接、角接和端接等接头形式的焊接。由于连续激光焊时金属熔池中的非金属夹杂物在激光束的辐射下被汽化，从而形成了激光束对金属熔池的净化作用。因此，激光焊接头比一般电弧焊接头有更好的力学性能。

连续激光焊接所需的激光功率不仅与材料的厚度及焊接速度有关，而且与金属材料的熔点、热导率以及材料表面对激光的反射和吸收率有很大的关系。因此，对铝、铜等高热导、高反射率材料及钨、钼、钽等高熔点材料，在一般情况下不宜采用 CO_2 连续激光焊接。

连续激光焊已在许多场合得到应用，如在汽车制造业中，激光焊已用于变速箱齿轮组件的焊接、轿车底板材料的拼焊乃至车身外壳的焊接。在冶金工业中，已用于薄钢板连续轧制时的拼卷焊及小直径薄壁管的连续焊接生产。在仪器仪表制造业中，用于焊接多种压力、温度传感器、波纹管、膜盒及多种仪器仪表组件。在制罐业中，用于焊接食品罐、气雾罐及各种容器罐罐身。

9 其他熔焊

9·1 热剂焊

9·1·1 原理及特点

1. 原理 热剂焊是利用热剂（铝热剂）氧化—还原反应产生的化学热作为热源，还原金属作为填充金属，使被焊工件焊合的方法。也可以利用该热源加热作为型腔的金属管来熔焊其他金属。不论哪种热剂焊，均需在预制的型腔中成形。热剂焊最常采用铝粉为还原剂，故又称铝热（剂）焊。常用的铝热剂配方及其产生的温度及热量见表 6·4-41。由于产生的热量大、温度高、反应时如不加控制，甚至可发生爆炸。为了不同需要，通常加入多量氧化物或金属屑，以控制反应的正常和焊缝成分。通常采用高温火柴或镁带来引燃，引燃后利用自身反应热使化学反应继续进行。

表 6·4-41 铝热剂配方及其产生的温度及热量

氧化物	每克氧原子生成热 (kJ)	氧化物中氧的质量分数 (%)	铝热剂配方(%)		反应产生的温度 (℃)	每克铝热剂的热效应 (kJ)
			氧化物的质量分数	铝的质量分数		
Cr_2O_3	376.8	32	74	26	2977	2.51
MnO_2	259.6	37	71	29	4993	4.68
Fe_2O_3	276.3	30	75	25	2960	3.89
Fe_3O_4	276.3	28	76	24	3066	3.56
CuO	159.1	20	81	19	4866	3.94

2. 特点 热剂焊不需外加能源，装置简单，投资少，工艺操作方便，焊接速度快（由几秒至 30s 内完成），不受环境和场地的限制，是野外和太空适用的焊接方法之一。

9·1·2 应用

热剂焊常用来焊接铁路钢轨、建筑钢筋、避雷线、铜或铝制电缆导线、母线及各种棒料等。也可用来修复和补焊，如修理船舶大截面钢件，断裂的尾架、舵、轴及柱等；又如需大量焊缝金属焊补大截面轧辊、钢锭模的空洞、断口等修复工作。还可用热剂焊将挖泥机铲刃刃焊到中心环上。作为一种生产手段，一次可以焊数几千公斤的金属。

热剂还可以作为热处理和钎焊的热源。它是太空钎焊理想的热源。

超星公司制作请尊重作者版权

1. 钢轨及建筑钢筋的热剂焊　将热剂粉配好后，放入耐高温的坩埚中。将被焊件定位，安好内腔形状、尺寸与焊缝相应的成形模。成型模可用砂型、半永久性的金属模或重复使用的碳精模，但都应具有浇口、冒口和浮渣贮槽，见图 6·4-54 和图 6·4-55。

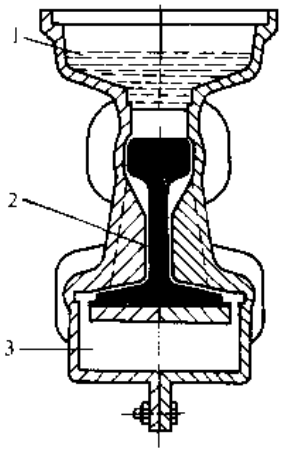


图 6·4-54　带有预热金属室的钢轨热剂焊模型截面

1—浮渣槽　2—钢轨截面　3—预热金属室

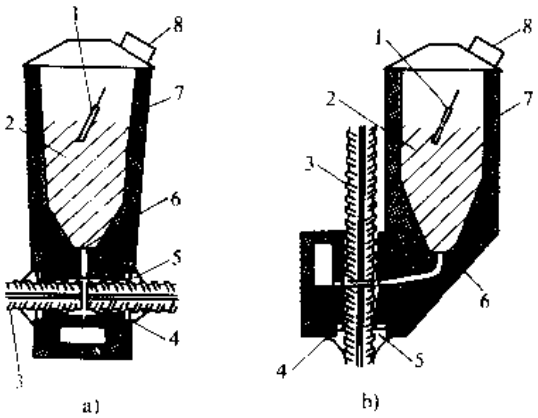


图 6·4-55　钢筋热剂焊

a)水平位置　b)垂直位置

1—高温火柴　2—铝热剂　3—钢筋

4—石棉　5—型砂　6—出口金属封盘

7　镁砂坩埚衬里　8—坩埚帽

2. 铝导体、缆线热剂焊　通常使用按规格预制的药包。药包内装有热剂粉、成形和导热用铁管、铝填块等。操作时，将被焊缆线插入铁管，加好堵头，用剪式焊钳夹紧缆线，即可引燃施焊。几秒钟后，熔渣包裹铁管，将热量通过铁管传入填块，并使铝填块和缆线熔化，送进铝线并顶紧。冷却后，剥除铁管，形成规则的焊接接头。

为了调节反应速度，熔渣温度和流动性，热剂粉中要加入 SiO_2、MgO 和 CaF_2 等。

9·2　电阻熔焊

电阻熔焊是利用碳精成型模为一极、被焊导线为一极，接触通电几秒钟产生的电阻热熔化铝线，并在模腔中成形端面焊缝的熔焊方法。碳模与铝线由轻巧的铜焊钳夹紧，可以手工操作，也可以自动化，原理图见图 6·4-56。

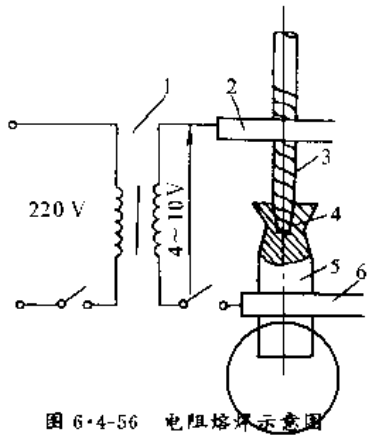


图 6·4-56　电阻熔焊示意图

1—焊接变压器　2—夹线钳　3—铝绞线或双股线

4—模腔　5—瓶式碳模　6—夹模钳

9·3　熔焊-钎焊

对于焊接冶金性能差、熔点相差较大的异种金属可采用熔焊-钎焊法。熔焊-钎焊时，熔点低的母材与钎料熔化，实行熔焊，同时与高熔点母材实行钎焊结合。热源通常采用气焊火焰或钨极氩弧。前者需用熔剂，后者可不用钎剂。热源应不使高熔点母材产生熔化，以防止脆性相的形成。

熔焊-钎焊可以焊接多种异种金属，但具体应用的实例以铝铜为最多。例如在铜板待焊部位预涂（搪、镀）锡、银、锌等金属层，用氩弧加热能保证熔融铝与铜很好漫流而不必使用钎剂。

超星公司制作请尊重作者版权

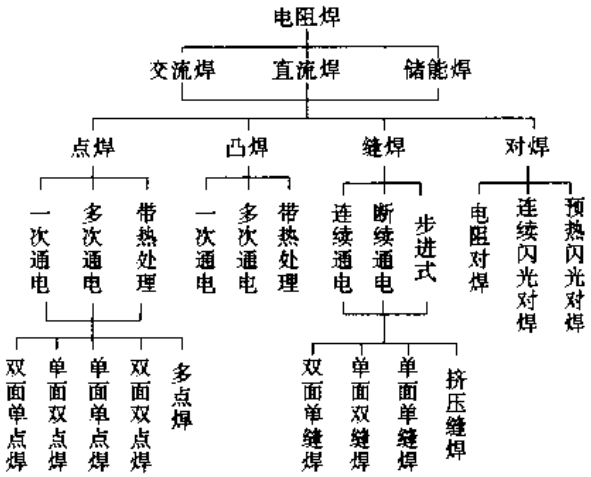
第5章 压 焊

1 电阻焊[28][29]

电阻焊是焊件组合后，通过电极施加压力，利用电流通过接头的接触面及邻近区域产生的电阻热进行加热的焊接方法，又称接触焊。

1·1 电阻焊分类

电阻焊分类如下：



1·2 点焊

点焊是焊件装配成搭接接头，压紧在两电极之间，利用电阻热熔化焊件金属，形成熔核（焊点）的电阻焊方法（图 6·5-1）。电阻热使焊件贴合面处金属熔化，加压使焊接区产生必要的塑性变形，阻止熔化金属的流失，并使导电顺利，二者适当配合和共同作用是获得优质接头的基本条件。

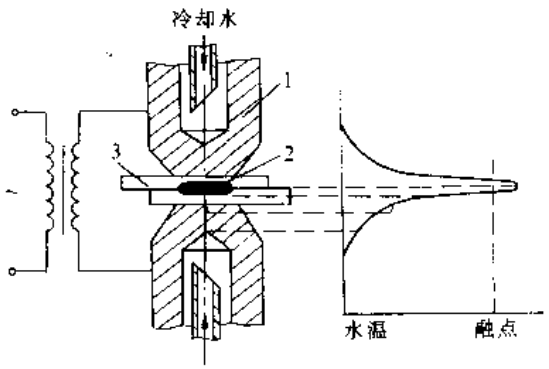


图 6·5-1 点焊示意图

1—电极 2—熔核 3—焊件

与铆接或其他焊接方法相比，优点是接头质量高、辅助工序少、不需辅助材料、劳动条件好、生产率高、易于机械化和自动化。缺点是设备电功率大、接头的无损检验较困难、非导电材料不能焊。

1·2·1 应用

宜用于：(1)薄板冲压件搭接，如汽车驾驶室、车厢、收割机鱼鳞筛片、航空发动机扰流器；(2)薄板与型钢构架和蒙皮结构，如车厢侧墙和顶棚、拖车厢板、收割机漏斗、飞机蒙皮；(3)网和空间构架及交叉钢筋；(4)缝焊前的定位焊等。

适合采用点焊的最大厚度：低碳钢一般为 2.5～3.0mm，小型构件为 5～6mm，特殊情况可达 10mm；钢筋和棒料直径为 25mm。

1·2·2 接头设计

接头设计应掌握以下几点：

(1)电极应易于达到（表 6·5-1）；(2)应有足够的搭接边（表 6·5-2）；(3)焊点应尽量位于刚度较小处；(4)铁磁材料焊件和夹具应避免在焊接时伸入焊机的焊接回路内，或保持伸入量一定；(5)焊点应主要承受剪力。焊点抗拉（撕裂）能力较差，钢和耐热合金的拉伸强度约为拉剪强度的 60%～75%，而铝合金仅为 30%～40%[27]；(6)焊点应有的最小直径和剪切强度见表 6·5-3；(7)为限制电流分流，推荐的点距（表 6·5-4）可保证接头剪切强度大致与母材相等。轻合金接头要获得等强度，可采用相对或交错排列的多排焊点；(8)要求密封的接头，焊点间应有 50%以上的重叠；(9)接头的材料和厚度应尽量相同或相近，不等厚的厚度比一般不应超过 1∶3；(10)三层接头，最好的是两外层等厚中间层薄，其次是两外层等薄中间层厚，应避免不对称。

1·2·3 点焊焊接性

低碳钢的焊接性最好，可采用软规范（电流小、通

超星公司制作 请尊重作者版权

表 6·5-1 点焊接头的工艺性

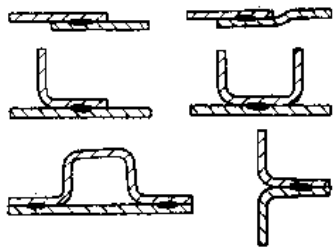
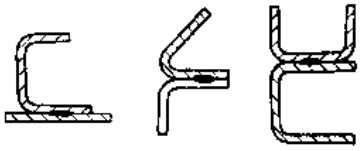
接头种类	开敞接头	半开敞接头	封闭接头
接头型式			
评价	可采用标准型直电极，工艺性最好	需采用斜电极，工艺性尚好	需采用特殊电极，工艺性较差

表 6·5-2 点焊接头搭接边最小值 (mm)

最薄焊件厚度	单排焊点			双排焊点		
	结构钢	耐热钢及其合金	铝合金	结构钢	耐热钢及其合金	铝合金
0.5	8	6	12	16	14	22
1.0	10	8	14	20	18	24
1.5	12	10	16	24	22	30
2.5	16	14	24	32	30	40
4.0	22	20	30	42	40	50

表 6·5-3 焊点应有的最小直径和剪切强度

焊件厚度 (mm)	焊点直径 (mm)	抗剪强度 (N)						
		10钢 20钢	25CrMnSiA 30CrMnSiA	1Cr18Ni9 1Cr18Ni9Ti (软态)	1Cr18Ni9 2Cr13Ni4Mn9 (冷作硬化态)	LY12CZ LF6 LC4CS	LF2 LF3 LY12M	LF21
0.5+0.5	2.5	1450	1700	2000	2700	550	450	350
0.8+0.8	3.0	3100	3600	3800	5000	950	850	700
1.0+1.0	3.5	4000	4800	5000	7000	1250	1150	900
1.2+1.2	4.0	5600	6400	5800	8200	1550	1400	1100
1.5+1.5	4.5	8000	9000	7500	10000	2500	2100	1500
2.0+2.0	5.5	17000	13000	10000	13000	3600	3100	2000
2.5+2.5	6.0	15000	15200	13400	18000	4800	4200	2200
3.0+3.0	6.5	19000	20000	17000	23000	6300	5600	2500

表 6·5-4 点焊接头推荐的点距尺寸 (mm)

最薄焊件厚度	点距		
	结构钢	耐热钢及其合金	铝合金
0.5	10	8	15
1.0	12	10	15
1.5	14	12	20
2.0	16	14	25
3.0	20	18	30
4.0	24	22	35

电时间长)或硬规范(电流大、通电时间短)。对冷轧板材，为减轻近缝区软化，宜采用硬规范。

C 的质量分数>0.3%的碳钢和大部分低合金钢，有形成马氏体和裂纹的倾向，通常需采用较软规范或带热处理的规范。

奥氏体不锈钢焊接性良好，宜采用硬规范和较大的电极压力，可施加外部水冷。单相奥氏体钢易产生热裂纹；无钛的铬镍不锈钢还易引起晶间腐蚀。

轻合金焊接性尚好，宜采用特硬规范。对热处理强

化的轻合金还需提高锻压力，以消除裂纹。

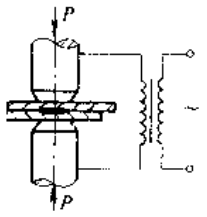
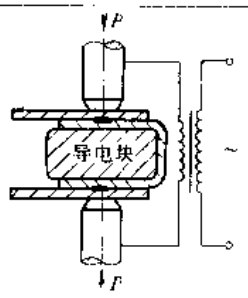
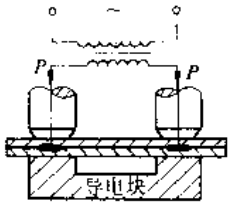
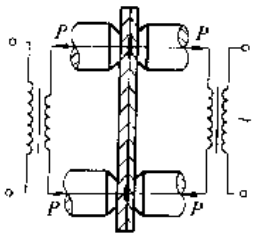
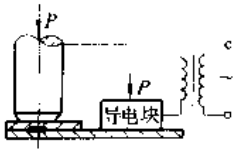
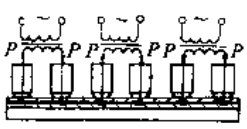
镀锌钢板的焊接性较差。低熔点的锌镀层使熔核在结晶过程中易产生裂纹和气孔，同时会加快电极的粘损。一般需采用较大电流和压力，而且规范范围窄，接头强度波动也较大。

1·2·4 点焊种类、方式及选用（表6·5-5及表6·5-6）

表6·5-5 点焊种类及选用

点焊种类	所需设备			应用范围
	电源组成	控制装置	复杂程度	
工频交流点焊	通过阻焊变压器获得低电压大电流	机械或电磁式	最简单，一般为小型	各种钢材不重要件
		半同步电子离子式	较简单，一般为中、大型	各种钢材一般件
		同步电子离子式	较复杂，一般为中、大型	各种钢材重要件、轻合金一般件
低频交流点焊	通过变频器变换成10Hz以下的低频，再经阻焊变压器供电	同步电子离子式	很复杂，一般为大型	各种钢材和轻合金重要件以及大型磁性件
直流冲击波点焊	先经整流器，再通过阻焊变压器供电，通电时间很短	同步电子离子式	较复杂，一般为大型	轻合金重要件
次级整流点焊	先经阻焊变压器，再经整流器供电	同步电子离子式	较复杂，一般为中、大型	与低频交流点焊类似
电容储能点焊	先经整流器，使电容充电，放电时通过阻焊变压器供电，通电时间极短	机械或电磁式、或电子、离子式	小型很简单，大型较复杂	异种金属、不等厚度、非铁金属、精密件

表6·5-6 点焊方式及选用

点焊方式	示意图	特点和应用	点焊方式	示意图	特点和应用
双面单点焊		采用通用固定式或悬挂式焊机（焊钳），焊接质量高，应优先选用	简单双面双点焊		设备同双面单点焊，一次焊两个焊点
单面双点焊		生产率高，需专用焊机，适用于大型复杂焊件的大量生产	特殊双面双点焊		电源在同一瞬间的极性相反，相当于双面单点焊，但一次焊两个焊点，较单面双点焊分流小，需专用焊机，适用于大型焊件的大量生产
单面单点焊		常用于无法进行双面单点焊场合，设备为点焊枪。手动加压时焊接质量较差，多用于大型焊件定位焊	多点焊		采用多变压器分组加压和分组通电，或单变压器顺次加压和通电。生产率高，需专用焊机，适用于大型焊件的大量生产

能量公司制作 请尊重作者版权

版权所有 重作者 请勿制作 盗版必究

1·2·5　点焊工艺

焊件的表面状态对焊点大小、强度和表面质量以及电极寿命有直接影响。电极与焊件以及焊件与焊件的接触面均需清理。各种钢材可用酸洗、喷砂或机械法。铝合金等非铁金属可用酸洗或机械法，但焊件与焊件的接触面应有一定的接触电阻。不锈钢小件还可用电抛光。

点焊的工艺参数通常应保证熔核直径等于焊件厚度的两倍加3mm，高度等于焊件厚度的35%～70%，焊点表面的压坑深度不超过焊件厚度的10%～20%。对于薄件，熔核的高度可适当降低。

工艺参数一般包括焊接电流、通电时间及次数、电极压力以及电极的形状和尺寸。

焊接电流和通电时间主要决定焊件的加热和熔化。用大电流、短时间时，压坑深度小，热影响区小，焊件变形小，电极磨损慢，电能损耗小，生产率高；但要求焊机电功率大和控制精确，容易产生喷溅，易淬火材料不宜用。

电极压力应保证能顺利通电和消除焊点不应有的疏松或裂纹。稍大的电极压力能使焊点质量稳定，但使焊件电阻变小，从电极导走的热量增加，因而应相应加大焊接电流或通电时间。

通常熔核直径为与电极接触面直径的0.9～1.4倍。焊各种钢材用平头电极，焊轻合金用球面电极。

工频交流点焊1＋1mm焊件厚度的规范见表6·5-7。

表6·5-7　工频交流点焊1＋1mm焊件的工艺参数

焊件类别	焊接电流(A)	通电时间(s)	电极压力(N)	电极端头直径或球面半径(mm)
低碳钢	7000	0.4	850	直径5
结构钢	5000	1.0	800	直径5
不锈钢	5000	0.12	3000	直径5
铝合金	22000	0.16	2000	球面半径75

用硬规范工频交流点焊所需电功率见表6·5-8。

表6·5-8　用硬规范工频交流点焊所需电功率

焊件厚度(mm)	低碳钢	1	1.5	2.5	4	6	8
	铝合金	0.5	0.5	0.6	0.8	1.5	2
所需电功率(kVA)		25	50	75	100	200	400

1·3　凸焊

凸焊是在一焊件的贴合面上预先加工出一个或多个突起点，使其与另一焊件表面相接触并通电加热，然后压塌突起点而形成焊点的电阻焊方法。凸焊过程和点焊类似，但接头可以是一个环，接合处可以是固相连接。

凸焊设备基本上和点焊是一样的，仅电极成平板状以及电功率和焊接压力都比较大，有通用的，也有专用的。

凸焊时，突起点使电流密集，可同时焊多点或一环，焊点可密集，也可焊不等厚件。为保证各点加热均匀，各突起点高度差应小于或等于±0.1mm。各突起点间及突起点到焊件边缘的距离，不应小于突起点直径的两倍。突起点可以是半球形或平头锥体(焊件厚度大于2.5mm时)。

焊接电流约为各点电流总和的2/3，电极压力为各点总和的1.5倍，通电时间则为焊一个点的通电时间。

凸焊比点焊生产率高，常用于低碳钢件的大量生产中。汽车制造厂常用来将螺母焊到平板上，还有汽车轴和轴环、刹车踏片、冰箱压缩机的外壳支架、密封接线座、晶体管外壳的封装等也多用凸焊。

1·4　缝焊

缝焊是焊件装配成搭接接头，压紧在两滚轮电极接合面之间，滚轮电极带动焊件前进并通电，利用电阻热熔化焊件金属，形成一连串焊点的电阻焊方法(图6·5-2)。

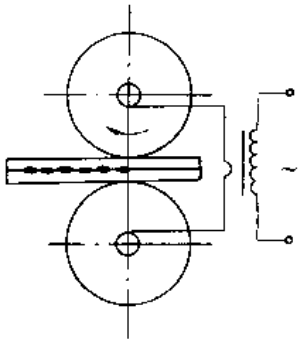


图6·5-2　缝焊示意图

如果一连串焊点相互重叠，可形成连续或密封焊缝。当滚轮电极间歇滚动、电流在滚轮静止时接通，则称步进式缝焊。当搭接边仅为焊件厚度的1.25～2倍、焊后接头成对接形式，则称挤压缝焊。

超星公司制作请尊重作者版权

优缺点基本上和点焊一样，但生产率高得多。适宜用于焊接厚度为 0.2～2mm 焊缝较规则的钢铁和轻合金焊件。要求密封时，焊点间应相互重叠 50%以上。常用于焊接汽车和飞机的油箱、钢制散热器、各种容器，如油桶、油漆罐、食品罐等。

缝焊的接头设计和工艺与点焊类似，仅工艺参数多一个焊接速度，即滚轮电极转动时的线速度以及与此有关的休止时间，以决定各焊点间的中心距。

当焊接镀锌板材时，为消除锌的粘附，对滚轮电极往往在焊接中附带有刮削修整装置。对焊接食品罐，由于板材仅零点几毫米，焊接速度达 10m/min 以上，往往采用和焊件一起送进的铜轮传递压力和电流，此时不需要清理电极。

用工频交流缝焊时，滚轮是连续转动的，因此，压力是逐渐降低的，焊接质量要比点焊略低，特别是连续通电时，质量更差，但设备最简单。当用控制设备使通电断续时，能满足一般钢材的质量要求，为工业上常用的缝焊。也可以配用直流或电容储能电源以及步进缝焊等，应用范围与点焊类似，具体见表 6·5-9。

表 6·5-9 缝焊种类及选用

缝焊种类	所需设备和特点	应 用 范 围
连续通电缝焊	最简单，一般为工频交流电动式焊机	各种钢材薄件或不重要件
断续通电缝焊	较简单，一般为工频交流中、大型气压式焊机，也有电容储能式的	各种钢材重要件，用电容储能电源时，可用于异种金属、不等厚度、非铁金属、精密件
步进式缝焊	较复杂，一般为大型低频或直流冲击波气压式焊机	各种钢材和轻合金重要件以及大型磁性件。直流冲击波缝焊仅用于轻合金重要件
次级整流缝焊	较复杂，一般为中、大型气压式焊机	
挤压缝焊	较简单，一般为工频交流中、大型气压式焊机	要求接头表面平整的场合，如管子以及轧钢生产中材料的接长

逆变式电阻焊电源，频率在 1000Hz 左右，可大大缩小变压器的体积和重量，可组成轻便式焊机，以适应需要移动焊接的场合，如点焊钳和缝焊钳。对缝焊还可进一步提高焊接速度，因为用工频交流，每半周通电加热形成一个焊点，则每秒最多只能焊成 100 个焊点。以焊点间距为 2mm 计，则最快的焊接速度为 12m/min，而用逆变电源，则速度还可提高。

若将电源输出再经整流，就可成为次级整流缝焊。

1·5 对焊

对焊是以整个接触面焊合的电阻焊方法（图6·5-3）。焊接处的断面形状应尽量相同。合理的接头形式见图 6·5-4。实施上可分为电阻对焊和闪光对焊两种。

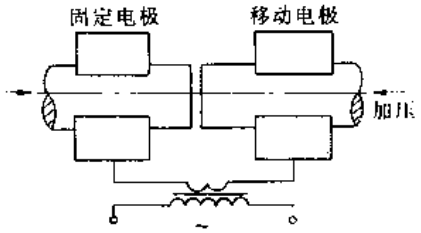


图 6·5-3 对焊示意图

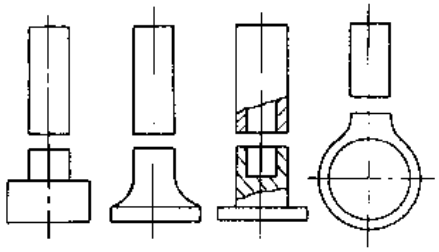


图 6·5-4 几种合理的对焊接头形式

1·5·1 电阻对焊

将焊件装配成对接接头，使其端面紧密接触，利用电阻热加热至塑性状态，然后迅速施加顶锻力完成焊接的电阻焊方法。在同种金属或结晶化学与热物理性质相近的异种金属电阻对焊时，在高温塑性状态下由再结晶组成两焊件的共同晶粒实现焊接。在结晶化学和热物理性质相差甚大的异种金属电阻对焊时，连接是由于接口表面紧密贴合和相互扩散形成的。上述两种情况均为固相连接。

电阻对焊的优点是设备和操作简单，接头外形匀称。缺点是焊前对焊接表面清理要求高，接头质量难以保证。宜用于焊接断面紧凑、直径小于 20mm 的低碳钢棒料和管子，直径小于 8mm 的非铁金属棒料和管子。当采用电容储能电源时，可用于异种金属棒料和管子的焊接，如冰箱管道的铝铜接头。

工频交流电阻对焊所需电功率见表 6·5-10。

超星公司制作请尊重作者版权

表 6·5-10　工频交流电阻对焊所需电功率

焊件状况	低碳钢紧凑断面	低碳钢管子	铜	黄铜	铝
所需电功率 (kVA/mm²)	0.12～0.15	0.2	0.5～1 (t=2～6s)	0.23～0.4 (t=1～2.5s)	0.13～0.23 (t=1～5s)

1·5·2　闪光对焊

焊件装配成对接接头，接通电源，并使其断面逐渐移近至局部接触，在电阻热加热下使端面金属熔化并飞出，形成闪光，直至端部在一定深度范围内达到预定温度时，迅速施加顶锻力完成焊接的电阻焊方法。闪光对焊时，虽产生液体金属，但在闪光和顶锻时与氧化物一起被排出，因此，亦属固相连接。为了获得高质量的接头，必须使闪光过程连续而剧烈地进行，使整个断面获得均匀的加热，顶锻时得到足够而又适当的塑性变形，并排除氧化物。

为了降低所需电功率，可采用电阻法或闪光法预热。优点是焊前不需清理，接头强度高，易获得高质量。缺点是设备或操作较复杂，接头有毛刺，劳动条件差。宜用于焊接各种断面和各种材料的焊件，为工业上常用的对焊方法，如焊接钻头、刀具、钢轨、轮圈、链条、石油钻杆、板材、铜铝过渡接头等。

工频交流闪光对焊所需电功率见表 6·5-11。

表 6·5-11　工频交流闪光对焊所需电功率

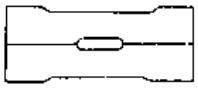
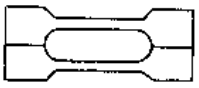
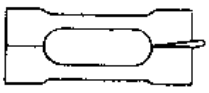
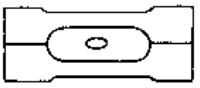
焊件状况	紧凑断面	封闭形紧凑断面	不封闭展开断面	封闭形展开断面
所需电功率 (kVA/mm²)	0.08～0.1	0.12～0.15	0.12～0.15	0.18～0.22

1·6　电阻焊接头的缺陷和检验

电阻焊可能产生的缺陷见表 6·5-12 及表 6·5-13。

为稳定焊接质量，应定期对焊机进行测试，包括回路电阻、电极压力、通电时间、变压器次级电压、缝焊机的焊接速度、对焊机的钳口移动情况等。有条件时尚应测试焊接电流。

表 6·5-12　点、缝、凸焊时可能产生的缺陷及原因

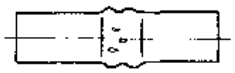
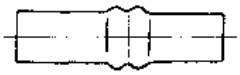
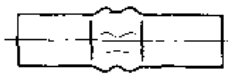
缺陷种类	示意图	可能原因	缺陷种类	示意图	可能原因
未焊透或焊点过小		焊接电流过小(电网电压下降，分流、焊接回路阻抗增大)；通电时间过短；焊件电阻过小(电极工作表面直径增大，电极压力增大)	烧穿或表面烧伤		焊件或电极表面过脏；电极压力太小；加热过快
外部飞溅或局部烧穿		焊件表面清理不良；电极表面过脏；电极压力太小；电流过大或焊接时间过长	压坑过深		热输入量过大；电极压力过大；有内部飞溅
内部飞溅		电极压力小；焊件焊接面脏或装配不良；加热过快	缩孔和气孔		锻压力小或加压过迟；焊件表面过脏
			裂纹		电极压力不足或冷却不良；规范过硬

焊接工艺参数的确定常通过试验件、破坏性试验和性能检验进行。焊接生产中常采用试片或抽样进行破坏性试验的方法监视焊接质量。有可能时尽量应用无损检验。

点、凸、缝焊生产过程中，对一般件，往往先作试片的撕破试验，合格后再焊正式焊件。对重要件，先要作试片的低倍检验，测量熔核的尺寸、压坑深度、检视缺陷情况，合格后再焊正式焊件。焊接 2h 后，要再作低倍检验。对所有制成品，还要抽一定数量进行破坏性检验。有可能通过透视显示熔核质量的焊件，如硬铝，则可用透视代替破坏性检验。

由于采用了微机技术，实现了焊接时的实时监控。虽然监控参数一般仅能间接反映焊接质量，但在一定程度上还是可信的。生产中已获得应用的有监控焊接电流、电极间电压积分值、电阻、输入能量、焊接时焊件的热膨胀等。

表 6·5-13 对焊时可能产生的缺陷及原因

缺陷种类	示意图	可能原因	缺陷种类	示意图	可能原因
错位		焊件未对准或倾斜(焊件未校直或钳口未调整好);焊件过热或伸出长度过大,焊机刚性不够或导轨间隙过大	疏松		加热区过大或顶锻压力过小,使熔化金属未完全排出
			横向裂纹		接头淬火变脆
未焊透		顶锻前接口温度太低;顶锻量过小;顶锻压力和顶锻速度不够;有电顶锻不足;基本金属的非金属类杂物太多	纵向裂纹		过热区过宽;顶锻压力过大
			晶粒粗大		加热时间过长

焊接电流是影响焊接质量的重要因素,监控较复杂,但监控效果较好,可用于各种材料。电极间电压积分值能大致反映输入能量,实现监控较容易,主要适用于低碳钢和不锈钢,有时也可用于铝合金。电阻法依据形成熔核时电阻变化率有明显变化进行监控,实现较复杂,主要适用于低碳钢。输入能量要保持一定,实现起来也较复杂,据经验统计,主要适用于不锈钢。焊件的热膨胀能比较好地反映焊接质量,但要求焊机有良好的机臂刚性和加压随动性,检测尚简单,适用于各种材料。

同时监控 2 个参数能大大提高监控的可靠性。目前已经应用的有焊接电流加电阻,即在焊接过程中使焊接电流恒定,同时监控焊件电阻。

对焊的质量往往可通过透视来检验内部质量,表面质量则可用磁力探伤、超声波探伤、萤光检验等。

1·7 电阻焊用电极材料

电阻焊用电极材料应具有:(1)高的电导性和热导性;(2)高的再结晶温度,即在高温下有高的强度和硬度;(3)高的抗氧化性和耐磨性;(4)和焊件形成合金的倾向小;(5)加工制造容易,价格便宜。

点、缝焊用电极材料要求较高,也易于磨损。生产中应经常保持尺寸一定和表面清洁,一般采用人工修整或定时更换的办法。缝焊用的滚轮电极,往往可以一边施焊一边刮削修整。

凸焊和对焊用电极的电流密度和电极压力均较小,但形状复杂,必须有较高的寿命。一般可用点、缝焊时焊接钢的电极材料。

表 6·5-14 列举了点、缝焊用电极材料。焊接碳钢、不锈钢和耐热钢用的电极材料,多采用铬铝镁青铜。铬锆铜为近年发展的电极材料,已列入部标准。综合性

表 6·5-14 点、缝焊用电极材料

电极材料	成分的质量分数(%)(其余为铜)	电导率(%)(纯铜为 100)	20℃时硬度 HB	再结晶温度(℃)	应用范围
紫铜	杂质<0.01	98	75～100	200	焊接轻合金
镉铜	Cd 0.9～1.2	～90	100～120	250	焊接轻合金和碳钢
铬青铜	Cr 0.6～0.8	～80	110～120	400	焊接碳钢
铬锌青铜	Cr 0.4～0.6 Zn 0.3～0.6	75～80	120～140	430	焊接碳钢
铬铝镁青铜	Cr 0.5～1.0 Al 0.1～0.25 Mg 0.1～0.25	75～80	110～135	510	焊接碳钢、不锈钢和耐热钢

（续）

电极材料	成分的质量分数(%)（其余为铜）	电导率(%)（纯铜为100）	20℃时硬度HB	再结晶温度（℃）	应用范围
铍钴钛铜	Be 0.38～0.41 Co 2.55～2.62 Ti 0.12～0.42	50	250	630	焊接碳钢、不锈钢和耐热钢
铬锆铜	Cr 0.25～0.65 Zr 0.08～0.20	75	160	550	焊接碳钢、不锈钢和耐热钢

合性能指标较好，其使用寿命比铬铝镁青铜高3～4倍，焊接质量也好。

2　摩擦焊

2·1　摩擦焊分类及特点

摩擦焊是把被焊零件的焊接表面相互压紧并使之按一定轨迹相对运动，以焊接表面上生成的摩擦热做为热源的一种压焊方法。生产中广泛应用的是两个零件做相对转动，分为连续驱动摩擦焊及惯性摩擦焊两种基本型式。

1. 连续驱动摩擦焊　过程原理见图6·5-5。

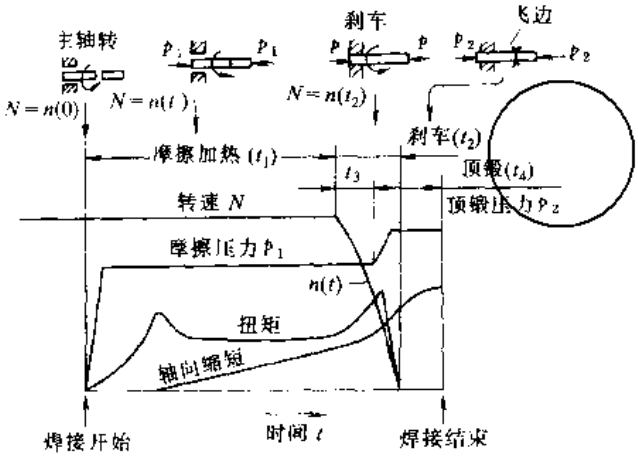


图6·5-5　连续驱动摩擦焊过程示意图

2. 惯性摩擦焊　过程原理见图6·5-6，利用转动飞轮所储存的动能进行焊接。惯性摩擦焊的焊接时间很短，过程中需控制的工艺参数也仅为转速 $n(t)$ 和压力 p。

摩擦焊过程中，焊接区处于高温的金属沿焊缝周围被挤出形成“飞边”。大多数焊件不许带着“飞边”使用，所以焊后要用车削或冲剪方法去除。

为了焊接非圆异形断面的零件，“轨道式摩擦焊”和“直线运动摩擦焊”在生产中也得到了应用。

在现有的焊接方法中从材料的焊接性角度比较，摩擦焊是名列榜首。摩擦焊可以较容易地得到与母材强度相同的接头；焊接质量稳定，焊件焊后的几何尺寸（同轴度和焊件长度）精度高，零件可在加工后进行装配焊接；高效、节能、节材和无污染。特别适于圆形、管形截面工件的对接，在这些领域有逐步取代闪光焊的趋势。

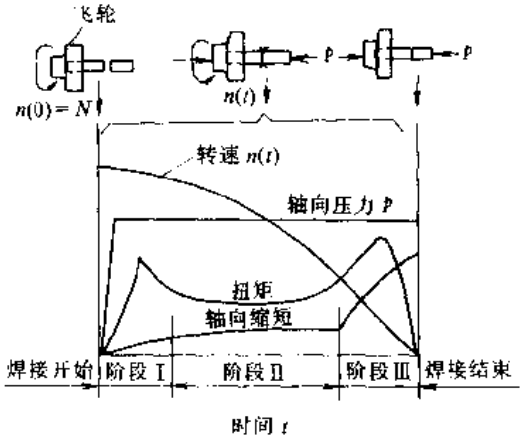


图6·5-6　惯性摩擦焊过程示意图

2·2　摩擦焊机

焊机由主机、液压系统和电控系统三部分组成，全自动焊接还包括自动上、下料装置。

主机是焊接动作的执行者，基本构造如图6·5-7。液压系统提供夹紧和轴向推力。电控系统保证焊接过程的自动循环。

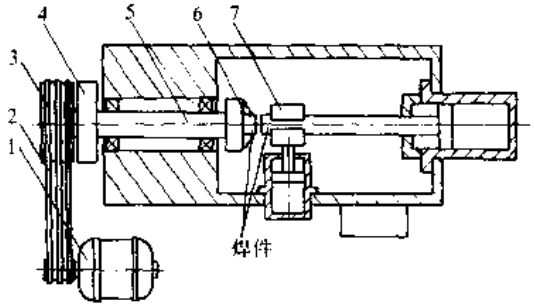


图6·5-7　摩擦焊机示意图

1—电动机　2—传动带　3—带轮　4—转动制动装置
5—主轴　6—转动夹具　7—不转动夹具

版权所有 侵权必究

超星公司制作 请勿重作者版权

钢与钢焊接时焊机主要设计参数：摩擦压力 30～100MPa，顶锻压力 100～200MPa，单位面积的摩擦功率不大于 80W/mm²，焊件外表的线速度 2m/s 左右。

连续驱动摩擦焊机中取消制动装置，则主轴同电机脱离后，焊件由于焊接表面摩擦扭矩的作用逐渐停止相对转动，这就是同时具有连续驱动和惯性摩擦焊特点的混合式摩擦焊。它的刹车时间 t_2 可在较宽的范围内调节。t_2 对改善接头力学性能，特别是韧性有明显作用。

在连续驱动摩擦焊机上增设定相位机构就可焊接被焊两个零件在焊后有固定的相对位置要求的焊件。

最大焊机的轴向推力已达 196 133kN，主轴功率达几千千瓦；最小焊机轴向推力只有数百牛顿，功率只有数十瓦。

2·3 摩擦焊工艺

图 6·5-8 为工业中常用金属的摩擦焊焊接性。

表 6·5-15 列出了一些典型摩擦焊产品所用的焊接工艺参数。

焊接工艺参数主要根据经验和实验来确定，要遵循的一般原则是：淬硬倾向较强的金属需用较弱的焊接规范，淬硬倾向低的金属用较强的焊接规范。

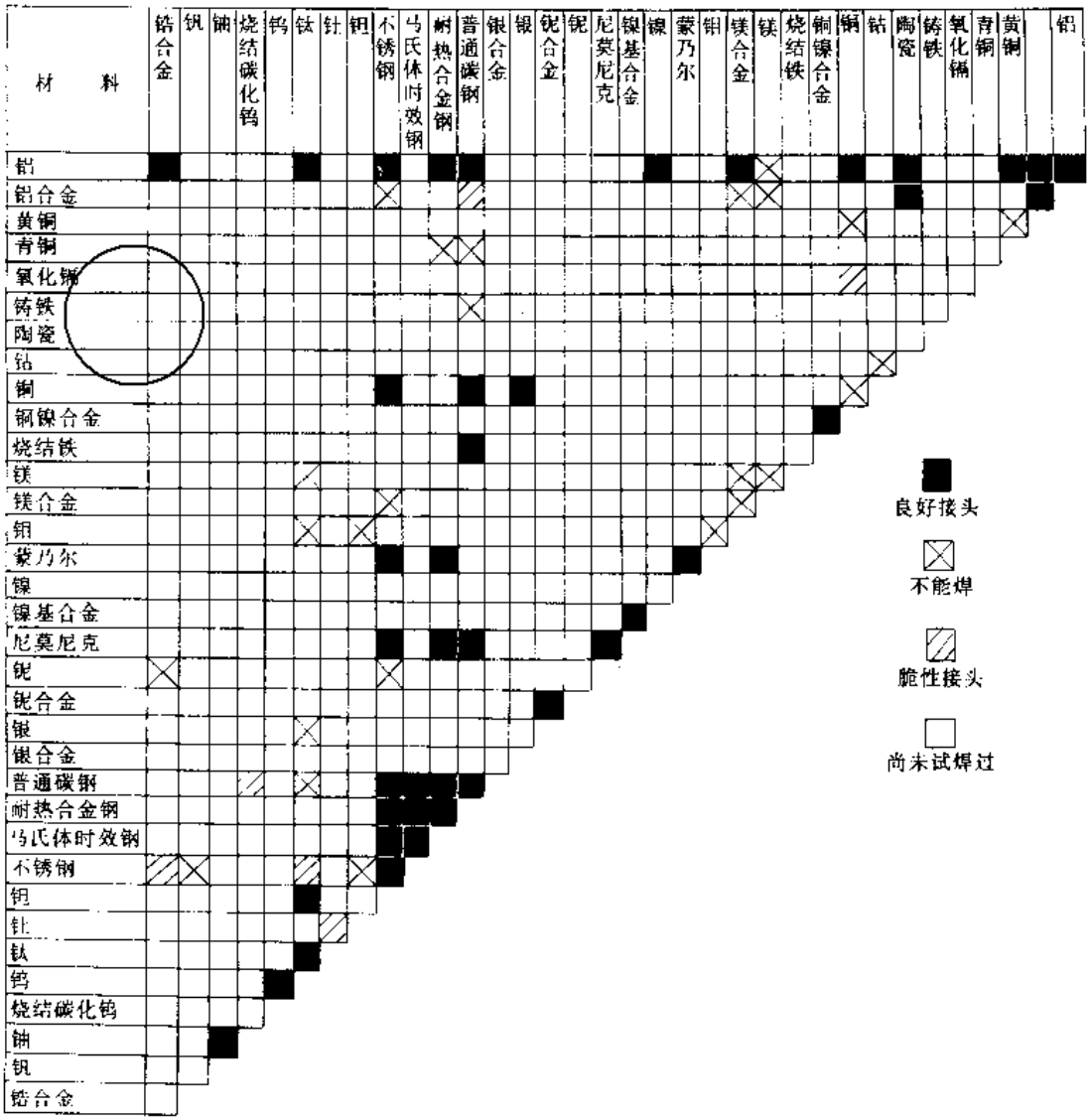


图 6·5-8 各种材料摩擦焊的焊接性

超星公司制作 请勿重作者版权

表 6·5-15　连续驱动摩擦焊工艺参数实例

产品名称	接头尺寸 (mm)	工艺参数				
		转速 (r/min)	摩擦压力 (MPa)	摩擦时间 (s)	顶锻压力 (MPa)	总变形量 (mm)
铝-铜接头	φ40	160	350	6	400	～20
拼头套 (钢＋1Cr13)	φ25	1750	34	40	240	～20
锥柄麻花钻 (W18Cr4V－45钢)	φ26	1700	100	13	200	3～5
石油钻杆 (35CrMo＋45Mn2)	φ140×20	580	70～90	10～15	180	3～6
双金属轴瓦	φ60～80	1450	70	1.2	77	～2
发动机排气阀 (奥氏体钢＋马氏体钢)	φ10	2800	60～100	3～6	240～300	4～8
涡轮增压器转子 (NIMONIC90＋S106)	φ50×14	1200	130	13	220	4.9
发动机预燃室 (镍基合金＋结构钢)	φ56×9	890	130	9	260	4.9
运土机主动齿轮	φ84 元钢＋钢板锥接头	1200	50	9.7	100	13
载重汽车推进轴	φ90×12	1200	70～80	25	100～120	8
汽车轴套	φ110×20	750	15～30	15	95	6
拖拉机支重轮	φ132×12.7	1500	25～50	15	150	7
铝-不锈钢接头	φ26	1000	50	2.8	100	16
青铜-钢接头	φ20	2400	100	3.2	150	

焊接高温强度较大的金属，需要较大的摩擦压力和顶锻压力，用以保证要求的塑性变形。

焊接高热导性、表面易擦伤及冷作硬化或摩擦系数较低的金属（如：铜、铝等），必须用很高的转速提高线能量。

焊接高温强度相差悬殊的异种金属时，为使两种材料变形均匀，可在易变形材料的焊接端套上一个环形模，以增加其抗塑变阻力。

焊接某些能生成脆性金属间化合物的异种金属时，要用适当的焊接参数限制焊接温度。如，铜和铝焊接时，宜用较大的轴向压力和较低的转速，把焊接温度限制在共晶点以下，这就可得到塑性良好的接头。

某些材料焊前热处理状态对焊接性有一定影响，如，铜-铝焊接前应分别退火处理。

某些金属间的焊接可用第三种金属做为中间过渡金属，以改善其焊接性。

2·4　摩擦焊焊后热处理

调质钢摩擦焊接头强度很高，但韧性很低。为了改善接头的综合力学性能，焊后一般都要求热处理（长形工件可做局部热处理）。重要的工件通常进行调质处理（淬火－高温回火）。最新的进展是对接头采用焊接-热处理工艺，即焊后在焊机上对接头立即淬火，然后再高温回火。这种新方法不仅简化热处理工艺，更重要的是可以达到在不降低接头强度的前提下，把接头的韧性提高到母材（调质状态）的水平。

2·5　摩擦焊接头设计

图 6·5-9 为常用的接头形式。图 6·5-10 为锥形接头（可有较高的同心度）。图 6·5-11 为带有"飞边槽"的接头。

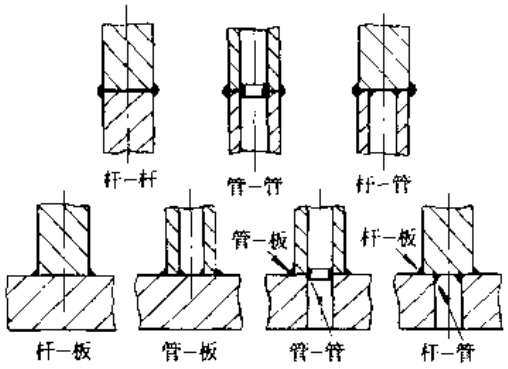


图 6·5-9　常用的接头形式

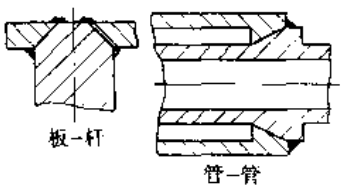


图 6·5-10　锥形接头形式

超星公司制作 请勿重作者版权

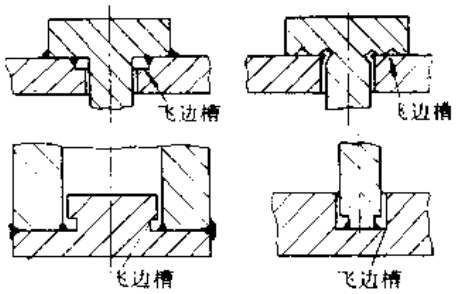


图 6·5-11 接头中的飞边槽

2·6 摩擦焊质量保证系统

2·6·1 焊接毛坯的准备

焊接表面应与轴线垂直，不允许有油污，特别是氧化皮。最好焊接表面经车削后立即焊接。重要焊件毛坯焊前要经探伤。

2·6·2 焊接过程质量监视

利用监视仪在焊接过程中判定焊接工艺参数是否在允许范围内，当某一参数超出时，能给出警告。

2·6·3 焊后检查

重要焊件焊后应逐个经超声波探伤，每班抽出一定数量的焊件做拉伸、弯曲或压扁等破坏性检验。焊后检查也可安排在热处理后进行。

2·7 典型产品

图 6·5-12 是典型的摩擦焊产品。

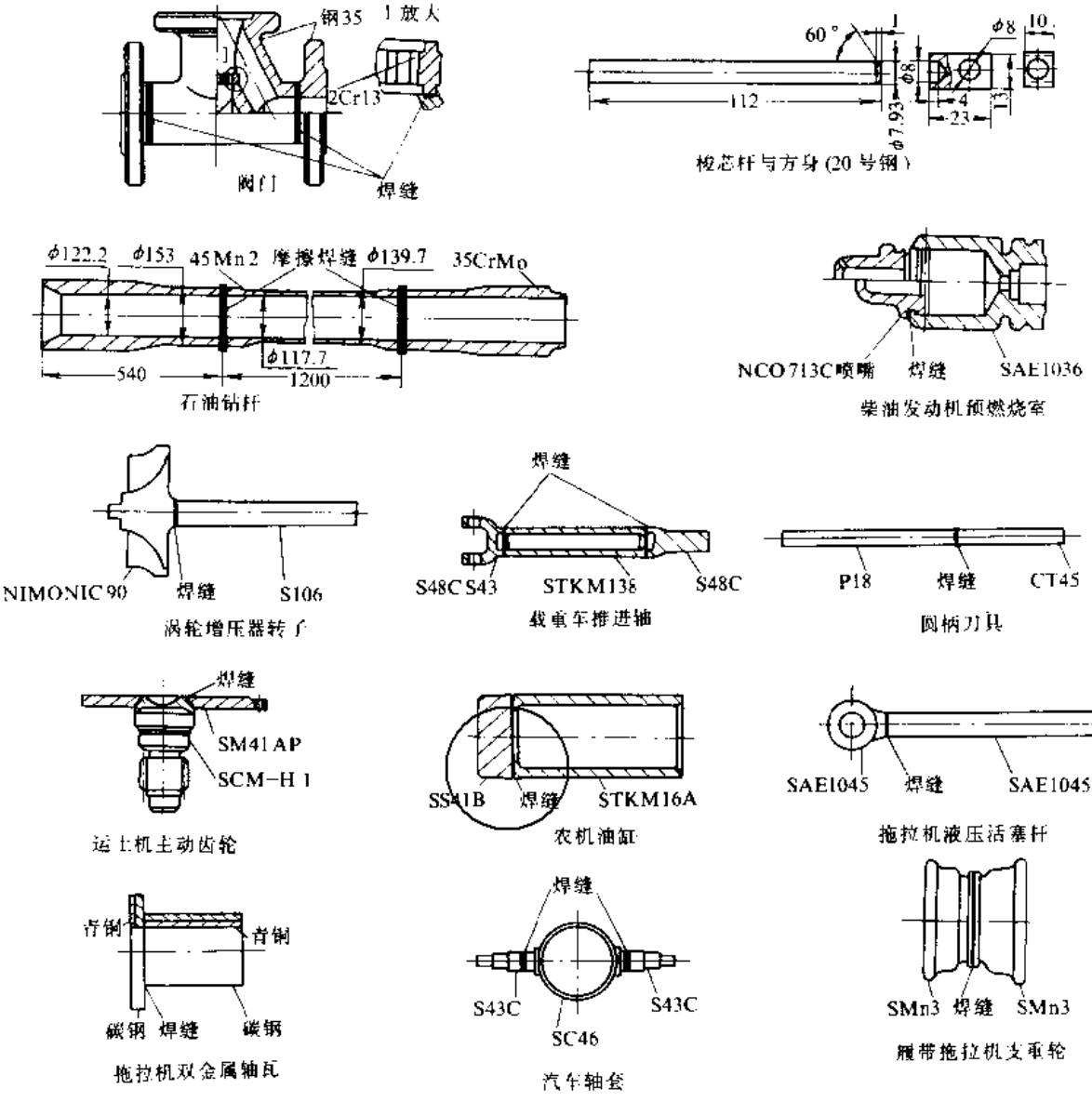


图 6·5-12 摩擦焊典型产品

版权所有 盗版必究 未经许可 不得转载

最初从经济效益出发只把摩擦焊用于中小断面焊件焊接，而今顺气发动机压气机转子这种焊接断面积达数万平方毫米的重要焊件也采用摩擦焊焊接，这是因摩擦焊接头的高质量是其他焊接方法所达不到的。

2·8 塑料焊接(参见本篇第10章)

3 冷压焊[30]~[32]

3·1 冷压焊特点

冷压焊不需外加热源，仅借助于压力使金属产生塑性变形，把结合界面的氧化膜及其他杂质挤出，使纯洁金属接近到原子间距$(4\sim6)\times10^{-8}$cm，形成固态焊接的方法。

接头获得最大强度所需要的最小变形量称为冷压焊的变形程度，是判断材料冷压焊接性的重要参数。所需的变形程度越小，焊接性也越好。

按接头形式冷压焊分对接和搭接两类，对接和搭接示意图分别见图6·5-13和图6·5-14。

对接焊时，为达到所需的塑性变形程度(即总压缩量)，可挤压一至多次。

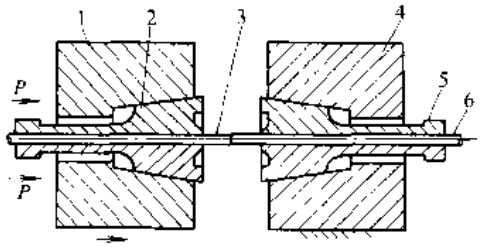


图6·5-13 对接冷压焊示意图

1—动夹具 2—左钳口 3—焊件

4—固定夹具 5—右钳口 6—焊件

搭接分点焊、滚焊、套压焊三种。点焊时预压力 p_1 =20～40MPa，压头以压力 p_2 压入一定深度，完成焊接过程。

焊接塑性较差的金属，可在工件间放置厚度>1mm、塑性好的金属垫片做为过渡材料，接头强度等于变形硬化的垫片强度。

水及油污等有机物是阻碍焊合的主要因素，焊前应清理。

冷压焊的主要特点如下：

(1)接头没有热影响区、软化区，也不产生脆性金属中间相；接头的力学性能和电气、耐蚀性能好。(2)设备简单，易于操作和维护。(3)工艺过程简单，易掌握。(4)焊接质量稳定，不受网路电压波动的影响。(5)劳动卫生条件好。(6)冷压焊局部变形量大，搭接时有压坑；焊接压力比电阻焊大好几倍。焊接大截面焊件时，所需设备吨位较大。爆炸加压的冷压焊机的出现，弥补了设备笨重的缺点。

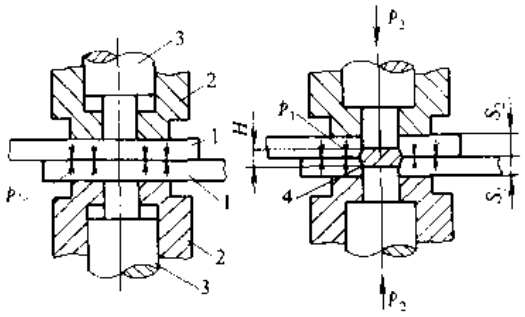


图6·5-14 搭接点焊示意图

1—焊件 2—预压模(预压力 p_1) 3—压头(压力 p_2)

4—焊缝 S_1、S_2—焊件厚度

3·2 冷压焊工艺及模具

3·2·1 焊前清理

采用溶剂清洗、机械加工、烘烧或钢丝刷清理等方法，其中以高速脱脂钢丝轮清理的效果最好。

3·2·2 焊接工艺参数

1. 焊接压力 根据材料种类、状态及选用的工艺方案确定。从铟、铅到钢，焊接压力在200～4500MPa范围内。常用材料的焊接压力见表6·5-16。

表6·5-16 几种金属的焊接压力

(MPa)

材料名称	对接焊	搭接焊
铝与铝	750～1000	1800～2000
铝与铜	1500～2000	>2000
钢与钢	2000～2500	2500
HLJ型铝合金	1500～2000	>2000

2. 变形程度 搭接的变形程度用压缩率 ε 表示：

$$\varepsilon=\frac{2S-H}{2S}\times100\%$$

式中 S——焊件厚度(mm)；

H——压缩后剩余厚度(mm)。

几种材料所需最小压缩率见表6·5-17。对接的变形程度用总压缩量表示，等于焊件的伸出长度(减去压缩剩余长度后)与挤压次数的乘积，见表6·5-18。

纯量公司制作 请尊重作者版权

表 6·5-17 几种金属的最小压缩率(%)

材料名称	压缩率	材料名称	压缩率	材料名称	压缩率
纯铝	60	镉	84	镍	89
工业纯铝	67	铜与铝	84	铁	92
w_{Mg}2%的铝	70	铜与铅	85	锌	92
钛	75	铜	86	银	94
硬铝	80	铝与铁	88	铁与镍	94
铅	84	锡	88	锌合金	95

注：w_{Mg}为含镁量的质量分数。

表 6·5-18 几种材料的最小总压缩量

材料名称	最小总压缩量(单侧)		挤压次数
	圆形断面(直径 d)	矩形断面(厚度 b)	
铝与铝	(1.6～2)d	(1.6～2)b	2
铝与铜	铝(2～3)d	铝(2～3)b	
	铜(3～4)d	铜(3～4)b	3
铜与铜	(3～4)d	(3～4)b	4

3·2·3 模具

1. 对接用的模具(钳口) 钳口各由两个相互对称的半模组成，起到夹紧焊件、传递压力、控制变形等作用。尖型复合钳口具有省力、利于金属流动、能切掉飞边和保护刃口等优点(图 6·5-15)，已普遍应用。

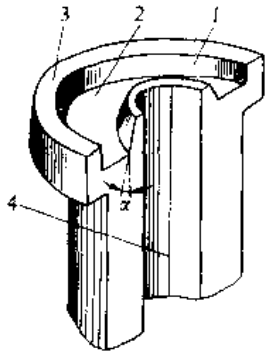


图 6·5-15 尖形复合钳口示意图

1—刃口 2—飞边溢流槽 3—护刃环 4—模膛

α—刃口倒角(不大于 30°)

2. 搭接模具 点焊模具称为压头，有圆柱形与矩形、单点与多点、双面与单面、等厚与不等厚多种形式，见图 6·5-16。滚焊模具称为压轮，通常成对组合，焊接大长度焊缝。

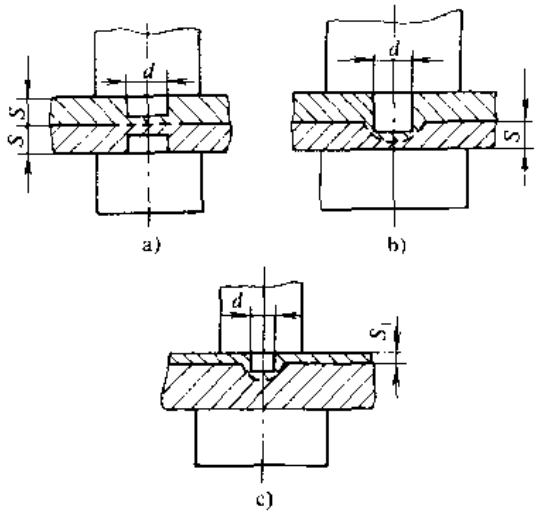


表 6·5-16 冷压点焊形式

a)单点双面变形 b)单点单面变形 c)不等厚单点单面变形

s—焊件厚度 s_1—较薄件厚度 d—压头直径

a. 压头 圆形点直径与工件厚度的关系为 $d=(1\sim1.5)s$ 或 $2s_1$；矩形点压头短边与圆形直径相当，长边为短边的 5～6 倍。厚度相差悬殊的工件应从薄件一边单面点焊。

压头工作长度(压入深度)，等厚件按表 6·5-17 压缩率计算选取。不等厚度件按较薄件考虑。铝与铝压坑深为$(1.5\sim2)s_1$，铝与铜、铜与铜为$(2\sim3)s_1$。

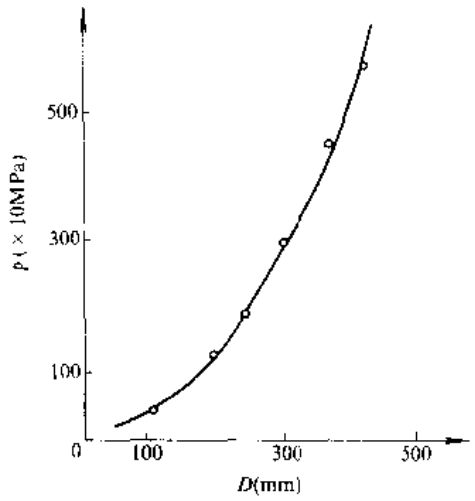


图 6·5-17 焊接壁厚为 0.9mm 铝管时压轮直径与焊接压力的关系

b. 压轮 压轮工作直径 D 对焊接压力的影响甚大(图 6·5-17)，从减小焊接压力考虑，D 应越小越好，但要满足工件自然入机的条件：

$$D\geqslant175\epsilon(s_1+s)$$

式中 ϵ——变形程度(%)；

超星公司制作 请尊重作者版权

s— 工件厚度；

s_1 —不等厚件中薄件的厚度。

压轮的工作凸台宽度 B 应满足下式要求：

$$\frac{H}{2}<B<1.25(s_1+s)$$

式中　H— 焊缝厚度(mm)。

单、双面滚焊见图 6·5-18。

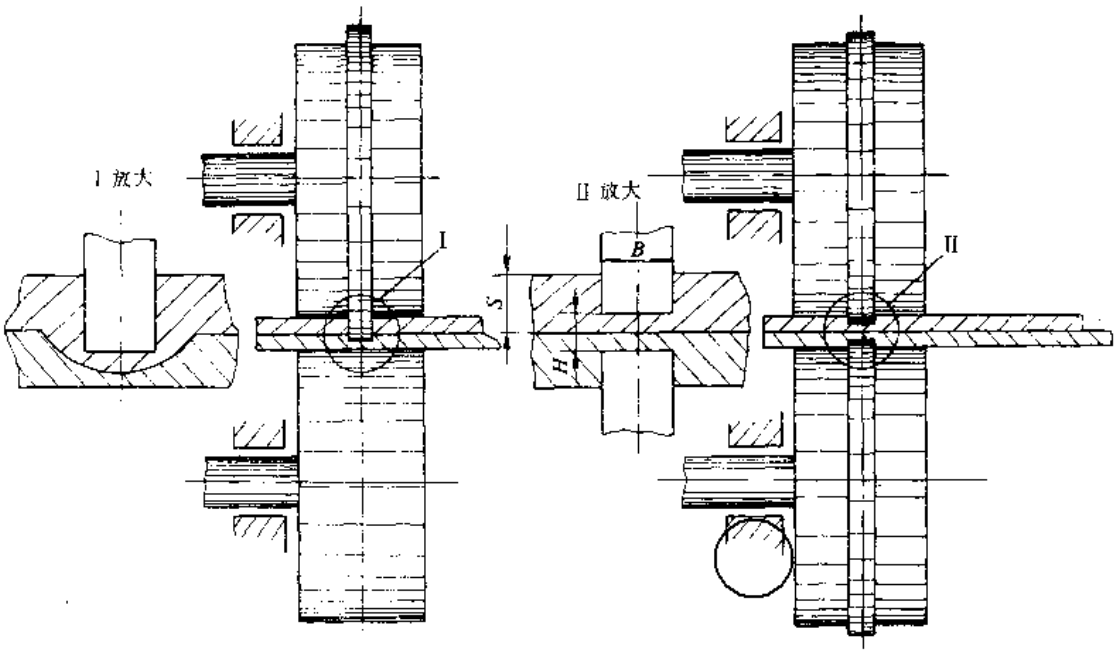


图 6·5-18　冷压滚焊示意图

c. 套压焊模具　套焊模具相当于中空式的压头、分上模和下模，形成封闭的环状焊缝，见图 6·5-19。

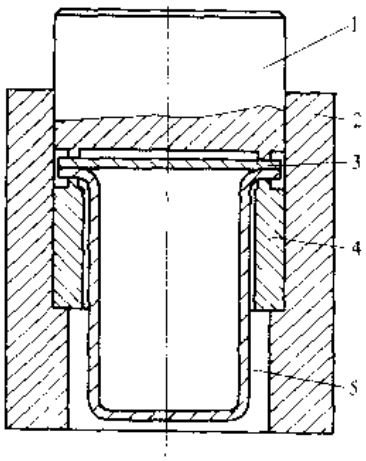


图 6·5-19　冷压套焊示意图

1—上模　2—模座　3—工件封头

4—下模　5—工件帽套

3. 模具材料　各种模具的工作部位应有足够的硬度，控制在 45～55HRC。硬度过高，韧性差，易崩刃；硬度过低，刃口易变形，影响焊接精度。

3·3　冷压焊的应用

冷压焊宜用于以下几个方面：

(1)塑性金属材料。铝的焊接性最好，厚 0.01mm 铝箔不经去膜也能焊成气密性的接头。钛的焊接性仅次于铝。

(2)特别适宜焊接异种金属，包括固相、液相互不相溶的金属；熔点、硬度相差悬殊和产生脆性合金的金属之间的焊接，如铜与铁、镍与各种非铁金属、钛与钢、铝与钢以及非铁金属之间相互配焊，如铝与铜等。

(3)特别适于焊接近缝区不允许升温、软化的焊件，或在施焊中不允许焊接热损伤绝缘的产品，如形变硬化铝合金、铝外导体电缆等。

(4)板材、带材及箔材都可冷压点焊和缝焊，可焊厚度 0.02～20mm。缝焊对容器的密封、器件的封装、大长焊缝的管件生产具有很高的生产率，滚焊焊管的速度可达 1000m/h，成本低，不会出现熔焊常见的气孔、夹渣等缺陷。

棒材、母线、导线、异形型材、管材、带材的对接焊，可焊截面 0.5～1000mm²。

各部门应用冷压焊的实例见表 6·5-19 和图 6·5-20。

超星公司制作 请尊重作者版权

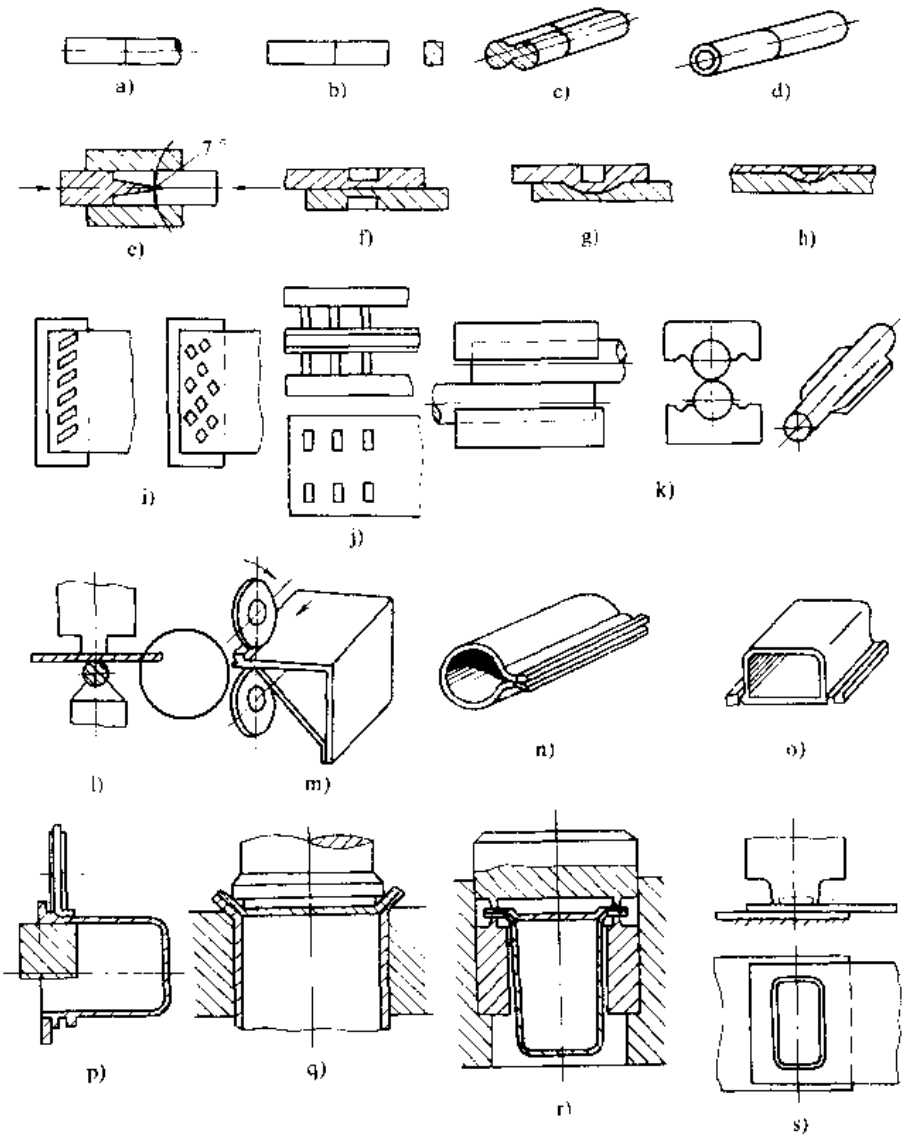


图 6·5-20 冷压焊应用实例

a)圆截面棒料及线材对接 b)矩形断面线材、母线对接 c)电气机车滑接线异型断面对接 d)管件对接 e)铜与钛等金属的楔形对接 f)双面点焊 g)单面点焊 h)厚薄件的单面点焊 i)铝箔的多点点焊 j)铝板两面镶铜 k)棒料或导体的搭接 l)板件与导线搭接 m)三角形构件的双面滚焊 n)滚焊连续制管 o)矩形断面的管件滚焊 p)筒与法兰盘单面滚焊 q)容器封头搭压缝焊 r)环形封头双面套压缝焊 s)单面套压缝焊

表 6·5-19 冷压焊应用的一些实例

（续）

工业部门	应 用 实 例
电子工业	圆形、方形电容器外壳封装；绝缘箱外壳封装；大功率二极管散热器片；电解电容器阳极板与屏蔽引出线
电气工程	铝护套管的连续生产；各种规格铝铜过渡接头；铝合金与铜预制接头；电线电缆厂、电机厂、变压器厂、开关厂铝、铜及铝合金导线的接长及引出线；母线、铝排、铜排、整流片、汇流排；输配电站引出线；架空输电线、通讯电线、电力电缆、通讯电缆、地下电缆的接线和引出线；电缆屏蔽带接地；筒式绕组铝箔引出线；多芯电缆与实心导体；铜镶铝

（续）

工业部门	应　用　实　例
制冷工业	热交换器
汽车制造	小轿车暖气片、汽车水箱、散热器片、脚踏板
交通部门	矿山运输、地下铁路、无轨电车异形截面滑接线对接
日用品工业	铝壶、电热铝茶壶制造、铝容器、铝盆的手把、螺钉支撑等
其他部门	铝管、铜管、铝锰合金管、铝镁合金管、钛管的对接

4　扩散焊

4·1　扩散焊特点

扩散焊分为真空和非真空两大类，非真空扩散焊需用熔剂或气体保护，应用较广和效果最好的是真空扩散焊。

扩散焊是借助温度、压力、时间及真空等条件实现金属键结合，其过程首先是界面局部接触塑性变形，促使氧化膜破碎分解，当达到净面接触时，为原子间的扩散创造了条件。同时界面上的氧化物被熔解吸收，继而再结晶组织生长，晶界移动，有时出现联生晶及金属间化合物，构成牢固一体的焊接接头。

真空扩散焊的特点有：(1)不需填充材料和熔剂(对某些难于互熔的材料有时加中间过渡层)；(2)接头中无重熔的铸态组织，很少改变原材料的物理化学特性；(3)能焊非金属和异种金属材料，可制造多层复合材料；(4)可进行结构复杂的面与面、多点多线、很薄和大厚度结构的焊接，采用局部真空可焊工件尺寸几乎不受限制；(5)焊件只有界面微观变形，残余应力小，焊后不必加工、整形和清理，是精密件理想的焊接方法；焊接接头质量通常是稳定的，不出现裂纹、气孔等缺陷；(6)扩散焊容易实现过程的程序化，劳动条件非常好，与其他焊接方法相比具有突出的无害性；(7)扩散焊表面制备要求高，焊接和辅助装配时间长，大型工件又受到真空室的限制，在一定程度上影响了真空扩散焊的扩大应用。

图6·5-21为典型的扩散焊接头类型。

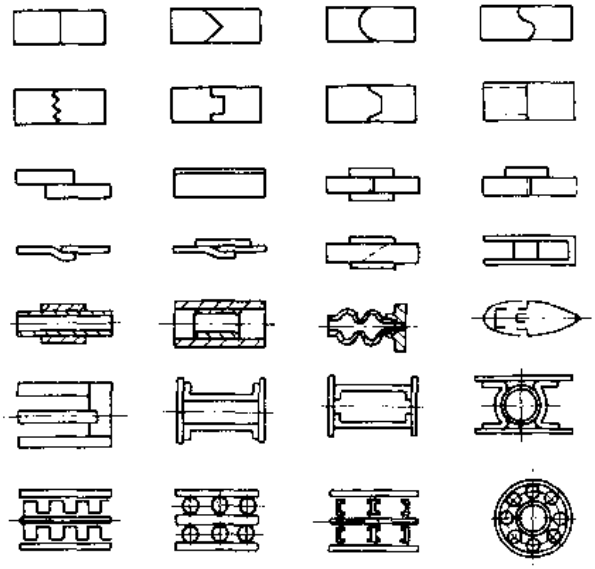


图6·5-21　典型的扩散焊接头

4·2　扩散焊设备

真空扩散焊设备常用低真空、高真空。超高真空只在个别情况下应用。图6·5-22为感应加热式的真空扩散焊机构造原理。

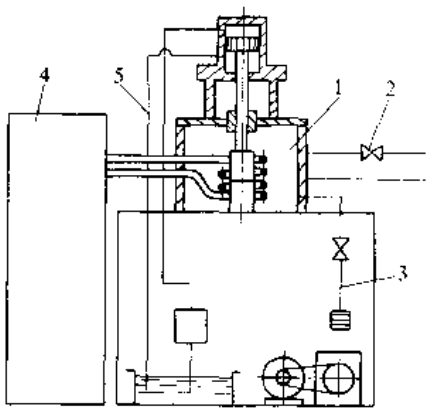


图6·5-22　扩散焊机构造原理图

1—真空室　2—水冷系统　3—真空系统

4—高频感应加热系统

5—液压系统

先进的扩散焊机应具备下述功能：(1)真空充气两用，能低真空也能高真空，真空室带照明及风冷装置；(2)各种焊接参数能监控和自动记录；(3)对工件表面有净化措施(超声波振荡摩擦或氩离子轰击等)；(4)加

压灵敏、稳定，大面积压力均匀；(5)采用节能热源，多工作室连续作业。

4·3 扩散焊工艺

真空扩散焊工艺及其参数的影响：

(1)焊件表面一定要光洁，其平面度在1.6μm以下。必须清除氧化膜及油污。

(2)压力是净面接触实现原子扩散的必要条件，压力大小取决于材料的屈服极限和蠕变强度。界面产生微量变形是获得牢固接头的重要保证。

(3)温度是促进原子扩散的活跃因素，按材料的熔点及再结晶温度来选定。一般常用0.5～0.8熔点温度。利用材料的相变温度脉动加热，有利于加速扩散过程。

(4)真空对材料表面有净化作用，同时对材料的蒸汽压温度有强烈的影响。

(5)时间要与其他几个参数相匹配，时间太长要防止出现脆性金属间化合物。

真空扩散焊工艺过程见图6·5-23。

对于不互熔的难焊材料，常采用填加中间过渡金属或采用过渡液相焊接法(TLP法)，填料熔化后全部扩散到基体金属内部，这是区别于钎焊的主要特征。表6·5-20列出了常用材料的扩散焊规范。

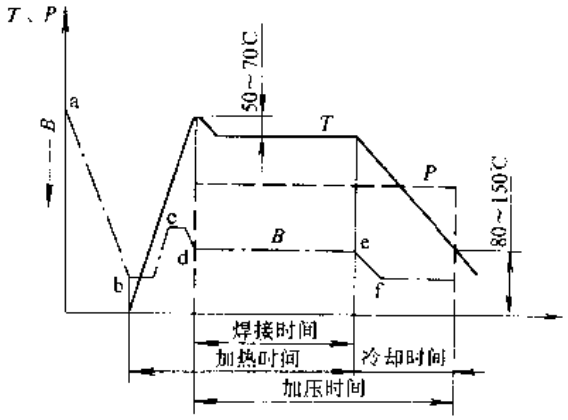


图6·5-23 真空扩散焊工艺流程

T—温度 *P*—压力 *B*—真空度

表6·5-20 真空扩散焊规范

被焊材料	中间层材料	温度(℃)	压力(MPa)	时间(min)	真空度(Pa)
Al+Al	Si	580	10	1	1.333×10^{-3}
LF_5+LF_5	无	500	15	10	1.333×10^{-3}
L_4+TV_1	无	400	8	20	1.333×10^{-1}
Al+Ni	无	500	10	30	1.333×10^{-3}
LF_6+不锈钢	无	550	14	15	1.333×10^{-2}
Cu+Cu	无	850	5	5	1.333×10^{-3}
Cu+Mo	无	850	20	10	1.333×10^{-2}
Cu+Ti	无	860	5	15	1.333×10^{-3}
Mo+Mo	无	1100	160～400	5	1.333×10^{-2}
Mo+Mo	Ti	915	70	20	1.333×10^{-2}
Mo+Mo	Ta	915	67	20	1.333×10^{-2}
TA_6+TA_6	无	900	2	60	1.333×10^{-1}
Nb+Nb	无	1200	70～100	180	1.333×10^{-4}
Nb+Nb	In	985	1	60	1.333×10^{-1}
W+W	Nb	927	70	20	1.333×10^{-2}
Ni+Ni	无	1580	62	45	1.333×10^{-2}
Ta+Ta	Ti	870	70	10	1.333×10^{-2}
Zr_2+Zr_{-2}	Cu	1040	0.21	90	1.333×10^{-3}

超星公司制作 请尊重作者版权

（续）

被焊材料	中间层材料	温度（℃）	压力（MPa）	时间（min）	真空度（Pa）
2Cr13+2Cr13	无	950	15	10	1.333×10^{-1}
GH3039+GH3039	无	1165	25	6	1.333×10^{-2}
W18Cr4V+W18Cr4V	无	1100	10	5	1.333×10^{-1}
硬质合金+钢	无	1100	10	6	1.333×10^{-2}
可伐+可伐	无	1100	20	25	1.333×10^{-3}
可伐+青铜	无	950	7	10	1.333×10^{-3}
可伐+99陶瓷	无	1000	25	20	$6\times1.333\times10^{-4}$

4·4 扩散焊的应用

扩散焊的应用已走向工业化生产，尤其是异种材料以及金属和非金属材料的焊接更显示出无比的优越性，同时也展示了应用领域的广泛性。实现了560多组异种材料的焊接。采用局部真空措施焊成的巨型工件长达50m，重75t[33]；有用533个零件焊成的一个巨大的轰炸机部件[34]。在宇宙飞船构件的制造中，焊接了发动机的喷管、蜂窝壁板；飞机制造中的反推力装置、蒙皮、起落架、钛合金空心叶片、轮盘、浆毂；在化工设备制造中，焊成了高3m、直径1.8m的部件；在原子能设备制造中，制成水冷反应堆燃料元件；在冶金工业中生产了复合板；在机械制造中应用更加广泛。利用钛合金超塑性的成形扩散焊已得到了成功的应用。

应用实例：

(1)可伐合金和氧化铝质量分数为99%的陶瓷焊成的电真空器件，扩散结合强度已超过了陶瓷本身强度。

(2)大功率激光喷嘴扩散焊，这是要求精度很高的密排结构，可保证小缝隙均匀。

(3)泵轮，材料是镍基高温合金，比精铸节约大量材料及工时。

(4)W4Cr4V2高速钢钻头和45钢钻杆的扩散焊，采用熔剂保护。接头焊后经过扩散热处理后发现了碳的上坡扩散现象。

(5)45铸钢的扩散焊，在界面上出现不连续的铁素体。

5 高频焊

5·1 高频焊特点

高频焊是一种利用高频电流通过工件接合面产生的电流热并加一定的压力达到连接的焊接方法。高频焊是利用高频电流的两大特性，即趋肤效应和邻近效应。趋肤效应是高频电流倾向于在金属导体表面流动。电流的透入深度 Δ 与电流频率 f、材料的电阻率 ρ 及磁导率 μ_r 有关，其关系式是：

$$\Delta=5030\sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}\quad(\text{cm})$$

可见，随着频率的增加，电流透入深度减少。

邻近效应是通交流电的导体附近若有反向电流导体，则两导体内侧交链的磁力线最少，导体的感抗也就最小，使电流集中于内侧表面；两导体越靠近，则其相对内侧表面上的电流密度越大。这样可以利用感应器式反向电路控制加热器。同时，与工频电流相比，高频电流可在较低的电流和较高的电压下获得高的表面加热速度。

高频焊的基本特点是热量高度集中，可在很短的时间内将接缝边缘加热至焊接温度，生产效率很高，热影响区相当小，工件变形十分小，不需任何填充材料，耗能少，生产成本低，适于连续高速生产。

5·2 高频焊设备

5·2·1 电源

10000Hz以上的连续高频焊电源通常只采用真空管振荡器，它主要由下列三部分组成：(1)水银真空管，用来将一次输入电压转变成振荡回路所需的直流电压；(2)整流器组，大多采用晶闸管；(3)振荡回路的输出电路，包括感应圈。这种高频电流发生器的输出功率范围为1～600kW。

对于3000～10 000Hz频率范围的高频电源一般是电机驱动的高频发电机或半导体逆变器。

5·2·2 匹配器

真空管高频振荡器本身具有较高的输出阻抗，其

超星公司制作请尊重作者版权

负载亦应是高阻抗的。但感应圈和接触子均系低阻抗负载，为提高能量的传递效率，必须加接阻抗匹配器。这种匹配器大多是一个变压器，直接与高频发生器输出端相接。

5·2·3 接触子

接触子是高频电阻焊时向工件传导高频电流的部件。高频接触子，无论是固定的，还是滑动的，所使用的材料通常是铜银合金。因接触子需承受相当高的电流，故在大多数情况下需对接触子及其支架增设水冷装置。接触子加在待焊部件上的压力一般是很小的。对于连续焊挤压压力范围为 20～200N，而对于断续焊顶锻压力为 20～400N。

5·2·4 感应圈

感应圈是使高频交流电产生感应加热所需的交变磁场的部件。感应圈可采用铜管、铜棒或铜片弯制而成。为提高感应加热效率，在感应圈中可附加磁性体。图 6·5-24 为焊管用感应圈结构。

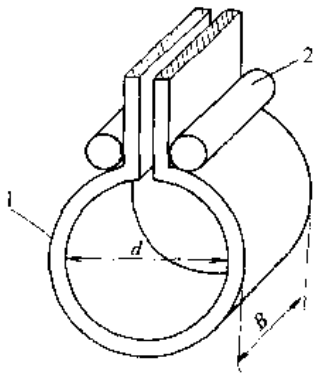


图 6·5-24 焊管感应器

1—感应器 2—铁氧体磁棒

5·2·5 阻抗器

管子的高频电阻焊或高频感应焊，在管子内表面会产生耗散电流。这种电流对接合面的加热不作贡献。为减小管子内壁的耗散电流，往往在管子内焊接区段放置磁铁棒，即阻抗器。这样可有效地利用焊接能量，在给定的输入功率下可相应提高焊接速度。

5·2·6 输入电压调节器

因高频焊装置是一种大生产系统，当焊接速度为 100m/min 时，将金属从室温加热到焊接温度的时间仅为百分之几或千分之几秒。这样高频电源的自动和连续可调是十分重要的。

5·3 典型工艺

5·3·1 连续高频电阻焊

图 6·5-25 为连续高频电阻焊过程原理图。连续高频电阻焊通常以滑动接触子向工件传导 300 000Hz 以上高频电流来完成的。待连接部件通过预成形装置挤压成 4°～7°V 形接缝，高频电流沿 V 形通道从一个接触子流向另一个接触子。高频电流通过接缝边缘表层产生电阻热。调整好焊接速度和焊接功率，可使接缝焊接区在极短的时间内达到焊接温度，随即加一定的顶锻压力而形成焊缝。熔化金属和氧化物在顶锻过程被向外挤出形成外毛刺。在连续生产中，通常采用专用刀具将毛刺加工掉，而留下光滑的焊缝表面。

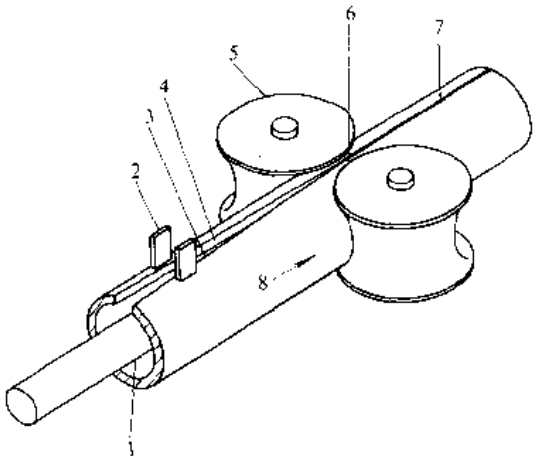


图 6·5-25 连续高频电阻焊过程原理图

1—阻抗器 2—接触子 3—V 形接口 4—电流通道 5—轧辊 6—焊点 7—焊缝

连续高频电阻焊的另一种方式是利用较低频率(10 000Hz)的电流、较大的透入深度和邻近效应，从而产生接合面表层高速集中加热，随即将接合面挤压在一起形成连续的焊缝。这种方法亦称高频穿透电流焊接法。

5·3·2 断续高频电阻焊

断续高频电阻焊原理如图 6·5-26。这种焊接法可以将一定长度的焊件，通过高频电流同时加热到焊接温度，并加必要的顶锻压力，而形成完整的焊缝。焊接时将焊件平放在金属平台上，并在接缝上安置高频邻近感应器，使高频电流集中于接合面流通，选择适当的电流频率使电流的透入深度能将整个接头热透。以 250mm 宽、1.6mm 厚的带钢对接为例，焊接时间仅为

超星公司制作 请尊重作者版权

0.75s。

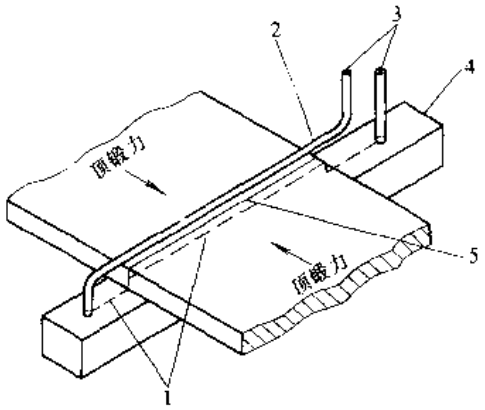


图 6·5-26 断续高频电阻焊原理图

1—电流通道 2—邻近感应器 3—接高频电源 4—平台 5—对接缝

5·3·3 连续高频感应焊

连续高频感应焊只适用于能形成闭环回路的工件，以使感应电流能沿接缝环流，如图 6·5-27 所示的管子纵缝高频感应对接焊。与管子纵缝高频电阻焊相似，管坯经预成形并挤压成 4°～7°V 形接口，感应圈安置在管子的外围 V 形接口张开端。感应圈内的高频电流在管子背面和 V 形接缝区内感应出环向电流。将焊接功率和焊接速度作适当的调整，即可在相当短的时间内将接合面加热到所要求的焊接温度。随即挤压滚轮将接缝压拢而形成焊缝。这种高频感应焊接技术很适宜于深层金属的连接。其焊接速度范围为 15～300m/min。

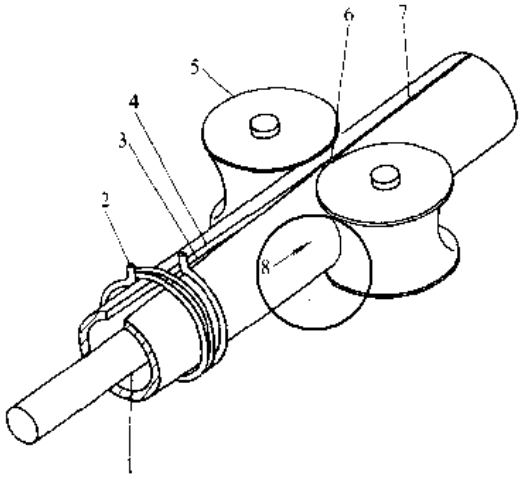


图 6·5 27 连续高频感应焊原理图

1—阻抗器 2—感应器 3—V 形接口 4—电流通道 5—轧辊 6—焊接点 7—焊缝

5·3·4 环形部件的高频感应焊

单一的分离部件如能提供闭合的回路而感应环向高频电流，如管子端部的环向对接，则可完成高频感应焊接，如图 6·5-28。

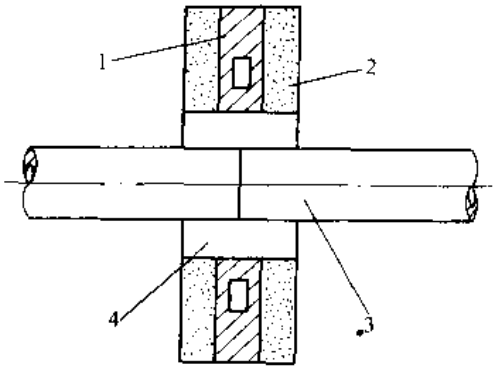


图 6·5-28 锅炉管高频对焊示意图

1—感应圈 2—导磁环 3—待加热的管子 4—间隙

5·4 高频焊的应用

5·4·1 管子纵缝高频对接焊

连续高频焊的一个重要应用领域是管子纵缝高频对接焊，采用这种方法制造的管子在世界钢管产量中已占有很大的比重。连续高频焊不仅已大批量焊接了自行车管、水煤气管、变压器散热管等，而且也成功地焊接了优质高压锅炉管。

管子纵缝既可采用高频电阻焊，亦可采用高频感应焊焊接。

高频电阻焊可用于直径 1200mm 以下、壁厚 15mm 以下所有规格管子的焊接，而高频感应焊通常用于直径＜220mm、壁厚＜11mm 的各种规格管子的焊接。

高频电阻焊时，接触子与加压辊轮中心线的距离为 20～150mm，焊铝管时一般选用下限，焊碳钢管时可选上限。接触子间的电压为 50～200V，焊接电流范围为 1000～3000A，焊接速度可达 60～300m/min。

高频感应焊时，感应圈至焊点的距离一般取 30～150mm。为加强电磁感应，增大管坯内壁的电抗，减少分流损耗，管内常要放铁氧体磁芯。感应圈内径 d 与宽度之比为 1～1.5 时可获得最高的加热效率。

高频焊管机的适用范围列于表 6·5-21。

超星公司制作 请勿重作者版权

表 6·5-21 高频焊机的适用范围(mm)

可焊管径范围	可焊壁厚范围
9～32	0.6～2.5
20～64	1.0～3.5
17～76	1.5～4.5
48～114	1.5～5.0
114～219	3.0～7.0

高频焊管机的额定功率有 100,200,400kW 三档。

5·4·2 螺旋翅片管的高频焊

在锅炉受热面部件中,为提高热效率,往往采用螺旋翅片管和纵向侧面鳍片管。螺旋翅片和纵向侧面鳍片均可采用高频电阻焊方法焊到光面的直管外壁。图 6·5-29 和图 6·5-30 为螺旋翅片和纵向鳍片高频电阻焊过程。0.3～0.5mm 厚的薄翅片可在焊接之前轧制成各种形状,也可在成形的同时连续进行焊接。纵向鳍片的厚度一般在 6mm 以下。为防止管子变形,应同时在管子的两侧焊接两条鳍片。

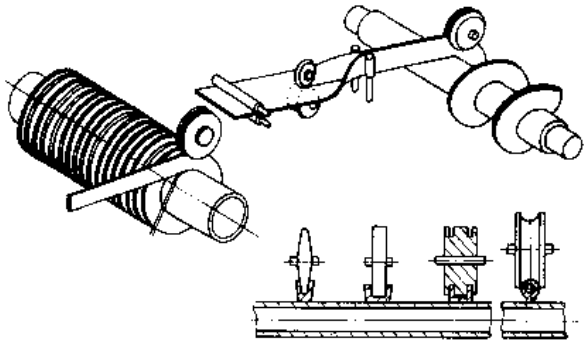


图 6·5-29 螺旋翅片高频电阻焊示意图

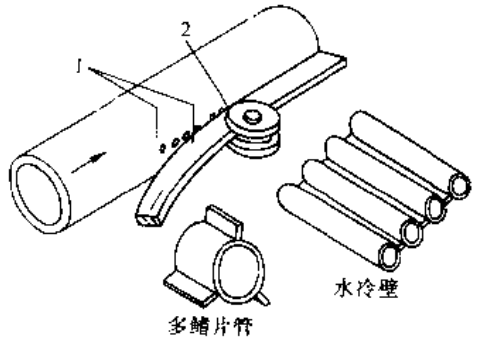


图 6·5-30 纵向鳍片高频焊示意图

1—电极 2—压力辊

5·4·3 型钢的高频电阻焊

高频电阻焊也可用于结构型钢的生产,例如 I 形和 H 形梁焊接过程如图 6·5-31。I 和 H 型钢焊接时,可从卷钢筒中同时抽出三根钢带,用两台高频电阻焊机同时焊接两个 T 字形接头。焊接速度视焊件厚度可在 8～60m/min 范围内。最大可焊规格已达 510mm,腹板最大厚度为 10mm。型钢高频焊机的最大功率为 280kW。这种焊接方法的优点是可制造无法轧制的结构型钢和异种金属组合的型钢,如翼板为高强钢、腹板为低碳钢或翼板为不锈钢的型钢。

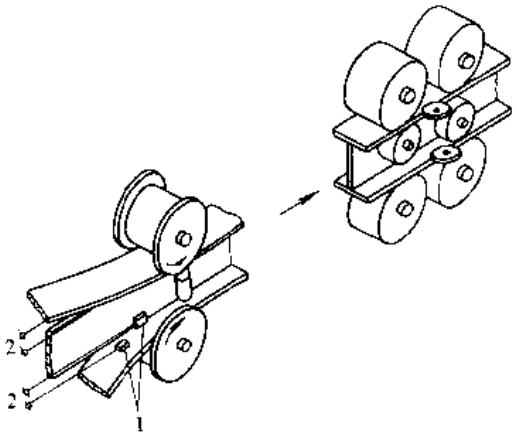


图 6·5-31 I 或 H 型钢的高频焊(两腿同时焊)

1—焊接电极 2—接高频焊机(每边一台)

6 爆炸焊[35]～[37]

爆炸焊是利用炸药爆轰能量,驱动焊件做高速倾斜碰撞,使其界面实现冶金结合的特种焊方法。界面没有或仅有少量熔化,无热影响区,属固相焊接。适用于广泛的材料组合,有良好的焊接性和力学性能。在工程上主要用于制造金属复合材料和异种金属的连接。

6·1 爆炸焊原理

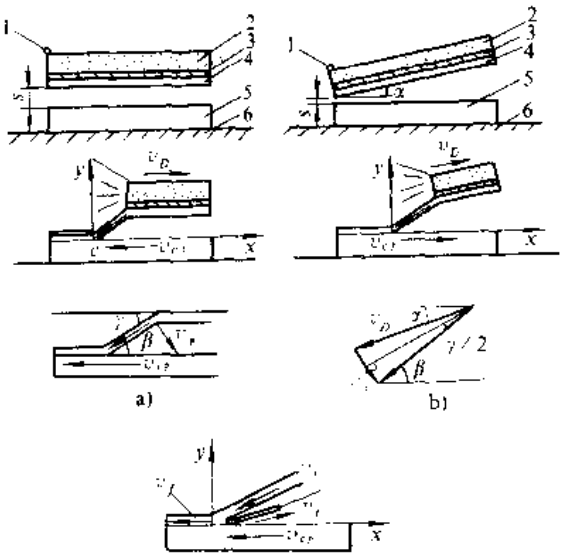
爆炸焊的典型装置和金属流动过程见图 6·5-32。

爆炸焊装置包括炸药-金属系统和金属-金属系统。按初始安装方式的不同,它可分为平行法和角度法。复材和基材之间设置间距,基材放在质量很大的垫板或沙、土基础上,炸药平铺在复材上并用缓冲层隔离,以防损伤复材表面。选择合适起爆点放置雷管,用起爆器点火。

炸药爆轰驱动复材作高速运动,并以适当的碰撞角和碰撞速度与基材发生倾斜碰撞,在界面产生金属

版权所有 侵权必究 请尊重作者版权

射流，称之为再入射流。它有清除表面污染的"自清理"作用。在高压下纯净的金属表面产生剧烈的塑性流动，从而实现金属界面牢固的冶金结合。因此，形成再入射流是爆炸焊的主要机理。



a)

b)

图 6·5-32 爆炸焊典型装置及金属流动图

a)平行法 b)角度法

1 雷管 2—炸药 3—缓冲层 4—复材 5—基材 6—基础 v_D—炸药爆速 v_p—复材碰撞速度 v_{cp}—碰撞点运动速度 v_f—来流速度 α—安装角 γ—弯折角 β—碰撞角 s—间距

6·2 爆炸焊工艺参数

爆炸焊初始参数包括单位面积药量和间距，前者表征输入焊接界面的能量，后者提供了复材加速的空间和便于排除再入射流的条件。爆炸焊是一个动态过程，v_p、γ、β 和 v_{cp} 是该过程的动态参数。由图 6·5-32 速度矢量关系，可得到如下关系式：

$$v_p = 2v_D \sin\frac{\gamma}{2}$$

$$v_{cp} = v_D \sin\gamma / \sin\beta$$

$$v_f = 2v_D \sin\frac{\gamma}{2}\cos\left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right)/\sin\beta$$

$$\beta = \alpha + \gamma$$

当 $\alpha=0$ 时，$\beta=\gamma$ $v_D=v_{cp}=v_f$，即平行法时：

$$v_p = v_D \sin\beta$$

$$\beta = \sin^{-1}\frac{v_p}{v_{cp}}$$

根据炸药一维爆轰对金属板的抛掷作用，对颗粒状硝铵炸药可采用 Deribas 公式计算 v_p 的最大值 v_{pm}：

$$v_{pm} = 1.2v_D\left[\frac{\left(1+\frac{32}{27}R\right)^{\frac{1}{2}}-1}{\left(1+\frac{32}{27}R\right)^{\frac{1}{2}}+1}\right]$$

对于二维爆轰，可采用 Gurney 方程的近似解：

$$v_{pm} = \phi\sqrt{2E}\left(\frac{3}{1+5/R+4/R^2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

式中 R——质量比，$R=\dfrac{\text{单位面积炸药质量}}{\text{单位面积复材质量}}$；

E——Gurney 能(m/s)；

ϕ——修正系数，$\phi=0.70\sim0.83$。

焊接界面的碰撞压力 p 与材料密度 ρ、声速 c 和碰撞速度 v_p 有关，一般可采用由垂直碰撞得到的压力关系式近似估算最小 v_p 时的压力值：

$$p = \frac{c_1\rho_1 v_p}{1+c_1\rho_1/c_2\rho_2}$$

上述动态参数，除压力 p 外，也可通过电测和光测试验技术进行测量，然后利用上述关系式进行计算。

6·3 焊接条件的选择

6·3·1 确定焊接参数的一般原则

1. 选用低爆速炸药 形成再入射流是实现爆炸焊接的关键，为此，v_D 或 v_{cp} 要小于材料声速。金属板中声音传播的速度 c 是由相应的弹性模量和材料密度比值的平方根给出的。一般 v_D 应为基、复材声速较低值的 $\frac{1}{2}\sim\frac{2}{3}$，有关材料的声速值见表 6·5-22。

表 6·5-22 有关材料的声速 (m/s)

材料	铁	钢	铜	铝	银	镁	镍
声速	4800	5100	3970	5370	2600	4493	4667
材料	钼	钛	锆	铌	铅	不锈钢	锌
声速	5173	4780	3771	4500	2000～2300	4550	3100

2. 碰撞点压力要足够大 一般要求 p 值为基、复材静屈服强度较大值的 10～12 倍，相应要求有足够大的 v_p 值，以保证产生射流。

3. 合适的动态碰撞角范围 一般为 5°～25°，超出此范围，无论 v_p 为何值时都不能实现良好的焊接。不同的金属组合有其合适的碰撞角范围，可通过试验和计算确定。

6·3·2 焊接参数的极限条件

根据对碰撞区金属性质的流体动力学分析，爆炸焊要求的最小 v_p 和 β 值的表达式为

$$v_{p\min}=\left(\frac{\sigma_b}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\beta_{\min}\geqslant K\left(\frac{HV}{\rho v_{cp}^2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

式中 σ_b——材料的极限抗拉强度(MPa)；

ρ 材料密度(kg/m³)；

HV 材料的维氏硬度(N/m²)；

K 系数，$K=0.6\sim1.2$。

临界碰撞点速度 v_T 表征了焊接界面有无波形的极限条件，当 $v_{cp}<v_T$ 时，界面无波，呈平直状；当 $v_{cp}>v_T$ 时，焊接界面呈波状。v_T 的表达式为

$$v_T=\left[\frac{2Re(H_1+H_2)}{\rho_1+\rho_2}\right]^{\frac{1}{2}}$$

式中 Re 为适用于流动过程的雷诺数，H 和 ρ 分别为材料的维氏硬度和密度，下角标 1、2 分别代表复材和基材。

v_{cp}的上限值为材料声速的 1.2～1.5 倍，v_p 的上限值是根据控制界面熔化量，保证界面结合性能，由材料的热力学特性给出的：

$$v_{p\max}=\frac{1}{N}\frac{(T_m c)^{\frac{1}{2}}}{v_{cp}}\left(\frac{Kcc_h}{\rho\delta}\right)^{\frac{1}{4}}$$

式中 N 常数；

T_m——熔点；

K 热导率；

c_h 比热；

δ——复材厚度。

由于在 v_p、β 和 v_{cp}三变量中只有二个独立变量，因此可在 β-v_{cp} 平面坐标图上把可焊的极限边界条件表示出，见图 6·5-33。由各边界条件限定的焊接参数范围称为“焊接性窗口”。

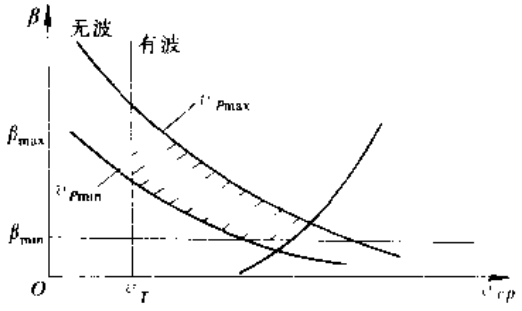


图 6·5-33 爆炸焊焊接性窗口示意图

6·3·3 焊接参数的确定

合理的焊接参数应根据材料组合及焊接要求的动态参数为依据，然后与炸药爆轰对材料作用的对应数据相拟合，来确定合理的初始焊接参数。通过确定焊接性窗口来选择合理焊接参数，当然是最好的方法。在工程上也可通过少量试验或借助有关资料来确定焊接参数。合理的焊接参数应在焊接性窗口下边界条件的上方，这样会得到优质的焊接界面。

1. 炸药性质及单位面积药量 W_g 爆炸焊要求化学安定性好、密度变化小，临界直径和极限直径小的低爆速炸药。通常在炸药中混合一定比例的惰性材料来降低爆速。国内外使用炸药的主要品种为：(1)颗粒状硝酸铵与 6%～12%柴油混合；(2)硝基胍加惰性材料；(3)2#岩石硝铵炸药加盐；(4)硝酸铵与 TNT 及雾化铝粉混合。

单位面积药量是爆炸焊的重要参数，根据量纲分析，W_g 可用下式估算：

$$W_g=K_0(\delta\rho)^{\frac{1}{2}}$$

式中 K_0 系数，$K_0=0.9\sim1.4$；

δ ——复材厚度(cm)；

ρ——复材密度(g/cm³)。

2. 间距 s 根据复材加速至所要求的碰撞速度来确定 s 值。根据复材密度不同，适用的 s 值在复材厚度的 0.5～2.0 倍之间。实用的最小 s 值与炸药厚度 δ_c 和复材厚度 δ 有关：$s=0.2(\delta_c+\delta)$

6·4 界面形态与结合区的性质

爆炸焊动态参数直接制约界面形态，一般情况下，界面呈连续的波状形貌，整个界面由直接结合区和漩涡区组成。当再入射流全部喷射出去时，界面全部形成直接结合区。当 v_p 值过大时，界面出现连续的熔化层。若 $v_{cp}<v_T$ 时，界面无波形。

在基、复材密度相近的情况下，波峰两侧均有漩涡；若密度相差较大，仅在波峰一侧出现漩涡。漩涡内部由熔化物质组成，又称熔化槽，呈铸态组织。前漩涡以基材成分为主；后漩涡以复材成分为主。如漩涡内材料形成固溶体则呈韧性；如形成金属间化合物则呈脆性。良好的焊接界面应由均匀细小的波纹组成，熔化槽呈孤立隔离状态。此界面有优良的力学性能。

直接结合区是由中间极薄的熔化层(约 2～4μm)和两侧高速变形区组成。熔化层内是排列不规则的特细等轴晶粒，含有非晶和微晶。界面两侧有微量的元素迁移。

6·5 爆炸焊的主要类型

按接头形式和结合区形状的不同，爆炸焊可分为

超星公司制作 请尊重作者版权

点焊、线焊和面焊。面焊是爆炸焊的主要形式。

6·5·1 板材的爆炸焊

采用爆炸焊方法可得到两层及多层金属复合板。复材具有耐蚀、耐热和耐磨等特殊性能，基材提供使用要求的强度和刚度。根据设计和使用要求，可选择合适的材料组合和随意确定厚度比。大多数可塑性金属和合金都可进行爆炸焊。表6·5-23列出了工程上常用的一些金属组合。

爆炸焊金属复合板是理想的工程结构材料，广泛用于制造壳板和管板类结构。根据设计要求，复材可以参与强度计算也可不参与强度计算。对于一般结构，可在爆炸态使用，对压力容器等重要结构，复合板应进行热处理，以消除爆炸加工产生的硬化和残余应力。爆炸复合板可通过轧制得到更薄的规格，也可经受切割、机械加工、冷热成型和焊接，具有良好的加工适应性和焊接性。

表6·5-23 爆炸焊典型的金属组合

	锆	锌	镁	钴	钯	钨	铅	钼	金	银	铂	铌	钽	钛及合金	镍及合金	铜及合金	铝及合金	低合金钢	普碳钢	F不锈钢	A不锈钢
A不锈钢	●			●		●		●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
F不锈钢								●						●	●	●	●	●	●	●	
普碳钢	●	●	●	●			●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●		
低合金钢	●	●	●	●			●	●	●			●	●	●	●	●	●	●			
铝及合金			●							●		●	●	●	●	●	●				
铜及合金								●	●	●		●	●	●	●	●					
镍及合金			●					●	●		●		●	●	●						
钛及合金	●		●			●				●	●	●	●	●							
钽								●	●		●	●	●								
铌					●			●			●	●									
铂											●										
银										●											
金									●												
铜								●													
铅							●														
钨						●															
钯					●																
钴				●																	
镁			●																		
锌		●																			
锆	●																				

注：●表示可焊的组合。

6·5·2 管材及棒材的爆炸焊

应用爆炸焊原理，同样可得到复合管材及复合棒材，还可经拉拔、挤压等工艺得到各种规格的产品。管材爆炸焊分为外爆法和内爆法(图6·5-34)，需采用低熔点金属芯棒和模具来控制变形。与上述方法类似的

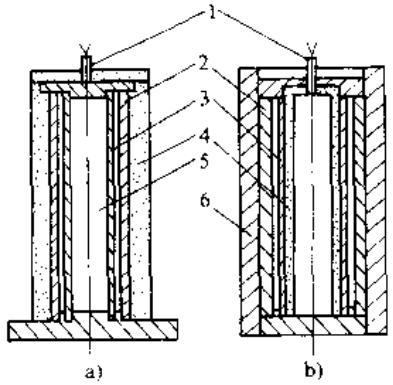


图 6·5-34 管材爆炸焊示意图

a) 外爆法 b)内爆法

1—雷管 2—基材 3—复材 4—炸药 5—芯棒 6—模具

装置是管和管板的爆炸焊，图 6·5-35 示出了平行法和角度法两种装置，可采用单管或分区成组爆炸焊方法进行操作。对于泄漏的热交换器管子，采用管状杯形件进行爆炸焊，起到堵管的作用，称之为爆炸堵管。上述两种方法要求结合区长度大于复管壁厚的 5 倍或不小于 12.7mm，取其较大值以保证连接强度。

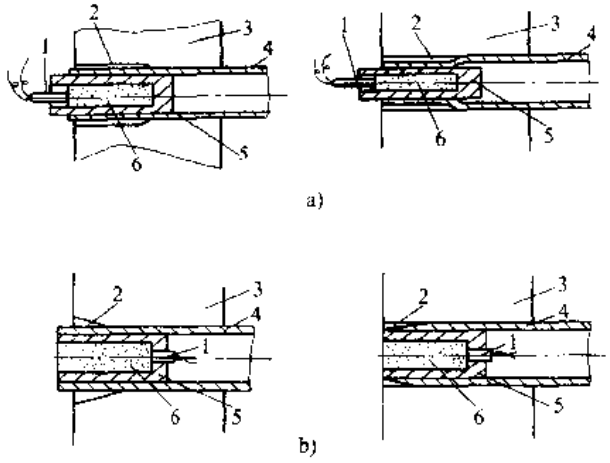


图 6·5-35 管与管板爆炸焊装置示意图

a)平行法 b)角度法

1—雷管 2—间隙 3—管板 4—管子 5—插入套 6—炸药

6·5·3 过渡接头及搭接爆炸焊

用常规的熔焊方法连接异种金属是困难的或有的甚至是不可能的，但用爆炸焊方法可将物理、化学性能，诸如熔点、密度、硬度及线膨胀系数相差悬殊的金属或合金可靠地连接在一起。过渡接头的作用是把异种金属的焊接变成同种金属的焊接。

过渡接头分为结构过渡接头和导电过渡接头。前者有板状的也有管状的，连接船舶铝上层建筑和钢甲板的铝-钢过渡接头是典型的实例。管状接头也可从厚的复合板上切取。铝、铜和钢的过渡接头是导电过渡接头中最常用的金属组合，既是电的良导体，又能把功率损失降低到最小。此外，爆炸焊还适用于各种形式的搭接，用以解决工程中难以解决的一些问题。

6·6 爆炸复合板的性能及试验方法

爆炸复合板的性能与材料组合、焊接参数及加工过程的工艺质量有关，其检验项目和指标要求以及试验方法在国家标准中都作了相应要求。其中 GB9396－86 复合钢板性能试验方法和 GB7734－87 复合钢板超声波探伤方法是复合钢板性能检验的方法标准。性能的指标要求在相应的材料标准中有明确的规定。

金属复合板具有很高的结合强度和良好的韧性，表 6·5-24 列出了常见复合板的性能数据。

表 6·5-24 爆炸复合板的性能

材料组合	力学性能				冷弯 $d=2a$、180°		状态
	σ_b(MPa)	σ_s(MPa)	δ_5(%)	τ(MPa)	外弯	内弯	
1Cr18Ni9Ti / 16MnR	540～575	330～345	25～28	300～350	良	良	920℃，1h
0Cr19Ni9 / 20G	435	300	37	270～280	良	良	920℃，1h
00Cr17Ni12Mo2 / 20G	470	255	35	290～320	良	良	920℃，1h
B30 / A3	400	340	27.5	240	良	良	爆炸

版权所有 北京金属结构公司制作 请勿重作者版权

（续）

材料组合	力学性能				冷弯 $d=2a$、180°		状态
	σ_b(MPa)	σ_s(MPa)	δ_5(%)	τ(MPa)	外弯	内弯	
$\frac{T_2}{16Mn}$	580	500	18.7	170	良	良	爆炸
$\frac{TA1}{20G}$	477	344	32	140～330	良	良	爆炸
$\frac{L1}{A3}$	365	312	17.7	80～122	良	良	爆炸
$\frac{Ni6}{A3}$	460	315	39	294～343	良	良	爆炸

注：τ——界面抗剪强度

6·7　爆炸复合板的应用

金属复合板是先进的工程结构材料，体现了优化设计、合理选材和提高产品可靠性等重要原则，复合钢板已形成标准化和系列化，可满足设计、建造和使用要求。

与采用复材单体金属相比，复合钢板可节省贵重、稀缺金属，减少设计厚度，延长使用寿命，从而降低设备造价，有明显的经济效益和社会效益。因此在石化、化工、造船、冶金、宇航、轻工等工业部门获得了广泛的应用。

7　超声波焊[138]

7·1　超声波焊原理及特点

超声波焊是一种固相焊接方法，是通过声学系统的高频弹性振动及压力实现焊接的，其原理见图6·5-36。图中各部件功能是：超声频电源发生器产生16～80kHz声波，换能器将磁滞伸缩电磁能转换成弹性振动能，聚能器耦合负载并放大振幅，上声极传递振动能，下声极传递压力。

超声波焊接的特点是不需外加热源，焊接区热输入较小，可以焊接金属及非金属材料，适于微连接及薄厚差别很大的工件，对焊接面有自清理作用，焊点强度高于接触点焊，而焊件变形甚小。

超声波焊有四种类型：点焊、缝焊、环焊、线焊。环焊是采用环形电极扭转振动，可一次形成封闭焊缝；线焊是通过刀条状上声极一次获得线形焊缝，特别适于易燃易爆材料口袋的封装焊接。

超声波焊接机理是金属表面在摩擦功的作用下发生强烈塑性流动，实现了静面接触的条件，通过公共电子云实现键合。诚然，不可排除焊接过程中的冶金反应，再结晶、扩散、相变及金属间化合物的出现等。摩擦、塑性流动、温升是实现超声波焊接的三大因素，其中摩擦起主要作用。非金属与金属的焊接主要连接机理是机械嵌合作用。

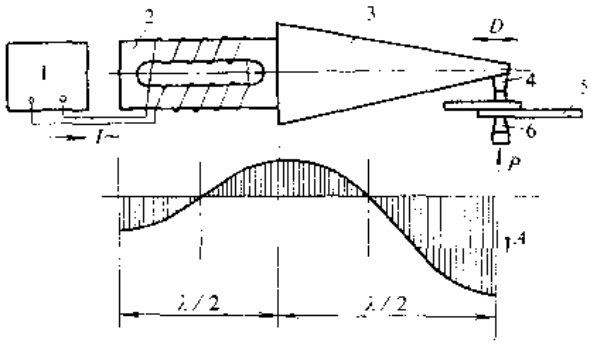


图 6·5-36　超声波焊方法原理

1—超声频电源发生器　2—换能器　3—聚能器

4—上声极　5—焊件　6—下声极

I—振荡及磁化电流　p—压力　D—振动方向　A　振幅

7·2　超声波焊工艺参数

超声波焊接的主要工艺参数是频率、振幅、压力和焊接时间。谐振对焊接质量至关重要。振幅与材料的种类及厚度有关，大振幅可提高生产率，但易发生工件与声极咬合现象。压力与时间也必须匹配，压力过大会发生工件表面压溃促使接头强度降低，时间不超过3s，通常≤1.5s。

超声波可焊材料很广（图6·5-37），典型材料焊接规范见表6·5-25。

超星公司制作 请尊重作者版权

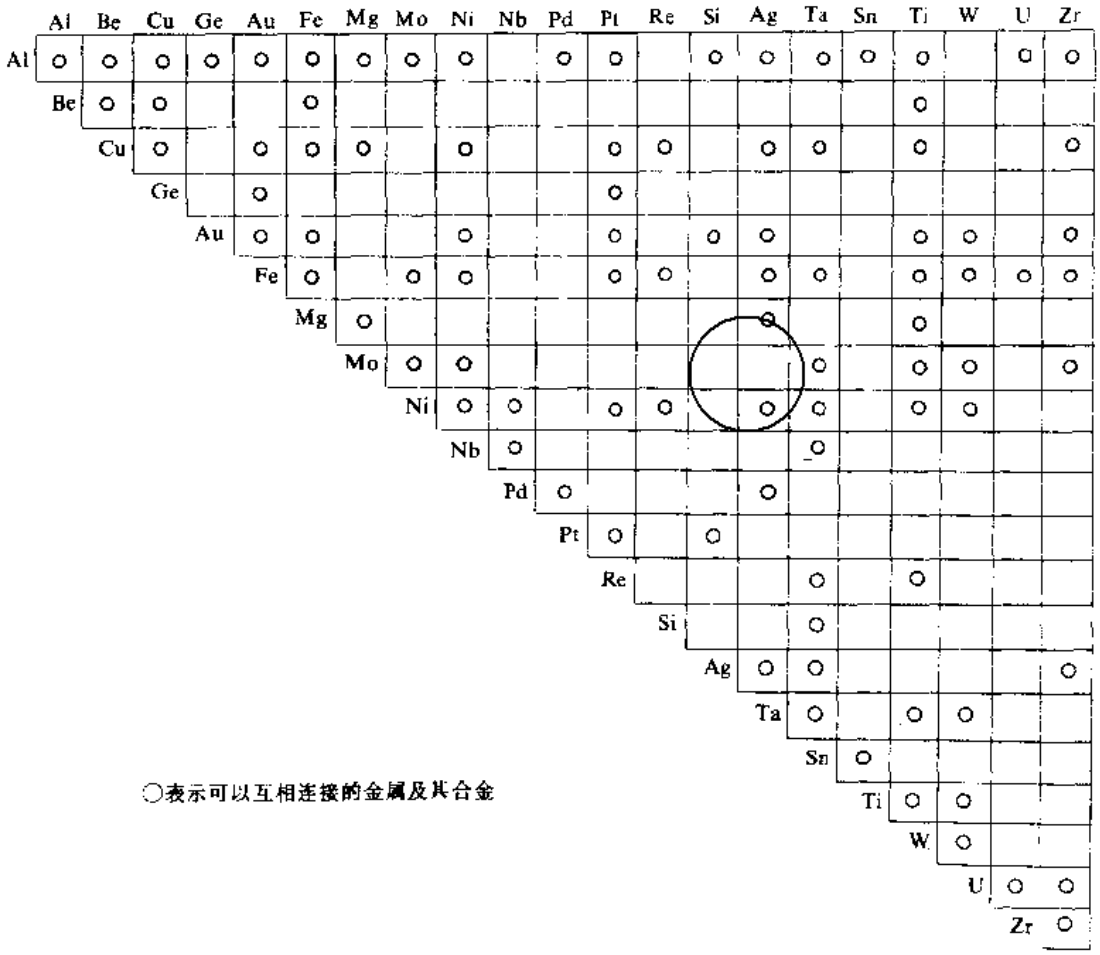


图 6·5-37 超声波焊接材料范围

表 6·5-25 几种典型材料的焊接规范

材 料	厚度 (mm)	压力 (N)	时间 (s)	振幅 (μm)	上声极材料	破断力 (N)
铝	0.3～1.2	200～500	0.5～1.5	14～16	45钢	
铜 MI	0.3～1.0	300～1000	1.5～3.0	16～20	45钢	>1130
钛 BT-1	0.5～1.0	800～1200	0.5～1.5	20～22	BK—20	>2000
锆	0.5	900	0.25	23～25	BK—20	>700
树脂 68	3.2	100	3	35	钢	>10
聚氟乙烯	5	500	2.0	35	橡皮	>2300

8 其他压焊

8·1 气压焊

气压焊是用气体火焰加热并加压焊接的一种方法，该方法又分为熔化和非熔化两类，最常用的，也是效果较好的，是无间隙固相热压焊。

气压焊的优点是焊接质量比电阻焊、闪光焊接头质量稳定，设备简单可移动，不需用电加热，工件尺寸可大可小等；缺点是焊接速度慢，工件对接表面必须平整而且清洁，尤其是焊接尺寸较大的实心工件，需要很长时间使热量传到内部，为此常设计成锥形接头以克服这一缺点。

气压焊的全部工艺过程见图 6·5-38。用多火焰焊炬将焊口加热到热塑状态进行加压顶锻，使接头无铸态组织、无气孔和夹杂，焊接区可与母材作同样热处理。由于温度梯度不陡，裂纹敏感性较小。

气压焊的应用较广，常用于焊接管道、钻杆、钢轨、钢筋、飞机起落架等。表 6·5-26 列出了碳钢管氧乙炔气压焊的典型工艺参数。

超星公司制作 请尊重作者版权

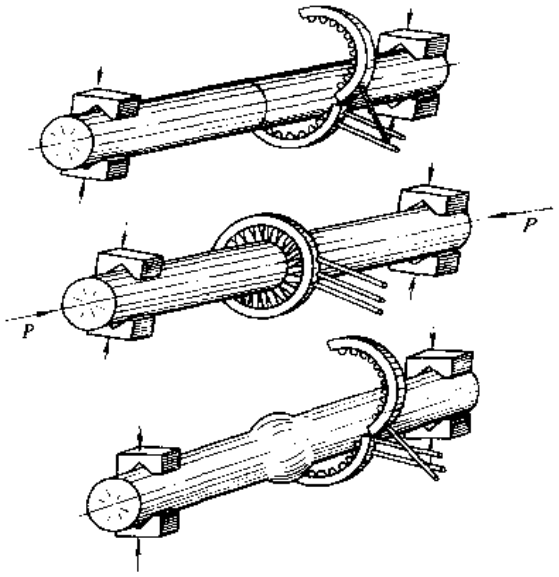


图 6·5-38 气压焊工艺流程

表 6·5-26 不同壁厚碳钢管气压焊工艺参数

壁厚 (mm)	端面坡度 (°)	焊接时间 (s)	初始压强 (MPa)	顶锻压强 (MPa)	总缩量 (mm)
5	4	45～50	0.7	2.8	6.25
6.3	4～5	55～60	0.7	2.8	7.85
9.5	6	90	0.7	2.8	10.2

8·2 电渣压焊

电渣压焊是利用电渣热源将被焊工件熔化并施加压力的焊接方法。电渣压焊与普通电渣焊不同之处在于工件各为一极，不需另加填充材料，焊后在熔化状态下加压。电渣压焊熔化过程见示意图 6·5-39。为了获得牢固的焊接接头，常将上工件的下端削成锥状，以便使下工件顶端形成凹形熔池，待锥端熔化一部分之后，再施加垂直压力，即可实现牢固的焊接。

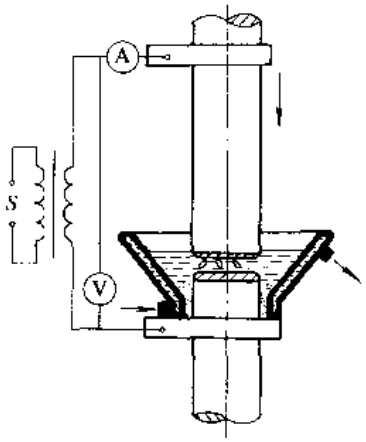


图 6·5-39 电渣压焊示意图

加压不仅可以将熔渣排除至焊缝之外，还可改善铸态组织状态，显著地提高了接头力学性能。焊后须清除接头周围的固态熔渣和去掉被挤出的多余金属。

8·3 螺柱焊

螺柱焊是一种加压熔焊的方法。焊接时螺柱或类似的紧固件被电弧熔化并快速挤压而形成接头。引弧、燃弧时间和挤压过程是自动控制的。

螺柱焊有两种基本方法，即电弧螺柱焊和电容储能螺柱焊。螺柱焊枪构造见图 6·5-40，螺柱本身充当电极。电弧螺柱焊时常需采用陶瓷垫圈，以支撑熔化的焊缝金属，并需用焊剂。储能螺柱焊时，由于时间很短，不需用焊剂。焊接非铁金属或活性金属螺柱时，通常用惰性气体保护。

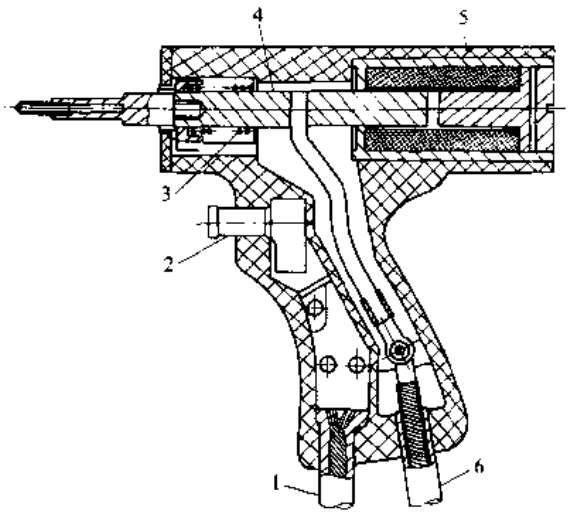


图 6·5-40 螺柱焊枪结构

1—控制电缆 2—开关 3—主弹簧 4—铁芯
5—电磁线圈外壳 6—焊接电缆

上述两种方法焊接钢铁时都采用直流正接，而焊接非铁金属时采用反接。多数非铁金属螺柱采用电容储能方法焊接，直径大于 10mm 的螺柱采用电弧螺柱焊。储能螺柱焊又分为预间隙法、预接触法和拉弧法，前两种电弧燃烧时间为 3～6ms，适于焊接薄板和异种金属；拉弧法燃弧时间为 6～12ms，适用于表面有锈污或涂层的不平表面，压力也较前两种大。各种方法的适用性见表 6·5-27。

螺柱焊不受方向和位置限制，可将螺柱焊到倾斜和弯曲表面上，工件表面允许有污染和涂层，是一种简单高效的方法；尤其是焊接非铁金属或不锈钢螺柱代

能量公司制作 请尊重作者版权

替氩弧焊，可节约生产成本。螺柱焊也有其局限性，目前只适于焊接直径 20mm 以下的螺柱，螺柱形状又必须适合于装夹；储能螺柱焊时，有时要求螺柱下端精心设计一凸台，以利引弧。螺柱焊在金属加工业中获得了广泛采用。

表 6·5-27 螺柱焊方法适用性

条件因素		电弧螺柱焊	电容储能螺柱焊	
			预间隙法 预接触法	拉弧法
母材	碳钢	A	A	A
	合金钢	B	A	C
	不锈钢	A	A	A
	铝合金	B	A	A
	铜合金	C	A	A
母材厚度	<0.4mm	D	A	B
	0.4～1.6mm	C	A	A
	1.6～3.2mm	B	A	A
	>3.2mm	A	B	A
螺柱材料	碳钢	A	A	A
	合金钢	B	C	C
	不锈钢	A	A	A
	铝合金	B	A	A
	铜合金	C	A	A
螺柱形状	圆形	A	A	A
	方形	A	C	C
	矩形	A	C	C
	不规则形	A	C	C
焊缝尺寸	φ1.6～3.2mm	D	A	A
	φ3.2～6.4mm	C	A	A
	φ6.4～12.7mm	A	C	C
	φ12.7～25.4mm	A	D	D
	≤32mm²	C	A	A
	≥32mm²	A	D	D

注：A—好焊 B—特殊工艺 C—使用有限 D—不推荐

8·4 旋弧压焊[39]

旋弧压焊是利用旋转电弧加热，随后快速压接的一种方法。采用爆炸动力来实现快速加压的方法原理见图 6·5-41。工件 1、5 由高频引弧后，线圈 2、4 通电后将产生径向磁场 B，处于磁场中的电弧 3 受到切线力 F 的作用沿管端作圆周运动，并将管端加热到焊接温度，此时点燃爆炸缸使工件快速挤压在一起。

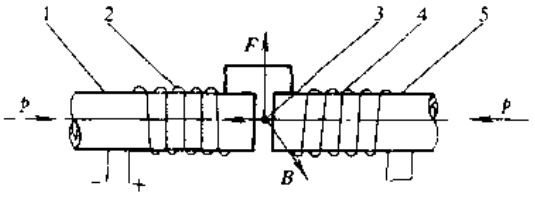


图 6·5-41 旋弧压焊原理图

1，5—被焊工件 2，4—线圈 3—磁场中电弧

表 6·5-28 列出了 20 钢管旋弧压焊工艺参数。采用该法生产的高压管道质量可靠，运行安全正常。

表 6·5-28 20 钢管旋弧压焊规范

钢管尺寸 (mm)	焊接电流 (A)	励磁电流 (A)	对口间隙 (mm)	炸药量 (g)	焊接时间 (s)	断路次数	备注
φ38×3.5	320	180	2.8	6.3	4.0	无	自动连续动作
φ57×4.5	430	215	2.8	6.8	8.6		
φ60×3.0	420	215	1.8	6.8	4.6		
φ50×5.0	400	215	2.8	9.5	21	5～6	手动顶锻规范
φ76×4.5	450	215	2.8	11.0	12	1～2	

旋弧压焊具有不需填充材料，比闪光焊功率小，设备简单，管端不开坡口，可焊大口径管道等一系列优点，已引起重视。

8·5 热剂压焊

热剂压焊是靠热剂的化学反应还原出钢水，凝固后立即加压的一种焊接方法。关于热剂焊方法已在本篇第 4 章第 9 节中有所叙述，本节重点阐述加压的必要性和效果。

热剂焊的一个严重缺点是焊缝组织较疏松，疲劳强度很低，因此热剂焊的钢轨断头率比闪光焊高 2 个数量级。采用加压热剂焊新工艺明显地改善了热剂焊缝质量(表 6·5-29)。焊接规范见表 6·5-30。接头质量已超过了铁道部标准，达到和接近气压焊和闪光焊的接头质量。

铁道部工程机械厂制作 请尊重作者版权

表 6·5-29 60kg/m 钢轨热剂压焊接头性能

焊剂牌号	受压部位	静弯		落锤次数	疲劳载荷 F_{max}/F_{min} (N)
		压力(×9.8kN)	挠度 (mm)		
铁 I-50	轨头	135～147	30～48	6锤未断	340/68
铁 II-50	轨头	110～125	18～20	4.5锤未断	340/68
铁道部标准		90	10	2	250/50

表 6·5-30 60kg/m 钢轨热剂压焊规范

预热时间 (min)	预热温度 (℃)	顶锻量 (mm)	顶锻时间 (s)	顶锻力 (×9.8 kN)	推凸时间(s)		轨缝宽 (mm)
					铁 I-50	铁 II-50	
5～6	800～900	30～32	10	18.4	210	160～180	14～16

第6章 钎 焊[40]

熔点比焊件低的钎料和焊件共同加热到钎焊温度，在焊件不熔化的情况下，钎料熔化并润湿钎焊面，依靠二者的扩散而形成钎焊接头，这种连接方法称为钎焊。与熔焊相比，钎焊的焊件加热温度较低，其组织和力学性能变化小，变形较小，接头光滑平整；某些钎焊方法可一次焊多工件，多接头，生产率高；可以连接异种材料。钎焊广泛用于制造铝和铜散热器，包括大型板式换热器、夹层结构、压气机部件、航空发动机、硬质合金刀具、导管、滤网、容器、电真空器件、波导、导线、电机、电器部件等。

温度高于450℃的钎焊称硬钎焊，低于450℃称软钎焊。

1 材料钎焊性

材料的钎焊性指的是材料对钎焊加工的适应性，即材料在一定的钎焊条件下获得优质接头的难易程度。

各种常用材料的钎焊性及钎料、钎剂选择见表6·6-1。

表 6·6-1 常用材料的钎焊性及钎料、钎剂的选择

材料	钎焊性		钎料	钎剂	注
	硬钎焊	软钎焊			
碳钢、低合金结构钢	优	优	H62，BCu60ZnSn-R 紫铜 银基钎料 锡铅钎料	硼砂或硼砂、硼酸混合物 硼砂、保护气体、真空钎焊 QJ102，QJ103，QJ104 氧化锌与氯化铵水溶液	
碳素工具钢	良		H62，BCu60ZnSn-R 紫铜 银基钎料	硼砂或硼砂、硼酸混合物 硼砂，保护气体、真空钎焊 QJ102，QJ103，QJ104	
高速钢	良		高碳锰铁，Cu-30Ni，Cu-12Ni-13Fe-4.5Mn-1.5Si	硼砂	钎焊温度应与高速钢淬火温度相适应
硬质合金	良		BCu48ZnNi-R， BCu58ZnMn BCu57ZnMnCo BAg50CuZnCdNi	硼砂或硼砂、硼酸混合物 剂102	
铸铁	良		BCu60ZnSn-R 银基钎料	硼砂或硼砂、硼酸混合物 剂102	钎焊前应清除干净被钎表面的石墨

超星公司制作请尊重作者版权

（续）

材料		钎焊性 硬钎焊	钎焊性 软钎焊	钎料	钎剂	注
1Cr18Ni9Ti，1Cr13		良	良	HLCuNi30-2-0.2 铜 HLAuNi17.5 银基钎料 镍基钎料 锰基钎料 锡铅钎料	201号 201号、气体保护、真空钎焊 气体保护、真空钎焊 QJ102，QJ103，QJ104 201号，气体保护、真空钎焊 保护气体或真空钎焊 磷酸水溶液，氯化锌盐酸水溶液	
高温合金		良		银基钎料 铜 镍基钎料 HLAuNi17.5	QJ102 保护气体或真空钎焊 保护气体或真空钎焊 保护气体或真空钎焊	含铝和(或)钛应的高温合金应表面镀镍
银		优	优	银基钎料 锡铅钎料	QJ102，QJ103，QJ104 松香酒精溶液	
铜、黄铜、青铜		优	优	铜磷钎料、铜磷银钎料、铜磷锡钎料 铜锌钎料 银基钎料 镉基钎料 铅基钎料 锡铅钎料	钎铜不用钎剂。钎铜合金用硼砂、硼酸混合物，QJ102 硼砂或硼砂、硼酸混合物 QJ102，QJ103，QJ104 QJ205 氯化锌水溶液 松香酒精溶液，氯化锌与氯化铵水溶液	
铝和铝合金	L2，LF21，LF1	优	优	铝基钎料 BAl90SiMg，BAl88SiMg BAl86SiMg HL501 HL502 HL607 HL505 铝钎焊板	QJ201，QJ206，1号，2号 真空钎焊 刮擦法，QJ203 QJ203 QJ204 QJ202 浸沾钎焊用钎剂1号、2号	
	LF2	良	良	铝钎焊板	浸沾钎焊用钎剂1号、2号	
	LF5，LF6	差	差			润湿性很差
	LD2	良		铝基钎料	201，QJ202，1号，2号	注意防止过烧
	LD5，LD6	困难		BAl86SiCu	1号，2号	易过烧，建议用浸沾钎焊
	LY12，LC4	差	差			极易过烧，不宜硬钎焊
铸铝合金	Al-Cu系	困难		HL505	QJ202	容易过烧
	Al-Si系	困难		BAl67CuSi，HL505	QJ201，QJ202	润湿性差
	Al-Mg系	差				表面氧化物难除，润湿性很差
	Al-Zn系	良		铝基钎料	QJ201，QJ206	
	压铸件	差				母材表面起泡
钛和钛合金		良		BAg94Al Ti-15Cu-15Ni	气体保护或真空钎焊	接头抗蚀性较差，接头延性较差

超星公司制作 请尊重作者版权

（续）

材料	钎焊性		钎料	钎剂	注
	硬钎焊	软钎焊			
金刚石与钢	良	—	BCu58ZnMo BCu60ZnSn-R BCu57ZnMnCo	硼砂	注意防止裂纹
铝与铜	良	—	90Sn-10Zn,HL501 HL502 铝基钎料	QJ203,QJ205 QJ201,QJ206	也可以铝表面镀铜、镍后进行钎焊
铝和钢	良	—	HL502 90Sn-10Zn	QJ203,QJ205 QJ203	也可以铝表面镀锌、铜、镍后进行钎焊
陶瓷-陶瓷、陶瓷-金属	—	—	70Ag-27Cu 3Ti-Ti-Cu	真空或气体保护钎焊	或在陶瓷表面金属化后钎焊
石墨	—	—	70Ag-27Cu-3Ti Ti-Cu,Ti-Ni	真空或气体保护钎焊	

低合金结构钢工件在调质热处理后钎焊，宜用熔点较低的钎料（如BAg40CuZnCd）以免工件软化。钎焊后须热处理的钢件如高碳钢，宜用铜钎料（熔点为1083℃，而一般渗碳或淬火温度很少高于940℃），也可用固相线比热处理温度高的黄铜钎料。钎焊和热处理两工序可同时进行。

铸铁钎焊前应充分清除待焊面的石墨。

钎焊不锈钢应考虑焊件的工作温度：低于230℃用铜钎料，不能用铜磷钎料，也不宜用铜锌钎料，以防应力开裂；低于427℃用银基钎料；低于600℃用铜镍、锰基钎料；低于900℃用镍基钎料。经调质热处理的1Cr13用BAg40CuZnCd钎料钎焊，以免焊件软化；用HLAuNi17.5或Cu58.5Mn31.5Co10钎料钎焊1Cr13钢时，钎焊与调质热处理的淬火可同时进行。含铝、钛的高温合金钎焊前应镀镍。

铜不可在氢气中钎焊，无氧铜除外。但铜可在氮气保护下钎焊。黄铜在炉中钎焊时最好先镀铜。w_{Pb}[○]<3%的铅黄铜、磷青铜、硅青铜为防止应力开裂，焊前应加热消除应力并避免有应力集中的地方。w_{Ni}[○]>20%的白铜也易产生应力开裂，除须作消除应力处理外，焊时加热、冷却应慢且均匀。白铜钎焊宜用不含磷的银钎料。w_{Pb}[○]>5%的铅黄铜不能硬钎焊。w_{Al}[○]不大于8%的铝青铜可用低熔点的高银钎料钎焊。铜磷钎料不能用于钎焊铍青铜及w_{Ni}[○]>30%的白铜。

纯铝及LF21比较容易钎焊。软钎焊的铝钎焊接头耐蚀性差。为提高软钎焊铝接头的耐蚀性，表面可先镀镍。锌基钎料钎焊的铝接头具有中等的耐蚀性。含镁量较高的铝合金如LF5、LF6因润湿性差，固相线温度较低的铝合金如LC4、LY12等极易过烧，二者均不能用铝基钎料钎焊。压铸铝合金因气孔多，难以钎焊，但随着铸造技术的提高，钎焊性有所改善。

铝与铜、钢软钎焊时，可先在铝表面镀锌，再镀铜或镍，然后用锡铅钎料钎焊。铝与钢、镍、因康镍、可伐、蒙乃尔等合金钎焊时，可用铝基钎料直接钎焊，但最好是在钢、镍、因康镍、可伐等合金表面先覆铝，然后进行钎焊。铝与铜可以用锌基钎料、锌镉钎料、铝基钎料直接钎焊，但要求加热快，钎焊保温时间要短。

2 钎料

钎料熔点低于450℃称软钎料（或易熔钎料），高于450℃称硬钎料（难熔钎料）。国标对钎料的表示方法规定如下：牌号中的第一大写字母B代表钎料，B后面的第二部分表示主要合金组元的一组化学元素符号。第一个化学元素符号表示钎料的基体组元，其后数字表示含量，其余组元的化学元素符号按含量多少顺序排列。当钎料需标记其他内容时，以间隔符号"-"与第二部分隔开标注于后。不符合此表示方法的为部标或厂标钎料。

选用钎料应考虑：(1)润湿母材并能形成良好钎焊接头；(2)满足工件的工作要求（力学性能、工作温度、耐蚀性、电导性等）；(3)满足所用的钎焊方法及钎焊性的需要；(4)成本。在分级钎焊时前级钎料比后级钎料的熔点要高。

钎料供应状态有丝、棒、片、铸条、粉及膏状等。为便于钎焊生产，可将钎料制成各种专用的圈、环、片等。铝钎料还能与母材预制成双金属板（称为铝钎焊板）。

常用钎料的成分、性能及用途见表6·6-2～表6·6-16。

○ w皆为该元素的质量分数。

表 6·6-2 锡铅钎料和锡银钎料的牌号、成分、性能和用途

牌号	化学成分的质量分数(%)				熔化温度(℃)		电阻率	用途
	Sn	Sb	Pb	杂质	固相线	液相线	(μΩ·m)	
BSn4Pb	3～4	5～6	余量	<0.5	245	265	—	含锡量最低，脆性大，只用于钢的镀覆和钎焊不受冲击的零件以及卷边或销口钎缝
BSn18Pb	17～19	2～2.5	余量	<0.5	183	277	0.220	含锡量低，力学性能差，可用于钎焊钢、黄铜、镀锌铁皮等强度要求不高的场合以及钎焊低温工作的工件
BSn30Pb	29～31	1.5～2.0	余量	<0.5	183	256	0.182	是应用较广的钎料，润湿性较好，用于钎焊铜、黄铜、钢、锌板、白铁皮和散热器、仪表、无线电器械、电动机匝线、电缆套等
BSn40Pb	39～41	1.5～2.0	余量	<0.5	183	235	0.170	是应用最广的钎料，润湿性好，用于钎焊铜和铜合金、钢、镀锌铁皮等，可得到光洁表面。常用于钎焊散热器、无线电及电器开关设备、仪表零件等
BSn50Pb	49～51	≤0.8	余量	<0.5	183	210	0.156	钎焊散热器、计算机零件、铜和黄铜、白铁皮等
BSn55Pb	54～56	≤0.8	余量	<0.5	183	200	—	—
BSn60Pb	59～61	≤0.8	余量	<0.5	183	185	0.145	熔点最低，适于钎焊不能受高温和能充分填充窄毛细间隙的地方，如电子器件，电气开关零件，计算机零件，易熔金属制品和淬火钢件等
BSn90Pb	89～91	≤0.15	余量	<0.3	183	222	0.120	可钎焊大多数钢、铜和合金以及其他金属。由于钎料含铅少，特别适于钎焊食品器皿和医疗器材
HL605	95～97	—	—	Ag3～4	221	230	—	抗腐蚀性好，工作温度可达 100℃，适宜于钎焊铜、黄铜、铝青铜、铝黄铜等

表 6·6-3 铅基钎料的牌号、成分、性能和用途

牌号	化学成分的质量分数(%)				熔点 (℃)	电阻率 (μΩ·m)	用途
	Pb	Ag	Sn	杂质			
HLAgPb97	96～98	2.7～3.3	—	<0.5	300～305	0.20	钎焊铜及铜合金零件工作温度<150℃
HLAgPb92-5.5	余量	2.2～2.8	5.2～5.8	<0.5	295～305	—	
HL608							
HLAgPb65-30-5	65	5	30		225～	—	
HLAgPb83.5-15-1.5	82～85	—	—	<0.5	265～270	—	

注：多以丝状供应。

表 6·6-4 镉基钎料牌号、成分、性能和用途

牌号	化学成分的质量分数(%)				熔化温度(℃)		用途
	Cd	Zn	Ag	杂质	固相线	液相线	
HL503	94～96		4.5～5.5		338	393	钎焊工作温度较高的铜和铜合金，如散热器及电机整流子、工作温度<250℃，此外，HL506 钎缝能电镀
HLAgCd96-1	95～97	0.5～1.5	2.5～3.5	<0.5	300	325	
HL506	82～84	16～18	—	—	266	270	

注：多以丝状供应。

表 6·6-5 铝和铝合金软钎焊用钎料成分、熔化温度及用途

牌号	化学成分的质量分数(%)						熔化温度(℃)		用途
	Zn	Sn	Pb	Cd	Al	Cu	固相线	液相线	
HL501	56～60	38～42	—	—	—	1.5～2.5	200	350	用于铝芯线的刮擦钎焊，也可钎焊铝、铝合金、铝与铜接头
HL502	58～62		—	38～42	—	—	266	335	润湿性好，可钎焊铝和铝合金、铝与铜，耐蚀性尚好
HL607	8～10	29～33	49～53	8～10	—	—	150	210	钎焊铝芯电缆接头，接头耐蚀性差，表面须用保护措施
HL505	70～75	—	—	—	25～30	—	430	500	用于铝和铝合金钎焊，接头耐蚀性好

注：多以铸条供应。

表 6·6-6 铝基钎料成分、性能及用途

牌号	化学成分的质量分数(%)					熔化温度(℃)		性能和用途
	Al	Si	Cu	Mg	其他	固相线	液相线	
BAl86SiCu	余量	9.3～10.7	3.3～4.7	—	—	521	583	适用于各种钎焊方法、钎料的结晶间隔较大，易于控制钎料流动
BAl88Si	余量	11～13	0.3	—	—	577	582	是一种通用钎料，适用于各种钎焊方法，具有极好的流动性和耐蚀性
BAl90Si	余量	9～11	0.3	—	—	577	591	制成片状用于炉中钎焊和浸沾钎焊，钎焊温度比 BAl92Si 低
BAl67CuSi	余量	4～7	25～30	—	—	525	535	熔点低，以棒状在火焰钎焊时使用，接头的耐蚀性稍差
BAl90SiMg	余量	6.6～8.2	0.25	2～3	—	559	607	真空钎焊用片状钎料，钎焊温度高
BAl86SiMg	余量	11～13	0.25	1～2	—	559	569	真空钎焊用片状钎料，丝状钎料，用于钎焊温度不能高，流动性好的场合

表 6·6-7 铝钎焊板

牌号	基体金属	包覆层	包覆层熔化温度 (℃)	钎焊温度 (℃)
LF63-1	LF21	Al-11～12.5Si	577～582	582～604
LF 3	LF21	Al-6.8～8.2Si	577～612	600～615

表 6·6-8 银基钎料成分、性能及用途

牌号	化学成分的质量分数(%)						熔化温度(℃)		用途
	Ag	Cu	Zn	Cd	Sn	其他	固相线	液相线	
BAg94Al	余量					Mn0.7～1.3 Al4.5～5.5	780	825	用于钎焊钛和钛合金
BAg10CuZn	9～11	52～54	余量	—	—	—	815	850	钎焊温度较高，塑性较差，用于钎焊含铜量低于58%的黄铜、铜零件、钢
BAg25CuZn	24～26	40～42	余量	—	—	—	745	775	有较好的润湿性和填缝能力，可钎焊要求表面光洁、能承受冲击载荷的铜和铜合金、钢、不锈钢等零件，但 BAg45CuZn 钎焊温度较低，接头性能更好，是最常用的一种银钎料
BAg45CuZn	44～46	29～31	余量	—	—	—	665	745	
BAg50CuZn	49～51	33～35	余量	—	—	—	690	774	钎料结晶间隔较大，适用于钎焊间隙不均匀或要求钎缝圆角较大以及承受多次冲击载荷的零件
BAg65CuZn	64～66	19～21	余量	—	—	—	685	720	钎料熔化温度较低，强度和延性好，用于钎焊性能要求高的黄铜、青铜和钢件
BAg70CuZn	69～71	24～26	余量	—	—	—	730	755	适宜钎焊要求电导性好的铜、黄铜、银等，含锌少可用于炉中钎焊
BAg40CuZnCdNi	39～41	15.5～16.5	17.3～18.3	25.1～26.5	—	Ni 0.1～0.3	595	605	熔化温度最低的银钎料，工艺性能和力学性能很好，用于钎焊铜和铜合金、钢、不锈钢，特别适宜于要求钎焊温度低的调质钢及镀青铜等。镉蒸气有毒
BAg50CuZnCd	49～51	14.5～16.5	14.5～18.5	17～19	—	—	625	635	BAg50CuZnCd 特别适用于钎焊温度要求不很严，而强度要求高的零件
BAg35CuZnCd	34～36	25～29	19～23	17～19	—	—	605	700	可填充较大和不均匀的间隙。但为了防偏折，要求加热快。钎焊铜和铜合金、钢、不锈钢
BAg50CuZnCdNi	49～51	14.5～16.5	13.5～17.5	15～17	—	Ni 2.5～3.5	630	690	耐热和耐蚀性好，适于钎焊不锈钢及硬质合金
BAg56CuZnSn	55～57	21～23	15～19	—	4.5～5.5	—	620	650	BAg50CuZnCd 的代用品，以及钎焊不锈钢，钎缝与不锈钢色相近
BAg40CuZnSnNi	39～41	24～26	29.5～31.5	—	2.7～3.3	Ni 1.3～1.65	634	640	BAg40CuZnCd 的代用品无毒，但性能不及 BAg40CuZnCd

（续）

牌号	化学成分的质量分数(%)						熔化温度(℃)		用途
	Ag	Cu	Zn	Cd	Sn	其他	固相线	液相线	
BAg34CuZnSn	33～35	35～37	25～29	—	2.5～3.5	—	630	730	BAg35CuZnCd 的代用品，无毒，但性能不及 BAg40CuZnCd
BAg50CuZnSnNi	49～51	20.5～22.5	26～28	—	0.7～1.3	Ni 0.30～0.65	—	—	钎焊不锈钢时可防止接头的界面腐蚀，又可用于硬质合金的钎焊
BAg49CuZnMnNi	49～51	17～19	18～20	—		Ni4.5 Mn7.5	690	710	硬质工具的钎焊

表 6·6-9 真空级银钎料成分、性能及用途

牌号	主要成分的质量分数(%)				杂质(%)						熔化温度(℃)		用途
	Ag	Cu	Sn	In	Bi	Pb	Cd	Zn	S	P	固相线	液相线	
BAg-V	99.95	0.05	—	—	—	0.002	0.001	0.001	0.005	0.002	960	960	电真空器件钎焊时用作第一级钎料
BAg50Cu-V	49～51	49～51	—	—	—	0.002	0.001	0.001	0.005	0.002	779	850	电真空器件钎焊时用作中间级钎料
BAg72Cu-V	71～73	27～29	—	—	—	0.002	0.001	0.001	0.005	0.002	779	779	电真空器件钎焊中应用最广的一种钎料。多级钎焊时用作中间级钎料或末级钎料
BAg60CuIn-V	余量	29.2～30.8	—	9～11	—	0.002	0.001	0.001	0.005	0.002	600	720	电真空器件多级钎焊时用作末级钎料
BAg68CuPd-V	余量	26～28	Pd 4.5～5.5	—	—	0.002	0.001	0.001	0.005	0.002	807	810	与 BAg72Cu-V 相同，但钯大大提高了钎料对钢和镍基合金的润湿性

表 6·6-10 铜和铜锌钎料的成分、性能及用途

牌号	化学成分的质量分数(%)							熔化温度(℃)		用途
	Cu	Sn	Si	Fe	Mn	Zn	Ni	固相线	液相线	
3Cu	≥99.90	—	—	—	—	—	—	1083	1083	主要用于在还原性气氛、惰性气氛和真空条件下钎焊低碳钢、低合金钢、不锈钢、镍、钨和钼等
BCu54Zn	53～55	—	—	—	—	余量	—	885	890	钎焊铜、青铜、铸铁、钢等不受冲击和弯曲的零件
H62	60.5～63.5	—	—	—	—	余量	—	900	905	强度和延性好，用于铜、镍、钢、铸铁的钎焊

BCu60ZnSn-R	59～61	0.8～1.2	0.15～0.35	—	—	余量	—	890	905	可取代 H62 钎料以取得更致密的钎缝，尚可作气焊黄铜用焊丝
BCu48ZnNi-R	46～50	—	0.05～0.25	—	—	余量	9～11	921	935	钎焊有一定耐热要求的钢、镍和镍基合金，对硬质合金也具有良好的润湿性
BCu58ZnMn	57～59	—	—	0.15	3.7～4.3	余量	—	880	909	用于硬质合金刀具、模具及采掘工具的钎焊
BCu62ZnNiMnSi-R	61～63	0.1	0.1～0.3		0.1～0.3		0.3～0.5	853	870	用途同 BCu60ZnSn R，但熔点较低

表 6·6-11　铜磷钎料的成分、性能及用途

牌　号	化学成分的质量分数(%)					熔化温度(℃)		用　途
	Cu	P	Ag	Sn	其他	固相线	液相线	
BCu93P	余量	6.4～7.2	—	—	—	710	793	流动性很好，可以流入间隙很小的接头，钎料脆，用于钎焊不受冲击载荷的铜和黄铜零件
BCu91PAg	余量	6.8～7.2	1.8～2.2			643	810	钎料中的银改善了延性和流动性，在较大钎焊温度范围内，能填充钎焊接头间隙，用于电冰箱、空调器、电机和电表等行业，电导性好，流动性低，适宜于钎焊间隙较大的零件
BCu89PAg	余量	5.8～6.7	4.8～5.2			650	800	适宜于钎焊较大间隙的接头
BCu80PSnAg	余量	4.8～5.8	4.5～5.5	9.5～10.5	—	560	650	用于要求钎焊温度低的铜及铜合金零件
BCu95P	余量	4.7～5.3				710	924	制成片状使用，流动性低，特别适宜于电阻钎焊
HLAgCu70-5①	余量	4.5～5.5	24.5～25.5	—	—	650	710	铜磷钎料中延性和电导性最好的一种，用于钎焊要求较高的电气接头
HLCuP6-3	余量	5.7～6.3	—	3～4	—	640	680	部分代替银钎料和铜磷银钎料，钎焊铜和铜合金

① HL 为原机电部部标。

表 6·6-12　锰基钎料成分、性能及用途

牌　号	化学成分的质量分数(%)							熔化温度(℃)		用　途
	Mn	Ni	Cr	Cu	Co	Fe	B	固相线	液相线	
BMn70NiCr	余量	24～26	4.5～5.5	—	—	—	—	1035	1080	具有良好的润湿性和填充间隙能力，用于不锈钢波纹板夹层结构，换热器的低真空钎焊

（续）

牌号	化学成分的质量分数(%)							熔化温度(℃)		用途
	Mn	Ni	Cr	Cu	Co	Fe	B	固相线	液相线	
BMn40NiCrFeCo	余量	40～42	11～13	—	2.5～3.5	3.5～4.5	—	1065	1135	钎料的高温性能和耐蚀性稍高于 BMn70NiCr 钎料。为避免不锈钢晶粒长大，应严格控制钎焊温度
BMn68NiCo	余量	21～23	—	—	9～11	—	—	1050	1070	用于钎焊工作温度较高的薄件
BMn52NiCuCr	余量	27.5～29.5	4.5～5.5	13.5～15.5	—	—	—	1000	1010	用于钎焊温度不允许高的不锈钢薄件，BMn50NiCuCrCo 的高温性能优于 BMn52NiCuCr
BMn50NiCuCrCo	余量	26.5～28.5	4.0～5.0	12.5～14.5	4.0～5.0	—	—	1010	1035	
BMn45NiCu	余量	19～21	—	34～36	—	—	—	920	950	用于钎焊温度要求较低，以及分级钎焊及补钎场合

表 6·6-13 镍基钎料成分、性能及用途

牌号	化学成分的质量分数(%)							熔化温度(℃)		用途
	Ni	Cr	B	Si	Fe	C	P	固相线	液相线	
BNi74CrSiB	余量	13～15	2.75～3.5	4～5	4～5	0.6～0.9	—	975	1038	用于强度要求高以及高温合金钎焊接头，如涡轮叶片、喷气发动机零件及高应力部件
BNi75CrSiB	余量	13～15	2.75～3.5	4～5	4～5	0.06	—	975	1075	用于高温喷气发动机零件以及室温及低温下工作的零件
BNi82CrSiB	余量	6～8	2.75～3.5	4～5	2.5～3.5	0.06	—	970	1000	与上述钎料相似，但能在较低温度下钎焊
BNi68CrWB	余量	9.5～10.5	2.2～2.8	3～4	2～3	0.06	W 11.5～12.5	970	1095	接头抗氧化性比上述钎料较差，用于钎焊高温下受大应力的零件
BNi92SiB	余量	—	2.75～3.5	4～5	0.5	0.06	—	980	1010	与 BNi74CrSiB 钎料相似，但对保护气氛和真空度的要求较低
BNi93SiB	余量	—	1.5～2.2	3～4	1.5	0.06	—	980	1065	用于要求钎缝圆角较大和韧性较好的场合，也能用来钎焊间隙较大的接头
BNi71CrSi	余量	18.5～19.5	—	9.75～10.5	—	0.10	—	1080	1135	用于钎焊在高温下工作的高强度和抗氧化的接头，还可用于钎焊不允许含硼的核部件
BNi89P	余量	—	—	—	—	0.10	P 10～12	877	877	流动性好，对母材的溶蚀小，用于钎焊工作温度不是太高的不锈钢零件
BNi76CrP	余量	13～15	0.01	0.10	0.2	0.08	P 9.7～10.5	890	890	钎焊蜂窝结构，薄壁管组件以及高温下使用的其他结构，又可用于不允许含硼的各种部件

表 6·6-14 金基钎料的成分、性能及用途

牌号	化学成分的质量分数(%)					熔化温度(℃)		用途
	Au	Cu	Ni	Pd	In	固相线	液相线	
HLAuCu20	余量	19.5～20.5	—	—	—	891	891	多级钎焊时作为末级钎料，可钎焊铜、可伐、钼、钨、镍和钢等
HLAuCu40	余量	39～41	—	—	—	950	975	多级钎焊时，作为中间级钎料
HLAuCu62.5	余量	62～63	—	—	—	991	1016	多级钎焊时作为一级钎料
HLAuCu60-5	余量	59～61	—	—	5	850	880	HLAuCu20 的代用品
HLAuPdNi34-36	余量	—	36.5～37.5	33.5～34.5	—	1135	1166	用于钎焊在高温下要求具有良好强度和耐蚀性的接头
HLAuNi17.5	余量	—	17～18	—	—	949	949	具有优良的润湿性、强度和耐蚀性，广泛用于钎焊铜、可伐、钼、钨、镍、各种不锈钢和高温合金

表 6·6 15 银基自钎性钎料成分、性能及用途

牌号	化学成分的质量分数(%)					熔化温度(℃)		用途
	Cu	Mn	Ni	Li	Ag	固相线	液相线	
HLAgCu7.5-0.5	7～8			0.5	余量	780	890	因含少量锂可在保护气体(如氩)中不用钎剂钎焊不锈钢
HLAgCu27.5-1-0.5	26.5～28.5		0.8～1.2	0.5	余量	780	800	
HLAgCu25.5-5-3-0.5	24.5～26.5	4.5～5.5	2.6～3.4	0.45～0.6	余量			

表 6·6-16 铜锗和铜镍钎料成分、性能及用途

牌号	化学成分的质量分数(%)			熔点(℃)	用途
	Ge	Ni	Cu		
HLCuGe8	7.5～8.5	—	余量	940±10	钎焊铜、可伐、钼等，钢代替 Au-Cu 钎焊，电真空器件钎焊时，HLCuGe8 为第一级钎料，HLCuGe10.5 为中间级钎料；HLCuGe12 0.2 为末级钎料
HLCuGe10.5	10～11	—	余量	880±10	
HLCuGe12 0.2	11.5～12.5	0.25	余量	850±10	
HLCuNi30-2-0.2	Si2 B≤0.2 Fe<1.5	30	余量	1080～1120	用于钎焊不锈钢，接头强度高，工作温度可达 600℃

超星公司制作 请尊重作者版权

3 钎剂

钎剂能清除液态钎料和工件待焊表面的氧化物、改善钎料对工件的润湿性，并在钎焊过程中保护免于氧化。因此，钎剂是在大气中钎焊时不可缺少的。合理选择钎剂对钎焊质量有重大影响。

软钎料用钎剂成分、性能及用途见表 6·6-17，硬钎料用钎剂成分、性能及用途见表 6·6-18。铝和铝合金用钎剂成分、性能及用途见表 6·6-19。除上述钎剂外，还有气体钎剂以及利用保护气体、真空达到保护及防氧化的作用。钎剂残渣有腐蚀作用（松香除外），钎焊后应清除干净。

表 6·6-17 软钎焊用钎剂成分、性能及用途

序号	成分的质量分数(%)	钎焊温度(℃)	用 途
1	松香或松香(25)酒精(75)溶液	150～300	无腐蚀性，钎焊铜、镉、银等
2	松香 2～2.5，三乙醇胺 1～2，盐酸乙二胺 3～5，酒精余量	150～330	弱腐蚀性，钎焊铜和铜合金、镀锌铁皮，镍
3	松香 28，氯化锌 3，氯化铵 1，酒精余量	280～300	弱腐蚀性，钎焊铜和铜合金、镀锌铁皮，镍
4	氯化锌 25，水 75	290～350	弱腐蚀性，钎焊钢、铜和铜合金
5	氯化锌 15，凡士林 85	290～350	弱腐蚀性，钎焊钢、铜和铜合金
6	氯化锌 18，氯化铵 6，水 76	180～320	弱腐蚀性，钎焊铜、铜和铜合金
7	氯化锌 25，盐酸 25，水 50	180～320	强腐蚀性，钎焊铬钢、不锈钢
8	磷酸 50，水 50	180～320	强腐蚀性，钎焊铬钢，不锈钢，镍铬合金，铁铬铝丝
QJ205	$ZnCl_2$50，NH_4Cl15，$CdCl_2$30，NaF5	250～400	强腐蚀性，钎焊铝和铝合金、钢、铝黄铜、铝青铜

表 6·6-18 硬钎焊用钎剂成分、性能及用途

牌号	成分的质量分数(%)	钎焊温度(℃)	用 途
	硼砂	800～1150	用铜基钎料钎焊碳钢、铜、铸铁、硬质合金
	硼砂 25，硼酸 75	800～1150	用铜基钎料钎焊碳钢、铜、铸铁、硬质合金
201 号	硼酸 80，硼砂 14.5，氧化钙 5.5	850～1150	铜基钎料钎焊合金钢、不锈钢
QJ101	$H_3BO_3$30，$KBF_4$70	550～850	银基钎料钎焊铜和铜合金、钢、不锈钢
QJ102	KF42，$KBF_4$23，$B_2O_3$35	600～850	用银基钎料钎焊铜和铜合金、钢、不锈钢，活性极强，应用最广
QJ103	KBF_4>95	550～750	用银基钎料钎焊铜和铜合金、钢、不锈钢，活性极强，应用最广
QJ104	$H_3BO_3$35，$Na_2B_4O_7$50，KF15	650～850	银基钎料炉中钎焊铜、铜合金、钢、不锈钢
QJ105	$ZnCl_2$15，NH_4Cl5，$CdCl_2$30，LiCl25，KCl25	450～600	钎焊铜及铜合金

超星公司制作 请尊重作者版权

表 6·6-19 铝和铝合金钎焊用钎剂成分、性能及用途

牌号	成分的质量分数(%)	钎焊温度(℃)	用 途
QJ201	LiCl32,KCl50,$ZnCl_2$8,NaF10	450～620	火焰钎焊,炉中钎焊
QJ202	LiCl42,KCl28,$ZnCl_2$24,NaF6	420～620	火焰钎焊,炉中钎焊
QJ203	$ZnCl_2$88,NH_4Cl10,NaF2	275～400	反应钎焊铝芯电缆接头等
QJ204	三乙醇胺 82.5,$Cd(BF_4)_2$10,$Zn(BF_4)_2$,$NH_4BF_4$5	180～275	软钎料钎焊,残渣腐蚀性较小
	LiCl41,KCl51,$KFAlF_3$8	>560	浸沾钎焊
	LiCl34,KCl44,NaCl12,$KFAlF_3$10	>560	浸沾钎焊
QJ206	SnCl25,KCl32,LiCl25,LiF10,$ZnCl_2$8	550～620	火焰钎焊,炉中钎焊

4 钎焊接头设计

由于钎料强度比母材低,钎焊接头多采用搭接(图 6·6-1)。为使钎焊接头与母材等强度,搭接长度 l 可按下式计算。

$$l=\alpha s\frac{\sigma_b}{\sigma_\tau}$$

式中 α——安全系数;

s——金属厚度(mm);

σ_b——钎焊金属抗拉强度(MPa);

σ_τ——钎焊接头抗剪强度(MPa)。

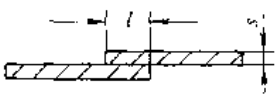


图 6·6-1 搭接接头

各种金属钎焊接头的抗剪强度见表 6·6-20,具体数值与钎焊方法、接头形式、钎焊工艺等有关。实际生产中搭接长度通常为母材厚度的 2～3 倍;对于薄壁件可取 4～5 倍;但搭接长度很少超过 15mm。

搭接接头间隙是影响钎缝致密性和接头强度的关键因素。间隙太小,妨碍钎料流入;间隙过大,破坏钎缝的毛细作用,钎料不能填满间隙。表 6·6-20 列出了常用金属的搭接接头的间隙值。异种材料钎焊必须考虑两者不同的膨胀系数对钎焊时间隙的影响。

表 6·6-20 常用金属钎焊接头的合适间隙和接头抗剪强度

钎焊金属	钎料	间隙(mm)	抗剪强度(MPa)
碳钢	铜	0.00～0.05	100～150
	黄铜	0.05～0.20	200～250
	银基钎料	0.05～0.15	150～240
	锡铅钎料	0.05～0.20	38～51
不锈钢	铜	0.02～0.07	
	铜镍钎料	0.03～0.20	370～500
	银基钎料	0.05～0.15	190～230
	镍基钎料	0.05～0.12	190～210
	锰基钎料	0.04～0.15	≈300
铜和铜合金	铜锌钎料	0.05～0.13	
	铜磷钎料	0.02～0.15	100～180
	银基钎料	0.05～0.13	160～220
	锡铅钎料	0.05～0.20	21～46
	镍基钎料	0.05～0.20	40～80
铝和铝合金	铝基钎料	0.10～0.30	60～100
	钎焊铝用软钎料	0.10～0.30	40～80

常用典型接头形式见表 6·6-21,接头设计还须考

越星公司制作 请尊重作者版权

虑：(1)采用"自保持"接头形式，即尽量不用夹具而能保证装配的定位及间隙；(2)钎料的安置应保证钎料能均匀填充在钎焊间隙内，见表 6·6-22。

表 6·6-21　典型钎焊接头形式

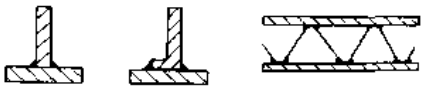
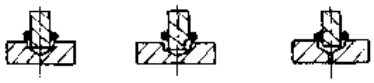
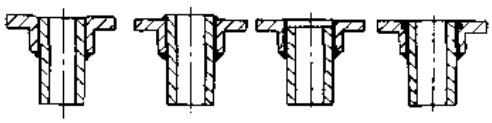
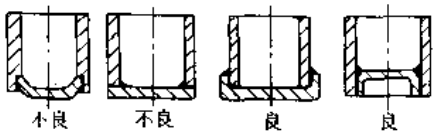
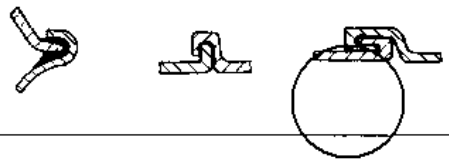
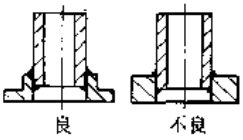
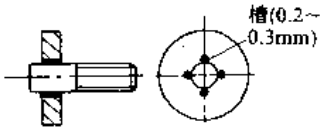
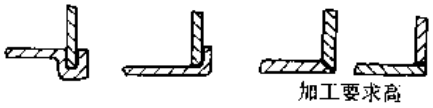
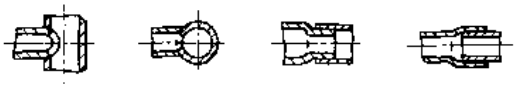
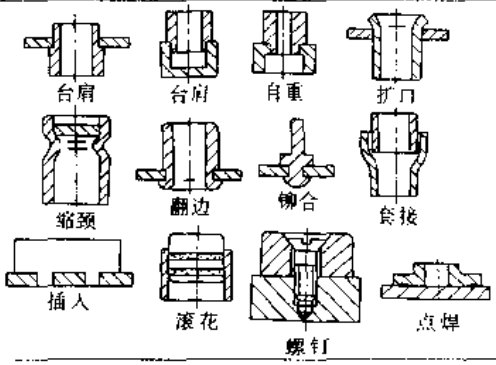
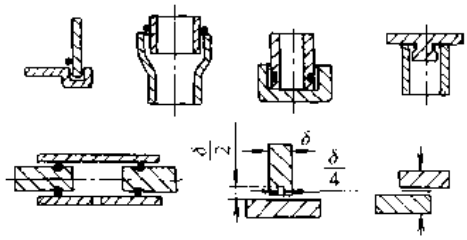
接头形式	简图
搭接平面接头	
T形接头	
闭合接头	
套管法兰接头	
容器堵头接头	
线接头	
薄壁镶边接头	
不同厚度零件接头	
紧配合接头	
角接头	
管接头	

表 6·6-22　常用"自保持"接头形式

	简图
零件定位	
钎料安置	

5　钎焊方法

按热源及加热方式分为烙铁钎焊、火焰钎焊、电阻钎焊、感应钎焊、浸沾钎焊、炉中钎焊等。也用钨极氩弧钎焊钛与钢，真空聚焦电子束钎焊，激光钎焊，超声和刮擦软钎焊铝及铝合金，以及用微束等离子弧等热源进行钎焊。

5·1　烙铁钎焊

烙铁钎焊加热温度低，适用于钎焊温度低于300℃的软钎料(锡铅或铅基钎料)。焊薄、小件，需使用钎剂。

5·2　火焰钎焊

火焰钎焊设备简单、通用性好。手工操作时生产率低并要求操作技术高。适于钎焊某些限于工件形状、尺寸及设备等原因不能用其他方法钎焊的工件。可采用火焰自动钎焊。常用氧-乙炔焰，但钎焊铝广泛用空气-汽油火焰。火焰钎焊须用钎剂。可钎焊钢、不锈钢、硬质合金、铸铁、铜、银、铝等及其合金。所用钎料有镍基、铜锌、铜磷、银基、铝基及锌铝钎料。

5·3　电阻钎焊

电阻钎焊加热快，生产效率高。可焊各种形状的工件，如 0.03～0.12mm 细丝、实心导线及多股导线与导电环、导电块的钎焊等。可用焊件通低压电产生的电阻

超星公司制作 请勿重作者版权

热直接加热，也可用碳极通电放出的电阻热间接加热焊件。操作技术易掌握。钎焊接头面积小于65～380mm²时，经济效果最好。特别适于钎焊某些不允许整体加热的工件。焊铜时使用铜磷钎料可不用钎剂；也适宜于钎焊铜合金、银及银合金、钢、硬质合金。使用的钎料有铜锌、铜磷、银基钎料等。常用于钎焊刀具、电器触头、电机定子线圈、仪表元件、导线端头等。

5·4 感应钎焊

感应钎焊加热快、生产效率高，可局部加热，零件变形小。钎料需预置，一般须用钎剂，否则应在保护气体或真空中钎焊。接头洁净，易满足电子、电器工业要求。适用于各种材料及导体材料的钎焊。特别宜于钎焊形状对称的管接头，法兰接头等。感应钎焊的应用受零件形状及大小限制。常用银基、铜基、镍基钎料。

5·5 浸沾钎焊

浸沾钎焊加热快、生产效率高，设备能力大时，可同时焊多工件、多缝。在熔融的钎料槽内浸沾钎焊，主要用于软钎料焊钢、铜和合金，特别适于钎焊焊缝多的复杂工件，如换热器、电机电枢导线等。浸沾软钎焊的缺点是钎料消耗量大。在盐浴槽中浸沾硬钎焊，所用盐类不同，方法也不同：(1)工件预置钎料及钎剂，浸熔盐中钎焊；(2)工件预置钎料，在熔融的钎剂或含钎剂的熔盐中钎焊；(3)所用熔盐不仅能起钎剂作用，而且能在钎焊同时向工件渗碳、渗氮。盐槽浸沾钎焊适于焊钢、铜及其合金、铝及其合金，使用铜基、银基、铝基钎料。浸沾钎焊宜大量连续生产，如制氧机铝制大型板式热交换器，单件或非连续生产时不经济。

5·6 炉中钎焊

炉中钎焊炉内气氛可控，炉温易控制准确、均匀、工件整体加热、变形小；可同时焊多工件、多缝，适于大量生产，成本低，用途广，但受工件尺寸限制。在空气炉中钎焊主要用于软钎料钎焊钢、铜及其合金，铝基钎料钎焊铝合金，以免工件严重氧化。在还原气体如氢、分解氨的保护气氛中，不需钎剂，可用铜、银基钎料钎焊钢、不锈钢、无氧铜，镍基钎料钎焊不锈钢。在惰性气体如氩的保护气氛中，不用钎剂，可用含锂银基钎料钎焊钢、不锈钢，银铜钎料钎焊铜、镍；或用少量钎剂，以银基钎料钎焊钢和不锈钢，铜钎焊不锈钢。在真空炉中可用铜、镍基钎料钎焊不锈钢、高温合金；以银铝钎料和钛基钎料钎焊钛合金；银铜钎料钎焊铜、镍、可伐、银；铝基钎料钎焊铝合金。

第7章 堆 焊[41][42]

堆焊是机械制造行业中一个重要的制造和维修手段。它是用焊接方法将填充金属熔敷在金属材料或零件表面以得到特殊的表面性能或需要的尺寸的工艺方法。目的是提高设备或零件的使用寿命，节省制造和维修费用，提高生产率。由于堆焊能更合理地利用材料，对改进产品设计也有重大意义。现在堆焊已广泛地用于矿山、冶金、农机、建筑、电站、铁路、车辆、石油、化工设备以及工具、模具等的制造和修理。

1 堆焊材料

1·1 常用堆焊合金类型、主要性能和用途

堆焊合金种类很多。一般按堆焊层的化学成分和组织结构进行分类。常用的堆焊金属类型、特点及应用举例见表6·7-1。

表6·7-1 常用堆焊金属类型、特点及应用举例

类型	牌号(国产)	主要成分的质量分数(%)	性能特征	主要应用举例
珠光体钢	焊条：D102、D106、D107、D112、D126、D127、D132、D146、D156	C<0.5，其他合金总量<6.5，主要是Mn、Cr、Mo、Si	价廉，抗裂性好，可机加工，硬度较低(20～38HRC)，耐磨性不高	过渡层或恢复尺寸堆焊，也可堆焊轴类、车轮、齿轮

超星公司制作 请尊重作者版权

（续）

类型	牌号(国产)	主要成分的质量分数(%)	性　能　特　征	主要应用举例
马氏体钢	焊条： 低碳：广堆1～4、D217A、DM-742 中碳：D172、D167、D212、D237 高碳：D207、D227	C0.1～1.0，最高可达1.5。其他合金总量<12，个别可达14。主要是Mn、Cr、Ni、Mo、Si	硬度、耐磨性、耐冲击性不同牌号差别大，25～65HRC，低碳的韧性好，中碳的能耐中度冲击，含碳和合金量高的耐磨性高。但焊接性较差，必须预热和后热	低碳马氏体钢主要作过渡层，也可堆焊轴、齿轮等。中、高碳马氏体钢可堆焊铲斗、搅拌机叶片等
工具钢	焊条： 高速钢：D307 冷工具钢：D317、D322、D327、D327A、D017、D027、D036 热锻模钢：D337、D397	高速钢含碳量>0.8，其他钢种含碳较低，其他合金元素有Cr、Mo、W、V、Co、Si等	高速钢、工具钢堆焊层硬度≥55HRC。热锻模、热轧辊钢含碳较低，能耐中度冲击，有的有较好耐冷热疲劳性。多种材料有较高热强性和红硬性	金属切削刀具、热锻模、热轧辊、冷冲模、农机、矿山机械及磨焊煤锤头等
高铬不锈钢	焊条：G202、G207、G217、D502、D507、D507Mo、D507MoNb、D512、D517 合金粉末：F321	含铬约13，其他合金总量<13，主要是Mo、Nb、W等	有空气淬硬特性，堆焊层硬度≥38HRC。有适度的耐磨性、耐腐蚀性、耐热性和耐冲击性	耐中温(300～600℃)金属间磨损零件，如阀门密封面、螺旋输送叶片、搅拌桨等
铬镍不锈钢	焊条：A002、A042、A062、A102、A202、A302、A402、D547、D547Mo、D557 合金粉末：F311、F312、F322、F327A、F327B	含铬量>17，含镍>7，其他合金总量<10，主要是Mo、W、Si等。个别还含V、Nb、B等	韧性、耐热性好。有冷作硬化性，冷作后可达40HRC，低碳和超低碳的抗腐蚀性好。含碳较高的耐高温磨损。加硼的耐磨性更好	常作高铬钢堆焊的过渡层。低碳的用于化工设备抗腐蚀堆焊，高碳的用于阀门密封面和炉内零件
奥氏体锰钢和铬锰奥氏体钢	焊条：D256、D266、D276、D277、D516M、D516MA、D567、D577 合金粉F326	奥氏体锰钢含碳<1.1，含锰13。还含少量Cr、Mo、V、Ni等，总量<10。铬锰奥氏体钢除高锰外，含铬>10，还含W、Mo、Ni、V、Si等	奥氏体锰钢韧性好，耐冲击，在重冲击时冷作硬化效果显著，可达450HB。只能电弧焊，且焊时工件必须冷却，工作温度不能超过200℃。在碳钢上堆焊需过渡层。铬锰奥氏体钢性能与高锰钢相似，但耐磨性更好，没有碳化物脆化问题	高冲击条件下金属间磨损和磨料磨损的工件，如铁路道岔、铁轨、机床夹具、破碎机、推土机、阀门密封面等
合金铸铁	焊条：D608、D678、D698、D618、D628、D642、D646、D667、D687 合金粉末：F323、F323A、F324、F325 焊丝：HS101、HS103	含碳量1.5～6，马氏体型含铬<10，奥氏体型含铬12～28，高铬合金型含铬>28，此外含W、Mo、V、Ti、Ni、B等	硬度高，45～64HRC，抗磨料磨损性好，堆焊时易裂。一般需预热和后热。奥氏体型能抗轻度冲击，但抗高应力磨料磨损性较差。马氏体型的抗高应力磨料磨损性好，但抗冲击性差。含铬高的耐热性、耐蚀性、抗氧化性都较好	矿山冶金机械、农业机械、泥浆泵、粉碎机辊、挖掘机、挖泥机、磨煤机、制砖机、螺旋输送器、混合器叶片、水轮机叶片等

超星公司制作请尊重作者版权

（续）

类型	牌号(国产)	主要成分的质量分数(%)	性能特征	主要应用举例
镍基合金	焊条：Ni112、Ni307、Ni307B、Ni337 合金粉末：F121、F122、F113 NDG-2	含镍约70，铬15，还含Mo、Nb、Fe、Mn等元素 镍铬硅硼系 无硼的镍铬钨硅系	抗裂性较好。Ni337抗粘着磨损、耐蚀性、耐热性都较好（硬度250HB） 耐热、抗氧化、在650℃以下环境中有良好耐磨、耐蚀性能。中硬的F121硬度40～50HRC。高硬的F122≥55HRC 耐磨、耐热、抗腐性都超过Stellite No. 6，是理想的代钴材料	Ni337作核容器密封面，Ni307在异种钢上堆焊，Ni112主要作过渡层，模具、轴类、耐高温、耐蚀阀门密封面 核容器密封面、热剪刀刃、热模具、汽轮机叶片等
钴基合金	焊条：D802、D812、D822、D842 合金粉末：F221、F221A，F222，F223 焊丝：HS111、HS112、HS113、HS114	钴铬钨合金含铬20～33，含碳0.5～3.3含钨3～21，还含少量Fe、Si、B等元素	高温(650℃)硬度、抗蠕变性、耐磨性、抗氧化性都很好 抗粘着磨损性能良好。高碳型(D822、HS113)的脆，但抗磨料磨损性好。低碳型(D802、HS111)韧性好，抗氧化性好	用于高温腐蚀、高温磨损环境中工作的工件，如高温高压阀门密封面、热剪刀刃、热锻模、高压泵轴套等
铜基合金	焊条：T107(紫铜)	Cu＞99，Si＜0.5，Mn＜0.5	对大气、海水有良好耐蚀性	耐海水腐蚀的碳钢零件表面堆焊
	T207(硅青铜)	Si2.4～4，Mn≤1.5，Sn≤1.5，其余Cu	对硝酸以外大部分酸及海水有良好耐蚀性	化工机械管道内衬堆焊
	T237(铝青铜)	Al7～9，Mn≤2，Si≤1，Fe≤1.5，其余Cu	有优良的耐粘着磨损和耐蚀性	轴承、滑道、化工设备内衬、阀门密封面
	T227(磷青铜)	Sn7.9～9、P0.03～0.3，其余Cu	有一定强度、良好的塑性，耐冲击性、耐磨性和耐蚀性	磷青铜轴衬，船舶推进器叶片，铸铁件修补和堆焊
	合金粉：F422(锡磷青铜)	Sn9.0～11.0，P0.10～0.50，Cu余量	良好的耐粘着磨损性和耐蚀性，硬度低(80～120HB)，易切削加工	轴和轴承的修复和预防性保护
	焊丝：HS222(铁黄铜)	Sn0.7～1.0，Fe0.35～1.2，Si0.05～0.15，Mn0.03～0.09，Cu57～59，Zn其余	良好的耐粘着磨损性和耐蚀性	轴承和抗腐蚀表面堆焊
碳化钨堆焊层	焊条：D707(碳钢芯) D717(管装粒状铸造碳化钨芯) YZ型(管装粒状铸造碳化钨芯) YD型(烧结型、胎体为"镍银"合金) YZ、YD均为气焊堆焊焊条	含碳1.5～3，钨40～50 含碳1.5～4，钨50～70，其余为Cr、Mo、Ni、Mn、Si等	硬度≥60HRC，不能机加工，耐磨料磨损性好，脆，堆焊层易产生裂纹 碳化钨易崩裂，脱落，高温抗氧化性差，工作温度不能超过650℃ 耐磨料磨损性好，韧性比铸造碳化钨好	混凝土搅拌叶片，风机叶片，挖泥机叶片，牙轮钻头爪尖等强烈磨损件 石油钻井，修井及打捞工具，如钻杆接头、耐磨带、铣鞋、磨鞋等

能量公司制作请尊重作者版权

（续）

类型		牌号(国产)	主要成分的质量分数(%)	性能特征	主要应用举例
自熔合金粉末	镍基	F101、F102、F103、F104、F106、F109	Cr8～18、C<1、Si2.5～5.5、B1.3～4.5、Fe≤8，余量Ni；F109，Cu、Fe含量较多	熔点低、自溶性好。有良好耐磨、耐蚀、耐热和抗氧化性(可达760℃)	低硬的F103用于喷熔汽缸、导轨等。中硬的F101、F106喷熔汽门、齿轮、阀门座等。高硬的F102、F104、F109喷熔阀门、柱塞、起重、装卸机械的零件
	钴基	F202、F203、F204	钴铬钨合金加硼(1.2～3.5)，F203加镍(11～15)，F204含碳、钨较高	很好的红硬性和抗高温氧化性(可达1000℃)，良好耐磨、耐蚀性。高硬的F204耐冲击性较差。中硬的F203，不易产生裂纹	高温高压阀门、密封环、热剪刀刃、内燃机阀头等。F203适于各种高温高压阀门和热鼓风机加热交错部位
	铁基	F301、F302、F303、F306、F307	含Ni>28，含Cr4～12，还含Si、B、Mo等，余量Fe	耐磨性较好。有一定耐热(500℃以下)、耐蚀性	齿轮、刮板、车轴等的喷熔。硬度较低的F303、F306用于多冲击零件，如枪械、汽门等喷熔
	含碳化钨型	F105Fe(F102+35%WC) F105(F102+50%WC) F108(F102+80%WC) F205(F204+35%WC) F305(F302+25%WC)	—	硬度高≥55HRC(F305，≥50HRC)，耐磨料磨损性好	强烈抗磨料磨损零件、如导板、刮板、风机叶片、铲齿犁刀等的喷熔

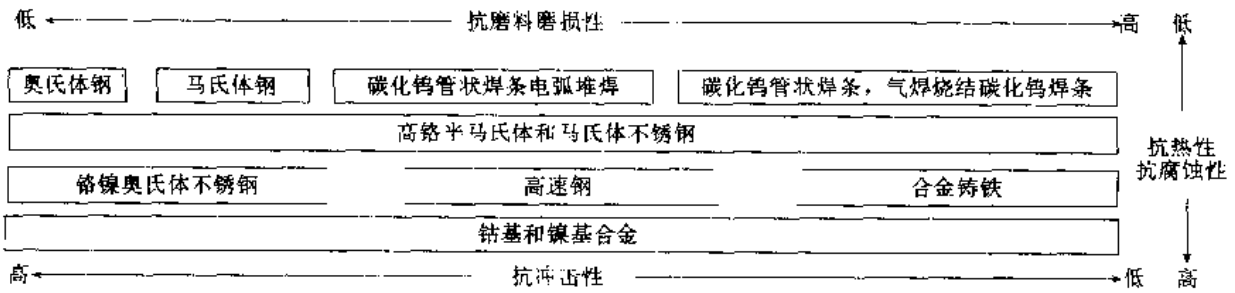
1·2 堆焊材料的形状

堆焊材料按其可加工性分别制成丝、带、铸条(带、丝、片)和粉(粒)。铸条材料主要是轧、拔加工性不好的钴基、镍基和合金铸铁等堆焊材料。粉状材料拓宽了可堆焊材料的范围，也方便了堆焊层成分的调整。水平连铸丝、药芯焊丝、药芯带极的出现促进了堆焊过程的机械化和自动化。光焊丝、铸条和药芯焊丝外涂药皮制成的准焊焊条使用方便，是较广泛使用的堆焊材料。

1·3 堆焊合金的选择

选择堆焊合金首先考虑工件的工作环境，如磨损类型(磨料磨损、金属间磨损、冲蚀等)，受冲击力的大小，工作温度和工作介质等；其次是经济合理性。应把堆焊材料价格和堆焊件投入使用后产生的经济效果同时考虑。此外，堆焊件的材质和批量、堆焊层加工的要求以及拟采用的堆焊工艺等也是考虑的因素。

堆焊金属的使用性主要包括耐磨性、耐冲击性、耐腐蚀性和耐热性，而抗磨料磨损是堆焊最重要的应用。不同类型堆焊金属性能的比较如下：



由于堆焊条件十分复杂，各类堆焊金属性能互有交叉，因此，要取得最佳效果，必须在对工作环境和合金性能充分了解的基础上选材，通过现场考核试验，综合考虑寿命和成本作最后决定。

超星公司制作请尊重作者版权

2 堆焊方法和工艺

2·1 堆焊方法和工艺特点

1. 氧-乙炔焰堆焊 设备简单，稀释率低，容易获得表面光滑的堆焊层，成分稳定，适于批量不大的中小型工件小面积堆焊。工件温度梯度小，有利防止裂纹；但工件吸热多、变形大，不适于堆焊要求限制线能量的工件，如高锰钢等。

2. 手工电弧堆焊 设备简单，操作灵活，可达性好，适于小批量工件堆焊制造及现场修复和不规则工件堆焊。外观成形与操作技术密切相关。稀释率高。

3. 钨极氩弧堆焊 可见度好，堆焊层形状容易控制，电弧稳定，飞溅小，堆焊层质量优良。手工钨极氩弧堆焊工件吸热少，变形小，对母材性能影响小，常用来代替氧-乙炔堆焊。稀释率比氧-乙炔焰堆焊大。自动钨极氩弧堆焊可严格控制焊接规范（焊接电流、焊接速度、填丝速度、焊枪摆动等），可获得性能稳定、高质量的堆焊层。填充材料有实心丝、药芯丝和铸条，也可把粉状、颗粒状堆焊材料输送到电弧区。适于堆焊件小、形状复杂的工件，如气轮机叶片堆焊很薄的钴基合金，也适于某些大型零件或焊接性差的零件，如含钛的不锈钢件或含铝的镍基合金件，在钴管接头区表面利用碳化钨颗粒堆焊获得相应的堆焊层等。

4. 熔化极气体保护电弧堆焊 可见度好，可半自动或全自动堆焊。后者可连续堆焊，易实现机械化、全自动化堆焊。稀释率受工艺规范直接影响，短路过渡熔深较浅，稀释率可达5%；采用喷射过渡，稀释率可达40%。向熔池送进辅助填充金属可减少熔深，稀释率可达3%～5%，并提高了熔敷速率。采用自保护药芯焊丝堆焊，焊丝伸出长度可加大，焊丝直径也可较大（ϕ2.4mm），有利提高熔敷速率（2.3～11.3kg/h）。填充材料有实心丝、药芯丝、药芯带极，也可往熔池填加金属颗粒，可填充不同成分的辅助焊丝获得所需成分的堆焊层。常用CO_2气体保护堆焊机车和车辆轴孔、球铁轴瓦、泥浆泵等工件；氩气保护堆焊层质量高，常用于钴基、镍基合金堆焊，也可用于堆焊低合金钢和青铜等。细直径实心焊丝（ϕ1.6mm以下），只能用于拉制性能好的低合金钢、不锈钢、铜基和镍基合金。药芯焊丝主要堆焊铁基合金和碳化钨，也堆焊钴基合金。

5. 埋弧堆焊 埋弧、无飞溅及电弧辐射，劳动条件好，外观成形光滑，易实现机械化、自动化堆焊。稀释率随工艺变化很大，单丝最高（30%～60%），常需堆焊2～3层才能满足要求；带极堆焊稀释率较低，可低到10%；添加带极的双带堆焊法，稀释率可进一步降低。采用直流正接、向电弧区外加冷、热焊丝（带）的方法能显著提高熔敷速度，降低稀释率。

除单丝埋弧堆焊外，又发展了很多改进型堆焊方法。串列双丝双弧埋弧堆焊，第一个电弧电流较小，后一电弧用大电流，致使堆焊层及其附近金属冷却较慢，减小了淬硬和开裂倾向；并列多丝式加上机头摆动，使堆焊焊道加宽，生产效率提高而熔深较浅。带极埋弧堆焊时焊道宽而平整，熔深浅而均匀。

埋弧堆焊主要用于堆焊铁基材料，如在大型容器内壁堆焊耐腐蚀层，在轧辊上堆焊耐磨层等。

6. 等离子弧堆焊 明弧，堆焊层形状容易控制，成形平滑、整齐，不加工或稍经加工即可使用，容易实现机械化、自动化堆焊。

等离子弧温度高，能量集中，热利用率高，热梯度较大。为防止开裂，大工件堆焊时需要预热。

等离子弧堆焊分填丝等离子弧堆焊和粉末等离子弧堆（喷）焊。堆焊时用转移弧作主热源，用非转移弧作二次热源。填丝等离子弧堆焊有冷丝、热丝之分；冷丝堆焊在工艺和质量上都较稳定，除实心焊丝外，铸棒、带状和药芯焊丝都能用，送丝可手工或自动，还可数根焊丝并排给送，在等离子弧摆动过程中熔敷成堆焊层，也可在工件上预置焊丝或硬质合金圈，用等离子弧熔化实现堆焊；热丝堆焊，焊丝是实心或药芯的，预热焊丝的电源和等离子弧电源分开，用电阻热将焊丝加热到熔点并连续熔敷于等离子弧前面，可大大提高熔敷速率，适合大面积的自动堆焊。粉末等离子弧堆焊的主要优点是堆焊材料的种类多，铁基、镍基、钴基合金，甚至难熔合金都能堆焊。由于容易获得稀释率低的、表面平整的薄堆焊层，对钴基合金堆焊特别有利，可以把碳化钨颗粒加在粉末中或直接导入焊接熔池。

7. 电渣堆焊 最合适的堆焊位置是和垂线呈45°～60°角，在水平或垂直位置堆焊时都得有成型模具。电渣堆焊采用多丝极（实心或药芯丝）或带极，因而堆焊焊道较宽，稀释率较低，熔透也较均匀。熔敷速率可与带极埋弧堆焊相比。堆焊层合金化除了通过电极外，还可把合金粉末加到渣池或涂在电极表面。但熔合线附近成分变化过陡，高温使用时堆焊层易剥离。因此堆焊在含氢介质中工作的压力容器内壁时，第一层必须用埋弧堆焊，第二层才能用电渣堆焊。

磁控带极电渣堆焊法，属浅熔深法，是电渣、电弧联合堆焊过程。靠调整焊剂成分和焊接参数控制电弧

一电渣比例，使带极两端边缘产生电弧，带极中间部位仍为电渣过程。外加磁场的目的是抵消电磁收缩力，使堆焊层表面更均匀，还能克服咬边、加宽焊道，从而提高了生产率。焊道成形好，熔深＜1mm，稀释率低到5%～8%，是一种优质、高效、低耗的新型堆焊工艺。

8. 激光表面熔涂 用激光为热源，把粘在零件表面的合金敷料熔化，与微熔的零件表面形成冶金结合的表面保护层。激光加热、冷却快，对基体热影响少，工件变形小，稀释率低，涂层组织细密，性能好。

2·2 堆焊方法特征参数比较

堆焊方法很多，几乎任何一种熔焊工艺都能用于堆焊。常用的堆焊方法主要特征参数见表6·7-2。

表6·7-2 堆焊方法特征参数比较

堆焊方法		稀释率①（%）	熔敷速率（kg/h）	最小堆焊厚度（mm）	熔敷效率（%）
氧-乙炔焰堆焊	手工送丝	1～10	0.5～1.8	0.8	100
	自动送丝	1～10	0.5～6.8	0.8	100
	手工送粉	1～10	0.5～1.8	0.2	85～95
手工电弧堆焊		10～20	0.5～5.4	3.2	65
钨极氩弧堆焊		10～20	0.5～4.5	2.4	98～100
熔化极气体保护电弧堆焊		5～40	0.9～5.4	3.2	90～95
其中：自保护电弧堆焊		15～40	2.3～11.3	3.2	80～85
埋弧堆焊	单丝	30～60	4.5～11.3	3.2	95
	多丝	15～25	11.3～27.2	4.8	95
	串联电弧	10～25	11.3～15.9	4.8	95
	单带极	10～20	12～36	3.0	95
	多带极	8～15	22～68	4.0	95
等离子弧堆焊	自动送粉	5～15②	0.5～6.8	0.2	85～95
	手工送丝	5～15	0.5～3.6	2.4	98～100
	自动送丝	5～15	0.5～3.6	2.4	98～100
	双热丝	5～15②	13～27	2.4	98～100
电渣堆焊		10～14	15～75	15	95～100

① 指单层堆焊结果。

② 钢母材上堆焊铜及铜合金可低到2%。

2·3 堆焊方法选择

堆焊方法的选择可根据堆焊材料所能制成的不同形状，各种堆焊方法的特点以及堆焊件批量、重量、材质、堆焊部位、形状及堆焊成本等因素综合考虑后决定。

批量小时一般根据能得到的堆焊材料的形状，配合厂里现有的设备进行堆焊。最常用的是手工电弧堆焊和氧-乙炔焰堆焊。批量很大时，生产率高是主要的，设备的费用在成本中比重下降。所以应根据堆焊层的要求、堆焊件的特点，参考表6·7-2最合理地选择堆焊方法。

堆焊应用范围很广，因而对堆焊层的要求差别很大。如不锈钢耐蚀层堆焊，除了对成分有要求外，还必须保证完整无缺陷，因为裂纹、夹渣等都会产生快速的局部腐蚀，从而引起灾难性的破坏。因此堆焊方法的稀释率和稳定性都得考虑。而挖土机铲斗等零件的堆焊，只要求耐磨、延长使用寿命，对气孔、裂纹等缺陷限制不严格，可以现场手工堆焊。

对于大型的，难以运输和翻转的工件，适于手工电弧堆焊或半自动熔化极气体保护电弧堆焊。对于要求堆焊部位准确的小工件，则用氧-乙炔焰堆焊或钨极氩弧堆焊。不同材质的工件对焊接线能量要求不同，如高锰钢工件不能用氧-乙炔焰堆焊，而氧-乙炔焰加热、冷

超星公司制作 请尊重作者版权

超星公司制作 请尊重作者版权

却慢。对于易裂材料的堆焊却很有利。

选择时必须综合考虑堆焊成本和堆焊件投入使用后的经济效益。堆焊成本包括人工费用、堆焊材料的成本、设备的成本和运输费用等。

第8章 钢铁的焊接[43]

1 碳钢的焊接

1·1 低碳钢的焊接

低碳钢碳的质量分数低(≤0.25%),焊接性良好。采用通常的焊接方法焊接后,接头中不产生淬硬组织或冷裂纹。只要焊接材料选择适当,便能得到满意的焊接接头性能。一般手弧焊采用J422焊条,埋弧焊采用H08焊丝匹配HJ431焊剂,CO_2保护焊采用H08Mn2Si焊丝。当母材成分中碳含量偏高或在低温下焊接大刚性结构时,也可能产生冷裂纹,故应采取预热或采用低氢型焊条(如J427)等措施。

低碳钢电弧焊焊缝金属的碳含量一般均低于母材,依靠提高焊缝中硅、锰含量和电弧焊所具有的较高的冷却速度而达到与母材等强度。由于碳含量低,焊缝的塑性、韧性和抗裂性能均良好。随着冷却速度的增加,焊缝强度提高,塑性和韧性降低。因此,厚板单层角焊缝的焊角尺寸不宜过小,多层焊时应尽量连续施焊,表面缺陷的补焊焊缝应具有一定的尺寸,长度不得过短,必要时还应采用100~150℃的局部预热。

低碳钢弧焊焊缝通常具有较高的抗热裂纹能力,但当母材碳的质量分数接近上限时(0.21%~0.25%),遇到下列情况之一有可能出现热裂纹,在施焊工艺上应采取措施,尤其是避免窄而深的焊缝成形:(1)角焊缝;(2)对接多层焊的第一道;(3)焊透整个板厚的单面单道焊缝。

沸腾钢氧含量较高,钢板厚度中心有显著偏析带,焊接时易产生裂纹和气孔,厚板焊接有时还有一定的层状撕裂倾向,时效敏感性也较大,焊接接头的脆性转变温度较高,故一般不用于承受动载或在严寒下工作的重要焊接结构。

1·2 中碳钢的焊接

中碳钢的碳的质量分数较高(0.25%~0.60%),焊接性较差,易产生淬硬组织和冷裂纹,热裂纹倾向也较大,焊接接头的塑性和疲劳强度均较低。焊接中碳钢时应选用碱性低氢型焊条,当不要求与母材等强度时,可选择强度等级低的焊条。在不允许预热时,应采用铬镍奥氏体焊条,如A102、A302等。不论采用何种焊条,均应使用小电流、低焊速和多层焊。采用铁素体焊条施焊时应预热。预热既可降低热影响区的淬硬倾向,防止产生冷裂纹,又可改善焊接接头塑性,减少接头的残余应力。焊接完毕应立即进行消除应力和改善热影响区性能的热处理,焊后热处理可提高结构的工作可靠性。如果焊后不能立即进行消除应力热处理,应在预热温度以上对工件进行后热处理,以降低焊接应力和使焊缝中的扩散氢逸出,防止出现焊接冷裂纹。

碳钢的焊接工艺见表6·8-1。

表6·8-1 碳钢的焊接工艺

钢号	板厚 (mm)	预热及层间温度 (℃)	焊条类型	消除应力回火温度 (℃)
10、Q235	≤50	无特殊要求		
20、Q235	50~100	>100	大刚度或低温环境条件下焊接,必要时采用低氢型	600~650
25	≤25	>50	低氢型	600~650
30	25~50	>100	低氢型	600~650
35	50~100	>150	低氢型	600~650
45	≤100	>200	低氢型	600~650

2 低合金高强度钢的焊接

2·1 低合金高强度钢的种类

低合金高强度钢按屈服强度 σ_s 分级，常用的钢种见表 6·8-2，表中 HQ 系列钢的数字代表钢的抗拉强度 σ_b 的级别。

σ_s=295～390MPa 级的低合金高强度钢（又称普低钢），一般在热轧或正火状态下使用，其组织为铁素体加珠光体。这类钢含有少量的合金元素，冶炼、轧制工艺简单，成本低廉。

表 6·8-2 常用低合金高强度钢

强度等级 σ_s(MPa)	热处理状态	钢号	碳当量典型值① C_E(%)
295	热轧或正火	09Mn2(Cu)②	0.36
		09MnNb	0.28
		09MnV	0.28
		12Mn	0.35
		E32(D32,A32)	0.38
345	热轧或正火	16Mn(Cu)	0.39
		16MnRe	0.39
		14MnNb	0.31
		E36(D36,A36)	0.41
		36Z	0.40
390	热轧或正火	15MnV(Cu)	0.40
		15MnTi(Cu)	0.38
		16MnNb	0.41
		14MnMoNb	0.44
		E40(D40)	0.45
440	正火	15MnVN(Cu)	0.43
		14MnVTiRe	0.41
	调质	CF60	0.40
		CF62	0.42
		HQ60	0.46
490	正火+回火	18MnMoNb	0.55
		14MnMoV(Cu)	0.50
540	正火	14MnMoVB	0.47
590	调质	12Ni3CrMoV	0.65
		12MnNiCrMoVCu	0.58
		HQ70	0.59
690	调质	14MnMoNbB	0.55
		HQ80C	0.69
785	调质	12Ni5CrMoV	0.67
880	调质	HQ100	0.65

① $C_E=C+\frac{Mn}{6}+\frac{Cr+Mo+V}{5}+\frac{Ni+Cu}{15}$，其中 C、Mn、Cr 等均指该元素的质量分数。按国标应用 w_C、w_{Mn}、w_{Cr} 等表示。

② 代表 09Mn2 和 09Mn2Cu 两种牌号，其余同。

版权所有 侵权必究

超星公司制作 请尊重作者版权

$\sigma_s \geqslant 440$MPa 级的低合金高强度钢又可分为两类，一类是 $\sigma_s = 440 \sim 540$MPa 的钢，一般经正火或正火加回火处理，组织为细晶粒铁素体加珠光体或贝氏体；另一类是 $\sigma_s = 590 \sim 880$MPa 的钢，是经淬火加高温回火处理，称调质钢，其组织为低碳回火马氏体或贝氏体。这两类钢通常具有优良的综合力学性能，用于要求高强度、高韧性及在低温或动载荷条件下工作的重要焊接结构。

2·2 低合金高强度钢的焊接特点

2·2·1 热影响区的淬硬倾向

$\sigma_s = 295 \sim 390$MPa 级的钢，合金元素含量少，碳当量低（$C_E < 0.4\%$），热影响区淬硬倾向比低碳钢稍大，只要焊接工艺选用得当，板厚在 28mm 以下可不预热。

$\sigma_s \geqslant 440$MPa 级的钢，合金元素含量多，焊接时热影响区易出现淬硬的马氏体组织，硬度明显增高，塑性和韧性降低，抗应力腐蚀性能恶化，冷裂纹倾向较大。

$\sigma_s = 440 \sim 540$MPa 级钢，其碳当量（$C_E = 0.4\% \sim 0.6\%$）较高，有一定的淬硬倾向。焊接这类钢时应根据工件厚度和接头形式的不同，调整焊接线能量和预热温度，以控制热影响区的冷却速度，保证其最高硬度不超过临界硬度值（一般为 350～450HV），以避免冷裂纹的产生。为满足临界硬度的要求，随着碳当量的增加，热影响区的冷却速度须相应降低，即焊接线能量和预热温度要相应提高。但是，过高的线能量将导致热影响区性能降低，对于晶粒长大敏感、过热倾向强的钢要特别注意。

$\sigma_s \geqslant 590$MPa 级的调质钢，碳当量一般在 0.60% 以上，有高淬硬倾向。但 12Ni3CrMoVA、12MnNiCrMoVCu14MnMoNbB、10Ni5CrMoV 等钢中碳的质量分数多数小于 0.15%，这类钢具有高的淬硬倾向，高的强度、塑性和韧性，也有较好的焊接性能。它们不要求很高的预热温度（一般不超过 200℃），焊后可不进行热处理。热影响区的良好性能是依靠形成低碳马氏体或下贝氏体组织来保证的，故焊接这类钢时有一最低冷却速度要求，实际施焊时的冷速应高于此值。如果冷却速度过低，热影响区将转变成粗大的贝氏体，这对强度和韧性都不利。但是冷却速度过大将导致塑性下降，抗裂性恶化。因此，在拟定焊接工艺时必须调整好焊件厚度、预热温度和线能量之间的关系，以便在避免冷裂纹的同时，保证热影响区有合适的冷却速度，从而达到所要求的力学性能。

2·2·2 焊接接头中的裂纹

焊接低合金高强度钢时最容易出现的裂纹是冷裂纹（包括延迟裂纹）。实践表明，在手工焊或埋弧焊焊接 18MnMoNb、14MnMoNbB 和 13Ni3CrMoV 等钢时，经常出现焊缝横向裂纹，它埋于焊缝深处或扩展到焊缝表面，大多垂直于焊缝中心线，彼此呈平行分布，有的甚至延伸到热影响区。产生这类裂纹的主要原因是焊缝中的扩散氢或焊缝金属强度过高（冷却速度也是不可忽视的因素）。为防止焊缝冷裂纹，施焊过程要严格控制低氢操作。首先是认真烘干焊条和焊剂，并注意防止吸潮；焊丝表面的锈及坡口处的潮湿、油迹等也要清除干净；其次是焊接规范参数的选择，都应力求有利于焊缝中扩散氢的逸出，如选用适当的预热温度、层间温度及焊接线能量，保持冷却速度低于临界值，必要时采用后热。

用手工电弧焊焊接上述高强度钢时，还在热影响区发现有横向、纵向或纵横混杂分布的冷裂纹。其形成原因主要是母材的淬硬倾向大，当冷却速度快时在热影响区产生了淬硬组织；此外，氢从焊缝中向热影响区中扩散对裂纹的产生也有一定影响。

某些类型的低合金高强度钢还有热裂纹倾向、热影响区液化裂纹（微裂纹）倾向、再热裂纹倾向和层状撕裂倾向等，这些裂纹的产生原因及防止措施详见本篇第 2 章 3 节。

2·3 低合金高强度钢的焊接材料

首先要根据对焊接接头的强度要求和热处理状态来选择焊接材料。在一般情况下要求焊缝强度略高于母材强度，焊接热轧钢、正火钢及焊态下使用的低碳调质高强度钢时，应选用焊后焊缝金属强度略高于或相当于母材的焊接材料，但不必追求焊缝成分与母材成分一致。对于焊后进行调质处理的接头，为保证焊缝性能与母材相当，要求焊缝金属主要合金成分与母材成分相接近，但碳含量低于母材。在焊接某些大厚度、大刚性的构件时，为防止出现焊接冷裂纹，可选用焊缝强度低于母材强度的焊接材料，即所谓的“低匹配”。必要时还可选择抗冷裂纹性能优异的奥氏体型焊接材料。

其次，即使是焊接同一种钢，当其板厚、接头形式、坡口形状及焊接线能量等不相同时，为了达到所要求的焊缝性能，所选用的焊接材料也不完全相同。对焊后进行消除应力处理的构件，为补偿焊后热处理带来的强度损失，宜选用合金含量稍高的焊接材料。

版权所有 请勿重制

低合金高强度钢焊接材料的选用见表 6·8-3。

表 6·8-3 低合金高强度钢焊接材料选用表

强度等级 σ_s(MPa)	钢号	手工电弧焊焊条	埋弧焊		电渣焊		CO_2 气体保护焊焊丝
			焊丝	焊剂	焊丝	焊剂	
295	09Mn2 09MnNb 09MnV 12Mn	J422 J423 J426 J427	H08A H08MnA	HJ431 HJ430	—	—	H08MnSi
345	16Mn 16MnRe 14MnNb EH32 EH36 36Z	J502 J506 J507 J507GR① J506CF① J507CF① TH326① TH226①	H08MnA H08Mn2 H08MnSi H10Mn2 H06MnNiA	HJ431 HJ430 SJ402 SJ301 SJ201 YD504A① HJ250	H08MnMoA H10MnSi H10Mn2	HJ360 HJ431	H08Mn2Si H08Mn2SiA HS-50T
390	15MnV 15MnTi 14MnMoNb EH40	J506 J507 J507GR J506CF① J507CF①	H08MnA H08MnSi H08Mn2 H06MnNiMoA	HJ431 HJ430 SJ301 SJ201 SJ101 HJ250 HJ350	H08Mn2MoVA H10MnMo	HJ360 HJ431	H08Mn2Si H08Mn2SiA HS-50T (Ar+φ_{CO_2}20%)②
440	15MnVN 14MnVTiRe HQ60 CF60 CF62	J556 J557 J557MoV J606 J607 J607G J607H① J607CF①	H08MnMoA H10Mn2 H10Mn2Si① H08MnMoTi①	HJ431 SJ201 SJ101 HJ350 SJ104	H10Mn2MoVA	HJ360 HJ431	H08Mn2SiA H08MnSiMo H05MnSiNi① HS-60
490	18MnMoNb 14MnMoV	J607 J607G J707 J707G	H08Mn2MoA H08Mn2MoVA H08Mn2NiMo①	HJ250 SJ101 HJ350	H10Mn2MoA H10Mn2MoVA H10Mn2NiMoA①	HJ360 HJ431	—
540	14MnMoVB	J607 J607G J707 J707G	H08Mn2MoVA H10MnMoVA①	HJ250 SJ101 HJ330 HJ350	—	—	—
590	HQ70	J707G	—	—	—	—	H08SiMnNiMo①
	12Ni3CrMoV	65C-1①	H10MnSiMoTi	HJ350	—	—	HS-70C
	12MnNiCrMoVCu	803①	H08MnNi2CrMo①	HJ350	—	—	HS-70A(Ar+φ_{CO_2}20%)

超星公司制作 请勿重作者版权

（续）

强度等级 σ_s(MPa)	钢　号	手工电弧焊焊条	埋弧焊		电渣焊		CO_2 气体保护焊
			焊丝	焊剂	焊丝	焊剂	焊丝
690	14MnMoNbB	J807A	H08Mn2Ni2CrMo①	HJ350	H08Mn2Ni2CrMo①	HJ360 HJ431	HS-80A(Ar+φ_{CO_2}20%或 φ_{O_2}2%
	HQ80C	GHH-80①	—	—	—	—	GHQ80①(Ar+φ_{CO_2}20%)
785	10Ni5CrMoV	840①	—	—	—	—	402A①(Ar+φ_{CO_2}5%)
880	HQ100	J956①	—	—	—	—	GHQ100①(Ar+φ_{CO_2}20%)

① 非标准的焊接材料。

② φ_{CO_2}为 CO_2 的体积分数。

2·4　低合金高强度钢的焊接工艺

2·4·1　焊前准备

焊前准备包括坡口加工、焊接材料准备及装配、定位焊接等。对低合金高强度钢而言，一般均采用火焰切割或碳弧气刨加工坡口，当要求坡口精度高时可采用机械加工。焊接前坡口两侧 50mm 范围内应清除水、油、锈及脏物等。焊接材料的准备主要有焊条、焊剂的烘干(表 6·8-4)，焊丝的除油、除锈，CO_2 保护气体的脱水处理等。装配时要尽可能避免强力装配，应采用与正式焊缝同一类型的焊条(强度级别可低些)进行定位焊接，必要时还需要进行预热。定位焊缝要有足够的厚度和长度，严禁在非焊接部位随意打弧。

表 6·8-4　焊条焊剂的烘干参数

焊接材料	母材强度等级 σ_s(MPa)	烘干温度 (℃)	保温时间 (h)
碱性焊条	≤390	350～400	2
	440～540	400～430	2
	≥590	430～470	2
酸性焊条	290～390	150～250	1～2
熔炼焊剂	290～790	300～450	2
烧结焊剂	290～790	300～450	2

2·4·2　焊接线能量

焊接线能量的确定主要根据防止过热区脆化和焊接裂纹两个方面，一般以前者为主，后者还可以辅之以焊前预热、后热等措施。

对于碳当量 C_E<0.4%的普通低合金钢，焊接线能量一般不予限制。当 C_E=0.4%～0.6%时，焊接线能量的下限按热影响区最高硬度不超过临界值的要求确定，上限由满足热影响区韧性的要求确定。对于 C_E>0.6%的低碳调质钢而言，其线能量的大小应与其他因素(如板厚、预热等)综合考虑来确定。上限值以热影响区能得到低碳马氏体或下贝氏体组织为条件，下限值出热影响区的塑性和抗冷裂纹性能来确定。作为参考，HQ 系列钢的最大焊接线能量列于表 6·8-5。

表 6·8-5　HQ 系列钢的最大线能量和预热温度

钢号	板厚 (mm)	预热温度(℃)			层间温度 (℃)	线能量 (kJ/cm)
		手工电弧焊	气体保护焊	埋弧焊		
HQ60	6≤δ<13	不预热	不预热	不预热	≤150	≤30
	13≤δ<26	40～75	15～30	25	≤200	≤45
	26≤δ<50	75～125	25	50	≤200	≤55
HQ70	6≤δ<13	50	25	50	≤150	≤25
	13≤δ<19	75	50	50	≤180	≤35
	19≤δ<26	100	50	75	≤200	≤45
	26≤δ≤50	125	75	100	≤220	≤48
HQ80C	6≤δ<13	50	50	50	≤150	≤25
	13≤δ<19	75	50	75	≤180	≤35
	19≤δ<26	100	75	100	≤200	≤45
	26≤δ≤50	125	100	125	≤220	≤48
HQ100	≤32	100～150	100～150	—	≤150	≤35

随着钢的碳当量和强度级别的提高，钢的热处理状态也从热轧、正火(含正火+回火)到调质，与之相适宜的焊接线能量随之降低，范围也变窄。同时，焊接线能量对焊缝力学性能和抗裂性的影响也更加显著。因此，焊接较高强度的低合金高强度钢时，焊接线能量的选择是十分重要的。

超星公司制作 请尊重作者版权

2·4·3 预热、层间温度及后热

预热可降低冷却速度，有利于扩散氢的逸出，对防止冷裂纹有明显作用；预热还可以减小焊接应力作用，与适当的焊接线能量配合也可控制接头的组织与性能。HQ 系列钢的预热温度见表 6·8-5。层间温度应等于或略高于预热温度，但预热及层间温度过高，均可能引起某些钢种的焊接接头组织与性能的恶化。后热可加速氢的扩散逸出，主要用于强度级别较高的钢种和大厚度的焊接结构。后热温度一般在 200～300℃范围内，保温时间与板厚有关，通常为 2～6h。后热也称“消氢处理”，如果施焊工艺中规定焊后要热处理，就要焊后立即进行，才能达到良好的效果。

预热及后热应在坡口两侧 75～100mm 范围内保持一个均温带。加热最好在施焊侧的背面进行，且避免火焰正对坡口中心。对调质钢要防止局部超过回火温度。

2·5 低合金高强度钢的焊后热处理

强度级别较低、厚度较小的低合金高强度钢，多数情况下不进行焊后热处理。

低合金高强度钢的焊后热处理有如下三类：

(1)消除应力处理。用于板厚较大，焊接残余内应力较高的结构，低温下工作的结构，承受动载的结构，有应力腐蚀性能要求或尺寸稳定性要求的结构。

(2)正火＋回火或正火。用于电渣焊结构，以改善接头的组织和性能。

(3)淬火＋回火(调质处理)。用于焊后要求进行调质处理的结构。

焊后热处理应注意如下事项：

(1)对于含有一定数量 V、Ti 或 Nb 的低合金钢，在 600℃左右保温易造成韧性明显下降，同时强度升高，塑性降低，此类钢应尽量避免在这一温度下保温。

(2)焊后消除应力回火的温度，一般应比母材的回火温度低 30～60℃。

(3)对于含有一定数量 Cr、Mo、V、Ti、Nb 等元素的低合金高强度钢焊接结构，消除应力处理时应注意防止再热裂纹。

(4)热处理过程中要采取措施防止结构产生变形。

常用低合金高强度钢的预热及焊后热处理温度汇总于表 6·8-6。

表 6·8-6 常用低合金高强度钢的预热及焊后热处理温度

强度等级 σ_s(MPa)	钢号	厚度 (mm)	预热温度 (℃)	焊后热处理温度(℃)	
				电弧焊	电渣焊
295	09Mn2 09Mn2Si 09MnV 12Mn	一般无厚板	不预热	不热处理	不热处理
345	16Mn 16MnR 14MnNb EH32 EH36 36Z	≤40	不预热	不热处理，或者在600～650回火	900～930正火 600～650回火
		>40	≥100		
390	15MnV 15MnTi 14MnMoNb EH40	≤32	不预热	不热处理或者在530～580回火	950～980正火 560～590或 630～650回火
		>32	≥100		
440	15MnVN 14MnVTiRe HQ60	≤32	≥50	—	—
		>32	>100		
	CF60 CF62	≤25	不预热	550～580回火	—
		>25	50～100		

超星公司制作请尊重作者版权

（续）

强度等级 σ_s(MPa)	钢 号	厚度 (mm)	预热温度 (℃)	焊后热处理温度(℃)	
				电弧焊	电渣焊
490	18MnMoNb 14MnMoV	—	≥150	600～650 回火	950～980 正火 600～650 回火
540	14MnMoVB	无厚板	≥150	—	—
590	12Ni3CrMoV 12MnNiCrMoVCu HQ70	≤35	80～120	—	—
690	14MnMoNbB HQ80C	≤25 26～50	≤100 100～130	600～630 回火	600～630 回火
785	10Ni5CrMoV	≤80	100～140	—	—
880	HQ100	≤32	≥100	—	—

3 超高强度钢的焊接

用于焊接结构的超高强度钢，主要是低合金超高强度钢和马氏体时效钢。前者通常以退火状态供货，焊后经淬火和回火处理后使用；后者通常以固溶状态供货，焊后经时效处理后使用。

此外，超高强度钢中的中合金超高强度钢和半奥氏体沉淀硬化不锈钢也用于制造焊接件。

3·1 超高强度钢的焊接特点

3·1·1 焊缝金属韧性

在焊缝金属的强度与母材相当的条件下，焊缝金属的韧性一般不及母材。这主要是焊缝金属的铸态组织及S、P等有害元素的偏析所造成的。强度级别越高，韧性降低也越多。

焊缝金属韧性低，往往是超高强度钢焊接结构低应力破坏的主要原因之一。为提高焊缝金属的韧性，首先应选用韧性高的母材和填充金属，改进冶炼方法，尽量降低焊丝中的硫、磷、氢、氧、氮等有害杂质和气体含量；其次应选择合适的焊接方法、工艺参数及热处理工艺。

焊接方法中以钨极氩弧焊为好，熔化极氩弧焊次之，手工焊及埋弧焊再次之。为减少热影响区中过热区及半熔化区韧性的下降幅度，施焊时宜采用较小的线能量并选择合理的焊接顺序。焊后热处理可在一定程度上恢复接头的韧性。

3·1·2 焊接裂纹和气孔

常见的焊接裂纹有冷裂纹、热裂纹和微裂纹。

低合金超高强度钢中碳的质量分数较高(0.25%～0.45%)，冷裂纹倾向比低合金高强度钢更大。

马氏体时效钢的碳含量极低，S、P含量也很低，故对冷裂纹不敏感，施焊时不需要预热和后热。但当焊丝中的氢的质量分数超过 5×10^{-4}%时，也有出现冷裂纹的可能性。故需尽量降低焊缝中氢的含量，必要时施以热处理去氢。

为了减少超高强度钢的焊接热裂纹敏感性，应尽量降低焊缝中S、P的含量。S、P的质量分数应分别<0.015%，总量应<0.025%。

微裂纹在超高强度钢焊接中较常见，这种裂纹实质上是焊接热影响区中的液化裂纹，分布在粗大的原奥氏体晶界上。其尺寸很小，用无损探伤方法无法检出，但用金相法可以检出。在使用过程中这种裂纹有可能继续扩展，成为低应力破坏的原因之一。

焊接气孔在马氏体时效钢焊接时较常出现。为防止气孔，除焊丝中应含有足够的脱氧剂Ti、Al外，还应避免在湿度大的环境中焊接。

3·1·3 焊缝中的元素偏析

当马氏体时效钢焊缝凝固时，在枝晶间富集Ni、Mo、Ti等元素(特别是Mo和Ti)，同时Fe和Co的浓度降低，在晶间形成很稳定的奥氏体。这种残留奥氏体的存在降低了马氏体时效钢的焊缝韧性。

超星公司制作请尊重作者版权

为减少马氏体时效钢焊缝中的残留奥氏体，通常采取以下措施：(1)调整焊丝成分，减少元素偏析；(2)采用小线能量；(3)多层焊时层间温度应小于120℃；(4)进行高温均匀化处理。

3·2 超高强度钢的焊接材料

当采用韧性高于而强度低于母材的焊缝金属时，为使焊缝与母材有同样的承载能力，必要时需采用补强接头(焊缝余高增大)；对于厚度＜5mm的薄壁结构，正常的余高即可弥补焊缝金属强度的不足。

焊接强度较低的低、中合金超高强度钢时，可采用强度与母材相当的焊缝金属，但这时需对焊缝外形进行修整，以减少缺口带来的应力集中。常用的填充金属材料列于表6·8-7。

表6·8-7 超高强度钢焊接用填充金属材料

种类	钢号	焊接用填充金属牌号
低合金超高强度钢	30CrMnSiA 30CrMnSiNi2A 32SiMnMoV 40SiMnCrMoV 45CrNiMoV(D6A-C)	H08Mn2SiA H08CrMoA H10SiMnCrMoVA H18CrMoA(或HT-3焊条) 10Cr2Mo(用于薄板) 45CrNiMoV(用于厚板)
中合金超高强度钢	40Cr5MoV(H-11)	40Cr5MoV(H-11)
半奥氏体沉淀硬化不锈钢	0Cr17Ni7Al(17-7HP) 0Cr15Ni7Mo2Al (HP-15-7Mo)	0Cr13Ni8Mo2Al(HP13-8Mo) 0Cr13Ni8Mo2Al(HP13-8Mo) 0Cr15Ni7Mo2Al(HP15-7Mo)
马氏体时效钢	00Ni18Co8Mo5TiAl 20Ni9Co5Mo2Cr2V	H00Ni18Co8Mo4Ti H08Ni7Co4MoCr

注：D6A-C——美国高碳高铬型　H——美国工具钢
HP——美国沉淀硬化不锈钢

3·3 超高强度钢的焊接工艺

3·3·1 焊前准备

1. 坡口加工 坡口形式要有助于减少焊接变形，便于施工。坡口两侧50mm内要清除油锈等脏物，20mm内应打磨至金属光泽，保持洁净。

2. 焊材准备 焊丝表面要光滑、清洁、去除油锈和拔丝润滑剂等，对要求高的要打磨至光亮。必要时对焊丝进行真空除氢处理，并保存于干燥器内随用随取。焊条、焊剂要充分烘干。

3. 装配与点固 尽量保证均匀的装配间隙，避免强力装配。点固焊应均匀、对称分布，且有足够的长度。为防止焊点开裂，可采用低强度焊接材料。不允许在焊接处以外随意打弧。

4. 焊接垫板 对接接头如须用垫板时，宜采用连续的垫板，避免缺口。用于疲劳载荷时最好去掉垫板，根部焊道须检验或作封底焊。

3·3·2 预热和后热

为避免冷裂纹，焊接低、中合金超高强度钢时，一般应预热和后热处理。预热和后热温度的选择，取决于母材的碳和合金含量及结构的刚性条件等。对碳含量较高、刚性较大的构件，预热温度应高于Ms点，层间温度和后热温度也应保持同样温度，后热时间一般为30min。这样，焊缝和热影响区组织将不转变为马氏体，而转变为贝氏体或贝氏体加少量马氏体。也可以焊后及时高温回火，使焊缝转变为回火索氏体组织。在不发生冷裂纹的情况下，预热温度可以低于Ms点，如150～250℃。当碳含量低、拘束度不大时，也可以不预热，但环境温度要适宜，焊后应进行消除应力退火。

3·3·3 焊接工艺参数

超高强度钢一般都采用低的线能量焊接。焊接马氏体时效钢时，为减少焊缝中的残留奥氏体，应采用小的线能量、高的冷却速度和低的层间温度，并选用适当的焊速。多层焊时，为减少热影响区的马氏体向奥氏体的转变，焊接道数不宜过多。

焊接工艺参数对薄板的韧性影响较大。焊接18Ni马氏体时效钢薄板时，为使焊缝和热影响区的性能得到最佳配合，焊接速度取12～18m/h为宜。

超高强度钢的焊接工艺参数举例列于表6·8-8。

表6·8-8 超高强度钢的焊接工艺举例

焊接方法	板厚(mm)	焊丝(焊条)直径(mm)	工艺参数					试验用钢	备注
			电弧电压(V)	焊接电流(A)	焊速(m/h)	送丝速度(m/h)	焊剂或气体流量(L/min)		
手工电弧焊	4	3.2	20～25	90～110	—	—	—	30CrMnSiA	—
	10	3.2 4.0	21～32	130～140 200～220	—	—	—	30CrMnSiNi2A	预热350℃ 焊后680℃回火

超星公司制作请尊重作者版权

（续）

焊接方法	板厚(mm)	焊丝（焊条）直径(mm)	工艺参数 电弧电压(V)	焊接电流(A)	焊速(m/h)	送丝速度(m/h)	焊剂或气体流量(L/min)	试验用钢	备注
埋弧焊	7	2.5	21～38	290～400	27	—	HJ431	30CrMnSiA(3层)	
	26	3.0 4.0	30～35	280～450	—	—	HJ350	30CrMnSiNi2A(13层)	
CO_2 气体保护焊	2	0.8	17～19	75～85	—	120～150	CO_2,7～8	30CrMnSi	短路过渡
	4	0.8	17～19	85～110	—	150～180	CO_2,10～14	30CrMnSi	短路过渡
TIG 焊（钨极惰性气体保护焊）	2.5	1.6	9～12	100～200	6.75	30～52.5	Ar,10～20	45CrNiMoV	预热 260℃ 焊后 650℃回火
	23	1.6	12～14	250～300	4.5	30～57	Ar14+He5	45CrNiMoV	预热 300℃ 焊后 670℃回火
	12.5	1.6	8.5～10	150～180	9～15	27～36	Ar,12	18Ni 马氏体时效钢	—

3·4　超高强度钢的焊后热处理

通常情况下，超高强度钢焊接后都要进行热处理，常用的热处理形式列于表 6·8-9。

为使强度和韧性得到良好配合，应选择适合于特定焊接接头的热处理制度，这对防止低应力破坏也极为重要。热处理时，低合金超高强度钢应防止严重脱碳。为防止工件变形，应尽量采用工装夹具。

表 6·8-9　超高强度钢常用的热处理形式

热处理形式	用途和目的	钢种举例
回火(500～700℃)	消除应力，校形，冷加工	30CrMnSiA，30CrMnSiNi2A，D6A-C，18Ni
球化退火(850～950℃)	冷加工成型，校形	D6A-C
淬火＋回火(200～300℃)	焊缝金属均匀化，获得最佳性能	18Ni，30CrMnSiNi2A
淬火(880～950℃)＋回火(480～700℃)	焊缝金属均匀化，获得最佳性能	D6A-C，30CrMnSiA
焊后＋固溶(850～900℃)＋时效(450～510℃，3h)	焊缝金属均匀化，获得最佳性能	18Ni
焊后＋时效(450～510℃，3h)	焊缝金属均匀化，获得最佳性能	18Ni

3·5　超高强度钢的焊接接头性能

超高强度钢的焊接接头性能举例于表 6·8-10。

表 6·8-10　超高强度钢焊接接头性能举例

钢号	厚度(mm)	焊条或焊丝牌号	热处理制度	σ_b(MPa)	A_{KU}(J) 20℃	−20℃	−40℃	−60℃	焊接方法
30CrMnSiA	4	HT-3/H18CrMoA	880～940℃油淬，480～550℃回火	1197	52	—	—	—	手工电弧焊
	7	H18CrMoA	880～940℃油淬，480～550℃回火	1184	62	—	—	—	埋弧焊
	2	H08Mn2SiA	880～940℃油淬，480～550℃回火	1168	56	—	—	—	CO_2 气体保护焊

（续）

钢号	厚度(mm)	焊条或焊丝牌号	热处理制度	σ_b(MPa)	A_{KU}(J) 20℃	−20℃	−40℃	−60℃	焊接方法
30CrMnSi-Ni2A	14	HT-3/H18CrMoA	等温处理 250℃回火	1265	62	—	33	—	手工电弧焊
	26	H18CrMoA	等温处理 250℃回火	1068	64	—	57	—	埋弧焊
	20	H10SiMn2CrMoVA	等温处理 250℃回火	1382	55	46	48	42	$Ar+CO_2$ 脉冲焊

4 耐热钢的焊接[44]~[46]

耐热钢分珠光体、马氏体、铁素体和奥氏体四类，具有不同的焊接特点。

长期处在高温高压和腐蚀性介质中工作的耐热钢焊接接头，除要求具有良好的室温力学性能外，还应具有良好的热稳定性、热强性和与母材相当的物理特性。

4·1 珠光体耐热钢的焊接

4·1·1 焊接特点

珠光体耐热钢是含 Cr、Mo、V、W 等合金元素总量(质量分数)在5%以下的低合金钢。焊接的主要问题是：

(1)冷裂纹。在焊接过程中碳与合金元素共同作用，使钢的奥氏体稳定性增加，冷却到较低温度时才发生马氏体转变，产生淬硬组织(淬硬程度取决于冷却速度和合金元素的含量)，使接头变脆，加之氢的有害作用，当焊接拘束度大、冷却速度快的厚壁结构时，会导致冷裂纹(包括延迟裂纹)的产生。

(2)再热裂纹。珠光体耐热钢是再热裂纹敏感的钢种，敏感温度为 500～700℃。在焊后热处理或长期高温工作过程中，在热影响区熔合线附近的粗晶粒区有时会发生这种裂纹。

(3)回火脆性。某些珠光体耐热钢焊接接头长期在 371～593℃范围内工作，会发生脆化并导致焊接构件破坏，这与钢中的 P、Sb、Sn、As 等杂质和合金元素含量有关。在铬钼钢中含 Cr 的质量分数 2%～3%的 2.25Cr-1Mo 和 3Cr-1Mo 钢焊缝具有最大脆化倾向。防止脆化主要措施是控制钢的 Mn、Si 元素和杂质的含量。当脆化系数 $X=(10P+5Sb+4Sn+As)^{10^{-2}}\leqslant 20\times10^{-5}$ 和脆化指数 $J=(Mn+Si)(P+Sn)10^4\leqslant 200$ 时，可免除回火脆性的发生。

4·1·2 焊接工艺

1. 焊接方法 主要采用埋弧焊和手工电弧焊。$Ar+CO_2$ 或 $Ar+O_2$ 的低氢 MIG 焊、药芯焊丝气体保护焊以及实心焊丝 CO_2 气体保护焊的应用日益广泛。TIG 焊广泛用于管道根部打底焊道焊接。在大截面结构中，电渣焊得到了应用。电阻、闪光、感应和摩擦对焊等方法主要用于焊接小直径管和棒材。薄壁小直径管也可采用气焊。

2. 施焊要求 焊接材料应按有关规定烘干；焊丝表面不准有锈和油污存在；坡口两侧 50mm 范围内清除油、水锈等污物；定位焊和正式施焊都应预热，预热温度和层间温度见表 6·8-11。焊件焊接完毕转至热处理前或因故中断焊接时，应采取保温措施。对刚性大的结构应进行 200～350℃保温 0.5～2h 后再进行焊后热处理。预热和后热联合采用可降低预热(层间)温度，有效防止冷裂纹产生。

3. 焊后热处理 为消除焊接应力，防止延迟裂纹和变形以及改善焊接接头综合力学性能，除薄壁管件，

表 6·8-11 珠光体耐热钢焊接预热(层间)温度和焊后回火温度 (℃)

钢号	预热(层间)温度	焊后回火处理温度 ASME Ⅷ	BS5500 非直接火压力容器(1976)	推荐温度⑤
16Mo	100～200	≥593	650～680	600～700
12CrMo ZG20CrMo	150～250 200～300	≥593	—	630～710
15CrMo ZG15Cr1Mo	150～250 150～300	≥593	630～670① 650～700②	630～710

超星公司制作 请勿重作者版权

（续）

钢 号	预热(层间)温度	焊后回火处理温度		
		ASME Ⅷ	BS5500非直接火压力容器(1976)	推荐温度⑤
12Cr2Mo1 ZG15Cr2Mo1 2.25Cr-1Mo	200～350 250～350	≥677 ≥677	630～670③ 680～720④ 710～750②	680～750 690～750
12CrMoV 12Cr1MoV ZG20CrMoV	200～300 250～350	—	—	700～740
15Cr1Mo1V ZG15Cr1Mo1V	300～400	—	—	710～740
12MoVWBSiXt	200～300	—	—	750～780
12Cr2MoWVTiB	250～350	—	—	750～780
12Cr3MoVSiTiB	300～350	—	—	750～780
25Cr2NiMoV	200～300	—	—	610～660

① 以高温特性为主。

② 以焊缝区软化为主。

③ 以抗拉强度为主。

④ 以蠕变特性为主。

⑤ 以高温抗拉强度选下限温度，以持久强度为主选中间温度，为软化焊接接头选上限温度。

一般应按表6·8-11规定的温度焊后立即回火，电渣焊或气焊焊接接头可采用正火(空冷、鼓风冷却或喷雾冷却)+回火处理。

4·1·3 焊接材料选择

选择原则是保证焊缝成分和力学性能与母材相当，常选用焊缝碳的质量分数一般≤0.12%的低氢型焊接材料焊接，以提高焊接接头的抗热裂纹、抗冷裂纹能力和韧性。精加工后或电站现场发现的铸铁缺陷修补，为减小变形简化焊接工艺和焊后不热处理，常采用E16-25-Mo6N-15(奥507)等焊条焊补[44]，焊接材料选用见表6·8-12。

表6·8-12 珠光体耐热钢焊接材料选择

钢 号	手工电弧焊		埋弧焊		气体保护焊	
	焊条牌号	焊条标准号	焊 丝	焊剂	焊丝	焊丝标准号
16Mo	R102	E5003A1	H08MnMoA	HJ350	H08MnSiMo	R10(TIG) AWSER-08S-G
12CrMo ZG20CrMo	R202 R207 R307	E5503-B1 E5515-B1 E5515-B2	H10MoCrA	HJ350 HJ250	H08CrMnSiMo H08Mn2SiCrMo	R30(TIG) AWSER-08S-B2
15CrMo ZG15Cr1Mo	R307 A507	E5515-B2 E-16-25Mo6N-15	H08CrMoA H12CrMo	HJ350 HJ260 HJ250	H08CrMnSiMo H08Mn2SiCrMo	R30(TIG) AWSER-08S-B2

能量公司制作请尊重作者版权

（续）

钢号	手工电弧焊		埋弧焊		气体保护焊	
	焊条牌号	焊条标准号	焊丝	焊剂	焊丝	焊丝标准号
12Cr2Mo1 ZG15Cr2Mo1	R407	E6015-B3	H08Cr2Mo1 H08Cr3MoMnSi	HJ350 HJ260 HJ250	H08Cr2Mo1A H08Cr3MoMnSi H08Cr2Mo1MnSi	— AWS ER90S-B3 TIG-R40
2.25Cr-1Mo	R407 R407B	E6015 B3	H08Cr2Mo1 GR-H13Cr2Mo1A	HJ350 SJ603	H08Cr2Mo1A	—
12CrMoV 12Cr1MoV ZG20CrMoV	R317 A507	E5515 B2 V E16-25-Mo6N 15	H08CrMoVA	HJ350 HJ250	H08Mn2SiCrMoV H08CrMoVA	— GB1300—77
15Cr1Mo1V ZG15Cr1Mo1V	R327 R337 A507	E5515-B2-VW E5515-B2-VNb E16-25-Mo6N-15	—	—	CB-08X1M1ГСФA①	—
12MoVWBSiXt	R327 R337	E5515-B2-VW E55-15-B2-VNb	—	—	—	—
12Cr2MoWVTiB	R347	E5515 B3 VWB	—	—	—	—
12Cr3MoVSiTiB	R417 R407VNb	E5515-B3-VNb	—	—	—	—

① 原苏 CO_2 焊丝，成分的质量分数(%)：C≤0.1、Si0.6～0.9、Mn1.3～1.5、Cr1.25～1.35、Mo0.7～1.6、V0.25～0.4。

4·1·4 珠光体耐热钢焊接接头性能

高温瞬时拉伸性能和蠕变断裂性能是高温焊接构件强度设计的基本依据。表 6·8-13 列出了常用珠光体耐热钢焊条熔敷金属的室温和高温瞬时抗拉强度值。表 6·8-14 列出了焊缝金属和焊接接头持久强度和热强系数。

表 6·8-13 常用珠光体耐热钢焊条熔敷金属的室温和高温瞬时强度

焊条型号	牌号	试验温度(℃)	σ_b (MPa)	δ_5 (%)	ψ (%)	热处理状态
E5515-B1	R207	室温	588	25.3	76.6	700℃ 2h 回火
		450	514.5	21.3	78.1	
		500	451.8	23	74	
E5515-B2	R307	室温	627	29.7	75.3	700℃ 2h 回火
		450	535	20	75	
		500	496.9	22.7	75	
E5515-B2 V	R317	室温	672	23.7	74.7	720℃ 4h 回火
		500	514.5	21.3	78	
		550	455.7	21.3	79.8	
E5515-B2-VW	R327	室温	699.7	23.2	70	730℃ 4h 回火
		570	470.4	16.8	69	

超星公司制作 请尊重作者版权

（续）

焊条型号	牌号	试验温度(℃)	σ_b (MPa)	δ_5 (%)	ψ (%)	热处理状态
E5515-B2-VNb	R337	室温	695.8	24.6	75.8	740℃ 4h 回火
		570	441	18.5	89	
E6015-B3	R407	室温	619	26	758	740℃ 4h 回火
		500	452.6	21	77.2	
		570	417.6	24.7	81	

表 6·8-14 珠光体耐热钢焊接接头的持久强度和热强系数[46]

钢号	试验温度(℃)	持久强度 σ_{10^5}(MPa)			热强系数① (K_w)	断裂部位
		焊缝	接头	母材		
12CrMo	510	—	113	134	0.85	热影响区
ZG20CrMo	510	108	113	108	1	母材
	530	69～78	78	78	1	母材
	550	59	59～64	59	1	母材
2.25Cr-1Mo	540	—	88	96	0.92	—
12Cr1MoV	540	—	68～78	95～108	0.77	—
ZG20CrMoV	525	137～167	137～167	137～167	1	熔合区
	540	137	108	137	0.8	母材热影响区
ZG15Cr1Mo1V	565～570	93～98	78～83	88～127	0.78	母材热影响区
	580	83	64	76～108	0.7	
15Cr1Mo1V (锻件)	565～570	98	79～93	88～127	0.85	母材热影响区
	580	83	69～74	74～93	0.85	
12Cr2MoWVB	600	—	74	108	0.69	—
	620	—	58.8	76	0.77	
12Cr3MoVSiTiB	600	—	70	76	0.77	—
	620	—	54	66	0.81	

① 热强系数(K_w)系指焊接接头持久强度与母材持久强度之比。

4·2 马氏体耐热钢的焊接

4·2·1 焊接特点

马氏体耐热钢包括含 w_{Cr}[⊖]5%～9%中铬钢和大部分含 w_{Cr}≥12%的高铬钢(由具体化学成分而定)。这类钢比珠光体耐热钢具有更大淬火倾向，热导性差，更易产生冷裂纹(包括延迟裂纹)。含 Mo、V、W 等元素的 w_{Cr}≥12%钢有较大的晶粒粗化倾向。在焊接调质状态马氏体耐热钢时，Ac_1 温度附近区出现软化带，使焊接接头高温强度下降并发生过早断裂。此外，马氏体耐热钢一般具有回火脆性倾向，焊接和热处理时都应加以注意。

4·2·2 焊接工艺

1. 焊接方法 宜优先采用超低氢或低氢焊接法，如 MIG、TIG 等，也宜电子束焊接。手工电弧焊和埋弧焊也获得了广泛应用。电渣焊的热循环有利防止冷裂纹，在厚壁结构中采用。

2. 施焊要求 焊接坡口清理和焊接材料清理烘干，如珠光体耐热钢，要求更严。预热温度范围见表 6·8-15，视钢实际的碳和合金元素含量、壁厚和焊接方法

⊖ w_{Cr}为 Cr 的质量分数。

能量公司制作 请尊重作者版权

表 6·8-15 焊接马氏体耐热钢的焊接材料、预热温度和焊后回火温度 (℃)

钢号	焊接材料	预热温度①	热处理温度①
1Cr5Mo	手工电弧焊：E_1-5MoV-15(R507)；E_1-23-13-16(A302)；E_1-23-13-15(A307)；E_2-26-21-15(A407)；E_1-16-25Mo6N-15(A507) 埋弧焊：H1Cr5Mo+HJ260 或 HJ350	250～350	720～760
	MIG 焊、TIG 焊：H1Cr5Mo 或 AWS E_R-502	200～300	
Cr6SiMo	手工电弧焊：E_1-5MoV-15(R507)；E_1-23-13-15(A307)；E_1-23-13-16(A302)；E_2-26-21-15(A407)；E_1-16-25Mo6N-15(A507) 埋弧焊：H1Cr5Mo(或 H1Cr25Ni13)+HJ260	300～400	720～760
	TIG 焊：H1Cr5Mo 或 AWS E_R-502	200～300	
1Cr9Mo	手工电弧焊：E_1-9Mo-15(R707)	250～400	720～760
	TIG 焊：AWS E_R505	200～300	
1Cr11MoV	手工电弧焊：E_1-11MoVNi-15(R807)	250～400	710～760
	TIG 焊：H08Cr11MoNiV	200～250	
1Cr12NiWMoV(F11)	手工电弧焊：E_2-11MoVNiW(R817)；E_2-11MoVNiW-15(R827) 埋弧焊：HCr12WMoV+HJ350	350～400	730～780
	TIG 焊：HCr12WMoV	200～250	
1Cr12Mo 1Cr13	手工电弧焊：E_1-13-16(G202)；E_1-13-15(G207)；相当 E_1-13-15(G217)；E_0-19-10-16(A102)；E_0-19-10-15(A107)；E_0-18-12Mo2-16(A202)；E_0-18-12Mo2-15(A207)	250～350	680～730
	MIG 焊、TIG 焊：H1Cr13；H0Cr14	150～250	
2Cr13	手工电弧焊：E_1-13-15(G207)；E_0-19-10-15(A107)；E_0-18-12Mo2-15(A207)	300～400	680～730
	TIG 焊：H1Cr13；A0Cr14	200～300	

① 使用奥氏体钢焊接材料时可降低预热温度 150～200℃或不预热，焊后可不热处理。

法适当调整，但在保证不裂的情况下预热温度尽可能降低，以有利于焊接接头性能。对采用与母材相近成分的焊接接头，焊后一般应进行热处理，但焊后不应立即回火，一般应缓冷至 100～150℃、保温 0.5～2h，随后立即回火，以获得较高韧性。

4·2·3 焊接材料选择

在要求焊接接头满足热强性和抗腐蚀性时，一般应选用与母材成分相近、性能相当的马氏体类焊接材料。当焊件高温预热和热处理困难，且接头性能允许不同于母材时，可选用奥氏体钢焊接材料。焊接材料按表 6·8-15 选择。

4·2·4 马氏体耐热钢焊接接头性能

从表 6·8-16 列出的含 V、Nb 与不含 V、Nb 的 9Cr-1Mo 焊缝持久强度比较可见，V、Nb 元素对提高 9Cr-1Mo 焊缝持久强度有很大作用。

表 6·8-16 不同类型 9%Cr 钢焊缝金属持久强度 (MPa)

焊缝类型	σ_{10^4}	σ_{10^5}
9Cr-1Mo	60	25
9Cr-1MoVNb①	98	49

注：750℃，10h 回火；试验温度 600℃。

① V、Nb 的质量分数分别为 0.27%、0.03%。

表 6·8-17 列出的持久强度试验值可见，R807 焊条焊接15Cr11MoV钢的焊接接头具有与母材等强性。

表 6·8-17　15Cr11MoV 钢焊接接头持久强度

试验温度(℃)	母材			手工电弧焊接接头		
	σ_{10^4} (MPa)	σ_{10^5} (MPa)	最长试验时间(h)	σ_{10^4} (MPa)	σ_{10^5} (MPa)	最长试验时间(h)
550	192	149	2531	174	152	3773

注：母材 1050℃保温 30min 油冷，680℃2h 空冷回火，焊前 350℃预热，焊后 700℃5h 回火。

4·3　铁素体耐热钢的焊接

4·3·1　焊接特点

铁系体耐热钢系指 Cr 的质量分数 17%以上的高铬钢及部分 Cr13 型钢。这类钢焊接时不发生 $\alpha\rightarrow\gamma$ 相变，无硬化倾向，但在熔合线附近的晶粒会急剧长大使焊接接头脆化，铬含量越高，在高温时间停留越长，则脆化越严重，且不能通过热处理使其晶粒细化，在焊接刚性结构时容易引起裂纹。此外，在焊接缓冷时这类钢易出现 475℃脆性和 σ 相析出脆化而使焊接接头韧性恶化。改善铁素体耐热钢焊接性的最新方法是提高钢的纯净度，并加 Nb 和 Ti 元素来控制间隙元素(C、N)的有害作用。这种钢焊接后即使不热处理仍可获得塑性和韧性良好的焊接接头。

4·3·2　焊接工艺

1. 焊接方法　主要采用手工电弧焊和 TIG 焊，也可用 MIG 焊和埋弧焊。电渣焊和气焊因引起晶粒粗大不宜采用。

2. 施焊要求　(1)用与母材相当的焊接材料焊接刚性较大的工件时，需进行 100～200℃或 150～230℃预热，但预热和层间温度不可过高，防止过热和 475℃脆性；(2)宜用低线能量的焊接方法和规范，手工电弧焊时采用小直径焊条以直线运条并短弧焊接，避免铬氧化和氮污染；(3)焊后为消除应力，改善焊接接头塑性和抗腐蚀性能，采用 704～840℃空冷回火。

4·3·3　焊接材料选择

可选用与母材成分相当的焊接材料，也可用铬镍奥氏体钢焊条(表 6·8-18)，对要求抗高温腐蚀和抗氧化的焊接接头应优先选用与母材相近的焊接材料。

表 6·8-18　焊接铁素体耐热钢的焊接材料、预热和焊后回火温度　(℃)

钢号	焊接材料		预热层间温度③	热处理温度
	焊条	焊丝		
Cr17 Cr17Ti	E_0-17-15(G307) E_0-17-16(G302)	E_R430① E_R630①	150～230	750～800 (704～843)
Cr17 Cr17Ti	E_0-19-10Nb-16(A132) E_0-19-10Nb-15(A137)	H00Cr19Ni9 H0Cr19Ni9	不预热	不热处理
Cr17Mo2Ti	E_0-18-12Mo2-15(A207)	H0Cr19Ni11Mo3		
Cr25Ti①	E_1-23-13-16(A302) E_1-23-13-15(A307)	E_R26-1① H1Cr25Ni13	100～230	750～800 (704～843)
Cr28② Cr28Ti②	E_2-26-21-15(A407) E_2-26-21-16(A402)	E_R26-1 H1Cr25Ni20	100～230	750～800 (704～843)

① ER430、ER630 和 ER26-1 系美 AWSA·5·9 铬钢焊丝，焊时采用氩弧焊。

② 用奥氏体焊接材料焊接时不用预热和热处理，为提高塑性，Cr25Ti、Cr28 和 Cr28Ti 钢焊后也可进行热处理。

③ 预热温度随母材板厚、拘束状态和焊接材料成分而异，母材越厚，拘束应力越大选较高预热温度，使用加 Nb 焊接材料时可选较低预热温度。

4·4　奥氏体耐热钢的焊接

4·4·1　焊接特点

奥氏体耐热钢焊接的主要问题是热裂纹、475℃脆性和 σ 相脆化。防止热裂纹的措施与奥氏体耐蚀钢相同(参见本章 5·1 节)，防止脆化主要措施是：(1)焊缝中控制铁素体量⊖(2%～5%)；(2)采用低线能量焊接

⊖ 指体积分数。

版权所有 侵权必究

版权所有 重庆通用工业(集团)有限责任公司制作

工艺，焊前不预热，焊后可视需要进行强制冷却，以减少在高温下停留时间；(3)已产生475℃脆性和σ相脆化的焊接接头，可以用热处理方法消除，短时加热到600℃以上空冷可消除475℃脆化；加热到930～980℃急冷可消除σ相脆化。

4·4·2 焊接材料选择(表6·8-19)

表6·8-19 奥氏体耐热钢焊接材料选择

钢号	焊条	埋弧焊丝(焊剂)①	气体保护焊丝
0Cr19Ni9 1Cr18Ni9	E_0-19-10-16(A101)； E_0-19-10-15(A102)	H0Cr19Ni9	H0Cr19Ni9
1Cr18Ni9Ti	A112；E_0-19-10Nb-16(A132)；	H1Cr19Ni10Nb	H0Cr19Ni9Ti
0Cr18Ni11Ti	E_0-19-10Nb-16(A132)； E_0-19-10Nb-15(A137)		H1Cr19Ni10Nb H0Cr19Ni9Ti
0Cr18Ni11Nb			H1Cr19Ni10Nb
0Cr17Ni12Mo2 0Cr17Ni13Si4 0Cr17Ni13W	E_0-18-12Mo2-16(A201，202)； E_0-18-12Mo2-15(A207)	H0Cr19Ni11Mo3	H0Cr19Ni11Mo3
0Cr17Ni13W3Ti	E_0-18-12Mo2Nb-12(A212)	H0Cr19Ni11Mo3	H0Cr19Ni11Mo3
0Cr19Ni13Mo3	E_0-19-13Mo3-16(A242)	H0Cr25Ni13Mo3	H0Cr25Ni13Mo3
0Cr19Ni19WMoNbTi 0Cr14NiMo2WNb	$E_0$18-12Mo2V-15(A237)	—	—
0Cr23Ni3	E_1-23-13-15(A302)； E_1-23-13-15(A307)	H1Cr25Ni13	H1Cr25Ni13
1Cr14Ni14Si2	E_1-23-13Mo2-16(A312)		
0Cr25Ni20 1Cr25Ni20Si2	E_2-26-21-16(A402)； E_2 26-21-15(A407)	H1Cr25Ni20	H1Cr25Ni20
3Cr18Mn12Si2N 2Cr20Mn9Ni2Si2N	E_2-26-21-16(A402)； E_2-26-21-15(A407)	—	H1Cr25Ni20
1Cr15Ni36W3Ti	E_4-16-35Mo3Mn4W3Nb-15 (A607)	—	—
1Mn17Cr7MoVNbBZr	新奥917②	—	H1Mn18Cr8MoVNbBZr②

① 埋弧焊可匹配HJ260熔炼焊剂或SJ601烧结焊剂。

② 成分的质量分数(%)为：C0.05～0.12；Si0.5～0.8；Mn17～19；Cr7～9；Mo0.8～1.1；V0.25～0.45；Nb0.3～0.5；B0.05；Zr加入量的质量分数0.08。

4·4·3 奥氏体耐热钢焊接接头性能

奥氏体耐热钢焊缝金属一般均能达到与母材等强度。但由于焊缝是铸态并含有铁素体相存在，从表6·8-20所列数据可见，18-8Ti焊缝焊态的塑性和韧性比母材低，尤其当长期高温时效后塑性和韧性更明显下降。

奥氏体钢焊缝金属如焊接材料和焊接工艺选择恰当，一般均能达到与母材相等的持久强度。

表6·8-20 18-8Ti钢焊缝的瞬时拉伸性能

试样	焊缝	温度(℃)	σ_t(MPa)	σ_b(MPa)	δ_5(%)	ψ(%)	a_K(J/cm²)
母材	—	20	236	560	69	79	276
	—	650	128	394	34	65	286
焊缝	04Cr19Ni9	20	261	567	60	70	130
		650	158	370	34	49	143
	0Cr18Ni9V3Si	20	350	636	52	69	125
		650	209	476	32	51	127

表 6·8-21 1Mn17Cr7MoVNbBZr 耐热钢管子爆破持久强度

试验温度(℃)	母材			氩弧焊接头			手工电弧焊接头			气焊接头		
	σ_{10^4}	σ_{10^5}	最长试验时间(h)	σ_{10^4}	σ_{10^5}	最长试验时间(h)	σ_{10^4}	σ_{10^5}	最长试验时间(h)	σ_{10^4}	σ_{10^5}	最长试验时间(h)
	(N/mm²)			(N/mm²)			(N/mm²)			(N/mm²)		
650	149	106	3152	156	119	3303	174	139	4689	165	140	3340

以锰代镍的奥氏体耐热钢的焊接接头，从表6·8-21所列的数据可见，具有与母材相等的持久强度。

5 耐蚀钢的焊接

5·1 不锈钢的焊接

不锈钢通常按其组织特点可分为马氏体、铁素体、奥氏体、双相(主要指铁素体和奥氏体)和沉淀硬化不锈钢。

5·1·1 马氏体不锈钢的焊接

马氏体不锈钢含 w_{Cr}12%～18%、w_C0.1%。含 w_{Cr} 13%的不锈钢自高温加热后在空气中冷却，就可得到马氏体组织。当 w_C0.1%左右时(1Cr13)，淬火后为马氏体和铁素体。w_C0.2%～0.4%时(2Cr13、3Cr13、4Cr13)，淬火后全部为马氏体(C 含量为上限时，有少量碳化物)。当向 Cr17 型不锈钢加入 w_{Ni}2%时，亦可得到马氏体钢，它是硬度、韧性和耐蚀性良好结合的一个钢种(1Cr17Ni2)。

1. 马氏体不锈钢焊接特点 无论马氏体不锈钢供货状态如何，焊接接头总会形成淬硬的马氏体组织。热影响区硬度主要取决于母材的 C 含量。随着硬度的提高、塑、韧性降低，并对冷裂纹更为敏感。控制预热温度和层间温度是防止冷裂纹的最有效方法，为获得最佳接头性能，要求焊后热处理。

2. 马氏体不锈钢焊接工艺 凡用于调质状态的低合金高强度钢的焊接工艺原则均适用于马氏体不锈钢。为了防止冷裂纹发生，必须预热和保持层间温度，应处于马氏体转变开始点 Ms 和终止点 Mf 之间(200～450℃)。预热温度取决于母材 C 含量及其质量、拘束度和填充金属的成分。厚板、大刚性结构件取上限。焊后应立即进行整体或局部高温回火(730～790℃)热处理，不允许冷却至室温。为了获得足够韧性的细晶粒组织，应冷却到 150～200℃保温 2h，使奥氏体大部分转变成马氏体，然后及时进行高温回火热处理。焊接时，所用的线能量应大些，以利于减少冷裂纹倾向，但线能量的增加以不使晶粒粗化为限度。

3. 马氏体不锈钢焊接材料 通常选用与母材成分和组织相近的焊接材料，以保证与母材等强度匹配。但往往焊后要进行热处理，以改善塑、韧性。

如焊后不能进行热处理，则常选用奥氏体不锈钢或镍基合金的焊接材料，其焊缝金属的强度比母材偏低一些，但塑、韧性较高。

5·1·2 铁素体不锈钢焊接

普通铁素体不锈钢有三种类型：

(1)Cr13 型如 0Cr13、0Cr13Al、0Cr11Ti 等；(2)Cr16～19 型如 1Cr17、1Cr17Ti、1Cr17Mo2Ti 等；(3)Cr25～30 型如 1Cr25Ti、1Cr28。

普通铁素体不锈钢不含 Ni，只含少量的 Ti、Nb 或 Mo 等元素。其价格低廉，而且具有良好抗应力腐蚀性能。但是，有各种脆化倾向，抗冷裂纹和耐腐蚀性能较差，从而限制了普通铁素体不锈钢的应用。在 70 年代后，运用各种精炼技术(如 AOD、VOD)已生产出各种 C、N 极低的高纯铁素体不锈钢，基本上克服了上述各种缺点，成为一类很有发展前途的钢种。

高纯铁素体钢有四种类型：

(1)Cr18 型：如 00Cr17Ti、00Cr18Mo2Ti、00Cr19Mo2Ti；(2)Cr26 型：如 00Cr26Mo；(3)Cr28 型：如 00Cr28Mo2、00Cr28Ni4Mo2；(4)Cr30 型：如 00Cr29Mo4、00Cr29Mo4Ni2、00Cr30Mo2。

1. 普通铁素体不锈钢焊接特点

a. 冷裂倾向 Cr 的质量分数 16%以上的铁素体不锈钢焊接时，近缝区晶粒急剧长大而引起脆化，同时常温韧性较低，如接头刚性较大时，则很容易在接头上产生冷裂纹。在使用铬钢焊接材料时，往往采用低温预热以使接头处于富韧性状态下进行焊接。为了防止过热脆化，预热温度控制在 70～150℃。C 含量越高，则预热温度越高，一般为 200～300℃。

b. 焊接接头的脆化 这类钢的晶粒在 900℃以上极易粗化；加热至 475℃附近或自高温缓冷至 475℃附近，在 550～820℃温度区间停留(形成 σ 相)均使接头的塑、韧性降低。在焊接工艺上，宜采用小线能量和窄焊道进行焊接，并对层间温度要加控制。有时，在焊接时已产生 σ 相和 475℃脆化，则可采用 516℃以上短时

⊖ w_{Cr}、w_C、w_{Ni}分别为 Cr、C、Ni 的质量分数。

航星公司制作 请勿重作者版权

超星公司制作 请尊重作者版权

加热后空冷，以消除475℃脆化，也可采用加热900℃以上急冷，以消除σ相脆化。

2. 高纯铁素体不锈钢焊接特点 高纯铁素体不锈钢的C的质量分数应在0.015%以下，(C+N)的质量分数≤150×10^{-4}%。因此，比普通铁素体不锈钢具有良好抗冷裂性能和耐蚀性能，并解决了铁素体不锈钢室温脆性问题。在焊接工艺上宜采取如下措施：

(1)焊接时，必须注意防止在焊接过程中带入C、N、O杂质。可采用带背面保护的钨极氩弧焊或双层气流保护焊，并要采用高纯度氩气，以便获得高纯焊缝金属。

(2)采用含有Ti、Nb稳定化元素的高纯铁素体不锈钢焊接材料，以防止多层多道焊接时产生敏化以及焊缝金属吸收焊接气氛中的C和N后造成晶间腐蚀。

(3)高纯高铬铁素体不锈钢在含Cl^-介质中，退火状态一般不产生应力腐蚀。但是当钢或焊缝金属中Ni、Cu、Mo含量超过临界值，会造成耐应力腐蚀性能下降，并出现应力腐蚀倾向。为此对Ni、Cu、Mo要加以控制。

(4)高纯铁素体不锈钢也存在475℃脆性，其与杂质(C、N、O等)含量无关。宜采用小线能量和窄焊道进行焊接，并控制层间温度。如果发生475℃脆化，可采用消除普通铁素体不锈钢475℃脆性方法加以消除。

5·1·3 奥氏体不锈钢焊接

奥氏体不锈钢有三个系列：Fe-Cr-Ni合金(美国AISI300系)；Fe-Cr-Ni-Mn合金(美国AISI200系)以及特殊奥氏体不锈钢(00Cr20Ni25Mo4.5Cu、0Cr20Ni25Mo5等)，其中Fe-Cr-Ni合金系列不锈钢使用最多。

奥氏体不锈钢比其他类型不锈钢具有良好的焊接性。但必须正确选用焊接材料和工艺，以防止焊接接头出现热裂纹、脆化、晶间腐蚀和应力腐蚀。

1. 热裂纹 当采用奥氏体—铁素体双相焊接材料焊接奥氏体不锈钢时，热裂倾向一般不大，而单相奥氏体不锈钢的热裂倾向较大。防止热裂纹的措施有：

(1)控制双相焊缝金属中焊态的δ铁素体量[⊖]为3%～10%，经生产实践证明是十分有效的冶金措施。

(2)无论是双相还是单相奥氏体焊缝金属，尽量采用高纯焊接材料，降低S、P和低熔点杂质(Pb、Zn、Sn)。尤其对单相奥氏体焊缝金属更为必要。

(3)控制焊缝成分，在保证焊态δ铁素体含量条件下，适当提高Mn、Mo含量，而降低C、Cu含量；对单相奥氏体焊缝可加入能提高敏活能的元素如Mo、Ti、W、Ta等，适当提高C、N含量，限制Si含量。

(4)单相奥氏体不锈钢应采用碱性低氢焊条和高碱度的焊剂，最好采用烧结焊剂。

(5)采用小的线能量(小电流、高焊速)，低层间温度，焊条不摆动等工艺。

2. 脆化 某些奥氏体焊缝金属，在一定条件下可能出现475℃脆性和σ相析出脆化。防止措施和铁素体不锈钢一样。在保证抗热裂性能前提下，把δ铁素体尽量控制在下限，对含Nb、Si、Mo的焊缝金属尤为重要。在400℃以上中期工作时，当焊缝金属成分适当且δ铁素体含量[⊖]<5%可防止σ相脆化。

3. 晶间腐蚀 奥氏体焊缝金属和热影响区在经450～850℃(也称为敏化温度)保持一定时间后，在晶间析出铬的碳化物而发生晶间腐蚀倾向(贫铬理论)，防止晶间腐蚀的措施有：

(1)降低碳含量，采用超低碳的母材和焊接材料(C的质量分数≤0.03%)；

(2)采用含有适量铁素体的双相奥氏体焊接材料；

(3)加入稳定化元素Nb和Ti，其加入量(质量分数)按下式计算：$w_{Ti}\geqslant(w_C\%-0.03)\times5$；$w_{Nb}\geqslant w_C\%\times8$。Nb加入量(质量分数)不宜超过1%，否则容易产生脆化。但在强氧化性介质中易发生刀状腐蚀。

(4)焊后可进行固溶化处理或稳定化处理。固溶化处理仅适用于热处理后不再经受450～850℃加热的结构。稳定化处理仅适用于含稳定化元素(Ti、Nb)的不锈钢。

(5)采用热量集中的焊接方法，小的线能量，多道焊，焊接过程中强使接头快冷，接触腐蚀介质的焊缝应在最后进行焊接等工艺措施。

4. 刀状腐蚀 刀状腐蚀是晶间腐蚀的一种特殊形式。发生在紧邻焊缝的过热区中，呈窄而深并类似刀切形状。它只是出现在含稳定化元素的不锈钢中。高温过热(>1200℃)和随后中温敏化(450～850℃)的顺序加热是产生刀状腐蚀的必要条件。防止措施除上述防止晶间腐蚀的措施外，最有效的方法是采用超低碳或钛碳比和铌碳比高的母材。

5. 应力腐蚀 奥氏体不锈钢焊接接头除晶间腐蚀和刀状腐蚀外，在拉应力和某些特定腐蚀介质(Cl^-、H_2S水溶液、海水、H_2SO_4)共同作用下，存在应力腐蚀裂纹(SCC)倾向。尤其是焊接接头对高浓度的氯化物溶液、热水和高温水更为敏感。减缓或防止接头SCC

⊖ 指体积分数。

超星公司制作请尊重作者版权

的措施有：

(1)选择含 Ni 量高的母材及其焊接材料(SCC 的敏感性：0Cr18Ni10>1Cr18Ni12>Cr25Ni20)。

(2)选用铁素体含量高的奥氏体不锈钢和焊接材料。

(3)选择产生较小残余应力的焊接方法、焊接次序和工艺参数，并要防止热影响区粗晶化。

(4)防止不锈钢表面碰伤和焊接接头表面质量较差(咬边、弧疤、未焊透和成形不良等)。

(5)焊后热处理消除残余应力是十分重要的工艺措施。

5·1·4 双相不锈钢(铁素体—奥氏体)的焊接

所谓双相不锈钢，是指钢的组织中主要由两种相组成，且每种相都占较大的体积比。这不同于一种主相中分布着微细第二相的两相结构。通常实用双相不锈钢是由铁素体和奥氏体两相组成，铁素体的体积分数不少于50%。

双相不锈钢含有 w_{Cr}[⊖] 17%～30%和 w_{Ni} 3%～10%，大约 w_{Mn}0.5%～2.0%和 Si(主要用于冶炼时的脱氧)，其中一些还含有 Mo、Cu、Nb(Ti)等元素。大部分双相不锈钢含有低的 w_C0.08%。有的还加入 N。

由于双相不锈钢组织的性能特点，使它与奥氏体不锈钢比较时具有较低的热裂倾向，而与铁素体不锈钢相比较时，则焊后具有较低的脆化倾向，而且焊接热影响区铁素体相的粗化程度也较低。双相不锈钢的相比例与加热温度有密切关系，焊接时会产生明显的相比例变化，有的甚至会完全变成单相铁素体组织，而失去双相不锈钢的固有特性。焊接时发生的 γ→α 相转变是造成焊缝力学性能、耐蚀性能(晶间腐蚀、应力腐蚀、点蚀等)发生变化的最主要的原因。其次，焊接时碳化物和金属间相的析出也是原因之一。为此，控制母材和填充金属的成分以及焊接工艺参数就可使接头形成足够数量的 γ 相，从而保证焊缝具有足够的力学性能和耐蚀性能。

双相不锈钢仍然具有高铬铁素体不锈钢的各种脆性倾向，防止脆化措施和铁素体不锈钢一样。另外，使用温度受到限制。

5·1·5 沉淀硬化不锈钢焊接

沉淀硬化不锈钢是在各类不锈钢中通过单独或复合加入硬化元素而获得高强度、高韧性、高耐蚀性的一类不锈钢。

1. 马氏体沉淀硬化不锈钢焊接 由于 C 含量低，焊接接头不易产生冷裂纹，故不需进行预热和焊后热处理。

焊接材料的选择取决于对焊缝性能的要求，若要求焊缝韧性好，可选用韧性好的 Cr-Ni 奥氏体不锈钢焊接材料，若要求焊缝性能与母材相当，则应选用与母材成分相同的焊接材料进行焊接。

17-4PH 钢进行单道焊时，焊缝经时效处理可获得良好性能。若进行多道焊，焊后应先固溶化退火处理再进行时效。

2. 半奥氏体沉淀硬化不锈钢焊接 本类型钢的焊接可采用与奥氏体不锈钢相同的焊接工艺。焊接材料同样取决于对焊缝性能的要求。在采用与母材成分相同的焊接材料进行焊接时，焊缝中将出现大量 δ 铁素体，造成韧性下降。为控制焊缝中的 δ 铁素体，可适当调整焊接材料成分，如降低铬或提高镍。此外焊接时应采用惰性气体进行严格保护以防焊丝中铝的氧化。

3. 奥氏体沉淀硬化不锈钢焊接 本类钢无论采用何种热处理，在室温都为奥氏体组织。由于在退火状态下奥氏体组织中含有大量硬化元素，使焊后的焊缝和热影响区容易出现裂纹。A286 钢(w_C0.05%、w_{Cr} 14.8%、w_{Ni} 25.2%、w_{Mo} 1.30%、w_{Ti} 2.75%、w_{Al} 0.02%、w_V0.28%、w_B0.004%)比一般奥氏体不锈钢的工艺焊接性要差，因钢中含有较高的铝、钛，在焊缝中容易产生热裂纹。若采用钨极氩弧焊或控制线能量，可减轻热裂倾向。

17-10P 钢(w_C0.12%、w_{Cr} 17%、w_{Ni} 10%、w_P0.30%)因含磷高，在焊接时，焊缝易产生裂纹，若使用与母材成分不同的焊丝(如 AISI300 系)可进行良好焊接。

5·2 不锈钢焊接方法

用各种熔焊方法焊接不锈钢的适用性见表6·8-22。

表 6·8-22 各种熔焊方法的适用性

焊接方法	材料			一般适用板厚 (mm)
	马氏体钢	铁素体钢	奥氏体钢	
手工电弧焊	Ⅱ～Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ～Ⅰ	>1.5
钨极氩弧焊	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	0.5～3
熔化极氩弧焊	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	>3
埋弧焊	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ	>6
等离子弧焊			Ⅰ	2～8
微束等离子弧焊			Ⅰ	0.1～1
电子束焊			Ⅰ	5～60
气焊	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	<2

注：Ⅰ表示适用；Ⅱ表示较适用；Ⅲ表示很少应用。

⊖ w_{Cr}、w_{Ni}等分别为 Cr、Ni 等的质量分数。

超星公司制作 请尊重作者版权

5·3 不锈钢焊接材料的选用

焊条多采用钛钙型。与低氢型不锈钢焊条的主要区别在于钛钙型药皮中含碳酸盐少，焊接时焊缝增碳量小，因而焊缝抗晶间腐蚀性能好。

焊接材料选用举例见表 6·8-23。

表 6·8-23 焊接材料选用表

钢种	钢号	焊条		氩弧焊焊丝	预热及层间温度(℃)	焊后热处理	选择原则
		国标	牌号				
马氏体不锈钢	1Cr13 2Cr13	E1-13-16	G207 G357	H0Cr14 HS357	300～350	700～750℃空冷	耐蚀、耐热
		E0-19-10-15 E0-18-12Mo2-15	A107 A207	H0Cr21Ni10 H0Cr18Ni 12Mo2	200～300 200～300	—	高塑韧性
	1Cr17Ni2	E0-17-15	G367M	HS367M	300～350	700～750℃空冷	耐蚀、耐热
		E0-19-10-15 E0-18-12Mo2-15	G307 A107 A207	H0Cr21Ni10 H0Cr18Ni 12Mo2	200～300 200～300 200～300	—	高塑韧性
铁素体不锈钢	0Cr13	E0-13-16 E0-13-15	G202 G207	H0Cr14	—	700～760℃空冷	耐蚀、耐热
		E0-19-10-15 E0-18-12Mo2-15	A107 A207	H0Cr21Ni10 H0Cr18Ni 12Mo2	—	—	高塑韧性
	1Cr17 0Cr17Ti 1Cr17Ti	E0-17-15	G307	H1Cr17	70～150	700～760℃空冷	耐蚀、耐热
		E0-19-10-15 E0-18-12Mo2-15	A107 A207	H0Cr21Ni10 H0Cr18Ni 12Mo12	70～150	—	高塑韧性
	1Cr17Mo2Ti	E0-17-15	G307	H1Cr17	70～150	700～760℃空冷	耐蚀、耐热
		E0-19-10-15 E0-18-12Mo2-15	A107 A207	H0Cr21Ni10 H0Cr18Ni 12Mo2	—	—	高塑韧性
	1Cr25Ti	E0-19-10-15 E0-18-12Mo2-15	A107 A207	H0Cr21Ni10 H0Cr18Ni 12Mo2	—	—	高塑韧性
	1Cr28	E2-26-21-15	A407	H0Cr26 Ni21	—	—	高塑韧性

钢种	钢号	焊条		氩弧焊焊丝	埋弧焊	
		国标	牌号		焊丝	焊剂
奥氏体不锈钢	0Cr18Ni9 0Cr19Ni9	E00-19-10-16	A002	H00Cr21Ni10	H00Cr21Ni10	HJ260 SJ601
	0Cr18Ni9Ti 1Cr18Ni9Ti	E0-19-10-16 E0-19-10Nb-16	A102 A132	H0Cr20Ni10Ti H0Cr20Ni10Nb	H0Cr20Ni10Ti H0Cr20Ni10Nb	HJ172

超星公司制作 请尊重作者版权

（续）

钢种	钢号	焊条		氩弧焊焊丝	埋弧焊	
		国标	牌号		焊丝	焊剂
奥氏体不锈钢	0Cr18Ni11Nb 1Cr18Ni11Nb	E0-19-10Nb-16	A132	H0Cr20Ni10Nb	H0Cr20Ni10Nb	HJ172
	0Cr18Ni12Mo2Ti 1Cr18Ni12Mo2Ti	E00-18-12Mo2-16	A022	H00Cr19Ni12Mo2	H00Cr19Ni12Mo2	HJ260 HJ172 SJ601
	0Cr18Ni12Mo3Ti 1Cr18Ni12Mo3Ti	E00-18-12Mo2-16 E0-18-13Mo3-16	A022 A242	H00Cr19Ni12Mo2 H0Cr20Ni14Mo3	H00Cr19Ni12Mo2 H0Cr20Ni14Mo3	HJ260 HJ172 SJ601
	00Cr17Ni14Mo2	E00-18-12Mo2-16	A022	H00Cr19Ni12Mo2	H00Cr19Ni12Mo2	HJ260 HJ101 SJ601
	00Cr17Ni14Mo3 00Cr19Ni13Mo3	E00-18-12Mo2-16	A002	H00Cr19Ni12Mo2	H00Cr19Ni12Mo2 H0Cr20Ni14Mo3	HJ260 HJ172 SJ601
	00Cr18Ni14Mo2Cu2	E00-19-13Mo2Cu2-16	A032	—	—	—
	0Cr18Ni18Mo2Cu2Ti	—	A802	—	—	—
	00Cr18Ni10	E00-19-10-16	A002	H00Cr21Ni10	H00Cr21Ni10	SJ601
双相不锈钢	00Cr18Ni5Mo3Si2	E1-23-13-16	A002Si A302	H1Cr24Ni13	H1Cr24Ni13	HJ260 HJ172 SJ601
	0Cr21Ni5Ti 1Cr21Ni5Ti	E0-19-10-16	A102	H0Cr20Ni10Ti	—	—
	00Cr25Ni5Mo2	E00-19-10-16	A002	H00Cr21Ni10	—	—
沉淀硬化不锈钢	0Cr17Ni4Cu4Nb	E0-16-5MoCu4Nb	G347 CuNb	HS347CuNb	—	—

不锈钢焊接材料的熔敷金属和焊缝金属的组织可利用 Schaeffler 组织图(图 6·8-1)来估算。为考虑氮的影响和更精确地估算组织时，可查 Delong 焊缝组织图(图 6·8-2)。

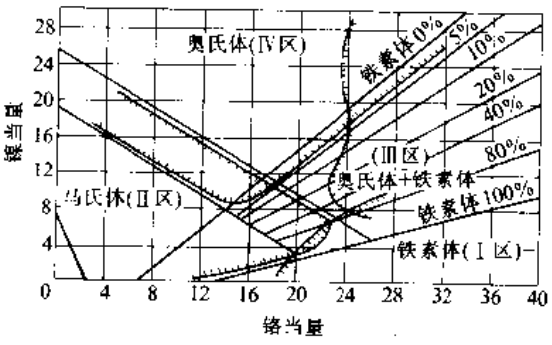


图 6·8-1 Schaeffler 熔敷金属组织图
区域Ⅰ：发生晶粒粗大，脆化和室温低韧性
区域Ⅱ：在正常冷却条件下，焊缝金属出现马氏体
区域Ⅲ：在 650～850℃焊缝金属可能出现 σ 相
区域Ⅳ：有热裂倾向
镍当量 $=w_{Ni}\%+30\times w_C\%+0.5\times w_{Mn}\%$
w_{Ni}、w_C、w_{Mn}分别为 Ni、C、Mn 的质量分数
铁素体量指铁素体的体积分数

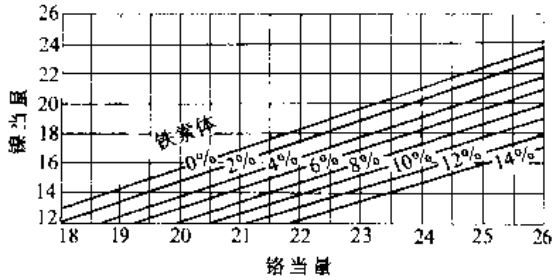


图 6·8-2 Delong 焊缝组织图
铬当量 $=w_{Cr}\%+w_{Mo}\%+1.5\times w_{Si}\%+0.5\times w_{Nb}\%$
镍当量 $=w_{Ni}\%+30\times w_C\%+30\times w_N\%+0.5\times w_{Mn}\%$

5·4 不锈钢焊接接头形式及焊接工艺参数

不锈钢手工电弧焊、埋弧焊和钨极氩弧焊的接头形式和坡口尺寸，基本上与碳钢的相似。钨极氩弧焊单面封底焊(包括管子对接焊)时，为便于焊透宜用大坡口角度和小钝边。不锈钢埋弧自动焊时，由于熔深较浅，坡口钝边宜小；双面焊时，反面清根必须彻底。不锈钢焊条焊接电流应比碳钢小 20%左右。不锈钢管子氩

超星公司制作 请尊重作者版权

弧焊及不锈钢钢板氩弧焊和埋弧自动焊工艺参数分别 见表 6·8-24～表 6·8-27。

表 6·8-24 钨极自动氩弧焊规范

接头种类	坡口形式	管子尺寸(mm)	钨极直径(mm)	层次	焊接电流(A)	电弧电压(V)	焊接速度(s/周)	填充丝直径(mm)	送丝速度(mm/min)	氩气流量(L/min)	
										喷嘴	管内
管子对接(全位置)	管子扩口	φ18×1.25	2	1	60～62	9～10	12.5～13.5	—	—	8～10	1～3
		φ32×1.5	2	1	54～59	8～9	18.6～21.9			10～13	1～3
	V形	φ32×3	2～3	1	110～120	10～12	24～28	—	—	8～10	4～6
			2～3	2～3	110～120	12～14	24～28	φ0.8	760～800	8～10	4～6
管板	管子开槽	φ13×1.25	2	1	65	9.6	14	—	—	7	—
		φ18×1.25	2	1	90	9.6	19			7	

表 6·8-25 钨极自动脉冲氩弧焊规范

接头种类	坡口形式	管子尺寸(mm)	钨极直径(mm)	层次	平均电流(A)		频率(s^{-1})	脉冲宽度(%)	焊接速度(s/周)	氩气流量(L/min)	
					基本	脉冲				喷嘴	管内
管子对接	管子	φ8×1	1.6	1	9	36	2	50	12	6～8	1～3
	扩口	φ15×1.5	1.6	1	27	80	2.5	50	15	6～8	1～3
管子管板	管板开槽	φ13×1.25	2	1	8	70～80	3～4	50	10～15	8～10	
		φ25×2	2	1	25	100～130	3～4	50～75	16～17	8～10	

表 6·8-26 对接熔化极脉冲氩弧焊规范

板厚(mm)	坡口形式	层次	焊丝直径(mm)	平均电流(A)		电压(V)		焊接速度(m/h)	气体流量(L/min)	
				基本	脉冲	脉冲	电弧		Ar	CO_2
6	I形	1～2(正反各1)	1.6	40～50	120～130	34	28～29	15～18	25～29	3.5～4.0
8	V形	1～2(正反各1)	1.6	40～50	130	36	32	14～18	25～29	3.5～4.0

注：脉冲频率 $50s^{-1}$，焊丝 0Cr18Ni9。

表 6·8-27 埋弧自动焊规范

板厚(mm)	坡口形式	焊丝		焊剂	正面焊缝			反面焊缝		
		牌号	直径(mm)		电流(A)	电压(V)	速度(m/h)	电流(A)	电压(V)	速度(m/h)
6	I形	H0Cr19Ni9Si2	3.2	HJ260	250～300	32～34	36	450	32～34	36
12	V形	H0Cr19Ni9Ti	4	SJ601	450～500	34～36	30～32	600	34～36	28～32
16	X形	H0Cr19Ni9V3Si2	4	HJ260	550～600	34～38	20～24	550～600	34～38	20～24
65	U形	H0Cr19Ni9	4	HJ260	480～520	36～38	26～30	550～600	36～38	25～26

5·5 低合金耐蚀钢的焊接

5·5·1 低合金耐蚀钢的焊接特点

低合金耐蚀钢的焊接除与普通低合金结构钢的焊接有相同点外，还具有一些不同的特点。

1. 耐大气和耐海水腐蚀低合金钢 为了提高抗大气及海水腐蚀性能，用 P 和 Cu 合金化较为有效。如同时有 Cr 则效果更好。普通含 Cu 钢，在 Cu 的质量分数不超过 0.5%并限制 P 含量，即使 C 的质量分数高达 0.2%，其工艺焊接性还是比较好的。对含 P 低合金耐蚀钢，C 的质量分数一般控制 0.12%以下，并且(C+P)的质量分数≤0.25%，以便防止焊缝中形成结晶裂纹和热影响区冷裂纹以及接头塑、韧性降低。焊缝金

超星公司制作请尊重作者版权

属可以用P合金化(如J507CuP),也可以不用P合金化(如J507CuNi)。为了保证接头焊接质量,尽可能避免在大拘束度条件下焊接和采用小的焊接线能量。至于同时含有Al的低合金钢,其焊接性主要是近缝区的"铁素体带"脆化。

2. 耐硫化物腐蚀低合金钢 含Al低合金钢焊接时(12CrMoAlV,15Al3MoWTi)的淬硬倾向很小,焊前不需预热,焊后一般也不需热处理。但存在以下两个问题:

a. 焊缝合金化问题 为了能同母材抗腐蚀性能相匹配,焊缝也应含较多的Al。因此造成焊缝增Si和增C,导致焊缝性能的恶化。为此提出两种合金化方法:一种是不含Al的Mo系铁素体—珠光体钢焊缝(如J507Mo);另一种是含Al的高锰奥氏体—铁素体钢焊缝(如TS607焊条,适用含Al的质量分数2%~3%的耐蚀钢),所以,焊缝的成分与母材有很大差别。

b. 近缝区"铁素体带"脆化问题 在焊缝成分与母材不同的情况下,焊后在熔合线的母材侧,常出现一条"铁素体带",实际上它是一个脱碳层,使塑性和韧性急剧降低。这种"铁素体带"很难通过焊后热处理加以消除。采用小的焊接线能量进行焊接,可以减轻熔合线的过热,使"铁素体带"变窄。

3. 耐硫酸露点腐蚀低合金钢 09Cu和09CuWSn低合金钢,其Cu的质量分数分别为0.35%和0.5%,其C的质量分数均控制在0.12%以下,09CuWSn钢中的Sn的质量分数又控制在0.4%以下(Sn的质量分数≤0.4%时,热裂纹没有太大影响),所以该两种钢具有良好的焊接性。

4. 耐氢、氮、氨腐蚀的低合金钢 12CrAlMoV和12SiMoVNbAl是含Al低合金钢,而10MoWVNb是珠光体耐热钢,其焊接特点分别见相应钢种的有关介绍。

5. 耐盐卤腐蚀低合金钢 10CrMoAl和10Cr2MoAlRE属于珠光体耐热钢。该类钢焊接时,如果冷却速度较大则易形成淬硬组织,在较大的拘束应力时,常产生冷裂纹。预热使接头的冷却速度,特别是低温阶段的冷却速度减缓,使热影响区不易形成淬硬组织,能有效地防止冷裂纹发生。该类钢由于二次硬化元素的影响,在焊后热处理过程中有再热裂纹的倾向。

5·5·2 低合金耐蚀钢的焊接材料

低合金耐蚀钢大部分有相应的配套焊条(表6·8-28)。有的钢种无专用焊条,暂用Cr-Ni不锈钢焊条进行焊接。因此,将产生异种钢焊接和热处理时的一些问题(如稀释、马氏体组织、碳迁移),而导致熔合区塑性和韧性下降。为此,应从焊接材料和工艺采取措施,以保证焊接接头的质量。与低合金耐蚀钢相配套的埋弧自动焊焊丝和焊剂尚不多,暂用H08A、H08MnA、H10Mn2、H08CuWSn、H08CrMoVA等焊丝配HJ431、HJ401、SJ101、SJ401、HJ250、HJ350等焊剂。为了保证合金元素的过渡,减少焊缝中的非金属夹杂物,提高焊缝的塑、韧性应选用氧化性较弱的碱性焊剂,如HJ250、HJ350等。

表6·8-28 低合金耐蚀钢焊接材料及应用

低合金耐蚀钢种	钢号	焊接材料		应用
		焊条	焊丝+焊剂	
耐大气腐蚀低合金钢	16MnCu 16CuCr 12MnCuCr 15MnCuCr 09CuP 09CuPCrNi-A 09CuPCrNi-13 09MnCuPTi(Re)	J502NiCu,J507NiCu 无P系(如J502NiCu) 有P系(J507CuP) 无P系 有P系(如J507CuP) J507CrNiCu,J507CrNi J506FeWCu,J506NiCu, J506WCu J502NiCu,J502WCu	H08MnA+HJ431 H10Mn2+SJ401	铁路车辆,近海工程,桥梁海洋结构
	10MnPNbRe 08CuPVRe	J507CuP,J507NiCuP J502WCu,J506WCu	H08MnA+HJ431 HJ401	

超星公司制作 请尊重作者版权

（续）

低合金耐蚀钢种	钢号	焊接材料		应用
		焊条	焊丝+焊剂	
耐海水腐蚀低合金钢	10MnPNbRe 10CrMoAl 10NiCuP 08PVRe	J507CrNi J502CuP J507NiCuP J507MoNbRe	H08MnA+HJ431 HJ401	海洋结构，海水管道，海洋船舶钢桩，闸门，海水冷凝器
耐硫化物腐蚀低合金钢	12CrMoAlV 12AlMoV 15Al3MoWTi 15MoVAl	J507Mo，J507Nb TS607，A307 J507MoNb	—	石油天然气工业，以油气为原料的化学工业
耐硫酸露点腐蚀低合金钢	09Cu 09CuWSn	J507CrCu SD-1，JW 1	H08CuWSn+HJ250 HJ350	燃油锅炉，空气预热器，稀硫酸、盐酸装置
耐 H、N、NH_3 腐蚀低合金钢	10MoWVNb 12Cr2AlMoV 12SiMoVNbAl	J507MoNi R317 J507MoNb A302，A312，A132	H08CrMoVA+HJ350	石油、化工高温高压设备 抗 H_2S-H_2O 应力腐蚀石油裂化加热炉管，塔内构件
耐盐卤腐蚀低合金钢	10CrMoAl 10Cr2MoAlRe Cr2AlMoNiCu Cr4AlMoNiCu	J507CrNi J607Cr A102，A302	—	制盐工业、蒸发罐加热管

6 低温钢的焊接

低温钢按组织分为铁素体、低碳马氏体和奥氏体三种类型。

6·1 低温钢的焊接特点

6·1·1 铁素体低温钢的焊接

铁素体低温钢分为铝镇静钢（SLA33A、SLA33B、PG36 等）、低合金钢（16MnDR、09Mn2VDR 等）和低 Ni 钢（w_{Ni}2.5%和 w_{Ni}3.5%等）。母材组织主要是铁素体＋少量珠光体。一般在正火或调质状态下使用，使用温度为-40～-101℃。铁素体低温钢含碳低，其淬硬和冷裂倾向小，因此具有良好的抗裂性能。焊接关键是保证焊接接头的低温韧性。其 V 形缺口冲击功≥27J（单个最小值≥20J），以防止低应力脆性破坏，确保低温设备使用可靠性。

低温钢焊接时，线能量的选择是至关重要的。为避免焊缝金属和热影响区形成粗晶组织而降低低温韧性，应采用快速多层焊和尽量降低层间温度，以利于细化晶粒。埋弧焊的线能量控制在 25～50kJ/cm，而手工电弧焊为 26kJ/cm 以下。

w_{Ni}3.5%钢是靠添加 Ni，并利用热处理细化晶粒，线能量对热影响区低温韧性的影响更为敏感。因此，焊接时必须把线能量控制在较低的范围内。手工电弧焊 20kJ/cm 以下，MIG 焊接 25kJ/cm 以下。

w_{Ni}3.5%钢含碳低，淬硬倾向不显著。但是板厚在 25mm 以上时，通常预热到 100℃以上。

w_{Ni}3.5%钢当冷加工变形量超过 5%时，将可能产生应变时效，其韧性降低。因此，必须进行消除应力热处理，以便恢复韧性。

6·1·2 低碳马氏体低温钢的焊接

对于这类材料如 w_{Ni}9%钢，在淬火后为马氏体组织，正火后的组织为马氏体、铁素体及少量珠光体。经 550～580℃回火后，为含镍铁素体及约 12%～15%[㊀]

㊀ w_{Ni}为 Ni 的质量分数。

㊁ 指体积分数。

超星公司制作请尊重作者版权

富碳奥氏体。因此，在-196℃仍然具有良好的低温韧性。其焊接接头V形缺口冲击功≥34J(单个最小值≥27J)，使用温度为-101～-196℃。

从强度角度看，w_{Ni}9%钢相当490MPa级高强钢。但抗裂性却优于490MPa级高强钢，即使刚性大也不会在热影响区产生裂纹，所以焊前不需要预热。

w_{Ni}9%钢一般在调质状态下使用，如用较大线能量焊接，则热影响区的韧性低于母材。因此，线能量通常控制在45kJ/cm以下，层间温度在150℃以下。

w_{Ni}9%钢是强磁性材料，所以焊接时，尤其是采用直流电源焊接，会引起磁偏吹现象，严重时无法焊接。因此，必须把磁性控制在50T以下，否则容易产生焊接缺陷(主要是未熔合)。

w_{Ni}9%钢一般采用镍基焊接材料，其焊缝金属容易产生热裂纹，尤其是火口裂纹。所以应选用良好抗裂性能和线膨胀系数接近母材的焊接材料。哈斯特劳依比因科镍焊接材料抗热裂性能好。

6·1·3 奥氏体低温钢的焊接

一般采用的奥氏体低温钢有1Cr18Ni9、00Cr18Ni10、0Cr18Ni9Ti不锈钢。最低使用温度为-186～-269℃。

奥氏体不锈钢焊接时，容易产生热裂纹。为了防止热裂纹，焊缝组织应为双相组织(A+δ)，但为了保证低温韧性，δ相含量应严格限制，以保证焊缝金属在低温下不产生脆化。

采用小的线能量、多道焊等措施，缩短焊接区在450～850℃停留时间，以防止晶间析出铬的碳化物，确保接头低温韧性。

6·2 低温钢的焊接方法和焊接材料

常用的焊接工艺方法为手工电弧焊及埋弧焊。也可采用气体保护焊(MIG、TIG)。焊接材料选用举例见表6·8-29。

表6·8-29 低温钢焊接材料选用举例

钢种	允许使用温度(℃)	焊接方法	焊接材料	熔敷金属化学成分的质量分数(%)								熔敷金属力学性能			
				C	Si	Mn	S	P	Ni	Mo	其他	σ_t(MPa)	σ_b(MPa)	δ_5(%)	A_{KV}(J)
16MnDR(热轧)	-40	手工电弧焊	J507GR(E5015-G)	0.07	0.20	0.80	0.025	0.025	0.80	0.20	—	430	530	25	-40℃ 100
		埋弧焊	H08MnNiA+603(烧结)或HJ250	0.07	0.26	0.70	0.02	0.02	0.80	0.27	—	430	530	24	80
DG50	-50	手工电弧焊	J607Ni(E5015-G)	0.08	0.30	1.30	0.020	0.015	1.80	0.20	—	520	610	24	-50℃ 90
		埋弧焊	H10Mn2NiMoA+603(烧结)	0.06	0.16	1.40	0.020	0.010	1.0	0.60	—	660	730	20	50
09Mn2VDR(正火)	-70	手工电弧焊	W707Ni(E5515-C1)	≤0.12	≤0.60	≤1.25	≤0.035	≤0.035	2.0～2.75	—	—	440	540	16	-70℃ ≥27
		埋弧焊	H08Mn2MoVA+HJ250	≤0.10	≤0.25	1.40～1.70	<0.03	<0.03		0.45～0.65	V 0.06～0.12 Ti 0.05～0.15	≥340	≥540	≥21	-70℃ 62(A_{KU})
06MnNbDR(正火)	-90	手工电弧焊	W907Ni(E5515-C2)	≤0.12	≤0.60	≤1.25	≤0.035	≤0.035	3.0～3.75	—	—	≥440	≥540	≥17	-90℃ ≥27
w_{Ni}3.5%	-101	手工电弧焊	W107Ni	0.05	0.20	0.60	0.015	0.015	3.20	—	—	500	580	25	-101℃ 50
		埋弧焊	H05Ni3.5A+603(烧结)	0.05	0.15	0.50	0.020	0.015	3.50	—	—	430	530	26	60
		MIG	MGS-3N	0.03	0.26	1.18	0.006	0.004	4.08	0.20	—	≥470	≥570	32	130
		TIG	TGS-3N	0.03	0.29	0.70	0.008	0.008	3.50	0.16		≥490	≥570	31	78

① w_{Ni}为Ni的质量分数。

超星公司制作请尊重作者版权

（续）

钢种	允许使用温度（℃）	焊接方法	焊接材料	熔敷金属化学成分的质量分数(%)									熔敷金属力学性能			
				C	Si	Mn	S	P	Ni	Mo	其他		σ_t (MPa)	σ_b (MPa)	δ_5 (%)	A_{KV} (J)
w_{Ni}9%	−196	手工电弧焊	Ni327	0.052	0.40	4.01	Nb 3.26	Cr 15.01	余量	4.71	Fe 2.94		460	660	21.6	−196℃ 61
		埋弧焊	US-709S+PFN-3	0.03	0.12	1.20	—	1.60	余量	16.60	W 2.50	14.70	380	670	48	130
			US-709S+PFN-4	0.03	0.74	0.58	—	1.70	余量	17.20	2.70	14.90	400	690	42	83
		TIG	TGS-709S (70Ni18MoCrW)	0.02	0.01	0.01	—	2.0	余量	19.1	2.90	5.50	470	760	49	150
奥氏体不锈钢	−253	手工电弧焊	NC-318MF	0.035	0.34	5.61	—	18.56	16.71	3.01	—		370	540	46	83 −257℃ 70

6·3　低温钢的焊接工艺

应符合《钢制压力容器焊接规程》并采取以下工艺措施：

(1)焊条、焊剂使用前于350～400℃保温2h烘干；焊丝去除油锈。

(2)定位焊道长度≥40mm。

(3)焊接电流不宜过大，采用快速焊接；焊条直线运条，多层多道焊要控制层间温度。

(4)焊前预热：w_{Ni}3.5%钢要求125℃以上，w_{Ni}9%钢不预热。其余按340～410MPa级低合金钢的预热温度执行(参见本章2节)。

(5)焊后消除应力热处理：w_{Ni}3.5%钢和其他铁素体低温钢，当板厚或其他因素造成不利的焊接残余应力时，考虑采用600～650℃热处理，w_{Ni}9%钢和奥氏体低温钢一般不考虑。

(6)制造过程中，应特别注意防止碰伤材料，如碰伤应打磨修理，必要时应进行热处理；不得在非焊接部位任意打弧，可在焊缝或坡口内引弧，但引弧处应重熔，弧坑应填满；焊缝成形应良好，避免咬边；焊缝表面应圆滑过渡到母材；纵、环缝及接管、人孔处的角焊缝必须保证焊透的工艺方法或措施；当环缝不得不采用残留垫环进行单面焊时，应特别注意垫环的装配质量并在装到内壁上后，将垫环本身的对接处焊合；装配用定位块和楔子去除后，所留的焊疤等应打磨光滑并进行补焊。返修焊补工艺的制定及施焊应特别严格，避免大面积焊补。

6·4　低温钢的应用实例

铁素体低温钢一般用于制造乙烯、人造橡胶和煤化工设备中的压力容器和热交换器等。应用实例见表6·8-30。w_{Ni}9%钢主要用于液化天然气储罐。

表6·8-30　低温钢应用实例

产品名称	工作温度（℃）	工作压力（MPa）	钢种	焊接材料
30万t/年乙烯脱甲烷塔	塔顶 −100 塔底 −45	2.94	塔顶 Ni3.5% 塔底 SLA33A SLA33B	NB-3N (w_{Ni}3.5%)，NB-1 (w_{Ni}0.5%～1.0%)
30万t/年乙烯精馏塔冷凝器	管程 −40 壳程 −40	管程 2.06 壳程 0.981	管程 STBL39 壳程 SLA33A	NB-1 US255+MF38
2万t/年炼厂气分离装置乙烯蒸馏塔	−70	0.589	09Mn2VDR (正火)	特117H08Mn2MoVA+HJ250
乙烯分离器	−100	2.16	06AlNbCuN (正火)	特127A

7　铸铁的焊接[49]~[52]

铸铁是可以焊接的。只要焊接材料选用恰当、焊接工艺正确，焊接质量就可以满足技术要求。通过补焊，可以提高铸件成品率；使用中损坏的铸铁机械大部分都可以焊接修复。随着多种性能优良的铸铁焊接材料的开发应用及焊接工艺技术进步，铸铁焊接正在成为被广泛掌握的技术，铸铁已逐渐成为易焊材料。

㊀ w_{Ni}为Ni的质量分数。

超星公司制作请尊重作者版权

7·1 铸铁焊接的特点

7·1·1 产生裂纹

焊接及不适当的预热均会在铸件内产生热应力。由于铸铁塑性差，当热应力引起的拉伸应变超过其变形能力时就会产生热应力裂纹。由于铸铁在400℃以上有一定的塑性，裂纹大多产生于400℃以下，并伴随脆性断裂声。按照其产生于较低温度，可以认为是一种冷裂纹。焊补处刚度越大、焊补体积或面积越大、焊缝越长，这种裂纹越易产生。焊缝及熔合区产生严重的白口组织会增大裂纹倾向，但氢对这种裂纹影响较弱。不适当的预热会引起原来裂纹延伸甚至使母材开裂。焊缝为铸铁类型时易产生焊缝裂纹，焊缝强度高、层数多时易引起焊缝沿热影响区剥离。

用碳钢焊条焊铸铁时极易产生热裂纹，镍基焊条也有一定的热裂纹倾向。铸铁型焊缝不产生热裂纹。用碳钢焊条焊铸铁还会产生冷裂纹，其方向与焊缝垂直。

7·1·2 产生白口及淬硬组织

焊接时冷却速度远大于铸造，与母材同成分的焊缝会变成白口组织。因此，铸铁类型的焊缝必须提高碳、硅含量，有时还加入铅等元素，以提高石墨化能力。球墨铸铁焊条应选择白口倾向小甚至有一定石墨化能力的元素作为球化剂，以减小焊缝形成白口的倾向。熔合区成分较接近于母材，更难避免白口，因此焊接时还须采取工艺措施减慢高温时的冷却速度，才能防止熔合区生成白口组织。

异质焊缝电弧冷焊采用纯镍焊条可以大大减弱熔合区白口，细直径纯镍焊条"瞬间点焊"几乎可以完全消除熔合区白口组织；H08Mn2Si细丝弱规范CO_2保护焊时熔合区白口程度也较轻并呈断续状。但在采用碳钢焊条、高钒焊条焊铸铁时熔合区白口较重、较宽并连续。

冷焊时热影响区还易产生马氏体淬硬组织；碳钢焊条及铜钢焊条焊铸铁时，其焊缝内存在较严重的淬硬组织，结果也使可加工性变差。

7·2 铸铁的焊接方法及焊接材料

铸铁焊接方法及工艺要点见表6·8-31。

铸铁焊接材料及相应焊接方法特点见表6·8-32。

表6·8-31 铸铁焊接方法及工艺要点

焊接方法	工艺要点
异质焊缝(非铸铁型)电弧冷焊	采用焊缝为有一定塑性的非铸铁型的焊条，较小的焊接电流、短段焊(根据壁厚每段10～50mm)、断续焊(焊接区<60℃)、分散焊，每段焊后立即锤击使之塑性变形消除应力
同质焊缝(铸铁型)不预热电弧焊	采用焊缝为铸铁类型的焊条，较大直径及较大焊接电流连续焊，以便提高局部温度、减小冷却速度防止白口。为了防止开裂，较大面积或较长的缺陷，可采取逐段连续多层焊法
同质焊缝(铸铁型)电弧热焊气焊热焊	采用焊缝为铸铁类型的焊条或焊丝，焊前加热至550～650℃、焊接过程中>400℃、焊后500～700℃消除应力退火
同质焊缝(铸铁型)半热焊	预热300～400℃，较大电流连续焊。只适于刚度不大的部位
加热减应区焊接法	正确选定减应区，一般在裂纹两端而不在其侧、加热时间隙明显张开。用气焊火焰加热至600～700℃，焊接时保持，焊后同时冷却收缩，可以采用气焊、也可采用同质焊缝电弧焊焊接
气电焊	与异质焊缝(非铸铁型)电弧冷焊相同，低电压、小电流、浅熔深、分段焊、断续焊、锤击，但分段长度可增大；细丝弱规范可减轻熔合区白口
手工电渣焊	用耐火泥造型，用石墨电极建立渣池并预热、持续加热，将预先计算好数量的铸铁屑倒入渣池、连续施焊
钎　焊	先用机械法开钎焊坡口，预热，清除油污；用气焊火焰或其他热源加热坡口到钎焊温度进行钎焊

表 6-8-32 铸铁焊接材料及相应焊接方法特点

类别、名称	牌号	国标型号	焊缝合金类型	焊接方法	适应铸铁种类、接头 σ_b(MPa)	焊缝金属 σ_b(MPa)	熔敷金属硬度 HV	熔合区白口厚度(mm)	可加工性	抗裂性、其他特点
纯镍铸铁焊条	Z308	EZNi-1 EZNi-2	镍≥90/85 硅≤2.5/4.0	电弧冷焊	灰铸铁 147～196	240～390	120～170	0～0.2 平均 0.08	好	好，但焊球墨铸铁易裂
镍铁铸铁焊条	Z408 Z438	EZNiFe-1 EZNiFe-2 EZNiFe-3	镍 45～60 铁	电弧冷焊	球墨铸铁 294～496	390～540	150～210	0～0.25 平均 0.15	较好	好，适应多种铸铁，"－1" $w_{Si}\leqslant 2.5\%$，$w_{Mn}\leqslant 1.8\%$，"－2"、"－3" $w_{Si}\leqslant 4\%$，$w_{Mn}\leqslant 1$，$w_{Cu}\leqslant 2.5\%$，"－3" w_{Al} 1%～3%
镍铁铜铸铁焊条	Z408A	EZNiFeCu	镍 45～60 铜 7 铁	电弧冷焊	球墨铸铁	390～540	160～190	—	较好	好，适应多种铸铁，焊芯镀铜是提高石墨型药皮保存期的方法之一
镍铜铸铁焊条	Z508	EZNiCu-1 EZNiCu-2	镍 60～70 铜 镍 50～60 铜	电弧冷焊	灰铸铁 78～167	190～390	140～180	—	较好	焊缝收缩率大、易裂，但锤击效果显著可防止开裂
纯铁芯及碳钢铸铁焊条	Z112 Z100	EZFe-1 EZFe-2	碳钢	电弧冷焊	灰铸铁	—	—	0.8～1.0	很差	易产生热裂纹及剥离，熔合性好
高钒焊条	Z116 Z117	EZV	钒 8～13 钢	电弧冷焊	高强灰铸铁 球墨铸铁	538～588	200～250	0.3～0.5	尚可	较好，焊缝不产生热裂纹，但含硅高时易脆裂
铜钢焊条	Z607 Z612	—	铜～80 钢	电弧冷焊	灰铸铁 50～147	—	110～400 很不均匀	0～0.5	勉强	好；多层焊易产生气孔
灰铸铁焊条	Z208 Z248	EZC	灰铸铁	半热焊、热焊 不预热焊	普通灰口铸铁 基本等强度	170～200	150～240 与冷速有关	0～1 与工艺有关	较好、很好 与工艺有关	大刚度部位的大缺陷易裂
球墨铸铁焊条	Z258	EZCQ	球墨铸铁	预热焊	球墨铸铁	—	—	—	—	铸芯、药皮含钇基重稀土球化剂
	Z238SnCu	EZCQ	球墨铸铁	预热焊 不预热焊	多种球墨铸铁，焊后须经相应热处理，接头组织、强度、硬度匹配，焊缝塑性低			—	—	钢芯、药皮含钇基重稀土球化剂及锡、铜珠光体化元素
	Z238F	EZCQ	球墨铸铁	通常可 不预热焊	较低强度 球墨铸铁	≥500 δ 5%	—	—	可加工	较好，钢芯，药皮含铋，焊缝为铁素体、白口倾向较低
	Z268	EZCQ	球墨铸铁	通常可 不预热焊	常用球墨铸铁 σ_b、δ 达到标准	≥600 δ 5%	—	—	可加工	较好；钢芯、药皮含多量钡、钙脱氧脱硫、球化稳定、白口倾向较低

蠕墨铸铁焊条	Z288	—	蠕墨铸铁	不预热焊	蠕墨铸铁 315,δ 1.6%	381	…		可加工	较好
纯镍 蠕墨铸铁焊条	Z358	—	镍	电弧冷焊	蠕墨铸铁 298,δ 6%	352 δ 8%	—		好	好
白口铸铁 底层焊条	BT-1	—	镍铁 1∶1	电弧冷焊	白口铸铁	—	—	—	—	好，线膨胀系数与白口铸铁相近，熔合性好，须配用特殊电弧冷焊工艺
白口铸铁 工作层焊条	BT-2	—	中碳合金钢	电弧冷焊	白口铸铁	—	48～52HRC	—	—	
灰铸铁焊丝	HS401	RZC^{-1}_{-2}	灰铸铁	气焊热焊 不预热气焊	灰铸铁 等强度	—	—	—	好	大刚度长焊缝易裂
合金铸铁焊丝	—	RZCH	镍钼铸铁	气焊	合金铸铁	—	—	—	好	大刚度长焊缝易裂
球墨铸铁焊丝	HS402	$RZCQ^{-1}_{-2}$	球墨铸铁	气焊	常用球墨铸铁 接近母材		—	—	好	较好，不适于厚大件大缺陷长时间焊接，以免球化衰退
蠕墨铸铁焊丝	HS403	—	蠕墨铸铁	气焊	蠕墨铸铁 362,δ 1.7%	—	—	—	好	较好，冷速须≤9℃/s
黄铜钎料	HL103	—	黄铜	钎焊	灰铸铁 118～147	≥196	—	0	好	较好，薄壁易裂
铜锌镍锰钎料	—	—	铜锌镍锰	钎焊	灰口铸铁 >196	406～554	165～199	0	好	较好，颜色近似
低碳低合金 钢细焊丝	—	H08Mn2Si 等	钢	细丝 CO_2 焊	灰铸铁 球墨铸铁	—	—	0～0.25	较好	较好，采用弱规范电弧冷焊
高钒药芯焊丝	—	—	钒 8～13 钢	CO_2 焊	球墨铸铁 410～450	—	—	约 0.3	可	较好，底层焊后高温退火可消除熔合区白口
镍铁合金焊丝	—	—	镍 45～60 铁	Ar 弧焊	球墨铸铁	—	—	—	较好	较好

注：w_{Si}、w_{Mn}、w_{Cu}等分别为 Si、Mn、Cu 等的质量分数。

超星公司制作请尊重作者版权

7·3 灰铸铁的焊接

灰铸铁可采用多种方法进行焊接。550～650℃热焊时，铸铁因具有一定的塑性可防止产生过大的热应力，焊后又立即退火消除应力，从而可有效地防止产生裂纹；并且因冷却速度缓慢，还可避免产生白口及淬硬组织。电弧热焊及气焊热焊分别采用碳、硅总量(质量分数)为6%～6.5%的铸铁焊条Z248及焊丝RZC-1。局部加热只有在不引起过大热应力时才能采用。"加热减应区法"是加热焊接区以外的局部部位，使焊接区能够自由膨胀、收缩，从而避免大刚度部位产生过大热应力、防止裂纹的方法。铸铁型焊缝不预热焊采用碳、硅总量(质量分数)在7.6%以上并含铝等石墨化元素的Z248焊条电弧焊、RZC-2灰铸铁焊丝气焊，但硅含量的质量分数不宜多于5%，以免焊缝脆化。电弧焊时宜采用大电流连续焊工艺，以便减慢冷却速度、防止产生白口组织。灰铸铁焊条加入适量锰、钼、铜等合金元素可用于电弧冷焊，具有这种合金成分的焊缝金属在适当冷却速度时，在不同温度会发生贝氏体及马氏体相变，同时伴随发生应力松弛现象，即"相变超塑性"，从而可以防止裂纹。但焊态硬度较高，只适于非加工面，否则需高温回火。

异质焊缝电弧冷焊采用具有良好塑性的非铸铁型焊条及专门的电弧冷焊工艺：小线能量、浅熔深、短段焊、断续焊，避免局部产生过大的热应力，并随即锤击焊缝使之发生塑性变形减小应力，防止产生裂纹。锤击的力度需视铸铁材质、厚度而定，具有深坡口的厚大受力铸铁件，为了防止焊缝剥离，常采用在坡口内预置螺丝的栽丝法可有效地分散焊接应力；为了降低残余应力还可在坡口内敷设焊接垫板，大大减少熔敷金属量，从而防止剥离。为了提高大型受力铸铁机械承载能力往往还采取机械及焊接加固措施。但因工作热应力而损坏的铸铁机械不可加固，相反，应在保证承载能力的前提下减小刚度，防止工作时产生过大热应力。采用细丝CO_2保护焊亦应遵从电弧冷焊工艺要点：低电压、小电流、浅熔深、分段焊、断续焊、锤击，但规范参数及具体尺度有所不同。

钎焊时母材不熔化因而不会产生白口组织，但铸铁件薄壁处及大刚度部位钎焊时母材可能因热应力过大而开裂。

手工电渣焊适用于大型铸铁件特大缺陷的焊补，但劳动条件较差，且大刚度部位也可能产生裂纹。

灰铸铁材质的大型设备损坏后选用恰当的焊接材料和正确的焊接工艺进行修复，完全可以达到损坏前的技术性能并可长期使用。大型铸铁设备焊接修复示例见表6·8-33。

表6·8-33 大型铸铁设备焊接修复示例

设备名称	材质、质量	损坏情况	焊补方法	修复结果
160t冲床床身	灰铸铁	断裂面积1600×50(mm)	Z308加结507栽丝冷焊	使用多年
16m立车卡盘	HT200 45t	裂纹11条，最长者2200mm，壁厚40～80mm	Z408冷焊，个别处加焊接垫板	使用多年
水轮机环形接力器缸	HT300 1.6t	裂纹长1650mm 壁厚30mm	Z408冷焊	焊后逐级水压至250MPa，使用多年
大型转子铣床	灰铸铁	导轨研伤长>1000mm，宽30～50mm深2mm	Z308冷焊	用砂轮、油石打磨焊缝再研磨，使用多年

7·4 球墨铸铁的焊接

球墨铸铁具有一定的塑性，其塑性越好、热应力裂纹敏感性就越低，但是截面形状突变等大刚度部位仍易产生裂纹。球化剂一般均增大白口倾向，如果球墨铸铁型焊缝及熔合区形成了较严重的白口组织，则不仅难于机械加工而且降低力学性能，容易产生焊缝裂纹及剥离。球墨铸铁通常用于重要场合，重要部位的补焊需满足力学性能要求，因此，对球墨铸铁焊接材料的研制、生产提出了较高、较严格的要求，选用时亦应慎重。

7·4·1 同质焊缝(球墨铸铁型)电弧焊

焊条采用钢芯或铸铁芯、外涂石墨化型药皮并加入一定量的球化剂，以期获得球墨铸铁类型的焊缝和较高的力学性能，Z238(EZCQ)是最老的一种。为了改善性能开发了多种其他牌号球墨铸铁焊条，其特点、性能各不相同(表6·8-32)，可根据具体要求选用。

焊补工艺：白口倾向较小的球墨铸铁焊条可以采用不预热焊接工艺，逐段连续多层焊法，可以防止裂

超星公司制作请尊重作者版权

纹，焊后根据要求进行不同的热处理或不热处理；预热焊预热温度为400℃或600℃，适用于刚度较大的部位或白口倾向较大的球墨铸铁焊条(表6·8-32)。

7·4·2 异质焊缝(非球墨铸铁型)电弧冷焊

采用镍铁焊条及高钒焊条，接头强度(390～450MPa)接近QT450-10球墨铸铁，但塑性(1%～5%)相差较大；对于高强度球墨铸铁(如QT600-3)则强度相差太多。高钒焊条主要用于非加工面。CO_2保护焊采用H08Mn2Si细丝(ϕ0.6～1.2mm)，低电压、小电流、浅熔深焊接，熔合区白口，接头强度有所提高为440～450MPa。还可采用镍铁合金焊丝氩弧焊。

可以应用异质焊缝电弧冷焊制造球墨铸铁—钢复合结构，但球墨铸铁的正火、退火、消除应力退火等热处理应在焊前进行，焊后不应再热处理。但是在未与钢焊接之前的过渡层可以进行高温退火消除白口。

7·4·3 气焊

火焰温度低。当壁厚小于50mm、连续焊时间小于15min，采用钇基重稀土球化剂HS402球墨铸铁焊丝焊补，焊缝石墨球化稳定、白口倾向较小，接头性能可基本满足QT600-3、QT450-10球墨铸铁的要求。当采用稀土镁球化剂的球墨铸铁焊丝焊补时，为了防止球化衰退，连续补焊时间应当缩短。

7·5 蠕墨铸铁的焊接

蠕墨铸铁是一种新型工程材料，兼有球墨铸铁与灰铸铁的优点，石墨呈蠕虫状，强度较高(302MPa)并有一定的塑性(2%)，化学成分比较接近于球墨铸铁，其焊接性也与球铁相似，但熔合区白口倾向稍小。蠕墨铸铁焊接材料，用于铸造缺陷及磨损的焊补。

7·5·1 同质焊缝(蠕墨铸铁型)电弧焊及气焊

电弧焊采用Z288钢芯蠕墨铸铁焊条，药皮含强石墨化剂和蠕化剂，焊缝金属成分的质量分数(%)：C3.9，Si3.0，Mn0.4及适量Al、Ca、Ba、Bi、Mg、RE(Ce、Y、La、Ce蠕化效果最好)、Ti；S＜0.01，P＜0.015。焊前不预热，采用中等焊接规范(线能量应大于882kJ)，连续焊，接头无渗碳体，最高硬度270HB、易加工，焊缝金属石墨蠕化率＞50%、σ_b381MPa、δ2.5%，接头σ_b315MPa、δ1.6%。电弧焊适于焊补中大型缺陷。

气焊采用蠕墨铸铁气焊丝HS403，其化学成分的质量分数为：高碳、Si≤3%、适量RE及Ti。焊接熔池冷却速度应较慢(＜8.33℃/s)。焊缝金属蠕化率＞50%，焊接接头最高硬度230HB，σ_b362MPa，δ1.7%。气焊适于焊补薄壁铸件。

7·5·2 异质焊缝(非蠕墨铸铁型)电弧焊

用Z358纯镍蠕铁焊条，焊缝含适量碳、钇、钴、钛，提高了抗热裂纹能力及力学性能，焊缝金属σ_b352MPa、δ～8%；焊接接头σ_b298MPa、δ～6%。用于小缺陷及加工面补焊。

7·6 可锻铸铁的焊接

可锻铸铁碳、硅含量低，铸态为白口，经退火析出团絮状石墨(黑心可锻铸铁)，或经氧化脱碳退火而获得白心可锻铸铁。黑心可锻铸铁焊接时，重熔部分成为白口组织，即使热焊也不能避免。可锻铸铁力学性能较高、裂纹敏感性与球墨铸铁相似。白心可锻铸铁焊接性较好。

7·6·1 钎焊

钎焊温度应低于1000℃，避免母材熔化。可采用黄铜钎料HL103、铜锌镍锰钎料或铸铁焊丝，主要用于磨损部分恢复尺寸。

7·6·2 电弧冷焊

如焊后不加工可采用Z408、Z308、Z116、J506、J422焊条，小电流、多层焊，也可采用H08Mn2Si细丝CO_2气体保护焊。

如焊后需要加工应先用直径≤2mm的Z408、Z308焊条瞬间点焊打底，每次焊接时间在1s以内、不移动电弧，然后电弧冷焊。

7·6·3 不预热电弧焊

可锻铸铁件多为小型薄壁件，因此可以用Z268球墨铸铁焊条小电流、多层连续焊，焊缝为铁素体及珠光体加球状、团絮状石墨，熔合区石墨呈蠕虫状一枝晶状。可焊补铸造缺陷，使用中的断裂，螺丝孔损坏后可先扩大成喇叭形孔，焊堵后重新钻孔、攻丝。

7·7 白口铸铁焊补

白口铸铁中的碳主要以渗碳体形式存在。基体为莱氏体，脆、硬、塑性极低，焊接性很差，焊接时易开裂，使用中焊缝易剥离。为了焊补白口铸铁，研制出BT-1、BT-2白口铸铁专用焊条和相应的白口铸铁电弧冷焊

超星公司制作 请勿重作者版权

工艺，主要用于激冷铸铁轧辊及白口铸铁锤头焊补。

7·7·1 白口铸铁冷焊专用焊条

BT-1 为镍(50)铁(50)合金焊条，药皮加入钡、钙、稀土，焊缝石墨呈球状，与白口铸铁熔合性好、线膨胀系数与白口铸铁相近，为底层焊条。

BT-2 为铬钼镍钨钒中碳合金钢焊条，焊缝组织为马氏体＋下贝氏体＋残余奥氏体＋碳化物质点，硬度48～52HRC，韧性较好，耐磨性、线膨胀系数与白口铸铁相近，药皮含变质剂使熔合区渗碳体团球化，提高了强度，用于工作层。

7·7·2 白口铸铁电弧冷焊工艺

将清理好的缺陷分成若干个约 40mm×40mm 小块，底层采用 BT-1、较大电流(正常值 1.3～1.5 倍)，大熔深焊接；工作层采用 BT-2，厚度视耐磨层要求而定。各块采用跳跃、分散堆焊，块间、与母材间距离 6～8mm、高出母材 1～2mm。每次焊后于 700～300℃重锤锤击。各块焊好后分散焊接各块之间，最后分段分散焊接与母材的间隙。

采用上述焊条及工艺焊补 2300mm 激冷铸铁轧辊局部掉皮，可轧中板 2000t 以上。

第9章 非铁金属的焊接

1 铝及铝合金的焊接

铝及铝合金是继钢铁之后的第二大类工业金属结构材料。其中，工业纯铝、非热处理强化变形铝镁、铝锰防锈铝合金，焊接性良好，应用广泛；可热处理强化变形铝合金的焊接性较差，如 LY12CZ、LC4 等焊接时热裂倾向性严重，焊缝、熔合区及热影响区的组织、性能弱化，故一般情况下，不推荐用弧焊焊接重要承载部件。铸造铝合金件多因有疏松、缩孔、气孔、夹渣、裂纹等缺陷而进行补焊，焊接性较差。常用的某些铝及铝合金的焊接性见表 6·9-1。

表 6·9-1 常用铝及铝合金的焊接性

焊接方法	材料牌号及其相对焊接性					适用厚度范围(mm)	
	工业纯铝	铝-锰合金	铝-镁合金		铝-铜合金		
	L1-L6	LF21	LF5 LF6	LF2 LF3	LY11 LY12 LY16	适用范围	一般界限
钨极氩弧焊	好	好	好	好	差①	1～10	0.9～25②
钨极脉冲氩弧焊	好	好	好	好	尚可	1～10	0.9～25②
熔化极氩弧焊	好	好	好	好	尚可	≥1	≥1
熔化极脉冲氩弧焊	好	好	好	好	尚可	≥2	≥0.8
电阻焊 (点、缝焊)	较好	较好	好	好	较好	—	铝箔～4
气焊	较好	较好	差	尚可	差	0.5～10	0.3～25
碳弧焊	较好	较好	差	差	差	1～10	—
手工电弧焊	较好	较好	差	差	差	3～8	—
电子束焊③	好	好	好	好	较好	3～75	
等离子弧焊	好	好	好	好	尚可	1～10	—

① 特殊情况下，要求采取特殊工艺措施，改善其焊接质量。

② 厚度大于 10mm 时，推荐采用熔化极氩弧焊。

③ 焊接过程可在真空室中或在氦气保护气氛中进行。

1·1 铝及铝合金的焊接特点

(1)铝极易氧化生成氧化铝(Al_2O_3)薄膜，厚度约为 0.1～0.2μm，熔点高(～2050℃)，组织致密，保护着母材表面，在 680～720℃时仍有良好的保护作用；但焊接时，如不将其从接头处清除，将会阻碍母材熔化和熔合，造成焊缝中的未熔合缺陷，或因氧化膜密度大(约为铝的 1.4 倍)，不易浮出熔池表面，而形成焊缝夹

超星公司制作请尊重作者版权

杂物。另外，氧化膜逸出功低，易发射电子，使电弧漂移不定，不能稳定燃烧，因此，焊接时必须考虑焊前清除氧化膜；同时，焊接时对焊接区加以有效的保护，不使氧化；还应考虑焊接过程中能有不断破除氧化膜的作用。

(2)热导、电导性高，热容量大，焊接时比钢的热损失大，因此，铝和铝合金焊接要求采用能量集中的强热源；要求达到与钢相同的焊速，其焊接线能量约为钢的2～4倍。电阻焊时，比钢需要更大功率的电源。

(3)铝的线膨胀系数和结晶收缩率比钢大一倍，而且高温强度低、塑性差等特点，造成焊件中产生较大的热应力、变形和裂纹倾向和较大的内应力，影响结构长期使用的尺寸稳定性。

(4)液态铝可溶解大量的氢气，固态时却几乎不溶解。因此，氢在焊接熔池快速冷却、凝固结晶过程中，来不及析出并排出熔池表面，易使焊缝产生气孔。

(5)铝及铝合金从固态转变为液态时，无明显的颜色变化，加上高温下强度和塑性低，使操作者难于掌握加热温度，有时还可能引起熔池金属的塌陷和焊穿，操作困难。

(6)铝合金含的低沸点合金元素(如镁、锌、锰等)，在焊接电弧和火焰作用下，极易蒸发、烧损，从而改变了焊缝金属的化学成分和性能。

(7)可热处理强化铝合金接头性能明显弱化。

总的说来，纯铝、铝-锰合金、铝-镁合金及某些铝-锌-镁合金的焊接性是良好的，可热处理强化铝合金焊接困难较多，但只要针对其焊接的特点，正确选择焊接方法、填加材料、采用合适的、先进的工艺措施，完全能够获得质量良好的焊接接头。

1·2 铝及铝合金的焊接材料

为保证各种牌号铝或铝合金母材的焊接质量和焊接工艺，通常可选配若干种不同的焊接材料，例如：填充材料、保护气体、电极品种、焊剂(焊粉)等。焊接材料如果选配不当，往往是造成产生各种工艺缺陷，并使接头强度、塑性和各种使用性能下降的重要原因。

1. 填充材料 根据不同焊缝金属成分组成和焊接工艺的要求，可选择与母材相同成分或相近成分的焊丝，或不同于母材成分的焊丝。常用的焊接填加材料搭配如表6·9-2和表6·9-3。某些焊丝成分如表6·9-4。

表6·9-2 同牌号的铝及铝合金焊丝选择

母材		填加焊丝	母材		填加焊丝
工业高纯铝	LG3	LG3、LG4	防锈铝	LF6	LF6①
	LG4	LG4		2101(189)	HS2101(HS189)
工业纯铝	L1	L1、LG3		LF12	LF12、LF13
	L2	L2、L1、HS301		LF21	LF21、HS321、HS311、LT1
	L3	L3、L2、HS301、HS302	硬铝	LY12	②、HS302、BJ380A、SC3-3
	L4	L4、L3、HS301、HS302		LY16	③
	L5	L3～L5、HS301、HS302		LY17	③
	L6	L3～L5、HS301、HS302		147	720
防锈铝	LF2	LF3	锻铝	LD2	LT1、HS311
	LF3	LF3、LF5、HS331		LD10	②、BJ380A、SC3-3
	LF5	LF5、LF6、HS331		164	164-1
	LF11	LF11	超硬铝	LC4	④
	2103(180)	2103(180)		LC10	LF33
				183-1	LF33、183-1
			铸铝	ZL101	ZL101
				ZL104	ZL104

① LF6焊丝中增加Ti的质量分数0.15%～0.24%，细化晶粒，提高抗裂性能。

② 试用焊丝成分的质量分数(%)：ⓐ Cu6～7，Mg2～3，Ti0.2，Al余量；

ⓑ Cu5.8～6.8，Mn0.2～0.4，Ti0.1～0.2，适量Re，Al余量；

ⓒ Si3～5.5，Cu1.3～2.3，Ti0.2，Al余量。

③ 试用焊丝成分的质量分数(%)：Cu6～7，Mg1.5～1.7，Ni2～2.5，Ti0.25～0.3，Mn0.4～0.6，Al余量。

④ 试用焊丝成分的质量分数(%)：Mg6，Zn3，Cu1.5，Mn0.2，Ti0.2，Cr0.25，Al余量或Mg3，Zn6，Ti0.5～1，Al余量。

超星公司制作 请尊重作者版权

表 6·9-3 异种牌号铝及铝合金焊丝选择

母 材	LF6	LF5 LF11	LF3	LF2	LF21	L6	L3～L5
L2	LF6	LF5	LF5	LF3 LF2	LF21 HS311	L2	L2
L3～L5	LF6	LF5	LF5 HS311	LF3 LF2	LF21 HS311	L2	—
L6	LF6	LF5	LF5 HS311	LF3 LF2	LF21 HS311	—	—
LF21	LF21 LF6	LF5	LF5 HS311	LF3 LF2	—	—	—
LF2	LF6	LF5	LF5 HS311	—	—	—	—
LF3	LF6	LF5	—	—	—	—	—
LF5 LF11	LF6	—	—	—	—	—	—

表 6·9-4 一些常用铝合金焊丝化学成分的质量分数 (%)

焊丝名称	Mg	Mn	Cu	Cr	Si	Ti	Zr	V	Be	Al
HS301	—	—	—	—	—	—	—	—	—	≥99.6
HS302	—	—	—	—	—	—	—	—	—	≥99.5
HS311	—	—	—	—	4～6	—	—	—	—	余量
HS321	—	1.0～1.6	—	—	—	—	—	—	—	余量
HS331	4.7～5.7	0.2～0.6	—	—	0.2～0.5	—	—	—	—	余量
2103(180)	4.7～5.5	0.5～1.0	—	0.05～0.2	—	0.03～0.15	—	—	0.0001～0.0015	余量
HS2101(HS189)	5.2～6.2	0.3～0.7	—	0.1～0.2	—	—	0.1～0.25	—	0.0001～0.015	余量
164-1	—	—	—	—	5.5～7.0	0.05～0.2	0.1～0.25	—	—	余量
720	—	—	5.8～6.8	—	—	0.1～0.2	0.15～0.30	0.05～0.15	B 0.002～0.025	余量

2. 电极 钨极氩弧焊、等离子弧焊可用纯钨、钍钨、锆钨和铈钨四种电极，目前以铈钨电极综合性能较好，应用最广泛。电极直径应根据采用的电流种类和大小以及焊接速度来选择。一定的电极直径具有一定的极限电流，若超过此极限电流值，则电极强烈发热、熔化和蒸发，引起电弧不稳、焊缝夹钨等问题。

3. 保护气体 铝及铝合金焊接时可采用氩、氦或氩＋氦气。氦气价格贵，所以多用氩气。其纯度一般应大于 99.9%。采用交流或直流反接焊接时，具有良好的阴极雾化作用。为提高焊接线能量和改善保护性能，可以采用添加氦气的氩。采用正极性钨极氦气保护时，可进行高速自动焊接或深熔焊接。

4. 气焊用焊粉 为除去氧化膜及其他杂质，焊粉由钾、钠、锂等元素的氯化物和氟化物组成。

1.3 铝及铝合金的焊接工艺

根据铝及铝合金的牌号、焊件厚度、产品结构、生产条件、经济效益及对产品的质量要求等因素来选择焊接工艺方法。铝及铝合金可以用大多数的熔焊、压

焊、钎焊等方法进行焊接。

1. 氩弧焊 焊接质量好，实现工艺方便，不必采用具有腐蚀性的焊剂，易于实现自动化和全位置焊接，应用广泛。

铝和铝合金惰性气体保护焊大致可分为熔化极惰性气体保护焊(MIG 焊)和钨极惰性气体保护焊(TIG 焊)。

为保证焊接质量，焊件和焊丝必须在焊前进行清理：有机械法和化学法。机械清理如下：用丙酮或酒精擦拭待清理部位，清除油污，再用不锈钢丝轮或钢丝刷(钢丝直径应<0.3mm，一般可为 0.1～0.15mm)将焊接区域表面氧化膜等刷净，露出金属光泽，也可用刮刀清理表面。目前化学清理法已不少，大多也很有效，见表 6·9-5。

表 6·9-5 化学清理法参考规范

材质	碱洗			冲洗	中和光化			冲洗	干燥
	溶液	温度(℃)	时间(min)		溶液	温度	时间(min)		
纯铝	NaOH 60～100g/L	40～50	～10≤20	清水(或温水)	HNO_3 300g/L	室温	1～3	清水(或温水)	风干或低温干燥
铝合金			～1≤7						

焊丝应整体浸洗。焊件接头处应清洗，或清理坡口及其两侧(不小于 20mm)。清理后到焊接的间隔时间一般不超过 24h。

钨极氩弧焊焊接厚度大于 5mm 时，熔化极氩弧焊焊接厚度大于 25mm 时，或温度低于－10℃时，应考虑采用预热。一般预热 100℃便足以保证起始熔透，而不必再另调整电流。变形铝合金一般预热不超过 150～200℃。大型或形状复杂的铸件需预热至 420℃左右，焊后缓冷。镁的质量分数 4%～5.5%的铝镁合金不得预热至 100～230℃范围内，因经此温度处理后，其抗应力腐蚀裂纹的能力下降。

工艺参数见表 6·9-6 至表 6·9-9。

表 6·9-6 铝及铝合金手工钨极氩弧焊焊接工艺参数

板厚(mm)	坡口形式			焊丝直径(mm)	钨极直径(mm)	喷嘴直径(mm)	焊接电流(A)	氩气流量(L/min)	焊接层数 正/反
	形式	间隙(mm)	钝边(mm)						
1	I	0.5～2	—	1.5～2	1.5	5～7	30～60	4～6	1
1.5	I	0.5～2	—	2	1.5	5～7	40～70	4～6	1
2	I	0.5～2	—	2～3	2	6～7	60～80	4～6	1
3	I	0.5～2	—	3	3	7～12	120～140	6～10	1
4	I	0.5～2	—	3～4	3	7～12	120～140	6～10	1～2/1
5	V70°	1～3	—	4	3～4	12～14	120～140	9～12	1～2/1
6	V70°	1～3	2	4	4	12～14	180～240	9～12	2/1
8	V70°	2～4	2	4～5	4～5	12～14	220～300	9～12	2～3/1
10	V70°	2～4	2	4～5	4～5	12～14	260～320	12～15	3～4/1～2
12	V70°	2～4	2	4～5	5～6	14～16	280～340	12～15	3～4/1～2

注：适于纯铝。焊接铝镁、铝锰合金时，其电流值可降低 20～40A。

表 6·9-7 铝及铝合金钨极自动氩弧焊工艺参数

板厚(mm)	焊接层数	钨极直径(mm)	焊丝直径(mm)	喷嘴直径(mm)	氩气流量(L/min)	焊接电流(A)	送丝速度(m/h)	焊接速度(m/h)
2	1	4	1.5～2	8～10	12～14	180～220	65～70	28～32
3～5	1～2	5	2～3	10～14	14～18	240～280	69～74	24～30
6～8	2～3	5～6	3	12～16	16～20	280～320	70～80	18～24
>8	>2	6	3～4	14～18	18～24	300～340	74～83	18～24

超星公司制作 请尊重作者版权

版权所有 侵权必究

表 6·9-8 纯铝熔化极自动氩弧焊工艺参数

板厚 (mm)	焊丝直径 (mm)	喷嘴直径 (mm)	焊接电流 (A)	电弧电压 (V)	氩气流量 (L/min)	焊接速度 (m/h)	焊接层数 正/反
6	2.5	22	230～260	20～23	30～33	25	1
8	2.5	22	300～320	28～30	30～33	25～28	1
10	3	22	300～330	25～27	30～33	15～18	1/1
12	3	28/17	310～330	26～28	30～33	15～18	1/1
16	4	28/17	380～420	28～32	35～40	15～20	1/1
20	4	28/17	480～520	28～32	35～40	15～20	1/1
26	4	28/17	490～550	29～32	40～60	15～20	1/1
28	4	28～30	550～580	30～32	40～60	13～15	1/1

注：1. 焊接铝合金时，电流可降低 20～40A，氩气流量增加 10～15L/min。

2. 喷嘴直径一项中的分母系指分流套直径。

3. 接头型式，板厚<16mm 用 I 型接头，>16mm 用大钝边 90°X 形接头，钝边高均等于 1/2 板厚。

表 6·9-9 铝及铝合金熔化极半自动氩弧焊工艺参数

板厚 (mm)	坡口形式			焊丝直径 (mm)	氩气流量 (L/min)	焊接电流 (直流反接) (A)	电弧电压 (V)	焊道数
	形式	钝边 (mm)	间隙 (mm)					
3.2	I	—	0～3	1.2	14	110	20	1
4.8	60°V	1.6	0～1.6	1.2	14	170	20	1
6.4	60°V	1.6	0～3	1.6	19	200	25	1
9.5	60°V	1.6	0～4	1.6	24	290	25	2
12.7	60°V	1.6	0～3	2.4	24	320	25～31	2
19	60°V	1.6	0～4.8	2.4	28	350	25～29	4
25.4	90°V	3.2	0～4.8	2.4	28	380	25～31	6

熔化极氩弧焊稍经改装还可用于熔化极氩弧点焊厚度0.5～6mm铝及铝合金。分熔透焊及不熔透焊两种见图6·9-1。当t_1>3mm时，须预先钻小孔；t_2<0.7mm时，须加垫板。最好$t_2 \geq 2t_1$。工艺参数见表6·9-10。

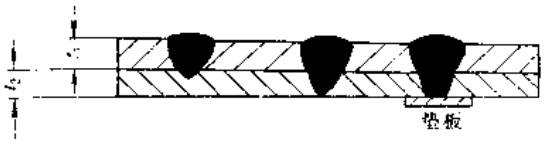


图 6·9-1 熔化极氩弧点焊示意图

表 6·9-10 各种厚度铝合金熔化极氩弧点焊工艺参数

板厚(mm)		不熔透				熔透			
上板	下板	空载电压 (V)	送丝速度 (m/h)	焊接电流 (A)	焊接时间 (s)	空载电压 (V)	送丝速度 (m/h)	焊接电流 (A)	焊接时间 (s)
0.5	0.8	—	—	—	—	28	450	150	0.3
0.8	0.8	25.5	428	143	0.3	28	495	165	0.3
0.8	1.6	30	540	180	0.3	31	675	225	0.3
1.6	1.6	32	630	210	0.4	32	825	275	0.5

超星公司制作 请勿重作者版权

（续）

板厚(mm)		不熔透				熔透			
上板	下板	空载电压(V)	送丝速度(m/h)	焊接电流(A)	焊接时间(s)	空载电压(V)	送丝速度(m/h)	焊接电流(A)	焊接时间(s)
1.6	3.2	32.5	975	325	0.5	34.5	1015	337	0.5
1.6	6.4	39	1162	387	0.5	41	1200	400	0.5
3.2	3.2	39.5	1200	400	0.5	41	1275	425	0.6
3.2	6.4	41	1350	450	1.0	—	—	—	—

注：焊丝直径1.2mm，成分的质量分数(%)：Mg2.4～3.0，Cr0.05～0.2，Ti0.05～0.2，Mn0.5～1，Si0.4＋Fe。

表6·9-11 焊接铝及铝合金用焊粉成分的质量分数 (%)

编号	Na_3AlF_6	NaF	CaF_2	NaCl	KCl	$BaCl_2$	LiCl
1	—	8	—	28	50	—	14
2	—	8	—	35	48	—	9
3	—	—	4	19	29	48	—
4	—	—	—	30	50	—	—
5	45	—	—	40	15	—	—

表6·9-12 气焊喷嘴和填充焊丝直径

板厚(mm)	1	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
气焊喷嘴号数	1		2			3		4			5		
填充焊丝直径(mm)	1.5～2		2.5～3		3～4	4～4.5		4.5～5.5					

2. 气焊 设备简单，方法灵活，适于焊接薄件及小零件。缺点是变形大，接头质量不高，生产效率低，需用铝焊粉溶解和清除氧化膜，有腐蚀危险性，焊后必须严格清除。焊粉易吸潮、失效，所以应瓶装密封。最好随用随调。焊粉成分见表6·9-11。表6·9-12为铝气焊时喷嘴号数和填充焊丝直径的选择。氧-乙炔焰应采用中性焰。

1.4 铝及铝合金的焊接接头性能

铝及其合金氩弧焊焊接接头的力学性能列于表6·9-13。

表6·9-13 氩弧焊对接接头的力学性能

母材		填加材料	焊接方法	力学性能	
牌号	板厚(mm)			σ_b(MPa)	冷弯角
L2	14	L2	I-1	75～79	130°～180°
L3	8	L3	I-1	83	180°
L4	6	L3	I-1	75～84	160°～180°
LF21		LF21	I	108～114	180°
LF2	10	LF2	I-1	166～180	107°～161°
LF3	20	LF3	I-2	229～230	54°～35°
2103(180)①	3	2103(180)①	I-1	334	180°
2101(189)①	3	HS210(HS189)①	I-1	373	180°

质量公司制作 请尊重作者版权

（续）

母材		填加材料	焊接方法	力学性能	
牌号	板厚(mm)			σ_b(MPa)	冷弯角
LF6	18	LF6	I-2	308～324	32°～72°
LF12	3	LF13	I-1	376～394	—
LY12M		LT1	I-1	206	16°～20°30′
147CX10S①	3	720①	I-1	286	59°20′
164CS①	2	164-1①	I-1	207	—
LC10CS	3	LF33	I-1	≥334	>30°
183-1CS①	3	LF33	I-1	324～392	70°～90°

① 合金已定型，但尚未纳入国标。

注：I—氩弧焊；I-1—钨极手工氩弧焊；I-2—熔化极自动氩弧焊。

2 铜及铜合金的焊接

2·1 铜及铜合金的焊接特点

铜及铜合金的热物理性能和工艺性能等与低碳钢有很大的差异，其焊接特点如下：

(1)铜的热导性和热容量大(热导系数较低碳钢大7.2倍左右)，焊接输入热量宜大，必要时作适当的预热。

(2)铜及铜合金的线膨胀系数大，凝固时收缩率也较大。因此，焊接变形大，焊件刚度大时易产生裂纹，应采用窄焊道、焊后轻敲焊缝等措施，减少变形及残余应力(同时有利细化晶粒)。某些铜合金还要焊后退火处理消除应力，防止脆裂。

(3)铜在液态时易氧化，生成的氧化亚铜(Cu_2O)与铜形成低熔点共晶体，分布在晶界，易引起热裂纹，故要严格控制用于焊接的紫铜氧的质量分数，一般应≤0.03%，重要件应≤0.01%。

(4)铜在液态时对氢的溶解度比凝固时大3.7倍，焊接过程容易生成氢气孔及因氢和氧化亚铜反应生成水汽而引起的气孔。

2·2 铜及铜合金的焊接材料

铜及铜合金焊接材料已部分标准化。如焊接紫铜时选用含硅、铝、钛等脱氧元素的焊丝；焊接黄铜、青铜和白铜时一般选用含脱氧元素的近母材成分焊丝，以调整焊缝成分和性能与母材相匹配。

2·3 铜及铜合金的焊接工艺

选择铜及铜合金的焊接方法，主要由其焊接性、焊件的厚度及对接头质量的要求而定。

2·3·1 气焊和碳弧焊

气焊铜及铜合金，除黄铜可采用弱氧化焰外，一般均采用中性焰。由于火焰温度较低，除薄板外，焊件焊前都预热至400℃以上，焊后还进行退火或锤击处理，以提高焊接接头质量。已广泛采用以硼酸甲脂为代表的气体熔剂混合于火焰中焊接黄铜的工艺，效果良好。

气焊和碳弧焊除对薄、小铜件还有一定的使用价值外，已逐渐被钨极氩弧焊所代替。

2·3·2 钨极氩弧焊及熔化极氩弧焊

惰性气体保护焊已成为所有牌号的铜及铜合金熔焊方法中应用最广泛的一种。

厚度小于3mm的焊件采用TIG焊可不开坡口不加丝。厚度3～12mm的焊件可用填丝TIG焊或MIG焊。厚度大于12mm的焊件一般采用MIG焊。对热导性大的较厚件需适当预热和保持一定的层间温度。

焊接紫铜或高热导率铜合金，不允许预热或要求获得较大熔深时，可采用Ar的质量分数70%与He的质量分数30%的混合气。焊接黄铜，为了能采用小电流，也可预热。为了防止硅青铜产生热应力裂纹，层间温度应低于100℃，并用较高焊接速度。

除铍青铜和铝青铜采用交流焊有利于破除表面氧化膜外，其余铜及铜合金均采用直流正接。只有流动性低的硅青铜和白铜可进行立焊和仰焊。焊接工艺参数见表6·9-14和表6·9-15。

2·3·3 等离子弧焊

等离子弧焊很适合焊接高热导系数和对过热敏感的铜及铜合金。6～8mm厚的铜件可以不预热不开坡

超星公司制作 请尊重作者版权

表 6-9-14 铜及铜合金 TIG 焊工艺参数

材料		板厚(mm)	坡口形式	焊丝 牌号	焊丝 直径(mm)	焊接电流(直流正接)(A)	氩气流量(L/min)	预热温度(℃)	备注
紫铜		<1.5	I形	含 Si、P 紫铜丝 HS201	2	140～180	8～10	不预热	单面焊
		2～3	I形		3	160～240	12～14	不预热	单面焊
		4～5	I形		3～4	220～320	14～16	300～400	双面焊
		6～10	V形		4～5	300～400	16～20	400～500	单面多层焊、反面封底焊
黄铜		<2	I形	硅青铜丝 锡青铜丝	1.6	170～190	10～12	不预热	单面焊
青铜	铍青铜	2.4～3.2	V形	同母材	—	交流 250	Ar+He 12～14	不预热	单面双层焊
	锡青铜	<3.0	I形	锡青铜	2	90～180	10～14	不预热	单面焊
		5～7	V形		3～4	180～250	14～20	不预热	单面多层焊、反面封底焊
	铝青铜	<1.6	I形	铝青铜	1.6	交流 25～80	10～12	不预热	单面焊
		3～6	V形		3～4	交流 150～250	12～16	不预热	单面多层焊
		9～12	V形		4～5	交流 250～350	12～16	150	单面多层焊、反面封底焊
	硅青铜	<1.6	I形	硅青铜	1.6	100～130	10～12	不预热	单面焊
		3～6	V形		3～4	150～250	12～16	不预热	单面多层焊
		9～12	V形		4～5	250～350	12～16	不预热	单面多层焊、反面封底焊
白铜		<3	I形	含铁白铜	3	300～350	12～16	不预热	单面焊
		3～9	V形		3～4	300～350	12～16	不预热	单面多层焊

表 6-9-15 铜及铜合金 MIG 焊工艺参数

材料		板厚(mm)	坡口形式	焊丝 牌号	焊丝 直径(mm)	焊接电流(直流反接)(A)	电弧电压(V)	氩气流量(L/min)	预热温度(℃)
紫铜		<3	I形	含 Si、P 紫铜丝 HS201	1.6	250～300	25～30	14	不预热
		6～8	V形		1.6	400～450	32～36	14～16	200～250
		>12	V形		2.4	550～650	30～35	16～20	350～400
黄铜		3～6	V形	硅青铜或锡青铜	1.6	270～300	25～28	12～14	不预热
		9～12	V形		1.6	270～300	25～28	12～14	不预热
青铜	铍青铜	6～12	V形	同母材	1.2	200～240	25～30	Ar+He 14	300～400
		>12	V形		1.2	200～240	25～30	Ar+He 14	400～500
	锡青铜	3～6	V形	锡青铜	1.0	160～180	25～27	12～14	不预热
		9～12	V形		1.6	250～320	28～30	14～16	不预热

超星公司制作 请尊重作者版权

（续）

材料		板厚（mm）	坡口形式	焊丝 牌号	焊丝 直径（mm）	焊接电流（直流反接）（A）	电弧电压（V）	氩气流量（L/min）	预热温度（℃）
青铜	铝青铜	3～6	V形	铝青铜	1.6	280～300	27～30	16～20	不预热
		9～12	V形		1.6	300～320	27～30	16～20	不预热
		>16	V形 X形		1.6	300～350	27～30	16～20	150～200
	硅青铜	3～6	V形	硅青铜	1.6	300～320	27～30	14～16	不预热
		9～12	V形		1.6	300～320	27～30	14～16	不预热
白铜		3～6	V形	含钛白铜	1.6	270～300	22～28	14～16	不预热
		9～12	V形		1.6	270～300	22～28	14～16	不预热

表 6·9-16 紫铜和黄铜的等离子弧焊工艺参数

材料	板厚（mm）	钨极直径（mm）	钨极内缩量（mm）	喷嘴直径（mm）	保护罩至工件距离（mm）	气体流量(L/min) 离子气	气体流量(L/min) 保护气	焊接电流（A）	备注
紫铜	6	5	3～3.5	4	8～10	4～4.5	12～14	160～180	不开坡口，正反各一层
	10	5	3～3.5	4	8～10	4～4.5	20～22	220～240	V形坡口，60°×3mm，正3层反1层
	16	5	3～3.5	4	8～10	5～5.5	21～23	240～260	V形坡口，60°×3mm，正4层反1层
黄铜	6	5	3	4	8～10	4～4.5	25	280～290	无坡口，无间隙，不加热

口一次焊成。厚度在8mm以上的铜件可以采用留大钝边、开V形坡口的等离子弧焊与MIG焊联合工艺。微束等离子弧焊接0.1～1mm的超薄件可使工件变形减到最小程度。

等离子弧焊采用直流正接转移弧。一般采用非穿透焊。选用等离子弧焊工艺必须与相应的加工装配精度要求联系起来。工艺参数见表6·9-16。

2·3·4 埋弧焊

埋弧焊适合于中、厚板长焊缝的焊接。生产率高、成本低。厚度20mm以上的焊件焊前要预热、单面焊时反面要加成形垫板。工艺参数见表6·9-17。

表 6·9-17 铜及铜合金埋弧焊工艺参数

材料	板厚（mm）	坡口形式	焊接材料 焊丝	焊接材料 焊剂	焊丝直径（mm）	焊接电流（直流反接）（A）	电弧电压（V）	焊接速度（m/h）	备注
紫铜	5～6	对接	HS201 HS202	HJ431 HJ260 HJ150	4	500～550	35～40	25～20	单面单层加垫板
	10～12				5	700～800	40～44	20～15	
	16～20				6	900～1000	45～50	12～8	双面单层焊
	25～40	U形			4～5	1000～1400	50～55	15～10	单面多层加垫板

超星公司制作请尊重作者版权

（续）

材料	板厚(mm)	坡口形式	焊接材料		焊丝直径(mm)	焊接电流(直流反接)(A)	电弧电压(V)	焊接速度(m/h)	备注
			焊丝	焊剂					
黄铜	4	对接无坡口	HS220 HS221	HJ431	1.5	180～200	24～26	20	单面单层加垫板
	8				1.5	300～380	26～28	20	
	12				2.0	450～470	30～32	25	
	18	V形			3.0	650～700	32～34	30	双面单层焊
铝青铜	10	对接	SCuAl	HJ431 HJ150	2	450	35～36	25	
	15	V形			3	550～650	35～36	25	单面双层加垫板
	26	X形			4	750～800	36～38	25	单面多层加垫板

2·3·5 电子束焊

电子束焊一般不加焊丝。为了避免铜合金中锌、锡、磷等低熔点元素的蒸发损失，应使电子束聚焦在稍高于工件表面的位置，或采用摆动电子束的办法。铜的电子束焊接，焊缝晶粒细，含气量远低于母材，主要的力学和热物理性能不低于母材。

2·3·6 电阻焊

铜及铜合金电阻焊的焊接性与其电导、热导率成反比。大多数的青铜和白铜可进行点焊和滚焊。电导、热导率达到紫铜值30%以上的黄铜，电阻焊比较困难。高锌、含铅黄铜等铜合金还因高温塑性差，加压温度区间窄而使焊接困难。

电阻焊铜合金的电极最好选用端部镶嵌有钨块或钼块的铜镉合金。端部可加工为球形或圆锥形。一定要采用硬规范。薄件可用储能焊机或直流冲击波焊机。

2·3·7 闪光对焊与摩擦焊

一般采用缩短伸出长度、加大烧化速度和顶锻速度的带电顶锻的闪光对焊工艺。精确控制规范参数可获得满意的接头性能。

摩擦焊在同种或异种接头中得到较广泛的应用。接头性能一般高于闪光焊。焊接规范见表6·9-18。

表6·9-18 铜及铜合金摩擦焊规范

接头材料	棒料直径(mm)	旋转速度(r/min)	单位压力(MPa)		顶锻量(mm)	焊接时间(s)
			加热时	顶锻时		
紫铜+紫铜	40	920	34.3	147	20	30
H62黄铜+H62黄铜	16	3000	32.4	32.4	6～7	3
紫铜+纯铝	8	1350	19.6～39.4	98～196	—	10～20
QAl9-2+20钢	20	1500	24.5	24.5	6～8	8～9
HMn58-2+20钢	30	1500	24.5	24.5	6～8	8

2·3·8 扩散焊

扩散焊可以根据材料的不同，选择在真空或惰性气体(氩或氦)、还原性气体(氢)介质中进行。扩散焊接头的变形很小，性能优良，特别适合于精密焊接。

2·4 铜及铜合金的焊接接头性能

铜及铜合金焊接接头的性能，因焊接方法、焊接材料、焊接工艺及焊后处理不同而有较大差异。一般熔焊接头的电导性、热导性、耐蚀性及塑性比母材略低。随着一些先进工艺的推广(如MIG焊、TIG焊、等离子焊)，一批新材料的采用(如含强脱氧剂的焊丝、氟化物焊剂)，焊缝含氧和含杂质量、接头的热循环得以精确的控制，不少铜及铜合金熔焊接头的各种性能达到母材的指标，较好地满足了工件的要求。

超星公司制作 请尊重作者版权

3 镁及镁合金的焊接

纯镁强度低，一般不做结构材料使用。工业上多应用镁合金。

镁锰合金（含 w_{Mn} 1.3%～2.8%），MB1 焊接性良好，无明显热处理强化效果。镁-锰合金中加入适量铈可以细化晶粒（MB8）。镁-锰-铈合金如 MB13 焊接性良好。镁-铝-锌合金中 $w_{Al}<10\%$ 有助于改善晶粒结构，改善焊接性，但 $w_{Al}>1.5\%$ 易产生应力腐蚀，焊后需清除残余应力；$w_{Zn}>1\%$，增大热胀系数，Zn 含量提高，热裂敏感性增大。MB2、MB3、ZM5 等的焊接性好，MB6 则较差，MB15 不作焊件。镁-锌-锆合金如 MB15、ZM1、Zn2 等，热裂纹倾向大，焊接性不良。含钍镁合金焊接性良好。

3·1 镁及镁合金的焊接特点

(1)在焊接高温下，镁易与空气中的氧及氮强烈化合生成镁的氧化物及氮化物，形成焊缝夹渣，降低焊缝的力学性能和耐蚀性能。

(2)熔点低，而且焊件表面又有高熔点氧化膜覆盖，易产生烧穿或下塌现象。

(3)对焊件表面、保护气体和熔剂中存在的水份敏感，焊接时，焊缝极易形成蜂窝状的气孔。

(4)热导性好，应采用较大功率的焊接热源。

(5)焊接时镁合金易产生过热。

(6)焊接镁合金产生强烈弧光、氧化镁烟雾及臭氧，需采取防护措施；焊接时的飞溅，易导致起火（可用干砂或2#防火熔剂灭火，严禁用水灭火）。

3·2 镁及镁合金的焊接工艺

3·2·1 焊前准备

(1)镁合金的焊接接头形式可参考钢焊件。但镁合金焊接面上的尖角、毛刺等要求认真修整，表面要严防划伤，因尖角、毛刺等易在焊缝中构成氧化镁夹渣。

(2)焊件坡口 20～30mm 内及焊丝表面可用直径 0.08～0.15mm 的不锈钢（或铜、铝）刷，刮刀等进行机械清理，清理后 2～3h 内焊接；也可按表 6·9-19 进行化学清理，清理后妥善保存并在 72h 内进行焊接（盘状焊丝用化学清理）。

表 6·9-19 镁及镁合金化学清理

序号	工作内容	溶液成分(g/L)	溶液温度(℃)	清洗时间(min)
1	除油	NaOH 10～25 Na_3PO_4 40～60 Na_2SiO_3 20～30	60～90	5～15 (将零件在溶液中浸洗)
2	热水冲洗		50～90	2～3
3	流动冷水洗		室温	2～3
4	槽液中腐蚀	NaOH 350～450	MB8:70～80	2～3
			MB2:60～65	2～3
5	热水冲洗		50～90	2～3
6	冷水冲洗		室温	2～3
7	铬酸中和处理	CrO_2:150～250	室温	5～10 (或将锈除尽为止)
8	冷水冲洗		室温	2～3
9	热水冲洗		50～90	1～3
10	用压缩空气吹干		50～70	吹干为止

(3)对于厚大截面、特别是接头拘束度小的铸件，一般不需要预热。对于薄截面、高拘束度的接头，尤其是高锌合金，则经常需要预热，以防止焊缝产生裂纹。

(4)通常用与母材同牌号的镁合金焊丝。焊 MB8 采用 MB3 焊丝，可以防止近缝区晶界析出低熔共晶体（Mg_3Ce），避免形成裂纹。焊丝直径按母材板厚选用 1.5～6mm，气焊用较粗的焊丝。

3·2·2 焊接工艺方法

镁在熔化状态下的化学活性要求在焊接时必须进

⊖ w_{Mn}、w_{Al}、w_{Zn} 分别为 Mn、Al、Zn 的质量分数。

超星公司制作 请尊重作者版权

行有效的保护。镁在一般情况下容易焊接。镁合金可采用氩弧焊、气焊、电阻焊及钎焊等方法。由于熔化潜热较铝低，所以线能量相应可低些，焊接速度可高些。但其热膨胀系数较大，易产生较大的焊接变形。

最经常用的两种弧焊方法为钨极氩弧焊和熔化极氩弧焊。钨极氩弧焊可用交流或直流电源，如用直流，钨极可接正极或负极。熔化极氩弧焊，电源都采用直流，并且金属电极都接正极，其熔滴过渡形式根据电流和送丝速度不同而变化。

1. 钨极氩弧焊 可用于焊接及铸件焊补。多用交流，板厚小于4.5mm也可用直流反接。在保证成形和焊透的前提下，尽量采用大电流、快焊速，可使热影响区减小，焊缝强度系数达母材80%～95%而且变形小。例如厚度5mm、V形坡口的对接焊缝反面采用不锈钢垫板，电流300～340A，焊接速度可达21～27m/h。自动钨极氩弧焊的焊接速度可更高。几种镁合金焊接工艺参数见表6·9-20和表6·9-21。

表6·9-20 钨极氩弧焊(交流)工艺参数

板厚(mm)	MB8		MB3		ZM5	
	钨极直径(mm)	电流(A)	钨极直径(mm)	电流(A)	钨极直径(mm)	电流(A)
1.0～2.0	2	70～110	2	60～95	2	50～70
2.5～3.0	3	120～160	3	85～130	2	70～100
3.5～4.0	5	200～240	4	170～200	3	120～150
4.5～5.0	6	290～340	6	240～300	4	150～220

注：均采用不锈钢垫板。

表6·9-21 氩弧焊钨极喷嘴直径及氩气流量

钨极直径(mm)	喷嘴直径(mm)	氩气流量(L/min)
1.5～2.0	5.0～7.0	4～6
2.5～3.0	7.0～9.0	7～10
4.0～5.0	9.0～12.0	12～14
6.0	12.0～14.0	14～18

一般采用左焊法施焊，尽量压低电弧长度(约2mm)，尽可能不中断施焊，保证焊透使反面焊缝余高均匀。自动焊质量好，弧长可控在0.6mm左右。为消除焊接应力，焊后在热空气循环加热炉中进行回火处理，其工艺参数见表6·9-22。

表6·9-22 镁合金回火处理工艺参数

合金牌号	回火温度(℃)	保温时间(h)
MB8	230±10	1.5
MB3	290±10	5
ZM5	250～350	2以上

2. 熔化极氩弧焊 熔化极氩弧焊焊接镁合金采用直流反接。适用于三种金属熔滴过渡形式：短路过渡，射流过渡和脉冲射流过渡。恒压式外特性电源适用于短路过渡焊接和射流过渡焊接；恒流式电源(或陡降式电源)设备可用于低电流下的脉冲射流过渡焊。后种情况下飞溅小。用特殊恒压电源进行脉冲电流输出。

熔化极氩弧焊的焊接速度比一般钨极氩弧焊更高，但应设法防止弧坑裂纹(如采用引出板、电流逐渐衰减、填满弧坑等)。焊接工艺参数见表6·9-23。

表6·9-23 熔化极氩弧焊镁合金工艺参数①

熔滴过渡形式	板厚(mm)	坡口形式及间隙(mm)	焊丝		电流(反接)(A)	电压(V)	氩气流量(L/min)	焊道数
			直径(mm)	送丝速度(m/h)				
短路过渡	0.6	I形，0	1.0	210	25	13	18～28	1
	1.0	I形，0	1.0	345	40	14	18～28	1
	1.6	I形，0	1.6	278	70	14	18～28	1
	3.2	I形，2.3	2.4	202	115	14	18～28	1
	5.0	I形，2.3	2.4	307	175	15	18～28	1
脉冲射流过渡	1.0	I形，0	1.0	540	50	21	18～28	1
	3.2	I形，0	1.6	420	110	24	18～28	1
	5.0	I形，0	1.6	708	175	25	18～28	1
	6.4	60°V形，0②	2.4	435	210	29	18～28	1

超星公司制作 请尊重作者版权

（续）

熔滴过渡形式	板厚(mm)	坡口形式及间隙(mm)	焊丝 直径(mm)	焊丝 送丝速度(m/h)	电流(反接)(A)	电压(V)	氩气流量(L/min)	焊道数
射流过渡	6.4	60°V形,0②	1.6	795	240	27	24～36	1
	9.5	60°V形,0②	2.4	428～465	320～350	24～30	24～36	1
	12.7	60°V形,0②	2.4	480～540	360～400	24～30	24～36	2
	16.0	60°X形,0③	2.4	495～555	370～420	24～30	24～36	2
	25.4	60°X形,0③	2.4	495～555	370～420	24～30	24～36	4

① 焊接速度:36～54m/h。

② 间隙0,钝边1.6mm。

③ 间隙0,钝边3.2mm。

3. 缺陷的焊补 指母材上的缺陷和焊后缺陷。焊补操作比焊接更难,要求更高。

大型镁合金工件和铸件上的缺陷,焊补前应彻底铲除缺陷,修整好坡口并清理好,坡口角度为90°～120°,焊补操作技术与焊接零件相同,焊补电流根据焊补件的厚度及散热条件而定,但要比同厚度的焊件小1/3～1/2。厚度小的焊补处反面用不锈钢垫板。焊补时在坡口端头10mm处引弧和收弧,弧坑应填满并稍高于焊缝,以避免弧坑裂纹。

多次焊补的接头抗拉强度只能达到母材抗拉强度的80%～90%,但因产生焊接缺陷的机会增多,接头塑性也有所下降,故对于重要件同一处焊补次数应加限制,不宜过多。

厚度较小而形状不太复杂的ZM5铸件和变形镁合金一般不预热。对于补焊面积大、厚度大和形状复杂的铸镁件焊前需局部或整体预热250～300℃。焊补电流应比MB3、MB8的焊补电流小20%,对铸镁件上的疏松等须彻底铲尽后焊补,以免产生气孔等。

4 钛及钛合金的焊接

钛及钛合金按其室温平衡组织分为α、β和α+β三类。工业纯钛(组织为α)、α钛合金和β钛合金焊接性较好,α+β钛合金中随β形成元素含量增加,焊接接头塑性降低,焊接冷裂纹和延迟裂纹敏感性增加,焊接性变差。钛及钛合金中以工业纯钛(TA2)和Ti-6Al-4V应用最广,前者主要用作耐蚀合金以代替不锈钢和铜镍合金等;后者用作结构件以减轻重量,它可在焊态下使用,也可通过焊后热处理强化。

4·1 钛及钛合金的焊接特点

(1)钛的化学活性大,820K以上时容易被空气、水分、油脂等污染,吸收氧、氮、氢、碳等,降低焊接接头塑性和韧性,在熔化状态下尤其严重。因此在焊接时对熔池(特别是背面熔池)以及温度超过820K的焊缝和热影响区要进行妥善保护。

(2)钛及钛合金熔点高,热容量大,热导性差,焊缝及近缝区容易产生晶粒长大,引起塑性及断裂韧度降低。随β稳定元素含量增加,晶粒长大倾向减少。当焊接接头冷却速度快时容易生成不稳定的钛马氏体(α),使接头塑性降低。因此对焊接线能量要适当控制。

(3)钛及钛合金焊接热裂纹敏感性小,β稳定化元素含量高的α+β钛合金冷裂纹敏感性大。在氢和焊接残余应力作用下,许多钛合金具有延迟裂纹倾向,因此要控制氢含量,复杂的焊接结构要及时进行消除应力处理。

(4)焊接气孔敏感性大。气孔占全部焊接缺陷的70%以上。为预防气孔,要严格控制焊丝质量,对待焊处进行酸洗或加工,采用合理的焊接方法和工艺等。

(5)钛的弹性模量小(约为钢的一半),焊接变形大,校形困难。采用真空电子束焊、等离子弧焊、脉冲氩弧焊等可减少焊接变形。

4·2 钛及钛合金的焊接工艺

4·2·1 氩弧焊

钛及钛合金的焊接,钨极氩弧焊应用最广,熔化极氩弧焊用于中厚板产品的焊接。

钨极氩弧焊分为敞开式焊接和箱内焊接。前者设备简单、操作方便,应用最广;后者主要用于复杂构件焊接。

焊接坡口与不锈钢相近,用机械方法加工坡口,焊前用酸洗法或机械方法(如刮削、细砂纸打磨等)清理待焊区和焊丝。酸洗液一般用HF 50g/L + HNO_3 350g/L水溶液,酸洗后用热水冲洗,晾干,从清理到焊接的时间应尽量短。临焊前用无水酒精擦洗焊丝和待焊处。

超星公司制作 请勿重作者版权

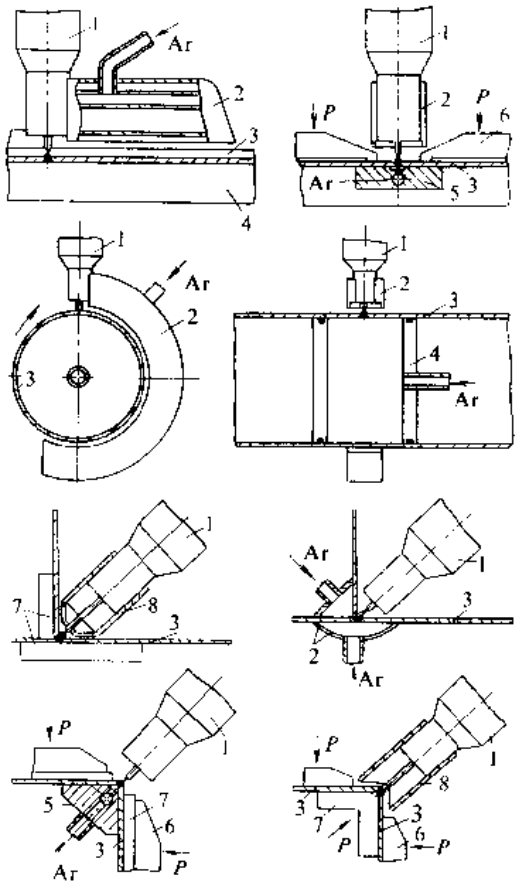


图 6·9-2 钛及钛合金焊接局部保护示意图

1—焊枪 2—拖罩 3—焊件 4—挡板 5—气保护垫板 6—冷却块 7—压板 8—玻璃罩

氩气纯度应不低于 99·99%，图 6·9-2 为局部保护措施示意图。

单道焊保护效果可通过焊接区正反面的表面颜色作大致评定(表 6·9-24)。多道焊时前道焊缝保护不良，焊缝受到污染，后一道焊缝保护良好照样可获得颜色正常的焊缝，但焊缝质量却受到影响。因此前道焊缝受到污染不经严格清理不许焊后一道焊缝。可用焊接接头的冷弯角和焊缝硬度检验污染的程度。

氩弧焊时采用直流正接。可用与母材同成分的焊丝。有时为提高接头塑性可用强度稍低的焊丝，如焊 TA2 时用 TA1 焊丝，焊 Ti-6Al-4V 时用 Ti-5Al-4V 焊

表 6·9-24 焊接区颜色与质量的关系

焊接区颜色	保护效果	污染程度	质 量
银白色(金属光泽)	好	小	良好
金黄色(金属光泽)			合格
紫色(金属光泽)			合格
青色(金属光泽)			合格
灰色(金属光泽)			不合格
暗灰色			不合格
白色			不合格
黄白色	坏	大	不合格

表 6·9-25 钛及钛合金手工钨极氩弧焊工艺参数

板厚 (mm)	接头形式	钨极直径 (mm)	焊丝直径 (mm)	焊道数	焊接电流 (A)	氩气流量(L/min)		
						喷嘴	拖罩	背面
0.5	直边对接	1	1	1	20～30	6～8	14～18	4～10
1	直边对接	1	1	1	30～40	8～10	16～20	4～10
2	直边对接	2	1.6	1	60～80	10～14	20～25	6～12
3	直边对接	3	2	2	80～110	11～15	25～30	8～15
5	单 V 形坡口对接	3	2～3	3	100～130	12～16	25～30	8～15
10	双 V 形坡口对接	3	2～3	6	120～150	12～16	25～30	8～15

丝。但焊较厚的 $\alpha+\beta$ 和 β 钛合金时不能用 α 钛合金焊丝，否则会出现氢化钛引起脆性，表 6·9-25 为手工钨极氩弧焊工艺参数。

工业纯钛焊后一般可不进行消除应力处理。结构复杂或有应力腐蚀、延迟裂纹倾向时则要进行消除应力退火。不完全退火可在空气中进行，加热温度 720～920K。完全退火因温度较高(950～1150K)，宜用氩气或真空保护。保温时间可取 5～10min/mm。

版权所有 北京航空航天大学出版社

表 6·9-26 钛及钛合金焊缝金属力学性能

材料	抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	伸长率 δ_5 (%)	断面收缩率 ψ(%)	V形缺口冲击功 A_{KV}(J) 293K	233K
TA1	400	300	42	76	45	39
TA3	560	440	24	48	18	15
Ti-5Al-2.5Sn (低杂质)	860	780	15	28	47	35
Ti-6Al-4V	1020	950	5	10	19	12
Ti-0.2Pd	500	400	28	59	46	

Ti-6Al-4V 钛合金一般采用焊前固溶，1170～1210K、30min，水淬，焊后时效，750～810K、4～10h。焊缝金属力学性能如表 6·9-26。

4·2·2 等离子弧焊

等离子弧焊非常适用于钛及钛合金焊接，无钨夹杂，气孔少，焊缝成形好，接头性能好。小孔法和熔透法等离子弧焊都可应用，典型的焊接规范如表 6·9-27。

等离子弧焊接时，保护方式与氩弧焊相同。采用直流正极性。厚度小于 0.5mm 时可以不用拖罩保护。由于等离子弧焊能量集中，10mm以下可以不开坡口一次焊透，生产率比氩弧焊高。厚板焊接时由于线能量大，因此需要加强保护。Ti-6Al-4V 钛合金焊接接头性能如表 6·9-28。该表中焊接接头去掉了焊缝余高。从该表可知，等离子弧焊的接头性能优于氩弧焊。经两种不同的焊后时效处理后，焊接接头强度相近，但母材强度却不相同，高温时效比低温时效低 34MPa。在焊接区可加厚的情况下，选用低温时效较好；在焊接区不能加厚的情况下，因高温时效伴随较大程度的消除焊接残余应力，故选用高温时效为佳。

表 6·9-27 钛及钛合金等离子弧焊接规范

厚度 (mm)	喷嘴孔径 (mm)	焊接电流 (A)	电弧电压 (V)	焊接速度 (m/h)	焊丝直径 (mm)	送丝速度 (m/h)	氩气流量(L/min) 离子气	保护气	拖罩	背面
0.2	0.8	5	16	7.5	—	—	0.25	10	—	2
0.4	0.8	6	16	7.5	—	—	0.25	10	—	2
1	1.5	35	18	12	—	—	0.5	12	15	4
3	3.0	150	24	23	1.5	60	4	15	20	6
6	3.0	160	30	18	1.5	68	7	20	25	15
8	3.0	170	30	18	1.5	72	7	20	25	15
10	3.5	250	25	9	1.5	42	6	20	25	15

表 6·9-28 Ti-6Al-4V 钛合金焊接接头性能

时效制度	材料	抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	伸长率 δ_5 (%)	断面收缩率 ψ (%)	冷弯角 (°)
	等离子弧焊接接头	1005	956	6.9	21.8	13.2
823K	氩弧焊焊接接头	1005	960	5.9	14.6	6.5
4h	板材(横向)	1072	983	11.2	27.3	16.9
	板材(纵向)	1189	1128	12.4	—	--
873K	等离子弧焊接接头	1009	960	7.1	—	—
2h	板材(纵向)	1155	1103	12.7	—	—

4·2·3 真空电子束焊

真空电子束焊非常适用于钛及钛合金，其最大优点是焊缝及近缝区不受空气、水分和粉尘等的沾污，晶

表 6·9-29 钛及钛合金真空电子束焊接规范

材料厚度 (mm)	加速电压 (kV)	束流 (mA)	焊接速度 (m/min)
1	13	50	2.1
2	18.5	90	1.9
3	20	90	0.8
5	28	170	2.5
16	30	260	1.5
25	40	350	1.3
50	45	450	0.7

超星公司制作请尊重作者版权

粒长大倾向小，焊接变形小，接头性能好。其缺点是焊缝成形不如等离子弧焊接，焊件结构尺寸受真空室限制等。焊接规范如表 6·9-29。

4·2·4 扩散焊

钛及钛合金容易进行扩散焊。扩散焊一般在真空条件下进行，也可在高纯氩气保护下进行。被焊接表面清理特别重要，表面要加工平光，焊前清理多用酸洗法。Ti-6Al-4V 合金扩散焊规范为：1220K、2～30MPa、2～4h。真空度不低于 0.13Pa。为减少扩散焊时的变形，可加铜、银箔中间层。

超塑性成形与扩散焊两个工艺过程合拼为一个工序完成的新工艺可以节约加工费 80%左右，材料利用率也大大提高。

4·2·5 电阻焊

钛及钛合金电阻焊可在普通的电阻焊机上进行。点焊不需要附加保护，焊缝有时需附加保护，保护装置类似于氩弧焊拖罩。焊前一般要用 $HF\text{-}HNO_3$ 水溶液酸洗。电极材料无特殊要求，电极端部形状以球面（r75～100mm）为宜。工业纯钛的焊接规范与不锈钢相近，钛合金焊接规范应小些，焊接规范如表 6·9-30。

表 6·9-30 钛及钛合金电阻点焊规范

合 金	厚度(mm)	焊接电流(kA)	焊接时间(s)	焊接压力(N)	电极端面半径(mm)
Ti-5Al-2.5Sn	1.5+1.5	10	0.17	6860	75
Ti-6Al-4V	0.8+0.8	5.5	0.11	2646	75
Ti-6Al-4V	1.5+1.5	10.6	0.17	6860	75
Ti-6Al-4V	0.5+1.5	7	0.13	1764	100
Ti-6Al-4V	1.0+1.5	8.5	0.17	2646	100

4·2·6 钎焊

钎焊是钛及钛合金与其他金属最简单可靠的连接方法，也可用于钛及钛合金的连接。钎焊一般要在真空或氩气保护下进行。钛容易钎焊，也容易生成脆性的金属间化合物，故选择钎料及钎焊工艺是重要的。

钎料主要有银基、铝基和钛基三类。含铜镍较多的钎料，因易形成脆性金属间化合物，一般不推荐使用。比较重要的钎料有：Ag-5Al、Ag-5Al-5Ti、Ag-5Al-1Mn-0.2Li、Al-12Si 和 Ti-48Zr-4Be 等。

4·2·7 钛钢复合板焊接

钛与铁能生成脆性化合物和低熔点共晶，直接熔焊时必然会产生裂纹。通过接头设计避免钛与钢直接焊接，即进行钛与钛焊接、钢与与钢焊接，参见第 10 章第 3 节。

5 镍、钴及其合金的焊接

镍具有面心立方结构，并一直保持到熔点，室温有磁性。钴在接近 400℃时，由密排六方转变为面心立方结构，室温也具有磁性。大多数镍和钴合金由室温至高温为面心立方奥氏体组织，无磁性。

镍及钴合金，按其工作环境，可分为耐蚀合金和高温合金。按强化方式，分为固溶强化合金和沉淀强化合金。按制造工艺，又可分为变形合金和铸造合金。

镍合金中常加入 Cu、Cr、Mo、W、Fe、Co、Ti、Al 等固溶强化元素，以提高耐蚀、抗氧化和高温强度等性能。

钴合金中加入 Ni、Cr、W、Mo 等固溶强化元素。Ni 稳定奥氏体组织，Cr 提高抗氧化和耐蚀性能，其他元素，如 Nb、Ti、Mn、Si，只要含量控制适当，不会影响焊接性。

5·1 镍、钴及其合金的焊接特点

1. 有较大的热裂倾向 某些镍和钴合金焊缝和热影响区易产生结晶裂纹和液化裂纹，在弧坑产生火口裂纹。杂质元素 S、P、Pb、Bi，晶界强化元素 B、Zr，以及 Si 都促使这些裂纹产生。Nb 可抵消 Si 的有害作用。熔融铜能引起镍和钴合金开裂，应防止 Cu 沾污焊接高温区。

2. 大多数沉淀强化镍合金有应变—时效裂纹倾向 铝钛含量越高，裂纹敏感性愈大。铝的作用大于钛。

3. 气孔 工业纯镍及 Ni-Cu 合金，由于固液温度区间小、液相流动性差，在焊接快速冷却条件下，极易产生气孔。为防止气孔，焊接材料中通常含有铝钛等脱氧剂。铝钛总量（质量分数）在 2.5%～3.5%时效果最佳。

4. 焊接区耐蚀性可能降低 Ni-Cr、Ni-Mo 和 Ni-Cr-Mo 合金焊接热影响区可能因晶界析出碳化物和晶界邻域贫 Cr 或贫 Mo，产生敏化，导致在某些介质中出现晶间腐蚀。一些合金中加入 Ti 或 Nb 固定碳，以防敏化。

5·2 镍、钴及其合金的焊接材料

1. 分类 焊接材料化学成分一般应与被焊金属相似，但经常含有较多的 Al、Ti、Nb、Mo 等元素以减

表 6·9-31 镍基合金焊接材料化学成分的质量分数①

(%)

分类	牌号	C	Mn	Fe	P	S	Si	Cu	Ni	Al	Ti	Cr	Nb+Ta	Mo	W
ENi-1	镍 141	0.10	0.75	0.75	0.03	0.02	1.25	0.25	≥92	1.0	1.0～4.0	—	—	—	
ENiCu-7	蒙镍尔 190	0.15	4.0	2.5	0.02	0.015	1.5	其余	62～69	0.75	1.0	—	②	—	—
ENiCrFe-1	因康镍 132	0.08	3.5	11.0	0.03	0.015	0.75	0.5	≥62	—	—	13.0～17.0	1.5～4.0	—	—
ENiCrFe-2	Inco-weldA	0.10	1.0～3.5	12.0	0.03	0.02	0.75	0.5	≥62	—	—	13.0～17.0	0.5～3.0	0.5～2.5	
ENiCrFe-3	因康镍 182	0.10	5.0～9.5	10.0	0.03	0.015	1.0	0.5	≥59	—	1.0	13.0～17.0	1.0～2.5		
ENiCrMo-3	因康镍 112	0.10	1.0	7.0	0.03	0.02	0.75	0.5	≥55	—	—	20.0～23.0	3.15～4.15	8.0～10.0	—
ERNi-1	镍 61	0.15	1.0	1.0	0.03	0.015	0.75	0.25	≥93	1.5	2.0～3.5	—	—	—	—
ERNiCu 7	蒙镍尔 60	0.15	4.0	2.5	0.02	0.015	1.25	其余	62～69	1.25	1.5～3.0	—	—	—	—
ERNiCr-3	因康镍 82	0.10	2.5～3.5	3.0	0.03	0.015	0.5	0.5	≥67	—	0.75	18.0～22.0	2.0～3.0	—	—
ERNiCrFe-5	因康镍 62	0.08	1.0	6.0～10.0	0.03	0.015	0.35	0.5	≥70	—		14.0～17.0	1.5～3.0	—	—
ERNiCrFe 6	因康镍 92	0.08	2.0～2.7	8.0	0.03	0.015	0.35	0.5	≥67		2.5～3.5	14.0～17.0	—	—	—
ERNiCrFe-7	因康镍 69	0.08	1.0	5.0～9.0	0.03	0.015	0.5	0.5	≥70	0.4～1.0	2.0～2.75	14.0～17.0	0.7～1.2	—	—
ERNiCrMo-3	因康镍 625	0.10	0.5	5.0	0.02	0.015	0.5	0.5	≥58	0.4	0.4	20.0～23.0	3.15～4.15	8.0～10.0	
HGH3113	-	0.08	1.0	4.0～7.0	0.015	0.015	1.0	0.2	其余	—	-	14.5～16.5	—	15.0～17.0	3.0～4.5
HGH3030	—	0.12	0.7	1.0	0.015	0.015	0.8	0.2	其余	0.15	0.15～0.35	19.0～22.0	—	—	—
HGH4169	因康镍 718	0.08	0.35	其余	0.015	0.015	0.3		50.0～55.0	0.2～0.6	0.65～1.15	17.0～21.0	4.75～5.5	2.8～3.3	

① 表中所列单个值，除其他规定，则均为最大值。

② 铌，有要求时最大为 2.5。

越星公司制作 请尊重作者版权

少气孔和裂纹。镍及镍合金焊条标准等效采用美国焊接学会(AWI)标准。表6·9-31为几种常用焊条(代号E)未稀释的焊缝金属和光焊丝(代号ER)化学成分。我国高温合金焊丝用代号HGH表示。

2. 焊接材料选择原则 原则上各类焊接材料用于焊接相应类型的合金。但考虑到铸造组织的焊缝与轧制的母材冶金差异较大,常产生严重的偏析,合金元素分布不均匀。有时为了防止焊接缺陷加入或减少某些元素,导致焊接接头性能不能全面达到母材水平。因此选择焊接材料的原则是,在满足工艺焊接性要求的同时,保证必要的使用性能,牺牲一些次要指标。主要从以下四方面考虑:

a. 工艺焊接性 在裂纹和气孔倾向大时,应选用含Al、Ti、Nb高的焊条。ENiCrFe-5焊条含有足够的Nb+Ta,至少为Si的四倍,旨在降低裂纹倾向。

b. 力学性能 包括强度、塑性、韧性、疲劳、持久和蠕变。镍和钴合金焊后状态接头强度一般等于退火状态母材,而塑性稍低。不同焊接材料的性能不尽相同,如ENiCrFe-3焊条比ENiCrFe-1和ENiCrFe-2焊条可满足更加严格的弯曲试验的裂纹限制。ERNiCrFe-7焊件经固溶退火和时效处理可使焊缝产生沉淀强化。NiCrMo-3焊缝金属长期在650~800℃工作,因析出包括Ni3Nb的第二相而损失塑性。

c. 耐蚀性 包括晶间腐蚀、应力腐蚀、电位腐蚀和点蚀。应避免焊缝腐蚀电位相对母材为阳极。在严重点蚀环境,必须增加焊缝铬钼含量。

d. 物理性能 包括膨胀系数、电阻系数和导热性,铝钛的加入会显著降低焊缝金属的热传导性能。

5·3 镍、钴及其合金的焊接工艺

焊接镍合金类似焊接奥氏体不锈钢。用镍稳定的钴合金同样为奥氏体组织,焊接过程冶金反应与镍合金相似。所有固溶强化镍合金焊接工艺和方法也适于钴合金。

清洁是成功焊接镍合金的重要条件之一。焊接或加热任何镍合金前,必须仔细清理焊接区的油、油脂、油漆、润滑剂、标记笔迹、测温指示材料等。这类材料往往含有硫或铅,可能引起裂纹。

5·3·1 电弧焊

1. 坡口设计 熔融的镍和钴合金焊缝金属流动性差,不易润湿母材。为保证接头熔透,应注意选用大坡口小钝边的接头形式。

2. 预热、层间温度和线能量 除含高铝钛的铸造镍合金外,焊接镍及钴合金不要求焊前预热。焊件温度应高于15℃,以避免湿气凝结和气孔。层间温度应尽可能低,以降低总的热输入量。对某些耐蚀合金,最高层间温度不应超过100℃。焊接宜采用小规范、窄焊道。高的热输入会引起焊接热影响区组分液化、碳化物沉淀或其他冶金反应,导致裂纹或耐蚀性降低。含高铝钛的铸造镍合金对结晶裂纹、液化裂纹以及应变--时效裂纹都非常敏感,为避免裂纹常需高的预热温度。

3. 焊前和焊后热处理 纯Ni、Ni-Cu、Ni-Cr、Ni-Cr-Fe等耐蚀和高温合金,一般在固溶状态下焊接,焊后不进行热处理。Ni-Mo、Ni-Si合金焊后需固溶退火以恢复耐蚀性。某些镍合金要求焊后消除应力处理以满足特殊的耐蚀要求。钴合金一般不需焊后热处理。

对于沉淀强化镍合金,如焊后直接时效处理产生应变--时效裂纹时,可先固溶处理再时效。对应变--时效裂纹极敏感的含高铝钛镍合金,采用焊前过时效,焊后再进行固溶和时效的工艺,可有效地防止裂纹。

4. 钨极氩弧焊 广泛用于焊接镍及钴合金,特别适于薄板和沉淀强化型合金。采用直流电源、正极性。用氩、氦或二者的混合气体做保护气体。氦气虽有穿透性强、减少气孔等优点,但由于氩气便宜,故常被选用。手工焊时用氩气。在氩中加H_2的质量分数5%可增强清理作用,但多层焊时易引起气孔。焊接时焊缝背面应进行保护,防止空气侵入熔池。工业纯Ni-Cu合金不填丝焊易产生气孔,建议用含铝钛的焊丝。

5. 等离子弧焊 很适于焊接镍和钴合金,熔深比钨极氩弧焊大。用小孔焊成形工艺,单道焊一次熔透可达8mm。用氩或氩氢混合气做离子气和保护气。氢增加焊接能量,提高焊接速度。

6. 熔化极气体保护电弧焊 除高硅铸造镍合金外,适于焊接所有固溶强化合金。也可用于沉淀强化合金,为降低裂纹敏感性,特别对多层焊,很少用匹配成分的焊丝。可采用喷射、脉冲喷射、熔滴和短路过渡工艺,直流恒压电源。

7. 手工电弧焊 药皮焊条手工电弧焊是焊接工业纯镍和固溶强化镍合金的常用方法之一。一般情况最小焊接厚度为1.6mm。这种方法很少用于焊接沉淀强化合金。

8. 埋弧焊 适当的焊丝和焊剂配合,可用于焊接固溶强化合金,适于焊厚板。不推荐用于焊接Ni-Mo

超星公司制作请尊重作者版权

合金，高的线能量和慢的冷却速度产生低的焊缝塑性。

5·3·2　其他焊接方法

1. 氧-乙炔焊　特别适于焊接高硅镍合金铸件。对其他镍合金，由于容易增碳和高的线能量，仅在无电弧焊设备时采用。焊接 Ni 及 Ni-Cu 合金用微还原焰，Ni-Cr 合金用中性焰。

2. 电阻焊　镍及镍合金可进行点焊、凸焊、缝焊及闪光对焊。镍合金的电阻比低碳钢大，热导性差，可用较低的焊接能量。高温合金的电极压力和顶锻力应比碳钢和不锈钢的大。

3. 电子束焊　由于高能量密度和高真空的焊接条件，特别适于电弧焊困难的合金。

4. 激光束焊　是高能量密度焊接方法，在大气中进行，用氩或氮做保护气，热过程和冶金行为与电子束焊相似，很适于焊接镍和钴合金。

6　钨、钼、钽、铌、锆及其合金的焊接

钨、钼、钽、铌、锆及其合金具有耐高温、耐熔蚀和抗腐蚀等特性。钨与钼还具有热导性好、热膨胀系数小以及蒸汽压低的特性。上述特性使其在火箭、原子能、电子、化工等工业中得到了广泛的应用。

6·1　钨、钼、钽、铌、锆及其合金的焊接特点

(1)这类金属及合金焊接加热时极易氧化、污染，吸收气体和其他杂质，焊后冷却时氧化物、氮化物或碳化物会析出，使焊缝及热影响区强化，但塑性下降，显著提高了这类难熔金属的脆性转变温度，一般要达到室温以上。这与气体杂质在金属中的固溶度、反应程度和反应产物的含量、分布有关。气体杂质在难熔金属中的固溶度见表 6·9-32。从表中可见间隙杂质在 W、Mo、Ta 和 Nb 金属中的溶解度有很大差别。对于一般工业纯的 Ta、Nb 金属来说，氮、氢和氧都是处于固溶状态。而对于工业纯的 W、Mo 金属，其间隙杂质氮、氧和碳的含量都远远超过溶解度，形成过饱合固溶体和少量氮化物、氧化物或碳化物第二相。因此，间隙杂质对 W、Mo 金属脆性的影响，要比 Ta、Nb 严重，微量氧就可使钼的脆性转变温度直线上升。

因此，为获得优质的接头，同时还要控制母材中气体杂质的含量(表 6·9-33)及对箱内保护气体的纯度提出严格的要求(表 6·9-34)。

表 6·9-32　金属固溶体中间隙原子的质量分数

($\times10^{-4}\%$)

金属类别	H	N	O	C
W	0.1	≤0.1	1	≤0.1
Mo	0.1	1	1	0.1～1
Ta	4000	1000	200	70
Nb	9000	300	1000	100

表 6·9-33　焊接性对母材气体杂质的质量分数要求　($\times10^{-4}\%$)

金属类别	O	N	H
钨、钼及其合金	<10	<10	—
钽、铌	<600	<300	<150
钽、铌合金	<250	<250	<10
锆及其合金	—	<80	<40

表 6·9-34　箱内钨极弧焊时对保护气体的纯度要求

($\times10^{-4}\%$)

金属类别	允许杂质总量	H_2	O_2	N_2	H_2O	要求条件
钨、钼及其合金	≤5～10	—	—	—	—	抽真空到压力小于 1.33×10^{-2} Pa 后充 99.999%Ar，焊接时用微量气体分析仪，定量地监视气体成分变化
钽、铌及其合金	<100	<2	<5	<15	<20	
锆及其合金	抽真空到 $1.33\sim1.33\times10^{-2}$Pa 后充 99.99% Ar 或 He					

(2)对焊接热过程敏感(锆除外)，晶粒长大对难熔金属的脆性有很大影响，对钨、钼脆性转变温度的影响尤其显著。一般情况下，晶粒长度为 0.1mm 时，W、Mo 的脆性转变温度均在室温以上。

6·2　钨、钼、钽、铌、锆及其合金的焊接工艺

1. 钨　钨的熔点高达 3400℃，但加热 400℃就开始氧化，且在室温呈现脆性，脆性转变温度在 240～550℃之间。因此，作为焊接结构材料，很难得到令人满意的结果。作为高温炉的发热元件，反射屏使用的钨板或钨丝编织网，用真空电子束焊或真空充氩箱内焊方

越星公司制作请尊重作者版权

法，获得了实用的高质量接头。高质量接头还要有焊前工件的净化处理——NaOH93%～97%[⊖]＋$KNO_3$7%～3%[⊖]溶液400～500℃热清洗，焊前工件预热等工艺措施来保证。电阻焊早已用于连接电子管的钨部件，通用的工艺方法是利用铌、钛、铁或镍的金属箔或镀层做中间层进行接触点焊。所研制的W-Re合金，其焊接性明显优于工业纯钨，不经预热就可进行惰性气体保护电弧焊。

2. 钼 工业纯钼熔点为2600℃，其焊接性与钨基本相同，在空气中加热到400℃便开始氧化，加热到600℃以上时，发生强烈氧化。焊接接头在室温通常是脆性的。用工业纯钼制做钼舟等在高温条件下使用的非受力焊接件，可用大气下钨极惰性气体保护焊完成，最佳的焊接工艺方案，还是真空箱内惰性气体保护焊。焊前热碱溶液清洗被焊工件，去除表面油污及氧化层以及工件的焊前预热，都是防止焊接裂纹，保证焊接接头质量的必要措施。

钨极惰性气体保护焊接钼及钼合金时，均用直流电源，正接法。保护气体用氮气替代氩气可降低焊接热输入量，在一定程度上改善金属过热及晶粒长大。一般情况下，钼的焊接接头组织均为粗晶组织。焊接清洗不良，焊接过程保护不良时，溶入的气体杂质，将以氧化物、氮化物或碳化物形式沿晶界析出，使焊接接头塑性降低。高压电子束焊接的钼接头，由于良好的保护和能量高度集中，可得到净化和细化的焊缝组织，使焊接接头具有室温塑性。

钼合金由于加入钛、锆、铼等金属元素，在一定程度上，限制了气体杂质及晶粒长大对焊接接头的有害作用，使焊接接头具有室温塑性。常用的钼合金有，Mo-0.5Ti，Mo-0.5Ti-0.08Zr-0.03C等。

钼及钼合金作为高温隔热元件使用时，可用接触点焊工艺实现元件的连接。为改善接触点焊的接头性能，可采用工件间加钽、钛、锆或镍箔垫层。

3. 钽 钽的熔点仅次于钨，高达2980℃，具有较高的高温强度和良好的室温塑性，通常不存在脆性转变问题。钽及钽合金有良好的焊接性能是做为高温结构的理想材料。常用钽合金Ta-10W，在1600℃高温下，抗拉强度为120.7MPa，焊接接头抗拉强度为161.7MPa。钽还具有良好的耐盐酸、硫酸、硝酸、磷酸和醋酸的腐蚀性能，所以，钽是制造化工设备的第一优选材料。钽还具有优良的低温塑性，优良的加工性能和焊接性能。氮、氢、氧气体含量过高，同样要显著降低焊接接头性能。为此，钽的焊接关键问题之一是防止气体杂质的有害作用。为减少气体杂质污染，焊前钽要进行酸洗，酸洗液配方为：H_2SO_4：HNO_3：HF＝5：2：2。由于钽的熔点高，热导系数大，钽焊接要消耗更多的热能，保护措施要更加严格。采用便规范，加快被焊钽材的冷却可提高保护效果并防止晶粒长大，保证良好的接头性能。钽及钽合金不仅可采用真空电子束焊、真空箱内气体保护焊，而且可采用大气下惰性气体保护焊。惰性气体保护焊要采用直流正接，焊缝的正、反面均采用拖罩保证焊缝处在高温时不受气体杂质污染。

4. 铌 铌熔点为2460℃。铌及铌合金具有熔点较高，理想的高温强度，良好的室温塑性和优良的抗腐蚀性能。铌合金是难熔金属中应用领域最广的合金，宇航工业、原子能工业均广泛使用了铌合金。工业纯铌及固熔强化铌合金的焊接与钽的焊接有极其相似的特点。沉淀硬化铌合金及某些具有时效脆化现象的铌合金，通常要采用焊接前或焊接后的热处理来改善焊接接头性能。对于这类合金的焊接，采用通常的惰性气体保护焊，合理的热处理，即可保证获得满意的焊接接头力学性能。为消除时效脆化现象，可以通过1055～1220℃，1～3h的焊后真空退火处理予以恢复。

5. 锆 锆及锆合金的熔点是难熔金属中最低的。工业纯锆的熔点为1852℃。862℃发生相变。锆及锆合金优良的抗腐蚀性能，使它在化工及原子能工业中得到广泛的应用。锆及锆合金加热到200℃便开始氧化，所以焊接时加强保护是极其重要的。为保证良好的焊接接头性能，有效地防止焊接气孔的产生，焊接前被焊工件的酸洗是必不可少的工序。酸洗液通常采用的配比是：$HNO_3$35%～45%[⊖]＋HF5%～7%[⊖]＋H_2O余量的溶液。作为化工耐腐蚀材料应用的工业纯锆，通常采用钨极氩弧焊焊接。作为核反应堆堆芯结构材料应用的锆合金，要采用保护效果最佳的真空电子束焊或充气箱内钨极氩弧焊，以便得到具有优良的耐腐蚀性能的焊接接头。

⊖ 皆指质量分数。

超星公司制作 请尊重作者版权

第10章 异种材料及其他材料的焊接

1 异种钢的焊接[46]~[53]

异种钢焊接通常是指不同组织的钢或不同成分的钢之间的焊接。

1·1 不同珠光体钢的焊接

这里主要指不同成分的珠光体耐热钢。根据珠光体耐热钢的焊接特点，为避免出现淬硬组织导致冷裂纹及热处理时产生再热裂纹，同时还要满足接头工作性能的要求，必须处理好焊接选材、预热及层间温度控制以及焊后回火温度的合理选择等几个关键问题。其处理原则是[54]：(1)焊接材料选择能满足合金成分较低的母材侧焊接性能要求；(2)预热及层间温度控制以满足合金成分较高母材侧焊接性能要求为出发点；(3)焊后热处理温度选择应兼顾两侧母材需要。接头强度评定应按低强母材一侧进行。

1·2 珠光体钢与奥氏体钢焊接特点

1. 稀释 异种钢焊缝成分是由填充金属成分、母材成分及其熔合比所确定。过度稀释的焊缝金属中将会形成马氏体组织，有产生裂纹的危险。利用 Schaeffler 镍铬当量组织图可以估算稀释后焊缝金属的组织状态。稀释程度还受焊接方法、接头型式、焊接工艺参数的影响。

2. 熔合区塑性降低 紧邻珠光体钢一侧熔合线处的奥氏体焊缝金属中，存在一个窄的低塑性过渡带(层)，宽度一般为 0.2～0.6mm。一般情况下，过渡带中镍的质量分数低于 5%～6%时，将形成马氏体组织，它的存在会严重影响接头的冲击韧性。对在低温下工作和承受冲击载荷的异种钢接头，应选用高镍合金焊条，以减小熔合区脆性马氏体带的宽度和熔合区附近冲击韧度降低的幅度。

3. 碳的扩散迁移及其对高温性能的影响 异种钢焊接接头在焊后热处理或在高温条件下工作时，在熔合线附近发生碳的扩散迁移现象，结果在珠光体钢一侧产生脱碳层，在相邻的奥氏体焊缝中形成增碳层。脱碳层硬度低、质软、晶粒粗大；增碳层中的碳以碳化铬形态析出，硬度高。其结果是接头的高温持久强度和抗腐蚀性能下降，脆性增大，使接头可能沿熔合区产生破坏。脱碳层和增碳层的宽度随加热温度提高和加热时间增长而增大。

珠光体钢中碳含量低、碳化物形成元素含量高、焊缝金属中镍含量高，可阻止碳的迁移。且工作温度愈高，焊缝金属中含镍量应愈高。例如下列接头在下列条件下，工作时间长达几千小时，尚不发生碳的迁移现象。

(1)用 Cr25Ni25Mo3 焊丝，焊接 45 钢的异种钢接头，工作温度 450℃。

(2)用 Cr25Ni40Mo7 焊丝，焊接 12Cr5Mo 钢的异种钢接头，工作温度 550℃。

(3)用 Cr25Ni60Mo10 焊丝，焊接 12CrMoV 钢的异种钢接头，工作温度 580℃。

也可以用高镍奥氏体焊条，预先在珠光体钢坡口上堆焊 6～8mm 过渡层，以阻止碳的迁移。

4. 热应力及其影响 奥氏体钢热膨胀系数比珠光体钢约大 30%～40%，这两种材质的异种钢接头在焊后冷却、热处理和运行中将产生热应力。在周期性加热和冷却条件下工作时，在熔合区珠光体钢侧，尤其在脱碳层，可能产生热疲劳裂纹，引起接头过早断裂。

采用线膨胀系数与珠光体钢较接近的高镍基焊条(如 Ni307)堆焊过渡层，可减小热应力及热疲劳应力的不利影响。

1·3 焊接材料及工艺选择[55]

1·3·1 焊接材料选择

强度用钢焊接时，按强度等级较低的钢材选择焊条和焊丝。珠光体钢与 w_{Cr}≥12%不锈钢焊接时，原则上用珠光体钢焊条，也可用奥氏体焊条。珠光体钢与 W_{Cr}≥17%不锈钢焊接时，必需用奥氏体钢焊条。这两类异种钢埋弧焊或氩弧焊时，可选用含碳量较低的 Cr、Ni 钢焊丝。珠光体钢与奥氏体钢焊接时，原则上选用含镍

㊀①w_{Cr}为 Cr 的质量分数。

能量公司制作请尊重作者版权

表 6·10-1　异种钢焊接材料选择

异种钢名称	手工电弧焊	埋弧焊		CO_2 气体保护焊
	焊条型号(牌号)	焊丝牌号	焊剂牌号	焊丝牌号
Q235+16Mn	E4303,E4315 (J422),(J427)	H08A,H08Mn	HJ431	H08MnZSi
2.25Cr-1Mo+Cr5Mo	E6015-B3 (R407)	H12Cr3MnMoA	HJ350	H12Cr3MnMoA
15CrMo+20CrMo9	E5515-B2 E5515-B2-VW (R307),(R327)	H12Cr3MnMoA	HJ350	H12Cr3MnMoA
Q235+1Cr13 型	E5015,E1-13-15 (J507),(G207) E1-11MoVNi-15,E1-23-13-15 (R807),(A307)	H10CrMoA	HJ431	H08CrNi2MoA
15MnV+0Cr13Ni6N	E0-18-12Mo2V 13(A237)① E0-18-12Mo2-16(A202)②			
Q235+Cr17 型	E0 18-12Mo-15 E1-23-13-15 (A207),(A307)	H10CrMoVA	HJ431	H08CrNi2MoA
Q235+Cr18Ni9 型	E1 23-13-15,E2-26-21-15 (A307),(A407)	H1Cr25Ni13	HJ431	H08CrNi2MoA

① 用此焊条在 15MnV 钢坡口上堆焊过渡层(8～10mm)。

② 用此焊条填满焊缝

量较高的铬镍奥氏体焊条和含铬、镍较高的焊丝，如 H1Cr25Ni13。选择举例见表 6·10-1。

1·3·2　焊接工艺

对于异种强度用钢，其焊接规范、预热温度、焊后热处理规范等，参照焊接性较差的钢材拟定。异种珠光体耐热钢预热温度大多在 250～350℃，焊后回火温度在 650～750℃。珠光体钢与 1Cr13 型钢焊接时，预热温度及焊后热处理工艺按后者考虑。珠光体钢与 Cr17 型(包括 0Cr13)以及珠光体钢与奥氏体钢焊接，一般不预热或低温预热，焊接电流尽量小，焊后一般不热处理。

2　异种金属的焊接

2·1　异种金属熔焊焊接性[56][57]

异种金属间彼此能形成固溶体的，熔焊焊接性良好；形成机械混合物或其他复杂组织者，焊接性尚好；形成金属间化合物的，焊接性差，几乎不可能用熔焊的方法获得满意的接头，但用固态焊接的方法、中间过渡层方法、钎焊方法等，仍有可能获得良好的接头。异种金属间物理、化学性能的差异，会在很大程度上影响它们的焊接性。异种金属焊接在大多数情况下，熔合区塑

性下降，内应力较大，易形成裂纹，甚至焊缝金属剥离。一些异种金属的熔焊焊接性见图 6·10-1。

2·2 铜-钢焊接

铜-钢的熔焊焊接性较好，因为铜与铁不形成脆性中间相，互相间有一定溶解度，晶格类型相同，晶格参数接近。但由于两者的熔点、热导性、热膨胀系数等物理性能相差悬殊，加之铜在高温时极易氧化、易吸气等不利因素，在实际施焊时也有很多困难，主要表现为对规范敏感性较大。铜一侧熔合区易产生气孔和母材晶粒长大，由于存在低熔点共晶和较大的热应力而有裂纹倾向。钢一侧熔合区经常发生液态铜向钢晶粒之间的渗透，导致形成热裂纹。焊缝金属塑性随铁的含量增加而降低，要求铁的质量分数<20%，铜母材氧含量尽可能低。通常焊前对铜件需要预热。填充金属常选用铜或铜合金丝。

铜-钢用摩擦焊、扩散焊、爆炸焊等固态焊接法都能获得优良的接头。

2·2·1 钨极氩弧焊

可用于紫铜-钢的管与管板、管与管、板与板的焊接及钢上衬紫铜等。主要适用于薄件。焊接铜件酸洗，

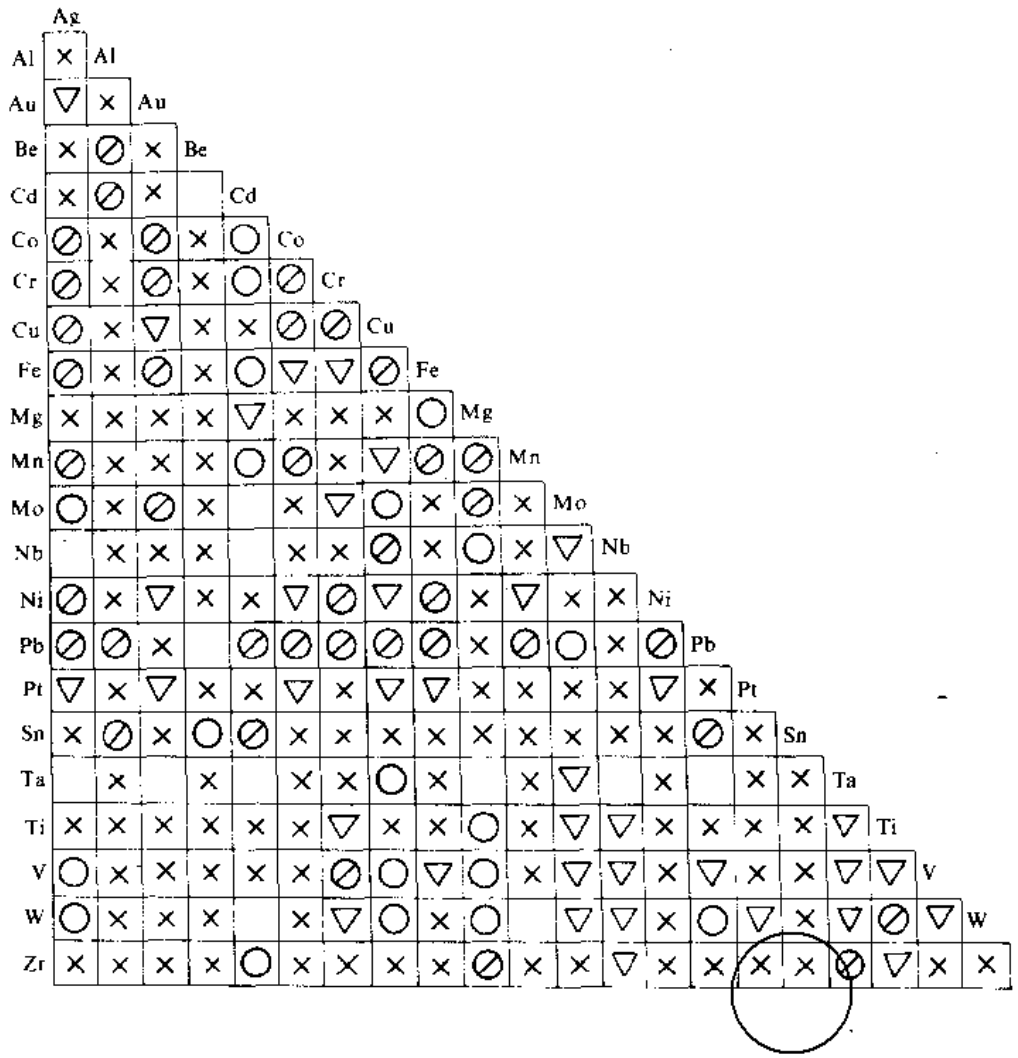


图 6·10-1 异种金属熔焊焊接性

▽—好，形成固溶体 ⊘—较好，形成机械混合物或复杂组织

○—一般，资料不全 ×—困难，形成金属间化合物

空格—缺少资料

超星公司制作 请尊重作者版权

超星公司制作请尊重作者版权

钢件除油，必要时铜件预热，用直流正接。填充金属：紫铜与低碳钢可用 HS202 焊丝；紫铜与不锈钢可用 B30 白铜丝或 QA19-2 铝青铜焊丝，焊接时电弧偏向铜侧。

2·2·2　手工电弧焊

结晶器铜内壁（$\delta=14$mm）与钢水套（$\delta=3$mm）T 形接头，焊前预热至 750～800℃，用 ϕ4mmT107 紫铜电焊条施焊，单道角焊缝，焊条偏向铜侧。也可用 A132、J507 等焊条。焊接时工件温度应不低于 650℃。

2·2·3　埋弧焊

通常用于厚件焊接。1 万 L 糊化煮沸锅，焊接规范列于表 6·10-2。坡口形式、焊丝位置、填充铝丝放置见图 6·10-2。坡口中加铝丝可以脱氧、减弱液态铜向钢侧晶间渗入的倾向，Al 与 Fe 形成微小的 $FeAl_3$ 质点，使铜的晶粒细化。结果使接头强度不低于铜母材，伸长率可达 20%，冷弯角达 180°无裂纹。

表 6·10-2　铜-钢不预热单面焊双面成形埋弧焊规范

焊件材料及厚度 (mm)	焊丝材料直径 (mm)	焊剂牌号	焊接电流 (A)	电弧电压 (V)	焊接速度 (m/min)	焊丝伸出长度 (mm)	极性	焊机型号
Q235；$\delta=12$ T_2；$\delta=12$	T_1，ϕ4 填充纯铝丝 1 根，ϕ3	HJ431 烘干	650～700	40～42	0.2	35～40	反接	GM-1000 硅整流焊机

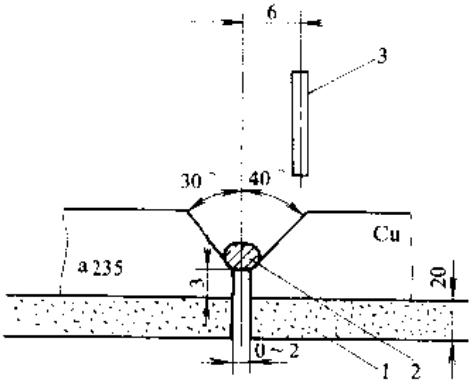


图 6·10-2　铜-钢埋弧焊

1—焊剂　2—填充铝丝　3—焊丝

2·2·4　闪光对焊及电阻对焊

紫铜、黄铜与钢的闪光对焊和电阻对焊都可获得合格接头。闪光对焊时，钢 $l=3.5d$，紫铜 $l=1.0d$，黄铜 $l=1.5d$，式中 l 为伸出长度，d 为焊件直径。电阻对焊时，钢 $l=2.5d$，紫铜 $l=1.5d$，黄铜 $l=1.0d$；顶锻压力均为 9.8～14.7MPa。顶锻时必须把接口处的熔化金属和杂质全部挤出，并使焊件在接口处产生一定的塑性变形。

2·2·5　扩散焊

铜-钢扩散焊可获得优良接头。紫铜-低碳钢扩散焊规范：焊接温度 900℃，焊接压力 4.9MPa，焊接时间 20min，真空度 1.333×10^{-1}～1.333×10^{-2}Pa。为了提高接头强度，常用镍片作中间扩散层。

2·3　铝-钢焊接

铝、铁能形成多种脆性金属间化合物，即使固态钢与液态铝相接触也能形成；铝的线膨胀系数为钢的 2 倍，接头区域易形成应力，引起变形和裂纹；难焊。可用中间过渡层焊接（实质是钢侧钎焊，铝侧熔焊的熔焊—钎焊）。采用各种固态焊接方法，并控制温度和时间，避免产生脆性组织，可获得优良接头。

2·3·1　钨极氩弧焊

焊前钢件待焊边缘 30mm 范围内，电镀一层 35～40mm 厚的锌层，焊接规范见表 6·10-3。焊接时只熔化铝侧母材和填充金属。接头抗拉强度可达 88～99MPa，沿锌层断裂，断口上常发现气孔。如镀层改为铜-锌或镍-锌复合镀层，或增大钢侧钎焊面积等工艺措施，可使接头静载强度或疲劳承载能力达到铝或 LF6 母材的水平。

表 6·10-3　铝-钢氩弧焊规范

工件材料牌号	工件厚度 (mm)	电极材料直径 (mm)	焊接电流 (A)	电弧电压 (V)	焊接速度 (m/h)	填充金属化学成分的质量分数 (%)
Q235＋LF6	3	钨极 ϕ3	160～180	16	6.5～8.0	Ni3.5；Zn7 Si4～5； Al 余量

超星公司制作 请尊重作者版权

2·3·2 气焊

工件 Q235+L2，厚度 1～2mm，临焊前焊件平整清理，钢侧无镀层。填充金属含量的质量分数：Al87%～88%，Zn5%，Sn8%～7%；熔剂：CJ401，中性焰。按气焊铝方法焊接，只熔化铝边和填充金属，并使液态金属流到钢侧，形成钎焊结合。长焊缝宜分段焊，接头强度 σ_b 可达 72MPa。

2·3·3 钎焊

Cr18Ni9 型不锈钢锅底与 L2 铝板钎焊，用氟化物钎剂，粉末状 Al-Si 共晶钎料，氮气保护炉中钎焊。

2·3·4 摩擦焊

焊前须退火，清理，焊接面温度应控制在 550℃左右为宜。规范列于表 6·10-4。

表 6·10-4 铝-钢摩擦焊规范

工件材料	工件直径 (mm)	转速 (r/min)	送丝速度 (mm/s)	摩擦时间 (s)	伸出长度 (mm)		摩擦压力 (MPa)	顶锻压力 (MPa)
					钢	铝		
1Cr18Ni9Ti+L1	管子 φ60 壁厚 5	170	4	4～6	24	2	235	392

2·4 铝-铜焊接

铜在铝中最大溶解度 548℃时为 5.65%，当超过这个含量时，在晶界上将出现固溶体和 $CuAl_2$ 的脆性共晶体。铝在铜中含量的质量分数超过 9.4%时，形成 Cu_9Al_4 相，变脆。因此不宜用熔焊法，可采用熔焊—钎焊、钎焊及各种压焊。

2·4·1 熔焊—钎焊

铜待焊面先搪一层锌基钎料或镀一层 50～60μm 的锌层，用 CJ401 气焊熔剂，纯铝焊丝进行气焊，只熔化铝一侧，或用钨极填丝氩弧焊进行熔焊—钎焊，都能获得良好效果。

2·4·2 钎焊

铝、铜电器接头，经清理、装配，用 QJ203 水溶液，Sn80-Zn20 钎料熔池，450℃左右，浸沾钎焊。

在铝件上镀铜或在铜件上镀锌，用 Cd-Zn 钎料配合 QJ204 钎剂，进行火焰钎焊或电阻钎焊。

2·4·3 压焊

常用方法及比较见表 6·10-5。

铝-铜闪光对焊、电容储能对焊依靠提高顶锻速度和足够大的顶锻力，同时严格控制有电顶锻时间，将已形成的金属间化合物随液态金属一起挤出接口之外，并使脆性层尽量薄和不连续，保证接头具有一定塑性。

铝-铜摩擦焊转速低，摩擦压力大，摩擦面温度低于共晶温度，通常只有 350℃左右，可避免脆性金属间化合物的形成。其接头质量与冷压焊相同，具有优良塑性。

铝-铜过渡接头在以后的焊接（如：铝端与铝，铜端与铜的焊接）及使用过程中，接缝处受热温度应低于 300℃，受热时间应尽量短；

表 6·10-5 铝-铜焊接方法的比较

焊接方法	闪光对焊	摩擦焊	储能对焊	冷压焊
焊接质量	好（有脆性层，但不影响使用）	很好（无脆性层）	好（有脆性层，但不影响使用）	很好（无脆性层）
常焊面积	250～1600mm²	φ6～40mm	0.5～10mm²	0.5～200mm²
断面形状	矩形	焊接时：圆形棒料	线材，管材	不限，实心件

超星公司制作 请勿重作者版权

（续）

焊接方法	闪光对焊	摩擦焊	储能对焊	冷压焊
生产率（平均）	60 件/h	80～120 件/h	自动 300 件/h 半自动 150 件/h	自动 120 件/h
焊前准备工　作	须严格退火，表面清理一般，端面要求不高	须退火，端面要求平整，不能有油污、水等脏物	硬铜件须退火，清理要求也较高	硬铜线要退火，表面清理一般，端面要求不高
焊后工作	去毛刺加工量不太大	车去飞边，通常须锻扁或机械加工	挫去或砂轮磨去飞刺，管件清理内壁	—
材料消耗	铜烧掉 4.5～6mm 铝烧掉 15～18mm 不易收回	铜约 6～7mm 铝约 4～10mm 能收回	铝：线径的 1～1.5 倍 铜：线径的 1.5～2 倍 不易收回	约为工件直径或厚度的 2.5～3 倍 易收回
附加设备	电源变压器、空压机、抽风机	锻压机、机械加工设备	砂轮机	—
主要应用场　合	由专业厂或车间制造大截面铝-铜过渡接头	由专业厂或车间制造中型断面铝-铜过渡接头	线材、管材等铜-铝过渡接头	适于制造相当于 ϕ2～13mm 的铝-铜过渡接头
常用设备	UN9 200 型铝铜对光对焊机 LQ-200 型对焊机 LQ-300 型对焊机 改装 MCMY-150 型闪光对焊机	自制设备	各厂自制设备 UR2-800 型电容储能自动对焊机 UR3 1200 型电容储能半自动对焊机	LHJ-15 型冷压焊机 QL-25 型冷压焊机，手焊钳

3　复合钢板的焊接

复合钢板亦称“双层钢”。通常基层应用碳钢及普通低合金高强钢，由基层来保证复合板的强度，基层厚度≤40mm，而覆层材料有不锈钢（铬镍奥氏体不锈钢或铬不锈钢）、镍及其合金、钛及其合金、铜及其合金、铝及其合金等。一般覆层厚度占复合板总厚度的 10%～20%（通常为 1～5mm）。复合材料具有耐蚀性、电导性等特殊性能。

复合钢板广泛应用于石油、化工、造纸、轻纺等各工业领域以及高能物理工程技术等部门。

3·1　复合钢板焊接的一般原则

复合钢板的焊接，包括基层的焊接、覆层的焊接及基层与覆层交界处的过渡区的焊接三部分。基层、覆层的焊接工艺、原则上与单独焊接这两类材料的工艺相同，而过渡区的焊接则属于异种金属的焊接。异种金属的焊接由于基层焊缝的稀释作用，往往导致焊缝的塑性和韧性的降低，并影响到覆层焊缝的成分与性能。为此必须正确地选择过渡区焊缝的材料和焊接工艺。对过渡区的焊接有三种情况：(1)问题已基本解决，并已获得广泛应用者，如各种不锈钢复合钢板、铜及铜合金复合钢板的焊接等；(2)问题虽可初步解决，但因成本过高而难以推广应用者，如钛及钛合金复合钢板的焊接等；(3)问题尚未解决者，如铝及铝合金复合钢板的焊接等。因此对后两种情况，目前在工程应用中，仅分别焊基层和覆层，而不焊过渡区焊缝。

3·2　复合钢板焊接坡口的设计

复合钢板的坡口设计，除应满足坡口设计的一般原则外，还必须便于分别对基层、覆层及过渡区的焊接施工。常用坡口形式见图 6·10-3 及图 6·10-4。

超星公司制作 请尊重作者版权

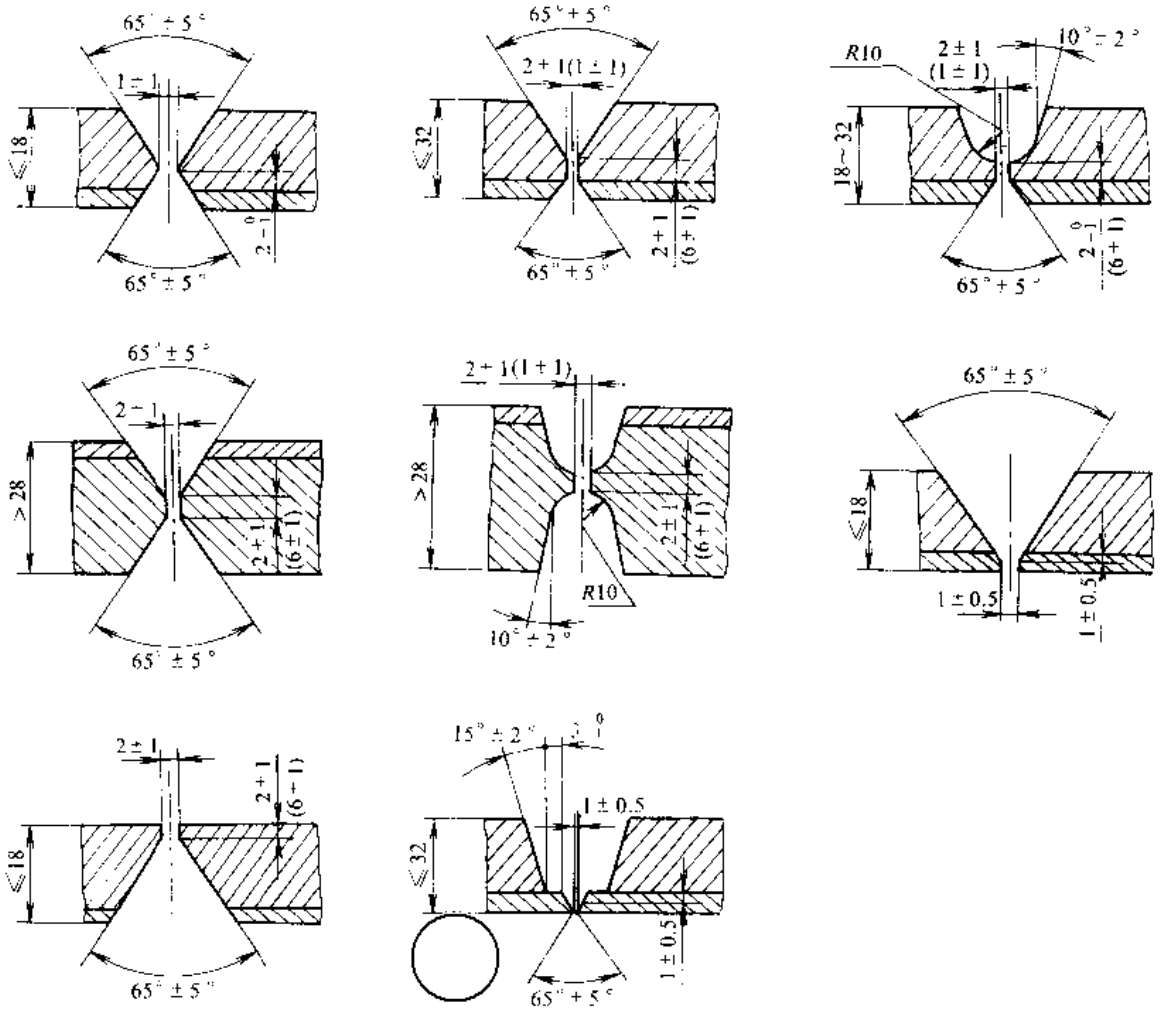


图 6-10-3　不锈钢复合钢板、铜及铜合金复合钢板对接接头常用坡口形式(括号内的尺寸供埋弧焊用)

表 6-10-6　不锈钢复合钢

母材			手工电弧焊
类别		牌号	焊条
基层钢A	A1	Q235、20、20g、20R、22g、3C	E4303、E4315、E4316
	A2	16Mn、16MnR、16Mng	E5003、E5015、E5016
	A3	15MnV、15MnVR、15MnVN、15CrMo、16MnNb	E5003、E5015、E5016、GBE5501-G、GBE5515-G、GBE5516-G
复层不锈钢B	B1	0Cr13	E0-19-10-15、E0-19-10-16
	B2	0Cr18Ni9、1Cr18Ni9	
	B3	0Cr18Ni11Ti、1Cr18Ni9Ti	E0-19-10Nb-15、E0-19-10Nb-16
	B4	00Cr19Ni11、00Cr18Ni10N	E00-19-10-15、E00-19-10-16
	B5	0Cr17Ni12Mo2、0Cr19Ni13Mo3	E0-18-12Mo2-15、E0-18-12Mo2-16、E0-19-13Mo3-16
	B6	0Cr18Ni12Mo2Ti、0Cr18Ni12Mo3Ti	E0-18-12Mo2Nb-16
	B7	00Cr17Ni14Mo2、00Cr19Ni13Mo3	E00-18-12Mo2-16、E00-23-13Mo2-16
过渡区		A+(B1~B4)	E1-23-13-15、E1-23-13-16 E2-26-21-15、E2-26-21-16
		A+(B5~B7)	E1-23-13Mo2-16、E1-2b-21Mo2-16 E2-26-21-15、E2-26-21-16

超星公司制作 请尊重作者版权

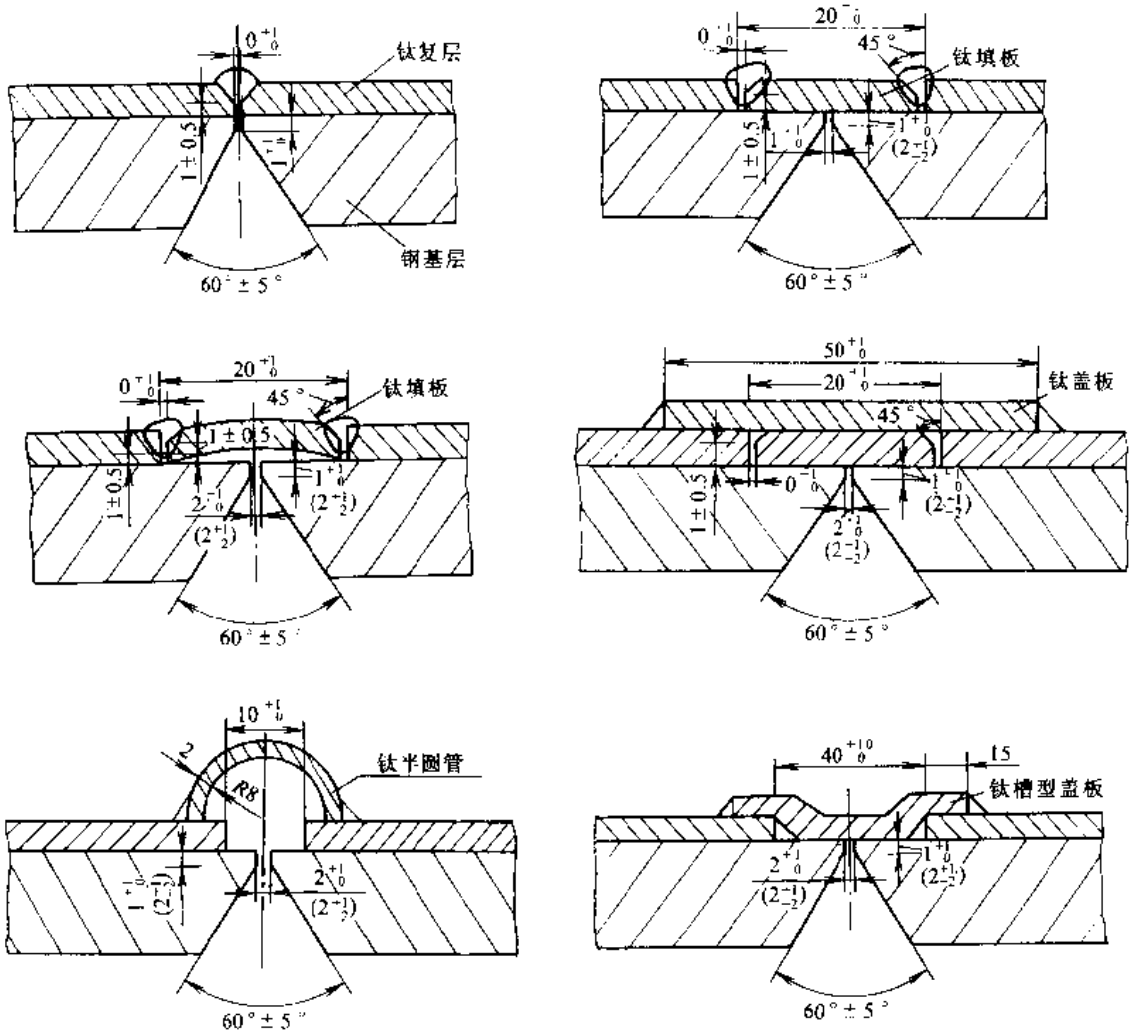


图 6-10-4　钛及钛合金或铝及铝合金复合钢板对接接头常用坡口形式(括号内的尺寸供埋弧焊用)

板的焊接材料

埋弧焊		气体保护焊		备注
焊　丝	焊　剂	焊　丝	气体	
H08、H08A、H08MnA	HJ431、SJ101	H08Mn2Si、H10Mn2、H08Mn2SiA	CO_2 或 CO_2+Ar	
H08MnA、H10Mn2、H10MnSi、H08Mn2SiA、H08Mn2MoA	HJ431、HJ430、HJ350、SJ101、SJ301	H08Mn2SiA、H08Mn2MoA、H10MnSi		
—	—	H0Cr14 H0Cr21Ni10 H0Cr20Ni10Ti、H0Cr20Ni10Nb H00Cr21Ni10 H0Cr19Ni12Mo2、H0Cr20Ni14Mo3 H00Cr19Ni12Mo2	Ar	可以用与母材相近成分的丝材
—	—	H1Cr24Ni13、H0Cr26Ni21 H1Cr26Ni21、H1Cr24Ni13Mo2	Ar	

超星公司制作 请尊重作者版权

3·3 复合钢板的焊接材料

不锈钢复合钢板覆层及过渡区焊缝焊接材料的选用见表6·10-6。其中基层钢的焊接材料也适用于其他种类的复合钢板的焊接。铜及铜合金复合钢板、钛及钛合金、铝及铝合金复合钢板的覆层焊接材料，一般与覆材相同。铜及铜合金复合钢板的过渡层焊接材料见表6·10-7。

表6·10-7 铜及铜合金复合钢板过渡区焊接材料

覆层材料	铜	铝青铜	磷青铜	硅青铜	白铜
焊接材料	Nb、N2、N4	TCuAl SCuAl	TCuSn SCuSn	TCuAl SCuAl	Nb、N2、N4 TCuAl、SCuAl

3·4 复合钢板的焊接工艺

3·4·1 焊接方法

基层钢的焊接一般采用手弧焊、埋弧焊及CO_2气体保护焊。不锈钢复合钢板覆层及过渡区的焊接，可采用手工电弧焊、埋弧焊和TIG焊。而对于铜、铝等复合钢板覆层焊接应选择电弧功率较高的焊接方法，如He+Ar混合气体保护焊、He弧焊工艺等。

3·4·2 焊接程序

一般情况下先焊基层，且经清根及规定的质量检验合格后，再焊过渡区，最后焊覆层。

3·4·3 焊接施工

焊接基层钢时，应防止覆层的过热和熔化。焊接过渡区时，应尽量减小稀释率。焊接覆层时，焊缝表面应力求平整、成形美观。

4 陶瓷的焊接

由于陶瓷主要靠烧结成形，硬度很高而难于机械加工，所以形状复杂的陶瓷零件常需经过焊接组成。许多零件的不同部位有不同的性能要求，就需要将陶瓷与金属焊接起来。因此，陶瓷的焊接既包括陶瓷与陶瓷之间，又包括陶瓷与金属之间的焊接。

4·1 陶瓷的性能特点

表6·10-8中列出了几种常用结构陶瓷的物理性能和力学性能。同时也列出了两种金属的有关性能作为对照。由表可知，结构陶瓷的特点是：密度小（可以使零件质量小，惯性小）；弹性模量高；室温下具有一定的高强度且在高温下强度降低不多；硬度极高；热胀系数一般较小；比热容大；熔点（或分解、升华温度）都比一般金属高。

表6·10-8 常用结构陶瓷的性能

性能	结构陶瓷				金属	
	Al_2O_3	ZrO_2	Si_3N_4	SiC	Fe	Cu
密度(kg/m³)	3980	5910	3260	3100	7800	8900
弹性模量(GPa)	360	205	230	303	210①	110
抗折强度(MPa)						
室温	440	1020	880	500	300②	220②
1000℃	340	450③	510	475	—	—
1400℃	230	—	160	470	—	—
努普硬度(GPa)（3N荷重）	20.0	11.7	15.0	28.0	87④	47④
线胀系数($\times10^{-6}$/℃)	8.1	10.5	3.3	4.3	11.9	16.5
比热容[J/(kg·K)]	753.6	502.4	795.5	837.4	460	380
熔点(℃)	2050	≈2500	>1900⑤	≈2200⑥	1539	1083

① 钢的弹性模量。② 室温抗拉强度。③ 800℃时的抗折强度。④ 布氏硬度HB。⑤ 分解温度。⑥ 升华温度。

4·2 陶瓷焊接的主要问题

4·2·1 陶瓷与金属组织结构的明显差异

陶瓷与金属的晶格不同、电子结构不同，因而，当陶瓷与金属焊接，或采用中间层金属连接陶瓷时，主要依靠在焊接温度下，陶瓷与金属相互反应生成反应产物，获得原子尺度的结合界面，从而形成焊接接头。

4·2·2 陶瓷与金属之间的热应力

由于线胀系数差别很大，且陶瓷不易变形，陶瓷与金属连接后，从焊接高温冷却至室温时，因收缩量差异而会在界面附近形成相当大的热应力，这就可能在界面附近的陶瓷中造成微观损伤甚至引起破断。通常降低焊接温度或在界面处加入过渡层金属，靠金属变形吸收和缓解热应力是有效的办法。

超星公司制作请尊重作者版权

4·3　陶瓷的焊接方法

4·3·1　活性钎料钎焊

普通用于金属的钎料对陶瓷不能润湿。含有 Ti、Zr、Cr 等活性元素的钎料能与陶瓷发生反应而经润湿形成结合界面，这种活性钎料钎焊方法在连接陶瓷中有着广泛的应用。钎料中活性元素的含量及钎焊温度、保温时间等工艺条件是影响接头强度的主要因素。如果是陶瓷与金属的钎焊，则应加入过渡层以缓解热应力，这有助于提高接头强度。

与此法相似的还有氧化物连接法，Al_2O_3、B_2O_3、SiO_2、ZnO等氧化物可与陶瓷晶界的玻璃相发生反应并沿晶界渗透，同时陶瓷向氧化物中溶解，也能形成连接。

4·3·2　真空扩散焊

扩散焊时陶瓷可以直接连接，也可以通过中间层连接，但后者较易实现。所用中间层有 Ni、Ti、Al 等高塑性金属或其合金，它们无需润湿陶瓷，但应与陶瓷发生反应形成连接并具有相当的结合强度。

扩散焊主要控制的工艺条件是温度和保温时间，压力也有一定的影响。热等静压可以认为是扩散焊的一种特例，此法加压均匀，质量较好，但设备复杂，成本过高。

4·3·3　熔焊

陶瓷熔焊主要采用电子束焊、激光焊和等离子弧焊等高能量密度的方法，但适用的陶瓷种类有限，因为有些陶瓷低于熔点便已分解(Si_3N_4)或升华(SiC)，而有些则在熔化时迅速蒸发(MgO)。

5　复合材料的焊接

5·1　材料特性、分类及焊接特点

两种或两种以上的材料宏观地结合在一起而不发生整体化学反应，即可形成复合材料。复合材料通常由基体材料和增强材料两大部分组成，构成复合材料的各组分材料(原材料)的种类、数量、纤维方向及其他参量可以自由调节，从而获得各单一原材料所不具备的优越的综合性能，如高比强度、高比刚度、尺寸稳定性、耐热性、耐磨性、耐蚀性等等，因此复合材料在现代工程特别是航空航天领域，得到越来越广泛的应用。

复合材料按基体可分为金属基、陶瓷基、及聚合物(高分子)基三大类。按增强相的性质有碳、硼、玻璃纤维、碳化硅、三氧化二铝及金属丝等多种，按增强相的形状可分为颗粒状增强、纤维增强、片状物增强、以及板层状复合材料等。

复合材料的焊接性较差。国内外对其焊接性的研究起步也较晚。总的来说，随着基体与增强相的不同，焊接特点、焊接(或胶接)方法及工艺有较大的差异。归纳起来，复合材料焊接有如下特点：

(1)基体材料与增强相的物理、化学性能差异较大，焊接(或胶接)温度难以选择与控制。

(2)高熔点增强相的出现，改变了熔池的正常结晶状态，易产生未熔合、气孔、夹渣等缺陷。

(3)增强相的出现，使冶金反应复杂化，产生脆性相的可能性增加。

(4)增强相的出现，往往降低了接合处的润湿性。

(5)复合材料焊接时的工艺要求比较高，并且往往需要添加中间材料，才能使其焊接性得到改善。

研究较多的是铝基复合材料(增强相有硼纤维、碳纤维、三氧化二铝、碳化硅晶须或碳化硅颗粒等)的焊接。下边以碳化硅晶须增强铝($SiCw^{\ominus}$/Al)复合材料为例予以说明。

5·2　碳化硅晶须增强铝复合材料焊接方法选择

1. SiCw/6061Al 的熔焊　采用通常的 MIG 焊或 TIG 焊方法，难以形成良好的接头，很易出现未熔合、气孔、夹杂等缺陷，主要原因是增强相与基体的物理性能特别是熔点相差太大，增强相熔点高，熔池流动性差，增强相与基体润湿性也不好。此外，在高温下发生化学反应，生成 Al_4C_3 和 Si 块，使接头变脆。当采用高能量密度的激光焊时，熔池流动性得到改善，可形成外观成形良好的焊缝。

2. SiCw/6060Al 的电阻焊　电阻焊加热时间短，能抑制增强相与基体间的反应，并可在压力下消除气孔等缺陷，因此采用电阻焊是可行的。但电阻焊受增强相体积百分比的限制，若百分比过大，接合将变得困难。此外压力过大时，纤维遭到破坏并使飞溅增大。

3. SiCw/6061Al 的钎焊　由于 SiC 晶须的存在，严重阻碍了钎料在母材上的润湿与铺展。但若在复合材料表面镀 Cu 或 Ni，可以实现其钎焊连接。此外，在真空下钎焊，用 Ag 基钎料，以及采用接触反应钎焊等工艺，可以大大改善其钎焊性。

4. SiCw/6061Al的扩散焊　试验表明，在几种焊

⊖ Cw—碳化物晶须。

超星公司制作 请尊重作者版权

接方法中，与熔焊、电阻焊、钎焊等方法相比，扩散焊的接头质量最高。特别是用 Al 做中间夹层时，接头强度可以达到甚至超过母材。SiCw/6061Al 合适的扩散焊参数为：$T=600℃$，$P=4MPa$，$t=30min$，真空度 $1.333\times10^{-2}\sim1.333\times10^{-3}Pa$。此外，焊前的表面清理应适当，追求过高的焊口表面光洁反而使接头强度降低，用 280 号砂纸打磨比用 1600 号砂纸打磨效果要好。

6 塑料的焊接

6·1 塑料的焊接条件

塑料焊接的基本原理是热熔状态下的大分子在焊接压力的作用下相互扩散，产生范德华力，从而紧密地焊接在一起。塑料焊接的必要条件为：

(1)焊接温度——造成塑料的熔融与流动；

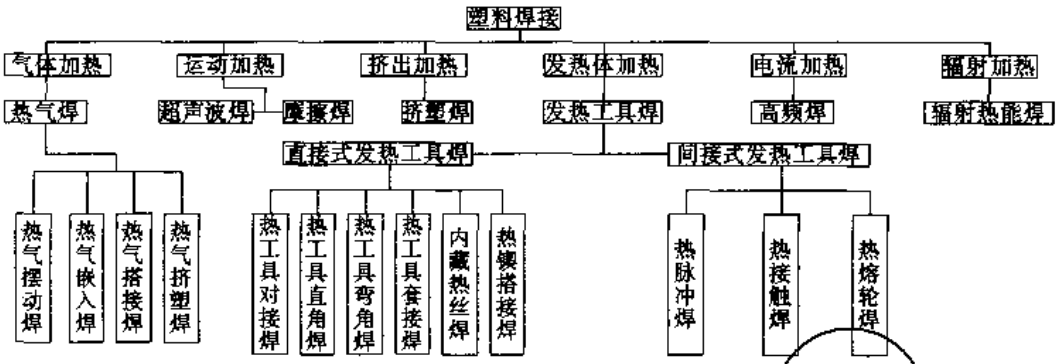
(2)焊接压力——促进大分子相互扩散，并挤去焊缝中的气隙；

(3)压力及温度的作用时间，在这段时间里塑料从加热，熔融直至冷却硬化，建立起足够的焊接强度。

根据塑料焊接的原理和条件，热固性塑料不能够进行焊接，大多数热塑性塑料可以焊接。

6·2 塑料的焊接方法

选用什么焊接方法取决于塑料的种类、材质和制品形状。目前已得到工业应用的塑料焊接方法如下：



6·2·1 热气焊

热气焊(又叫热风焊)属于传统的手工操作焊接方法，一般以 0.1～0.5Pa 压力的热气体去加热塑料和焊条，同时由焊工用手顶紧焊条形成作用压力，或利用辅助工具施加作用力，从而实现焊接。热气焊接的接头强度较低，不适宜用于受力的部位。热气焊接的温度选择见表 6·10-9，聚氯乙烯的热气温度对焊接接头强度系数的影响见表 6·10-10。

表 6·10-9 不同塑料热气焊的参考温度 (℃)

塑料类别	聚氯乙烯	聚丙烯	有机玻璃	聚碳酸酯
热气温度	210±20	220±20	250±10	330±10

表 6·10-10 硬聚氯乙烯的热气焊温度与接头焊接强度系数的关系

热气温度(℃)	200	210	220	230	250	270
强度系数	0.55	0.66	0.67	0.65	0.59	0.45

6·2·2 超声波焊

塑料超声波焊接的原理与金属超声波焊接相仿。如果超声波振头与塑料焊接面之间的距离很近，一般称为近程焊接，反之则称为远程焊接。由于超声波能量在塑料中传递的能量损失较大，所以材质较软的塑料，如用远程焊接的效果不好，可改用近程焊接。塑料超声波焊接的性能通常与材料的硬度或模量成正比。利用超声波还可以进行塑料的点焊以及金属零件在塑料中的嵌装焊接。

6·2·3 摩擦焊

摩擦焊接的制品一般要求轴对称，非轴对称制品可以采用振动焊接。振动焊接的频率在 180～250Hz 之间，振幅大约为 20mm。振动焊接一般以电磁或液压振动系统驱动。

6·2·4 挤塑焊

挤塑焊接适用于聚烯烃材料的厚壁工件焊接，如大容器、大管道，或大面积的贴面焊及表面封焊等，特点是效率高，自动化程度高，质量容易控制，因而近年来发展比较快。

6·2·5 发热工具焊

发热工具焊接的方式方法很多，适用也很广，其中直接式发热工具焊接的发热体与被焊塑料表面直接接

触，而间接式的热量要经过在工件中的传递才能到达被焊面上。间接式方法一般用于薄膜或薄片材的焊接。

直接式发热工具焊接一般要经历准备、预热和加热工件、切换热工具和压焊 4 个阶段。比较典型的应用是塑料管道的焊接。不同壁厚高密度聚乙烯管材的热板焊接条件见表 6·10-11。

齐鲁 DGDB2480 高密度聚乙烯管材用塑料的焊接性能与热板焊接工艺参数的关系见图 6·10-5 和图 6·10-6；杨子 HDPE6100M 聚乙烯管材的接头强度与热板温度的关系见表 6·10-12。

发热工具焊接的应用受发热工具自身材料，特别是表面保护涂层材料的限制，因此高性能工程塑料不能用发热工具进行焊接，而只有依靠运动加热的方法进行焊接。

表 6·10-11　高密度聚乙烯管材的热板焊接条件

壁厚 (mm)	卷边高度① (mm)	加热时间② (s)	切换时间 (s)	冷却保压③ 时间(min)
2.0～3.9	0.5	30～40	4	4～5
4.3～6.9	0.5	40～70	5	6～10
7.0～11.4	1.0	70～120	6	10～16
12.2～18.2	1.0	120～170	8	17～24
20.1～25.5	1.5	170～210	10	25～32
28.3～32.3	1.5	210～250	12	33～40

① 卷边高度指平行端面加热阶段所产生的熔料溢出形成的高度，此时压力为 0.15MPa。

② 指卷边达到指定高度，把压力由 0.15MPa 降到 0.01MPa 后的加热保持时间。以上两个阶段的热板温度均恒定在 210±10℃。

③ 保持焊接压力为 0.15MPa 至冷却所需时间。

表 6·10-12　杨子 HDPE6100M 的焊接性能

焊接温度(℃)	200	205	210	215	220
接头强度(MPa)	31.88	31.40	31.38	31.72	31.07

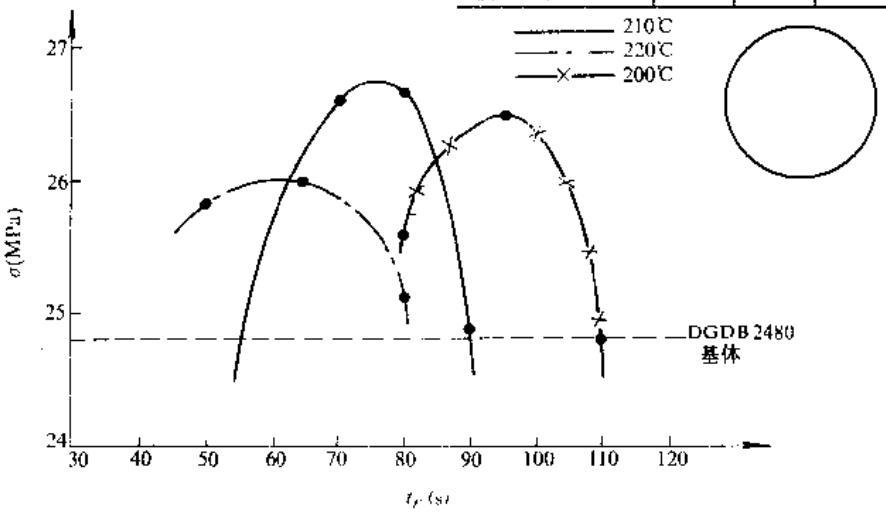


图 6·10-5　热板温度 T、加热时间 t 对 DGDB2480 接头强度的影响

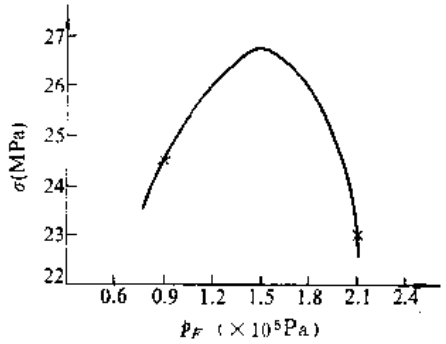


图 6·10-6　热板温度为 210℃条件下焊接压力对 DGDB2480 接头强度的影响

6·3　不同焊接方法接头强度比较

表 6·10-13 给出主要塑料用不同方法焊接的接头强度值比较。

一般来讲，同种类、同材质的塑料可以相互焊接，仅在少数特殊情况下才能实现异种塑料的焊接。

表 6·10-13　主要塑料品种的焊接方法及焊接接头强度比较　(MPa)

塑料	材质说明	热板焊	超声波焊	摩擦焊
HDPE	MFI>2g/10min	17～27	—	20～27
HDPE	—	35～40	—	—
PP	—	20～24	10～18	—
PS	—	—	6～12	—
ABS	—	30～40	15～25	30～45
PC	—	60～65	35～45	—
PBT	—	5～10	7～13	10
PBT 增强	—	20～30	15～20	50～60
PA6	—	45～50	20～30	35～45
PA66	—	—	20～22	50～70
PMMA	高温热板	50～60	5～8	—
POM	—	—	20～30	—

注：表中 HDPE 为高密度聚乙烯，PP 为聚丙烯，ABS 为丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物，PC 为聚碳酸酯，PBT 在聚对苯二甲酸丁二醇酯，PA 聚酰胺，PMMA 聚甲基丙烯酸甲酯，POM 为聚甲醛。

版权

超星公司制作 请尊重作者版权

第11章 焊接结构生产用机械装备[58]~[61]

焊接结构生产过程一般包括：(1)准备(焊接钢材的预处理、矫正、工件开坡口等)；(2)装配(对正、定位、夹紧或点固焊等)；(3)焊接；(4)清理(从装配、焊接夹具上卸除焊件、清除焊渣等)；(5)检验；(6)焊后热处理及机械加工；(7)产品最后检验等工序。本章主要介绍焊接结构的准备、装配和焊接工序用的机械装备。

1 钢材预处理

钢材预处理就是把钢板、型钢、管子在进入车间加工之前，预先对钢材表面上的氧化皮、铁锈、污垢等进行清理，喷保护底漆。这是提高产品质量、减少环境污染、有利于数控切割机正常工作和设备保养的有效工艺措施。

钢材清理有机械法和化学法两大类。化学法对环保要求苛刻，使用较少，一般用于薄板或特殊要求的材料。应用最广泛的还是机械法。中厚钢板、型钢、管子先进行抛丸清理、吹净、喷保护底漆、烘干。实践证明，一般经过预处理的钢材比手工或风动钢丝刷清理的钢材耐腐蚀寿命要长5倍以上。

GYX-2M及GYX-3M钢材预处理装置，既可用于钢板、型钢表面预处理，也可用于焊接结构件的表面清理，其技术性能详见表6·11-1。

该装置的特点有：具备钢板、型钢、焊接结构件清理三用。采用布袋式除尘器除尘，干式滤气器过滤漆雾，达到国家规定的排放标准。应用光电传感、脉冲计数、自动控制弹丸闸门、喷枪的开启和关闭，保证清理质量和漆膜厚度。整套设备可单机控制、联机控制、程序控制和自动控制。抛丸室护板采用15Cr耐磨铸铁，具有较高耐磨性能，全部是积木式结构，便于维护更换。GYX-3M钢材预处理成套设备，见图6·11-1。

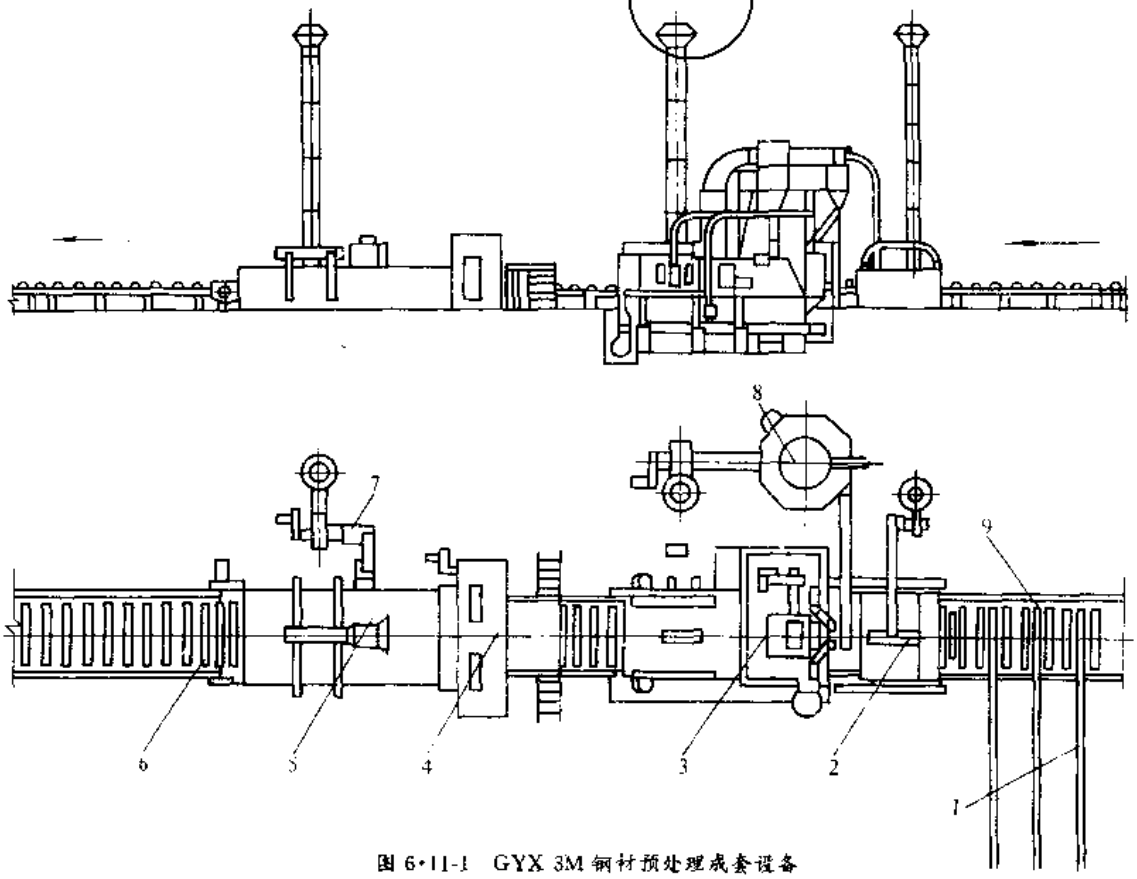


图6·11-1 GYX 3M钢材预处理成套设备

1—横向上料机构 2—预热室 3—抛丸机 4—喷漆机 5—烘干室 6—出料辊道 7—滤气器 8—除尘器 9—进料辊道

超星公司制作请尊重作者版权

表 6·11-1　GYX-2M 及 GYX-3M 钢材预处理装置技术性能

序号	项目		GYX-3M	GYX-2M
1	处理钢材规格(mm)	钢板	宽 1000～3000	宽 1000～2000
			厚 6～60	
			长 2400～12000	
		型钢	最小断面尺寸 60×8	
			最大断面尺寸 1000×300	
			长 2400～12000	
		构件	最大高度 800	
			最大宽度 1450	
			长 2400～12000	
2	辊道最大负荷(t/m)		2	1
3	工件输送速度 v(m/min)		v=0.8～4，清理板材 v=2～3 无级变速，清理型材 v=1～2.2	
4	年处理量(t)		20000～40000	10000～30000
5	质量	除锈等级	SIS05　5900A-B　Sa2 $\frac{1}{2}$ 级	
		漆膜厚度(μm)	15～25	
6	外形尺寸(mm)		长 55545×宽 12655×高 7782（不包括通风设备）	长 62000×宽 12000×高 7230（不包括通风设备）
7	动力消耗	总电量(kW)	390.9（不含预热）	440（包括预热 200）
		总通风量(m^3/h)	37619	29600
		煤气量(m^3/h)	420（电加热 225kW）	—
		压缩空气量(m^3/h)	400	400
8	设备总质量(t)		～130	～100

2　装配、焊接夹具

装焊夹具是用于装配、夹紧、定位、焊接变位和防止焊接变形，且具有提高焊接效率和保证质量的工艺装置。

在焊接结构生产中，装配和焊接是两道重要的生产工序，通常以两种方式完成。一种是先装配后焊接；另一种是边装配边焊接。我们把用来装配点固工件的夹具称装配夹具，而专门用来焊接工件的夹具称作焊接夹具，把既用来装配又用来焊接的夹具称作装配—焊接夹具，统称装焊夹具。

2·1　装焊夹具结构设计要求

(1)装夹、拆卸要轻巧灵便，有足够的装配、焊接空间，不妨碍焊接操作和焊工观察。

(2)夹紧可靠，刚性适当。夹紧时不破坏焊件的定位位置和几何形状，夹紧后既不使焊件松动滑移，又不使焊件的拘束度过大产生较大应力。气动和液压夹紧应能自锁。有时为了减小或防止焊后变形，在装配时需使焊件有一定的反变形量。

(3)夹紧时不应损坏焊件的表面质量，夹紧薄件和软质材料的工件时，应限制其夹紧力，或者采取压头行程限位，加大压头接触面积，接触面加添铜、铝垫片等措施。

(4)既要考虑操作手柄隔热，又要防止焊接飞溅对夹具各机构的损伤。

(5)应尽量选用通用化、标准化零部件。

(6)夹具的施力点应位于工件的支承处或布置在靠近支承的地方，要防止支承反力与夹紧力、支承反力与重力形成力偶。

(7)注意各种焊接方法在热导、电导、受力或绝缘等方面对夹具的特殊要求。例如：熔焊时，夹具主要承受焊接应力、焊件重力和夹紧力；压焊时，夹具承受顶锻压力，并兼作导体；钎焊时夹具兼作散热体，因此要求夹具具有良好的电导、热导性能。又如，真空电子束焊接所使用的夹具不得用磁性材料制作，也不得带有剩磁，以免影响电子束聚焦。

(8)在一个夹具上，定位器和压夹机构的结构形式不宜过多。

(9)装焊夹具应具有较好的制造工艺性能和较高的机械效率。

2·2　焊件的定位及定位器

在装焊作业时，焊件按图纸要求，在夹具中得到正确位置的过程称定位。

焊件在夹具中要得到正确的位置，必须遵从物体定位的 6 点法则。由于焊件在夹具中的装配和点固是按顺序进行的，各零件之间都有确定的位置关系，可以利用先装好的零件作为后装配零件的定位基点，可以大大地减少定位器数量。

为了保证装配精度，应将工件几何形状比较规则的边和面作为定位面与定位器接触。

定位器是保证工件在夹具中获得正确装配位置的

零件或部件，又称定位元件和定位机构。

对定位器的技术要求是耐磨度、刚度、制造精度和安装精度。

定位器的分类及特点如图 6·11-2。

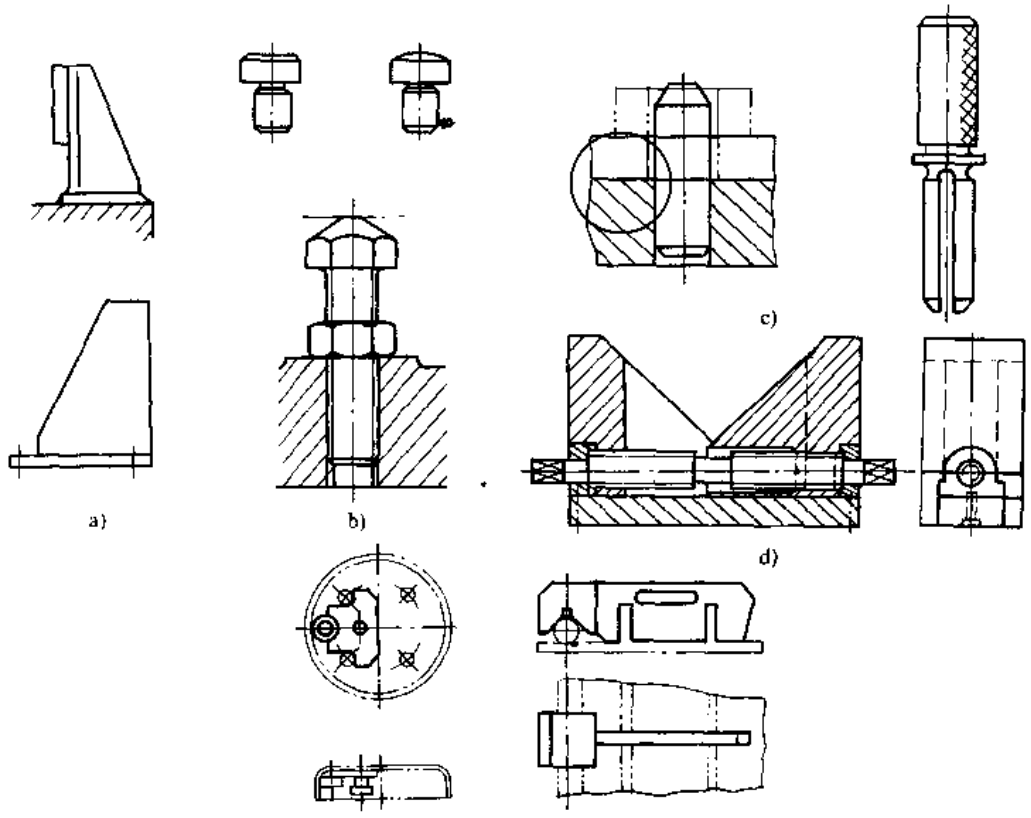


图 6·11-2　定位器

a)挡铁　b)支撑钉　c)定位销　d)V 形铁　e)定位样板

挡铁和支撑钉用于平面定位，定位销用于工件的孔定位，V 形铁用于圆柱体、圆锥体工件的定位，而定位样板则用于工件与已定位工件之间的给定定位。定位器可以做成拆卸式、进退式、铰接式或翻转式。

2·3　焊件的夹紧及夹紧器

在装配焊接中，工件一直保持确定位置的过程称夹紧。使工件保持正确位置的各种机构称夹紧器。夹紧器按其动力源分：手动的、气动的、液压的、磁力的、真空的和电动的共 6 类。而以手动和气动两类应用最为广泛。

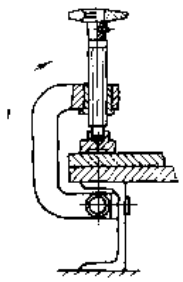
设计手动夹紧器时，其手柄的操作高度以 0.8～1m 为宜，操作力应在 150N 以下，短时功率应控制在 120W 以内，当夹具处在压夹状态时，应有可靠的自锁性能。

设计气动压夹机构所使用的压缩空气压力为0.4～0.6MPa，而设计液压压夹机构所用的油压为 3～8MPa。

气动夹紧速度快，可以集中或程序控制，夹紧力比较稳定，操作方便，不污染环境，在装焊生产线上使用广泛。液压夹紧其功能与气动相似，由于其传力介质不同，可获很大夹紧力。其夹紧动作平稳，耐冲击，结构尺寸可以做得很小，通常用在要求夹紧力很大而空间尺寸受限制的地方。

夹紧器的分类及特点如表 6·11-2。

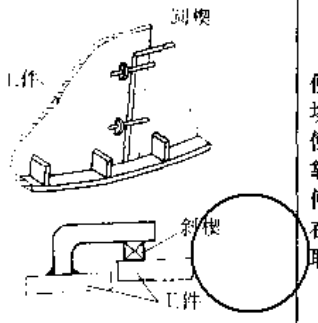
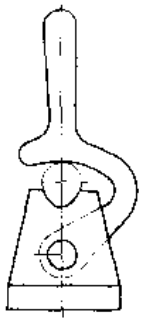
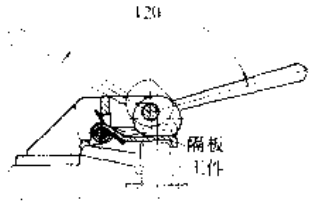
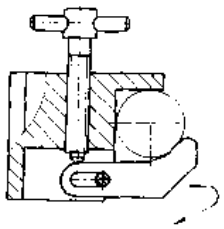
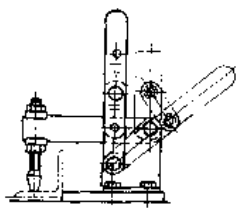
表 6·11-2　夹紧器的分类及特点

类别		结构举例	特　点
手动夹具	铰接螺旋式		形式多样，结构简单，适应面广，能产生较大夹紧力，自锁性能好，但螺旋行程较小，动作缓慢，效率较低，多用于单件和小批量生产

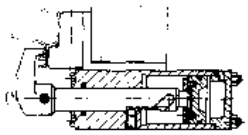
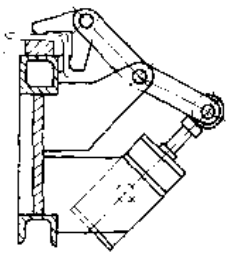
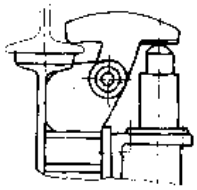
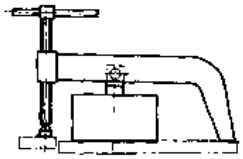
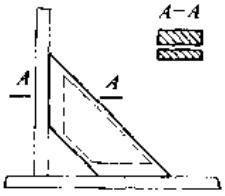
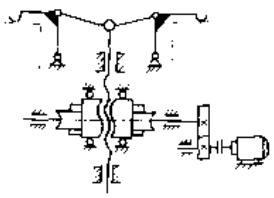
版权所有 侵权必究

超星公司制作 请尊重作者版权

（续）

类别		结构举例	特点
手动夹具	楔条式		简单、制造方便，主要用于现场装配作业，为使楔条夹紧可靠、自锁且又方便退出，楔角应在8°～11°内选取
	偏心式		手柄动作一次，即可将件夹紧，装卸快，适用的尺寸范围小，多用在夹紧力不大和振动较小的场合
	凸轮式		夹紧快，但行程小，适用范围很小，轴向凸轮具有空缺，以便焊件装卸
	杠杆式		夹紧快，夹紧力大，适用厚度误差的范围大。其派生结构形式很多，应用范围很广
	肘节式		夹紧快，压头高度调节范围大

（续）

类别		结构举例	特点
气动夹具	直接作用式		采用直接压紧可获得正确压紧力，该机构松开时可使压头回转一定角度便于焊件装卸，便于集中控制和实现自动化
	非直接作用式		通过杠杆或肘杆夹紧，打开角度大，夹紧力大，便于焊件的装卸。便于集中控制和实现自动化
液压夹具	非直接作用式		同气动夹具，有直接作用式和非直接作用式二种，压紧力大，压力恒定，夹紧可靠
磁力夹具	电磁式		操作方便，夹紧力大，可作成标准通用夹紧元件，适合除奥氏体钢外的各种钢材
	永磁式		操作方便，可作成标准通用夹紧元件，适合除奥氏体钢外的各种钢材，但夹紧力小
电动夹具			传动复杂，体积较大。装焊夹具中已少用

（续）

类别	结构举例	特　点
真空夹具 真空泵式	A　A—A　A	吸盘吸力由真空泵产生，对焊件表面要求光洁、挠度小。适用于夹紧特薄的或挠度小的以及其他方法夹紧容易引起变形或无法夹紧的件，多用于仪表、电器小型器件的装焊
真空夹具 吸压式	压缩空气	吸盘吸力由压缩空气射流形成负压产生，对焊件表面要求光洁、挠度小。适用于夹紧特薄的或挠度小的以及其他方法夹紧容易引起变形或无法夹紧的件，多用于仪表、电器小型器件的装焊

2·4　夹具体

夹具体是在夹具上安装定位器、夹紧器以及承受焊件重量的部件。

通用的夹具体就是在各种焊接变位机的工作平台或车间的固定式平台上的槽孔中安装各种定位器和夹紧器。

专用夹具体是根据被装焊工件的形状、尺寸、定位及夹紧要求，装配焊接工艺而专门设计的。

对夹具体的设计要求是：(1)足够的刚度和强度；(2)便于装配和焊接；(3)焊件装卸方便；(4)必要的导电、导热、导水、导气及通风条件；(5)方便定位器和夹紧器位置的调节与补偿；(6)需要时有控制焊接变形之功能。

一般装焊平台多为铸造结构，而专用夹具体多为焊接结构。

2·5　通用装焊夹具

通用装焊夹具，可根据焊件的结构形状和生产批量的变化进行组合，以便在各种焊接变位机上和装配平台上，以及专用胎具和生产线上使用。特别是在产品多变的小批量中使用尤为经济合理。图 6·11-3 为永磁式磁力夹具在焊接变位机上的应用。图 6·11-4 为液压夹具与电磁夹具的组合在专用胎架上的应用。

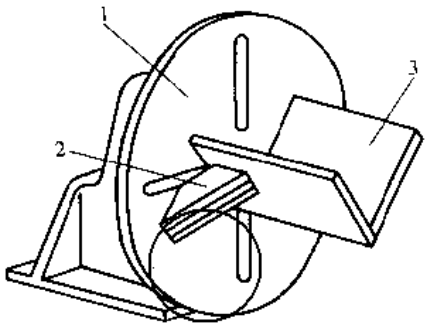


图 6·11-3　永磁式磁力夹具在焊接变位机上的应用

1—焊接变位机　2—夹紧机构　3—焊件

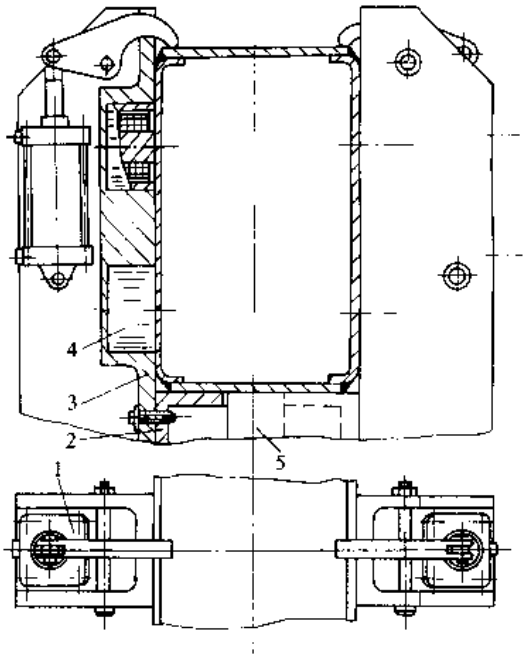


图 6·11-4　液压夹具与电磁夹具的组合在专用胎架上的应用

1—液压夹具　2—胎架底座　3—胎架侧柱

4—电磁夹具　5—顶出焊件油缸

2·6　专用装焊夹具

专用夹具是在夹具体上，由多个多种定位器和夹紧器组合而成。用途广泛，除满足装焊工艺外，还应满足尺寸精度(互换性)、形位公差、生产节奏和焊枪的可达性等要求，还应充分考虑依次装配焊接的特点。

超星公司制作 请尊重作者版权

超星公司制作请尊重作者版权

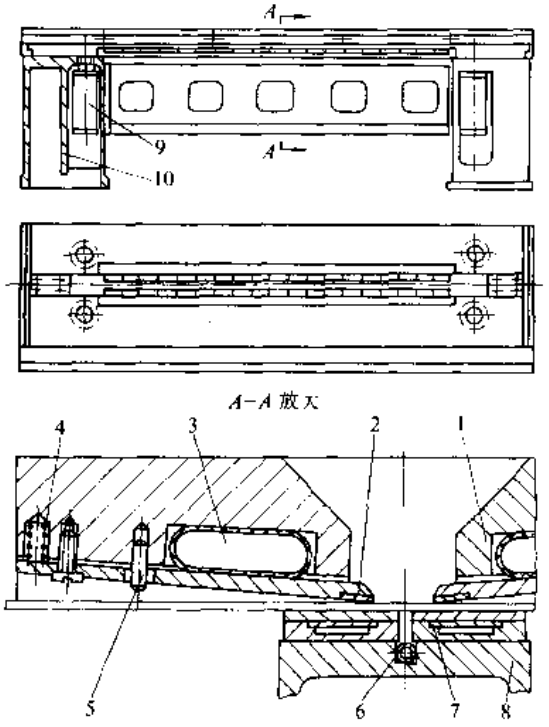


图 6·11-5　琴键式拼板夹具

1—压板梁　2—琴键压板　3—气带　4—弹簧　5—导向销　6—背面气体保护喷管　7—水冷铜垫　8—衬垫梁　9—气(油压)缸　10—底座

1. 琴键式拼板夹具　薄、中板拼接单面焊双面成形多采用琴键式拼板夹具如图 6·11-5。焊接时，气带 3 充气使压板 2 压紧待焊钢或铝件，焊后气带放气，压板由弹簧 4 复位。夹具由于采用气带和琴键式压板，使压板压紧均匀，与背面衬垫板贴紧严密，这样，焊件变形小，焊缝背面成形和保护良好。为便于焊后拱曲焊件退出，压板梁 1 由气(液压)缸 9 提升和锁紧。压板可分别单边压紧，便于装配。琴键式拼板夹具适用于氩弧焊、等离子弧焊及CO_2气体保护焊，其技术规格见表 6·11-3。

2. 门式拼板压力架　中、厚板拼接单面焊双面成形可采用门式拼板压力架如图 6·11-6。当待拼钢板 6 放置对中后，气缸 4 将压板 2 下压，压板 5 压紧钢板正面，同时气带 8 充气顶升铜衬垫 7 将焊缝背面贴紧。焊后压架与衬垫复位。为方便钢板装配和吊卸，门架可电动驶离工作位置。常用门式拼板压力架技术规格见表 6·11-4。

表 6·11-3　典型琴键式拼板夹具技术规格

焊缝长度 (mm)	拼接板厚 (mm)	单边压紧力 (MPa)	压板梁顶升高(mm)	工作气压 (MPa)
3000	1～6	2.4	30	0.6

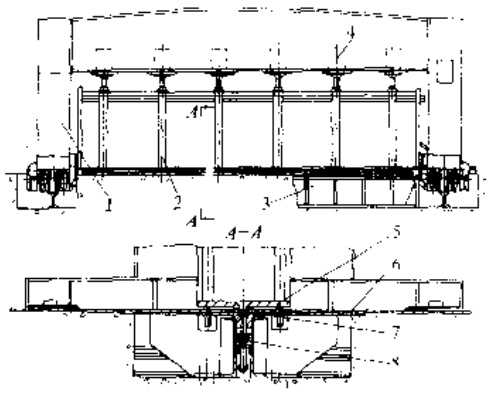


图 6·11-6　门式拼板压力架

1—电动门架　2—压架　3—衬垫座　4—气缸　5—压板　6—待焊钢板　7—铜衬垫　8—气带

3. 电磁平台和电磁衬垫夹具　大面积钢板的拼接广泛地使用电磁平台如图 6·11-7。曲面钢板和全位置钢板的拼焊一般采用电磁衬垫夹具如图 6·11-8。使用电磁平台时，先将钢板放准，由电磁铁吸牢在平台上，气带充气将焊剂垫升起压牢在焊缝下面，然后进行焊接。电磁衬垫夹具则在焊缝处直接安放。

4. 筒体纵缝外箍式专用夹具　待焊筒体套入夹具后，上下内模撑开，左右外卡环箍紧筒体如图6·11-

表 6·11-4　常用门式拼板压力架技术规格

拼接钢板最大宽度(mm)	拼接钢板厚度(mm)	门架行走电动机功率(台数×kW)	门架行走速度 (m/h)	压力缸数 (个)	总压紧力 98(MPa)	门架轨距 (mm)	外形尺寸 (长×宽×高)(mm)
6000	4～14	2×1.0	600	8	10	700	7900×3000×2680
9000	4～14	2×1.1	600	11	20	10800	11800×3450×3600
12000	4～14	2×1.5	600	18	30	13600	14600×3450×3600

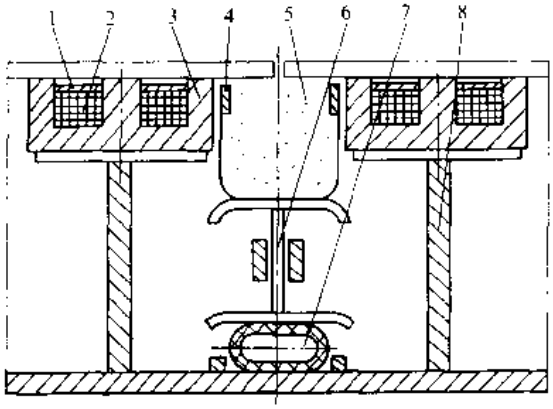


图 6·11-7 电磁平台
1—铝盖板 2—线圈 3—铁芯 4—铝板条
5—焊剂 6—撑条 7—气带 8—钢构架

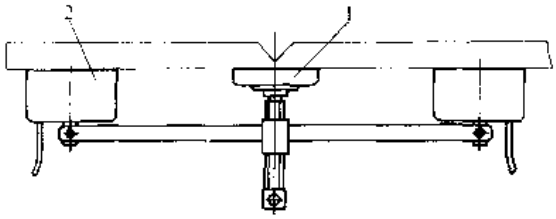


图 6·11-8 电磁衬垫夹具
1—软衬垫(或铜衬垫) 2—电磁夹具

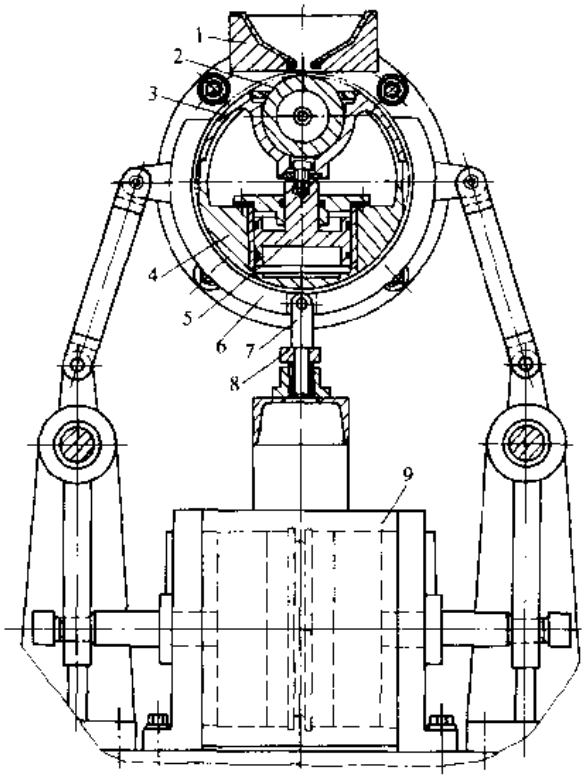


图 6·11-9 筒体纵缝外箍式专用夹具
1—压板 2—水冷铜块 3—上内模 4—下内模 5—活塞 6—卡环 7—滑叉 8—调节螺母 9—气缸

9。这种夹具定位精确，适用薄壁压力筒体的纵缝拼接。

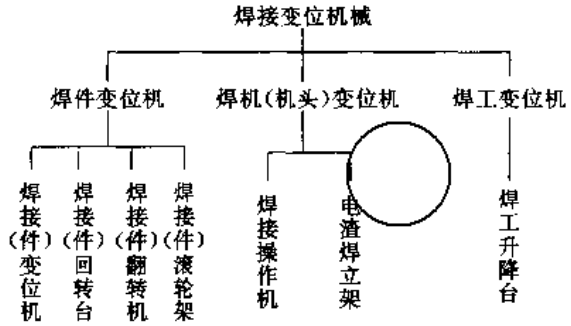
3 焊接变位机械

3·1 分类及要求

焊接变位机械是用来改变焊件、焊机(机头)或焊工的位置以完成机械化、自动化焊接的各种机械装置。

使用焊接变位机械可缩短焊接的辅助时间，提高劳动生产率，减轻工人的劳动强度，改善焊接质量，并可充分发挥各种焊接方法的效能。

焊接变位机械分类如下：



各种焊接变位机械可以单独使用，但多数场合是综合使用，已成为机械化、自动化焊接生产线的重要组成部分。

一般焊接变位机械的设计要求：

(1)结构合理简单，有足够大的刚度和强度，调速范围大，焊接速度稳定。

(2)与焊接机器人配合或特殊要求的焊件变位机的到位精度(点位控制)和运行轨迹精度(轮廓控制)应控制在 0.1～1mm 之间。

(3)动作灵活，调整和操作方便，使用安全可靠，一些动作要自锁。回程速度应快，但应避免产生冲击和振动。

(4)有良好的导电、导水和导气装置，以及导热和通风性能。

(5)各种动作有利集中程序控制。

(6)焊接变位机械的工作台面应方便地安装各种定位器和夹紧机构。

(7)结构布置要避免焊接飞溅的损伤，且方便清除焊渣、药皮等异物。

(8)尽可能实现通用化、标准化和系列化。

版权

超星公司制作请尊重作者版权

(9)对应用在电子束、等离子、激光、钎焊等焊接时，应注意在导电、隔磁、绝缘等方面的材料要求。

3·2　焊件变位机

焊件变位机能将焊件回转、倾斜、翻转，使焊缝处于水平、船形易焊位置。焊接小型精密件或大型压力容器均可使用焊件变位机械，变位机械的载重量可由几公斤至一千吨以上。

3·2·1　焊接(件)变位机

1. 焊接(件)变位机的分类(表 6·11-5)

2. 结构及设计特点　焊接(件)变位机的典型结构如图 6·11-10。

表 6·11-5　焊接(件)变位机的分类

类　别			特　点	适用范围
手动焊接(件)变位机			结构简单，成本低	轻、小焊件手工焊
机动焊接(件)变位机	有级调速变位机		制造容易，成本较低	不适合球体特殊产品的制造
	无级调速变位机	机械无级调速	调速范围较小	各种焊件
		液压无级调速	调速范围大，传动平稳，成本高	
		电力无级调速	调速范围大，方便可靠	

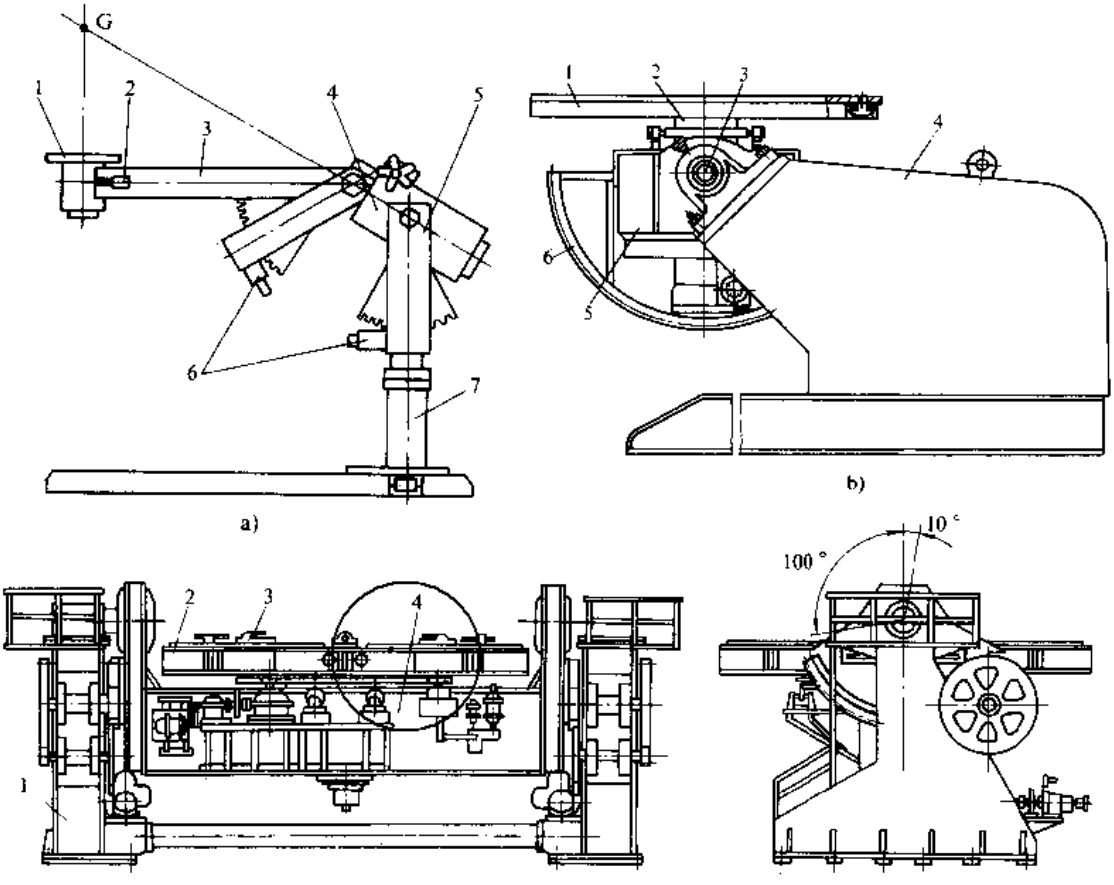


图 6·11-10　焊接(件)变位机

a)手动变位机

1—工作台　2—夹紧定位机构　3—横臂　4—倾斜轴　5—立柱　6—横臂角度调整机构　7—底座

b)3t 变位机

1—工作台　2—回转主轴　3—倾斜轴　4—机座　5—回转机构　6—倾斜大齿轮

c)100t 变位机

1—机架　2—回转工作台　3—夹具　4—中夹机构

a. 手动焊接(件)变位机 图6·11-10a示焊件重心G在倾斜轴和工作台回转轴两中心线的交点上，翻动省力。倾斜轴的倾斜度在一定的范围内可调。

b. 机动焊接(件)变位机(图6·11-10b、c)

(1)工作台。用于紧固焊件。常见台面有方形、圆形、八角形、十字形。一般台面上开有"T"形槽，可安设夹紧装置，也可附加支臂，装焊轻而大的焊件。

(2)机座。多为焊接结构，根据其不同载重量有单柱(图6·11-10b)、双柱(图6·11-10c)和四柱式。

(3)倾斜角度。一般为0°～135°。重型变位机因机座强度等原因，采用－45°～＋90°(如图6·11-11)或－10°～＋100°(如图6·11-10c)。

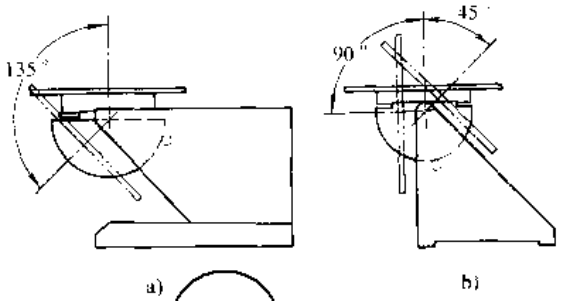


图6·11-11 不同倾斜角度焊接(件)变位机
a)倾斜角0°～135° b)倾斜角－45°～＋90°

(4)导电装置。尽可能避免焊接电流通过轴承和齿轮接地。常见导电装置如图6·11-12。

(5)载重量。选用或设计焊接变位机时，要注意额定载重量。还要注意焊件的重心距A和偏心距B(如图6·11-13)。

3. 传动与调速 回转机构和倾斜机构一般分别驱动。回转机构一般采用机械传动；倾斜机构一般采用液压传动。

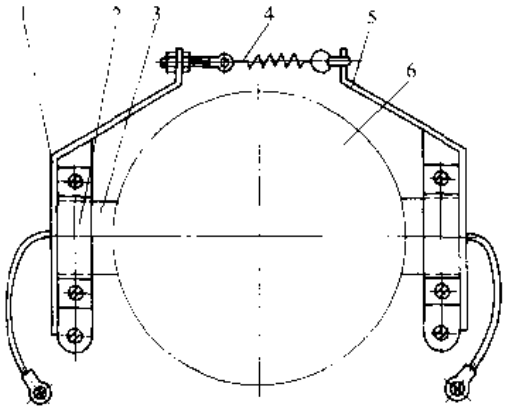


图6·11-12 碳刷导电装置
1—碳刷架Ⅰ 2—碳刷压盒 3—碳刷
4—弹簧 5—碳刷架Ⅰ 6—导电环

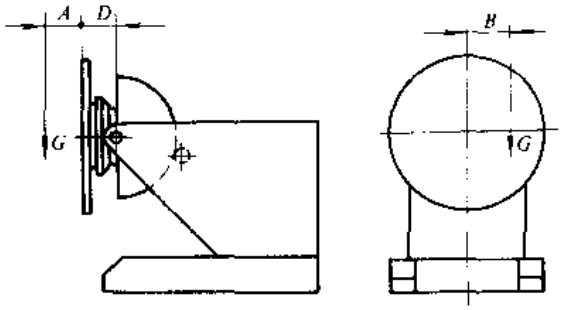


图6·11-13 变位机载重量示意图
A—焊件重心距 B—焊件偏心距
D—工作台至倾斜中心的距离 G—焊件和夹具重量

4. 通用焊接变位机的技术数据(表6·11-6)

表6·11-6 通用焊接变位机技术数据

额定载质量(kg)	250	500	1000	1500	3000	5000	25000	100000
焊件重心距(A)(mm)	150	150	150	300	300	300	1000	2000
焊件偏心距(B)(mm)	100	100	100	150	300	300	100	100
工作台面尺寸(mm)	ϕ600	ϕ750	ϕ1000	ϕ1200	ϕ1500	1500×1500	ϕ3400	ϕ7000
工作台回转速度(r/min)	0.05～1.0	0.05～1.0	0.034～1.030	0.034～1.030	0.288～0.865	0.0153～0.332	0.013～0.525	0.005～0.295
工作台倾斜角度	0～135	0～135	0～135	0～135	0～135	低位0～135 高位0～110	－10～＋100	－10～＋100
工作台倾斜速度(r/min)		0.5	0.9	0.5	0.5	0.375	0.0625	0.0106～0.106
工作台倾斜方法	手动	手动或机动	电动	电动	电动	液压	电动	电动
工作台面在水平位置时距离地面高度(mm)	800	800	1000	1200	1400	1400～2000	2140	4500
备注					见图6·11-10b			见图6·11-10c

鲍星公司制作 请尊重作者版权

超星公司制作 请勿重作者版权

3·2·2　回转台

回转台是设有倾斜机构的焊接变位机。用作平面圆焊缝焊接和封头余量切割等。

为了提高大直径回转台运转的平稳性，在工作台下面沿外周边缘可设支承滚轮如图 6·11-14。

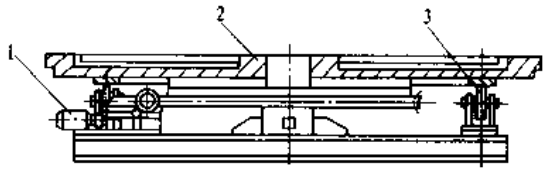


图 6·11-14　回转台

1—电动机和传动机构　2—回转工作台　3—支承滚轮

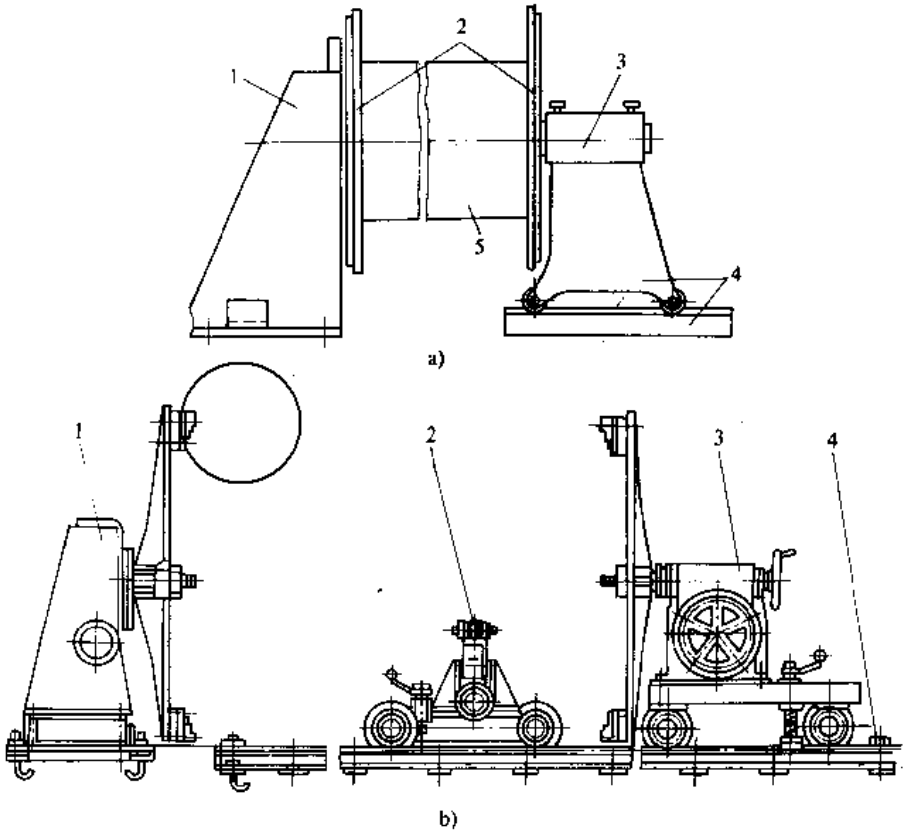


图 6·11-15　头尾架式翻转机

a)头尾架式翻转机

1—头座　2—卡盘　3—尾座　4—导轨　5—焊件

b)带托架头尾座式翻转机

1—头座　2—卡盘　3—托架　4—尾座

3·2·3　翻转机

翻转机能将焊件绕水平轴翻转，适用于梁柱、框架、椭圆容器等的焊接。

为适应不同焊件的需要，翻转机有头尾架式、框架式、环式和顶杆式。

1. 头尾架式翻转机　头架通常定速回转。用作环缝自动焊时，需采用多速或无级调节。尾架是从动的(图 6·11-15)。

2. 框架式翻转机　如焊件庞大，可将翻转机安装在地坑内，采用液压升降。翻转一般采用定速(图 6·11-16)。

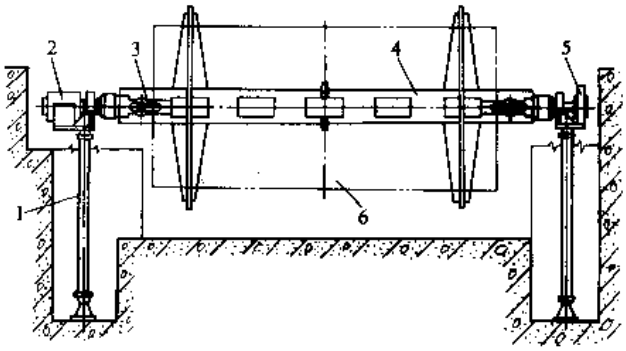


图 6·11-16　框架式翻转机

1—升降油缸　2—回转油缸　3—油缸夹具　4—翻转框架　5—制动器　6—焊件

超星公司制作 请尊重作者版权

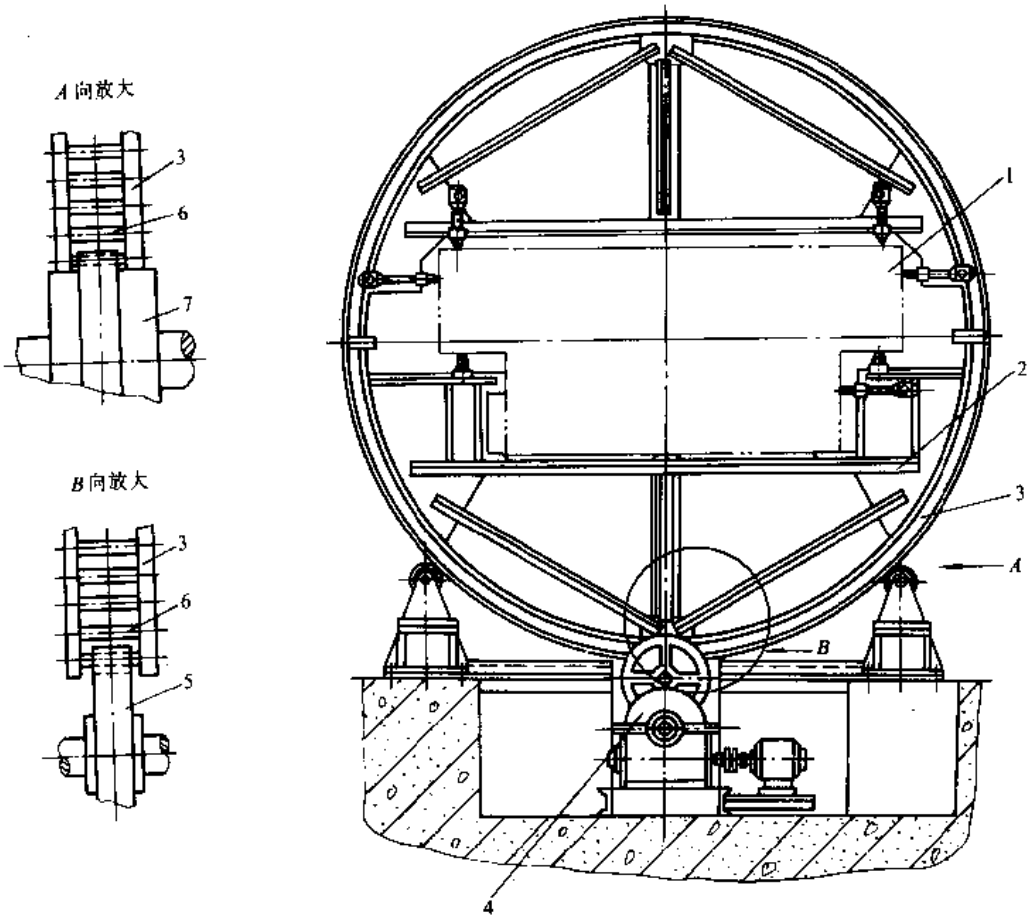


图 6·11-17　环式翻转机

1—焊件　2—框架　3—圆形回转架　4—传动机构　5—主动轮齿轮　6—大轮齿轮　7—支承滚轮

3. 环式翻转机　这类翻转机一般为专用的，如专焊椭圆容器、开关板框架和梁柱等(图 6·11-17)。

4. 顶杆式翻转机　工作台可作四个方向翻转(图 6·11-18)。工作时可将任意三侧的铰链插销松开，液压缸使工作台绕未松开的一侧铰链翻转。液压缸安装在地坑里，以采用伸缩式套筒液压缸为好。工作台一般高出地面 100～800mm。

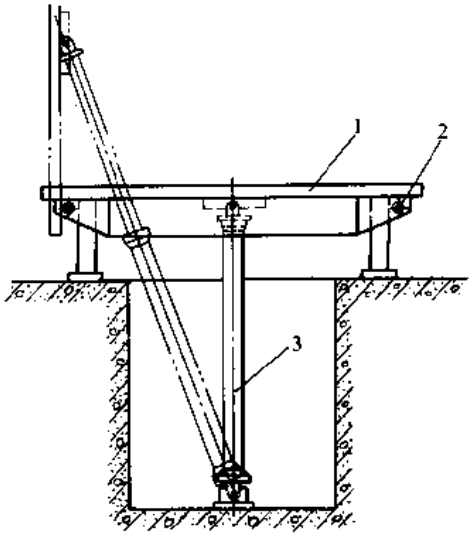


图 6·11-18　顶杆式翻转机

1—工作台　2—铰链　3—液压缸

3·2·4　滚轮架

滚轮架是借助焊件与主轴滚轮间的摩擦力来带动圆筒形焊件旋转。载质量从几十公斤到千吨以上。

1. 焊接滚轮架分类　如表 6·11-7、图 6·11-19。焊接滚轮架主要用于筒形工件的装配与焊接，但是要对主、从动轮的高度做适当地调整，也可进行锥体、分段不等径回转体的装配和焊接。长滚柱式滚轮架尤适用于薄壁、多筒节的装配和焊接。长轴式滚轮架用于薄(细)长筒件焊接时，宜采用中部驱动方式。

超星公司制作 请尊重作者版权

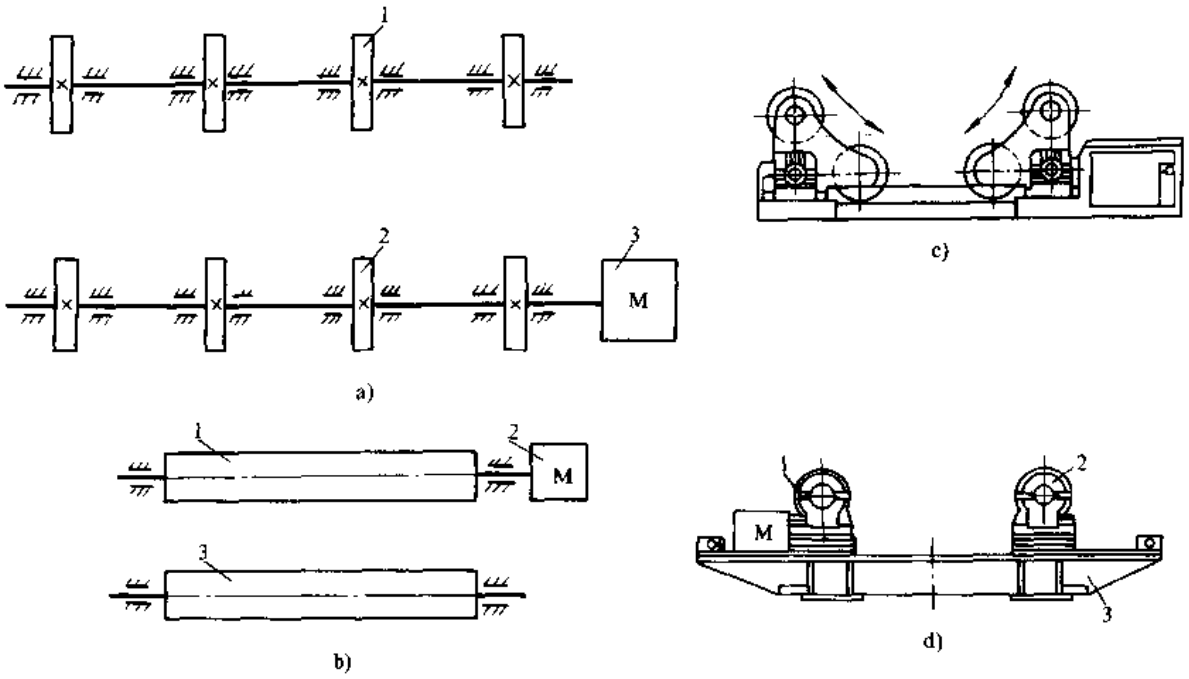


图 6·11-19　焊接滚轮架
a)长轴式滚轮架
1—从动滚轮　2—主动滚轮　3—电动机
b)长滚柱式滚轮架
1—主动滚柱　2—电动机　3—从动滚柱
c)自调式滚轮架
d)非自调式滚轮架
1—主动滚轮座　2—从动滚轮座　3—支架

表 6·11-7　焊接滚轮架分类

类别		特点	适用范围
组合式滚轮架	自调式	径向一组主动滚轮传动，中心距可自动调节	一般圆筒形焊件
	非自调式	径向一对主动滚轮传动，中心距可调节	一般圆筒形焊件
长轴式滚轮架		轴向一排主动滚轮传动，中心距可调节	细长筒体焊件焊接及多段筒节的装焊

焊接滚轮架的品种很多，系列较全，承载量在 1000～1500000kg，焊件直径在 1～8m 的标准组合式滚轮架(两个主动与两个从动滚轮座的组合)均成系列供应。其滚轮线速度多在 6～90m/h 之间无级调节。有的滚轮架还具备防止焊件轴向窜动的功能。

2. 焊接滚轮架的结构及设计特点

a.　焊接用滚轮结构　(表 6·11-8、图 6·11-20)

金属材料的滚轮多用铸钢和合金球墨铸铁制作，其表面热处理硬度约为 50HRC，滚轮直径多在 200～700mm 之间。

b.　焊接滚轮架的计算

(1)驱动功率计算。驱动力矩一般包括：1)焊件与滚轮间的滚动摩擦力矩；2)滚轮轴承的滚动摩擦力矩；3)焊件的偏心力矩；4)焊件纵缝通过滚轮时产生的附加力矩。在很多种情况下，第 4 种力矩是主要的。

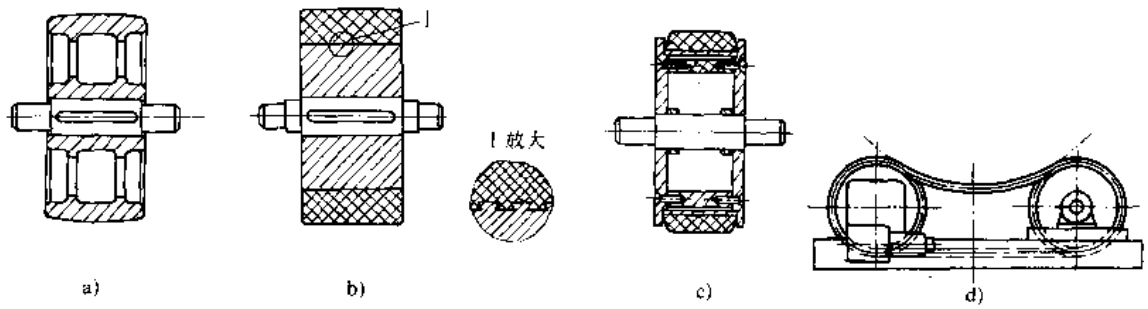


图 6·11-20　焊接用滚轮结构
a)钢轮　b)橡胶轮　c)组合式　d)履带式

超星公司制作 请尊重作者版权

(2)中心角的选择。选择合适的中心角 α(如图 6·11-21a 所示)，有利于工件稳定而均匀的转动，并可减少滚轮的支反力、驱动圆周力和节能。由主动滚轮单位质量圆周力 K_T 和滚轮单位质量支反力 K_Q 分别与中心角 α 的关系如图 6·11-21 知，α 应取在 120°以内比较合适。中心角 α 过小时，工件易失稳而倾复，所以中心角一般宜在 50°～120°之间选用。为此，与中心角对应的筒件直径不应超越下述范围：

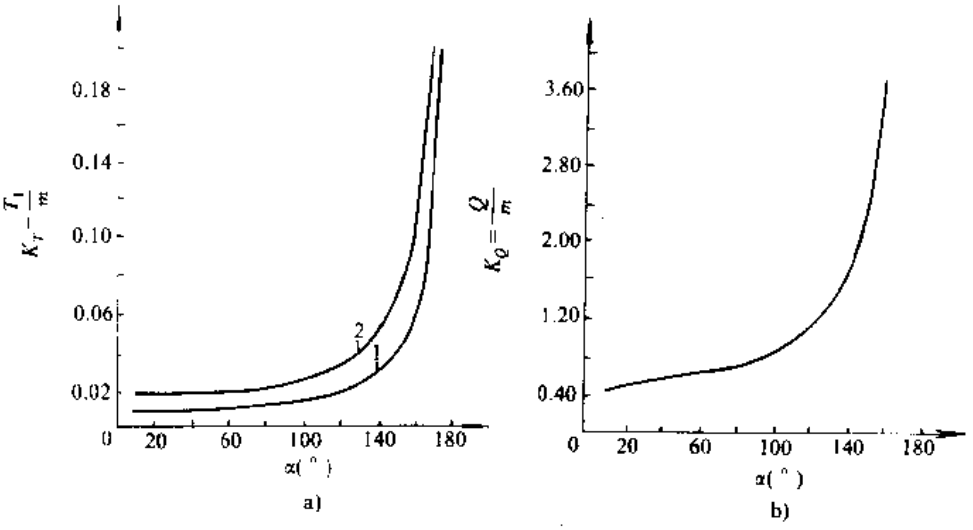


图 6·11-21　K_T 和 K_Q 与 α 的关系曲线

a)主动滚轮单位质量圆周力 K_T 与 α 的关系曲线　b)单位支反力 K_Q 与 α 的关系曲线

1—滚动轴承　2—滑动轴承

$$D_{max}=\frac{L}{0.42}-D_r$$

$$D_{min}=\frac{L}{0.86}-D_r$$

式中　D_{max}——筒件最大直径(mm)；

L——滚轮中心距(mm)；

D_{min}——筒件最小直径(mm)；

D_r——滚轮直径(mm)。

表 6·11-8　焊接用滚轮结构

型式	特　　点	适应范围
钢轮①	承载能力强、制造简单	一般用于重型焊件②
胶轮	钢轮包外橡胶，传动平稳，摩擦力大，但橡胶易压坏	一般用于 50t 以下焊件
组合轮	钢盘与胶轮组合，承载能力比胶轮提高，传动平稳	一般用于 50～100t 焊件
履带式	大面积履带和焊件接触，有利于防止薄壁件变形，传动平稳，但制造复杂	用于轻型、薄壁大直径的焊件

① 对预热的焊件进行多道焊，用水冷滚轮和水冷轴承。

② 重型滚轮架，除增大钢轮直径和宽度外，尚需将轮子热处理提高其外缘的表面硬度。

(3)附着力验算。为防止工件在滚轮上打滑，还应按下式进行附着力(Q_1)验算：

$$Q_1\varphi\geqslant 3T_1$$

式中　φ——工件在主动轮上的附着系数，对于钢轮 $\varphi=0.15$，对于胶轮 $\varphi=0.3\sim0.4$。

T_1——主动轮上的驱动圆周力(N)。

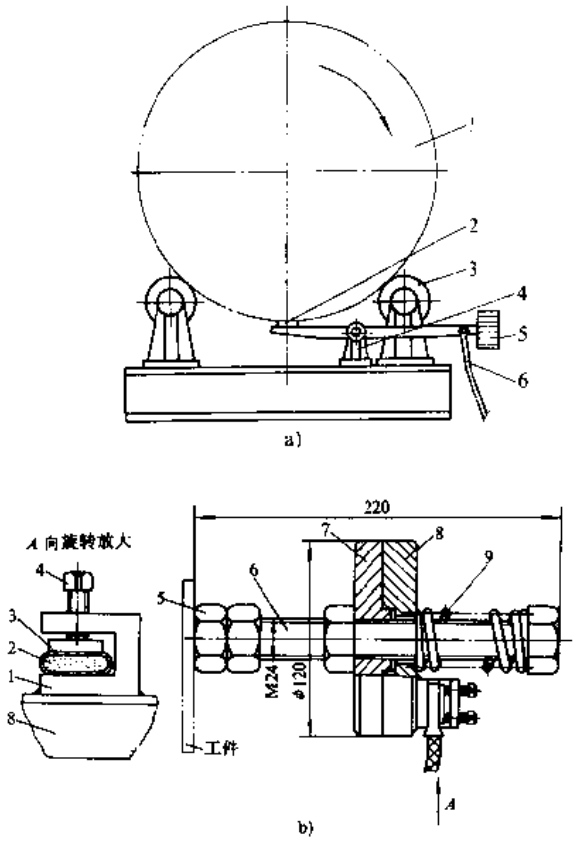


图 6·11-22　导电装置

a)滑块式

1—焊件　2—紫铜或石墨滑块　3—滚轮架　4—滑块支架　5—配重　6—地线

b)旋转盘式

1—地线压盘　2—电缆　3—地线压板　4—压紧螺钉　5—螺母　6—长螺杆　7—导电盘Ⅰ　8—导电盘Ⅱ　9—弹簧

c. 防止焊件的轴向位移(窜动)　为了满足窄间隙焊和带极堆焊高精度焊接以及重型容器焊接的需要，焊接滚轮架必须采用有防止焊件轴向窜动措施。具体措施如下：(1)在焊件端面加置止推滚轮；(2)控制从动轮的偏转；(3)控制从动轮的升降。

d. 导电装置　常用的导电装置有滑块式和旋转盘式(如图 6·11-22)。

3. 传动与调速　滚轮架调速范围一般为 3∶1 和 10∶1。大多采用无级调速，并设有空程快速。滚轮架无级调速方式如表 6·11-9。

4. 中心距的调节　焊件中心与两个支承滚轮中心连线的夹角(中心角)一般可在 50°～120°，常用 50°～60°。角度过小，筒体放置不稳；角度过大则增大转动扭矩。滚轮中心距的调节方法如图 6·11-23。

表 6·11-9　滚轮架无级调速方式

调速方式	特　　点	调速比	适用范围
晶闸管控制直流电动机	速比大，控制线路较复杂	10∶1	各种滚轮架
三相整流子异步电动机	过载能力大，传动扭矩大，调速范围小，电刷易磨坏，速比小	3∶1	中小型滚轮架
电磁调速交流异步电动机	速比大，低速时不稳定，效率低	10∶1	中小型滚轮架
液压马达	速比大，传动平稳，价格贵	10∶1	中小型滚轮架

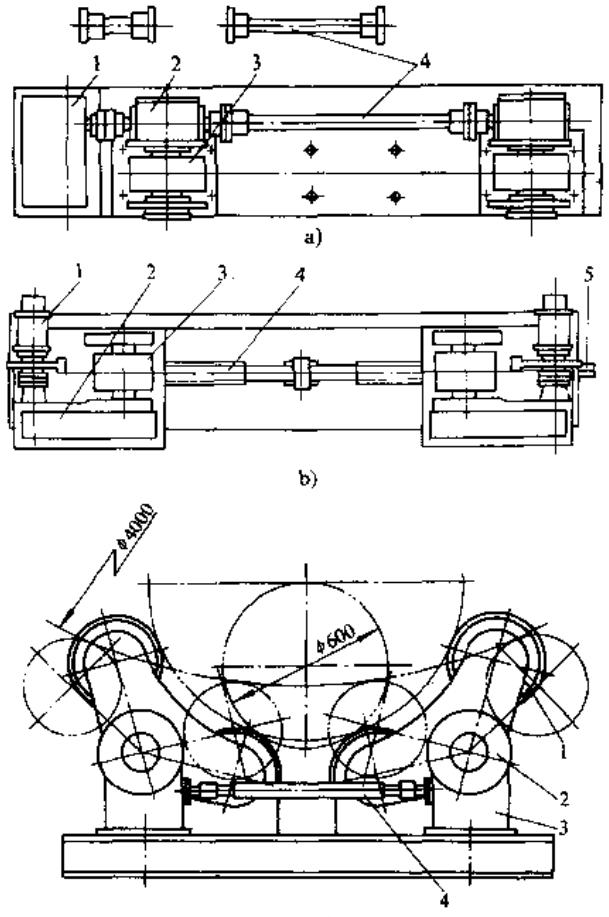


图 6·11-23　滚轮中心距调节方式
a)有级调节式
1—一级减速器　2—二级减速器　3—滚轮　4—可换传动轴
b)丝杠式
1—电机　2—减速器　3—滚轮　4—双向丝杠　5—丝杠调节把手
c)自调式
1—滚轮对　2—滚轮轴承座　3—变速箱　4—传动轴

5. 焊接滚轮架的标准化、系列化　生产焊接滚轮架时，应制定企业标准，并形成系列。对其主要参数系列化。按照 R5 优先数系，通用非自调式和自调式焊接滚轮架的主要技术标准和系列如表 6·11-10、表 6·11-11。

表 6·11-10　通用非自调式焊接滚轮架主要技术标准(性能)

额定载质量(一个主动架和一个从动架的总载质量)(kg)	焊件直径范围(mm)	焊接速度(m/h)	滚轮材质
1000	100～2500	7～70	胶轮
1600	120～2500	7～70	胶轮
2500	300～2500	7～70	胶轮
4000	300～2500	7～70	胶轮
6000	400～3000	7～70	胶轮
10000	500～4000	7～70	胶轮
16000	500～4000	7～70	胶轮
25000	500～4500	7～70	胶轮
40000	500～5500	7～70	胶轮/钢轮
60000	800～5500	7～70	胶轮/钢轮
100000	800～5500	7～70	胶轮/钢轮
160000	1000～5500	7～70	钢轮
250000	1200～6000	7～70	钢轮
40000	1500～6000	7～70	钢轮

超星公司制作请尊重作者版权

超星公司制作 请尊重作者版权

表 6·11-11 通用自调式焊接滚轮架主要技术标准(性能)

额定载质量(一个主动架和一个从动架的总载质量)(kg)	焊件直径范围(mm)	焊接速度(m/h)	滚轮材料	额定载质量(一个主动架和一个从动架的总载质量)(kg)	焊件直径范围(mm)	焊接速度(m/h)	滚轮材料
10000	500～4000	7～70	胶轮	100000	800～5500	7～70	胶轮/钢板
16000	500～4000	7～70	胶轮	160000	1000～5500	7～70	钢板
25000	500～4500	7～70	胶轮				
40000	500～5500	7～70	胶轮/钢轮	250000	1200～6000	7～70	钢板
60000	800～5500	7～70	胶轮/钢板	400000	1500～6000	7～70	钢板

6. 焊接滚轮架的技术数据(表 6·11-12、表 6·11-13)

7. 特殊焊接滚轮架

a. 10t长轴式焊接滚轮架 如图6·11-24、表6·11-14所示,适用于多节筒体的装焊,筒体的对中性较好。

表 6·11-12 30t 自调式滚轮架技术数据

载质量(t)	30	滚轮宽度(mm)	250
焊件直径范围(mm)	600～4000	滚轮中心距(mm)	1950
焊接速度(m/h)	20～60	电动机型号	JZS-51
滚轮外径(mm)	370	电动机功率(kW)	3/1

注:所列系一组滚轮组(即一组主动轮及一组从动轮)的技术数据。

表 6·11-13 非自调式滚轮架技术数据

载质量(t)	5	10	30	50	100	250	400
焊件直径范围(mm)	500～3500	600～4000	600～4000	800～5000	800～5000	1400～6000	2000～6000
焊接速度(m/h)	6～60	6～60	6～60	6～60	6～60	6～60	6～60
滚轮外径(mm)	400	400	400	400	500	500	750
滚轮宽度(mm)	100	180	260	300	300	500	600
滚轮中心距(mm)	640～1430	710～1640	710～1850	850～2270	920～2310	1400～3000	1600～3600
滚轮中心离地高(mm)	350	350	400	450	600	700	950
电动机台数×功率(kW)	1×1.0	1×1.5	1×2.2	2×1.5	2×2.2	2×4	1×13

注:所列系一组滚轮组(一对主动轮及一对从动轮)的技术数据。

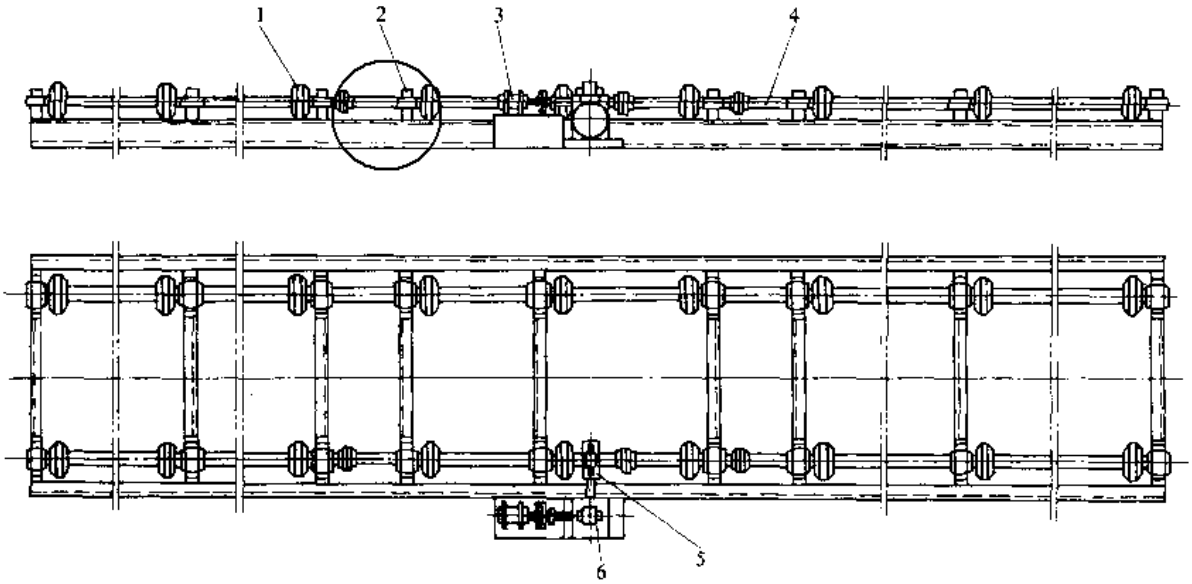


图 6·11-24 10t 长轴式焊接滚轮架

1—滚轮 2—轴承座 3—电动机 4—传动轴 5—二级蜗轮蜗杆减速箱 6—一级蜗轮蜗杆减速箱

超星公司制作请尊重作者版权

表 6·11-14　10t 长轴式滚轮架技术数据

载质量(t)	10	滚轮宽度(mm)	80
焊件直径范围(mm)	600～3000	滚轮中心高(mm)	330
焊件最大长度(m)	10	滚轮中心距(mm)	700～1400
焊接速度(m/h)	6～60	电动机型号	JZT21-4
滚轮外径(mm)	280	电动机功率(kW)	1.1

b.　台车式焊接滚轮架　适用于焊接操作机不动的长筒体内外环缝的焊接。台车内配置有机动焊剂垫台车。

c. 50t 球形焊件滚轮架　如图 6·11-25 所示，球形焊件放在四个锥形滚轮上进行焊接。

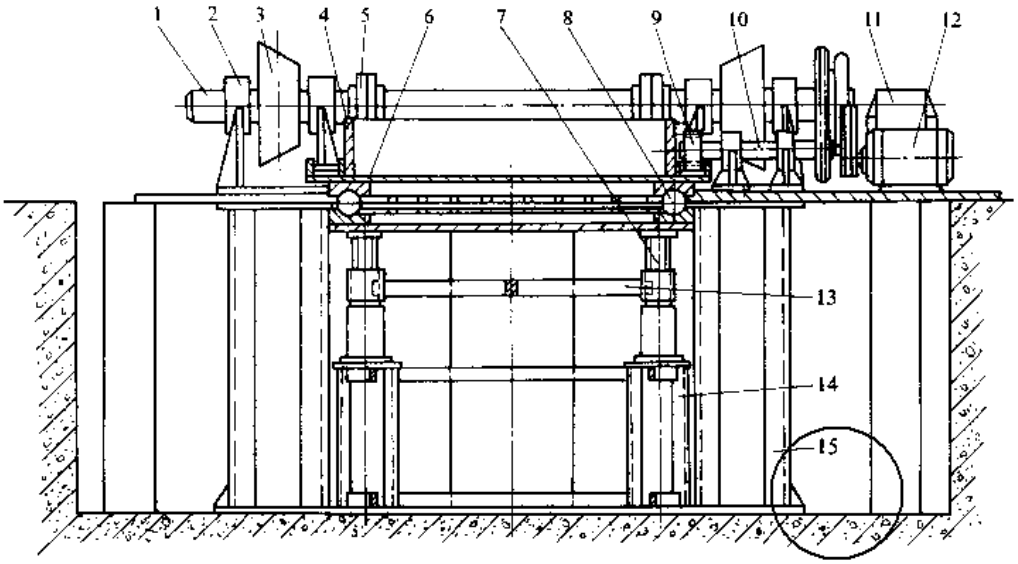


图 6·11-25　50t 球形容器焊接滚轮架

1—滚轮轴　2—滚轮轴承座　3—主动滚轮　4—上转盘支承架　5—联轴节
6—上转盘　7—30t 千斤顶　8—滚球　9—链轮　10—链轮轴　11—减速箱
12—电动机　13—拉筋　14—小立柱　15—大立柱

3·3　焊机(机头)变位机

焊机(机头)变位机(即焊接操作机)的作用是将焊机或机头准确地送到并保持在待焊位置，或以选定的焊接速度沿规定的轨迹移动焊机。焊接操作机与焊件变位机等配合使用，可以完成纵缝、环缝、螺旋缝的焊接和封头内表面堆焊等工作。

3·3·1　焊接操作机的分类(表 6·11-15)

表 6·11-15　焊接操作机的分类

类　型	特　点		适用范围
伸缩臂式焊接操作机	机头或焊机装在伸缩臂一端，伸缩臂可伸缩和升降；立柱能回转；底座型式有台车式、固定式；结构轻巧，操作灵活，通用性强；布置时占用车间面积较大		内、外、纵、环焊缝，封头内表面堆焊等
悬臂式焊接操作机	机头或焊机装置在悬臂上并沿臂移动，悬臂可升降和绕立柱回转；或机头(或焊机)装置在悬臂端，悬臂可升降，不能旋转，其底座一般为固定式或台车式；结构简单，成本不高		主要用于外缝焊，长悬臂则多用于内缝焊接
平台式焊接“操作机”	底座为台车式	焊机在操作平台上工作，平台能升降，台车能移动；刚性好，制造较容易，结构较大；布置时，占用车间有效工作面积不多	外纵、外环焊缝的焊接
	单轨壁行式	整个操作机沿下面的单轨和装置在厂房立柱上的导轨梁行走；车间起重机移动时，严重影响焊接过程的正常进行，单设立柱其影响消除，占用“车间有效工作面积最少	
龙门式焊接操作机	机头或焊机在龙门架上，横向移动及升降；龙门架可沿导轨纵向移动；龙门架刚性好，结构庞大；占用车间有效面积也大		筒体外焊缝、长梁柱的直焊缝

超星公司制作 请尊重作者版权

3·3·2　伸缩臂式焊接操作机

1. 伸缩臂式焊接操作机分类　按结构形式和用途可分，简易型、小型、中型、大型和重型五类如表6·11-16和图6·11-26。通用型伸缩臂式焊接操作机型号及主要技术性能见表6·11-17。

2. 特殊用途的焊接操作机

a. 无立柱内缝伸缩臂式焊接操作机　无立柱，伸缩臂在机座内导轮间伸缩，不能升降和回转，伸缩臂端设置三维调整机构如图6·11-27。专门用于焊接筒体内纵缝和内环缝。

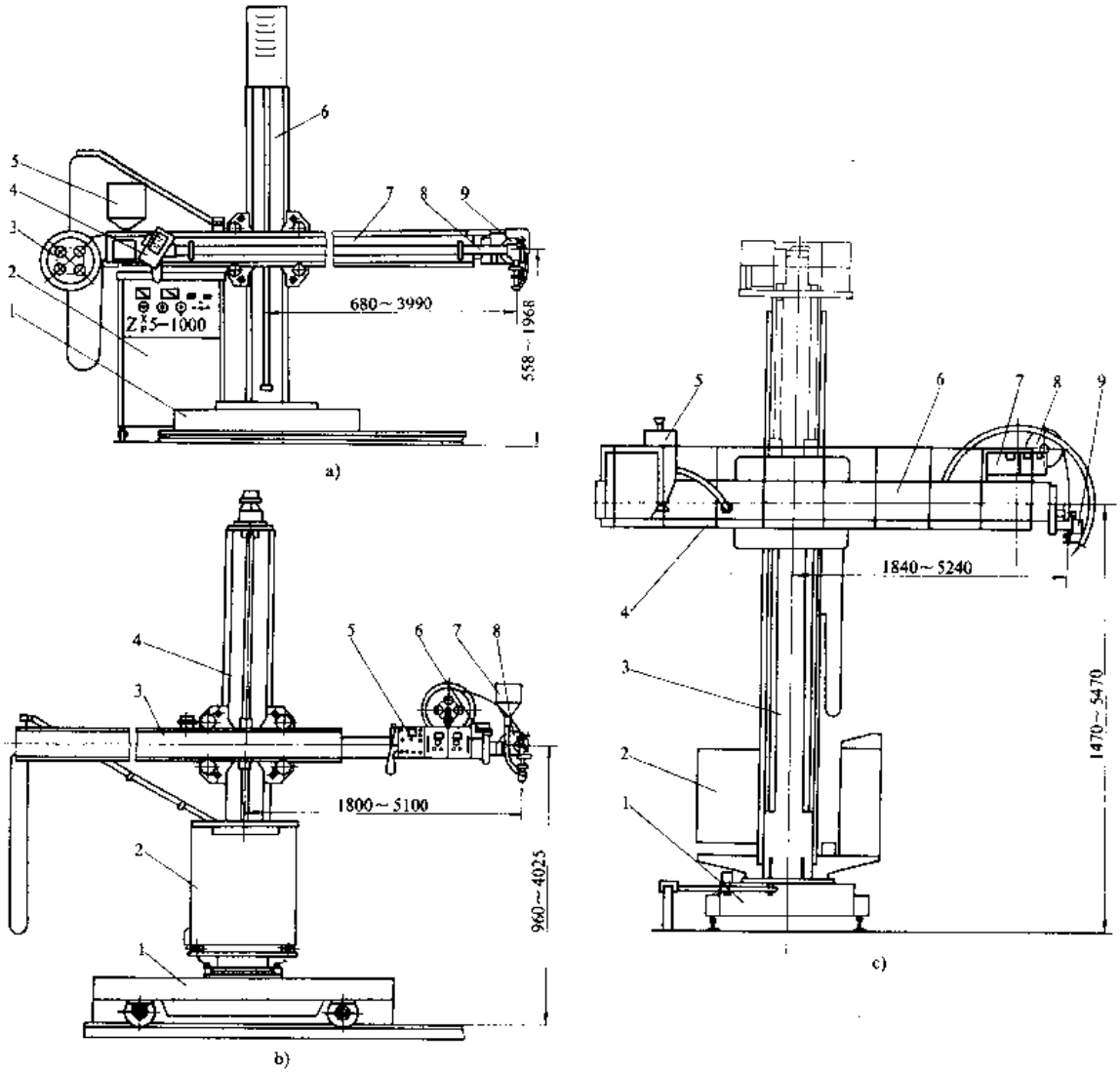


图6·11-26　伸缩臂式焊接操作机

a)小型焊接操作机

1—台车　2—焊接电源　3—焊丝盘　4—操作盘及手控盒　5—焊剂输送系统　6—立柱　7—伸缩臂和滑座　8—调整机构　9—送丝机头

b)中型焊接操作机

1—台车　2—焊接电源　3—伸缩臂和滑座　4—立柱　5—操作盘及手搭盒　6—调整机构　7—焊剂斗　8—送丝机头

c)大型焊接操作机

1—台车　2—焊接电源　3—立柱　4—护栏和走台　5—焊剂回收装置　6—伸缩臂和滑座　7—操作盘　8—调整机构　9—机头

超星公司制作请尊重作者版权

表 6·11-16　伸缩臂式焊接操作机的分类

类别	特　　点	适用范围
简易小型或超小型	伸缩臂机动伸缩，高、低档，焊速无级调节；伸缩臂端部调整机构（水平和垂直调整）按需选用机动型或手动驱动；滑座升降采用手动丝杠一螺母、齿轮—齿条或卷扬筒式；台车人工驱动。结构简单、制造容易，成本很低且功能齐全	小型或超小型焊件内、外、纵环焊缝
小型	伸缩臂机动伸缩，高、低档，焊缝无级调节，调整机构机动；滑座升降机动、等速；台车移动和立柱旋转可根据需要选用机动或手动；控制盘按需要设于伸臂端侧或机旁；焊剂自动输送回收；结构简单，制造容易，使用方便，功能齐全	小型焊件的直、纵、环焊缝
中型	伸缩臂伸缩、滑座升降、调整机构、台车移动、立柱旋转等均为机动；伸缩臂伸缩，有高、低档，低档无级调速；伸臂侧设置焊工走廊；内柱内设置配重；焊剂自动输送回收	中型焊件的直、纵环焊缝
大型	结构、特点、功能及水平与中型机类似	大型焊件的直、纵、环焊缝
重型或特大型	结构、特点、功能及水平与中大型机类似	特大焊件的直、纵、环焊缝

表 6·11-17　通用型伸缩臂式焊接操作机的主要技术性能

型号	横臂水平行程(mm)	横臂垂直行程(mm)	焊接最小内径(mm)	焊接时横臂伸缩速度(m/h)	空程时横臂伸缩速度(m/h)	横臂升降速度(m/h)	立柱回转角度(°)	横臂端的载质量(kg)	横梁调速方式	调整机构调整范围(mm)		底座型式	台车移动速度(m/h)	备注
										水平	垂直			
HJX	3310	1410	400	7～70	15.6	15.6	手动±180	50	无级调速	±40	±40	台车式	手动	
HJZ	3300	3065	800	7～90	—	42	手动±180	80	无级调速	±100	±100	台车式	电动 120	
HJD	4000	4000	2000	7～90	—	86.4	电动±180	300	无级调速	±100	±150	台车式	电动 120	
HJT	5500	4470	2000	7～70	—	86.4	电动±180	500	无级调速	±200	±200	台车式	电动 120	
HC-X	1500	2000	—	—	168	60	手动 360	80	定速	—	—	台车式	150	
M2×2-S	2000	2000	—	9～90	—	30	手动 360	75	无级调速	—	—	固定式	—	
HC-WZ	3000	3000	—	10～100	180	90	电动 350	150	无级调速	—	—	固定式	—	
Z-44	4000	4000	—	7～70	180	120	电动 360	300	无级调速	—	—	台车式	120	
HC-ZH1	5000	4000	—	65～130	—	120	电动 355	—	无级调速	—	—	台车式	576	
Z55	5000	5000	—	7～70	290	170	电动 360	500	无级调速	—	—	台车式	120	
HC-ZH2	8000	4010	—	10～100	180	90	电动 350	80	无级调速	—	—	台车式	180	横臂二节套装
ZHJ7×7	7000	7000	—	15～100		90	电动<360	—	无级调速	—	—	台车式	162	

超星公司制作 请尊重作者版权

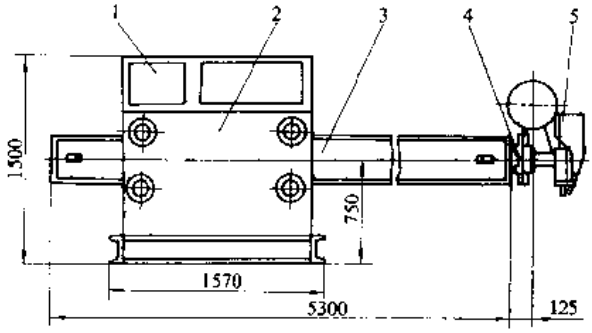


图 6-11-27 无立柱内缝伸缩臂式焊接操作机

1—控制箱 2—机座 3—伸缩臂

4—调整机构 5—焊接机头

b. 三节伸缩臂式内环缝焊接操作机(图 6-11-28)

最大有效工作行程可达 14.35m，适用于容器各筒段全部装配完成后施焊其内外环缝的技术方案。

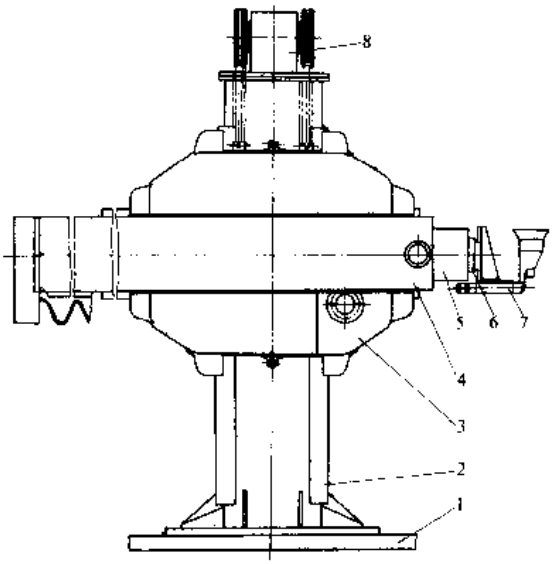


图 6-11-28 三节伸缩臂式内环缝焊接操作机

1—底座 2—立柱 3—滑座 4—Ⅰ级伸缩臂

5—Ⅰ级伸缩臂 6—Ⅱ级伸缩臂 7—三维调整机构 8—滑座升降驱动系统

c. 三根伸缩臂式筒段内外纵缝焊接操作机(图 6-11-29) 在一根立柱上配置了二个滑座三根伸缩臂，下滑座固定在立柱上，下伸缩臂在其中伸缩施焊内纵缝，上滑座升降，上伸缩臂在其中伸缩施焊外纵缝；支承托臂在其中伸缩支承托住薄筒段，确保焊接过程稳定性；在同一个工位上，先后施焊内外纵缝，大大地

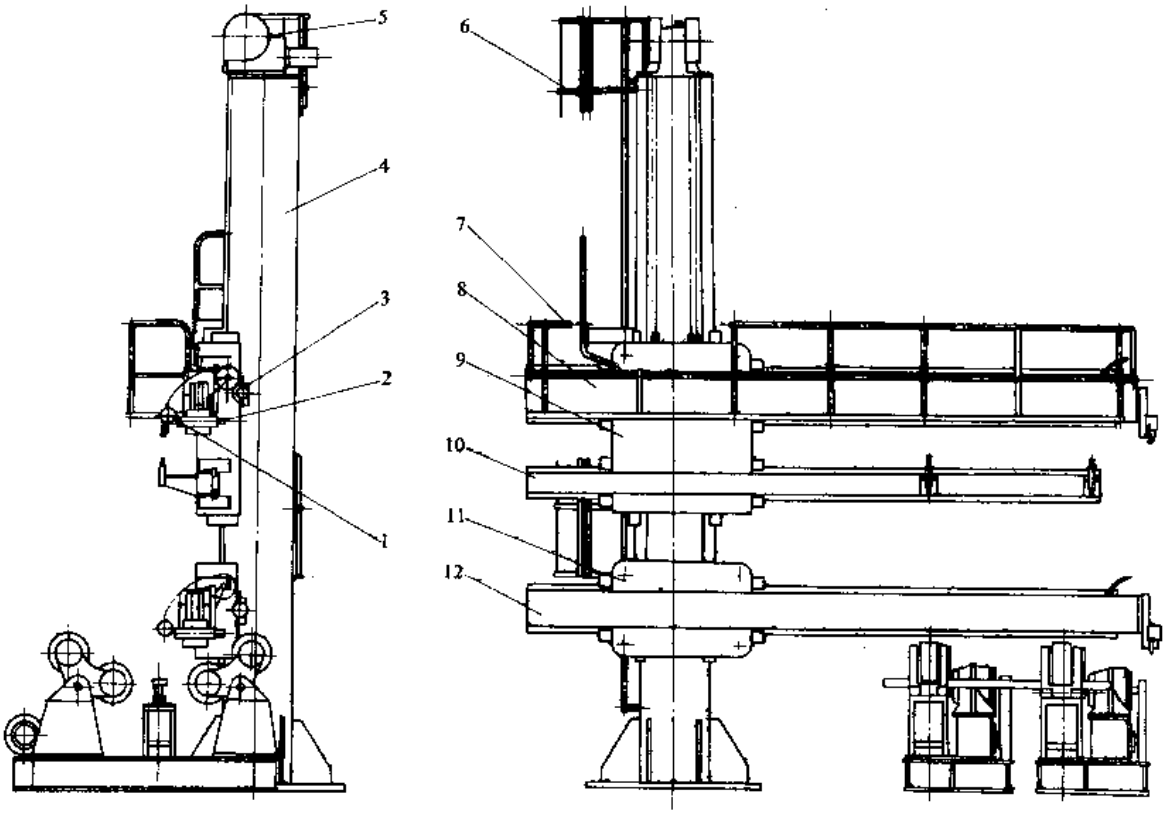


图 6-11-29 三根伸缩臂式筒段内外纵缝焊接操作机

1—机头 2—二维调整机构 3—伸缩臂驱动机构 4—立柱 5—上滑座升降机构 6—扶梯 7—护栏和走台

8—上伸缩臂 9—上滑座 10—支承托架 11—下滑座 12—下伸缩臂

超星公司制作 请尊重作者版权

减少了工序间辅助时间；通过电气转换控制，内、外纵缝共用一台调整机构的步进电机驱动电源和焊接电源。

d. 窄间隙伸缩臂式焊接操作机　在通用的单节伸缩臂式焊接操作机的伸缩臂前端设置一套窄间隙自动焊接装置，即为特殊用途的焊接操作机。

3·3·3　悬臂式焊接操作机

该机型横臂水平悬置，单端固定在滑座上，横臂与滑座一起沿立柱导轨升降，横臂相对立柱位置或不变或可绕立柱旋转。

1. 短悬臂式焊接操作机（图 6·11-30）　其机头或焊接小车沿横臂上导轨移动。横臂可绕立柱旋转，滑座可升降，主要用于筒件或焊件的外缝施焊。

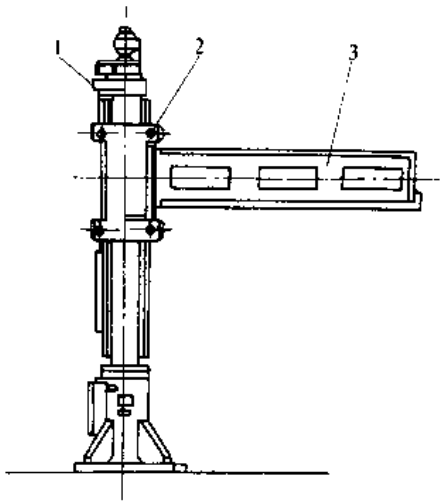


图 6·11-30　短悬臂式焊接操作机

1—立柱　2—滑座　3—横臂

2. 细长悬臂式内环缝焊接操作机（图 6·11-31）　该机为小直径长筒体内环缝专用焊接操作机。立柱不能旋转，细长悬臂不能伸缩，悬臂垂直移位行程很小。该机最佳施焊技术方案应是焊接操作机不动，焊件移、变位实施焊接方案，即操作机底座为固定式，防止了操作机移位产生的细长悬臂抖动现象，焊件则放置在滚轮架台上移位和变位。该机设置了焊头找缝和自动跟踪、焊丝伸长自动调节系统。

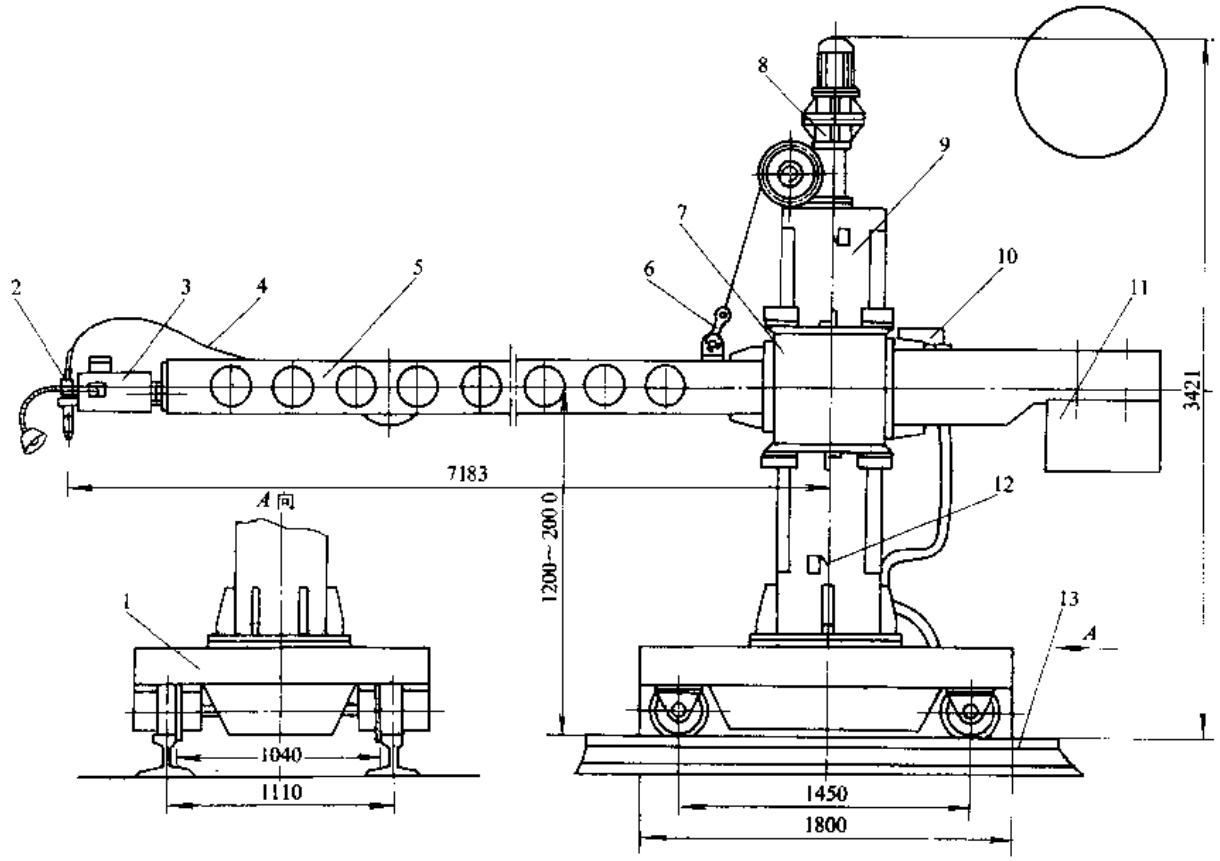


图 6·11-31　细长悬臂式内环缝焊接操作机

1—台车　2—机头　3—三维调整机构　4—送丝机构　5—悬臂　6—链条连接钩　7—滑座　8—滑座升降机构　9—立柱　10—电缆　11—配重　12—限位开关　13—导轨

超星公司制作请尊重作者版权

3·3·4　平台式操作机

如图6·11-32所示，操作机平台可以升降，自动焊小车可在平台的导轨上移位和调整，焊工和辅助工人可在平台上操作，立柱固定不能旋转。该操作机仅是一个移、变位台架，且焊接小车只能沿导轨移位，焊接生产过程的机械化自动化受到很大限制。操作平台的升降和台车的行走机构与伸缩臂操作机相似。

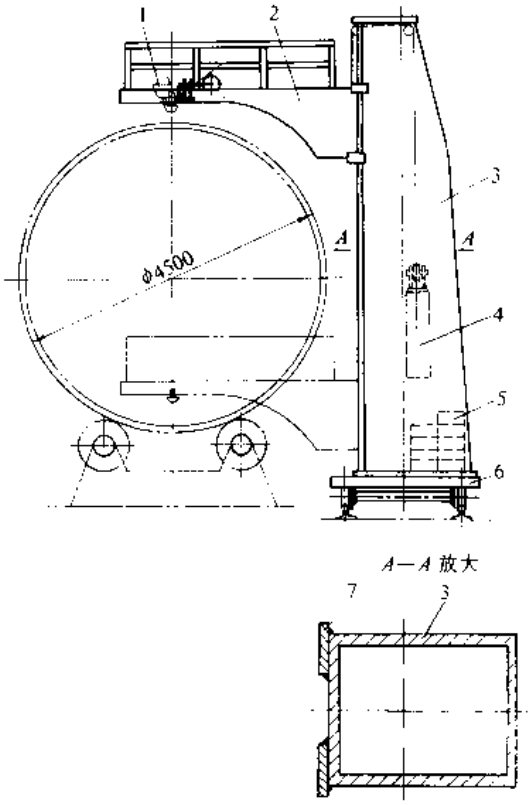


图 6·11-32　平台式操作机

1—自动焊机　2—操作平台

3—立柱　4—配重　5—压重

6—台车　7—立柱平轨道

3·3·5　龙门式操作机

如图 6·11-33 所示，操作平台 3 可沿龙门架 2 机动升降，龙门架沿轨道行走。适用长型容器的装配和焊接。移动焊接时，要求台车导向精度高。

3·3·6　电渣焊立架

电渣焊立架是将电渣焊机和焊工按焊接需要的速度实现提升的装置。主要用于立缝电渣焊，也可与滚轮架配合用于环缝电渣焊。整个立架放置在可行走的台车上。电渣焊机靠自身的电动机拖动沿导向立柱以焊速升降。要调节导向立柱的位置，使之与焊件接缝在焊接过程中始终保持平行。调节方式有两种形式。

1. 调节立架整体　如图 6·11-34 所示，台车 8 下面有 4 个螺旋千斤顶 7，用以调节整个立架的垂直位置。

2. 单独调节导向立柱　如图6·11-35所示，导向立柱的上下端部安装在球面支承的调节座6上，转动调节座手柄，可使导向立柱沿四个方向调节 1°20′。

操作平台可与电渣焊机组合在一起(图 6·11-34)或单独设置(图 6·11-35)，此时平台由电机 11 拖动，沿立柱 7 快速升降。技术数据如表 6·11-18。

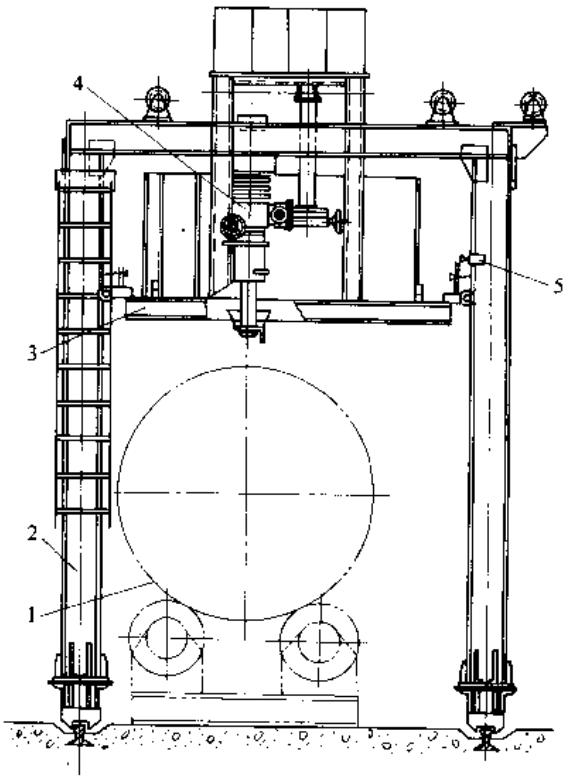


图 6·11-33　龙门式操作机

1—焊件　2—龙门架　3—操作平台

4—自动焊机和调整装置　5—限位开关

超星公司制作 请尊重作者版权

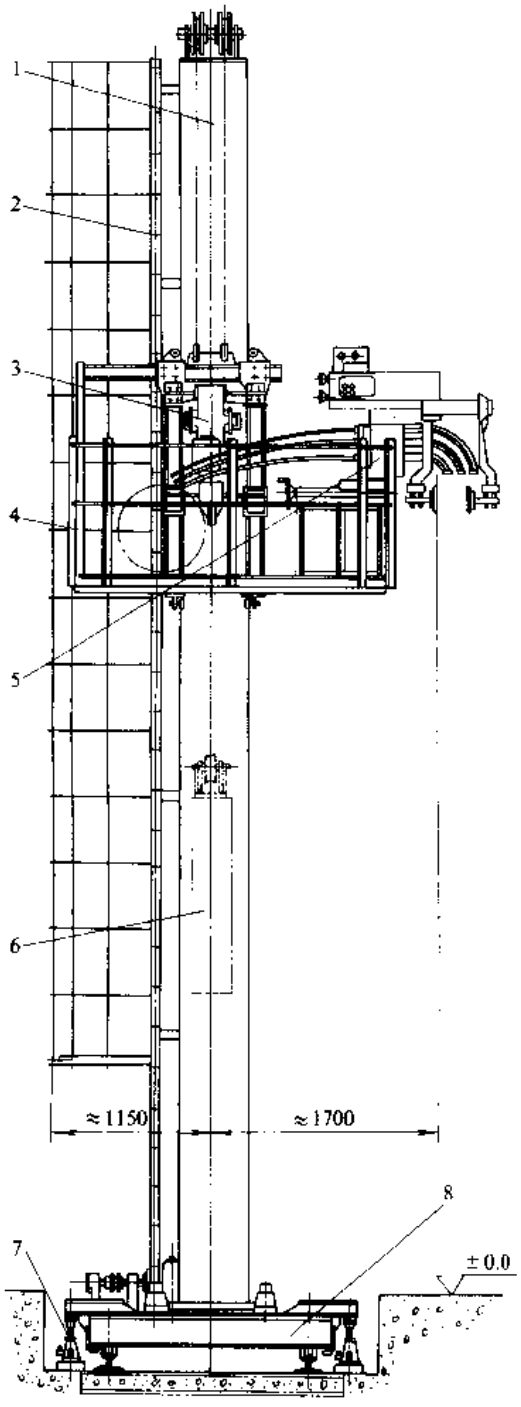


图 6·11-34　台车式 7m 电渣焊立架

1—立柱　2—梯子　3—调整座　4—焊工、焊机升降台
5—电渣焊机　6—升降台平衡重　7—螺旋千斤顶
8—活动台车

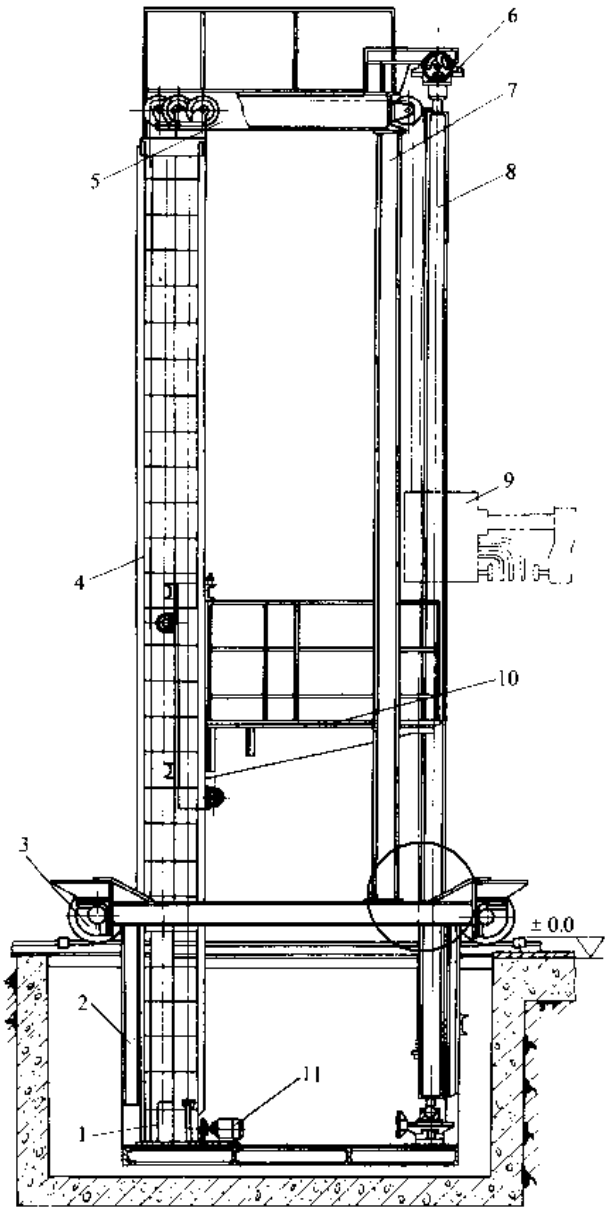


图 6·11-35　5.5m 电渣焊立架

1—卷扬机构　2—车架　3—车轮　4—梯子　5—升降架顶台
6—调节座　7—立柱　8—焊机导向立柱　9—电渣焊机
10—焊工平台　11—电动机

表 6·11-18　电渣焊立架技术数据

焊件最大高度　(mm)	7000	5500
操作平台行程　(mm)	7000	5500
焊机焊接速度　(m/h)	0.5～9.6	0.5～9.6
焊机空程速度　(m/h)	50～80	50～80
焊机提升电机功率　(kW)	0.7(直流)	0.7(直流)
操作平台空程速度　(m/h)	50～80	60
平台升降电机功率　(kW)	与焊机共同一台	0.6(交流)

版权所有 重作者制作 请勿公司制作

（续）

焊机调整方式	调节台车下，螺旋千斤顶7	调节导向立柱上下端调节座手柄
焊机调整角度	任意	1°20′(四向)
台车行走速度 (m/h)	180	手动
台车行走电机功率 (kW)	1.0(交流)	—
操作平台有效载荷 (kg)	500	200
立架前后移动量 (mm)	37500	1000
外形尺寸 (mm)	3010×2500×10195	3286×3825×9756
地坑尺寸 (mm)	—	3900×2265×2000
总质量 (kg)	6867	5000

3·4 焊工变位机(升降台)

焊工变位机(升降台)能将焊工及装备升降到所需的高度和位置。适用于高大焊件的自动焊、半自动焊、手工焊和装焊等工作。

3·4·1 肘臂式焊工升降台(图 6·11-36)。

该类装置结构精巧、移动灵活、使用方便。摇动手摇油泵，平台上升，焊工还可在平台上用脚踏油泵微调平台高度。撑脚可根据需要调整伸缩量，拧紧撑脚即可固定升降台，必要时可以配重以防止升降台倾倒。技术数据如表 6·11-19。

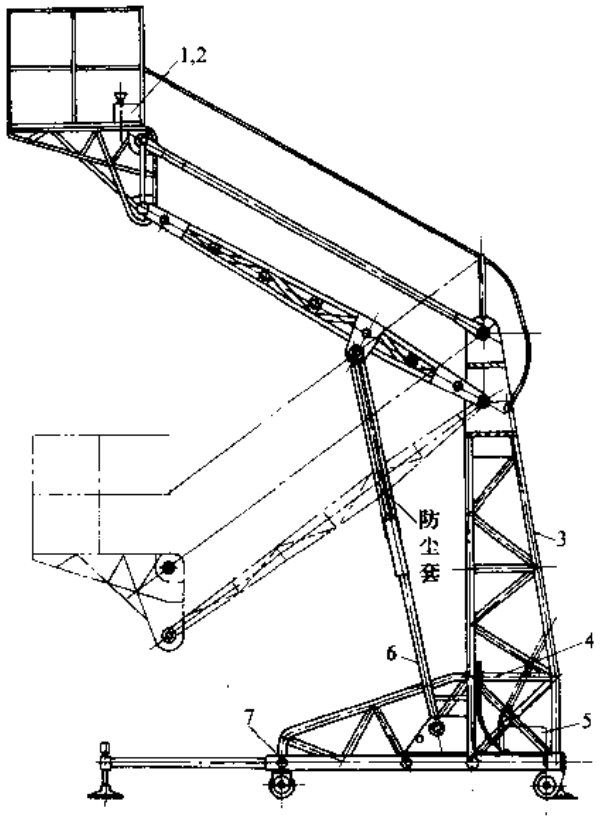


图 6·11-36 肘臂式焊工升降台

1—平台 2—脚踏油泵 3—升降油缸 4—梯子 5—手摇油泵 6—轮子 7—撑脚

表 6·11-19 肘臂式焊工升降台技术数据

载质量 (kg)	升降高度 (mm)	平台尺寸 (mm)	肘臂长度 (mm)	油缸		手摇泵		脚踏泵		外形尺寸 (mm)	总质量 (kg)
				缸径 (mm)	行程 (mm)	手推力 (N)	工作压力 (MPa)	脚踏力 (N)	工作压力 (MPa)		
250	1600～4000	900×1350	2300	44	900	250	80	200	80	3300×2650×4700	705

3·4·2 套管肘臂式焊工升降台

平台、肘臂和肘臂油缸与肘臂式焊工升降台相同。机架由三节可伸缩的套管和组缸组成，通过滑轮组和钢丝绳可以增加其升降高度。其最大升降高度可达 8m。

4 焊接辅助机械装置

4·1 埋弧焊焊剂垫

为了防止焊缝烧穿或使背面成型，常在焊缝背面垫上衬垫。衬垫有焊剂的、紫铜的、石棉的、石墨的，其中以焊剂垫最常用。

常用埋弧焊焊剂垫类型如表 6·11-20，其结构如图 6·11-37～图 6·11-41 所示。

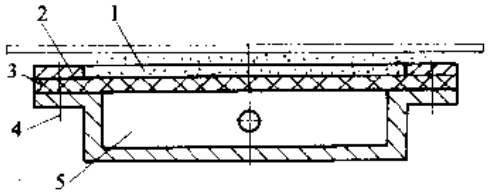


图 6·11-37 橡皮膜式焊剂垫

1—焊剂 2—盖板 3—橡胶膜 4—螺栓 5—气室

超星公司制作 请勿重作者版权

表 6·11-20　常用埋弧焊焊剂垫类型

类型			工作原理	焊剂循环方式	工作部分宽度(mm)	优点	缺点
纵缝	橡皮膜式		用压缩空气推动橡皮膜将焊剂压向工件	无	300	简单易行	长度不超过 2m
	软管式		用压缩空气使软管膨胀，将焊剂压向工件	无	300	压力均匀，焊缝背面可成型，适于长焊缝	
环缝	圆盘式		装满焊剂的圆盘，在气缸作用下压向工件，并由工件带动回转	人工填加焊剂	500	简单易行	在回转过程中，焊剂易下落，需及时补充
	皮带式		铺满焊剂的皮带，在气缸作用下压向工件，并由工件带动回转	人工填加焊剂，用漏斗供料	600	结构坚固，使用可靠，维修方便，焊剂厚度均匀压力适当，不易破碎，粒度易控制	焊剂易洒落地下，移动范围小，不能用于窄小部位
	螺旋推进器式	立式	用螺旋推进器使焊剂向上运动压向工件，靠焊剂自重落回螺旋推进器进料口	上、下循环	450	移动灵活、轻便，焊剂可自动循环，易于实现远距离控制	推进器磨损严重，维修工作量大，焊剂易碎，灰分多，透气性不好
		卧式	用正螺旋推进器使焊剂向前运动压向工件，靠反向螺旋推进器使焊剂回到进料斗	前、后循环	220	移动灵活轻便，焊剂自动循环，宜在狭窄部位使用	
软衬垫			用热固化树脂及石英砂垫使焊缝成型，用石棉泥板防止烧穿，用粘接带贴在焊缝背面，或用磁性夹具压向工件	无	55	外形尺寸小，宜用于狭窄部位的直缝及曲面焊缝(含环缝)。当坡口间隙在 3mm 以内，钝边在 2mm 以内，均可保证背面成型(单面焊双面成型)	坡口中，需填充一定合金成分的金属颗粒。制造工艺复杂

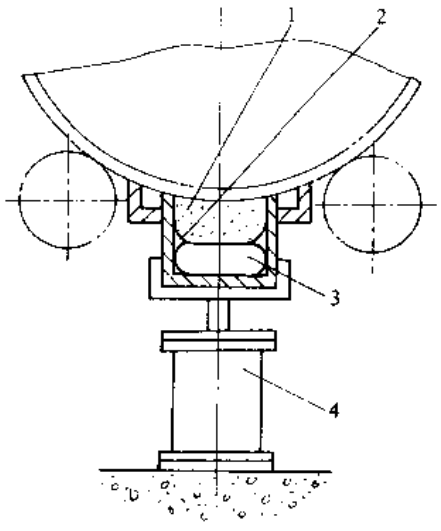


图 6·11-38　软管式焊剂垫

1—焊剂　2—帆布　3—充气软管　4—气缸

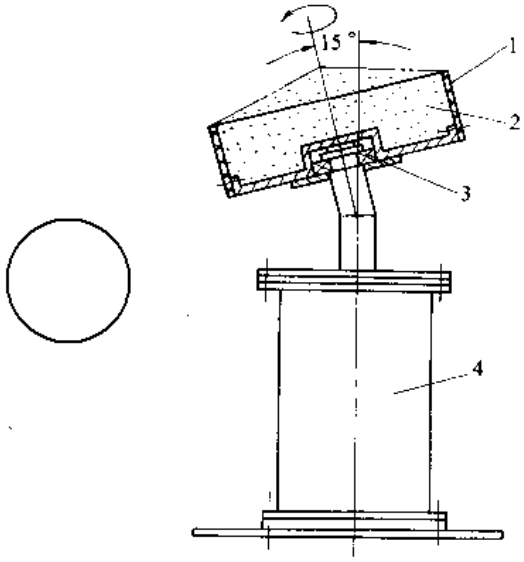


图 6·11-39　圆盘式焊剂垫

1—橡胶带　2—焊剂　3—滚动轴承　4—气缸

超星公司制作 请尊重作者版权

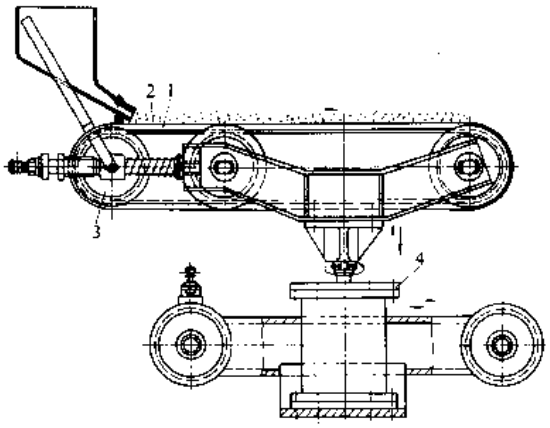
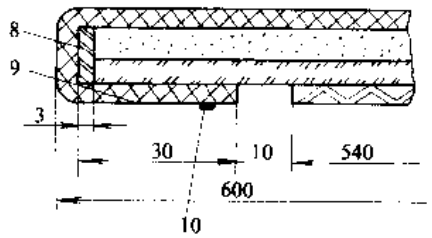
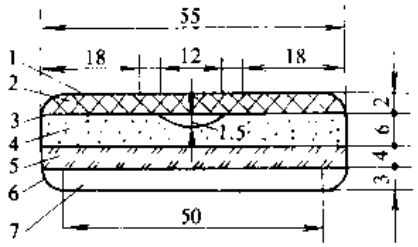


图 6·11-40　皮带式焊剂垫

1—传动带　2—焊剂　3—张紧轮　4—气缸



a)



b)

图 6·11-41　软衬垫

1—塑面隔离纸　2—双面粘接带　3—玻璃纤维带　4—热固化树脂石英砂垫　5—石棉泥板垫　6—热收缩薄膜　7—瓦楞纸衬　8—玻璃绒衬　9—单面粘接带　10—订书钉

4·2　焊剂输送和回收装置

4·2·1　焊剂循环系统

1. 固定式循环系统　适用于专用自动焊接机。图 6·11-42 是一台螺旋管焊接机焊剂循环系统。焊剂靠自重落下，用斗式提升机或安装在焊机附近的气动输送回收装置进行焊剂回收。

2. 移动式循环系统　焊剂输送回收装置安装在焊接机头处，随焊接小车或焊接操作机伸缩臂移动，在距离电弧 300mm 处回收焊剂如图 6·11-43 所示。

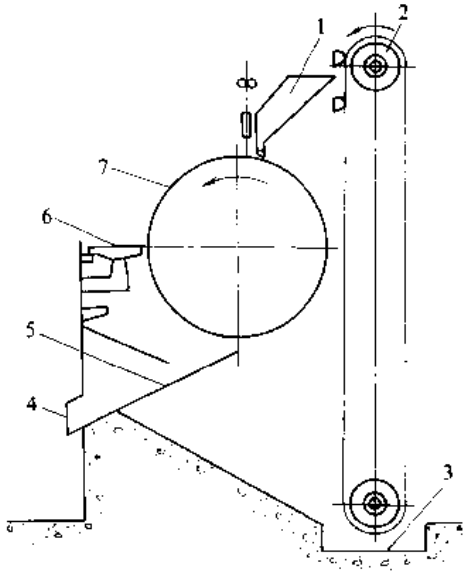


图 6·11-42　螺旋管焊接机焊剂循环系统

1—焊剂漏斗　2—斗式提升机　3—焊剂槽　4—渣出口　5—筛网　6—清渣刀　7—被焊管

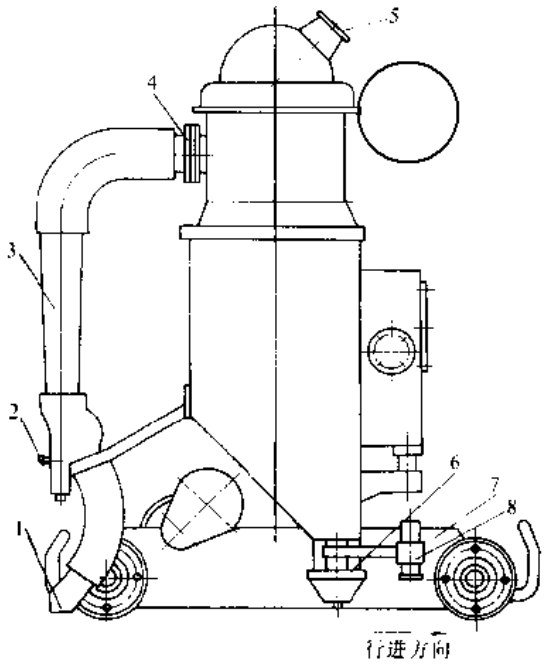


图 6·11-43　吸压式焊剂回收器

1—焊剂回收嘴　2—进气嘴　3—喷射器　4—焊剂箱进料口　5—出气孔　6—焊剂箱出料口　7—自动焊小车　8—焊口位置指示灯

超星公司制作 请尊重作者版权

4·2·2　焊剂输送装置

图 6·11-44 为焊剂输送装置示意图。当压缩空气通入输送装置上部时，即对焊剂加压，并使焊剂伴随空气经管路流到装置在焊头上的焊剂漏斗内，此时焊剂落下，空气自上口逸出。在设计制造焊剂输送系统时，要注意尽量减少管路接头，并避免突变截面。

为使焊剂输送更加可靠，可采用增压器。增压器一般设置在焊剂筒出口处。当输送距离较长时，还可在输送管路上设置增压器。

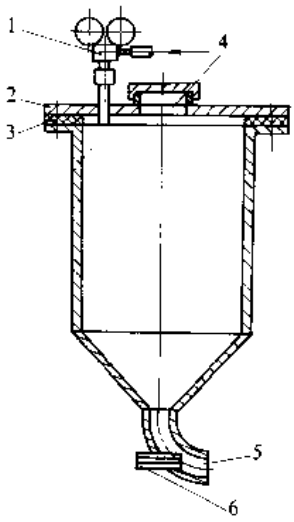


图 6·11-44　焊剂输送装置

1—进气管及减压阀　2—桶盖　3—胶垫　4—焊剂进口　5—焊剂出口　6—管端增压器

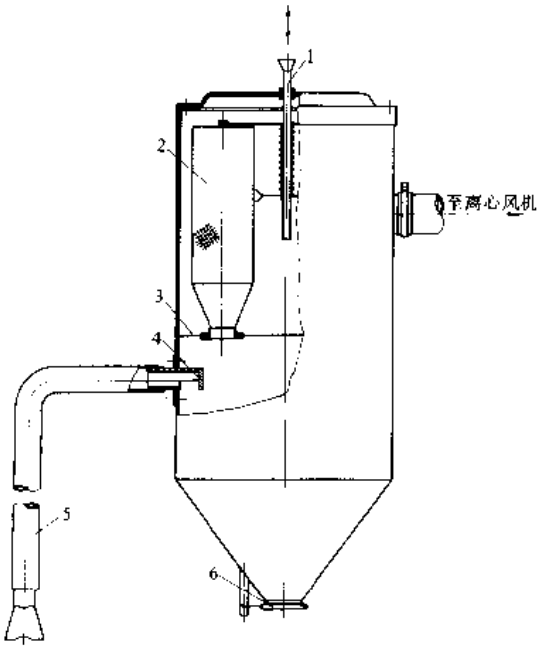


图 6·11-45　电动吸入式焊剂回收装置

1—振动杆　2—滤尘袋　3—隔板　4—耐热橡胶挡板　5—软管及吸嘴　6—焊剂出口

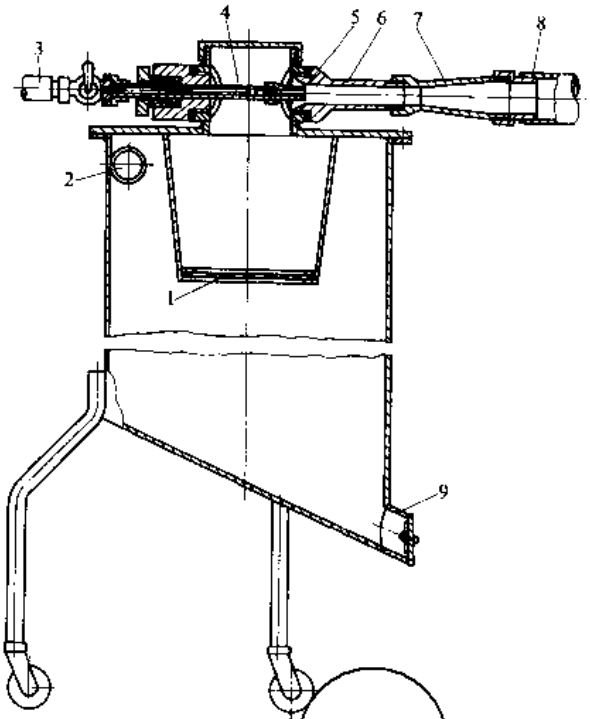


图 6·11-46　气动吸入式焊剂回收装置

1—铜网过滤筛　2—焊剂吸入管　3—压缩空气进口　4—喷射管　5—喷嘴　6—等压管　7—扩压管　8—压缩空气出口　9—放出管

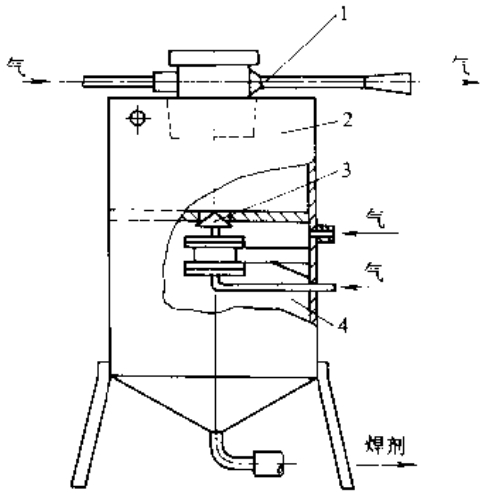


图 6·11-47　混合式焊剂回收装置

1—喷射器　2—回收器　3—气阀　4—输送器

采用压缩空气输送焊剂时，必须装设气水分离器，清除压缩空气中的水和油。

4·2·3 焊剂回收、输送装置

采用压缩空气回收和输送焊剂具有如下优点：(1)使用工厂的压缩空气网方便；(2)回收装置简单，回收完全；(3)便于将回收器直接装置在焊机上；(4)回收和输送可采用同一装置；(5)便于在自动线上应用。

常用焊剂气动回收、输送装置如表6·11-21所示，其结构分别如图6·11-45～图6·11-47所示。

表6·11-21 常用焊剂气动回收、输送装置

分类	电动吸入式	气动吸入式	吸压式	组合式
工作原理	利用电动离心风机造成焊剂筒中负压，焊剂被空气流带入筒中	利用拉瓦尔喷嘴喷出的气流，在密闭的焊剂筒中造成负压，焊剂被空气流带入筒中	拉瓦尔喷嘴装在吸入管的焊剂入口附近，吸入管内是负压力，焊剂筒内是正压力	由吸入式回收器和正压式输送器组成，当气动阀门打开时，回收器内的焊剂落入输送器
焊剂破碎及设备磨损	焊剂有破碎现象，设备内壁有磨损	焊剂有破碎现象，设备内壁有磨损	焊剂破碎严重。设备内部磨损严重	焊剂有破碎现象，设备内壁有磨损
输送、回收可能性	可同时输送、回收	可同时输送、回收	可同时输送、回收	可连续回收，周期地输送
输送可靠性	焊剂筒内是负压力，当用于同时输送、回收时，出口处有焊剂“吸住”现象；当压缩空气压力为0.3MPa时，焊剂面需高于1.5m才无“吸住”现象；输送不可靠		因焊剂筒中是正压力，所以无“吸住”现象，输送可靠	
焊剂污染情况	焊剂不和压缩空气接触，不被污染		焊剂直接和压缩空气接触，易被压缩空气中的水、油污染	
输送距离	负压输送，距离较短		正压输送，距离较长	
空气滤清系统	不需要		需要	
用途	用于较远距离回收	与大型焊剂斗配合，用于大型工件的焊接	用于自动化单机和自动线	用于固定场合

版权所有 侵权必究

超星公司制作请尊重作者版权

第 12 章　焊接自动控制[62]~[67]

焊接自动控制系统是在埋弧自动焊的基础上发展起来的。埋弧自动焊机仅限于焊丝的自动送进和焊接机头（或焊车）沿焊接线自动行走，只是一种机械化的焊接方法。而为了确保焊接质量，提高生产效率和改善劳动条件，焊接自动控制还应在焊接机头的位置、焊接熔池的尺寸和焊接过程的程序等方面进行控制。实际上焊接过程是一种随机的复杂过程，工况也十分恶劣。所以在这种情况下利用传统的方法难以实现焊接过程自动控制。由于现代控制技术的发展，如传感技术、电子技术和计算机控制技术等的出现，才能实现对焊接过程中出现的偏差进行自动校正以及使一个复杂的焊接过程按预定程序自动进行。

1　焊枪位置控制

焊枪位置控制亦称焊缝跟踪，能使焊枪沿着预定轨迹运动。

1·1　焊缝跟踪系统的构成

焊缝跟踪系统由传感器、控制器和执行器三大部分组成，如图 6·12-1。

在这个系统中，由传感器检测电弧与焊接线的相对偏差，在控制器中进行比较、放大，然后输出信号控制执行器中电动机开/停及转向。通过执行器调节焊枪对准焊接线，从而实现焊缝自动跟踪。

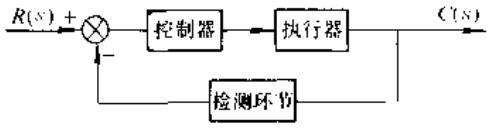


图 6·12-1　焊缝自动跟踪系统

1·2　焊缝跟踪传感器

1·2·1　分类

在焊缝自动跟踪系统中，传感器是最关键的一环。但目前尚不存在一种通用传感器，常常是根据具体产品开发成不同类型的传感器。按其工作原理分类如下：

- 传感器
  - 接触式
    - 机械式
    - 机电式
  - 非接触式
    - 光电式
    - 电磁式
    - 电容式
    - 射流式
    - 超声式
    - 电弧式

1·2·2　机械式传感器

机械式传感器是直接利用焊接工件坡口或边缘作为焊接行走机构的导向靠模，如图 6·12-2。在机械式焊缝跟踪装置中，传感器和执行器合为一体，该方法跟踪精度较低，一般仅能达到±2mm 左右。

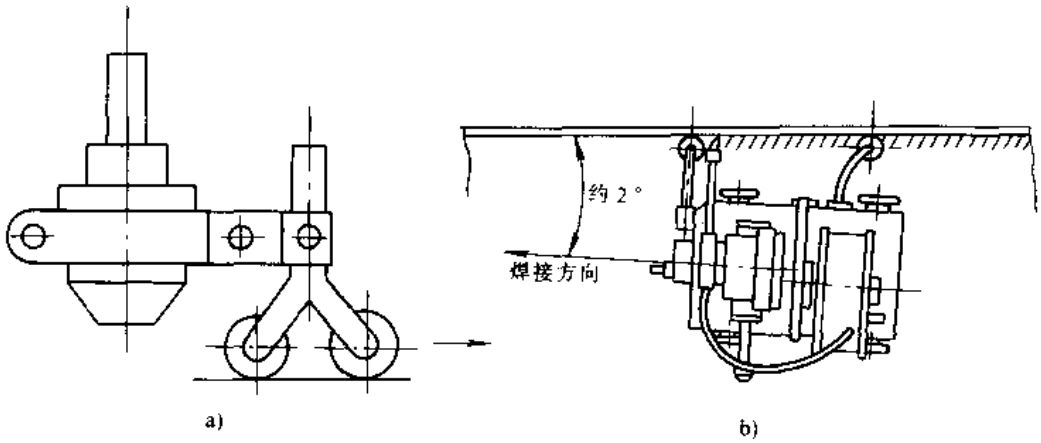


图 6·12-2　机械式跟踪

a）沿对接坡口移动　b）以角焊缝的垂直板导向

超星公司制作 请尊重作者版权

1·2·3 机电式传感器

机电式传感器是通过与工件坡口接触的导向杆(或轮)将机械偏差转换为位移传感器可直接检测的位移量，然后再通过差动变压器式、光电式传感器或触点式的位移传感器输出电信号，如图6·12-3。

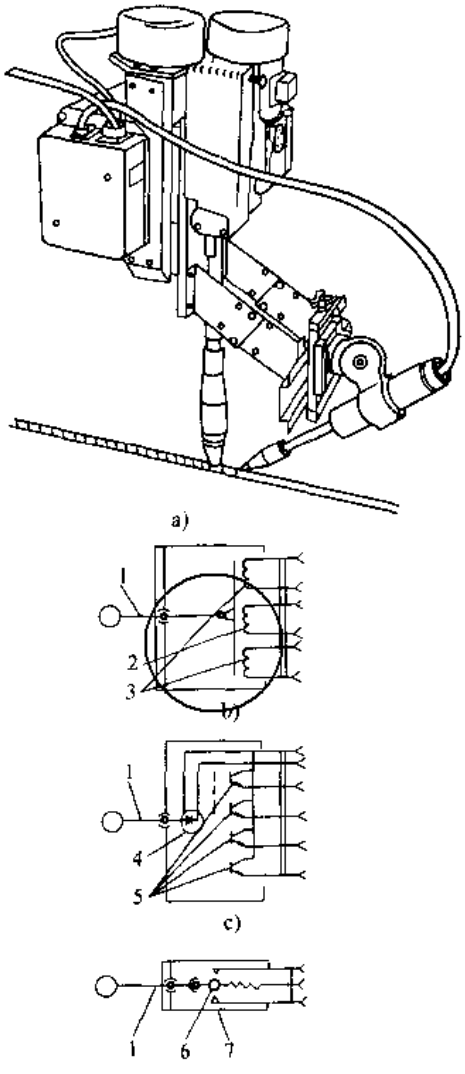


图6·12-3 接触式机电传感器

a) 带有接触式传感器的跟踪装置 b) 差动变压器式传感器 c) 光电式传感器 d) 触点式传感器

1—探针 2—计时线圈 3—感应线圈 4—发光二极管 5—光电三极管 6—触点座 7—触点

导杆式传感器应用较灵活，可以与焊接小车或焊接操作机等配套使用，是目前工业生产中应用最广泛的一种焊缝跟踪传感器。它的结构简单、动作直观、抗干扰能力强，可靠性高。尽管传感器本身具有较高的灵敏度，但由于导杆与坡口表面直接通过滑动接触采样，所以采样精度将取决于坡口状态，如果坡口经加工，表面比较光滑时，跟踪精度可达到±0.5mm。

1·2·4 光电式传感器

光电式传感器是一种非接触式跟踪传感器，其原理是由电光源通过光学系统将光线照射到焊接线（或基准线）上，再将其像反射到光电元件上，并将焊枪相对焊接线的偏移量所产生的光量度的变化转换成电讯号。

根据光电元器件的不同，光电式跟踪传感器已形成许多类型，如：单元点式、组合镜反射式和图像式传感器等。

1. 单光点式光电跟踪传感器 它的工作原理示于图6·12-4a。由光源发出的光照射到焊接线上形成光斑，再通过该光斑将对中焊接线和状况反射到两只光电三极管 D_1 和 D_2 上，得到相应的光量度信号，通过图6·12-4b所示的差放电路输出电信号。

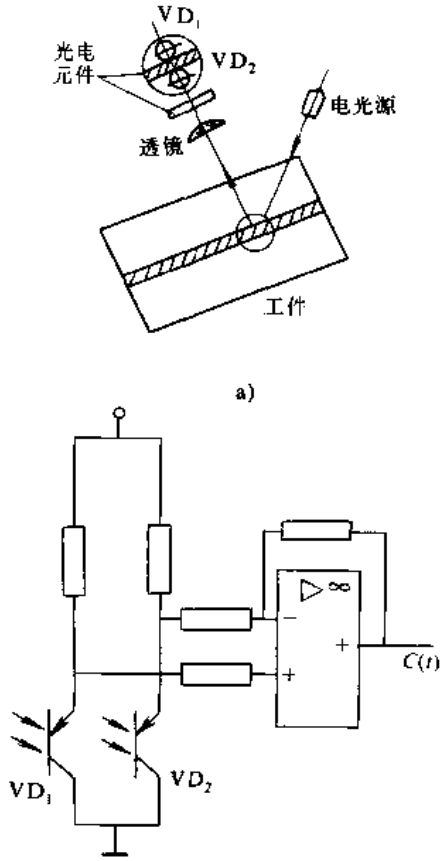


图6·12-4 单点式光电跟踪传感器

a) 工作原理 b) 信号处理电路

超星公司制作请尊重作者版权

2. 组合镜反射式光电跟踪传感器　该传感器是将电光源、光敏器件和光学透镜组装在一起构成一个组合式传感器，如图 6·12-5。其中图 a 为其结构特点，图 b 为其工作特性。该传感器的实质是高度传感器。高度合适时（h_0）输出信号 U_0 最大，否则较小。

实际应用有单件式、差动式和扫描式，如图 6·12-6～图 6·12-8。

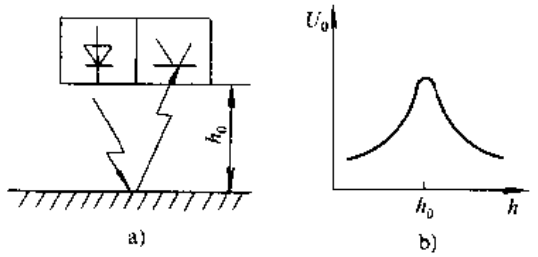


图 6·12-5　组合镜反射式光电跟踪传感器

a）结构特点　b）工作特性

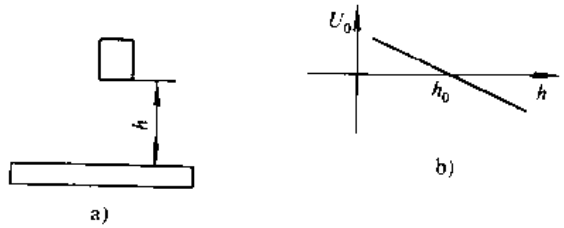


图 6·12-6　单件式镜反射式光电跟踪传感器

a）结构特点　b）传感器工作特性

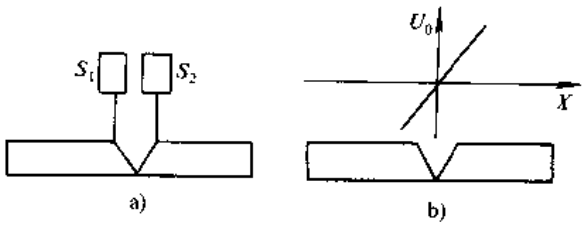


图 6·12-7　差动式镜反射式光电跟踪传感器

a）结构特点　b）传感器工作特性

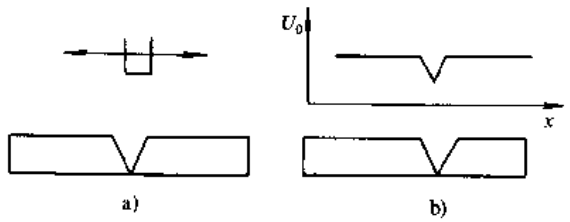


图 6·12-8　扫描式镜反射式光电跟踪传感器

a）结构特点　b）传感器工作特性

其中差动式和扫描式都能得到准确的偏移量信息，而单件式只能得到高度信息。但是扫描式传感器还需要配置机械摆动机构，从而使得结构复杂和使用不便。

3. 图象式传感器　利用电视摄象机作为传感器，可以将电弧周围的图像全部摄入，获得十分丰富的信息，有利于焊接过程控制。但是目前实际使用中，用摄象机直接摄取坡口图象的精度往往不高，为了提高对坡口的分辨力，采用激光作为光源，经光学聚焦系统将其聚成条状光，称该光束为结构光，它与工件相交得到与坡口形状一致的一条亮线，再由 CCD 摄象机摄取这条亮线，则对坡口的分辨率有较大的提高。如图 6·12-9。这种方法被称为结构光法，是一种高精度的视觉传感器。

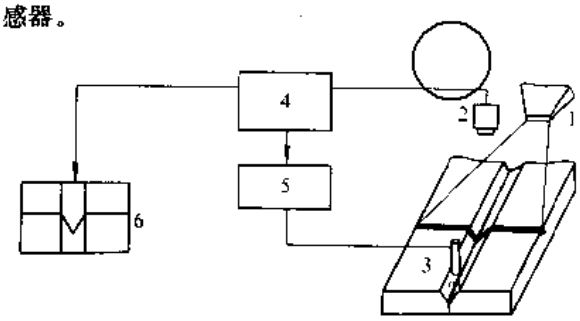


图 6·12-9　结构光法原理

1—结构光源　2—摄象机　3—焊接机头　4—图象处理装置　5—驱动器　6—监视器

此外，利用摄象机直接摄取焊接区域的图象是一种很有前途的视觉传感系统，为排除弧光干扰，大多采用红外或紫外波段，取得了良好的效果。

1·2·5　电磁传感器

电磁传感器是利用工件间隙的磁阻作用，检测焊接线位置，其典型结构如图 6·12-10。这种三芯柱差动变压器或传感器，中柱上绕有激磁绕组。当传感器中心与工件坡口中心重合时，由两侧心柱感应线圈差动相接，输出电势为 0，否则输出电势不为 0。

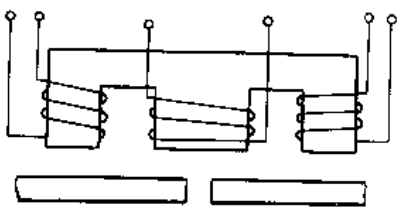


图 6·12-10　电磁传感器的典型结构

电磁传感器的灵敏度很高，但同时对错边也很敏感，目前克服错边干扰的方法有很多种，可分为外部补偿与内部补偿两种。图 6·12-11 为外部补偿法的两种常用结构，一种是利用增强漏磁，另一种是利用与位移量无关的高度传感线圈产生补偿电压。这两种方法均

超星公司制作 请尊重作者版权

可获得较好的补偿效果，但增加了传感器体积，同时也降低了灵敏度。

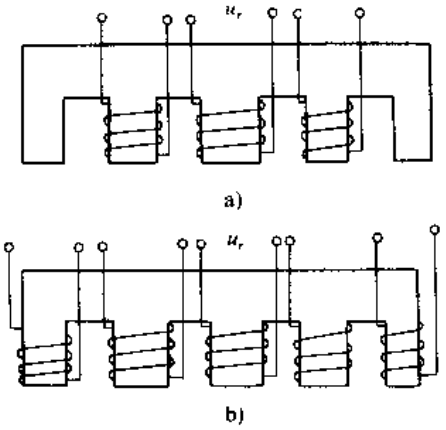


图 6·12-11　外部补偿错边方法

a）增强漏磁法　b）补偿电压法

图 6·12-12 示出了两种内部补偿错边的方法。这两种方法均勿需改变传感器结构（都为三芯柱三绕组结构），其中图 a 是通过电耦合，利用自感对错边的敏感强度补偿错边干扰。图 b 则是利用涡流效应补偿错边干扰。后者必须选用合适的激磁频率 f_{rh}。

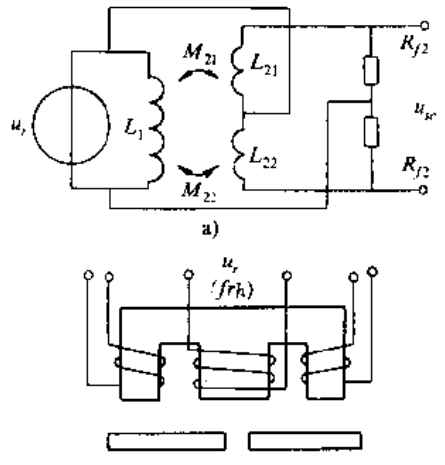


图 6·12-12　内部补偿错边方法

a）电耦合补偿法　b）涡流效应补偿法

1·2·6　电弧传感器

电弧传感器是利用电弧在工件坡口上扫描时，由于焊枪高度变化所引起的电弧电压或焊接电流变化作为传感信号。图 6·12-13 为 TIG 焊电弧传感器，当电弧沿坡口扫描时的电弧电压变化特点如图 b 所示。

电弧扫描方法有机械摆动法与电磁摆动法，其中电磁摆动电弧装置的体积小，易控制如图 6·12-14。

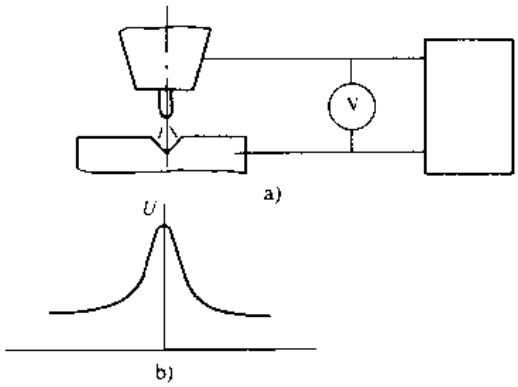


图 6·12-13　TIG 焊电弧传感器

a）结构示意图　b）电弧电压沿坡口的变化

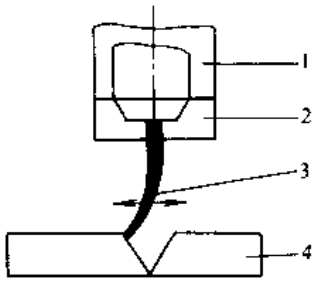


图 6·12-14　电磁摆动

1—焊矩　2—电磁铁　3—电弧　4—工件

MIG 焊和 MAG 焊电弧传感器不同于 TIG 焊电弧传感器。这时大都采用细丝和平特性电源，当电弧沿坡口扫描时，由于焊丝外伸长的变化而引起焊接电流变化，其变化规律如图 6·12-15。

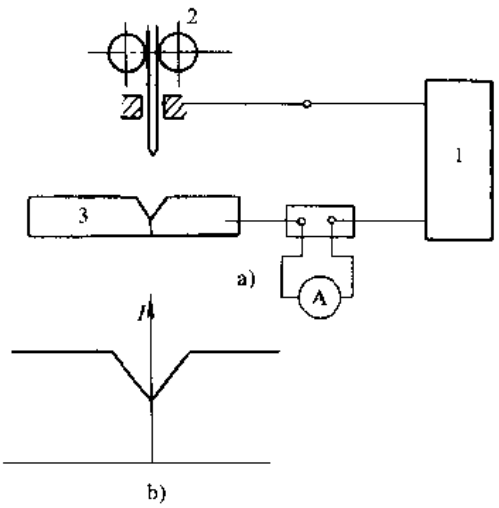


图 6·12-15　MIG 和 MAG 焊电弧传感器

a）结构示意图　b）焊接电流沿坡口的变化

1—焊接电源　2—送丝机　3—工件

在 MIG 焊中要求电弧摆动速度不能太大，当弧长变化时依靠电弧自身调节作用应能使其恢复到新的静

超星公司制作 请尊重作者版权

态工作点。实际上采用的机械扫描法有旋转法和机械摆动法两种，如图 6·12-16。

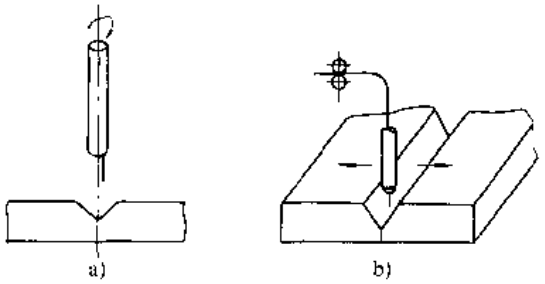


图 6·12-16　机械扫描法

a）旋转法　b）机械摆动法

电弧传感器的最大优点是勿需附加传感器，因此消除了传感器导前的固有跟踪偏差。不但具有较强的抗干扰能力，而且适于各种类型焊缝的跟踪，尤其适合于曲线焊缝的跟踪。

除了上述几种传感器外，还可以利用电容式、射流式或超声式传感器检测焊接线的位置，但应用很少。

1·3　焊缝跟踪控制器

焊缝跟踪控制器的作用是将从传感器获得的信号经变换并反馈至系统的控制端，与控制信号进行比较，产生偏差信号，再经放大后控制执行机构，以便消除偏差，从而实现闭环控制。根据控制方式的不同，焊缝跟踪控制器可分为比例控制器，开关量控制器和计算机智能控制器。

1·3·1　比例控制器

比例控制器输出与由传感器获得的反馈电压信号成比例的信号，它驱动直流伺服电机。显然，比例控制器实际上就是一个线性功率放大器。一旦跟踪焊缝出现偏差，则执行机构立即发生动作。由于偏差是经常的和随机的，所以调整过程也是连续发生的。

1·3·2　开关量控制器

开关量控制器将传感器的电压信号通过比较器与给定量进行比较并转换成控制电动机开/停与正/反转的开关信号。这一给定量实际上就是允许的偏差量，它决定了系统的控制精度。当实际偏差量小于给定量时，执行机构的电动机停止不动；反之，根据其偏差的正/负，调整电动机的正/反转。可见系统的调整过程是间断发生的，有利于系统的稳定性。

1·3·3　计算机智能控制器

计算机智能控制器利用计算机的存贮及计算判断功能，不但可以模拟上述比例控制器或开关量控制器，而且还可以通过软件程序实现对传感器导前误差的校正及提高系统抗随机干扰的能力。

1·4　焊缝跟踪执行器

典型的执行器如图 6·12-17，由电动机与丝杠、螺母传动系统构成。驱动电动机可以采用直流伺服电动机或步进电动机。采用步进电机更适宜，可以简化机构，提高执行器精度，还适于与计算机控制器配套使用。

执行器调整焊枪的速度通常在 2～5m/min，驱动力在 490N 左右。

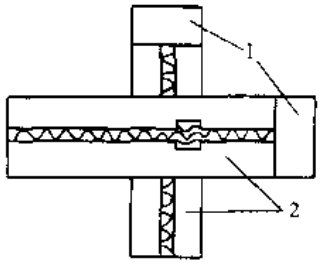


图 6·12-17　执行器结构图

1—电动机　2—机械传动机构

2　焊接熔透控制

焊接质量控制是在焊接过程中能自适应若干不可控或不完全可控因素的变化，有效地保证焊接过程按照预定质量要求进行。

焊接质量的标志除了无常见焊接缺陷外，焊缝尺寸（熔深、熔宽和熔透等）是十分重要的，而焊缝尺寸又由焊接参数（含焊接电流、电弧电压和焊接速度等）所决定。由于工件尺寸与形状的变化、坡口形状与散热条件的变化等原因的影响，已往的恒值参数控制法，难以获得均匀一致的焊缝尺寸，而直接采样被控制参数和进行闭环控制法却能保证预定的焊接质量要求。

在焊缝尺寸控制中，目前只有焊接熔透控制取得了成功地应用。熔透控制系统也是由传感器、控制器和执行器三部分组成，如图 6·12-18。可以看到该系统也是一个闭环控制系统，传感器采集的信息反馈到控制端与给定值进行比较，其差值经过放大和变换，去驱动执行器。

焊接熔透方法有两种，一为熔入法，另一为小孔法。由于熔透方法不同，采样方法也不同。

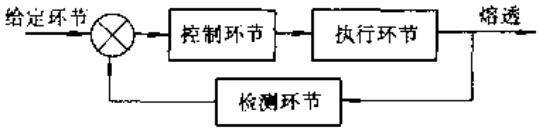


图 6·12-18 焊接熔透控制系统框图

2·1 测试棒法

测试棒法是通过置于焊缝背面的测试棒检测等离子流穿过小孔的程度，如图 6·12-19。显然，小孔等离子流的电压特性反映了小孔的尺寸和熔透程度。

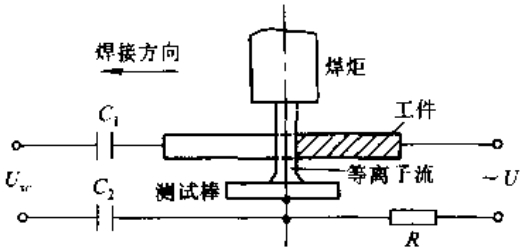


图 6·12-19 测试棒熔透控制法

2·2 声控法

利用等离子弧焊接管与管的对接焊缝的情况，当熔透焊件形成小孔时，将能发出特定频率的声音信号，声音的持续时间和小孔存在的时间是相对应的，电弧声信号出现的越早，声音持续时间越长，说明焊接规范越强，反之亦然。因此，声音信号能够反映脉冲等离子弧穿透情况，如图 6·12-20。可以看出，利用该信号能够实现熔透控制。

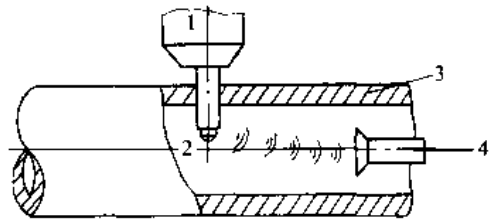


图 6·12-20 电弧声检测法

1—焊炬 2—等离子火焰 3—管件 4—拾音器

2·3 光电法

这是一种利用光电传感器检测熔透信息的方法。光电传感器是将光信号转换为电信号的一种传感器。常用的光电元件有光敏电阻、光电池和光敏晶体管。此外新型的光电器件不断涌现，有光导纤维和电荷耦合器件（CCD）等。由于使用的光电元、器件不同，而派生出许多种光电控制法。

采用 3DU33 型硅光敏晶体管作为光电传感器，由于其增益高，反应快和暗电流小等特点以及光谱响应范围在 0.4～1.1mm（从可见光到近红外），所以非常适合于熔透控制。不但适合于小孔法（图 6·12-21a），而且也适合于熔入法（图 6·12-21b）。前者必须将传感器安装在等离子火焰的侧面，而后者却可以安装在熔池的下方。

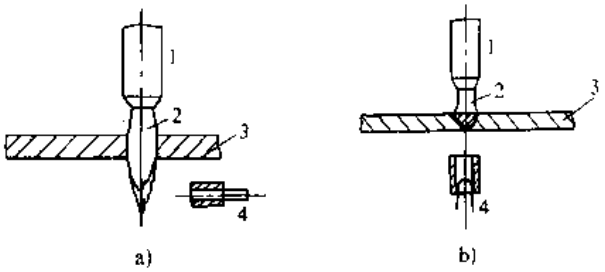


图 6·12-21 利用光敏晶体管等光电元件的光电法

a）小孔法 b）熔入法

1—焊炬 2—电弧（或等离子弧）

3—工件 4—传感器

光谱辐射最大值时的波长 λ_M 与温度有关，对于钢来说，熔点（1800K）时的 $\lambda_M=1.61\mu m$，而对于铝则较低（熔点为 932K），$\lambda_M=3.10\mu m$。这时硅光电晶体管已不合适了，而采用 PbS 作为熔透传感器，其光谱响应范围在 1.0～3.0μm 之间，这恰好适合于作为熔入法熔透控制传感器。传感器的安装见图 6·12-21，控制系统框图如图 6·12-22。这是一种步进式脉冲 TIG 焊熔透自适应控制法。当熔透传感器检测的信号经放大后 U_f 与给定值 U_g 相比较，如果 $U_f>U_g$，说明已熔透，比较器输出信号 TR，使触发器翻转，一方面控制焊接电源进入维弧阶段；另一方面驱动步进电机拖动焊接小车移动。当熔池冷却后 $U_f<U_g$，则比较器输出信号又使触发器翻转，于是焊接小车停止不动，而

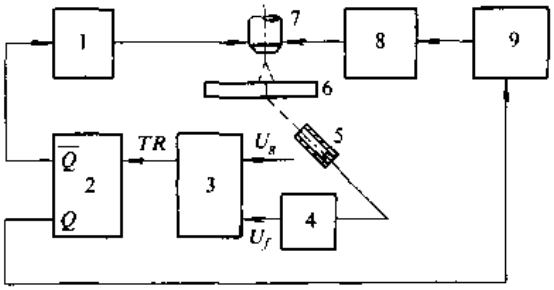


图 6·12-22 光电法控制系统框图

1—电源 2—触发器 3—比较器 4—放大

5—传感器 6—工件 7—焊炬

8—步进电机 9—驱动电机

版权

超星公司制作 请尊重作者版权

电源向电弧提供脉冲电流，再形成一个焊点，就这样周而复始地形成一系列焊点搭接而成焊缝。

上述光电元件的控制精度还不够高，于是利用红外元件扫描法或红外 CCD 法进行熔透控制。这时不但能取得直观而准确地控制效果，而且还能够从熔池正面采样，扩大了熔透控制的使用范围。

2·4　电弧传感熔池外激谐振法

薄板 TIG 焊时，在脉动电流作用下能引起熔池振荡，造成弧长及电弧电压信号的变化。熔透熔池的自然振荡频率与熔池质量、尺寸及外部拘束条件等有关。通常在其他条件相同时，熔池的自然振荡频率大致与熔宽成反比，如图 6·12-23。当脉动电流与一定尺寸的熔池自然振荡频率相同时，则熔池产生谐振，此时熔池振幅最大。如果外激电流频率大于或小于熔池自然振荡频率，将不会产生谐振且振幅小于谐振振幅。这样，谐振频率就可以作为特征信号，通过脉动电流频率控制熔池尺寸的大小。

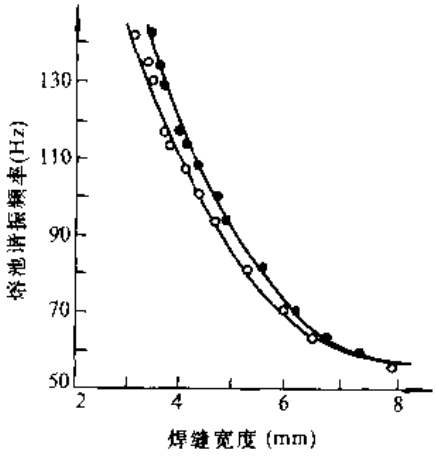


图 6·12-23　熔池自然振荡频率 f 与熔宽 B 的关系

●—背面熔宽　○—正面熔宽

利用上述熔池外激谐振原理，外激电流频率是由设定的熔宽来确定的。在电弧加热熔池的过程中，随着熔池尺寸长大，熔池自然振荡频率随之降低。当熔池尺寸达到设定值时，也就是达到谐振频率时，经计算机输出电弧电压幅值发生明显的上升和下降的变化，如图 6·12-24。把从峰值下降 ΔU 电压作为谐振的标志。

该熔透控制法的执行器受控于电弧电压信号。经计算机处理的电弧电压波形、焊接电流波形及焊接速度随时间的变化情况示于图 6·12-25。当熔池达到设定值时，焊接电流变小，为恒定直流的维弧阶段，同时焊枪移动一定距离，熔池随之冷却和凝固。接着又进入焊接电流为含有脉动分量的脉冲阶段，同时焊枪固定不动直到熔宽再次达到设定值。如此周而复始，由连续的焊点形成熔透焊缝。

图 6·12-24　计算机输出的电弧电压幅值波形图

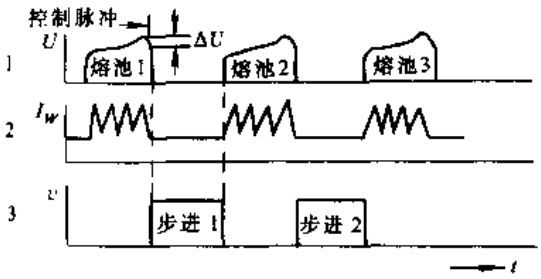


图 6·12-25　步进式电弧传感熔透控制法

1—计算机输出的电弧电压　2—焊接电流

3—步进移动

显然，该法勿需附加传感器，只利用电弧外激振荡便可以十分方便地采集信号，则抗干扰能力强，控制精度高和适于应用到更广泛的范围，其中包括在难以从熔池背面采样的情况下采用。

3　焊接程序控制

焊接程序控制是以合理的次序使焊接设备的执行元件进入规定的工作状态。

3·1　焊接过程程序

焊接过程程序是由焊接工艺方法、被焊工件材料、厚度及焊缝位置等决定的。然而，对于各种气体保护焊法不论那种情况都要求提前与滞后供气，可靠地引弧，提供合适的焊接参数和熄弧时填充弧坑，并防止粘丝等。此外，在有焊缝跟踪或熔透控制的情况下，当引弧后应使它们进入工作状态，而焊接结束时退出工作状态。

超星公司制作 请尊重作者版权

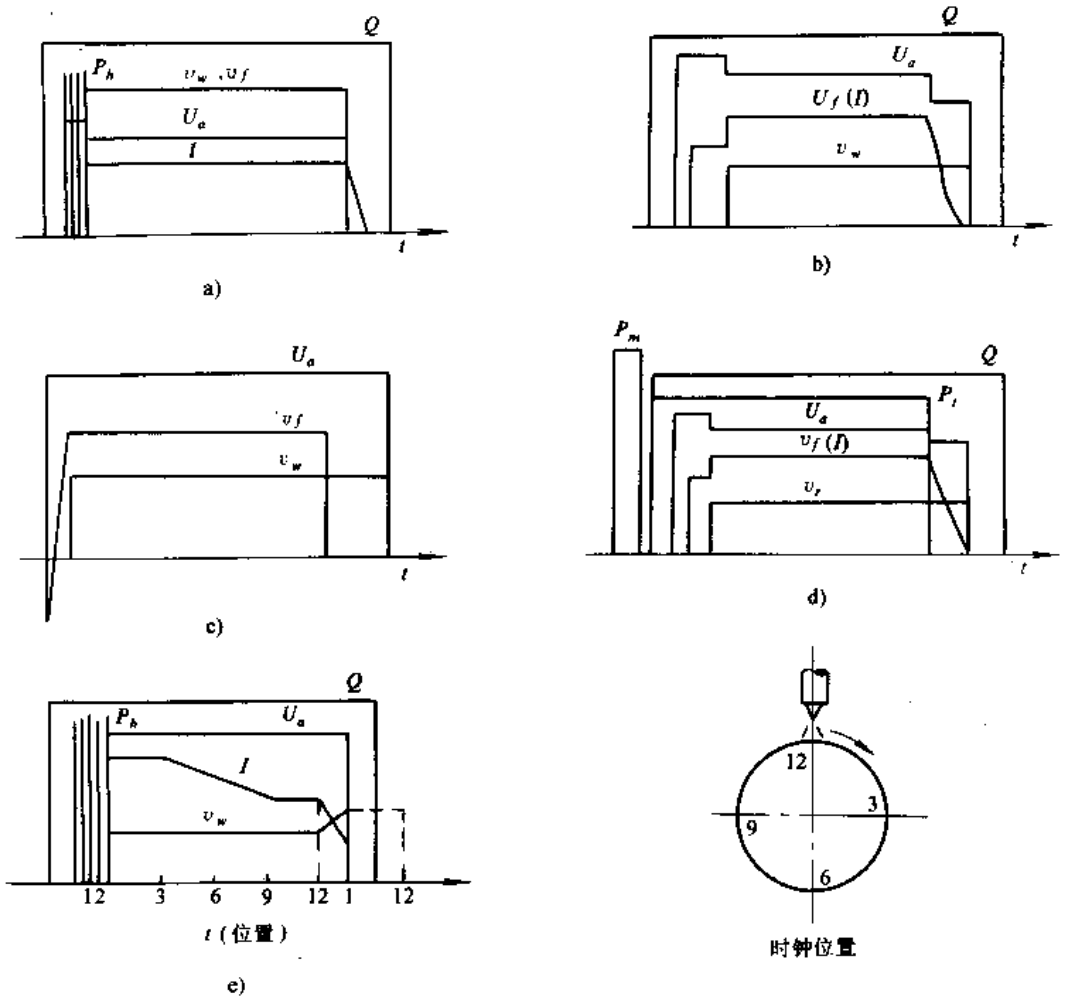


图 6·12-26　自动电弧焊程序循环图

a) TIG 焊　b) 熔化极气体保护焊　c) 埋弧焊　d) 含焊缝跟踪的 MAG 焊　e) 水平固定管的 TIG 自动焊

U_a—电弧（电源）电压　I—焊接电流　v_f—送丝速度　v_w—焊接速度　v_r—转胎转速

Q—保护气流量　P_t—跟踪焊缝　P_h—高频引弧　P_m—调整操作机

典型的焊接过程程序循环图示于图 6·12-26，其中 a、b 和 c 为一般 TIG、MIG（或 MAG、CO_2）焊和埋弧焊的自动电弧焊的程序循环图。当该自动焊系统附加焊缝跟踪装置时，其循环图如图 d 所示，启动焊缝跟踪与供气同时进行。焊接结束时焊缝跟踪与送丝同时停止，接着填充火口和最后延时停气。图 e 表示水平固定管 TIG 对接焊程序，除与图 a 的控制程序相同外，为保证焊缝一周的尺寸均匀，采用变换焊接电流和焊接速度等措施。

从图可见，焊接程序含有“定时”控制、“定位”控制和条件转换控制，这些控制往往还同时存在于一个系统中。

3·2　焊接程序指令系统

焊接程序指令系统是编制、贮存和产生焊接 程序指令的部分。在通用自动焊机中大都采用继电器控制或继电器与半导体延时器混合控制。有些设备采用无触点开关控制。在较复杂产品的装配与焊接中，以采用可编程控制器，甚至采用工业控制机最为合适。无论那种控制都是以继电器控制为基础，下面以继电器控制为例说明图6·12-26a循环图的实现方法，如图6·12-27 所示。启动时首先按下 AN，则继电器 J_1 动作，同时继电器 J_3 动作，开始预通气。经缓通型延时继电器 SJ_1 延时后接通高压引弧脉冲进行引弧。电弧引燃后，

超星公司制作 请尊重作者版权

经电弧继电器 J_2 控制，一方面切断高压脉冲引弧器，另一方面接通缓通型延时继电器 SJ_2，经延时后接通焊接电流和行走机构进行焊接。反之，焊接结束时释放 AN，J_1 断电则焊接小车停走，焊接电流衰减，衰减时间由电容 C_1 放电决定，衰减结束 SJ_3 释放，焊接电源断电。随后经电容 C_2 放电延时，为滞后停气时间，这样就完成了程序控制。

继电器控制简单、方便和价廉。但是触点接触不良而影响运行的可靠性。于是，许多设备采用无触点程序控制，利用晶体管开关电路，光电耦合器件和晶闸管等功率开关构成程序控制指令系统。提高了系统的寿命和可靠性。

可编程序控制器是一种新型的控制器件。它将逻辑运算、顺序操作、定时、计数等控制功能，用一串指令形式存放到存贮器中，然后根据所存贮的内容，经过数字或模拟输入、输出接口，对生产设备及生产过程进行控制的装置。可编程序控制器是由微处理器控制。但其软件功能与继电器类似，因此它可以方便地取代继电器系统。它是专为工业控制设计的，所以抗干扰能力强，输出触点功率大，可直接驱动电磁阀，微电机等焊接过程中常用的执行元件。可编程控制器可以有几十至几千个输入输出点，所以特别适用于大中型专用自动焊机装配与焊接系统的程序控制。

工业控制计算机是比可编程控制器更为完善的控制设备。在软件功能上与一般商用计算机完全兼容的通用计算机。但在硬件上为工业设备及生产过程控制专门设计，所以具有较强的抗干扰能力。工业控制计算机采用标准总线，常用的有 STD 总线和 IBM pc/AT 总线。它们都采用模块化结构，除配有键盘、显示器和打印机等标准外设计，还具有 A/D、D/A 等控制专用的 I/O 接口板，同时 I/O 接口板可以做成全隔离型。

工业控制计算机可用于大型、复杂的自动焊系统的程序控制及系统工作参数给定、检测和记录。

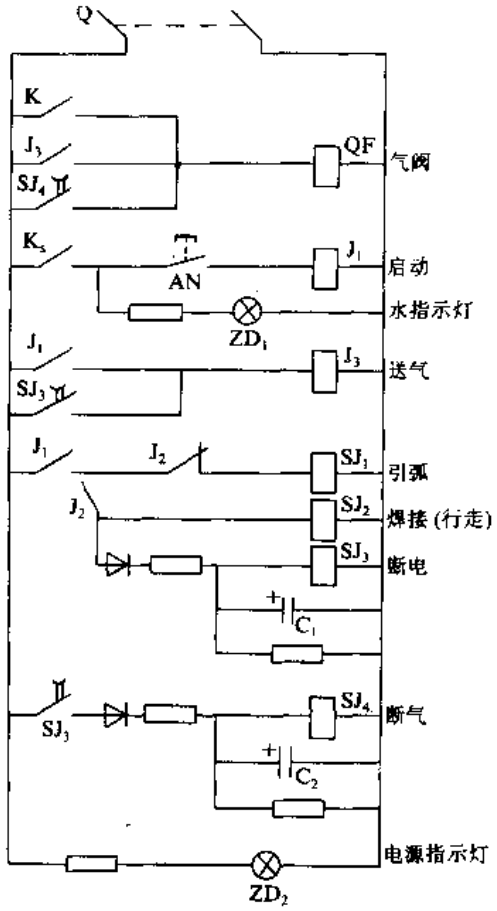


图 6-12-27　焊接程序继电器控制

第 13 章　焊接生产线与焊接机器人[58]~[67]

焊接结构生产过程中，纯焊接时间仅占焊接结构生产总时间的 25%～30%，其余均为焊前准备、装配、焊件运输、变位等辅助时间。为了提高生产效率、保证焊接质量及改善劳动条件，必须提高焊接生产全过程的机械化与自动化水平。

1　焊接生产线设计原则

现代焊接生产线应该是各种备料加工、装配、焊接、焊接质量无损检验等中心和焊件的上料、卸料、焊件传输的综合组合体；也可以是部分中心和焊件的上

超星公司制作请尊重作者版权

料，卸料和焊件传输的综合组合体。焊接生产线要根据产品结构特点、生产规模、车间面积、设备能力等拟定。其工艺流程和结构方案，选择其布置形式进行总体设计，然后进行专用机械设备和自动控制系统的设计。

1·1 焊接生产线设计特点

焊接生产线在很多情况下是多工序的综合生产线。焊接工艺及规范参数的选择要先进、合理、可靠，关键工艺要经过充分试验。

采用多极焊机可提高单个工位的生产率，是保证工位节拍平衡的有效途径，但需保证焊接质量稳定可靠。

1·2 焊接生产线组成

现代生产线上的焊接工位，通常由焊接中心即由传输装置、专用焊接设备和焊件变位装置等组成。

传输装置一般包括：上料、传送及卸料机构，焊件夹紧定位机构、转向机构、焊件分配机构等。焊件传输可采用间歇传送及连续传送两种形式。

焊接中心主要由焊接电源、专用焊机、焊机或机头变位机——焊接操作机、焊件传输装置、焊件变位机械、焊接辅助装置、焊缝自动跟踪和焊丝干伸长自动调节装置以及其综合电气控制系统等组成。

在同一条生产线上根据生产要求可采用通用或专用定型焊机，也可以专门设计非标准设备。

1·3 焊接生产线的控制

要考虑各台设备的工作情况，设备之间的联动，焊件装夹是否正确，操作安全以及生产线调整时的手工控制等问题。

整线控制的设备太多时，要考虑将控制分成几个系统，分段的界限因条件不同而异。每个控制系统最好构成一个独立的插件，这样单个系统的调试或故障检查比较容易。然后将几个系统综合连接起来。

复杂的控制系统最好采用电子线路（分离元件和集成电路），也可以利用程序控制器。

计算机控制能使生产线适应生产几种规格的同类产品以及在生产受到外界干扰时自动补偿，保证产品的质量。

2 焊接自动机与焊接中心

发展焊接结构的单元或工位的焊接自动机或焊接中心，应是焊接生产中今后发展和技术改造的方向。

2·1 专用梁柱焊接自动机

1. T形梁装焊自动机（图 6·13-1） 可以同时装焊双面连续的或间断的焊缝，翼板厚度 3～30mm，宽度 60～350mm，腹板厚度 3～25mm，宽度 60～500mm，梁的翼板与腹板可垂直或不垂直，可对称或不对称，焊缝可以是直线，也可以是曲率小的曲线。

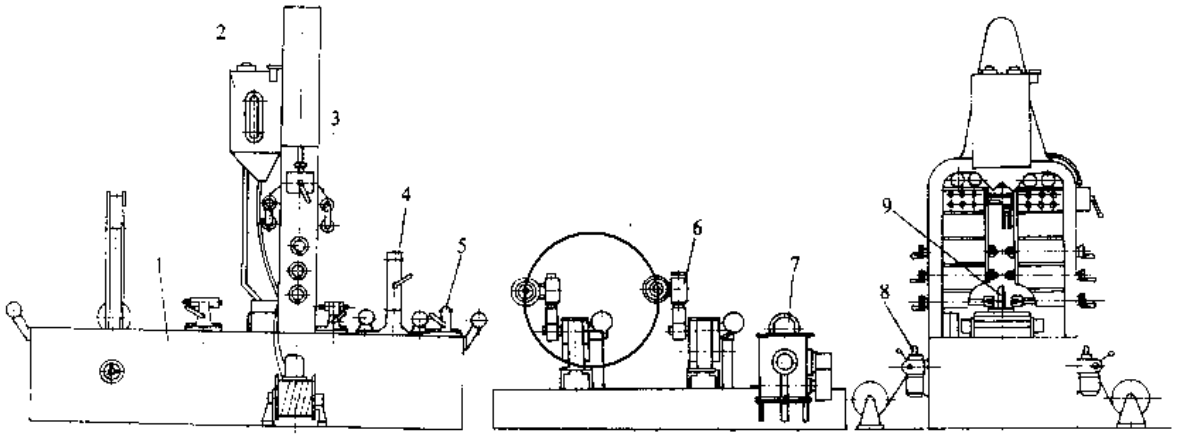


图 6·13-1 T形梁装焊自动机

1—传动箱 2—焊剂回收、输送装置 3—立板压紧对中装置 4—立板扶正装置 5—面板对中装置 6—电磁翻板装置 7—送进装置 8—送丝机头 9—焊件

超星公司制作请尊重作者版权

2. 4 级 CO_2 焊接自动机（图 6·13-2）　为便于同时焊接 4 条焊缝，把箱形梁上的焊缝设计成在角焊及横焊位置。油缸或其他机械装置推动工件移动，固定在龙门架上的四个 CO_2 焊头同时焊接四条焊缝。

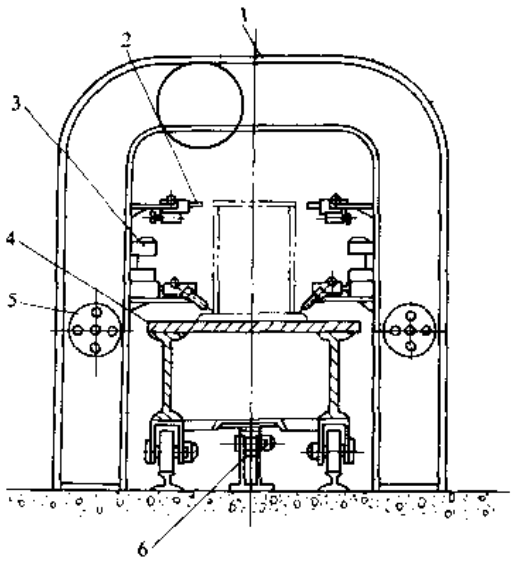


图 6·13-2　4 极 CO_2 焊接自动机

1—龙门架　2—焊接机头及调整机构　3—送丝机构　4—活动工作台　5—焊丝盘　6—工作台驱动装置

2·2　12 极锅炉膜式壁焊接中心

采用光管加扁钢焊制膜式壁管屏是近年来电站锅炉大型膜式壁部件制造中的发展方向。过去广泛采用埋弧焊和 CO_2 焊工艺。由于这些方法的自身特点和不能实现倾焊的限制，正反两面不能同时施焊，故需翻转工件和校正焊接变形，使生产周期变长。为满足大型锅炉机组的特殊要求，已采用一种 12 极或 4 极同时上下两面施焊的膜式管屏自动焊接装置，并使用 MAG 焊接方法成功地制造出高质量、高精度的锅炉膜式壁产品。

12 极锅炉膜式焊接中心（图 6·13-3）由一台 12 极焊机、12 极焊机前辊道、碳化钨导向块和 12 极焊机后辊道、混合供气系统和电气控制系统组成。该机采用上下各 6 个焊头可以同时焊接 4 根扁钢与 5 根钢管（包括 2 根工艺管）的双面角焊缝，一次成形，工件不需翻身。12 极焊机主要用于膜式壁管屏组装焊接。

2·3　汽车车轮合成焊接中心

车轮合成环缝的焊接技术途径有两种：第一，采用压配合成时，同时自动点固焊外圈，而内圈采用 CO_2 气体保护焊施焊见图 6·13-4a、b，第二，采用压配合成后，手工点固焊，然后用 CO_2 气体保护焊分别施焊内外圈环缝如图 6·13-4c。

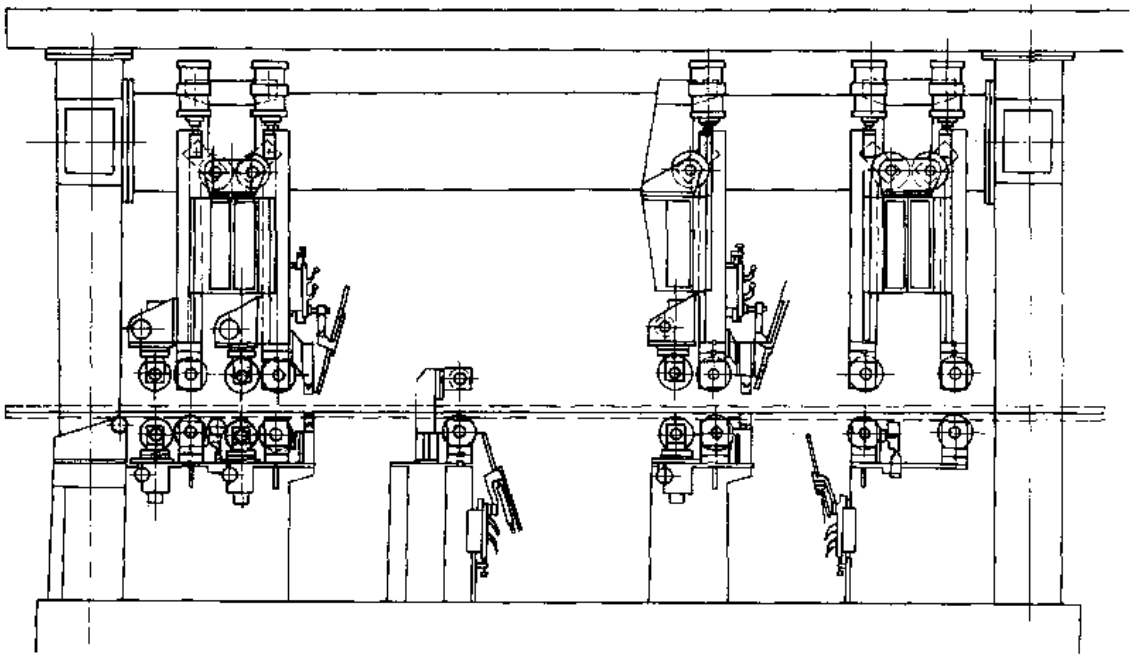
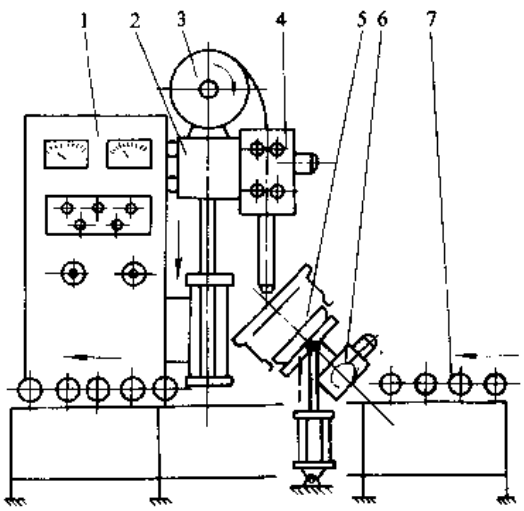
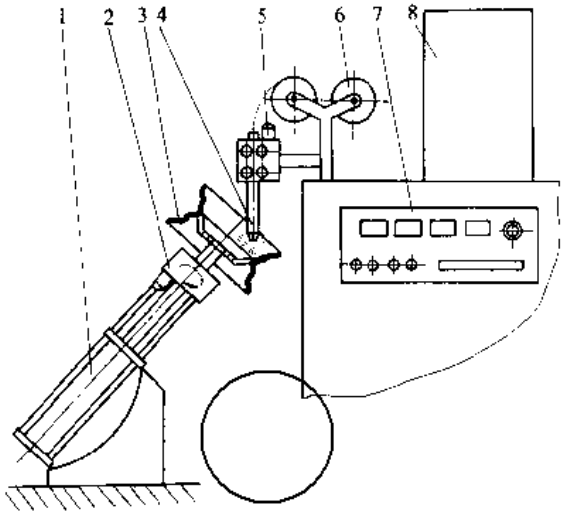


图 6·13-3　12 极锅炉膜式壁焊接中心

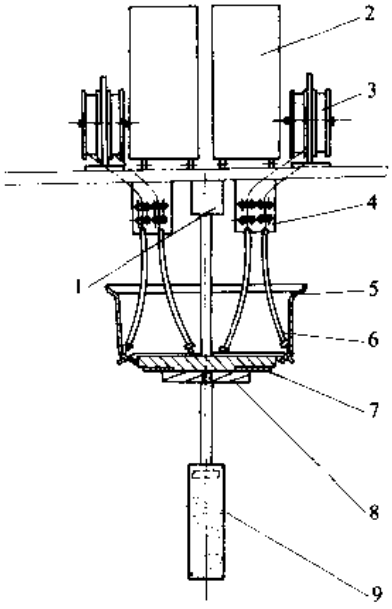
超星公司制作 请尊重作者版权



a)



b)



c)

图 6·13-4 汽车车轮合成环缝焊接中心

a) CA141 车轮合成内环缝焊接中心

1—操纵盘 2—机头调整机构 3—焊丝盘 4—送丝机构 5—车轮合成 6—车轮合成变位机 7—车轮合成轨道

b) 轻型汽车车轮合成内环缝焊接中心

1—升降气缸 2—变位机 3—车轮合成 4—焊枪 5—送丝机及机头调整机构 6—焊丝盘 7—操纵盘 8—焊接电源

c) EQ140 车轮合成环缝焊接中心

1—焊件回转台减速机 2—焊接电源 3—焊丝盘 4—送丝机 5—车轮合成 6—刚性送丝管 7—定位夹盘 8—升降夹盘 9—升降气缸

3 焊接生产线[68]

3·1 中小直径筒（管）节焊接生产线

该生产线是施焊筒(管)节内、外纵缝专用生产线。筒（管）节一般为低碳钢和低合金结构钢。筒（管）节直径范围为 400～1200（1400）mm，筒（管）壁厚 δ=6～14mm，筒节长 L<3m。图 6·13-5所示焊接生产线是由待焊筒（管）节存料架、筒节自动送进装置、筒（管）节内纵缝焊接中心、筒（管）节移位卸料架、外纵缝待焊存料架、筒（管）节外纵缝焊接中心、卸料架和电气控制系统组成。该焊接生产线内、外纵缝在两个工位施焊，筒（管）节移位不再使用吊车，大大地减少移位辅助时间，明显提高了焊接生产效率。

3·2 中小直径筒（管）体焊接生产线

筒（管）体由 筒（管）节内、外纵缝和筒体内、外环缝拼焊而成。该生产线适用筒（管）体。直径：400～1200mm；壁厚 δ=6～14mm；长度 L_{max}≤13m。图 6·13-6所示焊接生产线包括备料、装配、内外纵环缝的

超星公司制作 请尊重作者版权

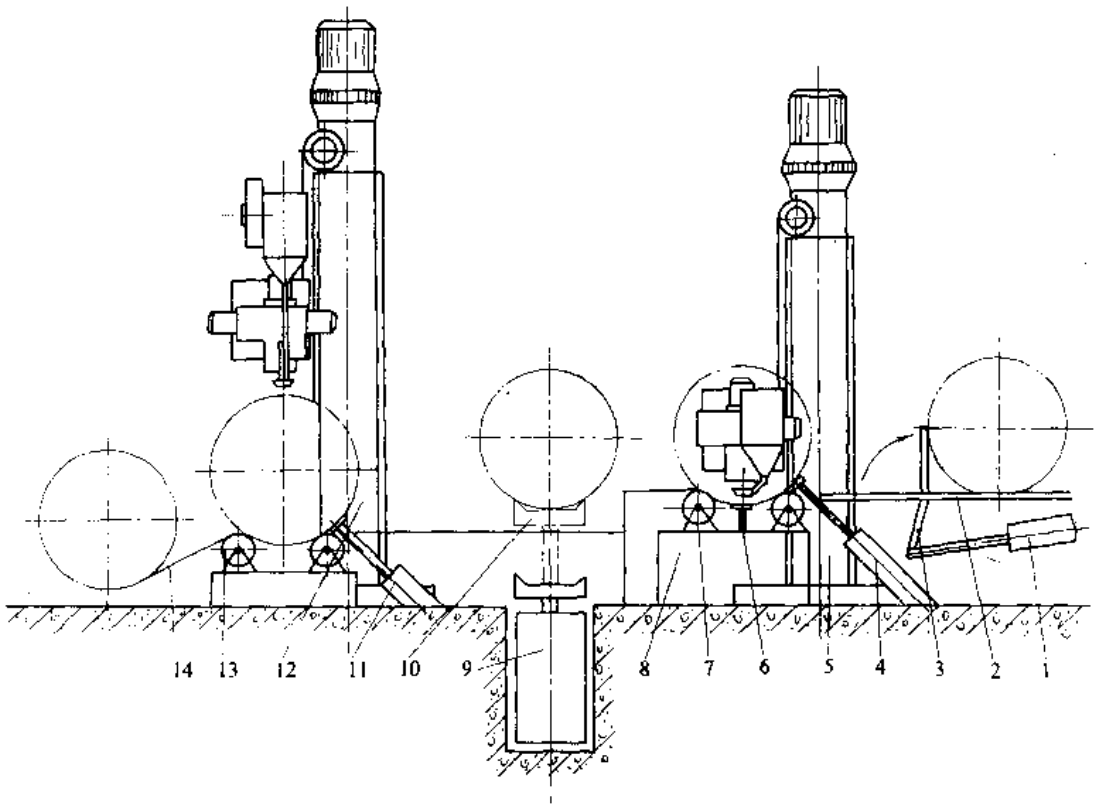


图 6·13-5 中小直径筒（管）节焊接生产线

1—挡料气缸 2—存料架 3—挡料架 4—内纵缝推料气缸 5—筒（管）节内纵缝焊接操作机 6—内纵缝焊剂垫及气缸 7—内纵缝焊接滚轮架 8—筒（管）件 9—卸料气缸 10—卸料架 11—外纵缝接料架 12—筒（管）节外纵缝焊接操作机 13—外纵缝滚轮架 14—滚料架

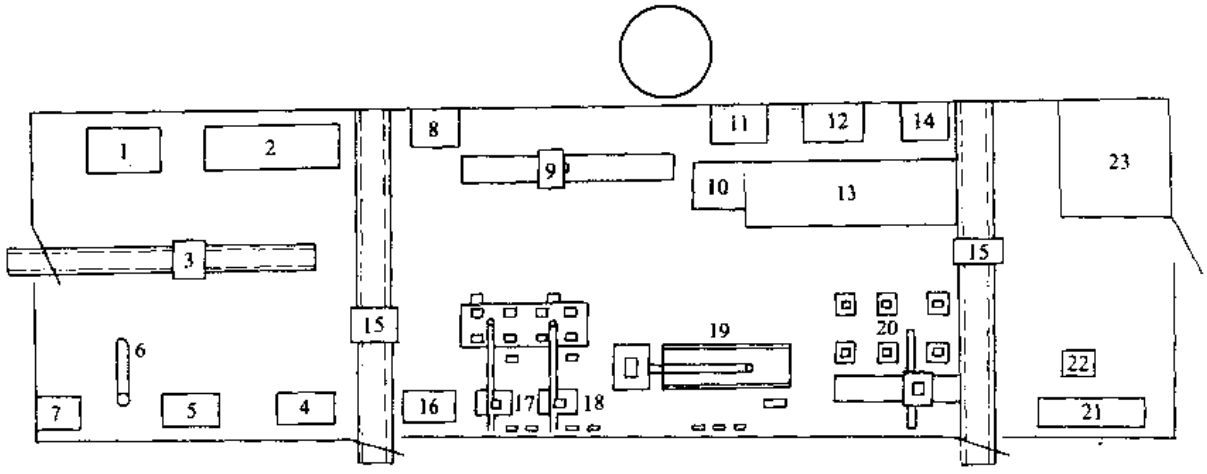


图 6·13-6 中小直径筒（管）体焊接生产线

1—钢板矫平机 2—半自动切割下料区 3—进出料车 4、5—剪板机 6—钻床 7—砂轮机 8—数控切割机控制间 9—数控切割机 10、16—卷板机 11—焊接电源 12—CO_2 焊接电源 13—装配工位 14—马鞍形切割机 15—进出料车 17—内纵缝焊接中心 18—外纵缝焊接中心 19—筒体内环缝焊接中心 20—筒体外环缝焊接中心 21、22—筒（管）体加强筋装焊中心 23—筒（管）体工业电视无损检验中心

越星公司制作 请尊重作者版权

焊接、清理和焊缝质量无损检验等工序。主要由筒（管）节内、外纵缝焊接中心、数控切割系统、筒（管）体内、外环缝焊接中心和工业电视无损检验中心组成。实现了配套流水生产。

大直径容器筒体焊接生产线与此类同。

3·3 轻型越野汽车车身总成装焊生产线

车身由前围、前地板、后地板、侧围、骨架、梁、柱等部件装焊而成，如图6·13-7所示。组成车身的各部件均为厚度1.0+1.2mm或1.2+1.2mm板材搭接结构，焊缝数量多，形状复杂，是处于空间位置的间断焊缝。因此，在生产线上主要采用多点焊机，局部焊缝采用CO_2气体保护焊。各工位工序如表6·13-1。

表6·13-1 车身装焊生产线各工位工序

工位	工序	焊接方法
Ⅰ	装前围、前地板、后地板	专用多点焊、CO_2焊
Ⅱ	前围—前地板，前地板—后地板焊接	CO_2焊
Ⅲ	中柱焊接、门洞包角点固	CO_2焊
Ⅳ	中柱、边梁包角点焊	专用多点焊
Ⅴ	侧围点固	CO_2焊、焊钳点焊
Ⅵ	边梁、中柱、后柱侧围点焊	专用多点焊
Ⅶ	侧围—后挡泥板点焊	专用焊钳
Ⅷ	车身转入调整线	

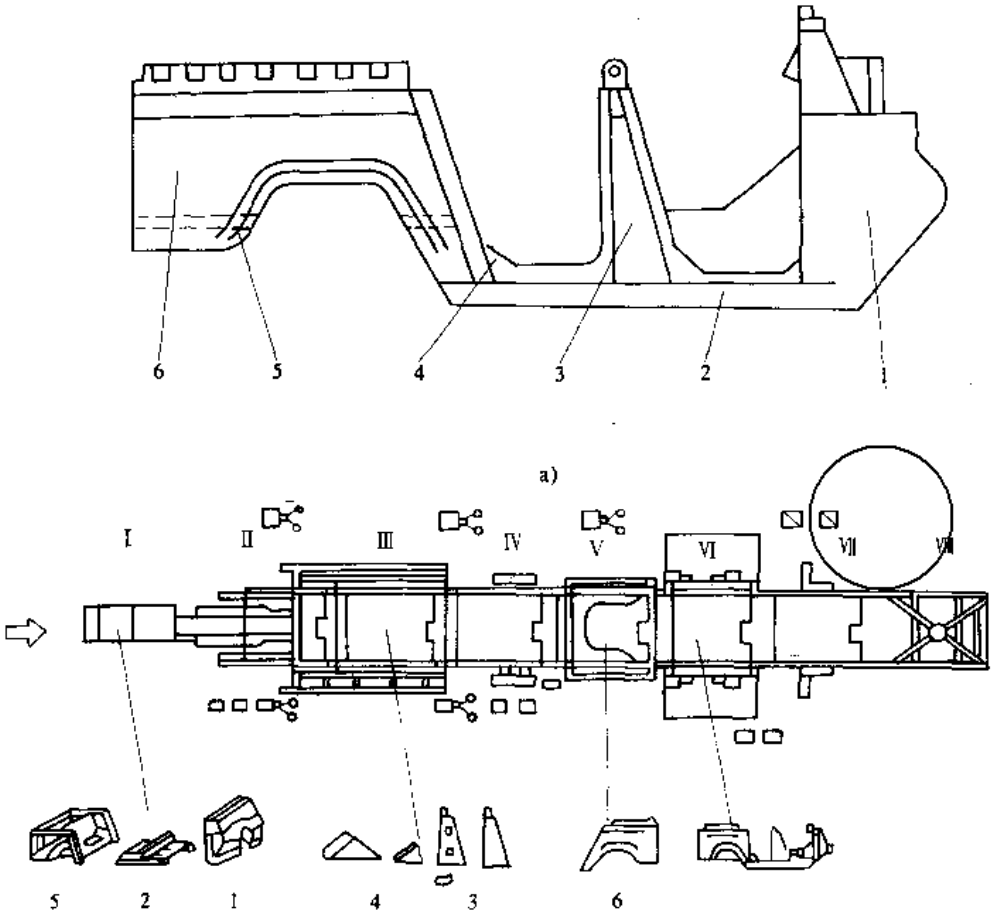


图6·13-7 汽车车身总成装焊生产线

a）轻型越野汽车车身总成 b）车身总成装焊生产线

1—前围 2—前地板 3—中柱 4—包角 5—后地板 6—侧围

3·4 车轮合成自动装焊生产线

车轮合成由轮辐与轮毂焊接而成，在车轮自动装焊生产线上采用等厚轮辐和4头CO_2焊，如图6·13-8所示，各工位工序如表6·13-2所示。

焊件的传送采用无随行夹具的往复步运动。由滑

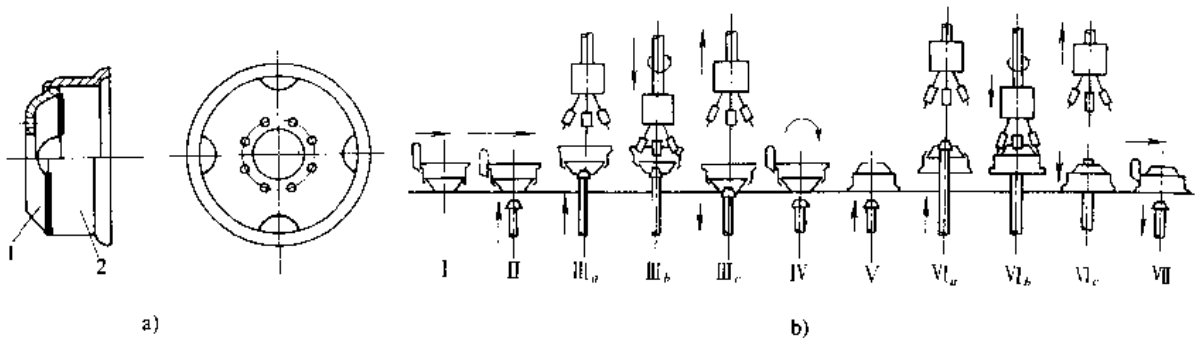


图 6·13-8　车轮合成自动装焊生产线

a）车轮合成　b）装焊生产线

1—轮辐　2—轮毂

表 6·13-2　车轮合成装焊生产线各工位工序

工位	工　　序
I	上料、计数
II	提升定位
III	a. 焊件上升
	b. 焊接机头下降及焊接
	c. 回程复位
IV	翻转
V	提升定位
VI	a. 焊件上升
	b. 焊接机头下降及焊接
	c. 回程复位
VII	卸料

架带动车轮前进，并停止在相应工位上。当焊件需要定位及焊接时，由固定在底架上的升降台将车轮托起，使之离开滑架。焊接时滑架空程复位，准备送下一个车轮。翻转机械手在焊完内缝后将车轮夹紧翻转 180°，再进行外缝的定位和焊接。

焊接采用 4 头 CO_2 专用焊机，每个机头旋转 90°。为防止引弧时间不一致，除保证引弧可靠外，在起弧后有一段引弧停留时间。焊接末端控制系统将电流、电压同时衰减，并在小规范电弧下反向焊接，完成填弧坑。焊接机头与焊缝的对准采用焊缝跟踪装置。

3·5　汽车轴合成自动装焊生产线

汽车轴合成由轴管等 4 个零件焊接而成，采用多工位自动装焊生产线生产，如图 6·13-9所示，各工位工序如表 6·13-3所示。

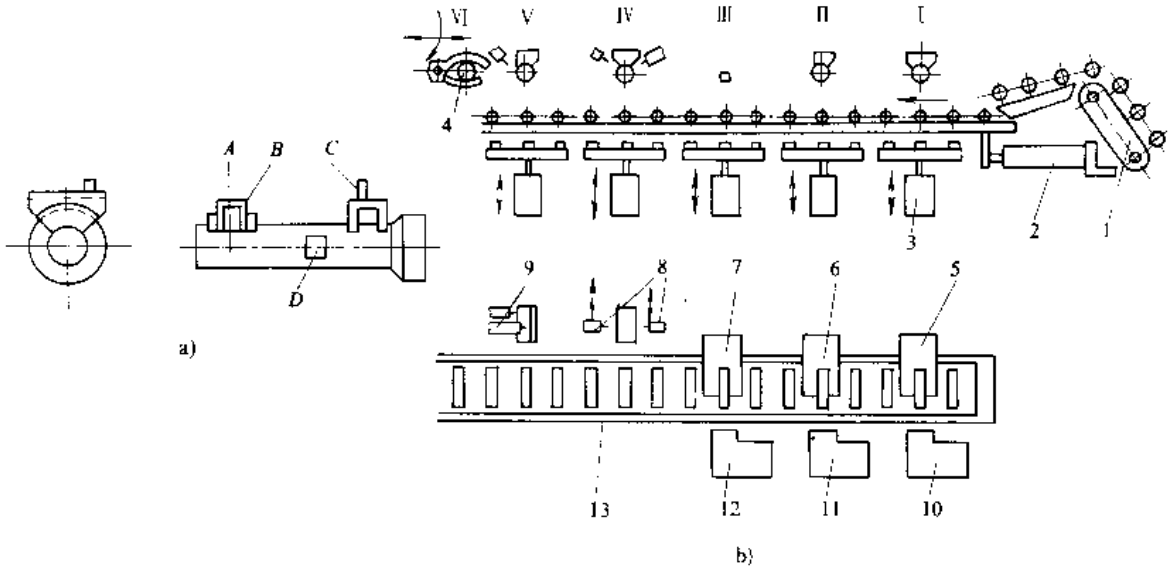


图 6·13-9　汽车轴合成自动装焊生产线

a）汽车轴合成　b）装焊生产线

1—件 A 上料装置　2—步进油缸　3—工作台升降气缸　4—卸料机械手　5、6、7—电阻总焊机　8、9—双头 CO_2 焊机　10—件 B 上料装置　11—件 C 上料装置　12—件 D 上料装置　13—步进传输装置

表 6·13-3 汽车轴装焊生产线各工位工序

工位	工 序	焊接方法
Ⅰ	件A、B上料及装配	电阻点固焊
Ⅰ	装件C	电阻点固焊
Ⅱ	装件D，并焊接	电阻点固焊
Ⅳ	件B与件A焊接	双头自动 CO_2 焊
Ⅴ	件C与件A焊接	双头自动 CO_2 焊
Ⅵ	卸料	

3·6 自行车车架钎焊生产线

自行车车架由管子和管接头等12个零件进行盐浴钎焊生产，如图6·13-10所示。

整线采用环形排列，共十个工位：Ⅰ——上焊件，Ⅰ——上钎料，Ⅱ——浸钎剂，Ⅳ——盐浴钎焊，Ⅴ——除盐，Ⅵ——酸洗，Ⅶ——中和，Ⅷ——再酸洗，Ⅸ——最终中和，Ⅹ——卸料。

焊件在各个工位(除上焊件、上焊料及卸料三个工位外)需要升降，使焊件分别浸入各个浴池。为此，采用往复式升降导轨与固定导轨相结合的形式，如图6·13-11所示。传送运动的动作程序由凸轮机构、行程开关等程序控制系统进行自动控制。

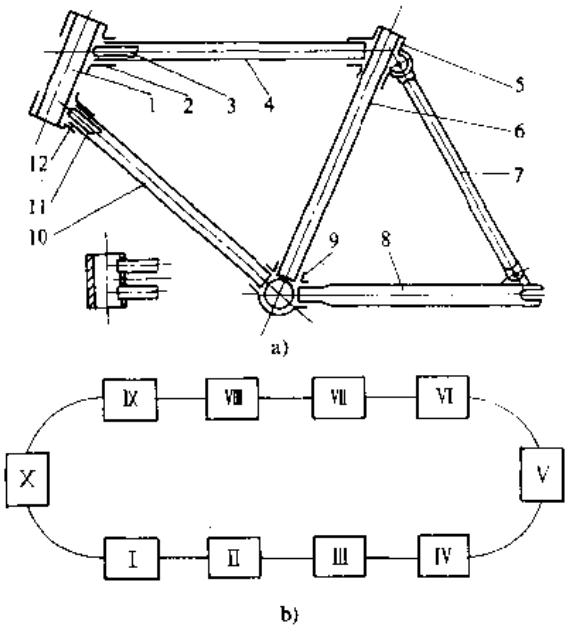


图 6·13-10 自行车车架钎焊生产线

a) 车架 b) 钎焊生产线

1—前管 2—上接头 3—上衬管 4—上管 5—后接头 6—立管 7—立叉 8—平叉 9—中接头 10—下管 11—下衬管 12—下接头

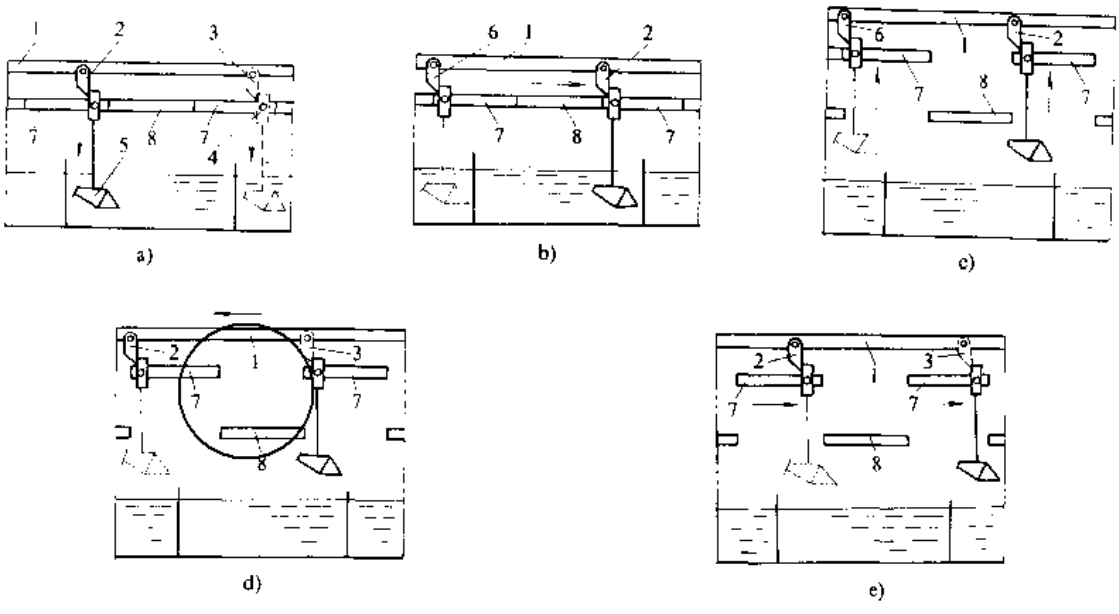


图 6·13-11 钎焊生产线传送方式

a) 浸入 b) 洗浴 c) 上升 d) 往复杆回程 e) 传送

1—往复杆(由气缸带动作往复运动，并可与升降导轨7一起升降) 2—挡块B(用以推动焊件架作前进运动，但回程时焊件架不动) 3—挡块C 4—焊件架(它可以在升降导轨与固定导轨上移动) 5—焊件 6—挡块A 7—升降导轨(用以使焊件跨进浴池) 8—固定导轨(用以使焊件在浴池中前进，其长度往往决定洗浴时间)

版权所有 翻印必究

超星公司制作 请勿重作者版权

3·7　直缝管焊接生产线

直缝管的直径一般为 6～500mm，直缝管生产线一般采用直线排列，如图 6·13-12。整线工艺流程一般为：Ⅰ——开卷，Ⅱ——校直，Ⅲ——剪边，Ⅳ——成形，Ⅴ——定位，Ⅵ——焊接，Ⅶ——去毛刺，Ⅷ——定径，Ⅸ——切断。

直缝管生产采用的焊接方法有电阻焊，高频焊和高频感应焊，也有采用气体保护焊的。不同焊接方法的直缝管生产除了焊接部分不同外，其他工艺均是类似的。

直缝管生产线一般自动化程度很高。它要求尽量采用高的焊速，焊接规范的选择应尽量使焊接工序与其他加工工序同步。

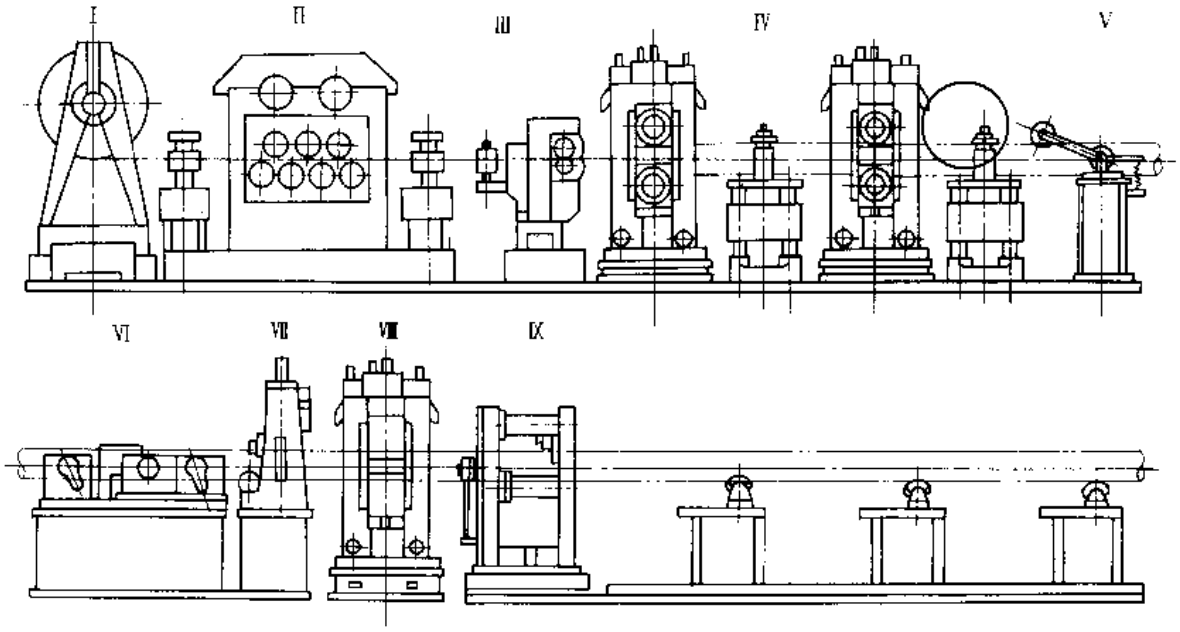


图 6·13-12　直缝管焊接生产线

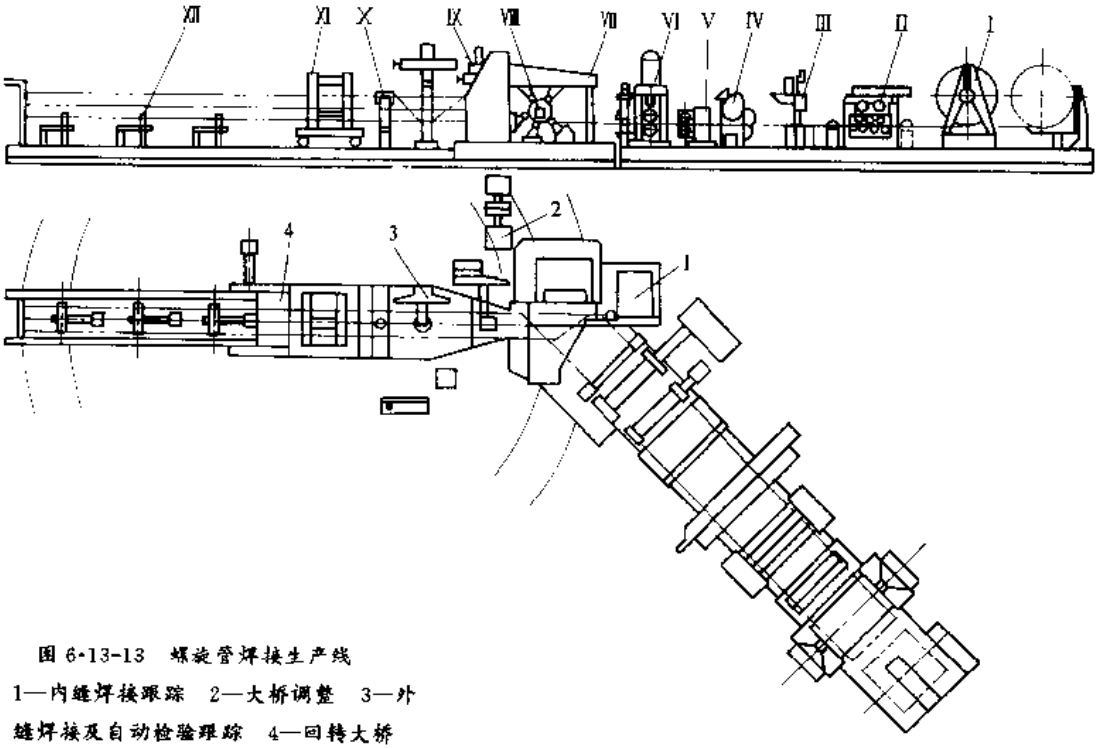


图 6·13-13　螺旋管焊接生产线

1—内缝焊接跟踪　2—大桥调整　3—外缝焊接及自动检验跟踪　4—回转大桥

版权所有 北京机械工业自动化研究所 未经许可 不得翻印

3·8　螺旋管焊接生产线

螺旋管的直径一般在350～1420mm范围内，其生产线均采用折线排列，如图6·13-13。整线工艺流程为：Ⅰ——开卷，Ⅱ——校平，Ⅲ——剪切端部，Ⅳ——对接焊，Ⅴ——切边，Ⅵ——传送和清锈，Ⅶ——成形，Ⅷ——内缝焊接，Ⅸ——外缝焊接，Ⅹ——超声波自动检验，Ⅺ——飞车切割，Ⅻ——产品传送卸料。

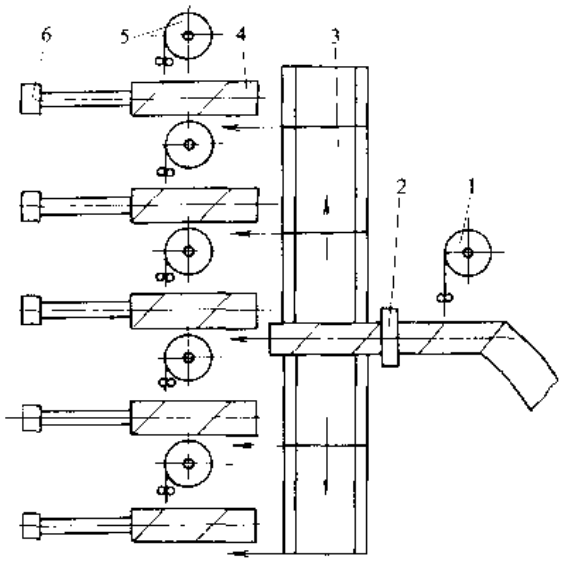


图6·13-14　高速预焊及终焊

1—预焊　2—切割　3—钢管分配　4—分工位焊接台（终焊用）　5—外缝焊接　6—内缝焊接

成形机、内外缝焊接装置、超声波检验装置、飞车切割装置及产品卸料装置全装设在回转大桥上，桥的角度根据钢带宽度和管子直径调整。为了保证焊缝间隙，大桥装有自动微调装置。为了保证质量，内外焊缝焊接机头及超声波检验上均装有自动跟踪焊缝装置。

焊接方法有埋弧焊，CO_2焊或高频焊等。

提高生产率的途径：一是采用多头多丝焊（一般用埋弧焊），二是在成形后进行高速预焊（一般用CO_2焊接外焊缝），按给定长度（12～24m）切断，然后分别送到12个专用焊接台架上同时进行内外缝终焊（一般用埋弧焊），如图6·13-14。

3·9　钢筋网装焊生产线

钢筋网装焊生产线可在大量生产钢筋混凝土网或筛网中应用，用多头点焊焊接并进行自动装配，远比手工生产质量好，生产率高，劳动强度小。整线结构如图6·13-15。工艺流程：Ⅰ——纵向钢筋校直，Ⅱ——装横向钢筋，Ⅲ——焊接，Ⅳ——切断。

根据生产的情况装焊机有自动的和半自动的。由于钢筋网规格不同，装焊机可做成可调式的。

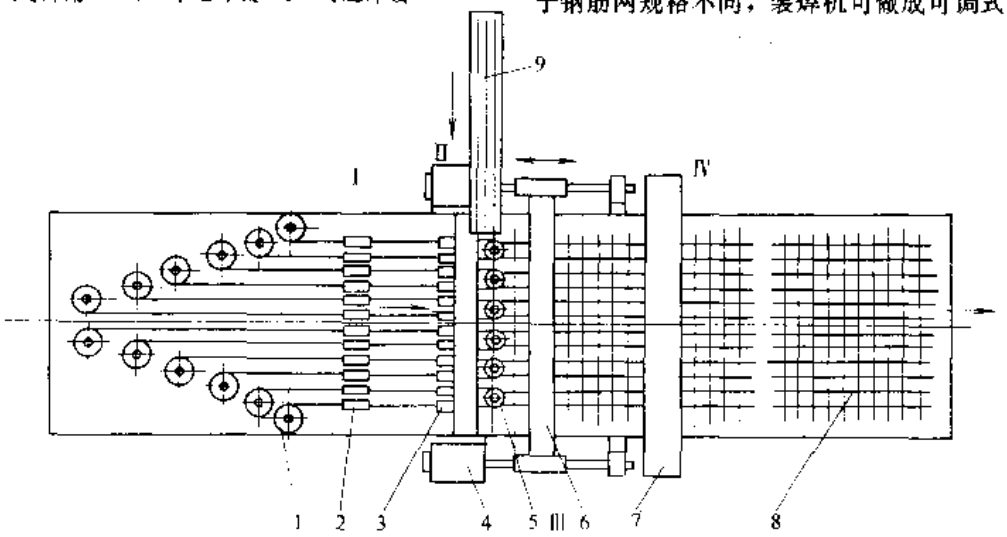


图6·13-15　钢筋网装焊生产线

1—钢筋卷　2—校直机构　3—导向机构　4—传动机构　5—总焊机　6—钢筋网拖板　7—剪切机　8—产品　9—横向钢筋输送机构

4　焊接机器人的应用

焊接机器人是焊接自动化的革命性进步，它突破了焊接刚性自动化传动方式，开拓了一种焊接柔性自动化新方式。刚性的焊接自动机和焊接生产线等设备一般都是专用的，只适用于中大批量产品的自动化生产，因而在中小批量产品焊接生产中，手工焊仍然是主要焊接方式。焊接机器人使小批量产品的自动化生产成为可能。由于机器人的示教再现功能，焊接机器人完成一项焊接任务，只需给它做一次示教，它即可精确地

超星公司制作 请尊重作者版权

再现示教的每一步操作，如要机器人去做另一项工作，勿需改变任何硬件，只要对它再做一次示教即可。因此，在一条焊接机器人生产线上，可同时生产若干种焊件。

焊接机器人的主要优点如下：(1)稳定和提高焊接质量，保证其均一性；(2)提高生产率，一天可 24h 连续生产；(3)改善工人劳动条件，机器人可在有害环境下长期工作；(4)降低对工人操作技术的要求；(5)缩短产品改型换代的准备周期，减少相应的设备投资；(6)可实现小批量产品焊接自动化；(7)为焊接柔性生产线提供技术基础。

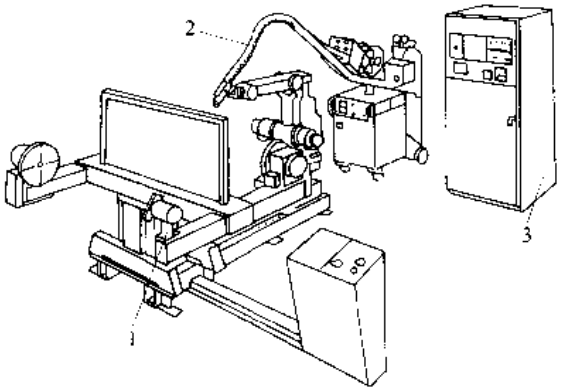


图 6·13-16　弧焊机器人自动焊接系统

1—夹持装置　2—焊接装置　3—机器人和控制系统

4·1　弧焊机器人的应用

弧焊机器人可以被应用在所有的电弧焊、切割技术范围及类似的工艺方法中。最常应用的范围是结构

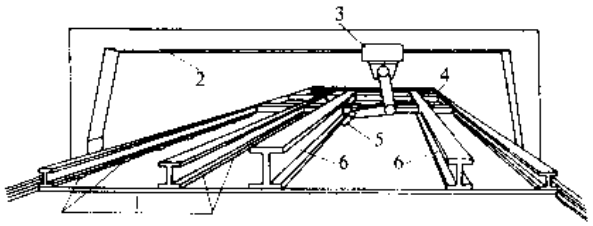


图 6·13-17　框架组件的弧焊机器人自动焊接系统

1—点固焊缝　2—移动门形架　3—机器人台车

4—肋板　5—焊枪　6—工字钢

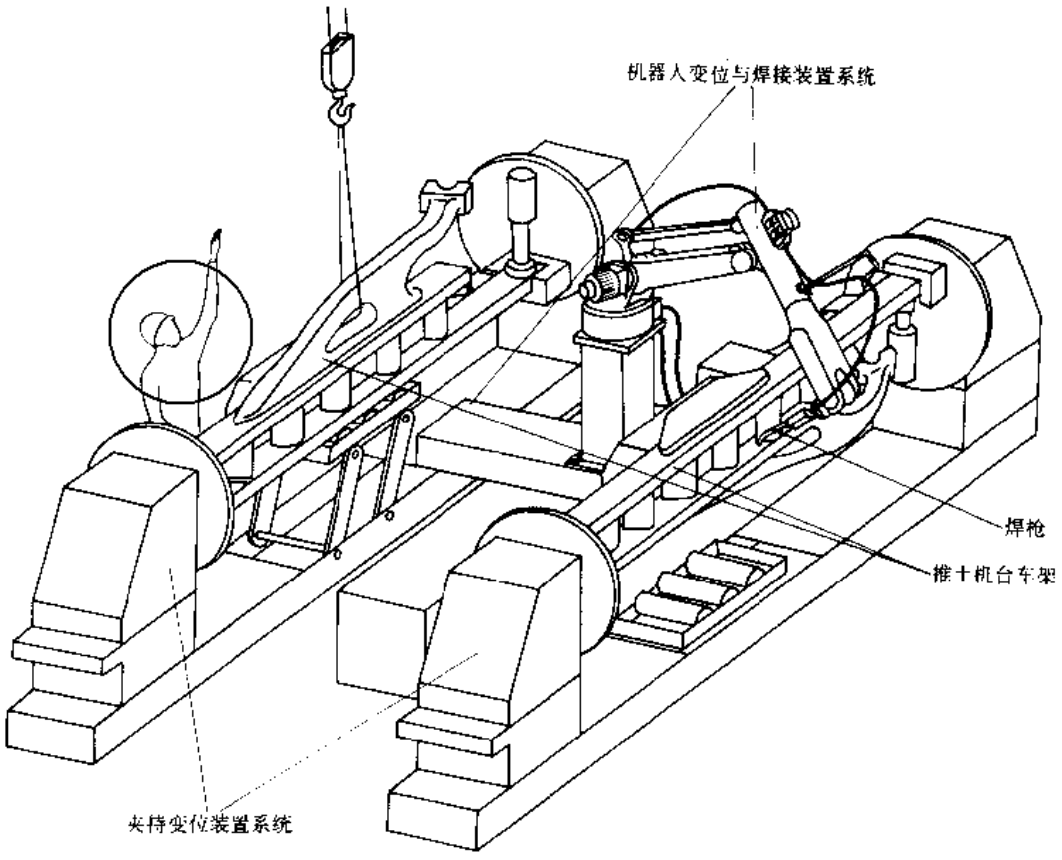


图 6·13-18　推土机台车架机器人焊接工作站

工件：长度——4.1m　　质量——1t

工作站：面积——(8×6)m²　　质量——20t

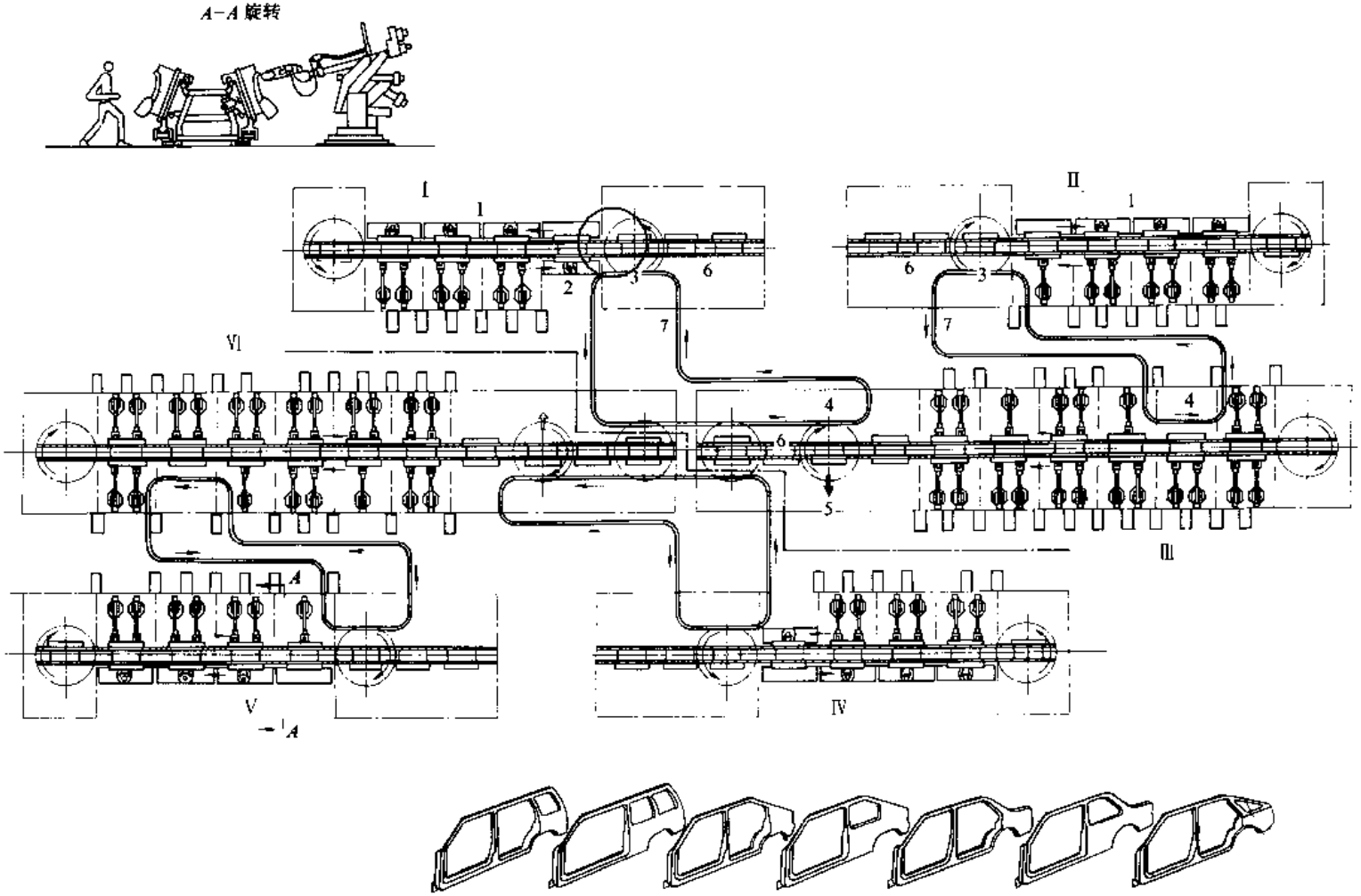


图 6-13-19 轿车侧围点焊机器人焊接生产线

Ⅰ—右侧框外面板生产线 Ⅱ—右侧框里面板生产线 Ⅲ—右侧框装焊生产线 Ⅳ—左侧框外面板装焊生产线
Ⅴ—左侧框里面板生产线 Ⅵ—左侧框装焊生产线 1—手工安装 2—手工 CO_2 焊接 3—自动拆卸
4—自动安装 5—拆卸 6—夹紧机构转换 7—高架电动传输装置

超星公司制作请尊重作者版权

钢和铬镍钢的熔化极气体保护焊（CO_2 气体保护焊、MAG 焊），铝及特殊合金熔化极惰性气体保护焊（MIG 焊），铬镍钢和铝的填丝和不填丝的钨极惰性气体保护焊（TIG 焊）以及埋弧焊。除气割、等离子切割及等离子喷涂外，还实现了在激光切割上的应用。

图 6·13-16 为弧焊机器人自动焊接系统，包括焊接机器人机械手、控制系统、焊接装置和焊件夹持变位装置。系统内有两组夹持变位装置可轮番供机器人在其上焊接。

图 6·13-17 为框架组件的弧焊机器人自动焊接系统，是由机器人的机械手、焊接装置、框架、移动门形架、机器人台车和控制系统组成。

图 6·13-18 是弧焊机器人焊接推土机台车架的应用实例。根据台车架的结构尺寸，设计了专用夹持变位装置系统及机器人变位装置系统。台车架采用粗丝（ϕ1.6mm）熔化极混合气体保护焊，焊接生产效率比采用手工电弧焊提高约 30%。焊接质量（焊缝外观成形等）也有了很大提高。

4·2　点焊机器人的应用

点焊机器人广泛用于各种汽车制造业。图 6·13-19 为汽车侧框（墙）点焊机器人柔性焊接生产线，一辆汽车的左右侧框分别由三条点焊机器人生产线装焊完成。Ⅰ线右侧为框外面板生产线；Ⅰ线为右侧框里面板生产线；Ⅱ线为右侧框的装焊生产线。Ⅵ、Ⅴ、Ⅳ线则分别为左侧框外面板、里面板和左侧框装焊生产线。这个系统可以用于处理任意批量的两种不同车型。左右侧框分别加工，首先加工内、外面板，然后将其装焊在一起组成左、右侧框。零件传输采用高架输送。每个侧框焊点在 320 到 500 个之间，这由不同车型和其变型所决定。六条生产线的焊接操作由 64 个安装在地面的机器人分担。在这个柔性生产线上的工作周期为 36s，其中应用时间为 75s。这样，这六条生产线每小时可生产 75 组侧框。

汽车车身各分总成均是在与上类似的柔性装焊生产线上完成装焊的。车箱各分总成则是在弧焊机器人和点焊机器人共存的装焊生产线上完成全部装焊工作。

第 14 章　水下焊接与切割[69]~[72]

随着开发海洋事业的兴起，水下焊接与切割技术也得到迅速发展，现已成为海洋工程建造、船舶维修、救捞工程及海军建设中不可缺少的工艺手段。也有将水下焊接与切割技术用于核电站维修及解体中的。

1　水下焊接

陆地上应用的一些焊接方法大多在水下试验过，有的已用于生产。从潜水焊工和被焊工件所处的环境将以电弧为热源的水下焊接分成三类：湿式水下焊接、干式水下焊接、局部干式水下焊接。另外还有一些特种水下焊接方法，如水下爆炸焊在生产中也得到了应用。

1·1　湿式水下焊接

不采取特殊排水措施，焊件的接缝在水湿状态下进行焊接的方法称为湿式水下焊接。典型的湿式水下焊接是水下药皮焊条手工电弧焊。电弧在水中燃烧示意图见图 6·14-1。焊接电弧是在由电弧热作用产生的水蒸气和药皮组分分解放出的气泡中，即包围电弧和熔池的气相区（电弧空腔）中燃烧。电弧燃烧过程与陆上焊接电弧燃烧过程基本相同，只是电弧周围气相区的成分和压力不同而已。

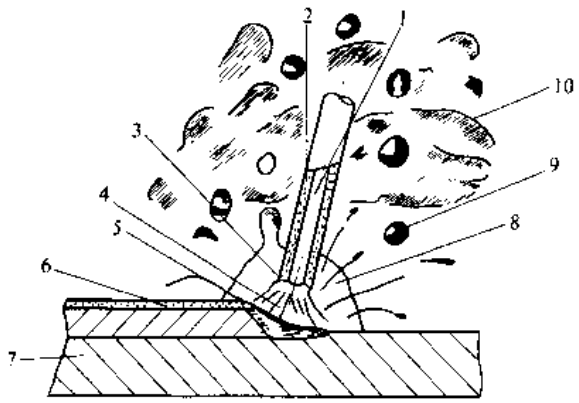


图 6·14-1　电弧在水中燃烧示意图

1—焊芯　2—药皮　3—药皮套筒　4—电弧　5—熔池　6—熔渣　7—焊件　8—电弧空腔　9—气泡　10—烟雾

湿式水下焊接使用的专用焊条有不锈钢焊条和低碳钢焊条。我国仅有低碳钢水下焊条。其焊缝金属化学成分及焊接接头力学性能列于表 6·14-1中。常用的焊

版权所有 北京金星公司制作 请勿重作者版权

表 6·14-1　水下焊条焊缝金属成分及接头力学性能

焊条型号	焊缝金属化学成分的质量分数（%）					焊接接头力学性能	
	C	Mn	Si	S	P	抗拉强度 (MPa)	冷弯角 (°)
J 202	≤0.12	0.3～0.6	≤0.25	≤0.035	≤0.04	420	≤90 ($d=3a$)
J SH-1	<0.10	0.35～0.65	<0.20	<0.05	<0.05	420	—
J 0-1	0.030～0.067	～0.38	0.11～0.13	<0.02	<0.03	400 (断于母材)	130 ($d=2a$)

条规格有 ϕ3.2mm 和 ϕ4.0mm 两种，使用的焊接电流一般比陆地上要大 10%～15%。

湿式水下焊接使用的电源是陆上直流手工焊电源，焊接时多采用反接法，即焊条接正极。

湿式水下焊接具有方便、灵活、适应性强，施工成本低等优点。实用水深最大已达 180m。由于存在水中可见度低，施焊时潜水焊工操作技术要求高；焊缝金属含氢量高易造成气孔及氢脆；焊缝冷却速度快、接头中易出现高硬度组织致使接头塑性和韧性较低等一些缺点，这种水下焊接方法大多只用于临时性修补或不重要结构的焊接。

采用自保护药芯焊丝湿式焊接很有成效，应用水深已达 80m，焊接接头质量也优于碳钢水下焊条手工电弧焊，是较有发展前途的湿式水下焊接方法。

1·2　干式水下焊接

采用大型密封式或反压式工作舱将焊件接缝罩住，并将水排除，潜水焊工在较干燥气相环境下进行焊接的方法称为干式水下焊接。工作舱内压力与所处水深压力相当时，称为高压干式焊接；工作室中压力与陆上大气压力相当时，称为常压干式焊接。

干式水下焊接时，可采用手工电弧焊，TIG 焊和 MIG 焊等焊接方法。为确保焊根质量一般采用 TIG 焊封底，手工电弧焊或 MIG 焊填充盖面。干式水下焊接的接头质量较好，可达到陆地上焊接水平。但这种焊接方法适应性窄、灵活性差，辅助时间长，费用高。在高压水下焊接时也曾发生过工作室内气体爆炸的事故，必须加强安全保障措施。

1·3　局部干式水下焊接

潜水焊工在水中操作，仅采取措施将焊件接缝处局部区域的水排开而进行焊接的方法称为局部干式水下焊接。局部干式水下焊接的接头质量比湿式水下焊接好，而焊接设备比干式水下焊接设备简便、使用灵活，施工成本也低，它综合了湿式水下焊接和干式水下焊接的优点。

局部干式水下焊接按排水方式可分为两类，气罩式和可移动气室式，如图 6·14-2所示。水下局部排水 CO_2 半自动焊接法，简称 LD—CO_2 焊接法，属于可移动气室式水下焊接。LD—CO_2 焊用 CO_2 气作保护气体和兼作排开气室中水的气体。这种水下焊接法可焊板

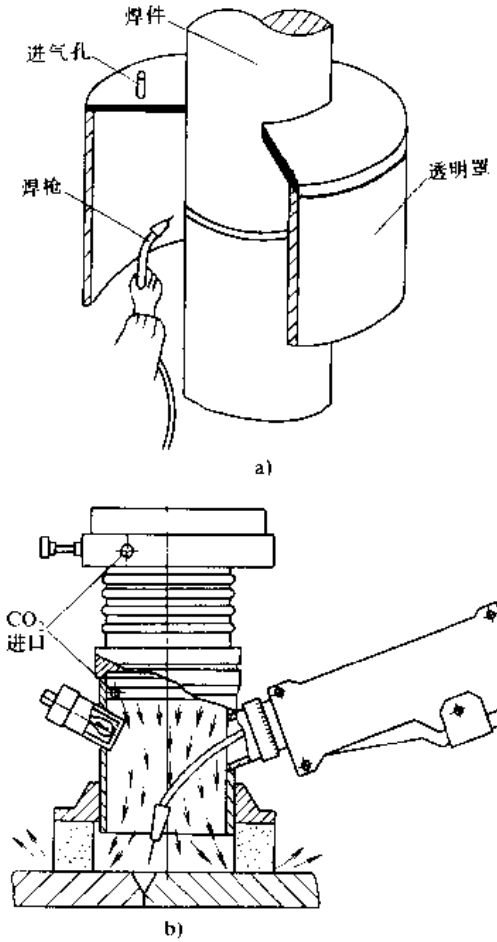


图 6·14-2　局部干式水下焊接示意图

a）气罩式水下焊接

b）可移动气室式水下焊接

熔星公司制作 请尊重作者版权

厚 3～20mm 的对接、搭接和夹角不小于 90°的角接接头。适用于海上平台、水下管线、船舶等重要海洋金属结构建造或维修时的水下焊接施工。

1·4　水下焊接质量检验

潜水作业采用湿法或局部干法焊接时，潜水员的身体稳定性较差，行动不方便，给水下焊接带来很多困难，加上水的影响，较陆上焊接更容易产生缺陷。干法焊接时因工作舱内湿度较高，或气压较大，亦易产生缺陷。常见的水下焊接缺陷有未熔合、未焊透、气孔、裂纹、咬边、夹渣、成形不良和烧穿等。检查水下焊接质量目前有如下几种方法：

1. 表面宏观检查　潜水员在水中直接或借助低倍放大镜观察焊缝表面，检查表面缺陷。也可借助水下摄象机和水下照相机将焊缝表面状态摄录下来，由陆上检验人员检查。

2. 水下磁粉探伤　采用水下专用磁粉探伤仪进行表面磁粉探伤。主要是检查那些肉眼难以发现的表面裂纹。

3. 水下超声波探伤　将陆上用的超声波探伤仪加密封防水措施即可用于水下探伤。操作程序和评定方法与陆上超声波探伤基本一样。主要用来检查焊缝内部缺陷。

目视宏观检查一般是随焊随检查，发现缺陷随时处理。磁粉探伤和超声波探伤要在焊后 48h 以后再进行，以防延迟裂纹被漏检。

2　水下切割

水下切割同水下焊接一样，凡陆上使用的金属切割方法在水下大多尝试过。

2·1　水下电-氧切割

水下电-氧切割是利用空芯电极（简称割条）与工件间产生的电弧将金属熔化并被从割条芯孔中喷出的氧气氧化燃烧、吹掉，形成割缝。如图 6·14-3。

水下割条有三种：钢管割条、陶瓷管割条和石墨棒割条。常用的是钢管割条，牌号为特 304，外径有 8.0，7.0，6.0mm 三种规格。内孔分别是 3.0，2.0，1.25mm。长度为 400mm，外涂钛铁矿型药皮，重量系数为 20%。常用切割工艺参数如表 6·14-2。实际应用时可适当大些，以确保电弧稳定性。

水下电-氧切割用电源为手工电弧焊用的直流电源。只是使用的极性与焊接时相反，割条要接负极，即正接法。

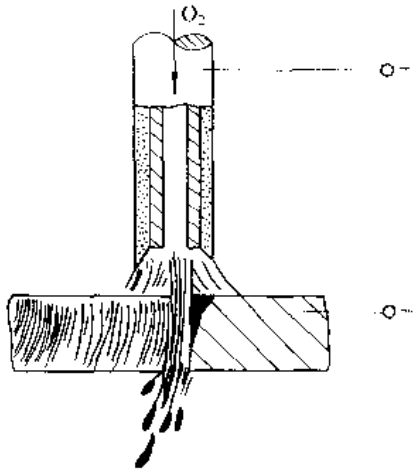


图 6·14-3　水下电-氧切割示意图

表 6·14-2　电-氧切割常用切割参数

钢板厚度(mm)	切割电流(A)	氧气压力(MPa)
5～10	280～320	0.3～0.4
10～20	320～340	0.4～0.5
20～50	340～360	0.5～0.6
50～80	360～375	0.6～0.7
100 以上	400～500	0.7～0.8

2·2　熔化极水喷射切割

该方法是利用高压水将被电弧熔化的金属吹掉形成割缝的水下切割法。切割效率较高，切割 12mm 厚的碳钢板速度可达 20m/h，在 56m 水深试用过。最大试验切割厚度为 40mm，其原理如图 6·14-4。

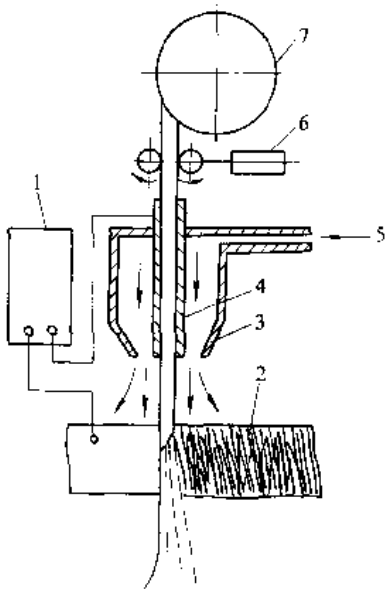


图 6·14-4　熔化极水喷射切割原理示意图

1—发电机　2—工件　3—喷嘴　4—导电嘴
5—高压水　6—送丝机　7—割丝盘

超星公司制作 请尊重作者版权

该切割法使用的割丝为普通镀锌铁丝，直径一般为 2.0～2.5mm。该切割法也可切割不锈钢和非铁金属。

这种水下切割法配套设备比较笨重，在水下移动不方便，操作也较困难。

2·3 水下等离子弧切割

水下等离子弧切割首先用于拆除核反应堆容器中有放射性部件。用水下等离子弧切割拆除有放射性部件有很多优点：切割速度快，易实现自动化，可遥控，同时易于将切割过程中产生的细小金属质点及氧化物收集起来减少对环境的污染。

水下等离子弧切割用氩气、氮气或空气作工作气体。尤其是用空气作工作气体，成本低、切割速度快，但对电极烧损大。

水下等离子弧切割用电源与陆上等离子弧切割电源基本相同，只是空载电压稍高一些。其割炬也可用陆上等离子弧割炬，但必须采取密封绝缘措施，以防触电。目前国外已开发了专用水下等离子弧切割割炬，效果很好。

水下等离子弧切割不仅可切割普通钢材，也可切割不锈钢及其他非铁金属。切割速度快，约为电—氧切割的 3～8 倍。目前试验水深已达 370m。这是任何其他种类的水下切割法所未达到的深度。

这种水下切割方法也可用于陆上工厂下料。将被切钢板放到 100mm 左右深水池中进行水下切割，切割产生的氧化物和金属粉尘被水带走或沉入水池底，防止其对车间空气的污染。也减少了噪音、弧光辐射及臭氧与 N_2O（笑气）的污染，更突出的优点是工件变形很小。

2·4 药芯焊丝水下切割

以药芯焊丝作电极，利用电弧把被切工件的金属熔化，并利用药芯焊丝熔化时产生的气体和电弧吹力将熔化金属吹掉而形成割缝。切割效率与熔化极水喷射切割差不多，但设备较之简便得多，操作也简单些。原苏联在这方面发展较快，几乎代替了水下电—氧切割。但这种水下切割方法比水下等离子切割速度还是慢些，切割口质量也不如水下等离子切割。

3 水下焊接与切割安全技术

水下焊接与切割是一项技术性较高、环境复杂恶劣，危险性较大的潜水作业，稍有疏忽大意就可能造成事故，甚至危及生命。作业时，必须严格遵守有关潜水作业规则和条例，了解水下焊接与切割安全知识，确保施工安全。

3·1 水下安全用电

水下作业时，对人体起危害作用的是通过人体的电流。但只有当电流达到某一限度时才发生危险。把通过人体而不致危及生命的电流值称为通过人体的安全电流。安全电流因人、电流种类的不同，其值也不同。表 6·14-3为电流对人体作用情况。从表中可以看出，在水下直流电比交流电安全。参考潜水作业标准和水下作业经验，水下焊接与切割时的安全电流为：工频交流电不超过 15mA，直流不超过 60mA。直接接触安全电压值为：工频交流不超过 12V，直流不超过 36V。

表 6·14-3 电流对人体的作用

触电时人体反应情况	直流（mA）		交流（mA）			
	男人	女人	60（Hz）		10000（Hz）	
			男人	女人	男人	女人
有感觉，稍有点发麻	5.2	3.5	1.1	0.7	12	8
没有抖动，无痛苦，能脱开	9	6	1.8	1.2	17	11
抖动而痛苦，仍能脱开	62	41	9	6	55	37
抖动而痛苦，达到能脱开的极限	74	50	16	10.5	75	50
严重抖动，肌肉强直，呼吸困难	90	60	23	15	94	63
脉搏有可能减弱	500	500	100	100	500	500
脉搏减弱，有生命危险	1300	1300	1000	1000	1100	1100

3·2 劳动保护及安全操作

为确保水下焊接与切割作业安全，要注意下列劳动保护和安全操作措施：

(1) 戴好防护目镜，防止弧光灼伤眼睛。

(2) 站立在焊点（割点）上方或上水头作业，并戴好防护用具（手套等），防止熔化金属或飞溅物灼伤皮肤或潜水服装。

(3)潜水气泵要放到作业区上风头，确保呼吸气体卫生。

(4)作业前对现场进行周密调查，作出完善的施工方案，避免盲目作业。

超星公司制作 请尊重作者版权

(5) 接牢地线，并使地线和焊炬（割炬）处于潜水员的同一侧。而潜水员头盔不能处在电弧与接地线中间，防止焊接(切割)回路通过潜水服装而造成电腐蚀。

(6)在带电结构上作业时，应首先切断结构上的电路。

(7)尽量避免悬空作业。根据结构特点设置操作台或采取措施稳定住身体。

(8) 注意对潜水器材和焊接（切割）设备的保养。用前要认真检查，用后要清洗保养。

(9) 及时放出积聚在结构中的气体，防止爆炸。

第 15 章　焊接质量检验

1　焊接缺陷及检验方法

1·1　焊接缺陷

熔焊的焊接缺陷详见《金属熔化焊焊缝缺陷分类及说明》(GB6417—86)。

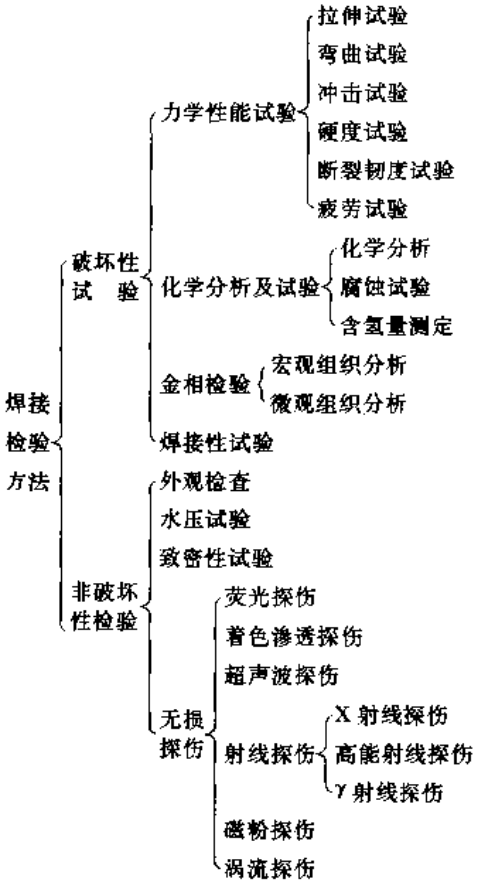
常见的焊接缺陷如表 6·15-1。

表 6·15-1　熔焊的焊接缺陷及其特征

缺陷种类	特　　征
焊缝外形尺寸及形状的缺陷	焊缝外形尺寸(如焊缝长度、宽度、余高、焊脚等）不符合要求，焊缝成形不良
焊接接头几何尺寸的缺陷	焊接接头出现错边、角变形
咬　　边	在焊趾区形成凹下的沟槽
焊　　瘤	焊缝边缘或焊缝根部出现未与母材熔合的金属堆积物
弧　　坑	焊缝末端收弧处熔池未填满，凝固后形成凹坑
气　　孔	存在于焊缝金属内部或表面的孔穴
夹　　渣	残留在焊缝金属中的宏观非金属夹杂物
未焊透	焊接接头中存在母材与母材之间未完全焊透的部分
未熔合	焊道与母材之间或焊道与焊道之间未完全熔化结合的部分
裂　　纹	属平面型缺陷，诱发焊接接头破裂，失效，存在于焊缝或热影响区的内部或表面

1·2　焊接检验方法

焊接质量的检验方法通常按破坏性试验与非破坏性检验进行划分，具体分类如下。



2　破坏性试验

2·1　焊缝金属及焊接接头力学性能试验

2·1·1　拉伸试验

拉伸试验用于评定焊缝或焊接接头的强度和塑性性能。抗拉强度和屈服强度的差值（$\sigma_b-\sigma_s$）能定性说明焊缝或焊接接头的塑性储备量。伸长率（δ%）和断面收缩率（φ%）的比较可以看出塑性变形的不均匀程度，能定性说明焊缝金属的偏析与组织不均匀性，以及焊接接头各区域的性能差别。

版权所有 侵权必究

焊缝金属的拉伸试验有关规定应按《焊缝及熔敷金属拉伸试验方法》(GB2652—89)标准进行。焊接接头的拉伸试验有关规定应按《焊接接头拉伸试验方法》(GB2651—89)标准进行。

2·1·2 弯曲试验

弯曲试验用于评定焊接接头塑性并可反映出焊接接头各个区域的塑性差别，暴露焊接缺陷，考核熔合区的接合质量。弯曲试验可分为横弯、纵弯、正弯、背弯及侧弯。侧弯试验能评定焊缝层与母材之间的结合强度、双金属焊接接头过渡层及异种钢接头的脆性、多层焊的层间缺陷等。焊接接头的弯曲试验有关规定应按《焊接接头弯曲及压偏试验方法》(GB2653—89)标准进行。

2·1·3 冲击试验

冲击试验用于评定焊缝金属和焊接接头的韧性和缺口敏感性。试样为V形缺口，缺口应开在焊接接头最薄弱区，如熔合区、过热区、焊缝根部等。缺口表面的光洁程度、加工方法对冲击值均有影响。缺口加工应采用成型刀具，以获得真实的冲击值。V形缺口冲击试验应在专门的试验机上进行。焊接接头冲击试验有关规定应按《焊接接头冲击试验方法》(GB2650—89)标准进行。

2·1·4 硬度试验

硬度试验用于评定焊接接头的硬化倾向，并可间接考核焊接接头的脆化程度。硬度试验可以测定焊接接头的洛氏、布氏和维氏硬度，对比焊接接头各个区域性能上的差别，找出区域性偏析和近缝区的淬硬倾向。

2·1·5 断裂韧度COD试验

此试验用于评定焊接接头的COD（裂纹张开位移）断裂韧度，通常将预制疲劳裂纹分别开在焊缝、熔合线和热影响区，评定各区的断裂韧度。试验按《焊缝金属COD试验方法》(GB4291—86)和《裂纹张开位移，(COD)试验方法》(GB2358—80)进行。

2·1·6 疲劳试验

疲劳试验用于评定焊缝金属和焊接接头的疲劳强度及焊接接头疲劳裂纹扩展速率(da/dN)。测定在对称交变载荷下的疲劳强度(σ_{-1})按《焊缝金属和焊接接头的疲劳试验法》(GB2656—81)进行；测定接头的da/dN按《焊接接头疲劳裂纹扩展速率试验方法》(GB9447—88)进行。

2·2 金相检验

2·2·1 宏观组织分析

能直接用目测或借助低倍放大镜进行的检验，其内容如表6·15-2。

表6·15-2 宏观组织检验方法

方法	检验内容	检验对象
宏观组织分析	焊缝一次结晶组织的方向、大小、熔池形状，尺寸；焊接接头各区域的界限尺寸；各种焊接缺陷	焊接接头，一般切取横断面进行分析
断口分析	断口组成，断裂性质(塑性或脆性)及断裂类型(晶间、穿晶或复合)，组织与缺陷及其对断裂的影响	冲击、拉伸、疲劳等试件的断口和折断试验法的断口；破裂、失效的断口等

2·2·2 微观组织分析

利用显微镜能检查焊接接头各区域的微观组织、偏析和分布。通过微观组织分析，研究母材、焊接材料与焊接工艺存在的问题及解决途径。

有些情况下，也可用复膜检查方法，对制造过程中或运行中的焊接接头表面制作复膜，然后在显微镜下作宏观或微观组织分析和缺陷分析。此法亦可属非破坏性的金相检验法。

2·3 化学分析与试验

2·3·1 化学成分分析

从焊缝金属中钻取试样，除应注意试样不得氧化和沾染油污之外，还应注意取样部位在焊缝中所处的层次。不同层次的焊缝金属受母材的稀释作用不同。一般以多层焊或多层堆焊的第三层以上的成分作为熔敷金属的成分。

2·3·2 扩散氢的测定

熔敷金属中扩散氢的测定，有45℃甘油法、水银法及色谱法三种。过去多用甘油法(GB3695—83)，但该法测定精度较差，正逐步被色谱法所代替。水银法因

超星公司制作请尊重作者版权

污染问题而极少应用。

2·3·3　腐蚀试验

焊缝金属和焊接接头的腐蚀破坏有以下几种形式：总体腐蚀、晶间腐蚀、刀状腐蚀、点腐蚀、应力腐蚀、海水腐蚀、气体腐蚀和腐蚀疲劳等。不锈钢及耐酸钢等钢种的晶间腐蚀试验有关规定应按《不锈钢硫酸—硫酸铜腐蚀试验方法》(GB4334.5－84) 标准进行。

3　非破坏性检验

3·1　外观检验

以目测观察为主，并可以借助低倍放大镜观察。此法用于发现焊接接头的外部缺陷。焊接接头外部缺陷的存在，通常是产生内部缺陷的标志。

3·2　水压试验

用于评定锅炉、压力容器、管道等焊接构件的整体强度性能、变形量大小以及有无渗漏现象。

水压试验时应注意：(1)焊接构件内的空气必须排尽；(2)焊接构件上和水泵上应同时装有校验合格的压力表；(3) 试验环境温度不得低于 5℃；(4) 试验压力应按规定逐级上升；(5) 试验场地应有防护设施。

水压试验应按《蒸汽锅炉安全技术监察规程》和《压力容器安全技术监查规程》进行。

3·3　致密性检验

3·3·1　气密性试验

检验小容积的压力容器，容器置于水槽中充气，焊缝金属致密性不良时，水中呈现气泡。检验大容积的压力容器，容器充气后，在焊缝处涂肥皂水检验渗漏。

3·3·2　氨气试验

对检验的压力容器充以氨气，在焊缝上贴一条比焊缝略宽的浸过硝酸汞溶液的试纸，若焊缝区有泄漏，试纸的相应部位上将呈现黑色斑纹。

3·3·3　煤油试验

用于检验不承受压力的焊缝。在焊缝及热影响区涂刷石灰水溶液，在另一面涂刷煤油，如有穿透性缺陷时，则煤油会渗透过缝隙使涂有白色底基的粉面上呈现黑色斑痕。

3·4　无损探伤

3·4·1　着色渗透探伤

用于检查焊缝表面、焊缝清根后的表面和热影响区表面的开口型缺陷，根据着色渗透液在显像剂上的分布，确定缺陷位置、走向与尺寸。探伤灵敏度利用标准试片确定。有关探伤规定应按《渗透探伤方法》(ZBJ04005—87) 标准进行。

3·4·2　磁粉探伤

用于检查铁磁性材质的焊接接头表面与近表面缺陷，尤以检查表面和次表面裂纹灵敏度最高。根据磁粉的分布，确定缺陷的位置、走向与尺寸。探伤灵敏度利用标准试片确定。有关探伤规定可参考《钢制压力容器磁粉探伤》(JB3965—85) 标准进行。

3·4·3　超声波探伤

超声波探伤用于检查焊缝内部缺陷（裂纹、气孔、夹渣、未焊透及未熔合），对面积型缺陷很灵敏，根据荧光屏上缺陷脉冲信号，确定缺陷的位置、走向与尺寸。探伤灵敏度利用标准试块确定。有关焊缝的探伤应按《钢焊缝手工超声波探伤方法和探伤结果的分级》(GB11345—89) 标准规定进行。

3·4·4　射线探伤

焊缝射线探伤包括 X 射线探伤、γ 射线探伤和高能射线探伤。射线探伤用于检查焊缝内部缺陷（裂纹、气孔、夹渣、未焊透及未熔合），对体积性缺陷很灵敏。根据射线照相底片显示缺陷的影像，确定缺陷的性质、位置、数量与尺寸。探伤灵敏度利用象质计确定。高能射线探伤其探伤象质计灵敏度最高，X 射线探伤次之，γ 射线探伤象质计灵敏度较低。

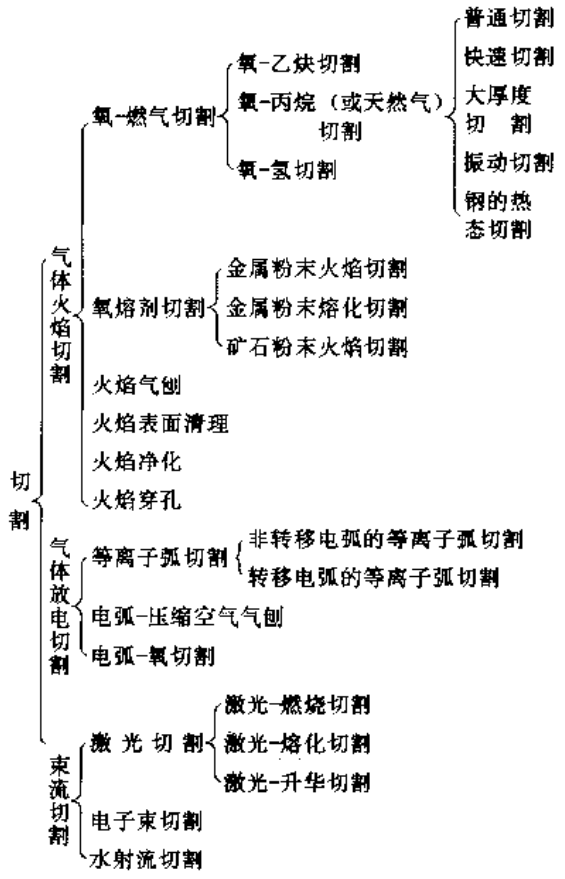
根据焊接构件厚度选择射线探伤方法时，大厚度焊接构件应选取高能射线或 γ 射线探伤方法为宜，中低厚度焊接构件选取 X 射线探伤方法为宜。有关焊缝的射线探伤应按《钢焊接接头射线照相及底片等级分类法》(GB3323—87) 标准规定进行。

超星公司制作请尊重作者版权

第16章　切　　割[73][74]

1　切割方法分类

切割常常是焊接的第一道工序，在现代焊接工程中，切割的质量和效率，关系到焊接工程的质量、效率及经济效益的提高。因此，在现代工业生产中，都相当重视切割工艺的应用。下面列出的切割方法，几乎可以切割所有的工程材料。



2　气体火焰切割

2·1　氧-燃气切割

2·1·1　氧-乙炔切割

1. 原理　用氧-乙炔预热火焰把金属表面加热到燃点，然后打开切割氧，使金属氧化燃烧并放出热量，同时将燃烧生成的氧化熔渣从切口吹掉，形成割缝，从而实现金属的切割（图6·16-1）。

进行普通气割的条件是被切割金属在氧流中的燃点，以及切割时的氧化物的熔点，均低于被切割金属的熔点，且在切割温度下，氧化物的流动性较好。

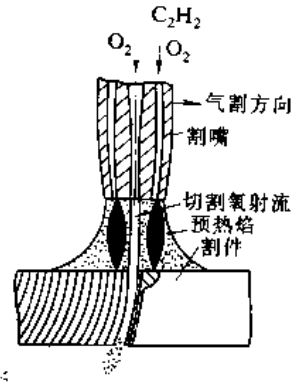


图6·16-1　切割示意图

普通碳钢、高锰钢、低铬、低铬钼及低铬镍合金钢、不锈钢-碳钢复合板以及钛及钛合金等，都可顺利地进行氧-乙炔切割。

2. 割炬及割嘴　氧-乙炔射吸式割炬及割嘴规格性能见表6·16-1。氧-乙炔等压式割炬及割嘴规格性能见表6·16-2。

3. 工艺

a. 预热火焰　在开启切割氧阀前，预热火焰应将工件切割起点表面加热到一定温度（钢为900℃左右）。预热火焰应采用中性焰。切割5～200mm厚钢材的预热时间约3～30s。

b. 影响切割质量及速度的工艺因素　采用机械切割，当工艺参数稳定时，可得到优质切口——后拖量小、上下边缘整齐、割纹深度浅。

厚度30mm以下钢板直线切割时，采用20°～30°的后倾角，可提高切割速度。

曲线切割时，割嘴必须严格垂直切割件表面。

氧气纯度对切割速度和切割面质量均有影响，随着氧气纯度的提高，切割速度和切割质量也将得到改善。

版权所有 重作者请勿制作 盗版必究

表 6·16-1 氧-乙炔射吸式割炬及割嘴规格性能

型号	割嘴号码	割嘴形式	切割范围 (mm)	切割氧孔径 (mm)	气体压力 (MPa)		气体消耗量	
					氧气	乙炔	氧气 (m^3/h)	乙炔 (L/h)
G01-30	1	环形	2～10	0.9	0.2	0.001～0.1	0.8	210
	2		10～20	0.9	0.25	0.001～0.1	1.4	240
	3		20～30	1.1	0.3	0.001～0.1	2.2	310
G01-100	1	整体形(梅花形)	10～25	1.0	0.3	0.001～0.1	2.2～2.7	350～400
	2		25～50	1.3	0.4	0.001～0.1	3.5～4.3	460～500
	3		50～100	1.6	0.5	0.001～0.1	5.5～7.3	550～600
G01-300	1	整体形(梅花形)	100～150	1.8	0.5	0.001～0.1	9.0～10.8	680～780
	2		150～200	2.2	0.65	0.001～0.1	11～14	800～1100
	3	环形	200～250	2.6	0.8	0.001～0.1	14.5～18	1150～1200
	4		250～300	3.0	1.0	0.001～0.1	10～26	1250～1600

表 6·16-2 氧-乙炔等压式割炬及割嘴规格性能

型号 (名称)	割嘴号码	切割氧孔径 (mm)	切割范围 (mm)	气体压力 (MPa)		气体消耗量	
				氧气	乙炔	氧气 (m^3/h)	乙炔 (L/h)
G02-100 等压式割炬	3	1.1	10～25	0.3	0.5	2.2～2.7	350～400
	4	1.3	25～50	0.4	0.5	3.5～4.3	400～500
	5	1.6	50～100	0.5	0.6	5.5～7.3	500～600
G02-300 等压式割炬	7	2.2	150～200	0.65	0.7	15～20	1000～1500
	8	2.6	200～250	0.8	0.8	20～25	1500～2000
	9	3.0	250～300	1.8	0.9	25～30	1800～2200
G04-12/100 等压式焊割两用炬	1	0.7	5～20	0.2	0.4	1.5～2.5	250～400
	3	1.1	20～50	0.3	0.5	3.5～4.5	400～500
	5	1.6	50～100	0.5	0.6	5.0～6.4	500～600

2·1·2 氧-丙烷切割

1. 丙烷及天然气的特点 液化石油气的主要成分是丙烷，故习惯上称为丙烷。天然气的主要成分是甲烷。

氧-丙烷切割比氧-乙炔切割燃气费用可大幅度降低，切割面质量好，表面光洁、棱角整齐、氧化铁渣易打掉。切割面硬度和含碳量低于氧-乙炔切割。切割薄板时变形量小。

丙烷燃烧速度低，是乙炔的27%，切割时不易回火。

丙烷便于装瓶贮存，便于运输和保管，使用方便。缺点是：切割速度较慢，氧气耗量较大。

2. 割炬和割嘴 表6·16-3为一种通用氧-丙烷割炬参数。割炬可用射吸式氧-乙炔割炬改制。

表 6·16-3 氧-丙烷割炬参数

割炬型号	G07-100	G07-300
割嘴号码	1～3	1～4
割嘴孔径 (mm)	1～1.3	2.4～3.0
切割厚度 (mm)	100以内	300以内
可换割嘴个数	3	4
氧气压力 (MPa)	0.7	1.0
丙烷压力 (MPa)	0.03～0.05	0.03～0.05

2·1·3 氧-天然气切割

天然气比丙烷燃烧温度更低，更需强化预热火焰，点火和调整火焰时更易灭火。

预热时间比氧-丙烷切割稍长，割速更慢，切割质量仍然较好。预热时氧与天然气的混合比为2∶1，以

版权所有 北京金威公司制作 请尊重作者版权

提高火焰温度，切割时混合比为1.5∶1，切割较厚钢板时常用1∶1。

2·1·4 氧-氢切割

用氧-氢发生器将水电解成氧气和氢气，氧、氢再按一定比例配合做为切割用预热燃气进行正常的氧焰切割。

2·1·5 燃气特种切割

1. 快速优质切割

a. 原理及特点 普通割嘴氧孔道为直孔型，允许的工作压力低，氧流出口速度慢，涡流大。而快速优质切割，割嘴的切割氧孔道为拉瓦尔喷管形，见图6·16-2，当具有一定压力的氧流经稳定段均化、并经收缩段加速后，至喉部时达到临界速度，然后气流在扩散段内扩散、膨胀加速为超音速气流。用这种均匀的超音速气流，可实现快速优质切割。

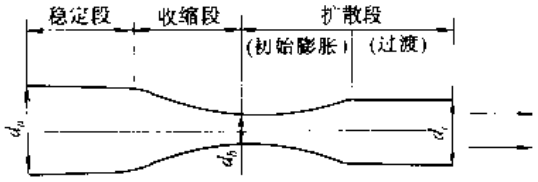


图6·16-2 快速优质切割割嘴

与普通气割相比，切割面粗糙度可降低一级以上。切割速度可提高40%～100%，切口热影响区宽度和切割变形相应减小。

b. 切割氧孔道 喉部直径d_b取决于被切钢板厚度（表6·16-4）。扩散出口马赫数Ma（为气流速度与音速之比值）取决于切割氧管道供气压力及对切割速度的要求。一般取值为$Ma=2$或再低些，当要求割速更高时，可选用2.5或更高值。

表6·16-4 喉部直径的选择 (mm)

钢板厚度	5～50	50～100	100～200	200～300	300以上
喉部直径	0.5～1	1～1.5	1.5～2	2～3	>3

c. 预热火焰孔道 预热孔道截面比普通割嘴大25%左右。乙炔割嘴多用预热火焰出口为圆形的整体式结构。丙烷割嘴宜用嘴芯外侧为齿槽形的组合式结构。

d. 切割工艺特点 切割氧压力，只取决于切割氧出口马赫数并应保持一定，不随切割厚度的变化而变化。厚30mm以下钢板直线切割时，推荐后倾角$\alpha=5°$～30°，切割速度可显著提高。预热火焰的功率一般应较普通割嘴大，用中性焰为宜。

不同板厚切割工艺参数见表6·16-5。

表6·16-5 $Ma=2.0$系列割嘴切割工艺参数

钢板厚度 (mm)	割嘴喉部直径 (mm)	切割氧压力 (MPa)	燃气压力 (MPa)	切割速度 (mm/min)	切口宽度 (mm)
≤5	0.7	0.75～0.8	0.02～0.04	1100	≈1.3
5～10				1100～850	
10～20				850～600	
20～40				600～350	
40～60				350～250	
20～40	1	0.75～0.8	0.02～0.04	650～450	≈2.0
40～60				350～380	
60～100				380～200	
60～100	1.5	0.7～0.75	0.02～0.04	430～270	≈2.8
100～150				270～200	
100～150	2	0.7	0.02～0.04	300～250	≈3.5
150～200				250～170	

2. 大厚度切割 切割600mm以上大厚度钢件，可采用大厚度专用割嘴进行机动切割。

大厚度切割时使用的氧-丙烷外混式割嘴，具有不产生回火、不易灭火、割嘴与工件距离允许在大范围内变化、使用安全等特点。其结构及有关参数见图6·16-3，及表6·16-6、表6·16-7。

根据设计氧孔道的要求，选择出口直径与喉部直径比为1.68，切割氧压力0.8MPa，切割氧出口速度可达2.07Ma。

3. 振动火焰切割 用普通氧-乙炔割炬，在切割

过程中割炬嘴头以一定的频率和幅度前后上下振动，可以冲破高熔点的氧化膜，从而实现切割不锈钢及铸铁。

缺点是：切口宽，且较粗糙，应用少。

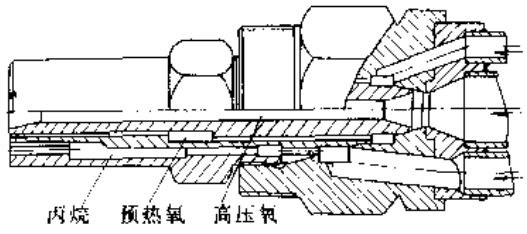


图 6·16-3　大厚度专用割嘴

表 6·16-6　F411-600～1500 外混式割嘴工艺参数

规　　格		F411－600	F411－1000	F411－1500
切割板厚（mm）		600	1000	1500
切割速度（mm/min）		60～160	25～30	25～30
切口宽度（mm）		15～20	25～30	25～35
丙烷	压力（MPa）	0.04	0.04	0.04
	流量（m^3/h）	7.4	13	13
预热氧	压力（MPa）	0.06	0.06	0.06
	流量（m^3/h）	11	20	20
高压氧	压力（MPa）	6～8	6～8	6～8
	流量（m^3/h）	120	240	300

表 6·16-7　F411-600～1500 外混式割嘴结构参数

名　　称	孔　　径			混合比
	高压氧	低压氧	丙　烷	氧：丙烷
600 扩口型	6.5	1.05×1.7 16 槽	2.5 20 孔	1.54：1
1000 扩口型	9.5	1.3×2.2 18 槽	3.2 24 孔	1.54：1
1500 扩口型	14	1.3×2.2 18 槽	3.2 24 孔	1.54：1

4. 钢的热态切割　钢的热态火焰切割用于冶金企业连铸、连轧钢坯的切断。采用专用割嘴可获得较高的切割速度和窄的切口宽度，切割 300℃以上的连铸钢坯，厚度 150mm 时，切割速度可达 450～500mm/min 以上，切口宽度可以控制在 5～6mm。割嘴工作时处于较高的环境温度，应有较高的抗回火能力。

2·2　氧熔剂切割

2·2·1　原理

在切割过程中加入铁粉或其他熔剂，利用其反应热和反应产物，可提高切口温度，改善熔渣流动性，同时拌随有机械冲刷作用，从而实现对不锈钢、铸铁或其他合金的切割。

2·2·2　送粉方式

将熔剂送入割嘴，与切割氧流汇合形成切割氧熔剂流，这是内送粉式；将熔剂通过管路送至割嘴氧流出口处，这是外送粉式（图 6·16-4）。

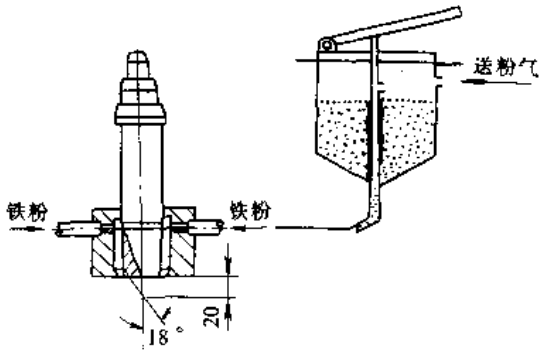


图 6·16-4　外送粉式示意图

2·3　火焰气刨

这是一种采用气割原理在金属表面加工沟槽的方法。

2·4　火焰表面清理

是一种采用气割火焰铲除钢锭表面缺陷的方法。

2·5　火焰净化

用氧-燃气火焰使金属或矿石工件的表面迅速地短时间被加热，使有机或无机覆层或涂层剥落或反应气化而被除去的方法。

2·6　火焰穿孔

用低碳钢管在矿石或金属材料上穿孔，钢管的外

超星公司制作 请尊重作者版权

超星公司制作 请尊重作者版权

露端被加热到熔点，加入氧即燃烧，依靠燃烧的热量维持穿孔的切割过程。

在矿石材料中，钢管燃烧时所产生的金属氧化物使矿石熔融物变成易流动的熔岩被氧流吹走。

在金属材料中，金属在氧流中氧化燃烧，并用氧流排出，产生孔洞，许多孔洞相连便形成一排孔或一条切口。

3　等离子弧切割

3·1　等离子弧切割原理及应用

切割用等离子弧是电弧经过机械压缩效应、热压缩效应和电磁压缩效应而形成。其形式有两种(图6·16-5)，转移电弧用于较厚材料的切割，非转移电弧用于薄件或非金属材料的切割。

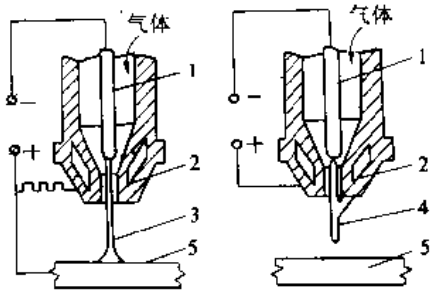


图6·16-5　等离子弧两种形式

a）转移电弧　b）非转移电弧

1—电极　2—喷嘴　3—等离子弧

4—等离子焰　5—工件

等离子弧切割，要求能迅速熔化金属，并立即吹掉形成切口。所以电弧功率和压缩程度都要比焊接的强，能量更集中，温度可达10000～30000℃，有很强的吹力，气流速度可达1500mm/s。

用等离子弧可以切割不锈钢、高合金钢、铸铁、铜、铝及其合金以及非金属材料等。切口窄、切割面的质量较好，切割速度快。切割厚度可达150～200mm。

随着空气等离子弧技术的发展，在切割20mm以下碳钢和低合金钢时，由于切割速度快，其综合经济效益已赶上或超过氧-乙炔切割。

为了改善薄板的切割质量，发展了小功率的CO_2气体冷却的氮气等离子弧切割、水下等离子弧切割、水射流等离子弧切割等。

图6·16-6为等离子弧切割原理示意图。

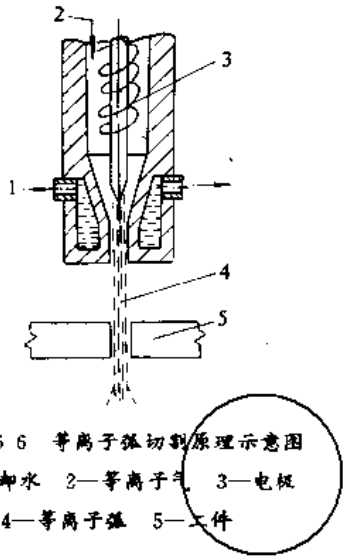


图6·16 6　等离子弧切割原理示意图

1—冷却水　2—等离子气　3—电极

4—等离子弧　5—工件

3·2　切割设备

等离子弧切割设备由电源、割炬、控制系统、气路系统及冷却系统等组成。用于机械切割还要有小型切割机或数控切割机等。

1. 电源　采用直流，正接（电极接负）。为建立稳定电弧，应有较高的空载电压及在工作范围内需具有陡降的外特性。按不同的工作气体及切割厚度，空载电压应在150～200V以上，专用电源常采用300、400V或更高。

2. 割炬　主要由上体（电极夹持、调节及导电部分）、绝缘柱及下体（喷嘴和气室）等组成。提高电极与喷嘴孔的同心度对于保证切割过程正常、提高切割面质量和喷嘴寿命极为重要。为了便于电极对中，宜采用中心可调式割炬。

3·3　切割工艺

等离子弧切割的过程：给气、用高频高压或脉冲高压在电极和喷嘴间先引燃非转移弧，然后把电弧转移到电极和切割件之间，供给较大的电流进行切割。自动切割还需控制割炬的行走速度和轨迹。

1. 工作气体　通常用纯氮或氮氢混合气，也可用氩或氩氢、氩氮混合气。

近年来又发展到用压缩空气、氧等做为等离子弧切割的工作介质。

2. 电极材料　电极常采用铈钨极。极限工作电流取决于电极直径和电极冷却方式。铈钨极几乎没有放射性，用于等离子弧切割的性能也比带有放射性的钍钨极好。对于用空气做工作气体的电极材料要用铪或锆，以增强抗氧化能力，延长使用寿命。

超星公司制作请尊重作者版权

不同直径电极的许用电流值也不同，如果电极直径分别为4，5，6mm，相应的最大许用电流可达250，360，550A。

3. 切割规范参数

a. 电弧电压和工作电流 增大电弧电压和工作电流，能提高等离子弧的功率，从而使切割速度和可切厚度增大。

b. 喷孔直径和长度 喷嘴孔直径和孔道长度决定了等离子弧的机械压缩程度。孔道比即喷嘴孔道长度与喷嘴孔直径的比为1.6～1.8较好。

c. 气体流量和切割速度 增大气体流量，在一定范围内使等离子弧的能量更集中，吹力加大，有利于提高切割速度和切割质量，并有利于避免烧坏喷嘴。

d. 其他参数 电极尖端至喷嘴端部的距离，即内缩量，一般为：l（孔道长）+2～4mm。喷嘴顶部至工件距离，一般为4～8mm。电极尖端角度为50°左右。

不锈钢等材料等离子弧切割工艺参数见表6·16-8。

表6·16-8 不锈钢等材料等离子弧切割工艺参数

材料	厚度 (mm)	喷嘴孔径 (mm)	电弧电压 (V)	工作电流 (A)	气体成分	气体流量 (L/h)	切割速度 (m/h)
不锈钢	12	2.4	100～110	140～160	N_2	2700～3000	80～100
		2.8	130～140	300～240	N_2	2700～3000	120～150
	20	2.8	130～140	200～240	N_2	2700～3000	70～80
	30	3.2	140～150	240～280	N_2	2700～3000	25～35
	45	3.2	140～150	250～350	N_2	2500～2700	20～25
	80	3.5～4.0	150～160	350～400	N_2	1800～2000	8～10
	130	5.5	170～180	500	N_2+H_2	$N_2$3170 $H_2$960	8～10
铝及铝合金	15	2.8	130～140	160～200	N_2	3000	140～160
	80	4.0	150～180	350～380	N_2+H_2	$N_2$2150～2440	13～20
	150	5.0	170～240	420～480	N_2+H_2	$H_2$2700～2750	9～10
铸铁	100	5.0	160	400	N_2+H_2	$N_2$3170 $H_2$960	10～13

4 电弧－压缩空气气刨

此法是利用电弧的高温使材料熔化或燃烧，用压缩空气把熔化金属吹掉，以清除焊缝缺陷，开坡口（特别是U型坡口），清理铸件飞边，毛刺及铸造缺陷以及切割高合金钢、铝、铜及其合金等。

5 电弧-氧切割

电弧在空心电极与工件之间燃烧，通过空心电极的切割氧，使这种切割连续下去，熔融物被切割氧排出，形成切口。这种方法设备简单，但切割表面不规则。

6 激光切割

这是利用激光束的热能实现切割的方法。它可以切割金属材料和非金属材料。

此法特点是割缝窄、速度快、热影响区小、切割面光洁。在10mm以下金属切割中，割缝宽度仅0.1～0.3mm。

6·1 激光-燃烧切割

将适合于火焰切割的材料利用激光束加热到燃点，再通过氧射流使其连续燃烧，氧化物被氧流吹走，形成切口。

版权所有 侵权必究 请勿擅自制作盗版

6·2 激光-熔化切割

利用激光束将材料局部熔化，熔化物被气体射流排出，形成切口。

6·3 激光-升华切割

利用激光束使材料局部受热并蒸发，蒸发物被气体射流吹走，形成切口。

6·4 激光切割设备

1. 激光器 大多数使用 CO_2 激光器，功率大，品质好。

2. 轨迹控制机构 激光器安装在数控切割机上，按照控制程序切割出所需图形。

7 电子束切割

利用电子束的能量将被切材料熔化，熔化物蒸发或靠重力流出形成切口。

电子束切割速度快、精度高、割缝窄。由于能量易于控制，可实现高度自动化。

但是，由于被切工件一般都要置于真空室内，因此，成本较高。

8 水射流切割

8·1 水射流切割原理及应用

这是用高压水(200～400MPa)有时也加一些粉末状的磨料，通过喷嘴射到工件上进行切割的工艺方法。

此法可切割金属、复合材料、玻璃、陶瓷、塑料、以及其他特殊的工程材料。

切割零件无挂渣、无热变形。切割过程也无粉尘、无污染，是极有发展前途的切割工艺方法。

8·2 水射流切割设备

水射流切割头是由压缩空气、高压水、磨料输入管、开关单元、混合室、聚焦头等组成。高压水与磨料在混合室均匀混合后，通过聚焦嘴（割嘴）高速喷出，用于切割工件。聚焦嘴的外径为 6.4～8mm，内径为 0.8～1.6mm，长度根据需要而定，但过长压力损耗增大。

水的增压系统如图 6·16-7，是由过滤器、增压泵、蓄水罐、高压泵组成。可产生 200～400MPa 的高压水。

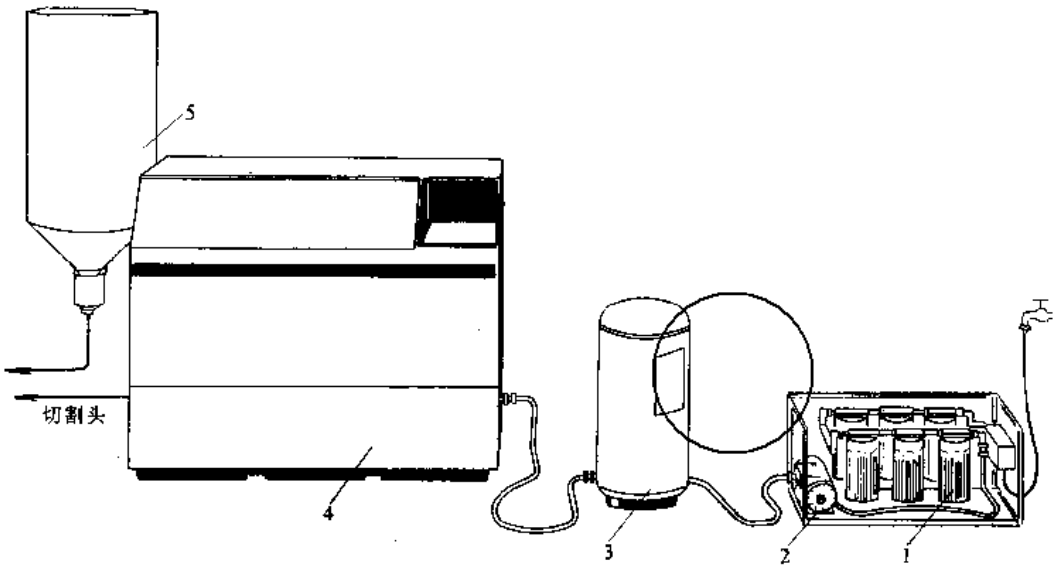


图 6·16-7 水射流切割增压系统

1—过滤器 2—增压泵 3—蓄水罐 4—高压泵 5—磨料罐

为提高切割效率，使用的磨料通常是金刚砂，可回收反复使用。磨料由带有开关阀的专用料罐供给。

水射流下面要设置能量吸收装置，以免剩余能量引起穿透破坏。一般是涂有耐磨材料，深度为 800mm 的水槽。

这套系统安装在数控切割机上，就可以切割出各种复杂图形的零件。

9 各种切割工艺方法比较

各种切割工艺方法可切割的工程材料及其工艺参

超星公司制作请尊重作者版权

数的比较，见表 6·16-9及表 6·16-10。

表 6·16-9　各种切割工艺方法比较

可切割材料		氧焰切割	等离子弧切割	激光切割	水射流切　割
金属	碳　钢	+	+	+	+
	低合金钢	+	+	+	+
	高合金钢		+	+	+
	非铁金属		+	+	+
非金属	陶　瓷			+	+
	塑　料			+	+
	橡　胶			+	+
	木　材			+	+
	皮　革			+	+
	布			+	+
	其他非金属			+	+

注：+表示可切割。

表 6·16－10　切割速度比较

(mm/min)

碳钢板厚(mm)	氧焰切割	等离子弧切割	激光切割	水射流切　割
<1	—	—	>5000	3300
2	—	—	3500	600
6	600	3700	1000	200
12	500	2700	300	100
25	450	1200	—	48
30	300	250	—	—
>100	<150	—	—	—

第 17 章　切割机械化与自动化

1　现代切割技术的特点

在实现金属分割的方法中，现代切割设备是最重要的机械装备。由于计算机及微电子高新技术的应用，使切割生产效率大为提高，给生产过程带来了质的变化。现代切割技术的特点是：

(1)以机械代替手工。过去用手工下料的工序，普遍以各种机械设备来代替，能满足各种场合下料工序的需要。

(2)加工精度得到极大提高。由于计算机技术的引入，现代切割加工零件的形位公差、尺寸精度及切割面质量，不需二次机械加工就可直接满足焊接装配的需要。

(3)经济效益显著。切割工艺方法效率高，能耗低，在金属分离的各种手段中，成本最低，经济效益十分显著。

2　常用机械控制切割机的选用（表 6·17-1）

表 6·17-1　常用机械控制切割机选用

分　类	原　理	特　点	适用切割范围
小车式	小车带动割炬在专用轨道上运动	轻便、灵活、搬动方便。导轨有刚性、挠性、多向	直线或缓曲线、单件小批生产
靠模式	小车或门架在轨道上运动，割炬按靠模横向运动	结构简单、使用可靠，可采用多割炬	直线及非封闭曲线成批生产
门架式	门架带动数个割炬在轨道上运动，有一割炬可作横向运动	结构简单，使用可靠，生产率高，精度高	直线、大批量生产
摇臂式	由磁滚轮沿样板仿形带动割炬运动、机架与割炬为折臂铰接	结构简单，紧凑，用样板仿形	中、小工件封闭曲线（包括圆形）大批量生产
直角坐标式	由磁滚轮沿样板仿形带动割炬运动，机架与割炬采用纵横向车架联接	适合切割较大工件，用样板仿形，可采用多割炬	较大工件直线或封闭曲线，大批量生产

超星公司制作请尊重作者版权

3 光电跟踪切割机

3·1 跟踪原理

由光电头产生旋转光圈对图样线条进行扫描，用光电管接收光圈扫描脉冲讯号。将接收有脉冲讯号与旋转反射镜同步讯号进行相位比较，不同相位表示光电头与线条之间有不同的夹角，从而驱动相应纵向或横向电机带动割炬按线条方向进行切割。

3·2 跟踪机构

跟踪机构主要由图架、光电头、控制系统及操作台等组成，执行零件图形跟踪任务。

3·3 机械结构

分双臂式及龙门架式两种，两种结构形式组成相似，以龙门架式为例，主要机械结构有：

1. 机器台 两侧各有导轨，其中之一装齿条，车架齿轮在它上面作纵向运动。

2. 主横梁 由车架、导向轮及横向导轨组成。上面装有纵、横向进给机构。

3. 切割小车 由导向轮、主、副切割车架、割炬调节机构、气体分配阀等组成。它带动割炬在主横梁上作综合运动。

4. 纵、横向进给机构 由纵、横向伺服电机驱动，做纵、横向运动。

当前，光电跟踪切割机除利用光电头跟踪图形轨迹之外，大都带有简易数控系统，将图形编程直接输入，切割出所需零件。因此，具备了光电、数控两种功能。

4 数控切割机

4·1 工作原理

将要进行切割的零件图样预先编好程序，然后用键盘、纸带、磁带、或磁盘输入到控制机中，经控制机处理，再经伺服系统变换放大调制，驱动 X、Y 方向上的伺服电机，伺服电机的运转经减速箱带动一齿轮在齿条上传动，从而使整个横梁和横梁上的割炬小车按一定规律运动，来完成所需要的钢板零件形状的切割。

其工作原理见图 6·17-1。

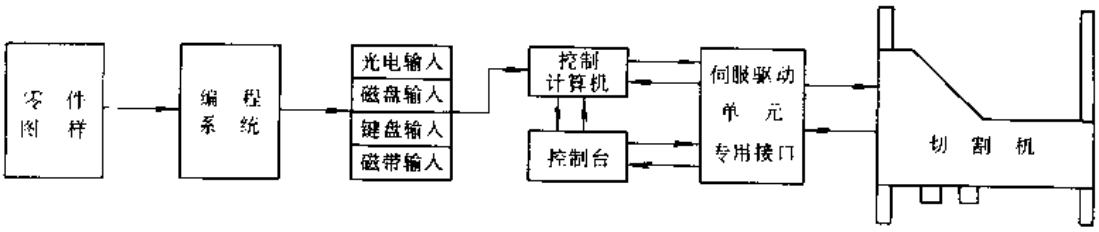


图 6·17-1 数控切割机工作原理

4·2 控制机

控制机是切割机的核心部分，接受外来程序指令，经过内部运算处理，然后送出控制信号，驱动切割机各部件运动。同时，它还要满足切割工艺的几种要求：

(1) 返回控制。割炬沿程序段运动时，假定在某一点未被割穿或熄火，由操作者或熄火检测系统向控制机发出指令，使割炬能返回该程序段(或程序)的起点。

(2) 稳速控制。切割速度的稳定对切割质量及割缝宽度均有影响，严重时造成钢板割不穿。因此，要求割炬沿任何曲线运动时，X、Y 方向的合成速度都要是稳定的。

(3) 减速控制。数控切割机惯性较大，高速划线或切割时，在拐点处会有过冲现象，因此，在程序段末，应插入减速控制指令。

(4) 割缝补偿控制。数控切割机是控制割炬火焰中心运动轨迹的。由于存在割缝，且钢板厚度不同，割缝宽度也不同。所以，控制机应具有割缝宽度自动补偿功能，补偿量的范围在 0～10mm。

(5) 坡口切割控制。厚钢板切割 X、Y 型坡口，不但要求割炬沿图形轨迹移动，而且要求割炬围绕中心轴按一定规律旋转，即需增加一轴，控制旋转割炬。该割炬架上，通常安装 2～3 只割炬。

(6) 切割工艺程序控制。根据钢板的厚度，在程序中设置割炬下降、预热火焰的点燃，预热时间、开启切割氧阀及切割程序段结束时切割氧阀及燃气阀的关闭，割炬提起等控制性指令。

(7) 自动穿孔控制。厚钢板切割时，起点如果不是在钢板的边缘，要加入自动穿孔控制程序。预热火焰要前后摆动，在给切割氧的同时，割炬要缓慢提起，以防

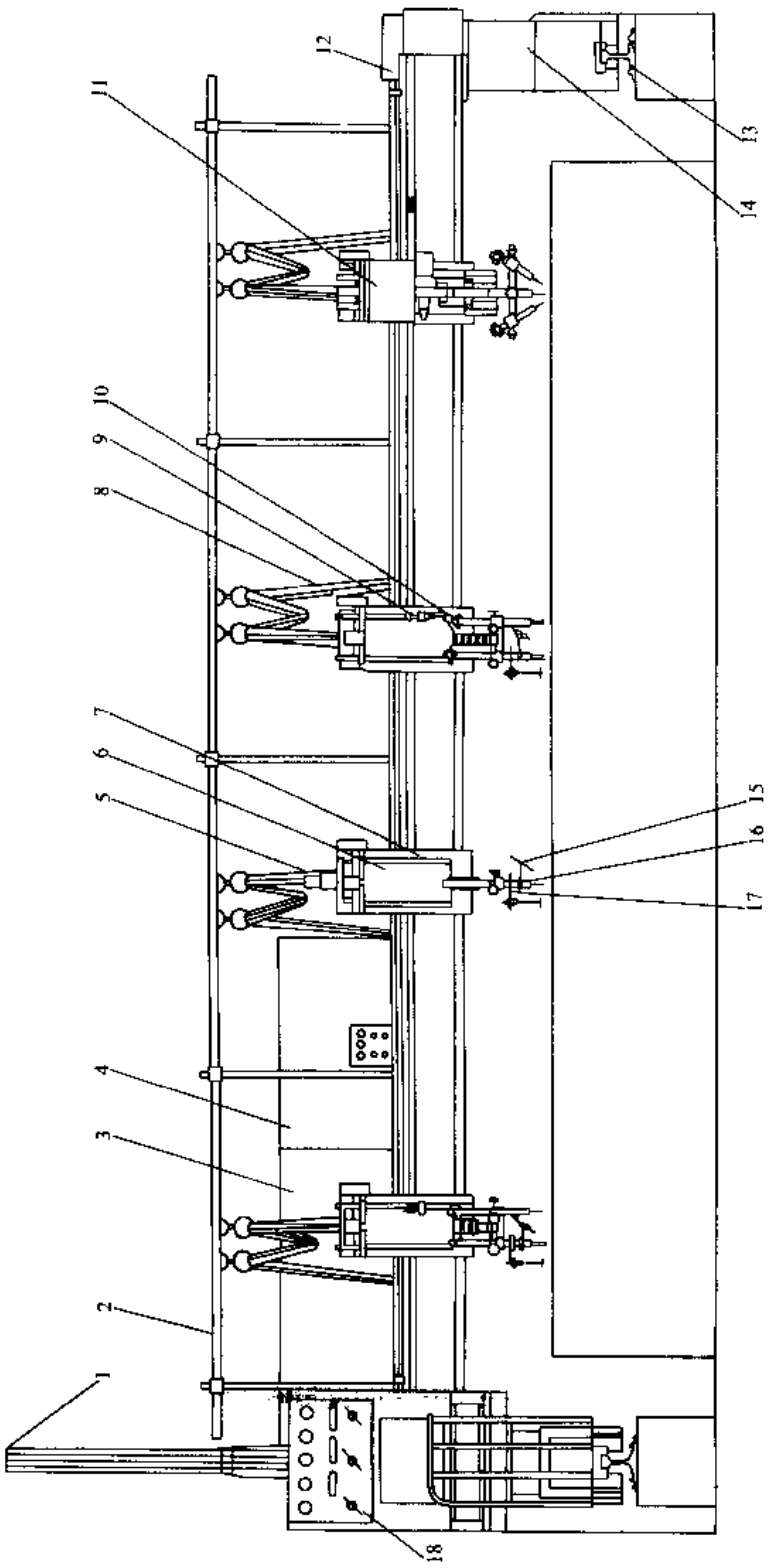


图 6·17-2　数控切割机

1—纵向挂架　2—横向挂架　3—配电箱　4—电控箱　5—横向传动装置　6—割矩升降架　7—横向移动小车　8—气路胶管
9—喷粉划线枪　10—横梁　11—光纬三割矩　12—钢带传动装置　13—导轨　14—端架　15—点火枪　16—半割矩
17—调高装置　18—控制台

版权所有 请勿复制 侵权必究

反射的熔化金属飞溅物堵塞割嘴，穿透后又要缓慢下降，以继续正常切割。

(8) 自诊断功能。控制机一旦出现故障，应具有自诊断功能，并在屏幕上显示出故障的范围。

4·3 控制台

控制台是为切割机的控制电源及机上各辅助功能，如割炬升降、电磁气阀、自动点火等手动操作，以及一般显示和应急情况的处理而配置的。主要由按钮、开关、指示灯等元器件组成。

4·4 伺服驱动单元及专用接口

1. 伺服驱动单元 由交流或直流伺服系统组成。由于交流伺服系统动态响应快、开关频率高、噪声低、振动小、易维修等，在数控切割机上应用较多。

2. 专用接口 控制机发出的辅助功能控制信号，经过专用接口的逻辑关系来驱动切割机上各执行部件动作。

4·5 机械结构

图 6·17-2所展示的是典型的数控切割机的机械结构。

1. 导轨 安装在对水平和直线性能进行螺钉调整的基座上。若单边驱动，主导轨外侧还装有纵向齿条，若双边驱动，辅导轨外侧也装有纵向齿条。

2. 横梁 一般为箱形结构，装有横向齿条、钢带，以使带割炬的小车沿其横向运动。

3. 端架 将横梁支撑在导轨上，是切割机纵向运动的导向部件。

4. 纵、横向驱动装置 由交（直）流伺服电机驱动、通过精密齿轮减速、末端小齿轮与纵、横向齿条啮合，配有消除间隙装置。

5. 小车 安装在横梁导轨上，小车上装有滚轮，起支撑与导向作用，前部装有单割炬或三割炬，主小车中装有横向驱动装置，小车后部装有钢带夹紧器。

6. 钢带传动装置 由滚轮、张紧轮、滑轮、钢带等部件组成，钢带的两端固定在主动小车后部。钢带作环状移动。变动从动小车后部的夹紧方向，可使从动小车作对称或同形运动。

7. 割炬 装在用步进或伺服电机驱动的升降装置上，根据工艺需要，可由单、双或三割炬组成。一些辅助装置，如自动点火、自动调高、喷粉划线等，也根据需要安装其上。

如切割曲线坡口，还要安装按控制计算机指令规律旋转的三割炬。此时控制计算机要增加一运动轴。

8. 气路系统 由阀门、减压器、电磁气阀、回火防止器、胶管等组成。

5 切割辅助控制

5·1 自动点火控制（表 6·17-2）

表 6·17-2 常用自动点火控制方法

方法	原 理	特 点
电容放电	利用电容放电，经变压器升压使两极尖端产生火花	结构简单、无机械动作、无噪声、无干扰、着火率高、便于无触点控制
压电陶瓷	用机械法对压电陶瓷加压，陶瓷两端产生电压，产生火花	体积小、经济、使用方便
高频放电	用高频振荡器，经变压器升压（电压 2～5kV），产生尖端放电	以往用得最多的一种方法，输出线路不能太长
发火枪	用旋转小砂轮与火石摩擦产生火花	人工辅助点火作为附件有成品供应(不推荐)

5·2 熄火检测控制（表 6·17-3）

表 6·17-3 常用熄火检测控制方法

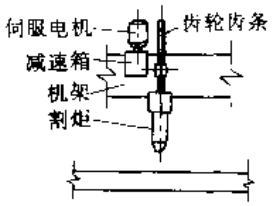
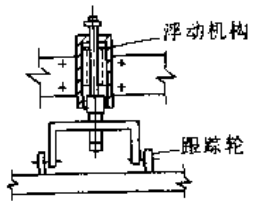
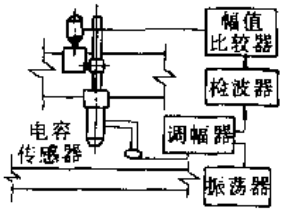
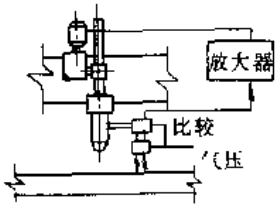
方法	原 理	优 点	缺 点
光电法	用传感器接收切割的氧化光谱的有无，检测熄火讯号	传感器比较成熟	控制系统比较复杂
气压法	用专门压缩空气喷嘴及微压开关，当未割透时，有反射气流，微压开关动作	不用电讯号放大系统	传感器比较复杂，需供给气源
电势法	测量割嘴与工件间静电势。切割时有电势；熄火时电势消失；未割透时电势极性变化	只需测电势，不用专门传感器	控制系统比较复杂

版权

超星公司制作请尊重作者版权

5·3　割炬高度控制（表 6·17-4）

表 6·17-4　常用割炬高度控制方法

方　法	示　意　图	原　理	优　点	缺　点
手操电动		操作者控制割炬升降电机、目测割炬高度进行人工控制	简单	人工控制、劳动强度大、精度差
浮动机构		跟踪轮与割嘴作机械联接，割嘴与机架可上下滑动，保持割炬高度不变	简单	接触式，有机械磨损，拖动功率小；结构笨重，精度差（约为 5mm），特别会受到工件表面缺陷影响
变容调节		采用环形电容传感器，检测工件与传感器距离，当距离变化时，电容改变，用它控制高频振荡器，进行调幅，用调幅波拖动伺服电机自动控制割炬高度	精度较高约为 0.5mm，非接触式灵敏度高	线路复杂，成本高
气体反压		利用钢板反射压缩空气，经比较，转换成电控制	非接触式灵敏度高，精度 0.5～2mm，钢板局部缺陷对控制影响较小	传感器较复杂，需供给专门气源

5·4　切割图形轨迹标示

1. 喷粉划线枪　由气流利用射吸原理，将锌粉带到割嘴出口端，再利用割嘴的预热火焰将喷射在钢板上的锌粉熔固在钢板表面上，随着切割机的运动，显示出被切零件的图形。

喷粉划线枪一般都安装在割炬的一侧。

2. 冲点装置　利用交流电磁线圈引起装有硬质合金尖头的阀杆上下高速振动，从而在钢板上打出小圆点，随着切割机的运动，显示出由一系列圆点组成的被切零件的图形。

冲点装置一般也装在割炬的一侧。

在数控切割机上，根据需要，可任选一种图形轨迹标示装置使用，以检测切割图形程序的正确性。

5·5　喷水冷却装置

是安装在割嘴周围的带小孔的环形金属管，通以压力水，冷却被切零件，防止热变形。

通常在切割薄板时才使用该装置。

超星公司制作 请尊重作者版权

6 数控切割机的编程系统

6·1 功能

相同厚度不同形状的零件，在同一张钢板上如何排列才能使钢材利用率最高，是编程系统要完成的任务。这是现代数控切割机下料必备的配套系统。编程系统应当具备的主要功能是：(1) 用于图形的编辑；(2) 用于工件的半自动套料；(3) 用于工件的全自动套料；(4) 用于圆柱，圆锥等零件图形的展开。

6·2 工作原理

全自动套料系统，其工作原理可分为两类：

1. 货柜式套料 被套料的工件包含在一个货柜中，所谓货柜是一个尽可能小的矩形，将这个货柜放在板材的任意空间中，然后移动货柜到一个适当位置，使板材利用率最高。

2. 轮廓式套料 当工件的外形被输入后，工件和板材空间及工件与工件之间的距离由计算机进行计算，计算的结果将使工件之间的距离为最小，使材料利用率为最高（图 6·17-3）。

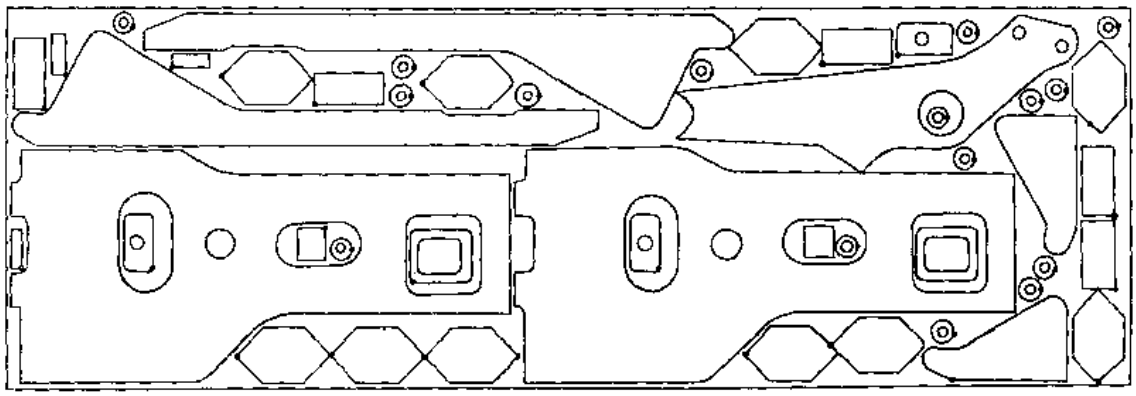


图 6·17-3 全自动套料

6·3 组成

(1)带键盘和高解象度图象显示屏幕的微机；(2) 绘图仪；(3) 打印机；(4) 高速穿孔读带机。

7 专用切割机

7·1 封头切割机

封头切割机由回转台及操作机组成，可用来切割封头，也可用来焊接圆形焊缝。

回转台的转速是可调的，以切割不同厚度及不同直径的封头。

7·2 数控管子切割机

现代工程中，各种相贯体管形件的切割是必须解决的工艺问题。数控管子切割机能满足各种立体曲线坡口切割工艺要求。

图 6·17-4是六轴数控管子切割机，其数控系统(计算机及伺服系统)能控制六个运动轴按一定规律协调一致地进行工作。

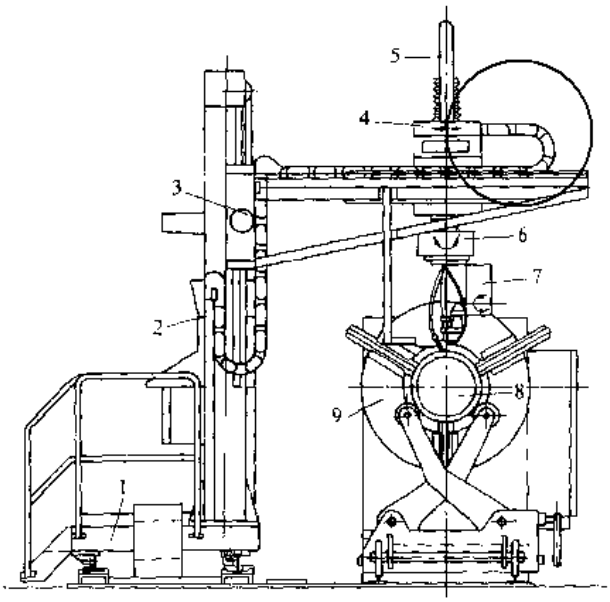


图 6·17-4 数控管子切割机

1—纵向运动 2—控制台 3—上下运动
4—横向运动 5—割炬高度调节
6—割炬旋转运动 7—割炬摆动
8—管子旋转运动 9—旋转台

超星公司制作请尊重作者版权

8　热切割及冷加工组合机

为了减少工件的往返搬动，提高加工效率，在数控切割机上将板材下料、钻孔、镗孔及铣削加工同时进行的设备即为热切割及冷加工组合机。

它是在数控切割机的基础上，增加进行钻孔、镗孔、铣削加工的组件及其控制轴，其图形、轨迹、加工量的大小等，统一由计算机程序控制。

这种冷加工组件安装在数控切割机横梁的下方，并能沿横梁进行横向运动，而组件本身又能围绕垂直轴旋转和升降，以满足不同工件加工的要求。因此，数控切割机装设冷加工组件后，计算机控制系统至少要再增加三个运动轴。

9　数控切割机的选型原则

9·1　轨距

$$S=B+n+h+b \quad (\text{mm})$$

式中　B——钢板宽度（mm）；

n——钢板张数；

h——机器无效行程（一般 400～500mm）；

b——宽程（一般 200～300mm）。

对装设冷加工组件的数控切割机，还需将冷加工组件的宽度加上。

9·2　驱动方式（图 6·17-5）

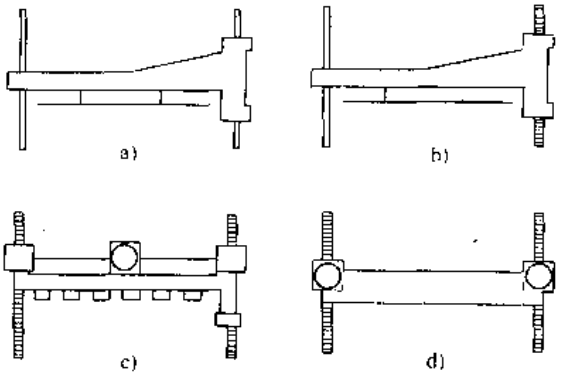


图 6·17-5　数控切割机驱动方式

a）单边摩擦驱动　b）单电机单边齿轮齿条传动　c）单电机双边齿轮齿条传动　d）双电机双边齿轮齿条传动

1. 单电机单边摩擦驱动　最大轨距为 3m，最高速度为 6m/min，仅用于气体火焰切割。

2. 单电机单边齿轮齿条驱动　最大轨距为 7m，最高速度为 12m/min，最大切割速度为 6m/min，可用于等离子弧和气体火焰切割。

3. 单电机双边齿轮齿条传动　最大轨距为 9m，最高速度为 12m/min，最高切割速度为 6m/min，可用于等离子弧和气体火焰切割。

4. 双电机双边齿轮齿条传动　最大轨距为 20m，最高速度为 24m/min，最高切割速度为 12m/min，可用于激光、等离子弧和气体火焰切割。

单边驱动比双边驱动价格便宜，但是，单边驱动在高速起动时会产生抖动。对于气体火焰切割，轨距在 5m 以下可选单边驱动，5m 以上应选双边驱动。对于激光、等离子弧、水射流切割，需要较高切割速度，应选双边驱动的数控切割机。

9·3　轨长

$$L=l\times n+c+d$$

式中　l——钢板长度；

n——钢板张数；

c——机器长度；

d——余度（一般取 2～3m）。

导轨一般 2m 一段，因此轨长应取双数。

9·4　割炬托架形式

1. 棒形（图 6·17-6a）　多用于多把割炬切割同一形状的工件。

2. 钢带形（图 6·17-6b）　可用于多把割炬同时切割同一形状工件，也可切割对称形工件。

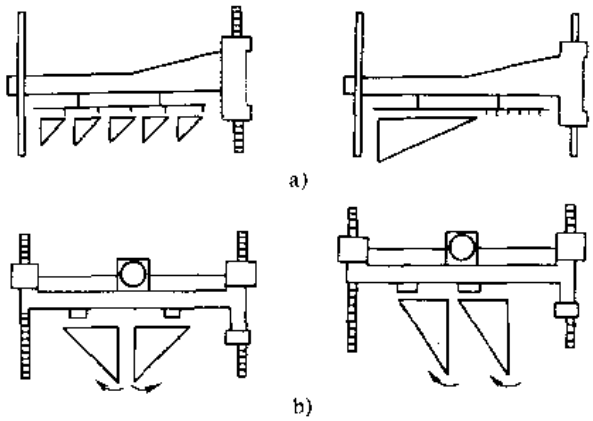


图 6·17-6　割炬托架形式

a）棒形　b）钢带形

9·5　割炬数

原则上根据切割工件大小、钢板尺寸来确定，通常每张钢板配备两把割炬为宜。

超星公司制作请勿重作者版权

9·6　切割辅助控制装置的选择

自动点火装置每把割炬应配置一套。

割炬电动升降装置，由于工艺的需要，每把割炬都应配置。

自动调高装置和喷水冷却装置是在切割较薄钢板时，为防止钢板和工件变形应具备的。

划线枪是为检验程序的正确性而设置的。

9·7　切割设备总台数的确定

切割设备总台数 ΣN 依据设备的切割能力与产品的年产量 Q 确定。

$$\Sigma N=\frac{L\times Q}{S\times t\times 0.8\times A}$$

$$t=H\times 60\times n\times T$$

式中　L——一台典型产品中需要切割的总长度（m/台）；

S——割嘴平均切割速度（m/min）；

t——一年有效的切割工作时间（min）；

A——每台切割机平均使用割嘴数；

H——每班实际切割小时数（h/班）；

n——每天班次（班/d）；

T——全年工作天数（d/年）；

0.8——考虑到空行程、预热等系数。

10　切割质量和尺寸偏差

切割面质量是根据切割面平面度 u、割纹深度 h、缺口（切割面上的一种凹进缺陷）的最小间距 L 三项参数进行分等。后拖量 n、上缘熔化度 r、挂渣不作切割面质量分等评定依据。

X、Y、V、K形坡口的切割面质量，应对各切割面分别评定。

10·1　切割面质量等级及其测定

火焰切割面质量分Ⅰ、Ⅱ两级（表6·17-5）。切割面平面度 u、割纹深度 h 的分等取值范围见图6·17-7及图6·17-8。Ⅰ级质量中缺口最小间距 L 应≥2000mm；Ⅱ级质量中缺口最小间距 L 应≥1000mm。

表6·17-5　切割面质量分等

切割面质量	切割面平面度 u	割纹深度 h
Ⅰ级	1等和2等	1等和2等
Ⅱ级	1等～3等	1等～3等

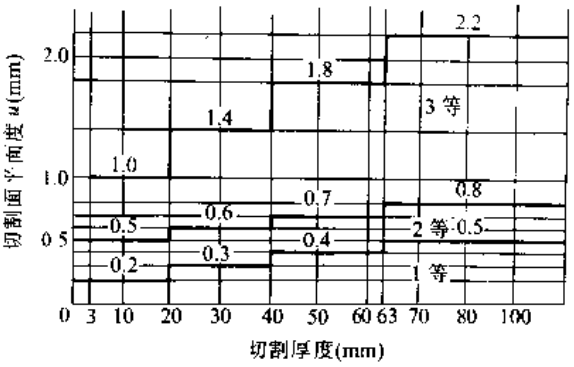


图6·17-7　火焰切割面平面度 u

（数值表示上限）

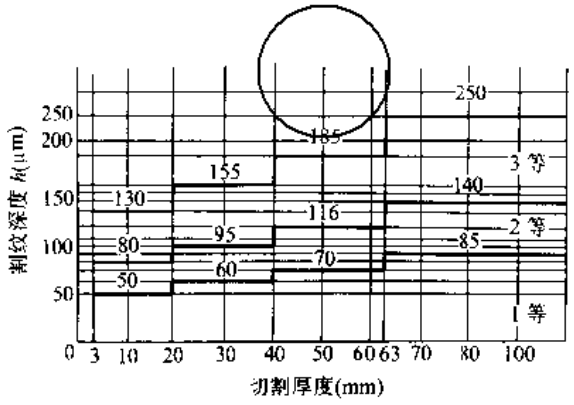


图6·17-8　火焰切割割纹深度 h

（数值表示上限）

等离子弧切割面质量也分为Ⅰ、Ⅱ两级，切割面平面度 u、割纹深度 h 的分级取值范围见图6·17-9及图6·17-10。

切割面表面质量可用切割面质量样板作对比鉴定。用这一样板在现场作对比测量，对比得出的切割面质量等级即做为评定结果。

切割面平面度 u 和割纹深度 h 的数值，可用测量仪器和量具分别测定。

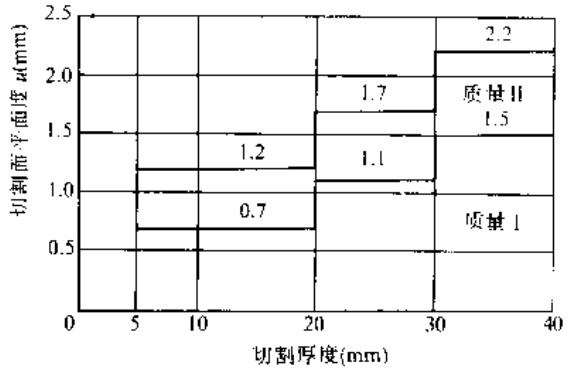


图6·17-9　等离子弧切割面平面度 u

（数值表示上限）

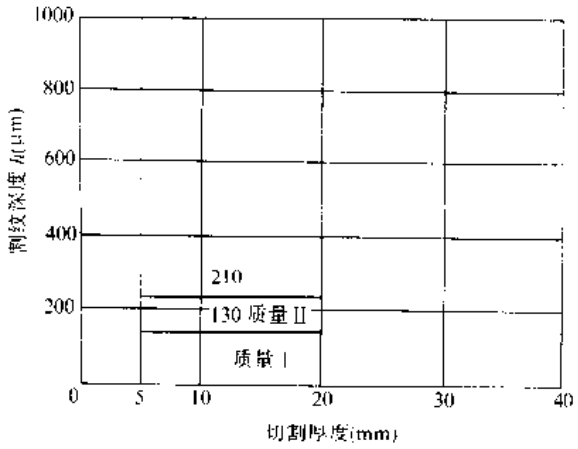


图 6·17-10　等离子弧切割割纹深度 h
（数值表示上限）

激光和水射流切割的表面质量，要比火焰切割和等离子弧切割的表面质量还可提高一个等级。

10·2　工件尺寸偏差

工件的尺寸偏差是指工件基本(图样)尺寸与切割后的实际尺寸之差值。实际尺寸应在切口经过清理并冷却到室温后进行测量。

火焰切割尺寸偏差见表 6·17-6。尺寸偏差包括由切割面平面度造成的偏差部分。

等离子弧切割工件的尺寸偏差见表 6·17-7。尺寸偏差也包括由切割面平面度造成的偏差部分。

表 6·17-6　火焰切割工件尺寸偏差

(mm)

精度	切割厚度	基本尺寸范围			
		35～<315	315～<1000	1000～<2000	2000～4000
A	3～50	±0.5	±1.0	±1.5	±2.0
	50～100	±1.0	±2.0	±2.5	±3.0
B	3～50	±1.5	±2.5	±3.0	±3.5
	50～100	±2.5	±3.5	±4.0	±4.5

表 6·17-7　等离子弧切割工件尺寸偏差

(mm)

精度	切割厚度	基本尺寸范围			
		35～<315	315～<1000	1000～<2000	2000～4000
C	5～50	±1	±1.5	±2	±2.5
D	5～50	±1.5	±2.5	±3	±3.5

两表中所示工件尺寸偏差适用于：

(1) 图样上未注公差的尺寸；

(2) 长宽比≤4∶1 的工件；

(3) 切割周长≥350mm 的工件。

激光和水射流切割的工件尺寸偏差要比火焰切割和等离子弧切割的尺寸偏差还可提高一个数量级。

第 18 章　焊接工作的劳动保护

焊接防护是保障焊接作业人员的安全和健康，提高焊接质量与劳动生产率，实现安全生产的重要方面。焊接劳动保护要贯彻预防为主的方针。采用一种新工艺、新技术，必须同时考虑安全和劳动卫生措施。

焊接工作的劳动保护主要包括设备安全技术和焊接劳动卫生与防护等两个方面。

1　设备安全技术

1·1　电气安全技术

(1) 电焊机空载电压必须符合现行相应焊机标准规定的限值。如果有超过限值的，焊机必须采用空载自动断电装置。

(2) 等离子弧切割电源空载电压高，应尽量采用自动切割并加强防触电措施。

(3) 普通电焊机不能在气温过高或过低、气压过低、湿度过大以及腐蚀性或爆炸性等特殊环境中工作。如需要在这些特殊环境中进行焊接时，必须使用特殊性能的焊机或采取相应的防护措施。

(4) ≥20kV 电子束设备，应有铅屏防护或遥控操作。定期检查设备的放射性（≤2.0mR/h）。

(5) 电焊机必须装有独立的电源开关，其容量应符合要求并有过载保护装置。

(6) 焊机外壳应接地，禁止用氧气管道和乙炔管道等作接地极，防止产生火花而引爆。

(7) 焊机裸露带电部分和转动部分必须有安全保护罩。

(8) 以高频引弧或稳弧时应对电缆进行屏蔽。

版权

超星公司制作 请尊重作者版权

(9) 电缆外皮必须完整，绝缘良好，绝缘电阻不得小于1mΩ。

(10) 电焊钳必须有良好的绝缘性和隔热能力。

1·2 气瓶安全技术

1. 氧气瓶 氧气瓶是用于贮存和运输氧气的高压容器，瓶内充装压力为14.71MPa，水压试验压力为22.06MPa。

(1) 氧气瓶应符合国家颁布的《气瓶安全监察规程》和TJ30《氧气站设计规范》(试行)的规定。应定期进行技术检查，气瓶使用期满和送检未合格者，均不准继续使用。氧气汇流排(站)输出的总管上应装有防止可燃气体进入的单向阀。

(2) 不得靠近热源，勿曝晒，距可燃气瓶、明火或热源应大于5m。

(3) 严禁沾染油脂，打开阀门时勿操作过快。

(4) 要有防振胶圈，且不使气瓶跌落或受到撞击。

(5) 应戴有安全帽，防止摔断瓶阀造成事故。

(6) 禁止使用氧气作为局部通风换气或用作试压和气动工具的气源。

2. 乙炔瓶 乙炔瓶是用于贮存和运输乙炔的压力容器，在15℃时的充装压力为1.52MPa，水压试验压力为5.88MPa。

(1) 乙炔瓶的充装、检查、储运等均应符合国家劳动总局颁布的《溶解乙炔气瓶安全监察规程》和《气瓶安全监察规程》规定。

(2) 在运输、装卸、使用时都应保持气瓶竖立放稳，严禁在地面上卧放并直接使用。必须使用卧放瓶时，先将瓶竖立静放20min后再连接乙炔减压器，然后使用。

(3) 缓慢开启瓶阀，不要超过一转半，一般情况只开启3/4转。

(4) 室内注意通气，防止乙炔泄漏。

3. 液化石油气瓶 用于贮存和运输液化石油气的气瓶最大工作压力为1.569MPa，水压试验为2.94MPa。

(1) 液化石油气钢瓶的制造和充装量应符合CJ31《液化石油气钢瓶标准》规定。

(2) 胶管和衬垫材料应采用耐油性材料，胶管耐压力不得小于最大工作压力的4倍。

(3) 勿曝晒，贮存室应通风良好，照明必须采用防爆灯具和开关，室内严禁明火。

(4) 瓶阀及管接头处不得漏气。注意丝堵、角阀丝扣的磨损、锈蚀情况，防止在压力下打出。

(5) 气瓶严禁火烤或用沸水加热。冬季可用40℃以下温水加热，不得靠近暖气片。使用中气瓶同明火与热源距离必须在5m以上。

(6) 采用液化石油气瓶集中供气的贮气瓶室和汇流排室的设计、管道设置应符合TJ16《建筑设计防火规范》以及TJ28《城市煤气设计规范》的规定。

2 焊接劳动卫生与防护

2·1 焊接有害因素

1. 焊接有害因素种类 焊接有害因素可分为物理有害因素与化学有害因素两大类。物理有害因素有电弧辐射、高频电磁场、热辐射、噪声及放射线等；化学有害因素有焊接烟尘和有害气体等。

2. 烟尘及有毒气体的成分

(1) 烟尘是由于熔化金属或金属化合物的蒸发、凝结和氧化而产生的，与所采用的焊接工艺方法和焊接材料关系较大，其强烈程度还与焊接规范或线能量有关。

(2) 工件表面存在的涂层或镀层（如含锌或铬），产生相应的有毒烟尘。

(3) 钢材的手工电弧焊，CO_2气体保护焊以及自保护焊丝电弧焊，烟尘是主要有害因素。烟尘中的主要成分是铁、硅、锰，主要毒物是锰。采用镀铜焊丝的气体保护焊、烟尘中尚存在毒物铜。采用低氢型焊条，烟尘中的主要成分和毒物尚有氟，特别是可溶性氟。

(4) 手工电弧焊的烟尘中含有较多量的Fe_2O_3，毒性不大，颗粒极细，约≤5μm，长期接触可能形成电焊工尘肺（铁尘肺）。

(5) 碳弧气刨时烟尘较大，其中还存在有毒成分铜（镀铜碳极引起）。

(6) 毒性气体以臭氧(O_3)和氮氧化物(NO_x，主要为NO和NO_2)为主，是由电弧的紫外线辐射作用于环境空气中的氧和氮而产生的。臭氧的浓度与焊接材料、保护气体和焊接规范有关。

(7) CO_2气体保护焊起弧时CO浓度较高，在封闭空间内焊接时应采取通风措施。

(8) 铝和铝合金氩弧焊，臭氧和氮氧化物是主要有害因素。熔化极氩弧焊的臭氧浓度最高。其他非铁金属（铜、铅、镍、镁及其合金等）的氩弧焊，尚存在相应金属烟尘的有害因素。

(9) 一般而言，烟尘越多，电弧辐射越弱，有毒气

体浓度越低；反之，电弧辐射越强，有毒气体浓度越高。

2·2　焊接卫生标准

1. 烟尘及有毒气体　按照 TJ36—79 规定，对车间空气中有毒物质的最高容许浓度作了限制，参照此规定，关于烟尘与有毒气体的焊接卫生标准列于表 6·18-1。

表 6·18-1　烟尘及有害气体的焊接卫生标准

烟尘和有毒气体		国家标准	国际标准	毒性
烟尘 (mg/m^3)	低害粉尘	10	10	弱
	氧化铁	10	10	
	氧化钙	—	5	
	锰及其化合物(换算成 MnO_2)	0.2	5	
	氧化锌	5	5	
	氟化物	1	2.5	
	镍	—	1	
	铬	—	1	
	砷化氢	0.3	0.5(砷)	
	铅　烟	0.03	0.2(铅)	
	铅金属、含铅漆料铅尘	0.05	—	
	汞	0.01	—	
	V_2O_5	0.1	0.1	
	铜	0.1	0.1	
	铬酸盐	0.1(Cr_2O_3)	0.1	
	氧化镉	0.1	0.1	
	银		0.01	
	铍	0.001	0.002	强
有毒气体 (10^{-6})	CO_2	—	4000	弱
	CO	30	50	
	NO	—	25	
	SO_2	8	5	
	NO_2	5	5	
	O_3	0.3	0.1	
	$COCl_2$(光气)	0.1	0.1	强

2. 高频电磁场

(1)高频辐射作业安全标准

工作频率适用范围：100kHz～300MHz

场强标准限值：电场强度 $E \leqslant 20V/m$

磁场强度 $H \leqslant 5A/m$

(2)甚高频辐射作业安全标准

工作频率适用范围：30～300MHz

场强标准限值：$(PW)50\mu W/cm^2$(脉冲)

$(CW)25\mu W/cm^2$(连续)

3. 放射性物质

根据国标 GBJ8—74 规定的几种基本射线最大允许剂量见表 6·18-2。

表 6·18-2　几种基本射线的最大允许剂量

辐射种类	最大允许剂量(R/d)
X 射线与 γ 射线	0.05
β 粒子与电子	0.05
α 粒子	0.005
热中子	0.01
快中子	0.005

2·3　焊接卫生措施

1. 焊接材料方面

(1) 选用低尘、低毒电焊条。通过调整焊条药皮成分，在保证焊条基本性能的条件下，尽量降低加入药皮材料中烟尘及有毒气体的发生量，如低毒低氢型焊条，控制发尘量和氟、锰含量；不锈钢低尘低毒焊条，控制烟尘中可熔性铬的含量。

(2) 在焊条标准中作出规定，限制各类焊条发尘量不允许超过规定的最大值。

(3) 采用低尘药芯焊丝。

2. 焊接工艺方面

(1) 提高焊接机械化、自动化程度。这不仅提高了焊接生产效率与产品质量，而且有效地改善了劳动条件，减少了焊接烟尘和有害气体对操作者的危害。

(2) 推广采用单面焊双面成型工艺。容器、管道采用这种工艺，可避免操作者在狭窄空间内施焊，极大地改善了劳动卫生条件。

(3) 推广采用重力焊工艺。重力焊又称滑轨式焊接工艺，这种焊接一般是采用专用的铁粉型高效长焊条，一人可同时操作 2～10 台重力焊装置，既提高了焊接效率，又改善了劳动条件。

(4) 氩弧焊工艺中，可在氩气中加入少量的一氧化氮，施焊时两者可发生反应，使电弧周围的臭氧含量降低。等离子弧切割中，提高电压，降低电流，可降低臭氧浓度。

(5) 采用水槽式等离子弧切割台，或采用水弧切割，即以一定角度和流速的水均匀地向等离子弧喷射，上述方法可使部分烟尘及有害气体溶入水中，减少作业场所污染程度。

(6) 扩大压焊使用范围。压焊如电阻焊、摩擦焊、

越星公司制作 请尊重作者版权

超星公司制作请尊重作者版权

真空扩散焊等，对环境的污染较小，且焊接质量好，易于实现焊接自动化作业。

3. 通风措施方面 通风是改善熔焊劳动条件的重要措施。除焊接车间的设计要考虑达到全面通风条件良好外，还可采取局部通风的措施，例如：采用排烟罩、排烟焊枪、轻便小型风机和压缩空气引射器等方法。采用局部通风时，焊接工地附近的控制风速建议为30m/min，这一风速不致破坏焊接气体保护效果。

(1) 当焊工作业室内的高度低于3.5～4m或每个焊工工作间小于200m³时；当工作间(室、舱、柜等)内部结构影响空气流动时，而且焊接作业点的烟尘及有害气体浓度超过国家标准时，应采取全面通风换气措施，保持每个焊工有57m³/min的通风量。

(2) 在狭窄局部空间内焊接、切割时，应进行局部通风换气。局部排风系统一般是由排气罩、风管、净化装置和风机等组成。采用局部通风换气应防止焊接空间积聚有害和窒息气体，同时应有专人负责监护工作。

(3) 在焊接、切割工作时，如遇到粉尘和有害气体无法采取通风措施时，应采用送风呼吸器。

4. 个人保护措施 为保护劳动者的安全与健康，必须佩戴个人防护用品。

(1) 焊工佩戴的个人防护用品主要有工作服、工作帽、电焊面罩(或送风头盔)、护目镜、电焊手套、口罩、绝缘鞋、鞋套、套袖等。进行高空焊接作业时，还需佩戴安全帽、安全带等。

(2) 焊工所佩戴的防护用品必须是符合国家标准的合格产品。

第19章 胶 接[75][76]

胶接是利用胶粘剂起连接作用的一种连接方法。同焊接、机械连接(铆接、螺栓连接)统称为三大连接技术。利用胶粘剂胶接必须通过化学或物理方法使胶粘剂固化，才能获得足够强度的胶接接头。化学方法是通过固化剂或一定条件使胶粘剂聚合、交联固化。物理方法固化有乳胶液的凝聚、溶剂的挥发、熔融体的冷却等。

1 胶接的特点

(1) 可连接金属、木材、工程塑料、复合材料及陶瓷等材料，甚至于各种不同材料之间也可相互连接

(2) 接头为面际联接，应力分布均匀，减少了薄板结构由于焊、铆、螺栓连接引起的应力集中和局部翘曲，可大幅度地提高疲劳寿命。

(3) 接头密封性好。采用胶—焊、胶—铆、胶—螺等复合连接可以提高接头承载能力和密封性。此外，接头还具有绝缘、防腐等特点。

(4) 在大批量生产中可节省工时，降低成本(约20%)。

(5) 工艺过程易实现机械化和自动化。

胶接接头缺点是：耐老化性、耐高温性和耐溶剂性比较差；胶接质量比较难于检查；胶接强度的分散性比较大；胶接工艺的控制要求也比较严。

2 胶粘剂

(1) 主要胶粘剂的特点、性能和用途见表6·19-1，其余参见工程材料卷第8篇5章。

(2) 各种胶粘剂均有一定的贮藏期(一般半年至一年)，应在避光和较低温度下贮藏。

表6·19-1 主要胶粘剂的特点、性能和用途

分类	类型	牌号	特点	用途	接头性能 (MPa)
结构胶	环氧-丁腈	自力-2	弹性及耐候性良好，耐疲劳 使用温度：-60～100℃ 固化条件：160℃，2h	可胶接金属、复合材料及陶瓷材料	铝合金，抗剪强度 -60℃>30 20℃>27 100℃>9 不均匀扯离 20℃>55kN/m 钢，抗剪强度 20℃>38 铜，抗剪强度 20℃>33 复合材料，抗剪强度 20℃>10

（续）

分类	类型	牌号	特点	用途	接头性能 (MPa)
结构胶	酚醛-丁腈	J-03	弹性及耐候性良好，耐疲劳 使用温度：−60～150℃ 固化条件：160℃、3h	可接金属、陶瓷及复合材料	铝合金，抗剪强度 −60℃>37 20℃>29 150℃>9 不均匀扯离 20℃>90kN/m 钢，抗剪强度 20℃>20
	环氧-丁腈	HS－1	强度、韧性好 使用温度：−40～150℃ 固化条件：130℃、3h	可胶接金属和非金属	铝合金，抗剪强度 −40℃>18 20℃>20 150℃>15 不均匀扯离 20℃>26kN/m
	酚醛-缩醛-有机硅	204	耐湿热溶剂 使用温度：20～200℃ 固化条件：180℃、2h	可胶接金属、非金属及复合材料	铝合金，抗剪强度 20℃>17 100℃>18 钢，抗剪强度 20℃>23 200℃>16
修补胶	环氧-改性胺	JW-1	耐湿热，固化温度低 使用温度：−60～60℃ 固化温度：20℃、24h	可修补陶瓷、复合材料及工程塑料	铁，抗剪强度 20℃>29 45钢，抗剪强度 20℃ 26 黄铜，抗剪强度 20℃ 18 复合材料，抗剪强度 20℃ 材料破坏
	环氧-丁腈-酸酐	J-48	耐湿热、耐介质 使用温度：−60～170℃ 固化温度：25℃、24h	可修补陶瓷、复合材料及工程塑料	铝合金，抗剪强度 20℃>18 170℃>6 剥离 20℃>3kN/m
点焊胶	环氧-改性胺	425	流动性好，耐介质 使用温度：−60～60℃ 固化温度：130℃、3h	铝合金的先点焊后注胶，也可先注胶后点焊	铝合金，抗剪强度 −60℃>19 20℃>19 60℃>19 不均匀扯离 20℃>39
	环氧-丁腈-胺	KH-120	耐疲劳性好、耐介质好 使用温度：−55～120℃ 固化温度：150℃、4h	适于铝合金先点焊后注胶	铝合金，抗剪强度 −55℃>15 20℃>20 120℃>14 不均匀扯离 20℃>30kN/m
螺栓锁固胶	双甲基丙稀酸多缩乙二醇酯	Y-150	较高锁固强度慢固化厌氧胶 使用温度：−55～150℃ 固化温度：25℃、24h	适于各种材质螺纹件的固紧与密封防漏	M10 螺栓破坏扭矩 20℃>33N·m −55℃>8N·m 铝合金抗剪强度 150℃>9
	双甲基丙稀酸多缩乙二醇酯	GY-230	较高不锈固强度 使用温度：−55～120℃ 固化温度：25℃、24h	适于M12以下螺纹件固紧与密封防漏及零件装配后注胶填充固定	M10 螺栓破坏扭矩 −50℃>38N·m 120℃>9N·m 45钢，抗剪强度 20℃>10N·m
高温胶	氧化铜-磷酸	无机胶	耐高温、耐介质、脆 使用温度：−60～700℃ 固化温度：室温 24h，60℃、80℃各 0.5h、100℃、1h	适于套接压、拉剪接头	钢，套接压抗剪强度 20℃>100 700℃>40 套接拉抗剪强度 −60℃>80 20℃>80

超星公司制作 请尊重作者版权

超星公司制作请尊重作者版权

（续）

分类	类　型	牌号	特　点	用　途	接头性能　(MPa)
高温胶	有机硅-填料	KH-505	糊状非结构耐高温胶 使用温度：−60～400℃ 固化温度：270℃、3h	适于钢、陶瓷等非承力结构的胶接如螺栓、小轴、螺钉的紧固	钢，抗剪强度20℃＞9 425℃＞4 持久性能：425℃切应力1.5MPa作用下30h试样未破坏
	双马来酰亚胺改性环氧	J-27H	耐热耐介质 使用温度：−60～250℃ 固化温度：200℃、1h	适于石墨、石棉、陶瓷及金属材料的胶接	铝合金，抗剪强度−60℃＞22 20℃＞23 150℃＞24 250℃＞15
导电胶	环氧-固化剂-银粉	SY-11	双组份导电胶，性脆 使用温度：−55～60℃ 固化温度：120℃、3h 或　80℃、6h	适于各种金属、压电陶瓷、压电晶体等导体的连接	铝合金，抗剪强度20℃＞16 体积电阻率$1.25\times10^{-5}\Omega\cdot m$

3　胶接工艺

胶接施工场地应清洁、空气湿度≤75%、温度15～25℃。

3·1　表面处理

目的在于清除表面污物、增加表面能和表面积。对金属包括预清洗、除油、机械处理、化学处理等工序（接头强度要求不高时，可省去化学处理等工序）；对非金属，一般只进行机械处理、溶剂清洗两工序；对个别低能表面还需用腐蚀法、辐照法、放电法等。

1. 预清洗　一般用汽油浸、刷去污垢，或用除漆剂去漆。

2. 除油　按零件批量大小，选用有机溶剂（丙酮、信那水、乙酸乙酯等，最好用三氯乙烯蒸汽浴处理）、碱溶液（氢氧化钠、碳酸钠、碱性硅酸钠、偏磷酸钠）或超声波法（针对复杂构件细缝、死角）除油。

3. 机械处理　用机械加工、喷砂、砂轮或钢丝刷、刮擦等方法除掉金属表面的旧氧化膜或锈、并使表面粗糙。处理后的表面，应再次用有机溶剂清洗。

4. 化学处理　常用的方法见表6·19-2。

5. 涂底胶　不仅改善胶接性能，还有保护和防腐底漆的作用。

化学处理后应保持清洁与干燥并尽快涂胶。

表6·19-2　常用材料的表面化学处理方法

材料	化学处理剂		处理工艺
铝合金	浓硫酸 重铬酸钾 水	10份 1份 30份	60～65℃处理10～15min，用流动水冲洗至中性，放入60～70℃干燥箱中不超过1h
	铬酸阳极化处理 铬干	50～55g/L	阴阳极面积比1∶10～1∶5，电压10min从0～40V，保持30min，温度40±2℃，水冲洗
铁或碳钢	浓磷酸 工业乙醇	1份 1份	60～65℃浸10min或室温浸泡100min，水冲洗、烘干
不锈钢	浓盐酸 过氧化氢30%① 甲　醛40%① 水	52g 2g 10g 45g	65℃处理10min，水冲洗、烘干
锌及锌合金	浓盐酸（或水醋酸） 水	10～20份 80～90份	15～20℃浸2min，温水冲洗，60～70℃干燥20min
铜及铜合金	三氯化铁42%① 浓硝酸 水	18份 32份 200份	15～20℃浸1～2min，水冲洗、烘干

① 皆为质量分数。

（续）

材料	化学处理剂	处理工艺
钨及钨合金	浓硝酸 30g 氢氟酸 5g 水 15g	15～20℃浸蚀1～5min，水冲洗，70～80℃烘干
氟塑料	钠—萘处理剂 辐照接枝或等离子体处理	浸15min以上，用丙酮清洗晾干
聚乙（丙）烯塑料	浓硫酸 300g 重铬酸钾 13g 水 24g	15～20℃浸1～1.5h或70℃浸15～30min，水冲洗、干燥
	冷等离子体处理	功率400W，时间20min
橡胶	异丙醇或甲醇	木锉打磨，擦洗2～5min，水冲洗、烘干
	浓硫酸	浸泡5min，水冲洗干燥

3·2 预装配

预清洗后，要预装检查，以保证胶接面良好接触。

3·3 胶粘剂准备

按技术条件或产品使用说明书配制胶粘剂。调配室温固化胶粘剂应注意适用期和配胶量，各组份要充分调合均匀，涂胶后应立即搭合。

3·4 涂胶方法

随胶粘剂的种类而异，分述如下：

1. 液体（或溶剂型）胶粘剂 采用刷胶、喷胶、浸胶、注胶、辊胶和漏胶等方法：

a. 刷胶 用毛刷涂胶。适用于较稀胶液及复杂零件。多层涂胶时，为使溶剂挥发尽，第一层涂胶要薄。

b. 喷胶 使用喷枪喷胶，适用于稀胶液。胶层薄而均匀，效率较刷胶快5～10倍。多层喷胶时，第一层胶要薄。喷胶时需通风良好。

c. 浸胶（或称蘸胶） 适用于铆钉、螺钉或圆棒、板材端部涂胶。

d. 注胶 用"注胶器"将胶液注入搭接缝边缘，通过毛细管作用充满接头间隙，如图6·19-1，该法适用于长条胶缝。

e. 辊胶 用胶辊涂布，适用于中粘度的胶液，质量好，效率高。

f. 漏胶 在机械化条件下进行，效率高，如图6·19-2。胶条的数量、间距、宽度和厚度均可控制。

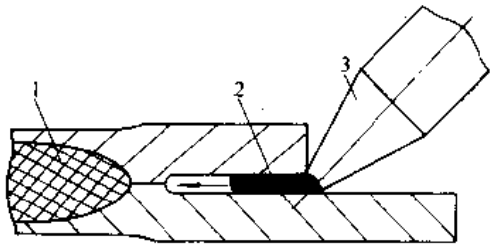


图6·19-1 点焊后注胶示意图

1—焊核 2—胶粘剂 3—注胶器

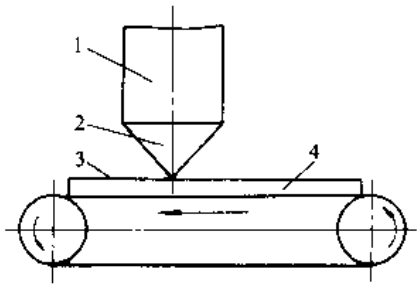


图6·19-2 漏胶示意图

1—贮胶缸 2—漏胶嘴 3—胶条 4—工件

2. 糊状胶粘剂 用刮刀或橡胶刮板刮胶，适用于涂填补胶或大面积涂胶。

3. 固体胶粘剂

a. 胶膜 在胶接面上，先刷底胶再敷贴胶膜。敷贴时要防止裹进空气，形成气泡。胶膜适用于大面积涂胶，胶膜厚度0.15～0.45mm。

b. 热熔胶粘剂 用热压缩空气，将熔融的热熔胶粘剂喷射于事先加热的涂胶表面上，或将热熔胶粘剂加工成所需形状，贴在涂胶面上，搭合、加压并加热使胶粘剂熔融。还可将热熔融胶粘剂加工成条状件，借助于热空气流填补在待胶接的部位上。

对于含有溶剂的胶粘剂，均应在一定温度下停放晾置一定时间，使溶剂彻底挥发，避免加热固化时，胶层出现气泡。为使溶剂尽量挥发，还规定了涂胶次数。

3·5 固化

胶层固化应控制温度、时间、压力三个参数。固化后缓冷，能减小内应力和变形，这对胶接薄件，或热膨胀系数不同的零件更为重要。

常用的加热、加压方法如下：

加热可用电热板、蒸汽加热板、远红外线加热箱，感应加热等。

加压方法取决于胶接件的大小、形状和设备情况。

鲍星公司制作 请尊重作者版权

平面胶接可用压机、杠杆加压器，简单小件可用弓形夹具，形状复杂件可用真空袋或借助于热压釜及专用夹具，见图 6·19-3。

此外，还有用紫外线、电子束等辐照固化的新工艺。

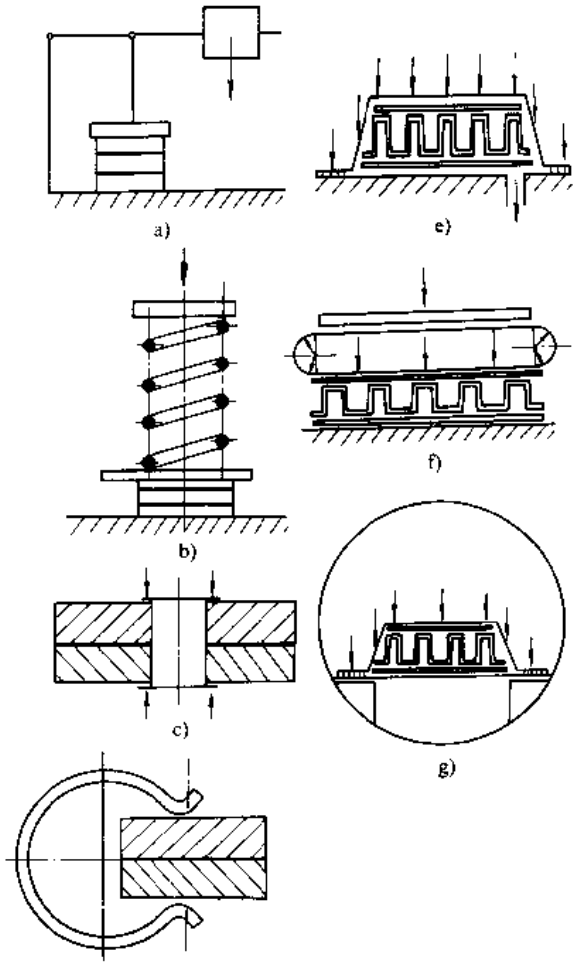


图 6·19-3　装配件的加压方法

a）杠杆加压　b）弹簧加压　c）空心铆钉　d）弓形夹加压　e）空心袋法　f）密封加压袋　g）热压釜法

3·6　机械加工

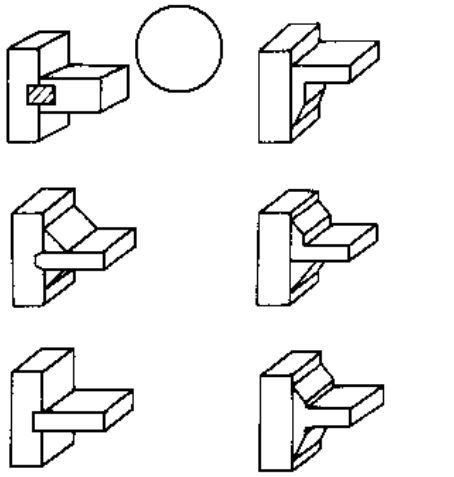
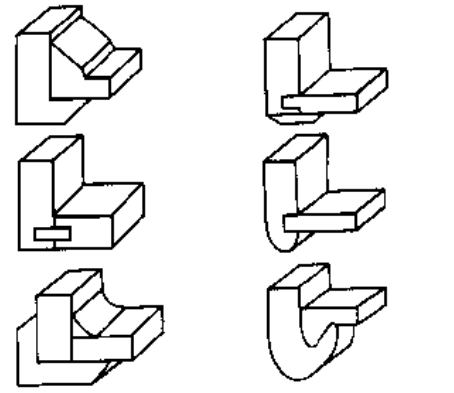
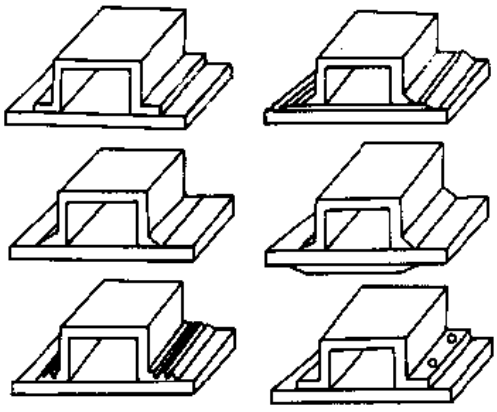
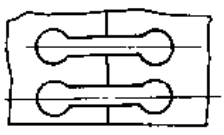
胶接件固化后，可机械加工，但应控制切削力及切削温度。

4　接头形式

常用典型接头形式见表 6·19-3。接头形式必须考虑：（1）尽量不用夹具而能保证装配的定位及间隙；（2）尽量使接头承受均匀拉扯力、剪切力，避免受剥离力、不均匀扯离力和劈裂力；（3）胶接接头承受冲击能力较弱，必要时应采用韧性胶粘剂。

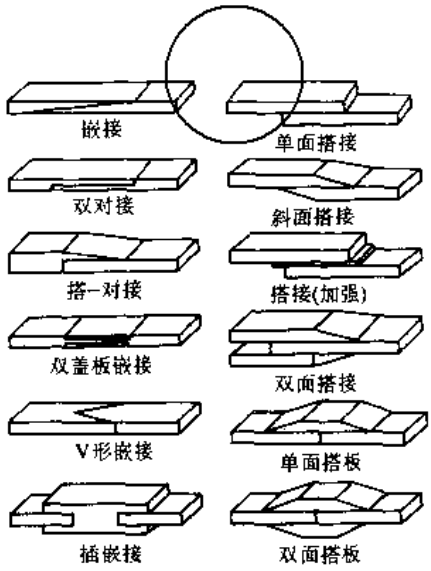
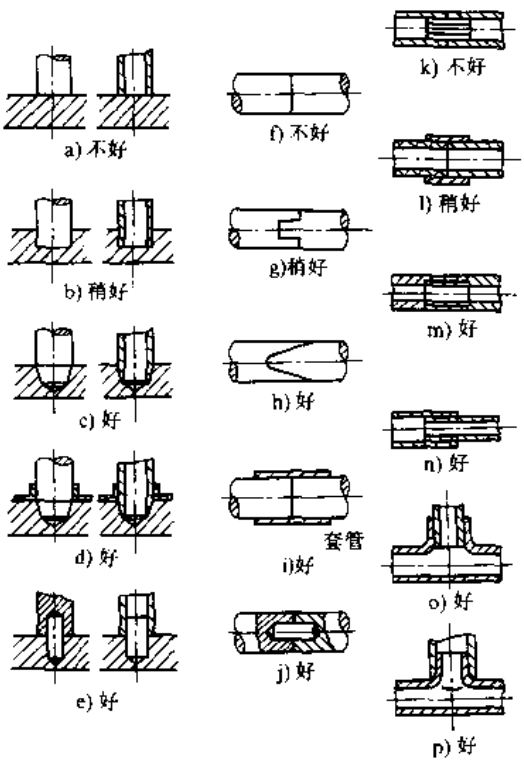
对于复合材料的胶接接头形式，还要考虑增强相方向与分布形式，尽量使增强相横断面垂直于胶接面。

表 6·19-3　典型胶接接头形式

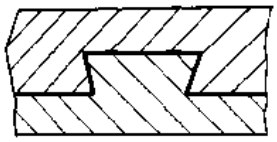
接头形式	简　图
T形	
L形	
Π形	
骨形键	

版权所有 侵权必究

（续）

接头形式	简图
板材	
棒管	

（续）

接头形式	简图
燕尾槽	

5 胶接件质量检验

1. 用肉眼或放大镜检查胶缝中挤出的胶液 如沿整个胶缝形成均匀胶瘤，表明固化压力均匀，涂胶量适当；如胶液仅局部挤出或全部没有挤出。表明胶层薄或压力不均匀；如挤出的胶液有气泡，表明涂胶后晾置时间短，或室温低，溶剂挥发不彻底。

2. 用木制或尼龙小锤敲击胶合处 清脆的音响回声表明胶接质量良好，沉闷的回声则表明胶层有缺陷。

上述两种方法只能作定性判断，不能确定具体的脱胶范围和程度。

3. 超声波探伤法、声阻法、激光全息照相、液晶法 可定量判断。在要求胶接质量极高的情况下，还要做部件破坏性抽验，或随产品在同样条件下做随炉试验件。然后对试验件作各种破坏性试验。

6 胶接与胶补应用举例

常用材料的胶粘剂选择见表 6·19-4。

6·1 量刃具上的应用

1. 接长钻头、丝锥柄（图 6·19-4） 可保证 0.01～0.02mm 同心度。这种套接接头可采用无机胶粘剂，胶层厚度为 0.1～0.2mm。

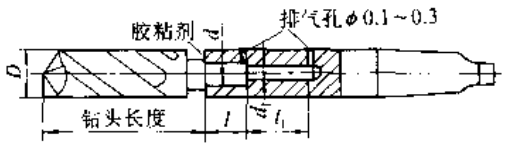


图 6·19-4 胶接接长钻头

$d=0.6\sim0.7D$，$d_1=d-(2\sim6mm)$

$l=1.5\sim2D$，$l_1=10\sim20mm$

2. 胶接刀头 采用无机胶粘剂胶接与机械夹固相结合的连接方法。将陶瓷、硬质合金高速钢刀头连接到车刀杆、铰刀杆、铣刀盘等刀体上。

版权所有 侵权必究

超星公司制作 请勿重作者版权

表 6·19-4　常用材料的胶粘剂选择

被胶接材料	聚醋酸乙烯	乙烯—醋酸乙烯聚合物	氰基丙烯碳酸	聚丙烯酸酯	脲醛	不饱和聚酯	环氧	环氧丁腈	酚醛—缩醛	酚醛—丁腈	酚醛—氯丁	氯丁橡胶	聚氨脂	有机硅	聚酰亚胺	无机胶
金　属		△	+	+		+	++	++	++	++	△	△	+		+	+
陶瓷、玻璃			+	+		△	+	++	+	++			+	+	+	++
复合材料			+	+		+	++	++	++	++	+	+	++		++	+
工程塑料			+	+			+						+			
橡　胶			+				+	++	+	++	++	−+	+			
混凝土					++	+	+	+				+	+			
木　材	++	+				△						+	++			
皮　革	+	△	+				△						++			
织　物	++	+				△	△						++			

注：++——优；+——好；△——可以。

3. 量具（柄量规）的胶接　可采用无机胶粘剂或有机胶粘剂连接光面塞规与手柄，代替锥度配合。

4. 内磨砂轮　采用无机胶粘剂胶结效果良好。

6·2　机床导轨面的胶接及胶补

1. 导轨面的胶接　把玻璃钢板胶接在机头导轨的一个面上，能使金属导轨面寿命提高1～4倍。图6·19-5a是用埋头螺钉将玻璃钢板的端部固定在龙门刨工作台底面，中间用胶接。图6·19-5b是将玻璃钢板胶接在车床溜板底面上。

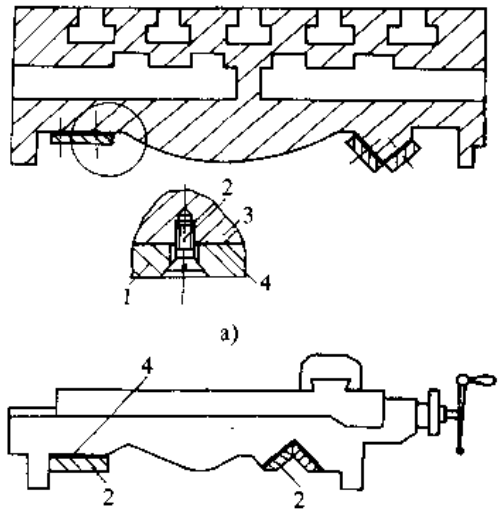


图 6·19-5　导轨的胶接

a）龙门刨床大拖板　b）车床走刀架

1—玻璃钢板　2—螺钉　3—导轨　4—胶粘剂

2. 导轨面的胶补　采用室温固化胶粘剂或中温固化胶粘剂，加二硫化钼，可胶补车床溜板导轨面、车床尾座导轨面、卧式铣床中心架导轨面以及其他机床导轨面。

3. 锁固　防松及防漏的螺钉、螺帽用厌氧胶锁固，可防止螺钉、螺帽松动。对管道螺纹接头的耐压密封、平面法兰接合面的紧固，轴承的固定等均可采用胶接防松、防漏和锁固。

4. 模具的胶接　整体结构的模具既加工困难又浪费材料。用胶接镶拼制造模具，可简化工艺过程。图6·19-6为落料模胶接示意图。

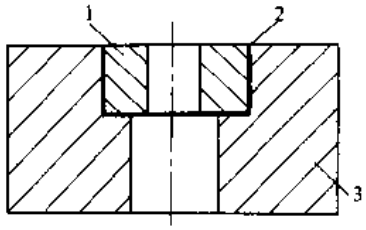


图 6·19-6　落料模胶接

1—凹模　2—胶粘剂　3—凹模定板

6·3　汽车、拖拉机上的应用

1. 摩擦片、制动带的胶接　石棉刹车带与钢制刹车蹄胶接，可提高刹车带使用寿命，又降低应力集中，

鲍星公司制作 请尊重作者版权

使用效果良好。

2. 风挡玻璃的胶接 引进汽车生产线要求可直接用于风挡玻璃与胶条和涂漆钢板的粘接，对湿气敏感、固化速度快，固化后弹性好。

3. 车身焊缝和点焊缝的密封 前者可在电泳底漆涂敷后使用，随面漆烘干硬化。后者在车身钢板点焊缝填充用。

4. 防震底涂胶 用于车底部和翼子板内壁抗石击防震防腐涂料。

5. 气缸体水套外壁裂纹的胶补 沿裂纹开浅槽，并在裂纹末端钻直径3～5mm的止裂孔用铁钉蘸胶将止裂孔堵塞。先涂上一层胶粘剂后，再敷上二三层中间涂胶的玻璃布，如图6·19-7。

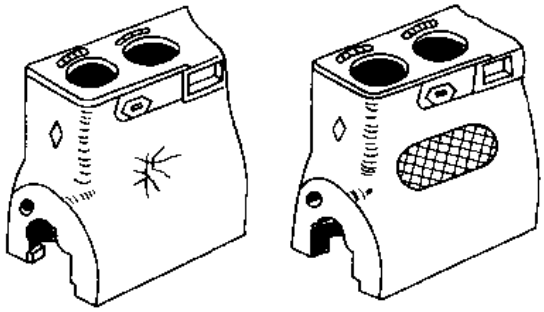


图6·19-7 发动机气缸体裂纹的胶补

6·4 恢复零件尺寸

1. 镶件 将零件的破损部位扩孔或开槽，然后胶接镶件，如图6·19-8。

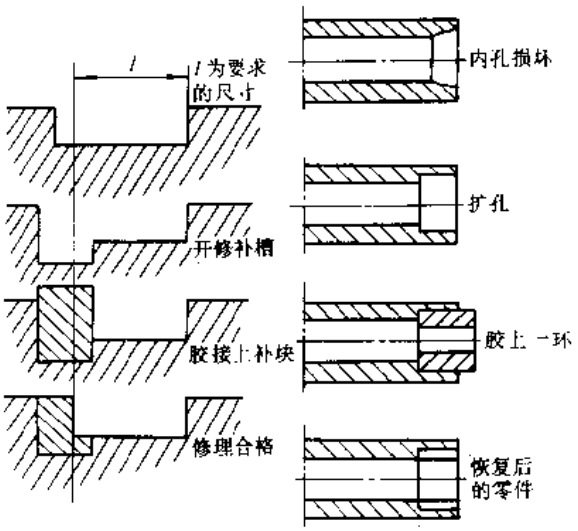


图6·19-8 镶件

2. 恢复轴、瓦片尺寸 轴的滑动面与轴套配合，表面摩擦系数要小，则在胶接剂中加二硫化钼；轴与轴承紧配合面，要求表面硬度高，在胶粘剂中加铁粉。

瓦片尺寸恢复是先镗瓦片、消除椭圆和锥形，加热到200℃，敷上420胶膜，排出气泡，加热固化，最后按轴的尺寸加工。

6·5 铸件缩孔、气孔、砂眼等缺陷的胶补

在胶粘剂中加入铁粉、石英粉，用刮板添补在缺陷部位，或在气孔处扩孔，用胶接的方法镶入塞子，对于穿透性缩孔，可用真空吸胶法，如图6·19-9。

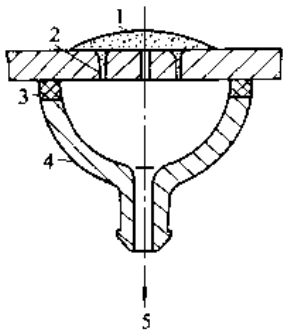


图6·19-9 真空抽吸胶法

1—胶粘剂 2—穿透性缩孔 3—橡胶密封垫 4—真空杯 5—抽真空

6·6 航空、航天飞行器上的应用

飞机及卫星等飞行器广泛采用胶接技术（特别是胶接蜂窝夹层结构），减轻了飞行器重量。

蜂窝夹芯用机械化漏胶法涂胶、固化、拉伸、形成蜂窝格子，再与蒙皮胶接，组成夹层结构。直升飞机旋翼的胶接如图6·19-10。

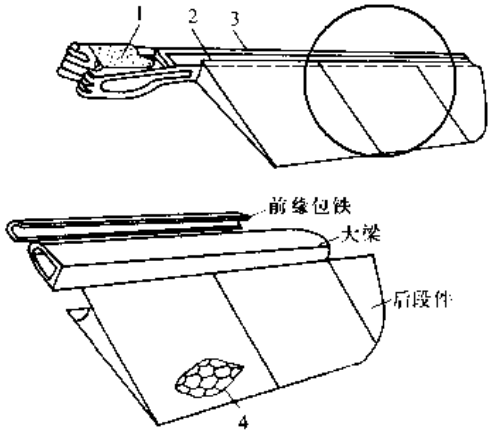


图6·19-10 胶接旋翼

1—梳状接头与大梁胶接、胶-自由钉联接 2—后段件与大梁胶接 3—前缘包铁与大梁胶接 4—胶接蜂窝结构

超星公司制作 请尊重作者版权

6·7 胶-铆和胶-螺钉连接

可提高接头密封性，减小应力集中，提高疲劳强度，防止接头产生不均匀扯离、剥离、劈裂力。

在已固化的胶接部件上，安装铆（螺）钉。其工艺程序有两种：(1)预装—定位—钻孔—涂胶—固化—铆（螺）接。胶粘剂应选用韧性较高的结构胶；(2) 预装—定位—钻孔—涂胶—铆（螺）接—固化。后者工艺较简单，固化时可利用铆（螺）钉压力，不用另行加压。但胶膜厚度不易控制，甚至欠胶。

6·8 胶接-点焊

航空工业中应用胶接-点焊代替铆接，提高了接头密封性、疲劳寿命，并消除了接触腐蚀。其工艺是：先点焊，然后注胶，或先涂胶再点焊。胶接-点焊比单纯点焊或胶接的疲劳拉伸强度高（表 6·19-5）。

表 6·19-5 点焊—胶接性能比较

接头连接形式	疲劳强度（MPa）
点　　焊	45
胶　　接	65
胶接—点焊	75

注：试样规格。

材料：铝合金，搭接长度 20mm，厚度 1mm，焊点直径 5mm，宽度 25mm。

7 安全技术

大多数胶粘剂由有机物质组成，部分胶粘剂还含大量有机溶剂。操作中，微量胶粘剂和绝大部分有机溶剂要散发在空气中，对人体呼吸系统有不同程度的刺激，部分有机溶剂和化学试剂对皮肤有腐蚀作用，而且有些物质还有毒性。因此，施工厂房应有良好的通风。操作者应穿工作服，调胶和涂胶时，要带胶皮手套。

有机溶剂极易燃烧，施工厂房严禁明火，由有机溶剂引起火灾，要用泡沫灭火器、砂等扑灭，不得用水。

工作场所不得进食和吸烟。

参 考 文 献

[1] 夏丕旭．国外大型拼焊结构的设计与制造技术．世界机械工业．1986.1 (1)

[2] 林尚扬．焊接过程的低成本自动化：背景·现状·问题·措施．见：中国焊接：焊接学会三十周年纪念文集．1992.5．北京

[3] 张文钺主编．金属熔焊原理及工艺（上册）．北京：机械工业出版社，1990

[4] 松田福久．溶接冶金学，工刊工業新聞社，1972

[5] 周振丰，张文钺合编．焊接冶金与金属焊接性．北京：机械工业出版社，1988

[6] 张文钺著．焊接物理冶金．天津：天津大学出版社，1991

[7] 张文钺等编．焊接工艺与失效分析．北京：机械工业出版社，1989

[8] 中国机械工程学会焊接学会编．焊接手册第五卷：焊接结构．北京：机械工业出版社，1992

[9] 田锡唐主编．焊接结构．北京：机械工业出版社，1982

[10] Винокуров В А. Сварка в машиностроении. Машиностроение, 1978

[11] Винокуров В А, Григорьяни А. Г. Теория сварочных деформаций и напрянсении. машиностроение, 1984

[12] Schimmoller H A, Ruge J L. Estimation of Residual stresses in Reactor Pressure Vessel steel specimens Clad by Stainless Steel Sstrip Electrodes Int. Conf. In: on Residual Stresses in Welded Construeture and Thier Effects. London, 1977

[13] R uge J L. Handbuch der Schweisstechnik Band I. Springer, 1980

[14] H ansch H. Schweisseigenspannungen und Formanderungen an Stabartigen Bauteilen Berechnung und Bervertung. VEB, 1984

[15] Hrivnak I, Yushenko K A. Principles of Mechanical Stress Relief. Treatment. In: Proceedings of the Int. Welding Conf. Sofia, 1987

[16] 朱文华，刘俊湖，陈亮山．16 吨汽车吊臂的爆炸消除应力处理．见：锅炉压力容器安全，爆炸消除残余应力专辑，1989

[17] Николаев Г А. Сварные конструкции. Высшая Школа, 1990

[18] (日) 增淵兴一．焊接结构分析．张伟昌等译．北京：机械工业出版社，1985

[19] 美国金属学会主编．金属手册 第 6 卷 (1971) 原书第 8 版．北京：机械工业出版社，

1984

[20] American Welding Society. Welding Handbook Seventh Edition. Vol. 1. 1976

[21] American Welding Society. Welding Handbook Seventh Edition, Vol. 2. 1978

[22] Патон Б Е. Электрошлаковая Сварка и Наплавка Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ. Машиностроение, 1980

[23] Cary H B. Modern Welding Technology. IMC. Englewood Cliffs, 1979

[24] Tamsic M. Keyhole Plasma Arc Welding of Aluminium with Variable Polarity Power. Welding Journal, 1984 (2)

[25] Патон Б Е. Микроплазменная Сварка. Киев: Наукова Думка, 1974

[26] 周大中等. 单电源等离子—MIG 焊方法. 焊接学报. 1990. 11 (3)

[27] 赵熹华主编. 压力焊. 北京: 机械工业出版社, 1989

[28] (苏)奥尔洛夫主编. 接触焊工艺和设备. 陈幼松译. 北京: 国防工业出版社, 1980

[29] (日)浜崎正信. 搭接电阻焊. 尹克里等译. 北京: 国防工业出版社, 1977

[30] 李致焕等. 冷压焊中原子扩散行为的试验研究. 焊接学报. 1991. 12 (1)

[31] 河北工学院金工教研室. 电气工程中铝铜焊接技术. 北京: 机械工业出版社, 1978

[32] 美国焊接学会编. 焊接手册 第 3 卷: 焊接方法. 北京: 机械工业出版社, 1986

[33] (苏)卡扎柯夫著. 材料的扩散焊接. 何康生译. 北京: 国防工业出版社, 1982

[34] Owczarski W A. Application of Diffusion Welding in the USA. Welding Journal. 1981 (2)

[35] 郑哲敏, 杨振声. 爆炸加工. 北京: 国防工业出版社, 1981

[36] 邵丙璜, 张凯. 爆炸焊原理及工程应用. 大连: 大连工学院出版社, 1987

[37] 埃拉兹著. 金属爆炸加工的原理与实践. 张延生等译. 北京: 国防工业出版社, 1981

[38] 沈世瑶主编. 焊接方法及设备 第 3 分册. 北京: 机械工业出版社, 1982

[39] 第一机械工业部天津设计院, 第六机械工业部第九设计院, 第六机械工业部设计室合编. 焊接设备选用手册. 北京: 机械工业出版社, 1974

[40] 中国机械工程学会焊接学会编. 焊接手册第 1 卷: 焊接方法及设备. 北京: 机械工业出版社, 1992

[41] The Welding Institute. Weld Surfacing and Hardfacing. Abington Hall Abington Cambrige CBI 6AI C, 1988

[42] American Society for Metals Handbook Committee. Metals Handbook. Welding, Brazing and Soldering. 9 ed. Vol. 6, 1983

[43] 中国机械工程学会焊接学会编. 焊接手册 第 2 卷: 材料的焊接. 北京: 机械工业出版社, 1992

[44] 闵成德. 使用铁基奥氏体钢焊条对耐热珠光体钢大型铸件的焊补, 汽轮机技术. 1981 (3)

[45] 钱昌黔. 耐热钢焊接. 北京: 水利电力出版社, 1988

[46] 周振丰主编. 金属熔焊原理及工艺 (下册). 北京: 机械工业出版社, 1981

[47] (美)席瓦尔兹. 金属焊接手册. 袁文钊等译. 北京: 国防工业出版社, 1988

[48] 上海发电设备成套研究所. 机电工程材料手册. 上海科技出版社, 1991

[49] 哈尔滨焊接研究所主编. 焊工手册. 北京: 机械工业出版社, 1991

[50] 杨建华编著. 铸铁焊补. 济南: 山东科技出版社, 1978

[51] 杨建华. 高球化稳定性低白口倾向的通用铸铁焊条的研究. 焊接. 1984 (9)

[52] 邹增大等. 白口铸铁轧辊焊补的研究. 济南: 山东工业大学学报. 1989 (4)

[53] 何康生, 曹雄夫编著. 异种金属焊接. 北京: 机械工业出版社, 1986

[54] Герман С И. Электродуговая сварка теплоустойчивых Сталей Перлитного Класса. Москва, 1963

[55] 刘中青等编著. 异种材料的焊接. 北京: 科学出版社, 1990

[56] 新成夫. 異種金属の溶接における問題について, 溶接学会誌. 1976. 45 (6)

[57] 虞觉奇等编. 二元合金状态图集. 上海科学技术出版社, 1987

[58] (苏)Б. А. 塔乌别尔著. 装配焊接夹具及机械

越星公司制作请尊重作者版权

装置．陈利华译．北京：机械工业出版社，1957.12

[59] 甘肃工业大学焊接教研室编．焊接机械装备图册．北京：机械工业出版社，1982

[60] Куркин С А，Ховов В М，Рыбачук А М. Технология механизации и Автоматизации Произво дства Сварных Конструкций АТЛАС. МОСКВА：Машиностроение，1989

[61] Куркин С А，Николаев Г А. Сварные Конструкции Технологии и Контроля качества в Сварочном Произво дстве. Высшая школа，1991

[62] 卢本等编．焊接自动化基础．武汉：华中工学院出版社，1985

[63] 赵家瑞，董挺合编．焊接自动控制基础．北京：机械工业出版社，1989

[64] 焊接自动化译文集编译组．焊接自动化译文集．北京：中国铁道出版社，1983

[65] Львов Н С，Гладков Э А. Автоматика и Автоматизация Сварочных Процессов. Москва：Машиностроение，1982

[66] 野村情一．アーク溶接用センサおよびセンサシステム．溶接技術．1985.6～10

[67] 郭振芹主编．非电量电测量．北京：计量出版社，1984

[68] 陈裕川．我国锅炉压力容器焊接技术的现状和发展趋势．石油化工设备．1987（11）

[69] 梅福欣，俞尚智．水下焊接与切割译文集．北京：机械工业出版社，1982

[70] 宋宝天．水下焊接与切割．北京：机械工业出版社，1989

[71] 林尚扬．2000年的焊接与连接．机械工程．1991，Vol.2（5）

[72] 浜崎正信．水中溶接．切断における安全衛生．溶接技術．1983（6）

[73] 孟昭光．我国热切割设备生产现状存在问题与发展战略的分析及建议，见：第六届全国焊接学术会议论文选集（第1集）．1990.5．西安

[74] （德）赫尔席柏格著．钢的热切割．黄石生译．广州：华南工学院出版社，1986

[75] 高学敏等编著．粘接和粘接技术手册．成都：四川科学技术出版社，1990

[76] 李宝库，钮竹安主编．胶粘剂应用技术．北京：中国商业出版社，1989

超星公司制作 请尊重作者版权