

精密铸造实用技术

原著 山屋洋树

编译 许云祥

(内部资料)

二〇〇二年五月

编译前言

日本著名精密铸造专家山屋洋树先生于 1990~1994 年在日本《铸锻造と热处理》杂志上连载 23 期发表了“精密铸造の基础と应用技术”一文，该文共分：蜡模成形、蜡模组装、陶瓷型壳制造、脱蜡、焙烧、熔炼浇注六讲，详细阐述了熔模铸造的基本原理、基础技术、操作要领、注意事项、可能产生的问题及如何防止等。1989 年山屋洋树先生在日本《JACTNEWS》杂志上发表了“精密铸造プロセスにおける铸造欠陥と関連要因”一文，详细阐述了精密铸造件缺陷产生原因及防止措施。1997 年山屋洋树先生在日本“サンピア多摩”组织“精密铸造特别讲习会”详细讲授了上述两文。该两文内容非常丰富实用，对我国精密铸造生产很有参考价值。为了便于阅读参考，特将该两文翻译整理，编译为：概述、蜡模制造、蜡模组装、陶瓷型壳制造、脱蜡、型壳焙烧、熔炼和浇注、精铸件缺陷分析共八章，取名《精密铸造实用技术》，打印成内部资料供参考。在编译过程中删去了某些图面不太清楚的图片和相应说明及个别阐述重复的内容，但基本内容尊重原著。限于编译水平，文中讹误之处难免，敬请批评指正。

本内部资料的编译得到了山屋洋树先生的理解，在此特向山屋洋树先生致以衷心感谢。

许云祥

二〇〇二年五月

目 录

第1章 概述	1
第2章 蜡模制造	3
2.1 蜡料及其种类	3
2.2 压蜡机	5
2.3 蜡料熔化和熟成调质处理	6
2.4 蜡模制作	7
2.5 蜡模检查与修正	10
2.6 蜡料再生及再生蜡的性能	11
2.7 水溶性蜡芯及其成形	13
2.8 样件蜡	16
2.9 应用例	16
第3章 蜡模组装	18
3.1 蜡模组的组装基准	18
3.2 蜡模组装作业	20
3.2.1 浇注系统的成形	21
3.2.2 密封处理	21
3.2.3 大型蜡模的组装	21
3.3 蜡模组装铸造方案	21
3.4 组装方案的改进	24
3.4.1 防止机械粘砂和改善表面粗糙度的措施	24
3.4.2 防止蜡模模组破损的措施	24
3.4.3 防止大型铸件变形的措施	25
3.4.4 改进脱蜡性、改善铸件表面质量的措施	25
3.5 组装技术的未来动向	25
第4章 陶瓷型壳制造	26
4.1 前言	26
4.2 陶瓷型壳制造过程	28
4.2.1 模组洗净处理	28
4.2.2 前处理	31
4.2.3 面层型壳涂挂	31
4.2.4 第二层型壳涂挂	47
4.2.5 背层型壳	49
4.3 涂料管理	60
4.3.1 硅溶胶涂料管理	60
4.3.2 硅酸乙酯涂料管理	64
4.3.3 涂料管理的自动化	65
4.4 陶瓷型壳系统的应用实例	65
4.4.1 打印机叉形盘芯铸件的制壳系统	65
4.4.2 厚壁的原子能铸件的制壳系统	66
4.4.3 大型精铸件的制壳系统	67

4.4.4	高尔夫球头的制壳系统	68
4.5	陶瓷型壳的再生回用	69
第5章	脱蜡	71
5.1	脱蜡方法及其特征	71
5.1.1	有机溶剂溶出法	72
5.1.2	熔融蜡中浸渍溶出法	72
5.1.3	热水脱蜡法	73
5.1.4	热冲击脱蜡法	73
5.1.5	微波脱蜡法	73
5.1.6	热砂脱蜡法	73
5.2	蒸汽釜脱蜡法及其操作顺序	74
5.2.1	蒸汽釜脱蜡法	74
5.2.2	脱蜡操作顺序	76
5.3	压力釜装置及其功能	77
5.4	脱蜡缺陷及其对策	77
5.5	微波脱蜡的自动化	78
第6章	型壳焙烧	79
6.1	型壳焙烧设备及其特征	79
6.2	型壳的烧成效果与型壳强度	80
6.3	浇注时的型壳准备和型壳温度条件	84
6.4	型壳焙烧中的问题和技术对策	85
第7章	熔炼和浇注	86
7.1	高频熔炼和脱氧处理	86
7.1.1	高频熔炼	86
7.1.2	除气脱氧剂及其应用效果	89
7.1.3	高频感应炉熔炼操作管理	91
7.1.4	高频感应熔炼装置	92
7.2	各种精密铸造合金的熔炼方法	94
7.2.1	耐磨钢——高锰钢的熔炼和特性	99
7.2.2	奥氏体系列不锈钢 304、304L 合金的熔炼和特性	100
7.2.3	奥氏体不锈钢 303 合金的熔炼和特性	102
7.2.4	马氏体不锈钢 410 的熔炼和特性	103
7.2.5	析出硬化型不锈钢 17-4PH 的熔炼和特性	104
7.2.6	SCH13 耐热钢的熔炼和特性	106
7.2.7	司太立 6 钴基合金的熔炼和特性	106
7.2.8	司太立 21 钴基合金的熔炼和特性	107
7.2.9	司太立 31 钴基合金的熔炼和特性	107
7.1.10	磁性材料 3%Si 钢的熔炼和特性	108
7.1.11	球墨铸铁的熔炼和特性	109
7.3	有色合金的熔炼	110
7.3.1	AC4C 铝合金的熔炼和去氢效果及其特性	110
7.3.2	高频感应炉熔炼青铜	113
7.3.3	高频感应炉熔炼纯铜过程	115
7.4	高频感应加热真空熔炼装置	116

7.4.1	真空熔炼装置和熔炼过程	117
7.4.2	真空熔炼用合金的晶粒细化处理和定向凝固组织的形成	120
7.5	钛合金熔炼	121
7.6	精密铸造浇注作业和浇注方法	123
第8章	精铸件缺陷分析	128
8.1	铸造缺陷其改进措施	128
8.2	压型制造和蜡模成形的相关要素	133
8.3	蜡模组装方案及组装相关要素	139
8.4	制壳系统及其相关要素	140
8.4.1	铸件表面粗糙及其防止措施	140
8.4.2	夹砂夹杂缺陷及其防止措施	143
8.4.3	型壳开裂及其防止措施	145
8.4.4	浇不足及其防止措施	146
8.4.5	气泡豆缺陷及其防止措施	147
8.5	脱蜡过程相关要素	148
8.6	焙烧对铸造缺陷的影响及缺陷防止措施	149
8.7	熔炼技术对铸造缺陷的影响及缺陷防止措施	149
8.8	浇注对铸造缺陷的影响及缺陷防止措施	151
8.8.1	铸件表面粗糙及其防止措施	152
8.8.2	夹砂、夹渣缺陷及其防止措施	153
8.8.3	浇不足及其防止措施	153
8.8.4	气孔缺陷及其防止措施	153
8.9	表面加工和铸件表面粗糙	153

未经编译同意不得翻印复印!

古代失蜡铸造法采用密蜡作为制模材料，在古代常用来制造外观美丽的青铜制品。虽然现代精密铸造技术在原理上与古代失蜡铸造法相同，但是采用古代失蜡铸造法很难制造出精度要求高、无缺陷的现代精密铸件，毕竟无论从原材料还是从铸造技术上说现代工业化的精密铸造已经与古代失蜡铸造法有了很大的不同。为了从概念上将它们区分开，我们称古代失蜡铸造法为古代精密铸造法，称现代工业化的精密铸造法为精密铸造。精密铸造依据其制造过程可以大致分为：陶瓷型壳法、陶瓷型法、陶瓷混合法及石膏型法四种，其中应用最广泛的是陶瓷型壳法，可以说陶瓷型壳法是精密铸造的典型代表。本文阐述的实际上是陶瓷型壳法的精密铸造实用技术。

图 1-1 所示为精密铸造生产工艺过程。通常蜡模成形采用金属压型。金属压型的制造方法主要取决于蜡模的种类、形状及生产数量。一般说多品种少批量订货的精铸件往往是一型单件。另外对于形状复杂的如叶轮、打印机机头这样的精铸件，为了保证铸件整体的尺寸精度和提高生产率，也往往采用整体型结构。在金属压型制造阶段，特别应注意金属压型的尺寸精度、表面粗糙度及产生误差的可能。因为蜡模是金属压型的复制品，对于最终精铸件的精度起决定性影响。

蜡模的成形，采用的是与铸件形状相似的上述压型，使用各种压蜡机将蜡料压入金属压型型腔，此时根据铸件不同形状、压蜡条件会稍有变化。如今为了提高蜡模的生产率，已开发了一些新的蜡料，并广泛使用了高压全自动压蜡机。

成形的蜡模与浇道成批焊装成组。这些模组全部由蜡料组成，在模组中铸件所占铸件组的比例大约为 35%—38%。之后在模组的表面上制造陶瓷型壳。

在制壳之前，为了去除蜡模成形时的分型剂、提高制壳糊状涂料的润湿性，需进行洗净处理。模组去除洗净液后浸入面层涂料中，面层涂料由水溶性硅溶胶粘结剂和耐火粉料、非离子型活性剂、消泡剂组成。在模组上均匀覆盖涂料后撒上锆英细砂，进行一定时间的干燥。干燥后再进行几乎同样处理的第二层。第二层以前的干燥，由于层厚较薄，如进行激烈的强制性干燥会引起涂层与模组剥离，为此最好在较低温、高湿情况下进行干燥。第三层采用由比较粗的耐火粉料和粘结剂组成的背层涂料，将模组浸渍其中之后撒上较粗的砂。背层涂料粘度较小、含水较多，所以第三层后的型壳干燥时间较长。第四层须进行几乎同样的处理。最后一层为了保证脱蜡时型壳具有必须的干燥强度，所以必须采用粘度很小的涂料进行涂覆强化处理。之后经 24 小时以上自然干燥后脱蜡。脱蜡处理一般采用高压蒸气釜装置。

高压蒸气釜脱蜡是根据加压水热反应进行处理。脱蜡处理压力为 0.65~0.7MPa，脱蜡温度为 140~150℃，脱蜡时间为 15~20 分钟。由高压蒸气釜回收的蜡料经管道系统进入蜡再生装置进行再生处理。脱蜡后的型壳含有过饱和的水分，所以脱蜡后应在常温下放置 30 分钟以上时间让水分自然蒸发，干燥后须进行型壳焙烧。

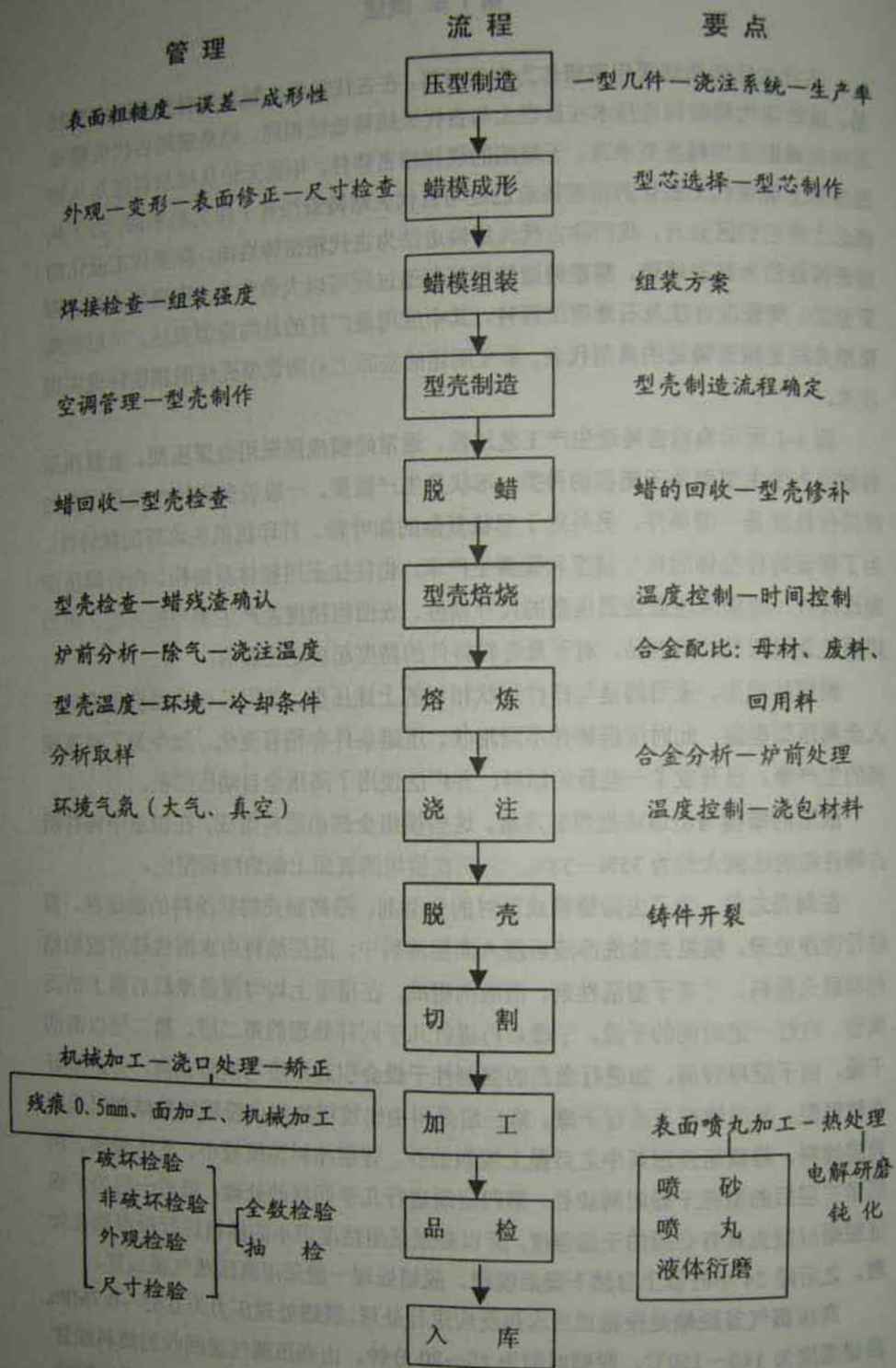


图 1-1 精密铸造生产过程

型壳焙烧最好采用煤气炉。焙烧温度对于铁系合金为 1000~1050℃，对于有色金属为 700℃。焙烧时间大约为 90~120 分钟。焙烧时务须使脱蜡后残留在型壳

中的蜡料完全燃烧失去。大多数铁系合金的熔炼采用 100~200 kg 高频感应炉。最好进行快速熔炼,平均一炉的熔炼时间大约为 18~20 分钟。熔炼方法和脱氧方法视不同材质而异。另外浇注条件也视铸件品种而异。

浇注方法采用浇包浇入,也可由高频炉直接浇注。另外为了防止浇注时卷入气体往往采用倾斜浇注法。

浇注后的铸件采用脱壳机脱壳,由于在内浇口附近难以切断,所以接着进行悬挂喷丸处理。之后,切断浇道,从各浇注系统上切离下铸件。采用夹具可以提高铸件内浇道的切割精度。内浇道加工后,由于无规定限制,相应客户的要求可以衍磨或喷丸或液体喷磨,并进行电解研磨和氧化处理及钝化处理等。

品质检验视不同铸件而异,但全部铸件需经目视检验,根据需要可进行破坏检验、非破坏检验、外观检验及尺寸检验。经过以上多道工序以后制造出符合要求的精密铸件,以下将就各工序分别进行阐述。

第 2 章. 蜡模制造

日本的精密铸造工厂极少在自己工厂内设有压型制造车间,有压型制造车间的仅占全部工厂的 10%~15%,金属压型的制作以外制为主,大多数工厂精密铸造的首道工序是蜡模制造,因此需对外制压型,特别是金属压型的表面粗糙度、精度、分型及分型精度和蜡料的成型性等进行检查。与蜡模相关的金属压型结构要素是压型喷射板的喷嘴直径,其值为 $\phi 8 \text{ mm}$ 。金属压型应有充分的排气孔,良好的蜡模脱模性。结构应与压蜡机的机能匹配。另外根据使用的压蜡机机种,相应的金属压型可以分为自动压蜡机用压型和手动压蜡机用压型。

2.1 蜡料及其种类



图 2-1. 精密铸造用模料

图 2-1 所示为精密铸造用蜡料。精密铸造的蜡料有蜡系、树脂系、尿素系及萘系四类，其中应用最多的是蜡系。蜡系又大致可以分为非填料蜡和填料蜡，一般大多采用非填料蜡。非填料蜡可以由几种以上的天然蜡和合成蜡配合而成，表 2-1 所示为其中的一例。

表 2-1 非填料蜡的配比 (%)

硬蜡	微晶蜡	含树脂的塑料	硬松香	Antiexidant
40	25	15	20	0.05

填料蜡中相对非填料蜡配入了各种填料（聚苯乙烯系、有机酸系、脂肪酸胺系、淀粉系、水）大约为 30%~45%。

表 2-2 所示为非填料蜡和填料蜡的性能比较。填料蜡由于性能优良，其使用量逐年增长，对于精度要求高的航空航天相关零件的铝合金、镁合金大型铸件大多采用填料蜡。填料蜡使用急剧增加的另一原因是再生利用已经成为可能。另外新填料不断开发，脱蜡性能也得到了大的改善。

表 2-2 非填料蜡和填料蜡的性能比较

物性及性状	非填料蜡	填料蜡
收缩率	0.7%~1.0%	0.2%~0.5%
表面缩凹	稍有	极少
脱模性	一般	较好
抗弯强度	一般	较高
韧性及粘附性	有	几乎没有
变形	容易发生	几乎没有
脱蜡性	没有问题	脱蜡慢
蜡再生利用	容易	可能
生产率	一般	高
适用压蜡机机种	低压、高压压蜡机	高压压蜡机
蜡模表面粗糙度	较粗	细
成型合格率	一般	高，95%以上
材料价格	便宜	便宜
适用产品	一般工业零件、 高尔夫球头	航空航天零件、办公自动 化机器零件、原子能件有 色合金大型零件

表 2-3 精密铸造用蜡料构成物的特性

类 别	特 性	
蜡类	天然蜡	提高强度, 表面粗糙, 凝固快, 收缩大
	合成蜡	
石蜡类	石蜡	收缩小, 表面缩凹大, 增加柔软性, 提高硬度
	微晶蜡	
树脂类	天然树脂	粘结强度高, 多数增加脆性
	合成树脂	
填料类	有机酸	硬, 凝固快, 收缩小, 表面缩凹小, 提高可操作性
	聚苯乙烯粉	
	脂肪酸酰胺	
	水	

通常使用的非填料蜡主要由石蜡系、蜡系及树脂系三种成分组成。图 2-2 为这三种成分组成的蜡料成分三角形图。

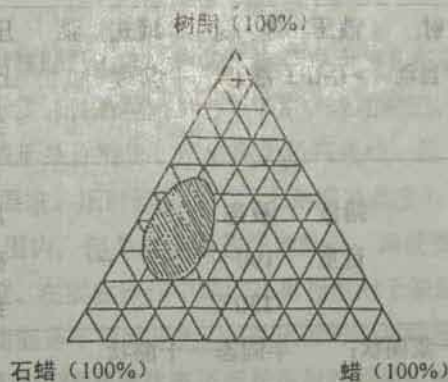


图 2-2 非填料蜡的三成分系三角形图表及其构成范围

一般说新蜡和再生蜡的性能由各蜡料生产厂测定。试验测定的项目有粘度、软化点、针入度、弯曲强度、灰分、水分（仅限再生蜡）、凝固点、密度、热膨胀系数、热传导系数、脱蜡速度、涂料润湿性、变形等。其中特别是粘度、弯曲强度、灰分、水分、凝固点、热膨胀系数、脱蜡速度、涂料润湿性、变形更为重要。

蜡料供货状态如由通常的板状变为颗粒状将方便向自动压蜡机输送。

2.2 压蜡机

常用的压蜡机分为手动、半自动和自动压蜡机三种。另外根据压射压力可以分为低压和高压两类。表 2-4 所示为压蜡机的分类及其特点。

表 2-4 压蜡机分类和型式

分类	型式	压力	模料状态	模料供应	特点	生产率
低压压缩机	立式、手动	空压 <1MPa	液态	上部、罐式	最初形式, 蜡混合, 供蜡难, 多用于小压型	低
	卧式、半自动	空压 <1MPa	液态	罐式, 泵供给	换压型较难, 管线长时压力不足	中
高压压蜡机	立式、立射、 手动	液压 >1MPa	半固态 半液态	上部, 凸卡式	能适用于各种压型, 蜡模形状复杂, 蜡容量~5kg	中
	立式、横射、 手动	液压 >1MPa	半液态 液态	罐式, 泵 供给	适用于形状简单大件, 能用型芯, 从压型的分型面射蜡	低
	卧式、立射、 自动、半自动	液压 >1MPa	半液态 液态	罐式, 泵 供给	压型装在压蜡机上, 用于半自动全自动大量生产	高
自由浇注		蜡液 自重	液态 100~ 130℃	—	用于艺术工艺品, 硅橡胶压型, 收缩和缩凹大	高

注: 半液态—浆糊状; 半固态—干酪状

为了适应大批量精铸件生产可采用能 24 小时满负载运转的高压卧式立射全自动压蜡机, 这种压蜡机从分型剂涂刷到合型、压射、开型、取模、运送都可实现全自动。模料由泵从大型蜡罐中将液态蜡压送供应。

2.3 蜡料熔化和熟成调质处理

蜡料采用油浴间接加热方式预先加热到 100~120℃ 熔融态。在采用填料蜡时为了防止填料分离沉淀, 必须混合。以液态蜡供给的蜡料冷却到所规定的温度使用。但当以凸卡方式供蜡时, 在蜡料注入凸卡机构后在规定温度 (实际压蜡温度+2~3℃) 的水浴中静置保持 24 小时, 在压蜡机中调节充满蜡的凸卡后使用。另外采用特殊的熟成调质处理蜡料可以得到比未调熟处理更光滑漂亮的蜡模表面。图 2-3 所示为蜡料的急冷熟成调质处理。

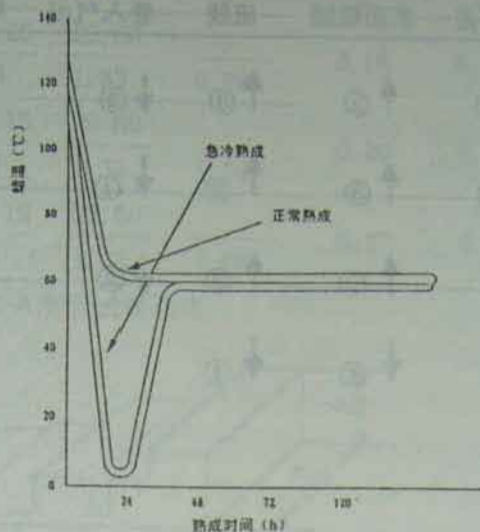


图 2-3 蜡料熔化和急冷熟成调质处理

2.4 蜡模制作

表 2-5 所示为蜡模缺陷的对策。一般说蜡模成形的合格率在 95% 以上。蜡模的缺陷主要有：充填不良、表面粗糙、卷入气泡、表面缩凹、尺寸超差、变形及流纹缺陷等。就蜡模成形条件而言，压射压力越高越好，但一般压射压力 $25 \sim 30 \text{ kg/cm}^2$ 已可以满足要求。压射温度（实际上是蜡料温度），不管哪种蜡料几乎都设定在 $55 \sim 70^\circ\text{C}$ 范围内，但是由于蜡的导热性差，即使变化设定温度也难以立即控制到设定的温度。在实际操作中蜡的压射速度对于缺陷影响最大，因此压蜡机的压射速度调节功能是不可缺少的。另外压射时间对蜡模收缩率和表面缩凹也有很大影响，在压蜡机喷嘴开放状态下延长压射时间可以减小收缩率和表面缩凹的程度。图 2-5 所示为压射时间与收缩率的关系。当然压射压力越高，收缩率越小、表面缩凹越少；压射温度越高、收缩率越大、表面缩凹越严重。表 2-6 所示为压射温度和收缩率及表面缩凹的关系。

表 2-5 蜡模缺陷及其对策

成形条件	浇不足	表面粗糙	流纹	卷入气泡	缩凹	飞边	变形
压射压力	↑ ②	↑ ①	↑ ①		↑ ①		↓ ②

成形条件	浇不足	表面粗糙	流线	卷入气泡	缩凹	飞边	变形
压射速度	↓②	↑②	↑③	↓②			
压射温度	↑①	↑③	↑②	↓①	↓②	↓①	↓①
喷嘴温度	↑②	↑③	↑②	↓②	↓②	↓①	↓①
分型剂	↓④	↓④	↓④				↑①
压射时间	↑③				↑①		↑①
冷却时间					↑③		↑②
空气抽拔	↑②		↑④	↑③			
浇口尺寸	↑②	↑②	↑①	↑①	↑②		
注	浇口位置		○		○		
意	合型精度					○	
要	浇口数	○					
点	压型冷却				○	○	
	型腔光洁	○					
	料 坯			○			

- 注：(1) 表中数字为对策优先顺序。
 (2) 压型分型面不得有污物沾附。
 (3) 压型状态不良时应立即修正。

表 2-6 非填料蜡蜡模压射温度和收缩率及表面缩凹的关系

压射温度 (°C)	实测值 (mm) / 收缩率 (%)				缩凹 (mm)		
	A	B	C	\bar{X}	a	b	\bar{x}
62	148.45	149.35	29.65				
	1.03	0.45	1.17	0.88	0.12	0.15	0.14

(续)

压射温度 (°C)	实测值 (mm) / 收缩率 (%)				缩凹 (mm)		
	A	B	C	\bar{X}	a	b	\bar{x}
64	148.30	149.25	29.60		0.18	0.14	0.16
	1.13	0.50	1.33	0.99			
66	148.20	149.15	29.60		0.20	0.17	0.19
	1.20	0.57	1.33	1.03			
68	148.10	149.15	29.60		0.27	0.30	0.29
	1.27	0.57	1.33	1.06			

注: A、B、C为图2-4所示试样尺寸

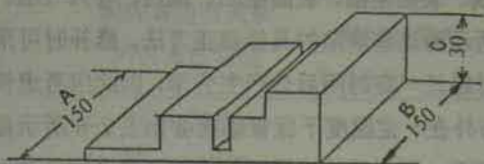


图2-4 测定蜡模收缩率的试样

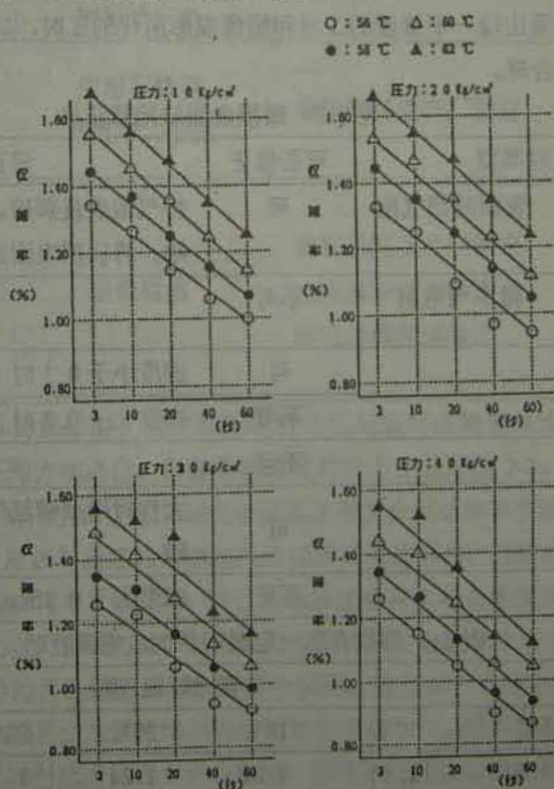


图2-5 蜡模压射时间与收缩率的关系 (非填料蜡)

蜡料的选定是非常重要的。一般说薄壁大型蜡模,为了蜡料能完全充填和防止变形,在一定压射温度下尽可能采用低粘度、不粘模的高强度蜡。对于厚壁蜡

模尽可能选用不易表面缩凹的蜡，也可采用水冷式金属结构或冷蜡镶体。

一般说对于非填料蜡每小时大约可生产 35~50 个蜡模，填料蜡大约可生产 50~65 个。一个压蜡周期的合型、压射、开型的时间大约为 1: 1: 1。蜡模的脱模性对蜡模成形操作影响很大。蜡模的分型剂可采用硅系、氟氯系及水溶性的物质。氟氯系分型剂由于破坏地球臭氧层而限制使用。最近美国开发了含有亲水基的称为 P 蜡的新蜡，在金属压型中涂刷水溶性分型剂就可很容易地脱模而提高生产率。在出模时吹气可以促进脱模。

2.5 蜡模检查与修正

蜡模从压型中取出时应尽可能避免应力变形和避免由于手的热量而在蜡模表面留下指纹印痕。在制备各种产品的蜡模样件时特别应注意七种蜡模缺陷，这七种缺陷是：不成一直线、表面粗糙、表面缩凹、流线、卷入气泡、尺寸超差及蜡模局部破损。表 2-7 所示为这些缺陷的具体修正方法。修补时可采用修补蜡及细嘴喷灯等。蜡模保管时经过一定时间后会产生变形，因此应考虑使用防止变形的蜡模存放专用器具。另外在一定温度下保管蜡模会如表 2-8 所示那样因收缩率变化而产生尺寸波动和变形。不正常的蜡模超差有可能是金属压型的精度问题、分型面刮伤及粘附污物、锁紧力不够、压射压力过高、蜡温过高等原因产生。总之无论如何必须比较一下修模的工时和蜡模成形所化的工时，以此来判断采用哪种方法更经济合理。

表 2-7 蜡模表面缺陷修正法

气泡类型	可否修正	修正方法
表面局部气泡	可	将气泡表皮刺破，在气泡中填入修补蜡，将模型表面加工光整平滑
卷入气泡	不可	
微小气泡群	不可	
流纹	可	深度小于 0.1 时
不成直线	不可	深度大于 0.2 时
表面粗糙	可	大件时用细嘴氢气喷灯，通常用修补蜡
缩凹	不可	深度大于 0.15mm 作不良品处理

表 2-8 蜡模存放一定时间后的收缩率波动 (%)

测定部位	存放温度					
	5℃	10℃	15℃	20℃	25℃	30℃
A	1.51	1.44	1.35	1.24	1.15	1.00
B	0.79	0.71	0.65	0.57	0.47	0.41
C	1.60	1.53	1.40	1.23	1.13	1.07
X	1.30	1.23	1.13	1.01	0.92	0.83

2.6 蜡料再生及再生蜡料的性能

正常生产时必须保证蜡模的成形条件和蜡模的尺寸精度及外观精度恒定。蜡料再生反复使用时，特别是由于水分和灰分的不正常混入可使蜡料质量不稳定。另外在蜡料多次反复使用过程中和脱蜡过程中（通常反复经过 150℃）也会引起蜡料的性质变化。精密铸造用蜡含碳原子数约为 18~45，与氢原子结合成链状或直链状。这样的蜡在反复使用时链状、直链状结合被破坏，特别是双键结合的破坏可使熔点下降（比新蜡低）、软化倾向增大。在实际生产中为了保持蜡料的品质稳定，必须实施表 2-9 所示的定期检查、校验管理。

表 2-9 再生蜡料的定期检查和校验要点

检查及校验项目	产生问题	检查方法	检查频数
灰分	铸件表面有夹杂 铸件表面粗糙	ICI 标准材料说明书对于一般机械零件、灰分界限为 0.08%	2 日 1 次
水分	卷入气泡 流动性变差 颜色变化大 脆而易折断	干燥减量法	2 日 1 次
软化点 针入度 弯曲强度	成形不稳定 易变形，垂弛	委托模料生产厂测定	1 月 1 次
成形性 试验	尺寸检查		7 日 1 次
	收缩率	委托模料生产厂测定	
	缩凹	蜡模破损 由阶梯形试片检查	
	弯曲强度	按弯曲强度试验法	1 月 1 次

通常由高压釜脱蜡装置回收的蜡料的再生处理可在精密铸造工厂或蜡料供应厂采用各自不同方法进行。目前品质最好的再生工艺是图 2-6、图 2-7 示的加压过滤再生。蜡料再生有仅除去回收蜡中水分和灰分的单纯再生法和调整蜡料的物理化学性能、形成与新蜡料性能相同的调质再生法两种。当然填料蜡和非填料蜡都可以进行调质再生。表 2-10 所示为加压过滤再生和自然沉淀及金属网过滤再生的物性值比较，由表可知，加压过滤再生在灰分除去率方面有很好的效果，这样所获得的单纯再生蜡可以和新蜡配合使用，也可单独使用再生蜡。表 2-11 所示为新蜡和单纯再生法再生蜡不同配比时的性能比较。填料蜡调质再生时，在单纯再生阶段，填料成分已完全分离去除，仅需按比例添加新的填料即可。

高压釜脱蜡的回收蜡中大约含水 55% 左右，灰分为 0.22% 左右。采用加压过滤再生，水分和灰分除去后各可达 0.02%。单纯再生法的再生蜡可以用于浇道，调质再生蜡可以用于制作蜡模成品。

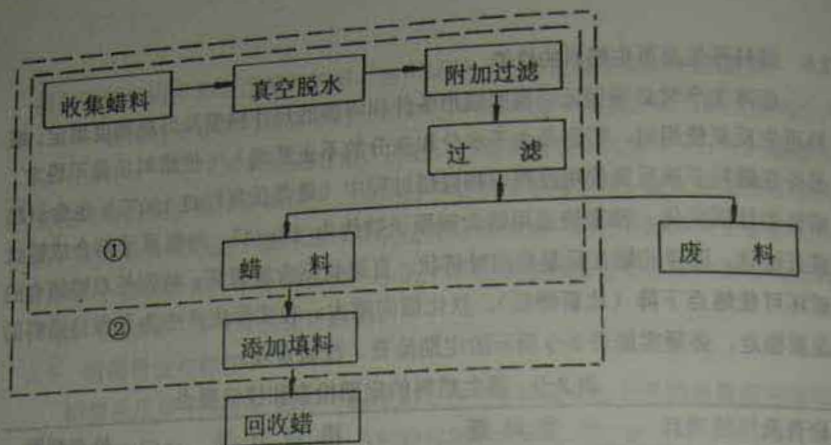


图 2-6 蜡的单纯再生系统和调整再生系统

①—简单回收 ②—调整回收

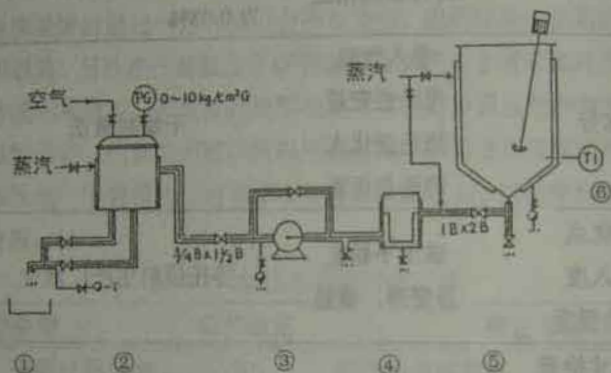


图 2-7 蜡的加压过滤再生装置流程系统

- ① 箱 (W275×L390×H115)
- ② 过滤机 (A:0.09m²)
- ③ 压入泵 (10L/min, 5kgG/cm², 0.4kw)
- ④ 过滤器 (Φ90×350) (带水套)
- ⑤ 溶化槽 (Φ500×700, 100L) (带水套)
- ⑥ 盘式温度计 (0~200℃)

表 2-10 各种再生蜡的物性值比较

蜡的种类及再生条件	水分 (%)	灰分 (%)	软化点 (°C)	针入度	弯曲强度 (MPa)	粘度 (cps)	
脱蜡后的蜡	55	0.22	69	4	5.4	90	
加压过滤再生法	—	0.03	69	4	5.3	91	
再生法	生产现场 120℃ 4hr	—	0.11	69	4	5.5	88
	采用的自然沉降法 120℃ 8hr	—	0.10	69	4	5.0	90
	120℃ 16hr	—	0.09	70	4	4.8	88
	120℃ 24hr	—	0.08	69	4	4.5	84
金属网 150 目	—	0.20	70	4	5.6	87	
过滤法 200 目	—	0.19	70	4	5.6	87	

表 2-11 不同再生蜡配比时的物性值

蜡的配比	软化点 (°C)	针入度	粘度 (cps)	弯曲强度 (MPa)	灰分 (%)	收缩率 (%)
新蜡	66	3	100	6.2	0.02	0.83
再生蜡	66	4	82	5.5	0.02	0.86
新蜡 60: 再生蜡 40	67	3	98	5.6	0.02	0.86
新蜡 50: 再生蜡 50	67	3	96	5.4	0.02	0.85
新蜡 40: 再生蜡 60	66	4	92	5.3	0.02	0.85
新蜡 30: 再生蜡 70	67	4	84	5.1	0.02	0.87

2.7 水溶性蜡芯及其成形

表 2-12 所示为水溶性蜡的基本组成和成分。水溶性蜡芯的成形可以直接使用通常的压蜡机。在要求高强度型芯时可以使用混有玻璃纤维的水溶性蜡。型芯成形的压射压力应当比主型蜡成形压射压力高出几个大气压。水溶性蜡的收缩率约为 0.2%~0.3%。由于成形的型芯容易吸湿，所以成形后应尽可能快地和主形蜡压射成形，特别是在精度要求高时在主形蜡压射成形前应放在有干燥剂的干燥器皿中保管。水溶性型芯的设计和形状取决于陶瓷型壳的制壳界限，而由陶瓷型壳的层数和型壳的强度关系决定型芯的设计基准。图 2-8 所示为有两端芯头时，水溶性蜡芯的设计基准和形状界限，一般芯头的长度大于 10mm。为了增强水溶性型芯的强度，型芯中也可铸入金属芯棒。水溶性蜡的流动性比模型蜡差，另外水溶蜡芯应有强度要求。图 2-9 所示为优先考虑蜡芯强度的压型方案。方案 a 所示有 2 个注蜡口时在蜡料的汇合部容易产生流线，因而在蜡模成形的压射压力作用下产生裂纹。所以类似的型芯形状最好采用单个注蜡口，喷嘴和注蜡口的直径为 8~10mm。方案 b 所示结构当 $H_0 > H_1$ 时为了防止水溶蜡芯开裂，在 H_0 方向设单个注蜡口，此方案条件下垂直方向的蜡芯弯曲强度比水平方向高。表 2-13 所示为日本市场的商品水溶性蜡的性能。

表 2-12 水溶性蜡的组成配比

组成物及物性值	1	2	3	4	5	6	7
亚硝酸钠				45			
硝酸钠			45	55			
尿素	80	98					100
硝酸钾	20		55				
硼酸		2					
白碳					32		
碳蜡					48	46	

(续)

组成物及物性值	1	2	3	4	5	6	7
云母微粉					1.2		
碳酸钠					8	54	
玻璃纤维						0.5	
聚乙烯醇							5
硬脂酸							1~2
石油							2
表面活性剂							1
熔点 (°C)	120	120	137	218			
收缩率 (%)	0.1~0.7		0.15~0.20				

注: No.1—强度高、吸湿小

No.3—流动性好、吸湿

2-13 日本市场的商用水溶性蜡及其特性

日本厂商	品名	特性及技术说明
日本富利玛公司	可溶蜡	完全能溶于水, 弯曲强度高, 溶出后无残渣, 色淡绿, 收缩率 0.2%
日本化成公司	可溶蜡	淡青色, 弯曲强度 10MPa, 收缩率 0.2%, 高压成型, 压射温度 52~55°C
信和产业公司	No.3s	适用于小件
	No.4s	20% 盐酸溶解
	No.5s	适用于大件
	No.6s	适用于大件及复杂形状

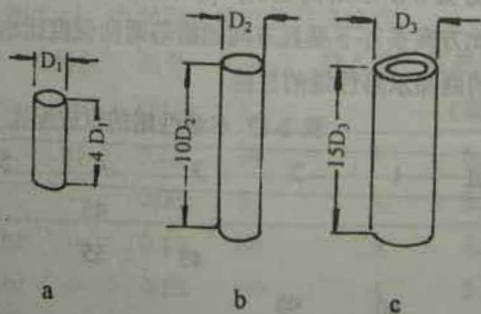


图 2-8 水溶性蜡芯的设计基准和形状界限

a— $D_1=1.5\sim 5.0\text{mm}$;b— $D_2=5.0\sim 10.0\text{mm}$;c— $D_3>10\text{mm}$ 时作成空心型芯

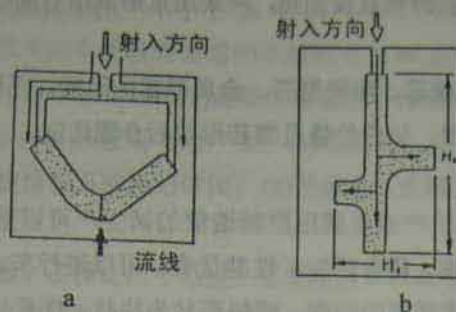


图 2-9 水溶性蜡芯的压型方案

在实际蜡芯成形时，由于水溶性蜡比常用模型蜡的流动性差，所以压蜡机的喷嘴孔径和压型喷射压板的喷嘴孔径都应为 $\phi 8\text{mm}$ 。另外为了防止主形蜡成形时蜡芯断裂，所以一般都有弯曲强度要求。

型芯蜡在水中的溶解速度约为 $20 \text{ 分}/\text{cm}^3$ 。在 $3\% \sim 5\%$ 质量浓度的盐酸溶液中的溶解速度为 $2 \text{ 分}/\text{cm}^3$ 。为了提高溶解速度，厚壁蜡芯应采用中部贯通掏空的设计。缓慢搅拌溶液也可加快蜡芯溶解。溶解后的溶液最后经无毒化中和处理后废弃。随着铸件向大型薄壁化的发展，对于具有型芯形状要求高的铸件日益增多，水溶性蜡的使用量也大大增加。

表 2-14 型芯系统的分类和选择

型芯种类	主要原料	生产批量	价格	型芯形状
水溶性蜡	聚乙烯乙二醇 填料	中等批量 每批 < 3000	较便宜	形状复杂
陶芯型芯	熔融石英 锆英粉 氧化锆 粘结剂	大批量 每批 > 3000	价高	形状复杂
金属型芯	铝合金 低熔点合金	小批量	便宜 经济	简单形状

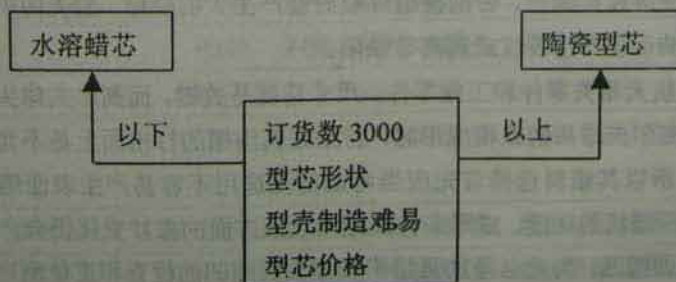


图 2-10 陶瓷型芯和水溶性蜡芯的选择基准

水溶性蜡的熔化应避免直接加热，应采用水浴或油浴间接加热。熔化温度绝对不允许超过 100℃。

表 2-14 为水溶性蜡芯、陶瓷型芯、金属型芯的比较。无论采用其中哪种均必须考虑铸件生产数量、铸件价格及型芯形状后合理选定。

2.8 样件蜡

几件以内的小批生产或金属压型制造前的试生产可以采用能机械加工的样件蜡经机械加工成蜡模。样件蜡加工性能优良，可以进行车、铣、刨、钻等切削加工，也具有通常修模需要的硬度，蜡料形状为块状。样件蜡熔点高，也可再生回用和用于金属压型试模。可以使用的样件蜡的品名有 FORMAXNG-001 和 FREEMAN 10800 以及成形加工蜡等。用样件蜡制作蜡模后采用正常的精铸生产工艺制造铸件。目前采用样件蜡进行样件生产已越来越多。

2.9 应用例

最近，由于精铸件的高要求、大型化及形状的多自由度复杂化，而必须具有更高的综合技术能力。精铸件中要求技术水准最高的领域是航空航天相关零件，即单晶叶片类零件。该类零件的蜡模要求表面粗糙度小于 6S。由于要求全部外观无缺陷，因此蜡料采用高填料蜡，要求这种蜡料中所含杂质必须小于 0.015%。当然在这个领域中是不使用再生蜡的，全部是采用严格选定的新蜡。另外如形状复杂、超小型的打印机空心磁头，由于尺寸精度、外形精度、变形及蜡模生产率方面的要求也采用填料蜡，且使用自动压蜡机而满足了零件的高品质要求。其成形采用了压射压力为 30~40kg/cm² 的高压成形。成形的蜡模全部经过目视检验。打印机空心磁头零件用的蜡料必须满足：(1) 尺寸精度优良；(2) 表面光滑、外观无缺陷；(3) 有强度、无粘韧性；(4) 生产率高；(5) 流动性好。

大型精铸件大致有二个领域，其一为原子能零件和铸造刀具为代表的大型厚壁件，这些零件的蜡料需满足 (1) 收缩率小；(2) 凝固温度范围窄。这些零件的成形条件是：(1) 压蜡机的压射喷嘴处于开放状态下控制压射时间；(2) 为了提高填充率，压射压力应大于 30kg/cm²。另一类大型精铸件是有色合金的大型箱体、罩壳和支架。这些件的蜡料最好是在蜡模成形时要有适当的韧性，成形后牢固，不会变形。为了在成形时容易取模，蜡模要有适当的韧性。另外要求强度高而不变形，以便焊装和制壳。否则模组焊装时会产生大的变形，制壳的第一层涂料受其应力影响而产生裂纹或剥离等缺陷。

对于航空航天相关零件和工业零件，尺寸精度是关键，而高尔夫球头则重量精度是关键。高尔夫球头的蜡模成形时，特别是其沟槽的打击面上是不允许产生局部缩凹的，所以其蜡料选择首先应当考虑的是选用不容易产生表面缩凹的蜡料。可是由于压蜡机的功能、成形条件及蜡料调质方面的微妙变化仍会产生不同程度的蜡模表面缩凹，为此必须加强蜡模成品表面缩凹的检查和重量测定。高尔夫球头的最大缩凹允许值为 0.15 mm，重量精度误差为 250g±3g。另外高尔夫球头蜡模的重量误差受分型面精度、压射条件及蜡模温度的影响很大，必须认真关

注。避免缩凹的基本措施是压射压力不小于 25 kg/cm^2 ，严格控制喷嘴开放时的压射时间。防止金属高尔夫球头蜡模表面缩凹不超过 0.15 mm ，重量误差小于 $\pm 3\text{g}$ 的要点是：(1)选择体收缩率小的蜡料；(2)选择压蜡温度下流动性较好的蜡；(3)选择凝固温度范围窄的蜡；(4)应没有飞边产生；(5)蜡模表面无气泡；(6)测定蜡模重量；(7)控制喷嘴开放情况下的压蜡时间；(8)使用嵌入式蜡芯；(9)金属压型设有冷却系统。

不论哪种类型的蜡模，在保证尺寸精度、重量精度和外观精度的同时均应对压蜡机的压射规范进行控制，并对生产率进行平衡管理。

精铸零件的应用范围越来越广，特别是办公自动化机械、汽车发动机、医疗机械等新领域的需求正在明显扩大。表 2-15 所示为精密铸造件的适用领域。

表 2-15 精密铸造件的适用领域例

领 域	零 件 名 称
蒸汽透平，喷气发动机	动静叶片、喷嘴、叶轮、接管、钩夹、罩壳、转接器
飞机机体	操纵装置、叶片机构、座席装置、空调装置等的杠杆、机架合叶、接头、通信机用的机壳
内燃机	预燃烧室的喷口、过给机叶轮、喷嘴、入口动叶片
蒸汽透平	动叶片、静叶片、喷嘴、喷口、入口动叶片
车辆	阀片、转矩转换轮、回转片转换器、螺旋联轴器、扇形齿轮、棘爪、多支管
食品机械、印刷机械、造纸机械	研磨圆板、凸轮、夹持器、圆板、附件
压缩机、阀门	阀片、阀门导杆、阀体、阀座
泵	叶轮、喷嘴、联轴器、齿轮箱、喷嘴箱
电气装置、通讯机械	非相断路器零件、变压器零件、波导管、链轮、凸轮、特殊电机机架磁芯、轭铁、磁铁、雷达用喇叭
计量仪器	微型机架、高度测量仪、滑块、测头、陀螺仪、手把、凸轮、支架、联轴器、滚轮
纺织机械	凸轮、手柄、棘轮、棘爪、导杆夹持器
工业缝纫机	送布器、压布器、手柄、内外釜、附件
枪械	手枪、猎枪、步枪的板机、击铁、顶平凿、脚头、准星、准星座
原子反应炉	燃料控制棒用快速限制器、燃料棒用速率打印器
其它	包装捆包零件、电梯零件、木工机械零件、轮式燃烧器、工具、体育用品、医疗器具

蜡模成形的最后一道工序是将蜡模组装成组。蜡模组装也称为蜡模串装，此词所表达的意思是将各个蜡模装配成一串葡萄，在欧洲这种称呼被广泛使用。另外由于组装成树木状所以也称为蜡模树，这种称呼始于美国，后在日本、东南亚各国被广泛使用。例如在中国台湾称为“组树”作业，是强调蜡模树的装配。在本文中选择了术语“蜡模组”，因为“树木”有叶、有果。蜡模成组组装是决定精密铸件品质好坏的重要因素。最近随着市场要求的提高，精密铸件的形状也更复杂化，也出现涉及多种形状组成整体的复杂铸件，使得装配方案明显复杂化。对于一般砂型铸造件，在确定工艺方案时只要考虑其铸造工艺性就可获得比较好的铸件，但对于精铸件的组装方案则不光要考虑其铸造工艺性，还必须充分考虑其制壳成型、脱模性、脱蜡性及后加工作业等。

组装方案常采用一个横浇道和多个横浇道的门型方案。其基本立足点几乎都是方向性凝固。这样的组装方案比较简单，适用于多数产品。但是其浇注金属液直接激烈冲刷型腔，除了夹杂、夹砂外，还容易产生气孔缺陷，特别是由于浇口附近产生金属液紊流而经常产生气孔和针孔缺陷。解决这些问题的措施是在蜡模组的各个部位设置陶瓷过滤网或采用底注方案。底注可使金属液平稳充填型腔，缓和铸型内壁的热冲击，使得夹砂、夹渣、气孔等缺陷大幅度减少。底注还有利于脱蜡和脱模，对于圆棒状和平板状铸件常常收到良好的技术效果，特别是对于铝合金、铜合金精密铸造件，常是解决夹杂的有效措施。组装方案原先是在考虑了简单的方向性凝固基础上结合实际经验确定。最近采用计算机模拟液体金属的充填浇注过程并结合特别的输入数据后对铸件凝固过程及其温度场进行数值模拟，在这方面已经有了复杂形状铸件的模拟解析的实例。

蜡模组装时一般采用压勺状的焊刀。但是加热能使焊刀表面附着的蜡料碳化而产生夹杂缺陷，而且组装生产率也不高，所以有些工厂开始采用喷灯喷嘴组装和开始采用自动组装装置。蜡模组装方案直接影响铸件成本。组装时尽可能每个模组多焊装一些蜡模以减低制造成本。蜡模组由蜡模、浇注系统组装而成。最近为了减少组装作业的工时和实现铸件的切割等后处理工序的自动化，发展了蜡模和浇注系统的一体化成形，从而减少了蜡模焊接不良造成的涂料制壳过程中的损坏，而且由于保证了蜡模组装的正确位置，从而实现了自动化切割和工时数的大幅度下降。

3.1 蜡模组的组装基准

图3-1所示为蜡模组各部位的名称及组装基准。蜡模组一般由蜡模、浇口杯、主浇道、辅助浇道、辅助脱蜡通道组成。除了蜡模外一般都采用再生蜡。考虑到蜡模是铸件的预制品，为了提高其质量而采用新蜡（净化蜡）。可是最近由于蜡回收再生技术的提高，也常常将新蜡和再生蜡混合使用，及直接使用回收蜡。浇

注系统用蜡可以采用由高压釜回收的蜡经除去水分和灰分后使用。最近由于铸件的大型化和蜡模组的大型化，因而对浇注系统的强度有了较高的要求，为此使用时在再生蜡中配入了一些松香、微晶蜡和树脂等添加物。

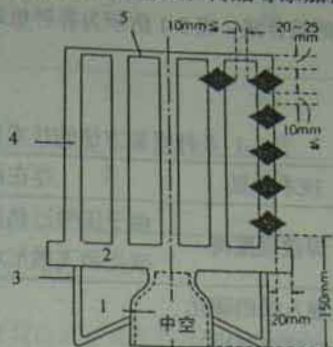


图 3-1 蜡模组的组装基准

- 1—浇口杯 2—横主浇道 3—辅助脱蜡通道、出气孔
4—竖主浇道 5—辅助浇道

蜡模组的主要管理内容是对铸件铸造方案实施管理。这些管理内容如果不充分满足的话，要想制造出优良的精铸件是不可能的。模组组装的管理内容为：

- (1) 严格遵守图 3-1 所示的基本组装基准；
- (2) 浇注系统和蜡模等必须焊牢；
- (3) 铸型的成形性良好，即蜡模组应无破损、模组形状复杂部位能涂到料、整个铸型容易干燥、浇注系统和蜡模表面无因气泡产生的孔洞和针孔、模组表面上无污物和蜡片沾附；
- (4) 脱蜡性良好，在铸件部位的型腔内无脱蜡残渣；
- (5) 不妨碍金属液浇注充填并保证铸件部位有一定的金属液静压头；
- (6) 不妨碍铸件切割，即应该有一定的切割空间，不能损伤铸件；
- (7) 保证经济性，工艺出品率高。

如图 3-1 所示，蜡模间的间隙对于正常铸型应大于 10 mm，浇口侧的压头应达到 125 mm。目前蜡模组的出品率约为 35%~38%，采用底注内环组装时出品率约为 33%~35%。图 3-2 所示为底注方案。底注时液体金属由下向上平稳充填型腔，防止了空气卷入而产生气孔缺陷，同时脱蜡性良好，特别是对于铝合金铸件能得到相当高的合格率。

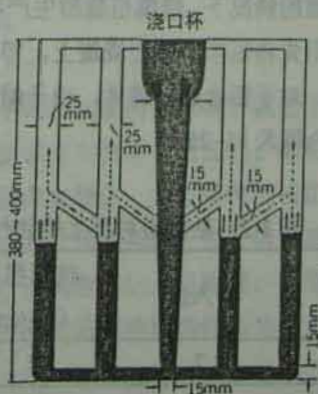


图 3-2 底注式浇注系统

3.2 蜡模组作业

蜡模模组的组装方法有：(1)使用加热的压勺状电热刀或氢气喷灯细口喷嘴；(2)使用粘接蜡在结合面粘结；(3)使用自动组焊装置。通常采用的方法是(1)和(2)，有时也采用(1)和(2)的组合法。表3-1所示为各种组装方法的技术效果、生产率及存在问题的比较。

表3-1 各种组装方法的技术评价

组装方法	技术效果	存在问题	生产率
使用压勺状电热刀	焊接强度高	由于压勺过热而产生蜡的碳化和飞散形成表面缺陷	生产率低
使用氢气喷灯	不会混入蜡的碳化物。蜡模表面容易修补		生产率低
使用粘接蜡	适用于小蜡模	容易产生焊接不牢	生产率较高
自动组焊装置	组装精度高	不适用多品种小批量	生产率高

采用压勺状电热焊刀的组装方法至今仍被广泛使用。但是由于蜡的焊接表面被反复加热，蜡的碳化物容易粘附在表面上，因此容易产生夹杂物。为了防止这种缺陷，应定期采用喷砂处理清除压勺上粘附的碳化物。粘接蜡多数应用于小蜡模的组装。市场上可以买到蜡料生产厂家生产的各种粘接专用蜡，其中最好是使用熔点为110~120℃的低粘度粘接蜡，因为这种蜡的粘接处的接触角小，所以可以满足粘接状态的要求。第38届美国精密铸造协会技术大会的展示会上Fansteel-Escast公司初次展示了他们的蜡模自动组焊装置，但实际上组焊功能并未100%地满足，如果进一步改进其结构和功能，今后还是有可能被实际生产采用。粘接蜡组焊会在脱蜡回收时将粘接蜡混入再生蜡，但由表3-2可知，回收蜡的基本性能几乎没有本质变化，在浇注系统等全部准备就绪的情况下，蜡模组装的生产率大约为每天30~45组。为了提高生产效率，可以采用先将蜡模组装在浇道上，等积存到一定数量后再组装成分步连续组焊作业法。对于铝合金精铸件，由于蜡模上内浇口多，所以组装方案比较复杂，生产率大约为每天15~25组。

表3-2 粘接蜡对再生蜡物性的影响

蜡	软化点 (℃)	针入度	抗弯强度 (kg/cm ²)	粘度 (cps)	灰分 (%)
粘接蜡	80	7	24	230	0.03
再生蜡	72	2	50	42	0.02

(续)

蜡	软化点 (°C)	针入度	抗弯强度 (kg/cm ²)	粘度 (cps)	灰分 (%)
粘接蜡 2% 模型蜡 98%	73	3	49	48	0.03
粘接蜡 5% 模型蜡 95%	73	3	45	52	0.03
粘接蜡 10% 模型蜡 90%	74	3	40	57	0.03

3.2.1 浇注系统的成形

浇注系统的成形方法有自由浇注成形和压射成形两种，这两种方法使用的蜡都是再生蜡。为了提高浇道的脱蜡性可以采用空心浇道。浇注系统也可使用比蜡模熔点更低的模料。

有棱角的浇注系统脱蜡时容易引起型壳开裂，所以应将棱角的刃口作成倒角或R，壁厚应尽可能均匀。

3.2.2 密封处理

蜡模组装时各个焊接部位常常出现焊接不良现象，这种焊接不良的部位可以采用密封蜡进行密封处理。密封处理通常由低分子的石蜡、硬脂酸及微晶蜡构成。密封处理可以使没有焊牢的不完全焊接处被密封蜡充塞，而且在焊接部位形成光滑的圆角过渡。密封处理时可以用毛刷刷蜡。密封蜡也常用于浇注系统的表面修正。

3.2.3 大型蜡模的组装

大型精铸件，为了减少压型制造经费或没有大型压蜡机等原因，往往将蜡模分割成几个蜡模分别成形，然后将这些蜡模焊装成整体蜡模。在焊接面上涂上稀释剂、油漆或瞬时焊接剂，采用定位夹具焊合。焊合部位的间隙用修补蜡充填。当要求蜡模有高的强度时，可在结合面上贴上增强片蜡。这种分块蜡模已应用于热处理用的大型筐笼和原子能零件。尺寸严格的超大型精铸件可以采用美国 Temperaft 公司 300T 超大型压蜡机一次成形。

3.3 蜡模组装铸造方案

铸件形状、大小及材质不同，其蜡模的组装方案也不同。小件（小到几克）和大件（大到 100 kg 左右）的组装方案有很大的区别。最近由于制壳机械手的普及和制造价格削减等原因，模组倾向大型化。大型铸件的模组常组装一个蜡模，而对于几克重的小铸件，模组可以装到几百个蜡模。每个铸件都有其特有的组装方案，有的方案优先考虑方向性凝固，有的方案把保温效果、暗冒口、出气口、模组的增强及制壳成型放在优先位置，有的方案则将脱蜡性作为重点处理等等，因而使得浇注系统多彩多姿。

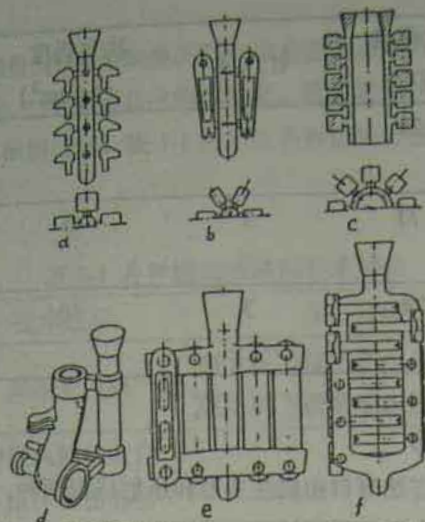


图 3-3 各种模组的组装方案和浇注系统

图 3-3 所示为各种铸件的模组。图 3-4 所示为静翼等小型叶片精铸件的组装方案，此方案属于底注中空环形方案，在环形横浇道上组装了各个叶片，由于将薄壁的前端部位面向中心浇道方向组焊，保证了叶片薄壁部位的金属液充填良好。

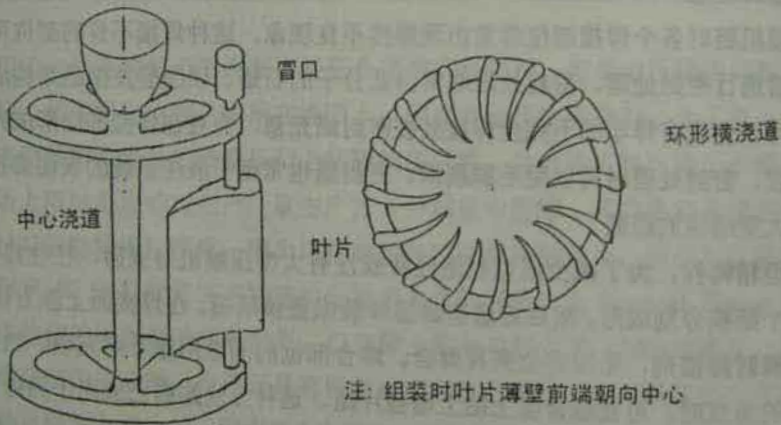


图 3-4 小型静翼叶片的组装方案

铁系精铸件和有色合金精铸件都存在卷入杂质问题。为了防止这类缺陷可以采用图 3-5 所示在浇道内设置陶瓷过滤网片。对外观精度要求严格的航空零件大多采用过滤网。

对于高尔夫球头铸件，由于击球面的沟槽部容易产生铸造缺陷，因此将沟槽部位朝向浇注方向，使得制壳时涂料分布均匀，沟槽部不易积存水分而保证生产出好的铸件。另外现在已有商品陶瓷浇口杯供应，采用陶瓷浇口杯可以防止脱蜡时浇口杯部位型壳开裂和防止浇注时型壳碎片混入铸件产生夹杂。

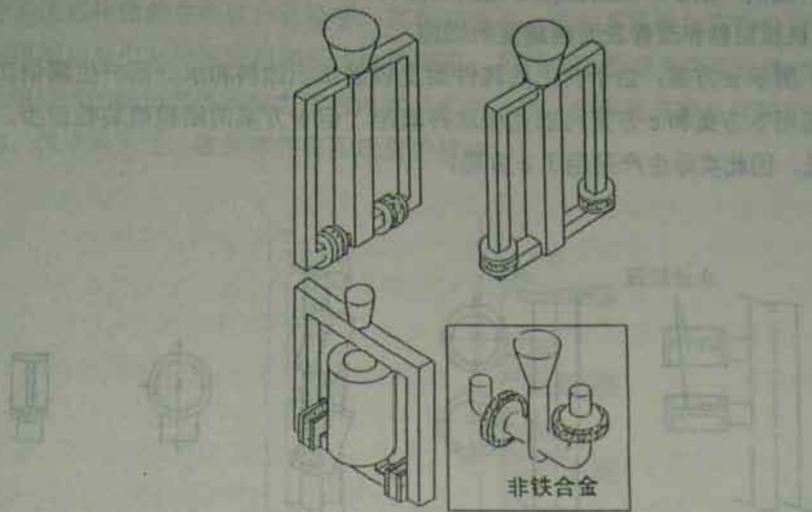


图 3-5 应用陶瓷过滤网的组装方案

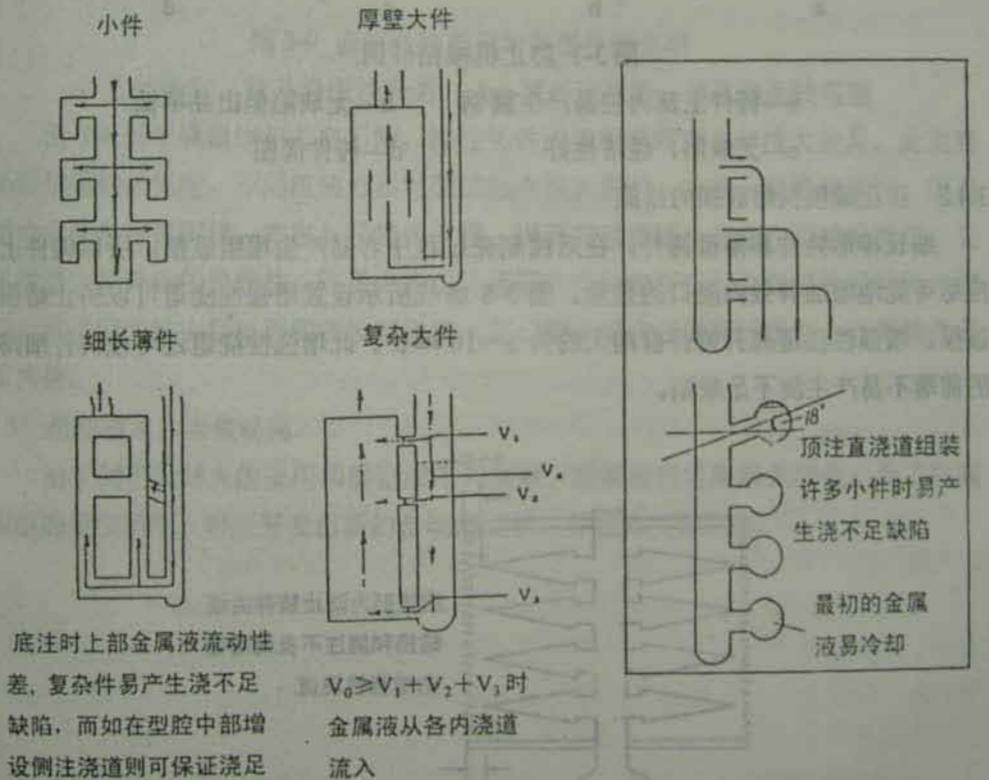


图 3-6 各类铸件形状的相应组装方案

图 3-6 所示为各种形状、大小精铸件的典型组装方案。薄壁平板状铸件主要采用底注方案, 可以提高外观精度。厚壁铸件也往往采用底注方案, 并通过冒口。

3.4 组装方案的改进

蜡模模组组装方案的改进可以使一些铸造缺陷，如表面粗糙、表面鼓胀、型壳开裂变形、漏钢、粘砂、模组破损等得到克服。

3.4.1 防止机械粘砂和改善表面粗糙度的措施

图 3-7 所示 a 方案，由于向上的铸件面上容易堆积涂料和水分而产生漏钢和表面粗糙，采用 b 方案和 c 方案可以克服这种缺陷，但 b 方案的蜡模组装数量少、工艺出品率低，因此实际生产采用了 c 方案。

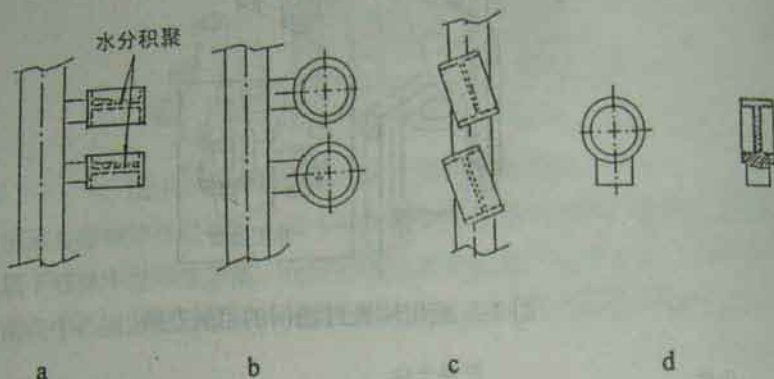


图 3-7 防止机械粘砂例

a—铸件上部内腔易产生漏钢

b—无缺陷但出品率低

c—无缺陷、经济性好

d—铸件简图

3.4.2 防止蜡模模组破损的措施

细长棒形铸件和薄壁铸件，在后续制壳过程中容易产生模组破损，所以铸件上应尽可能地增加有效内浇口的数量。图 3-8 虚线所示设置增强性浇道可以防止蜡模破损。增强性浇道离开铸件前端大约为 5~10 mm 长。此增强性浇道还可使铸件细薄的前端不易产生浇不足缺陷。

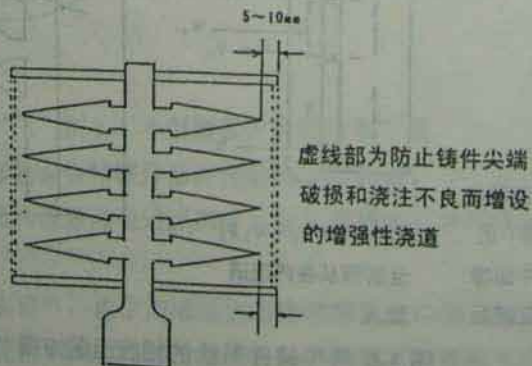


图 3-8 模组的增强性浇道

3.4.3 防止大型铸件变形的措施

罩壳、箱体类铸件容易产生变形，原因可能是受组装方案的影响。具体改进措施是浇注系统的蜡采用强化蜡，超大型的蜡模组也可采用增强框架和铝合金芯骨等。浇注系统强化蜡的主要成分是松香，其韧性要小。浇注系统蜡如有韧性会因大型铸件蜡模的自重引起蜡模变形和模组整体变形。另外由于受型壳面层涂挂时的涂料浮力及撒砂床的吹力产生的应力影响而容易产生变形，导致面层容易开裂和剥离。

3.4.4 改进脱蜡性、改善铸件表面质量的措施

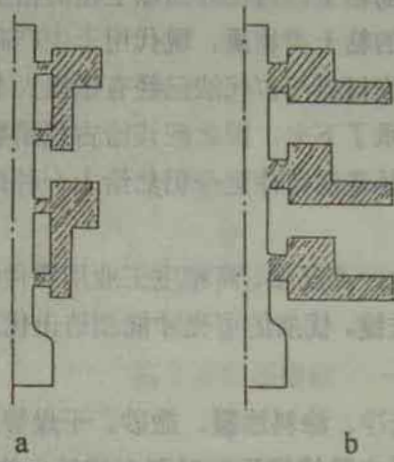


图 3-9 模组组装方向对脱蜡性的影响

a—脱蜡性好，铸件表面较光洁 b—脱蜡速度慢，铸件表面较粗糙

图 3-9 所示模组组装方向不同，浇注铸件的表面粗糙度会有很大差异，此主要是受脱蜡性的影响。不同组装方案对脱蜡性有很大影响。方案 a 脱蜡速度快，因而型内几乎没有残留蜡。方案 b 脱蜡速度慢，因而有残留蜡，且型内面被蜡浸透。为了改善大型铸件的脱蜡性，除了内浇口外还需在铸件的下凹部位直接设置辅助出蜡口。随着模组的大型化而常在模组浇口一侧设置出蜡口以提高脱蜡性、改善铸件表面质量。

3.5 组装技术的未来动向

由于制壳机器人的采用和制造成本的削减，蜡模模组将渐趋大型化。为了提高模组的组装精度，可望开发出新的自动组装机，并获得实际应用。

4.1 前言

型壳制造是精密铸造蜡模组装后的一道工序。大约在6世纪中期左右佛教从大陆传入日本,以佛像为代表的一些如梵钟和灯笼等佛具以及为数众多的艺术品也开始在日本采用古代精密铸造法生产制造,如今这些古代蜡形法生产的青铜铸件仍让人赞叹不矣。

古代精密铸造法——蜡型法是在密蜡模型的表面上涂上加工得很细的粘土,然后在其上面涂上中等粗细的粘土,再在外面涂上粗的粘土。为了保证具有良好的透气性,其外侧使用了较粗的粘土类物质。现代用于生产高质量和高精度工业用零件的精密铸造法,虽然其制壳材料与古代法已经有了很大不同,但是其基本成形技术的方法原理仍然原样被继承了下来,因此应该给古代蜡型法以高度的评价。由这些古代蜡型法所制造出的各种青铜铸件至今仍然给人一种外观美的感觉和风格上的尊严。

采用现代精密铸造法生产高品质、高精度工业用零件时,陶瓷型壳制造是决定铸件外观精度和尺寸精度的关键。优质的型壳才能制造出优质的精铸件,不合格的型壳只能生产出不合格的产品。

陶瓷型壳制造由模组洗净、涂料涂覆、撒砂、干燥等几道工序组成。

模组洗净处理的目的是去除蜡模压射时留在蜡模上的金属压型的分型剂,或者对蜡模表面进行亲水处理。洗净用的溶剂主要是低级酒精和酮类或者芳香族碳氢化合物,此外还有卤素系有机溶剂(氟氯系)。可是现在由于地球环保的要求,卤素系有机溶剂的使用应严格控制。另外从环保考虑,酒精、丙酮以及芳香族碳氢化合物的使用也会困难起来。1989年在美国精密铸造协会的技术年会上已经提出了研究无公害的洗净系统代替氟氯卤素系有机溶剂的问题。而在1990年的学术年会上介绍了采用含有有效活性剂的水溶液进行洗净的方法,并已经被实际应用。

模组洗净之后,将模组浸入到由各种耐火粉料和耐火粘结剂混合而成的涂料中进行浸渍处理。此处所谓涂料是指由不溶解物和水搅成糊状的一种混合物,它是精密铸造的专用术语,而其中与铸件直接接触的形成铸型型腔表面部的涂料称为面层涂料,这个面层涂料的组成和熟化管理是精密铸造中最重要的关键要点。特别是要求具有一定的强度和透气性,并应形成均匀的分布层。涂料浸渍后在此涂料表面上撒上细微的耐火砂,之后为了使粘结剂脱水和化学反应,需进行一定时间的干燥。

在形成了这样的第一层陶瓷型壳以后,再用规定的涂料和耐火砂多次重复上述的浸渍、撒砂以形成必要厚度的陶瓷型壳。在型壳的构成上,第三层以后的涂层称为背层。为了保证型壳整体的透气性和强度,背层所用的涂料耐火粉和耐火砂的粒度必须是较粗目数的耐火材料。

应该说陶瓷型壳不是最终产品,而仅是制造高精铸件的一种手段和过程,所以要确定一种完全满意的制壳技术是非常困难的。

最近在陶瓷型壳制造过程中已经广泛采用了自动制壳机器人和型壳输送机,因而提高了制壳生产率,较人工作业的生产率可以提高几倍以上。陶瓷型壳成型的主要问题是需要较长的干燥周期。为了解决这个问题,使用了各种干燥装置,已有在

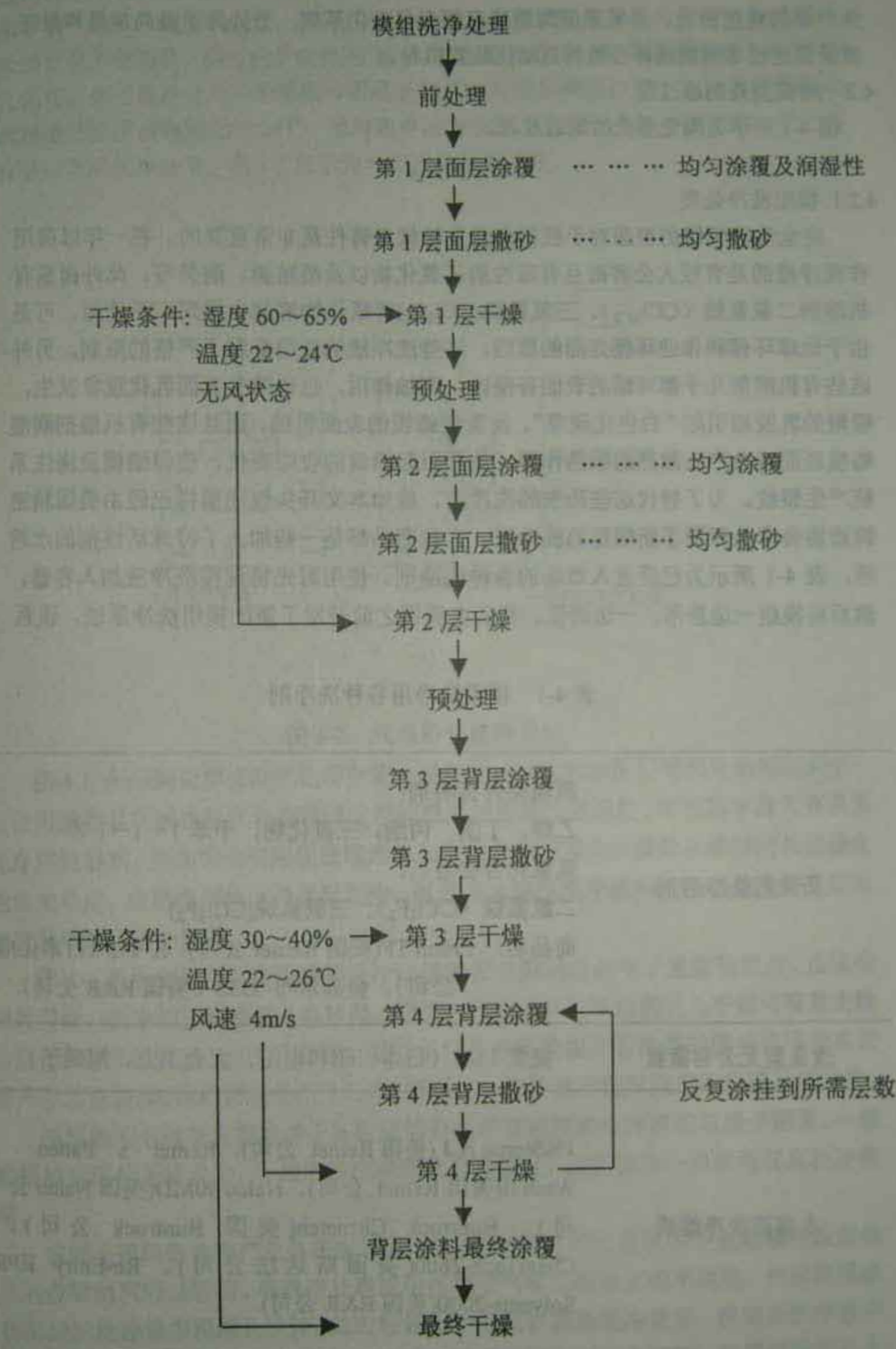


图 4-1 陶瓷型壳制壳过程

有限的制壳作业面积中提高生产率两倍以上例子。今后，从降低铸件成本、提高生产率的角度出发，必须采用陶瓷型壳制壳自动化系统，另外为了提高质量和保证质量稳定也希望能选择合适的自动化装置机种。

4.2 陶瓷型壳制造过程

图 4-1 所示为陶瓷型壳的制造过程。

4.2.1 模组洗净处理

完全洗净模组的表面对于获得高质量的优良铸件是非常重要的。在一年以前用作洗净液的是有较大公害而且有毒性的三氯化物以及酒精类、酮类等，此外卤系有机溶剂二氯氟烷 (CCl_2F_2)、三氯氟烷 (CCl_3F_2) 等氟化物溶剂也得到广泛使用。可是由于地球环保和作业环保方面的原因，这些洗净液的使用受到了严格的限制。另外这些有机溶剂几乎都对蜡的表面有侵蚀、刻蚀作用，也伴随有表面乳化现象发生，吸附的乳胶相引起“白色化现象”，反而使蜡模的表面粗糙。而且这些有机溶剂润湿蜡模表面时会产生激烈的吸热作用，从而引起微小的收缩变化，使得蜡模及浇注系统产生裂纹。为了替代这些历来的洗净液，就如本文开头叙述那样已经由美国精密铸造协会牵头开发了新规范的洗净液，这些商品都是一些加入了特殊活性剂的水溶液，表 4-1 所示为已经进入市场的各种洗净剂。使用时先将这些洗净液加入容器，然后将模组一边悬吊，一边清洗。作者在美国之前开发了新的模组洗净系统，该系

表 4-1 模组洗净用各种洗净剂

历来的洗净溶剂	酒精类有机溶剂： 乙醇，丁酮，丙酮，三氯化物，甲苯 1-1-1 等 氟氯化物溶剂： 二氯氟烷 (CCl_2F_2)、三氯氟烷 (CCl_3F_2) 商品名：Freon TF(美国 Remet 公司)，K-445(日本化成公司)，金苏尔布-5535(美国 R&R 公司)
改良型无公害氟氯	氟氯 134a(日本 昭和电工，大金工业，旭硝子)
水溶液洗净溶液	1% Sterox N.J(美国 Remet 公司)，Remet's Patten Wash II(美国 Remet 公司)，Nalco 90MD(美国 Nalco 公司)，Buntrock Citruetch(美国 Buntrock 公司)，ChemTech-2600(美国斯达法公司)，Re-Entry RFS Solvents-2000(美国 R&R 公司)
气泡净化洗净系统	O/W 型活性剂“彼尔达”水溶液

统称为气泡净化洗净系统。在加入了特殊活性剂“波尔达”的恒温水溶液中一边产生细小的气泡，一边清洗模组。如采用该系统则完全可以除去硅系分型剂，而且蜡模表面完全不会粗化，同时由于活性剂“波尔达”的添加作用，蜡模表面形成了O/W型乳化相，使得洗净处理后的蜡模与面层涂料具有良好的润湿作用。加入了活性剂的水溶液的温度调整到22~25℃，采用超声波发生洗净装置产生细小的气泡，使之具有更有效的洗净效果。图4-2所示为气泡净化洗净系统。

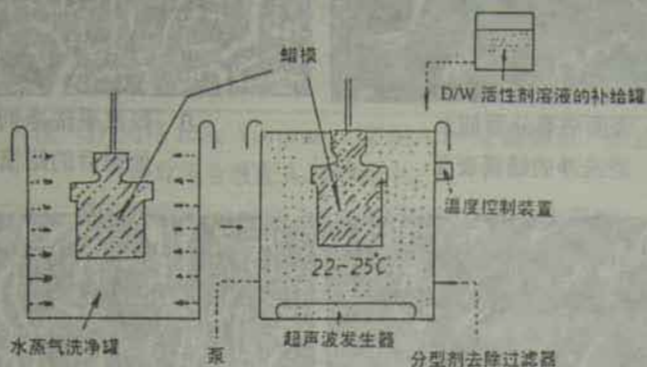


图 4-2 气泡净化洗净系统

图 4-1 所示陶瓷型壳制壳过程中第一层的前处理涂料和面层涂料中的粘结剂多数使用的是具有耐热强度和高温强度性能稳定的水溶性硅溶胶。如果其中混入有机系洗净用的溶剂，则常常会引起预处理涂料和面层涂料胶凝化，因此从涂料的长期稳定性角度考虑，应尽量避免这种情况发生，而采用水溶性洗净液和气泡净化洗净系统则能有效地避免这一问题。

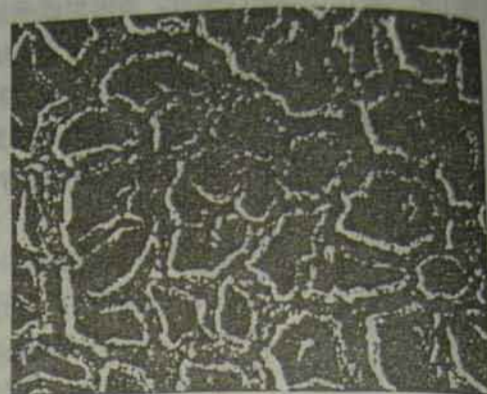
图 4-3 所示为采用各种洗净剂洗净蜡模表面分型剂后的电子显微镜照片。由这些照片可知，历来的洗净溶剂（酒精类、酮类，此外还有氟系溶剂）几乎都可有效去除分型剂。但可以肯定，由于其表面上吸附了白色的乳胶相并因激烈的吸热作用使其表面产生细微裂纹，因而影响表面光洁度。而采用水溶性洗净液时则没有出现这些缺陷。

模组的洗净效果主要取决于各种蜡的表面极性程度和洗净液的双极子因素。一般蜡模的表面是无极性的，而相应的洗净液具有双极性，因而很少一点就可提高洗净效果。

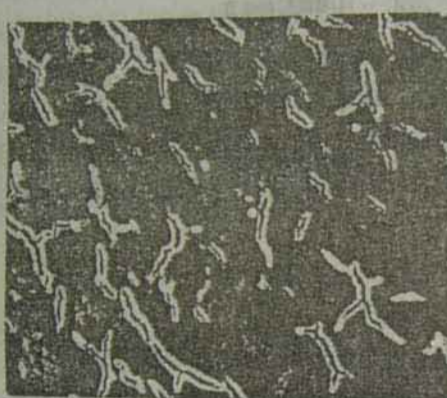
实际上模组的洗净作业是在组装后，在大约 2 小时的恒温状态下在蜡模模组组室内保管的同时进行的。在洗净处理前用压缩空气吹去模组上的不纯物，然后将模组在清洁的洗净液中浸渍几秒钟，此时轻轻上下摇晃以提高洗净效果。模组从洗净液中提出后，如果使用的是有机溶剂，则必须立即用压缩空气吹去溶剂。如果使用的是水溶性洗净液，则洗净后应进行水洗处理。洗净液用泵进行循环，并必须用过滤器除去分型剂和不纯物。



A 表面沾有分型剂未经洗净的蜡模表面



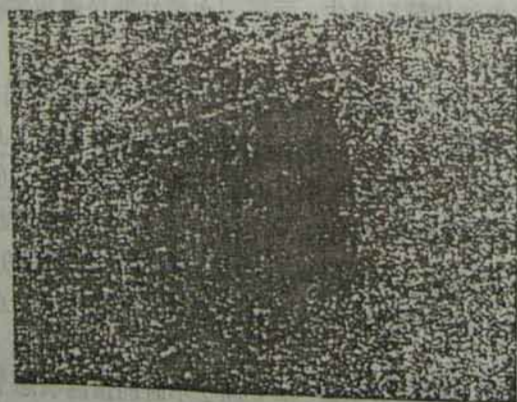
B 氟氯系洗净剂洗净处理后的蜡模表面



C 丙酮洗净处理后的蜡模表面



D 甲苯洗净处理后的蜡模表面



E 含有 O/W 型活性剂“波尔达”溶液的气泡净化洗净系统洗净后的蜡模表面

图 4-3 用各种洗净剂浸渍 5 秒钟后的蜡模表面的电镜照片 ($\times 100$)

4.2.2 前处理

前处理的主要目的是提高面层涂料的涂覆均匀性,特别是对于形状复杂和含有精致细微部位的铸件,其作用与油漆时先打底漆相似。面层涂料用的粘结剂往往可以不经处理原样直接使用。表 4-2 所示为前处理溶液的组成。

表 4-2 前处理溶液组成

硅溶胶 (SiO_2 30%)	80kg
Victawet 12 [#] (非离子型活性剂)	150g
蒸馏水	500g

注: ① 先将 150g Victawet 12[#]混入 500g 蒸馏水, 然后再将此混合液配入硅溶胶中。

②直接将 Victawet 12[#]加入硅溶胶会产生胶凝物。

前处理时先将洗净处理后的模组浸渍在前处理溶液中, 在溶液中将模组上下轻轻摇动, 模组提出后必须用压缩空气吹去细微的文字部位、沟槽部位、锐角部位等所积聚的前处理溶液。如果疏忽了这一项工作则会在这些部位产生粘砂、型壳破损等铸造缺陷。

为了使前处理溶液用的硅溶胶能对面层型壳起增强作用, 特别应该选用胶粒细小的硅溶胶。

前处理时一般说是将前处理溶液倒入前处理槽后就可使用, 但是在长时间使用时, 由于微生物的作用而往往产生恶臭, 此与制壳作业频度有关, 使用次数越少这种倾向越严重, 此时可以在前处理槽中设置循环泵消除。

4.2.3 面层型壳涂挂

表 4-3 硅溶胶和硅酸乙酯粘结剂的性能比较

性能要素	硅溶胶	硅酸乙酯水解液
面层粘结剂	合适	不合适
背层粘结剂	合适	合适
型壳透气性	普通	良好
操作安全性	无问题	有危险性
作业处理	良好	需水解处理
涂料稳定性	非常稳定	不稳定
型壳干燥	干燥慢	干燥迅速
高温强度	强度高	强度不足

面层涂料是指第一层, 乃至第二层使用的涂料, 另外也有称其为第一层涂料、

初层涂料的。面层涂料的组成是第一层涂层涂挂技术的核心，是决定精铸件好坏和品质水平的关键因素。

面层涂料使用的粘结剂基本是硅溶胶，原先采用的粘结剂大多数是对蜡模润湿性好、干燥快的水解硅酸乙酯，但由于其浇注时的高温强度不足而往往产生表面缺陷，现在几乎都已使用硅溶胶。表 4-3 所示为硅溶胶和水解硅酸乙酯粘结剂的性能比较。

表 4-4 所示为市场供应的精密铸造用硅溶胶的性能。作为面层涂料用的硅溶胶的选择标准是应具有合适的高温强度，而且从涂料的长期稳定观点考虑， SiO_2 的最佳浓度是 30%，应选择细小的 SiO_2 粒子直径。同一品种的各公司的产品的性能几乎没有什么差异。

表 4-4 日本市场的精密铸造用硅溶胶的性能

精密铸造 用硅溶胶	各种硅溶胶的特性						
	SiO_2 (%)	Na_2O (%)	PH [25°C]	粒子直径 (nm)	粘度 (cps)	密度 (g/cm^3)	外观
S-20L	20-21	0.05>	8-10	10-20	5>	1.12-1.14	乳白色
S-20H	20-21	0.4>	9-11	10-20	5>	1.12-1.14	乳白色
S-30L	30-31	0.4>	8-10	10-20	10>	1.19-1.22	乳白色
触 S-30H	30-31	0.5>	9-11	10-20	10>	1.19-1.22	乳白色
媒 SI-30	30-31	0.5>	9-9.5	10-14	5>	1.19-1.22	乳白色
化 SI-40	40-41	0.5>	8.5-9.5	16-20	15>	1.29-1.31	半透明
成 SI-50	47-49	0.7>	8.5-9.5	21-30	50>	1.38-1.40	半透明
工 SI350	30-31	0.7>	9-10	7-9	10>	1.19-1.22	半透明
业 SI-45P	40-41	0.5>	9-10.5	35-55	5>	1.29-1.31	乳白色
公 SI-80P	40-41	0.5>	9-10.5	70-90	5>	1.29-1.31	乳白色
司 SN	20-21	0.05>	2-4	10-20	5>	1.11-1.14	半透明
SA	30-21	0.5>	9-10	10-20	5>	1.19-1.22	半透明
USB-2	25	—	9.5-10.5	5-7	10>	—	乳白色
SB	30.6	0.45	9.4	11	4>	1.21	半透明
D30	30	0.44	9.7	7	7	1.20	半透明
三 X30	30	0.30	9.8	13	6	1.20	半透明
菱 T15	15	0.08	9.9	40	3	1.09	乳白色
蒙 T30	30	0.15	9.9	40	4	1.20	乳白色
三 T40	40	0.20	9.7	40	6	1.30	乳白色
特 W15	15	0.06	10.2	125	2	1.09	乳白色
公 W30	30	0.12	10.2	125	2	1.20	乳白色
司 W40	40	0.16	10.2	125	3	1.30	乳白色
W50	50	0.20	10.2	125	6	1.39	乳白色

(续)

精密铸造用硅溶胶		各种硅溶胶的特性						
		SiO ₂ (%)	Na ₂ O (%)	PH [25℃]	粒子 直径 (nm)	粘度 (cps)	密度 (g/cm ³)	外观
旭 电 化 工 业 公 司	AT-20	20-21	0.35>	9-9.5	10-20	3>	1.10-1.14	半透明
	AT-30	30-31	0.6>	9-10	10-20	10>	1.18-1.24	半透明
	AT-40	40-41	0.7>	9.5-10.5	10-20	20>	1.28-1.32	半透明
	AT-50	47-49	0.8>	9-10.5	20-30	50>	1.38-1.40	半透明
	AT-20S	20-21	0.5>	9-10	7-10	10>	1.10-1.14	半透明
	AT-20N	20-21	0.1>	9-10	10-20	5>	1.10-1.14	半透明
	AT-20A	20-21	0.2>	8.5-9.5	10-20	10>	1.10-1.14	半透明
	AT-30A	30-31	0.6>	9-10	10-20	20>	1.16-1.24	半透明
	AT-20Q	20-21	0.05>	2-4.5	10-20	5>	1.10-1.14	半透明
	AT-30S	30-31	0.6>	9-10	7-10	15>	1.16-1.24	半透明
	AT-30P	28-29	0.6>	9-10.5	10-20	10>	1.16-1.25	乳白色
	AT-300	30-31	0.6>	9-10.5	10-20	10>	1.16-1.24	半透明
	AT-300S	30-31	0.6>	9-10.5	7-20	10>	1.16-1.24	半透明
日 本 化 学 工 业 株	硅溶胶 20	20-21	0.4>	9.5-10.5	10-20	6>	1.12-1.14	乳白色
	硅溶胶 30	30-31	0.3-0.6>	9.5-10.5	10-20	6>	1.12-1.14	乳白色
	硅溶胶 40	40-41	0.3-0.6>	9.5-10.5	10-20	20>	1.20-1.22	乳白色
	硅溶胶 20A	20-21	0.05>	2-4	10-20	6>	1.29-1.31	乳白色
	硅溶胶 20B	20-21	0.05>	9-10	10-20	6>	1.12-1.14	乳白色
	硅溶胶 20G	20-21	0.4>	9.5-10.5	40-50	6>	1.12-1.14	乳白色
	硅溶胶 20GA	20-21	0.05>	2-4	40-50	6>	1.12-1.14	乳白色
日 产 化 学 工 业	SnowtexS	30-31	0.6>	9-10.5	7-9	7>	1.20-1.22	乳白色
	Snowtex30	30-31	0.6>	9-10.5	10-20	6>	1.20-1.22	乳白色
	SnowtexC	20-21	0.2>	8.5-9.0	10-20	10>	1.10-1.16	乳白色
	SnowtexN	20-21	0.02>	8-9	10-20	3>	1.10-1.16	乳白色
	SnowtexO	20-21	0.02>	3-4	10-20	3>	1.10-1.16	乳白色

表 4-5 所示为面层涂料用的强化硅溶胶粘结剂。Primcote 粘结剂是美国 Ransom & Randolph 公司的产品, 这种特殊粘结剂由硅溶胶、湿型增强剂、活性剂、干燥度指示剂及消泡剂组成。另外, Nalco chemical 公司的 Latrix 6300 产品是与上述 Primcote 相当的新开发的硅溶胶系列强化粘结剂。

陶瓷型壳的干燥强度和高温强度基本上取决于粘结剂中所含 SiO₂ 浓度, SiO₂ 浓度越高, 型壳强度越大。如果把硅溶胶当作基本粘结剂使用, 则应了解其性质, 使用目标与其特性一致, 才能获得满意的结果。干燥后的硅溶胶经过 β 方石英、β

磷石英转变为熔融石英。硅溶胶所含的 SiO_2 粒子为球状，球的内部既有致密的，也有多孔的，现在市场上供应的几乎都是致密球状，这些状态可由电子显微镜观察到。硅溶胶的最显著的一个特点是具有胶凝特性。硅溶胶的胶凝化有两种途径，其一是 SiO_2 粒子集合，成长长大，然后沉淀；另一种途径是硅溶胶中所含的 SiO_2 粒子的硅烷醇基脱水，硅氧烷联成网状结构的凝胶。硅溶胶在 0°C 以下结冰，此时 SiO_2 粒子沉淀，呈现上述的胶凝现象而失去粘剂功能。硅溶胶是种以负电荷结合的硅氧烷 $[\text{Si-O-Si}]$ 的 SiO_2 粒子在水中悬浮分散而成的胶状液体。图 4-5 所示为 SiO_2 粒子吸附 OH^- 离子的状态。图 4-4 所示为硅溶胶的 PH 值与胶凝时间的关系。硅溶胶的 SiO_2 粒子的稳定性随 PH 值上升而增加，随 Na^+ 离子的增加而降低。所以在选择商品硅溶胶时，为了保持涂料的长期稳定，应尽量选择含 Na_2O 少的商品。如图 4-5 所示那样，一般说 PH 值在 8.5~11 范围内最稳定。靠近此值的酸性一侧会变得不稳定而发生胶凝变化。在前述的硅溶胶第二种途径的胶凝领域内也不能得到型壳强度，涂料明显不稳定，也难以保证制壳作业的稳定。

表 4-5 面层涂料用强化硅溶胶

强化硅溶胶品名	强化硅溶胶的性能					
	SiO_2 %	Na_2O %	PH	粒子直径 nm	密度	外观
Primco	30	0.48	9.75	10	1.18	绿黄色
Latrix-6002	28.5	—	10.1	—	1.197	黄白色
Latrix-6001	28.5	—	10.2	—	1.197	黄白色
Latrix-6300	50	—	9.5-11	—	—	乳白色
Latrix-6010	30	0.5	10.0	13	1.206	—

注：Primcote 是美国 R&R 公司的产品。

Latrix 是美国 Nalco chemical 公司的产品。

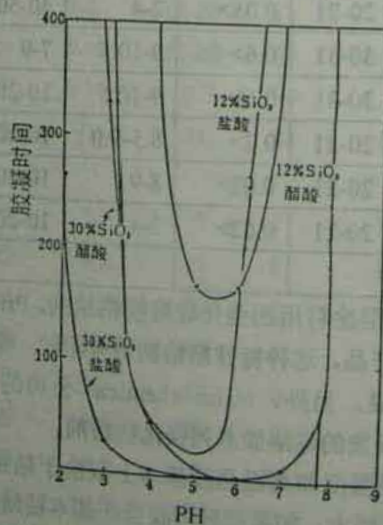


图 4-4 商品硅溶胶的 PH 值与胶凝时间的关系

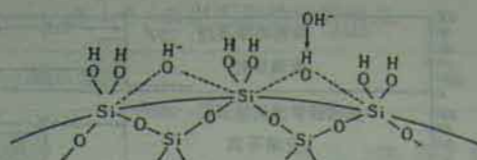


图 4-5 硅溶胶粒子吸附 OH 离子的状态

有关防止涂料胶凝化的主要措施可参见后述涂料管理的内容。

面层涂料的硅溶胶的胶粒大小最好是 $6\sim 10\times 10^{-3}$ nm, 此种 SiO_2 胶粒的大小正好与香烟烟粒大小相当, 用肉眼也不能观察到。

将面层涂料用的耐火粉料与上述的硅溶胶配合在一起就组成了面层涂料。这种耐火粉料有的称为耐火微粉, 有的称为耐火粉末, 在本文中称为耐火粉料。

型壳面层的性能与面层涂料中的耐火粉料有着很大的依存关系, 所以这些耐火粉料的选定非常重要。对这些粉料的基本要求是: ①具有能承受高温液体金属作用的耐火性, 且必须要有良好的耐激剧热冲击的性能; ②高温的热膨胀收缩非常小; ③为了防止常温干燥和脱蜡时型壳开裂, 所以应含有部分较粗的粉料; ④为了使脱蜡时由于受物理作用而不产生型壳开裂, 面层涂料应保持一定的透气性; ⑤浇注后的落砂性应与其物理化学处理方法相适应。面层涂料的耐火粉料可以采用澳大利亚产及美国佛罗里达产的高品位锆英粉和高品位的熔融石英。

表 4-6 澳大利亚产锆英粉的化学成分

品名	保证成分值 (%)			标准成分值 (%)					标准度 (目)
	ZrO ₂	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	ZrO ₂	SiO ₂	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	
陶 400°									>400°, 95%
瓷 350°	>66.0	<0.1	<0.06	66.3	32.5	0.06	0.05	0.31	>350°, 95%
级 200°									>200°, 95%
普 400°									>400°, 95%
通 350°	>65	<0.25	—	65.9	32.5	0.14	0.07	0.03	>350°, 95%
级 200°									>200°, 95%

表 4-6 所示为高品位锆英粉的化学成分。精铸件壁厚在 20mm 以内的面层涂料用的耐火粉料采用标准级的锆英粉不会有问题, 可是壁厚大于 20mm 的大件则必须使用陶瓷级的锆英粉。铸件的壁厚越厚越要使用高品位的锆英粉, 否则会产生铸件表面粘砂和表面粗糙。为了保持铸件表面光滑、具有能耐热冲击的高温强度, 应以高品位的锆英粉为基材, 而为了保持型壳具有透气性和溃散性则应配入一定比例的熔融石英粉。

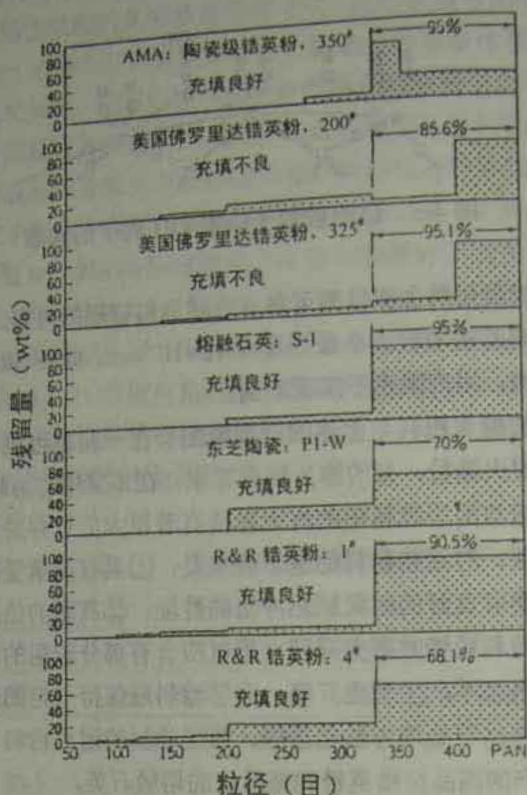


图 4-6 面层涂料用耐火粉料的粒度分布

图 4-6 所示为面层涂料用耐火粉料的粒度分布。如果面层涂料用的耐火粉料的粒度分布含有很多大于 150 目的粉时，铸件表面将粗糙。

除了澳大利亚 (AMA 级、AMC 级) 和美国佛罗里达产的锆英粉外，其它产地的如南非、印度、马来西亚、斯里兰卡产的，其品位均不如上述两种好。

表 4-7 所示为作为面层涂料耐火粉料的辅助粉料——熔融石英粉，其市场供应的品种很多。熔融石英粉可以用作辅助粉料，可是用作面层涂料时应尽量使用高品质的产品。

表 4-7 面层涂料用各种熔融石英粉

制造公司	商品名	化学组成 (%)				
		SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O
电气化学工业公司	L105	99.6	0.10	0.10	0.01	0.01
美国 MINCO 公司	MIN-SIL	99.88	0.01~0.035	0.05~0.08	0.003	0.003
住友石炭矿业公司	TS-50,60	99.80	0.03	0.20	—	—
吉田铸造工业公司	Purecote	99.50	0.07	0.30	0.01	0.07
东芝陶瓷公司	PI-W	99.80	0.07	0.05	0.005	0.001
R&R	Ranco-sil	99.70	0.03	0.20	0.01	0.01

4.2.3.1 面层涂料的组成

表 4-8 典型面层涂料的组成

类别	品名	备注
粘结剂	硅溶胶	SiO ₂ 30%, 粒子直径 7~10nm
耐火粉料	锆英粉	AMA 350 ^o , 陶瓷级
	熔融石英粉	L-105, 配入量为锆英粉的 0~10%
润湿剂	Victawet 12	非离子型
消泡剂	Dow corning V-30	(注:涂料粘度, 4 ^o 詹杯 22~27 秒)

表 4-8 所示为典型的面层涂料的组成。面层涂料的粘度同样随配入粉料相对粘结剂的比例的增加而增大。也有采用 40~50 秒 (詹杯 4^o粘度计), 此时能保证铸型型腔表面光洁、致密、牢固。可是如果面层太致密, 脱蜡时蜡料难以浸透面层, 反而因蜡的膨胀而往往引起型壳开裂。精密铸造时引起的型壳开裂和型壳内部破损几乎都与此有关, 因此保证脱蜡后获得没有缺陷的完整型壳应是非常重要的。表 4-8 所示的涂料配比能够解决这一问题。

润湿剂主要用来提高涂料在蜡模表面的润湿性。润湿剂一般有非离子型、阳离子型、阴离子型。考虑到面层涂料的相溶和对胶凝作用的稳定性, 最好采用非离子型润湿剂。表 4-8 所示的美国 Akzo 化学公司产的 Victawet 12^o属于非离子型润湿剂。表 4-9 所示为典型的润湿剂的物理化学性能, 其中 Sterox NJ 是 Monsanto 公司的产品, Merpol LFH 是杜邦公司的产品。

表 4-9 各种润湿剂的物理化学性能

品名	类型	可溶性	粘度 (cps)	密度 (g/cm ³)	浓度 (LB/GAL)	PH 25 ^o C	表面张力 (达因/cm)
Sterox NJ	非离子型	可溶	260	1.05	8.8	6.0~7.5	36.4
Victawet 12 ^o	非离子型	25 ^o C, <1%	91	1.12	9.3	7.0~7.4	31.8
Aerosol T	阴离子型	25 ^o C, 1.5g/ml	200	1.09	9.1	5~7	37.6
Merpol LFH	非离子型	40%	28	0.95	7.96	6~8	36.9
Sterox NJ	非离子型	可溶	273	1.02	8.5	5~7.5	41.7

4-10 所示为各种消泡剂。由于涂料中添加了润湿剂, 因而会产生一定的气泡, 消泡剂的作用就是消除这些气泡。涂料中消泡剂加入过量会促进涂料胶凝化, 所以加入量应尽量少。无论如何, 面层涂料是决定精铸件品质好坏的最重要的决定性因素, 所以对涂料组成的选定必须非常慎重。

表 4-10 各种消泡剂和商品名

制造公司	消泡剂及商品名
一般商品	辛醇, 2 乙基己烷
Dow corning 公司 (美)	去泡剂: B, H-10, 1410, Y-30, 1430
Union Carbide 公司 (美)	Sag-10, Sag-6010, Sag-30, Sag-5441
General Electric 公司	AF-75, AF-60
Remet 公司 (美)	CS-10, CS-30
Hydrolabs 公司	RSD-10
突雷硅公司	SH5501

此外也有在面层涂料中加入如表 4-5 所示的强化粘结剂[Primcote], 此时已如前述, 只要在 Primcote 粘结剂中按一定比例配入耐火粉料、润湿剂和消泡剂混合就可使用。另外也常见在面层涂料中配入触变剂以及膨润土和高岭土等膨润剂。为了得到干燥增强效果也常见配入乳胶型和树脂型的添加物。可是如果不严格涂料管理, 则往往会损害浆料的物性而产生铸造缺陷。铝合金等非铁合金精密铸造的面层涂料的组成与前述的铁系涂料的组成是不同的, 基本上是由一层面层组成的脆弱陶瓷型壳。表 4-11 所示为非铁合金用面层涂料的组成。对于铝合金精铸件, 浇注后铸型的溃散性是个很大的问题, 为此需降低硅溶胶的浓度, 同时在耐火粉料中增加熔融石英粉的数量以满足制造脆弱型壳的要求。调整硅溶胶浓度时只要加入一定量的蒸馏水就可以(自来水有离子化倾向, 不能用)。一般说当精铸件受到应力作用时在其晶界上容易产生裂纹。另外晶界也是非金属夹杂物容易集中的地方, 对于高合金也会析出一些不好的金属相, 为此可预先在面层涂料中加入一些晶粒细化剂以便得到晶粒细化的组织, 从而能从本质上提高铸件的机械性能。用作晶粒细化剂的金属氧化物有钴、镍、锰及铁的氧化物。这些金属氧化物必须根据浇注合金的种类选定。图 4-7 所示为钴的氧化物作为细化剂及其细化作用。使用的氧化钴、铝酸钴及硅酸钴等由于产生还原反应和吸热作用而达到细化晶粒的目的。这些氧化钴可以相对面层

表 4-11 铝合金用面层涂料的组成

类别	品名	备注
粘结剂	硅溶胶	SiO_2 25%, 粒子直径 10~20nm
耐火粉料	锆英粉	AMA 350 [®] , 标准级
	熔融石英粉	L-105, 配入量为锆英粉的 5%
润湿剂	Victawet 12 [®]	非离子型
消泡剂	Dow corning V-30	(注: 涂料粘度, 4 [°] 詹杯 15~20 秒)

涂料的耐火粉料加入一定的量。在这种铸型中浇注液体金属后到凝固前3分钟左右对铸型施加微微振动可以获得更好的细化作用。在涂料中加入钴氧化物时应预先按比例加入硅溶胶中搅拌均匀。

晶粒细化剂:

钴氧化物	$\text{Co}_2\text{O}_3, \text{CoO}$	配入量: 耐火粉料的 0.5~4%
铝酸钴	CoAl_2O_4	配入量: 耐火粉料的 1.0~10%
钴氧化物	CoSiO_3	配入量: 耐火粉料的 1.0~20%

细化作用:

- *还原作用
- *吸热作用

钴氧化物吸热作用细化晶粒过程:

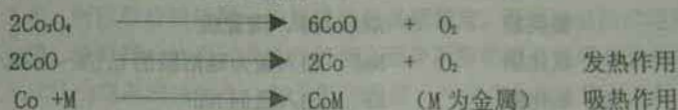


图 4-7 钴氧化物晶粒细化剂及其细化作用

表 4-12 面层涂料中的烧结剂及其烧结作用

烧结剂	熔点 (°C)	沸点 (°C)	水溶性	备注
NaF	995	1705	5g/100ml	最实用
KF	869	1505	92.3 g/100ml	易溶于水
NaHF				160°C时分解为 NaF 和 HF
Na_3AlF_6	881		0.135 g/100ml	助熔剂

烧结作用:

烧结剂 \longrightarrow 在 150°C 以下时难溶于水 \longrightarrow 1000°C 左右熔化

面层涂料层烧结化 \longleftarrow 面层涂料层出现烧结现象 \longleftarrow

为了缩短各层的干燥时间、改善面层的高温强度,联合碳化物公司生产了 C-20 混合粘结剂,杜邦公司和日产化学公司开发了联合工艺和日产快速工艺用的快速成形粘结剂,但是至今仍然没有得到广泛普及应用。在制造航空航天领域用的精铸件时,型壳以及型壳内部绝对不允许混入不纯物。以硅溶胶为主体的前处理溶液以及面层涂料用粘结剂,一经干燥后硅溶胶凝胶析出,胶态超微粒子的水凝胶集合体附在型壳表

面,脱蜡时绝大多数这种凝胶状物质随着蜡一起溶出,可是一一定量的水凝胶集合体附在型壳表面而残留下来。为了去除这些凝胶物,目前采用的方法是充分水洗型壳内部,这些白色的凝胶物用手触摸就能沾在手上,如果接触高温液体金属就会卷入液体金属中而成为夹杂。目前代替水洗的方法是预先在面层涂料中配入烧结剂,在1000℃型壳焙烧时使之烧结(面层光泽熔融化处理),能够完全防止凝胶析出现象。表4-12所示为这些烧结剂。烧结剂的配入比例是相对面层涂料的硅溶胶的0.5%~1.0%。表4-13为高品位精铸件所用的面层涂料的组成例。

表4-13 高品位精密铸选用面层涂料的组成

类别	品名	备注
粘结剂	硅溶胶	SiO ₂ 30%, 粒子直径 7~10nm
耐火粉料	锆英粉	AMA 350°, 陶瓷级
烧结剂	氟化钠 或 氟化钾	NaF: 加入量为硅溶胶的 0.5%~1.0% KF: 加入量同 NaF
润湿剂	Victawet 12#	非离子型
消泡剂	Dow corning V-30	

注: 涂料粘度, 4°詹杯 22-27 秒

4.2.3.2 面层撒砂材料

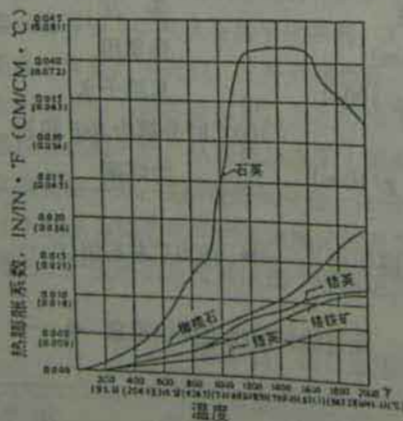


图4-8 面层撒砂的热膨胀系数

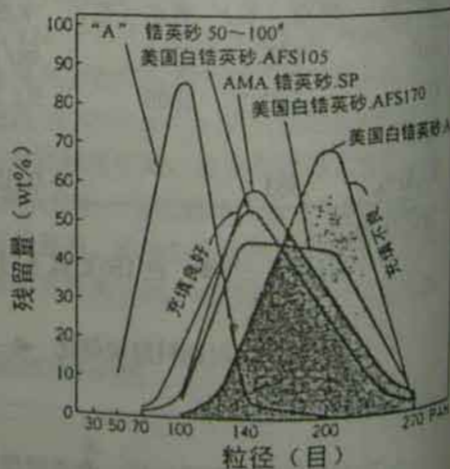


图4-9 面层撒砂的粒度

蜡模模组在面层涂料中浸渍以后,其表面均匀地沾附了涂料料浆,之后在涂料表面还处于湿态时撒上干燥的细粒耐火砂,称为撒砂处理。面层撒砂同面层涂料的耐火

粉料一样必须耐热，通常采用锆英砂、熔融石英砂、刚玉砂、高品位的莫来砂等。图 4-8 所示为这些面层撒砂的热膨胀系数。图 4-9 所示为面层砂的粒度分布。面层砂粒度对于精铸件的表面粗糙度有很大影响，另外也是影响面层透气性的关键因素。面层砂的平均粒度为 65~70 目时铸件表面较粗糙，最好使用 100~105 目的面层撒砂，由此可以得到光滑而美丽的铸件表面，即使对于铝合金也能得到高表面精度的精密铸件。而当采用 105 目以上的面层撒砂时型壳的透气性明显恶化，因而容易出现液体金属充填不良的缺陷。面层撒砂的形状最好是球状，粒度分布的峰值宽度越窄越好。铁系精铸件几乎都采用锆英砂，而铝合金时可以采用莫来石细粒砂。

4.2.3.3 面层涂料的涂覆

面层涂料的涂覆是决定精铸件品质的最重要的作业之一。对于型壳面层的构成由于铸件的形状和壁厚不同，其涂料涂覆作业的基准有很大差异，如今几乎大多数仍依赖于人手，所以很难保持同一批量铸件的品质稳定，面层涂层的成型采用了真空减压涂料涂覆、涂料离心力甩料及吹气处理，至今所有的致命问题都已解决，而且可以制造出形状相当复杂的精铸件。对于型壳面层，与液体金属反应产生粘砂、型壳开裂、剥离等都是不允许的。图 4-10 所示为面层的基本作业过程。经洗净处理、前处理过的模组，置于真空减压涂料涂覆装置中，大约在 5 托的真空下在涂料中浸渍 5 秒钟，因而在模组表面上完全涂覆了面层涂料。之后模组置于低速离心机上旋转一定时间甩去多余涂料。其回转时间视铸件形状、大小可以任意调整控制。采用这一方法使得涂料均匀润湿，在空心部位局部堆积的涂料也能完全去除，与目前的人工作业相比较能够相当迅速的进行涂覆作业。目前涂料的涂覆作业既可以人工操作，也可以用自动制壳机器人进行。

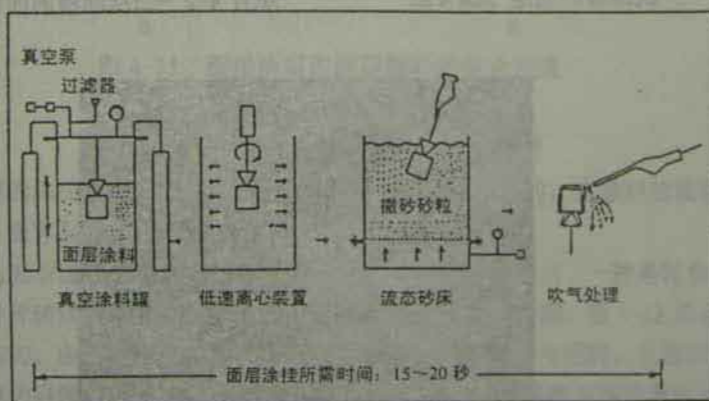


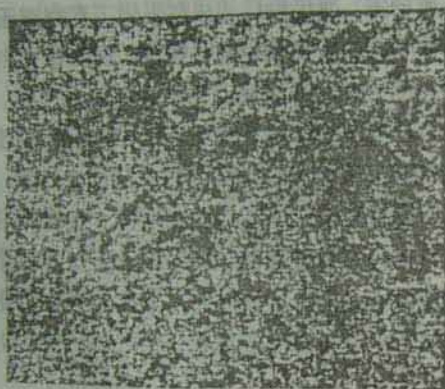
图 4-10 面层涂料的基本作业过程

在人工进行涂覆操作时为了使涂料润湿和均匀分布，对于蜡模的沟槽以及文字部位要用压缩空气吹，一部分要用毛刷刷刷，为此不仅要依赖操作人员的基本技能和经验，而且难以保持品质稳定。

面层涂料涂覆将模组浸入涂料的基本要点是：①按蜡模各部位不形成整气的方向缓慢浸入，对于沟槽则应沿着沟槽方向浸入。此时应使涂料中不混入空气，缓慢插入。②在模组完全浸入后缓慢提起，一边流失并甩去剩余涂料，一边将模组不规则地转动。③在模组多余涂料尚未完全流失过程中用细口吹气喷管轻轻吹去蜡模小孔、沟槽、文字部位的小气泡，促进涂料润湿，并除去多余涂料。此时空气压力为 $3\sim 3.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 。蜡模的平面部位、外棱角部位不得吹气。在涂料甩料完全停止以后立即进行撒砂。

面层涂料在蜡模任意部位都形成均匀层厚是最正常的状态。由于型壳的面层直接承受各种高温液体合金的作用，因此提高撒砂层的致密性是相当重要的。

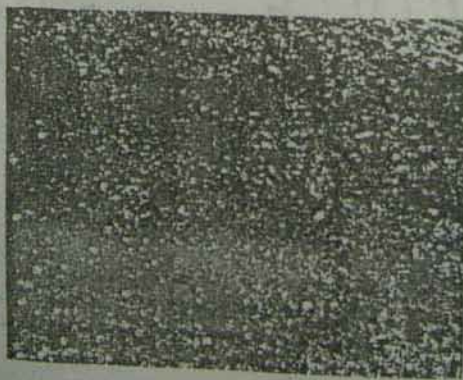
在铸件形状相当复杂情况下，采用人工进行各种细致操作是很困难的，而采用自动制壳机器人进行涂料涂覆操作则可以实现。自动制壳机器人已经相当多见。



照片 4-1 一次涂覆的面层 SEM x 25



照片 4-2 二次涂覆的面层 SEM x 25



照片 4-3 三次涂覆的面层 SEM x 25

在表 4-8 所示的涂料组成情况下是单一面层涂料的涂覆厚度大约为 0.05mm 。铸件壁厚小于 10mm 时仅靠一次涂覆层能够承受住液体金属的热冲击的。当壁厚大于 10mm 时须采用面层涂料进行二次和三次涂覆以形成厚的单一涂膜。制造光滑美丽的

铸件表面是面层涂料层的基本要求。面层涂料的粘度过高、过低都不利于获得合格的精铸件。如果涂料粘度过高，即涂料中粉料加入过多，则形成了比较牢固的型壁，而有损透气性，当然脱蜡时型壳容易开裂，浇注后脱壳困难。而粘度过低，透气性是好了，但型壳面层脆弱，另外容易粘砂而使表面粗糙。所以面层涂料的粘度必须综合考虑面层型壳的强度、透气性、型壳内表面光滑以及型壳的溃散性等全部因素。采用上述所定合适粘度的涂料进行一次涂覆、二次涂覆及三次涂覆时应与各种合金和铸件要求相适应，控制涂料涂覆层的厚度，不损坏型壳的透气性，能承受金属液的热冲击，且能防止粘砂以获得光滑美丽的铸件表面。

涂料涂覆的均匀性与型壳的透气性和强度有直接关系。涂料涂覆操作时，比较平坦的平面部位的涂层比较均匀，可是外棱角和锋利的端部则容易异常流失，涂膜容易变薄，所以应根据铸件的形状、大小及其合金材质决定面层涂料涂覆时进行1~3次的涂覆处理，以形成必要的面层涂料层。采用该面层涂料进行2次和3次涂覆处理可以保证型壳面层的致密性和耐冲击性，大大强化了型壳，防止涂覆层开裂和剥离。照片4-1~4-3所示为一次涂覆到三次涂覆处理后的面层的电镜照片。采用2~3次涂覆处理后的面层的表面没有观察到面层砂贯穿涂料层，得到了光滑的型壳内表面。图4-11所示为面层涂料和面层撒砂的结合机构。

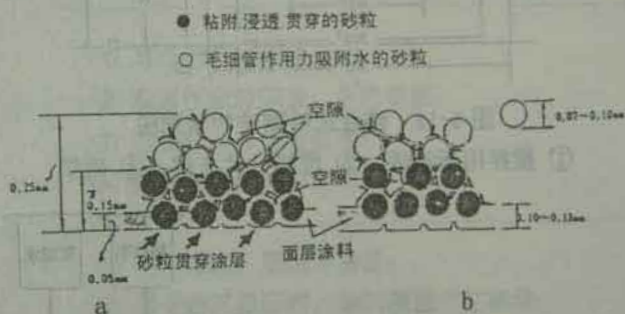


图4-11 面层涂料和面层撒砂的结合机理

a — 1次涂覆，部分砂粒贯穿涂层

b — 2~3次涂覆，无砂粒贯穿涂层

当涂料的流失方向呈规律性时是难以形成均一的涂膜的，在涂料的流动方向留下了肋迹，而容易产生涂料局部增厚。

涂料用的涂覆装置是涂料罐。通常采用的料罐有两种形式，一种是转台式料罐，另一种是叶片转动搅拌式料罐。一般广泛采用的是转台式料罐。图4-12所示为转台式料罐的结构。由于搅拌用的挡板（折流板）固定而料罐本身回转，从而混合涂料。料罐的转速由料罐内径决定，但不应该卷入气孔。而从涂料搅匀搅熟考虑，转速大约为35~38rpm。转速大于此速时，由于离心力的作用，罐的中心部位和周边部位的涂料粘度将不同，而转速小于上述值时则会因涂料中的耐火粉料沉淀，而造成涂料组成偏析。另外，转台式料罐涂覆时操作的有效面积大，因此往往用于自动制壳机器人流水线。叶片转动搅拌式的搅拌率高，但容易在涂料中搅入气泡，罐内各部位的涂料也容易不均匀。

粉料全部加入完后大约 3 小时测定涂料粘度,在达到目标值后加入润湿剂(Victawet 12[®]),润湿剂以 50%溶液浓度加入。之后再经过 30 分钟后停止转动料罐,静止 3 分钟后在涂料液面上将出现细小的气泡,之后,加入能使气泡消失到非常少时所需的消泡剂,到确认已经完全没有气泡后再继续转动料罐,直至涂料熟成。从新涂料配制到能够实际使用的熟成的时间大约需 12 小时。新配制后不足 12 小时的涂料由于熟成不足而得不到必须的程度。

4. 2. 3. 4 面层撒砂作业

撒砂是指在上述涂覆涂料后的模组上附上砂粒的作业过程。撒砂有雨淋式、流态床式和回转滚筒式三种方式。表 4-14 所示为这三种方式的比较。所谓雨淋式是将砂斗中的砂粒依靠电磁送料器通过筛网以雨淋形式撒附到涂料表面上。聚集在坑内的砂由斗式输送机送回到上部料斗中继续循环使用。

表 4-14 各种撒砂方法的特点和比较

撒砂方法	特 点
雨淋式	<ul style="list-style-type: none"> ① 适用于面层撒砂; ② 撒砂作业时间长,生产率低; ③ 能进行砂粒分级处理; ④ 砂粒容易分均匀附着
流态床式	<ul style="list-style-type: none"> ① 生产率高,适用于背层; ② 用于面层撒砂时,涂料膜能产生移动; ③ 锋利的刃部和外棱角砂粒难以沾附; ④ 砂团难以分离; ⑤ 型芯部位为盲孔时砂粒难以沾附; ⑥ 连续操作时砂层温度会显着升高; ⑦ 有噪音
回转滚筒式	<ul style="list-style-type: none"> ① 能用于面层撒砂; ② 能进行砂粒分级处理; ③ 占用场地少

图 4-14 所示为流态床撒砂装置。压缩空气从装置下部吹入砂床,使得砂层处于流动状态,涂覆了涂料的模组插入流动砂床中,砂粒撒附在模组的表面上。回转滚筒撒砂装置基本上是以回转方式实现雨淋式撒砂的一种机构,其装置比较简单。面层撒砂应该使用雨淋式或者滚筒式。这些撒砂方式中的砂粒是以非常自然的形式撒

砂在面层涂料的涂膜上，而流态床方式则砂粒能贯穿涂料的涂膜，且能引起涂膜移动，从撒砂作业生产率角度出发，流态床是最好的方式，而雨淋式和回转式附着的砂料均匀而且最少。

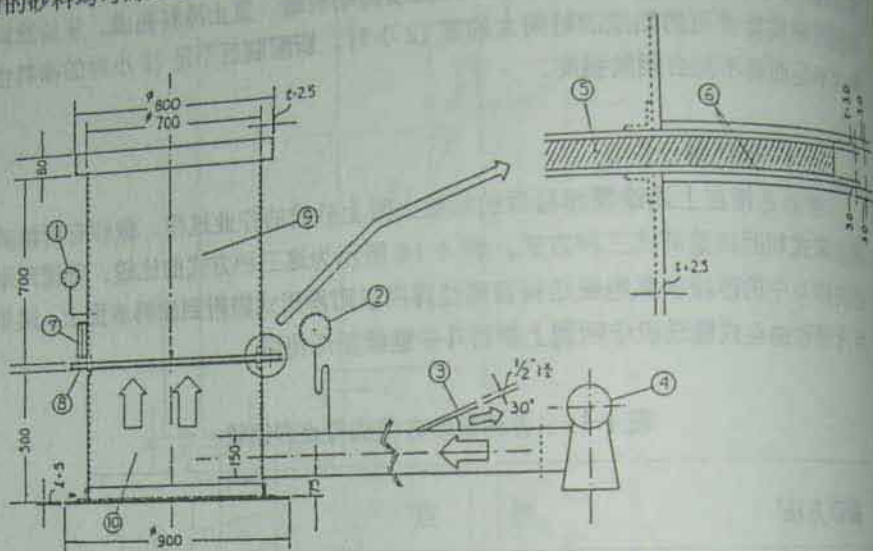


图 4-14 流态床撒砂装置结构简图

- ①装在砂床内的温度计； ②风速计； ③压缩空气吹入口；
④鼓风机 (11kw, 11.5m³/min)； ⑤滤网 (t=3)； ⑥铁丝网 (t=3)；
⑦排砂口； ⑧弯板； ⑨砂床； ⑩空气室

面层撒砂作业与涂料涂覆作业同样重要。撒砂以后必须充分确认砂粒的附着状态。特别是采用流态床撒砂时必须调整空气压力使得砂床处于均匀的流动状态，模组依靠自重能自然插入流态床撒砂，不许粗暴插入流态床中。在流态床撒砂时砂的流动状态具有方向性，所以往往会发生仅一部分撒砂，而有的部分则没有撒砂，这一点必须充分注意。

与涂料涂覆作业一样，面层撒砂时在口径窄的空穴部位、沟槽、文字及内角部位容易积附厚的砂层，所以撒砂以后必须用吹气处理去除剩余的游砂。面层砂层的游砂会引起脱蜡时型壳局部破损，在浇注时往往在这些部位产生型壳破坏，而造成铸造缺陷。当一个铸件的形状中有某个内角部位时，则该部位承受的高温液体金属的热冲击最激烈，因此要求这些部位的面层型壳比平面部位致密。可以说直至今天精铸件产生铸造缺陷的主要原因大多数是与制壳有关。如图 4-15 所示，当角内部为锐角时，其所附着的一层涂料和一层撒砂比平面部位厚，当然发生剥落缺陷的概率也大。通常锐角部位撒砂砂粒的间隙较大，充填密度显著降低，所以在液体金属静压的作用下，面层扭曲，产生应力和裂纹，同时由于撒砂砂粒层的物理结合破坏，引起剥落缺陷。对浇注后还是红色的型壳进行冲击试验，则会发现在型壳的 1-3 层石英砂撒砂的砂粒分界面上产生了壳片的面剥离，由此可以得知，当型壳受热冲击和物理冲击时容易破坏的部位是面层撒砂的砂粒层面处。

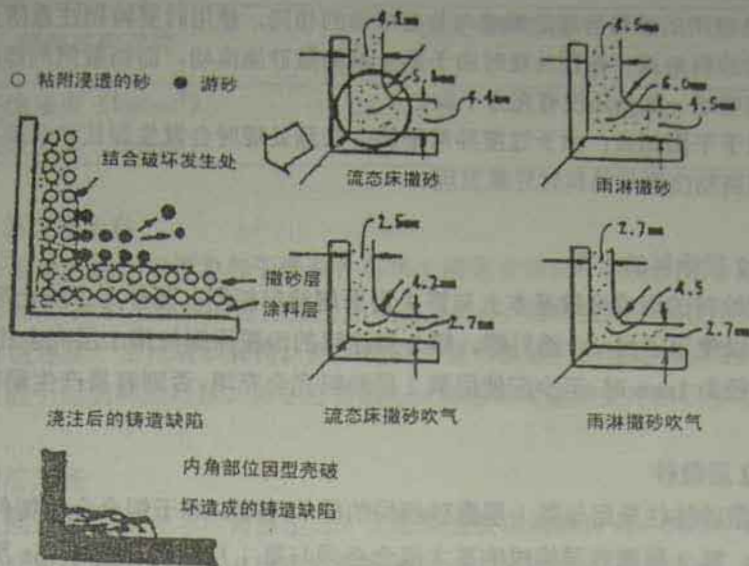


图 4-15. 面层内角部位产生剥落的机理及吹气处理的效果

4.2.3.5 面层干燥

陶瓷型壳制壳过程中时间最长的工序是干燥。在采用硅溶胶为粘结剂时，其中 70% 是水分，因此许多试验想提高硅溶胶粘结剂的干燥速度。面层的第一层的层厚大约为 0.15mm，是非常薄的涂膜。为了防止这一层非常薄的面层开裂和剥离，形成一个牢固的面层，必须严格控制面层涂挂室的室温和湿度。满足这样机能的室温是 22~24℃，湿度是 60~65%。由于面层的厚度很薄，所以不管铸件形状如何复杂，都必须极力保持各个部位的干燥速度相同。采用强制风干或者湿度小于 50% 都容易产生涂层开裂和剥离。另外室温不要超过以上范围。通常第 1 层和第 2 层的干燥时间分别为 2~3 小时。面层的干燥速度可用脱水率表示，干燥程度的界限大约为脱水率 70% 左右。

由于面层很薄，尽管制品形状相当复杂，但其干燥速度还是比较快，而且厚度薄也不能指望有高的型壳强度。另外由于面层密度致密，在一定条件下经过几个小时的干燥后的脱水率能达到 90% 以上，因而经常容易出现裂纹和剥离，这种现象第一层和第二面层制壳阶段经常出现，因此面层干燥最好是在高湿低温下进行，应绝对避免激烈地干燥。干燥程度的掌握方法，首先大致以干燥时间作为大致标准，同时在制品最难干燥的部位的表面搔挠校核。也有根据模组重量的减少作为脱水率的基准，也有用接触式水分测定仪测定脱水率。由于面层和背层的型壳干燥条件有很大不同，所以制壳场地必须明确分开。

4.2.4 第 2 层型壳涂挂

4.2.4.1 第2层预处理

第1层干燥到所定时间后,在第2层预处理前需用压缩空气吹去第1层的浮砂。第2层预处理用的涂料溶液的组成与前处理用的相同。使用时要特别注意防止污染前处理用的涂料溶液。在预处理时由于第1层的撒砂能流动,而当看到局部涂料层呈白色时表明这一部分还没有充分干燥。

另外对于平面部分,由于过度异常干燥,在预处理时会发生裂纹和剥离,这种倾向在采用高粘度面层涂料时经常发现。

4.2.4.2 第2层涂料的涂覆

第2层涂料的组成多数基本上与第1层面层涂料相同。另外为了防止污染第1层涂料,所以使用了另一个涂料罐。第2层涂料的涂覆原则与第1层完全相同。当铸件孔的口径为1mm时,至少应使用第2层涂料完全充填,否则容易产生漏钢缺陷。

4.2.4.3 第2层撒砂

第2层撒砂往往采用与第1层撒砂相同的砂和粒度。对于铝合金精铸件也常常使用莫来砂。第2层撒砂层构成的基本概念必须与第1层相同。图4-16a所示为吹砂处理后型壳各层的厚度。图4-16b这个型壳组成模式适用于狭窄口径孔部的型壳层充填。

目前常用制壳方法的最小口径设计界限为0.5mm,进行吹气处理后可达0.3mm,经过这种吹气处理后的型壳,由于其充填致密,型壳强度肯定能提高,表4-15所示为吹气处理后的型壳强度测定结果。

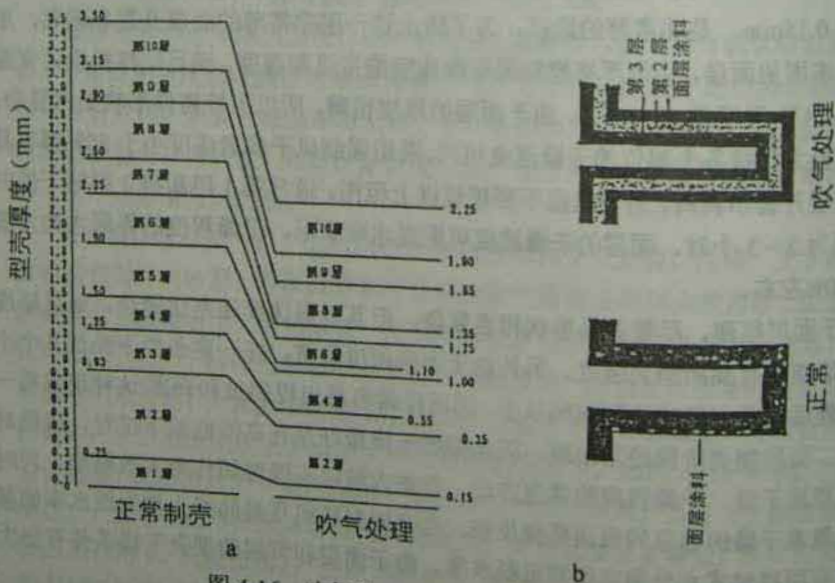


图4-16 吹气处理的型壳各层的构成

a—型壳各层的厚度变化

b—狭孔部位的型壳结构

表 4-15 吹气处理后的型壳强度

型壳抗弯强度	型壳制作方法	
	正常制作	吹气处理
干燥强度 (kg/cm^2)	21.59	32.51
烧成强度 (kg/cm^2)	53.90	77.58

4.2.4.4 第 2 层干燥

第 2 层型壳的干燥概念和干燥条件与第 1 层完全相同。型壳到第 2 层的层厚大约为 0.35mm。由于干燥后的型壳强度并不指望层厚，因此受到一些很小的应力和冲击作用时也容易产生龟裂和剥离。例如涂料涂覆和撒砂时的模组蜡模变形应力、韧性等都可能引起这样的问题。第 2 层前的作业都应尽可能避免冲击和小心处理。

4.2.5 背层型壳

第 3 层以后的型壳总称背层型壳。面层型壳要求耐热冲击、光滑、透气，而背层型壳除要求透气性外还要有增强性和保温性。另外涂料的基本组成、撒砂及干燥条件也与面层有很大不同。

背层型壳所采用粘结剂为硅溶胶或者硅酸乙酯水解液。硅酸乙酯水解液的性能如表 4-3 所示，它具有干燥时间短、型壳透气性好的优点，特别是背层层数较多，要求干燥迅速时很有价值。在美国，原先背层型壳广泛采用了硅酸乙酯，但是由于制壳室的操作环境问题以及背层型壳采用机器人的普及，大多数渐渐转化为硅溶胶。

4.2.5.1 第 3 层预处理

表 4-16 所示为第 3 层预处理溶液的组成。第 2 层干燥后也应用压缩空气吹去游砂，之后进行预处理。当前层撒砂为 0.3mm 以下的锆英砂时，如果直接进行背层涂料的涂覆，则由于砂粒表面涂料润湿性差，特别是会卷入很多气泡，因而使结合性变差。为了改善这一问题，在背层也应进行预处理。预处理使得涂层结合牢固，有效地防止了浇注时面层剥离和脱落缺陷。

表 4-16 第 3 层预处理溶液的组成

硅溶胶 (SiO_2 30%)	80kg
Victawet 12# (非离子型活性剂)	100g
蒸馏水	350g

注：先将 100g Victawet 12# 混入 350g 蒸馏水，然后再将此混合液配入硅溶胶中。

4.2.5.2 第3层背层涂料的涂覆

所谓背层涂料是指从第3层到最后一层所用的涂料。表4-17所示为以硅溶胶为粘结剂的涂料组成。背层用的硅溶胶的性能要求考虑型壳的增强效果和浇注后的溃散性。如果优先考虑溃散性时，则应该采用胶粒直径为10~20nm的硅溶胶。对于铝合金精铸件，应该选择和调整到SiO₂浓度为20%，胶粒直径为10~20nm的粘结剂。

表4-17 硅溶胶背层涂料的组成

类别	品名	备注
粘结剂	硅溶胶	SiO ₂ 30%, 粒子直径 10~20nm
耐火粉料	熔融石英粉	L-105
润湿剂	Victawet 12 [#]	非离子型
消泡剂	Dow corning Y-30	

注：粘度调整到4[#]詹杯11~14秒。

作为涂料的耐火粉料，为了保持溃散性和尺寸精度，多数使用熔融石英粉。另外从经济角度考虑也可以采用莫来粉和陶渣粉及粘土熟料粉代替熔融石英粉。

表4-18所示为铝合金用背层涂料。由于涂料的耐火粉料是比较粗的熔融石英粉，所以涂料流动性好，滴料时间短，能够提高生产率。图4-17所示是背层涂料用耐火粉料的粒度分布。

表4-18 铝合金用背层涂料的组成

类别	品名	备注
粘结剂	硅溶胶-47	SiO ₂ 20%, 粒子直径 10~20nm
耐火粉	Mulcoa-Grade 48	
润湿剂	Victawet 12 [#]	非离子型
消泡剂	Dow corning Y-30	

注：粘度调整到4[#]詹杯10~12秒。

背层涂料用耐火粉料的粒度分布对整个型壳的透气性也有相当大的影响，特别是采用300目以下的粒度占有率超过50%的耐火粉料时，透气性将明显恶化。实际生产中也容易发生浇注充填不良缺陷。在背层涂料涂覆时由于涂料粘度低，在粘结剂的毛细管渗透力的作用下，涂料将明显地向面层浸透，所以应尽可能地控制模组在涂料中的浸渍时间，当粘结剂浸透达到饱和程度时将严重恶化干燥。背层涂料涂覆操作应注意掌握：浸料时间短，滴料充分。

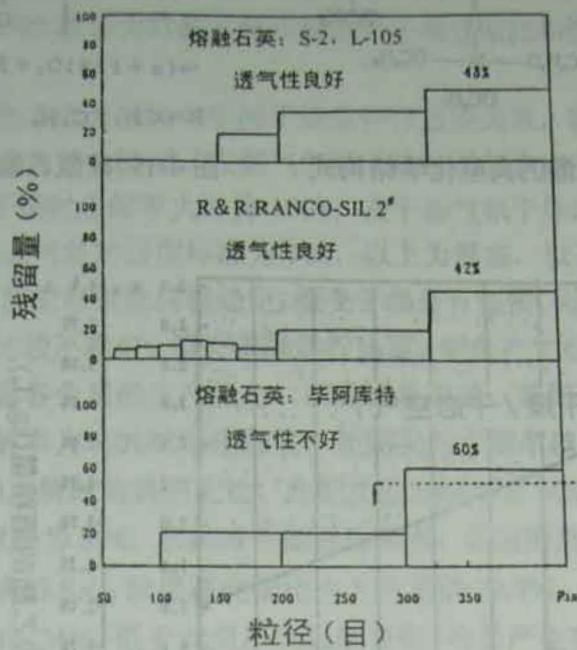


图 4-17 背层涂料用耐火粉料的粒度分布

为了减少涂挂层数，在背层涂料中可以配入玻璃纤维和碳纤维等无机纤维，配入量为耐火粉料的 0.2%~0.5%，所用纤维的长度为 1~1.5mm 时能有效提高型壳强度，这样可以削减 1~2 层。背层涂料粘结剂采用硅酸乙酯水解液的也很多。含 SiO₂40% 的称为硅酸乙酯 40，表 4-19 所示为各种市场供应的硅酸乙酯性能。硅酸乙酯 40 是平均聚合度为 4~5 的直链状、环状、分叉状聚合物的混合物，含有极弱的酒精味，稍有粘性，不能与水接触。如果能避免与空气接触则还是比较稳定的。可是如果直接或间接接触空气中的湿气，则会发生水解，终于分解为硅凝胶和酒精。胶凝化的浆料失去了粘结剂的功能。另外在操作上硅酸乙酯 40 属于消防法中规定的石油类制品。作业环境上它本身具有的允许浓度为 2500ppm。图 4-18 所示为硅酸乙酯 40 的化学结构式。如图所示，它的主体是聚合度为 5 的聚硅酸乙基酯。

表 4-19 商品硅酸乙酯的性能

商品名	密度	SiO ₂ (wt%)	酸度	酒精	粘度	凝固点
シリエステル OS (三菱蒙三特化成)	1.07	40~41	0.002HCl%	<1.0%	5cps	-50°C
Tama 硅酸乙酯 40 (多摩化学工业)	1.034	39~41	0.01HCl		4.8cps	
硅酸乙酯 40 (コルコート公司)	1.045	40~41			4.2cps	

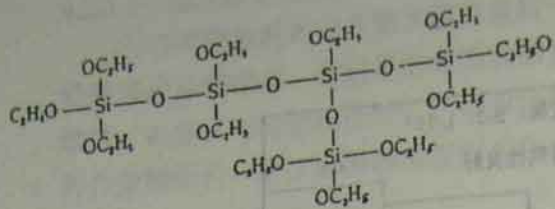


图 4-18 硅酸乙酯的典型化学结构式

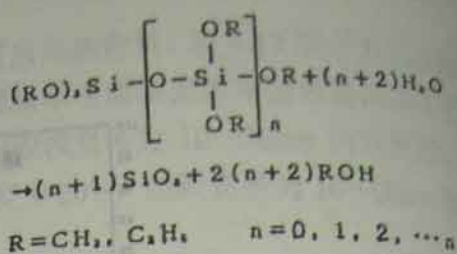


图 4-19 硅酸乙酯的水解反应式

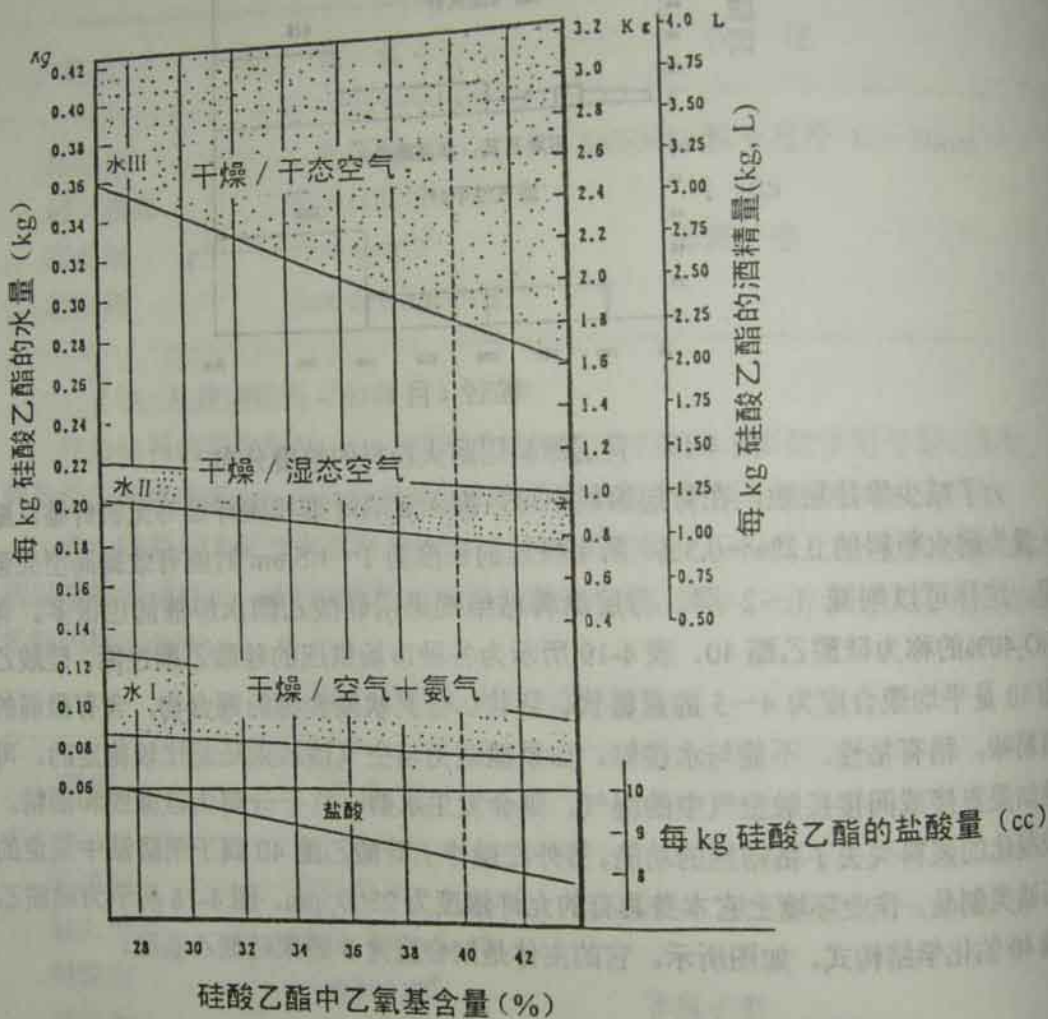


图 4-20. 硅酸乙酯水解配比计算图

硅酸乙酯水解后才能作为粘结剂使用，其水解按图 4-19 所示反应式进行。硅酸乙酯和水的水解作用是在溶剂中触媒存在的条件下进行的。硅酸乙酯属于油性物质，与水不相溶。溶剂可以采用乙醇、异丙醇、甲醇、异丁醇、丙酮等。水解在中性条件下进行得很缓慢，但当有触媒剂酸和碱存在时进行得很快，而且伴随有发热出现。常用的有效触媒是盐酸。采用酸触媒的原因是因为它比采用碱触媒的缩聚反应缓慢。图 4-19 所示是相应水解率为 100% 时的反应式，将此式的水量乘 0.8 即为水解率为 80%。各制造商从以粘结剂为目的和涂料长期稳定性出发考虑决定其水解率。

水解液刚新制成时是低粘度的液体，随着时间延长慢慢增粘，最后结果达到胶凝化。这种胶凝化，即增粘现象将导致涂料性能变坏。硅酸乙酯水解液的长期稳定性主要决定以下因素：①SiO₂浓度；②水解率；③盐酸的加入量；④环境温度；⑤溶剂的种类和加入量。图 4-20 所示为硅酸乙酯水解液各成分配比和型壳合适干燥范围关系的计算图。

硅酸乙酯水解液的基本成分配比与型壳干燥条件有直接关系，根据干燥方法，其相应的配比范围可以分为三个区域。在氨气气氛下进行强制快速干燥时水解率大约为 50%；在湿气气氛下干燥时水解率大约为 100%；在干态气氛干燥时水解率应调整到 150%。区分干态与湿态气氛的湿度标准为 70%，以上为湿态，以下为干态。例如用水解率为 150%的粘结剂配制的涂料较稳定，型壳干燥进行缓慢，而用水解率为 50%的粘结剂配制的涂料则比较不稳定，型壳干燥进行迅速，容易产生型壳开裂和剥离。干燥条件的选定必须根据各公司的生产能力、制壳设备决定。采用硅酸乙酯水解液为粘结剂的型壳强度水解率为 50%时强度最高，粘结剂的水解率越高，强度越低。表 4-20 所示为硅酸乙酯水解时的典型配比，此配比的水解率为 50%。相对硅酸乙酯 40，配入水 10%正好水解率为 50%。水解时不能用自来水，必须用蒸馏水。另外对水解液型壳强度有直接影响的 SiO₂ 浓度在此配比中为总量的 22.7%。通常陶瓷型壳用水解液的 SiO₂ 浓度为 18~24%，低于此值型壳强度变弱，容易产生夹砂和型壳破损，高于此值则涂料容易胶凝而难以长期使用。水解液的制作方法是，首先将蒸馏水和盐酸混合，然后将酒精配入此混合液中，在很好搅拌混合后，最后慢慢滴入硅酸乙酯 40。全部混合结束后继续熟成搅拌大约 5 分钟。此时液体会立即发热，图 4-21 所示为水解液熟成过程中的温度变化。此水解液温度冷却到常温大约需要 90 分钟左右。如果回到原先的常温，此溶液就可作为水解液供配制涂料使用。注意：水解液搅拌装置有发生火灾的危险，所以不应使用金属制品。表 4-21 所示为硅酸乙酯背层涂料的组成配比。

表 4-20 硅酸乙酯水解液的配比和性能

配方组成	配入量 (cc)
硅酸乙酯 40	5000
酒精	3300
浓盐酸	11.6
蒸馏水	500
水解液性能：	
SiO ₂	22.7%
密度	0.87~0.89
PH	2.1~2.4

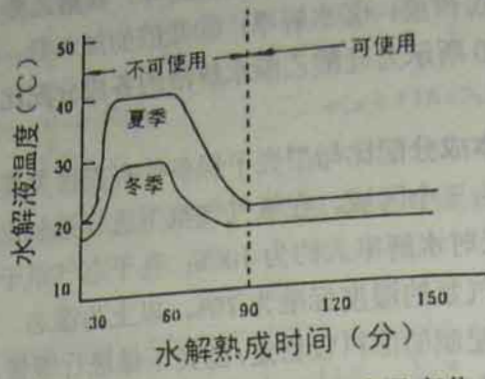


图 4-21 水解液熟成过程中的液温变化

表 4-21 硅酸乙酯背层涂料的组成

粘结剂:	硅酸乙酯水解液 (SiO ₂ : 22.7%)
耐火粉:	Mulcoa-47-Grade48

注: 涂料粘度调整到 4# 詹杯 12~14 秒

硅酸乙酯涂料具有良好的润湿性, 所以不必使用润湿剂和消泡剂。可是如果面层涂料采用硅溶胶作为粘结剂的话, 则也存在背层和前层牢固结合的问题, 特别是在生产平面大的大型铸件时会产生分层现象, 此时可以在硅酸乙酯涂料涂覆前先用硅酸乙酯水解液进行预处理, 这样可以解决不同材料层之间的结合, 防止层间分层剥离。

硅酸乙酯背层涂料用的耐火粉料也往往采用 200 目左右的锆英粉。在使用硅酸乙酯涂料涂覆时由于涂料层干燥速度快, 所以涂料滴料时间不能太长, 否则会产生因涂料表面干燥而撒不上背砂砂粒的现象, 因此与硅溶胶涂料相比, 从涂覆到撒砂的动作必须要快。

采用硅酸乙酯涂料时必须充分考虑制壳室的工作环境, 特别是对于臭气的对策。采用硅酸乙酯背层涂料时的理想型壳干燥条件是温度 24~26°C, 湿度 70%~75%。采用硅溶胶背层涂料时的型壳干燥条件必须是温度 22~26°C, 湿度 30%~40%。粘结剂不同, 干燥条件也有很大不同。

4.2.5.3 第 3 层撒砂作业

所谓背砂是指第 3 层以后直至结束的撒砂用的砂粒。背砂大多数采用莫来砂、刚玉砂、熔融石英砂。图 4-22 所示为背砂的粒度分布。背层撒砂操作几乎都使用流态床方式。第 3 层背砂通常采有 0.3mm、0.3~0.7mm 的单一刚玉砂, 而第 4 层以后的背砂采有 0.7~1.0mm 或者 0.7~1.5mm 的砂粒。特别是第 3 层用的砂, 由于要求面层和背层之间的层间结合紧密, 所以必须采用正好是中间粒度的砂粒。第 3 层

撒砂如果采用 0.7~1.0mm 的砂粒,则在制品的边缘部、刃部以及锐角的内圆角等部位难以沾附砂子,型壳壁厚难以均匀。当铸件带有口径小的孔部及细小的沟槽和文字等部位时,第 3 层、第 4 层甚至第 5 层都要用 0.3mm 的刚玉砂及莫来砂。

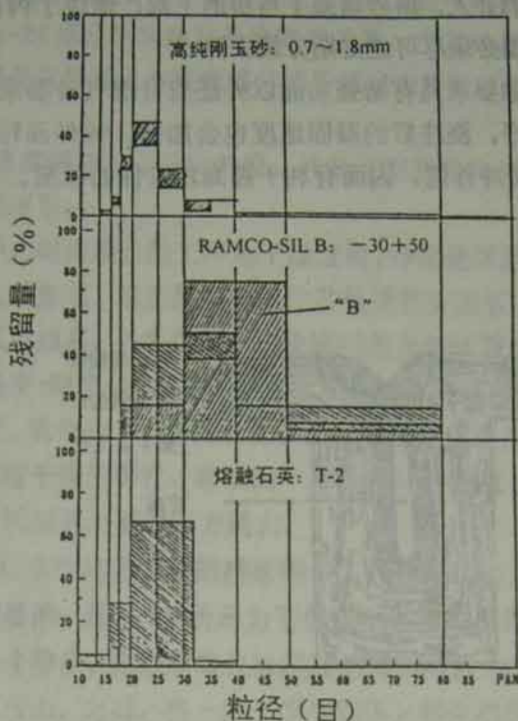


图 4-22 背砂的粒度分布

当铸件壁厚较厚时,第 3 层~第 5 层撒砂如果采用锆英砂,则可以充分耐住高温液体金属的热冲击。如果如上那样从面层到第 5 层的撒砂都采用粒度较细的砂(锆英砂和 0.3mm 的刚玉砂及莫来砂)时整个型壳的厚度较薄,为了能达到能耐高温金属所需的厚度,一般必须比正常的型壳层数增加 2~3 层。

的确,采用上述的撒砂方式完全可以铸出孔、沟槽部、文字部,可是由于整个铸型透气性下降,又反而形成液体金属充填不良及气孔缺陷。同时由于透气性原因而往往会产生脱蜡时型壳开裂等缺陷。解决这类技术问题的撒砂方法可以采用双重撒砂法。所谓双重撒砂法是指在孔部、沟槽部、文字部附近只用锆英砂和 0.3mm 的刚玉砂,而其余整体则用 0.3~0.7mm, 0.7~1.0mm 的刚玉砂进行背层撒砂。第 3 层以后的撒砂从透气性优先角度考虑应该采用粒度粗的砂,而且最好是使用粒度分布峰值幅度较窄的单一砂。由于背层撒砂的装置采用流态床,而模组插入有一定的方向性,因而制品的憋气部位难以附上背砂砂粒,因此必须充分确认砂粒附着,同时在撒砂后必须用压缩空气吹去游砂。后半部分作业时每组型壳的重量可以超过 10kg 是相当重的,所以可以采用自动制壳机器人和平衡器或者机械手。有的机器人一次已可进行 8~9 个模组的制壳。

当铸件超过 1 英寸时,第 3 层及第 4 层用的撒砂材料的耐火度对铸件质量影响

很大，厚铸件往往产生粘砂和表面粗糙缺陷，特别是在使用 Al_2O_3 小于 45% 的氧化铝系砂和莫来砂时这种缺陷常常可见，在浇注不锈钢和耐热钢铸件时也能见到。在第 3 层到第 5 层的背层散砂时，如图 4-23 所示，在制品的局部容易出现图示那样的搭桥缺陷，这个缺陷的产生与各涂层的涂料的流动性差滴料不充分及游砂没有去除有关。由于游砂的介入，游砂堵塞了搭桥的上部，造成了内部空隙。

流态床中的散砂砂团必须尽可能定期分级去除。如前所述，对背层除要求具有增强功能以外还应有透气性要求。如能满足透气性要求则脱蜡性也会良好，浇注后的凝固速度也会加快，铸件晶粒细化，也能对高温液体金属的热冲击起缓冲作用，因而有利于提高精铸件的品质。

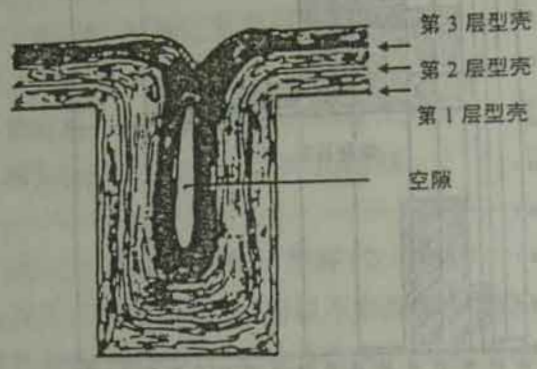


图 4-23 面层涂料不均匀和砂粒阻塞引起的搭桥缺陷

4.2.5.4 第 3 层的干燥

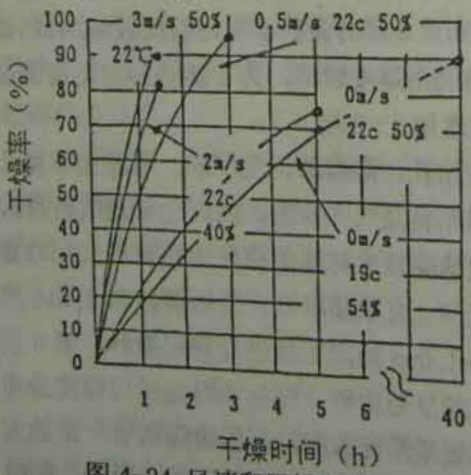


图 4-24 风速和干燥率的关系

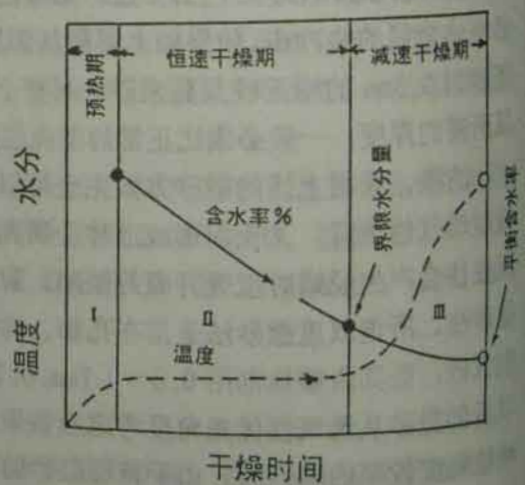


图 4-25 干燥脱水率和型壳温度的关系

硅溶胶背层的干燥条件与面层有很大的区别。背层涂料的组成中的水分较多，而且粘度低，因而其中的水分向面层一侧浸透显著，所以干燥效率较低，因此其干燥条件必须是恒温低湿。正由于其干燥条件与面层干燥条件有很大的不同，所以需要把制壳明显区分为两个，而现状实际几乎所有的工厂的面层和背层的干燥是在相

同气氛的制壳室中进行的。为了防止面层开裂和剥离，几乎所有工厂的制壳室的气氛是在优先考虑面层干燥条件下进行的。在这种情况下，由于恒温高湿的结果，降低了背层的干燥效率。为了缩短干燥时间可以采用风机进行强制风干以提高干燥效率，风干加快了干燥速度。最佳风干效果的风速是 2m/s ，有的工厂在型壳风干输送线的上方安装了风速计，根据风速进行管理，也可根据飘带飘动状态来简易地确定风速。图 4-24 所示为风速与干燥率的关系，由其结果可知，风速越增大，干燥速度越快，但是直接遇风的型壳部分的干燥状态较好，而整个型壳的各部位则难以干燥均匀。

作者为了提高背层的干燥均匀度，开发了型壳真空干燥装置 (PVD)，有关这些内容将在后面报导。

精密铸造中占时间最长的工序是干燥过程。特别是背层型壳的干燥程度不仅对后续工序有很大的影响，而且是影响铸件质量的重要因素。型壳干燥越好，干燥后的强度和烧成强度越高。干燥强度还与脱蜡时型壳的开裂密切相关。所以背层的干燥管理，包括温度-湿度-风速三要素的空调管理是关键要点。在干燥的最初阶段，由于水分的蒸发、吸热冷却，使得插在模组蜡模中的干湿温度计的湿球显示出低的温度，之后随着干燥的进行，蜡模的干球温度计的温度也上升，湿球温度和干球温度的差越大表明型壳内部的应力越大。

实际上，严格实行风速管理的精密铸造工厂仅很少的几家，而风速和风速分布的控制是非常重要的。图 4-25 所示为干燥脱水量和型壳温度变化的关系。一般说干燥可以分为三个阶段。在成型壳涂料层的最初阶段由于水分过饱和，使得粒子处于被水膜覆盖状态。之后，在一定干燥气氛下，型壳层的温度到达了与干燥条件相平衡的温度，从干燥开始到到达这个温度，称为 I 阶段，即预热阶段。之后，由于型壳层中水膜的存在，型壳层温度几乎恒定，而这个阶段的含水量与时间成比例地减少，此时的干燥程度可有斜线表示，此阶段为 II 阶段，即恒温恒速阶段。接着干燥速度减少，当达到了与干燥条件相平衡的含水率时，干燥终止，这个阶段称为 III 阶段，即减速干燥阶段。对于硅溶胶的背层的干燥，其恒温恒速阶段非常之长，所以可以采用风干方法来缩短干燥时间。

对于大型精铸件，型壳的层数多达十多层，另外对于形状复杂的铸件也需要更长干燥时间，此时生产效率成了最大的障碍。为此采用了前面已经介绍的本文作者开发的真空干燥装置，以及 Prytech 公司开发的快速干燥隧道系统和 Cargocaire Eng 公司开发的调节式干燥系统，收到了很好的效果。图 4-26 所示为 Cargocaire 公司开发的调节式干燥系统。

通常在一定干燥条件下，背层各层的干燥大约需要几个小时。另外对于有复杂型芯形状的铸件也有采用一天仅制一层壳的，其原因是型壳表面和型芯的干燥速度有一定间隔。为了使表面部位和型芯部位的干燥速度一致，并为了提高干燥程度，开发了真空干燥装置 (PVD)。本装置中真空和温吹风交互操作，既保持了型壳温度恒定，又缩短了脱水操作时间，由于采用了本装置，使得干燥时间比通常缩短了一半。

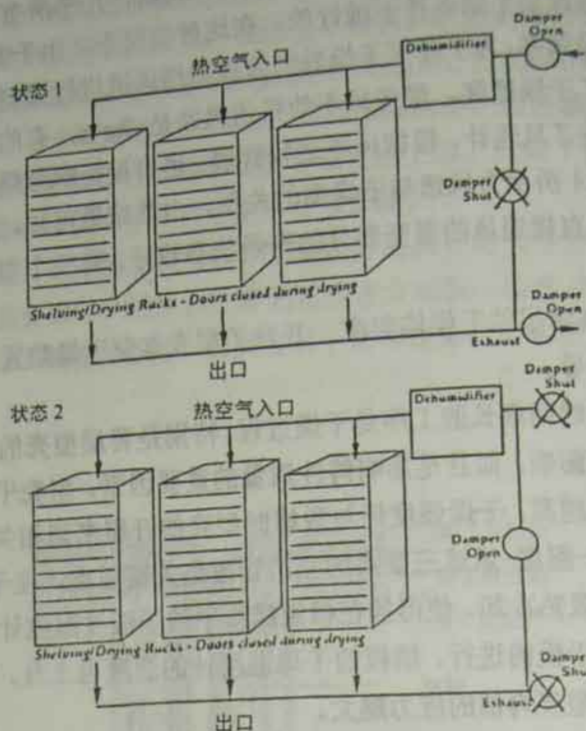


图 4-26 Cargooaire 公司开发的调节式干燥系统

几乎所有的精密铸造工厂型壳干燥线都是采用悬挂式输送线，此时，希望整个型壳干燥室的空调管理在任何场所都应均匀。

硅酸乙酯背层的干燥条件和硅溶胶有很大不同，其湿度必须高，基本上必须维持在 70%~75% 的高湿度气氛。硅酸乙酯型壳的干燥如图 4-20 所示，基本上有三种方法：其一是在高湿气氛下，同时在氨气环境下迅速硬化；其二是在高湿气氛下的干燥方法；其三是在干燥大气下的干燥方法。一般采用前面两种。硅酸乙酯背层的水解液膜，在高湿气氛空气中的湿气作用下，硅酸聚合物继续进行水解反应，同时进行缩聚和凝固反应。假如在干燥气氛中湿气不够的情况下，也即低湿度气氛下，就不能充分发生缩聚反应，由于反应在恒速阶段终止，所以强度比较低，容易产生剥离现象。对于在氨气气氛下的硬化干燥法，先是在高湿气氛下干燥 30 分钟，之后在氨气密封气氛中（氨浓度 0.5%~0.8%），大约胶凝硬化 15 分钟，之后再在高湿气氛下进行 15 分钟的最终干燥，最终干燥的目的是去除渗入型壳的氨气。如果将含有氨气臭味的模组再浸入硅酸乙酯涂料中，就会使涂料胶凝变质。硅酸乙酯背层采用高湿气氛下干燥 2~3 小时的方法是最稳定、操作最容易的方法。

4.2.5.5 第 4 层以后的型壳背层操作

第 4 层以后的涂料涂覆技术、撒砂技术以及干燥条件和第 3 层的技术完全相同。对于一般精密铸造件，其型壳层数以 6 层为基准，此时背层由四层构成。背层涂料可以原样使用。用作撒砂的标准砂为刚玉砂，粒度为 0.7~1.0mm。

另外对于中碳钢、高碳钢以及低合金钢精铸件，为了防止凝固时表面脱碳，在

第4层、第5层撒砂中可以在刚玉砂中混入百分之几的渗碳剂。

当铸件壁厚较薄时，为了增强背层和保温，在最后一层背层附近可以采用撒金属短线。

当铸件壁厚大时，为了形成能耐液体金属的高温冲击和液体金属应力的型壳，通常型壳层数可以达到十几层厚。可是这种方法需要较大的制壳工时，型壳材料费也相当高，为此可以采用通常的陶瓷型壳做到4~5层，浇注时将此烧成的型壳插入锆英砂的流动槽中，之后停止槽内流动，在负压吸引的状态下进行浇注。这个方法特别是在社会主义国家的很多工厂被采用。采用这个方法，背层层仅2~3层，制壳工时数可大大削减。采用这种方法浇注时必须满足-600mmHg柱的真空度要求，此法也可用于解决液体金属充填不良的问题。

最近日本的精铸件明显大型化，已经生产出了500×500×500mm的大型铸件。此时模组组装时增强的蜡质浇注系统难以完全承受型壳的重量，在后半部背层制壳操作时模组很容易破损，型壳的最大总重量可以超过30kg，所以为了事先保证模组组装的强度，必须采用铝合金等重量轻的芯骨增强。

4.2.5.6 制壳最终涂料涂覆操作

制壳的最终操作通常只使用背层涂料，而不进行撒砂。最终涂覆涂料的目的是增强型壳强度，使前层的撒砂能牢固连结。最终操作的涂料的粘度过高有利于增强型壳，但是大大有损型壳的透气性，脱蜡时由于热量从型壳外壁传入的传热速度比较慢，而往往发生脱蜡时型壳开裂。所以最终操作的涂料的粘度尽可能低，也可以采用背层涂料用的粘结剂。

4.2.5.7 型壳最终干燥

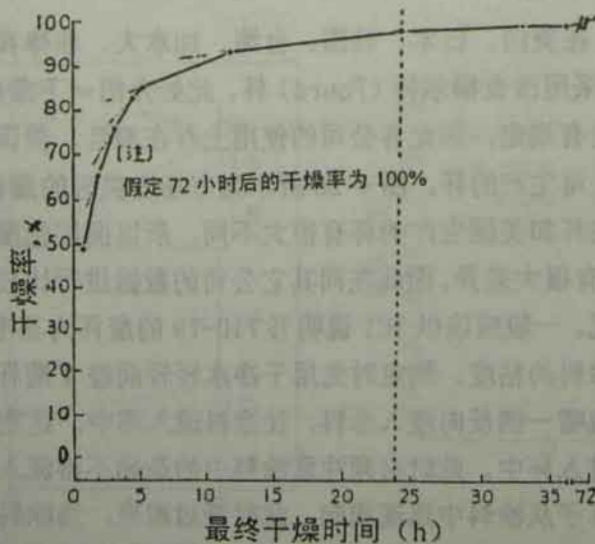


图 4-27 最终干燥时间与干燥率的关系

硅溶胶型壳的最终干燥时间在温度、湿度以及风速等空调管理下大约需要 24 小时，硅酸乙酯型壳大约为 12 小时左右。图 4-27 所示为最终干燥时间与干燥率的关系，24 小时的干燥率大致处于平衡状态。为了缩短最终干燥时间可以采用前面介绍的真空干燥装置 (PVD)，采用这个装置后可以缩短干燥时间 20 小时以上。

4.3 涂料管理

陶瓷型壳的涂料管理非常重要，特别从获得合格的型壳和质量管理角度考虑，在保持涂料的长期稳定性，防止涂料胶凝劣化倾向方面都还存在着不少问题。这些问题不论是硅溶胶粘结剂还是硅酸乙酯粘结剂都存在。涂料必须保持在新配的组成和品质的恒定状态。由于涂料的胶凝化使得涂料粘结剂中的 SiO_2 胶粒浓度升高，同时粘结剂的 PH 值也超出了安全范围，另外涂料浓度也会异常升高。所以涂料管理可以说就是防止涂料的胶凝化的发生。如果涂料发生胶凝化，则涂料的控制指标值会发生异常，同时涂料的性能也出现大的变化。例如：首先面层制壳时和干燥过程中往往发生壳层开裂和剥离。又如脱蜡时型壳开裂和型芯开裂的数量增多，浇注时往往发生漏钢，结果铸件废品增加。为了防止这些铸造缺陷的产生，涂料管理是绝对不可少的。

4.3.1 硅溶胶涂料管理

涂料管理对于面层涂料和背层涂料，其管理概念完全相同。管理内容包括：①涂料粘度测定；②涂料组成测定；③涂料比重测定；④涂料中粘结剂的 PH 值测定；⑤涂料中粘结剂的 SiO_2 浓度测定；⑥涂料表面的外观目测评价；⑦涂料的水分测定和水分添加。

4.3.1.1 涂料粘度测定

涂料粘度的测定，在美国、日本、韩国、台湾、加拿大、菲律宾等地都采用詹 (Zahn) 杯，欧洲各国采用改良福特 (Fourd) 杯。此处介绍一下詹杯的使用方法。詹杯的形状在 JIS 中没有规定，因此各公司的使用上存在混乱。美国精密铸造协会 (ICI) 使用的是 GE 公司生产的杯。图 4-28 所示为市场上供应的詹杯的尺寸大小。日本离合社公司生产的杯和美国生产的杯有很大不同，所以面层粘度和背层粘度的测定值如图 4-30 所示有很大差异。因此在同其它公司的数据进行比较时必须注意各自粘度测定用杯的情况。一般应该以 ICI 说明书 710-79 的詹杯为基准，以测定涂料流出时间来表示所测涂料的粘度。测定时先用干净水轻轻润湿 4[#] 詹杯两次倒掉，然后立即从杯的上部溢流嘴一侧反向浸入涂料，使涂料流入杯中，达到容量的 1/3 之后使涂料从杯的流出进入杯中。此时必须注意涂料中的杂物不得流入杯中。到涂料全部流入结束立即将杯子从涂料中迅速提起，此时开启跑表，当涂料滴落到后一半时，把流出嘴部放到与测定者视线水平位置，当流出的料在流嘴下 10mm 处断流的瞬间停止跑表。图 4-29 所示为詹杯测定粘度的基准，图中 A 法测定误差最小。测定次数应根据实际涂料使用的次数和生产率决定，一般每天三次左右。由于詹杯毕竟是测定粘度的简易测定器，所以应反复正确操作。平时应保持清洁，实际测定的个人

误差必须控制在±0.5秒以内。对于面层涂料和背层涂料一般基本采用4[#]詹杯。采用4[#]詹杯以外的杯进行测定时必须把握住粘度检测的基本数值。采用詹杯测定涂料的粘度只是检查涂料的粘性阻力的一种方法，根据此结果判断涂料的配比以及胶凝化倾向是不合理的，可是能对于涂料浓度有个大体的认识。理由是涂料由耐火粉料和粘结剂组成，也即由耐火粉料和水及SiO₂胶粒组成。如果粘度高，则可能有两种可能性，其一，耐火粉料含量多导致涂料浓度高，另一种是粘结剂的SiO₂高浓度化导致粘结剂的粘性增大。因此有关涂料粘度测定应该参见后述的管理内容指示。ICI为了比较涂料的性能除了采用詹杯测定粘度处，还进行涂片测定。这个方法可很方便地比较涂料的沾附性。试验时将60mm×60mm的金属板浸入涂料中，待滴流终止后测定其重量，由此判断涂料的性能，图4-31所示为涂片重量和詹杯测定的粘度值。从这个结果也可以清楚了解涂料的沾附量和涂料比重的关系。

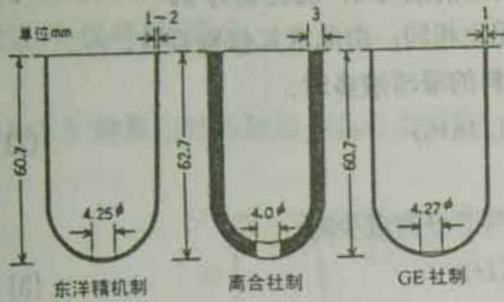


图 4-28 商品詹杯的尺寸

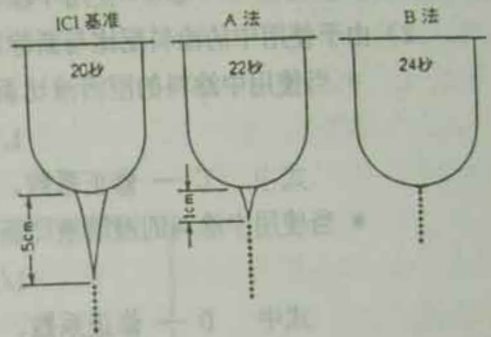


图 4-29 詹杯测定粘度的基准



图 4-30 不同4[#]詹杯的粘度值误差

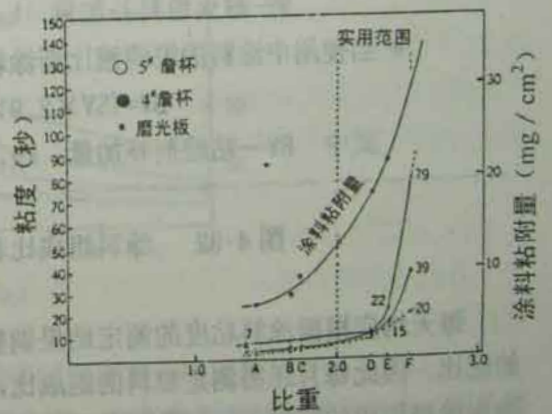


图 4-31 涂料粘度、密度和沾附量的关系

4.3.1.2 涂料组成比的测定

测定方法是：先采用离心分离机将待测涂料分离，测定分离后的澄清液的容量和分离前的涂料的容量，了解涂料中的粘结剂和耐火粉料的比例。此时离心分离机的转速为 3000rpm，回转时间为 20 分钟。然后以新涂料的配比为基准求出使用过程中的涂料配比，在此基础上调整涂料组成。图 4-32 所示为配比计算和配比调整方法。

1) 粘结剂/耐火粉料：澄清液/沉淀物。

$$1/A:1/B=1/a:1/b \quad (1)$$

式中

1/A—新涂料的粘结剂为 1，耐火粉料为 A；

1/B—新涂料的澄清液为 1，沉淀物为 B；

1/a—使用中的涂料的粘结剂为 1，耐火粉料为 a；

1/b—使用中涂料的澄清液为 1，沉淀物为 b。

2) 由于使用中的涂料配比与新涂料配比相同，由此求其修整系数。

* 当使用中涂料的澄清液比新涂料的澄清液多时：

$$1/A=1/(a+C) \quad (2)$$

式中 C—修正系数。

* 当使用中涂料的澄清液比新涂料的澄清液少时：

$$1/A=(1+D)/a \quad (3)$$

式中 D—修正系数。

3) 由使用的涂料槽中涂料的容量和修正系数，采用下式求出粘结剂或耐火粉料的补加量。

* 当使用中涂料的澄清液比新涂料的澄清液多时，补加耐火粉料：

$$W=(SV \times 2.9 \times C)/(a+1) \quad (4)$$

式中 SV—涂料总容量；

W—耐火粉料补加量，kg。

* 当使用中涂料的澄清液比新涂料的澄清液少时，补加粘结剂：

$$BV=(SV \times 2.9 \times D)/(a+1) \quad (5)$$

式中 BV—粘结剂补加量，kg。

图 4-32 涂料组成比和配比修正法

每天均应根据涂料粘度的测定结果调整涂料的组成，但是这只能保证涂料大致的配比，因此每月还需测定涂料的组成比，并据此正确进行涂料配比的微调，以确保涂料组成的稳定。特别是对于面层涂料，由于使用前处理液而使面层涂料渐渐稀释，从而引起涂料组成产生大的变化。而对于背层涂料，则由于使用频繁、经常补充新涂料，因此涂料配比变动不太显著。面层涂料的浓度过高容易发生涂料胶凝恶化倾向。

4.3.1.3 涂料比重测定

涂料比重相对反映了涂料的组成配比和涂料中粘结剂的比重。但是如果直接使用这些正确的数据也会出现一些问题，因为当粘结剂本身有胶凝化倾向时其比重也会有一定的变化。涂料比重的测定一般是在 100ml 的量筒中正确量取 100ml 涂料，然后测定其重量，求出其比重。也有使用比重瓶和浮标测定的。另外也有将涂料中的粘结剂抽出测定粘结剂的比重的。当出现新涂料比重和使用中的涂料比重有异常不同时，则须同时测定上述的涂料成分配比，然后正确进行涂料组成的调整。

4.3.1.4 涂料中粘结剂的 PH 值测定

采用离心机将涂料中的粘结剂抽出后，使用 PH 测定仪测定粘结剂的 PH 值。新的粘结剂的 PH 值为 9.5~10.5，旧涂料由于受离子化倾向的影响，PH 值稍微有变化，此时可使用碳酸铵溶液适当调整 PH 值。但是除了使用相当多含有杂质的耐火材料和离子性高的润湿剂及消泡剂以外，PH 值一般不会有大的变化。PH 的测定可以采用电极型 PH 仪和 PH 试纸。

4.3.1.5 涂料中粘结剂的 SiO_2 浓度测定

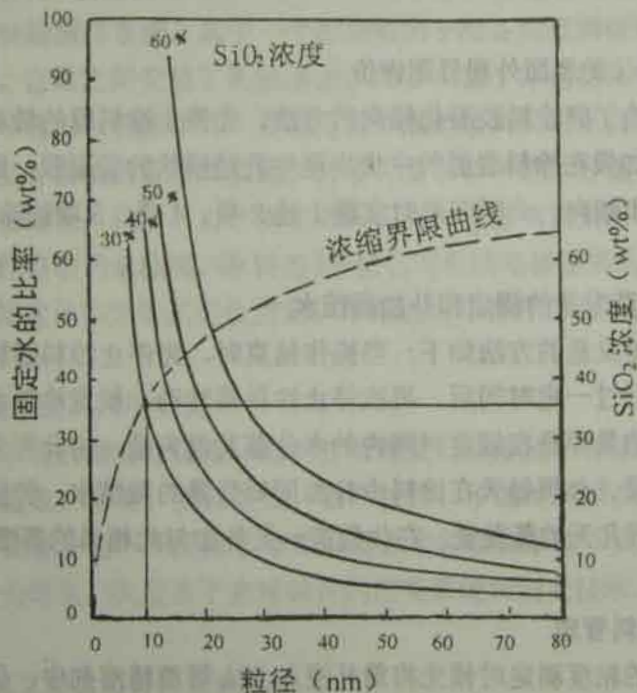


图 4-33 硅溶胶的 SiO_2 浓度和固定化水分的关系

SiO_2 浓度测定是涂料管理中最重要内容。在有空调控制的制壳室中，不论那种涂料罐，其涂料粘结剂中的水分都会蒸发消失，这个蒸发量的多少取决于制壳室的空调气氛和涂料罐的口径，一般说 1 米直径的涂料罐大约每天蒸发水分 1~2 升。在正确求得水分蒸发量后每天必须补加与蒸发量相同的蒸馏水。新粘结剂的 SiO_2

浓度大多数情况是 30%，粘结剂的组成残余的 70% 是水。如果这个水分蒸发消失了一部分，粘结剂中含水只有 60% 时，则 SiO_2 浓度相反提高到了 40%。试验结果表明当粘结剂中的 SiO_2 达到 35% 时涂料的胶膜劣化倾向变得明显。这一点由图 4-33 所示的硅溶胶的 SiO_2 浓度和固定化水分的关系的浓缩界限曲线就可清楚地看出。即 SiO_2 浓度胶粒直径为 10nm、 SiO_2 浓度为 30% 的粘结剂，当其固定化水分在 35% 以上， SiO_2 浓度在 35% 以上时则有胶凝化倾向出现。

不能使用自来水代替蒸馏水。因为自来水的离子化影响涂料的 PH 值，对涂料的稳定性有负面作用。另外面层制壳室和背层制壳室的湿度有很大差异，所以各个涂料罐的水分蒸发量也有很大的不同。当因水分蒸发而使涂料粘度提高时，目前有不少工厂采用添加硅溶胶来调整涂料的粘度，这种错误做法导致涂料胶凝化，涂料使用仅仅一个月就被废弃。

涂料中粘结剂的 SiO_2 浓度测定方法如下：先用离心机分离出澄清液，经化学滤纸过滤，测定滤液的重量，再将此滤液放入磁坩锅中加热焙烧，测定其残留物的重量，求出 SiO_2 浓度。另外也可用比重瓶测定分离过滤后的澄清液的比重，再根据其比重值推算出 SiO_2 浓度。

SiO_2 浓度测定是 1 个月进行 1 次。然后进行 SiO_2 浓度的微调整。正常时就可能保持涂料的 SiO_2 浓度稳定。

4.3.1.6 涂料胶凝化的表面外观目测评价

这是一种简易地了解涂料胶凝化倾向的方法。先停止涂料罐的转动，然后保持静止 3 分钟，此时如果在涂料表面的中央出现牛乳结膜状的胶凝膜，则就表明此涂料已有胶凝化的初步倾向。此时应及时实施上述 2 项、4 项、5 项的涂料管理测定。

4.3.1.7 涂料水分蒸发量的测定和补加蒸馏水

测定涂料水分蒸发量的方法如下：当操作结束时，先停止涂料罐转动，然后核定涂料的水平面。经过一定时间后，再次停止涂料罐转动，核定涂料水平面，这个水平面下降值相当的量即是在规定时间内的水分蒸发消失量，由此再求出与此值相一致的每天的蒸发量。必须每天在涂料中补加同等数量的蒸馏水，特别是长期休假时，应预先算出休假几天的蒸发量，在休假前一天补加与此相当的蒸馏水。

4.3.2 硅酸乙酯涂料管理

硅酸乙酯涂料的粘度测定时预先将詹杯浸入 IPA 等酒精溶剂中，使用后立即放入酒精溶剂中清洗干净。涂料的组成比例测定、比重测定、涂料中粘结剂的 SiO_2 浓度测定、涂料表面的外观目测评价等都与硅溶胶相同。硅酸乙酯粘结剂中的乙醇常常蒸发消失，乙醇蒸发量也相当多。

表 4-21 所示硅酸乙酯涂料的 SiO_2 调整到 22.7%，可是由于乙醇的蒸发， SiO_2 的浓度会提高，当 SiO_2 浓度超过 30% 时，硅酸乙酯就容易胶凝。胶凝的特征是没有

任何先兆而粘性急剧上升,而且涂料层的干燥显著变快,撒砂砂粒几乎不粘附。这种状态的涂料的粘结能力下降,即使添加粘结剂和乙醇也不容易恢复粘性。到了这种状态可以说已经达到了胶凝化。为了防止这样的胶凝化,保持涂料的稳定,每天必须补充与蒸发量相同量的乙醇。特别是蒸发速度快时必须与制壳生产量相一致每天2~3次添加乙醇。

在使用硅酸乙酯涂料于背层时,硅酸乙酯粘结剂的一部分向型壳面层渗透,所以涂料中的粘结剂的消耗比耐火粉料明显增多,造成涂料组成有大的变化。另外对这种涂料,离子化也有一定影响,PH值在短时间里容易变动,由于耐火粉料中所含的碱土类成分,即 Na_2O 和 K_2O 的影响,PH值提高,容易导致胶凝化倾向。为此应每天2~3次测定涂料的PH值,并必须用盐酸溶液调整PH值。

同样在硅酸乙酯水解和熟成过程中乙醇也会蒸发消失,所以也必须相应考虑补充乙醇。如果可能的话,最好使用密封容器进行熟成过程。

4.3.3 涂料管理的自动化

在ICI第37届技术大会上已经提出将涂料管理自动化作为共同开发的题目。为了对涂料进行合适的管理,每天需要花费相当多的管理测定时间,因此很有必要进行涂料管理自动化。前面的图4-13所示为实施了涂料管理自动化的涂料罐系统。该系统有2个涂料罐循环系统,其中一个涂料罐用于准备熟成和管理,另一个涂料罐用于涂覆操作。在罐之间安装了高粘度泵,同时设置了净化涂料中杂物的机构。罐底部设有搅拌叶轮用以搅拌涂料,并采用循环泵把浆料瞬时上升搅拌。在涂料罐的侧面安装了温度计自动测定涂料液温。为了调整涂料中的水分蒸发量补加蒸馏水和调整粘度补加粘结剂,采用了自动滴定方式。涂料粘度测定采用B型粘度计,并安装了浸渍型附件自动记录粘度。涂料的PH值也用浸渍电极型夹头测定、记录。涂料的浓度用电磁浓度计和光学测定仪测定。本系统是作者开发的系统。

4.4 陶瓷型壳系统的应用实例

陶瓷型壳系统因精铸件材质、形状复杂程度、壁厚及工作领域的不同而不同,其背层涂料的组成、粘度、型壳层数、撒砂材料、干燥时间以及涂料涂覆方法都有微妙的差异。此处介绍一下采用了特殊涂覆技术和制壳系统不同的点式打印机的叉形盘芯、高尔夫球头、大型原子能精铸件的制壳系统和制壳技术。

4.4.1 打印机叉形盘芯铸件制壳系统

图片4-4所示为典型的点式打印机的叉型盘芯铸件,随着打印机功能的提高和小型化,现在广泛使用的是24针打印机,几乎所有语言的打字打印机的形式及设计都是多种多样的,现在一心一意面向海外需要的不太多见,可是近10年间慢慢地适应办公自动化的飞速发展,叉形盘芯铸件隐藏着发展的可能性。在这个领域内在成本方面的竞争主要来自压射成形的粉末冶金。由于制造过程宜专业流水线,因此已经开始朝削减人员的方向发展。

该件对品质的要求比现在的精铸件要求严格, 24 针的间隔为 1.2mm, 非常狭小, 为了使针间间隔完全充满型壳, 所以撒砂使用的是白色锆英细砂, 操作时必须用压缩空气吹去面层撒砂的游砂。面层涂料的粘度为 4° 詹杯 20 秒左右, 其制壳系统如表 4-22 所示。



照片 4-4 打印机叉形盘芯铸件

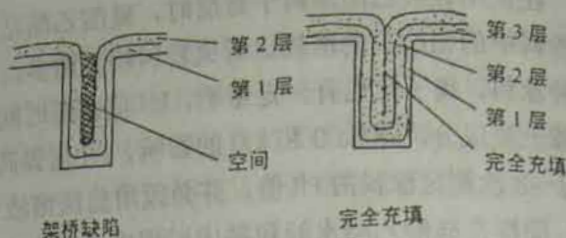


图 4-34 打印机叉形盘芯针间隔的型壳充填机理

表 4-22 打印机叉形盘芯的制壳系统

型壳层数	有无前处理液		使用的涂料		撒砂	干燥方法和时间		
	有	无	涂料	粘度		自然干燥	风干	干燥时间
第 1 层	●		面层	20 秒	WZS	●		3 小时
第 2 层	●		面层	20 秒	WZS	●		3 小时
第 3 层	●		背层	11 秒	WZS		●	4 小时
第 4 层	●		背层	11 秒	WZS		●	5 小时
第 5 层	●		背层	11 秒	WZS		●	5 小时
第 6 层	●		背层	11 秒	HAS		●	5 小时
第 7 层		●	背层	11 秒	HAS		●	5 小时
第 8 层		●	背层	11 秒	HAS		●	5 小时
第 8 层		●	背层	11 秒	—		●	24 小时

注: ① WZS 白锆英砂;

② 背层涂料为硅溶胶涂料;

③ 粘度为 4° 詹杯;

④ HAS 高纯刚玉砂, 0.7~0.8mm

叉形盘芯最初是采用切削加工成形的, 价格比较贵, 采用精密铸件代替以后, 成本降低了一半。该年越来越向小型化、高速化、低价格化方向发展, 为了达到汉字、图形打印的高精度, 对于制壳技术的要求也越来越高。

4.4.2 厚壁的原型零件的制壳系统

表 4-23 所示为原子能厚壁铸件—燃料集合板的制壳系统。不论是面层还是背层都采用了硅溶胶涂料。撒砂 WZR 表示白锆砂。由于该件壁厚特别厚，所以型壳由 14 层组成。由于下部厚壁部位有 64 个通孔，所以型壳的前一半的层的涂挂是关键，特别是型芯部位型壳的干燥，从开始到最后均应非常小心。

表 4-23 燃料集合板的制壳系统

型壳层数	有无前处理液		使用的涂料		撒砂	干燥方法和时间	
	有	无	涂料	粘度		自然干燥	风干干燥时间
第 1 层	●		FS	55~58	WZS	●	5~6
第 2 层	●		FS	55~58	WZR	●	6~7
第 3 层	●		FS	55~58	WZR	●	6~7
第 4 层	●		BS	12~15	WZR	●	6~7
第 5 层	●		BS	12~15	WZR	●	6~7
第 6 层	●		BS	12~15	RAN	●	6~7
第 7 层		●	BS	12~15	RAN	●	6~7
第 8 层		●	BS	12~15	RAN	●	6~7
第 9 层		●	BS	12~15	RAN	●	6~7
第 10 层		●	BS	12~15	RAN	●	6~7
第 11 层		●	BS	12~15	RAN	●	6~7
第 12 层		●	BS	12~15	RAN	●	6~7
第 13 层		●	BS	12~15	RAN	●	24 小时
第 14 层		●	BS	12~15	RAN	●	>24

注：① FS: AMA 锆英粉涂料。

② BS: RANCOSIL-2# 熔融石英粉涂料。

③ 粘度为 4^o 詹杯，秒。

④ RAN: RANCOSIL. B 熔融石英砂。

⑤ 干燥时间单位为小时，层间干燥检查时应重点检查型芯和孔部。

⑥ 靠近内浇口的孔部应用 WZR 白锆英粗砂完全充填。

4.4.3 大型精铸件的制壳系统

表 4-11 和表 4-18 所示为铝合金精铸件的涂料组成。

箱体类、支架类等大型铝合金精铸件在涂挂面层时往往容易产生开裂、剥离、变形等缺陷。面层涂料和撒砂时由于受涂料罐的回转应力和浮力作用以及流态床的风压作用，而面层又几乎没有强度，但蜡模却反而有韧性，所以容易产生型壳开裂和剥离。因此面层涂挂时必须避免涂料应力和流态床的风压的直接作用，在型壳还

没有具有一定强度之前应尽可能采用雨淋式撒砂。另外面层涂料涂覆时要临时停止涂料罐转动，而且模组不要伸向涂料内部，最好只在模组表面上浇上涂料。

对于钢铁类大型精铸件也有上述同样的问题。特别是厚壁件很容易发生鼓胀和粘砂，所以型壳的细孔和沟槽部位的型壳必须完全充填致密，否则会产生夹砂、跑火、漏钢等缺陷，此时撒砂应使用含有细砂和粗砂的混合砂，在背层涂料中添加0.2%的多股纤维以增强型壳。另外后一半背层撒上砂粒的同时撒上断钢丝，使之同时具有增强和保温效果。

4.4.4 高尔夫球头的制壳系统

高尔夫球头的外观精度和重量精度比尺寸精度更重要，特别是外观必须没有任何针孔、非金属夹杂、夹砂、缩松以及铁豆、铁刺、飞边。在结构上，一些细深数字、V型槽沟等处，由于容易卷入气泡，所以会产生铁豆等缺陷。表4-24所示为高尔夫球头用涂料的组成和性能，表4-25为制壳系统。高尔夫球头制壳时第1层、第2层涂料涂覆和撒砂后立即用细口喷嘴进行吹气处理，使涂料均匀，并吹去游砂。第1层涂料的涂覆要进行双重处理以得到无型壳开裂、表面光滑美丽的铸件。为了防止文字和沟槽部产生小铁豆，可使用真孔涂料罐，第1层涂覆也可以采用刷子涂刷，涂料紧密涂覆有利于去除气泡。第2层的干燥湿度保持在60%~65%，注意避免干燥过度。

表 4-24 高尔夫球头用涂料的组成和性能

涂料	组成	备注	
面层	硅溶胶	80kg	SiO ₂ : 30% , 粒径:7~10nm AMA 350 [°] , 陶瓷级 Victawet 12 [°] , 或非离子型 SH 度 5501
	锆英粉	175kg	
	润湿剂	200cc	
	消泡剂	微量	
	粘度:	詹杯 4 [°] 25~27 秒	
背层	硅溶胶	80kg	SiO ₂ : 30% , 粒径:10~15nm 电气化学公司制, N155 Victawet 12 [°] , 或非离子型 SH 5501
	熔融石英粉	80.5kg	
	润湿剂	50cc	
	消泡剂	微量	
	粘度:	詹杯 4 [°] 10~12 秒	

表 4-25 高尔夫球头制壳系统

型壳层数	涂料	撒砂	预处理	干燥系统	
1	面层, 2次涂覆	AMA 锆英砂	需	22~25℃, 60%~65%	自然干燥
2	面层, 1次涂覆	AMA 锆英砂	需	22~25℃, 60%~65%	自然干燥
3	背层涂料	0.7mm 刚玉砂	需	22~25℃, 30%~40%	风干
4	背层涂料	1.0mm 刚玉砂	—	22~25℃, 30%~40%	风干
5	背层涂料	1.0mm 刚玉砂	—	22~25℃, 30%~40%	风干
6	背层涂料	1.0mm 刚玉砂	—	22~25℃, 30%~40%	风干
7	背层涂料	1.0mm 刚玉砂	—	22~25℃, 30%~40%	风干
8	背层涂料	—	—	22~25℃, 30%~40%	风干

4.5 陶瓷型壳的再生回用

1991年日本精铸件的生产产值达到了520亿日元,生产量达到了1万2千吨。随着生产量的增大,陶瓷型壳的废弃处理和再生利用,从环保角度和降低成本角度看都是非常重要的,其方针措施的确立对于精密铸造的发展应该是当务之急。在美国、台湾和原苏联等正在向实用发展。美国自1987年以来由于用作撒砂材料的锆英砂供应困难,以ICI为中心的型壳再生研究已经真正起步。在日本,日本铸造技术普及协会也已提出作为1991年的研究事业开发题目,并已经完成了型壳再生开发的试验运行机器,正在实际运行。1976年美国加利福尼亚的Orbis公司从生产粉碎分级设备的Sweco公司购入了再生设备进行再生利用,已经收到了一定效果。另外台湾和原苏联也有2~3个工厂进行型壳再生处理。由于废型壳的性能和再生砂的性能要求各个工厂都稍有不同,所以很难有共同的再生标准和选定固定的再生设备。

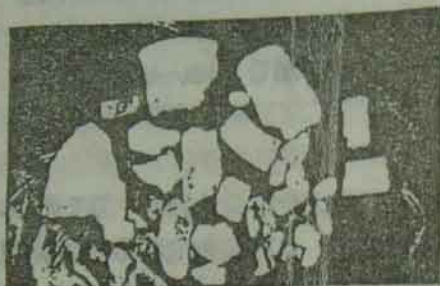
1981年作者在新东工业公司的协助下进行了基础性的再生试验。表4-26所示为该机种的性能。表4-27所示为分级处理后的再生砂的粒度分布。由这些结果可知,再生砂的粒度分布以满足使用要求。照片4-5所示为回收型壳和再生砂的照片。实际试验表明型壳强度是充分的,浇注试验也得到了满意的结果。从型壳的摩耗性和振动特性来判断有关实际分级设备,设备生产厂家采用RSU类型设备。

表 4-26 粉碎分级装置的机型和性能

机种	MSG-05	LSB-10
主轴转速	44rpm	63rpm
电机	3.7kW	7.5kW
处理量	100kg/批	200~300kg/批

表 4-27 MSG-05 机分级处理后的再生砂的粒度分布 (%)

目	6	8	10	14	20	28	35	48	70	100	150	200	270	底盘
上段上	61.7	16.7	12.8	6.2	0.5									
下段上			0.7	8.6	21.7	40.9	24.6	3.2						
下段下						0.6	7.4	12.7	8.6	7.7	7.5	6.3	7.8	41.7



照片 4-5 回收型壳和 10~35 目再生砂的实像

图 4-35 所示为新东工业公司推荐的型壳再生系统。日本铸造技术普及协会最近开发了型壳再生处理设备，并采用该装置再生了 20~70 目的砂和 270 目的微粉 2 个等级再生品，经过实际浇注试验，都达到了原先的结果。这些再生砂和再生粉用作背层涂料的耐火粉料和背层撒砂基本能满足使用要求。作为参考，对于再生生产能力为 500kg/h 的装置，建议由冲击破碎机、筒形磁选机和圆形振动筛组成。

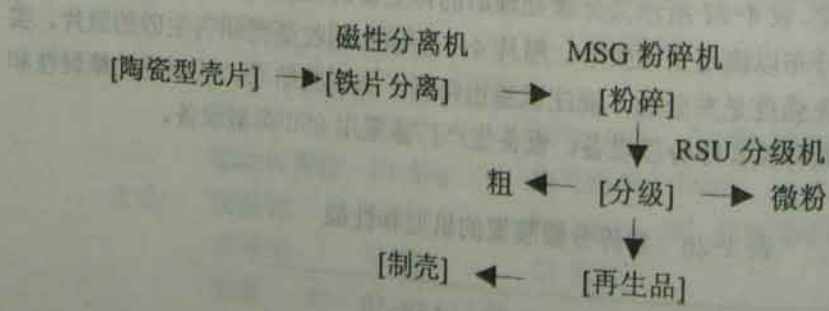


图 4-35 型壳再生系统

型壳制造的后续工序是脱蜡。古代精密铸造的脱蜡采用的是素灰烧笼法，将蜡模烧化流出，为了能让蜡流出并看到颜色而设置有孔。近代世界各地也称精密铸造为失蜡铸造，实际上就是以脱蜡工序为代表给了该法以相应的称呼。

陶瓷型壳的脱蜡可以采用各种各样的方法，其中较具代表性的方法有：有机溶剂法、熔融蜡浸渍熔出法、热水熔出法、热冲击法、高压蒸汽釜法、微波法和热砂法等。此外还有酒精浸透燃烧法和热风法。现在采用最多的是利用水热反应的高压蒸汽釜法。脱蜡的最大关键是脱蜡时容易发生型壳开裂，上述所提到的那么多方法都存在这个问题，而其中较难产生型壳开裂的是高压蒸汽釜法。所以本文主要介绍高压蒸汽釜脱蜡，重点介绍脱蜡时型壳开裂和蜡模材料的回用。脱蜡时型壳开裂主要与使用蜡的物性、模组装配方案、型壳的干燥状态、型壳透气性、脱蜡操作及高压蒸汽釜的功能等有关。另外脱蜡时希望脱蜡的蜡料的基本性能不受影响、有高的回收率。

最近几年，为了提高蜡模生产率和提高尺寸精度，不少工厂逐渐用填料蜡代替至今仍被广泛使用的非填料蜡，因此蜡料的熔点提高了。为了能完全脱蜡必须使用性能同目前蒸汽釜性能有很大不同的高压蒸汽釜，并已经在美国精密铸造工厂中使用。

脱蜡后的回收蜡是通过蒸汽釜本身的流出管道供给蜡料再生装置。

精密铸造生产流水线作业中采用现有的蒸汽釜设计自动生产线是很困难的，所以美国 Cober Electronics 公司开发了微波炉脱蜡装置并已实施了生产自动化。

脱蜡时希望型壳不会开裂而且希望型壳内的蜡完全熔出。采用蒸汽釜脱蜡基本上能满足此要求。脱蜡前型壳的干燥强度对防止脱蜡后型壳开裂影响很大。型壳透气性好坏也对脱蜡后型壳开裂有很大影响。型壳透气性好，型壳传热快，促进了从外向模组内部蜡的加热熔化，由于蜡表面层先熔化，熔化了了的蜡向型壳内表面浸透，从而消除了蜡整体的膨胀应力，也减少了型壳的拉应力，使得型壳难以开裂。另外模组组装方案应有利于在模组的蜡模整体加热熔化膨胀前能迅速熔出，同时蒸汽釜要有初期快速加压的功能。保证了这一些就能使型壳的开裂最少。

5.1 脱蜡方法及其特征

表 5-1 所示为各种脱蜡方法及其特征。其中除了有机溶剂法以外全部都需加热，因此都不能忽略蜡模的热膨胀因素。为了缓减加热脱蜡时蜡的热膨胀应力，必须迅速熔蜡和调整型壳的透气性。

表 5-1 各种脱蜡方法及其特征

脱蜡方法	技术效果和问题点
有机溶剂法	1、因不需加热，所以可不考虑蜡的热膨胀因素 2、溶出速度慢，生产率低 3、蜡料品种有限止

脱蜡方法	技术效果和问题点
熔融蜡浸渍熔出法	1、蜡可 100%回收 2、设备简单 3、由于蜡的附着浸透，所以易产生夹碳缺陷 4、脱蜡速度慢，生产率低
热水熔出法	1、蜡回收容易，由于蜡的物性没有变化，所以回收简单 2、硅酸乙酯和水玻璃型壳 3、脱蜡时间约为 30~40 分
热冲击法	1、脱蜡时间约为 10 分钟 2、蜡难以回收 3、能源消耗大，不经济 4、应考虑环保措施，设备费用高 5、作业环境差
微波法	1、能实现自动生产线 2、蜡回收非常容易 3、回收温度低，所以作业环境好 4、蜡的物性无变化，所以蜡可原样再使用 5、脱蜡迅速，生产率高 6、型壳不易产生开裂 7、设备费用高
热砂法	1、脱蜡时间约为 20 分钟 2、由于热砂起到背衬作用，所以型壳不易开裂， 3、设备简单，但生产率不高
高压蒸汽釜法	1、蜡回收率高， 2、由于是间歇式操作，所以难以实现自动生产线 3、型壳较难开裂 4、使用高压装置，所以有一定危险性 5、设备费较高。

5.1.1 有机溶剂溶出法

这种方法是将型壳浸入三氯乙烯或甲苯等有机溶剂中溶出蜡。通常溶蜡的时间很长，由于溶蜡速度慢，所以也会出现蜡模空心现象。为了提高溶出速度，蜡料尽可能使用碳原子低的碳氢化合物（实际碳原子数为 18~20）。

5.1.2 熔融蜡中浸渍熔出法

此法是将型壳模组浸入加热熔化的蜡中熔出蜡。所使用的熔蜡与蜡模用蜡同质。蜡几乎是 100%的回收，处理装置简单，可是实际完全脱蜡所需的时间相当长，而且型壳被蜡浸透，往往因不正常的粘附蜡而影响铸件质量。熔融蜡的处理温度约

为 100~120℃。采用此方法的蜡尽可能是在所定温度下粘度小的蜡。

5.1.3 热水脱蜡法

一般用的是沸腾水，是将型壳浸入沸腾的开水中熔出蜡，常用于采用硅酸乙酯水解液和水玻璃为粘结剂制作的型壳。对于硅溶胶型壳，由于其在沸腾水中型壳强度较低，所以应避免使用。此法脱蜡时间约为 30~40 分钟。采用在沸腾水中吹空气的方法可以提高其脱蜡性，如果模组用蜡的比重大于 1，则脱蜡后的蜡沉入水中。如果小于 1，则浮在面上，所以脱蜡后的蜡回收比较容易。

5.1.4 热冲击脱蜡法

此法将型壳放入喷嘴燃烧炉内直接加热到 900~1000℃，依靠激烈的热冲击进行脱蜡。型壳放置时模组浇口向下。脱蜡时间约为 10 分钟左右。此法能够回收的蜡很少，几乎所有的蜡都会在炉内被燃烧掉。由于蜡燃烧时会排出很多黑烟，所以可采用复燃室使蜡料完全燃烧后排出。此法存在蜡回收困难、加热到高温所化费的能源费比较高等问题。

5.1.5 微波脱蜡法

欧美各国在几十年前就已进行微波脱蜡的开发研究。此法利用微波加热进行快速脱蜡。1990 年美国精密铸造协会主办的技术年会上，Cober Electronics 公司介绍了微波自动脱蜡装置。至今所有脱蜡方法都是间歇式的，因此很难实现连续流水线式自动化脱蜡。图 5-1 所示为微波脱蜡 CC12-OH 型自动脱蜡装置。

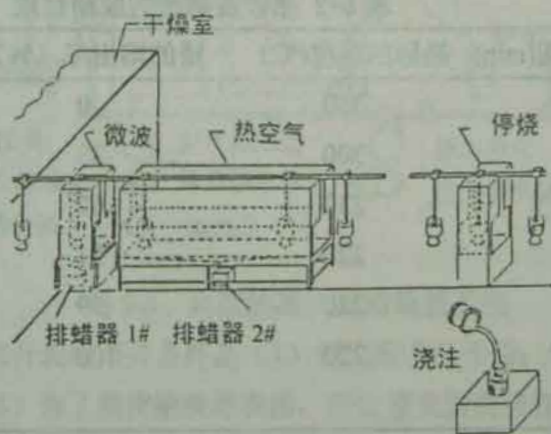


图 5-1 CC12-OH 型微波自动脱蜡装置

由于此法能进行低温脱蜡处理，所以蜡回收非常容易，而且蜡的物性几乎没有变化，再使用不会有问题。由于不存在高温作业，所以操作环境较好。特别是脱蜡快，生产效率相当高。微波脱蜡的初期型壳被激烈加热，之后仅与型壳接触的蜡模表层熔化，所以非常有利于防止型壳开裂。蜡本身不直接接受微波加热，所以没有蜡的膨胀作用，也就几乎没有其他脱蜡方法存在的型壳开裂问题。

5.1.6 热砂脱蜡法

此法是将预先加热到 300~400℃的砂充填入砂箱中型壳的四周，依靠砂的余热

进行脱蜡。也可以用热的铁砂代替热砂。由于此法加热的填充材料覆盖在型壳四周，所以作用于型壳的蜡的膨胀应力被填充材料的背衬作用所抵消，因此也能防止型壳开裂。此法脱蜡大约需要 20 分钟时间。图 5-2 所示为热砂脱蜡法示意图。表 5-2 所示为此法的脱蜡效果。

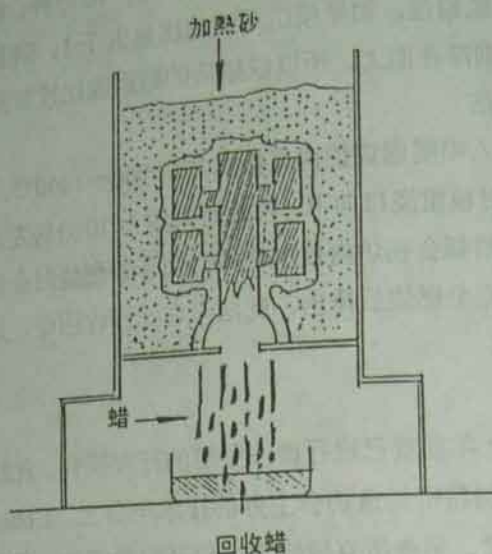


图 5-2 热砂脱蜡法

表 5-2 热砂脱蜡法的脱蜡性能

砂充填后的时间(min)	热砂的温度(°C)	蜡的熔出率 (%)	蜡温(°C)
充填后瞬间	350	0	—
5	300	30	72
10	230	67	94
15	220	91	95
20	220	99	93
21	220	100	—

5.2 蒸汽釜脱蜡法及其操作顺序

5.2.1 蒸汽釜脱蜡法

如表 5-1 所示，蒸汽釜脱蜡具有很好的技术效果，所以蒸汽釜脱蜡成了当前全世界精密铸造中脱蜡方法的主流。图 5-3 所示为典型的蒸汽釜脱蜡装置系统。该系统主要有锅炉、贮汽压罐和本体（高压蒸汽釜）及能满足蒸汽脱蜡时本体内初期快速加压要求的管道系统组成。

蒸汽釜法脱蜡时型壳开裂现象与初期快速加压程度密切相关。通常此法脱蜡时的常用压力为 $6\sim 7 \text{ kg/cm}^2$ ，特别是脱蜡初期的快速加压释放了模组内部的蜡的膨胀应力，因而能大致消除型壳开裂缺陷。型壳装入高压蒸汽釜本体内部后，从大气压快速加压到 3 kg/cm^2 所要的时间越短，型壳开裂的可能越少，最好是在 10 秒以内。

为了达到快速加压的目的，必须设有贮压罐。就如图 5-3 的系统图那样，贮压罐和锅炉及蒸汽釜本体之间都用导管连接，而蒸汽釜本体的外周与高压蒸汽罐复合成一个整体。另外此法脱蜡时容易出现的问题是型壳装入蒸汽釜本体内部和从本体的门完全闭锁后开始到打开贮压罐向本体输送高压蒸汽的阀门系统的时间，现在这些基本操作几乎都是手动的，各个炉批的误差和个人操作的误差多少会有一些问题。型壳装入的调整及紧后的快速加压升温操作必须相当迅速。美国精密铸造设备公司——Buntrock Industries 公司开发了自动快速切断闭锁式阀门，此类操作可在 1.2 秒内完成。蒸汽釜脱蜡法的型壳装入蒸汽釜本体内部以后必须瞬间脱蜡。在此瞬间，热量通过型壳迅速传递到蜡模的表面，在蜡模整体膨胀之前蜡的表面层熔化，一部分蜡浸入型壳的表面，一部分蜡从浇口及辅助脱蜡口熔出，从而减轻了型壳的膨胀应力。

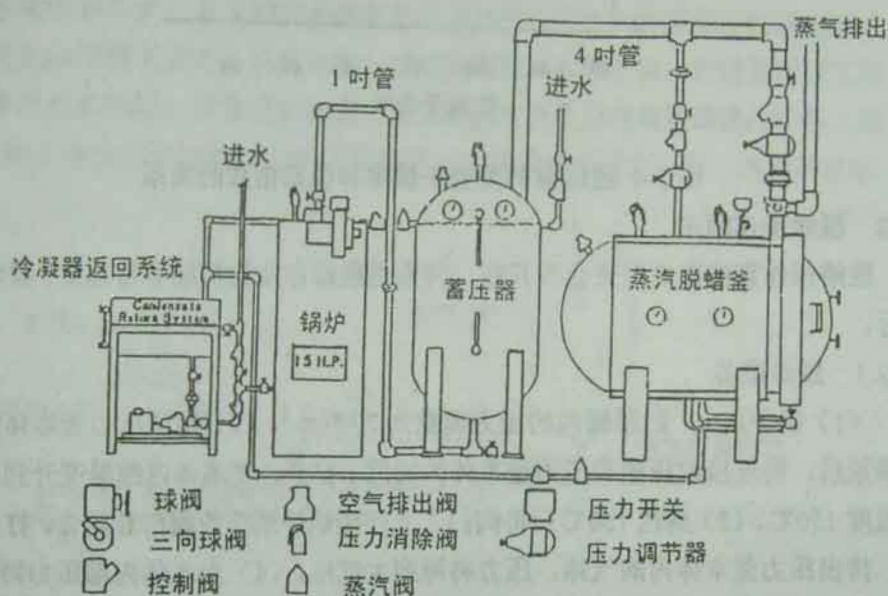


图 5-3 典型的蒸汽脱蜡装置系统

防止脱蜡时型壳开裂的必要条件是 (1) 型壳应充分干燥；(2) 型壳有适度的导热性和透气性；(3) 为了能使蜡浸透表面，所以型壳面层应有适度的透气性。一般来说球状铸件和圆筒形铸件最容易发生型壳开裂现象。英国的 G.Halsey 在他的技术报告中报道了型壳开裂和脱蜡指数 (V/a) 的关系。图 5-4 所示为脱蜡前型壳的干燥率和脱蜡指数的关系。脱蜡指数的因子 V 表示蜡的体积，因子 a 表示熔出口的断面积。由图可知，型壳干燥不充分时型壳容易产生裂纹。型壳中粘结剂中的残留水分，在脱蜡时会产生异常沸腾，从而引起型壳局部破损。硅酸乙酯型壳在蒸汽釜湿态气氛中的湿强度比硅溶胶型壳高，所以硅酸乙酯型壳很难产生开裂，因此将硅溶胶型壳在脱蜡前用硅酸乙酯水解液浸透，或用苯酚树脂酒精溶液及聚乙烯醇溶液浸透能减少型壳开裂。所使用蜡的性能对脱蜡时裂纹的产生也有很大影响，最好使用低熔点、低粘度的蜡料，这种蜡在快速加压的初期能容易熔出。相反，高熔点、高粘度的填料蜡则较多产生型壳开裂缺陷。

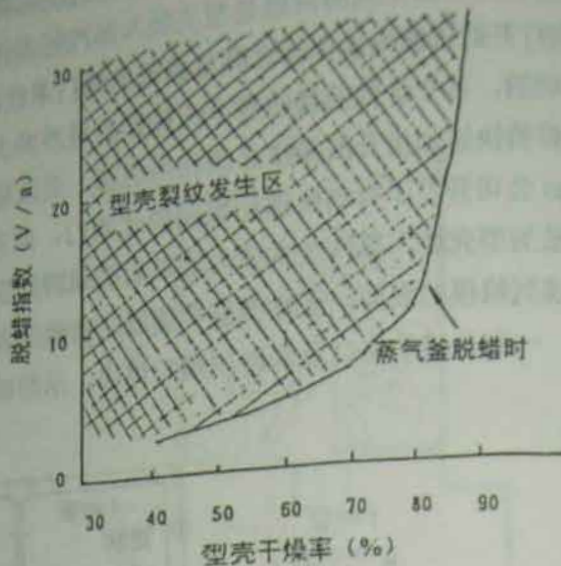


图 5-4 脱蜡前的型壳干燥率和脱蜡指数的关系

5.2.2 脱蜡操作顺序

脱蜡操作直接影响型壳会否开裂，特别是脱蜡作业的初期非常重要，要求迅速进行。

5.2.2.1 脱蜡准备

(1) 锅炉点火，贮压罐内的压力调整到 7 kg/cm^2 。(2) 确认压力釜本体的门闭合锁紧后，将连接贮压罐和压力釜本体的阀门 I 打开，使本体内部温度升到正常工作温度 150°C 。(3) 到达 150°C 后将阀门 I 及连接锅炉系统的阀门 II 闭合，打开阀门 III，排出压力釜本体内部的气体，压力将降到大气压。(4) 当本体内部压力降到 0.5 kg/cm^2 后慢慢打开排蜡的流出阀门，利用残压排出积聚在本体内下部的水分。(5) 完全回到大气压后闭合流出阀，打开本体的门，开始正式脱蜡作业。

以上准备工作是首批脱蜡的准备工作，目的是为了使压力釜本体内部的蒸气套管加热到正常工作温度。

5.2.2.2 脱蜡操作

(1) 打开压力釜本体的门，迅速装入待脱蜡的型壳，之后立即闭合锁紧该门，闭锁排气阀 III，同时打开阀 I，此时打开阀 I 后 10 秒内本体内部的压力必须达到 3 kg/cm^2 。(2) 之后闭合阀门 I，打开阀门 II，大约 3~5 分钟后达到正常工作压力 7 kg/cm^2 。(3) 本体内压力达到 7 kg/cm^2 、温度达到 150°C 后持续 10~15 分钟进行脱蜡。(4) 之后闭合阀 II，慢慢打开阀 III，此时压力从 7 kg/cm^2 降到大气压大约需要 5 分钟。如果瞬间快速降压会对型壳产生冲击作用而导致型壳开裂破损。(5) 达到 0.5 kg/cm^2 后慢慢打开流出阀排蜡回收。(6) 在确认完全回到大气压后打开门，立即取出型壳，重复进行下批脱蜡。

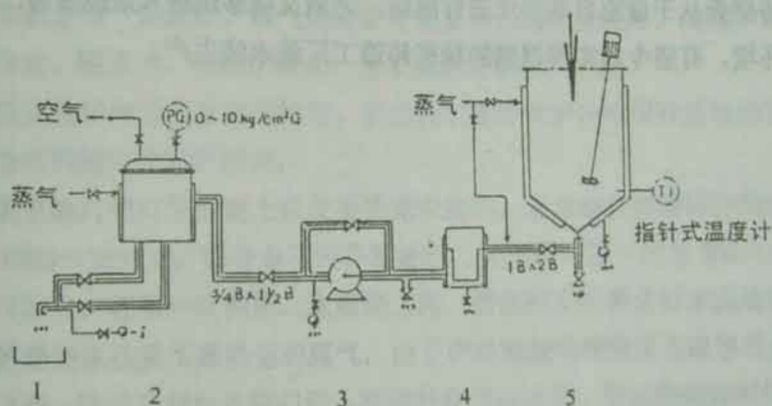
本脱蜡操作的要点是尽可能迅速地从压力釜本体内部取出型壳，装入型壳，以保

证本体内部温度、本体套管温度不降到 100°C 以下，因而保证脱蜡初期的快速加压和快速升温，使初期脱蜡迅速以防止型壳开裂。

5.3 压力釜装置及其功能

压力釜有多种形式，常见的形式为卧式结构，也有立式结构。立式的压力釜装置占用的工作场所较小，型壳进出操作比卧式简单，装入型壳数量也比卧式多。压力釜脱蜡的功能主要取决于贮压罐的设置及其容量。脱蜡初期能否快速加压决定于贮压罐的容量，一般说贮压罐的容量大致与本体相同。贮压罐的压力预先调整到 7 kg/cm^2 ，当打开它和本体的连接阀门后，本体内部的压力迅速达到 $3\sim 3.5\text{ kg/cm}^2$ 的平衡状态，所以锅炉的能力也应相应考虑到设置贮压罐的需要。标准压力釜装置的功能设计和容量设计可参考 Kermit.Buntrock 的计算公式。

为了能迅速从本体内部装入和取出型壳，实际脱蜡操作时应将下批待处理的型壳预先装到装壳台车上。由于蜡分解的气体有腐蚀性，所以本体应用不锈钢制造。脱蜡时型壳的浇口朝下装入，从浇口熔出的蜡积聚在本体的下部，脱蜡处理后立即从排蜡阀排出积聚的蜡。目前已有将压力釜和蜡回收再生处理装置连接的设备。图 5-5 所示为将本体的排蜡阀和蜡回收再生装置（加压式过滤再生装置）连接的流动系统。



1—箱盒 (275W×390L×115H) 2—过滤器 (0.09m², 21L) 4—过滤器 (φ90×350H)
3—压力泵 (10L/min, 5kg/cm², 0.4kw) 5—熔蜡槽 (φ500×700H, 100升)

图 5-5 压力釜脱蜡装置和蜡回收再生装置的连接流程图

5.4 脱蜡缺陷及其对策

脱蜡缺陷主要是型壳开裂和碳污。下面介绍有关碳污的起因和对策。

碳污是由于脱蜡后型壳内部存在了过多的残蜡、焙烧后在型壳下部局部处于碳化状态，浇注时氧化成气体而产生的缺陷。这种缺陷与模组组装方案有关。在组装方案上要考察制品的下窄部位脱蜡后是否有异常残蜡积存。当铸件容积小时，即使有若干残蜡也不一定会有碳污缺陷，可是当铸件壁厚大于 15 mm 时却常常出现碳污缺陷。

解决碳污的主要措施是在脱蜡后型壳内特别是下窄部容易有残蜡积存产生碳污的部位，在模组组装时设置辅助排蜡口。对于大型铸件也往往直接在铸件上设置一

个乃至几个排蜡口，这些排蜡口在脱蜡前削去型壳、露出口端，脱蜡时蜡从这些部位直接熔出，在古代脱蜡技术中称这个辅助排蜡口叫“蜡吐”。脱蜡后在排蜡口用蜡片覆盖，再在其上用硅溶胶和锆英粉混合的耐火泥块完全密封。

不同的蜡其脱蜡性有很大差异。特别是填料蜡，由于其熔点高、粘性大，脱蜡后容易在型壳内残留蜡，也容易产生碳污缺陷，而粘度越低则脱蜡性越好。

5.5 微波脱蜡的自动化

1972年第3届国际精密铸造会议上英国的 J. Boughton 发表了“应用微波加热于脱蜡”的技术报告，Boughton 由于在面层涂料中配入了石墨粉而产生了微波的加热效应，促进了脱蜡效果。此法在硅溶胶型壳生产中在脱蜡同时还能使型壳干燥。

最近很多精密铸造工厂计划实现生产线的自动化，而脱蜡却成了自动化生产线的喉咙口。1990年美国的 Cober Electronics 公司的 Bernard Krieger 在“INCAST”杂志上提出了用微波实现脱蜡自动化，而且报道了已取得明显效果的实际应用例。

微波不能直接加热蜡，因此能在蜡热膨胀前迅速脱蜡而避免产生型壳开裂。型壳被自动连续地装入装置内部，在微波室中的处理时间大约为 1~2 分钟，之后移至热风室，型内残留的蜡几乎全部被熔出。脱蜡结束后型壳进入下一工序。微波脱蜡系统能将型壳从干燥室自动移送进行脱蜡，之后又能移送进入焙烧线等，因而改善了工作环境，有望今后实现理想的精密铸造工厂流水线生产。

古代精密铸造的原始制造法是坭型铸造法，所谓坭型是指烧成型，即铸型内部烧到通红的程度。为了能确定铸型内部是否红热到符合烧成的程度，要预先在型上小心地开一个观察颜色的孔。焙烧的方法可以有素灰烧（不挂釉的原胚）、薪烧及蒸汽烧等方法。但是无论那一种方法都需焙烧均匀，为此常需要适度通风。另外为了避免从浇口和上部进入脏物，必须用粗土轻轻地覆盖。焙烧结束后从浇口和排气口或观察孔用皮老虎吹走型中的垃圾，然后待型的温度降到不能看到内部的火色后用膨润土堵住排蜡口和观察孔，再在上面塞上粗土。假如铸型出现龟裂，则将粗土作软后用毛刷刷土修理。此即坭型铸造法，即现在工业精密铸造法的型壳烧成的古代原始技术。坭型铸造法现在仍然用来制造许多艺术品、佛像工艺品，其烧成法同现代工业精密铸造的型壳烧成方法基本没有多大区别，即使有不同之处也仅是焙烧设备而矣。当然在焙烧管理方面古代坭型铸造法要非常小心，特别是铸型是否均匀红热和烧成是否合适，另外还担心型内是否有垃圾进入，而且烧成后的型内洗净和修补等要彻底。工业精密铸造的型壳焙烧中最重要的工作与上述相同，同时应使型内残留蜡完全烧失，并在适合各种合金浇注条件下形成牢固的型壳。现在型壳焙烧设备用的最多的是煤气焙烧炉，煤气焙烧炉可使型内残蜡完全烧尽。焙烧炉的结构可以采用间隙式、隧道式、移动炉床式、台车推进式等多种形式。

焙烧炉的炉内温度分布应均匀，在焙烧初期阶段炉内应保持适当的富氧状态，以保证型内残蜡完全燃烧消失。

型壳焙烧时浇口最好朝上以使型壳完全烧成。通常钢铁类精铸件的型壳的烧成温度为 $1000\sim 1050^{\circ}\text{C}$ ，铝合金精铸件时进行二次焙烧，第一次为 $700\sim 1000^{\circ}\text{C}$ ，第二次为 700°C ，在第一次和第二次焙烧之间，型壳的型腔要进行水洗处理以去除垃圾。炉的燃烧往往采用高热值的煤气，由于炉内燃烧喷嘴的压力很容易使炉衬材料等杂质飞扬，这些杂质如从浇口进入型腔往往形成夹杂。型壳的焙烧时间大约需 90 分钟，以保证型内水分、残蜡完全去除。型壳的焙烧温度和焙烧时间对型壳的强度、透气性和尺寸影响很大。实际生产时的浇注温度也必须根据铸件材质及形状和大小作稍微调整。

型壳焙烧的自动化流水线已引起人们的重视，已经有一部分工厂采用了连续输送式焙烧炉和推杆式台车以及机器人型壳运送系统与计算机联动进行自动控制。

6.1 型壳焙烧设备及其特征

焙烧方法随焙烧设备的形式而不同，一般采用的焙烧设备为燃气间隙式型，图 6-1 所示为这种焙烧炉的炉床结构。这种炉的炉床是固定的，有 1 只甚至 2 只工业混合煤气燃烧器喷嘴燃烧，由涡轮风扇向炉内供应新鲜空气以使型内残留的蜡被完全燃烧。为了使炉内燃烧温度分布均匀，在炉床的前方设计了排气道。视炉膛大小，炉内设置 1 只以上的温度测定仪，并记录其测定温度。燃烧的热源通常采用煤气，也可采用柴油和液化石油气。表 6-1 所示为采用液化石油气时的排出炉气成分分析，此分析值在大气污染允许范围内。间隙式焙烧炉的型壳装取比较困难，通常采用夹

具扣夹型壳的浇口杯后进入炉膛。型壳在炉内的安放方式采用浇口朝上以便型壳内部完全烧成。为了防止垃圾、杂物进入型腔，在浇口部位必须覆盖上陶瓷制的网帽。型壳装入高温炉后，立即关闭炉门，由涡轮风扇向炉内供给空气，以便在初期阶段将型壳内的残蜡烧尽。残蜡烧尽所要时间大约为型壳装入后 10~15 分钟左右。

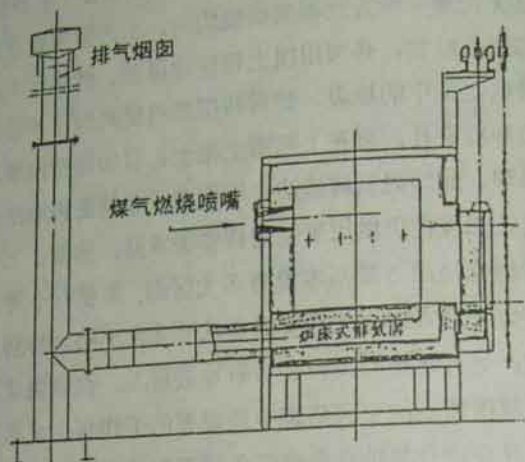


图 6-1 间隙式燃烧炉的炉床排气系统

表 6-1 液化石油气焙烧炉排出炉气的成分分析

炉内温度 (°C)	1150	1050	950
氧气浓度 (vol%)	11.3	10.8	12.4
二氧化碳浓度 (Vol%)	6.0	6.5	5.4
NOx (ppm)	51	53	47
SOx (ppm)	—	—	—
排出炉气中含水量(vol%)	10.1	10.3	9.1
湿排出炉气量 (N m ³ /h)	372	322	330
粉尘浓厚(g/Nm ³)	0.01	0.01	0.01

6.2 型壳的烧成效果与型壳强度

焙烧前后的型壳物性有很大差异，它随构成型壳的耐火材料和粘结剂的高温变化而变化。有关烧成强度试验和实验数据已有不少，但实际上需要的是能耐受金属液热冲击的强度，因此必须要有在更高温度下的烧成强度数值，可是缺少能满足这一要求的试验装置。烧成强度主要受焙烧温度的影响，图 6-2 所示为硅溶胶型壳时焙烧温度与型壳抗弯强度的关系。硅溶胶型壳的烧成强度随温度上升而提高，到达 1050°C 时达到最大值，超过此温度后强度有下降倾向。硅酸乙酯型壳也有这样的强度变化规律。型壳烧成冷却到常温后的高温残留强度比高温强度下降约 50% 左右，特别是 1000°C 以上高温焙烧后的残留强度几乎接近干燥强度值。由此，考虑到型壳

应具有承受实际浇注时金属液的冲击应力和浇注后型壳溃散的残留强度两个要求，型壳的焙烧温度推荐为 1050℃。

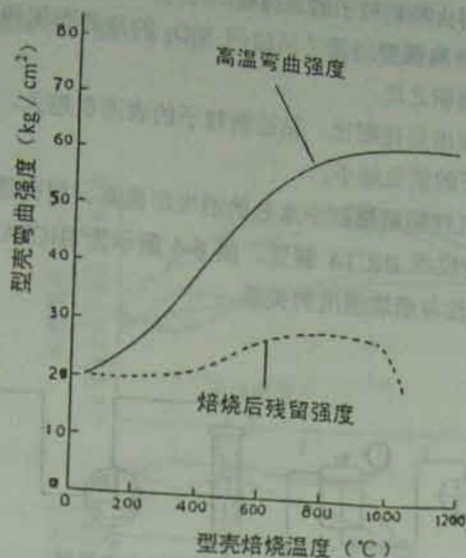


图 6-2 硅溶胶型壳烧成温度与型壳抗弯强度的关系

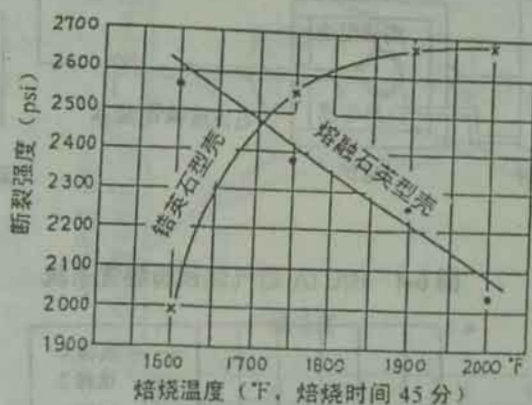


图 6-3 锆英石系和熔融石英系型壳的高温行为

构成型壳的涂料的耐火粉料种类对型壳的烧成强度有很大影响。据杜邦公司的 R.L. Risher 的研究，锆英石系型壳的烧成强度随焙烧温度的上升而提高，而熔融石英型壳则随焙烧温度上升而下降。其原因是锆英石系耐火材料没有相变进行，由于烧结而增加强度，而熔融石英的 SiO_2 会由非晶质变成晶质。图 6-3 所示为上述试验结果。氧化铝系型壳的强度变化与锆英石系型壳相似。另外型壳强度受粘结剂中所含碱性物质成分的影响很大，特别是在熔融石英系型壳时，由于碱性物质粘结剂中 SiO_2 的影响在高温下降低了 SiO_2 熔点产生烧结，使型壳强度提高。相对此的有效碱性成分含量为 1% 左右。相反，也由于以上碱性成分的存在而促进了 SiO_2 的结晶化，因此型壳冷却时容易产生裂纹，而使型壳强度变弱。粘结剂中 SiO_2 浓度越高，型壳强度也越高。型壳强度是粘结剂中 SiO_2 含量和耐火粉料粒子的表面积的函数，即

$$\text{Log RA}_{\text{max}} = -1.23 \text{ Log A grain} + 1.26$$

式中, A grain——耐火粉料粒子的表面积;

RA_{max}——最高强度所需的粘结剂 SiO₂ 的总表面积和耐火粉料粒子的总表面积之比。

由此式可以预测出最佳配比。粘结剂粒子的表面积越大, 为了获得最大结合力所需要的粘结剂粒子的重量越小。

型壳的高温透气性随粘结剂中水分的消失而提高。型壳透气性的测定通常使用 Ridsdale 透气性测定仪或 BICTA 装置。图 6-4 所示为 BICTA 透气性测定系统。图 6-5 所示为型壳透气性与焙烧温度的关系。

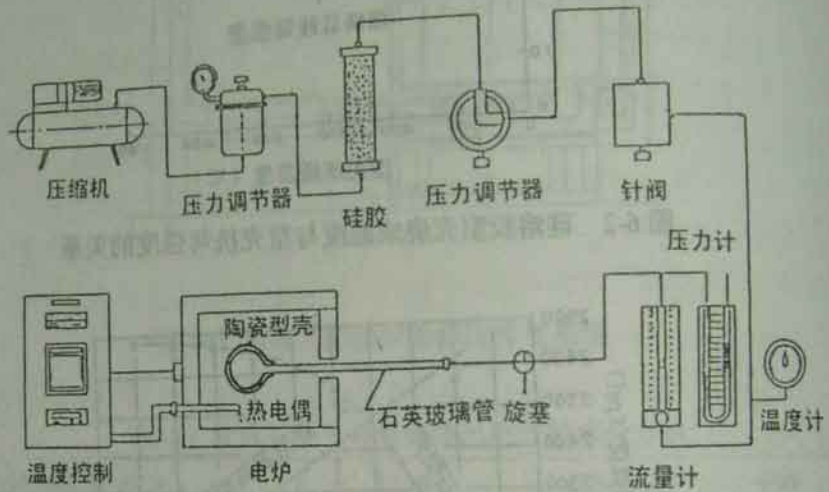


图 6-4 BICTA 透气性试验装置系统

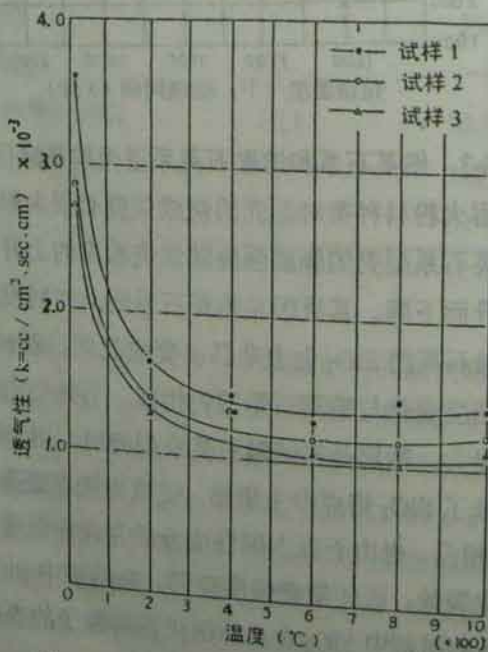


图 6-5 型壳透气性与焙烧温度的关系

N. Beyer 研究了 TiO_2 对型壳高温强度的影响, 表明在涂料中加入 1%~6%的 TiO_2 可以提高型壳的高温强度, 而其最佳值为 2%。另外 Beyer 指出加入乳胶可以同时提高型壳的干燥强度。图 6-6、图 6-7 所示为其研究结果。

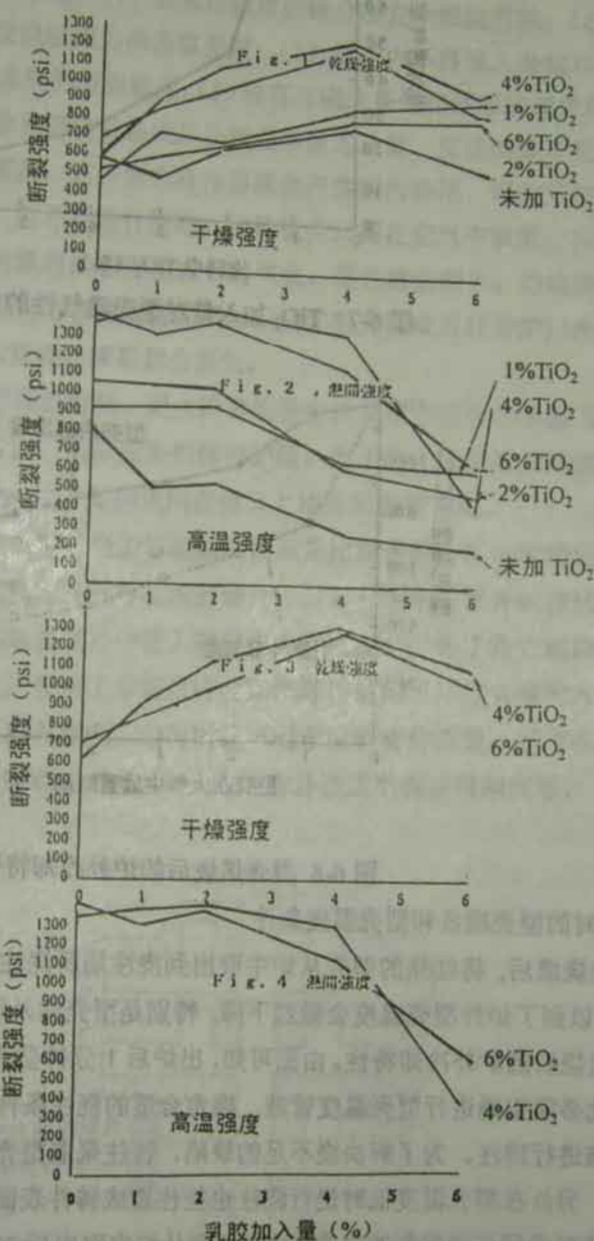


图 6-6 TiO_2 加入量对型壳高温强度的影响很大

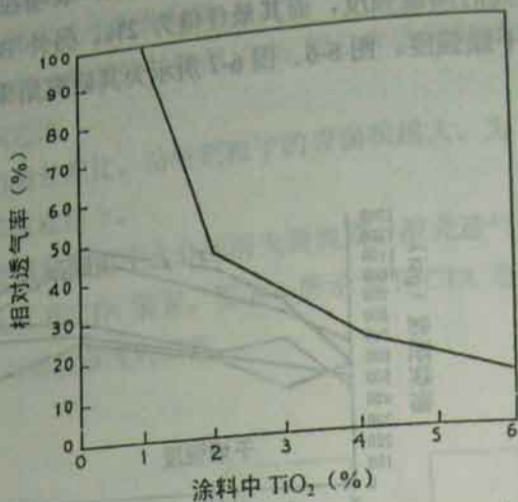


图 6-7 TiO₂ 加入量对型壳透气性的影响

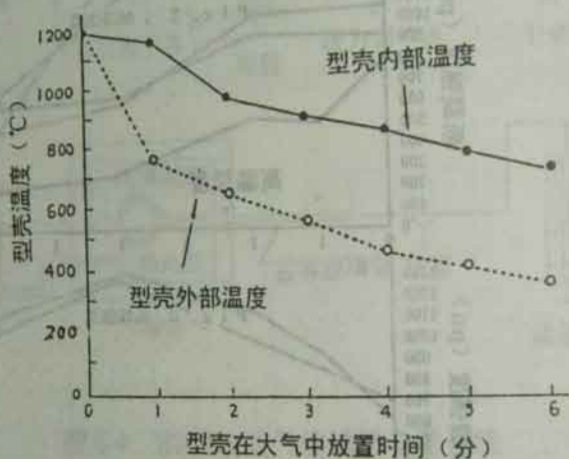


图 6-8 型壳焙烧后的炉外冷却特性

6.3 浇注时的型壳准备和型壳温度条件

型壳烧成后，将红热的型壳从炉中取出到浇注场所浇注。通常陶瓷型壳的壁厚较薄，所以到了炉外型壳温度会激烈下降，特别是型壳的外层冷却更快。图 6-8 所示为型壳焙烧后的炉外冷却特性。由图可知，出炉后 1 分钟型壳外层温度大约下降 400℃。因此必须正确进行型壳温度管理，确定合适的浇注条件和型壳从炉中取出后几秒内应该进行浇注。为了解决浇不足的缺陷，往往采取型壳从炉中取出后立即浇注的措施。另外在型壳温度低时进行浇注也往往造成铸件表面粗糙。因此型壳温度管理是浇注时必须正确控制的内容。通常型壳从炉中取出后 20 秒内需进行浇注。型壳从炉中取出后直接到炉台上进行浇注或取出后在保温的台车上进行浇注可以克服浇不足缺陷。在东欧的精密铸造工厂中将几层以下的薄型壳先进行预烧，之后用干砂为背砂填箱，再进行一次焙烧，然后带箱一起取出浇注，此法有效地解决了浇不足问题，而且比较经济。

无论是铁系合金还是有色合金，只要是精铸件要求质量很高时，都要在型壳焙

烧的间隔中进行水洗处理，以除去型内的垃圾。水洗处理是将 50~60℃ 的温水倒入型壳，用轻度的空气发泡去除垃圾。至所以使用温水是因为浸透型壳的温水可以自然蒸发而消失。如用常温水则浸透型壳后如再被焙烧，则由于水的沸腾反而会引起型壳剥离和破损。

6.4 型壳焙烧中的问题和技术对策

型壳焙烧的目的和要求是：(1) 型壳内残留的蜡分应完全燃烧消除；(2) 整个型壳应烧结并具有能承受浇注应力的高温强度；(3) 型壳内不得混入杂物和垃圾；(4) 持有与浇注条件相适应的型壳温度；(5) 持有与浇注条件相适应的型壳透气性。其中使蜡分完全燃烧消除是焙烧设备应具备的基本技术功能。型壳焙烧不充分时型壳内留有残渣，即残留碳黑，这种型壳浇注后就会产生碳污缺陷，因此焙烧后如发现型壳个别部位有黑色，则不能进行浇注，这种型壳只需在空气中放置一段时间，由于黑色部分与空气中的氧相接触而生成 CO_2 气化，黑色就会消失。当焙烧炉内如果不能保持富氧状态、型壳内容易残留碳黑时，则在型壳烧成后打开炉门冷却，使其与空气充分接触后再次焙烧，碳黑就会消失。

焙烧炉内用于保温的保温材料、耐火砖等的粉尘以及型壳破片等容易飞溅，因此也有混入型腔内部的可能，所以应定期清扫炉膛。为了防止脱蜡后及焙烧后存放的型壳从浇口处进入垃圾赃物，必须采用在浇口上加盖的保管方法。

因型壳破损而造成的夹砂、夹杂等缺陷的废品是比较多的，因此脱蜡后的型壳开裂和破损处必须根据破损程度进行相应的修补，图 6-9 所示为修补的方法。脱蜡后浇口附近的型壳毛边在焙烧过程中进入型腔也会产生废品，为了防止浇口部位的型壳片混入型腔，不少工厂使用了市场供应的陶瓷杯。有的工厂将夹棒伸入型壳的浇口中从焙烧炉中挑出、挑入型壳，这种做法不利于保证铸件质量。另外应绝对避免在焙烧炉内多层横向叠层堆放型壳，因为这样容易造成型壳破损和变形。

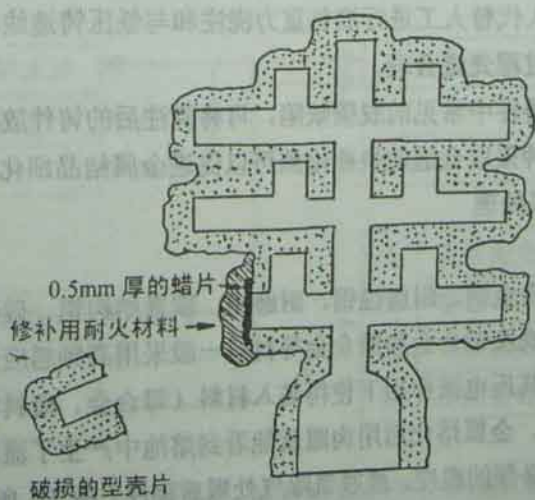


图 6-9 型壳破损处的修补例

第7章 熔炼和浇注

精密铸造的熔炼可以采用大气熔炼和真空熔炼两种方法,对于结构钢、耐腐蚀钢、耐热合金钢、耐磨钢、高合金钢、低合金钢、硅磁钢、球墨铸铁、钴基合金、铜合金、铝合金等可采用大气感应炉熔炼或氩气保护感应炉熔炼,镍基合金采用真空熔炼,而钛合金则可采用感应电渣熔炼、真空电弧熔炼、等离子熔炼及电子束熔炼等方法。另外铝合金也有用电阻炉、煤气炉及4kHz高频炉熔炼的。一般产业机械的铸钢件大多采用100~200kg的高频、中频炉熔炼。

高频炉的熔炼速度取决于输出功率和熔炼量,一般说输出功率与熔炼量的比为2~3。现在为了改善液体金属的性能,超高速熔炼已经引起人们的重视,且已在许多工厂得到应用。提高输出功率就能提高扩散能力、缩短熔炼时间,同时频率升高也能使金属液扩散沉静化,但是频率升高将提高熔炼设备费。1990年在美国达拉斯召开的ICI第38届精密铸造技术大会的设备展示会上,阿拉巴马大学的N.H.El-Kaddah介绍了无壳高频熔炼炉,这种熔炼炉不会混入因坩埚产生的杂物,而且可获得稳定的结晶组织,对于合金钢、铝合金、钛合金等能大大改善制品质量,今后也许会广泛应用。镍基和钴基合金中含有较多的铝和钛,因此这些合金液容易氧化形成氧化膜,这些氧化膜可以采用真空熔炼和真空浇注排除。真空熔炼可获得高质量的精铸件,在最近几年得到了惊人的发展,计算机控制的熔炼—浇注—冷却—凝固连续操作的一体化系统的真空熔炼浇注设备也正在惊人地普及。

陶瓷型壳从炉中取出后温度降低很快,所以浇注前必须预先作好充分准备和安排。从炉中取出型壳要迅速,应在所定浇注条件下迅速适宜地进行浇注。浇注方法通常在大气重力条件下,基本都是采用浇包浇注或由熔炼炉直接浇入型壳。另外也有采用反转浇注法、负压吸注法、离心浇注法及加压CLA浇注法和减压CLV吸注法。采用浇注机器人代替人工进行浇包重力浇注和与低压铸造线相仿的自动浇注线的引进将使得浇注过程先进合理。

为了防止钢铁铸件中常见的脱碳缺陷,可将浇注后的铸件放在无氧化气氛的装置中凝固。根据钢种采取合适的快冷措施可以促进金属结晶细化。

7.1 高频熔炼和脱氧处理

7.1.1 高频熔炼

低合金钢、高合金钢、耐腐蚀钢、耐磨钢、碳素结构钢、硅磁钢、耐热合金、钴基合金、球墨铸铁及铝合金和铜合金等材料一般采用高频感应炉熔炼。高频感应炉是在一次线圈的高压电流作用下使得装入材料(母合金、废料料头、回炉料)熔化达到必要的温度,金属熔化后用肉眼就能看到熔池中产生了流动搅拌。熔化结束后调整成分,升到必须的温度,经脱氧除气处理后浇注。图7-1所示为3000Hz频率时液体金属的搅拌和输出功率的关系。

高频感应炉的优点是:(1)熔炼时液体金属扩散强烈;(2)温度控制容易;(3)因氧化引起的损失极少;(4)脱碳难;(5)成分调整方便;(6)不需要铁芯套壳等。

高频感应炉的存在问题是：(1) 耗电高；(2) 高温熔炼时的炉衬材料问题。特别是为了减小电力消耗而常常在节假日和夜间作业。现在已有将高频熔炼炉和间隙型材料余热装置合在一起以减低电力消耗、缩短熔炼时间的实用例子。采用预热装置的预热温度可以达到 500°C ，预热依存率约为 15%，高频感应炉的电效率可提高 10%。图 6-2 所示为该装置的控制系统。高频感应熔炼操作顺序为：筑炉→装料→熔炼→除气处理→浇注。高频炉的炉体有的采用市场供应的成品坩埚炉，也有炉衬自己修筑的。由于成品坩埚整体紧密均匀，所以往往其熔炼次数比炉衬自己筑炉的多，但是成品坩埚的保管、安装、烧结及熔炼都需非常小心。

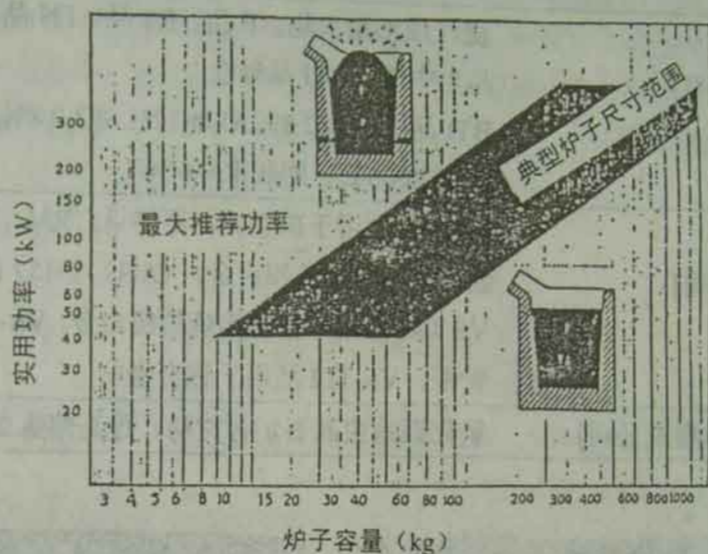


图 7-1 3000Hz 高频炉的液体金属的流动搅拌状态和输出功率图

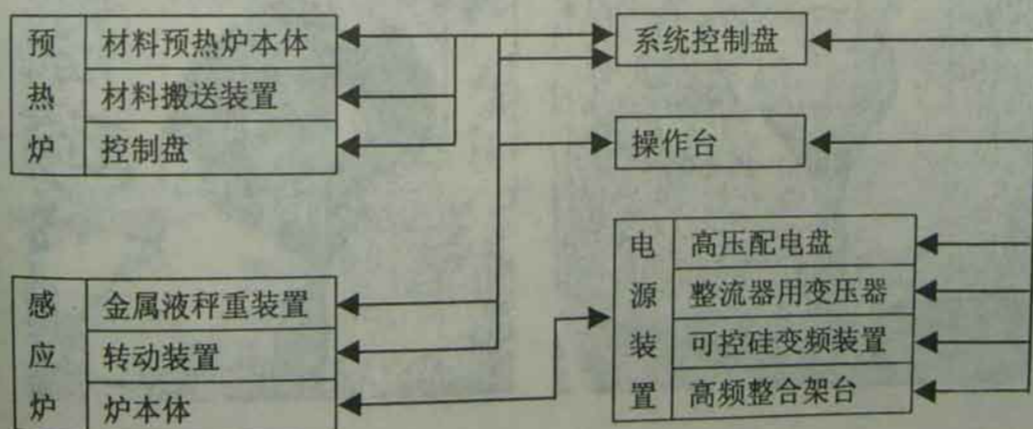


图 7-2 原材料预热装置控制系统

筑炉衬时必须是一人正确操作，为了保护线圈应采用耐火水泥型壳，和液体金属接触的应是耐热的炉衬，炉口和出钢槽经常接触冶炼工具和金属料锭，所以它们的炉衬应进行适当地补强，整个炉衬也必须进行适当补修。炉衬材料可以有酸性、

碱性和中性，有干态、湿态和半湿态的商品炉衬材料直接供应。表 7-1 所示为商品炉衬材料。最近主要采用弱碱性的氧化铝类的尖晶石炉衬材料，这种材料在加热冷却过程中膨胀收缩很小，炉内衬几乎不产生裂纹，而且可以适用任何合金。图 7-3 所示为使用尖晶石炉衬时的炉内状况。熔炼炉数 120 炉时仍几乎没有腐蚀和裂纹，最大使用寿命达到了 231 炉。该炉的容量为 150 kg，熔炼的合金为不锈钢、低合金钢、工具钢及耐热钢。

表 7-1 商品炉衬材料及其特征

商品炉衬材料	特征
B-31[东芝公司]	白色干态混合物。干态使用。筑炉性一般。炉衬约在 1670℃ 以上侵蚀。加热时的体膨胀约为 10%
RADANIT [卡得里斯公司]	浇注成形耐火物。F 品、FA 品、FN 品、FS 品、FSN 品为中性，BTI 品碱性 BTI 品: MgO82.8%, Al ₂ O ₃ 12%, SiO ₂ 2.8%, CaO1.8%。耐火温度 2000℃。膨胀率 0.6%
RM-177 [诺顿.INT.公司]	VA-113 品用于碳素钢、不锈钢，RM-117 品用于低合金和大气熔炼的超合金，VA-114、157 品用于不锈钢，VS-145 品用于真空熔炼的超合金，VA-123 用于黄铜和青铜，VA-112 品用于铝合金
ES073R[日本陶瓷公司]	氧化铝系尖晶石炉衬材料，最高熔炼 230 炉

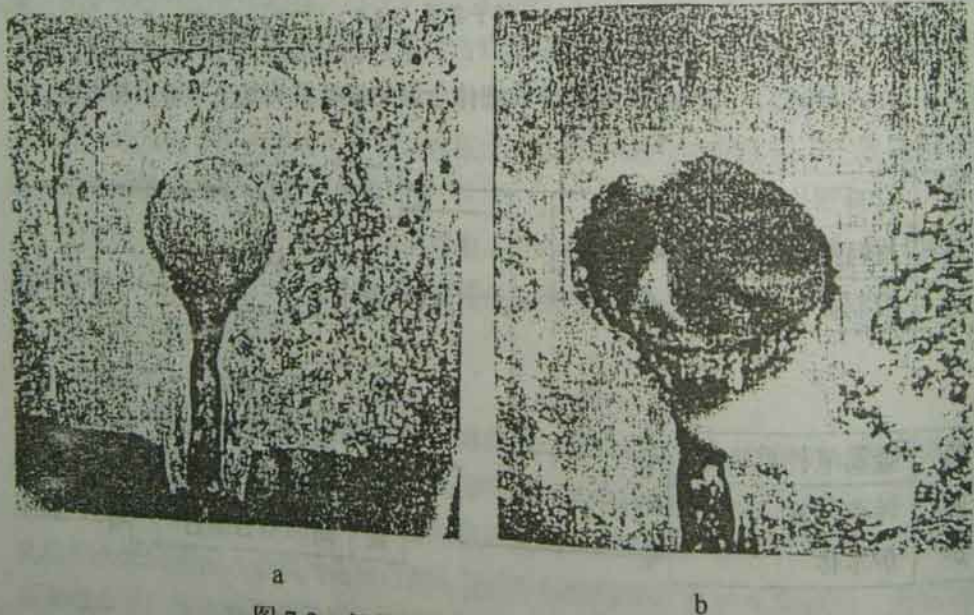


图 7-3 氧化铝系尖晶石炉衬的熔炼耐久性

a—使用 120 炉的状态 b—最大使用炉数 231 炉的状态

炉衬材料应根据相应的熔炼合金选定，线圈部位的型壳应非常干燥。筑炉时先将炉衬材料装入炉底，从炉底捣固，接着装入圆筒状的形模，在保持圆度的同时在

其周围捣固。筑炉结束后在炉内用电加热器或用煤气加热器加热干燥，之后在完全烧结前反复控制送电，然后小心取出圆筒形模，接着就可进行熔炼。

熔炼所用的合金材料应预先进行清洁处理，这样的操作能获得干净的液体金属，很少出现夹杂，也能遏止炉衬材料的摩耗，同时能减少 Mn、Si、Cr 等易氧化合金元素的烧损。熔炼时，随着输出功率的提高，金属开始熔化形成熔池，此时在熔池中加入一半的硅，待全部熔清后再加入剩余的硅及全部锰和铬，全部熔化后降低输出功率，炉前取样分析成分，接着在控制温度下进行脱氧、扒渣出钢。如果废料是料锭则预先尽可能紧密装炉。熔炼时可以使用多种除气脱氧剂，采用哪种的除气脱氧剂应视炉和浇包的容量及合金的品种而定。小于 50 kg 的炉子应在炉内除气脱氧，控制液体金属到合适温度后进行除气脱氧，由于液体金属流动搅拌因而收到迅速除气脱氧的效果。大于 100 kg 的炉子应进行炉内除气脱氧和浇包除气脱氧。浇包脱氧时，在出钢前将除气脱氧剂放入预热的浇包中，由于液体金属的搅动，脱氧剂可以收到最佳的扩散效果。除气脱氧剂不应浮游在液体金属表面。精密铸造用的浇包最好是茶壶式或底注式。如今除气脱氧剂的品种有很多，有的在除气脱氧的同时还具有细化晶粒、改善力学性能及改善 X 射线的 RT 等作用。

7.1.2 除气脱氧剂及其应用效果

表 7-2 列举了一些除气脱氧剂及其作用。

表 7-2 精密铸造的各种合金用脱氧剂及其特征

品名	特征	使用方法及说明
ストレッチクス	对 304、316、410、420 有效	是镁、钛、稀土金属等的复合合金，用作为脱氧剂时与纯铝合用有效
OGST 25 和 50	数字表示含钛量，余为铁硅。熔点低、扩散速度快	不锈钢的钛添加剂。有脱氮和脱氧效果，使用时加入浇包中。标准尺寸为 1~30mm。每捆 25 kg
MML	含有 32% 的稀土金属，剩余为铁	出钢时加入浇包中。大小 1~3mm，3~8mm，8~25mm，8~50mm。每捆 25 kg 袋装
Ni-Ca 合金	高级不锈钢用	用于脱硫脱氧。含钙 6%、10%、20%
Ni-Si 添加剂	炉前 Ni 添加剂含 Ni90%、80%	熔点低，扩散快。在 1100~1200℃ 的熔点时加 Ni 的有效率可达 100%
S.C.G 碳化硅粒	Si 源，C 源，脱氧剂	直接散布在金属表面。与使用 Fe-Si 时一样不必担心会在金属液中残留 Al。S.C.G.10M 为 10 目以下，其 SiC 为 88%，其中 Si61.6%、C26.4%
球化合金	脱硫、脱氧剂	纯镁和纯铁的合金。夹层法时加入浇包，含镁量为 5%~20%

为了去除各种合金液中的气体可以使用多种除气脱氧剂，这些除气脱氧剂的作用和使用效果记述如下。

7.1.2.1 铝

铝是铸钢中使用效果最好的脱氧剂。由于铝能与钢中的 FeO 结合形成细小的氧化铝，而使液体金属中的含氧量减少。另外铝能与氮结合生成氮化铝而细化晶粒。图 7-4 所示为碳钢和低合金钢用铝脱氧除气的效果。当含 C 在 0.2% 以下时必须加铝的同时加入 0.1%~0.15% 的 Ca-Mn-Si。当含 C 在 0.5% 以上时加铝必须大于 0.04%。合金中 C 量越低，铝的加入量必须越多。图中 I 区域可以得到最大的塑性和韧性，区域 II 引起延伸率降低，而使品质变坏，是个危险区域。不锈钢采用铝脱氧除气时会引起扒渣困难，因而容易卷入熔渣，产生夹杂缺陷，此时应该使用形成不流动渣的 Ca-Si 除气脱氧剂。采用铝作为除气脱氧剂时可采用纯铝及铁硅铝合金 (Fe40%、Si40%、Al20%) 和铝硅铁合金 (Al50%、Si35%、Fe15%)。

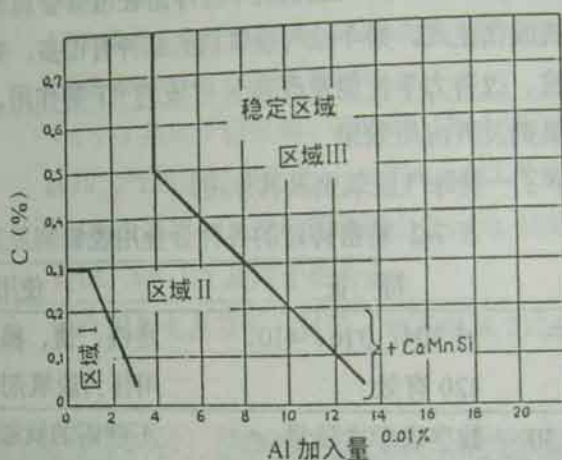


图 7-4 碳钢和低合金钢采用铝脱氧除气时的效果

7.1.2.2 钙

钙能有效去氮脱氧，改善钢的塑性，提高钢的流动性，同时加钙后容易扒渣。

7.1.2.3 钛

钛能与氮结合，是一种强除气剂。钛也容易与氧结合而脱氧。钛一般是在正常除气脱氧后再加入，能收到良好的去氮效果，可是钛的除气脱氧能力比铝和钙小。钛一般以钛铁、硅钛形式加入，有效加入量为 0.04%~0.08%。

7.1.2.4 锆

锆的作用与钛相似。锆和离子结合后容易扒渣。锆的除气效果与铝相同，且能细化晶粒，特别是因容易与氧结合而能控制氮和硫的含量。锆一般是以 Ni-Zr 及 Fe-Zr 的形式加入，有效加入量为 0.05%~0.15%。

7.1.2.5 Ca-Mn-Si

Ca-Mn-Si 除气脱氧剂应用于高合金和耐热合金时能收到良好的效果。目前主要采用 Ca-Si，但从除气脱氧而言 Ca-Mn-Si 更有效。Ca-Mn-Si 用于炉内除气脱氧

时有效加入量为合金液的 0.15%。在 Ca-Mn-Si 加入合金液的同时会激烈燃烧，所以最好的方法是采用图 7-5 所示的插入法。表 7-3 所示为 Ca-Mn-Si 加入量的计算方法。

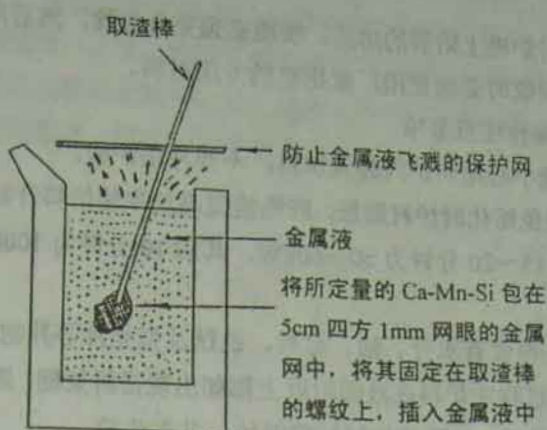


图 7-5 合金液中插入 Ca-Mn-Si 的除气脱氧法

表 7-3 Ca-Mn-Si 加入量计算法

Ca-Mn-Si 的回收率:

Ca : 0 , 100%渣化损失

Mn : 90%, 和硅酸盐复合后 10%消失渣化

Si : 90%, 含 Mn0.6%、Si0.5%的钢正常加入方法脱氧时, Mn 和 Si 回收率约为 90%

通常的加入量为装料量的 0.2%

相对 100 kg 的装料量所需的 Ca-Mn-Si 加入量为 $100 \text{ kg} \times 0.002 = 0.2 \text{ kg}$

加入 0.2 kg 的 Ca-Mn-Si 时的 Mn 和 Si 的增加量计算如下:

假如 Ca-Mn-Si 的组成为 Ca18%、Mn16%、Si55%，则

$$\text{Mn 的增量} = 0.2 \times 0.16 \times 0.9 \times 100 \div 100 = 0.029\%$$

$$\text{Si 的增量} = 0.2 \times 0.55 \times 0.9 \times 100 \div 100 = 0.099\%$$

$$\text{最终 Mn 量} = 0.6 + 0.029 = 0.629\%$$

$$\text{Si 量} = 0.5 + 0.099 = 0.599\%$$

7.1.3 高频感应炉熔炼操作管理

7.1.3.1 熔炼操作前的检查管理事项

(1) 每天必须正确测定、记录熔炼前的炉膛内径和深度，当炉膛内径比筑炉时已经侵蚀达到 10~12mm 时必须破坏炉体、重新筑炉。

(2) 每天必须详细目测和记录炉内壁的裂纹产生和侵蚀情况。

(3) 当发现龟裂纹大于 1mm 以上时或局部有异常侵蚀时，必须在每天熔炼前修

补,特别是金属液面和渣面的炉壁部位这些容易被金属液集中侵蚀处。修补材料应与原筑炉材料同质的耐火材料,否则会因热膨胀的差异而在有在修补部位产生龟裂的危险。

(4) 修补时炉壁上附着的熔渣、铁渣必须完全去除,然后用修补材料均匀修补。

(5) 修补裂纹时必须使用厂家指定的专用材料。

7.1.3.2 熔炼操作注意事项

(1) 尽可能小心地向炉内装入炉料,不要冲击炉壁。

(2) 为了避免熔化时炉衬膨胀,应慢慢提高功率使炉料开始熔化。功率上升的致标准为最初 15~20 分钟为 50~60kW,其后 10 分钟为 100kW,之后升到通常的熔化功率。

(3) 炉料不得含有水分、油、涂料、铁锈及型壳片等异物。

(4) 在熔化过程中炉料在液面附近上部如出现搭桥架棚,则其下面的金属液温度会异常升高、过热,从而使炉衬异常侵蚀,非常危险。

(5) 料锭补加时应先装入的炉料完全熔化前加入。

(6) 应正确测定炉内液体金属温度,炉内液体金属温度一般不得超过 1700℃。

(7) 浇注时如因型壳取出或准备工作延迟,则应降温保持。

(8) 熔炼的金属量应在规定的熔炼量以内。

(9) 当残留的液量少时,为了不使异常过热,应调整功率。

(10) 出钢前应完全扒去钢液中的浮渣,除渣剂粒度不应太细,否则反而会变成浮渣,不能获得除渣效果。

7.1.3.3 熔炼操作终止

熔炼操作结束后应用压缩空气清理炉体线圈和其四周。另外当炉壁还红热时在炉内装入加热用的料块后停电,并在炉口上盖上保温盖使炉内保温,以防炉内冷却时炉壁开裂。

7.1.4 高频感应熔炼装置

一般工业机械零件的大部分精铸件国外都采用高频感应炉熔炼,它适用的合金有碳钢、低合金钢、高合金钢、工具钢、耐磨钢、耐热钢、耐腐蚀钢、钴基合金、球墨铸铁、铜合金、铝合金及硅磁钢等,应用相当广。高频熔炼装置本身已比原先省能,从人工控制到高频输出的效率大约可保持在 95%以上。由于从原先的 MG 形式变成了可控硅整流变流形式而实现了小型化。另外由于高频和高输出已使快速熔炼成为现实,而使得熔炼成本大幅度下降。液体金属除气脱氧的完善和净化,而能够炼出清洁干净的合金液。

保证合金液品质的最大熔炼量约为 250 kg,当熔炼量超过此值时将难以保证除气脱氧和净化处理完善,使得 PT 和 RT 缺陷发生的概率上升。同时由于浇注型壳数量增加而难以保证液体金属的温度,容易发生浇不足和表面粗糙等缺陷。在美国有很多工厂采用最小容量的熔炼炉(例如一炉浇一组)进行快速熔炼。可以说小炉高速熔炼是今后为了保证精密铸造熔炼时获得高品位的合金液的必要条件。

往浇包中出钢时，在倾炉前先用压缩空气吹去炉子上部和出钢口的铁珠和渣滓及灰尘，然后倾炉出钢。小型炉为 3000~10000Hz 频率的台式炉，每次在 5~10 分钟内熔炼 5~10 kg，每炉浇注一组，浇注方式为炉前直接浇注。图片所示为小型反转式高频感应炉，浇注时在炉口部位安装并夹住烧成的型壳，然后将炉体反转 180°，液体金属直接浇入型壳。使用这种反转炉时必须完全除去合金液中的渣滓。这种熔炼炉能有效解决浇不足缺陷，在克服针孔和气孔上也有明显效果。由于是直注式，能够有效控制温度，吸气少，夹渣也少。

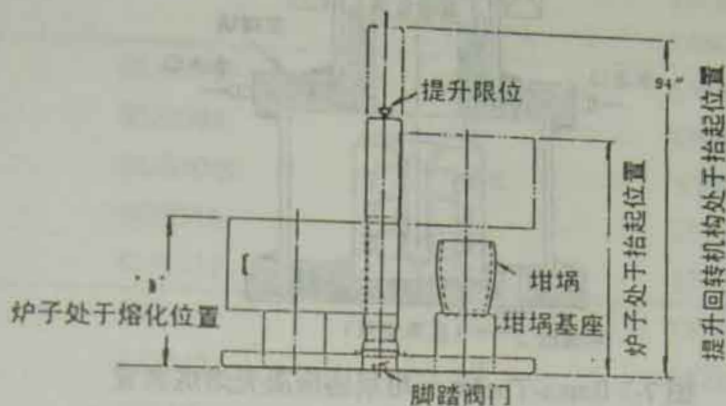


图 7-6 铝合金熔炼用升抬式高频回转炉



图片 小型反转式高频感应熔炼炉
(美 Inductotherm 公司制)

高频感应炉也可用于熔炼铝合金等有色金属。图 7-6 所示为升抬式回转炉，用于熔炼 AC4C 铝合金时，大约 20~30 分钟就可熔化。如图所示，在该炉的炉体中安装上石墨坩埚，然后熔炼，经熔化、除气、变质处理后，炉体抬起回转，坩埚装上浇注夹具后进行浇注。该炉由于感应扩散，使得氩气除气和变质处理容易获得好的效果。

1990 年在美国 ICI 主办的第 38 届技术大会上阿拉巴马大学铸造技术中心的 Thomas Pitwonka 博士介绍了该大学电磁研究所新开发的“Bama-Therm”系统装置，该系统装置也称为无坩埚熔炼浇注装置，该系统不使用坩埚，而是利用铝合金、高合金或钛合金的电磁性，使得液体合金悬浮在熔炼室内，经熔化后直接浇注。图 7-7 所示为 Bama-Therm 装置，该装置采用高频感应凝壳熔炼，该装置已经实现自动熔炼和浇注。由于该装置不使用坩埚，因此合金液清洁、结晶组织稳定、制造成本低。

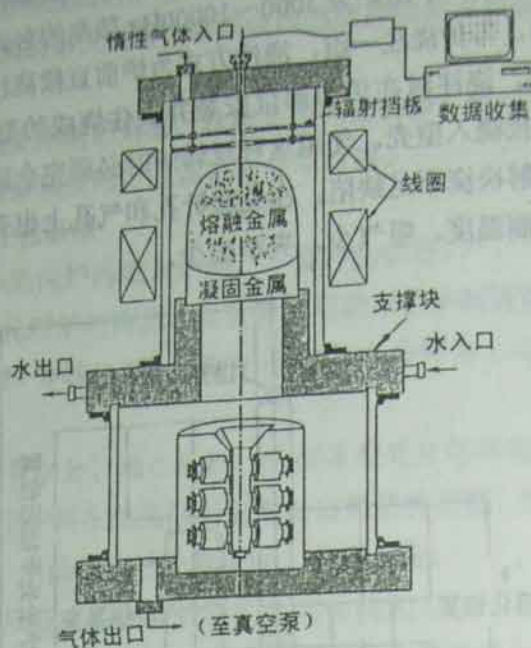


图 7-7 Bama-Therm 无坩埚感应凝壳熔炼装置

7.2 各种精密铸造合金的熔炼方法

适用于精密铸造的金属材料有很多，几乎所有的合金都适用。所采用的金属原料可以是母合金、废料碎屑及回炉料等，也可以用各种金属和合金配制新的合金。这些合金的熔点各不相同，根据铸件形状和铸造方案决定其熔炼温度和浇注温度。精密铸造件的形状一般说比砂型铸造件复杂、壁薄，另外由于型壳薄，型壳经高温烧成后到浇注的冷却也快，所以精密铸造件的熔炼浇注温度比砂型铸造大约要高出 20~50℃。表 7-4 所示为各种常用精密铸造用合金的熔点范围。通常精密铸造浇注温度的大致标准为熔点加 130~160℃。

表 7-4 精密铸造用各种合金材料的熔点范围

合金类别	合金牌号		熔点范围 (°C)
	JIS	AISI/ASTM	
碳素钢和 低合金钢	S20C	1020	1540
	S30C	1030	1525
	S40C	1040	1510
	S53C	1050	1505
	S58C	1060	1490
	SNCM220H	8620	1493
	SCM430	4130	1535
	SNCM240	640	1504
	SNCM439	4340	1504

合金类别	合金牌号		熔点范围 (°C)
	JIS	AISI/ASTM	
铁系不锈钢	SUS410	410	1482~1532
	SUS440C	440C	1372~1483
	SUS440A	440A	1372~1510
镍铬系不锈钢		17-4PH	1404~1440
	SUS303	303	1399~1455
	SUS304	304	1399~1455
	SUS304L	304L	1399~1455
	SUS316	316	1371~1399
	SUS317	317	1371~1399
工具钢	SKD11	D2	1371~1427
	SKD12	A2	1371~1427
	SKH9	M2	1371~1427

由于各种合金的熔点及合金液的特性不同,因此其铸造性能(流动性)也有很大的差异,特别是精铸件由于其形状自由度的复杂性,因而对合金液的铸造性能也有不同的要求。表7-5为精密铸造用各种合金铸造性能的比较表。

表7-5 精密铸造用各种合金的铸造性能比较

合金类别	合金牌号	可铸造性	流动性等级	收缩率等级	抗热裂等级
电工硅钢	0.5%Si	75	3	3	2
	1.2%Si	80	3	3	2
	1.5%Si	80	3	3	2
	1.8%Si	75	3	3	2
	2.5%Si	70	3	2	2
碳钢和含硫易切削钢(AISI)	1015	80	3	3	3
	1018	80	3	3	3
	1020	80	3	3	3
	1025	85	3	3	2
	1030	85	3	2	2
	1035	85	3	2	2
	1040	85	2	2	2
	1045	85	2	2	2
	1050	85	2	2	2
	1060	85	2	1	2

(续)

合金类别	合金牌号	可铸造性	流动性等级	收缩率等级	抗热裂等级
碳钢和含硫 易切削钢	1117	75	3	3	3
	1140	80	2	2	3
(AISI)					
低合金钢	2345	90	2	2	2
	(AISI)				
	3120	85	2	3	2
	4130	90	2	2	2
	4140	90	2	2	2
	4150	90	2	2	2
	4340	90	2	2	2
	4615	85	2	3	2
	4620	85	2	3	2
	4640	90	2	2	2
	5130	85	2	3	2
	6150	90	2	2	2
	8620	85	2	3	2
	8630	85	2	3	2
8640	90	2	2	2	
8645	90	2	2	2	
8730	85	2	3	2	
8740	90	2	3	2	
52100	80	1	2	2	
氮化钢					
	75	2	3	2	
400 系列 不 锈 钢	405	90	2	3	2
(AISI)					
	410	95	1	3	2
	416	85	1	3	2
	420	90	1	3	2
	430	90	1	3	2
	430F	90	1	3	2
	431	90	1	3	2
	440A	85	1	3	2
	440C	85	1	3	2
	440F	85	1	3	2
	17-4PH	85	1	3	3
	AMS5354	85	1	3	2
			1	3	2

合金类别	合金牌号	可铸造性	流动性等级	收缩率等级	抗热裂等级	(续)
300 系不锈 钢 (AISI)	302	100	1	1	1	
	303	95	1	1	2	
	304	100	1	1	1	
	310	90	1	1	1	
	312	90	1	1	1	
	316	100	1	1	1	
	347	95	1	1	1	
	CF-8M(ACI)	100	1	1	1	
	CN-7M(ACI)	95	1	1	1	
	高镍合金	QQ-N-288-A	85	1	2	2
蒙乃尔 R.H		75	1	2	3	
QQ-N-288-C		75	1	2	3	
AMS-5665		85	1	2	2	
47%Ni50%Fe		80	3	2	2	
Invar		75	1	2	2	
钴基合金	钴 J	80	1	1	3	
	钴 3	80	1	1	3	
	钴 6	80	1	1	2	
	钴 19	85	1	1	3	
	钴 21	90	1	1	2	
	钴 31	90	1	1	2	
	钴 93	70	1	1	3	
	N-155	80	1	1	3	
工 具 钢 (AISI)	A-2	85	2	2	2	
	A-6	80	2	2	2	
	D-2	85	3	2	2	
	D-3	85	3	2	2	
	D-6	80	3	2	2	
	D-7	80	3	2	3	
	BR-4FM	80	3	2	2	
	F-2	75	3	2	2	
	H-13	85	2	2	2	
	L-6	80	2	2	2	
	M-2	80	2	2	3	

(续)

合金类别	合金牌号	可铸造性	流动性等级	收缩率等级	抗热裂等级
工具钢 (AISI)	M-4	75	2	2	3
	O-1	80	2	1	2
	O-2	80	2	1	2
	O-7	80	2	1	2
	S-1	90	2	2	2
	S-2	90	2	2	2
	S-4	90	2	2	2
	S-5	90	2	2	2
	T-1	80	2	1	3
	铝合金	13	85	2	2
40E		75	3	3	3
43		90	2	2	2
356-A356		100	1	1	1
355-C355		95	1	1	1
B-195		85	1	2	2
铜合金	铝青铜 Gr.C	80	1	3	1
	铝青铜 Gr.D	80	1	3	1
	炮铜 88-10-2	85	1	3	1
	锰青铜	80	2	3	1
	高强锰青铜	80	2	3	1
	海军黄铜	85	2	2	1
	M 海军铜	85	2	2	1
	G 海军铜	85	2	2	1
	磷青铜	85	2	2	1
	85-5-5-5 红铜	90	1	1	1
	硅黄铜	100	1	1	1
	铍铜 10C	90	1	1	1
	铍铜 20C	100	1	1	1
铍铜 275C	90	1	1	1	

注：(1) 可铸造性是针对简单外形铸件，将三种铸造性能优秀的合金（302 不锈钢，20C 铍铜，356 铝合金）定为 100 的基础上进行比较后确定。

(2) 各种合金的流动性、收缩、抗热裂等级为：1——优，2——好，3——差。

合金的铸造性能可以采用提高浇注温度和控制合金成分来进行调整。例如碳钢、低合金钢、高合金钢、工具钢、耐磨钢、耐热钢、耐腐蚀钢等铸钢中的碳、硅、

铝、锰、铬、铜、钼等成分都影响铸造性能。图 7-8 所示为含碳量对钢液流动性的影响。图 7-9 所示为含硅量对钢液流动性的影响。加入硅可以提高钢的流动性。铸钢的除气脱氧完全时流动性会更好。加入少量的铝进行有效除气脱氧能提高流动性，可是加入量超过某个限度又会使流动性下降。含锰为 2%~14% 的锰钢，其钢液温度为 1460~1540℃ 时流动性得到改善，但含锰多的钢液在 1560℃ 以上流动性反而变坏。铬能使钢的流动性下降，这一点已由 410 系列不锈钢得到证明，而对此如果加入 3.25% 以上的镍又可改善其流动性。17-4 合金中镍的配比定在 4% 附近是为了增加流动性，而配入钼和钒又会降低流动性。

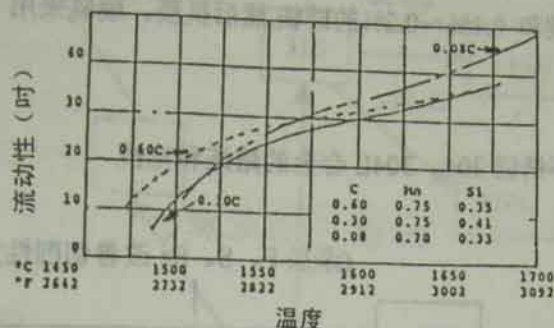


图 7-8 碳对铸钢流动性的影响

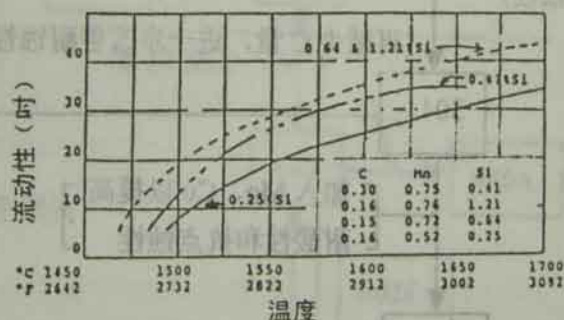


图 7-9 硅对铸钢流动性的影响

7.2.1 耐磨钢——高锰钢的熔炼和特性

表 7-6 铸造高锰钢的成分和力学性能

牌号	化学成分(%)					力学性能		
	C	Mn	Si	P	S	抗拉强度 (Mpa)	延伸率 (%)	硬度 (HB)
SCMnH1	0.9~1.3	>11.0	<0.10	<0.05	<0.04	>750	>25	170~223
SCMnH2	0.9~1.2	11~14	<0.4	<0.07	<0.04	>750	>25	170~223

表 7-6 所示为高锰钢的化学成分和力学性能。高锰钢至今仍未在精密铸造领域

获得广泛应用。可是最近随着需要量的扩大，其应用的机会也正在相应增加，特别是用于耐磨制品及需无磁性的电气零件。

当用酸性炉衬熔炼高锰钢时，会产生 $MnO + SiO_2 \rightarrow MnSiO_3$ 的激烈反应，而使炉衬严重侵蚀，所以炉衬材料需要采用氧化铝系的尖晶石炉衬材料以遏制侵蚀。浇注温度低的高锰钢的晶粒较细，浇注温度过高则得到粗大的树枝状结晶。另外，高锰钢较容易产生缩孔。高锰钢中含碳高时，由于生成 $(FeMn)_3C$ 而使塑性韧性下降，而含碳低则耐磨性降低。高锰钢很难进行机械加工。高锰钢熔炼的最高温度为 $1600^\circ C$ ，浇注温度大约为 $1480 \sim 1500^\circ C$ 。在全部炉料熔化后保持氩气保护气氛的同时加入 $0.1\% \sim 0.15\%$ 的碳和 $0.1\% \sim 0.2\%$ 的硅铁，然后扒渣。脱氧采用 0.1% 的 $Ca-Mn-Si$ 和 0.1% 的 $Ni-Ca$ 。

7.2.2 奥氏体系列不锈钢 304、304L 合金的熔炼和特性



图 7-10 奥氏体系列不锈钢系统图

图 7-10 所示为奥氏体不锈钢的系统图。图 7-11 所示为不锈钢的系统图。304 不锈钢的最大含碳量为 0.08% ，而且希望低于此值。此种合金的铸造性能优良，采用大气中熔炼，合金的熔点为 $1400 \sim 1454^\circ C$ 。熔炼时必须注意防止炉内合金液温度过高，而且尽量快速熔炼。浇注时型壳应保持清洁干净，浇包和型壳之间的距离应尽量靠近。脱氧除气剂最好采用 $Ca-Mn-Si$ ，如果还不充分的话则应使用 $Ni-Ca$ 。在浇包中脱氧除气应采用纯 Al 或和铈合用。

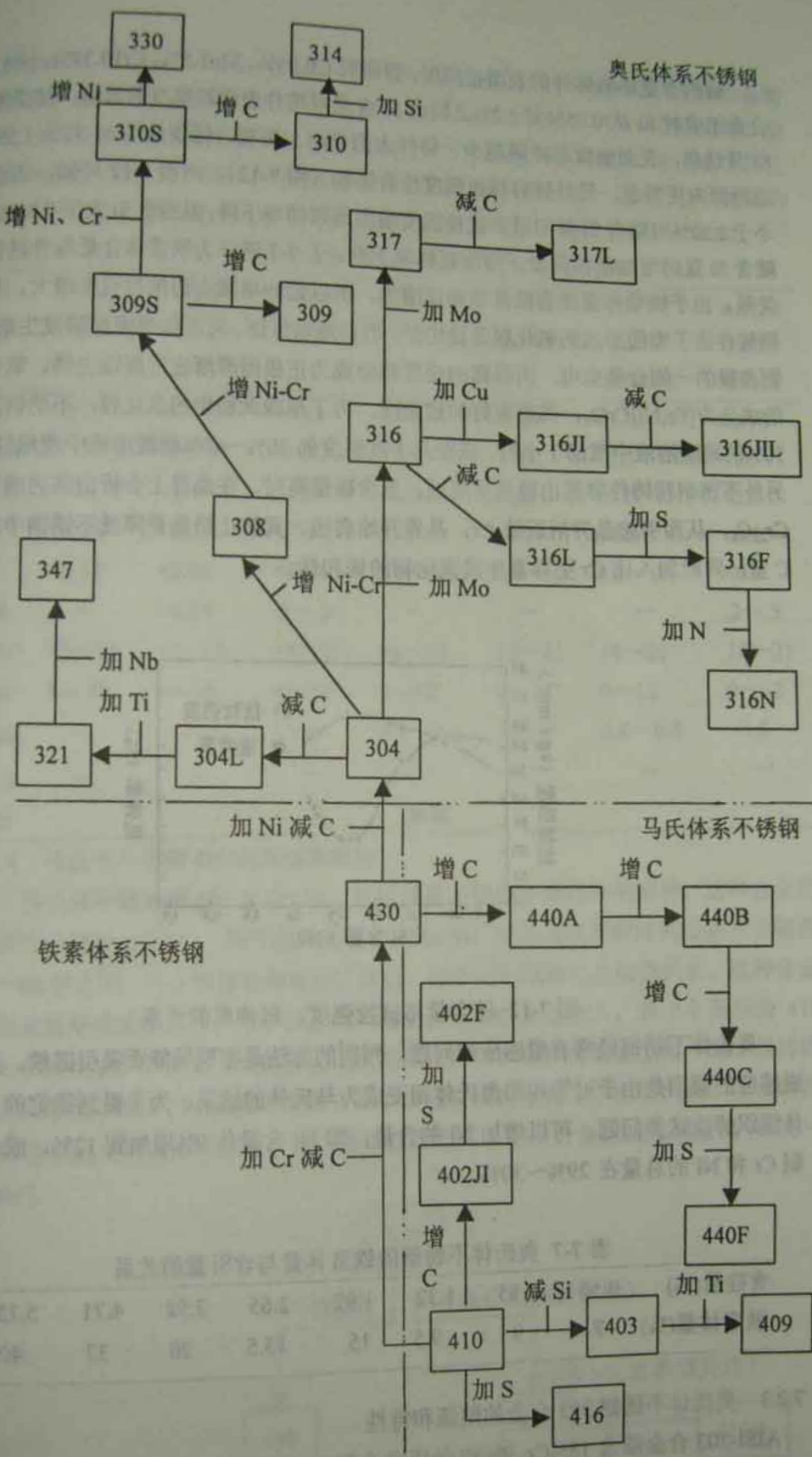


图 7-11 不锈钢系统图

硅的含量影响铸件的表面粗糙度。曾研究 C0.05%、Mn1.5%、Cr19.37%、Ni8.9% 合金组成时 Si 从 0.75% 到 2.2% 之间的 Si 含量对铸件表面粗糙度的影响，结果表明 Si 量越高，表面皱纹和冷隔越少，铸件表面光滑、美观，特别是当 Si 大于 1.5% 时这种倾向更明显。另外硅对抗拉强度也有影响（图 7-12），由图 7-12 可知，当含 Si 小于 2.22% 时随含 Si 量的增加抗拉强度增大而延伸率下降，但当含 Si 大于 2.22% 时，随含 Si 量的增加抗拉强度下降而延伸率上升。表 7-7 所示为铁素体含量与含硅量的关系。由于铁素体量随含硅量增加而增加，所以延伸率减小而抗拉强度增大。不锈钢铸件由于表面形成的氧化膜是稳定的，所以难以生锈。可是如果表面膜发生断裂，则在膜的一侧会带负电，所暴露的金属部分成为正极而渐渐进行腐蚀生锈。氧化膜的成分为 $[\text{Fe}, \text{Ni}]\text{CrO}_4$ ，具有良好的致密度。为了形成此稳定的氧化膜，不锈钢需在 50% 的硝酸溶液中煮沸 1 小时、或在几十度温度的 20%~40% 硝酸溶液中浸泡钝化。另外不锈钢精铸件容易出现晶界腐蚀。当含碳量高时，在晶界上会析出铬的碳化物 Cr_{23}C_6 ，从而引起晶界附近缺 Cr，晶界开始腐蚀。其防止措施是降低不锈钢中的含 C 量，同时加入比 Cr 更容易生成碳化物的铌和钛。

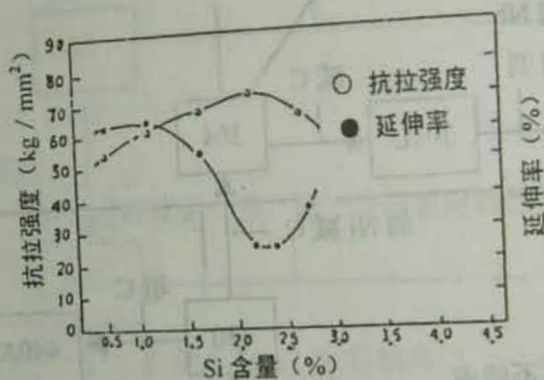


图 7-12 硅含量与抗拉强度、延伸率的关系

奥氏体不锈钢经常有磁感应的问题，判别的方法是在现场能否吸引磁铁。产生磁感应的原因是由于过饱和的奥氏体相变成为马氏体的结果。为了得到稳定的奥氏体组织解决这类问题，可以增加 Ni 的含量，即 Ni 含量从 9% 增加到 12%，或者控制 Cr 和 Ni 的总量在 29%~30%。

表 7-7 奥氏体不锈钢的铁素体量与含 Si 量的关系

含硅量 (%)	0.56	0.85	1.32	1.92	2.65	3.52	4.71	5.15
铁素体量 (%)	7	9	9.5	15	15.5	20	32	40

7.2.3 奥氏体不锈钢 303 合金的熔炼和特性

AISI-303 合金除含 18%Cr、9%Ni 外还含 S 和 Se，属于 18-8 奥氏体系列不锈钢。配入 S 和 Se 是为了改善切削性能。此合金的流动性比较好，热处理时难以硬化。

这种合金在 427~870℃ 析出碳化物，和铁素体形成 σ 层，表 7-8 所示为此种合金的化学成分。M. Henthorne 的研究表明，加入 0.15%~0.35% 的 S 可以改善切削性能，加入 0.3% 的 Zr 或 Mo 可以使硫化物稳定，即加入钼后形成细小的 ZrS。但是为了防止形成 FeS-Fe 共晶而使铸件表面粗糙，S 的加入量应小于 0.3%。此种合金的熔点为 1400~1420℃。脱氧除气一般采用 Ca-Mn-Si，浇注温度大约为 1580~1640℃。

表 7-8 AISI-303 不锈钢的化学组成 (%)

元素	AISI -303	AISI 303-Se	ACI CF-16F	ACI CF-16FA	ICI 0-3921	ASTM A296 CF16FA	ASTM A296 CF16F
C	<0.15	<0.15	<0.16	<0.16	<0.16	<0.16	<0.16
Mn	<2.0	<2.0	<1.5	<1.5	<2.0	<1.5	<1.5
Si	<1.0	<1.0	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0
P	<0.20	<0.20	<0.17	<0.04	<0.04	<0.04	<0.17
S	<0.15	<0.06	<0.04	0.2~0.4	.18~.4	0.2~0.4	<0.4
Se	—	>0.15	.2~.35	—	—	—	.2~.5
Cr	17~19	17~19	18~21	18~21	18~21	18~21	18~21
Ni	8~10	8~10	9~12	9~12	9~12	9~12	9~12
Mo	—	—	<1.5	0.4~0.8	<0.75	0.4~0.8	<1.5
Cu	—	—	—	—	<0.5	—	—
Fe	余量						

7.2.4 马氏体不锈钢 410 的熔炼和特性

马氏体不锈钢 410 含 Cr12%，可以说是不锈钢中最经济的钢种。这种合金的熔点为 1482~1532℃，除气脱氧采用 Ca-Mn-Si，加入脱氧剂的时间必须在出钢前 30~60 秒之间，待液体合金充分扩散后，将渣化的浮渣完全结壳扒去。这种合金的热处理必须根据其含碳量合适控制。增碳必须以铁合金加入。表 7-9 所示为 410 合金的化学成分。解决表面脱碳缺陷的措施是：(1) 保持碳量在上限；(2) 保持铬量在标准的下限；(3) 浇注后快冷；(4) 浇注后保持型内为非活性气氛。浇注时浇包和铸型的距离应尽可能近，防止液体金属紊流。这种合金的浇注温度为 1620~1680℃。



图 7-13 马氏体系和铁素体系不锈钢的系统图

图 7-13 所示为马氏体系和铁素体系不锈钢的系统图。410 合金有时会产生针孔缺陷。为此高频熔炼时从开始出现熔池到浇注应该在氩气保护气氛下进行。图 7-14 为氩气保护熔炼简图，在炉口加盖造成氩气保护气氛，以避免金属液和大气接触。注意氩气不要直接吹在合金液面上，要间接吹附在合金液的表面。另外为了防止点蚀锈斑，浇注后应采取无氧化保护气氛。

表 7-9 410 系列不锈钢的化学组成 (%)

元素	AMS 5350	ICI-IC 05913	AISI 410	ACI CA-15	ASTM CA-15	ASTM CA-15M	MIL-S CL-1	MIL-S CL-2	MIL-S 22216
C	0.05~0.15		≤0.15						
Mn	≤1.0								
Si	≤1.0		≤1.5			≤0.65	≤1.5	≤0.5	≤1.0
P	≤0.04						≤0.05		≤0.04
S	≤0.03		≤0.04				≤0.05		≤0.04
Cr	11.5~13.5		11.5~14.0						11.5~13.5
Ni	≤0.5	—	≤1.0				≤0.65		≤0.5
Mo	≤0.5	—	≤0.5	0.15~1		≤0.5	0.5~0.7	≤0.5	
Cu	≤0.5	—							≤0.5
Fe	余量								

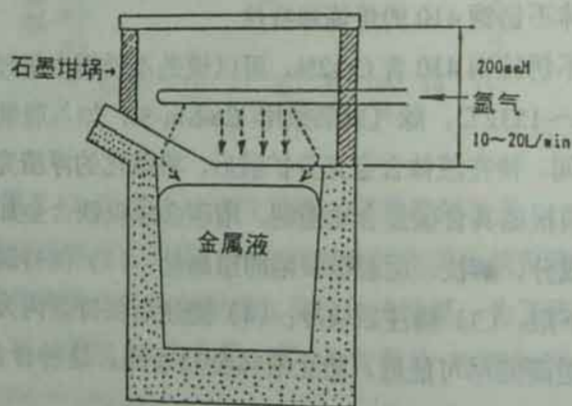


图 7-14 氩气保护熔炼 410 合金

7.2.5 析出硬化型不锈钢 17-4PH 的熔炼和特性

化学工业常采用此类不锈钢用作耐高温的结构零件、弹性零件及耐腐蚀零件。在其化学成份中含有 2.8%~5.0% 的 Cu 作为硬化元素。这种合金的熔点为 1405~1440℃，含 Cu 量越接近规格值的上限，熔点越低。除气脱氧剂为 Ca-Mn-Si。为了使铸件表面晶粒细化和防止产生针孔，在组成中加入了 0.15% 的 Si-Ti。Si-Ti 的加入时间应是紧接在 Ca-Mn-Si 除气脱氧剂加入之后。表 7-10 所示为这种合金的化学组成。表 7-11 所示为这种合金的力学性能。图 7-15 所示为 17-4 合金的熔炼操作过程。

此类合金浇注温度高、浇注后冷却缓慢可导致铸件表面粗化。为了改善 17-4 合金的铸件表面质量，可在型壳背层撒砂中加入 1%~2% 的无烟煤粒，使铸件表面细化。图 7-16 所示为这种处理的结果。

表 7-10 17-4 合金的化学组成(%)

元素	AMS 5355*	Armco17-4PH	ICI-IC03918	MIL-S-22216	ACI-CB-7Cu
C	≤0.06	≤0.07	≤0.06	≤0.08	≤0.07
Mn	≤0.70	≤1.0	≤0.70	≤1.0	≤1.0
Si	0.5 ~ 1.0	≤1.0	≤1.0	≤1.0	≤1.0
P	≤0.04	≤0.04	≤0.04	≤0.04	≤0.04
S	≤0.03	≤0.03	≤0.03	≤0.04	≤0.04
Cr	15.5~16.7	15.5~17.5	15.5~16.7	15.5~17.5	15.5~17.5
Ni	3.6 ~ 4.6	3.0 ~ 5.0	3.6 ~ 4.6	3.5 ~ 5.0	3.6 ~ 4.6
Cu	2.8 ~ 3.5	3.0 ~ 5.0	2.8 ~ 3.5	3.0 ~ 5.0	2.3 ~ 3.3
Ti	0.15~0.40	0.25~0.45	0.15~0.40	≤0.45	
N	≤0.05		≤0.05		
Fe	余量	余量	余量	余量	余量

注:*AMS 5342,AMS 5343, AMS 5344 相同的化学范围

表 7-11 17-4 合金的力学性能

力学性能	AMS 5355	AMS 5342	AMS 5343	AMS 5344
抗拉强度 Psi	180000	130000	150000	180000
0.2%屈服极限 Psi	150000	120000	130000	160000
延伸率,%	6	8	6	6
R.A,%	15	15	15	15
硬度 Rc	40	33	38	40

注: AMS 5355,时效处理温度 925 ~ 900 °F , AMS 5342,时效处理温度 1100±15 °F
AMS 5343,时效处理温度 1000±15 °F, AMS 5344,时效处理温度 900~925 °F

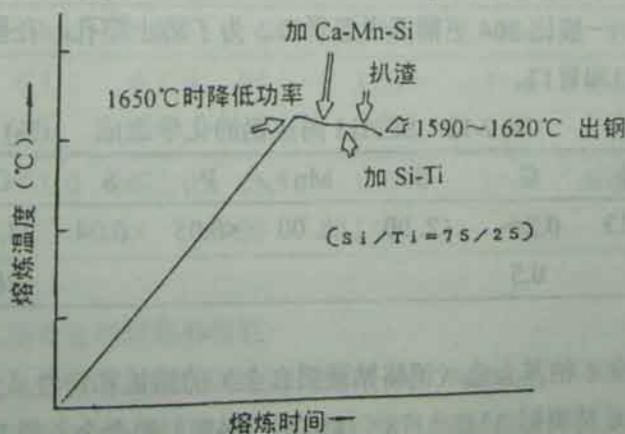


图 7-15 17-4 合金的熔炼顺序

7.2.6 SCH13 耐热钢的熔炼和特性

这种合金具有良好的高温强度和抗高温氧化性。使用温度范围小于 1100℃。表 7-13 所示为这种合金的成分。这种合金中含镍量越高，高温抗拉强度越低，但抗热冲击性越好。

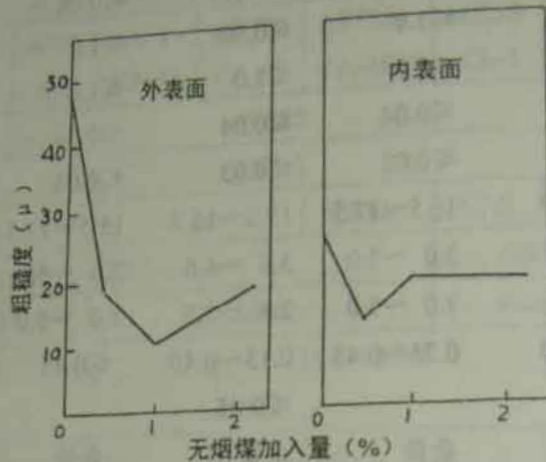


图 7-16 背层撒砂加入无烟煤砂粒改善 17-4 合金铸件表面粗糙度的效果

增加含铬量可以提高其耐蚀性、耐酸性及高温抗拉强度。另外硅含量会降低其高温抗拉强度。为了获得稳定的奥氏体组织，C、Cr、Ni 的含量必须满足下列关系式

$$[\text{Cr} (\%) - 16\text{C} (\%)] / \text{Ni} (\%) < 1.7$$

例如当 C 为 0.31%、Cr 为 27.17%、Ni 为 11.84% 时， $[27.17 - 16 \times 0.31] / 11.84 = 1.87$ ，此时合金中有部分铁素体出现，所以非常脆，在反复加热时容易开裂。另外这种合金的收缩率比较大，大约为 2.5%~2.6%。这种合金主要用于热处理炉的托盘、吊篮、喷嘴、罐釜、锅炉的横梁。其浇注温度一般比 304 低 10~15℃。为了保证铸造方案的补缩效果，一般比 304 更需要设置冒口。为了防止缩孔，在壁厚差显著的部位应该设置内浇口和冒口。

表 7-12 SCH13 耐热钢的化学组成 (%)

钢号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
SCH13	0.2~0.5	<2.00	<2.00	<0.05	<0.04	24.0~28.0	11.0~14.0

7.2.7 司太立 6 钴基合金 (钨铬钴硬质合金) 的熔炼和特性

司太立 6 是类似 AMS-5378 (28%Cr、5%W) 的合金，表 7-13 所示为这种合金的成分。钴基合金可以在大气中熔炼，铸造性能比 316 合金好。熔点为 1260~1357

℃。通常不使用除气脱氧剂，可是当需要控制针孔度时也可以添加不超过 0.15% 的 Ni-Ca。浇注温度为 1400~1440℃。这种合金具有好的耐磨性和自硬化特性。图 7-17 所示为其强化热处理去除应力的热处理规范。

表 7-13 司太立 6 [AMS 5385, 28Cr-5W] 合金的化学组成 (%)

规格	C	Mn	Si	Cr	W	Mo	Ni	Fe	抗拉强度	硬度
AMS	0.9~	≤	≤	27~	3.5~	1.6	3.0	4.0	8.07	41
5387	1.4	1.0	1.5	31	5.5				(MPa)	(HRC)



图 7-17 司太立 6 合金的去除应力热处理

7.2.8 司太立 21 钴基合金的熔炼和特性

司太立 21 钴基合金是类似规格 AMS-5385 (27%Cr、2.8%Ni、5.5%Mo) 的合金。这种合金广泛使用于高精度精铸件和牙科精铸件。在第二次世界大战期间作为耐高温合金被开发，是最早发明的一种超合金。这种合金在 1093℃ 时仍具有优良的耐热冲击性。通常可以在大气中进行熔炼，铸造性能优良，热处理时不硬化。表 7-14 所示为 AMS 5385 合金的化学组成。这种合金的熔点为 1340~1363℃。应在高于熔化温度不太高的情况下进行快速熔炼，一般不使用除气脱氧剂，如果产生针孔，可以在规定成分范围内加入 Ca-Mn-Si 在合金液内部搅拌扩散，最后蒙皮消失。浇注时浇包应尽量靠近型壳，浇注温度为 1465~1493℃。这种合金的铸造性能优于奥氏体不锈钢。

表 7-14 司太立 21 合金 [27%Cr、2.8%Ni、5.5%Mo] 的化学组成 (%)

规格	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	B	Fe
AMS	0.2~	≤1.0	≤1.0	25 ~	1.75~	5~6	≤0.007	≤3.0
5385	0.3			29	3.75			
HS21	0.2~	≤1.0	≤1.0	25.5~	1.75~	5~6	≤0.007	≤2.0
	0.3			29	3.75			

7.2.9 司太立 31 钴基合金的熔炼和特性

司太立 31 合金是类似于 AMS-5382 (25.5%Cr、10.5%Ni、7.5%W) 的合金。这种合金也可以在大气中熔炼，铸造性能好。表 7-15 所示为 AMS-5382 的化学组成。这种合金的熔点为 1342~1395℃，没有必要进行除气脱氧处理。但当需要防止针孔时

可以使用 Ca-Mn-Si, 但添加 Mn 和 Si 不能超过 Mn、Si 成分的规定范围。这种合金的铸造性能比 304 好。

表 7-15 司太立 31[25.5%Cr、10.5%Ni、7.55%Mo]合金的化学成分

规格	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	W	Fe	B
AMS	0.45	≤	≤	0.04	0.04	24.5	9.5	7	≤2	
5385	~	1.0	1.0			~26.5	~11.5	~8		
HS-31	0.55									
X-40	0.2	≤	≤	0.04	0.04	24.5	9.5	7	≤2	0.005
	~0.3	1.0	1.0			~26.5	~11.5	~8		~0.015

7.2.10 磁性材料 3%Si 钢的熔炼和特性

这种钢的电磁特性决定于硅、碳、磷、硫、氧、氮和氢的含量, 特别是含氧量对其电磁特性影响很大。氧量高时, 初透磁力、最大透磁力减少, 抗磁力和磁滞损失增大。由于在大气熔炼时晶界容易出现夹杂物而难以得到理想的电磁特性。另外真空熔炼的加工性能较好, 可以用于打印机叉形盘芯的精密铸造。应从原材料价格和磁性两个方面考虑是否采用精密铸造。从价格考虑使用 3%Si 的锭料作为原材料时采用真空熔炼, 在特殊条件下采用大气熔炼也能满足磁性要求。

表 7-16 所示为供真空熔炼用的 3%Si 的母锭的化学成分, 其含氧量必须小于 50ppm。另外购入的锭料必须不生锈。熔炼时从出现熔池到出钢必须在氩气保护下进行。除气脱氧剂使用不含杂物的纯硅(炉内除气脱氧)和纯铝(浇包中除气脱氧)。表 7-17 所示为这种合金精密铸造的焙烧熔炼工艺参数。图 7-18 所示为这种合金的熔炼过程。炉内除气脱氧为当熔化到一半时加入一半的硅量, 剩余的一半硅在全部熔清后温度达到 1600℃时再加入。打印机叉形盘芯的浇注温度为 1680℃左右。浇包脱氧除气应采用纯铝(Al: 99.99%)。为了改善浇注后铸件表面光洁度可以采用加蜡扣罩法。当用含 1%Si 的硅钢作电机、继电器零件时, 由于磁性要求不太严, 所以一般可以使用经 AOD 处理后的大气熔炼钢锭。

表 7-16 磁性材料 3%Si 钢的化学成分

Si	Mn	C	O	H	N
	(%)			(ppm)	
3.13	0.067	0.0053	20.7	0.82	15.6

表 7-17 3%Si 钢精密铸造的焙烧、熔炼工艺参数

焙烧工艺		熔炼工艺		
焙烧温度	焙烧时间	吹氩气压力	熔炼温度	熔炼时间
1000℃	2.0 h	2.5 MPa	1720℃	20 min



图 7-18 打印机叉形盘芯用 3%Si 磁钢的熔炼过程

为了得到所要求的磁性，铸造后必须进行磁性退火，在高纯度氢气保护下在 1100℃处理 2.5~3 小时。叉形盘芯磁性试验时从本体上取样。叉形盘芯的磁性要求是：保磁力 H_c 小于 0.35 Oe，残留磁束 B_r 大于 9500 Gs，磁束密度 B_i 大于 10000Gs，磁束密度 B_s 大于 13000Gs，磁束密度 B_{10} 大于 14000Gs。磁性评价一般以磁特性曲线为准。图 7-19 所示为磁特性曲线，纵轴表示磁束密度，横轴表示外部磁场的大小。永久磁铁磁化后必须有大的剩磁。打印机叉形盘芯的磁特性曲线要求线条细长，保磁力 H_c 和残留磁性尽可能小。图中磁特性曲线的 b、c、d、e、f、g 的面积越小，磁特性越好。

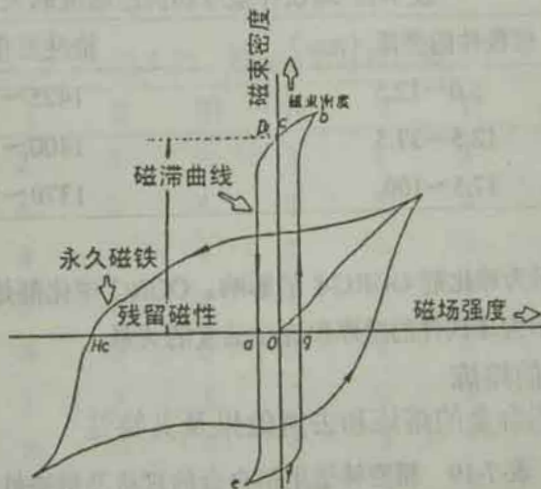


图 7-19 磁特性曲线

7.2.11 球墨铸铁的熔炼和特性

球墨铸铁因强度与延伸率高、韧性较好而可以与铸钢相匹敌。当球墨铸铁含硅量低、冷却速度大时，将不析出石墨，而析出较多的 Fe_3C ，使断面呈白色。因此当精铸件壁厚较薄，特别是含硅量不高时，很容易形成白口组织。球铁的铸造性能很好，浇注时型壳温度为 480~870℃时完全可以满足。球化处理可以采用夹层法，将镁合金和硅铁，或者 OGRC 等球化剂装在浇包底部，然后冲入铸铁液。为了防止白口和杂质元素的有害影响，球化剂中含有 0.02%以上的铈。球化以后应扒去液面的

浮渣。浇注温度大约为 1400~1450℃。球化后往往加入 0.3%~0.4%的硅铁进行变质处理以防止球化后出现白口。可是高频熔炼时没有必要进行变质处理，特别是快速熔炼时碳的烧损仅为 3.3%~3.25%。球墨铸铁液体金属的氧化严重，在金属液面上有一层特有的氧化膜，所以测定液体金属温度时应注意这一点。

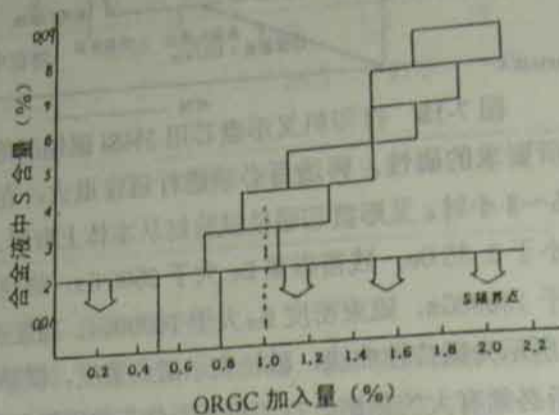


图 7-20 球化剂 OGRC-8 的球化效果

表 7-18 球铁件壁厚和浇注温度的关系

球铁件的壁厚 (mm)	浇注温度 (°C)
5.0~12.5	1425~1455
12.5~37.5	1400~1430
37.5~100	1370~1415

图 7-20 所示为球化剂 OGRC-8 的影响。OGRC 球化剂是镁合金，含 Mg 量为 4%。表 7-18 所示为球铁件的壁厚和浇注温度的关系。

7.3 有色合金的熔炼

7.3.1 AC4C 铝合金的熔炼和去氢效果及其特性

表 7-19 精密铸造用铝合金的规格及铸造性能

JIS 规格	化 学 成 分							特 性		
	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ti	抗拉强度 MPa	硬 度 HB	铸 造 性
JIS-H5202										
AC2A-F	3.5~4.5	4.0~5.0	0.2	1.0	0.8	0.5	0.2	1.8		4
AC2A-T6	3.5~4.5	4.0~5.0	0.2	1.0	0.8	0.5	0.2	2.8	90	
AC3A-F	0.2	10~13	0.1	0.3	0.8	0.3	0.2	1.8		5

JIS 规格	化 学 成 分							(续) 特 性		
	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ti	抗拉强度 MPa	硬 度 HB	铸 造 性
AC4A-F	0.2	8 ~ 10	0.2	0.2	0.7	0.3~0.8	0.2	1.8		5
AC4A-T6	0.2	8 ~ 10	0.8	0.2	0.7	0.3~0.8	0.2	2.5	90	
AC4C-F	0.2	6.5~7.5	0.2~0.4	0.3	0.5	0.3	0.2	1.6		5
AC4C-T6	0.2	6.5~7.5	0.2~0.4	0.3	0.5	0.3	0.2	2.3	85	
AC7B-T4	0.1	0.3	9.5~11	0.1	0.4	0.1	0.2	3.0	75	2

铸造性能：5—最好，4—良，3—普通，2—差，1—最差

表 7-20 铝合金的特性比较

铝合金/特性	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
AC1A	2	4	2	3	4	3	3	3	0
AC2A	4	3	4	2	2	3	3	3	0
AC2B	4	3	4	2	3	3	3	3	0
AC3A	5	1	4	4	1	3	3	4	—
AC4A	5	2	5	4	2	3	5	4	0
AC4B	5	3	4	3	2	3	5	4	0
AC4C	5	2	5	4	3	3	5	3	0
AC7A	2	5	1	5	5	3	3	1	—
AC7B	2	5	1	5	5	1	2	1	0
AC8A	4	2	4	3	1	4	3	5	0

注 1：I—铸造性；II—加工性；III—压力密封；IV—抗腐蚀性；V—氧化性；VI—高温强度；VII—焊接性；VIII—延伸率；IX—热处理

注 2：5—最好；4—良；3—普通；2—差；1—最差

铝合金轻、难生锈、表面美观、易加工、有一定强度、导电性好，所以其精铸件广泛应用于医疗、光学、检测仪器、电机、电子设备、办公自动化机械、航空航天、汽车、通讯情报机械、计量器械等领域。铝合金中应用最广泛的是 AC4C 合金。

铝合金铸造最重要的是获得合适成分的不含气体及夹杂物的优质液体合金。表 7-19 所示为精密铸造领域使用的主要铝合金的化学成分和铸造性能比较。表 7-20 所示为铝合金的特性比较，其中的 AC4C 合金由于具有合适的强度和优良的铸造性能而受到重视。

表 7-21 各种熔炼炉熔炼 AC4C 合金的气体分析结果

熔炼炉	熔到 700℃ 的含气量	0.3% 六氯乙烷除气处理	保持后的含气量
重油炉	0.4~0.45 cc/100g	0.15 cc/100g	0.2 cc/100g
煤气炉	0.4~0.45 cc/100g	0.15 cc/100g	0.3 cc/100g
高频电炉	0.3~0.35 cc/100g	0.15 cc/100g	0.2 cc/100g
电阻炉	0.3~0.35 cc/100g	0.10 cc/100g	0.15 cc/100g

注：高频炉为 4kHz

表 7-22 合金液表面的气体组成 (%)

熔炼炉	水分	二氧化碳	氧气	氮气
重油炉	5.7	4.7	14.2	72.8
煤气炉	7.7	3.4	14.1	74.1
高频炉、电阻炉	1.2	0.1	20.7	77.1

众所周知，铝合金精铸件发生针孔的主要原因是氢。产生针孔的临界含气量与合金种类、凝固速度等有关，不能一概而论。气体量多少合适，如何才能最少，已经成为一个课题。表 7-21 为调查了各种熔炼装置熔炼 AC4C 合金含氢量后的普遍结果。目前铝合金使用的主要除气剂是六氯乙烷类熔剂。最近采用了将惰性气体氩气通入铝合金液中发泡进行去氢处理，这种去氢法比历来的去氢效果好。图 7-21 所示为 AC4C 合金的氩气发泡去氢效果和其熔炼过程。每分钟 15 升流量的氩气去氢后，氢含量可以降到 $[H]0.08\text{cc}/100\text{g}$ 。如果去氢能达到这种程度，则精铸件的针孔缺陷几乎不存在。

目前已有多种氩气发泡处理装置在使用，去氢效果好的微孔尺寸为 50~70 微米，为了减低变质处理后的含氢量，可以再一次进行辅助氩气发泡处理。铝合金液共晶硅的细化变质处理可以采用陶瓷烧结体将钠变质剂（商品名：钠如或萨补玛丽 SS6000 和 SS7000）沉入铝合金液或保持浮游状态。钠如 A114 为日本富士科公司产，萨补玛丽 SS6000 和 SS7000 为日本重化学工业公司产。经过这样的变质细化处理后可以改善机械性能、提高韧性、防止缩孔。在钠变质处理后再经充分除气，所以没有微观针孔。钠还能显著提高合金的补缩性能，因而采用小的冒口就可以获得没有缩孔的精铸件。此外 AC4C 合金的共晶硅细化处理也可采用锆、钛、硼。图 7-22 所示为加入这些变质细化剂后的细化效果。

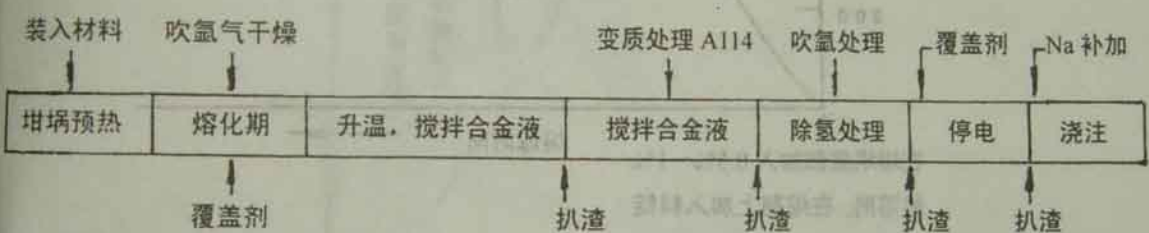
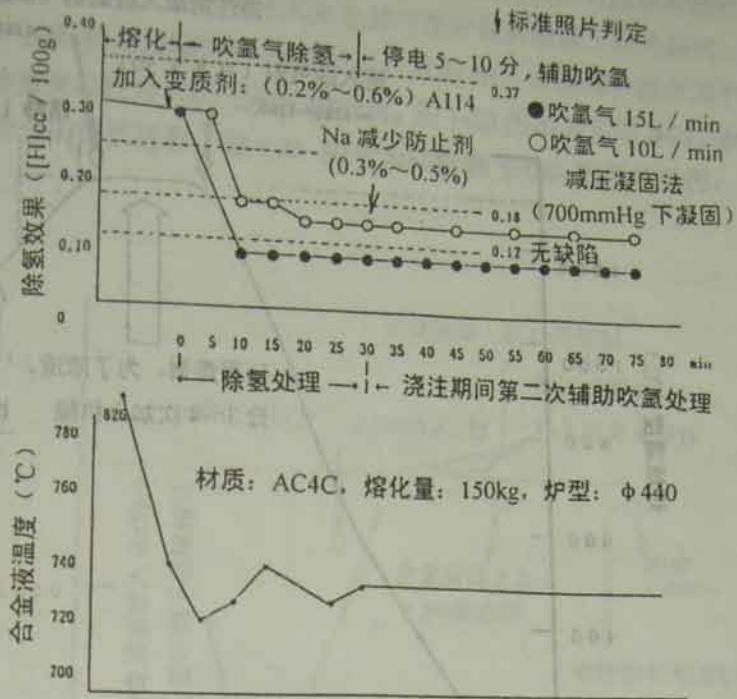


图 7-21 AC4C 铝合金的氩气去氢效果及其熔炼过程

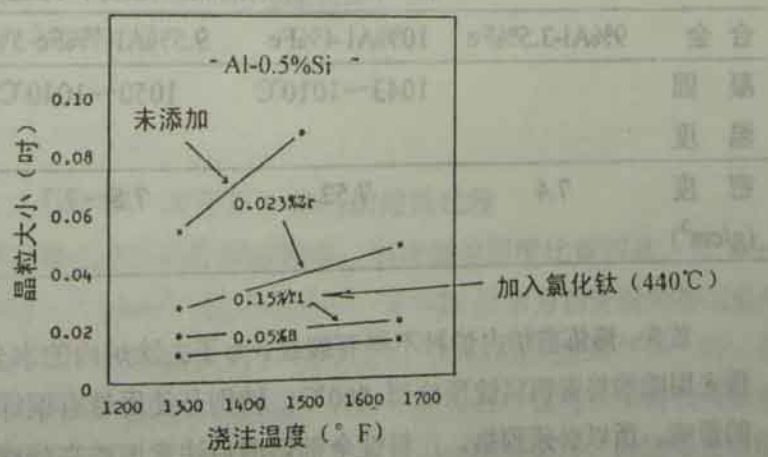


图 7-22 AC4C 合金的共晶硅细化效果

7.3.2 高频感应炉熔炼青铜

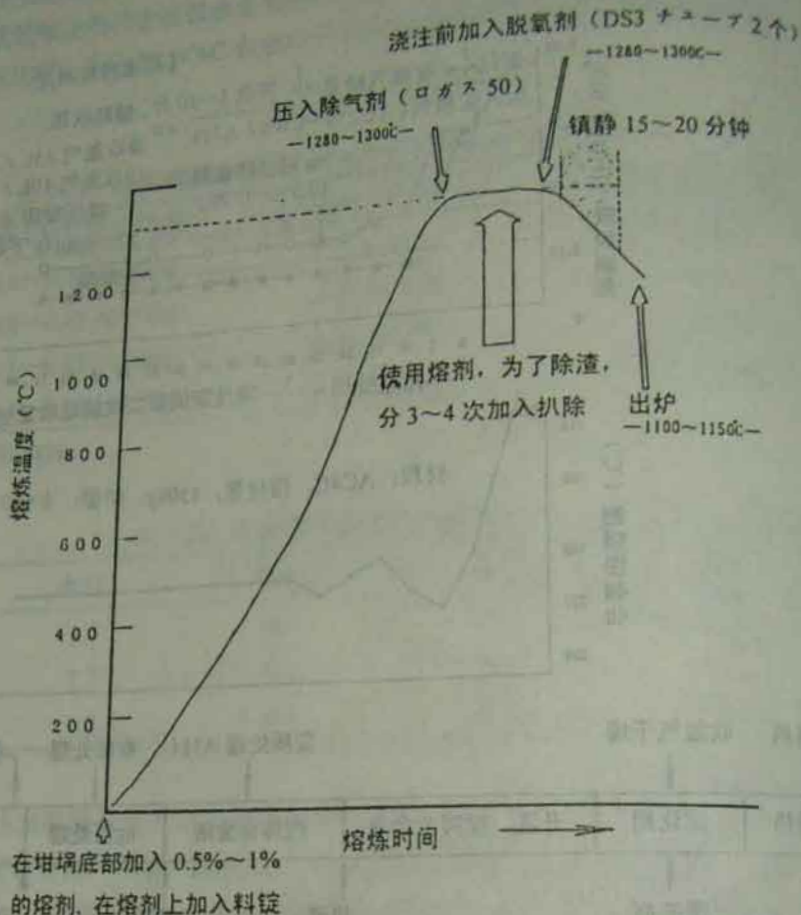


图 7-23 青铜 BC1、BC2、BC3、BC6、BC7 的熔炼过程

表 7-23 铝青铜的凝固温度和比重

合金	9%Al-3.5%Fe	10%Al-4%Fe	9.5%Al-4%Fe-5%Ni	11%Al-5%Fe-5%Ni
凝固温度		1043~1010°C	1050~1040°C	1060~1044°C
密度 (g/cm ³)	7.4	7.52	7.5~7.7	7.55~7.7

首先, 熔炼前炉内炉衬不得有裂纹。为了去除炉内的水分应预先进行炉衬烧结, 预先用喷嘴将青铜料锭预热到 800°C, 特别是使用带有铜绿的料锭, 此时易受氢气的影 响, 所以必须预热。在料锭全部熔清后注意调整高频感应炉的输出功率, 绝对 不能使温度大于 1300°C。另外为了避免合金液接触大气, 在熔炼过程中尽可能在合 金液面上覆盖熔剂。在采用立管将炉气及 DS 管插入合金液中进行处理时, 需将立 管持续压入合金液中进行反应。出炉前合金液镇静时应停止输入功率。镇静时间应

尽可能地长，最好镇静 15~30 分钟。在高频感应炉熔炼时由于合金液激烈搅动，容易卷入空气中的氢，镇静可以有利于除氢。浇注小阀门铸件时浇注前浇包内合金液温度应为 1100~1150℃，合金液注入浇包后应在浇包的液面上覆盖熔剂，浇注后在浇口上撒上一些蜡料并立即扣罩。经这种操作后的 BC1 合金铸件的表面非常整洁干净。浇注时的型壳温度为 700~800℃ 较合适。图 7-23 所示为青铜 BC1、BC2、BC3、BC6、BC7 合金的熔炼过程。图 7-24 所示为硅青铜 SzBC₃ 的熔炼过程。

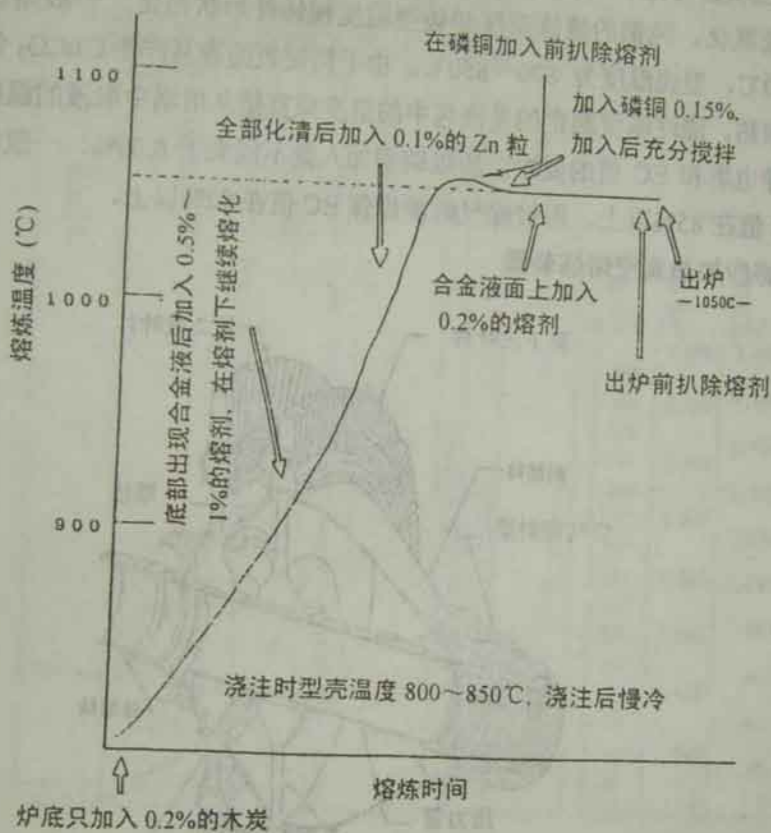


图 7-24 硅青铜 SzBC₃ 的熔炼过程

在精密铸造领域中除上以外还使用铝青铜。铝青铜的强度比黄铜高，为 40~100kg/mm²，比重为 7.3~7.5g/cm³，硬且耐腐蚀。表 7-23 所示为铝青铜的凝固温度和密度。铝青铜对海水有很好的耐腐蚀性，是铜合金中耐腐蚀性能最好的一种。铝青铜的精铸件有叶轮、船用推进器、搅拌器、化学机械器件、齿轮泵零件以及阀座等。浇注温度约为 1220~1250℃。由于熔炼时氧化物难以上浮液面、凝固温度范围较窄，所以铸件厚壁部位较容易产生缩孔，因此必须设置较大的冒口，应绝对避免顶注方案，采用平稳的底注快速浇注方案。熔炼时铝的损耗约为 0.2%~0.3%。

7.3.3 高频感应炉熔炼纯铜过程

熔炼用的石墨坩埚必须认真清扫干净，坩埚不得有裂纹和严重侵蚀。必须将坩埚放入炉内加热到 800°C 完全去除水分。预先在炉底加入 1% 的熔剂。熔剂组成为木炭：玻璃粉：硼酸 = 1: 1: 1。在熔剂上面装上料锭，慢慢提高功率，待铜液温度达到 $1180\sim 1200^{\circ}\text{C}$ 时再在液面上加上 1% 的熔剂，然后加 0.05% 的磷铜 (P:15%)。之后用预先预热的石墨坩埚接取铜液浇入测定收缩用的金属型中检查脱氧除气情况，再根据此检测结果决定磷铜的加入量。如果一次脱氧除气合格，接着将用纸包的除气材料 (铍 0.03%) 装入预热过的钟罩，压入合金液上下拉动 2~3 次，出炉前在液面上撒上钙硼，扒渣，用渣包或石墨坩埚浇注。最好在没有扒渣前采用原坩埚浇注，以防金属液氧化。纯铜的熔炼温度和铸型温度视铸件形状而定，一般熔炼温度为 $1050\sim 1180^{\circ}\text{C}$ ，型壳温度为 $800\sim 850^{\circ}\text{C}$ 。由于料锭表面容易产生 CuCO_3 铜绿，所以料锭应预热。浇注温度测定的是渣包中的温度或直接从坩埚中取液的温度。纯铜铸件因有导电率和 EC 值的要求，所以磷铜加入量不能大于 0.05%，一般说在用铍除气时 EC 值在 85% 以上，用铍除气时能确保 EC 值在 92% 以上。

7.4 高频感应加热真空熔炼装置

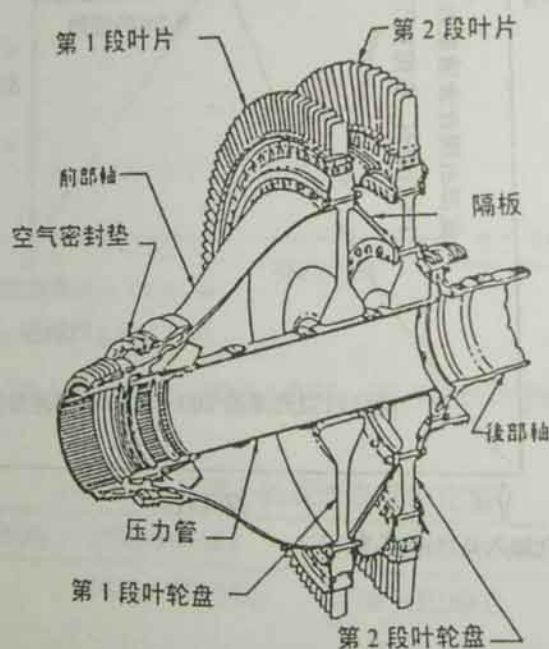


图 7-25 飞机发动机用透平转子的构造

飞机燃气轮机使用的精铸件要耐很高的温度，特别是其叶片和喷嘴由于直接接触燃气，所以必须采用耐热性好的合金。为了提高发动机的性能，燃气的温度越来越高 (透平的入口温度达到 1370°C)，因此其所使用的叶片和喷嘴必须有复杂冷却通道的冷却翼，随着陶瓷型芯的开发使得这种结构成为可能。图 7-25 所示为透平转子的结构。图 7-26 所示为燃气透平的耐热性和燃气流流动状态。这种飞机所使用的超级合金为镍基合金和钴基合金。由于这些超级合金中含有 Al 和 Ti，因此容易氧化，而在熔炼和浇注时容易形成氧化膜，氧化膜的大小和分布会以各种图案出现在叶片上，特别是叶片前端和边缘部位不允许有氧化膜存在，而在真空下进行熔炼

和浇注则这类缺陷完全可以排除。在真空条件下碳可以还原氧化钛 (1150°C) 和氧化铝 (1450°C)，在真空度为 3×10^{-3} 的真空条件下熔炼，在 $1550 \sim 1650^{\circ}\text{C}$ 时氧化铝的氧化膜被脱氧还原，($3\text{C} + \text{Al}_2\text{O}_3 = 2\text{Al} + 3\text{CO}$)，此时的 CO 以气体状态被排除。最近几年真空熔炼铸造技术的发展达到了很高的水平，已能够满足对铸件微观气孔和夹杂物的严格要求，获得了高品质的精密铸件。

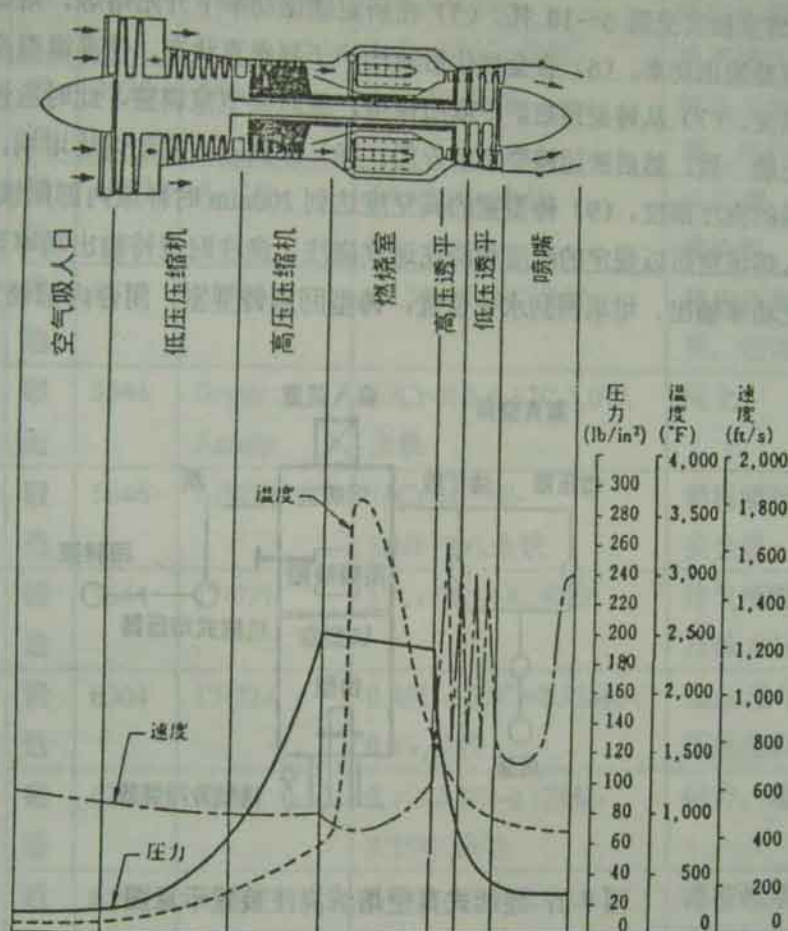


图 7-26 飞机燃气透平的耐热性和燃气流流动状态

7.4.1 真空熔炼装置和熔炼过程

图 7-27 所示为典型的真空熔炼浇注装置示意图。这种装置分为熔炼室和铸型室两部分。熔炼室包含高频感应线圈和坩埚炉。熔炼室的高真空度由回转泵、增压泵及扩散泵保持。铸型室由真空闭锁装置与熔炼室分离，并由回转泵保持真空。铸型通过铸型室的闭锁装置后提升进入熔炼室，转动坩埚，将合金液浇入铸型。

真空熔炼过程为：首先坩埚除气。可以采用在达到预定的漏泄速度之前在真空中加热坩埚，或者采用洗炉熔炼吸收气体除气。在熔炼前尽可能地除气，使得熔炼过程中因氧化造成的渣最少。除气结束后熔炼室的真空度抽到 1~10 托。然后通电

由高频感应熔化装入坩埚的合金。在到达所定的熔炼温度后将预热过的铸型装入铸型室。待熔炼室达到所定的真空度后打开铸型室的闭锁装置，提升铸型到坩埚的浇注位置。浇注后铸型下降回铸型室，与熔炼室隔离。铸型室到达大气压后从炉中取出铸型。

实际真空熔炼操作过程为：(1) 密闭除外部铸型室的门以外的所有入口和门。(2) 在下部铸型室内的平台上调整铸型位置。(3) 坩埚相对垂直方向倾 $30\sim 45^\circ$ 。(4) 熔炼室抽真空到 $5\sim 10$ 托。(5) 在所定输出功率下开始熔炼。熔炼过程中必须相应调整输出功率。(6) 合金熔化后转动炉子到垂直状态，使高温温度计接触液面测定温度。(7) 从铸型预热炉中取出铸型，放入铸型室调整。此时应使铸型的浇口位置正确一致。然后密闭铸型室的外门。(8) 来回三次摇动熔炼坩埚，使合金液润湿坩埚的浇注部位。(9) 铸型室的真空度达到 200mm 时释放内部闭锁阀。(10) 铸型进入熔炼室后以规定的温度和浇注速度浇注。浇注时保持输出功率至出炉终止后再停止功率输出。坩埚回到水平位置，铸型回到铸型室，闭合内部锁紧门。

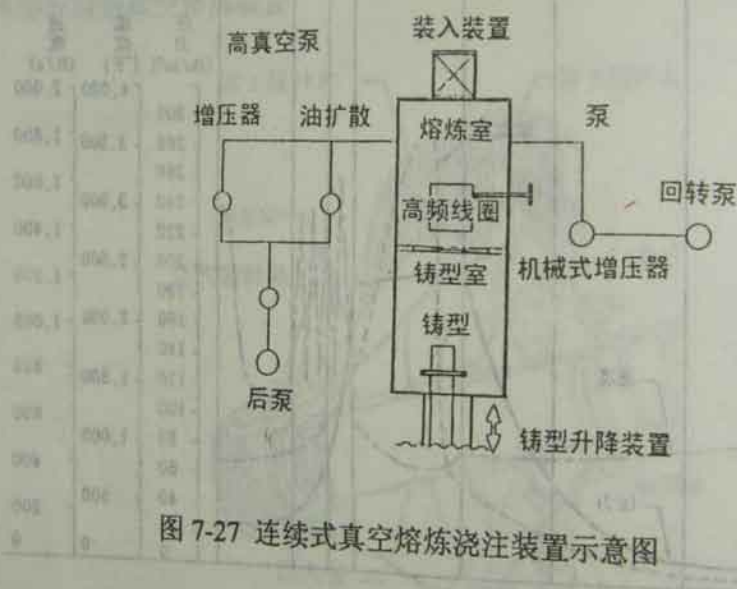


图 7-27 连续式真空熔炼浇注装置示意图

使用的坩埚为 T aycor 公司制造的氧化铝系坩埚。捣固材料最好是 Bruto-180 和 Lamag50M(干式)，压盖材料最好是 Lamag50M(湿式)。坩埚除气方法为：首先除去熔炼室的全部杂物，清扫干净后在坩埚中装入预热过的小块合金，起初 15 分钟内输出功率为 5kW ，当出现渣在液面上呈黑红色浮游时每 20 分钟功率升高 5kW ，直到最大达到 30kW 。用于熔炼 X-45、Mar-M509、Mar-M302 的坩埚必须每炉更换。用于熔炼 Inco718、Inco713、IN-100、Inco625、Maraging、Marage250、Marage300、Waspalloy、Inco706、Inco792、Rene41、Mar-M421、Hastelloy 及 A-286 合金的坩埚至少可以使用 3 次。在日本经常使用真空熔炼的镍基合金是 IN100、Mar-M200、Rene41、Inco713C、Inco718C、G74、Udimet500、Udimet700 及 Nicrotung。另外，用于真空熔炼的钴基合金是 Mar-M302、Mar-M322(Mar-M302 的改良型)。表 7-24 所示为飞机燃气透平零件的合金。

表 7-24 飞机燃气透平零件用合金

材料种类		性 状	AMS 规格	合金名	化学成分(%)	零件名称
镁合金		铸 造	4418	QE22A	6.5Al-1Zn- 0.15Mn,余镁	齿轮箱
铝合金		板	4160	6061(61S)	2.5Cu-0.6Si- 1Mg-0.25Cr,余铝	低压压缩机静翼, 风机排气导管
钛合金		锻 造	4928	6Al-4V	6Al-4V,余钛	低压压缩机动静 翼, 风机圆盘
		锻 造	4966	A-110	5Al-2.5Sn,余钛	风机箱, 低压压 缩机箱
不 锈 钢	马 氏 体	锻 造	5613	AISI410	12.5Cr-0.15C,余铁	高压压缩机动静 翼, 箱体
		锻 造	5646	Greek Ascoly	13Cr-2Ni-0.17C-3.0W, 余铁	同上
	奥氏 体	锻 造	5646	AISI347	18Cr-10.5Ni- 1(Nb+Ta),余铁	燃料喷嘴, 管件, 安全线
	析出 硬化	锻 造	5644	17-7PH	17Cr-7Ni-1Al,余铁	排气喷嘴, 反推力装置
低 合 金 钢		锻 造	6304	17-22A	0.45C-0.95Cr-0.55Mo- 0.3V,余铁	低压透平轴, 高 压压缩机盘
		锻 造	6260	9310	0.1C-1.2Cr-0.12Mo- 3.25Ni,余铁	附件, 驱动齿轮
		锻 造	6490	M-50	0.81C-4Cr-4.25Mo-1V, 余铁	滚柱轴承, 滚珠轴承
耐 热 合 金	铁基	锻 造	5735	A-286	15Cr-26Ni-1.3Mo- 2.1Ti-0.3V-1.5Mn- 0.7Si,余铁	低压透平盘, 箱 体
		锻 造	5660	Incoloy901	12.5Cr-0.1C-42.5Ni- 2.6Ti-6Mo-2Mn-0.6Si- 1Co,余铁	高压透平轴, 低压透平盘
	镍基	锻 造	5707	Waspaloy	19.5Cr-13.5Co-0.08C- 3Ti-1.4Al-4Mo,余镍	低、高压透平盘
		板	5865	TD Nickel	2.0ThO ₂ , 余镍	燃烧器

(续)

材料种类		性 状	AMS 规格	合金名	化学成分(%)	零件名称
耐 热 合 金	镍基	锻 造	5662	Inconel718	19Cr-0.1C-18Fe- 0.9Ti-0.6Al-3Mo- 5.2(Nb+Ta), 余镍	喉管箱 燃烧室箱
						板
		铸 造	5391	Inconel713C	13Cr-4.5Mo-0.75Ti -6Al, 余镍	低压透平动静翼
		铸 造	—	B1900	8Cr-10Co-1Ti-6Al- 6Mo, 余镍	高压透平动翼
		铸 造	—	MAR-M200+Hf	9Cr-10Co-2Ti-5Al- 0.14C-12.5W-1Nb- 2Hf, 余镍	同上(定向凝固)
		铸 造	—	Udimet 700	15Cr-18.5Co- 0.07C-3.3Ti-4.3Al- 5Mo, 余镍	高压透平动静翼
	钴基	铸 造	5382	Stellite 31	25.5Cr-10.5Ni- 0.5C-7.5W, 余钴	低压动静翼
	铸 造	—	W1-52	21Cr-0.45C-1.75Fe -11W, 余钴	高压静翼	

注: AMS 规格由美国汽车技术协会 (SAE) 的航空部制定, 广泛适用于以美空军为首的各种宇航材料, 特别是耐热合金和钛合金。

7.4.2 真空熔炼用合金的晶粒细化处理和定向凝固组织的形成

将钴化物加入到面层涂料中可以使钴基合金和镍基合金晶粒细化。一般用的是氧化钴。在涂料中加入硅溶胶量的 0.5%~4% 的氧化钴可以获得细化效果。另外加入 1%~20% 的硅酸钴, 加入 1%~10% 的铝酸钴也有细化效果。

表 7-25 IN-738 和 Rene95 的 HIP 处理条件

合 金	温度 (°C)	压力 (MPa)
IN-738	1180	100
Rene95	1120	100

在真空熔炼浇注装置上安装上计算机, 严格控制铸型升降机的升降速度和浇注速度、真空度能够形成定向凝固组织。与真空熔炼浇注装置相连接的真空泵只要稍有一点振动就可妨碍合金凝固时形成定向凝固组织。影响定向凝固组织形成的主要因素有: 铸型预热温度, 铸型保温方法, 浇注温度, 铸造时的环境气氛以及浇注后的冷却方法等。铸造时铸型的环境气氛和冷却速度都会影响显微缩松的形成和数量, 采用 HIP 热等静压加压处理可以消除这些缩松缺陷。HIP 是在氩气气氛下对铸

件进行高温加压处理，由于高温、高压的双重效果使得合金晶粒塑性变形而密合疏松，并因原子扩散而获得致密组织。表 7-25 所示为 IN-738 和 Rene95 合金的 HIP 处理条件。

7.5 钛合金熔炼

钛合金精密铸造是处于技术前沿的先进技术，目前已经开始在航空航天相关领域、医疗相关领域、原子能领域及石油化工领域得到广泛应用。钛的机械强度比不锈钢高，密度仅为 4.5g/cm^3 ，其物理特性无其它材料可以相比。

表 7-26 钛合金材料

钛合金	化学成分 (%)							力学性能		
	N ₂	C	H ₂	Fe	O ₂	Al	其它	抗拉强度	延伸率	硬度
Ti-6Al-4V	0.05	0.10	0.015	0.40	0.25	5.5 ~ 6.75	V:3.5 ~ 4.5	910MPa	10%	365HB
Ti-5Al-2.5Sn	0.05	0.10	0.015	0.50	0.20	4.0 ~ 6.0	Sn:2 ~ 3	800MPa	8%	335HB

注：上述为美国 ASTM B367 规格

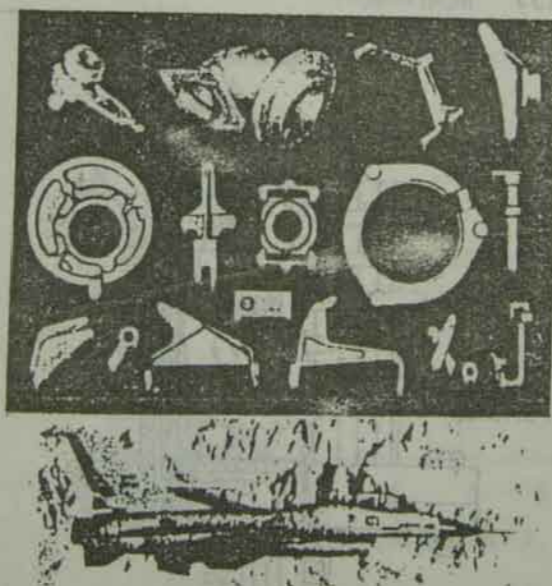


图 7-28 F100 战斗机用钛合金精铸件

表 7-26 所示为钛合金精铸件用得最多的材料规格。其中 Ti-6Al-4V 合金即众所周知的 Ti6-4，由于它具有优良的耐蚀性、重量轻而用作外科人工骨骼。此合金与人体组织不产生反应，耐蚀性好，延伸率可达到 10%，强度可以保证达到大于 ASTM 医疗器械基准的 65000psi 的要求。这种精铸件不允许有伤痕和表面缺陷及内部细微疏松。另外 F100 战斗机的发动机的喷嘴整流子片铰链、轴承座、轴承盖、轴承保

持架等也采用 Ti6-4。图 7-28 所示为 F100 战斗机用钛合金精铸件。

表 7-27 钛合金熔炼方法及其特点

熔炼方法	特 点	
	优 点	缺 点
真空感应熔炼	(1) 成分蒸发损失少; (2) 设备费小; (3) 维护管理容易; (4) 能熔炼废料; (5) 熔炼效率高	难以熔炼活性金属
真空电弧炉熔炼	(1) 成分蒸发损失少; (2) 维修费低; (3) 设备费中等	难过热熔炼
电子束熔炼	(1) 由于是高真空,所以能 高纯度熔炼; (2) 能熔炼废料; (3) 能过热熔炼	(1) Cr、Mn 有蒸发损失; (2) 设备费高, 保养、维修费高
等离子熔炼法	(1) 成分蒸发损失少; (2) 可过热熔炼; (3) 能熔炼废料	熔炼效率低

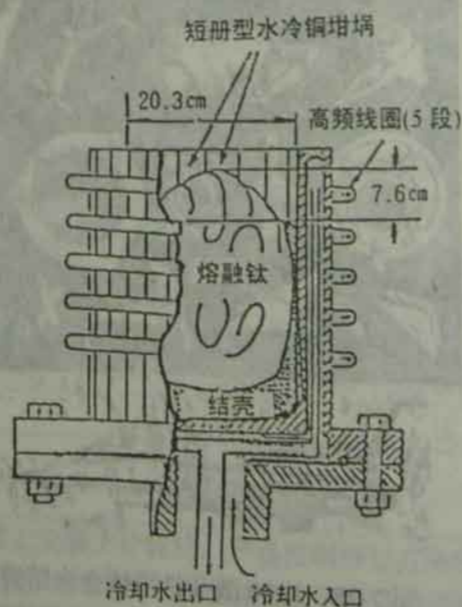


图 7-29 感应结壳炉熔炼法

目前钛合金采用的熔炼方法有: 真空感应熔炼法、真空电弧熔炼法、电子束熔炼法、等离子熔炼法等。表 7-27 所示为这些熔炼法的特点。特别是其中的电子束熔炼法, 由于其能在高真空中集中熔炼因此能完全除去液面的气体。一般是在 10^{-4} ~

10^5 托的真空下进行熔炼操作, 150~200kW 的电子枪的钛合金电极由升降装置自动操作向熔炼坩埚供给。浇注时回转坩埚进行浇注。

钛合金的突出问题是钛合金液与铸型材料会发生反应, 即使是高纯度的氧化铝和锆石耐火物也容易和它发生化学反应而产生气孔、表面粗糙。为了防止反应, 铸型材料应采用炭质材料、钨类材料及氮化物类、硼化物类非氧化性耐火材料。

最经济的熔炼方法是感应结壳炉熔炼。它采用水冷铜坩埚, 熔炼时形成一薄层结壳, 除了能得到液体合金扩散效果外, 使用铜坩埚在熔炼中极少污染。图 7-29 所示为感应结壳炉熔炼法示意图。

7.6 精密铸造浇注作业和浇注方法

陶瓷型壳薄, 而且精铸件的壁厚薄、形状复杂, 所以型壳焙烧出炉后必须很快浇注。型壳在保持所定温度条件下, 并在保证合金液浇注温度情况下进行浇注。

现在大多采用大气高频感应熔炼浇包浇注的方法。一般浇包容量为 50~100 kg。合金液进入浇包后温度将明显降低。图 7-30 所示为出炉后合金液的温度下降和浇注时温度下降的情况。铸钢和耐热合金浇注时的型壳温度大约为 800~1050℃。铝合金和铜合金浇注时的型壳温度为 250~700℃。由于陶瓷型壳降温激烈, 所以容易产生浇不足、冷隔等缺陷。为了防止浇注时型壳温度的降低, 可以采用在焙烧台车上浇注, 也可采用热装干背砂和减压铸造方法。

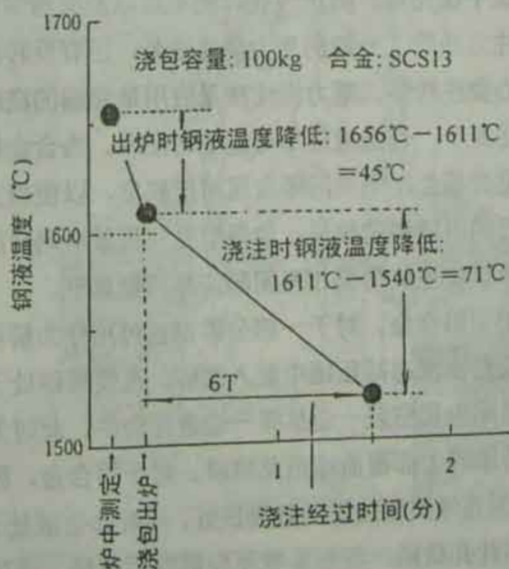
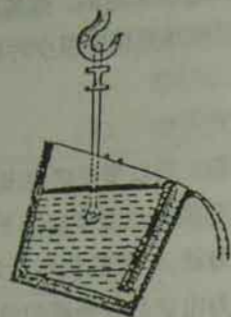


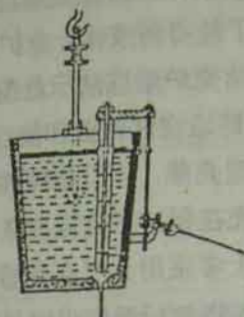
图 7-30 出炉过程和浇注过程的合金液温度降低

图 7-30 所示结果表明, 合金液进入浇包后大约降温 40~50℃, 夏季大约降 40℃, 冬季大约降 50℃。浇包在 800℃焙烧后内部应保持在红热状态。浇包的形状应有利于挡渣, 可以做成茶壶状。

精密铸造浇包的形状常用敞开型、茶壶型和底注型三种。特别是茶壶型应用最普遍。必须尽可能防止因浇包而产生夹杂，底注型浇包可以保持浇注的合金液清洁干净。浇包用炉衬必须选择合适的耐火材料。从耐火度角度考虑，浇包的炉衬应该使用氧化铝系耐火材料及氧化铝系的尖晶石。高铬耐热钢的浇包应选用锆英石系耐火材料为炉衬。



茶壶型浇包



底注型浇包

图 7-31 精密铸造用浇包

精密铸造常采用由熔炼炉直接向铸型浇注的直接浇注方式，此时应注意完全扒除熔炉的熔渣。直接浇注法的优点是：(1) 不需将合金液注入浇包，所以不会降低合金液的温度。(2) 不存在浇包耐火材料形成熔渣问题。(3) 由于浇注时型壳倾斜，所以有利于浇注流平稳充填，防止气孔、浇不足以及夹渣等缺陷。

精密铸造浇注方法除了一般的重力浇注法外，还有反转浇注法、反转加压浇注法、吸注法及离心浇注法等。重力浇注法是应用最普遍的浇注法。重力浇注时浇包和铸型的落差应尽量小，合金液应尽可能平稳注入。当合金材料的流动性小时，浇注应尽量快速，型壳相互之间的间隔应尽可能狭窄，以便极力保持型壳不易冷却。但是对流动性较好的不锈钢则相反，如果型壳间隔过窄则会产生热黑斑，壁厚的部分表面会粗化，所以浇注时型壳相互间隔应尽可能地开。

吸注法主要用于铝合金。对于一部分铸钢也可用作解决浇不足的措施之一。铸钢用的吸注装置是在流态减压罐中装入细砂，在使细砂处于流态时装进焙烧后的型壳，静置后从罐底由真空泵一边抽吸一边进行浇注。此时为了保持高真空度，可在浇口部位旁边的罐的上部覆盖维尼龙薄膜。对于铝合金，因其比重较小，所以采用图 7-32 所示的型壳倾斜浇注法的效果很好，此时合金液处于层流状态浇注，大大有利于解决气孔和针孔缺陷，特别是壁厚极薄的铝铸件，采用这种型壳倾斜浇注法的反转真空浇注装置的效果特别明显。

除了以上这些浇注法外还有 CLA 法和 CLV 法。这两种方法是将合金液底注上吸进入型腔的浇注方法。图 7-33 所示为 CLA 法。此法中铸型的浇口向下，浇口的前端从容器中露出，浇口插入合金液中，由真空泵使容器减压，合金液吸入铸型，型腔被合金液充填，凝固以后容器回复到大气状态，浇注系统的未凝固金属液回到熔炼炉。10 kg 的合金液吸入型腔大约需 1~2 分钟。此时的减压程度为 300~370mm

垂直。10~20秒后容器回到大气状态，剩余的合金液回到熔炼炉中。此法可以浇注壁厚0.3mm的薄壁件。

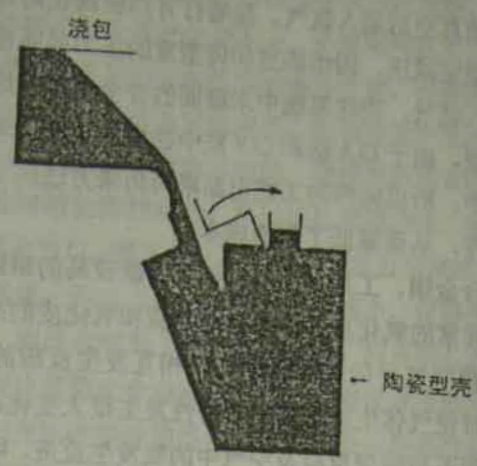


图 7-32 型壳倾斜重力浇注法



铸型压入合金液后负压吸注，使得型腔细微部充填良好

图 7-33 CLA法浇注原理简图

CLV法的熔炼浇注装置分为三个室：上侧的铸型室，中间室和下侧的熔炼室。中间室处于铸型室和熔炼室之间，熔炼室通常与大气隔断，因此它和中间室之间设

有挡板阀。首先在真空中熔炼，熔炼完成后闭合挡板阀，熔炼室中通入氩气，然后铸型室中放入铸型，此时铸型的浇口下垂伸向中间室，在铸型室和中间室抽真空后通入氩气。接着打开挡板阀使熔炼炉上伸，铸型的浇口浸入合金液中。铸型室减压，因熔炼室和铸型室的压力差而使合金液吸入型腔。铸件凝固后铸型室通入氩气，浇注系统中未凝固的合金液返回熔炉。然后闭合挡板阀，从铸型室取出铸型。由于CLA法和CLV法中在铸件凝固后未凝固的浇口、浇道部分的合金液返回熔炉，所以铸件的工艺出品率为历来方法的2倍以上。而且不需从铸件组上切割下铸件，从而减低了制造成本。

碳钢、合金钢、工具钢及轴承钢等含碳较高的钢铸造时表面容易出现脱碳，而且容易产生异常的氧化皮。这种表面脱碳和氧化皮的产生是由于碳的激烈扩散和热力学活性使得空气中的氧和铸型材料相互发生反应的结果。特别是铸型成分中的 SiO_2 在高温时使气体生成物的扩散特性发生很大变化，助长了铸件表面脱碳。为了使合金中的碳不与铸型材料及空气中的氧发生反应，可以采用图7-34所示方法，将丙烷气或丁烷气等碳化氢气体引入高温铸型充填区内，分解形成了高温炭，这个高温炭完全阻止了合金中的碳与空气中的氧及铸型材料发生作用。另外浇注后加上蜡片等燃烧物质，然后用罩箱将整个铸型扣罩起来密闭，使铸件在凝固时保持无氧化气氛，也能防止脱碳。这种扣罩法是将铸型放在铺有4#、5#砂的浇注台车上，浇注后在浇口上放上30~50g的蜡片或其它易燃烧性物质，然后立即加罩箱扣盖住。扣盖时应尽可能使铸型与大气隔开。由于加在浇口上的蜡燃烧，夺去了罩箱内的氧，不久箱内压力上升，其中未完全燃烧的气体通过铸型到达铸件表面，使铸件在还原性气氛中凝固，在这种气氛中继续保持5~10分钟。



图7-34 防止浇注时脱碳的高温炭效果

另外，马氏体不锈钢410和420及析出硬化钢17-4等合金容易在凝固时产生点蚀斑缺陷。所谓点蚀是指在铸件表面上出现的呈黑色麻点状的很浅的凹坑，此凹坑几乎在所有场合都呈圆形分散分布，采用喷丸处理去除黑色部分后还会有残痕凹陷，此凹陷的深度大约为20~100 μm ，对于容易发生点蚀的铬当量为5%~15%的合金，其壁厚较厚处的点蚀凹坑程度较深。点蚀产生的主要原因是铸型内部的空气和外部空气通过铸型进入，引起铸件表面氧化。如果浇注后铸件表面不氧化就能防止这种缺陷。所以在大气下浇注时应在无氧化气氛中凝固冷却，采用上述的浇注后加罩箱扣盖处理或在铸型的中间层使用含碳物质，浇注后保持还原性气氛就可防止点蚀缺陷的产生。

实际上浇注操作对精铸件的质量影响很大。一般说不论是哪种合金，合金的流动不是层流就是紊流，而在紊流强时就容易出现涡流。通常精密铸造用的铸型的透气性比较差，所以浇注速度的大小应根据铸件的具体情况进行调整。

合金液在型腔内的流动状态对会否产生浇不足、冷隔和气孔及针孔缺陷影响很大。图 7-35a 所示为大型精铸件常见的方向性凝固浇注方案。合金液呈不规则流动时有时会出现逆流，特别是在浇口附近会发生涡流，因而常常产生冷隔、气孔，此时所看到的冷隔的特征是铸件的棱角部位出现棱线，棱线的两端有清楚的高度差。克服这种缺陷的措施是浇注时避免激烈注入，尽可能地缓慢浇注，另外在浇口部设置大的圆角，铸件上应设置出气口。图 7-35 中 b，从 A 和 B 方向浇注都会产生回流，必然在孔的背后容易出现涡流，同时合金液的流动动能减小，使得孔的上部轮廓下垂和产生冷隔或产生气孔。因此此时为了防止涡流产生，应采用 C 方向浇注方案。

当铸件壁厚较薄时，应注意防止合金液降温过大，应使合金液通过型腔的距离尽量小。由于精密铸造的型壳比砂型时薄得多，所以合金液容易冷却，也容易产生冷隔和浇不足缺陷，因此浇注速度应尽可能地快。

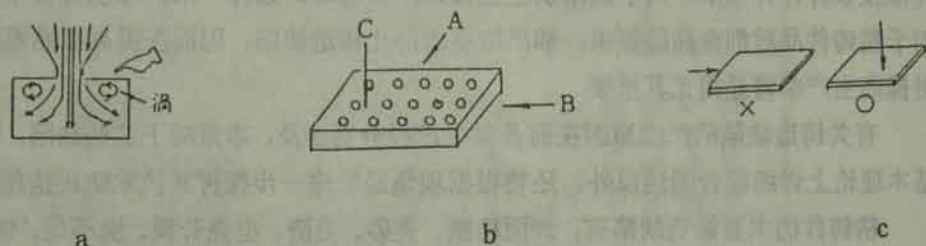


图 7-35 浇注条件和金属流的流动

- a— 大型精铸件的直接浇注 b— 浇注方向和回流
c— 解决薄壁件和细小件浇不足的浇口位置

精铸件的使用领域正在越来越广泛,除一般产业机械零件为主以外,已扩大到汽车工业、电子电气、通讯机械、办公自动化、计测机械、医疗器械以及宇航等相关零件。这些领域的零件有高的质量要求。在一般的产业机械零件中,精密铸造作为毛坯工业中的代表性制造技术特别受人注目。与毛坯加工的其他加工方法:机械加工、粉末冶金、压铸、锻造、压射成形粉末冶金、复合加压铸造、压力加工等相比较,精密铸造的最大优点是(1)零件形状可极度复杂;(2)能适用于各种合金材料。汽车工业零件的品质要求基准非常严,外观精度、内部缺陷、力学性能要求非常严格,可以说是按陆地行走的飞机来极严格地要求其品质和精度。另外对于电子电气和通讯机械及办公自动化机械的相关零件还要求其电气特性和电波特性或磁特性。同时这些领域的制品还要求小而轻巧,加上铸件形状复杂、铸件壁厚差大,使得铸造的难度越来越大。特别是这些领域的铝合金铸件的需求量大,整体功能要求及大型化、薄壁化,导致重量更轻。在计测机械和医疗器械相关零件的防锈措施中是不允许有极少的针孔的,这些领域的制品几乎全需研磨抛光处理。而航空航天是精铸件品质要求最严最高的领域,全部要求按 MIL 标准处理,并合并 ASTM 和 FED 标准及以样件为基准。对于民用航空也按此严格管理。这样一来,可以说各个领域对于精铸件品质都有高的要求,都严格要求防止铸造缺陷,因而在提高良品率的同时提高生产率将显得尤其重要。

有关铸造缺陷的产生原因在前各章中已经分别涉及,本章对于这些缺陷,除在基本理论上详细综合阐述以外,还将根据现场经验进一步探讨其技术防止措施。

精铸件的主要铸造缺陷有:表面粗糙、夹砂、夹渣、型壳开裂、浇不足、针孔、气孔、气泡豆、粘结剂渗透、冷隔、漏钢、缩孔、黑斑、因残蜡引起的碳污、尺寸超差、变形、重量超差等等。这些缺陷几乎都与型壳有关,可以说型壳制造技术是决定精铸件品质的关键。此外这些铸造缺陷还与整个精铸生产过程相关。以下将分别探讨这些缺陷的相关要素,以有助于防止这些缺陷的产生。

8.1 铸造缺陷及其改进措施

表 8-1 所示为精铸件主要缺陷及其相关工序要素。压型制造主要以浇注系统方案为准,同时应严格保证压型的尺寸精度。压型型腔的工作表面必须进行规定的表面研磨。并保证分型面和型块分割的精度。

蜡模制造时应选择成型性好的蜡料(无变形和脱模性好)。同时蜡料应含灰分、水分少,熔点和粘性低。另外蜡模生产率高、尺寸精度高。

蜡模组装时在充分考虑了制壳成形、脱蜡和加工性的基础上选定方向性凝固或者底注方案。模组在保证牢固的基础上尽量大些。底注方案可以保证金属液充填呈层流状态而有利于获得高品质铸件,有效防止夹砂、夹渣和气孔缺陷。底注方案不仅对于铝合金和铜合金,对于钢铁类精铸件也非常有效。在铸造方案上可设置排气孔以有效防止针孔和气孔。从经济角度考虑,模组尽可能大型化。蜡模和浇注系统焊接不密合是产生夹砂的主要原因之一。目前已有将蜡模和浇注系统在压型中一次

表 8-1 精铸件主要铸造缺陷及其相关工序要素

铸造缺陷	相 关 工 序 及 要 素								
	压型制造	蜡模成形	模组装配	制壳	脱蜡	焙烧	熔炼	浇注	后加工
表面粗糙	分型面，表面粗糙度，型腔面研磨	压蜡条件，内浇道方案，蜡模表面粗糙度，蜡料选择，蜡料熟成		型壳干燥，粘剂选定，面层涂料，面层撒砂，洗净液前处理	脱蜡方案，型内残蜡	型内残蜡，炉内气氛，焙烧温度和时间内，炉内温度分布，二次焙烧	成分配比	浇注温度和时间，浇注气氛，浇注间隔，冷却速度	抛丸喷砂材料及时，氢氧化钠处理，搬运
夹砂、夹杂	合型精度	出现飞边，蜡料中灰分	焊接不良，浇注系统	型壳干燥，涂胶凝化，面层系统，搭桥缺陷，面层撒砂，面层涂料有杂物，型壳破损	蜡中有杂物，脱蜡时型壳开裂	炉内有杂物，焙烧后水洗	熔炼温度，表层脱离，炉渣除净剂，炉衬材料	浇注方式，浇包形式和材料，浇注温度，底注，静流紊流	
型壳开裂		蜡料膨胀，内浇道截面积，内浇道位置，蜡的粘性 and 熔点	脱蜡性，模组方案平衡	型壳干燥，涂壳系统，制壳室透气调，面层选择性、粘剂选定	脱蜡条蜡件，脱蜡顺序，脱蜡(升温，升压)速度			型壳温度，浇注温度，冷却速度	

(续)

铸造缺陷	相 关 工 序 及 要 素							后加工
	压型制造	蜡模成形	模组装配	制壳	脱蜡	焙烧	熔炼	
浇不足 ⊖	压型透气	内浇道截面面积, 内浇道位置	组装方案, 组装空间, 浇口杯形状	透气性, 面层涂砂粒粘附度, 型壳系统, 型壳保温	型壳	焙烧温度, 焙烧时间, 炉内温度分布	熔炼 除气脱氧剂, 成分配比	浇注 浇注温度, 浇注速度, 型壳温度, 层流浇注, 浇包脱氧, 型壳保温, 真空减压浇注
针孔 ⊖			组装方案, 内浇道形状	透气性, 型内水分	型内残蜡	焙烧温度, 焙烧时间	熔炼温度, 料锭前处理, 除气脱氧剂选定, 除气脱氧顺序, 回炉料分析与配比, 高频快速熔炼	浇注 浇注温度, 浇注速度, 浇包脱氧, 型壳倾斜浇注, 层流浇注, 浇注落差
气孔 ⊖		内浇道截面面积, 内浇道方案	底注方案, 浇注系统, 内浇道形状	透气性, 型内水分	型内残蜡	焙烧温度和时间	成分配比 (Mn/Si 比)	浇注温度, 浇注速度, 浇包脱氧, 型壳倾斜浇注, 浇注落差, 层流浇注
缩孔 (松) ⊖		内浇道大小, 内浇道位置	组装方案, 补缩效果	型壳保温, 型壳厚度			熔炼温度, 除气脱氧条件, 成分配比	浇注温度, 浇注速度, 型壳温度, 浇包脱氧, 冷却速度, 补给金属液

(续)

铸造缺陷	相关工序及要素								
	压型制造	蜡模成形	模组装配	制壳	脱蜡	焙烧	熔炼	浇注	后加工
气泡豆 ⊕		蜡的表面积活性	组方案, 蜡模间隔	洗净效果, 前处理, 面层涂料涂覆, 真空减压涂料罐, 面层涂料粘度, 面层涂料中气泡					
粘结剂穿透 ⊕				面层干燥, 制壳室空调					
鼓胀 ⊕			组方案 (蜡模间隔)	型壳干燥, 搭桥缺陷, 面层涂料粘度, 面层撒砂, 型壳层数, 型壳耐火度, 面层气泡		焙烧温度		浇注温度, 型壳温度, 冷却速度	
漏钢 ⊕			组方案 (蜡模间隔)	型壳干燥, 搭桥缺陷, 型壳层数, 型壳厚度不均匀		焙烧破损		浇注温度, 浇注速度, 型壳温度, 冷却速度	
尺寸超差 ⊕ ⊖	压型尺寸精度, 分型面伤痕	选的压蜡条件 (蜡温), 夹具管理, 压型夹紧力	组方案	制壳材料		焙烧条件		浇注温度, 型壳温度, 补缩	

(续)

		相 关 工 序 及 要 素							
铸造缺陷	压型制造	蜡模成形	模组装配	制壳	脱蜡	焙烧	熔炼	浇注	后加工
		蜡的粘性, 蜡的熔点	组装方案	透气性	型内残存蜡, 脱蜡条件, 脱蜡速度	焙烧温度, 焙烧时间, 二次焙烧, 炉内气氛, 炉内温度分布	焙烧条件	烧注温度, 型壳温度, 冷却速度	
碳污 ⊖									
变形 ⊕ ⊖	压型精度, 合型度	蜡的选定, 压蜡条件, 压蜡机的型板保管, 夹具管理, 内浇道方案	组装方案	型壳强度, 型壳层数, 型壳耐火度, 型壳材料		焙烧条件		烧注温度, 型壳温度, 冷却速度	高压水喷射
重量超差 ⊕ ⊖	压型尺寸精度, 分型面伤痕	压蜡机功能, 压蜡条件, 蜡模重量管理, 压型夹压力				焙烧条件		烧注温度, 型壳温度, 冷却速度	
点蚀黑斑 ⊖			组装方案	型壳材料选定, 透气性, 加入还原剂及其配比		焙烧温度	成分配比	烧注凝固气氛, 型壳温度, 烧注冷却速度	

注: ⊕ 为凸缺陷或正侧缺陷, ⊖ 为凹缺陷或负侧缺陷。

成型制造蜡模浇套的工艺。

制壳是决定精铸件品质的关键。为了获得优质的型壳，至少要做到：(1) 涂料粘度不要太高，合适的粘度能获得均匀的涂膜；(2) 浮砂要除去，撒砂要均匀；(3) 各层的干燥均匀适当；(4) 型壳系统构成合理；(5) 合适的涂料料浆管理。

脱蜡操作应尽可能地迅速。脱蜡初期升压要快，脱蜡终止泄压要慢。型壳内的蜡尽可能完全脱出，为此组装方案可采用空心浇道，设置辅助脱蜡系统。

焙烧对铸件表面粗糙、夹砂、浇不足等铸造缺陷有很大影响。型壳内的残蜡和浸渗入型壳的蜡未完全焙烧去除时，型腔内表面会残留黑渣而导致铸件表面粗糙。焙烧温度，对钢铁为 $1000\sim 1050^{\circ}\text{C}$ ，对铝合金如在一次烧成为 1000°C 。因粘结剂中的结晶水（本质为硅醇基： $\text{Si}-\text{OH}$ ）需焙烧去除，同时需保证型壳的高温强度。保证炉内气氛为富氧状态，以便在 1000°C 焙烧时型壳内的残蜡能完全去除。

熔炼时应使用合适的脱氧剂和除氢剂。应不得超过规定的熔炼温度。熔炼温度越高，金属液吸气越严重。快速熔炼可以使金属液中吸气控制在最小量。

最好的浇注方式是炉前直接浇注。钢铁类铸件最好使用茶壶浇包。对于铝合金采用特制的底注浇包能得到很好效果。浇注时的型壳温度与浇注温度有密切的依存关系。型壳温度和浇注温度不相适应时容易产生铸件表面粗糙、浇不足等缺陷。浇注时在型壳倾斜情况下迅速浇注能防止因卷入空气而导致的气孔、针孔。另外浇注时的气氛对铸件表面粗糙度及麻点状黑斑有重要的影响。

后处理加工时应正确选定研磨材料。抛丸时间过长会导致铸件表面明显粗化。

8.2 压型制造和蜡模成形的相关要素

压型制造是影响精铸件外观精度、尺寸精度及重量精度的关键因素，同时也决定了蜡模的生产率。一般产业机械零件的蜡模表面粗糙度应满足 $R_{\text{max}} 12\sim 15\mu\text{m}$ ，航空航天相关零件的蜡模表面应满足 $R_{\text{max}} 2\sim 6\mu\text{m}$ 。图 8-1 所示为这两种蜡模表面的比较照片。

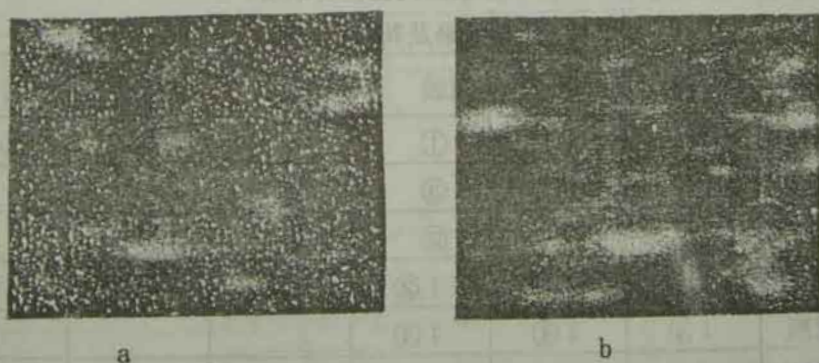


图 8-1 蜡模表面粗糙度的比较 ($\times 100$)

a— 一般产业机械零件的蜡模表面

b— 航空航天相关零件的蜡模表面

薄壁件和细长的大件，由于压射温度和压射压力高，因而压型分型面处容易产生飞边，所以压型分型面的精度要高，而且压型必须牢固地夹紧。在使用水溶性蜡芯和陶瓷型芯时，对于薄壁细长件，镶入蜡模成形的型芯常常出现破损，特别是航空发动机的空冷式复杂叶片，由于其型芯的形状复杂而易破损，因此需采取图 8-2 所示的防止破损措施。图 8-2 方案 a 有两个注入口时在蜡芯的汇合部易产生流线，因此在主型蜡模压射时蜡芯容易断裂。类似的蜡芯最好采用单个蜡料注入口。注入方向的直径一般为 8~10mm。图 8-2 方案 b，当 $H_0 > H$ 时，为了防止蜡芯开裂，射入方向应取 H_0 方向，并采用单个注入口。方案 b 的蜡芯垂直方向部位的强度高，而水平方向的强度较低。

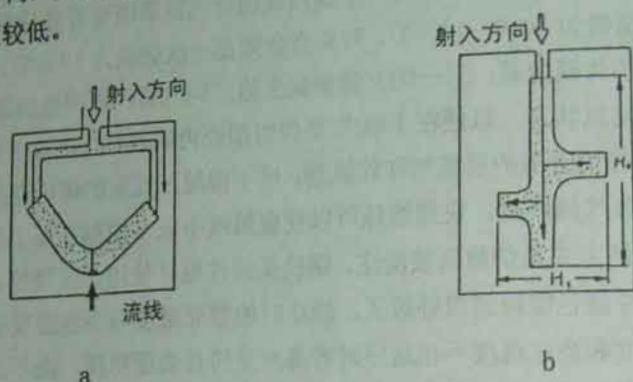


图 8-2 使用水溶性蜡芯的压型方案

为了改善金属液的充填、防止浇不足，铸件上的锐角部和针状的锋利前端部应预先在压型制作时设置称为“泪”的补贴。这种措施在工业缝纫机的百叶板和齿轮铸件上经常采用。

表 8-2 所示为蜡模成形时的缺陷防止措施。蜡模成形的主要缺陷有蜡料充填时的浇不足、表面粗糙、卷入气泡、流线、飞边、变形、尺寸超差等。其中流线是因熔融蜡料注入压型型腔后分流成两股，最后在某处汇合，而在汇合处出现凹痕缺陷。此种缺陷较浅时允许修补，但如缺陷较深则往往会断裂。

表 8-2 蜡模缺陷及其防止措施

成形条件	浇不足	表面粗糙	流线	气泡	缩凹	飞边
压射压力	↑②	↑①	↑①		↑①	↓②
压射速度	↓②	↑②	↑③	↓②		
压射温度	↑①	↑③	↑②	↓①	↓②	↓①
喷嘴温度	↑②	↑③	↑②	↓②	↓②	↓①
分型剂	↓④	↓④	↓④			
压射时间	↑③					
冷却时间					↑①	
空气抽拔	↑②		↑④	↑③	↑③	

注：表中数字为防止措施优先顺序。

蜡模成形的压射要素，压射压力和压射温度应经常调整控制。但是对于成形起重要作用的压射速度的调整控制的重要性还没有广泛引起重视，具有调整压射速度功能的压蜡机还没有普及。实际上调整压射速度能非常有效地防止充填不良、卷入气泡、流线等蜡模缺陷。

蜡模表面的粗糙程度将会原样反映到精铸上，因此模料的选定非常重要。近年来为了提高蜡模的成形性和生产率已广泛采用了填料蜡。填料蜡比非填料蜡的收缩率小，尺寸精度稳定，而且成形后的变形显著减小，生产效率极高。蜡模的表面粗糙度与蜡料的熟成调质处理方法密切相关。图 8-3 所示为熟成调质的改进方法。目前一般的熟成调质方法为直接或间接加热到 120~130℃ 熔化，在规定的温度下（一般为 60℃ 左右）搅拌混和一定时间，然后供实际压蜡使用。而新的熟成调质方法为急冷熟成调质法，此法为按一般方法熔化后的蜡料放入卡盘罐或混料装置中，将蜡料急冷至室温或低于室温，之后在规定温度和时间下混和，然后再供压蜡使用。采用急冷化处理的蜡料压制的蜡模表面明显的致密化，表面光滑美丽。其原因可能与金属学中快速冷却凝固后的金属晶粒组织细化相类似。



图 8-3 蜡料急冷熟成调质处理法



图 8-4 蜡的再生过程

①—单纯再生 ②—调整再生

蜡模产生飞边不仅降低了生产效率，影响铸件尺寸精度和重量精度，而且明显损伤了铸件的外观。蜡模飞边的产生除与压型的夹紧压力不足有关外，还与压型分型面上的伤痕或分型面上沾附了某种杂物有关。一般产品所用的蜡料往往是新蜡，由于新蜡中所含灰分小于 0.05%，所以夹杂缺陷几乎不会发生。但是如果采用再生蜡，由于其中含有较多的灰分，因而容易产生夹杂缺陷。最近为了有效去除蜡料中的灰分，开发了加压过滤法，采用此法过滤后的再生蜡可以调整到 0.02%~0.03%。而一般沉淀法处理的再生蜡的灰分限度为 0.5%，因此直接用于制造蜡模在品质上非常危险。图 8-4 所示为蜡料再生过程。表 8-3 所示为再生蜡的性能。蜡的再生过程有仅除去水分和灰分的单纯再生法和将单纯再生后物性值近似新蜡的再生蜡再配以新蜡后的配合再生蜡，实际使用的是这种配合再生蜡。

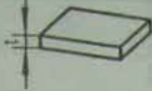






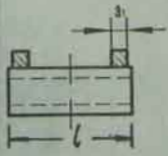

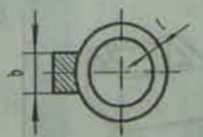

表 8-3 再生蜡的配比与性能 (填料蜡)

蜡的配比	软化点 (°C)	针入度	粘度 (cps)	弯曲强度 (Mpa)	灰分 (%)	水分 (%)	收缩率 (%)	缩凹 (mm)
新蜡	70	2	430	5.9	0.03	0.03	0.95	0.19
再生蜡	69	3	420	5.9	0.03	0.03	0.94	0.2
脱蜡后	—	—	—	—	0.18	22.0	—	—
新蜡 10: 再生蜡 90	69	3	420	5.2	0.03	0.03	0.95	0.21
新蜡 20: 再生蜡 80	69	2	425	5.9	0.03	0.03	0.94	0.15
新蜡 30: 再生蜡 70	69	2	430	5.9	0.03	0.03	0.93	0.14
新蜡 50: 再生蜡 50	69	2	430	6.0	0.03	0.03	0.94	0.14

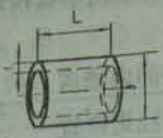


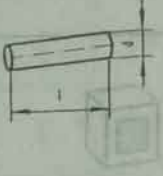




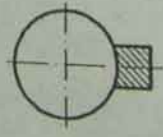
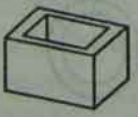
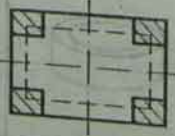
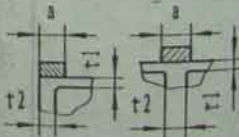
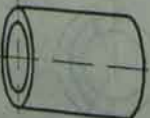

脱蜡时常常会因蜡料膨胀导致型壳开裂，因此应尽可能选用热膨胀系数小的蜡料，而且浇注系统的用蜡应尽量使用熔点更低、热膨胀系数更小的蜡料。为了提高脱蜡速度，浇注系统尽量采用空心浇道。选择在同等脱蜡温度下粘度低的蜡料能大大改善其脱蜡性，低粘度蜡可以提高脱蜡速度而不易引起型壳开裂，而且可减少型壳内残留蜡料，防止因碳污造成铸件表面粗糙。铸件内浇道的面积对脱蜡时型壳开裂、浇不足以及气孔都有很大影响。蜡模组装时各铸件内浇道断面积之和如果大于横浇道的断面积则将导致金属液难以均等注入铸件而引起充填不良。如果铸件和内浇道的接合部为直角，则内浇道附近会出现紊流，因而容易产生气孔和较大的针孔。因此此接合部必须作成圆角或倒角，特别对于厚壁铸件和大铸件此种措施对减少气孔

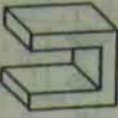
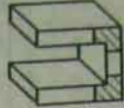
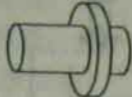
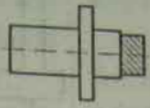
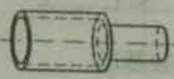
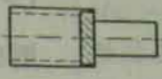
的效果很明显。一般说内浇道设在铸件壁厚厚大部位。对于壁厚差大的部位需设置辅助内浇道以防止产生缩孔。表 8-4 所示为各种不同形状精铸件所使用的内浇道位置及大小。

表 8-4 不同形状精铸件的內浇道

立体形状类别	铸件简图	內浇道位置	特记事项
板状及块状	板状	$t < 2$ 	 $a = 2.8t$
		$t > 2$ 	內浇道与铸件上下端面间各留出 0.5mm, $a = 1.9t$
	块状		$S_c = (4 \sim 9) S_{c_0}$ S_c —铸件截面积, S_{c_0} —內浇道截面积
管状及环状	管状	$t < 3, l < 200$ 	$b = 3t, l = (4 \sim 6.5)a$ 
		$t < 3, l > 200$ 	$b = 3t, a_i = a/2$ 
	环形		$b = 3t$ 
			$\alpha = 120^\circ$, 內浇道与内外圆间各留出 0.5mm

(续)

立体形状类别	铸件简图	内浇道位置	特记事项	
管状及环状	圆筒形 	$t > 3$ $L/D < 1$ 	$\alpha = 120^\circ$ 内浇道与内外圆间各留出 0.5mm	
		$t > 3$ $L/D > 1$ 	内浇道尺寸参见管状	
圆棒状	圆棒 	$d > 5$ $l < 100$ 	$D = 1.15d$	
		$d > 5$ $l > 100$ 		
	圆板	$t < 2$ 		内浇道尺寸参见板状和管状
		$t > 2$ 		
箱体和杯状	箱体 	底部 	 $a = 2t_1 + 1.5t_2$	
	杯状 	底部 	内浇道尺寸参见圆筒形	

立体形状类别	铸件简图	内浇道位置	(续) 特记事项
支架, 凸缘			
复合体			
			

注: 斜线部为内浇道部位

8.3 蜡模组装方案及组装相关要素

组装方案也是决定铸件质量的重要因素, 特别是对铸型细微部位的成型、脱蜡以及铸造性能的影响很大。通常采用的组装方案为顺序凝固方案, 使用最多的是单一浇道和门字形浇道, 这类浇注系统组装简单, 可以广泛适用于多数铸件。金属液直接充填入型腔除容易产生夹砂、夹渣外, 也容易产生气孔缺陷, 特别是注入型腔后产生紊流的铸件, 其内浇道附近常出现针孔、气孔缺陷。而底注方案, 由于金属液层流注入, 金属液对型腔内壁的热冲击缓和, 所以能防止夹渣缺陷。图 8-5 所示为底注方案例。采用此方案时液体金属从下向上平静充填, 从而防止了因卷入型腔内空气而产生的气孔、针孔。而且此方案的脱蜡性好, 能非常有效地防止型壳开裂。因此无论是钢铁类还是有色合金的圆棒、平板形状铸件经常使用这种形式, 特别是对于铝合金精铸件, 其良品率可以达到 95% 以上。

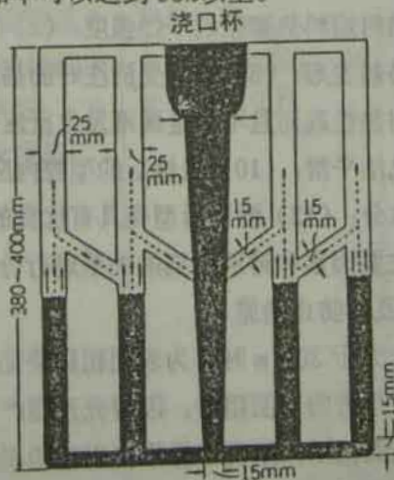


图 8-5 模组底注方案

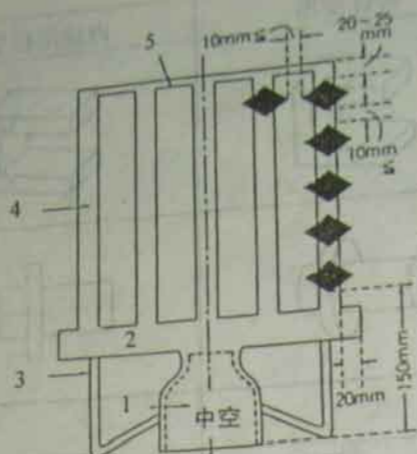


图 8-6 模组组装基准

图 8-6 所示为模组的组装基准。对于壁厚小于 12.7mm 的小铸件，其蜡模间的装配间隙应大于 12.7mm。如果间隔小于此值，则狭窄部位的型壳将难以完全成型，制壳容易出现搭桥，脱蜡时型壳容易开裂，浇注时容易跑火，而且铸件鼓胀也屡屡发生。当然从经济角度考虑蜡模间隔过大，每组模组的铸件数量减少会提高铸件的成本。

模组焊接处焊合不好是形成夹砂缺陷的主要原因。一般焊接的方法有两种。其一是用电勺焊接，由电压调整电勺的温度。另一种是粘接蜡。对于制壳和搬运时容易损坏的蜡模，组装时应取增强措施。脱蜡时浇注系统，特别是其锐角、拐角处型壳易开裂，所以各拐角部位尽可能设置大的圆角 R 或倒角 C。

8.4 制壳系统及其相关要素

几乎各种铸造缺陷都与制壳过程有关，特别是制壳过程中的型壳系统和型壳干燥是最重要的因素，同时面层涂料涂挂以及面层撒砂也是非常重要的因素。型壳最基本的要求是：(1) 为了防止脱蜡时型壳开裂，型壳面层应有合适的透气性；(2) 型壳应具有能承受脱蜡时蜡料热膨胀的干燥强度；(3) 型壳材料焙烧时的热膨胀系数小；(4) 焙烧时不易热变形；(5) 能承受浇注时的热冲击；(6) 浇注时具有合适的透气性；(7) 型壳耐热性高而且不与金属液发生反应；(8) 型壳不会被金属液渗透；(9) 型腔内表面光洁平滑；(10) 焙烧后的型腔内应无残蜡引起的碳黑；(11) 焙烧后的型壳内不含水分；(12) 浇注后型壳具有优良的溃散性。以下将对此 12 项要求及制壳过程中各主要因素和铸造缺陷的关系进行分析讨论。

8.4.1 铸件表面粗糙及其防止措施

表面粗糙度 R_{max} 大于 $30\mu m$ 时称为表面粗糙缺陷。表面粗糙缺陷包含有：表面皱纹；面层被金属液穿透的表面粗糙；因型壳开裂产生的表面粗糙；型壳耐火度差而产生粘砂引起的表面粗糙；型壳干燥不良引起的表面粗糙及因洗净液和前处理液被污染引起的表面粗糙等。表 8-5 所示为这些表面粗糙的状况及其防止措施。

表 8-5 因型壳制造引起的表面粗糙及其防止措施

表面粗糙缺陷分类	表面粗糙产生的原因	缺陷状况及发生部位	主要防止措施
砂雨状表面粗糙	因型壳面层异常疏松, 面层撒砂过粗, 液体金属穿透而产生的凸状表面粗糙: (1) 面层涂料粘度低; (2) 面层撒砂粒度过粗; (3) 面层涂料卷入气泡过多	<ul style="list-style-type: none"> ● 通常发生在型芯、内角及内浇道附近 ● 壁厚 20mm 以上的厚壁件则在整体出现 	<ul style="list-style-type: none"> ● 面层涂料粘度为 4# 詹杯 20~27 秒: (1) 壁厚小于 12mm 时, 面层采用涂料一次涂覆; (2) 壁厚大于 12mm 时, 面层采用涂料二次、三次涂覆 ● 面层撒砂为 AFS 100 ~ 110 目 ● 检查涂料的消泡效果: 涂料搅拌采用转台式; 最好使用真空减压涂料罐
蚯蚓状及龟裂状表面粗糙	型壳面层开裂: (1) 面层干燥过度; (2) 1~2 层采用了硅酸乙酯; (3) 面层吹风或制壳室湿度小于 50%、室温大于 26℃	<ul style="list-style-type: none"> ● 常发生在圆柱状、棒状、平板状等单一形状铸体部位 ● 硅深胶型壳中常见蚯蚓状表面粗糙 ● 硅酸乙酯型壳中多见龟裂状表面粗糙 	<ul style="list-style-type: none"> ● 减小面层干燥速度 (室温 < 22℃, 湿度 > 60%) ● 面层绝对避免吹风干燥 ● 面层避免用硅酸乙酯, 尽量用硅溶胶 ● 面层涂料粘度为 22~27 秒 (4# 詹杯) ● 面层干燥速度为 3 小时内失水 40%~50%
粘砂状表面粗糙	型壳面层耐火材料的耐火度低或面层太薄: (1) 面层涂料耐火粉料的耐火度低; (2) 面层撒砂耐火度低	<ul style="list-style-type: none"> ● 大型厚壁件几乎整体出现 ● 内浇道附近、型芯部位易发生 	<ul style="list-style-type: none"> ● 22~27 秒粘度 (4# 詹杯) 涂料前 2 层涂覆时采用二次或三次涂覆法 ● 面层涂料用耐火粉料为锆英粉时用 AMA 级, 为熔融石英粉时 SiO₂ 大于 99.9% ● 面层撒砂锆英砂时用 AMA-SP 级, 或采用熔融石英砂。特别是锆英砂中的氧化铁含量应小于 0.03%~0.05%

表面粗糙缺陷分类	表面粗糙产生的原因	缺陷状况及发生部位	主要防止措施
气泡状表面粗糙	型壳干燥不良, 型内残留水分	内浇道附近及型芯部位	<ul style="list-style-type: none"> ●背层强通风干燥 ●各层实施真空减压干燥
因洗净液和前处理液污染产生的凸点状表面粗糙	洗净液和前处理液中的蜡屑粘附在蜡模表面	铸件任意部位	<ul style="list-style-type: none"> ●定期去除洗净液和前处理液中的蜡屑浮游物 ●洗净液抽出再生

对于壁厚大于 12mm 的大型厚壁精铸件, 其厚壁部位和型芯部位的表面粗糙缺陷是比较明显的, 这些缺陷主要是面层被金属液穿透及面层用耐火材料的耐火度不够引起的。另外型壳干燥不够常常是气泡状表面粗糙的起因。洗净液中夹杂的蜡屑附在蜡模表面也会引起表面粗糙。圆柱状、棒状及平板状等单一形状铸件所出现的蚯蚓状、龟裂状表面粗糙是由于型壳开裂而形成的表面粗糙, 这种缺陷主要是 1~2 层是用水解硅酸粘结剂或面层干燥过度引起的。在面层涂料粘度过高 (4# 詹杯 40 秒以上) 时型壳也常常出现裂纹, 而当面层涂料粘度为 22~27 秒时这种缺陷可完全防止。精铸件壁厚大于 12mm 时面层采用涂料二次、三次涂覆法能有效防止金属液穿透, 而制造出表面光洁平滑的铸件。厚壁铸件容易产生粘砂类表面粗糙, 图 8-7 所示为粘砂类表面粗糙的照片, 主要是面层涂料层过薄引起的, 在面层采用了上述粘度涂料进行三次涂覆后防止了此类缺陷。另外粘砂类表面粗糙同面层撒砂也有关, 2 层以前的撒砂应使用 AMA-SP 级或熔融石英砂。此处所指的面层三次涂覆法是将模组浸入面层涂料中, 然后提起, 向其细微部位吹空气, 在面层涂料适当干燥排水, 但硅溶胶尚未干燥胶凝前, 再次浸入涂料中, 模组提出后, 再次涂料干燥排水, 然后再浸入涂料中, 提起后让涂料在模组上均匀涂布, 进行撒砂。表 8-6 所示为适用此法的面层涂料配比。

表 8-6 多次涂覆法用面层涂料的配比

品名	备注
粘结剂	硅溶胶, SiO ₂ 30%, 粒子直径 7~10nm
锆英粉	AMA350#, 陶瓷级
湿润剂	Victawet12# 或 诺尼翁系列
消泡剂	SH5510 或 有机硅系列
粘度	调整到 4# 詹杯 22~27 秒

当型腔内残留蜡料时铸件表面也会粗糙, 此类缺陷将在脱蜡相关因素中详细讨论。

近年来澳大利亚产的锆英粉和锆英砂的品质有一定下降, 特别是其中的含铁量过高, 对厚壁铸件的粘砂倾向非常明显, 因此原材料选用时应注意这一问题, 同时也应进一步研究开发锆英砂粉的代用品。

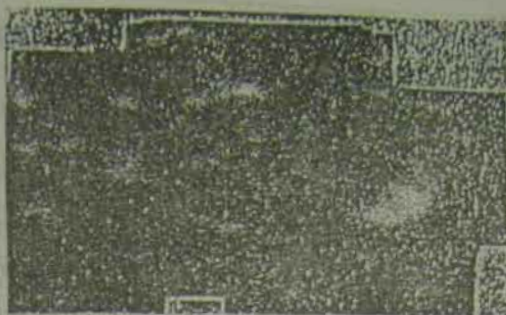


图 8-7 粘砂类表面粗糙照片

8.4.2 夹砂夹杂缺陷及其防止措施

夹砂缺陷主要与制壳过程有关。夹砂可以有：因型壳 1~2 层干燥过度而引起面层剥离产生的夹砂；因型壳干燥后强度较低造成脱蜡时型壳破损产生的夹砂；因制壳过程出现搭桥产生的夹砂；因面层制作时撒砂的浮砂引起的夹砂；因前处理液胶凝化而引起的细小夹砂；面层涂料中夹有型壳碎片及耐火材料等杂物引起的夹砂；制壳过程中局部破损和脱蜡时浇注系统开裂引起的夹砂等等。表 8-7 所示为这些缺陷的状况以及防止措施。上述多种形式夹砂中最常见的是型壳干燥强度低和型壳搭桥以及面层撒砂层剥离破损引起的夹砂缺陷。干燥过度型壳剥离主要在 1~2 层，涂料中的粘结剂从型壳剥离后的裂纹处渗入，产生夹砂和脉纹毛刺状缺陷。图 8-8 所示为搭桥和粘结剂渗透产生夹砂缺陷的示意。

表 8-7 因制壳过程产生的夹砂缺陷及其防止措施

产生夹砂的主要原因	夹砂状况及发生部位	主要防止措施
因面层干燥过度剥离产生的夹砂	剥离状凸缺陷（与纹状毛刺相似）存在的同时有夹砂点	<ul style="list-style-type: none"> ● 面层绝对避免吹风，干燥速度为 3 小时失水率 40%~50% ● 室温 22℃ 以下，湿度 60% 以上 ● 粘结剂采用硅溶液（采用硅酸乙酯时配入乙二醇）
因干燥后型壳强度低，脱蜡时型壳破损产生的夹砂	位于液体金属穿透处和型芯、沟槽处以及细文字破损处。夹砂程度显著	<ul style="list-style-type: none"> ● 面层涂料粘度为 4# 詹杯 20~27 秒，型芯、沟槽、细文字处采用多次涂覆法 ● 采用真空减压干燥使各部位干燥均匀，提高型壳强度 ● 面层涂料中配入适量乳胶或粘土
因面层涂料中存在碎型壳片和蜡屑等杂物引起的夹砂	夹砂细小	<ul style="list-style-type: none"> ● 分离和筛分涂料中的杂物

(续)

产生夹砂的主要原因	夹砂状况及发生部位	主要防止措施
因面层和中间层之间出现搭桥产生的夹砂	型芯部位和细沟槽的型壳破损处, 伴有金属液穿透。夹砂显著	<ul style="list-style-type: none"> ●在搭桥部位未充满前使用细砂 ●面层涂料均匀涂覆以促进撒砂均匀, 并吹气处理 ●撒砂砂粒定期筛选 ●采用上述低粘度涂料多次涂覆法
因面层撒砂层有浮砂或夹杂物而造成型壳剥离破损产生夹砂	剥离状凸缺陷存在的同时有夹砂点	<ul style="list-style-type: none"> ●面层撒砂后立即用压缩空气吹去内角、盲孔、型芯、细沟槽处的浮砂
因前处理液胶凝化产生的超微细夹砂	在航空航天零件上不允许出现这类极微细的夹砂。一般零件可不作为缺陷处理	<ul style="list-style-type: none"> ●一次焙烧后冷却至室温, 对型腔进行水洗, 然后再二次焙烧 ●面层涂料中配入烧结剂(钠化合物) ●浇注前向型壳内吹气
型壳局部破损和脱蜡时浇注系统开裂产生的夹砂	点块状夹砂	<ul style="list-style-type: none"> ●修补型壳的修补材料尽可能高粘性 ●采用陶瓷浇口杯 ●脱蜡后将型壳浸一下背层涂料(脱蜡后型壳外表沾蜡多时可以先焙烧一次, 冷却后再浸涂料)

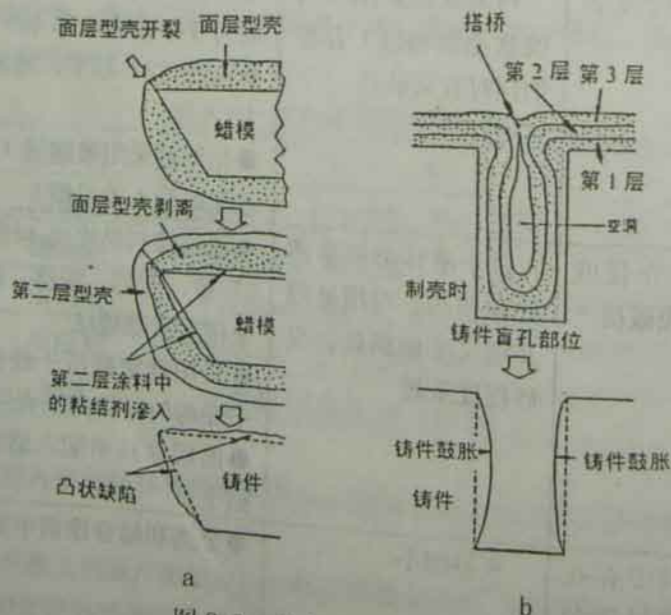


图 8-8 型壳开裂及其防止措施

a—粘结剂渗透夹砂缺陷 b—搭桥夹砂缺陷

8.4.3 型壳开裂及其防止措施

型壳开裂与制壳过程及脱蜡过程有关。蜡模组装不平衡时在制壳和型壳干燥时会因自重变形而导致型壳开裂剥离。另外型壳室的空调影响相当大,例如室温在15℃以下或29℃以上时型壳非常容易开裂。室温低时蜡模产生收缩变形,室温高时因蜡模膨胀和下垂应力而产生变形导致型壳开裂。制壳室湿度小于50%时1~2层面的干燥速度过快,导致各部位干燥程度出现差异而经常使型壳开裂。表8-8所示为这些型壳开裂缺陷的状况及防止措施。此外,面层型壳强迫通风干燥、涂料胶凝化、不合理的制壳工艺或难干燥部位的干燥不足等多种原因会导致型壳开裂。室温自然干燥时,特别是面层,将干燥速度调慢可以保证型壳各部位均匀干燥而有效防止型壳开裂。

表8-8 制壳过程中型壳开裂及防止措施

型壳开裂原因	缺陷状况及发生部位	主要防止措施
因面层干燥过度、过快、不均匀干燥而产生的面层开裂	常发生在单一形状圆柱形、棒形、平板状铸件上	<ul style="list-style-type: none"> ● 面层避免吹风,干燥速度小、制壳室空调控制 ● 控制面层涂料的粒度
蜡模组装不平衡或未采取增强措施导致自重变形引起型壳开裂	长形凸蚯蚓状裂纹,常见于单一形状	<ul style="list-style-type: none"> ● 蜡模组装平衡 ● 采用无弹性的高强度蜡 ● 空调控制
制壳室室温、湿度、风速不合适	在剥离状缺陷的同时产生的开裂。常出现于形状较复杂的铸件	<ul style="list-style-type: none"> ● 控制制壳室的室温、湿度、风速
因涂料变质和胶凝化产生的开裂(主要是型壳强度下降)	任何形状铸件均可能出现开裂和夹砂	<ul style="list-style-type: none"> ● 控制面层涂料粘度 ● 调整涂料粉液比 ● 控制硅溶胶的PH值和涂料温度 ● 抽出粘结剂,分析其SiO₂ ● 测定水分蒸发量,添加蒸馏水
型壳系统不合理		<ul style="list-style-type: none"> ● 严格涂料组成和粘度管理 ● 合理撒砂系统 ● 合理干燥系统 ● 均匀涂料和多次涂覆
因型壳干燥不良,脱蜡时产生型壳开裂	主要出现在内浇道附近和型芯部位、特别是组装时蜡模间隔很狭小的部位	<ul style="list-style-type: none"> ● 蜡模组装间隔合适 ● 采用陶瓷浇口杯 ● 浇注系统拐角处设置圆角R或倒角C

8.4.4 浇不足及其防止措施

型壳的透气性以及型壳保温条件能影响铸件浇不足缺陷。型壳透气性主要决定于1~2层面层涂料中的耐火粉料的粒度分布以及涂料粘度，同时1~2层面层涂料的耐火粉料的粒度分布也对透气性有很大影响。图8-9和图8-10所示为面层涂料的耐火粉料的粒度分布。例如采用澳大利亚产AMA错英砂SP级和美国夏威夷产错英砂的A级分别作1~2层撒砂时，浇注结果为美国砂比澳大利亚砂的浇不足缺陷增加了大约20%。又如面层涂料中使用100%澳大利亚产AMA级350目错英粉和使用90%AMA级350目错英粉配以10%R&R公司产的熔融石英粉相比较，使用混合粉的浇不足缺陷较全错英粉的大约降低了15%。

面层涂料的4#詹杯粘度40秒和25秒相比较，采用25秒粘度涂料的浇不足率较40秒降低了15%。

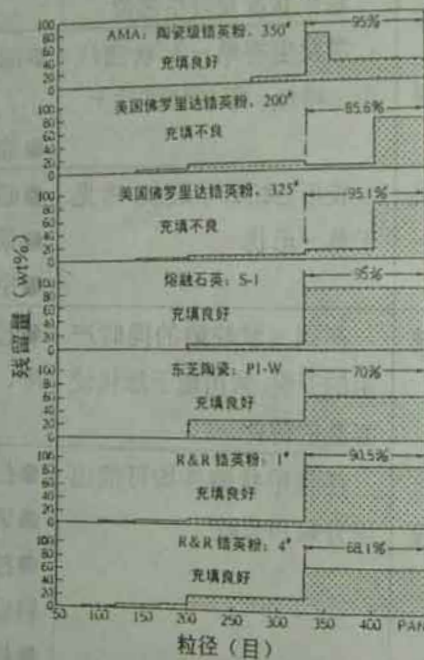


图8-9 面层涂料耐火粉料的粒度分布

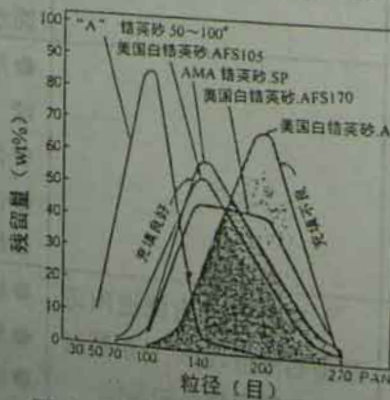


图8-10 面层撒砂的粒度分布

型壳的保温一般采用在型壳焙烧之前用 10~20mm 的绝热棉包卷型壳的四周，或采用装填背砂方式。为了提高型壳的保温性，在模组组装时必须考虑使模组铸件型壳之间相连而不单独分离的方案。英国的 Miu 在“精铸件质量与型壳关系”一文中论述模组组装方案的空间分类与铸造缺陷（浇不足和型壳开裂）之间的关系时也提出了同样的看法。

8.4.5 气泡豆缺陷及其防止措施

所谓气泡豆是指铸件表面的细小的球状凸缺陷。这种缺陷是由于蜡模的润湿性差、面层涂料搅拌机结构不合理、面层涂料的消泡效果差、前处理液润湿性差以及面层涂覆操作不当等原因产生。表 8-9 所示为气泡豆缺陷的状况及防止措施。提高硅溶胶涂料对蜡模表面的润湿性非常重要，另外必须避免面层涂料混入微细的气泡。在面层涂料涂覆时模组必须缓慢进入涂料。一般说需将无极性的蜡模表面切换成有极性的表面而改善涂料对蜡模的润湿性和附着性，此时最好使用含卤素类的溶剂（ CCl_2F_2 ， CCl_2F_3 ）作为洗净液，但是这些溶剂洗净时由于急剧的吸热作用而容易使蜡模表面出现龟裂，特别是大件。因此为了防止这种状况应事先使溶剂保持在 25℃ 左右。采用真空减压涂料罐可以有效防止气泡豆缺陷。在 10~40 托的真空减压状况下不仅涂料中的气泡消失，而且涂覆时也有良好的消泡效果，并能够保证均匀润湿涂覆。真空减压处理的时间大约为数秒钟时间。为了缩短真空减压处理时间和提高润湿性，所使用的涂料粘度以 20~28 秒最为合适。

表 8-9 气泡豆缺陷及其防止措施

气泡豆产生原因	缺陷状况及发生部位	主要防止措施
蜡模洗净处理不合理，形成不合格的洗净液	气泡豆集中发生在铸件复杂部位，同时伴随有因面层涂料润湿不良形成的铸件表面粗糙	<ul style="list-style-type: none"> 洗净液应为无极溶剂，最好使用具有良好微观刻蚀作用的高氟类溶剂 在上述溶剂中浸渍 3~5 秒钟，对任何蜡模都能完全被润湿
面层涂料搅拌机结构不合理，螺旋桨高速搅拌时卷入大量气泡	由于涂料中含有微小的气泡，因此在气泡豆出现同时，伴随全面发生铸件表面雨滴状粗糙	<ul style="list-style-type: none"> 对于直径 $\Phi 1000$ 的回转罐，最佳使用转速为 38~40rpm 阻流板设置约 10° 的螺旋角
消泡剂不合格，面层涂料消泡效果差	铸件上全面出现细小的气泡豆	<ul style="list-style-type: none"> 使用合适的消泡剂（最好是有有机硅系消泡剂） 加入量极微量
因前处理液润湿性差而影响消泡效果	铸件上全面出现细小的气泡豆	<ul style="list-style-type: none"> 消泡剂添加量极微量 前处理以后应吹压缩空气消泡
模组往涂料中浸渍过快，在模组浸入涂料同时卷入气泡	气泡豆出现在铸件的细微部、拐角部	<ul style="list-style-type: none"> 模组缓慢浸入面层涂料

(续)

气泡产生原因	缺陷状况及发生部位	主要防止措施
面层涂料粘度过大, 面层涂料涂覆时消泡操作不当	发生在铸件细微部、拐角部	<ul style="list-style-type: none"> • 涂料涂覆后用压缩空气吹细微部和拐角部 • 采用真空减压涂料罐(减压时间10秒) • 吹压缩空气消泡时的空气压力调整到 $3.5 \sim 4 \text{Kg/cm}^2$ • 为了保证吹压缩空气有效消泡, 蜡模组装间隔应适当留有余地

由上可知, 制壳过程对铸件缺陷的影响很大, 因此建议型壳干燥采用真空干燥系统。图 8-11 所示为真空减压系统的配管图。这一系统不仅可以大幅度缩短干燥时间, 而且可以使型壳整体均匀干燥并提高型壳强度。目前各企业所采用的自然干燥中仍有干燥不均匀的场所存在, 特别是型芯和盲孔处常常发生干燥不足, 因而在脱蜡时型壳和型芯开裂破损, 成为多种铸造缺陷产生的原因。如采用真空干燥, 则型壳整体均匀干燥, 型壳强度可以提高 $15\% \sim 20\%$, 铸造缺陷相应大幅度降低。

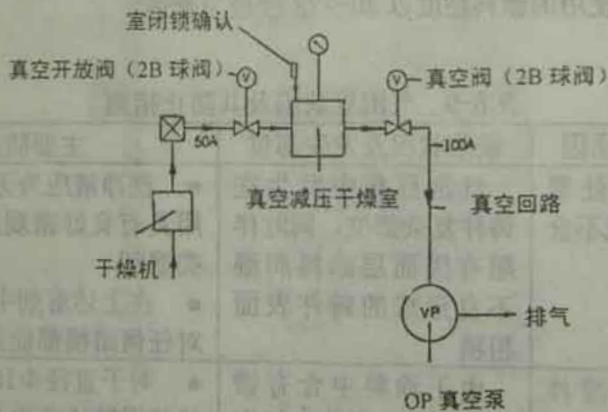


图 8-11 型壳真空减压干燥系统配管图

8.5 脱蜡过程相关要素

脱蜡一般采用高压蒸汽釜。脱蜡后型内的残蜡对铸件表面粗糙度及气孔的影响很大。除高压蒸汽釜的功能和脱蜡作业方式对脱蜡有影响外, 蜡料的粘度以及模组组装方案也有很大影响。一般说脱蜡速度应快, 型内残蜡应尽可能少。脱蜡性好有利于防止型壳开裂, 因此应尽量使用低熔点、低粘性的蜡。型内残蜡应在焙烧过程中完全燃烧去除。图 8-12 所示为残蜡对于铸件表面产生碳污缺陷的影响照片。另外型壳进入高压蒸汽釜后必须立即升压。型壳装入时间长则型壳容易开裂, 因此蒸汽阀门的启闭操作必须快速。型壳装入前的蒸汽釜内的温度不得低于 100°C , 否则型壳会因蜡膨胀而开裂, 同时希望蒸汽从大气压升到 5kg/cm^2 的时间控制在 10 秒钟以内。脱蜡时的操作和设备不符合上述要求时经常出现型壳开裂。在模组组装方案

上尽可能设置辅助排蜡口，特别是大件和厚壁件，在设置辅助排蜡口后在防止型壳开裂方面往往收到很好效果。

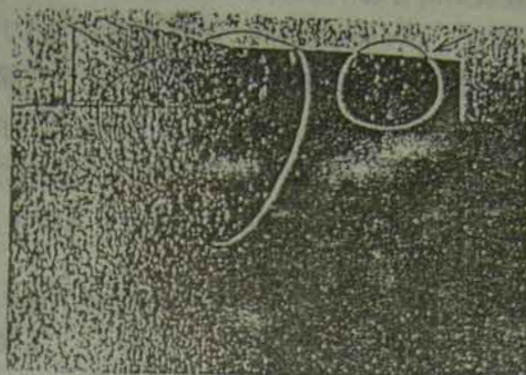


图 8-12 型壳内残蜡形成铸件表面碳污缺陷的照片

8.6 焙烧对铸造缺陷的影响及缺陷防止措施

最近焙烧多数采用煤气炉。通常在给煤气燃烧供给空气的同时也给蜡的燃烧供给空气，因此型内的残蜡能在富氧气氛中燃烧消失。但是实际上仍然往往在型内出现热分解的碳化氢气体和残留碳黑，因而在铸件的局部产生因碳污形成的铸件表面粗糙。型壳烧成基准，对于铁基合金大约为 $1000\sim 1050^{\circ}\text{C}$ 时 $60\sim 90$ 分钟。由于焙烧方法和焙烧炉结构有一定差异，煤气焙烧时炉内会产生对流，因此炉内温度分布容易不均匀，严重时炉膛前端和中央能差到 200°C ，此时必然会出现部分型壳因焙烧不充分而产生碳污类铸件表面粗糙。因此要求焙烧炉的结构应充分考虑炉内的燃烧对流和炉内温度分布均匀。对于铝合金精密铸造，一次焙烧为 1000°C 时 $30\sim 40$ 分钟，二次焙烧为 $600\sim 700^{\circ}\text{C}$ 时 $90\sim 120$ 分钟。在铝合金精铸时考虑到浇注后型壳的溃散性以及浇注温度和型壳温度接近，因而必须进行二次低温焙烧。为了防止夹砂、夹杂，完全去除型内残蜡，在第一次焙烧后待型壳冷却到常温，然后水洗。在此冷却期间，型壳和空气接触，发生 $\text{C}+\text{O}_2\rightarrow\text{CO}_2$ 的反应，碳黑被烧去，防止了因碳污产生铸件表面粗糙。水洗后的型壳再次焙烧到 $600\sim 700^{\circ}\text{C}$ 。每次水洗后对水洗后的水进行过滤，发现每组模组洗后的水中含有 $0.5\sim 0.6$ 克的杂物残渣，经分析，这些杂物为蜡中灰分和超细粒子的凝胶物。前处理液和面层涂料中的硅溶胶凝胶体粘附在型腔内壁上，用手指触摸时手指上会留下白色。这些凝胶物在脱蜡时绝大多数能随蜡一起熔出，但少数则留在型内形成夹杂。

铸件浇不足缺陷与型壳焙烧温度密切相关，因此应特别注意控制浇注时的型壳温度，对于浇不足缺陷敏感的铸件应在炉内取出型壳后立即进行浇注。

8.7 熔炼技术对铸造缺陷的影响及缺陷防止措施

熔炼温度不得超过规定温度。熔炼温度过高不仅会严重侵蚀炉体内壁，而且会导致金属液吸气而容易产生夹渣和针孔缺陷。表 8-10 所示为因熔炼技术产生的铸造缺陷及其防止措施。精密铸造的熔炼，对于铁基合金主要采用高输出功率的高频感应炉，最近快速熔炼得到了快速发展。另外金属料锭的处理和回炉料的处理非常重要。金属料锭需进行喷砂除锈和脱脂处理。由于回炉料中含有氮、氢、氧等气体，

因此必须进行再精炼处理。对于铸钢，熔炼时除气脱氧剂的选择和加入量非常关键。同时必须把握除气脱氧剂的有效作用时间。例如采用 Ca-Mn-Si 类除气脱氧剂时，除气的有效期为 60~90 秒，加入量为 0.15%。在浇包中采用纯铝 (99.99%) 和铈 (40%~70%) 脱氧时其除气脱氧的有效期极短。铝合金精铸件的除气采用吹氩气代替目前采用的熔剂除气可以收到良好的除氢效果。图 8-13 所示为此法的除氢效果。每分钟 10~30 升氩气可以使铝合金中的氢含量小于 0.12cc/100g，从而完全防止了针孔缺陷。

表 8-10 熔炼技术对铸造缺陷的影响及其防止措施

铸造缺陷	缺陷产生原因	状况及发生部位	主要防止措施
夹杂、夹渣	(1) 熔炼温度过高 (2) 扒渣材料和扒渣操作不当 (3) 炉衬耐火度不够 (4) 筑炉时充填不完全	(1) 炉衬严重侵蚀和渣的粘度降低，出现异常渣和扒渣困难 (2) 扒渣不完全 (3) 渣量增加 (4) 出现异常渣	<ul style="list-style-type: none"> ● 控制熔炼温度。熔炼温度=合金熔点+(120~150℃) ● 除渣剂粒度均匀 ● 最好使用氧化铝尖晶石耐火材料 ● 扒渣时停止送电迅速进行 ● 筑炉时充填紧实均匀
浇不足	(1) 除气脱氧剂不合适 (2) 合金成分调整有误差	金属液粘度高	<ul style="list-style-type: none"> ● 采用合适的脱氧剂以降低金属液粘度 ● 合理配制合金成分改善铸造性 (例如钢中适当增加 Si)
气孔、针孔	(1) 熔炼温度过高 (2) 金属料锭前处理 (喷砂、脱脂、预热) 不当 (3) 除气脱氧操作不合理 (4) 除气脱氧剂选择不当 (5) 回炉料配比和含气量有问题 (6) 熔炼时间过长 (7) 合金成分调整有误差	(1) 气体 (N ₂ 、O ₂ 、H ₂) 溶解量增加 (2) 应考虑除气脱氧时间和有效期 (3) 缺陷为针孔、气孔	<ul style="list-style-type: none"> ● 严格保证熔炼温度，正确处理金属料锭 ● 实施炉中除气脱氧及包中除气脱氧 ● 脱氧剂为 Ca-Mn-Si 或 Al 或铈 ● 快速熔炼 ● 考虑 (Mn/Si) 比率

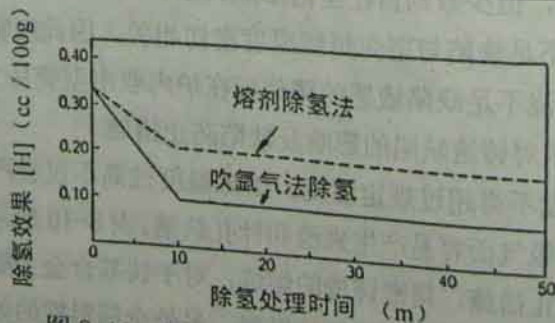


图 8-13 铝合金吹氩处理的去氢效果

8.8 浇注对铸造缺陷的影响及缺陷防止措施

浇注时的浇注温度、型壳温度、浇注速度、浇注气氛、浇注倾斜角、浇包形式、浇注方式和真空减压浇注等浇注条件取决于合金的铸造性能。表 8-11 所示为浇注条件和铸造缺陷的关系及缺陷防止措施。精密铸造时合适浇注温度的确定是非常困难的，但是一般说对于铸钢的浇注温度采用其熔点加 120~200℃，绝大多数可以满足要求。

表 8-11 浇注条件与铸造缺陷的关系

铸造缺陷		缺陷产生原因	缺陷状况及发生部位	主要防止措施
表面粗糙	粘砂	浇注温度和型壳温度过高	常发生在厚壁部位和内浇道附近	<ul style="list-style-type: none"> ● 确定合适的浇注条件
	皱纹和流线	浇注温度低、型壳温度低、浇注速度慢	薄壁铸件的大平面部位和细长部位	<ul style="list-style-type: none"> ● 降低浇注时型壳温度 ● 降低浇注温度
	黑斑	铸件表面局部氧化，常发生在 5% ~ 15%Cr 的钢中	厚壁件，特别是 410、420 材质铸件。黑色麻点凹坑	在无氧化气氛中浇注（加蜡扣箱法）
夹渣、夹砂	夹渣	扒渣或浇包浇注不当	熔渣夹杂物	<ul style="list-style-type: none"> ● 采用茶壶式浇包或直注 ● 浇包内衬使用中高耐火材料
	夹砂	铝合金浇注时紊流，铁基合金浇注时无隔离，浇注温度过高	有一定数量的夹砂物	<ul style="list-style-type: none"> ● 浇注时细流、层流 ● 内浇道处设置陶瓷过滤网 ● 对于铝合金在内浇道处设耐火网
缩孔	内缩孔，外缩孔	(1) 浇注温度过高，型壳温度过高 (2) 冷却速度小 (3) 跑火或补缩不当	内、外缩孔。壁厚差大和浇不足时	<ul style="list-style-type: none"> ● 降低浇注温度、型壳温度 ● 快冷 ● 浇道尽可能浇满

(续)

铸造缺陷		缺陷产生原因	缺陷状况及发生部位	主要防止措施
浇 不 足		(1) 浇注温度、型壳温度低 (2) 浇注速度小 (3) 型壳冷却过快 (4) 补缩压力不够 (5) 铸件内浇道附近有紊流和浇注速度太快	常发生在厚壁铸件的拐角处，细薄的前端部及拐角未作成圆角	<ul style="list-style-type: none"> ● 提高浇注温度和型壳温度及浇注速度，型壳保温 ● 铝合金采用真空减压浇注 ● 内浇道应设置大圆角 R，防止紊流 ● 控制浇注速度
气 孔	针孔	(1) 浇注温度过高 (2) 浇注方式不当	(1) 产生针孔 (2) 产生针孔、气孔，主要在铸件内浇道附近	<ul style="list-style-type: none"> ● 降低浇注温度 ● 倾斜浇注、层流浇注 ● 浇注时浇包接近浇口杯 ● 铝合金应细流层流浇注
漏 钢 、 鼓 胀		浇注温度、型壳温度高，冷却慢	易产生在厚壁件和模组装配间隔狭窄的场合，以及间隔狭窄的铸件部位	<ul style="list-style-type: none"> ● 降低浇注温度和型壳温度 ● 提高冷却速度 ● 增大模组组装间隔

8.8.1 铸件表面粗糙及其防止措施

浇注温度和型壳温度过高，铸件表面容易粘砂，特别是厚壁件这种倾向很明显。而浇注温度和型壳温度低及浇注速度慢时则容易产生铸件表面皱纹和流线状缺陷。另外对于铸钢件，其表面会产生非常浅的黑色麻点状凹缺陷，亦即黑斑缺陷。这种缺陷对于含 Cr 小于 20% 的 410、420、SUJ2、17-4、15-5、SKD、SKS 等钢种非常容易产生，特别是含 Cr 5%~15% 的钢更明显。经 X 光分析，黑斑组成为 α -Fe、氧化铬、尖晶石型氧化物 (FeO 、 Cr_2O_3)。黑斑为麻点状的黑色斑点，深度为 $20\mu\text{m}$ ~ $100\mu\text{m}$ ，是由于铸件表面氧化而产生的现象，主要是铸型内的空气及外部空气经型壳侵入铸件表面氧化的结果。由于型壳透气性不均匀，透气率高的部位的氧化严重，而在该部位形成了氧化层较深的斑状凹坑。将铸件置于无氧化的还原性气氛中凝固冷却能非常有效地防止黑斑缺陷。方法为将型壳放在铺有 4~5 号砂的台车上，浇注后立即撒上蜡片，用箱罩扣合，此时由于型壳与外界空气隔闭，罩内不完全燃烧

的气体通过型壳传至铸件表面，使铸件在还原性气氛中冷却，从而防止了黑斑缺陷。图 8-14 所示为黑斑缺陷部的断面。

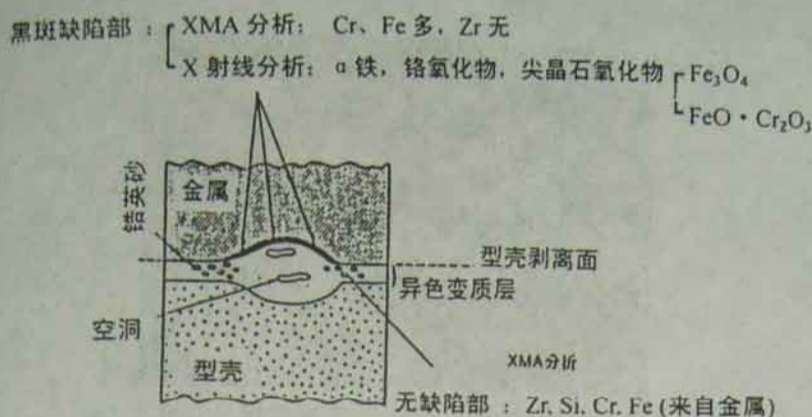


图 8-14 黑斑缺陷的断面示意图

8.8.2 夹砂、夹渣缺陷及其防止措施

浇注时使用合适的浇包能防止夹渣，特别是茶壶浇包的效果很明显。另外浇包用炉衬材料的选择也非常重要，一般说选用中性氧化铝类耐火材料能满足要求。浇注温度越高，越容易夹渣。近来许多企业采用高频感应炉直接浇注，从而避免了因浇包产生的夹渣。铝合金精铸件的浇注应尽量保持细流、层流。对于铁基合金铸件采用陶瓷网能有效防止夹砂、夹渣，对于铝合金铸件采用耐火滤网也非常有效。

8.8.3 浇不足及其防止措施

浇不足主要与浇注温度、型壳温度及浇注速度有关，特别是同型壳从焙烧炉出炉到浇注的计时关系很大。采用保温台车对防止浇不足很有效。铝合金铸件采用真空减压浇注对防止浇不足的效果非常明显。对于特殊铸钢件也可采用真空减压浇注。

对容易产生浇不足的铸件，希望在浇注时能正确测定每个型壳的温度。

8.8.4 气孔缺陷及其防止措施

气孔缺陷主要受浇注温度的影响。在浇注时型壳倾斜，液体金属沿着型壁流入，能够保持层流和防止紊流。对于精铸件，一般说型内金属液紊流是产生气孔和针孔的主要原因。这种因浇注紊流产生的气孔主要出现在铸件的内浇道附近。另外卷入金属液的气泡也会在铸件的前端部和拐角部产生气孔。对于铝合金精铸件，细流层流浇注是防止气孔的有效措施，同时浇注时浇包应尽可能接近型壳的浇口杯。

8.9 表面加工和铸件表面粗糙

精铸件的表面加工主要采用喷砂处理和抛丸处理。对于铸钢件，为了提高型芯去除效果多数采用抛丸处理。抛丸时间合适时出现的问题较少，但当抛丸时间过长（大约 30 分钟以上）时，铸件表面会产生疙瘩状的异常麻点。图 8-15 所示为这种缺陷的照片。

型芯的除砂也可用氢氧化钠处理，一般在氢氧化钠溶液中浸泡 20~60 分钟就可除砂。但时间过长也会产生麻点状表面粗糙。图 8-16 为处理时间超过 120 分钟后的照片。这些缺陷均为凹陷状缺陷，属于致命缺陷。

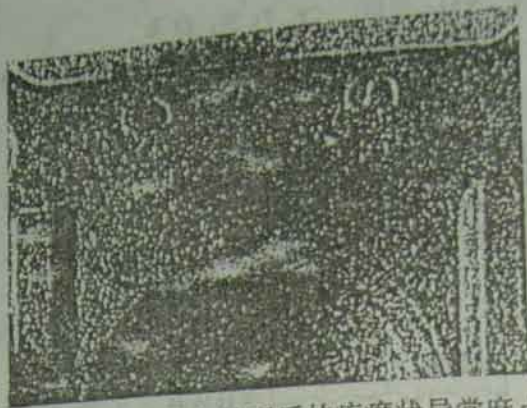


图 8-15 40 分钟抛丸处理后的疙瘩状异常麻点

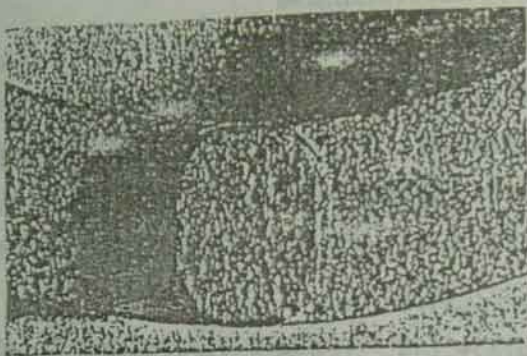


图 8-16 氢氧化钠处理 120 分钟后的麻点状照片 (处理温度 500°C)

铝合金精铸件的型芯除砂主要采用高压水喷射。高压水喷射枪的压力为 35~40Mpa。由于铝合金特别软，如采用铁基合金所使用的表面处理方法，则会在铸件的拐角部、尖角的前部形成圆状，而破坏了铸件原先的形状。