



普通高等教育“十三五”规划教材

熔模铸造

吕凯 主编

北京

冶金工业出版社

2018

前 言

本书承蒙“内蒙古自治区材料成型及控制工程重点专业建设项目”专项出版基金、内蒙古工业大学“材料科学与工程”学科建设经费及内蒙古自治区高等学校科学研究重点项目“纤维增强熔模铸造用硅溶胶型壳的性能及断裂失效行为分析”(NJZZ17080)资助, 谨此致谢。

我国从20世纪60年代起开始生产熔模型壳, 并称之为熔模铸造。近年来我国生产的熔模型壳品质日趋稳定并逐步向国际先进水平靠拢。我国已逐步成为世界熔模铸造生产的大国, 其中白口的熔模铸造模具集中在深圳、北京、上海、广州等地, 部分合金熔模型壳产量已占总产量的30%以上。

熔模铸造制备型壳方法或属于材料学或属于材料科学研究的某一个小的范畴。随着工业科技的不斷进步和重复以及社会需求的增长, 熔模铸造技术也在不断发展, 从20世纪50年代的水玻璃熔模型壳到以硅溶胶、硅酸乙酯黏结剂型壳, 再到多种黏结剂复合型壳, 熔模铸造技术在应对不同铸件及其性能的特殊要求下, 不断发展, 日趋成熟。

目前, 国内许多高校设置的专业中, 铸造专业已经逐渐成为材料成型及控制工程专业中的一个方向。但是, 相关专业的大学生及从业人员往往需要一本关于基础与实战结合的专业铸造教材。因此, 在长期从事熔模铸造课程教学和科研工作的基础上, 在查阅和参考了多部资料的前提下, 作者编写了此书。

前 言

熔模铸造也称为失蜡铸造或精密铸造，其广泛使用长达几个世纪之久。熔模铸造的历史可以追溯到4000年前，用来生产人类早期的基本工具，最早使用的国家有埃及、中国和印度，然后才传到非洲和欧洲。19世纪末期，医疗领域，尤其是牙科，采用了该项技术生产更为精密的铸件，人们也开始研究影响铸件性能的因素。20世纪初期，熔模使用的材料得到了调整。

现代工业开展以来，熔模铸造技术对世界的铸造技术发展有很大的影响。第二次世界大战期间，飞机发动机叶片、涡轮等部件的精密程度要求提高，传统的工艺流程无法满足日益增长的需求，美国率先在军工领域对熔模铸造技术进行了深入研究。20世纪80年代开始，机械化、自动化的进展打破了熔模铸造不易机械化的旧观念，日本、英国和苏联开始在民用汽车零件的生产中应用熔模铸造技术。21世纪以来，航空航天领域也越来越多地采用熔模铸造技术进行钛合金的铸造成型。

我国从20世纪60年代起开始生产硅溶胶型壳，并将之用于熔模铸造，近年来我国生产的该类型壳品质日趋稳定并逐步向国际商业品类靠拢。我国已经成为世界铸造机械生产的大国，其中出口的熔模铸造模具集中在欧洲、北美、日本、韩国等地，部分企业的出口模具量已占总产值的30%以上。

探索材料制备的新方法或赋予材料新性能是材料科学研究中一个永恒的话题。随着工业科技的不断进步和发展以及社会需求的提高，熔模铸造技术也在不断发展，从20世纪后半期的水玻璃黏结剂型壳到硅溶胶、硅酸乙酯黏结剂型壳，再到多种黏结剂复合型壳，熔模铸造技术在应对不同铸件及其性能的特殊要求下，不断发展，日趋成熟。

目前，国内很多高校设置的专业中，铸造专业已经逐渐成为材料成型及控制工程专业中的一个方向。但是，相关专业的学生及从业人员依然需要一本关于基础与实践结合的熔模铸造教材。因此，在长期从事熔模铸造课程教学和相关科研工作的基础上，在学习和参考了多部资料的前提下，作者编写了此书。

本书由吕凯副教授主编，刘向东教授、路焱老师参编。其中吕凯负责1~5章内容的编写和整理工作，刘向东负责第6、7章的编写和整理工作，路焱负责第8、9章的编写和整理工作。

本书配套教学课件读者可在冶金工业出版社官网（www.cnmp.com.cn）搜索资源获得。

由于水平所限，书中不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2017年11月

目 录

1	绪论	1
1.1	熔模铸造的发展概况	1
1.1.1	熔模铸造的历史	1
1.1.2	现代熔模铸造	3
1.2	熔模铸造的工艺流程及特点	4
1.2.1	熔模铸造的工艺流程	4
1.2.2	熔模铸造的特点	5
	复习思考题	7
2	熔模的制造	8
2.1	模料	8
2.1.1	对模料性能的要求	8
2.1.2	模料的分类及组成	13
2.2	制模	19
2.2.1	模料的配制	19
2.2.2	制模用工艺及设备	23
2.2.3	熔模的组合	26
2.3	模料的回收复用	27
2.3.1	模料变质的原因	28
2.3.2	模料的回收与复用	28
	复习思考题	30
3	型壳的制造	31
3.1	对型壳性能的要求	31
3.1.1	强度	31
3.1.2	透气性	31
3.1.3	热膨胀性	32
3.1.4	热震稳定性	32
3.1.5	高温化学稳定性	33
3.1.6	型壳性能测试方法	33
3.2	制壳用耐火材料	34
3.2.1	耐火材料的作用	34

3.2.2	对耐火材料的性能要求	34
3.2.3	常用的耐火材料	34
3.3	制壳用涂料组成及性能	44
3.3.1	涂料的组成	44
3.3.2	涂料的性能	48
3.4	水玻璃黏结剂及型壳	53
3.4.1	水玻璃黏结剂	54
3.4.2	水玻璃制壳工艺	60
3.5	硅溶胶黏结剂及型壳	71
3.5.1	硅溶胶黏结剂	72
3.5.2	硅溶胶制壳工艺	75
3.6	硅酸乙酯水解液及型壳	80
3.6.1	硅酸乙酯水解液黏结剂	80
3.6.2	硅酸乙酯制壳工艺	85
3.7	复合型壳及快速制壳	87
3.7.1	复合型壳制壳工艺	87
3.7.2	快速制壳工艺	89
	复习思考题	91
4	型芯的制造	92
4.1	熔模铸造型芯的要求及应用	92
4.1.1	熔模铸造型芯的性能要求	92
4.1.2	型芯的工艺特点和应用范围	93
4.2	陶瓷型芯的制造	93
4.2.1	制备陶瓷型芯的材料	93
4.2.2	制备陶瓷型芯的方法	96
4.3	水溶性型芯及水玻璃砂芯的制造	101
4.3.1	水溶性型芯	101
4.3.2	水玻璃砂芯	102
	复习思考题	103
5	熔模铸造铸件浇注、脱壳及后处理	104
5.1	铸件的浇注	104
5.1.1	焙烧	104
5.1.2	浇注	104
5.2	脱壳	107
5.2.1	机械震击脱壳	107
5.2.2	电液压清砂	107
5.2.3	高压水清洗	108

5.2.4 气爆脱壳	108
5.3 铸件的后处理	109
5.3.1 修整	109
5.3.2 清理	111
5.3.3 表面处理	114
复习思考题	116
6 压型的设计与制造	117
6.1 压型的分类与组成	117
6.1.1 压型的分类	117
6.1.2 压型的组成	118
6.2 压型结构的设计工艺	119
6.2.1 成型部分的设计	119
6.2.2 分型面的选择和设计	122
6.2.3 定位机构的设计	124
6.2.4 起模机构的设计	125
6.2.5 锁紧机构的设计	125
6.2.6 注蜡系统的设计	126
6.2.7 开合型和排气机构的设计	127
6.3 压型的尺寸确定及制造	128
6.3.1 型腔尺寸的确定	128
6.3.2 压型的总装和制造	129
7 熔模铸造铸件的工艺性分析	130
7.1 铸件结构的工艺性分析	130
7.2 工艺方案和工艺参数的确定	135
7.2.1 铸孔	135
7.2.2 基准面的选择	135
7.2.3 工艺筋	136
7.2.4 工艺孔	136
7.2.5 铸件精度和表面粗糙度	136
7.2.6 加工余量	136
7.2.7 铸造斜度	137
7.2.8 铸造圆角	137
7.3 浇注系统的设计	137
7.3.1 对浇注系统的要求	137
7.3.2 浇冒口系统的组成和设计	138
7.3.3 浇冒口系统的计算	144

8 熔模铸造铸件常见缺陷分析	147
8.1 铸件尺寸超差及变形	147
8.2 铸件表面缺陷	147
8.2.1 表面粗糙	147
8.2.2 黏砂	148
8.2.3 夹砂	149
8.2.4 麻点	151
8.2.5 毛刺 (金属刺)	151
8.2.6 铁豆 (金属珠)	152
8.2.7 鼓胀	152
8.2.8 结疤	153
8.2.9 橘子皮	154
8.3 孔洞类缺陷	154
8.3.1 气孔 (集中性气孔)	154
8.3.2 弥散性气孔 (析出气孔)	155
8.3.3 缩孔	155
8.3.4 缩陷	155
8.3.5 渣气孔	156
8.3.6 缩松	156
8.4 裂纹缺陷	157
8.4.1 热裂	157
8.4.2 冷裂	158
8.5 其他缺陷	159
8.5.1 铸件脆断 (包括氢脆)	159
8.5.2 表面脱碳	159
8.5.3 冷隔	160
8.5.4 浇不足 (欠铸)	160
8.5.5 砂眼	161
9 石膏型熔模铸造	162
9.1 石膏型熔模精铸的工艺特点	163
9.2 精密铸造用石膏的性能要求	165
9.2.1 流动性	165
9.2.2 凝结时间	165
9.2.3 强度	166
9.2.4 线膨胀率 (线收缩率)	166
9.2.5 抗裂纹能力	166
9.2.6 发气性	166

1 绪 论

1.1 熔模铸造的发展概况

熔模铸造通常是指采用易溶性物质制作与铸件相同的模样，在模样表面包覆若干层耐火材料，制成型壳，再将模样熔化排出型壳，通过硬化及高温焙烧等工序，获得浇铸用型腔，进而浇铸成型的一种铸造方法。由于模样广泛地采用蜡质材料来制造，故常将熔模铸造称为“失蜡铸造”。同时，熔模铸造所制备的零件表面光洁度好，尺寸精确，因而又常常被称为“熔模精密铸造”。

1.1.1 熔模铸造的历史

熔模精密铸造是在古代失蜡铸造的基础上发展起来的。世界失蜡铸造技术早于4000多年前就已出现，最早使用该方法的为西亚、中国、埃及和印度。作为文明古国，中国是使用这一技术较早的国家之一，远在公元前数百年，我国古代劳动人民就创造了这种失蜡铸造技术，用来铸造带有各种精细花纹和文字的钟鼎、器皿及农具等制品。

1978年在湖北随州市擂鼓墩曾侯乙墓中出土的曾侯乙尊盘，尊通高33.1cm，口径25cm，重约9kg；曾侯乙盘通高24cm，口径57.6cm，重约19.2kg。全套器物通高42cm，口径58cm，重约30kg。曾侯乙尊盘装饰纷繁复杂，铜尊上是用34个部件，经过56处铸接、焊接而连成一体，尊体上装饰着28条蟠龙和32条蟠螭，铜盘盘体上共装饰了56条蟠龙和48条蟠螭，是春秋战国时期最复杂、最精美的青铜器件。同年，河南浙县下寺楚墓中出土一套7件用失蜡法铸造的列鼎，造型装饰艺术相同，大小依次排列，其中最大的一件是王子午鼎。该鼎通高76cm，口径66cm，鼎上攀附6条龙形兽，图1-1是采用失蜡铸造制作的曾侯乙尊盘和王子午鼎。

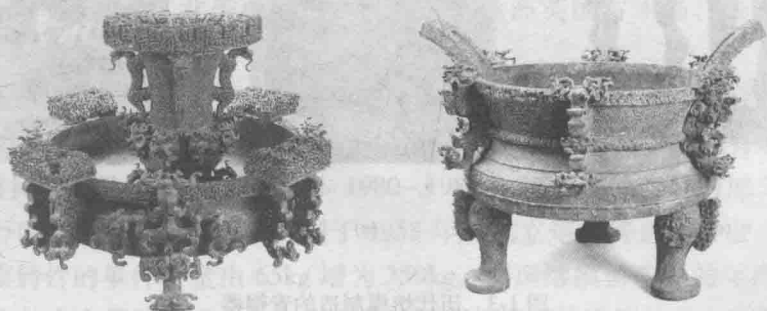


图 1-1 曾侯乙尊盘和王子午鼎

战国、秦汉以后，失蜡法更为流行，甚至于普通的农具的生产也采用该方法来实现，如图 1-2 所示。尤其是隋唐至明、清期间，铸造青铜器所采用的也大多是熔模铸造方法，如图 1-3 所示。

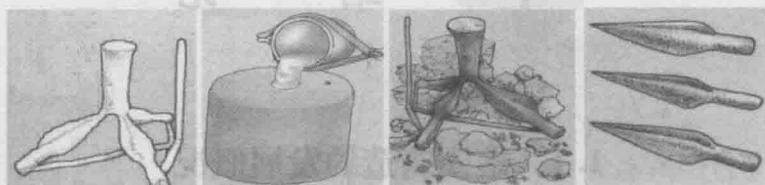


图 1-2 失蜡法制作农具示意图



图 1-3 历代熔模制造的青铜器

- (a) 铜错金博山炉 (汉); (b) 长信宫灯 (汉); (c) 弥陀鍍金铜像 (隋);
 (d) 浑天仪 (明); (e) 武当真武帝君像 (明); (f) 故宫太和门铜狮 (清)

中国传统的熔模铸造技术对世界的冶金发展有很大的影响。在西非，大约 11 世纪以后，制造了大量的熔模铸件，在 16 世纪时，熔模铸造工艺被艺术家和雕刻家们广泛运用，蔡利尼所制造的帕修斯仙座和女妖首领的铜像就是其中最杰出的作品之一，如图 1-4 所示。

19 世纪末期，熔模铸造工艺结合离心浇注技术，开始用于生产牙科铸件。20 世纪初为生产出更粗密的牙科件，人们开始研究影响蜡模和型壳尺寸稳定性的因素，以及一些金属和合金的凝固收缩性能，20 世纪 30 年代初调整了熔模使用的材料。从 1900 年到 1940 年这方面的专利就多达 400 件以上。珠宝首饰行业也广泛采用熔模铸造技术。



图 1-4 帕修斯仙座和女妖首领铜像

1.1.2 现代熔模铸造

现代工业的熔模精密铸造，就是从传统的失蜡法发展而来的。虽然无论在所用蜡料、制模、造型材料、工艺方法等方面，它们都有很大的不同，但是它们的工艺原理是一致的。20 世纪 40 年代，美国工程师奥斯汀创立以他命名的现代熔模精密铸造技术时，曾从中国传统失蜡法得到启示。这也开启了现代熔模铸造方法在工业生产中的广泛应用。

第二次世界大战期间，兵工制造业对铸造零件性能和批量的需求使得熔模铸造得到了迅速的发展。同时，航空喷气发动机要求制造如叶片、叶轮、喷嘴等形状复杂、尺寸精确以及表面光洁的耐热合金零件。由于耐热合金材料难于机械加工、零件形状复杂，以致不能或难于用其他方法制造，所以航空工业的发展也推动了熔模铸造的不断改进和完善。另外，熔模铸造还可应用于其他工业部门，特别是电子、石油、化工、能源、交通运输、轻工、纺织、制药、医疗器械、泵和阀等部门。之后的半个世纪，熔模铸造行业一直以较快的速度发展着。据报道，1996 年世界熔模铸造业（不包括前苏联）北美占 50%、欧洲 25%、亚洲 20%、其余 5%，北美中美国占 95%，而欧洲英国占 42%、法国 26%、德国 19%、意大利 7%、其余 6%。

20 世纪 80 年代是美国熔模铸造增长最快的时期，据美国熔模铸造协会的统计 1984~1990 年美国熔模铸造产量和产值年平均增长率分别为 8%~10% 和 18%。现有熔模铸造厂家 400 多个，熔模铸件产量约 15 万吨。日本 1980~1989 年熔模铸件产量增加 3 倍，熔模铸件年产量近 1 万吨，产值 4 亿美元。英国于 1958 年就成立熔模铸造师协会，由于采用机器制壳，使熔模铸件的单件质量由 65kg 增为 350kg。德国熔模铸造业的年产值为 2 亿美元，其中 13% 为航空产品的超级合金。西方发达国家的熔模铸造厂技术水平先进，如英国就有一半的工厂是由机器人操作控制主要工序生产，产品档次高，产品中超级合金和非铁合金材质所占的比重大。

我国是一个制造大国，熔模铸造在我国基础工业中起着举足轻重的作用。20 世纪五六十年代，我国开始将熔模铸造应用于工业生产。其后这种先进的铸造工艺得到巨大的发展，相继在航空、汽车、机床、船舶、内燃机、汽轮机、电讯仪器、武器、医疗器械以及刀具等制造工业中被广泛采用，同时也用于工艺美术品的制造。图 1-5 所示为熔模铸造技术生产的涡轮叶片和散热器部件。

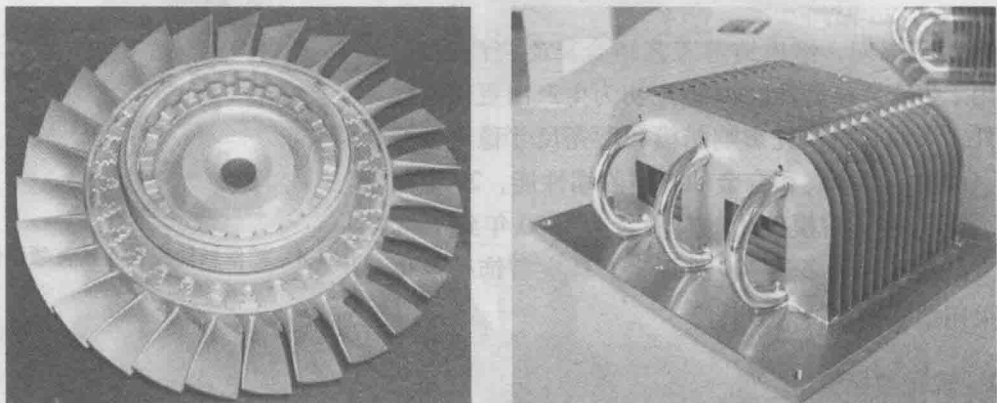


图 1-5 现代熔模铸造技术的产品

随着技术发展，熔模铸造不仅能生产小型铸件，而且能生产较大铸件，最大的熔模铸造的轮廓尺寸已近 2m，最小壁厚不到 2mm。同时熔模铸件也更趋精密，“精密、大型、薄壁”是现代熔模铸造所具有的鲜明特点。同时，熔模铸造又在生产低成本件和快速生产上有了新的突破。熔模铸造的迅速发展是依靠其技术发展和技术进步取得的。熔模铸造工艺的各个环节都有长足的进步，对熔模铸造发展有较大影响的新材料、新工艺、新设备也很多，如水溶性型芯、陶瓷型芯、金属材质改进、大型熔模铸造技术、钛合金熔模铸造、定向凝固和单晶铸造、过滤技术、热等静压、快速成型技术、计算机在熔模铸造中应用以及机械化自动化等。涡轮叶片就是一个很好的例子，涡轮叶片材质和工艺的进步使其性能得到了很大的提高。这些都使熔模铸造的应用面得以扩大，从而在与其他工艺的竞赛中处于较有利的地位，前景光明，利润可观。

1.2 熔模铸造的工艺流程及特点

1.2.1 熔模铸造的工艺流程

熔模铸造生产的完整工艺流程如图 1-6 所示。其主要的操作工序如下：

- (1) 工艺设计。根据给定零件图，按照熔模铸造的特点，设计零件的铸造工艺。
- (2) 压型设计及制造。根据铸造工艺要求，选定压型材质，设计及加工成型部分、定位机构、起模机构及浇注系统等。
- (3) 熔模制作。将液态或膏状模料通过模料压注装置压入压型，冷却凝固后开模取样。

- (4) 熔模组合。将单个熔模组合到一起，实现一型多模。
- (5) 挂涂料及撒砂。将模组浸入或表面刷涂一层涂料，然后撒上一层耐火材料，干燥硬化后，重复该步骤数次，制得型壳。
- (6) 脱模。将可熔性模组熔化流出型壳，获得浇铸用型腔。
- (7) 焙烧。将型壳放入加热炉中升温焙烧。
- (8) 浇注。将熔炼好的合金浇入型腔，获得铸件。
- (9) 后处理。脱壳后对铸件进行浇冒口切除、清理及检验等后续工艺。

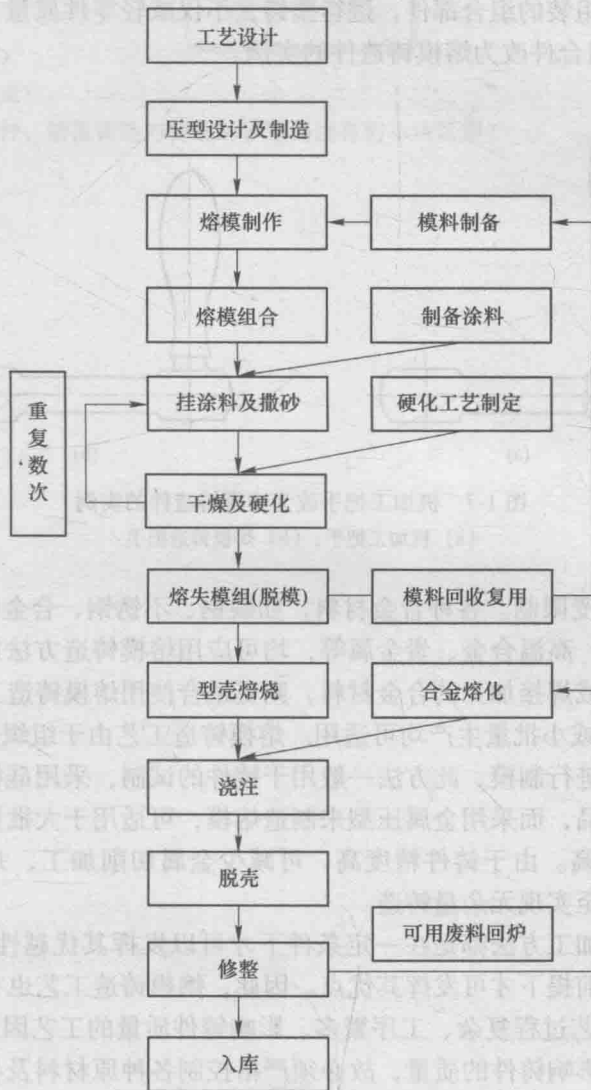


图 1-6 熔模铸造生产的工艺流程图

1.2.2 熔模铸造的特点

熔模铸造由于具有以下优点而被广泛使用：

(1) 铸件的尺寸精度高, 表面粗糙度小。由于熔模铸造采用尺寸精确、表面光滑的可熔性模, 进而获得无分型面的整体浇注型腔, 因此, 避免了一般铸造方法中的起模、下芯、合型等工序所带来的尺寸误差。熔模铸件的棱角清晰、尺寸精度可达 CT4~7, 尺寸公差可小于 $\pm 0.005\text{cm/cm}$ 。表面粗糙度可达 $Ra1.25\mu\text{m}$ 。

(2) 适用于铸造某些结构、形状复杂的铸件。熔模铸造可铸出结构形状复杂、难以用其他方法加工的铸件, 如叶轮、空心叶片等, 熔模铸造能铸造出壁厚仅为 0.5mm 、铸出孔最小直径达 0.5mm 以下的铸件, 质量小至 1g , 大至 1t 的铸件也可铸出, 还可将原来由许多零件组合、焊接、组装的组合部件, 进行整铸, 不仅减轻零件质量, 而且提高效率。图 1-7 是把手由机加工组合件改为熔模铸造件的实例。

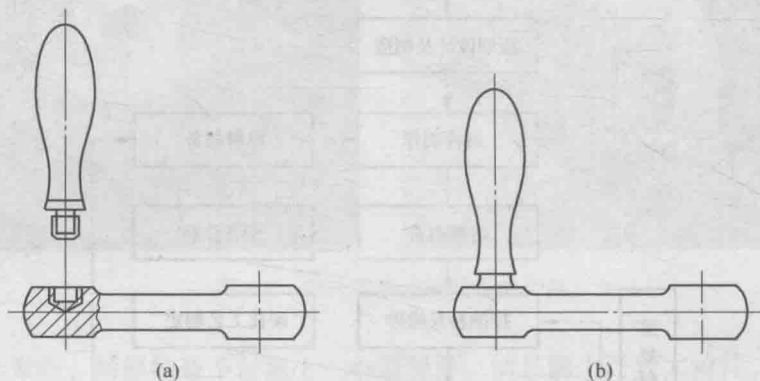


图 1-7 机加工把手改为熔模铸造件的实例

(a) 机加工把手; (b) 熔模铸造把手

(3) 合金材料不受限制。各种合金材料, 如碳钢、不锈钢、合金钢、铸铁、铜、铝合金、镁合金、钛合金、高温合金、贵金属等, 均可应用熔模铸造方法加工为铸件, 特别是对于难以切削、锻造或焊接加工的合金材料, 则更适合使用熔模铸造工艺加工。

(4) 大批量生产或小批量生产均可适用。熔模铸造工艺由于组织生产较为容易, 可采用成本较低的石膏型进行制模, 此方法一般用于铸件的试制, 采用硅橡胶压型则用来制作贵金属首饰和艺术品, 而采用金属压型来制造熔模, 可适用于大批量生产。

(5) 工艺出品率高。由于铸件精度高, 可减少金属切削加工, 并节省金属材料的消耗, 提高出品率, 甚至实现无余量铸造。

但是, 任何一种加工方法都是在一定条件下才可以发挥其优越性, 在满足性能要求, 又兼顾成本和能源的前提下才可发挥其优点。因此, 熔模铸造工艺也有其局限性:

(1) 熔模铸造工艺过程复杂、工序繁多、影响铸件质量的工艺因素多, 其中任何一个环节出现问题, 都会影响铸件的质量, 故必须严格控制各种原材料及各项工艺的操作, 才能稳定生产。

(2) 在生产大型铸件时, 由于熔模过大, 易变形, 所制型壳过大, 会导致搬运及操作等各环节的实施难度增大。

(3) 型壳透气性较差, 易造成铸件的浇不足和气孔缺陷, 因此常用真空吸铸的方法进行浇注。

(4) 铸件冷却速度慢, 故铸件晶粒粗大, 会给铸件的力学性能带来不利影响, 碳钢件还会造成表面脱碳。

(5) 生产周期长, 污染环境。熔模铸造通常需经过挂涂料—撒砂—干燥硬化环节的多次进行, 因此其生产周期长, 生产效率低。采用水玻璃型壳, 氨干时氨气会污染环境, 蜡基模料回收复用时, 如采用电解处理法, 会生产氯气, 脱壳时的噪声和粉尘也会使生产人员的工作环境受到污染。

复习思考题

1-1 熔模铸造有何优缺点?

1-2 作为特种铸造的一种, 熔模铸造与普通的砂型铸造有何本质区别?

2

熔模的制造

熔模铸造是采用可溶性熔模制造型壳，且每生产一个铸件就需要制备一个熔模，形成尺寸精确的型壳，并且内表面光滑，都离不开熔模的制造。由此可见，影响熔模制造的各个环节（熔模的材料种类、质量优劣、压制工艺等）都会影响到熔模的形状及性能，进而影响铸件的质量。同时，熔模的制造作为生产中的第一道环节，可以看做是压型中进行一次模料浇注成型的过程。

2.1 模 料

2.1.1 对模料性能的要求

2.1.1.1 熔化温度

模料的熔化温度及凝固温度区间应适中，一般在 $50\sim 90^{\circ}\text{C}$ 为佳，以利于模料配制及脱模时熔化工序方便。

2.1.1.2 凝固的温度区间

凝固温度区间不宜过窄或过宽，一般应选择在 $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ 范围内，以便于压型中压制熔模工艺的进行。

2.1.1.3 热稳定性（软化点）

热稳定性是指模料随温度升高时，抗变形的能力常用软化点或软化温度来表示（软化温度：标准模料试样按规定悬臂式地放置在热变形测定仪上，经2h后下垂2mm时的保温温度）。软化点要高于工作环境温度 10°C 以上，一般在 40°C 以上，保证制备好的熔模在存放过程中不发生变形。

2.1.1.4 流动性

模料在工作温度下应具有良好的流动性，充型时能够很好地充填压型型腔，使得熔模棱角清晰，尺寸精确，脱模时顺利地型壳中流出。在充型流动时的温度变化过程中，流动性变化应较小，以保证获得表面光洁的熔模，要控制模料流动速度，避免高流速导致的模料飞溅、紊流，致使熔模表面出现气泡、流痕等缺陷，常通过黏度来衡量。

2.1.1.5 收缩率

小的收缩率能够保证熔模达到应有的尺寸精度，不会在模样表面出现缩凹、扭曲变形等缺陷，且在脱蜡过程中不会因为模料的膨胀导致型壳的胀裂，一般应小于1%。熔模铸造用模料的收缩率常用“圆饼试样”在一定温度范围内冷却时的直径变化百分率表示。

2.1.1.6 强度

足够的强度是保证制模、制壳等生产过程中熔模不发生变形、断裂甚至损坏。通常用