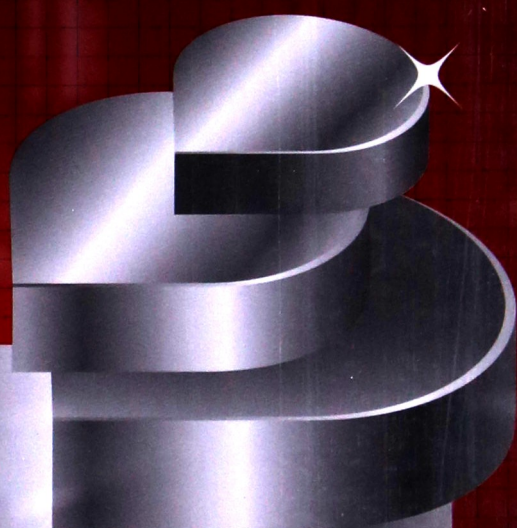


# 熔模

## 精密铸造实践

RONGMU JINGMI ZHUZAO SHIJIAN

车顺强 景宗梁 编著



机械工业出版社

# 熔模精密铸造实践

车顺强 景宗梁 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

熔模精密铸造是一种少切削、无切削的铸造工艺，是铸造行业中的一项优异的工艺技术。

本书紧密结合当前铸造技术的发展和应用情况，深入浅出地介绍了熔模精密铸造过程中涉及的原辅材料计算方法、熔炼浇注工艺，给出了提高精铸件质量的新工艺、新材料、操作细则和专项技术。

本书既有原理的叙述、工艺参数的给出，也有工厂的应用实例，可供铸造领域的技术人员、管理人员以及企业技术工人在实践中参考。

#### 图书在版编目 (CIP) 数据

熔模精密铸造实践/车顺强，景宗梁编著. —北京：  
化学工业出版社，2015. 7  
ISBN 978-7-122-24148-1

I. ①熔… II. ①车…②景… III. ①熔模铸造  
IV. ①TG249. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 115183 号

---

责任编辑：刘丽宏

责任校对：王素芹

装帧设计：刘丽华

---

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 装：大厂聚鑫印刷有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 11½ 字数 303 千字 2015 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

---

定 价：68.00 元

版权所有 违者必究

京化广临字 2015——16 号

熔模精密铸造是一种能生产精密铸件的近净形工艺,在我国有着悠久历史,是我国人民为世界铸造业做出的重大贡献之一。特别是 20 世纪 90 年代以后,我国铸造工程技术人员充分吸收国外熔模铸造的新技术、新工艺,使熔模铸造在工业生产领域的应用日益广泛。

本书的作者长期从事熔模铸造生产一线工作,积累了丰富的工艺经验和技術实例。本书以国内多家铸造企业精铸件实际铸造工艺为研究素材,归纳总结出各类精铸件的典型工艺,提出了工艺设计原则和设计方法,列举了典型精铸件工艺设计的成功案例。书中从基本工艺出发,对操作中的细节给出详尽解读,有原理的叙述,有工艺参数的给出,有在工厂应用的实例,给出了提高精铸件质量的新工艺、新材料、操作细则和专项技术。

书中许多内容,曾在全国铸造专业期刊上公开发表。对今天许多工厂把工艺技术和绝招秘而不宣起来而言,本书是非常宝贵的;是值得推介给广大读者的。

本书技术内容实践性强,涉及面宽,在一定程度上反映了我国精铸件工艺设计和现场质量控制水平。书中所介绍的典型工艺和设计原则并非被认定为标准工艺,它只是在铸造生产中相对先进的工艺,其对精铸件的生产无疑具有良好的参考价值。

全书内容翔实,注重实践环节兼有理论分析,可供高校院所材料成型专业师生和生产企业工程技术人员、生产车间操作者参考。

希望该书对读者有所启发,有所提高,为提升铸件质量发挥积极作用。

西安理工大学 教授 魏兵



熔模铸造技术发源于西亚和古代中国,繁荣于现代的欧美,现今又在我国得到迅速的发展,并形成了专门的产业。现在无论在欧美,还是在中国都非常重视熔模铸造技术的应用和开发,生产的熔模精密铸造件已向结构复杂化、精密化、大型化和整体化方向发展,生产过程也向机械化、自动化的方向发展,已能铸出直径大于1.5m和重达900kg以上的超大合金钢铸件,铸出的铝合金件尺寸已达850mm×500mm×500mm,壁厚不到2mm。航空、航天、燃气轮机、涡轮增压器等高温合金、钛合金、铝合金的高质量要求的精密铸件生产已经离不开熔模铸造技术。

北美和欧洲以航空航天铸件为支撑,拥有占全球25%的精铸厂,占全球总产值的63%,铸件的附加值很高。

我国熔模精密铸造通过半个世纪的发展,取得可喜的、长足的进步。据最新行业统计资料显示,采用第一类硅溶胶黏结剂工艺方法,生产航空、航天、燃气轮机、涡轮增压器等高温合金、钛合金、铝合金的高端精铸件的生产厂点70个,产值32亿元;采用第一类精铸工艺方法,生产出口商用精铸件为主的不锈钢、低合金钢的各类机械和日用五金的商用精密铸件,生产厂630个,产量23万吨,产值164亿元。采用第二类水玻璃黏结剂精铸工艺方法,生产各类机械和阀门的碳钢和低合金钢形状复杂的中小型毛坯铸件,生产厂1700个,产量126万吨,产值164亿元。

由此可见,高附加值的高质量精铸件,主要集中在航空、航天和船舶制造业领域,其中以航空发动机的涡轮叶片及热端部件和燃气轮机的压气机、燃烧室及涡轮为主。目前,中国熔模精密铸造水准与日俱进,体现在采用CAD计算机辅助设计,压型制造采用CAM计算机数值控制,三坐标、加工中心已经得到广泛应用,真空熔炼炉、光谱仪、力学性能检测、荧光检测、X射线检测已经十分普遍,CAE计算机静态和动态结构分析、铸件充型凝固过程数值模拟发展已进入工程实用阶段,铸造生产正在由凭经验走向科学理论指导,激光快速成型技术迅速发展,50t高压注蜡机、50kg三室等轴晶真空炉、陶芯压制成型机、高压脱芯釜等先进设备不断涌现,相信我国从精铸大国到精铸强国的进程会日益加快。

本书是笔者在《熔模铸造论文集》的基础上进行系统整理编写而成,目的是将熔模精密铸造的实践和体会介绍给同行,使之更好地为精铸生产服务。

本书编写得到朱锦伦、温耀信先生的大力支持,谨表示衷心的感谢。魏兵教授为本书撰写序,谨致以深切的谢意。

由于本人水平所限,书中难免有疏漏之处,热忱希望读者提出宝贵意见。

编著者

## 第1章 熔模铸造工艺

1

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 1.1 熔模铸造发展概况 .....      | 1  |
| 1.1.1 发展历史 .....        | 1  |
| 1.1.2 现代熔模铸造 .....      | 1  |
| 1.2 熔模铸造的工艺过程 .....     | 2  |
| 1.3 熔模铸造工艺的特点 .....     | 2  |
| 1.4 熔模制造对模料的要求 .....    | 3  |
| 1.5 模料 .....            | 3  |
| 1.5.1 蜡基模料 .....        | 3  |
| 1.5.2 石蜡-低分子聚乙烯模料 ..... | 4  |
| 1.5.3 树脂基模料 .....       | 5  |
| 1.5.4 填料模料 .....        | 5  |
| 1.6 制壳耐火材料 .....        | 6  |
| 1.7 熔模铸造用黏结剂 .....      | 8  |
| 1.7.1 水玻璃黏结剂 .....      | 8  |
| 1.7.2 硅溶胶黏结剂 .....      | 8  |
| 1.7.3 硅酸乙酯黏结剂 .....     | 9  |
| 1.8 熔模铸造用硬化剂 .....      | 9  |
| 1.9 熔模铸造用涂料 .....       | 10 |

## 第2章 熔模铸造型壳制造

11

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 2.1 型壳铸造的基本情况 .....       | 11 |
| 2.2 水玻璃型壳的铸造实践 .....      | 11 |
| 2.2.1 正辛醇能改善涂挂性 .....     | 13 |
| 2.2.2 磷酸氢二钠能提高型壳强度 .....  | 16 |
| 2.2.3 水玻璃工艺的改进及质量控制 ..... | 17 |
| 2.2.4 水玻璃黏结剂工艺的严细操作 ..... | 19 |
| 2.2.5 水玻璃型壳新型硬化剂 .....    | 22 |
| 2.2.6 水玻璃工艺的新开发 .....     | 26 |
| 2.3 硅溶胶型壳的铸造 .....        | 28 |
| 2.3.1 对型壳性能的要求 .....      | 28 |
| 2.3.2 校正插块的应用 .....       | 30 |
| 2.3.3 大平面上设置工艺钉 .....     | 31 |
| 2.3.4 支撑架铸件的铸造工艺 .....    | 32 |
| 2.3.5 调节臂铸件的工艺改善 .....    | 33 |
| 2.3.6 狭槽灌浆工艺 .....        | 35 |

|        |                        |    |
|--------|------------------------|----|
| 2.3.7  | 大平面铸件的表面涂层强化处理         | 36 |
| 2.3.8  | 熔模铸造麻点麻坑缺陷的持续工艺改善      | 37 |
| 2.3.9  | 熔模铸造表面层制壳工艺的研究         | 40 |
| 2.3.10 | 锆英粉+熔融石英粉混合浆料的应用       | 45 |
| 2.3.11 | 带狭窄内腔叶轮的灌砂             | 51 |
| 2.3.12 | 涡轮熔模铸造生产过程的工艺控制        | 51 |
| 2.3.13 | 硅溶胶熔模铸造工艺的改进措施         | 55 |
| 2.3.14 | 对熔模铸造现行制壳工艺的改进和讨论      | 60 |
| 2.3.15 | 熔模铸造负压充型-加压凝固工艺生产发动机叶轮 | 62 |
| 2.3.16 | 面层喷浆                   | 65 |
| 2.3.17 | 复合型壳工艺                 | 66 |
| 2.3.18 | 硅溶胶涂料的质量控制及管理          | 66 |
| 2.3.19 | 有气密性要求的精铸件工艺           | 68 |

### 第3章 熔模铸造表面层耐火材料

73

|       |                              |    |
|-------|------------------------------|----|
| 3.1   | 精铸专用砂(粉)替代锆英砂(粉)的应用实践        | 73 |
| 3.1.1 | 迎接挑战挖潜降成本                    | 73 |
| 3.1.2 | 精铸专用粉浆料的配制                   | 73 |
| 3.1.3 | 精铸专用粉浆料的特性与维护                | 74 |
| 3.1.4 | 精铸专用砂(粉)的生产应用                | 74 |
| 3.1.5 | 结果与讨论                        | 77 |
| 3.1.6 | 经济效益分析                       | 78 |
| 3.2   | 改性刚玉粉脱壳性改善的应用研究              | 79 |
| 3.2.1 | 刚玉粉面层脱壳性差的缘由                 | 79 |
| 3.2.2 | 利用面层材料内部相变机理降低残留强度的方法探讨      | 79 |
| 3.2.3 | 锆砂不锈钢面层及熔融石英碳钢面层脱壳性良好的原因及启示  | 80 |
| 3.2.4 | 严格按防粘砂理论对刚玉粉进行改性处理           | 80 |
| 3.2.5 | 试验结论                         | 80 |
| 3.3   | 降低烧结温度及玻璃相对刚玉面层脱壳性的影响        | 81 |
| 3.3.1 | 刚玉面层脱壳性差的机理                  | 81 |
| 3.3.2 | 材料内部相变微裂纹机制解决刚玉与面层脱壳性        | 81 |
| 3.3.3 | 仿照锆砂面层高温形成玻璃相解决刚玉面层脱壳性       | 82 |
| 3.3.4 | 外加物质生成足量玻璃相解决刚玉面层脱壳性         | 82 |
| 3.3.5 | 结论                           | 84 |
| 3.4   | 钛合金熔模铸造耐火材料的研究               | 84 |
| 3.4.1 | 早期的研究——以石墨材料为主的阶段            | 84 |
| 3.4.2 | 中期的研究——以钨面层为主的多种材料和工艺阶段      | 84 |
| 3.4.3 | 近期的研究——以 $Y_2O_3$ 为主的熔模陶瓷型阶段 | 84 |
| 3.4.4 | 耐火材料的发展                      | 85 |

### 第4章 熔模铸造的型芯

86

|     |             |    |
|-----|-------------|----|
| 4.1 | 熔模铸造对型芯的要求  | 86 |
| 4.2 | 熔模铸造用型芯的分类  | 86 |
| 4.3 | 熔模铸造型芯的应用实践 | 86 |

|       |                    |    |
|-------|--------------------|----|
| 4.3.1 | 自制型芯               | 86 |
| 4.3.2 | 采用处理后一般型砂工艺生产精铸件   | 88 |
| 4.3.3 | 自硬型芯工艺在异型铸件生产中的应用  | 89 |
| 4.3.4 | 熔模铸造工艺应用树脂砂型芯      | 92 |
| 4.3.5 | 精铸覆膜砂型芯的开发应用       | 93 |
| 4.3.6 | 热压成型型芯             | 95 |
| 4.3.7 | 二元复合型芯             | 96 |
| 4.3.8 | 砂浆自硬型芯工艺           | 97 |
| 4.3.9 | 填料中氧化钠含量对陶瓷型芯质量的影响 | 99 |

第5章 熔模铸造的熔炼

100

|       |                      |     |
|-------|----------------------|-----|
| 5.1   | 铸钢的分类                | 100 |
| 5.1.1 | 按化学成分来分              | 100 |
| 5.1.2 | 铸件的牌号                | 100 |
| 5.1.3 | 铸钢的力学性能              | 100 |
| 5.2   | 铸钢的熔炼                | 101 |
| 5.2.1 | 金属材料                 | 101 |
| 5.2.2 | 气体和非金属夹杂物对碳素钢力学性能的影响 | 102 |
| 5.3   | 铸钢熔炼的应用实践            | 105 |
| 5.3.1 | 炉底吹氩气精炼              | 105 |
| 5.3.2 | 对中频感应电炉脱氧的再认识        | 107 |
| 5.4   | 真空熔炼                 | 110 |
| 5.5   | 钛合金熔炼                | 111 |
| 5.5.1 | 水冷铜坩埚凝壳熔炼            | 111 |
| 5.5.2 | 热源种类                 | 111 |
| 5.5.3 | 感应凝壳熔炼               | 112 |
| 5.5.4 | 钛合金真空熔炼研究            | 112 |

第6章 浇注补缩系统的设计

114

|       |                  |     |
|-------|------------------|-----|
| 6.1   | 浇注补缩系统设计要点       | 114 |
| 6.2   | 熔模铸造浇注补缩系统设计应用实践 | 114 |
| 6.2.1 | 有气密性要求的精铸件工艺     | 114 |
| 6.2.2 | 抗氧化钢铸件的熔模铸造工艺    | 118 |
| 6.2.3 | 阀门精铸件浇注系统设计实践    | 122 |
| 6.2.4 | 冒口的设计与计算         | 124 |
| 6.2.5 | 航空件浇注系统设计和实践     | 131 |
| 6.2.6 | 叉形铸件环形内浇道的应用     | 135 |
| 6.2.7 | 发动机用钛合金部件精密铸造工艺  | 136 |
| 6.2.8 | CAE 技术在熔模铸造上的应用  | 138 |
| 6.3   | 浇注系统设计经验小结       | 138 |

第7章 熔模铸造生产应用实例

140

|     |      |     |
|-----|------|-----|
| 7.1 | 模料处理 | 140 |
|-----|------|-----|

|             |                               |            |
|-------------|-------------------------------|------------|
| 7.1.1       | 问题的提出 .....                   | 140        |
| 7.1.2       | 实验与机理 .....                   | 140        |
| 7.1.3       | 红蜡处理工艺参数 .....                | 142        |
| 7.1.4       | 操作程序 .....                    | 142        |
| 7.1.5       | 验证和结果 .....                   | 142        |
| 7.1.6       | 模料酸值测定方法 .....                | 143        |
| 7.1.7       | 分析方法 .....                    | 143        |
| 7.2         | 全自动低温蜡压蜡机的应用体会 .....          | 143        |
| 7.2.1       | 结构原理及工艺参数 .....               | 144        |
| 7.2.2       | 生产实例及工艺参数 .....               | 144        |
| 7.2.3       | 应用体会 .....                    | 145        |
| 7.3         | 低温蜡六工位全自动射蜡机的研制及应用 .....      | 145        |
| 7.3.1       | 设计布局 .....                    | 146        |
| 7.3.2       | 应用效果 .....                    | 147        |
| 7.4         | 精铸设备的节能改进 .....               | 148        |
| 7.5         | 第三代脱模剂和清洗剂的研发和应用 .....        | 149        |
| 7.6         | 二苯基碳酰二肼显色剂稳定性的改进 .....        | 152        |
| 7.7         | 熔模铸钢 2Cr13 的热处理 .....         | 155        |
| 7.8         | 覆膜砂型芯在熔模铸造中的应用 .....          | 157        |
| <b>附录一</b>  | <b>数理统计在化学实验室的应用</b> .....    | <b>161</b> |
| <b>附录二</b>  | <b>金相法测试镀层</b> .....          | <b>165</b> |
| <b>附录三</b>  | <b>用光谱仪检测材料元素时的注意事项</b> ..... | <b>168</b> |
| <b>附录四</b>  | <b>熔炼工上岗技能培训</b> .....        | <b>169</b> |
| <b>参考文献</b> | .....                         | <b>175</b> |



## 第1章

# 熔模铸造工艺



### 1.1 熔模铸造发展概况

#### 1.1.1 发展历史

熔模铸造又称熔模精密铸造、失蜡铸造，是一种近净形的液态金属成型工艺，应用该工艺获得的每个铸件都是经多种工序、多种材料、多种技术共同协作综合的结果。熔模铸造是在可熔（溶）性模的表面重复浸涂上数层耐火浆料，经过逐层撒砂、干燥和硬化后，用蒸汽或热水等加热方法将其中的熔模去除而制成整体型壳，然后进行高温焙烧、浇注而获得铸件的一种铸造方法。由于用这种方法所得到铸件的尺寸精确、棱角清晰、表面光滑、接近于零件的最终形状，因此是一种近净形铸造工艺方法，故又称为精密铸造。

世界失蜡铸造技术远在 4000 多年前就已经出现，最早应用失蜡法的是西亚（苏美尔人）、古代中国、埃及和印度。

我国的失蜡铸造技术，最早应用于春秋早、中期，用来铸造生产各种青铜器皿、钟鼎及艺术品，其造型复杂华丽、纹饰细致精巧，铭文美观清晰，充分显示出当时我国的失蜡铸造技术及冶炼工艺就已有了高度发展。

我国古代的失蜡铸造艺术珍品十分丰富，如隋代开皇四年，董钦造鎏金铜佛坛，坛高 41cm，座长 24.7cm，宽 24cm，整座佛坛为青铜鎏金。明代永乐，大威德金刚亥母鎏金佛像，高 41.5cm，铜鎏金。

#### 1.1.2 现代熔模铸造

现代熔模铸造工艺在 20 世纪开始形成，最初是牙科医生用熔模制造方法浇注金银假牙齿、制作珠宝首饰。

第二次世界大战期间，用熔模铸造工艺生产出喷气涡轮发动机叶片、涡轮增压器等形状复杂、尺寸精确、表面质量很高且不易加工的铸件。此后，熔模铸造以其工艺及技术上的优势进入航空、国防及机械制造工业领域。

进入 21 世纪以来，世界各地的熔模铸件的质量、产量、产值都有较大增长和提高。当前熔模精密铸造业正向精密、复杂、大型、部件整铸的方向发展，这样也就更能充分发挥熔模铸造所具有的技术优势和竞争力。从近 10 多年世界各国的熔模铸造业的发展和增长趋势及国际市场对熔模铸件的质量和需求量不断提升的情况看，今后若干年的发展速度仍将较快。

我国的熔模铸造在 20 世纪 50 年代从苏联引进水玻璃黏结剂制壳工艺，开始应用于工业生产，经过数十年的努力，二十年来，新型优质黏结剂、新技术、新工艺、新设备、新材料的应



用,使我国的熔模铸造有了较优迅速的发展,应用范围不断扩大。目前熔模铸造工艺已在航空、航天、机械制造、汽车、船舶、医疗、体育、电子、石油、化工、核能、兵器等几乎所有工业部门中得到广泛应用。近年来,在制壳机械化及自动化方面也有一定的进展,悬链式连续制壳和干燥线及机械手自动沾浆、撒砂制壳生产线,已开始投入实际生产应用。

近十年来,我国的熔模铸造在继承古代传统工艺的基础上,应用现代的工艺技术,复制出精美的古仿物及艺术品,使精铸工艺技术重现光辉,展示出广阔的前景。

## 1.2 熔模铸造的工艺过程

- (1) 压型设计 根据零件的铸造工艺设计图要求,设计压型。
- (2) 制造压型 根据压型设计图纸要求,加工钢材压型或铝合金压型或其他材料压型。
- (3) 制造熔模 用液压射蜡机或气动压蜡机,将糊膏状或液状蜡料注入压型,制成熔(蜡)模。
- (4) 焊接组装模组 把蜡模焊接或粘接到预制好的蜡棒(或浇注系统)上,组合成模组。
- (5) 消脂 将模组浸入专用脱脂液中,使蜡模表面的油脂、脱模剂除去,以增加蜡模的涂挂性。
- (6) 制造型壳 在模组表面浸涂上耐火涂料(浆料),并撒上一层砂(锆砂、刚玉砂、硅砂等),再将已撒上砂粒的模组经过干燥硬化(硅溶胶型壳),在硬化剂中使涂层硬化(水玻璃型壳)或经氨气干燥硬化(硅酸乙酯型壳),然后取出在空气中干燥,这样重复数次,在模组表面结成一定厚度的型壳。
- (7) 熔失熔模 将已制成的型壳,放入蒸汽或热水中加热,将蜡模全部熔化,得到内部有空腔的型壳。
- (8) 型壳焙烧 将型壳放入加热炉中进行高温焙烧,以烧去型壳中的残余蜡料、各种挥发物以及水分,以增加型壳的透气性和提高型壳的高温强度。
- (9) 液体金属浇注 将已熔化的化学成分合格的高温金属液浇注到已焙烧充分的热型壳中。
- (10) 脱壳与清理 用手工或震动脱壳机脱壳、清砂、切割浇冒口后的铸件,再经其他的清理和后处理工序。
- (11) 检验 铸件最后须经检验合格,才可入库。

## 1.3 熔模铸造工艺的特点

熔模铸造工艺具有以下优点。

(1) 熔模铸件的尺寸精度高,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,而获得了无分型面的整体型壳,且避免了砂型铸造中的起模、下芯、合型等工序带来的尺寸误差,熔模铸件的棱角清晰、尺寸精度可达到 CT4~6 级,表面粗糙度可达  $R_a 0.8 \sim 1.25 \mu\text{m}$ 。所以,熔模铸造所生产的铸件已较接近于零件最终形状,可以减少铸件的加工工作量,并节省金属材料的消耗。

(2) 适用于铸造结构形状复杂、精密的铸件 熔模铸造可铸造出结构形状复杂、精密,并难于用其他方法生产加工的铸件,如各类涡轮、叶轮、空心叶片、定向凝固叶片、单晶叶片等,也可以铸造壁厚为 0.5mm,铸孔最小为 1mm 的小铸件,质量小至 1g,最大至 1000kg,外形尺寸可达 2000mm 以上的铸件,还可以将原来由许多零件组合的部件,进行整体铸造。

(3) 合金材料不受限制 各种合金材料,例如碳钢、合金钢、不锈钢、高温合金、铜合金、铝合金、镁合金、钛合金、贵金属、铸铁等均可以应用熔模铸造方法生产铸件,特别是对于难以切削加工的合金材料,更适合于熔模铸造工艺。

(4) 大、小批量生产均可适用 熔模铸造工艺由于普遍采用金属压型来制造熔模,故适用于大批量生产,但应用价格低廉的石膏压型、易熔合金压型或硅橡胶压型(常用于艺术品及首饰铸造)来制模,则也可以适用于小批量生产或试生产。

(5) 熔模铸造工艺具有以下局限性。

① 熔模铸造过程复杂、工序多,影响铸件质量的工艺因素多,所以,必须严格控制各种原材料及工艺操作,才能稳定生产。

② 最适用于生产中、小铸件,能铸出最大孔径  $3\sim 5\text{mm}$ ,最大通孔径  $5\sim 10\text{mm}$ ,最大不通孔径  $5\text{mm}$ ,最小铸槽  $\geq 2.5$ ,最小槽深  $\leq 5\text{mm}$ 。

③ 生产周期较长。

④ 铸件的冷却速度较慢,易引起铸件晶粒粗大,碳钢件还容易产生表面脱碳层。

## 1.4 熔模制造对模料的要求

(1) 熔点 模料的熔点及凝固温度区间应适中,熔点一般在  $50\sim 80^{\circ}\text{C}$  范围为宜,模料的凝固温度一般选择在  $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ ,以便配制模料、制模及脱蜡工艺的进行。

(2) 热稳定性 热稳定性是指当温度升高时,模料抗软化变形的能力。蜡基模料的热稳定性常以软点来表示,它是以标准悬臂试样加热保温 2h 的变形量(挠度)达  $2\text{mm}$  时的温度作为软化点,模料软化点一般应比制模车间的温度高  $10^{\circ}\text{C}$  以上为宜。

(3) 收缩率 为了保证熔模达到应有的尺寸精度,要求模料的收缩率小,一般应小于  $1\%$ ,优质模料的线收缩率可达  $0.5\%$  以下,收缩率小则膨胀系数小,也有利于防止型壳在脱蜡时胀裂。

(4) 强度 模料在常温下应有足够的强度,以保证在制模、制壳等生产过程中熔模不会发生破碎、断裂,通常用于小型铸件时,模料的抗拉强度应大于  $1.4\text{MPa}$  ( $14\text{kgf}/\text{cm}^2$ ),用于大型铸件应不低于  $2.5\text{MPa}$ 。若模料测定抗弯强度,应大于  $2.0\text{MPa}$ ,最好为  $5.0\sim 8.0\text{MPa}$ 。

(5) 硬度 模料表面应有一定的硬度,以防生产过程中被碰伤或摩擦损伤,模料硬度通常以针入度表示(针入度:  $1\text{度}=1/10\text{mm}$ ),优质模料的表面硬度可达到  $4\sim 6\text{度}$ ,当然,模料硬度太高,修整性差,易发脆。

(6) 流动性 模料应具有良好的流动性,以利于充满压型的型腔、获得棱角清晰、尺寸准确、表面平滑光洁的熔模,也便于模料在脱蜡时从型壳中流出来。

(7) 涂挂性 模料应很好地为耐火材料所润湿,并形成均匀的覆盖层,模料的涂挂性可用测定熔模与黏结剂间的润湿角来衡量。

(8) 灰分 模料灼烧后的残留物称为灰分,型壳焙烧后,残留在型腔中的模料残灰尽量少,一般应低于  $0.05\%$  (质量比),以免影响铸件表面质量。

(9) 焊接性 熔模组合大多采用焊接法,所以模料应具有良好的焊接性能,以免模组在运输和制壳过程中从焊接处发生断裂。

## 1.5 模料

### 1.5.1 蜡基模料

蜡基模料实际上就是石蜡-硬脂酸模料,常用的配方是石蜡  $50\%$  + 硬脂酸  $50\%$ ,配料要求石蜡 ( $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ ) 应选用熔点  $\geq 58^{\circ}\text{C}$ ,精炼或半精炼白石蜡。硬脂酸 ( $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$ ) 应

选用一级（三压）硬脂酸（块状）。

石蜡是模料的基本成分，加入硬脂酸的作用是由于硬脂酸分子是极性的，它对涂料的润湿性好，能改善模料的涂挂性，并有利于模料热稳定性提高，液态的石蜡与硬脂酸互溶性良好，此种模料的熔点较低，制备方便，制模、脱蜡容易，蜡料回收率高，复用性好。若改变石蜡与硬脂酸的配比，会对模料的性能产生影响，当提高石蜡 10% 的含量时，可使模料的强度增加，当提高石蜡含量超过 80% 时，模料表面易起泡、熔模的表面质量差，并使模料的涂挂性和流动性下降。若提高硬脂酸含量 10% 时，模料的涂挂性、流动性和热稳定性均会有所提高，当硬脂酸含量超过 80% 时，模料的强度很低，韧性也很差，故不能采用。

石蜡-硬脂酸模料的强度和热稳定性不高（软化点为 31℃），而且在使用过程中，硬脂酸易与活泼的金属发生置换反应，也易与碱或者碱性氧化物起中和反应，生成不溶于水的皂化物（硬脂酸盐），使模料变质，而且黏性的皂化物残留在型腔表面，会影响铸件的表面质量。由于皂化反应会消耗模料中的部分硬脂酸，故在模料回用时补加新的硬脂酸，有利于稳定模料的性能。

石蜡-硬脂酸模料的性能除与模料的配比有关外，还受石蜡熔点的影响，如果采用 60℃ 以上石蜡替代 58℃ 石蜡，则模料的强度和热稳定性均有明显提高，且收缩率减小，因而模料的性能得以改善。

石蜡-硬脂酸模料虽有制备方便、制模脱模容易、复用性好等优点，但也有热稳定性不高、易变形，尤其是在生产过程中易皂化变质的缺点，这种模料须经回用处理才能重新使用，回用处理中的残留酸液易污染环境，所以，近年来推出多种无硬脂酸的蜡基模料。

### 1.5.2 石蜡-低分子聚乙烯模料

石蜡-低分子聚乙烯模料的组成为 95% 石蜡 + 5% 低分子聚乙烯，这种模料熔点为 66℃，软化点约为 34℃，低分子聚乙烯的分子量约为 2000~5000，它与石蜡的互溶性很好，用低分子聚乙烯代替硬脂酸配制的蜡基模料，具有强度高、韧性好、熔模表面光滑、化学性能稳定、使用后不会皂化、模料回收方便等优点，这种模料的黏度较大，制模时要适当提高糊状模料的温度和注蜡压力。

蜡基无硬脂酸模料中，加入了聚乙烯、EVA、褐煤蜡、地蜡、松香等材料，低密度聚乙烯在石蜡中溶解度不高，一般不超过 10%，但聚乙烯的分子量越小，在蜡料中的溶解度越大，所以，分子量在 2000~5000 的低分子聚乙烯和 EVA 就比低密度聚乙烯易溶解，而且聚乙烯的分子与石蜡相似，加入蜡基模料中可起到结晶核心作用，可使石蜡的晶体细化，提高模料的力学性能，所以石蜡基模料中加入低分子聚乙烯，模料的强度有所提高，耐热性也有改善，但加入量过多，性能改善不大，却会使收缩率增大，加入 EVA 也有相似作用。生产应用实践表明，聚乙烯长期使用会呈现老化特性而使模料性能变坏。加入褐煤蜡可提高模料的热稳定性，但同时模料的熔点及压注温度也会有所升高。

聚乙烯这类聚合物中，除存在晶态结构外，还存在非晶态（无定形）结构，也就是说它具有两相同时存在，即同时存在结晶区和非结晶区（无定形区）的特殊结构，而在聚乙烯球晶中的晶片之间，有高分子链联结着，每一个高分子可以贯穿几个晶区和非晶区，由于这种联接链的存在，所以聚乙烯的强度要比蜡质材料高得多。

除聚乙烯、乙烯-醋酸乙烯共聚树脂（EVA）之外，聚苯乙烯也可加入蜡料中，聚苯乙烯熔点高，对温度变化不敏感，热变形量比蜡料低，强度和硬度均较大，收缩率小，透明度高，加入模料中提高强度和软化温度，但因模料黏度大、脱模性差等原因应用不多。

1.5.3 树脂基模料

树脂基模料（俗称中温蜡）的基体是树脂，树脂分为天然树脂和人造树脂，树脂基模料的优点是强度高和热稳定性高、收缩率小，主要用于生产质量要求高的熔模铸件产品。

树脂基模料的原材料：松香、聚合松香、松香脂、顺丁烯酞松香脂。常用树脂基模料的成分和性能见表 1-1。

表 1-1 常用树脂基模料的成分和性能

| 序号 | 组成(质量分数)/% |      |      |    |      |     |     |          | 性 能        |                      |        |          |
|----|------------|------|------|----|------|-----|-----|----------|------------|----------------------|--------|----------|
|    | 松香         | 聚合松香 | 改进松香 | 石蜡 | 地蜡   | 褐煤蜡 | 虫白蜡 | 聚乙烯或 EVA | 熔点<br>滴点/℃ | 热变形量 <sup>①</sup> /m | 线收缩率/% | 抗弯强度/MPa |
| 1  | 81         |      | 1.6  |    | 14.3 |     |     | 3.1      | 95         | 8.5                  | 0.58   | 3.6      |
| 2  | 75         |      |      |    | 5    |     | 15  | 5        | 94         | 1.75                 | 0.95   | 10.0     |
| 3  | 60         |      |      |    | 5    |     | 30  | 5        | 90         | 1.07                 | 0.88   | 6.0      |
| 4  | 30         |      | 27   |    | 5    |     | 35  | 3        |            |                      | 0.78   | 6.1      |
| 5  |            | 17   | 40   | 30 |      | 10  |     | 3EVA     | 81         | 0.55                 | 0.76   | 5.4      |
| 6  |            | 30   | 25   | 30 | 5    |     | 5   | 5EVA     | 80         | 1.07                 | 0.55   | 6.4      |

① 热变形量： $\Delta H_{40-2}/\text{mm}_0$ 。

为适应精密、复杂的熔模铸件对模料质量及性能的要求，国内外发展了系列商品模料（也是一种树脂基模料），由专业模料厂研制生产、提供性能稳定的系列模料，如美国的 CL163 系列模料（美国 ACCU-END Co. 生产）、MASTER 系列（美国 Kindtcollins Co. 生产）、CA-STYLEND 系列（英国 Yates Co. 生产）、BLASON OLEFINES 系列、日本的 K-512 系列模料等。

商品系列模料按用途和特点可分为：模样（模型）蜡、浇道蜡、粘接蜡、修补蜡、浸封蜡、水溶蜡、样件蜡等。

1.5.4 填料模料

填料模料或称填充模料，在模料中加入充填材料就成为填料模料。无论是固体、液体或气体均可能用作充填材料，在模料中加入填料的作用主要是为减少收缩，防止熔模表面变形、表面凹陷，并提高熔模表面质量和尺寸精度。

在实际生产中，用得最多的是以固体粉末作填料模料，固体粉末填料主要有：聚乙烯、聚苯乙烯、聚乙烯醇、聚氯乙烯、合成树脂、多聚乙烯乙二醇、橡胶、尿素粉、炭黑等。

通常的蜡基和树脂基模料，都不能是模料原材料在熔化后组成的固溶体，而固体填料的特点是在工作温度时填料本身不会熔化，而在模料中成为分散均匀的固态细小质点，它能吸收模料在凝固时放出的潜能，并起骨料作用，从而提高模料的冷却作用，减少收缩，增加模料热稳定性和强度，防止蜡模变形和表面凹陷外，还可明显改善液态模料的注蜡工艺性能，固体填料加入量为 10%~40%。

对填料的要求：熔点较高，在模料的工作温度时不会熔化，对液态模料的亲和性好，易被润湿，但不会发生化学反应，填料粒度大小适宜，密度适中，焙烧后残留灰分少。

液体填料模料大多以水为填料，配制成水乳液填料模料。

水乳液填料模料的配制工艺实例：模料的组成为 30%褐煤蜡，26%褐煤蜡树脂，20%石蜡和 24%水。先将固体模料加热熔化，再加入液体乳化剂少量，搅拌均匀，然后加入 90℃热水进行高速搅拌，即制得蜡-水乳化液，就成为液体填料模料。使用水乳化剂填料模料，用压

力较高的注蜡机制成的熔模表面光滑、表面粗糙度小、无凹陷，主要用于生产尺寸精度要求高的熔模。

1.6 制壳耐火材料

(1) 制壳耐火材料的要求 耐火材料是制造熔模型壳的基本材料，型壳的主要性能，如高温强度、高温抗变形性、热震稳定性、热化学稳定性、热膨胀性、透气性、脱壳性等，均受耐火材料基本特性的影响。此外，型壳和铸件的表面质量还受耐火材料粒度和纯度的影响。因此，为获得质量高的型壳宜选择性能良好、质量稳定、资源丰富、价格适中的耐火材料。

(2) 制壳耐火材料的种类 用于熔模铸造的耐火材料种类很多，按用途可分为四种。

- ① 型壳面层用耐火材料，有锆英石、电熔刚玉、熔融石英、硅砂（石英）等。
- ② 型壳加固层（背层）的耐火材料，有铝硅系耐火材料、高岭土熟料、莫来石、煤矸石、匣钵砂、硅砂。
- ③ 用于陶瓷型芯材料的有：熔融石英（石英玻璃）、电熔刚玉、锆英石。
- ④ 用于炉衬材料的有：硅砂、铝矾土、镁砂、电熔镁砂、硅砂。

(3) 制壳耐火材料的化学成分及粒度

① 熔模铸造用硅砂的化学成分 见表 1-2 和表 1-3。

表 1-2 硅砂成分

| 级别 | SiO <sub>2</sub> (质量分数)/% | 有害杂质含量(质量分数)/%                     |         |                                | 耐火度/℃ | 外 观   |
|----|---------------------------|------------------------------------|---------|--------------------------------|-------|-------|
|    |                           | K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O | CaO+MgO | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |       |       |
| 98 | 98                        | ≤1.0                               | ≤1.0    | ≤0.1                           | >1700 | 洁白    |
| 97 | 97                        | ≤1.5                               | ≤1.5    | ≤0.2                           | >1650 | 少数有锈斑 |
| 96 | 96                        | ≤2.0                               | ≤2.0    | ≤0.3                           | >1650 | 少数有锈斑 |

表 1-3 硅砂粒度

| 分组代号 | 主要粒度组成部分/mm |       |       |
|------|-------------|-------|-------|
|      | 前 筛         | 主 筛   | 后 筛   |
| 85   | 0.700       | 0.850 | 0.600 |
| 60   | 0.850       | 0.600 | 0.425 |
| 30   | 0.425       | 0.300 | 0.212 |
| 21   | 0.300       | 0.212 | 0.150 |

② 熔模铸造用电熔刚玉化学成分见表 1-4。

表 1-4 刚玉砂成分

| 成分     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | 灼烧   |
|--------|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|------------------|------|
| 质量分数/% | ≥98.5                          | ≤0.6              | ≤0.1                           | ≤0.2             | ≤0.3 |

熔模铸造用电熔刚玉粉粒度，见表 1-5。常用耐火材料性能见表 1-6。

表 1-5 刚玉砂粒度

| 粒度/μm      | <5 | 5~20 | 20~40 | 40~80 | >80 |
|------------|----|------|-------|-------|-----|
| 含量(质量分数)/% | <8 | ≥26  | ≥47   | <18   | <1  |



表 1-6 常用耐火材料的物理、化学性能

| 名 称                                                       | 化学性质 | 熔点/℃ | 耐火度<br>/℃ | 密度<br>/(g/cm <sup>3</sup> ) | 莫氏硬度 | 线膨胀系数/(1/℃)<br>20~1000℃      | 热导率 λ<br>/(W/m·K) |       |
|-----------------------------------------------------------|------|------|-----------|-----------------------------|------|------------------------------|-------------------|-------|
|                                                           |      |      |           |                             |      |                              | 400℃              | 1200℃ |
| 硅砂 SiO <sub>2</sub>                                       | 酸性   | 1713 | 1680      | 2.65                        | 7    |                              |                   |       |
| 熔融石英<br>SiO <sub>2</sub>                                  | 酸性   | 1713 |           | 2.2                         | 7    | (0.51~0.63)×10 <sup>-6</sup> | 1.591             |       |
| 电熔刚玉<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                    | 两性   | 2050 | 2000      | 4.0                         | 9    | 8.6×10 <sup>-6</sup>         | 12.561            | 5.276 |
| 莫来石<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·SiO <sub>2</sub>   | 两性   | 1810 |           | 3.16                        | 6~7  | 5.4×10 <sup>-6</sup>         | 1.214             | 1.549 |
| 硅线石<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·SiO <sub>2</sub>   | 弱酸性  | 1845 |           | 3.25                        | 6~7  | 5×10 <sup>-6</sup>           |                   |       |
| 耐火黏土<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·SiO <sub>2</sub>  | 酸性   |      | 1670~1710 | 2.6                         | 1~2  |                              |                   |       |
| 铝矾土熟料<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·SiO <sub>2</sub> |      | 1800 |           | 3.1~3.5                     | ~5   |                              |                   |       |
| 锆砂<br>ZrO <sub>2</sub> ·SiO <sub>2</sub>                  | 弱酸性  | 1960 |           | 4.5                         | 7~8  | 4.6×10 <sup>-6</sup>         |                   | 2.091 |
| 铝酸钴<br>CoAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                   |      |      |           | 4.3                         | 7    | 9.2×10 <sup>-6</sup>         |                   |       |
| 尖晶石<br>MgO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                 |      | 2135 |           | 3.6                         | 8    | 7.6×10 <sup>-6</sup>         |                   |       |
| 氧化镁<br>MgO                                                | 碱性   | 2800 |           | 3.57                        | 6    | 13.5×10 <sup>-6</sup>        | 5.443             | 2.931 |
| 氧化钙<br>(烧结)CaO                                            | 碱性   | 2600 |           | 3.32                        |      | 13×10 <sup>-6</sup>          |                   | 7.118 |

③ 熔模铸造用锆石化学成分见表 1-7。锆英石粒度见表 1-8。

表 1-7 锆石成分及分级

| 成分<br>级别 | ZrO <sub>2</sub> | 杂质含量(质量分数)/%     |                                |                               |
|----------|------------------|------------------|--------------------------------|-------------------------------|
|          |                  | TiO <sub>2</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> |
| 1 级      | ≥65              | ≤1.0             | ≤0.30                          | ≤0.30                         |
| 2 级      | 63               | ≤2.0             | ≤0.70                          | ≤0.50                         |
| 3 级      | 60               | ≤3.0             | ≤1.00                          | ≤0.80                         |

表 1-8 熔模铸造用锆英石粒度

| 名 称            | 筛 号 | 上 筛  | 主 筛 | 下 筛 |
|----------------|-----|------|-----|-----|
| 牌 号            | 260 | 200  | 260 | 320 |
|                | 320 | 260  | 320 | 底盘  |
| 筛上余量留量(质量分数)/% |     | ≤1.0 | >70 | —   |

④ 熔模铸造用高岭石化学成分见表 1-9。

表 1-9 高岭石化学成分

| 化学成分(质量分数)/%                   |                  |      |      |                   |                  |                  |                                |
|--------------------------------|------------------|------|------|-------------------|------------------|------------------|--------------------------------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | CaO  | MgO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| 45                             | 52               | 0.41 | 0.12 | 0.14              | 0.12             | 0.78             | 0.61                           |



(4) 粒度标准 熔模铸造用的耐火材料的砂和粉的粒度，是通过标准筛网的筛孔尺寸，以1in (25.4mm) 面积的筛网内的筛孔数表示，因而称之为“目数”。在进行环境检测中，表示颗粒大小用μm，下表是目数和μm的对照表，见表1-10。

表 1-10 粒度单位的对照表

| 目数  | 粒度/μm | 目数   | 粒度/μm | 目数   | 粒度/μm |
|-----|-------|------|-------|------|-------|
| 5   | 3900  | 140  | 104   | 1600 | 10    |
| 10  | 2000  | 170  | 89    | 1800 | 8     |
| 16  | 1190  | 200  | 74    | 2000 | 6.5   |
| 20  | 840   | 230  | 61    | 2500 | 5.5   |
| 25  | 710   | 270  | 53    | 3000 | 5     |
| 30  | 590   | 325  | 44    | 3500 | 4.5   |
| 35  | 500   | 400  | 38    | 4000 | 3.4   |
| 40  | 420   | 460  | 30    | 5000 | 2.7   |
| 45  | 350   | 540  | 26    | 6000 | 2.5   |
| 50  | 297   | 650  | 21    | 7000 | 1.25  |
| 60  | 250   | 800  | 19    |      |       |
| 80  | 178   | 900  | 15    |      |       |
| 100 | 150   | 1100 | 13    |      |       |
| 120 | 124   | 1300 | 11    |      |       |

## 1.7 熔模铸造用黏结剂

### 1.7.1 水玻璃黏结剂

水玻璃又称泡花碱，是一种碱金属的硅酸盐，固体熔合物呈玻璃状，溶于水后成水玻璃溶液。

水玻璃制造方法：用纯碱（工业碳酸钠）与硅砂均匀混合，加热熔融，温度控制在1350～1400℃，反应生成物为硅酸钠，反应式为：



熔模铸造用高模数水玻璃的技术指标见表1-11。

表 1-11 水玻璃技术指标

| 项目 \ 级别         | 液-3         |      |      |
|-----------------|-------------|------|------|
|                 | 优等品         | 1等品  | 合格品  |
| 铁(Fe)/%(≤)      | 0.02        | 0.05 |      |
| 水不溶物/%(≤)       | 0.20        | 0.40 | 0.50 |
| 密度(20℃)/(g/cm³) | 1.368~1.394 |      |      |
| 氧化钠 Na₂O%(≥)    | 8.2         |      |      |
| 二氧化硅 SiO₂%(≥)   | 26.0        |      |      |
| 模数 M            | 3.1~3.4     |      |      |

### 1.7.2 硅溶胶黏结剂

硅溶胶是二氧化硅的溶胶，由无定形的二氧化硅的微小颗粒分散在水中而形成的稳定胶体溶液。