

航空高等院校教材

熔模铸造工艺学

王乐仪 编

国防工业出版社

高等院校教材

熔模铸造工艺学

王乐仪 编

机械工业出版社

内 容 简 介

本书比较全面地阐述了熔模铸造中制模和制壳工艺的基本问题，全书共分模料及制模工艺、粘结剂及其制备、制壳用耐火材料、型壳制造工艺、型壳质量分析以及涡轮叶片的熔模铸造等六章，着重阐明熔模铸造主要工艺过程的原理，并在叙述一般内容的基础上，侧重反映航空工业中熔模铸造的特点，注意介绍当前国内外熔模铸造方面的先进工艺和发展动态。

本书可作为航空铸造专业的教材，并供从事熔模铸造的科研、生产和工程技术人员参考，也可供非航空院校铸造专业师生选用。

熔模铸造工艺学

王 乐 仪 编

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张 8 166千字

1980年7月第一版 1980年7月第一次印刷 印数：0,001—5,300册

统一书号：15034·2021 定价：0.84元

前 言

熔模铸造是少切削无切削加工工艺的重要组成部分，是一项先进的铸造工艺，无论是民用工业还是国防工业都广泛地应用熔模铸造方法来生产精密铸件，特别在航空工业中占有重要的地位。近二十年来，国外熔模铸造工艺、材料和设备都得到了迅速的发展，我国建国后三十年来，在熔模铸造方面也有了很大的发展。随着四个现代化的进展，必将得到进一步发展。

编写本书的目的，一是为国防工业院校航空铸造专业的学生提供一本具有一定理论深度的熔模铸造工艺教材；二是为从事熔模铸造事业的广大科研、生产和工程技术人员提供一本具有一定参考价值的专业书籍。

本书是在原我校铸造专业所用教材《熔模铸造工艺》的基础上，经过修改、充实和提高而编写成的。全书共分模料及制模工艺、粘结剂及其制备、制壳用耐火材料、型壳制造工艺、型壳质量的分析以及涡轮叶片的熔模铸造等六章；比较全面地阐述了熔模铸造中制模和制壳工艺的基本问题。

与目前国内出版的同类书籍比较，本书有以下三个特点：第一，系统地阐明熔模铸造主要工艺过程的原理；第二，在叙述一般内容的基础上，侧重反映航空工业中熔模铸造工艺的特点；第三，介绍了当前国内外熔模铸造方面的先进工艺和发展动态。

本书不介绍铸件工艺设计和压型设计、合金熔铸以及精铸车间的工艺设备。按照教学计划的要求, 上述三部分内容分别在其它有关的课程中讲授。

在编写本书的过程中, 承史正兴、张立同等审阅全稿, 并提供许多宝贵的修改意见; 承郑宗惠绘制全书图稿。在此谨致热忱的谢意。

由于编者学识浅薄、水平不高, 重要文献资料搜集不全, 内容取材未必妥善, 书中定多缺点和错误, 衷心希望读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	1
第一章 模料及制模工艺	9
第一节 对模料性能的要求	9
一、模料的熔点和热稳定性(软化点)	9
二、模料的流动性和成型性	10
三、模料的收缩率和膨胀特性	10
四、模料的强度和表面硬度	11
五、模料的涂挂性	11
六、模料的焊接性	11
七、模料的灰分	11
第二节 模料的种类	12
一、低温模料	13
二、高温模料	13
三、中温模料	13
第三节 蜡基模料	14
一、蜡的化学结构与其物理性能的关系	14
二、蜡基模料中使用的蜡及其性能	19
三、蜡基模料中添加的塑料及其性能	24
四、蜡基模料的成分和性能	27
第四节 松香基模料	30
一、松香及其性能	31
二、改性松香	32
三、蜡在松香基模料中的作用	32
四、附加组元在模料中的作用	34
五、常用松香基模料的成分和性能	35

第五节 其它模料	36
一、塑料模料	37
二、可溶性模料	39
三、充填模料	40
第六节 制备模料的一般原理	41
第七节 制模工艺	44
一、蜡基和蜡塑混合模料的制模	44
二、应用泡沫聚苯乙烯模料的制模工艺	47
第二章 粘结剂及其制备	50
第一节 对粘结剂的要求与粘结剂的分类	51
一、对粘结剂的要求	51
二、粘结剂的分类	51
第二节 粘结剂基础	53
一、胶体溶液的有关基本特性	53
二、胶体溶液的双电层结构	54
三、硅酸胶团的结构	57
四、硅酸胶体溶液的稳定性及其变化	61
五、电解质对硅酸溶胶稳定性变化的影响	63
六、其它因素对硅酸溶胶稳定性的影响	67
第三节 水玻璃粘结剂	68
一、水玻璃及其性能	68
二、水玻璃的预先处理	72
三、水玻璃硅酸溶胶	78
第四节 硅酸乙酯粘结剂	80
一、硅酸乙酯及其性能	80
二、硅酸乙酯的水解过程原理	84
三、硅酸乙酯水解的计算	94
四、硅酸乙酯的水解方法	97
第五节 硅溶胶粘结剂	99
一、硅溶胶的基本特性	100
二、制备硅溶胶的基本原理	101

第三章 制壳用耐火材料	103
第一节 概述	103
一、耐火材料的耐火度及最低共熔点	103
二、耐火材料的热膨胀性	105
三、耐火材料的化学稳定性	106
第二节 石英及其性能	106
一、石英的结构与相变	107
二、石英的性能和应用	109
三、熔融石英——石英玻璃	111
第三节 电熔刚玉	113
第四节 硅酸铝质耐火材料	115
一、 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 二元状态图的分析	115
二、莫来石	116
三、硅线石	117
四、高铝矾土	117
五、高岭土类耐火材料	118
第五节 锆砂	120
第四章 型壳制造工艺	123
第一节 耐火涂料的配制	123
一、耐火涂料的工艺性能及其控制	123
二、常用耐火涂料的配比	127
第二节 水玻璃粘结剂型壳的干燥和硬化	130
一、型壳硬化前的自然干燥	130
二、水玻璃粘结剂型壳化学硬化的原理	131
三、水玻璃粘结剂型壳的硬化工艺	139
第三节 硅酸乙酯粘结剂型壳的干燥	142
一、涂料层干燥过程中的物理和化学变化	142
二、型壳干燥条件的选择	145
第四节 硅溶胶粘结剂型壳的干燥	147
一、型壳的干燥过程	148
二、影响干燥过程的因素	150
三、硅溶胶粘结剂型壳的干燥工艺参数	154

第五节 快速干燥和制壳工艺	153
一、水玻璃粘结剂型壳快速硬化工艺	155
二、硅酸乙酯粘结剂的湿法快速制壳	156
三、硅溶胶粘结剂型壳的快速干燥	157
四、互相胶凝(交替硬化)	158
第六节 脱模	163
一、脱模的基本要求	163
二、热水脱模法	164
三、蒸汽脱模法	165
四、闪烧(热冲击)脱模	166
五、燃烧脱模	167
六、微波脱模	168
第七节 型壳的焙烧	169
一、水玻璃粘结剂型壳的焙烧	169
二、硅酸乙酯和硅溶胶粘结剂型壳的焙烧	170
第五章 型壳质量的分析	172
第一节 型壳的表面质量	172
一、焙模表面和轮廓的复制精度	173
二、制壳工艺因素对型壳表面质量的影响	177
第二节 型壳的线量变化	178
一、水玻璃粘结剂型壳在加热和冷却过程中的线量变化	179
二、硅酸乙酯粘结剂型壳在加热和冷却过程中的线量变化	182
第三节 型壳的强度性能	183
一、浸涂材料及工艺因素对型壳常温强度的影响	184
二、型壳的高温强度	190
三、型壳的残留强度	194
第四节 型壳的透气性	196
一、计算和测定透气性的方法	197
二、影响型壳透气性的主要因素	198
第六章 涡轮叶片的熔模铸造工艺	202
第一节 无余量叶片的精铸工艺	202

一、铸造叶片的变形	204
二、型壳高温性能的改善	209
三、精铸无余量叶片的工艺和装备要求	213
第二节 预制陶瓷型芯	216
一、铸造空心叶片的应用	216
二、陶瓷型芯的性能要求	219
三、陶瓷型芯的制造工艺原理	223
四、石英玻璃型芯热压注法的制造工艺	231
五、应用陶瓷型芯铸造空心叶片的工艺	234
第三节 精铸叶片表面晶粒细化	238
一、叶片表面晶粒细化的意义	238
二、表面成核细化	240

绪 论

熔模精密铸造，简称熔模铸造或精铸，是古代失蜡铸造的发展。中国是世界文明发达最早的国家之一，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及器皿等制品。但是，由于反动封建阶级的长期统治，近百年来帝国主义的侵略，这种古老的铸造技术在国内没有得到应有的发展，甚至长期积累的技术经验也几乎失传。

现代熔模铸造方法在工业生产中得到实际应用是在本世纪的四十年代。当时，航空喷气发动机的发展，要求制造象叶片、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以及零件形状复杂以致不能或难于用其它方法制造，因此，需要寻找一种新的精密的成型工艺，于是借鉴牙科医生中流传下来的失蜡铸造，经过对其材料和工艺的改进，使现代熔模铸造方法在科学的基础上获得重要的发展。所以，航空发动机的发展推动了熔模铸造的应用，而熔模铸造的不断改进和完善，也为航空发动机进一步提高性能创造了有利的条件。

解放以后，我国才开始将熔模铸造应用于工业生产。这种先进的铸造工艺得到了巨大的发展，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，甚至也用于工艺美术品的

制造。

所谓熔模铸造工艺，就是用易熔材料（例如蜡料或塑料）制成可溶性模型（简称熔模或模型），在其上涂覆若干层特制的耐火涂料，经过干燥和硬化形成一个整体型壳后，再从型壳中熔掉模型，然后把型壳置于砂箱中，在其四周填充干砂造型，最后将铸型放入焙烧炉中经过高温焙烧（如采用高强度型壳时，可不必造型而将脱模后的型壳直接焙烧），铸型或型壳经焙烧后，于其中浇注熔融金属而得到铸件。

从熔模铸造方法的内容可以看出，这一方法与其它铸造方法比较，其特点是使用可溶性模型。一个熔模只能使用一次，即每生产一个铸件就需要制造一个熔模。同样道理，型壳也只能使用一次。这是熔模铸造方法的基本特征。

由于熔模铸造采用了尺寸精确的熔模以及避免了一般铸造方法的起模、下芯、合型等工序所带来的尺寸误差，并且所用的铸型材料均经高温处理，减小了铸型变形的可能性，所以，容易制得尺寸精确的铸件。目前国内用熔模铸造方法所制铸件的尺寸精度相当于HBO-7-67的ZJ3级，有个别尺寸可达更高的精度。但是，熔模铸造的工艺过程复杂，影响铸件尺寸精度的因素较多，例如模料的收缩、熔模的变形、型壳在加热和冷却过程中的线量变化、合金的收缩率以及在凝固过程中铸件的变形等，所以熔模铸件的尺寸精度虽然较高，但还比不上压铸件精确。

压制熔模时，采用型腔表面光洁度高的压型，因此，熔模的表面光洁度也比较高。此外，型壳由耐高温的特殊粘结剂和粉状耐火材料配制成的耐火涂料涂挂在熔模上而制成，与熔融金属直接接触的型腔内表面光洁度高。所以，熔模铸

件的表面光洁度比一般铸造件的高，但比不上压铸件。从目前国内生产情况看，熔模铸件的表面光洁度在 $\nabla 4 \sim \nabla 5$ 之间，局部可达 $\nabla 6$ 。

因为熔模铸件尺寸精确和表面光洁，所以可减少或不经过机械加工，只是在零件上要求较高的部位留少许加工余量即可，甚至某些铸件只留打磨、抛光余量，大部分不必机械加工即可使用。由此可见，采用熔模铸造方法可大量节省机床设备和加工工时，大幅度节约金属原材料。但是，必须指出，上面列举的熔模铸件的尺寸精度和表面光洁度的水平有时仍不能达到某些航空产品的严格要求，例如，航空工业中要求对涡轮叶片等重要零件实现无余量精铸，这就要求进一步提高熔模铸造工艺的水平。

熔模铸造方法的另一重要优点是，它可以铸造各种合金的形状复杂的铸件，特别是可以铸造高温合金铸件。由于航空喷气发动机的进展，要求制造尺寸精确、形状复杂的很难机械加工或完全不能机械加工的高温合金零件，例如涡轮叶片，要在 1000°C 以上的高温下工作。采用熔模铸造方法生产这些零件，不仅可以解决加工困难或不能加工的问题，而且还可以提高合格率和节约优质合金材料。熔模铸造中，因为熔模可以分成几部分压制，然后焊接成一个整体熔模，最后可制得整体的铸件，所以用此法可制造很复杂的铸件。这一优点，不仅可以解决生产中某些困难问题，而且在产品设计上，可用一个整体零件来代替原来用几个零件组成的部件，从而缩小产品的体积，减轻产品的重量。

熔模铸造方法所制得的型壳，必须经过高温焙烧，然后将合金液浇注到型壳中，就是说，使用高温型壳浇注合金，保

证了合金液的流动性，所以能浇注复杂的薄壁铸件，铸钢件能浇注的最小壁厚可至 0.3 毫米，具有细小排气边缘的涡轮叶片都能铸出。但是，使用高温型壳浇注带来的缺点是铸件容易产生晶粒粗大等缺陷。

如上所述，熔模铸造方法具有很多优点，但它在某些方面还不很完善。第一，其生产过程虽可划分为简单的单独工序，但就其整体来说，与其它铸造方法相比较，则工艺复杂、工序繁多，生产周期冗长，而且在繁杂的工序中，任何一点疏忽都会给铸件质量带来不良的后果。同时，由于生产周期长，也给分析铸件质量带来不利条件。其次，由于熔模及型壳的强度及耐火涂料涂挂工艺等方面原因，熔模铸件的重量尚有一定限制，据国内生产情况来看，熔模铸件的重量一般为由几克到几公斤，较大的精铸件一般为十几公斤，曾经生产的最大精铸件的重量达 60 公斤。第三，在生产中使用的某些模料的原材料、粘结剂和耐火材料的供应尚有一定困难，有些价格昂贵，有些质量不好，最大的缺点是这些材料多半不是专门为熔模铸造需要而生产的，经常不符合熔模铸造的要求，原材料的质量也不稳定。最后，熔模铸造方法虽然古代已有，但在我国工业生产上应用这一方法，还是一项新工艺，对熔模铸造生产的规律性还掌握不够；工艺基础理论薄弱；生产和科研工作中的测试手段还很不完善等。

由此可见，并非所有的情况都可以应用熔模铸造方法来生产铸件，只有在下列情况下才最适宜于应用，即（1）不能或难于机械加工的合金材料制成的铸件；（2）形状很复杂，用其它方法不能或难于制造的零件；（3）用其它方法制造毛坯需要很大机械加工余量的零件；（4）大量生产的少切

削加工的零件。当然，是否选用熔模铸造方法生产铸件，应根据各工厂的具体生产条件，全面考虑产品要求的必要性、技术上的可能性和经济上的合理性等因素来决定。

众所周知，熔模铸造是少切削无切削加工工艺的重要组成部分，是实现毛坯精化的重要方法。近二十年来，国内外在模料、粘结剂、耐火材料、制模和制壳工艺以及实现机械化和自动化方面，都有迅速的发展。下面就这些方面予以简单介绍：

一、国外熔模铸造方法的发展

模料的发展趋势 1948年时，模料仅用一般的蜡料。至1968年前，在蜡料应用扩展的同时，采用塑料、蜡塑混合料，还有少量采用冻结水银和低熔点合金模料。1968年以后，模料的研究和使用有了相当的变化，水银、低熔点合金模料基本上不用了，而塑料、蜡塑混合料、填料模料发展相当快，开始使用蜡水乳状液和空气乳状液制模。但是，蜡基混合料仍是当前用得最多的最重要的模料。

制模设备的变迁 1948年以前，采用手动压蜡压制熔模。1948年以后，开始用气动压蜡机，并逐步使用液压压注机。到1968年，气动压蜡机大大减少，液压压注机迅速增加，并且朝着自动化多工位压蜡机的方向发展。制模的方法也有相应的发展，1948年时，用液态或半液态模料压制，随后采用半固态的压制方法。到1968年，液态或半液态模料的压制方法采用渐少，而半固态或固态模料的压制方法有了很大的发展。

造型方法和粘结剂的发展 国外熔模铸造铸型用的粘结剂比较多，但实际用于航空工业熔模铸造的主要是硅酸乙酯

和硅溶胶。1948年只有硅酸乙酯实体铸型，随后发展了硅溶胶实体铸型、硅酸盐和磷酸盐实体铸型以及出现了高强度型壳。到1968年，以硅溶胶和硅酸乙酯作为粘结剂的高强度型壳获得了迅速的发展和广泛的应用，而实体铸型使用很少了。

制壳用耐火材料 熔模铸造高强度型壳通常用的耐火材料有石英砂、电熔刚玉、硅酸铝质耐火材料(如熟耐火粘土、莫罗卡特、莫来石等)、锆英砂以及熔融石英等。1948年面层用耐火材料为石英砂、硅线石和锆英砂，以后硅线石和石英砂不再使用。到1968年，主要用锆英砂、熔融石英、莫罗卡特以及电熔刚玉。加固层用的耐火材料，1948年只用硅线石一种，以后广泛应用熔融石英、烧结粘土、石英砂和莫罗卡特；到1968年，熔融石英和莫罗卡特的使用进一步扩大，并开始应用莫来石。

陶瓷型芯 作为陶瓷型芯用耐火材料有熔融石英(石英玻璃)、氧化铝、莫来石、硅酸锆、氧化镁等。陶瓷型芯的成型方法，最初用灌浆法，随后用生产率高的机械成型方法，例如，挤压法、干压法、注射法、热压注法等。

脱模方法 在脱模方法上各国也进行了不少研究。1948年只用热空气脱模，随后应用热水、蒸汽脱模，1968年以后，广泛应用蒸汽高压釜脱模，此外应用闪烧、燃烧、微波等脱模方法。

二、国内熔模铸造方法的发展

制模材料 为了提高模料的热稳定性和强度以及降低收缩率，在改善生产中现用的石蜡和硬脂酸低温模料和松香基中温模料性能的基础上，研制和使用一些新的蜡基模料，同

时也研究填料模料和塑料模料，以适应日益提高的生产要求。

粘结剂 广泛采用的水玻璃粘结剂只能满足一般产品的质量要求，而硅酸乙酯粘结剂不论在生产数量还是在性能方面都不能满足更高的要求，唯有性能良好的国产硅溶胶已在熔模铸造中得到应用。

制壳用耐火材料 广泛使用的石英粉和石英砂性能不好，电熔刚玉的用量由于铸造高温合金的扩大应用而日益增加，供不应求，且其性能也不能满足航空产品的质量要求，所以，多年来研制和使用一些新的耐火材料，主要是高岭土类、高铝矾土等硅酸铝质耐火材料以及硅酸锆等。

铸造工艺 近年来，熔模铸造工艺方面有不少进展，例如，由原来的填砂造型到目前的高强度型壳的普遍应用，大大提高了劳动生产率，并降低了工人的劳动强度，同时为实现机械化创造了有利的条件。在以水玻璃为粘结剂的制壳工艺方面，现在越来越多地采用快速硬化工艺，并采用聚氯化铝等新硬化剂。陶瓷型芯在熔模铸造生产中的应用，解决了制造带有深的薄壁空腔和细孔的复杂铸件问题，现在许多涡轮叶片的生产中都使用了陶瓷型芯。铸件晶粒控制是发展熔模铸造的一项重要工艺技术，为了提高叶片的使用性能和延长使用寿命，在叶片精铸生产中开始采用表面晶粒细化以及研制叶片的定向结晶等新技术。最近几年来，使用整体铸造的方法生产复杂的熔模铸件——涡轮、导向器和导风轮等都得到成功。

实现机械化和自动化 国内许多工厂建立了具有一定生产能力的熔模铸造车间；不少单位已建成熔模铸造机械生