

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

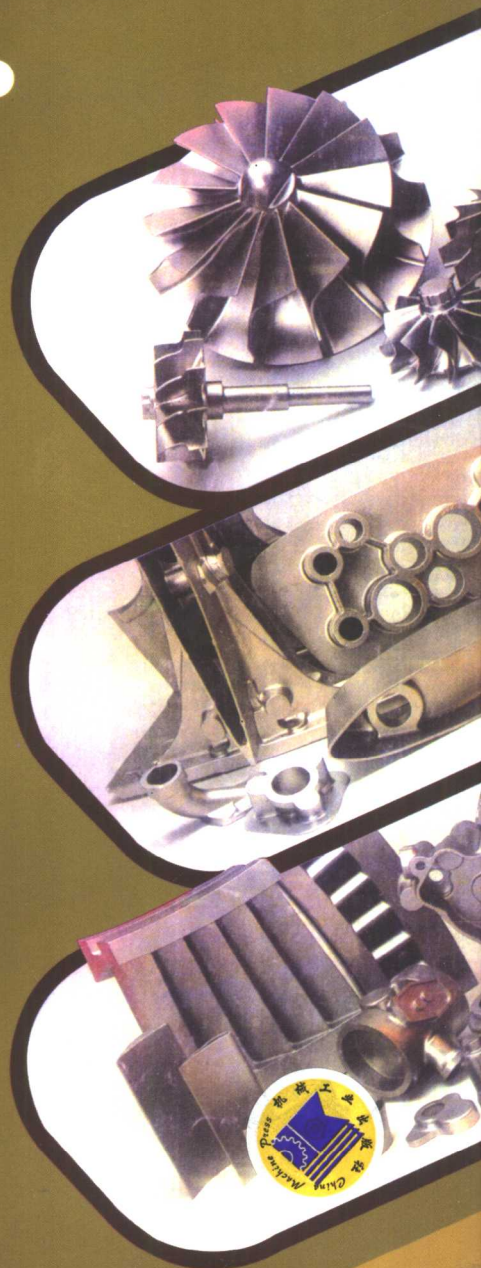
“十五”国家重点图书

先 / 进 / 铸 / 造 / 技 / 术 / 丛 / 书

丛书主编 张武城

熔模 精密铸造

姜不居 主 编
李传斌 主 审



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

 高水平著作出版基金资助项目

“十五”国家重点图书
先进铸造技术丛书

丛书主编 张武城

熔模精密铸造

姜不居 主编

李传杖 主审



机械工业出版社

本书系《先进铸造技术丛书》之一,取材新颖丰富。内容包括熔模精密铸造全部工艺过程,反映国内外精铸高新技术发展水平和趋势。重点介绍生产大型、薄壁、高精密和高强度熔模铸件的制模、制壳、型芯、熔炼、过滤净化,晶粒组织控制和金属凝固模拟等最新铸造技术的研究成果及其应用。本书可供熔模铸造工作者以及相关领域技术人员参考,亦可作为铸造专业学生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

熔模精密铸造/姜不居主编. —北京:机械工业出版社,
2004.4

(先进铸造技术丛书)

ISBN 7-111-14004-4

I. 熔… II. 姜… III. 熔模铸造:精密铸造

IV. TG249.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第010004号

机械工业出版社(北京百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:邝 鸥 王海峰 版式设计:冉晓华

责任校对:韩 晶 封面设计:鞠 杨 责任印制:李 妍

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005年1月第1版·第2次印刷

890mm×1240mmA5·11.125印张·326千字

定价:22.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

丛书编委会

丛书主编	张武城				
丛书副主编	李传栻				
丛书顾问	柳百成	陈蕴博			
丛书编委	黄天佑	姜不居	李传栻	毛卫民	
	谢成木	熊守美	颜永年	张伯明	
	张武城	张乃蕴			
丛书策划	邝 鸥				

序

铸造是机械工业重要的基础工艺与技术，广泛地应用于机械制造、航空航天、能源、交通、化工、建筑以及社会生活的各个领域，并随着各相关技术领域的发展自身不断更新、发展和完善，是我们生产和生活中时时不可或缺的一项重要工艺技术。

今天，铸造作为一种传统工艺与技术又面临着新的挑战。高速发展的社会，对铸造的精密性、质量与可靠性、经济、环保等要求越来越高。铸造已从单一的加工工艺发展成为新兴的综合性的先进工艺技术。它涉及到工艺方法、设备及工装、成型、生产过程的自动化与机械化、材料、环保等众多领域。不同学科之间的交叉、渗透及融合，高新技术对传统技术的不断影响，是当代科技发展的重要趋势。

为了解决广大铸造科技人员迫切需要了解和掌握铸造领域各学科的国内外先进技术及发展趋势的要求，以便指导他们的生产、科研及教学工作，北京机械工程学会组织了铸造行业有较快进步和较新发展的数个重要领域中有突出贡献的著名专家、学者编写、出版了这套先进铸造技术丛书。同时，邀请我国铸造、材料业界德高望重的著名专家柳百成院士、陈蕴博院士作为丛书的编写顾问。

本丛书旨在全面、系统地介绍国内外先进铸造技术的发展趋势，对我国铸造技术的发展起指导作用。本丛书是高层次的普及型丛书，深层次地介绍铸造相关领域的高新技术和基本规律，兼顾知识性和实用性，面向广大铸造工作者、研究人员、高等院校师生及相关领域技术人员等。

本丛书的特点是突出“高、新”二字，有较宽的知识覆盖面，注意相关学科的相互渗透，博采国际、国内最新研究和发展成果。

本丛书愿为广大铸造技术人员适应国际大环境、大市场的要求，使我国铸造界迅速加入国际经济市场，从铸造大国向铸造强国迈进的过程中作出重要贡献。

北京市发展和改革委员会及机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目对本丛书的出版提供了经济支持，中国机械工程学会副理事长宋天虎对丛书的出版给予了关心和支持，在此一并表示衷心的感谢。

丛书主编 张武城

前 言

熔模铸造是一种先进的成形工艺，能够生产高质量的精密铸件，除了应用于传统民用工业部门以外，更主要是在国防工业及至航空航天领域得到广泛应用。而且应用前景十分广阔。近年来在国内外，熔模铸造一直呈现着一种持续高速发展的态势，尤其受到包括我国在内的许多发展中国家的青睐。

本书系《先进铸造技术丛书》之一，取材新颖丰富，内容不仅涵盖了从制模、制壳、熔炼到清理等熔模铸造的全部工艺过程，而且还包含生产大型、薄壁、高精密和高强度熔模铸件的型芯、过滤净化、晶粒组织控制和金属凝固模拟等最新铸造技术的应用及研究成果，能够反映国际国内精铸高新技术水平和发展趋势。

本书可作为高等学校铸造专业高年级学生使用的教材，亦可供熔模铸造研究人员和专业工作者以及相关领域的专家学者参考。编者希望，本书的出版能对我国熔模铸造技术的发展起着积极的引导作用。

本书共10章，第1、3、4章由姜不居编写，第2、7、10章由陈冰编写，第5章由姜不居、吕志刚编写，第6章由闫双景编写，第8章由吕志刚编写，第9章由崔旭龙编写。全书由姜不居、陈冰统稿。本书在编写过程中还得到了周泽衡、马吉生、常明安、丁延桢等同志的协助，在此一并致谢。

限于编者水平及时间仓促，书中缺点及错误在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2004年4月于清华园

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 熔模铸造的发展概况	1
1.1.1 发展概况	1
1.1.2 能生产“大”、“精”、“薄”、“强”的铸件	2
1.2 熔模铸件的尺寸公差及表面粗糙度	4
1.2.1 熔模铸件的尺寸公差	4
1.2.2 熔模铸件的表面粗糙度	10
1.3 熔模铸件在典型产品中的应用	12
参考文献	22
第 2 章 新模料和先进制模技术	24
2.1 新模料和模料性能试验新方法	24
2.1.1 模料分类和特点	24
2.1.2 填料模料和亲水填料模料	25
2.1.3 回收—再生模料	29
2.1.4 模料性能试验的新方法	32
2.2 先进制模技术	37
2.2.1 液态压注和膏态压注技术	37
2.2.2 压注过程主要工艺参数的控制	38
2.2.3 计算机控制全自动压蜡机	43
2.2.4 固态压注技术	44
2.3 蜡模充型过程计算机数值模拟	47
2.3.1 模料的流变行为和模拟软件的选用	47
2.3.2 热物性参数测定	48

2.3.3 实验验证	49
参考文献	55
第3章 制壳原材料	57
3.1 耐火材料	57
3.1.1 熔融石英	57
3.1.2 电熔刚玉	61
3.1.3 锆砂	62
3.1.4 铝-硅系耐火材料	65
3.1.5 特种耐火材料	73
3.2 制壳粘结剂	77
3.2.1 粘结剂简介	77
3.2.2 硅酸胶体	82
3.2.3 硅溶胶	89
3.2.4 新型快干硅溶胶	95
3.3 其它附加物	101
3.3.1 表面活性剂(润湿剂)	101
3.3.2 消泡剂	105
3.3.3 晶粒细化剂	105
3.3.4 湿强度添加剂	106
参考文献	107
第4章 制壳工艺	109
4.1 型壳概况	109
4.1.1 型壳组成及结构	109
4.1.2 型壳主要性能及试验方法	111
4.2 硅溶胶型壳	119
4.2.1 硅溶胶涂料	119
4.2.2 硅溶胶型壳制壳工艺	127
4.2.3 快速制壳	138
4.3 硅酸乙酯型壳	142
4.3.1 硅酸乙酯涂料	142
4.3.2 硅酸乙酯型壳制壳工艺	143
4.4 水玻璃型壳	145

4.4.1	水玻璃涂料	145
4.4.2	水玻璃型壳制壳工艺	146
4.4.3	水玻璃型壳的表面质量和性能	148
4.5	脱蜡	152
4.5.1	蒸汽脱蜡	152
4.5.2	热水脱蜡	154
4.6	焙烧	154
4.6.1	焙烧目的	154
4.6.2	焙烧设备	155
4.6.3	焙烧工艺	156
	参考文献	156
第 5 章	熔模铸造型芯	159
5.1	概况	159
5.1.1	熔模铸造型芯	159
5.1.2	对熔模铸造型芯的基本要求	160
5.1.3	熔模铸造型芯的分类	161
5.2	陶瓷型芯	163
5.2.1	硅质陶瓷型芯	163
5.2.2	非硅质陶瓷型芯	175
5.3	水溶型芯	181
5.3.1	水溶石膏型芯	182
5.3.2	水溶陶瓷型芯	182
5.4	其它型芯	184
5.4.1	水玻璃砂型芯	184
5.4.2	树脂砂替换粘结剂型芯	185
	参考文献	187
第 6 章	熔炼	189
6.1	感应电炉熔炼	189
6.1.1	感应电炉	189
6.1.2	感应电炉原理	190
6.1.3	感应电炉熔炼工艺	192
6.1.4	优质料快速重熔法	196

6.1.5 惰性气体覆盖保护法	199
6.1.6 其它	206
6.2 真空感应电炉熔炼	211
6.2.1 真空感应电炉的类型	211
6.2.2 真空感应电炉熔炼冶金原理	211
6.2.3 真空感应电炉熔炼工艺	216
参考文献	218
第7章 过滤净化和熔模铸件晶粒组织控制	221
7.1 过滤净化技术	221
7.1.1 过滤净化技术发展概况和过滤器种类	221
7.1.2 过滤净化机制	222
7.1.3 陶瓷纤维编织过滤网	224
7.1.4 泡沫陶瓷过滤器	228
7.1.5 过滤网(器)的性能和技术要求	229
7.1.6 过滤器的使用	230
7.2 大尺寸铸件和大型模组的定向凝固和单晶铸造	234
7.2.1 大型和带中央水冷吸热器的定向凝固和单晶铸造设备	234
7.2.2 影响凝固界面温度梯度的其它因素	237
7.3 液体金属冷却法	240
7.4 整体铸造涡轮的晶粒控制	243
7.4.1 细晶铸造	244
7.4.2 定向凝固加细晶铸造(DS/GX法)	247
参考文献	249
第8章 熔模铸件清理与精整	252
8.1 熔模铸件清壳	252
8.1.1 机械清壳	252
8.1.2 化学清砂	255
8.1.3 水力清壳	258
8.2 熔模铸件的修补和精整	260
8.2.1 铸件修补	260
8.2.2 表面精整	263
8.2.3 铸件矫正	266

8.3 机械手的使用	268
参考文献	269
第9章 熔模铸造企业管理与信息系统	271
9.1 概述	271
9.1.1 企业管理现代化	271
9.1.2 现代企业管理思想	272
9.1.3 熔模铸造企业管理	278
9.2 企业管理信息化	282
9.2.1 信息在企业管理中的作用	282
9.2.2 企业管理信息化的内容	283
9.2.3 企业管理信息化的意义	284
9.2.4 企业管理信息化的工作	285
9.3 熔模铸造企业管理信息系统	285
9.3.1 管理信息系统基本知识	286
9.3.2 熔模铸造企业管理信息系统开发实例	290
参考文献	299
第10章 计算机技术在熔模铸造中的应用	301
10.1 浇注补缩系统计算机辅助设计	301
10.1.1 熔模铸造浇注补缩系统设计概况	301
10.1.2 基于模数法的浇冒口计算机优化设计	301
10.2 充型-凝固过程数值模拟	303
10.2.1 熔模铸造对凝固过程数值模拟的特殊要求	303
10.2.2 常用软件的功能和应用	304
10.2.3 相关材料(包括铸造合金和型壳材料)的热物性参数和初始 条件、边界条件	309
10.3 充型-凝固过程模拟和浇道优化设计一步完成	315
10.4 其它工艺过程模拟	318
10.5 快速成形技术在熔模铸造中的应用	320
10.5.1 目前常用的快速成形方法和特点	320
10.5.2 快速成形技术在熔模铸造中的应用	325
10.5.3 熔模铸造中应用 SLA 和 SLS 的新进展	329
10.5.4 应用效果比较	332

10.6 并行工程环境下熔模铸件的开发与生产	334
10.6.1 串行工程和并行工程	334
10.6.2 熔模铸造生产中实施并行工程	335
10.6.3 应用实例	336
参考文献	338

第 1 章 绪 论

1.1 熔模铸造的发展概况

熔模精密铸造（又称熔模铸造）是一种近净形成形工艺，其铸件精密、复杂，接近于零件最后的形状，可不经加工直接使用或经很少加工后使用。

1.1.1 发展概况

熔模铸造的历史可以追溯到 4000 年前，埃及、中国和印度是最早的起源国家。后用于制牙及珠宝首饰业中。20 世纪 30 年代末，人们发现 Austenal 实验室为外科移植手术研制的钴基合金可用于航空涡轮增压器。这类合金在高温下有着优异的性能，但很难加工，熔模铸造就成为该类合金成形的工艺方法，迅速地发展为工业技术，进入航空和国防工业部门，并很快应用到其它工业部门。

半个多世纪中熔模铸造工业一直以较快的速度在发展着。20 世纪末，世界熔模铸造业（不包括前苏联）年产值约 70 亿美元，北美占 50%、欧洲占 25%、亚洲占 22%、其它占 3%。美国占北美的 95%，而欧洲则英国占 42%、法国占 26%、德国占 19%、意大利占 7%、其余占 6%。在亚洲中国占 40%、日本占 26%、中国台湾占 16%、韩国占 9%、其它占 6%。20 世纪 90 年代美国熔模铸造业年产值从 23.2 亿美元增至 34.2 亿美元，增长 47.4%。英国 1999 年为 1993 年产值的 1 倍多。而中国 2000 年产值是 1988 年的 11.5 倍。可见熔模铸造业发展之迅速。

从产品看分为两大类：军工、航空类产品和商品类产品。前者质量要求高，后者质量不如前者。随着冷战时代的结束，各国军工产品大幅度减少，但民航、大型电站及工业涡轮发动机的发展，使得军工、航空类产品所占比例变化不大（见表 1-1）。现在熔模铸造除用

于航空、军工部门外，几乎应用于所有工业部门，如电子、石油、化工、能源、交通运输、轻工、纺织、制药、医疗器械等部门。

表 1-1 熔模铸件产品结构比例 (%)

国家及地区 产品	美国		英国		欧洲		日本	
	军工 航空	商品	军工 航空	商品	军工 航空	商品	军工 航空	商品
1982	50	50	67	33	55	45	—	—
1988	60	40	70	30	60	40	—	—
1991	60	40	70	30	55	45	—	—
1997	60	40	70	30	55	45	15	85

1.1.2 能生产“大”、“精”、“薄”、“强”的铸件

熔模铸造的迅速发展是依靠技术发展和进步取得的。对熔模铸造发展有较大影响的新材料、新工艺、新技术很多，如水溶型芯、陶瓷型芯、金属材质改进、大型铸件铸造技术、钛合金精铸、定向凝固和单晶铸造、过滤净化、热等静压、快速成形、计算机在熔模铸造中应用、机械化自动化等。随着技术发展，熔模铸造已可以生产更大、更精、更薄、更强的产品。

1. 更大更薄的产品 熔模铸造不仅可生产小型精密铸件，也能生产较大型精密铸件，最大轮廓尺寸可达 1.8m，而最小壁厚却不到 2mm，最大铸件重接近 1000kg。大型熔模铸件的生产技术是建立在制模、制壳、熔炼等工艺发展，以及优质材质、先进设备的基础上的。如性能更优的模料、水溶性模料和大型压蜡机的出现。美国 TEMPCRAFT 生产的 V-3002 型压蜡机合型力达 3000kN。又如，除粘结剂、耐火材料改进外，在涂料、制壳工艺研究上也取得较大进展，并出现提重超过 1000kg 的制壳机械手等大型设备。同时石膏型熔模铸造，Replicast CS 法等新工艺的兴起也促进了大型精密铸件的生产。

2. 更精的产品 熔模铸件已越来越精确，除线性尺寸公差外，铸件还能达到较高的形位公差。如 ISO 标准中的一般线性尺寸公差是

CT4~6级，特殊线性尺寸公差高的可达CT3级，而熔模铸件表面粗糙值也越来越小，可达到 $R_a 0.8\mu\text{m}$ 。为生产更精密铸件，美国熔模铸造协会ICI等国际协会开展了大量研究、调查，制定了新的策略。

3. 更强的产品 由于材质的改进和工艺技术的进步使得铸件的力学性能越来越好。以飞机发动机用涡轮叶片为例，由20世纪60年代到90年代，其材质（美国牌号）从1N100和B1900到MM200和MM247，再发展到PWA1480；同时因凝固技术的发展和运用，使所生产的涡轮叶片从传统的等轴晶（EQ）到定向凝固的柱状晶（DS），再发展到单晶（SC）叶片，加上设计改进从而使涡轮叶片的工作温度大为提高，由980℃提高到1200℃以上，见图1-1。

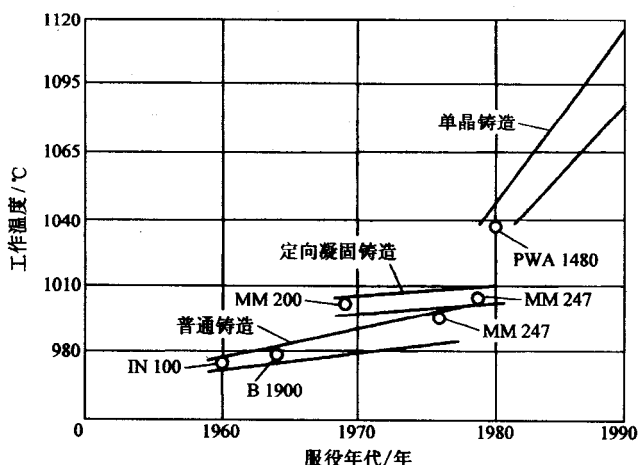


图 1-1 1960 年以来涡轮叶片材质及工艺发展情况

钛合金比强度高，已成为现代工业中一种重要的结构金属，钛合金精铸技术使生产复杂钛合金铸件成为可能，特别是制造大型复杂钛合金铸件可代替很多零件的组装件，大大减轻产品的重量而又提高了产品的强度。

另外，熔模铸件内部常存在缩松等缺陷，使其力学性能和使用可靠性降低，为获得致密的熔模铸件，热等静压（HIP）技术已被广泛用于涡轮叶片及其它熔模铸件上。HIP 是利用高温和高压，靠金属蠕

变和塑性变形让铸件内部缩松热裂等缺陷愈合（图 1-2）。从而降低铸件废品率，减少焊接后产生的裂纹，改善熔模铸件性能，使之可取代锻件。例如，它能使镍基高温合金、钛合金和铝合金的高温低周波疲劳性能提高 3~10 倍。

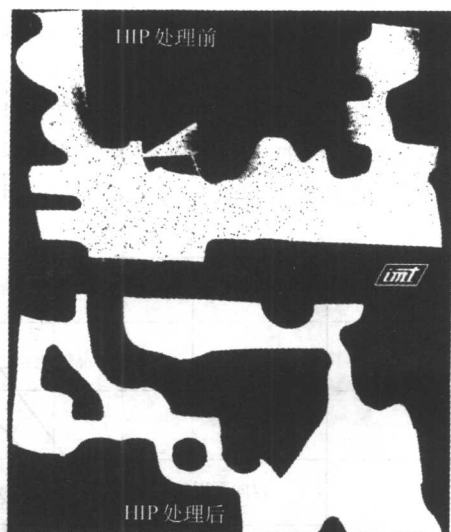


图 1-2 HIP 处理后铸件缺陷愈合情况

1.2 熔模铸件的尺寸公差及表面粗糙度

1.2.1 熔模铸件的尺寸公差

铸件尺寸公差是指铸件公称尺寸的两个极限尺寸之差。GB/T6414—1999《铸件尺寸公差与机械加工余量》规定铸件尺寸公差分 16 级，即 CT1 到 CT16 级，CT1 级精度最高。表 1-2 为铸件尺寸公差值，通常公差带对称分布，即公差的一半取正值，另一半取负值。不同的铸造方法所得到铸件公差不同。熔模铸造属精密铸造，一般铸件可达到 CT4~CT6 级，高精度铸件可达 CT3 级。铸件壁厚、铸孔及转接圆弧半径公差也可参考表 1-3~表 1-5。