

熔模铸造手册

中国铸造协会 编

熔模铸造手册

中国铸造协会 编



机械工业出版社

《熔模铸造手册》系统地介绍了熔模铸造的发展和特点，熔模铸造用合金，熔模铸件、工艺和压型设计，模料及制模，耐火材料，以及水玻璃、硅溶胶和硅酸乙酯三种粘结剂制壳工艺，型芯，合金熔炼，浇注及铸件控制凝固技术，热处理，清理与精整，不同合金典型零件熔模铸造实例，艺术品熔模铸造，铸件质量检测及缺陷防止，生产组织和管理，计算机技术在熔模铸造中的应用等。附录中列出了熔模铸造常用工艺材料性能测试方法，主要原辅材料、设备和熔模铸件的国内主要生产厂名录。内容丰富，新颖实用。

本书可供从事熔模铸造生产和科研的工程技术人员使用，也可供大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

熔模铸造手册/中国铸造协会编. —北京: 机械工业出版社, 2000.10
ISBN 7-111-08174-9

I. 熔… II. 中… III. 熔模铸造-手册
IV. TG249. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 66449 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 余茂祚 版式设计: 冉晓华 责任校对: 申春香

封面设计: 姚毅 责任印制: 郭景龙

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·37.5 印张·2 插页·931 千字

0 001—5000 册

定价: 66.00 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、68326677-2527

AA072/05

前 言

熔模铸造是一种能生产优质精密铸件的近净形技术，在工业生产中应用日益广泛。

为进一步推动我国熔模铸造业的发展，由中国铸造协会组织专家撰写的中国第一本熔模铸造专用手册。其内容反映我国改革开放以来，特别是 20 世纪 90 年代后熔模铸造方面的新成就，同时充分吸收了国外熔模铸造的最新资料。本书涵盖熔模铸造合金，铸件、工艺和压型设计，熔模铸造工艺、设备、材料，质量检测，以及管理等方方面面。全书汇集了大量技术资料、数据和图表，实用性强。《熔模铸造手册》还可使您全面了解和掌握国内外与熔模铸造相关的最新技术标准，是一本资料新颖、内容全面、适用面广、实用性强的手册。它不仅适用于熔模铸造的工程技术人员和大专院校师生，也适用于熔模铸件用户、原辅材料和设备生产厂商。

本书共分 20 章及附录共 21 个部分。各章执笔编写者是：第 1、12 章 姜不居；第 2、9 章 闫双景；第 3、4、5 章 许云祥；第 6、11、13、18、20 章 陈 冰；第 7、8 章 包彦堃；第 10、16 章 陈美怡；第 14 章 谭继良；第 15 章、附录 B、附录 C 周泽衡；第 17 章 谭德睿；第 19 章 吕志刚；附录 A 和第 12、14 章中铝合金熔炼、热处理部分 沈桂荣。全书由陈冰、姜不居、许云祥统稿。

此外，有些章节还有一些同志参加编写工作，分别注在各章后面。

由于作者水平有限，书中难免有疏漏之处，热忱希望广大读者批评指正。

《熔模铸造手册》编写组

目 录

前言

第1章 概论..... 1

1.1 熔模铸造发展概况..... 1

1.1.1 历史..... 1

1.1.2 现状..... 2

1.2 熔模铸造工艺流程及特点..... 3

1.2.1 工艺流程..... 3

1.2.2 特点..... 5

1.3 熔模铸造应用实例..... 5

1.4 怎样购买熔模铸件..... 10

1.4.1 选择熔模铸件供应厂家..... 10

1.4.2 关注熔模铸件工艺性..... 11

1.4.3 报价单..... 11

1.4.4 图样..... 11

1.4.5 订单..... 11

1.4.6 模具..... 12

1.4.7 样品..... 12

参考文献..... 12

第2章 熔模铸造用合金..... 13

2.1 概述..... 13

2.1.1 合金选择原则..... 13

2.1.2 合金的工艺性能及成本..... 13

2.1.3 合金的有关标准..... 13

2.2 铸铁..... 15

2.3 铸造碳钢和低合金钢..... 16

2.3.1 一般工程用铸造碳钢..... 16

2.3.2 铸造低合金钢..... 18

2.4 铸造不锈钢和耐热钢..... 19

2.4.1 工程结构用中、高强度不 锈钢..... 19

2.4.2 耐腐蚀不锈钢(不锈耐酸钢)..... 22

2.4.3 铸造耐热钢..... 35

2.5 铸造耐磨钢和工具钢..... 39

2.5.1 铸造高锰钢..... 39

2.5.2 铸造工具钢..... 47

2.6 铸造高温合金..... 47

2.6.1 中国标准..... 47

2.6.2 美国标准..... 47

2.6.3 中外铸造高温合金牌号 近似对照..... 47

2.7 铸造镍基、钴基合金..... 51

2.7.1 镍基合金..... 51

2.7.2 钴基合金..... 51

2.8 铸造铝合金和镁合金..... 53

2.8.1 铸造铝合金..... 53

2.8.2 铸造镁合金..... 60

2.9 铸造铜合金..... 62

2.10 铸造钛合金..... 65

参考文献..... 67

第3章 熔模铸件结构设计..... 68

3.1 熔模铸件结构工艺性要求..... 68

3.2 熔模铸件结构要素..... 70

3.2.1 壁厚..... 70

3.2.2 铸造圆角..... 71

3.2.3 壁的连接..... 71

3.2.4 起模斜度..... 73

3.2.5 最小铸孔、铸槽..... 73

3.2.6 铸肋..... 74

3.2.7 凸台..... 75

3.2.8 铸造文字、图案、螺纹..... 76

3.2.9 镶嵌件..... 76

3.3 转制熔模铸件的结构修正..... 77

3.3.1 壁厚修正..... 77

3.3.2 结构修正..... 77

3.4 熔模铸件尺寸公差与表面粗糙度	79	性能	164
3.4.1 熔模铸件尺寸公差	79	5.5.2 硅橡胶压型(模具)制作	168
3.4.2 熔模铸件形位公差	82	5.6 其它母模复制压型(模具)	169
3.4.3 熔模铸件表面粗糙度	84	5.6.1 环氧树脂压型(模具)	169
参考文献	85	5.6.2 电铸喷镀压型	170
第4章 熔模铸件工艺设计	86	5.7 浇注补缩系统模具及熔模校正用模具	171
4.1 熔模铸件工艺结构及其参数	86	5.7.1 浇注补缩系统模具	171
4.1.1 机械加工余量	86	5.7.2 熔模校正用模具	173
4.1.2 铸孔	86	参考文献	174
4.1.3 工艺孔	87	第6章 模料和制模	175
4.1.4 工艺肋	89	6.1 模料常用原材料	175
4.1.5 工艺凸台	90	6.1.1 蜡质原材料	175
4.2 熔模铸件基准面的选择	91	6.1.2 树脂类原材料	176
4.2.1 熔模铸件基准面的选择原则	91	6.1.3 高聚物类原材料	176
4.2.2 基准面的选择实例	92	6.2 模料成分及性能	176
4.3 熔模铸造浇注补缩系统设计	92	6.2.1 对模料的基本要求	176
4.3.1 熔模铸造浇注补缩系统的功能	92	6.2.2 蜡基模料	178
4.3.2 熔模铸造浇注补缩系统的分类	93	6.2.3 树脂基模料	178
4.3.3 熔模铸件浇注补缩系统方案设计要点	100	6.2.4 填料模料	179
4.3.4 浇注补缩系统组元结构	104	6.2.5 水溶性模料	180
4.3.5 浇注补缩系统组元计算	108	6.2.6 商品化模料	181
4.3.6 浇注补缩系统评价	120	6.3 模料性能试验方法	184
4.4 工艺图和铸件图的绘制	120	6.3.1 常规标准试验方法	184
参考文献	121	6.3.2 热分析法	186
第5章 压型设计和制造	123	6.3.3 模料力学性能试验的新方法	186
5.1 压型分类	123	6.4 制模设备与工艺	186
5.2 机械加工压型	124	6.4.1 制模设备	186
5.2.1 压型的结构与类型	124	6.4.2 制模工艺	192
5.2.2 压型的设计	126	6.5 模料回收和再生	195
5.3 铸造金属压型	159	6.5.1 蜡基模料的回收	195
5.4 石膏压型(模具)	161	6.5.2 树脂基模料的回收	196
5.5 硅橡胶压型(模具)	164	6.6 熔模常见缺陷及其防止方法	197
5.5.1 常用制模硅橡胶的种类及		参考文献	199
		第7章 制壳耐火材料	200
		7.1 概述	200
		7.2 硅砂	201

7.2.1	SiO ₂ 系统状态图及多晶转化	201	8.7.2	硅溶胶表面层涂料	235
7.2.2	熔模铸造用硅砂(粉)	202	8.7.3	硅溶胶-水玻璃复合型壳 工艺	235
7.2.3	熔融石英(石英玻璃)	204	8.7.4	脱蜡与焙烧	235
7.3	电熔刚玉	205	参考文献	235	
7.4	锆砂(锆英石)	206	第9章 硅溶胶粘结剂及制壳工艺	237	
7.4.1	ZrO ₂ -SiO ₂ 二元相图	206	9.1 硅溶胶粘结剂	237	
7.4.2	锆砂(粉)在熔模铸造中的应用	206	9.1.1 硅溶胶的制备	237	
7.5	铝-硅系材料	208	9.1.2 熔模铸造用硅溶胶	237	
7.5.1	Al ₂ O ₃ -SiO ₂ 二元相图	208	9.1.3 硅溶胶的结构及物化参数	238	
7.5.2	高岭石类耐火材料	208	9.1.4 商品硅溶胶	240	
7.5.3	铝矾土	211	9.2 硅溶胶涂料	241	
7.6	其它耐火材料	213	9.2.1 硅溶胶涂料组成	241	
参考文献	214	9.2.2 硅溶胶涂料配方	242		
第8章 水玻璃粘结剂及制壳工艺	215	9.2.3 涂料配制	242		
8.1	对熔模铸造型壳性能要求	215	9.2.4 涂料性能控制	245	
8.2	水玻璃粘结剂	217	9.3 制壳工艺	246	
8.2.1	水玻璃的种类和组成	217	9.3.1 模组清洗	246	
8.2.2	水玻璃的性能和技术要求	218	9.3.2 制壳工艺	247	
8.2.3	水玻璃的胶凝	220	9.3.3 影响硅溶胶型壳干燥的因素	248	
8.3	水玻璃涂料	221	9.3.4 型壳干燥的测试	248	
8.3.1	对涂料性能的要求	221	9.4 脱蜡和焙烧	250	
8.3.2	涂料组分选择与控制	221	9.4.1 脱蜡	250	
8.3.3	涂料的制备	225	9.4.2 焙烧	252	
8.3.4	水玻璃涂料性能控制	225	9.5 硅溶胶型壳缺陷分析	252	
8.4	水玻璃型壳制壳工艺	227	参考文献	255	
8.4.1	模组脱脂	227	第10章 硅酸乙酯粘结剂及制壳工艺	256	
8.4.2	浸涂料和撒砂	227	10.1 原硅酸乙酯物理化学性质	256	
8.4.3	型壳硬化前的自然干燥	229	10.1.1 原硅酸乙酯	256	
8.4.4	化学硬化	229	10.1.2 乙氧基的化学性质	257	
8.5	脱蜡和焙烧	233	10.2 硅酸乙酯水解液	257	
8.5.1	脱蜡	233	10.2.1 硅酸乙酯水解—缩聚反应	258	
8.5.2	型壳焙烧	233	10.2.2 硅酸乙酯水解加水量 M 及其意义	258	
8.6	水玻璃型壳缺陷分析	233	10.2.3 水解配料用材料	259	
8.7	硅溶胶-水玻璃复合型壳工艺	235			
8.7.1	硅溶胶粘结剂技术性能	235			

10.2.4	水解配料计算	259	11.6	细孔铸造和埋管铸造	284
10.2.5	水解液制备	260	11.6.1	铸件内腔工艺技术数据	285
10.2.6	水解液质量控制	262	11.6.2	型芯管材	285
10.3	硅酸乙酯涂料	262	11.6.3	金属管材型芯的制造工艺	285
10.3.1	涂料质量控制	262	11.7	其它型芯	286
10.3.2	涂料配比	263	11.7.1	水玻璃砂芯	286
10.3.3	涂料配制	263	11.7.2	树脂砂替换粘结剂型芯	287
10.3.4	涂料的使用寿命	263	参考文献	288	
10.4	硅酸乙酯型壳制壳工艺	263	第 12 章 合金熔炼	289	
10.4.1	型壳的干燥—硬化	263	12.1	铸钢的熔炼	289
10.4.2	型壳干燥—硬化工艺对强度的影响	263	12.1.1	熔炼设备	289
10.5	硅酸乙酯的复合型壳应用	264	12.1.2	常用材料	295
10.6	硅酸乙酯型壳常见缺陷分析	265	12.1.3	中频感应炉熔炼	298
参考文献	266	12.1.4	高频感应小翻转炉熔炼	305	
第 11 章 熔模铸造型芯	267	12.2	铸造高温合金熔炼	306	
11.1	概述	267	12.2.1	概述	306
11.1.1	熔模铸造型芯的基本要求	267	12.2.2	真空感应炉	308
11.1.2	熔模铸造型芯的分类	267	12.2.3	常用材料	310
11.2	热压注法陶瓷型芯	268	12.2.4	真空感应炉熔制母合金	313
11.2.1	工艺流程	268	12.2.5	真空感应炉重熔母合金和浇注铸件	316
11.2.2	浆料制备	268	12.3	铸造铝合金的熔炼	319
11.2.3	制芯工艺	271	12.3.1	熔炼设备	319
11.2.4	型芯缺陷分析及防止措施	274	12.3.2	常用材料	320
11.2.5	型芯的使用	274	12.3.3	熔炼前的准备	323
11.2.6	型芯脱除	275	12.3.4	铸造铝合金的精炼和变质处理	325
11.3	传递成形陶瓷型芯	276	12.3.5	熔炼工艺	328
11.3.1	制芯工艺流程	277	12.4	铸造铜合金的熔炼	330
11.3.2	芯料配比	278	12.4.1	熔炼设备	330
11.3.3	型芯性能	278	12.4.2	常用材料	332
11.4	灌浆成形陶瓷型芯	278	12.4.3	熔炼前准备	333
11.4.1	灌浆法制芯的工艺流程	278	12.4.4	熔炼工艺	335
11.4.2	陶瓷浆料的配比	279	12.4.5	脱氧与除气	336
11.4.3	型芯制备	280	12.5	铸造钛合金的熔炼	337
11.5	水溶型芯	281	12.5.1	熔炼设备	337
11.5.1	水溶石膏型芯	281	12.5.2	熔炼工艺	338
11.5.2	水溶陶瓷型芯	282	参考文献	340	

第 13 章 合金浇注和熔模铸件控制 凝固技术

13.1 熔模铸造常用浇注方法	341
13.1.1 重力浇注	341
13.1.2 真空吸铸(CLA 法)	347
13.1.3 调压浇注	350
13.1.4 低压浇注	351
13.1.5 离心浇注	351
13.2 过滤净化技术	352
13.2.1 过滤网(器)的种类	352
13.2.2 过滤网(器)的性能和技 术要求	353
13.2.3 过滤网(器)的规格	354
13.2.4 过滤网(器)的使用	355
13.3 定向凝固和单晶铸造	357
13.3.1 定向凝固原理和方法	358
13.3.2 单晶铸造原理和方法	358
13.3.3 定向凝固和单晶铸造的主 要工艺参数	359
13.3.4 定向凝固设备	361
13.3.5 定向凝固和单晶铸造应用 实例	364
13.4 高温合金细晶铸造	366
13.4.1 熔模铸造高温合金细晶铸造 常用的方法	367
13.4.2 细晶铸造应用实例和主要 工艺参数	367
参考文献	368

第 14 章 熔模铸件热处理

14.1 铸钢件的热处理	369
14.1.1 铸钢件热处理的作用	369
14.1.2 碳钢铸件的热处理	369
14.1.3 低合金钢铸件的热处理	370
14.1.4 高锰钢铸件的热处理	372
14.1.5 铸造工、模具钢铸件的热 处理	373
14.1.6 耐热钢铸件的热处理	374

14.1.7 铸钢件热处理的常见缺 陷与防止	376
14.2 铸造不锈钢(含中、高强度不锈 钢和不锈钢耐酸钢)的热处理	377
14.2.1 马氏体和铁素体不锈钢铸 件的热处理	377
14.2.2 奥氏体不锈钢铸件的热 处理	378
14.2.3 沉淀硬化型不锈钢铸件的 热处理	379
14.3 球墨铸铁件的热处理	379
14.3.1 球墨铸铁件的退火	379
14.3.2 球墨铸铁件的正火	380
14.4 有色合金铸件的热处理	381
14.4.1 铜合金铸件的热处理	381
14.4.2 铝合金铸件的热处理	382
14.5 高温合金铸件的热处理	384
参考文献	385

第 15 章 熔模铸件清理与精整

15.1 熔模铸件清理	386
15.1.1 清除型壳	386
15.1.2 切割浇冒口	391
15.1.3 表面及内腔清理	391
15.2 熔模铸件的修补	403
15.2.1 补焊	403
15.2.2 浸渗处理	408
15.2.3 热等静压(HIP)处理	410
15.3 熔模铸件精整	415
15.3.1 铸件修整	415
15.3.2 铸件矫正	416
15.3.3 铸件光饰	417
15.3.4 铸件的钝化与防锈	422
参考文献	427

第 16 章 各种合金典型铸件熔模 铸造工艺

16.1 铝合金熔模铸造工艺	429
16.1.1 复杂薄壁铝合金件的熔模	

铸造	429	17.7.4 锌合金	462
16.1.2 波导管的熔模石膏型法	429	17.7.5 低熔点合金	463
16.1.3 铝合金叶轮的熔模铸造	432	17.7.6 贵金属	465
16.2 不锈钢高尔夫球杆头的熔模铸造	435	17.7.7 铸铁	469
16.2.1 不锈钢高尔夫球杆头的结构特点及质量要求	435	17.7.8 铸造不锈钢	469
16.2.2 杆头熔模铸造工艺要点	435	17.8 艺术铸件的焊接和着色	470
16.3 钛合金叶轮的熔模铸造	437	17.8.1 艺术铸件的焊接	470
16.3.1 钛合金熔模铸造材料与工艺	438	17.8.2 艺术铸件的着色和保护	472
16.3.2 石墨熔模铸型	438	17.9 实例	479
16.4 高温合金叶片的熔模铸造	440	参考文献	480
16.4.1 概况	440	第 18 章 熔模铸件质量检验和常见缺陷分析	481
16.4.2 铸件尺寸及几何形状	441	18.1 概述	481
16.4.3 控制铸件疏松的一些工艺措施	444	18.1.1 熔模铸件质量标准	481
参考文献	446	18.1.2 铸件检验项目、内容和方法	481
第 17 章 艺术品熔模铸造	447	18.1.3 铸件按工作条件及用途分类	482
17.1 艺术品熔模铸造工艺方法分类、特点和应用	447	18.2 熔模铸件几何尺寸和重量的检测	484
17.2 艺术品熔模铸造的模具制作	447	18.2.1 熔模铸件尺寸(线性尺寸)公差	484
17.3 艺术铸件结构设计	447	18.2.2 熔模铸件形位公差	484
17.4 艺术品熔模	449	18.2.3 熔模铸件尺寸检测的方式、方法	484
17.4.1 艺术品熔模铸造的制模方法及应用特点	449	18.2.4 叶片型面和空心叶片壁厚的测量	486
17.4.2 艺术品熔模铸造用模料	449	18.2.5 熔模铸件重量偏差的评定	489
17.5 多层型壳的制作	450	18.3 熔模铸件表面粗糙度的评定和浇冒口余根	490
17.6 石膏铸型的制作	450	18.3.1 铸件表面粗糙度的技术标准	490
17.6.1 石膏铸型混合料(铸粉)	451	18.3.2 铸件表面粗糙度的评定方法	490
17.6.2 石膏铸型制作工艺	451	18.3.3 浇冒口余根	490
17.6.3 焙烧及浇注	453	18.4 化学成分检验	491
17.7 艺术铸造用合金	454	18.4.1 化学成分检验取样方法	491
17.7.1 艺术铸造用合金的性能要求	454	18.4.2 化学成分检验方法标准代号	
17.7.2 铜合金	456		
17.7.3 铝合金	461		

和名称·····	492	19.1.3 两种现代企业管理思想·····	524
18.5 力学性能检验·····	492	19.2 熔模铸造企业管理方法·····	526
18.5.1 力学性能检验的项目、内容和方法·····	492	19.2.1 生产计划·····	526
18.5.2 力学性能试样·····	493	19.2.2 生产现场控制·····	527
18.6 铸件表面和近表面缺陷的检验·····	500	19.2.3 质量管理·····	529
18.6.1 磁粉探伤·····	500	19.2.4 库存管理·····	531
18.6.2 渗透探伤·····	502	19.2.5 成本控制·····	533
18.6.3 熔模铸件允许存在的表面和近表面缺陷·····	505	19.3 熔模铸造企业的计算机管理·····	537
18.7 X射线探伤·····	507	19.3.1 计算机简介·····	537
18.7.1 X射线探伤设备、器材·····	507	19.3.2 计算机管理的优势·····	537
18.7.2 X射线探伤方法·····	507	19.3.3 熔模铸造企业实施计算机管理·····	538
18.7.3 X射线探伤缺陷判断·····	508	参考文献·····	539
18.7.4 X射线透照熔模铸件内部允许的缺陷·····	508	第20章 计算机技术在熔模铸造中的应用 ·····	540
18.8 金相检验·····	510	20.1 熔模铸造过程的计算机数值模拟·····	540
18.8.1 低倍组织检查·····	510	20.1.1 历史和现状·····	540
18.8.2 铸件晶粒度检查·····	510	20.1.2 基本原理·····	541
18.8.3 表面组织检查·····	512	20.1.3 软件的组成·····	542
18.8.4 铸件内部组织检查·····	513	20.1.4 世界知名铸造过程模拟软件简介·····	544
18.8.5 常用的金相检验方法标准·····	515	20.1.5 选购软件须知·····	546
18.9 其它特殊性能检验·····	515	20.1.6 软件的使用·····	548
18.9.1 密封性检验·····	515	20.2 快速样件和快速模具成形技术·····	551
18.9.2 钢及高温合金抗氧化性的检测·····	516	20.2.1 基本原理·····	551
18.9.3 抗腐蚀性检测·····	516	20.2.2 快速成形方法·····	552
18.9.4 常用特殊性能检验方法标准·····	516	20.2.3 常用快速自动成形设备·····	554
18.10 熔模铸件常见缺陷及其防止方法·····	519	20.2.4 快速成形技术在熔模铸造中的应用·····	554
参考文献·····	523	20.2.5 应用效果比较·····	557
第19章 熔模铸造生产组织和管理 ·····	524	20.3 在熔模铸造生产中实施并行工程·····	560
19.1 概述·····	524	20.3.1 串行工程和并行工程·····	560
19.1.1 企业与管理·····	524	20.3.2 熔模铸造生产中实施并行工程·····	561
19.1.2 现代企业管理·····	524		

20.3.3 并行工程环境下熔模铸件的 开发与生产	562	附录 B 精密铸造主要生产厂家的 测定方法	567
20.3.4 应用实例	564	附录 C 精密铸造主要原辅材料、 设备和仪器厂家名录	574
参考文献	565		
附录 A 熔模铸造常用工艺材料性能			584

第 1 章 概 论

1.1 熔模铸造发展概况

熔模铸造又称失蜡铸造，它的产品精密、复杂、接近于零件最后形状，可不加工或很少加工就直接使用，故熔模铸造是一种近净形成形的先进工艺。

1.1.1 历史

熔模铸造的历史可以追溯到 4000 年前，最早发源的国家有埃及、中国和印度，然后才传到非洲和欧洲的其他国家。

中国古代留下很多熔模铸件精品，如春秋晚期的王子午鼎、铜禁，战国的曾侯乙尊、盘，汉代的铜错金博山炉、长信宫灯，隋朝的董钦造弥陀鎏金铜像，明代浑天仪、武当真武帝君像，清故宫太和门铜狮等。图 1-1 为铜错金博山炉图，山顶有三猴，一猴骑一独角兽，半山有行人、樵夫及虎、野猪等八只出没动物，极为精致，器腹为错金云纹、圈足饰透雕云纹，极为华丽。

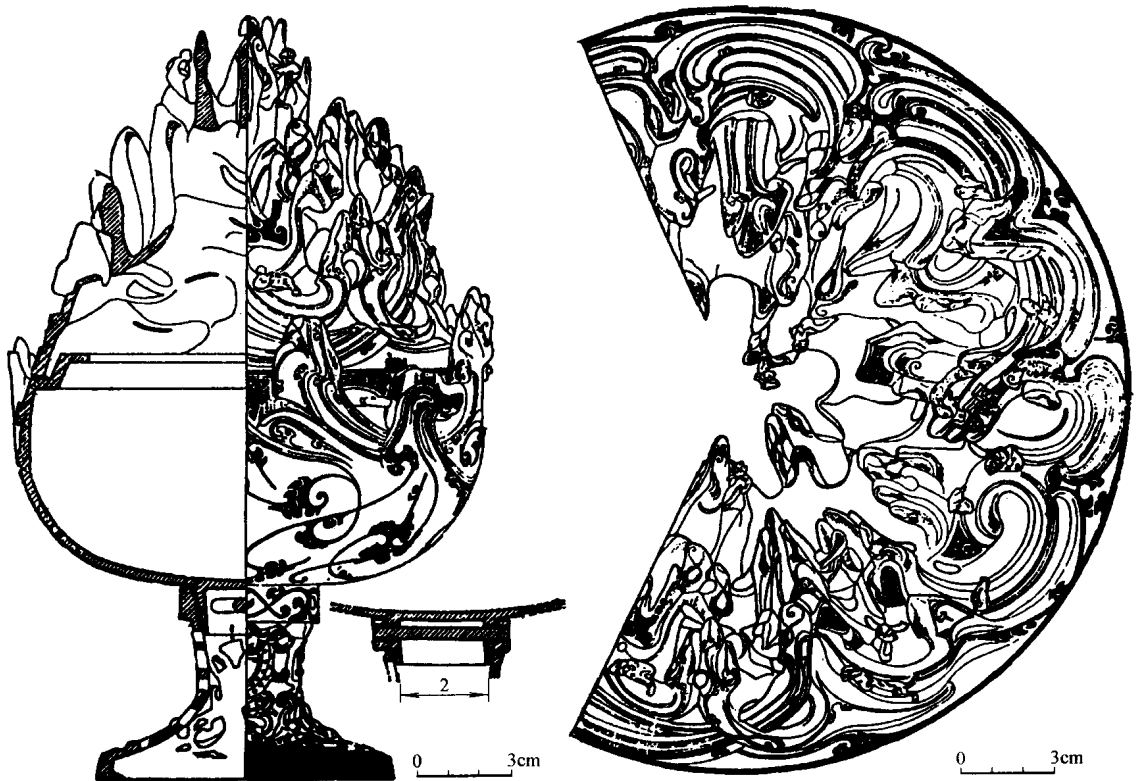


图 1-1 西汉的铜错金博山炉

在西非，大约在 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(Benvenuto Cellini)所制造的 Perseus 仙座和女妖首领的

铜像就是其中最杰出的作品之一。

世界上最早的失蜡铸造文字记述，当推中国南宋(公元 1127~1279 年)赵希鹄的《洞天清禄集》。随后有蔡利尼 1568 年的论文，明代宋应星《天工开物》及 16 世纪中期 VaVrinec Krickes 的《大炮、球、迫击炮、钟的铸造与制备指导》等。

19 世纪末期，牙医用熔模铸造工艺，结合离心浇注技术生产牙科铸件。20 世纪初为生产出更精密的牙科件，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。

在恶劣环境中工作的航空发动机零件，如涡轮增压器，若采用传统合金，则不能满足性能上的要求。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在高温下有优异的性能，可用于涡轮增压器。但这类合金很难加工，熔模铸造就成为该类合金成形的工艺方法，迅速地发展成工业技术，进入航空、国防工业部门，并迅速地应用到其它工业部门。

1.1.2 现状

自 20 世纪 40 年代熔模铸造用于工业生产后，半个世纪中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%，而欧洲则英国占 42%、法国 26%、德国 19%、意大利 7%，其余 6%。当年美国熔模铸造的销售额高达 26.1 亿美元。而 1970 年、1980 年美国熔模铸造的销售额分别仅为 2.5 亿美元和 11 亿美元，即 1996 年为 1970 年的 10.4 倍，是 1980 年的 2.37 倍。可见熔模铸造业发展之迅速。现在熔模铸造除用于航空、兵器部门外，几乎应用于所有工业部门，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。

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。

技术发展使熔模铸造不仅能生产小型铸件，而且能生产较大铸件，最大的熔模铸件的轮廓尺寸已近 2m，而最小壁厚却不到 2mm。同时熔模铸件也更趋精密，除线性公差外，零件也能达到较高的几何公差。熔模铸件的表面粗糙度值也越来越小，可达到 $R_a 0.4\mu\text{m}$ 。

另外，由于材质的改进和工艺技术的发展使得铸件力学性能也越来越好。涡轮叶片就是一个很好的例子，图 1-2 反映了涡轮叶片材质和工艺进步使其性能得到了很大的提高。20 世纪 60 年代到 90 年代，涡轮叶片的材质(美国牌号)

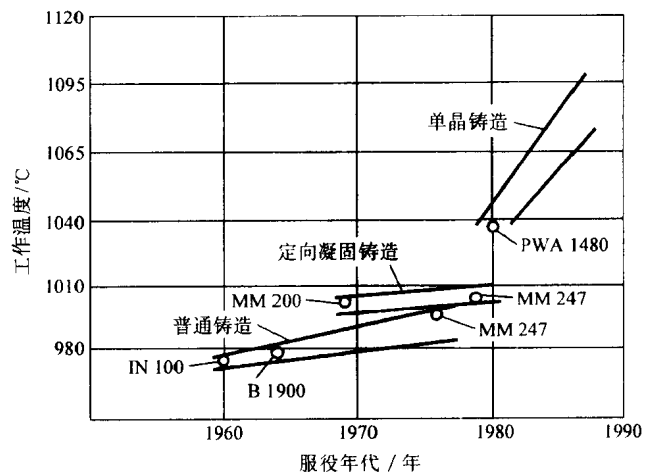


图 1-2 1960 年以来涡轮叶片材料及工艺发展

从 IN100、B1900 到 MM200、MM247，再发展到 PWA1480；同时由于凝固技术的发展，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，从而使涡轮叶片的工作温度由 980℃ 提高到 1100℃ 以上。

钛合金熔模铸造技术的发展，使现代工业中的重要结构材料钛合金能用熔模铸造方法生产出精密复杂零件，如飞机发动机的中间机匣、压气机机匣、医疗置入物等。特别是大型整体钛熔模铸件的出现，它代替组零件，减轻了机器的重量、提高了寿命，取得了很好的效果。据报道，1992 年生产的最大钛熔模铸件榫架经焊接加工后重 340kg，直径 1.918m，高 0.591m。

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。它是利用高温和高压，靠金属蠕变和塑性变形让铸件内部疏松、热裂等缺陷愈合，处理后铸件密度可达到金属理论密度，从而使性能提高。热等静压处理可使镍基高温合金、钛合金和铝合金的高温低周疲劳性能提高 3~10 倍；使镍基高温合金和钛合金的持久寿命提高 2 倍以上；使铸件性能波动和分散程度降低到原来的六分之一。

为缩短生产周期，简化工序，熔模铸造与 20 世纪 80 年代出现的快速成形技术(RPT)结合，使用 RPT 的立体光刻法(SLA)、选择性激光烧结法(SLS)、熔融堆积制造法(FDM)或分层实体制造法(LOM)等工艺所制塑料、蜡和纸原型代替传统蜡模，或使用直接型壳生产法(DSPC)工艺生产的陶瓷型壳进行熔模铸造生产，见图 1-3，增强了市场竞争力。

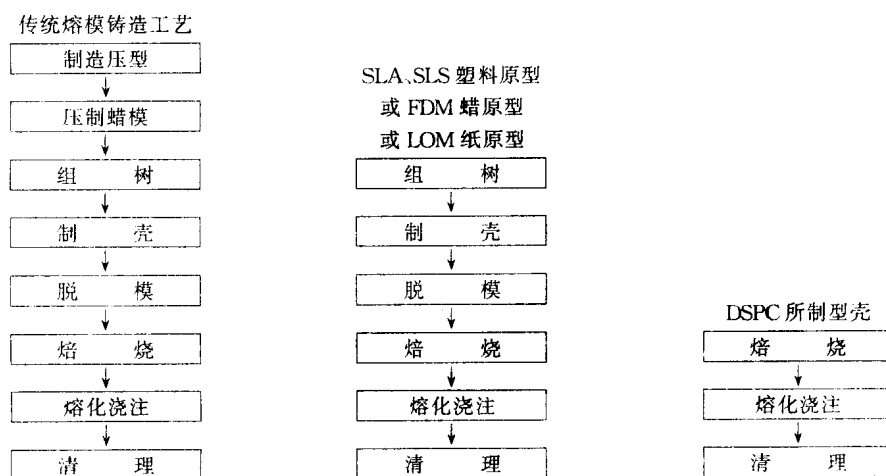


图 1-3 使用快速原型后熔模铸造工艺与传统工艺比较

机械化、自动化的进展打破了“熔模铸造工艺不可能实现机械化”的旧观念，日本、英国和前苏联已成功地将熔模铸造工艺用来生产低成本的汽车等民用零件。

总之，随着铸造技术的发展，熔模铸造已可以生产更精、更大、更强的高价值的产品，“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。这些都使熔模铸造的应用面得以扩大，从而在与其它工艺竞争中处于较有利的地位，前景光明。

1.2 熔模铸造工艺流程及特点

1.2.1 工艺流程

熔模铸造是用可熔(溶)性一次模和一次型(芯)使铸件成形的铸造方法。现代熔模铸造工艺流程如图 1-4 所示。用压型压制熔模(图 1-4a)、打开压型取出熔模(图 1-4b)、组合模组(图 1-4c)、将模组浸入涂料桶中上涂料(图 1-4d)、撒砂(图 1-4e)、让型壳干燥(图 1-4f)、重复 d、e、f 工序数次, 形成一定厚度的型壳, 脱除型壳中蜡(图 1-4g)、型壳焙烧(图 1-4h)、

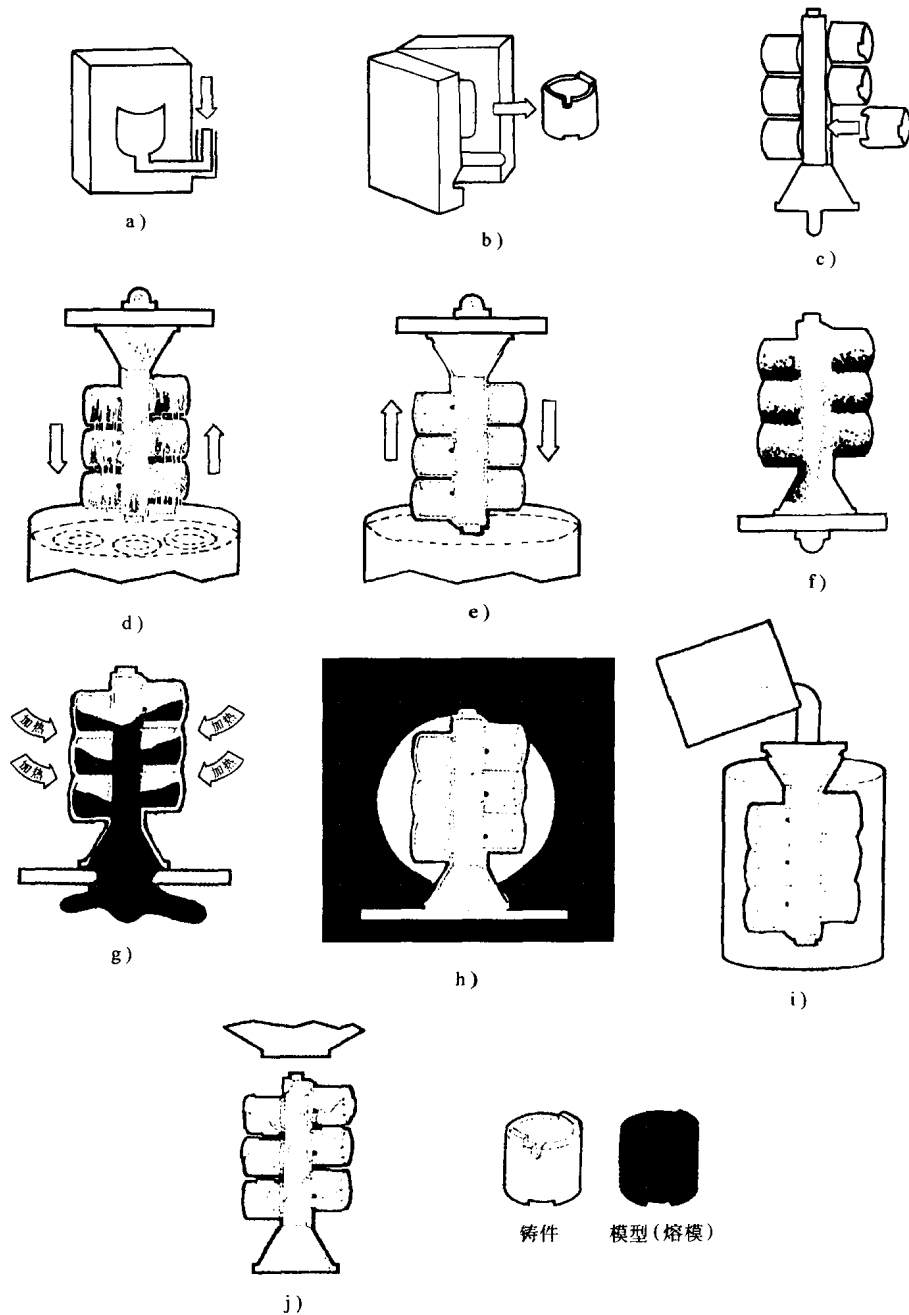


图 1-4 熔模铸造工艺流程

- a) 压射模料 b) 取出熔模 c) 组合模组 d) 上涂料 e) 撒砂 f) 型壳干燥
g) 熔失熔模(脱蜡) h) 型壳焙烧 i) 浇注 j) 脱壳和清整

浇注金属液(图 1-4i)、脱壳和清理(图 1-4j)。图 1-5 所示为熔模铸造工艺流程框图。

1.2.2 特点

同其它铸造方法和零件成形方法相比，熔模铸造有以下特点：

1. 铸件尺寸精度高、表面粗糙度值细 熔模铸件的尺寸精度可达到 4~6 级，表面粗糙度可达到 $R_a 0.4 \sim 3.2 \mu\text{m}$ ，可以大大减少铸件的切削加工余量，并可实现无余量铸造。

2. 可铸造形状复杂的铸件 熔模铸造能铸出形状十分复杂，并难于用其它方法加工的铸件，如叶轮、空心叶片等，给零件结构设计很大的自由度。也能铸造壁厚为 0.5mm，最小孔径为 1mm 以下，铸件轮廓尺寸小到几毫米、大到上千毫米，重量轻至 1g、最重接近 1000kg 的铸件。还可以将原来由许多零件组合、焊接的部件进行整铸，并减轻零件重量。总之，熔模铸造能最大限度地提高毛坯与零件之间的相似程度，铸件尺寸精度高和表面粗糙度值细，因而可以减少机加工余量和降低生产成本。

3. 合金材料不受限制 各种合金材料，如碳素结构钢、不锈钢、合金钢、铸铁、铝合金和铜合金以及铸造高温合金、镁合金、钛合金和贵金属等材料都可用于熔模铸造生产，对于难以锻造、焊接和切削加工的合金材料，更是特别适宜于用熔模铸造方法生产。

4. 生产灵活性高、适应性强 熔模铸造的工装模具可采用多种材料和工艺方法制造，使它既适用于大批量生产，也适用于小批量生产，甚至单件生产。大批量生产采用金属压型，小批量生产可采用易熔合金压型等，样品研制可直接采用快速原型代替蜡模。

熔模铸造也有一定的局限性，如工艺流程繁琐，生产周期长；铸件尺寸不能太大；铸件冷却速度较慢等。

1.3 熔模铸造应用实例

熔模铸造几乎应用于所有工业部门，特别是航空航天、造船、汽轮机和燃气轮机、兵器、电子、石油、化工、核能、交通运输、轻工、纺织、制药、医疗器械、仪器仪表、机械、泵和阀、运动器械、家用电器等等。熔模铸件按其服务对象可分为两类：一类用于航空及航天工业；一类用于其它行业。表 1-1 为熔模铸造应用实例。

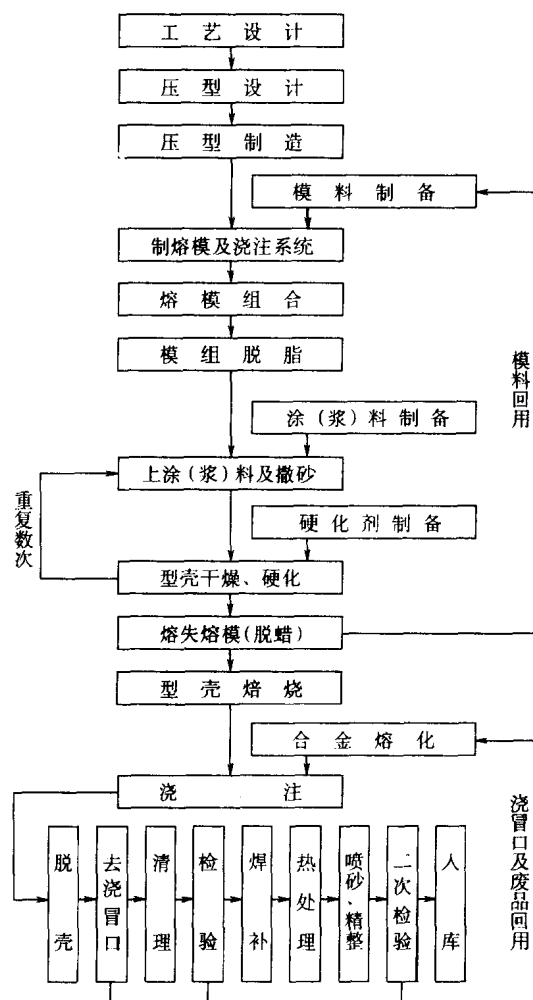


图 1-5 熔模铸造工艺流程框图