

先进制造技术丛书

近净形熔模精密铸造 理论与实践

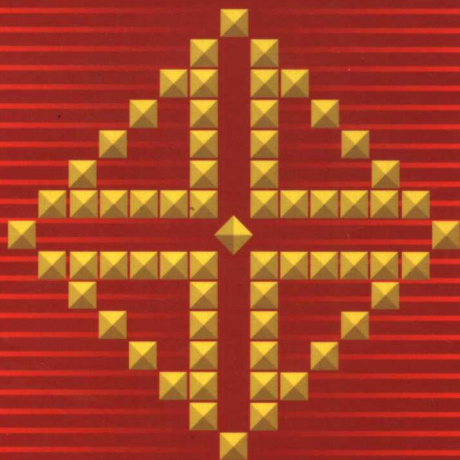
Theory and Practice
of Near Net-shape Investment Casting

张立同 曹腊梅 刘国利 王红红 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



► 上架建议：精密铸造 ◀

<http://www.ndip.cn>

ISBN 978-7-118-04908-4



9 787118 049084 >

ISBN 978-7-118-04908-4

定价：45.00 元

先进制造技术丛书

近净形熔模精密铸造 理论与实践

Theory and Practice of Near
Net-shape Investment Casting

张立同 曹腊梅 刘国利 王红红 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

近净形熔模精密铸造理论与实践/张立同等编著.

北京:国防工业出版社,2007.4

(先进制造技术丛书)

ISBN 978-7-118-04908-4

I. 近... II. 张... III. 熔模铸造:精密铸造

IV. TG249.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 153970 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 10 $\frac{3}{4}$ 字数 270 千字

2007 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 45.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革

开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金

第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员	陈达植				
顾问	黄宁				
主任委员	刘成海				
副主任委员	王峰	张涵信	张又栋		
秘书长	张又栋				
副秘书长	彭华良	蔡镭			
委员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成	
(按姓名笔画排序)	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生	
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同	
	张鸿元	陈火旺	侯正明	常显奇	
	崔尔杰	韩祖南	舒长胜		

《先进制造技术丛书》

编委会名单

顾问	师昌绪	中国工程院院士,中国科学院院士、主席团顾问
主任	胡壮麒	中国科学院金属研究所学术委员会主任,工程院院士
副主任	张立同	西北工业大学教授,工程院院士
	徐滨士	装甲兵工程学院教授,工程院院士
	雷廷权	哈尔滨工业大学教授,工程院院士
	艾 兴	山东大学教授,工程院院士
	周 济	华中科技大学教授,工程院院士
委员	赵连城	哈尔滨工业大学教授,博士生导师
	曾松岩	哈尔滨工业大学教授,博士生导师
	黄树槐	华中科技大学教授,博士生导师
	李庆春	哈尔滨工业大学教授,博士生导师
	田锡唐	哈尔滨工业大学教授,博士生导师
	王仲仁	哈尔滨工业大学教授,博士生导师
	董 申	哈尔滨工业大学教授,博士生导师
	吴复兴	北京 625 所科学技术委员会主任,研究员
	方洪渊	哈尔滨工业大学材料学院副院长,博士生导师
秘书	王桂伟	哈尔滨工业大学材料学院教学秘书

序

制造业是我国国民经济的支柱产业,其增加值约占我国国内生产总值(GDP)的 40%以上,振兴制造业是启动我国经济新高潮的杠杆,日本和美国的经验均可资借鉴,而先进制造技术是振兴制造业的系统工程中的重要组成部分之一。

先进制造技术(AMT—Advanced Manufacturing Technology)作为一个专有名词提出始于 20 世纪 80 年代末期,当时美国根据本国制造业面临的挑战与机遇,以及存在的问题进行了深刻反省,同时为了加强制造业的竞争能力和促进国民经济增长而提出先进制造技术新概念。从技术进步角度看,以计算机为中心的新一代信息技术的发展,全面推进了制造技术的飞跃发展,在不断汲取其他相关领域新技术的基础上,使创新贯穿于制造全过程,并使技术与管理相结合,不断推出新的制造模式,推动人类生产活动不断进步。

先进制造技术这一名词一经提出,立即获得世界各国的积极响应,将制造技术的发展推向新的高潮,经过 20 多年的努力,先进制造技术由于专业和学科间不断渗透、交叉、融合,技术日趋系统化、集成化,已发展成为集机械、电子、信息、材料和管理技术为一体的新兴交叉学科,可以称之为“制造工程”。

先进制造技术的核心和基础是优质、高效、低耗、清洁、无污染工艺,它是由传统的制造工艺发展起来的,并与计算机、信息、自动化、新材料及现代管理技术实现了局部或系统集成,以实现优质、高效、低耗、无污染和灵活生产,实现可持续发展。

未来先进制造技术的发展趋势是精密化、柔性化、智能化与集成化。首先设计技术不断现代化,突出反映在数值模拟与仿真以

及虚拟现实技术和产品建模理论等方面。成型制造技术向精密成型或近净成型方向发展,包括精密铸造、精密塑性成型和精密连接技术等。加工制造技术向超精密、超高速及发展新一代制造装备的方向发展。随着激光、电子束、离子束、分子束等新能源或其载体的引入,新型的高密度特种加工方法以及复合工艺不断发展,以至设计、材料应用、加工制造等专业学科界限日渐淡化,逐步趋向一体化。由于工艺模拟技术的迅速发展,也使工艺逐渐发展为工程科学。虚拟现实技术在制造业中获得日益广泛的应用。

为了适应世界知识经济时代的来临,促进先进制造技术在我国的发展,并为这一领域的科学人员提供必要的参考书,我们特地组织编写了本套《先进制造技术丛书》,希望它的出版有助于推动先进制造技术的快速进步,为我国的经济发展和国防现代化服务。

《先进制造技术丛书》编委会

2000年2月23日

前 言

近净形熔模铸造是一种少(无)切削的特种铸造方法。铸件的工作面无需机械加工或只进行局部打磨,即可达到类似抛光铸件的尺寸精度和表面粗糙度。不仅能节省大量机加工工时和提高金属利用率,还能铸造其他方法难以制造的高性能空心叶片和薄壁、复杂、整体近净形精密构件。近净形熔模铸造对提高航空航天产品性能、减轻重量和降低成本都有难以替代的作用,已经成为现代航空航天产品构件的一种重要生产方法。

我国近净形熔模铸造工艺的探索,早在 20 世纪 60 年代中后期已经开始,当时的条件虽然极端艰难,在前航空工业部技术局几届领导的支持和关怀下,在我国航空研究院所、高等院校和工厂的广大科技人员多年坚持不懈的共同努力下,在自行研制熔模铸造工艺用多种材料的基础上,终于在 80 年代初期突破了近净形熔模铸造的技术关键,将我国的熔模铸造技术水平推向国际先进行列,为我国熔模铸造技术的快速发展奠定了坚实基础。80 年代中后期又先后突破了近净形薄壁复杂铝合金铸件的石膏型熔模铸造技术,高温合金泡沫陶瓷过滤净化技术和定向凝固用陶瓷型壳材料和陶瓷型芯技术……。上述成果先后获得国家科技进步一等奖、二等奖各一项,国家科技进步三等奖三项和部委科技进步二等奖多项。在我国,一种制造技术获得多项大奖的情况还不多见,足以说明该技术的难度和重要性。这些研究成果是我国自行发展航空制造技术的宝贵财富,不仅在航空航天产品的生产中发挥了重要作用,而且推动了我国熔模铸造全行业的技术进步。但是,至今还没有一本全面反映这些成就的专著。

我国已经出版了不少熔模铸造书籍,1990 年出版的《熔模铸

造工艺》，比较系统地反映了我国 20 世纪 90 年代以前熔模铸造技术的发展概况和研究成果，特别在模料、粘结剂及其制壳工艺理论等方面的论述反映出较高的学术水平。鉴于以上情况本书在编写时不求系统性和完整性，而是着重反映航空航天产品对近净形熔模铸造技术的需求，总结我国近 30 年来航空航天近净形熔模铸造研究的主要理论和实践成果。由于作者水平有限，错误和局限性在所难免，不当之处请广大读者批评指正。

本书由西北工业大学和北京航空材料研究院共同完成。全书共九章，第一章由曹腊梅、张立同主写，刘国利和王红红参加；第二章由张立同编写；第三、四、五、六章由张立同、曹腊梅、刘国利、王红红和高蓉编写；第七章由曹腊梅、张立同编写；第八和九章由曹腊梅、刘国利和王红红编写。高蓉负责全书图表的编辑和审核。张立同为中国工程院院士、西北工业大学教授，曹腊梅、王红红为北京航空材料研究院研究员，刘国利为北京航空材料研究院高级工程师，高蓉为西北工业大学工程师。

内 容 简 介

本书总结了我国近三十年来航空航天工业近净形熔模铸造理论和实践的研究成果。着重阐述了近净形熔模精密铸造技术的理论基础、熔模、陶瓷型壳、陶瓷型芯材料、近净形熔模铸造工艺及其在高温合金、钛合金和铝合金复杂构件中的应用。此外,还简述了近净形熔模精密铸件的后处理与质量检测等。

本书可供从事熔模精密铸造技术研究和生产的科技人员和高等院校师生参阅。

The research achievements on the theory and practice of near netshape investment casting applied for the aerospace industry in China for almost 30 years are summarized in this book. The theoretical base of near net-shape investment casting technology, the materials of investment patterns, ceramic shells, ceramic cores and the processing of near net-shape investment casting and its application for complicated structural parts of superalloy, titanium alloy and aluminum alloy as the focal points are elaborated. Additionally, this book also introduces the post-treatment and quality inspection technologies of near net-shape investment precision castings.

This book could be used as a reference book for scientific and technical people, college and university teachers and students who are engaged in the research and manufacture of investment precision casting technology.

目 录

第一章 近净形熔模精密铸造技术的发展概况	1
1.1 近净形熔模精密铸造工艺特点及应用范围	1
1.1.1 工艺特点	1
1.1.2 应用范围	2
1.2 近净形熔模精密铸造的发展进程	2
1.2.1 国际近净形熔模精密铸造技术的发展进程	2
1.2.2 我国航空熔模精密铸造技术的发展历程	10
1.3 我国熔模精密铸造的现状和展望	14
1.3.1 我国航空熔模精密铸造的现状	14
1.3.2 我国航空熔模精密铸造的展望	15
第二章 近净形熔模精密铸造技术的理论基础	18
2.1 熔模铸件的铸造变形规律及其控制	19
2.1.1 熔模精密铸件的变形规律	19
2.1.2 对铸件变形规律的分析	21
2.2 近净形熔模铸件的粗糙度形成规律及其控制	27
2.2.1 熔模粗糙度的影响	28
2.2.2 浇注温度对面层耐火材料与高温合金相互作用的影响	28
2.3 近净形熔模精密铸造的关键技术	29
2.3.1 控制铸件的变形因素是实现近净形熔模铸造的前提	30
2.3.2 优质型壳是确保铸件表面粗糙度和表面质量的关键	37
2.3.3 近净形熔模铸造的关键技术要点	39
第三章 近净形熔模精密铸造用模料	41
3.1 模料的分类	41
3.2 模料原材料的化学组成、分子结构及其性能	42
3.2.1 模料原材料的熔点、热稳定性、强度、收缩率、黏度	

与分子结构的关系	42
3.2.2 模料原材料物态变化、膨胀收缩特点与分子结构和组成的关系	43
3.2.3 模料原材料的结晶性与分子结构的关系	45
3.2.4 模料原材料的化学性质与分子结构的关系	46
3.2.5 模料原材料的互溶性与分子结构的关系	47
3.3 模料组成设计、显微结构与性能	49
3.3.1 模料设计的基础	49
3.3.2 对模料性能的要求	53
3.3.3 典型液态模料的设计	55
3.4 典型模料组成与性能特点	60
3.4.1 典型模料的组成及应用	60
3.4.2 典型模料的性能	61
第四章 熔模精密铸造陶瓷型壳的耐热性能基础	63
4.1 铸型的组成和对铸型材料的要求	63
4.2 陶瓷型壳的中温力学性能基础	64
4.2.1 电熔刚玉型壳的中温力学性能机理	65
4.2.2 Al_2O_3 - SiO_2 系陶瓷型壳材料的中温力学性能机理	66
4.3 定向凝固用 Al_2O_3 - SiO_2 系型壳的高温力学性能机理	74
4.3.1 玻璃相数量的估算和 Al_2O_3 、 SiO_2 的分配系数	76
4.3.2 各杂质氧化物在晶相和玻璃相中的分配	81
4.3.3 玻璃相成分及其估计	82
4.4 陶瓷型壳材料的高温物理化学性能基础	84
4.4.1 高温合金与陶瓷型壳材料的界面冶金化学行为	84
4.4.2 钛合金与陶瓷型壳材料的界面冶金化学行为	86
第五章 常用陶瓷型壳耐火材料	90
5.1 高岭土类型壳耐火材料	90
5.1.1 煅烧工艺对高岭土熟料相组成的影响	91
5.1.2 主要杂质的影响	94
5.1.3 上店高岭土型壳的性能特征	96
5.1.4 上店高岭土的制壳特点	97

5.1.5	上店土陶瓷型壳材料的应用效果	100
5.1.6	高岭土类陶瓷型壳材料的应用推广	100
5.2	定向凝固陶瓷型壳材料	106
5.2.1	莫来石-刚玉相区型壳的高温抗蠕变性与微结构 的关系	106
5.2.2	刚玉型壳中二次莫来石化的伴生现象	113
5.2.3	EC95 型壳的焙烧工艺	114
5.3	钛合金用陶瓷型壳材料	115
5.3.1	对钛合金用陶瓷型壳材料的要求	116
5.3.2	钛合金铸造用主要陶瓷型壳材料	116
第六章	其他铸型材料和陶瓷型壳用粘结剂	126
6.1	石膏铸型材料	126
6.1.1	石膏的基本特性	126
6.1.2	铸造用石膏的胶凝特性	129
6.1.3	填料对石膏型性能的影响	139
6.2	型壳粘结剂的类型、性质和应用	148
6.2.1	SiO ₂ 系粘结剂	148
6.2.2	其他特殊粘结剂	148
第七章	型芯的组成、性能与应用	154
7.1	陶瓷型芯	154
7.1.1	陶瓷型芯结构与空心叶片的气冷效果	154
7.1.2	对陶瓷型芯的要求	158
7.1.3	陶瓷型芯的理论基础	159
7.1.4	中温用陶瓷型芯材料	170
7.1.5	定向凝固用陶瓷型芯材料	170
7.1.6	陶瓷型芯的烧结过程	178
7.1.7	陶瓷型芯的新型强化剂	182
7.2	可溶性型芯	188
7.2.1	可溶性羧芯	188
7.2.2	水溶性石膏芯	191
7.2.3	其他水溶性陶瓷型芯	193
7.3	型芯的脱除方法	196

7.3.1	影响陶瓷型芯脱除的工艺因素	196
7.3.2	氧化硅陶瓷型芯的脱除方法	197
7.3.3	氧化铝陶瓷型芯的脱除方法	198
7.4	空心零件中残留型芯的检验	199
7.4.1	残留型芯的检测方法	199
7.4.2	X射线照像技术在残芯检测中的应用	200
第八章	近净形熔模精密铸造工艺	203
8.1	近净形熔模精密铸造的工艺流程	203
8.2	熔模和陶芯压型结构设计的特点	204
8.3	陶瓷型芯的制造	207
8.3.1	陶瓷型芯的工艺流程	207
8.3.2	陶瓷型芯的制备工艺	207
8.4	熔模的制造工艺	214
8.4.1	熔模制造的工艺流程	214
8.4.2	熔模的质量控制	214
8.4.3	典型铸件的熔模制备工艺	224
8.5	熔模铸型的制造工艺	230
8.5.1	陶瓷型壳制造的工艺流程	230
8.5.2	陶瓷型壳的质量影响因素	231
8.5.3	石膏型的制造工艺	236
8.5.4	铸型的脱蜡与焙烧	237
8.6	典型合金的熔炼浇注工艺	239
8.6.1	高温合金的真空熔炼及铸造	239
8.6.2	钛合金的熔炼及浇注工艺	262
8.6.3	铝合金的熔炼与浇注	270
第九章	近净形熔模精密铸件的后处理与质量检测	279
9.1	近净形熔模精密铸件各种后处理的目的和方法	279
9.1.1	铸件热处理	279
9.1.2	铸件热等静压处理	281
9.1.3	铸件的补焊	281
9.1.4	铸件的校形	282
9.1.5	铸件光饰	282