



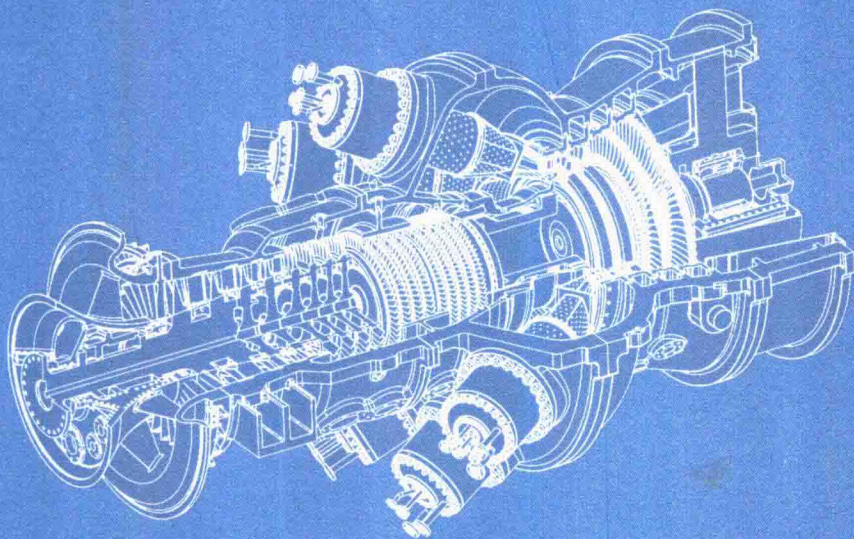
“十二五”国家重点出版规划

先进燃气轮机设计制造基础专著系列

丛书主编 王铁军

高温透平叶片增材制造技术

李涤尘 鲁中良 张安峰 著



 西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

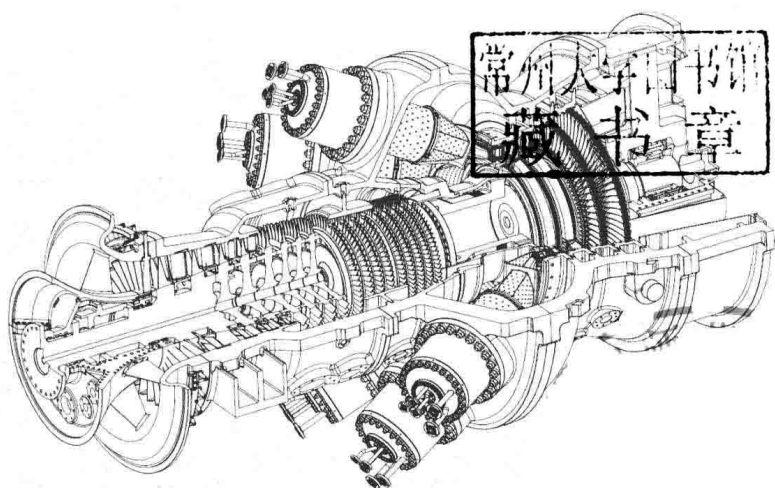
“十二五”国家

先进燃气轮机设计制造基础专著系列

丛书主编 王铁军

高温透平叶片增材制造技术

李涤尘 鲁中良 张安峰 著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内容简介

本书针对目前涡轮叶片制造技术的难点和未来发展高冷却效率涡轮叶片制造的需求,介绍了两种基于增材制造技术(3D 打印)的空心叶片制造技术方法。第一种方法是光固化原型的空心叶片内外结构一体化铸型制造方法,该技术与现有叶片铸造技术结合可以提升空心叶片制造效率和复杂内腔结构制造能力。第二种方法是激光直接成形方法制造涡轮叶片技术,该方法是为空心叶片制造探索新的工艺途径。相关研究为解决复杂涡轮叶片制造提供了新的制造技术路线,具有良好的工程应用前景。

本书主要为从事涡轮动力装备设计与制造、增材制造技术研究的工程技术人员和科研人员提供新技术参考。

图书在版编目(CIP)数据

高温透平叶片增材制造技术/李涤尘,鲁中良,张安峰
著. —西安:西安交通大学出版社,2015.12
(先进燃气轮机设计制造基础专著系列/王铁军主编)
ISBN 978-7-5605-8194-1

I. ①高… II. ①李… ②鲁… ③张… III. ①燃气轮机-透平-叶片-制造 IV. ①TK47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 311550 号

书 名 高温透平叶片增材制造技术
著 者 李涤尘 鲁中良 张安峰
责任编辑 屈晓燕 田 华

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址 <http://www.xjtupress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315(总编办)
传 真 (029)82668280
印 刷 中煤地西安地图制印有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 21.25 彩页 4 页 字数 458千字
版次印次 2016 年 10 月第 1 版 2016 年 10 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-8194-1
定 价 180.00元

读者购书、书店添货,如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82664954 QQ:8377981

读者信箱:lg_book@163.com

版权所有 侵权必究



国家出版基金项目

“十二五”国家重点出版规划

先进燃气轮机设计制造基础专著系列

编委会

顾问

- 钟 掘 中南大学教授、中国工程院院士
程耿东 大连理工大学教授、中国科学院院士
熊有伦 华中科技大学教授、中国科学院院士
卢秉恒 西安交通大学教授、中国工程院院士
方岱宁 北京理工大学教授、中国科学院院士
雒建斌 清华大学教授、中国科学院院士
温熙森 国防科技大学教授
雷源忠 国家自然科学基金委员会研究员
姜澄宇 西北工业大学教授
虞 烈 西安交通大学教授
魏悦广 北京大学教授
王为民 东方电气集团中央研究院研究员

主编

- 王铁军 西安交通大学教授

编委

- 虞 烈 西安交通大学教授
朱惠人 西北工业大学教授
李涤尘 西安交通大学教授
王建录 东方电气集团东方汽轮机有限公司高级工程师
徐自力 西安交通大学教授
李 军 西安交通大学教授

总序

20 世纪中叶以来,燃气轮机为现代航空动力奠定了基础。随后,燃气轮机也被世界发达国家广泛用于舰船、坦克等运载工具的先进动力装置。燃气轮机在石油、化工、冶金等领域也得到了重要应用,并逐步进入发电领域,现已成为清洁高效火电能源系统的核心动力装备之一。

发电用燃气轮机占世界燃气轮机市场的绝大部分。燃气轮机电站的特点是,供电效率远远超过传统燃煤电站,清洁、占地少、用水少,启动迅速,比投资小,建设周期短,是未来火电系统的重要发展方向之一,是国家电力系统安全的重要保证。对远海油气开发、分布式供电等,燃气轮机发电可大有作为。

燃气轮机是需要多学科推动的国家战略高技术,是国家重大装备制造水平的标志,被誉为制造业王冠上的明珠。长期以来,世界发达国家均投巨资,在国家层面设立各类计划,研究燃气轮机基础理论,发展燃气轮机新技术,不断提高燃气轮机的性能和效率。目前,世界重型燃气轮机技术已发展到很高水平,其先进性主要体现在以下三个方面:一是单机功率达到 30 万千瓦至 45 万千瓦,二是透平前燃气温度达到 $1600\sim 1700\text{ }^{\circ}\text{C}$,三是联合循环效率超过 60%。

从燃气轮机的发展历程来看,透平前燃气温度代表了燃气轮机的技术水平,人们一直在不断追求燃气温度的提高,这对高温透平叶片的强度、设计和制造提出了严峻挑战。目前,有以下几个途径:一是开发更高承温能力的高温合金叶片材料,但成本高、周期长;二是发展先

进热障涂层技术,相比较而言,成本低,效果好;三是制备单晶或定向晶叶片,但难度大,成品率低;四是发展先进冷却技术,这会增加叶片结构的复杂性,从而大大提高制造成本。

整体而言,重型燃气轮机研发需要着重解决以下几个核心技术问题:先进冷却技术、先进热障涂层技术、定(单)向晶高温叶片精密制造技术、高温高负荷高效透平技术、高温低 NO_x 排放燃烧室技术、高压高效先进压气机技术。前四个核心技术属于高温透平部分,占了先进重型燃气轮机设计制造核心技术的三分之二,其中高温叶片的高效冷却与热障是先进重型燃气轮机研发所必须解决的瓶颈问题,大型复杂高温叶片的精确成型制造属于世界难题,这三个核心技术是先进重型燃气轮机自主研发的基础。高温燃烧室技术主要包括燃烧室冷却与设计、低 NO_x 排放与高效燃烧理论、燃烧室自激热声振荡及控制等。高压高效先进压气机技术的突破点在于大流量、高压比、宽工况运行条件的压气机设计。重型燃气轮机制造之所以被誉为制造业皇冠上的明珠,不仅仅由于其高新技术密集,而且在于其每一项技术的突破与创新都必须经历“基础理论→单元技术→零部件试验→系统集成→样机综合验证→产品应用”全过程,可见试验验证能力也是重型燃气轮机自主能力的重要标志。

我国燃气轮机研发始于上世纪 50 年代,与国际先进水平相比尚有较大差距。改革开放以来,我国重型燃气轮机研发有了长足发展,逐步走上了自主创新之路。“十五”期间,通过国家高技术研究发展计划,支持了 E 级燃气轮机重大专项,并形成了 F 级重型燃气轮机制造能力。“十一五”以来,国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020 年),将重型燃气轮机等清洁高效能源装备的研发列入优先主题,并通过国家重点基础研究发展计划,支持了重型燃气轮机制造基础和热功转换研究。

2006 年以来,我们承担了“大型动力装备制造基础研究”,这是我国重型燃气轮机制造基础研究的第一个国家重点基础研究发展计划

项目,本人有幸担任了项目首席科学家。以 F 级重型燃气轮机制造为背景,重点研究高温透平叶片的气膜冷却机理、热障涂层技术、定向晶叶片成型技术、叶片冷却孔及榫头的精密加工技术、大型盘式拉杆转子系统动力学与实验系统等问题,2011 年项目结题优秀。2012 年,“先进重型燃气轮机制造基础研究”项目得到了国家重点基础研究发展计划的持续支持,以国际先进的 J 级重型燃气轮机制造为背景,研究面向更严酷服役环境的大型高温叶片设计制造基础和实验系统、大型拉杆组合转子的设计与性能退化规律。

这两个国家重点基础研究发展计划项目实施十年来,得到了二十多位国家重点基础研究发展计划顾问专家组专家、领域咨询专家组专家和项目专家组专家的大力支持、指导和无私帮助。经过项目组的共同努力,在重型燃气轮机高温透平叶片的冷却机理与冷却结构设计、热障涂层制备与强度理论、大型复杂高温叶片精确成型与精密加工、透平密封技术、大型盘式拉杆转子系统动力学、重型燃气轮机实验系统建设等方面取得了可喜进展。我们拟通过本套专著来总结十余年来的研究成果。

第 1 卷:高温透平叶片的传热与冷却。主要内容包括:高温透平叶片的传热及冷却原理,内部冷却结构与流动换热,表面流动传热与气膜冷却,叶片冷却结构与热分析,相关的计算方法与实验技术等。

第 2 卷:热障涂层强度理论与检测技术。主要内容包括:热障涂层中的热应力和生长应力,表面与界面裂纹及其竞争,层级热障涂层系统中的裂纹,外来物和陶瓷层烧结诱发的热障涂层失效,涂层强度评价与无损检测方法。

第 3 卷:高温透平叶片增材制造技术。重点介绍高温透平叶片制造的 3D 打印方法,主要内容包括:基于光固化原型的空心叶片内外结构一体化铸型制造方法和激光直接成型方法。

第 4 卷:高温透平叶片精密加工与检测技术。主要内容包括:空

心透平叶片多工序精密加工的精确定位原理及夹具设计,冷却孔激光复合加工方法,切削液与加工质量,叶片型面与装配精度检测方法等。

第5卷:热力透平密封技术。主要内容包括:热力透平非接触式迷宫密封和蜂窝/孔形/袋形阻尼密封技术,接触式刷式密封技术相关的流动,传热和转子动力特性理论分析,数值模拟和实验方法。

第6卷:轴承转子系统动力学(上、下册)。上册为基础篇,主要内容包括经典转子动力学及一些新进展。下册为应用篇,主要内容包括大型发电机组轴系动力学,重型燃气轮机组合转子中的接触界面,预紧饱和状态下的基本解系和动力学分析方法,结构强度与设计准则等。

第7卷:叶片结构强度与振动。主要内容包括:重型燃气轮机压气机叶片和高温透平叶片的强度与振动分析及实例,减振技术,静动频测量方法及试验模态分析。

希望本套专著能为我国燃气轮机的发展提供借鉴,能为从事重型燃气轮机和航空发动机领域的技术人员、专家学者等提供参考。本套专著也可供相关专业人员及高等院校研究生参考。

本套专著得到了国家出版基金和国家重点基础研究发展计划的支持,在撰写、编辑及出版过程中,得到许多专家学者的无私帮助,在此表示感谢。特别感谢西安交通大学出版社给予的重视和支持,以及相关人士付出的辛勤劳动。

鉴于作者水平有限,缺点和错误在所难免。希望广大读者不吝赐教。

《先进燃气轮机设计制造基础》专著系列主编
机械结构强度与振动国家重点实验室主任

王铁军

2016年9月6日于西安交通大学

前言

涡轮叶片是重型燃气轮机、航空发动机和船用燃气轮机的核心部件,由于其处于轮机温度最高、应力最复杂、环境最恶劣的部位而被列为第一关键件。英国著名的航空发动机公司——罗尔斯·罗伊斯公司 CEO Jhon Rose 爵士称其为制造业“王冠上的明珠”。空心涡轮叶片的性能水平(特别是承温能力)成为涡轮机械动力设备先进程度的重要标志,在一定意义上,也是一个国家制造技术水平的标志。涡轮叶片制造技术是国内外近 20 年来极为关注的重大技术问题,科学家与工程技术人员在不懈地探索叶片设计、材料与制造的科学原理和实现技术。本书的主要内容来自承担国家重点基础研究发展计划(973)项目“大型动力装备制造基础研究”之课题 4“复杂构件的控形控性制造方法研究”。在课题研究中力图突破现有的传统涡轮叶片制造技术,从增材制造这一新兴制造方法方面探索涡轮叶片制造的新技术。

现有涡轮熔模铸造工艺过程周期长,特别是陶瓷型芯型壳的多步成型组合法,组合时极易产生装配误差,造成叶片穿孔,成品率低,无法满足新型叶片设计要求。针对目前涡轮叶片制造技术的难点和未来发展高冷却效率涡轮叶片制造的需求,开展了两种以增材制造为特点的新技术研究,一种方法是基于光固化原型的空心叶片内外结构一体化铸型制造方法,第二种方法是激光直接成形方法制造涡轮叶片技术。基于国家重点基础研究计划课题的研究成果形成了本书的主要内容。书中主要介绍了两种基于增材制造技术(3D 打印)的空心叶片制造的研究成果。

本书安排了 11 章内容。第 1 章绪论介绍了涡轮叶片制造的基本情况以及增材制造技术在涡轮叶片制造方面的初步研究。第 2 章到第 6 章介绍了基于光

固化原型的空心叶片内外结构一体化铸型制造方法,该部分阐述了一体化铸型制造原理,研究了陶瓷铸型精度与性能调控方法,论述叶片铸型制造工艺,并进行了制造精度评价。该技术与现有叶片铸造技术结合可以提升空心叶片制造效率和复杂内腔结构制造能力。第7章到第11章介绍了激光直接成形方法制造涡轮叶片技术,介绍了激光直接成形过程装备系统,分析了激光成形过程中的结构成形稳定机制,研究了成形过程中定向晶组织的调控方法,实现了叶片制作与精度控制。该方法是为空心叶片制造探索新的工艺途径。研究工作表明,相关研究可以实现复杂冷却结构、异形气膜孔的涡轮叶片快速制造,为解决复杂涡轮叶片制造提供了新的制造技术路线,具有良好的工程应用前景。

本书主要为从事涡轮动力装备设计与制造、增材制造技术研究的工程技术人员和科研人员提供新技术参考。

在相关研究和本书的成稿过程中,得到了西安交通大学卢秉恒院士、虞烈教授和“大型动力装备制造基础研究”首席科学家王铁军教授的指导和帮助,课题相关合作单位东方汽轮机有限公司的王为民总工程师、王建录总工程师、赵世全副总工程师、杨功显副总工程师,清华大学黄天佑教授、康进武副教授等给予了协助和支持。在相关研究中,科研团队的研究生吴海华、朱刚贤、贺斌、苗恺、Do XuanTuoi、夏磊、谢磊、同颖稚、郭永娜、郭楠楠、崔锋录、孙博、徐东阳、陈晓杰、左艳峰、周志敏、邓星、张利峰、皮刚、付伟、同治强、路桥潘等在研究中做了大量的研究工作。在此一并感谢。

涡轮叶片制造是一个多学科和多技术综合的难题,需要科研人员和工程技术人员不断探索和实践。本书内容只是其中的一个新方法和新工艺探索,尚有许多问题需要研究和实践。书中有许多不足和问题,诚恳期待读者和专家给予批评和指正。

西安交通大学

机械制造系统工程国家重点实验室

李涤尘 鲁中良 张安峰

目 录

第 1 章 绪论/1

- 1.1 透平叶片制造的国内外现状/1
- 1.2 透平叶片增材制造研究进展/6
 - 1.2.1 型芯型壳一体化铸型制造技术/6
 - 1.2.2 激光金属直接成形技术/9
- 参考文献/13

第 2 章 凝胶注模原理/16

- 2.1 凝胶注模原理/16
- 2.2 凝胶注模模具/18
- 2.3 陶瓷浆料/20
 - 2.3.1 陶瓷浆料制备/20
 - 2.3.2 陶瓷浆料的粘度/24
 - 2.3.3 粘度预测理论模型/32
- 2.4 陶瓷浆料充型能力/37
- 2.5 真空振动成形/42
- 2.6 本章小结/49
- 参考文献/49

第 3 章 陶瓷铸型坯体冷冻干燥/54

- 3.1 引言/54
- 3.2 陶瓷铸型坯体冷冻干燥/56
 - 3.2.1 冷冻干燥原理/56
 - 3.2.2 冷冻过程/58
 - 3.2.3 升华干燥/66
- 3.3 陶瓷铸型坯体冷冻干燥特性/69
 - 3.3.1 冷冻干燥坯体力学性能/69

- 3.3.2 冷冻干燥收缩率/70
- 3.3.3 临界干燥收缩率/71
- 3.4 冷冻干燥工艺能力评价/75
- 3.5 本章小结/77
- 参考文献/77

第4章 陶瓷铸型坯体脱脂工艺/79

- 4.1 引言/79
- 4.2 热应力计算/80
 - 4.2.1 变形协调方程/80
 - 4.2.2 热应力求解/81
 - 4.2.3 结果分析/86
- 4.3 实验准备/86
 - 4.3.1 光固化树脂原型热解特性/86
 - 4.3.2 光固化树脂原型弹性模量/88
 - 4.3.3 热膨胀系数测定/90
 - 4.3.4 陶瓷坯体性能/90
- 4.4 有限元分析/91
 - 4.4.1 有限元模型建立/92
 - 4.4.2 求解方案/93
 - 4.4.3 求解过程/93
 - 4.4.4 结果讨论/94
- 4.5 脱脂工艺/100
- 4.6 本章小结/104
- 参考文献/105

第5章 陶瓷铸型综合性能/107

- 5.1 引言/107
- 5.2 综合性能测试/109
- 5.3 收缩率理论计算/111
- 5.4 陶瓷配方优化/113
- 5.5 烧结工艺/115
 - 5.5.1 烧结工艺参数/115
 - 5.5.2 烧结工艺方案/117
- 5.6 真空压力浸渍/120
 - 5.6.1 浸渍深度理论计算/121

- 5.6.2 真空压力浸渍实验/123
- 5.6.3 多次浸渍/128
- 5.7 浸渍强化机理/130
- 5.8 本章小结/134
- 参考文献/134

第6章 透平叶片快速制造/136

- 6.1 铸型的型芯型壳连接结构/136
 - 6.1.1 光固化原型结构设计/136
 - 6.1.2 型芯型壳连接结构优化/138
- 6.2 透平叶片的浇注工艺/148
 - 6.2.1 浇注系统设计/148
 - 6.2.2 浇注系统模拟优化/150
 - 6.2.3 浇注工艺优化/158
- 6.3 制造实例/162
 - 6.3.1 双层壁透平叶片/164
 - 6.3.2 带有扩张-收缩气膜孔透平叶片/168
 - 6.3.3 工艺比较/170
- 6.4 透平叶片的微观组织与精度/172
- 6.5 本章小结/176
- 参考文献/176

第7章 激光金属直接成形同轴粉末流场特征/178

- 7.1 引言/178
- 7.2 同轴粉末流场数值模拟/180
 - 7.2.1 同轴喷嘴模型/180
 - 7.2.2 计算与分析/184
 - 7.2.3 实例/189
- 7.3 实体结构对粉末流场汇聚特性的影响规律/190
 - 7.3.1 实体结构的建模/190
 - 7.3.2 参数设计与网格划分/191
 - 7.3.3 计算与分析/193
 - 7.3.4 实例/197
- 7.4 本章小结/198
- 参考文献/199

第 8 章 激光金属直接成形工艺/201

- 8.1 引言/201
- 8.2 工艺参数对单道成形尺寸的影响/202
 - 8.2.1 单道成形尺寸的理论推导/202
 - 8.2.2 实验验证/207
 - 8.2.3 工艺参数/214
- 8.3 工艺参数对单道多层成形的影响/216
 - 8.3.1 评价指标/217
 - 8.3.2 激光功率/219
 - 8.3.3 z 轴增量/223
 - 8.3.4 粉末流场离焦量/225
- 8.4 工艺参数对多道多层成形的影响/233
 - 8.4.1 评价指标和成形特征/234
 - 8.4.2 搭接率/236
 - 8.4.3 变速度/239
- 8.5 本章小结/244
- 参考文献/245

第 9 章 激光金属直接成形残余应力/248

- 9.1 引言/248
- 9.2 薄壁件几何结构对残余应力的影响/250
 - 9.2.1 物理模型/250
 - 9.2.2 残余应力模拟计算/251
 - 9.2.3 实验验证/260
- 9.3 扫描路径对薄壁件残余应力的影响/263
 - 9.3.1 实验方法/263
 - 9.3.2 实验结果/265
 - 9.3.3 实验分析/266
- 9.4 薄壁透平叶片样件的制造/267
- 9.5 本章小结/269
- 参考文献/269

第 10 章 激光金属直接成形组织/272

- 10.1 引言/272
- 10.2 DZ125L 高温合金的 LMDF 成形组织/274
 - 10.2.1 DZ125L 高温合金/274

- 10.2.2 单层定向晶生长特点/275
- 10.2.3 多层定向晶生长特点/278
- 10.2.4 定向生长的影响因素/280
- 10.2.5 组织缺陷/286
- 10.2.6 力学性能/288
- 10.3 液氩冷却对定向组织生长的影响/294
 - 10.3.1 液氩喷射实验/294
 - 10.3.2 结果与分析/297
- 10.4 本章小结/299
- 参考文献/300

第 11 章 激光金属直接成形透平叶片/303

- 11.1 引言/303
- 11.2 透平叶片扫描路径/304
 - 11.2.1 光栅式扫描路径/304
 - 11.2.2 轮廓式扫描路径/306
 - 11.2.3 混合式扫描路径/310
- 11.3 透平叶片 LMDF 成形温度场特征/312
 - 11.3.1 数理模型建立/312
 - 11.3.2 模拟结果分析/314
 - 11.3.3 实验验证/320
- 11.4 透平叶片制造/323
 - 11.4.1 单层壁空心透平叶片/323
 - 11.4.2 双层壁空心透平叶片/324
- 11.5 本章小结/325
- 参考文献/326

第1章 绪论

透平叶片是燃气轮机的关键零部件,由于处于温度最高、应力最复杂、环境最恶劣的部位,其结构与制造质量直接影响着燃气轮机的综合性能。透平叶片的性能水平(特别是承温能力)成为热动力设备先进程度的重要标志,在一定意义上,也代表着一个国家综合制造能力。透平叶片制造技术是国内近20年来极为关注的重大技术问题,科学家与工程技术人员在不懈地探索叶片设计、材料与制造的科学原理和实现技术。采用更高的透平前燃气温度是提高燃气轮机性能的一项主要措施。仅依靠改善合金的热强性能已无法满足透平前进口温度不断升高的要求,改善叶片冷却结构、提高热端核心部件的承温能力就成为透平叶片设计制造者所追求的目标^[1-3]。

1.1 透平叶片制造的国内外现状

早在1963年11月,中国科学院金属研究所师昌绪、胡壮麒等人率先将简单对流式气冷技术、精密铸造技术应用于航空发动机的透平叶片制造,克服了型芯材料的选择、脱芯、壁厚测量、防护涂层及冶炼中的若干难题,成功制造出九孔K17镍基铸造合金空心气冷透平叶片,并应用于中国歼8、歼7II等先进机种的发动机上。该成果使我国的透平叶片制造水平迈上两个台阶:由锻造合金改为真空精铸,由实心叶片改为空心叶片。

20世纪80年代航空部621研究所和西北工业大学等单位联合开展了无余量叶片熔模铸造工艺研究,研制了蜡模模料、型芯、型壳材料及其制作工艺,以铜川上店土熟料或铝钒土混合料代替刚玉型壳材料,实现了型壳材料上的重大突破;设计并制造了高精度、高光洁度的模具和检测装置,制订了合理的制壳工艺和熔炼浇注工艺,首次浇铸出斯贝低压一级无余量空心导向叶片,其精度、光洁度及冶金质量均达到国外相应标准。该成果不仅将我国精密铸造水平推向国际先进行列,而且为发展我国透平叶片及薄壁复杂整体构件制造技术奠定了理论和工艺基础。

贵州新艺机械厂是我国航空工业叶片专业化制造企业,也是中国航空工业发动机叶片精密铸造中心,目前建有国内最大的精密铸造叶片、定向晶叶片、单晶叶片生产线,实现了无余量、定向凝固透平叶片批量生产。但与发达国家相比,我国透平叶片制造水平尚有较大的差距,尤其缺乏大尺寸叶片、高效气冷叶片的制造能力和技术。

美国 GE 公司提出了一种高效冷却叶片制造新方法。首先利用熔模铸造技术铸造出空心、带有冷却通道的叶片骨架,然后将填充剂充填在冷却通道中,再应用电子束物理气相沉积 (Electron Beam Physical Vapor Deposition, EB-PVD) 工艺在叶片骨架表面上涂铺上一层金属涂层,最后清除掉填充剂,获得双层壁结构的高效冷却叶片。GE 公司和俄罗斯鲁宾斯基发动机设计制造局相互协作,成功地将这种叶片应用于航空发动机、工业燃气透平发动机中,如涡扇发动机 D277 和发动机 RD238。但利用 EB-PVD 制备的金属涂层孔隙率高达 7%,叶片承受高温能力有限;另外,金属涂层与基体的热特性不同,在高温、高压环境中金属涂层有可能从叶片骨架上脱落^[6]。针对高效冷却叶片结构特点,俄罗斯全俄航空材料研究院采取的制造方法有所不同,仍旧采取传统的熔模铸造工艺生产这种叶片,叶片双层壁以及叶身上的发汗冷却孔完全由组合的陶瓷型芯形成,只是进气边、叶盆和叶背上少量的孔洞通过二次加工获得。首先制备用于形成内部冷却通道的中心型芯以及用于形成双层壁、发汗冷却孔的镶嵌型芯,然后把镶嵌型芯与中心型芯组合在一起,获得组合式陶瓷型芯,再经压制蜡模、涂挂制壳、浇注、脱芯、打孔后,获得能在 2000 K 下工作的高效冷却叶片^[7]。在制造发汗冷却结构或高效冷却叶片过程中,由于中心型芯和镶嵌型芯是分开制备的,在压制蜡模之前,需要用一种特殊的材料把它们粘结在一起,如何准确地定位、组合在一起,保证所有的型芯之间具有正确的空间位置关系,是其中一个技术难点。再次,中心型芯的制造方法与传统的型芯制造过程大致相同,但镶嵌型芯的制造却非常困难。受制于镶嵌型芯的结构和尺寸特点,与之对应的陶瓷粉料粒度比较细小,粉料粒度越细,比表面能越大,烧结时,烧结驱动力和烧结收缩也越大,裂纹倾向性也增大,很难保证制造精度。因此,如何保证如此薄而细小的型芯在烧结过程中不断裂、不产生裂纹,并获得较高的制造精度,是另一个技术难点。俄罗斯全俄航空材料研究院成功地解决了上述技术难题,铸造出了直径仅为 $\Phi 0.6$ mm 的发汗孔。但这种组合工艺需要开发数量众多的金属模具,生产周期长,制造成本高。目前国内尚未开展组合式型芯制造技术研究,仍采取整体方式制备型芯,即一次性压注成形,型芯的复杂程度常受到金属模