

“二五”国家重点出版规划

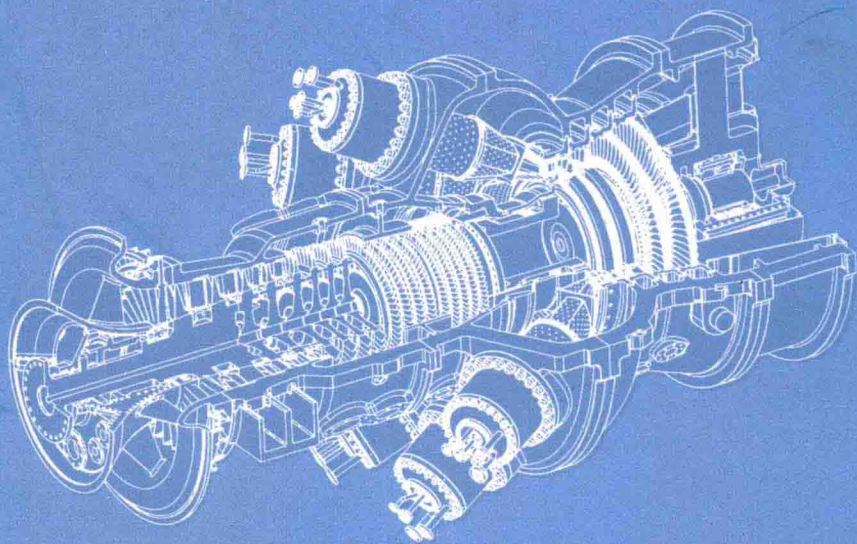


先进燃气轮机设计制造基础专著系列

丛书主编 王铁军

热障涂层强度理论与检测技术

王铁军 范学领 等著



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

“十二五”国家重点出版规划



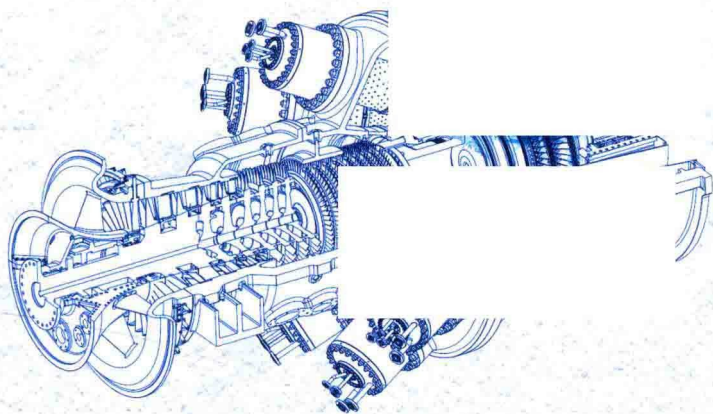
先进燃气轮机设计制造基础专著系列

丛书主编 王铁军

热障涂层强度理论与检测技术

王铁军 范学领 等著

书
章



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

内容简介

热障涂层技术是重型燃气轮机研发中的六大核心技术之一。本书详细介绍了近年来在热障涂层强度理论与检测技术方面的理论、数值和实验研究成果。主要内容包括热障涂层的高温氧化行为,热障涂层制备过程中的热应力,热障涂层系统中的热生长氧化应力,热障涂层系统中的表面、界面裂纹及其相互竞争,层级热障涂层系统中的应力和裂纹问题,热障涂层的烧结和冲蚀损伤,涂层系统的强度评价与无损检测方法。相关研究对未来先进热障涂层的设计、制备及强度评价具有借鉴意义。

本书可为从事重型燃气轮机、航空发动机等领域热障涂层技术的工程技术人员和科研人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

热障涂层强度理论与检测技术/王铁军,范学领著.—西安:西安交通大学出版社,2016.12

(先进燃气轮机设计制造基础专著系列/王铁军主编)

ISBN 978-7-5605-9472-9

I. ①热… II. ①王… ②范… III. ①燃气轮机-热障-涂层
IV. ①TK47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 048321 号

书 名 热障涂层强度理论与检测技术
著 者 王铁军 范学领 等
责任编辑 任振国 吴 浩 宋小平

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 32 彩页 4 页 字数 598 千字

版次/印次 2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5605-9472-9

定 价 268.00 元

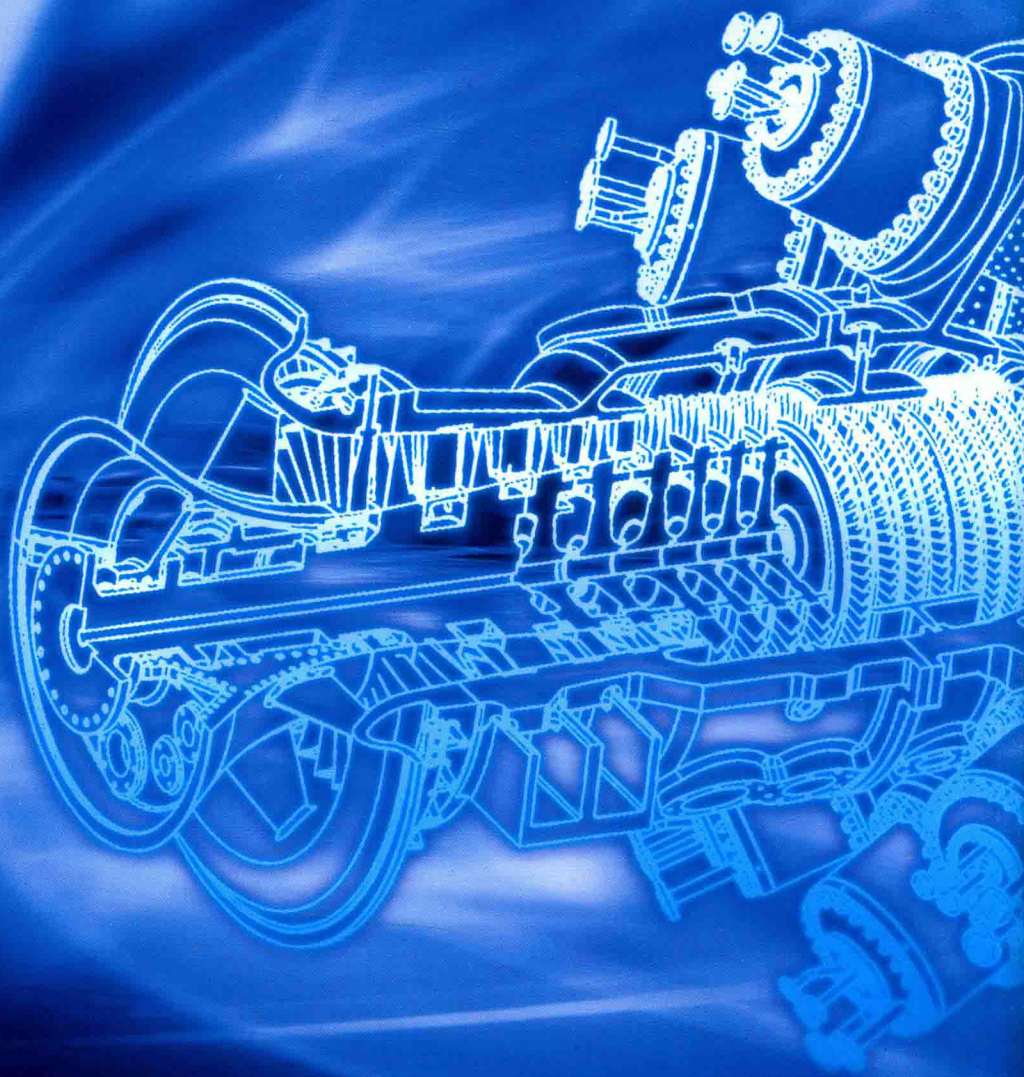
读者购书、书店添货,如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

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





“十二五”国家重点出版规划

试读结束：需要全本请在线购买：www.ertongbook.com





“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。项目组共同努力,校企协同创新,将基础理论研究融入企业实践,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方法及实例,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,以及相关人员付出的辛勤劳动。

鉴于作者水平有限,缺点和错误在所难免。敬请广大读者不吝赐教。

《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

燃气轮机是清洁高效火电能源系统的核心动力装备之一。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,人们在不断追求燃气温度的提高。目前,F级重型燃气轮机的燃气温度为 1400°C ,G/H/J级已达 $1500\sim 1600^{\circ}\text{C}$,未来将高达 1700°C 及以上。这种极端高温服役环境对透平叶片的强度、设计和制造提出了严峻挑战。要进一步提高透平前燃气温度,有以下几个途径可供选择:①开发能够承受更高温度的高温合金叶片材料,但成本高,周期长;②制备单晶或定向晶叶片,但难度大,成品率低;③采用高效的叶片内部冷却结构与气膜冷却技术,这会大大增加叶片的制造成本;④采用先进的热障涂层(Thermal barrier coating,TBC)技术。相比而言,TBC技术成本较低,效果明显,是发展先进重型燃气轮机的核心技术之一。

TBC技术的主要思想是将高温环境下具有较低热导率和较高稳定性的材料覆盖于基材表面形成热障层。TBC不仅具有热障效果,而且还能防止氧化、腐蚀、外来物冲蚀等对叶片造成的损伤。20世纪50年代以来,TBC技术就受到了广泛关注并得到迅速发展,在燃气轮机发展进程中发挥了重要作用。随着先进重型燃气轮机的研发,对TBC技术提出了更高要求。因此,深入研究TBC的强度理论和检测技术,对其设计、制备及强度评价具有重要意义,对燃气轮机的安全服役具有重要作用。

2006年本项目组承担了我国重型燃气轮机制造基础研究的第一

个国家 973 计划项目,2012 年得到持续支持,分别以 F 级重型燃气轮机(透平前燃气温度 1400°C)和 J 级重型燃气轮机(透平前燃气温度 1600°C)为背景,研究了稳定高效热障系统的制备方法、强度理论及检测技术。我们拟通过本专著来总结十余年来的研究成果。

全书共分为九章和一个附录。第 1 章是 TBC 系统结构、制备方法与典型失效模式,由王铁军、范学领撰写。第 2 章是 TBC 系统的高温氧化,由丁秉钧、梁工英、白宇、唐健江撰写。第 3 章是 TBC 制备过程中的热应力,由王铁军、宋岩撰写。第 4 章是 TBC 系统中的热生长应力,由王铁军、孙永乐撰写。第 5 章是 TBC 系统中的裂纹问题,由王铁军、范学领撰写。第 6 章是梯度 TBC 系统中的应力和裂纹问题,由王铁军、范学领、宋岩撰写。第 7 章是 TBC 系统的烧结与外来物损伤,由王铁军、范学领、吕伯文撰写。第 8 章是 TBC 强度评价,由王铁军、范学领撰写。第 9 章是 TBC 定量无损检测技术,由陈振茂、李勇撰写。附录部分介绍了涂层断裂分析中的相关数值计算方法,由范学领、侯成撰写。全书由王铁军统稿。

本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。在本书撰写过程中,张伟旭、李彪、苏罗川、李群、江鹏、李定骏、裴翠祥等提供了相关资料帮助,刘鹏飞、王销彬、王晓康等在修改相关图的格式方面提供了帮助,在此一并致谢。特别感谢西安交通大学出版社给予的重视和支持,以及相关人员的辛勤劳动。

希望本书能为我国燃气轮机的热障涂层技术提供借鉴,能为从事重型燃气轮机、航空发动机及其他相关领域的技术人员、专家学者等提供参考。本书也可供相关专业人员及高等院校研究生参考。

鉴于作者水平有限,缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

著 者

2016 年 10 月 5 日

目 录

第 1 章 热障涂层系统/1

- 1.1 热障涂层系统的基本结构/2
- 1.2 热障涂层制备方法/4
 - 1.2.1 等离子喷涂技术/4
 - 1.2.2 超音速火焰喷涂(HVOF)技术/10
 - 1.2.3 冷喷涂(CS)技术/11
 - 1.2.4 电子束物理气相沉积(EB-PVD)技术/12
 - 1.2.5 等离子喷涂物理气相沉积(PS-PVD)技术/15
- 1.3 热障涂层系统失效模式/16
 - 1.3.1 等离子喷涂热障涂层的典型失效模式/18
 - 1.3.2 电子束物理气相沉积热障涂层的典型失效模式/19
- 参考文献/21

第 2 章 热障涂层系统的高温氧化行为/24

- 2.1 金属氧化热力学/25
 - 2.1.1 金属氧化热力学判据/25
 - 2.1.2 表面氧化物自由能/28
 - 2.1.3 各种金属和氧化物的体积比(PBR)/31
- 2.2 热生长氧化物(TGO)的形成与生长/33
 - 2.2.1 热生长氧化物的结构/33
 - 2.2.2 尖晶石氧化物的生长/36
 - 2.2.3 Al_2O_3 结构对 TGO 生长的影响/42
- 2.3 不同方法制备的 MCrAlY 粘结层的高温氧化及 TGO 生长/45
 - 2.3.1 APS 喷涂粘结层的高温氧化及 TGO 生长/45
 - 2.3.2 LPPS 和 VPS 喷涂粘结层的高温氧化及 TGO 生长/49

- 2.3.3 HVOF 粘结层的高温氧化及 TGO 生长/53
- 2.3.4 CGDS 或 CS 粘结层的高温氧化及 TGO 生长/57
- 2.3.5 常用合金粘结层制备工艺的比较/60
- 2.3.6 TBC 的预氧化处理/62
- 2.3.7 EB-PVD 粘结层的高温氧化及 TGO 生长/65
- 2.4 超音速等离子喷涂 MCrAlY 粘结层的 TGO 生长/67
 - 2.4.1 超音速等离子喷涂简介/67
 - 2.4.2 超音速等离子喷涂 MCrAlY 粘结层/68
 - 2.4.3 热震过程中 MCrAlY 粘结层的 TGO 生长/72
 - 2.4.4 恒温氧化过程中 MCrAlY 粘结层的 TGO 生长规律/75
- 2.5 热障涂层系统失效模型/81
 - 2.5.1 Al 耗尽模型/81
 - 2.5.2 Al₂O₃ 膜耗尽模型/85
- 2.6 小结/89
- 参考文献/92

第 3 章 热障涂层制备过程中的热应力/99

- 3.1 热障涂层系统中的热应力/99
- 3.2 热障涂层系统制备过程中热应力的理论模型/100
 - 3.2.1 Stoney 公式/100
 - 3.2.2 多层梁模型/101
- 3.3 热障涂层系统制备过程各个阶段的热应力/104
 - 3.3.1 分析模型/104
 - 3.3.2 TBCs 制备过程中各个阶段的热应力/112
- 3.4 热障涂层系统冷却过程中的热应力/116
 - 3.4.1 分析模型与方法/116
 - 3.4.2 热障涂层系统在制备过程中冷却阶段的热应力/119
- 3.5 喷涂速度和对流换热对 TBC 制备过程冷却阶段热应力的影响/122
 - 3.5.1 分析模型及问题的解/122
 - 3.5.2 实时热应力演化/125
 - 3.5.3 喷涂速度对热应力的影响/128
 - 3.5.4 陶瓷层表面与外界环境间的对流换热的影响/131
- 3.6 小结/133

参考文献/133

第4章 热障涂层系统中的热生长应力/137

- 4.1 TGO 高温生长应力及其影响因素/137
 - 4.2 TGO 生长应力的率无关理论/141
 - 4.2.1 夹杂模型弹性解/141
 - 4.2.2 球对称模型基本方程及其弹塑性解/146
 - 4.2.3 其他模型/154
 - 4.3 凸形 TGO 局部应力/155
 - 4.4 凹形 TGO 局部应力/166
 - 4.5 TGO 生长应力的演化/176
 - 4.5.1 TGO 生长局部应力演化模型/177
 - 4.5.2 局部应力演化基本特征/182
 - 4.5.3 其他理论模型/201
 - 4.6 TGO 生长应力的有限元数值分析/203
 - 4.6.1 TGO 生长局部应力演化/203
 - 4.6.2 TGO 层蠕变影响/211
 - 4.7 TGO 生长应力的热-力-化学耦合分析/215
 - 4.8 TGO 生长应力诱发的微裂纹萌生机制/219
 - 4.8.1 凸形 TGO 附近微裂纹的萌生机制/219
 - 4.8.2 凹形 TGO 附近微裂纹的萌生机制/220
 - 4.8.3 凸凹形 TGO 连接区域微裂纹的萌生与会聚/221
 - 4.9 小结/222
- 参考文献/224

第5章 热障涂层系统中的裂纹问题/231

- 5.1 热障涂层中的裂纹形式/231
- 5.2 热障涂层中的表面裂纹/232
 - 5.2.1 表面裂纹模型/232
 - 5.2.2 表面裂纹密度的影响/237
 - 5.2.3 曲界面形貌的影响/241
 - 5.2.4 底层约束的效应/244
 - 5.2.5 TGO 生长的影响/247
- 5.3 热障涂层中的界面裂纹/253

- 5.3.1 界面裂纹模型/253
- 5.3.2 界面裂纹能量释放率/255
- 5.3.3 混合氧化物致界面脱粘/263
- 5.3.4 TGO 蠕变的影响/270
- 5.3.5 界面多裂纹问题/273
- 5.4 热障涂层中的表/界面裂纹间的竞争/277
 - 5.4.1 裂纹扩展路径选择判据/277
 - 5.4.2 材料失配的影响/278
 - 5.4.3 表面裂纹间距对界面裂纹的影响/283
- 5.5 小结/286
- 参考文献/287

第 6 章 梯度热障涂层中的裂纹问题/294

- 6.1 梯度涂层结构的基本概念/294
- 6.2 热障涂层新材料体系/298
 - 6.2.1 稀土锆酸盐/299
 - 6.2.2 六铝酸盐/299
 - 6.2.3 钙钛矿/300
- 6.3 双陶瓷涂层热障涂层系统制备过程中的热应力/301
 - 6.3.1 模型建立/302
 - 6.3.2 数值分析/308
 - 6.3.3 DCL-TBCs 系统制备过程中产生的热应力/309
 - 6.3.4 总的热应力/310
 - 6.3.5 预热处理的影响/311
 - 6.3.6 YSZ 与 LZ 层厚度比的影响/312
- 6.4 层级热障涂层中的裂纹问题/314
 - 6.4.1 双陶瓷层热障涂层中的表面裂纹/316
 - 6.4.2 双陶瓷层热障涂层中的界面裂纹/320
 - 6.4.3 双陶瓷层热障涂层失效模式/322
 - 6.4.4 双陶瓷层热障涂层失效的影响参数分析/325
- 6.5 小结/334
- 参考文献/335