

“十二五”国家重点出版规划

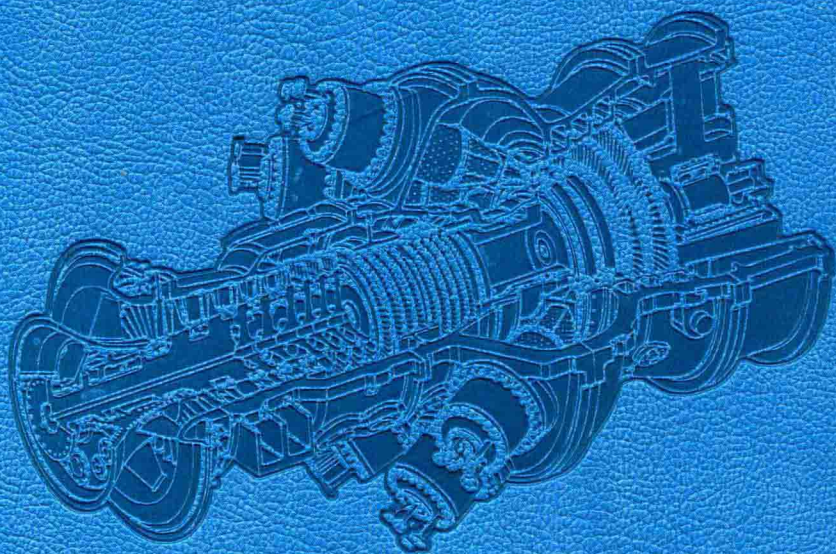


先进燃气轮机设计制造基础专著系列

丛书主编 王铁军

热力透平密封技术

李 军 晏 鑫 李志刚 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

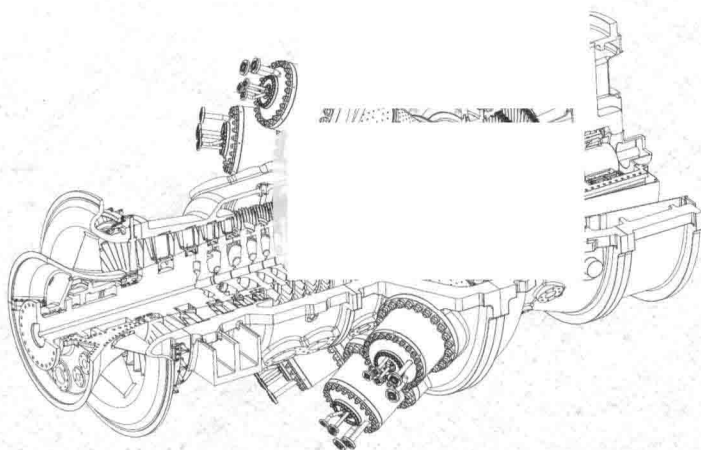


先进燃气轮机设计制造基础专著系列

丛书主编 王铁军

热力透平密封技术

李 军 晏 鑫 李志刚 著



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

内容简介

本书针对目前燃气轮机、航空发动机和汽轮机等热力透平机械动静间隙的密封技术流热固耦合机理和数值模拟与实验测量的热点以及未来发展高性能密封技术的需求,介绍了非接触式典型迷宫密封技术、蜂窝/孔型阻尼密封技术、袋型阻尼密封技术和接触式刷式密封技术的泄漏特性、传热性能和气流激振转子动力特性的数学模型与数值方法、试验测量技术和理论分析结论。相关研究为解决热力透平机械动静间隙密封技术的性能分析和研发低泄漏和高阻尼密封结构提供了新的技术路线和设计思路,具有重要的学术研究和工程应用价值。

本书主要为从事热力透平机械动静间隙密封技术研发设计和性能分析研究的高等院校科研人员和行业工程技术人员提供新方法和新技术参考。

图书在版编目(CIP)数据

热力透平密封技术/李军,晏鑫,李志刚著. —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 978-7-5605-8193-4

I. ①热… II. ①李… ②晏… ③李… III. ①透平机械-机械密封-研究 IV. ①TK05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 309443 号

书 名 热力透平密封技术
著 者 李 军 晏 鑫 李志刚
责任编辑 刘雅洁

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.xjtpress.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 22 彩页 4 字数 473千字
版次印次 2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-8193-4
定 价 205 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)82669097 QQ:8377981

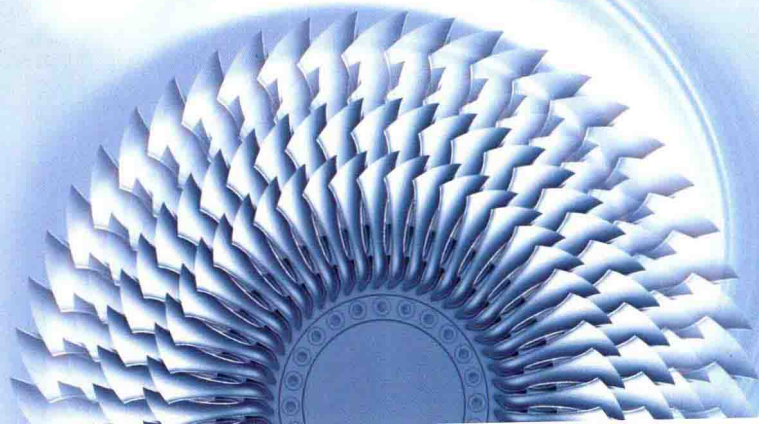
读者信箱:lg_book@163.com

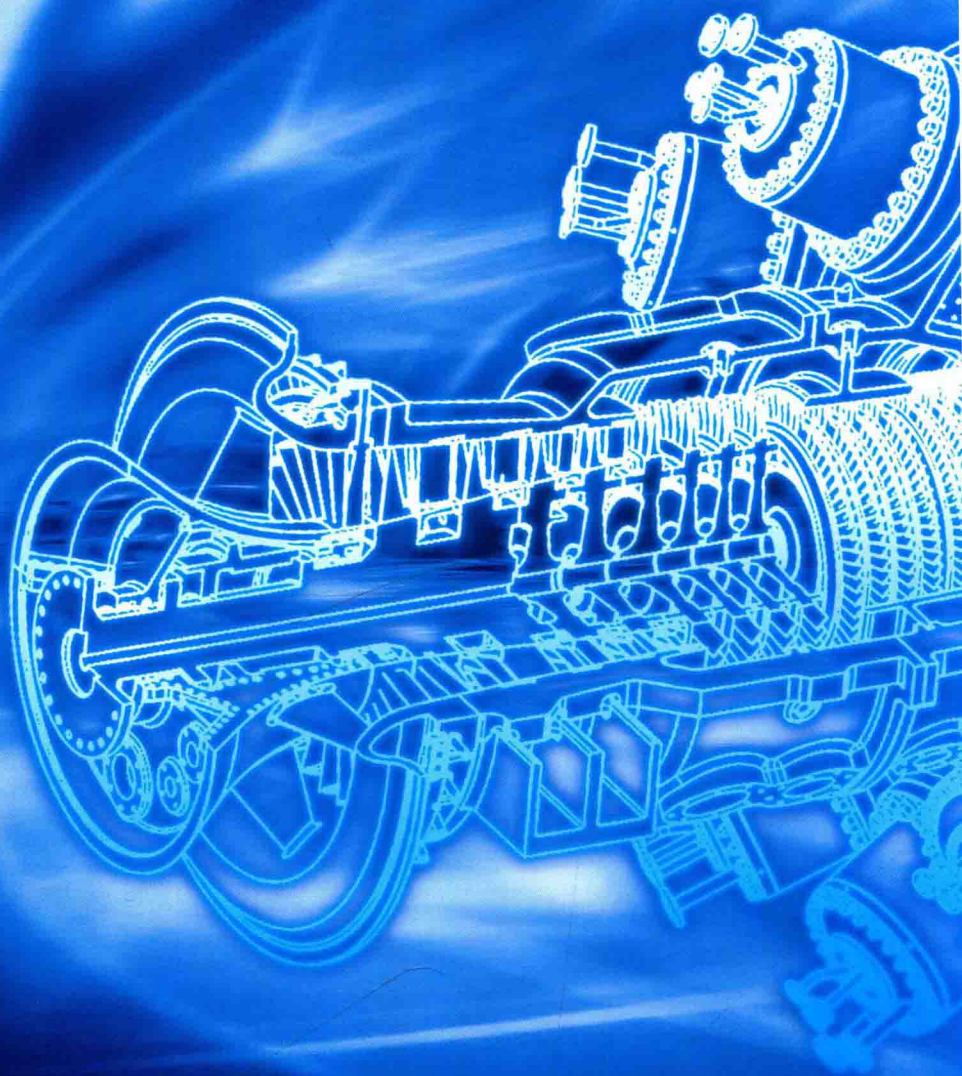
版权所有 侵权必究



“十二五”国家重点出版规划

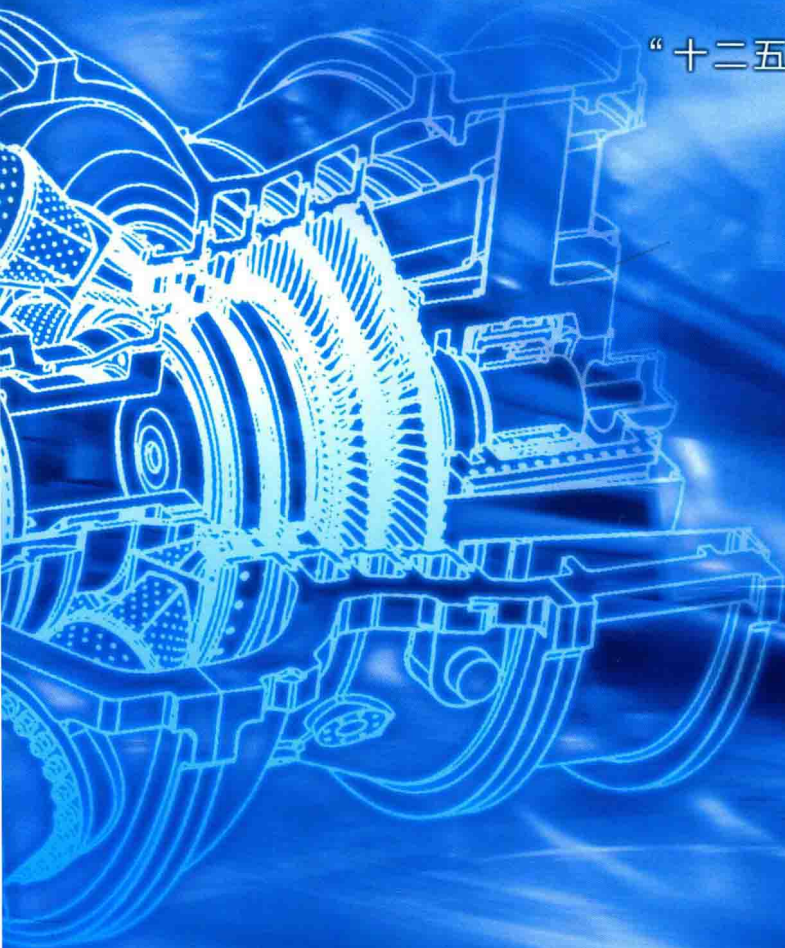
先进燃气轮机设计制造基础专著系列







“十二五”国家重点出版规划





“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

透平机械技术水平的不断提高,与密封装置的不断改进和更新密切相关。无论是小到如硬币大小的厘米级微透平,还是大到如半个足球场大小的百万千瓦等级核电汽轮机,密封的应用无处不在。在大多数情况下,密封装置工作在存在磨损、沉积、氧化以及高热应力的环境中,通过牺牲自身的完整性,以保证其它重要部件的安全运行和发挥最大的效用。所以,密封行业对摩擦学和材料学提出的研究要求是如何保证密封界面的耐久性和有效性;对转子动力学领域提出的要求是如何保证转子的稳定性以消除流体诱发的振动;对传热学提出的要求是如何防止高温燃气入侵内部冷却气流通道并降低热端部件的热应力;对于流体动力学提出的要求是如何有效地控制泄漏量,提高叶轮机械的气动效率……可见,透平机械密封技术的提高是一个多学科技术相互协调、共同进步的过程,密封技术的研究是一个十分复杂且有意义的课题。

作者及研究团队在透平机械旋转动密封技术的流动、传热和转子动力特性方面的研究至今已有十余年,所做的研究只是近年来我国透平机械通流设计研究与发展工作的一小部分,并且主要研究对象是超临界和超超临界汽轮机、燃气轮机和航空发动机的通流设计。为了更好地总结研究工作,推进研究成果的交流与应用,作者将团队的研究成果与相关文献介绍的研究进展结合起来,较系统地撰写成此专著,团队所作的研究成果对我国高性能透平机械通流部分设计和制造、电厂汽轮机的机组改造和运行以及燃气轮机和航空发动机的自主研究

具有参考价值。由于作者水平的限制,书中缺点和错误在所难免,敬请读者和同行批评指正。

作者衷心感谢国家自然科学基金委相关项目(51406144、51376144、51106122、50976083、50506023)的资助;感谢东方汽轮机厂有限公司、上海汽轮机有限公司、哈尔滨汽轮机厂有限责任公司对有关合作科研项目的资助;感谢国家重点基础研究发展计划的资助;感谢西安交通大学能源与动力工程学院叶轮机械研究所的邱波博士、孔胜如硕士、陈春新硕士、黄阳子硕士、雷建硕士、张志勇硕士、翟璇硕士、王敬慈硕士在旋转密封方面所做的工作和对本书的贡献。西安交通大学能源与动力工程学院俞茂铮教授审阅全书并提出修改意见,在此表示感谢。

本书由西安交通大学能源与动力工程学院叶轮机械研究所李军、晏鑫、李志刚共同编著,全书由李军统稿。

李 军

2015年7月于西安

主要符号表

a	椭圆轨迹长轴/mm
A	密封间隙泄漏面积/ mm^2
b	椭圆轨迹短轴/mm
C_D	密封流量系数
C_{xx}	X 方向直接阻尼/ $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$
C_{xy}	X 方向交叉阻尼/ $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$
C_{yy}	Y 方向直接阻尼/ $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$
C_{yx}	Y 方向交叉阻尼/ $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$
C_{avg}	平均直接阻尼/ $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$
C_{eff}	有效阻尼/ $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$
D_x	X 方向位移/ m
D_y	Y 方向位移/ m
D_{xx}	X 方向激励在 X 方向产生的位移/mm
D_{xy}	X 方向激励在 Y 方向产生的位移/mm
D_{yy}	Y 方向激励在 Y 方向产生的位移/mm
D_{yx}	Y 方向激励在 X 方向产生的位移/mm
F_x	X 方向流体激振力/N
F_y	Y 方向流体激振力/N
F_{xx}	Y 方向激励在 X 方向产生的流体激振力/N
F_{xy}	X 方向激励在 Y 方向产生的流体激振力/N
F_{yy}	Y 方向激励在 Y 方向产生的流体激振力/N
F_{yx}	Y 方向激励在 X 方向产生的流体激振力/N
f	涡动频率/Hz
H	无量纲腔室深度
H_{xx}	X 方向直接阻抗/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
H_{xy}	X 方向交叉阻抗/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
H_{yy}	Y 方向直接阻抗/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
H_{yx}	Y 方向交叉阻抗/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$

m	泄漏流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Mu	周向马赫数
n	转子转速/rpm
p	压力/Pa
R	转子半径/mm
r	圆轨迹半径/mm
R_g	气体常数/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
S	密封间隙/mm
T	温度/K
U	转子面旋转速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} (\omega \cdot R)$
U_{gas}	气体旋转速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
K	旋流强度(U_{gas}/U)
K_{xx}	X 方向直接刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
K_{xy}	X 方向交叉刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
K_{yy}	Y 方向直接刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
K_{yx}	Y 方向交叉刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
K_{avg}	平均直接刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
K_{eff}	有效刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
ω	转子旋转角速度/rad/s
π	压比($p_{\text{stat, out}}/p_{\text{tot, in}}$)
π	圆周率
Ω	涡动角速度/ $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
θ_k	袋型腔室周向方位角/deg
θ_1	袋型腔室周向起始角/deg
θ_2	袋型腔室周向终止角/deg
ξ	有效密封间隙系数
ζ_{geo}	几何效应系数
ζ_{dis}	粘性耗散系数
φ	流量系数
ψ	压力系数
δ	直线轨迹幅值/mm

目 录

第 1 章 绪论 /1

1.1 引言 /1

1.2 透平机械密封技术 /4

1.2.1 透平机械静密封 /4

1.2.2 透平机械常见旋转动密封 /4

1.2.3 其它新型旋转动密封 /13

1.3 密封的安装位置和作用 /14

1.4 研究目标与主要内容 /16

参考文献 /18

第 2 章 透平机械迷宫密封技术 /23

2.1 引言 /23

2.2 迷宫密封泄漏特性 /24

2.2.1 热力学分析方法 /24

2.2.2 三维数值分析方法 /26

2.2.3 试验测量方法和装置 /29

2.2.4 迷宫密封泄漏特性研究 /32

2.3 迷宫密封转子动力特性 /43

2.3.1 试验测量方法 /43

2.3.2 单控制容积 Bulk Flow 理论和方法 /43

2.3.3 三维非定常数值方法 /49

2.4 迷宫密封的性能退化 /66

2.4.1 齿磨损变形对泄漏流动特性的影响 /70

- 2.4.2 齿磨损变形对传热特性的影响 /75
- 2.5 本章小结 /84
- 附录 /85
- 参考文献 /88

第3章 蜂窝/孔型阻尼密封技术 /91

- 3.1 引言 /91
- 3.2 蜂窝/孔型阻尼密封泄漏流动特性研究进展 /95
 - 3.2.1 试验研究 /95
 - 3.2.2 理论预测 /97
 - 3.2.3 数值研究 /97
- 3.3 蜂窝阻尼密封泄漏特性研究 /98
 - 3.3.1 蜂窝组尼密封结构及运行工况的影响 /98
 - 3.3.2 压比和间隙影响 /112
 - 3.3.3 进口预旋影响 /113
 - 3.3.4 蜂窝孔径影响 /116
 - 3.3.5 蜂窝孔深影响 /117
 - 3.3.6 台阶影响 /118
 - 3.3.7 静子面结构影响 /120
 - 3.3.8 转速的影响 /122
- 3.4 鼓风加热效应研究 /123
- 3.5 蜂窝/孔型阻尼密封耦合传热特性的研究 /128
- 3.6 蜂窝/孔型阻尼密封转子动力特性 /133
 - 3.6.1 两控制体 Bulk Flow 理论和方法 /135
 - 3.6.2 三维非定常数值理论和方法 /142
 - 3.6.3 转子-密封系统转子动力特性 /148
- 3.7 本章小结 /159
- 参考文献 /160

第4章 透平机械袋型阻尼密封技术 /167

- 4.1 引言 /167
- 4.2 袋型阻尼密封的几何结构 /169