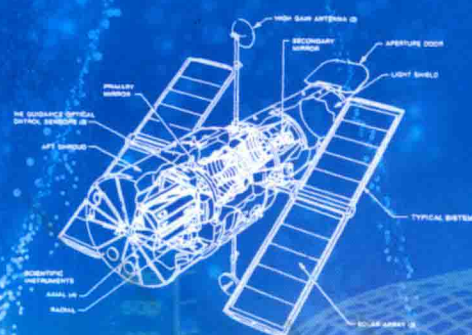


Aerospace Thermal Structures and Materials for a New Era

新一代航空航天 热结构与材料

[美] 厄尔·A. 桑顿 (Earl A. Thornton) 编

黄启忠 译



航空工业出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

高超声速技术译丛

新一代航空航天 热结构与材料

Aerospace Thermal Structures and
Materials for a New Era

[美] 厄尔·A. 桑顿 (Earl A. Thornton) 编

黄启忠 译

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书为美国热结构学术会议论文精选集,是美国航空航天协会(AIAA)出版的“AIAA 航空航天技术丛书”之一,主要阐述了航空航天热结构材料研究面临的挑战、新的解决方案及未来发展方向。全书共分为4章,第1章主要阐述了低温燃料箱面临的各种挑战,以及太空环境下材料的热衰减行为;第2章主要展示了航天器测试中的热结构研究结果,分析了当代热结构研发中的一系列问题;第3章主要描述了复合材料中微观结构热分布不均匀的情况,并主要考虑复合材料的长期性能;第4章主要介绍了飞机材料的性能情况,同时结合应用预测了航空航天材料的未来发展趋势。

本书可作为航空航天飞行器及其热结构材料相关从业人员的参考书,在设计结构材料时具有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

新一代航空航天热结构与材料/(美)厄尔·A. 桑顿
(Earl A. Thornton) 编;黄启忠译. --北京:航空工业出版社,2019.5

(高超声速技术译丛)

书名原文:Aerospace Thermal Structures and
Materials for a New Era

ISBN 978-7-5165-1746-8

I. ①新… II. ①厄… ②黄… III. ①航空材料—高
温材料—研究②航天材料—高温材料—研究 IV. ①V259

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第065685号

北京市版权局著作权合同登记

图字:01-2015-8079

Translated from the English language edition: *Aerospace Thermal Structures and Materials for a New Era*.
By Earl A. Thornton. Originally published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics,
Inc. ISBN 978-1-56347-182-7. Copyright © 1995 by the American Institute of Aeronautics and
Astronautics, Inc. All rights reserved.

新一代航空航天热结构与材料

Xinyidai Hangkong Hangtian Rejiegou yu Cailiao

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话:010-84936597 010-84936574

三河华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2019年5月第1版

2019年5月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:21

字数:510千字

印数:1—1500

定价:108.00元

《高超声速技术译丛》编委会

顾问：(按姓氏笔画排序)

王礼恒	史新兴	包为民	乐嘉陵
冯志高	刘永才	杜善义	杨卫
李椿萱	张立同	俞鸿儒	陶文铨
黄伯云	黄瑞松		

主任委员：郑耀

副主任委员：符松 孟华

委员：(按姓氏笔画排序)

王振国	方文军	刘洪	刘卫东
关成启	杨超	李仲平	李存标
李建林	李跃明	何国强	沈清
张天序	张香文	张蒙正	张新宇
陈振乾	林均品	周毅	宗群
桂业伟	高正红	高效伟	韩杰才
程克明	樊菁		

《高超声速技术译丛》序言

飞得更快、更高、更远，是人类永恒的追求。通常人们把大气层中飞行速度达到 5 倍声速以上的飞行称为高超声速飞行。相关的高超声速流动的理论研究始于 20 世纪 40 年代后期，我国的著名科学家钱学森先生和郭永怀先生都是高超声速概念的最早倡导者。

早在 20 世纪 60 年代，在突破 3 倍声速之前，人类就已经开始研究高超声速技术。美国开展的 X-43A、X-51A、X-37B 和 HTV-2 (Hypersonic Technology Vehicle 2) “猎鹰”等飞行器的飞行试验在高超声速领域占据了领先地位，并积累了宝贵的技术和经验。受其鼓舞，更是由于其潜在的重要战略意义和极高的应用价值，使得高超声速技术成为 21 世纪航空航天领域的研究热点之一，得到了世界范围的广泛关注。

我国在高超声速技术领域的研究方兴未艾，相关的科研院所和高等学校取得了令人瞩目的突破和积累，但与美国等航空航天发达国家相比仍有一定差距，亟待汲取其先进的研究经验，并借此能够系统培养相关的科研人员。《高超声速技术译丛》的出版适逢其时，译丛旨在借鉴和总结美国等航空航天领先国家的经验，使其理论化、科学化和系统化，进而结合工程实践，以形成具有我国特色的高超声速技术理论与实践相结合的知识体系。

《高超声速技术译丛》主要涵盖飞行器总体技术、推进技术、气动力与气动热、材料与结构热防护、制导与控制、数值模拟与试验测量技术等专业方向，知识领域覆盖了高超声速飞行器研发设计、制造和试验等关键技术。译丛择优选取了美国航空航天学会等国外机构出版的高超声速及相关技术的经典著作，以飨读者。

本套译丛的出版得到了国内众多方面的大力支持。丛书凝结了高超声速研究领域专家智慧和成果，承担着记载与弘扬科学成就、积累与传播科技知识的使命，具有较强的系统性、完整性、实用性和技术前瞻性，既可以作为实际工作的指导用书，也可以作为相关专业人员的学习参考书。期望这套丛书能够有益于高超声速技术领域人才的培养，有益于高超声速技术的发展，有益于高超声速飞行器的研制工作。同时，希望能够吸引更多的读者来关心、支持和热爱高超声速技术，并投身其中做出贡献。

《高超声速技术译丛》编辑委员会

2012 年 5 月

译者序

2003年2月1日,“哥伦比亚号”航天飞机在完成为期16天的考察任务后,在返航途中解体坠毁,7名航天员全部遇难。事故的主要原因是燃料箱表面脱落的泡沫材料击中左机翼的隔热瓦,导致局部高温而引起爆炸。可见,飞行器中热结构设计至关重要,它不仅反映了一个国家的结构材料技术发展的整体水平,更是发展航空航天事业的先行保障。我国在航空航天领域起步较晚,更应在西方发达国家先进技术的基础上,尽早打破技术壁垒,建立一套自己的核心材料体系。本书中译本的出版,正是希望能为我国航空航天材料的设计工作提供有益的参考。

本书是中航出版传媒有限责任公司(航空工业出版社)引进美国AIAA(American Institute of Aeronautics and Astronautics,美国航空航天协会)的“AIAA航空航天技术丛书”之一,并纳入航空工业出版社出版的“高超声速技术译丛”。原著由美国弗吉尼亚大学的厄尔·A.桑顿(Earl A. Thornton)教授主编。

本书摘选了1994年在弗吉尼亚大学举行的第二届热结构会议中的一系列论文,根本目的是让读者了解航空航天研究中的重点难题,并分别从理论和实验方面探讨了外太空极端环境下飞行器遇到的热结构问题,分析了各种结构材料在高温环境下的热分布,并预测了未来航天器材料的发展趋势。全书分为4章,第1章主要阐述低温燃料箱面临的各种挑战,以及太空环境下材料的热衰减行为;第2章主要展示了航天器测试中的热结构研究结果,分析了当代热结构研发中的一系列问题;第3章主要描述了复合材料中微观结构热分布不均匀的情况,并考虑了复合材料的长期使用性能;第4章主要介绍了航天器使用的一些材料的性能情况,同时结合应用预测了未来的发展趋势。

本书由中南大学粉末冶金研究院黄启忠教授负责翻译,张明瑜副教授、苏哲安副教授、杨鑫副教授、谢翔旻博士、王啸东博士、黎烈武博士、陈蕾博士、童恺博士、杨程博士、方存谦博士、王亚峰博士、曾广博士、邵俊杰博士、石安红博士等参与了本书的资料整理和文字校核的工作,感谢他们对翻译工作的帮助。同时,本书的出版得到了航空工业出版社的大力支持,在此表示真诚的感谢。

本书主要介绍了航空航天飞行器及其热结构材料的相关工作,阅读对象主要以高等院校的高年级本科、研究生以及教师为主体,也可作为相关科研院所、企业技术人员的参考资料。

由于译者水平有限,翻译过程中难免存在疏漏甚至谬误,恳请读者给予批评指正。

译者

2019年2月于长沙

原版前言

1990年11月，第一届热结构会议在弗吉尼亚州夏洛茨维尔市的弗吉尼亚大学举行。会议挑选了一系列论文并汇集名为《高速航天器的热结构和材料》的论文集。这一论文集发表在AIAA的“航空学进展丛书”中的卷140，其重点是为跨学科设计以及高速航天器的发展提供技术支持。

从1990年开始，世界发生的巨大改变使得有关航空航天研究迅猛发展，这一情况遍及美国、欧洲以及远东一些国家。在美国，针对国家航空航天飞机以及外层空间初步探索的研发已经结束，而且随着冷战的结束，美国已经减少了许多有关高性能军用飞机的研究，如今美国开始着重研究民用航空学和有关地球的航天任务。然而当今所研究的这些任务中依旧存在一些难题，使得研究热结构问题依然十分重要。这些难题包括超声速飞机长时间保持飞行状态、推进系统高温下运行、航天器在地球轨道上极热极冷地短暂飞行。

1994年10月18日到20日，第二届热结构会议依旧在弗吉尼亚州夏洛茨维尔市的弗吉尼亚大学举行，在这次会议中展示了此卷论文集。此次会议的根本目的是让参与者认识航空航天的重点难题，并且展示相关的热结构技术。该卷论文集将会议论文分成4个部分：热结构的分析研究；热结构的实验研究；高温复合材料分析；飞机材料的性能。

第1章，热结构分析。顾名思义，这一章主要说明热结构的分析研究，同时说明当前遇到的各种问题。该部分从两个不同学科共同分析低温燃料箱开始。多次使用的低温燃料箱的开发是设计先进超声速航天器所面临的最大挑战之一。起初Greer用计算机针对高温流量消耗速度极大的燃料箱中的流量进行液体动力学分析，发现低温液体的流体运动与结构分析所预测的一样，都是由于燃料箱箱壁的热压力导致，在与其密切相关的另一篇论文分析中， K_0 代表着相同燃料箱中结构分析的一个有限元，实验研究了燃料箱热压以及临界屈服温度对液体充满率的影响，这两篇论文证明了先进热结构分析的多学科交叉的特性。超声速航天器的另一个多学科交叉问题就是热结构对于先进推动系统所产生的高的声载荷的匹配问题，Lee在下一篇论文中就针对大幅度振动下的热屈服盘进行了分析。

第1章最后两篇论文描述的问题是：太空情况下的材料结构热衰减行为。Malla 和 Ghoshal 的论文中说明了大型轻质结构热振动减少的效应，针对太空结构下的温度这一影响因素进行分析，发现在太空环境的极度温度梯度下，会显现一大批在普通地球环境下并没有发生的静态和动态结构问题。Kim 和 McManus 在第1章的最后一篇论文中针对太空航天器的有效载重舱，使用一个绝缘实验舱，分析测定了其在热环境下的热效应以及材料在准定态结构变形时的性能。由于太空辐射以及遮蔽效应的影响，热分析会变得极其复杂。

第2章，热结构实验研究。这一部分共有3篇论文，主要展示热结构的实验研究。Blosser 在第一篇论文中主要介绍了航天器热结构在测试时选取适当边界条件的困难所在，原因是结构限制与已知热转移条件限制存在内在冲突。Blosser 在论文中仔细说明了这些冲突，并且列举了一些航天器结构的热结构测试。而与其相关的由 Polesky 和 Shideler 提出的另一篇论文则考虑了相反的边界条件：材料结构受到热应力的约束，并且从数据中也可以知道实验设备存在一个未知的弹性约束，弹性约束则是由最小二次方来确定的，他们通过挠度测量得到了其方法的适用性。这篇论文论证了方向数据整理技术对热结构测试的帮助。而在这一章的最后一篇论文中，Foster 和 Thornton 针对航天器桁条进行了热致振动实验，文中证实了稳态和非稳态振动，并且描述了其三维动态响应的作用。

总的来说，第1、第2章一共包括8篇论文，主要介绍了当代热结构的一系列问题。论文分析者们通过计算机将多种相关的、非相关的热结构问题结合起来进行研究，与此同时，实验者们则试图通过标准的实验测定来验证模型以及不相关数据是否与新现象相符。这些论文从侧面证明了过去几十年里计算机技术已大幅度进步，更重要的是，它们证明了数据分析与实验之间的相互影响依旧在新的多学科交叉的航天器研究领域有着很大的作用。

第3章，高温复合材料分析。这一章是整本书篇幅最长的一章，一共有8篇论文，论文的数量和其多样性也说明了这种复合材料在高温区间的应用越来越重要了。本章描述的是近来新形成的一种复合材料——功能梯度复合材料。此概念的提出涉及复合材料微观结构，即材料内部增强相的不均匀分布。Pindera 等人描述了这种材料的优势，并且概括了最近热机感应理论的发展。另一种先进复合材料是纺织基编织材料，与层压复合材料一样，具有非常杰出的损伤容限以及抗剥蚀能力。Glaessgen 和 Griffin 对热反应编织复合材料的微观结构进行三维的有限元分析，主要研究了材料位移、张力以及压力等材料参数的影响。

接下来的 5 篇论文探讨了传统层压复合材料在先进热材料相关应用方面所遇到的一些问题。当层压复合材料应用于航天器后，研究者们设计了精密的计算机程序用以优化材料设计，Noor 介绍了电脑模型对于复合材料热机械屈服和后屈服现象的灵敏度分析的先进之处。在电脑分析时，程序会估算出灵敏度导数，这些导数就可以用来预测所设计参数的效果。研究者们可以进行参数化实验来研究在改变温度的情况下多孔复合板的变化情况。接下来的论文则是 Couick 针对层压复合材料提出的，他建立激光照射的模型，并且研究在此情况下复合材料的损伤情况，使用的具体方法是夹层光线模型以及闭型分析法，使用这种方法的原因是温度分布非常复杂。

当聚合物基质层压复合材料所处环境为高温高压时，要将其成功应用于航天器结构，我们就必须慎重考虑它的长期性能。传统测试长期性能的方法是通过众多的检测，而 Chamis 和 Singhal 则介绍了另一种测试途径——通过计算机估计其可能的力学性能，并结合少许的实验测试来推测材料的长期性能，这种方法用以估算复合材料长期性能的不确定性。Wetherhold 和 Wang 在减少层压复合材料变形这一问题时，面临一个新的问题——层压复合材料内部存在一个温度梯度，热压屈服和表面变形都会降低材料的性能，这也就是限制层压复合材料应用的主要问题。所以在这篇论文中，他们采用分析技术来设计层压材料，用以消除材料热屈服现象或者设计出一个合适的平面热膨胀。若在温度多变的动态环境下使用层压材料，对于热弹性波的理解就显得非常重要了，在层压材料系列这一章的最后一篇论文里，Hawwa 和 Nayfeh 讨论了具有超塑性变形特点的金属材料——钛，依照这一特点，钛有可能在人工控制制备进程的情况下得到符合性能的材料，因此重点工作便是制备金属基复合材料。

本书的最后一章：飞机材料性能。在这一章里共有 3 篇论文，介绍了应用于飞机的一些材料的性能情况。在第一篇论文中 Staley 回顾了铝合金在亚声速飞机机身材料中的应用并且预测了将来的发展趋势，介绍了铝合金属性与其性能要求，预测了材料使用时所注重的方面：将从材料的性能发展转移到材料的成本上来。在另一篇与其相关的论文里，Williams 介绍了材料在航空发动机中的作用，他认为发动机重点在商业方面而非军事，同时他还讨论了未来一些产品的要求，以及材料在性能竞争力和价格方面的挑战。为了评估技术革新对发动机性能的影响，Generazio 介绍了能对其进行良好分析的一种方法。这种方法也许能用以确定成本很高的实验研究成功的可能性，同时也能将实验的先进理念与累计效益之间的关系清晰地展示出来。该方法着重关注先进复合材料以及工艺流程的改变两个方面，因为这对这一系统的有益值影响很大。

在此，编者对于第二届热结构会议（论文在该会议中介绍）技术对话的组织者的巨大贡献表示十分感激。他们是弗吉尼亚大学诸位教授：John A. Wert, Starke Jr., Ahmed K, Carl T. Herakovich, 以及 Dana M. Elzey。同时，我们也要感谢美国国家航空航天局（NASA）兰利研究中心的 Michael F. Card 博士、Donald B. Paul 博士，以及莱特－帕特森空军基地莱特实验室的 Christopher L. Clay 先生的资助与支持。编者同样非常感谢航空航天系列中 AIAA 项目的主编 Jeanne Godette 和 Paul Zarchan 所做的贡献。最后，对于此卷书的贡献者们的耐心、合作以及认真准备其论文的实验分析者们，编者表示由衷的感谢。

Earl A. Thornton

1995 年 2 月

目 录

第1章 热结构分析	(1)
燃料箱内低温流体的数值模拟	(3)
Donald S. Greer, NASA 德莱顿飞行研究中心, 加利福尼亚州爱德华	
摘要	(3)
名词术语	(3)
1 概述	(4)
2 模型描述	(5)
3 数值方法	(10)
4 结果与讨论	(14)
5 结束语	(17)
参考文献	(18)
部分填充低温液体容器的低温纵向弯曲强度和应力分析	(19)
William L. Ko, NASA 德莱顿飞行研究中心, 加利福尼亚州爱德华	
摘要	(19)
1 引言	(19)
2 问题描述	(20)
3 有限元模型	(21)
4 热低温屈曲分析	(23)
5 热低温应力分析	(23)
6 数值结果	(23)
7 结论	(34)
参考文献	(34)
热屈曲板的随机振动: I 板厚度方向零温度梯度	(36)
Jon Lee, NASA 莱特 - 帕特森实验室, 俄亥俄州莱特 - 匹兹堡空军基地	
摘要	(36)
1 问题陈述	(36)
2 Fokker - Planck 分布	(38)
3 基于 Edgeworth 级数的累积量分析	(43)
4 等效线性化的 Brute - Force 应力应用	(47)

5 一些板模型	(49)
6 结论	(53)
附录 A: 板参数	(54)
附录 B: 矩方程	(54)
附录 C: 一些高阶矩	(55)
附录 D: 正常的应变和应力分布	(55)
参考文献	(56)
航天结构的热致振动	(59)
Ramesh B. Malla, Anindya Ghoshal, 康涅狄格大学, 康涅狄格州斯托尔斯	
摘要	(59)
1 引言	(59)
2 航天结构的历史展望	(60)
3 普遍的热结构相互作用	(63)
4 热致振动对轨道结构的研究	(65)
5 轨道大型桁架系统	(70)
6 月球结构中的热反应	(73)
7 进一步探索	(74)
8 结论	(75)
参考文献	(75)
热控材料空间结构的瞬态热结构响应	(85)
Yool A. Kim, Hugh L. McManus, 麻省理工学院, 马萨诸塞州坎布里奇	
摘要	(85)
1 引言	(85)
2 背景	(86)
3 方法	(86)
4 环境的表征	(87)
5 多层绝缘层的线性模型	(90)
6 有限元分析	(91)
7 数值结果	(92)
8 总结	(98)
参考文献	(99)
第2章 热结构实验研究	(101)
航空航天热结构测试的边界条件	(103)
Max L. Blosser, NASA 兰利研究中心, 弗吉尼亚州汉普顿	

摘要	(103)
术语	(103)
1 简介	(104)
2 分析边界条件	(105)
3 实验边界条件	(109)
4 交互作用	(111)
5 热结构测试的例子	(113)
6 总结	(122)
参考文献	(123)
针对平板测试夹具的结构边界状态表征的反演分析	(125)
Sandra P. Polesky, John L. Shideler, NASA 兰利研究中心, 弗吉尼亚州汉普顿	
摘要	(125)
1 引言	(125)
2 测试夹具说明	(126)
3 模型分析	(127)
4 梁分析	(128)
5 铝板分析	(131)
6 结论	(137)
参考文献	(138)
航天器结构的热致振动实验研究	(139)
Richard S. Foster, Earl A. Thornton, 弗吉尼亚大学, 弗吉尼亚州夏洛茨维尔市	
摘要	(139)
1 引言	(139)
2 热致振动实验	(141)
3 实验仪器	(143)
4 实验说明	(145)
5 实验结果	(145)
6 结束语	(148)
参考文献	(149)
第3章 高温复合材料分析	(151)
功能梯度复合材料的研究进展	(153)
Marek - Jerzy Pindera, Jacob Aboudi, 弗吉尼亚大学, 弗吉尼亚州夏洛茨维尔市, Steven M. Arnold, NASA 刘易斯研究中心, 俄亥俄州克利夫兰市	
摘要	(153)

1 引言.....	(153)
2 功能梯度材料高阶微观理论.....	(155)
3 说明.....	(159)
4 结论.....	(167)
参考文献	(168)
纺织基复合材料中热响应的微观力学分析	(171)
E. H. Glaessgen, O. H. Griffin Jr, 弗吉尼亚理工学院暨州立大学, 弗吉尼亚州布莱克斯堡	
摘要	(171)
1 引言.....	(171)
2 几何形状的研究.....	(172)
3 材料选择.....	(172)
4 有限元模型.....	(173)
5 有限元结果.....	(174)
6 位移结果.....	(174)
7 应变能密度结果.....	(179)
8 分析讨论.....	(181)
参考文献	(182)
复合基板热机械后屈曲态的灵敏度分析研究进展	(184)
Ahmed K. Noor, 弗吉尼亚大学, NASA 兰利研究中心, 弗吉尼亚州汉普顿	
摘要	(184)
1 引言.....	(184)
2 数学公式.....	(185)
3 等级灵敏度系数.....	(186)
4 简化方法的应用.....	(188)
5 用于评估细节响应特征的计算程序.....	(190)
6 数值研究.....	(191)
7 未来的研究方向.....	(198)
8 结论性评论.....	(198)
附件 A: 基板的热弹性连续关系式	(199)
附录 B: 基板的非连续控制等式组合	(200)
参考文献	(202)
复合材料激光诱导热应力研究	(204)
Jerry R. Couick, 莱特-帕特森空军基地空军技术研究所, 俄亥俄州	

摘要	(204)
符号表	(204)
1 研究背景	(205)
2 问题描述	(206)
3 早期工作	(206)
4 问题解决	(207)
5 结果讨论	(213)
6 结论/建议	(216)
参考文献	(216)
耐湿热复合材料长期受力性能不确定因素的量化	(219)
Christos C. Chamis, NASA 刘易斯研究中心, 俄亥俄州克利夫兰市	
Surendra N. Singhal, NYMA 有限公司, 俄亥俄州布鲁克帕克	
摘要	(219)
1 引言	(219)
2 室温下复合材料性能的概率模拟	(221)
3 耐湿热复合材料性能的概率模拟	(223)
4 结论	(229)
参考文献	(230)
层状结构的热变形最小化	(231)
Robert C. Wetherhold, Jianzhong Wang, 纽约州立大学, 纽约州布法罗市	
摘要	(231)
1 引言	(231)
2 梁架理论	(232)
3 应用	(236)
4 与温度有关的属性	(238)
5 结束语	(242)
参考文献	(243)
各向异性层合复合材料中的谐波广义热弹性波	(244)
Muhammad A. Hawwa, Adnan H. Nayfeh	
摘要	(244)
1 引言	(244)
2 问题提出	(245)
3 求解	(249)

4 传递矩阵法.....	(250)
5 数值计算.....	(251)
6 结论.....	(255)
附录	(255)
参考文献	(257)
物理气相沉积 Ti-6Al-4V 的超塑性变形行为	(260)
J. Warren, H. N. G. Wadley, 弗吉尼亚大学夏洛茨维尔分校, 弗吉尼亚州	
摘要	(260)
1 引言.....	(260)
2 实验步骤.....	(261)
3 物理气相沉积的微观结构.....	(262)
4 蠕变测量.....	(265)
5 形变的微观结构.....	(267)
6 微观结构的演变关系.....	(268)
7 蠕变机制.....	(269)
8 结论.....	(273)
参考文献	(274)
第4章 飞机材料性能	(277)
亚声速飞机用铝合金	(279)
J. T. Staley, 美国铝业公司, 100 Technical Dr, 美铝中心, 宾夕法尼亚州	
摘要	(279)
1 引言.....	(279)
2 机身.....	(280)
3 机翼.....	(285)
4 尾翼.....	(288)
5 未来趋势.....	(288)
6 总结.....	(289)
参考文献	(289)
飞机发动机的材料需求	(291)
James C. Williams, 通用电气飞机发动机, 俄亥俄州辛辛那提	
摘要	(291)
1 引言.....	(291)
2 燃气涡轮发动机的材料改进.....	(292)
3 未来的发展需求与机遇.....	(296)

4 商业环境.....	(301)
5 结论.....	(302)
参考文献	(302)
新型发动机技术的效益评估	(303)
Edward R. Generazio, Christos C. Chamis, NASA 刘易斯研究中心, 俄亥俄州克利夫兰市	
摘要	(303)
1 简介.....	(303)
2 方法.....	(304)
3 实例.....	(309)
4 结论.....	(315)