

**CERAMIC FIBERS AND COATINGS**

**ADVANCED MATERIALS FOR THE TWENTY-FIRST CENTURY**

# 陶瓷纤维和涂层：21世纪先进材料

【美】高温陶瓷复合材料先进纤维委员会 著

陈照峰 译

国家材料咨询委员会

工程和技术系统委员会

国家研究理事会



科学出版社

# 陶瓷纤维和涂层：21 世纪先进材料

## Ceramic Fibers and Coatings: Advanced Materials for the Twenty-first Century

[美] 高温陶瓷复合材料先进纤维委员会 著  
国家材料咨询委员会  
工程和技术系统委员会  
国家研究理事会

陈照峰 译



科学出版社

北京

图文字号: 01-2017-3806

## 内 容 简 介

本书为 20 世纪末由美国高温陶瓷复合材料先进纤维委员会等机构组织编写, 全书共 8 章, 内容包括碳纤维、碳化硅纤维、氧化铝纤维、陶瓷基复合材料及其制备技术, 纤维、界面、复合材料微观结构, 纤维及复合材料制造成本及评价, 陶瓷基复合材料的设计与寿命、应用与需求, 氧化物纤维与非氧化物纤维随温度和时间微观结构与性能的演化规律, 纤维、复合材料未来的发展方向等。

本书可作为本科生和研究生的教材和论证材料, 也可作为相关领域工程技术人员参考资料。

This is the translation of *Ceramic Fibers and Coatings: Advanced Materials for the Twenty-First Century*. Committee on Advanced Fibers for High-Temperature Ceramic Composites; Commission on Engineering and Technical Systems; National Research Council © 1998 National Academy of Sciences. First published in English by National Academies Press. All rights reserved.

### 图书在版编目 (CIP) 数据

陶瓷纤维和涂层: 21 世纪先进材料 / 美国高温陶瓷复合材料先进纤维委员会等著; 陈照峰译. —北京: 科学出版社, 2018.2

书名原文: Ceramic fibers and Coatings: Advanced Materials for the Twenty-First Century

ISBN 978-7-03-056738-3

I. ①陶… II. ①美… ②陈… III. ①高温陶瓷-陶瓷纤维-涂层-研究 IV. ①TQ174.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 045687 号

责任编辑: 胡 凯 许 蕾/责任校对: 彭 涛

责任印制: 张 伟/封面设计: 许 瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018年2月第一版 开本: 720×1000 B5

2018年2月第一次印刷 印张: 10 1/2

字数: 220 000

定价: 89.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## （美国）高温陶瓷复合材料先进纤维委员会

DAVID W. JOHNSON（主席），新泽西州默里山，朗讯科技公司

ANTHONY G. EVANS，马萨诸塞州剑桥，哈佛大学

RICHARD W. GOETTLER，弗吉尼亚州林奇堡，麦克德莫特技术-林奇堡研究中心

MARTIN P. HARMER，宾夕法尼亚州伯利恒，利哈伊大学

JONATHAN LIPOWITZ，密歇根州米德兰，道康宁公司

KRISHAN L. LUTHRA，纽约州斯克内克塔迪，通用电气公司研发部门

PAUL D. PALMER，马萨诸塞州贝德福德，热纤维公司

KARL M. PREWO，康涅狄格州东哈特福德，联合技术研究中心

RICHARD E. TRESSLER，大学园，宾夕法尼亚州立大学

DAVID WILSON，明尼苏达州圣保罗，3M 公司

### （美国）国家材料咨询委员会职员

SANDRA HYLAND，高级项目经理

CHARLES T. HACH，研究助理

JANICE M. PRISCO，项目助理

ROBERT E. SCHAFRIK，主任（任职到 1997 年 11 月）

RICHARD CHAIT，主任（1998 年 2 月以后）

### 政府联络代表

ERNEST CHIN，马里兰州阿伯丁试验场，陆军研究实验室

JAMES A. DICARLO，俄亥俄州克利夫兰，美国国家航空航天局刘易斯研究中心

STEVEN FISHMAN，弗吉尼亚州阿灵顿，海军研究办公室

RONALD KERANS，俄亥俄州，赖特-帕特森空军基地

S. CARLOS SANDAY，华盛顿特区，海军研究实验室

MERRILL SMITH，华盛顿特区，美国能源部

## (美国) 国家材料咨询委员会

ROBERT A. LAUDISE (主席), 新泽西州默里山, 朗讯科技公司

G. J. ABBASCHIAN, 佛罗里达大学盖恩斯维尔分校

MICHAEL I. BASKES, 加利福尼亚州利弗莫尔, 桑迪亚/利弗莫尔国家实验室

JESSE (JACK) BEAUCHAMP, 帕萨迪纳, 加州理工学院

FRANCIS DiSALVO, 纽约州伊萨卡, 康奈尔大学

EARL DOWELL, 北卡罗来纳州达勒姆, 杜克大学

EDWARD C. DOWLING, 科罗拉多州恩格尔伍德, 塞浦路斯 Amax 矿业公司

THOMAS EAGAR, 剑桥, 麻省理工学院

ANTHONY G. EVANS, 马萨诸塞州剑桥, 哈佛大学

JOHN A. GREEN, 华盛顿特区, 铝协会

SIEGFRIED S. HECKER, 新墨西哥州洛斯阿拉莫斯, 洛斯阿拉莫斯国家实验室

JOHN H. HOPPS, JR, 佐治亚州亚特兰大, 莫尔豪斯学院

LISA KLEIN, Rutgers, 新泽西州皮斯卡塔韦, 新泽西州立大学

MICHAEL JAFFE, 新泽西州萨米特, 赫斯特有限公司

SYLVIA M. JOHNSON, 加利福尼亚州门洛帕克市, 斯坦福国际研究所

HARRY LIPSITT, 俄亥俄州黄泉, 莱特州立大学

ALAN G. MILLER, 华盛顿州西雅图, 波音民用飞机集团

RICHARD S. MULLER, 加州大学伯克利分校

ROBERT C. PFAHL, 伊利诺伊州绍姆堡, 摩托罗拉

ELSA REICHMANIS, 新泽西州默里山, 朗讯科技公司

KENNETH L. REIFSNIDER, 布莱克斯堡, 弗吉尼亚州理工学院和州立大学

JAMES WAGNER, 俄亥俄州克利夫兰, 凯斯西储大学

BILL G.W. YEE, 佛罗里达州西棕榈滩, 普拉特和惠特尼

## 前 言

美国国防部和（美国）国家航空航天局要求（美国）国家研究理事会（NRC）开展研究以介绍用于高温陶瓷基复合材料（CMC）的先进陶瓷纤维及纤维涂层在未来的研究方向和发展趋势。该项研究的范围仅限于纤维及其涂层，或者说是界面层，而不考虑 CMC 的制备过程和基体材料，因为纤维及其涂层是当前限制 CMC 强度和韧性的首要因素。在 NRC 专门设立的（美国）国家材料咨询委员会的支持下，这篇报告代表了（美国）高温陶瓷复合材料先进纤维委员会（此后简称为委员会）所做的工作。

高性能合成纤维主要类别的性能及其合成和加工的几种方法已在 1992 年的 NRC 报告 *High-Performance Synthetic Fibers for Composites* 中被讨论过，这份报告提出了一种对各类纤维进行评估的好方法，包括用于聚合物基和金属基复合材料中的纤维、CMC 和碳碳复合材料中的纤维以及非结构应用的纤维。然而 1992 年的这份报告并没有介绍陶瓷纤维中微观结构与性能的关系，或者说是没有介绍升温条件下加工和性能之间的关系。自 1992 年的报告发表以来，改进纤维涂层是改善复合材料性能的关键这一观点得到了更广泛的认同。鉴于对高温性能的持续需求，本书主要关注陶瓷纤维和陶瓷涂层的能力和 demand。

在工业界、政府和学术界的持续推动下，改善高温材料以提高其组件在高温下使用的性能、效率和耐久性迫在眉睫。例如，最近一篇 NRC 的报告 *Intermetallic Alloy Development: A Program Evaluation* 讨论了橡树岭国家实验室以金属间化合物项目作为发展金属间化合物合金在高温结构中应用的目标。另一篇 1996 年 NRC 的报告 *Coatings for High-Temperature Structural Materials: Trends and Opportunities* 介绍了在应用环境下保护涡轮发动机金属构件的方法，因此其可以在更高温度下使用。CMC 在高温下的固有稳定性使得该材料在高温下连续使用大有希望。然而，CMC 的成功实施将需要评估其性能和所构成的纤维及其涂层成本。因此，委员会被要求在本研究中完成下列目标：

- 表征高温纤维和界面材料的现状，明确国内外研究开发能力和生产能力
- 评估当前纤维的性能以满足未来的性能需求
- 建议有前途的纤维和涂层研究方向，以提高高温性能

- 确定具有高效费比的高温陶瓷纤维和涂层的生产加工技术
- 确定高温纤维发展小规模商业化应用的动力和障碍

最初，委员会打算单独设一章来讨论日本的纤维和涂层，但是鉴于美国和欧洲已经取得了进展，委员会认为专门为日本的工作设立一章是不合理的。因此，美国、欧洲和日本的陶瓷纤维和涂层技术水平均将在第 3 章讨论。

为了实现研究目标，委员会在 15 个月的时间内召开了四次会议，并进行了几次电话会议。其中两次面对面会议的重点是收集信息，另外两次则致力于分析信息和编写报告。美国国家航空航天局、美国国防部和美国能源部的代表以及非政府组织的代表被邀请讨论高温部件的长期材料性能要求以及现有材料的实现能力，并要求现有的 CMC 制造商为复合材料的制造定义纤维要求以及复合材料的性能和供应能力。

其中一次信息收集会议是与美国陶瓷学会在佛罗里达州可可比奇举行的第 21 届复合材料、先进陶瓷、材料及结构会议上同时举行的。在这次会议上，委员会出席了来自美国、日本和德国的工业界、政府和学术界代表的 15 场演讲，演讲大部分集中在纤维和涂层技术的现状和未来发展方向上。另外，两家主要的喷气发动机制造商提出了用于燃气涡轮发动机的 CMC 的一般要求。委员会收集的信息用于评估陶瓷纤维和涂层技术的现状，从而确定研究人员和制造商未来应采取的技术的方向。在华盛顿特区的国家科学院举行的第二次信息收集会议上，CMC 制造商的几位代表讨论了他们对陶瓷纤维和陶瓷纤维涂层性能的要求。

委员会审查了这些通报后，审议了以下问题：

- CMC 在制备过程中对纤维和界面层有何要求？
- CMC 主要市场和应用是什么？
- 纤维及其涂层对这些市场有什么要求？
- 目前的纤维是否满足或接近满足 CMC 的要求？
- 当前和潜在的 CMC 应用对纤维成本有多敏感？

委员会随后考虑了改善陶瓷纤维和涂层性能并降低成本的未来需求和机遇。这些讨论包括纤维及涂层的加工工艺的改进，以及（在一定程度上）降低开发和制造这些材料成本的机制。最后，委员会得出了本书中提出的结论和建议。

David W. Johnson 主席

（美国）高温陶瓷复合材料先进纤维委员会

## 致 谢

(美国) 高温陶瓷复合材料先进纤维委员会感谢以下人员提供的信息: 拜耳公司 (Bayer AG) 的 Hans-Peter Baldus、橡树岭国家实验室 (Oak Ridge National Laboratory) 的 Ted Besmann、联合技术研究中心 (United Technologies Research Center) 的 John Brennan、西屋 (Westinghouse) 的 Mike Burke、杜邦 Lanxide 公司 (DuPont Lanxide, Inc.) 的 Phillip Craig、(美国) 国防部陶瓷信息分析中心 (Department of Defense-Ceramics Information Analysis Center) 的 Said El-Rahaiby、Synterials 的 Dick Enghalt、杜邦 Lanxide 公司 (DuPont Lanxide, Inc.) 的 Doug Freitag、联合信号公司 (Allied Signal) 的 Hans Friedericy、赖特-帕特森实验室 (Wright Patterson Laboratory) 的 Randy Hay; (美国) 国防分析研究所 (Institute for Defense Analysis) 的 Bill Hong、道康宁公司 (Dow Corning) 的 K. William Householder、日本碳素公司 (Nippon Carbon Company) 的 Hiroshi Ichikowa、宇部兴产株式会社 (UBE Industries) 的 Kioyshi Kumagawa、材料与电化学研究集团 (Materials and Electrochemical Research Group) 的 Withold Kowbel、普拉特·惠特尼集团公司 (Pratt and Whitney) 的 Gary Linsey、橡树岭国家实验室 (Oak Ridge National Laboratory) 的 Richard Lowden、通用电气公司 (General Electric) 的 Michael Millard、洛克韦尔国际公司 (Rockwell International) 的 Peter Morgan、大阪大学 (Osaka University) 的 Koichi Niihara、无容器研究公司 (Containerless Research Corporation) 的 Paul Nordine、洛克韦尔国际公司 (Rockwell International) 的 John Porter、佛罗里达大学 (University of Florida) 的 Michael Sacks、道康宁公司 (Dow Corning) 的 Andrew Szweda、日本碳素公司 (Nippon Carbon Company) 的 Michio Takeda、3M 公司的 Tom Tompkins、麦克德莫特技术公司 (McDermott Technologies, Inc.) 的 Richard Wagner 和无容器研究公司 (Containerless Research Corporation) 的 Richard Weber。

委员会感谢美国陶瓷学会授权 (美国) 国家研究理事会在本书中使用以下数据: 图 3-1、图 3-2、图 3-6、图 3-8、图 3-12、图 3-13、图 3-15、图 3-16、图 3-17、图 3-21、图 3-23、图 3-24、图 4-2、图 5-2、图 5-3、图 6-6、图 6-8、图 6-9、图 6-10、图 6-12、图 6-14、图 6-15、图 6-16、图 6-17 和图 6-18。这些数据经美



国陶瓷学会（俄亥俄州韦斯特维尔市 6136 号邮政信箱 43086-6136）许可转载，美国陶瓷学会保留上述所有图片的版权。

根据 NRC 报告审查委员会批准的程序，本书分别选择不同的角度和技术方向的人员来审查。这个独立审查的目的是提供坦诚以及批评的意见，这将有助于作者和 NRC 尽可能准确地发表本书内容，并确保本书符合客观公正的制度标准，并可以对该项研究经费进行回应。评审意见和稿件的内容仍然保密，以保护审议过程的完整性。我们希望感谢以下人士参与本书的审议：纽约大学（New York University）的 Norbert S. Baer、联合技术研究中心（United Technologies Research Center）的 John J. Brennan、宾夕法尼亚大学（University of Pennsylvania）的 I. Wei Chen、联合信号公司（Allied Signal）的 Barry S. Draskovich、国际斯坦福研究所（SRI International）的 Sylvia M. Johnson、莱特州立大学（Wright State University）的 Harry A. Lipsitt、罗克韦尔国际公司科学中心（Rockwell International Science Center）的 David B. Marshall 和约翰·霍普金斯大学（Johns Hopkins University）的 Dennis C. Nagle。

虽然上述人员为本书提供了许多建设性的意见和建议，但对本书最终内容的责任仅在于本书编委会和 NRC。

委员会衷心感谢（美国）国家材料咨询委员会的坚定支持。高级项目主管 Sandra Hyland 和研究助理 Charles Hach 花费了大量的时间和精力来编写报告，Janice Prisco 作为高级项目助理非常有效地处理了许多问题。

委员会主席特别感谢委员会成员在有限时间内提交高质量报告所做的奉献，没有他们牺牲的时间和精力，本书是不可能顺利完成的。

## 缩 略 词

ACF	activated carbon fiber	活性炭纤维
BSR	bend stress relaxation	弯曲应力松弛
CFCC	continuous fiber-reinforced ceramic composite	连续纤维增强陶瓷复合材料
CMC	ceramic matrix composite	陶瓷基复合材料
CTE	coefficient of thermal expansion	热膨胀系数
CVD	chemical vapor deposition	化学气相沉积
CVI	chemical vapor infiltration	化学气相渗透
DTA	differential thermal analysis	差热分析
DTGA	differential thermal gravimetric analysis	差热重量分析
EFCC	externally fired combined cycle	外燃联合循环
IGCC	integrated gasification combined cycle	整体煤气化联合循环
IMC	intermetallic matrix composite	金属间化合物基复合材料
MMC	metal matrix composite	金属基复合材料
NMR	nuclear magnetic resonance	核磁共振
NRC	National Research Council	(美国) 国家研究理事会
PAN	polyacrylonitrile	聚丙烯腈
PFBC	pressurized fluid bed combustion	增压流化床燃烧
PMC	polymer matrix composite	聚合物基复合材料
R&D	research and development	研究和发展

TEM	transmission electron microscopy	透射电镜
TGA	thermal gravimetric analysis	热重分析
TPV	thermophotovoltaic	热光伏
UCSB	University of California-Santa Barbara	加州大学圣塔芭芭拉分校
UF	University of Florida	佛罗里达大学
UHC	unburned hydrocarbons	未燃碳水化合物
UTS	ultimate tensile strength	极限拉伸强度

# 目 录

执行摘要	1
方法	2
高温陶瓷纤维	3
纤维涂层	4
建议和影响	5
讨论的重点	7
1 绪论	8
方法	8
陶瓷基复合材料潜在的应用	9
复合材料	9
陶瓷纤维及其涂层	13
工程要求	16
本书内容结构	17
2 现在和将来的需求	18
新材料应用	20
陶瓷基复合材料的设计和寿命预测	22
陶瓷基复合材料的应用和需求	23
制造的要求	27
对纤维性能的影响	27
3 陶瓷纤维性能现状	31
候选纤维	31
非氧化物纤维的温度和时效性能	37
温度和时间对氧化物纤维性能的影响	50
性能特征与目标性能的比较	56
建议及未来的发展方向	57
4 陶瓷纤维制备	59
非氧化物纤维制备	59

氧化物纤维制备 .....	64
建议及发展方向 .....	73
<b>5 材料与微观结构 .....</b>	<b>75</b>
纤维发展的机会 .....	75
多晶氧化物 .....	78
多晶碳化硅 .....	80
非晶纤维 .....	80
建议与将来的方向 .....	81
<b>6 界面涂层 .....</b>	<b>83</b>
非氧化物复合材料的涂层 .....	83
氧化物纤维涂层 .....	96
建议和将来的方向 .....	110
<b>7 成本问题 .....</b>	<b>115</b>
价格和成本 .....	115
成本类型 .....	116
一般纤维生产成本 .....	118
陶瓷纤维的制造 .....	120
氧化物和非氧化物 .....	121
发现 .....	121
结论 .....	124
建议和未来发展方向 .....	125
<b>8 建议及未来发展方向 .....</b>	<b>127</b>
工程数据 .....	127
纤维涂层 .....	128
氧化物纤维研究 .....	129
非氧化物纤维开发 .....	130
制造成本 .....	131
优先级 .....	132
<b>参考文献 .....</b>	<b>133</b>
<b>委员会组织机构 .....</b>	<b>143</b>

## 图表资料目录

### 表格

表 ES-1	陶瓷纤维的典型性能范围	3
表 2-1	陶瓷基复合材料的优缺点	19
表 2-2	工业发电的应用	23
表 2-3	航空应用	26
表 2-4	航天应用 (美国)	26
表 2-5	陶瓷基复合材料的生产环境	27
表 3-1	用于 CMC 的商用纤维和开发性纤维	32
表 3-2	选择的商用陶瓷纤维	35
表 4-1	商业聚合物前驱体法陶瓷纤维生产工艺	62
表 4-2	商业氧化物纤维成分及前驱体	68

### 图片

图 1-1	连续纤维增强陶瓷基复合材料的理想应力-应变曲线与未增强的基体的应力-应变曲线对比图	10
图 1-2	连续增强陶瓷基复合材料示意图	11
图 1-3	Hi-Nicalon <sup>TM</sup> 纤维增强 SiC 基复合材料 (CVI 法制备) 断裂表面扫描电镜图	11
图 1-4	一种燃气轮机燃烧室的喉衬 (里面和外面)	12
图 1-5	八枚缎纹布	14
图 1-6	有氮化硼涂层的纤维丝	14
图 1-7	3M 公司的 Nextel 610 多晶陶瓷氧化物纤维	15
图 2-1	通用电气公司的一种大型燃气轮机加热部分横截面图	19
图 2-2	各类高温应用中的热性能要求	24
图 2-3	3M 公司 203 型 Nextel 纤维增强 SiC 基陶瓷复合材料滤棒	25
图 3-1	SiC 基纤维和氧化物纤维强度-温度图	38
图 3-2	(a) SiC 基纤维的杨氏模量与温度关系图; (b) 氧化物纤维的杨氏	

模量与温度关系图	38
图 3-3 不同 SiC 纤维的拉伸强度与温度关系图	39
图 3-4 硅基化合物和 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 基商用纤维快速断裂强度与温度关系	39
图 3-5 商用 Si 基和 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 基纤维在短期 (1~10h) 高温暴露后的室温残余强度	40
图 3-6 氩气中热处理 1h 后 SiC 纤维的拉伸强度	41
图 3-7 氩气中高温暴露 10h 后 SiC 纤维的室温拉伸强度	41
图 3-8 氩气中 1550°C (2822°F) 老化 10h 后, SiC 纤维拉伸强度	42
图 3-9 干燥空气中 1400°C (2552°F) 暴露 10h 后 SiC 纤维的拉伸强度	42
图 3-10 空气中 1000°C (1832°F) 热处理后 SiC 纤维的拉伸强度	43
图 3-11 SiBN <sub>3</sub> C 表面上形成的氧化扩散阻挡层的结构	44
图 3-12 Si-C-O 纤维热处理后温度与电导率的关系	44
图 3-13 在 Si-C 纤维中 C/Si 摩尔比与电阻率的关系	45
图 3-14 聚合物衍生的 SiC 纤维和其他多晶 SiC 纤维与 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 纤维 1h 弯曲应力释放率	46
图 3-15 空气中 (白色图标) 和氩气中 (黑色图标) 1200°C (2192°F) (三角形图标) 和 1400°C (2552°F) (方形图标) 下的 SiC 纤维断裂强度	48
图 3-16 空气中 Hi-Nicalon 快速断裂和断裂强度热活化图	49
图 3-17 处理前 SiC 纤维的平均强度热活化图	49
图 3-18 Nextel 610 和 Nextel 720 纤维单丝 [热标距=25mm (1in), 总标距=220mm (8.8in)] 测试温度与拉伸强度关系	51
图 3-19 多晶 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 基氧化物纤维在空气中 1090°C (1994°F) 时的典型蠕变曲线	52
图 3-20 Nextel 720 蠕变速率与其他商用氧化物纤维比较曲线	53
图 3-21 通过限边薄膜生长法 (EFG) 生成的定向凝固的共晶 YAG/氧化铝纤维、多晶氧化铝基纤维和 c 轴蓝宝石纤维的 1h 弯曲应力松弛率曲线	53
图 3-22 Nextel 610 纤维应力断裂	54
图 3-23 多晶和单丝 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 基纤维 100h 的断裂强度	55
图 3-24 标距~25mm (1in) 时已生产 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 基纤维的平均强度热活化图	55
图 3-25 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 纤维增强 CMC 和先进超合金强度性能比较	57
图 4-1 聚合物前驱体法生产陶瓷纤维典型工艺流程	61

图 4-2	热解工艺曲线	63
图 4-3	氧化物陶瓷纤维化学生产流程	66
图 4-4	干法纺丝工艺图	69
图 4-5	氧化铝纤维 DTA、DTGA、TGA 曲线	70
图 4-6	低的形核率导致产生大 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 晶粒	72
图 4-7	Nextel 610 纤维由于使用了结核剂, 晶粒尺寸很小	72
图 5-1	使用二维模型预测氧化铝纤维的蠕变速率与纵横比的函数关系	76
图 5-2	含体积分数 5%的 $0.15\mu\text{m}$ ( $0.006\text{mil}$ ) SiC 颗粒的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ -SiC 纳米复合材料和相同晶粒尺寸的未掺杂的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的拉伸蠕变率	77
图 5-3	未掺杂氧化铝和 1000ppm $\text{Y}_2\text{O}_3$ 掺杂的氧化铝的稳态蠕变率	77
图 5-4	高倍二次离子质谱分析图像显示钇和钪掺杂的氧化铝中出现掺杂物偏析	78
图 6-1	CVI 法制造的 Nicalon 纤维增强 SiC 基复合材料的拉伸试验结果	85
图 6-2	沿纤维末端暴露的单轴 SiC/C/SiC 复合材料的纤维-涂层-基体界面的氧化过程的示意图	85
图 6-3	纤维末端暴露的单轴 SiC/C/SiC 复合材料的纤维涂层的氧化深度	86
图 6-4	熔融渗透法制备的 Hi-Nicalon 纤维增强 SiC-Si 基复合材料拉伸试验结果为 4:2 和 4:4 纤维铺层的结果, 分别表示 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 方向的层数	87
图 6-5	具有 BN 涂层的热压 Nicalon 纤维增强玻璃陶瓷基复合材料的拉伸试验结果	88
图 6-6	熔融渗透方法制造的 Hi-Nicalon 纤维增强 SiC-Si 基复合材料的涂层氧化深度	89
图 6-7	具有 BN 纤维涂层的热压 SiC 纤维增强玻璃陶瓷基复合材料高温大气中 [ $1200^\circ\text{C}$ ( $2192^\circ\text{F}$ ), $69\text{MPa}$ ( $10\text{ksi}$ ), $11725\text{h}$ ] 经拉伸应力断裂实验后的截面抛光照片	90
图 6-8	连续纤维增强陶瓷复合材料暴露在高于基体开裂强度的应力下的基体裂纹的示意图	92
图 6-9	图 6-8 中椭圆区域中的裂纹-基体-纤维涂层区域的氧化进程示意图	93
图 6-10	由铝溶胶和 Darvan C 混合物沉积制备的多孔氧化铝纤维涂层	97
图 6-11	热环境对 $0^\circ/90^\circ$ 方向的全氧化物复合材料应力-应变行为的影响	99
图 6-12	Nextel 720 纤维增强铝硅酸钙玻璃陶瓷基复合材料在碳界面层氧	



	化之后残余模量及基体到纤维的载荷传递 .....	100
图 6-13	六方 $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和磁铁铅矿结构在每种结构下面是沿 $c$ 轴方向的镜面对称旋转 .....	102
图 6-14	裂纹沿粗糙的黑铝钙石界面的基本晶面扩展的透射电镜照片 .....	104
图 6-15	裂纹沿氧化铝-独居石界面偏转的扫描电镜照片 .....	105
图 6-16	沿白钨矿-Nextel 610 界面脱黏的扫描电镜和投射电镜照片 .....	107
图 6-17	不融合液相涂层技术的示意图 .....	108
图 6-18	不混液相技术沉积氧化物纤维涂层的实例 .....	109
图 6-19	由杂凝聚技术在 Nextel 720 纤维上沉积而成的 $\text{LaPO}_4$ 涂层 .....	110
图 7-1	制造成本的影响因素 .....	116
图 7-2	纤维额外费用 .....	119
图 7-3	纤维经济指标与年产量的关系 .....	122

## 资料

资料 1-1	有损伤容限的陶瓷基复合材料 .....	10
资料 2-1	CMC 应用实例 .....	19