

工程复合材料

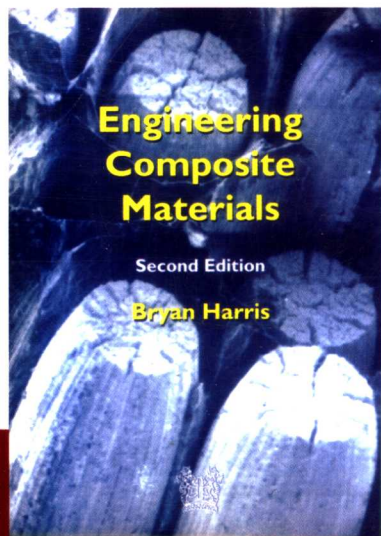
(原著第二版)

[英] 布赖恩·哈里斯 著

Bryan Harris

陈祥宝 张宝艳 译

Chemical Industry Press



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

工程复合材料

[英] 布赖恩·哈里斯 著

陈祥宝 张宝艳 译

(原著第二版)



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

工程复合材料/ [英] 哈里斯 (Harris, B.) 著; 陈祥宝, 张宝艳译. —北京: 化学工业出版社, 2004. 5

书名原文: Engineering Composite Materials

ISBN 7-5025-5504-8

I. 工… II. ①哈…②陈…③张… III. 工程材料: 复合材料 IV. TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 043855 号

Engineering Composite Materials, Second Edition/by Bryan Harris

ISBN 1-86125-032-0

Copyright © 1999 by IOM Communications Ltd. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by IOM Communications Ltd.

本书中文简体字版由 IOM Communications 出版公司授权化学工业出版社出版发行。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2003-2325

工程复合材料

布赖恩·哈里斯著 陈祥宝 张宝艳译

责任编辑: 王苏平

文字编辑: 周 寒

责任校对: 凌亚男

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行

材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

http: //www. cip. com. cn

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 16½ 字数 307 千字

2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5504-8/TB·40

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

第二版前言

在第一版出版数十年之后修订是件有益的事。在这数十年中复合材料领域得到了快速发展，在第一版前言写作时似乎确定的在这里只给予简要的回顾。经验能够导致人们完全放弃写作前言。但我准备再次冒犯错误的风险。

在复合材料领域及其伴随的产业化过程中已经发生了十分明显的变化，而且这些变化并不是都可以预测的。从发表出版的大量专著和文献（复合材料的科技杂志数在过去十年中已经增加了3倍或4倍）和每年召开一次或几年召开一次的昂贵的国际会议的数量可见目前人们对复合材料的兴趣。学术活动图展现出研究和发展的繁荣领域：复合材料研究的学术中心在世界范围内激增。在英国，和20世纪80年代早期相比，工程材料教学中复合材料课程也变得十分普通。许多关于 MMCs、CMCs 和碳/碳复合材料的新的专著已经出版，有些正在编写之中。

然而取决于一个国家的观点，在工业领域那边却是十分不同的。在20世纪70和80年代已经深深陷入复合材料研究（通常是先进材料研究）的许多英国公司现在已经放弃了他们对复合材料的兴趣——ICI、GKN、BP 和 Courtaulds。另外一些公司仍对复合材料保持着一定的兴趣。特别是在美国，以大量投入建立的专家中心和实验室已经消失，商业赢利的概念已经放弃，很快转向一些“核心行业”，例如石油和纺织品行业。像过去一样，高性能碳纤维的发明国家已经放弃了创新。现在英国已经不再生产高性能纤维。虽有一个法国石油公司也退出了复合材料领域，但在欧洲其他国家复合材料工业没有出现和英国、日本和美国那样相同的状态，对复合材料的兴趣仍然方兴未艾。

在三类复合材料中，无论是在研究还是应用方面，聚合物基复合材料仍然占主导地位。聚合物基复合材料品种日益扩

大，不论是模压成型还是高性能碳纤维增强塑料都已经成熟，价格也可以接受。设计者正在努力使用复合材料的全面功能，以科学分析设计替代原来的等代设计。在十多年中计算分析能力有了很大的提高，利用计算机可使设计计算进行得很快。

在第一版前言中提到的对金属基复合材料的“兴趣低落”仍在延续，但对于纤维增强 MMCs 应用的兴趣稍有不同。直到本书修订时，MMCs 的实际应用仍然很少。关于 MMCs 的研究，特别是高温条件下的应用研究仍在继续进行。CMCs 不可避免地会有裂纹，因此 CMCs 的应用必须确定其在裂纹存在的条件下是否可以工作。CMCs 材料在市场上已经可以获得，但价格比较昂贵，其应用将会冒一定的风险。

作者希望纠正在本书第一版时某些评论所述的那种印象：在过去和这次修订出版时，作者从未把本书作为复合材料力学性能的权威专著。早在 1986 年，这里已经有各种复合材料力学的专著——例如 R. M. Jones 的“复合材料力学”，Ashton, Halpin, Tsai 的“复合材料入门”等专著。到 1997 年，又有大量复合材料力学方面的专著出版。我从来不曾、现在也不打算和这些适宜于复合材料高级应用人员的专著进行竞争。在英国材料科学和工程的本科教学中需要一门复合材料的课程，以使大学生了解复合材料这类现代工程材料的性能和特点；对于刚刚涉足复合材料研究的研究生则需要一本涉及复合材料功能和发展方向的入门讲义，这是我修订此书的原因。第一版的评论者认为本书不够先进，如果他们读一下新版，那他们将会改变看法。虽然本书仍然有丰富的关于复合材料新发展和新出版物的参考文献，但我已经坚持删除了许多早期的参考文献。

总之，我喜欢挑战未来的评论。1970 年在皇家学会增强纤维研讨会上，内阁办公室首席科学家 Alan Cotterll 先生指出，“复合材料消耗的耐久性可能会给将来带来麻烦”。除了将旧的复合材料构件扔掉之外，对于他预见的问题人们没有做任何积极的研究。和废旧金属材料具有回收价值不同，复合材料的价值在于作为构件应用，而不是材料本身。Alan Cotterll 先生呼吁“我希望我们不要因为对这些激动人心的新材料的热情而导致忽略它带来的问题。”事实上，在 27 年以后，几乎没有任何研究组织正在致力于复合材料回收和再生利用方面的研究。

Bryan Harris

Bath 大学 材料科学与工程系

1998 年 7 月

第一版前言

复合材料具有多学科交叉的特点，是一个研究十分活跃的领域。复合材料的出现给科研人员提出了大量的理论和实验分析问题，同时它的可设计性也给设计者提供了更加广阔的空间。复合材料的历史可追溯到二战期间，虽然一些基督教义辩护士坚持认为最早的复合材料是古罗马-埃及时代使用的增强混凝土。早期复合材料的工作主要集中在玻璃纤维增强塑料，Jame Gordon 也以亚麻纤维作为增强材料对复合材料进行了实验研究。

在过去战争年代，复合材料的发展相对比较缓慢，其原因是根据位错理论，物理冶金技术可使金属合金的性能达到很高的水平，满足这一时期工程的要求。当然，在高分子化学方面，聚合物材料仍然得到了应有的发展。这期间是复合材料发展没有得到重视的时期，工程师们还不曾预测到发展复合材料是必须的。作者于 20 世纪 50 年代中期在 ICI 金属材料研究部的生活回忆表明，那时只有一个很小的化学研究小组针对这些奇怪的塑料板进行极少研究，而我们绝大部分的工作则是致力于合金的研制。

然而到 20 世纪 50 年代后期，工程师和早期的材料学家，实际上是冶金、物理和化学家的世界性组织，开始寻求发展新型高强度材料的可能性。原在 John Duckham 领导下的英国国家研究和发展委员会在剑桥大学发起了“奇思妙想”季节，这一时期使英国的科学家（和一些无知的研究生，作者是其中之一）提出了各种发展更新、更好工程材料的“不可思议”的建议。当时诸如超细粒子材料、晶须和高强度纤维（例如，我回想起 Touy Kelly 建议将非常细的金属纤维碳化以制造连续的 TiC 纤维）等“天方夜谭”的话在今天是普通的概念，并且部分已经

实现。然而在当时这些似乎和登月一样难以想像。

1962年作者到美国时，在英国的Morgan雇用学生们开始研究晶须。美国ThermoKinetics公司以克的规模出售氧化铝晶须，每克的价格在百美元量级，以及Texaco正在试制连续硼纤维。与此同时，冶金学家建立了金属复合材料的理论基础。到20世纪60年代中期，复合材料已经形成学科，相关论文的发表快速增加，以皇家航空研究院（Farnbrough）的Leslie Phillips和他的同事成功研制的连续高性能碳纤维，又进一步促进了复合材料的发展。使用方便，适宜采用相对简单的方法制造复合材料、综合性能优异的纤维的存在使航空航天设计者察觉到复合材料的应用前景，复合材料发展开始了新的阶段。复合材料应用实现了，复杂层合板性能精确预测的新的分析工作开始建立设计程序，对古老的GRP的兴趣再次唤醒。现实创造了古代哲学家不曾想到的大量事物，对于更新、更好纤维的探索仍在进行。

同时由于对于高温应用仍然没有综合性能足够好的增强纤维，因此对金属基复合材料的兴趣减退，而对于低温应用的增强塑料能够提供所有需要的原材料。尽管在20世纪70年代纤维增强金属基复合材料方面公开发表的文章很少，这仅仅表明对金属基复合材料兴趣的减退，但不是完全消失。

然而到20世纪80年代，风云又有转变，新的增强纤维可以得到，如以最近出席欧洲和美国会议的人数来表示（不包括非美国公民不能参加的非公开会场）对金属基复合材料兴趣程度，结果反映人们对金属基复合材料的兴趣程度是极高的。作者发现有意思的是新一代金属基复合材料研究者是必须挖一些老土的。然而天下真的没有任何新东西：纺织和造纸专家常常认为他们已经解决的所有重要问题，复合材料工作者会再来解决一次。这就是为什么复合材料是个令人兴奋的领域，并且作者希望读此书的人能为之工作。

作者或许允许本书像前言一样就复合材料专题及其发展反映一些个人观点。本书来自作者在Bath为材料学本科学生使用的讲稿和1984年在中国香港大学夏季研修班题为“高模量聚合物及复合材料”的讲稿。由于篇幅所限进行了必要的删改，但作者希望已经提供了足够的参考资料以便读者可进一步深入更复杂的情况以便获得更客观公正的观点。

Bryan Harris

1986年5月

致 谢

在本书的编写过程中应用了为复合材料学科奠定了基础的科学家、工程师的大量工作，这些工作已经在参考文献中注明。作者希望他们允许使用他们的工作并对他们的贡献表示感谢。作者特别感谢在 Bath 和 Sussex 大学一起工作和分享复合材料研究方面的快乐的学生、研究人员和同事。本书的文稿都采用电子文档，因此无需对文稿的录入者进行感谢。如果书中仍存在不妥之处，作者谨表歉意。作者还要感谢文字、公式和图表处理软件的编写者，正是这些软件使我在办公室里就可以完成文稿的全部编写工作。在本书的编写中使用的软件包括 Microsoft's word、Equation Editor、Microcal's Orign、Professional Draw、Biosoft's Ungraph、MathSoft's excellent Mathcad。这些软件工具的使用使我能以从来没有认为可能的方式进行本书的编写工作。

目 录

第 1 章	复合材料的本质	1
1.1	什么是复合材料	1
1.2	传统材料及其局限性	2
1.3	增强纤维	3
1.3.1	玻璃纤维	5
1.3.2	碳纤维	5
1.3.3	碳化硅纤维	6
1.3.4	氧化铝和氧化铝/硅化合物纤维	6
1.3.5	有机纤维	7
1.3.6	增强材料的形式	8
1.4	传统基体材料	9
1.4.1	基体的作用	9
1.4.2	金属材料	10
1.4.3	聚合物材料	10
1.4.4	玻璃、陶瓷和水泥材料	11
1.4.5	碳材料	13
1.5	常用文献及参考资料	13
1.5.1	常用书目	14
1.5.2	数据出处	15
第 2 章	复合材料制备	16
2.1	材料的复合	16
2.2	界面	17
2.3	制造工艺	18
2.3.1	聚合物基复合材料	18

2.3.2	金属基复合材料	20
2.3.3	陶瓷基复合材料	22
2.3.4	混杂复合材料	23
2.4	聚合物基复合材料的制造缺陷	23
2.5	聚合物基复合材料的无损检测方法	27
2.5.1	光学检测	27
2.5.2	射线检测	28
2.5.3	热像检测	28
2.5.4	超声检测技术	28
2.5.5	光纤传感技术	29
2.5.5.1	固化监测	29
2.5.5.2	变形和损伤监测(健康监测)	30
2.5.6	微波法	30
2.5.7	动态机械分析	30
2.5.8	声发射技术	31
2.6	复合材料应用	31
2.7	参考文献	31

第3章	纤维增强复合材料的弹性性能	34
3.1	简单微观力学模型	34
3.2	HALPIN-TSAI 方程	38
3.3	压缩模量	41
3.4	复合材料薄层板的各向异性	42
3.5	单向复合材料层板弹性性能的方向依赖性	44
3.6	多层层合板	47
3.7	短纤维复合材料	53
3.8	混杂复合材料	57
3.9	残余应变	59
3.10	织物复合材料	63
3.11	柔性复合材料	65
3.12	参考文献	67

第4章	纤维增强复合材料的强度	69
4.1	拉伸强度	69

4.1.1	单向连续纤维增强复合材料	69
4.1.2	脆性纤维的强度问题	71
4.1.3	单向复合材料中的累积损伤和失效	75
4.1.4	单向复合材料拉伸强度的计算	77
4.1.5	横向强度	80
4.1.6	复合材料强度的方向性	82
4.1.7	多层复合材料层合板的强度	85
4.1.8	短纤维复合材料	88
4.1.9	混杂复合材料	94
4.2	压缩强度	96
4.2.1	冲击后压缩强度	101
4.3	剪切强度	103
4.3.1	界面剪切强度	106
4.3.1.1	宏观剪切强度测试	106
4.3.1.2	裂纹间距测量	107
4.3.1.3	纤维拔出试验	107
4.3.1.4	微滴脱黏试验	109
4.3.1.5	压入试验	109
4.3.1.6	单纤断裂试验	110
4.3.1.7	激光-拉曼光谱测试	112
4.4	弯曲强度	112
4.5	复杂应力条件下的失效准则	113
4.6	陶瓷基复合材料的强度	115
4.7	参考文献	117

第5章 复合材料的断裂和韧性 121

5.1	复合材料失效的结构因素	121
5.2	复合材料的断裂过程	122
5.2.1	基体效应	123
5.2.2	纤维效应	123
5.2.3	纤维/基体的简单加合效应	124
5.3	复合效应对韧性的影响	125
5.3.1	纤维增强复合材料的增韧机制	125
5.3.1.1	纤维/树脂脱黏	129

5.3.1.2	脱黏摩擦功	132
5.3.1.3	纤维拔出	132
5.3.2	混杂复合材料的韧性	137
5.3.3	层合结构复合材料的韧性	138
5.3.3.1	分层	138
5.3.3.2	横向层开裂	141
5.4	层合复合材料的韧性	141
5.4.1	短纤维复合材料	144
5.4.2	抗损伤复合材料的设计	145
5.5	陶瓷基复合材料的韧性	146
5.5.1	基体开裂	147
5.5.2	纤维桥联	147
5.5.3	纤维拔出	148
5.6	断裂力学在复合材料中的应用	149
5.6.1	缺口复合材料的强度和缺口敏感性	149
5.6.2	断裂力学的应用	151
5.6.3	在具体复合材料中的应用	151
5.7	结论	154
5.8	参考文献	156

第6章	纤维复合材料的疲劳行为	161
6.1	引言	161
6.2	复合材料的损伤	162
6.2.1	失效的定义和试验数据的分散性	164
6.3	一些典型疲劳现象的评述	164
6.3.1	应力/寿命曲线	164
6.3.2	恒定寿命图	165
6.3.3	疲劳数据分析的统计情况	166
6.3.4	累积损伤定律	169
6.4	复合材料的疲劳行为	170
6.4.1	恒应力疲劳曲线	170
6.4.2	影响复合材料疲劳行为的材料因素	175
6.4.2.1	混杂复合材料	177
6.4.2.2	短纤维复合材料	178

6.4.3 影响复合材料疲劳行为的其他因素	180
6.4.3.1 试验设备和试样	180
6.4.3.2 试验频率及其影响	181
6.4.3.3 开孔和缺口的影响	182
6.4.3.4 应力体系和应力比 R 的影响	183
6.4.4 损伤积累和剩余强度	186
6.4.5 变应力条件下的疲劳: 分段加载	191
6.4.6 寿命预测	192
6.5 金属基复合材料的疲劳	194
6.6 陶瓷基复合材料的疲劳	199
6.7 结论	204
6.8 参考文献	204

第 7 章 环境影响

7.1 引言	209
7.2 复合材料的湿热敏感性	212
7.2.1 增强纤维的影响	212
7.2.2 树脂的影响	213
7.2.3 复合材料的影响	215
7.3 时间依赖性	217
7.3.1 腐蚀环境中的 GRP	218
7.4 复合材料的高温强度和蠕变	219
7.4.1 引言	219
7.4.2 蠕变	222
7.4.2.1 概述	222
7.4.2.2 复合材料的蠕变	227
7.5 参考文献	233

第 8 章 问题

附 录

A1 单层单向层板弹性性能的方向依赖性	241
A2 脆性材料强度的统计性质	244
参考文献	248
A3 复合材料的应用	248

第 1 章

复合材料的本质

1.1 什么是复合材料

复合材料正在提高和扩展各工程领域设计者的水平，尽管这种提高和扩展的程度目前仍不易察觉。虽然人们只能看到玻璃纤维增强复合塑料（GRP^❶）快艇的华丽外表或了解其比赛性能，但并不能感觉到复合材料直升机桨叶或现代碳纤维增强复合塑料（CFRP^❷）网球拍结构的复杂性。虽然如此，复合材料确实给人类提供了解决一些困难问题的新方法。

复合材料在复合过程中既综合各组分材料的优点，又同时减少其不利影响。优化的复合工艺使设计者从传统材料的选择和制造的束缚中解放出来，使人们使用更轻、更韧的材料，其性能能够通过综合平衡来满足实际设计的需要。由于复合材料很容易加工成复杂形状的构件，采用复合材料重新设计构件常常能够获得在降低成本的同时提高性能的效果。

复合材料的概念并不是人类发明的。木材是一种天然的复合材料，它由纤维素纤维和聚多糖木质素复合而成。虽然人类能够利用自然界中的木材，通过将其复合成更大尺寸的材料以克服自然界中木材的各向异性和轴向尺寸较小等缺点，但就制造木材那样结构的复合材料而言，自然界比人类做得更好。骨头、牙齿和贝壳是另一类天然复合材料，它们由硬的陶瓷相增强天然有机体复合而成。从远古时代，人类就认识到几种材料的结合是有益的，将枝条和胶泥复合是实际的复合工艺，并已用于建造结构，直到罗马人在 20 世纪发明预拉伸和过拉伸钢筋增强混凝土之前一直在使用。经过半个世纪的发展，直到 20 世纪下半叶，复合材料科

❶ GRP 是玻璃纤维增强塑料的缩写。

❷ CFRP 是碳纤维增强塑料的缩写。

学和技术的发展才给工程师提供了新型材料和充分利用这些材料所需的工装设备。

简单的术语“复合材料”几乎没有表明在这类材料中各种组分的巨大范围。图 1.1 清楚地给出了有关定义，这些定义对于材料科学家和材料的使用者以及设计工程师都是适用的。首先，在每一组材料内（金属、陶瓷和聚合物）这是已经存在的可称为复合材料的材料。大量应用的工程材料，如钢铁，就是由软的金属基体和硬的弥散陶瓷增强相复合而成的材料。这些陶瓷相有时呈片状，有时为针状，有时为球状或多边形。聚合物也常常是二相结构，往往在基体中弥散分布硬的增强相或软的增韧相，正像前面已经看到的那样，木材是这方面的典型例子。混凝土是一类陶瓷基复合材料的典型例子，它由砂粒和水泥组成。人类对复合材料早已非常了解。材料科学家通过控制增强相的数量、形式和分布实现控制其微观结构，进而可以控制其性能。通过加入其他组分可以扩展材料的性能，如在聚合物中加入硬的、阻燃的或更便宜的陶瓷颗粒，可使聚合物复合材料硬度提高。或阻燃、或热稳定的陶瓷颗粒加入到金属中去可以制造在高温和高速下切削金属的工具材料，这仅是复合材料的两个例子。而复合材料真正显著的发展是纤维增强复合材料——树脂基复合材料的出现，如 CFRP 和 GRP、金属基复合材料（MMCs），如碳化硅纤维增强铝和陶瓷基复合材料（CMCs），如碳纤维增强玻璃。

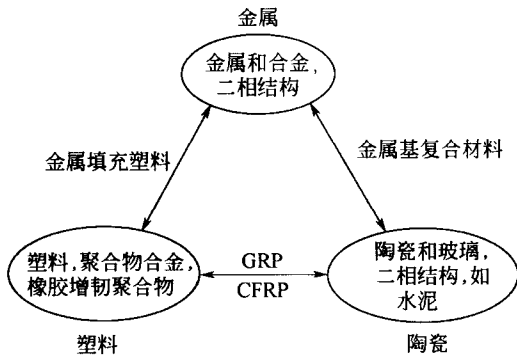


图 1.1 不同工程材料之间的关系

理想的工程材料应当是性能可重复和性能可精确预测的。由于复合材料的充分合理应用取决于设计适应性，这些设计适应性源自材料能够满足实际需求。因此，人类需要有效地预测复合材料的性能。但到目前为止，复合材料的某些重要工程性能可以根据数学模型精确预测，但还有部分性能不能有效预测。

1.2 传统材料及其局限性

由于金属、塑料和陶瓷 3 类材料各自的性能分布范围非常宽，因此通过简单

的列表来比较金属、塑料和陶瓷材料的相对强弱是非常困难的。然而可以通过比较定性地给出不同类型材料的明显优缺点。

① 塑料是低密度材料，具有良好的短期化学稳定性和较好的耐环境性能，易成型和连接，但热稳定性较差，力学性能一般较低。

② 陶瓷也是低密度材料（也有些陶瓷密度较大），热稳定性极高，耐腐蚀、磨蚀和磨损性能好，但陶瓷是脆性材料，成型和加工极其困难。

③ 金属是中高密度材料，镁合金、铝合金和钛合金的密度和塑料较接近。大部分的金属有良好的热稳定性，在合金状态具有一定的耐腐蚀性能。金属材料具有较高的力学性能和韧性，成型性和连接性较好。金属材料作为工程材料应用时，常常需要考虑其抗裂纹扩展性能和持久性能。

基于上面的比较可以发现，每一类材料都有其优点和缺点。对于设计者来说，金属材料相对塑料和陶瓷材料比较成熟。

1.3 增强纤维

结构和强度工程师很快就发现，目前工程上使用的材料有一个重要的特点，即它们的强度远远低于通过化学键能计算得到的理论强度值。造成这一结果的原因是材料在制备过程中会形成各种形式的缺陷。例如玻璃和陶瓷块体的强度不是由共价键和离子键决定，而是由玻璃内部或表面的微孔或裂纹决定的。高度抛光的高密度陶瓷的强度很少能超过其理论强度的千分之一。类似地金属在它们的晶格中存在层积缺陷——位错，导致块体金属试样在理论剪切强度的千分之几或更小的载荷下就发生塑性变形。

任何玻璃和陶瓷试样的强度实际上由它所包含的最大缺陷或裂纹的大小决定。根据1920年Griffith的热力学理论，玻璃和陶瓷的强度粗略地和最大缺陷长度平方根的倒数成反比。最简单的关系式是：

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\frac{2E\gamma_F}{\pi a}} \quad (1.1)$$

式中， $\sigma_{\max}$ 是材料的强度； E 是材料的弹性模量（杨氏模量）； γ_F 是试样断裂所需做的功； a 是缺陷的大小。由于这种材料包含的裂纹和缺陷的尺寸分布很宽，因此按照Griffith模型，脆性材料每个试样的强度测量值的分散性很大。

如果非常小心地控制制造过程以减少缺陷尺寸，那么材料的强度将会提高，分散性将会减少。例如通过以非常快的速度将熔融的玻璃拉伸成约10 μm的微纤——玻璃纤维，新形成的新鲜表面没有微观缺陷，纤维直径又非常小，以至于玻璃本体内不会含有缺陷。因此新鲜玻璃纤维的强度可达到5 GPa，而玻璃块体的强度小于100 MPa。新鲜玻璃纤维需要防护，以免和硬物磨损以及在大气中被

湿气腐蚀。磨损和腐蚀将导致表面缺陷的再次引入而使强度大幅度降低。类似地, 聚合物纤维, 如聚丙烯腈 (PAN) 纤维的强度受构成纤维的分子链间的弱化学键和制备过程中引起的缺陷的影响。然而通过小心地控制牵伸、氧化和碳化工工艺, PAN 纤维几乎完全转化为碳, 转化成为在纤维轴向强 C—C 键的比例极高、具有与石墨结构类似的晶体结构的碳纤维。这些直径约为 $7\text{ }\mu\text{m}$ 的碳纤维的承载能力很强, 内部缺陷的尺寸也非常小, 因此, 每根比人头发丝还细的纤维能经受 $10\sim 20\text{ kg}$ 的载荷而不断裂, 相当于强度达到 5 GPa 。碳纤维和另外一些有机和无机纤维一起, 在复合材料中得到广泛使用。对于同种材料, 纤维直径愈小, 它的强度愈高。

虽然材料所含的缺陷决定了材料的实际强度, 但对于一确定材料, 它的理论强度则由材料分子键的强度所决定, 因此仍有必要去寻找具有最强化学键结合的材料, 以便人类有机会探讨获得高强度材料结构的原理。浏览元素周期表可以评估化学键的强弱和性质。在元素周期表中有高密度共价键或共价/离子键混合区, 最值得注意的是直接化学键合的轻元素区域, 这些元素是 C、B、Si。在 1950 年, 当复合材料的概念刚刚形成时, 这些元素没有被作为高性能结构材料考虑, 但在英国皇家空军研究机构发明了碳纤维、美国 Texaco 发明了高强度硼纤维后, 为探索这些材料在工程复合材料中的应用, 有关研究发展计划得到了迅速扩大。

硅并不是有前途的结构材料, 但和另一些轻元素结合, 如与氧结合后形成的 SiO_2 , 则成为可制备与石英纤维、玻璃纤维相似的高强纤维。此外, 如 Al_2O_3 、 SiC 和 Si_3N_4 这些化合物是 3 种重要的陶瓷材料。由于 C—C 键具有高强度和刚度, 有机纤维也在纤维复合材料中得到应用, 其中最重要的两种纤维是聚乙烯纤维和芳香聚酰胺纤维 (较尼龙有更高的热稳定性)。表 1.1 给出了部分常用增强纤维的典型力学性能。用钢丝作为比较的基础, 可以清楚地发现为什么工程师们对新型纤维材料那么感兴趣。对于轻质结构, 如以强度/密度或刚度/密度来进行比较, 结果更加令人吃惊。

由于增强纤维是复合材料获得高强度、高刚度和低密度的关键, 有必要进一步简单地考虑一下纤维的特性。有关纤维的详细介绍见 1988 年 Bunsell 的著作和 1994 年 Mai 的著作。

表 1.1 部分常用增强纤维的典型力学性能

材 料	牌 号	密度 / $10^3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	纤维直径 / μm	杨氏模量 /GPa	拉伸强度 /GPa
高碳钢线	如: 钢琴线	7.8	250	210	2.8
短纤维					
氧化铝晶须		3.96	1~10	450	20
非连续氧化铝+氧化硅纤维	Saffil(U. K.)	2.1	3	280	1.5