

[英] D·赫尔 著
张双寅 郑维平 蔡良武 译

复合材料导论

复合材料导论

[英] D·赫尔 著

张双寅 郑维平 蔡良武 译

中国建筑工业出版社

本书为科学家和工程师们提供关于复合材料的知识,以作为改善其物理、机械性能和改进这些材料的生产工艺和产品设计的基础。为此,本书深入到了许多学科的边缘,从材料本身的物理化学性能,直至它们在工程中的设计与应用。

本书所涉及的专题包括:复合材料的定义与应用,纤维、基体及界面的性能,几何性状,单层板与层合板的弹性性质,断裂的微观机制和预测长、短纤维材料最终破坏的方法,疲劳和环境条件所造成的性能劣化等。

本书供从事材料科学研究、生产及设计人员参考,也可供有关院校师生阅读。

DEREK HULL
An Introduction to Composite
Materials
CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS

1981

复合材料导论

张双寅 郑维平 蔡良武 译

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

开本: 787×1092毫米 1/32 印张: 10³/₄ 字数: 231 千字

1989年2月第一版 1989年2月第一次印刷

印数: 1—1,945册 定价: 6.80元

ISBN7-112-00164-1/TU·109

统一书号: 15040·5477

译 者 的 话

随着复合材料的发展，一些关于复合材料的书相继问世。近年来，我国也出版了几本这方面的书。我们翻译的这本书在英国享有较高的声誉，与我国出版的几本书相比，它有一些明显的特点。

正如本书著者在前言中提到的，本书旨在材料科学家与设计工程师之间架起一座“桥梁”，通过它使材料科学家们了解工程设计中所需要的材料性能，作为改进材料、发展新工艺的指南；并且可以使结构设计师们熟悉与材料性能密切相关的微观物理机制和对产品性能有深远影响的制造工艺途径。这两类人员之间的思想沟通对他们紧密合作，共同发展复合材料事业无疑是至关重要的。

译者认为著者在这个“架桥”工作中取得了预期的成功。他以几种常用结构复合材料为对象，着重描述了预测材料弹性性质和破坏强度的理论与方法，这肯定是工程师们所最为关心的。同时，用足够的篇幅讨论了纤维、基体与界面性能，以及它们对复合材料性能的影响；并且简明扼要地介绍了几种常用生产工艺过程，突出说明了不同方法对材料最终性能的

影响。简言之，揭示材料宏观性能与微观性能之间和工艺过程与产品性能之间的相互关系是贯穿全书的主线。

复合材料是包含多学科、多层次的一门综合性学科。作为复合材料的导论，本书以恰当的比例安排了制造工艺、组分材料性能和复合材料性能三部分内容。论述力求深入浅出，通俗易懂。例如在讨论复合材料刚度与强度特性时，避开了冗长的数学演算，而着重阐明其物理意义，用了大量的图表与照片说明内在规律。照片与曲线清晰漂亮，有的照片十分珍贵。大量的实验数据对工程应用与科学研究很有参考价值。所以，从这个角度看，本书是一本难得的资料典籍。

本书可能有广泛的读者面。首先，它可以作为有关高等院校本科生或研究生的教科书与教师的教学用书，同时又是材料科学与制造工艺学等方面科研人员以及工程设计人员的参考书。

由于译者水平所限，不当之处在所难免，祈望批评指正。

前 言

关于复合材料的综合性的书籍所包含的内容极为广泛，它包括材料科学、冶金学、高分子技术、断裂力学、应用力学、各向异性弹性理论、加工工艺学和材料工程等学科的许多内容。可以说，复合材料几乎包括了所有的结构材料，从象骨骼和木材之类的天然材料，直到包括金属、陶瓷和聚合物在内的新型尖端工程材料，皆可包括在复合材料之中。本书试图对这个课题作一综述，毫无疑问，不同学科与不同方法之间的相互作用，将对我们进一步认识复合材料并开发新型复合材料体系提供有效的手段。

本书将在一个相当窄的范围内阐述这一课题，因为作者的主要目的在于使学生与研究人员，以及科学家和工程师们从物理的角度对复合材料的性能有所了解，这个了解，是我们改善复合材料性能、制造工艺和产品设计的基础。这种对复合材料的了解，是根据许多学科的研究发展而来，并且在某种意义上讲，对所有复合材料都是共同的。尽管本书的重点在于研究复合材料作为一个整体所具有的性能，但读者对各组分材料如纤维、基体和纤维与基体

之间界面的性质也应有所了解。

复合材料技术的实质就是将适当体积含量的强硬的纤维以适当的取向放在适当的位置上的技能。这种方法隐含着这样一个概念：在制造材料的同时，人们也在制造最终产品。这意味着要求那些从微观角度设计复合材料的人和那些必须设计与制造最后复合材料工程部件的人能够密切合作。

复合材料可以在几种不同的水平上进行研究，每种水平要求不同类型的专门知识。所采用的方法取决于研究的目的。例如，开发既能抵抗腐蚀环境，同时又能保持其物理与力学性能的复合材料，主要是选择能抵抗这种腐蚀环境的纤维、树脂和界面，这是化学家、物理学家和材料科学家们的专长。与此相反，工程师们的任务是设计一个刚性结构，如飞机的气动控制面或者压力管道，他们更关心的是材料的宏观弹性性能。他们应用各向异性弹性理论和有限元分析，在满足性能要求的前提下，设计出重量最轻或造价最低的结构。这两个例子所涉及的学科几乎互不相干，但是对物理学家而言，了解设计问题的实质是重要的；对工程师而言，察知他设计所用材料的细微之处也是很重要的。本书为架设沟通这两种大不相同的方法之间的桥梁抛砖引玉，它对所有与复合材料打交道的科学家和工程师们都将有一定的参考价值。当然，不同专业的人员可以从其它专著

中去查阅本课题中一些特殊问题的更深入的处理方法。

一方面是对固体进行纯物理或纯化学的研究，另一方面是在工程中应用材料，材料科学家向来是在这两者之间处于一个特殊位置上。本书是在我对大学最后一年的学生们讲授的二十讲课程的基础上写成的，他们是攻读材料科学和材料工程方向的理学士和工学士的优等生。在授课时，我规劝全体学生牢记查米斯博士（C.C.Chamis）对复合材料这一学科所作的评论：“这个领域仍未形成坚实的体系，无论对理论还是对实验的结果作评价，都需要有相当强的判断力”。而从物理上理解这些材料的行为，是建立这个判断力最坚实的基础之一。

本书开篇第一章就介绍了复合材料的分类与定义、复合材料与传统工程材料的关系以及复合材料产品的生产流程。第二章介绍了纤维和基体的性质，特别是材料的微结构与性能的关系以及工艺条件的影响。我们考察了三类纤维——玻璃纤维、碳纤维和有机纤维与两类高聚物基体——热固性塑料和热塑性塑料。

第三章讨论了纤维与基体之间的界面和测量粘结强度的方法。这一章里，先简单介绍了粘结的物理和化学原理，然后以玻璃纤维和高聚物树脂界面为例详细地予以说明。最后，对其它纤维和基体的界面作了一般性的介绍。

第四章从几何角度来研究复合材料，特别是就纤维的体积含量、纤维的长度、纤维的长度分布、纤维在二维和三维中的取向、空隙含量等方面的表征方法进行讨论。同时，也扼要地说明了拉伸和剪切流动中的纤维取向问题。

第五章阐述了单向板、面内随机取向长纤维单层板和短纤维复合材料的弹性性质。对一些不同的纤维-树脂系统的理论预测与实验结果作了对比。还有一小节讲述热应力与固化应力。第六章利用层合板理论介绍了复合材料层合板的弹性特性。数学细节保留在最低限度，而特别着重于物理意义的分析。讨论了正交铺层和角铺层层合板的性质，概述了各铺层内的应力计算，并将这些计算结果以图线来表示。

此后的三章分别讨论单层板、层合板与短纤维复合材料的强度。第七章讨论了单向板的纵向拉伸、压缩，横向拉伸、压缩与平面剪切的破坏的微观机理和强度的理论预测。提出了纤维拔出和断裂能的概念。最后一节讨论了强度对纤维取向的依赖关系和在双向应力条件下使用破坏准则预测强度的问题。第八章叙述了多层层合板的强度问题。简要介绍了依据逐层破坏导致最终破坏的模型来预测正交层合板和角铺层层合板破坏的方法，论述了自由边缘对破坏模式的影响和极限强度。第九章论述了三组短纤维增强复合材料断裂的微观机制与强度问题。这三组材料的短纤维排布形式是：定向

排列短纤维、以短切原丝毡形式面内随机排列与由注射成型的热塑性材料的随机排列。

最后一章介绍了下列内容：复合材料的疲劳性能与缺口敏感性；复合材料因环境条件的作用所导致的性能劣化；混杂复合材料的开发。

刚刚开始接触复合材料的人，面对近几年来发表的数目巨大的科技论文，很快就会觉得惘然不知所措。为方便读者，我们把一些重要文献列在每一章的末尾。我鼓励学生们选读其中的部分文献，但也要竭力劝告他们，不要试图吸收其中所有的内容。对于大学生读者，均衡地接受各种观点是大有裨益的。

只因有一大批富有献身精神的杰出的科学家和工程师们的开拓性的工作，才使得这样的一本书得以问世，这里仅能刊出其中几个人的名字：蔡（Tsai）、凯利（Kelly）、布鲁特曼（Broutman）、罗森（Rosen）、沃特（Watt）、珀克（Puck）。我要感谢我的许多朋友和同事们，是他们允许我在本书中引用他们著作中的例子，也感谢他们的出版商们，是他们允许我复制文章中的照片和插图。我要特别感谢我所在的利物浦大学材料工程系从事研究工作的学生和教师们，无论是过去还是现在，他们对我了解复合材料从多方面作出了贡献。我所在系的研究工作得到了科学研究委员会和不少工业公司的支持，这些工业部门

包括英国化学工业公司 (ICI)、英国石油公司 (BP)、斯各特-巴德公司 (Scott-Bader)、皮尔金敦兄弟公司 (Pilkington Bro) 和福特汽车公司 (Ford Motor Company)。这些支持, 过去是, 今后也仍然是极其宝贵的, 对此表示衷心的感谢。

D·赫尔

目 录

译者的话

前言

第一章 绪论 1

- 1.1 复合材料的分类及定义 (1)
- 1.2 复合材料与传统材料的比较 (5)
- 1.3 复合材料的几个问题:
基本原理 (9)

第二章 纤维与基体 11

- 2.1 碳纤维 (11)
- 2.2 玻璃纤维 (19)
- 2.3 有机纤维 (23)
- 2.4 各种纤维的比较 (27)
- 2.5 热固性树脂 (33)
- 2.6 热塑性塑料 (39)
- 参考文献与更进一步的读物 (41)

第三章 纤维-基体的界面 44

- 3.1 引言 (44)
- 3.2 粘着理论 (46)
- 3.3 玻璃纤维-聚酯树脂界面 (52)
- 3.4 其它纤维-基体界面 (57)
- 3.5 粘结强度的测量 (60)
- 参考文献与更进一步的读物 (71)

第四章 几何性状.....73

- 4.1 引言 (73)
- 4.2 单向板: 连续纤维 (75)
- 4.3 体积百分数和重量百分数 (80)
- 4.4 无捻粗纱布: 连续纤维 (81)
- 4.5 面内随机分布的纤维 (82)
- 4.6 纤维长度的分布 (84)
- 4.7 纤维取向的分布 (89)
- 4.8 空隙 (93)
- 4.9 纤维在流动过程中的取向 (97)
- 参考文献与更进一步的读物 (99)

第五章 弹性性能101

- 5.1 引言 (101)
- 5.2 单向板的弹性性能 (102)
- 5.3 面内随机长纤维单层板的
弹性性能 (111)
- 5.4 纤维端部的应力与应变分布 (114)
- 5.5 短纤维复合材料的弹性性能 (118)
- 5.6 热应力与固化应力 (121)
- 参考文献与更进一步的读物 (125)

第六章 层合板理论128

- 6.1 引言 (128)
- 6.2 单向纤维板的弹性性能 (130)
- 6.3 层合板的弹性性能 (140)
- 6.4 确定作用在单层板上的应力 (150)
- 参考文献与更进一步的读物 (156)

第七章 单向板的强度158

- 7.1 引言 (158)
- 7.2 纵向拉伸强度 (160)
- 7.3 纤维拔出 (178)
- 7.4 横向拉伸强度 (182)
- 7.5 纵向压缩强度 (192)
- 7.6 横向压缩强度 (202)
- 7.7 面内剪切强度 (203)
- 7.8 强度对方向的依赖性和
破坏准则 (207)
- 参考文献与更进一步的读物 (214)

第八章 层合板的强度217

- 8.1 引言 (217)
- 8.2 正交层合板 (219)
- 8.3 角铺设层合板 (227)
- 8.4 角铺设层合板的边缘效应 (239)
- 参考文献与更进一步的读物 (245)

第九章 短纤维复合材料的强度248

- 9.1 引言 (248)
- 9.2 定向短纤维 (250)
- 9.3 面内随机纤维 (260)
- 9.4 注射成型的短纤维材料 (267)
- 参考文献与更进一步的读物 (272)

第十章 其它专题274

- 10.1 引言 (274)

- 10.2 疲劳 (275)
- 10.3 缺口敏感性和断裂能 (282)
- 10.4 环境条件造成的材料性能劣化 (288)
- 10.5 混杂复合材料 (293)
- 参考文献与更进一步的读物 (297)

主要符号表	300
SI 单位制简表	303
索引	305

第一章 绪 论

1.1 复合材料的分类及定义

复合材料有很多种分类方法，这取决于不同的观点与概念，对此需要进行鉴别。表1.1给出了一种常用而又全面的分类方法并附之以实例。大多数自然界存在的材料是从两种或更多种组合中得到其优异性能的，借助光学显微镜或电子显微镜进行观察时，就能够分辨出这些组分。例如，人体中的许多组织是由刚度较低的基体包裹着象成胶质这样的刚性纤维构成的，具有很高的强度和极好的柔韧性。这些纤维沿载荷较大的方向排列从而提供最大刚度，并且纤维之间能够相互滑动，使得组织非常柔韧。同样，对木材和竹子的显微镜观察也可以看到明显的纤维状结构，这当竹子断裂时极为明显。无怪乎竹子被称为“天然的玻璃纤维”。

绝大多数大块的工程材料也都是由两相或更多的相在微观尺度上弥散分布而达到最佳性能的复合物。金属合金和工程塑料的强度与韧性是通过高强相和强韧相的组合而达到的。普通碳钢（如：含铁99.2%，含碳0.8%）就是一个比较简单的例子。当这种合金以800℃缓慢冷却时，就形成柔软的与

硬脆的两相层状交错的微观结构，柔软相几乎就是纯铁，而硬脆相是称作渗碳体的 Fe_3C 化合物。天然材料和工程材料二者都是微观复合材料，因为它们的性质是通过这些相细致的弥散获得的。它们的结构往往是非常细小，以致人们不得不采用高分辨率电子显微镜来分辨这些独立的相。

复合材料的大致分类 表 1.1

	例 子
天然复合材料	木 材 骨 骼 竹 子 肌肉和其它组织
微观复合材料	合金：如：钢 增韧热塑性塑料：如： 冲压聚苯乙烯、ABS塑料 片状模塑料 增强热塑性塑料
宏观复合材料 (工程制品)	镀 锌 钢 钢筋混凝土梁 直升飞机旋翼叶片 滑 雪 板

复合的“概念”也可以是宏观的。那些由两种或更多种材料构成从而得到比单一材料使用性能更好的工程构件尤其是这样。譬如镀锌钢，在钢的表面镀着一层锌，就是抗腐蚀性的锌与高强度的钢的结合；类似地，具有很好抗压强度的混凝土梁利用钢筋增强来提高拉伸强度。直升飞机旋翼叶片是由结构材料来提供强度和刚度，而由耐磨蚀材料来保