

材料科学与技术丛书

R. W. 卡恩 P. 哈森 E. J. 克雷默 主编

(第13卷)

复合材料的 结构与性能

(美) 邹祖诤 主编

科学出版社



材料科学与技术丛书(第 13 卷)

R. W. 卡恩 P. 哈森 E. J. 克雷默 主编

复合材料的结构与性能

[美] 邹祖诤 主编

吴人洁 等译

科学出版社

1999

图字：01-97-1625 号

图书在版编目(CIP)数据

复合材料的结构与性能 / [美] 邹祖伟主编；吴人洁等译，
-北京：科学出版社，1999

(材料科学与技术丛书：第13卷)

书名原文：Structure and Properties of Composites

ISBN 7-03-007155-7

I. 复… II. ①邹… ②吴… III. 工程材料：复合材料-
结构性能 IV. TP33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 36357 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1999年9月第一版 开本：787×1092 1/16

1999年9月第一次印刷 印张：36 1/2

印数：1—2 600 字数：840 000

定价：80.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换〈新欣〉)

7/1/22
6:00

《材料科学与技术》丛书 中文版编委会

主编

师昌绪 国家自然科学基金委员会
柯俊 北京科技大学
R. W. 卡恩 英国剑桥大学

成员 (以姓氏笔画为序)

丁道云 中南工业大学
干福熹 中国科学院上海光机研究所
叶恒强 中国科学院金属研究所
刘嘉禾 北京钢铁研究总院
朱逢吾 北京科技大学
朱鹤孙 北京理工大学
吴人洁 上海交通大学
闵乃本 南京大学
周邦新 中国核动力研究设计院
柯伟 中国科学院金属腐蚀与防护研究所
施良和 中国科学院化学研究所
郭景坤 中国科学院上海硅酸盐研究所
徐僖 四川大学
徐元森 中国科学院上海冶金研究所
黄勇 清华大学
屠海令 北京有色金属研究总院
雷廷权 哈尔滨工业大学
詹文山 中国科学院物理研究所
颜鸣皋 北京航空材料研究院

总 译 序

20世纪80年代末,英国剑桥大学的R. W. 卡恩教授、德国哥丁根大学的P. 哈森教授和美国康乃尔大学的E. J. 克雷默教授共同主编了《材料科学与技术》(Materials Science and Technology)丛书。该丛书是自美国麻省理工学院于80年代中期编写的《材料科学与工程百科全书》(Encyclopedia of Materials Science and Engineering)问世以来的又一部有关材料科学和技术方面的巨著。该丛书全面系统地论述了材料的形成机理、生产工艺及国际公认的科研成果,既深刻阐述了有关的基础理论,具有很高的学术水平,又密切结合生产实际,实用价值较强。

该丛书共19卷(23分册),分三大部分:第1~6卷主要阐述材料科学的基础理论;第7~14卷重点介绍材料的基本性能及实际应用;第15~19卷则着重论述材料的最新加工方法和工艺。

该丛书覆盖了现代材料科学的各个领域,系统而深入地对材料科学和技术的各个方面进行了精辟的论述,并附以大量图表加以说明,使其内容更加全面、翔实,论述也比较严谨、简洁。

有400余名国际知名学者、相关领域的学术带头人主持或参加了该丛书的撰写工作,从而使该丛书具有很高的权威性和知名度。

该丛书各卷都附有大量参考文献,从而为科技工作者进一步深入探讨提供了便利。

随着我国科学技术的飞速发展,我国从事与材料有关研究的科技人员约占全部科技人员的1/3,国内现有的有关材料科学方面的著作远远满足不了广大科技人员的需求。因此,把该丛书译成中文出版,不但适应我国国情,可以满足广大科技人员的需要,而且必将促进我国材料科学技术的发展。

基于此,几年前我们就倡议购买该丛书的版权。科学出版社与德国VCH出版社经过谈判,于1996年10月达成协议,该丛书的中文版由科学出版社独家出版。

为使该丛书中文版尽快与广大读者见面,我们成立了以师昌绪、柯俊、R. W. 卡恩为主编,各分卷主编为编委的中文版编委会。为保证翻译质量,各卷均由国内在本领域学术造诣较深的教授或研究员主持有关内容的翻译与审核工作。

本丛书的出版与中国科学院郭传杰研究员的帮助和支持是分不开的,他作为长期从事材料科学研究的学者,十分理解出版本丛书的重大意义,购买本

丛书版权的经费问题就是在他的大力协助下解决的，特此对他表示感谢。另外，本丛书中文版的翻译稿酬由各卷主编自筹，或出自有关课题组和单位，我们对他们给予的支持和帮助表示衷心的感谢。

我们还要感谢中国科学院外籍院士、英国皇家学会会员 R. W. 卡恩教授，他以对中国人民的诚挚友谊和对我国材料科学发展的深切关怀，为达成版权协议做出了很大努力。

材料是国民经济发展、国力增强的重要基础，它关系着民族复兴的大业。最近几年，我国传统材料的技术改造，以及新型材料的研究正在蓬勃展开。为适应这一形势，国内科技界尽管编著出版了不少材料科学技术方面的丛书、工具书等，有的已具有较高水平，但由于这一领域的广泛性和迅速发展，这些努力还是不能满足科技工作者进一步提高的迫切要求，以及我国生产和研究工作的需要。他山之石，可以攻玉。在我国造诣较深的学者的共同努力下，众煦漂山，集腋成裘，将这套代表当代科技发展水平的大型丛书译成中文。我们相信，本丛书的出版，必将得到我国广大材料科技工作者的热烈欢迎。

为了使本丛书尽快问世，原著插图中的英文说明一律未译，各卷索引仍引用原著的页码，这些页码大致标注在与译文相应的位置上，以备核查。

由于本丛书内容丰富，涉及多门学科，加之受时间所限，故译文中难免存在疏漏及不足之处，请读者指正。

师昌绪

柯俊

1998年3月于北京

丛书序

材料是多种多样的，如金属、陶瓷、电子材料、塑料和复合材料，它们在制备和使用过程中的许多概念、现象和转变都惊人地相似。诸如相变机理、缺陷行为、平衡热力学、扩散、流动和断裂机理、界面的精细结构与行为、晶体和玻璃的结构以及它们之间的关系、不同类型材料中的电子的迁移与禁锢、原子聚集体的统计力学或磁自旋等的概念，不仅用来说明最早研究过的单个材料的行为，而且也用来说明初看起来毫不相干的其它材料的行为。

正是由于各材料之间相互有机联系而诞生的材料科学，现在已成为一门独立的学科以及各组成学科的聚集体。这本新的丛书就是企图阐明这一新学科的现状，定义它的性质和范围，以及对它的主要组成论题提供一个综合的概述。

材料技术(有时称材料工程)更注重实际。材料技术与材料科学相互补充，主要论及材料的工艺。目前，它已变成一门极复杂的技艺，特别是对新的学科诸如半导体、聚合物和先进陶瓷(事实上对古老的材料)也是如此。于是读者会发现，现代钢铁的冶炼与工艺已远超越古老的经验操作了。

当然，其它的书藉中也会论及这些题目，它们往往来自百科全书、年报、专题文章和期刊的个别评论之中。这些内容主要是供专家(或想成为专家的人)阅读。我们的目的并非是贬低同行们在材料科学与技术方面的这些资料，而是想创立自己的丛书，以便放在手边经常参考或系统阅读；同时我们尽力加快出版，以保证先出的几卷与后出的几卷在时效方面有所衔接。个别的章节是较之百科全书和综述文章讨论得更为详细，而较之专题文章为简略。

本丛书直接面向的广大读者，不仅包括材料科学工作者和工程师，而且也针对活跃在其它学科诸如固体物理、固体化学、冶金学、建筑工程、电气工程和电子学、能源技术、聚合物科学与工程的人们。

本丛书的分类主要基于材料的类型和工艺模式，有些卷着眼于应用(核材料、生物材料)，有些卷则偏重于性能(相变、表征、塑性变形和断裂)。有些题材的不同方面有时会被安排在两卷或多卷中，而有些题材则集中于一专卷内(如有关腐蚀的论述就是编在第7卷的一章中，有关粘结的论述则是编在第12卷的一章中)。编者特别注意卷内与卷间的相互引证。作为一个整体，本丛书完成时将刊出一卷累积的索引，以便查阅。

我们非常感谢VCH出版社的编辑和生产人员，他们为收集资料并最后出

书,对这样繁重的任务作出了大量而又高效的贡献。对编辑方的 Peter Gregory 博士和 Deborah Hollis 博士、生产方的 Hans-Jochen Schmitt 经济学工程师表示我们的特别谢意。我们亦感谢 VCH 出版社的经理们对我们的信任和坚定的支持。

R. W. 卡恩 (Cambridge)

P. 哈森 (Göttingen)

E. J. 克雷默 (Ithaca)

我们的朋友和主编 P. 哈森教授,在今年五月份生病,并于 10 月 18 日在哥丁根 (Göttingen) 逝世,时年 66 岁。直到临终的最后一段时间,由于意志的驱使和对科学的热爱,他一直从事与我们合作的事业和参与有关的编辑工作。他的逝世对他的深为他热爱的家庭,他的同事们,他的教会,以及对全世界与他有密切联系的、从事金属物理和物理冶金方面研究的同行们是巨大的损失。

哈森博士为哥丁根大学的金属物理教授逾 30 年,直到近来退休,他的名字传遍了大西洋两岸。在他的祖国,他智慧的箴言,在公众界和学生间将会留下巨大的影响。他是《金属材料杂志》(Zeitschrift für Metallkunde) 的编辑,曾是哥丁根艺术与科学院 (Göttingen Academy of Arts and Sciences) 主席,Deutsche Gesellschaft für Metallkunde 理事会的中心人物,欧洲科学院院士,美国工程院院士。

1986 年,他首先倡议而最终导致出版《材料科学与技术》丛书前 18 卷,他亲自编著的关于相变方面的第 5 卷《材料的相变》于 1991 年出版,并获赞誉。我们感谢他对这一伟大事业的贡献,并以成功地完成这一事业作为对他的纪念。

R. W. 卡恩 (Cambridge)

E. J. 克雷默 (Ithaca)

1993 年 10 月

前 言

纤维增强复合材料的科学与工艺基础是建立在设计的概念上的,这是与常用结构材料的显著不同之处。纤维增强复合材料的微结构主要与其制造过程决定,而复合材料的性能则紧紧依赖于其微结构。某一种复合材料的性能决定其在外场(即热、力、电场等)作用下的反应。换言之,在各种外场下复合材料的行爲决定其特性与耐久性。本卷的目的是叙述现有的聚合物基、金属基与陶瓷基复合材料,特别着重于加工成型、微结构与性能的内在此关系。

本卷共 13 章,由三部分组成。第一部分叙述纤维、晶须等增强体以及聚合物、金属、陶瓷基复合材料,并论及这三大类材料用颗粒、晶须、短纤维及连续纤维等各种增强体时的加工成型、结构与性能等内容。第二部分介绍复合材料中的界面。一些作者处理这个问题时,实际上把界面定义为一个三维界面相区域,该相的化学与物理结构及形貌均不同于纤维与基体的本体相。第三部分论述建立复合材料的模型及其性能的特征,包括弹性与非弹性行为、强度、破坏与疲劳。必须指出,成型-结构-性能的关系是以集成的形式贯穿于本卷。一些作者致力于分析与建立模型时指出,对复合材料共性所作的努力是使基础研究的结果定量化,以便使从事复合材料实际工作的工程师和最终用户得益。

A. Kelly 在第 1 章中介绍了纤维复合材料的潜在市场。首先讨论了材料的选择、经济性和环境意识,特别是复合材料的再生问题。然后述及一些以前在复合材料、塑料以及陶瓷所不常见的几种新的成型方法。在富有挑战性的纤维几何结构的标题下,他试图提出在各种不同截面上纤维束的三维布置使其结构既轻又有最大可能的密度,能够实现这种结构的方法是编织和辫结工艺,以及在针对二维织物中处理纤维的取向和截面形状所用的方法。在考虑复合材料的性能方面,论述的内容仅涉及纤维的力学性质,以及在脆性层板中裂纹的控制和在多轴应力下的破坏。

在第 2 章中,A. Parvizi-Majidi 讨论了用于聚合物与耐高温基体中的增强体的当前发展情况。本章涉及玻璃(包括氮化物玻璃)、硼、碳以及高性能有机纤维和陶瓷纤维,其中包括氧化铝及以氧化铝为基的纤维、碳化硅及以碳化硅为基的纤维和氮化硅为基的纤维,还有各种类型的晶须等内容。虽然本章主要重点放在已经商品化增强体的描述,但也尽量涉及一些尚未达到商业规模但具有明显发展前景的品种。

第 3—5 章重点论述三种按基体系统分类的主要复合材料品种,包括应用

于宇航工业的连续纤维增强聚合物基复合材料的一些重要情况，如碳纤维增强热固性及热塑性聚合物基复合材料的常用成型方法。然后论及质量保证的方法和获取力学性能可靠性的测试方法。最后涉及有关聚合物基复合材料损伤容限的内容。

在第4章中，K. K. Chawla 提供有关金属基复合材料的情况。首先介绍三种以增强体形式，即颗粒、短纤维或晶须和连续纤维或片材来分类的常用金属基复合材料。然后述及各种金属基复合材料的制造成型方法和不同基体与增强体结合面形成的界面层结构特征。最后论及金属基复合材料的性能与应用情况。

在第5章中，G. Fantozzi 与 C. Olagnon 提供了有关陶瓷基复合材料的科学与技术的综合性论述。本章包括三个主要部分。第一部分叙述了由于颗粒、晶须、纤维等形式的增强体在陶瓷基体中所产生的主要增韧机制，并给出这些机制的理论分析。第二部分是针对纤维增强陶瓷基复合材料，首先介绍成型技术以及讨论它对最后形成的复合材料性能的影响，并列举一些玻璃基及高熔点陶瓷基复合材料的例子。第三部分涉及颗粒、晶须、片材增强的陶瓷基复合材料，并在描述一些重要的复合材料体系的结构与性能后也提供了其有关的成型技术。在本章的结尾处简要的讨论了两个有兴趣的问题，即具有超细微结构的纳米复合材料和由复杂结构形成的复合材料。

在第6章中，K. Kim 和 Y. W. Mei 讨论了复合材料界面。本章从粘接机理的理论处理和界面上传递力的力学开始，总结一系列评价界面质量的理论和实验方法，并指出其适用性和局限性。然后介绍为改进粘接质量所采取的各种对纤维表面进行处理的技术，同时还评价在加工成型过程中纤维-基体间的相容性和稳定性。最后对细观损伤机理作一综述，并涉及纤维增强复合材料断裂韧性的有关理论，指出对断裂韧性的了解可用来为发展以控制界面来增韧的新方法奠定基础，同时也提到有关残余应力的产生与控制的问题。

M. G. Bader 与 A. R. Hill 在第7章中的讨论涉及到范围很广的短纤维增强复合材料，其中包括用相关热塑性和热固性聚合物基体，指出短纤维增强复合材料可分为六种主要形式，即热塑性模塑料、可加热变形的片状料、热固性粒状模塑料、热固性片状模塑料、热固性块状模塑料和增强的反应注射成型料。然后他们评述了不连续纤维增强体的特点，进而讨论在考虑组成因素的基础上来控制复合材料的性能与品质，最后对短纤维增强复合材料制造方法加以综合性的评述，并特别着重于流变学和热学上的考虑。

H. Ishida 与 P. Bussi 在第8章中针对性地叙述半晶态热塑性聚合物基复合材料。他们考查了表面诱导结晶的现象，同时认为当纤维表面形核密度很高使之只有在与纤维垂直方向上产生球晶时才会发生此种现象。本章首先回顾

了影响横晶出现的各种参数,以及研究横晶的实验方法,讨论了横晶出现对力学性能的影响。最后在异相形核理论以及诱导时间的基础上对其进行理论性探讨。

在第9章中,由 R. F. Eduljee 与 R. L. McCulough 介绍了复合材料弹性性能等内容。他们首先对各向异性弹性与取向转换的主要基础进行简要地综述,然后评述应用于建立连续纤维复合材料体系的结构——性能关系模型的各种途径,重点放在以能量为基础的束缚方法上。其次又叙述了颗粒增强复合材料的微观力学模型。本章的最后部分是在以上材料的基础上进一步来处理非连续纤维增强复合材料的弹性行为。从预计值与测定值的对比中突出显示了取向分布、长径比分布和非连续纤维体系中的分布或聚集织态的重要性。

金属与热塑性聚合物基复合材料经常在其应力-应变行为中出现显著的非线性。C. T. Sun 在第10章中对其进行了讨论。本章首先介绍了正交各向异性非线性应力-应变关系可以用含有一个单一正交参数的正交各向异性塑性模型很好地描述。假定沿纤维方向的塑性可以忽略,则此模型可以简化。于是可将此单一参数的塑性模型应用于 ASA(碳纤)/PEEK 热塑性聚合物基复合材料和 B/Al 金属基复合材料上。可以认为,这种模型是适合描述塑性和粘滞塑性行为的。对于 ASA/PEEK 复合材料,此正交各向异性参数和有效应力-有效应变关系的方次指数在低于玻璃化温度的情况下可以看作常数。本章的最后部分描述了对称性层板的过应力粘塑模型和正交各向异性弹塑性行为。

R. Y. Kim 在第11章中对单向层板和多向层板的极限强度作了综合性的叙述。讨论是针对连续纤维增强聚合物基复合材料进行的。对单向层板的论述是基于微观力学理论来预测纵向、横向、剪切强度,同时也考虑到纤维-基体间的界面作用。其次是介绍多向层板中发生第一层破坏以及极限破坏,然后对于各种不同的材料和层叠形式的强度分析结果与实验值进行对比。由此进一步讨论了与强度行为密切有关的两个问题,即自由边缘应力效应和在缺口周围的应力集中问题。最后叙述了单向和多向层板强度的测定方法,并着重介绍在可行性设计和可靠性分析工作中对纤维增强复合材料破坏测试数据的统计处理。

第12章由 L. A. Carlsson 编写。本章的目的在于综述在复合材料的线弹性破坏机理研究的一些重要发展。由于线弹性和自身相似裂纹的限制,所以进行的分析与实验仅限于沿纤维方向的裂纹扩展。例如基体开裂和界面脱粘,而不考虑裂纹垂直于纤维的情况。此外,对破坏的应用力学和材料科学问题均作了明确的叙述。本章的第一部分是对断裂力学基础概念作了综述,包括应力集中因子、应变的能量释放率、混合模式破坏以及在两相材料界面上和粘接结构的裂纹等。第二部分则致力于介绍一些目前应用于复合材料断裂测试的试样,

如双悬臂梁、末端开缺口的样条和具有内分层缺陷的复合材料试样。后一部分是介绍复合材料在模式 I、模式 II 和混合模式破坏时断裂韧性的数据。最后讨论改善复合材料抗破坏性的措施。

本卷最后一章根据作者 R. Talreja 的思路,并非想对本章内容作一个详细的概论,而倾向于叙述一些经选择后的结果,为此其内容仅涉及复合材料疲劳过程的主要特征。由于纤维的几何因子是疲劳过程的主要影响因素,所以本章按纤维的形式排列来进行叙述。前面一部分是讨论短纤维而后面一部分则是分别从单向层板及其它各式层板,包括交角铺设、正交铺设的层板及一般层板,以及编织型复合材料等方面论述连续纤维增强复合材料。此外,还讨论了用绘制疲劳寿命图作为对疲劳破坏影响机制的解释方法,并给出不同的事例来阐明应用结果。总之,本章主要是针对聚合物基复合材料的。

本卷的完成归功于各位作者勇于承担、努力工作和坚韧的毅力以及 Edward J. Kramer 教授的悉心指导和提示。此外,本卷不可缺少的支持是 VCH 出版社,特别是 Delaware 大学复合材料中心的 Christina Dyllick 博士和 Peter-Gregory 博士,以及 Carolgn Basalla 女士的贡献。作者在此表示衷心的感谢。

邹祖诤

Newark, DE, 1993 年 7 月

目 录

1	纤维增强复合材料	(1)
2	纤维和晶须	(22)
3	聚合物基复合材料	(75)
4	金属基复合材料	(104)
5	陶瓷基复合材料	(155)
6	复合材料界面	(204)
7	短纤维增强复合材料	(247)
8	高聚物基复合材料的形貌控制	(285)
9	复合材料的弹性性能	(320)
10	复合材料的非弹性性能	(402)
11	纤维增强复合材料强度	(422)
12	纤维复合材料的断裂	(456)
13	纤维复合材料的疲劳	(505)
	索引	(527)

1 纤维增强复合材料

Anthony Kelly

University of Surrey, Guildford, Surrey, U. K.

(吴人洁 译)

目 录

1.1 复合材料原材料的选择	3
1.2 经济背景	5
1.3 环境问题	7
1.3.1 再生	7
1.4 纤维的力学性能极限	8
1.5 脆性层板的裂纹控制	9
1.6 新的成型方法	11
1.6.1 重建加工方法	12
1.6.2 反应加工方法	12
1.6.3 原位加工方法	13
1.6.4 金属基复合材料与喷射方法	14
1.7 纤维的几何学	15
1.8 多轴应力下的破坏	16
1.9 参考文献	21

符号与缩语表

b	90°层片的厚度
E	弹性模量
F, G, H	常数
L, M, N	常数
V	体积分数
γ	断裂功
ϵ	横向片层的破坏应力
θ	角度
ν	泊松比
σ	剪应力
τ	(摩擦)剪应力

BMC	块状模塑料
CFRP	碳纤维增强塑料
CTE	热膨胀系数
gdp	地区生产总值
GNP	国民生产总值
grp	玻璃纤维增强塑料
PPTA	聚对苯二甲酰对苯二胺
SMC	片状模塑料
LCP	液晶聚合物

1.1 复合材料原材料的选择²⁾

复合材料是把各种原材料组合在一起以达到指定的性能。这种组合可能是同一类材料,例如两种金属或者用不同类的材料,如玻璃与塑料。常见的复合材料品种如图 1-1 所示。

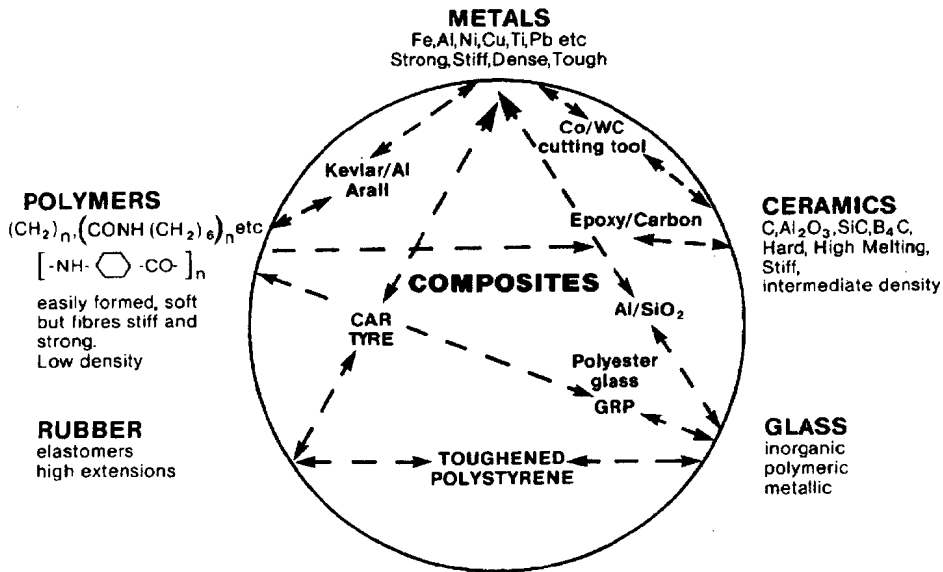


图 1-1 两种或两种以上材料所组成的复合材料

对于工程应用,复合材料的优越性可以归结成三个要点。首先是复合材料可以实现性能的独特组合,例如钨丝刚度很好(405GPa),但是密度大($19.3\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$)。然而用碳纤维与环氧树脂复合起来可以达到相近的刚度(306GPa),但其密度仅为 $1.5\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。碳纤维本身刚度则比钨高得多,可以达到 1000GPa,而密度仅为 $2.6\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

除了具有独特的性能组合外,复合材料另一优点是其性能可以在一定的范围内连续地变化。如果仅仅能应用少数单质材料,则在这些材料中每个材料的某给定性能的变化可以用数值表示出来。图 1-2 示出 SiC_p/Al 复合材料的热膨胀系数随其组分体积分数的改变而变化的情况。可以看出,其很容易达到与其它各种单质材料数据相匹配的结果。类似的非数值化性能也很重要,例如声波装置以及许多其它的匹配,如人体置换器材的匹配。

第三个重要的优点是复合材料有时可以对某一物理性能上出现其原材料本身所不具备的数值。图 1-3 示出各种材料的导热系数。显而易见,可以示出复合材料能达到比其组分或其它材料有更低的导热系数。这可以看成是一个颇为特殊的例子,由于复合材料的组成中尚有含有空气或真空作为其组分之一。然而它指示出一个普遍而重要的信息,就是当对固体材料进行模拟想象时,记住经常出现的空化、空洞将是一个重要的组成部分。

1) 为原著页码,仅供参考,下同。——译者注

2) ARALL 为芳纶/环氧复合材料与铝板构成的超混杂复合材料。——译者注

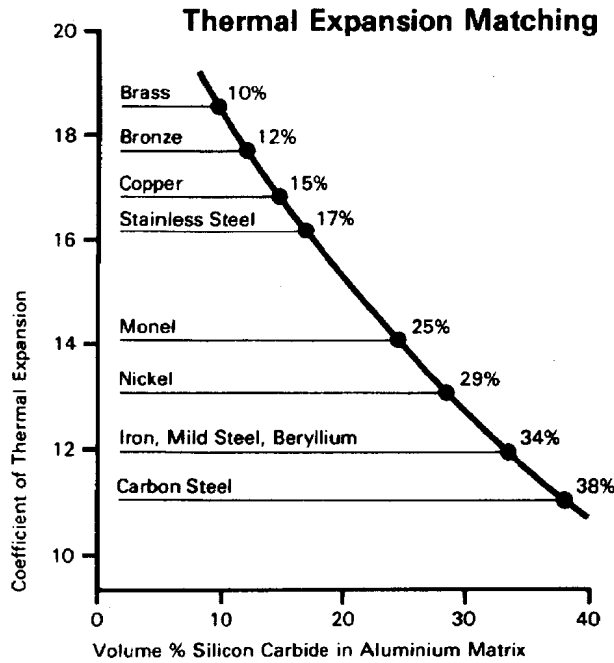


图 1-2 碳化硅颗粒增强铝不同体积分数时热膨胀系数的变化

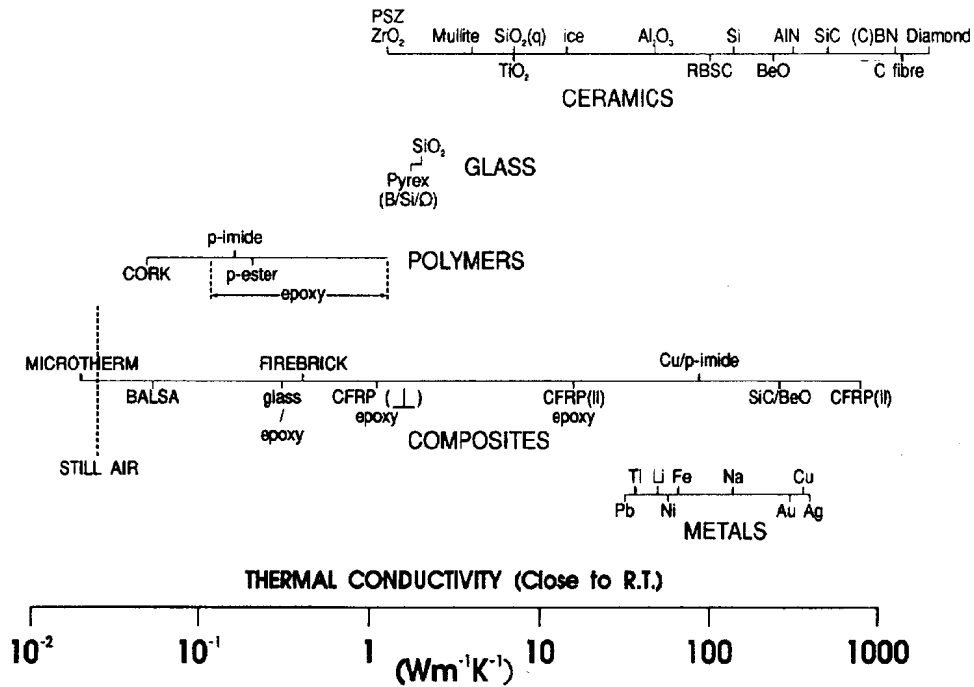


图 1-3 室温下各种材料的导热系数

复合材料的第二和第三个优点从改变热机械性能的观点上来看可能符合新用途的设计。然而复合材料真正在工艺上的重要性是，纤维增强复合材料具有超过其它材料的公认