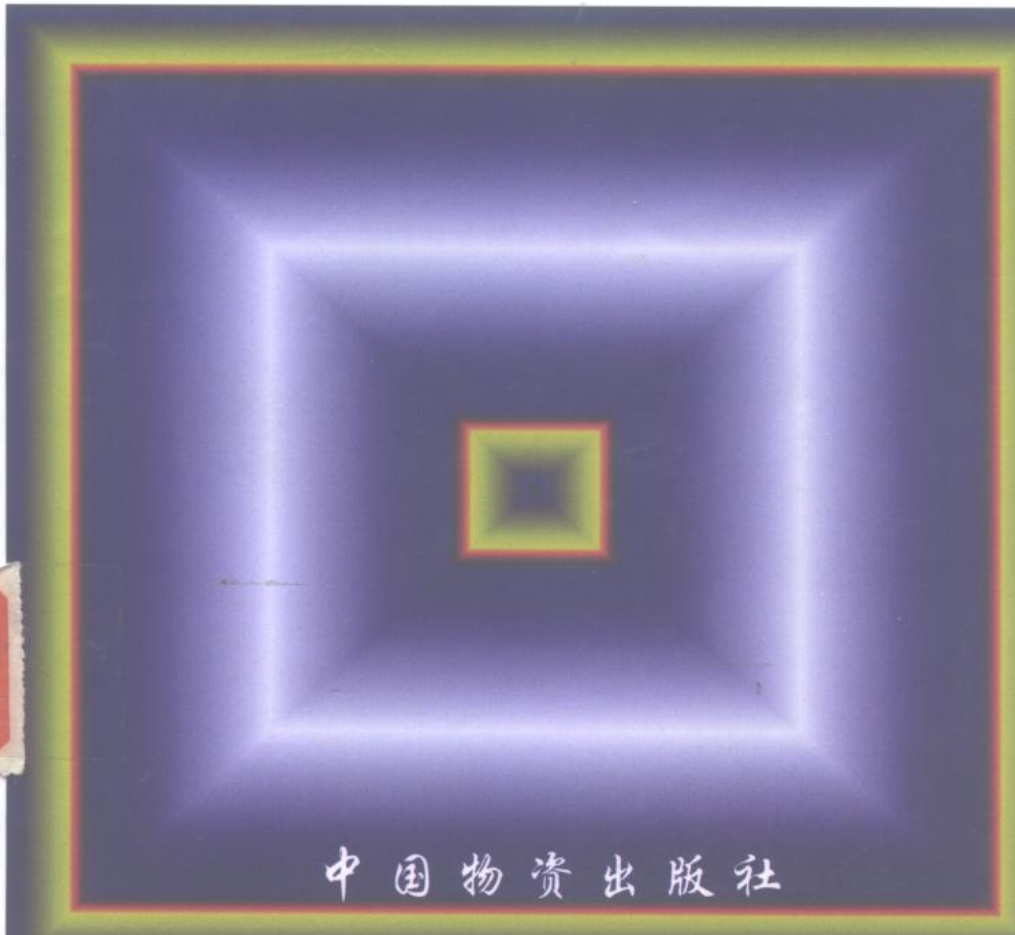


现代复合材料

编著：陈华辉 邓海金 李 明 林小松



中国物资出版社

现代复合材料

陈华辉 邓海金 编著
李 明 林小松

中国物资出版社

图书在版编目(CIP)数据

现代复合材料/陈华辉等编著. -北京:中国物资出版社,1997.12

ISBN 7-5047-0813-5

I. 现… II. 陈… III. 复合材料 IV. TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 11080 号

中国物资出版社出版发行

新华书店经销

北京市白河印刷厂印刷

开本:850×1168mm 1/32 印张:15.625 字数:406千字

1998年8月第1版 1998年8月第1次印刷

书号:ISBN 7-5047-0813-5/O·0025

印数:0001—3000册

定价:30.00元

前 言

现代科学技术的迅猛发展对材料提出了越来越高的要求。实践表明，单质材料使用范围受到越来越多的限制。由于复合材料具有强度高、刚度大、重量轻等单质材料无法比拟的优点，因而大力研制、开发和应用各类复合材料是当今正在发生的新技术革命的重要范围。复合材料是将多种各具特点的材料组元经过某种方法设计加工制成一个复合整体，形成了一种比各材料组元更为优异的新型材料。

20 世纪 40 年代玻璃钢的问世，开创了现代复合材料的新纪元。但早期的复合材料主要为玻璃纤维增强树脂基复合材料，其性能相对较低；由于生产量大，使用范围广，而被称为常用复合材料。半个多世纪以来，随着人类社会物质文明日新月异的地步，出现了大量先进复合材料。60 年代研制出碳纤维增强高性能树脂基复合材料和碳/碳复合材料；70 年代开发出金属基复合材料；80 年代开始发展陶瓷基复合材料。当前各种复合材料已应用于许多行业，从高科技的尖端产品到日常用品，如航空航天飞机的关键零部件、飞机机翼、机场支撑架、车厢和轿车外壳、自行车架、安全帽、羽毛球拍、微波器皿等，开始广泛地取代传统的钢铁材料。目前，复合材料正向多元混杂复合、功能复合、微观复合以及智能复合材料的方向发展，常规设计正向仿生设计和电子计算机辅助设计发展。科学家们预言，21 世纪将是复合材料的时代。

随着科技的发展，复合材料将愈来愈广泛地用于社会生活的各个领域。在人类社会即将迈入下一世纪的当今，掌握和了解现代复合材料的基本知识十分重要。然而令人遗憾的是，目前在国内尚未见到全国系统介绍不同基体复合材料的书籍，尤其是有关

陶瓷基复合材料和碳/碳复合材料的论著。鉴于上述情况，本书作者集多年教学经验和科研资料，编著了《现代复合材料》。本书论述了各种不同基体复合材料强韧化机理、制造工艺和性能出发，列出了若干应用实例。本书既可供有关领域的科技人员参考，也可作为大学研究生和大学生的教学参考书。书中引用的国内外公开发表的有关书籍和文献资料列于每章的参考文献中，以便读者查阅。为使读者检查自己学习掌握现代复合材料知识的程度，本书中附有思考题及参考答案。

本书由中国矿业大学北京研究生部陈华辉博士任主编。全书共九章，第一、二、三、六、九章由陈华辉博士编著，第五、七章由清华大学邓海金副教授编著，第四章和第八章分别由清华大学李明博士和湘潭工学院林小松博士编著。

由于作者水平有限，谬误之处恳请读者斧正。

本书作者
1998.2

目 录

第一章 复合材料概述	(1)
第一节 综述	(1)
第二节 复合材料的定义和分类	(4)
一、复合材料的定义	(4)
二、复合材料的分类	(6)
第三节 复合材料的性能	(9)
第四节 复合材料的用途	(11)
一、在机械工业的应用	(11)
二、在汽车工业及交通运输的应用	(11)
三、在化学工业的应用	(12)
四、在航空宇航领域的应用	(12)
五、在建筑领域的应用	(13)
六、在其它领域的应用	(16)
参考文献	(20)
 第二章 增强材料	(22)
第一节 纤维	(22)
一、有机纤维	(24)
二、无机纤维	(30)
三、其它纤维	(45)
四、各种纤维的比较	(46)
第二节 晶须	(48)
第三节 颗粒	(50)

第四节 增强材料的表面处理	(52)
一、玻璃纤维的表面处理	(52)
二、碳纤维的表面处理	(54)
三、其它纤维的表面处理	(56)
参考文献	(58)
 第三章 复合理论	(60)
第一节 复合原则	(60)
一、材料组元的选择	(60)
二、制备方法的选择	(62)
第二节 复合材料的界面设计原则	(63)
一、聚合物基复合材料界面设计	(64)
二、金属基、陶瓷基复合材料界面设计	(65)
第三节 复合材料界面理论	(66)
一、浸润性	(66)
二、界面粘结	(67)
第四节 界面粘结强度的测定	(71)
一、宏观试验法	(72)
二、单纤维试验法	(74)
三、微压入试验法	(75)
第五节 混合定律	(78)
一、连续纤维单向增强复合材料 (单向层板)	(79)
二、短纤维增强复合材料	(81)
参考文献	(88)
 第四章 聚合物基复合材料 (PMC)	(89)
第一节 概述	(89)
一、PMC 的发展历史	(89)
二、PMC 的分类	(91)

三、层合复合材料的表示法·····	(92)
四、PMC 性能特点 ·····	(94)
第二节 聚合物基体·····	(96)
一、概述·····	(96)
二、热固性基体·····	(100)
三、热塑性基体·····	(106)
第三节 PMC 界面 ·····	(109)
一、PMC 界面表征 ·····	(110)
二、PMC 界面特点 ·····	(112)
三、PMC 界面设计 ·····	(113)
第四节 PMC 制备工艺 ·····	(116)
一、预浸料及预混料制造工艺·····	(117)
二、手糊成型·····	(124)
三、袋压成型·····	(125)
四、缠绕成型·····	(127)
五、拉挤成型·····	(129)
六、模压成型·····	(129)
七、纤维增强热塑性塑料 (FRTP) 成型技术 ·····	(131)
八、其它成型方法·····	(133)
第五节 FRP 的力学性能 ·····	(134)
一、静态力学性能·····	(134)
二、疲劳性能·····	(141)
三、冲击和韧性·····	(142)
第六节 PMC 的应用 ·····	(146)
一、在航天和火箭上的应用·····	(147)
二、在航空领域的应用·····	(147)
三、在交通运输领域的应用·····	(148)
四、在石油化工领域的应用·····	(150)
五、在文体用品领域的应用·····	(150)

六、在电气领域的应用	(150)
七、在建材领域的应用	(150)
参考文献	(151)
第五章 金属基复合材料 (MMC)	(153)
第一节 概述	(154)
一、MMC 的沿革与发展	(154)
二、MMC 的分类	(156)
第二节 金属基体	(160)
一、铝及铝合金	(161)
二、钛及钛合金	(164)
三、镁及镁合金	(167)
第三节 MMC 制备工艺	(170)
一、固态法	(171)
二、液态法	(178)
三、喷涂与喷射沉积	(186)
四、原位复合	(190)
第四节 MMC 界面	(198)
一、MMC 界面类型与界面结合	(198)
二、MMC 界面稳定性	(202)
三、MMC 界面浸润与界面反应控制	(207)
第五节 MMC 的性能	(213)
一、MMC 性能特点	(213)
二、纤维增强金属基复合材料的性能	(219)
三、颗粒、晶须增强金属基复合材料的性能	(232)
参考文献	(248)
第六章 陶瓷基复合材料 (CMC)	(251)
第一节 概述	(251)

第二节 陶瓷基体	(254)
一、氧化铝陶瓷	(254)
二、氮化硅陶瓷	(255)
三、碳化硅陶瓷	(256)
四、玻璃陶瓷	(258)
第三节 CMC 制备工艺	(258)
一、粉末冶金法	(258)
二、浆体法	(259)
三、反应烧结法	(261)
四、液态浸渍法	(262)
五、直接氧化法	(264)
六、溶胶-凝胶法	(267)
七、化学气相浸渍法	(270)
八、其它方法	(273)
第四节 CMC 界面	(274)
一、界面的粘结形式	(274)
二、界面的作用	(274)
三、界面性能的改善	(275)
第五节 CMC 的性能	(277)
一、室温力学性能	(277)
二、高温力学性能	(287)
第六节 增韧机理	(298)
一、颗粒增韧	(299)
二、纤维、晶须增韧	(305)
第七节 CMC 的应用	(313)
一、在切削工具方面的应用	(313)
二、在航空航天领域的应用	(313)
参考文献	(316)

第七章 碳/碳复合材料/ (C/C)	(318)
第一节 碳/碳复合材料及其性能、应用	(318)
一、碳/碳复合材料发展简况	(318)
二、碳/碳复合材料的性能	(320)
三、碳/碳复合材料的应用	(324)
第二节 碳/碳复合材料的制备工艺	(332)
一、碳/碳复合材料的预成型体和基体碳	(332)
二、碳/碳复合材料 CVD 工艺	(338)
三、液态浸渍-碳化工艺	(344)
第三节 碳/碳复合材料的界面和显微组织	(350)
一、碳/碳复合材料的界面及结构	(351)
二、碳/碳复合材料的显微组织	(354)
三、碳/碳复合材料的裂纹和孔隙	(363)
第四节 碳/碳复合材料的氧化保护	(366)
一、碳/碳复合材料的氧化	(367)
二、碳/碳复合材料氧化保护原理	(369)
三、碳/碳复合材料的抗氧化保护	(376)
参考文献	(383)

第八章 混凝土基复合材料	(385)
第一节 概述	(385)
一、钢纤维混凝土韧性的研究	(386)
二、钢纤维混凝土基本性能的研究	(386)
三、中、高含量超高强钢纤维混凝土的研究	(386)
四、钢纤维混凝土结构构件的结构试验研究	(390)
五、钢纤维混凝土增强、增韧机理的研究	(391)
六、钢纤维部分或局部增强混凝土结构构件的研究	(391)
七、钢纤维混凝土的应用研究	(392)
第二节 混凝土基纤维复合材料的组成材料	(393)

一、纤维·····	(393)
二、混凝土基体·····	(395)
第三节 混凝土基纤维复合材料的制备工艺·····	(402)
一、混凝土基纤维复合材料的配合比·····	(402)
二、投料顺序与施工工艺·····	(403)
第四节 混凝土基纤维复合材料的基本性能·····	(407)
一、钢纤维混凝土的抗压性能·····	(407)
二、钢纤维混凝土的抗拉性能·····	(411)
三、钢纤维混凝土的弯曲性能·····	(412)
四、钢纤维混凝土的剪切性能·····	(415)
五、钢纤维混凝土的韧性·····	(417)
第五节 纤维-基体界面性能 ·····	(422)
一、界面结构与性能·····	(422)
二、改善界面性能的途径·····	(423)
三、粘结强度的测定·····	(427)
第六节 混凝土基复合材料的研究和应用·····	(429)
一、工程应用实例·····	(429)
二、我国钢纤维混凝土研究和应用中需 进一步解决的问题·····	(433)
三、玻璃纤维、聚丙烯纤维和碳纤维水泥基 复合材料的研究和应用·····	(435)
参考文献 ·····	(441)
 第九章 复合材料的新近研究和展望 ·····	(446)
第一节 增强材料·····	(446)
一、高性能纤维·····	(446)
二、微化纤维·····	(448)
三、超级纤维·····	(448)
四、增强方式·····	(449)

第二节 复合材料的基体与界面.....	(450)
一、复合材料基体.....	(450)
二、复合材料界面.....	(452)
第三节 复合材料设计.....	(453)
第四节 复合材料成型方法.....	(456)
参考文献.....	(459)
思考题.....	(461)
思考题参考答案.....	(481)

第一章 复合材料概述

第一节 综 述

材料、能源、信息是现代科学技术的三大支柱。随着材料科学的发展,各种性能优良的新材料不断地出现,并广泛地应用到各个领域。然而,科学技术的进步对材料的性能也提出了更高的要求,如减轻重量、提高强度、降低成本等。这可以通过在原有传统材料上进行改进,如对金属材料可通过塑性变形、固溶强化、弥散强化等提高其强度,也可以通过加入比金属更强的材料设计制备一种完全新型的材料,即复合材料。

复合材料是应现代科学技术发展涌现出的具有极大生命力的材料,它由两种或两种以上性质不同的材料,通过各种工艺手段组合而成。复合材料的各个组成材料在性能上起协同作用,得到单一材料无法比拟的优越的综合性能,它已成为当代一种新型的工程材料。复合材料具有刚度大、强度高、重量轻的优点,而且可根据使用条件的要求进行设计和制造,以满足各种特殊用途,从而极大地提高工程结构的效能。

1987年英国学者 M. Ashby 对不同时期各类材料的相对重要性进行了估计,见图 1-1,从图中我们可对材料的发展史有所了解。在一万年以前的旧石器时代,人类对石头进行加工制造成器皿和工具。大约在公元前 5000 年,人类发明用粘土成型再火烧固化制成陶器,与此同时,在烧制陶器的过程中又还原出金属铜和锡,创造了炼铜技术,生产出各种青铜器物,从而进入青铜时代。5000 年前人类开始使用铁,随着炼铁技术的发展,人类发明了用

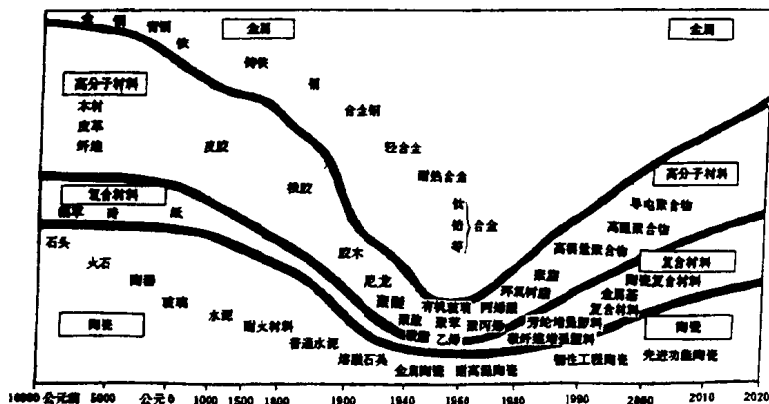


图 1-1 不同年代，四种材料（金属、陶瓷、聚合物和复合材料）

在机械和市政工程中的相对重要性（注意年代坐标是非线性的）

生铁炼成钢的技术，1856 年和 1864 年先后发明了转炉和平炉炼钢，使世界钢产量从 1850 年的 6 万吨突增到 1900 年的 2800 万吨，大大促进了机械制造、铁路交通的发展。随着合金钢、特殊钢的相继出现以及 20 世纪中叶优质合金、Cu、Ti、Zr 合金的大量应用，人类跨入了钢铁时代，钢铁在机械及市政工程中起着举足轻重的作用。20 世纪人工合成高分子材料的问世，尤其是三四十年代，尼龙等高分子材料的问世以及现代陶瓷业的崛起，钢铁材料现已开始渐渐失去往日的风采，高分子材料及现代陶瓷，尤其是复合材料高速增长，预示着到 21 世纪，高分子材料、陶瓷材料、复合材料与钢铁材料将有平分秋色之势，而且复合材料是更有发展前途的材料，是今后材料发展的主要方向。随着陶瓷基、金属基复合材料的发展，复合材料的重要性将越来越显著。

复合材料并不是人们发明的一种新材料，在自然界中，有许多天然复合材料，如竹、木、椰壳、骨骼、甲壳、皮肤等。这些天然复合材料在与自然界长期抗争和演化的过程中形成了优化的复合组成与结构形式。以竹为例，它是有许多直径不同的管状纤维分散于基体中所形成的材料，纤维的直径与排列密度由表皮到内

层是不同的，表皮纤维的直径小而排列紧密，以利于增加它的抗弯能力，但内层的纤维粗而排列疏可以改善它的韧性，所以这种复合结构很合理，达到了最优的强韧组合。

人类在 6000 年前就知道用稻草与泥巴混合垒墙，这是早期人工制备的复合材料，这种用泥土掺麦秸、稻草制土坯砌墙盖房的方法目前在有些贫穷的农村仍然沿用着，但这种复合材料毕竟是古老的和原始的，是传统的复合材料。现在我国建筑行业已发展到用钢丝或钢筋强化混凝土复合材料盖高楼大厦，用玻璃纤维增强水泥制造外墙体。新开发的聚合物混凝土材料克服了水泥混凝土所存在的脆性大、易开裂及耐蚀性差的缺点。碳纤维增强水泥，不仅提高强度，而且可改善水泥导电性，由此开发出具有压力敏感或温度敏感的本征智能材料，适用于混凝土大坝等工程的无损自诊断检测。建筑材料中通过加入一些特殊材料，还可使建筑材料具有导电传光的功能。5000 年以前，中东地区曾用芦苇增强沥青造船。1942 年玻璃纤维增强树脂基复合材料的出现（俗称玻璃钢），使造船业前进了一大步，现在造船业采用玻璃钢制造船体，尤其赛艇等变速艇等，不仅减轻了船艇的质量，而且可防止海生物等的吸附。

越王剑是古老金属基复合材料的代表，它是金属包层复合材料制品，不仅光亮锋利，且韧性和耐蚀性优异，埋藏在潮湿环境中几千年，出土时依然寒光夺目，锋利无比。70 年代末期发展的用高强度、高模量纤维与轻金属复合材料制成的金属基复合材料以及碳碳复合材料则有高比强度、高比模量、耐热、耐蚀等特点，已广泛用于航空航天等尖端技术领域。80 年代开始逐渐发展的陶瓷基复合材料，采用纤维增韧补强大大改善了陶瓷基体的脆性。可见随着科学技术的发展，现代的复合材料已被赋予了新的内容和使命，成为当代极为重要的工程材料。

自 40 年代美国诞生了玻璃纤维增强塑料（俗称玻璃钢）以来，近 50 年来，随着新型增强材料的不断出现和技术的不断进步，聚

合物基、金属基、陶瓷基、混凝土基复合材料和碳碳复合材料正以前所未有的速度向前发展。可以预料, 21 世纪我们面临的将是复合材料迅猛发展和更广泛应用的时代。

第二节 复合材料的定义和分类

一、复合材料的定义

什么是复合材料? 要给复合材料下一个严格精确而又统一的定义是很困难的。概括前人的观点, 有关复合材料的定义或偏重于考虑复合后材料的性能, 诸如:

复合材料是由两种或更多的组分材料结合在一起, 复合后的整体性能应超过组分材料, 保留了所期望的性能(高强度、刚度、轻的重量), 抑制了所不期望的特性(低延性)。

复合材料是多功能的材料系统, 它们可提供任何单一材料所无法获得的特性; 它们是由两种或多种成分不同, 性质不同, 有时形状也不同的相容性材料, 以物理形式结合而成的。

或偏重于考虑复合材料的结构, 诸如:

复合材料是两种或多种材料在宏观尺度上组合而成的一种有用的材料。

复合材料就是两种或两种以上的不同化学性质或不同组织相的物质, 以微观或宏观的形式组合而成的材料。

复合材料是不同于合金的一种材料, 在这种材料里每一种组分都保留着它们独立的特性, 构成复合材料时仅取它们的优点而避开其缺点, 以获得一种改善了的材料。

F. L. Matthews 和 R. D. Rawlings 认为复合材料是两个或两个以上组元或相组成的混合物, 并应满足下面三个条件:

- (1) 组元含量大于 5%;
- (2) 复合材料的性能显著不同于各组元的性能;
- (3) 通过各种方法混合而成。