



最新新型工程材料生产 新技术应用与新产品开发研制 及行业技术标准实用大全

复合材料

卷

学苑音像出版社

最新新型工程材料生产新技术 应用与新产品开发研制及 行业技术标准实用大全

TB3-51/2999 V.5

复合材料卷

主编：付利军

北京学苑音像出版社

最新新型工程材料生产新技术 应用与新产品开发研制及 行业技术标准实用大全

付利军 主编

出版:学苑音像出版社

开本:787×1092 1/16

发行:全国新华书店

字数:5500 千字

版次:2004 年 11 月第一版

印张:248

印次:2004 年 11 月第一次印刷

印数:1-500 册

ISBN 7-88050-205-X

光盘定价:2580.00 元(1CD+手册十卷)

编委会

主 编：付利军

编 委：蔡汉彬

蒙晓敏

黄 龙

陈 伟

马晓强

陈 征

吕景婷

王建平

许志华

李 彬

胡建立

黄旭恒

周汉珍

赵 刚

李永前

袁晓敏

杨 威

肖 军

苏 茂

李 辉

卢建伟

王 洋

潘伯津

黄宇翔

前 言

工程材料是工业生产的物质基础，是衡量一个国家经济实力与技术水平的重要标志。它与信息、能源并列为现代文明的三大支柱，是当今人类社会赖以生存和发展的重要条件。因此对工程材料的认识水平、掌握和运用能力，对于一个现代化国家的科学技术和经济实力、综合国力以及社会文明的进步都将产生至关重要的影响。

工程材料品种繁多，性能各异，尤其是改革开放以来，新材料，新产品更是层出不穷。目前崖的产业革命和发展对特殊性能的材料、功能材料提出了更多的需求，导致一系列新材料的出现。如高强材料的应用和加工速度的提高导致一系列陶瓷、氮化物、氧化物等新型刀具材料的出现；发动机温度的提高，高效率绝热发动机的设计，导致一系列新型高温合金和高温陶瓷及有序金属间化合物等高温材料的出现；汽车轻量化和节能的要求导致高强度、高成形性的材料双相钢、IF 钢、增磷钢等新型钢板的发展；飞行速度的提高以及减轻飞行物重量所带来的巨额效益，导致高比强度的新材料，如铝锂合金、工程塑料、复合材料等新材料的发展；高性能电机（尤其是汽车电机）的要求，导致了高磁化能的钕铁硼材料和非晶态材料的出现；知能化高效率加工线和高精度的加工要求，导致耐磨材料和表面处理工艺的发展（如激光、离子注入等）；通信、计算机产业的发展导致新型通信材料——光导纤维、敏感材料及大规模集成线路专用材料的发展；生物工程、生物医学、仿生设计的发展导致一系列功能材料的发展。这些新材料的发展不仅满足了国民经济有关产业的需要，而且新材料的开发生产本身又形成了巨大的产业，为国民经济创造重要价值，可见工程材料在国民经济中占有多么重要的地位。

工程材料是机械工业的重要物质基础。据对机械工业材料消耗的总量分析，其中 60% 左右是冶金部门提供的钢材，另有 5% 左右是由原材料部门提供的有色金属材料和高分子原材料等，其他还有 35% 左右属于机械工业专用材料。包括大

型铸锻件、铸钢件、铸铁件、电工材料、仪表材料、粉末冶金、工程塑料、复合材料、胶接密封材料、绝缘材料、润滑油品、包装材料和磨料等。如此众多的材料通过各类加工，将转化为数以万计的机械产品，这就必须根据零部件不同的服役条件，合理选用材料，进行加工、改性、处理、性能评定、质量监控，从而构成了成套的材料应用技术，它是机械工业中重要的共性基础技术之一。

七门课程成套教科书。材料工程基础是继材料科学导论、材料科学基础之后开的课程，在学生已掌握材料发展、分类和材料科学的基本知识基础上，主要讲授材料制备科学与技术方面的内容，即讨论成为最终适用的材料和制品的全过程的科学与技术问题。随着新材料的发展和对传统材料要求的提高，材料制备工程的成材技术显得更加重要，往往已发现的高性能材料，如1986年出现的高温超导材料，由于成材技术困难至今难于实现强电应用。现代陶瓷有着强度高、密度小、资源丰富等优越特性，有可能取代传统的金属结构材料，但若没有合理的制备工艺和技术来提高韧性，降低成本，也不会有竞争力。

随着科学技术及经济的发展，我国有关工程材料的标准亦在不断更新和完善。对于与工程材料有关的各行业人员，及时地了解和掌握现行标准规定的内容是十分重要的。然而由于涉及工程材料的标准文件很多，其量很大，一般读者不可能具备就近查阅全部标准文件的条件。本丛书在广泛的材料品种范围内，精心选编了标准中有关各种材料的牌号、化学成分和主要性能指标的资料，并编入了有关工程材料的基本知识，使读者在总容量不太大的一本手册中，即可方便地查阅和掌握工程材料的最重要标准数据。在需要时，读者可根据手册中所提供的某一标准号，进一步查阅该标准的全文，以获得有关该材料的全部资料。

限于时间和水平，书中不足之处敬请各界朋友指正。

丛书编委会

2004年11月

目 录

第一章 复合材料的本质	(1)
第一节 复合材料概述	(1)
第二节 传统材料及其局限性	(2)
第三节 增强纤维	(3)
一、玻璃纤维	(5)
二、碳纤维	(6)
三、碳化硅纤维	(6)
四、氧化铝和氧化铝/硅化合物纤维	(6)
五、有机纤维	(7)
六、增强材料的形式	(8)
第四节 传统基体材料	(9)
一、基体的作用	(9)
二、金属材料	(10)
三、聚合物材料	(10)
四、玻璃、陶瓷和水泥材料	(12)
五、碳材料	(13)
第二章 复合材料的增强材料	(14)
第一节 玻璃纤维及其制品	(14)
一、概述	(14)
二、玻璃纤维的分类	(15)
三、玻璃纤维的结构及化学组成	(16)
四、玻璃纤维的物理性能	(16)
五、玻璃纤维的化学性能	(22)
六、玻璃纤维织物的品种及性能	(25)

七、玻璃纤维及其制品的制造工艺	(26)
八、特种玻璃纤维	(28)
第二节 碳纤维	(30)
一、概述	(30)
二、碳纤维的分类	(31)
三、碳纤维的制造	(32)
四、碳纤维的结构与性能	(33)
第三节 芳纶纤维(有机纤维)	(35)
一、芳纶纤维的性能特点	(35)
二、芳纶纤维的结构	(37)
三、用途	(38)
第四节 其他纤维	(39)
一、碳化硅纤维	(39)
二、硼纤维	(40)
三、晶须	(41)
四、氧化铝纤维	(42)
第三章 复合材料的基体材料	(43)
第一节 金属材料	(43)
一、选择基体的原则	(44)
二、结构复合材料的基体	(46)
三、功能用金属基复合材料的基体	(49)
第二节 无机胶凝材料	(50)
一、概述	(50)
二、水泥基体材料	(50)
三、氯氧镁水泥	(52)
第三节 陶瓷材料	(53)
一、玻璃	(54)
二、玻璃陶瓷	(54)
三、氧化物陶瓷	(54)
四、非氧化物陶瓷	(54)
第四节 聚合物材料	(55)
一、聚合物基体的种类、组分和作用	(55)
二、聚合物的结构与性能	(57)
三、热固性树脂	(59)

四、热塑性树脂.....	(67)
第四章 粉末原料的性能及制备方法	(71)
第一节 金属钨的性能及其粉末的制备.....	(71)
一、钨的性质.....	(72)
二、钨粉的制备.....	(73)
第二节 金属钼的性能及其粉末的制备.....	(75)
一、钼的性质.....	(75)
二、钼粉的制备.....	(77)
第三节 金属钽和铌的性能及其粉末的制备.....	(78)
一、钽和铌的性质.....	(78)
二、钠热还原法生产钽粉和铌粉.....	(80)
第四节 金属钛的性能及其粉末的制备.....	(81)
一、钛的性质.....	(81)
二、钛的生产方法简介.....	(83)
第五节 金属锆的性能及其粉末的制备.....	(84)
一、锆的主要性能.....	(84)
二、锆粉的生产.....	(85)
第六节 金属铜的性能及其粉末的制备.....	(86)
一、铜的性能.....	(86)
二、铜粉的生产.....	(87)
第七节 金属铁、镍、钴的性能及其粉末的制备.....	(87)
一、铁、镍、钴的性能.....	(87)
二、铁、钴、镍粉末的制备.....	(88)
第八节 金属铬的性能及其粉末的制备.....	(90)
一、铬的性能.....	(90)
二、铬粉的生产.....	(90)
第五章 复合材料液态挤压	(91)
第一节 管、棒、型材液态挤压.....	(91)
一、管材液态挤压.....	(91)
二、型材的液态挤压.....	(97)
三、线、棒材的液态挤压.....	(98)
第二节 液态挤压成形规律.....	(99)
一、挤压过程的金属流动.....	(99)
二、液态挤压的压力曲线	(102)

三、液态挤压的压下速度	(104)
四、液态挤压制件缺陷分析	(105)
五、影响制件质量的主要因素	(108)
第三节 液态挤压强韧化	(109)
一、锌基合金液态挤压强韧化	(109)
二、ZL108 铝合金的液态挤压强韧化	(120)
第六章 纤维增强复合材料的强度	(126)
第一节 拉伸强度	(126)
一、单向连续纤维增强复合材料	(126)
二、脆性纤维的强度问题	(128)
三、单向复合材料中的累积损伤和失效	(132)
四、单向复合材料拉伸强度的计算	(134)
五、横向强度	(136)
六、复合材料强度的方向性	(139)
七、多层复合材料层合板的强度	(141)
八、短纤维复合材料	(144)
九、混杂复合材料	(149)
第二节 压缩强度	(151)
一、冲击后压缩强度	(156)
第三节 剪切强度	(158)
一、界面剪切强度	(161)
第四节 弯曲强度	(166)
第五节 复杂应力条件下的失效准则	(167)
第六节 陶瓷基复合材料的强度	(169)
第七章 复合材料可靠性评价	(172)
第一节 复合材料可靠性问题	(172)
一、可靠度描述	(172)
二、复合材料可靠性控制的复杂性	(174)
三、复合材料可靠性存在的问题	(174)
第二节 从组分材料入手提高复合材料可靠性	(176)
一、复合材料性能的分散性	(176)
二、纤维拉伸强度的分散性	(177)
三、基体对复合材料性能稳定性的影响	(178)
第三节 从控制工艺质量入手提高复合材料可靠性	(179)

一、影响复合材料性能的工艺因素及形成的缺陷	(179)
二、固化工艺实时监控	(180)
三、RTM工艺对复合材料质量可靠性的影响	(181)
第四节 环境条件下的可靠性评价	(184)
一、湿热条件对复合材料性能的影响	(184)
二、腐蚀性介质对复合材料性能的影响	(186)
三、冲击载荷对复合材料可靠性的影响	(187)
第五节 复合材料的无损检测方法	(188)
一、通用超声波检测法	(188)
二、超声技术的新方法	(189)
三、其他检测方法	(190)
第六节 复合材料质量评价与监控	(191)
一、原材料质量控制	(191)
二、制备过程的质量控制	(192)
三、复合料质量的评价	(193)
第八章 金属基复合材料	(196)
第一节 金属基复合材料的种类和基本性能	(196)
一、金属基复合材料的种类	(196)
二、金属基复合材料中增强体的性质	(198)
三、金属基复合材料的强度	(200)
四、复合材料组分的相容性	(202)
第二节 铝基复合材料	(204)
一、铝基复合材料的特点	(204)
二、硼铝复合材料	(205)
三、铝基复合材料的制造	(207)
四、铝基复合材料的二次加工	(209)
五、机械性能	(211)
第三节 镍基复合材料	(216)
一、蓝宝石晶须和蓝宝石杆	(217)
二、镍-蓝宝石反应的性质和影响	(218)
三、镍基复合材料的制造和性能	(220)
第四节 钛基复合材料	(220)
一、相容性问题	(221)
二、钛基复合材料的研制	(222)

三、钛基复合材料的发展前景	(224)
第九章 碳/碳复合材料	(225)
第一节 概 述	(225)
第二节 C/C复合材料的制造工艺	(227)
一、碳纤维的选择	(227)
二、胶黏剂的选择	(227)
三、坯体的预成型	(228)
第三节 致密化	(230)
一、化学气相沉积 (CVD) 法	(230)
二、化学气相浸渗法 (Chemical Vapor Impregnation, CVI)	(232)
三、液相浸渍法	(234)
第四节 C/C复合材料的抗氧化处理	(237)
一、内部抗氧化技术	(237)
二、C/C复合材料的抗氧化涂层技术	(238)
第五节 C/C复合材料的应用	(240)
一、C/C复合材料在刹车盘上的应用	(240)
二、C/C复合材料在耐烧蚀材料领域中的应用	(240)
三、C/C复合材料在航空发动机上的应用	(241)
四、C/C复合材料在工业制造领域的应用	(241)
五、C/C复合材料在生物医学领域的应用	(241)
第十章 水泥基复合材料	(242)
第一节 水泥基复合材料的种类及基本性能	(242)
一、水泥	(242)
二、水泥基复合材料的种类及基本性能	(248)
第二节 水泥基复合材料的成型工艺	(254)
一、混凝土的配合比设计及成型工艺的控制	(254)
二、钢筋混凝土的成型工艺	(260)
三、纤维增强水泥的成型工艺	(261)
四、聚合物改性水泥混凝土的成型工艺	(264)
第三节 水泥基复合材料的应用	(271)
一、混凝土的应用	(271)
二、纤维增强混凝土 (FRC) 的应用	(273)
三、聚合物改性水泥混凝土的应用	(275)
第十一章 仿生复合材料	(283)

第一节 材料仿生探索的提出	(283)
第二节 通过仿生分析探索生物材料的优良特性	(284)
第三节 复合材料的仿生设计、制备和处理	(286)
一、当前材料仿生研究的一些新动向	(286)
二、复合材料的仿生设计	(287)
三、复合材料仿生制备的新途径探索	(294)
四、材料改性和恢复的非平衡仿生处理可能性	(300)
第四节 改性生物材料的实用化尝试	(306)
第五节 材料仿生研究的方法论问题与新途径探索	(307)
一、关于仿生研究的方法论问题	(307)
二、材料仿生研究的新途径探索	(308)
第十二章 功能复合材料	(310)
第一节 功能复合材料的设计原则	(310)
一、功能复合材料设计特点	(310)
二、功能复合材料类别及应用情况	(313)
三、功能复合材料的发展趋势	(315)
第二节 压电复合材料	(315)
一、压电复合材料类型及制备方法	(316)
二、压电复合材料的研究进展	(318)
第三节 导电复合材料	(320)
一、聚合物基导电复合材料	(320)
二、其他类型导电复合材料	(323)
三、超导复合材料	(325)
四、应用及展望	(325)
第四节 磁性复合材料	(326)
一、磁性材料的分类	(326)
二、磁性复合材料种类及性质	(326)
三、磁性复合材料的应用	(328)
第五节 摩擦功能复合材料	(330)
一、摩阻复合材料	(330)
二、减摩复合材料	(331)
第六节 阻尼功能复合材料	(334)
一、复合材料的阻尼性能	(334)
二、阻尼复合材料展望	(337)

第七节 其他功能复合材料	(338)
一、热功能复合材料	(338)
二、光功能复合材料	(340)
三、声功能复合材料	(341)
第八节 机敏复合材料与智能复合材料	(342)
一、机敏复合材料简介	(342)
二、机敏复合材料的研究现状及应用	(344)
三、机敏复合材料的发展方向和前景	(346)
第十三章 复合材料的成形工艺	(348)
第一节 概 述	(348)
一、塑料(树脂)基复合材料	(348)
二、陶瓷基复合材料	(349)
三、金属基复合材料	(350)
第二节 纤维增强塑料的成形	(350)
一、增强塑料用纤维	(350)
二、纤维增强塑料的成形	(351)
第三节 陶瓷基复合材料的制备及成形	(356)
一、增韧陶瓷基复合材料的分类	(356)
二、陶瓷基复合材料的制备及成形方法	(357)
第四节 金属基复合材料的制备及成形	(359)
一、纤维增强金属基复合材料的成形	(359)
二、颗粒增强金属基复合材料的成形工艺	(362)

第一章 复合材料的本质

第一节 复合材料概述

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）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）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。

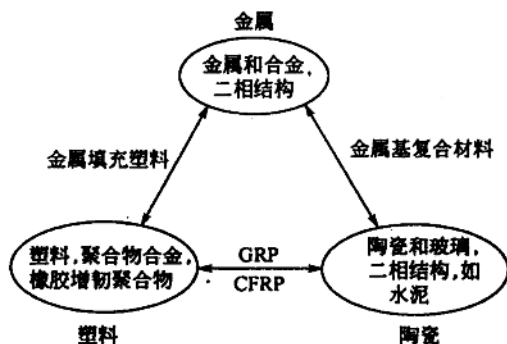


图 1-1 不同工程材料之间的关系

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。

第二节 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。

第三节 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 $10\mu\text{m}$ 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 5GPa ，而玻璃块体的强度小于 100MPa 。新鲜玻璃纤维需要防护，以