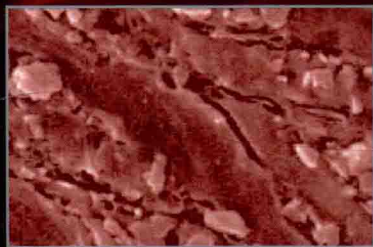
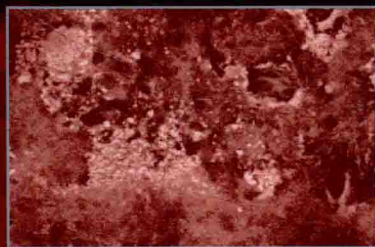
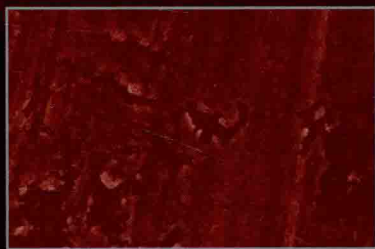


先进复合材料 加工技术与实例

XIANJIN FUHE CAILIAO
JIAGONG JISHU YU SHILI



辛志杰 编著



化学工业出版社

先进复合材料 加工技术与实例

XIANJIN FUHE CAILIAO
JIAGONG JISHU YU SHILI



辛志杰 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

先进复合材料是航空航天、国防工业、交通运输、能源及环保等诸多领域的关键材料，其应用范围不断扩大。本书主要介绍复合材料的分类、先进复合材料的性能、复合材料切削加工的特点，以及复合材料的原材料及其性能结构、复合材料的强韧性与界面行为特征等内容。

全书针对金属基复合材料、陶瓷基复合材料、聚合物基复合材料以及碳/碳复合材料，分别从其制造工艺、性能及应用、切削加工技术等方面进行了详细分析及论述，列举了大量复合材料加工、切削加工技术与实例。此外，本书还对复合材料切削加工所用刀具进行了详细分析，重点介绍了大量复合材料高效加工的孔用刀具、铣削加工刀具、车削加工刀具以及类金刚石涂层刀具等最新技术进展与实例。

本书可供广大从事复合材料生产、制造、加工等方面的工程科技人员参考，也可供广大从事机械工程及相关专业工程技术人员使用，还可供相关专业的在校师生作为教学、科研方面的参考书使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

先进复合材料加工技术与实例/辛志杰编著. —北京:
化学工业出版社, 2015. 6
ISBN 978-7-122-23871-9

I. ①先… II. ①辛… III. ①复合材料-加工
IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 093795 号

责任编辑: 朱 彤
责任校对: 王素芹

文字编辑: 王 琪
装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 高教社 (天津) 印务有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 13 $\frac{1}{4}$ 字数 354 千字 2016 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 59.00 元

版权所有 违者必究

前言

复合材料是新材料领域的重要组成部分，已成为新材料领域的重要主导材料。先进复合材料是航空航天、国防工业、交通运输、能源及环保等诸多领域的关键材料之一，是发展现代工业、国防和科学技术不可缺少的基础材料，也是新技术革命赖以发展的重要物质基础。

与传统材料相比，复合材料具有可设计性强、比强度和比模量高、抗疲劳断裂性能好、结构功能一体化等一系列优越性能，是其他材料难以替代的功能材料和结构材料。然而，复合材料的发展与应用还有许多制约因素，其中切削加工难度大是其主要因素之一。虽然复合材料零部件多数为直接成型工艺制成，然而，许多还离不开切削加工。例如，金属基复合材料在加工过程中，存在切削力大、散热条件差、刀具磨损严重、切削效率低等严重问题，造成该类材料目前的应用范围与其优异性能所具有的应用潜力并不相称，因此，对复合材料切削加工问题进行广泛而深入的研究迫在眉睫。

本书主要介绍复合材料的分类、先进复合材料的性能、复合材料切削加工的特点，以及复合材料的原材料及其性能结构、复合材料的强韧性与界面行为特征等内容。全书针对金属基复合材料、陶瓷基复合材料、聚合物基复合材料以及碳/碳复合材料，分别从其制造工艺、性能及应用、切削加工技术等方面进行了详细分析及论述，列举了大量复合材料加工、切削加工技术与实例。此外，本书还对复合材料切削加工所用刀具进行了详细分析，重点介绍了大量复合材料高效加工的孔用刀具、铣削加工刀具、车削加工刀具以及类金刚石涂层刀具等最新技术进展与实例。

总之，本书针对先进复合材料加工技术进行了详细分析和阐述，涵盖面广，内容丰富、实用。本书可供广大从事复合材料生产、制造、加工等方面的工程科技人员参考，也可供广大从事机械工程及相关专业工程技术人员使用，还可供相关专业的在校师生作为教学、科研方面的参考书使用。

本书第1~5章、第8章由辛志杰编写，第6章由辛志杰和庞俊忠共同编写，第7章由庞俊忠编写。此外，凌杰、张锦、李春光、潘杰、彭星等参加了书稿整理和配图工作，在此一并表示感谢！

由于编者水平和时间有限，疏漏之处在所难免，敬请各位读者批评和指正。

编著者

2015年4月

目 录

第1章 先进复合材料加工技术概述

1

1.1 先进复合材料概述	1
1.2 复合材料的分类	2
1.3 先进复合材料的性能	3
1.4 先进复合材料的研发动态	5
1.5 先进复合材料的应用	6
1.6 先进复合材料的切削加工特点	7
1.7 先进复合材料切削加工技术的研究现状	8
1.7.1 复合材料切削机理的研究	8
1.7.2 复合材料切削刀具材料及结构参数的改进	9
1.7.3 复合材料特种加工技术的研究	10
1.7.4 复合材料表面质量评价技术的研究	11

第2章 复合材料的原材料

12

2.1 纤维	12
2.1.1 陶瓷纤维	12
2.1.2 玻璃纤维	13
2.1.3 高熔点金属纤维	15
2.1.4 碳纤维	16
2.1.5 硼纤维	18
2.1.6 SiC 纤维	19
2.1.7 Al ₂ O ₃ 纤维与铝硅酸盐纤维	20
2.1.8 Si ₃ N ₄ 系纤维	21
2.1.9 ZrO ₂ 系纤维	21
2.1.10 BN 系、AlN 系纤维	23
2.1.11 芳纶纤维	23
2.2 晶须	24
2.2.1 SiC _w 、Si ₃ N _{4w}	24
2.2.2 钛酸钾晶须	25
2.2.3 硼酸铝晶须	26
2.2.4 氧化锌晶须	27
2.2.5 石墨晶须	27
2.3 颗粒	28
2.4 基体	29
2.4.1 聚合物基体	30
2.4.2 金属基体	31

2.4.3 陶瓷基体	31
------------------	----

第3章 复合材料的强韧性与界面行为

40

3.1 复合材料的增强机理	40
3.1.1 颗粒增强原理	40
3.1.2 单向排列连续纤维增强复合材料	41
3.1.3 短纤维增强原理	44
3.2 复合材料的韧性	45
3.2.1 材料断裂机理	45
3.2.2 对断裂能量的贡献	49
3.2.3 准临界裂纹的扩展	52
3.3 复合材料的界面特征与分类	54
3.3.1 界面特征	54
3.3.2 界面分类	55
3.4 复合材料界面的结合机理	55
3.4.1 力学结合	55
3.4.2 残余应力	55
3.5 复合材料的界面强度与界面行为	56
3.5.1 界面强度	56
3.5.2 界面行为	59

第4章 金属基复合材料

62

4.1 金属基复合材料的种类及性能特点	62
4.1.1 颗粒增强金属基复合材料	62
4.1.2 纤维增强金属基复合材料	63
4.1.3 晶须增强金属基复合材料	64
4.2 金属基复合材料的应用	64
4.2.1 应用领域及现状	64
4.2.2 发展方向及趋势	66
4.3 金属基复合材料的切削加工性	67
4.3.1 切削加工机理	68
4.3.2 已加工表面粗糙度	69
4.3.3 已加工表面的硬化	69
4.3.4 已加工表面的残余应力	70
4.3.5 已加工表面形貌	71
4.3.6 刀具材料的选用及其磨损机理	72
4.4 金属基复合材料的车削加工	73
4.4.1 钛基复合材料 (TiC _p + TiB _w)/TC4 的车削	73
4.4.2 铝基复合材料 SiC _p /ZL109 的车削	79
4.4.3 铝基复合材料 Al ₂ O ₃ /Al 的激光加热辅助车削	81
4.5 金属基复合材料的铣削加工	82
4.5.1 颗粒增强铝基复合材料的普通铣削	82

4.5.2	颗粒增强铝基复合材料的高速铣削	85
4.5.3	SiC _p /Al 复合材料的铣磨加工	89
4.6	金属基复合材料的钻削加工	90
4.6.1	ZL109 合金复合材料的钻削	90
4.6.2	SiC _p /Al 复合材料的钻削仿真	93
4.7	金属基复合材料的磨削加工	96
4.7.1	磨削力	96
4.7.2	磨削表面粗糙度	97
4.7.3	磨削加工表面形貌	98
4.8	金属基复合材料的特种加工	101
4.8.1	激光表面处理	101
4.8.2	电火花加工	102
4.8.3	超声振动加工	106

第5章 陶瓷基复合材料

115

5.1	陶瓷基复合材料的种类及性能特点	115
5.2	陶瓷基复合材料的制备	116
5.2.1	陶瓷基复合材料的制备方法	116
5.2.2	陶瓷基复合材料的成型工艺	119
5.3	陶瓷基复合材料的应用	120
5.3.1	应用领域及现状	120
5.3.2	发展方向及趋势	121
5.4	陶瓷基复合材料的切削加工性	123
5.5	陶瓷基复合材料的车削加工	123
5.6	陶瓷基复合材料的铣削加工	126
5.7	陶瓷基复合材料的钻削加工	129
5.8	陶瓷基复合材料的磨削加工	136
5.8.1	纤维增强陶瓷基复合材料磨削机理研究	136
5.8.2	纤维增强陶瓷基复合材料磨削表面形貌与磨屑分析	137
5.8.3	磨削参数对表面粗糙度的影响	140
5.9	陶瓷基复合材料的特种加工	141

第6章 聚合物基复合材料

144

6.1	聚合物基复合材料的种类及性能特点	144
6.2	聚合物基复合材料的制备	145
6.3	聚合物基复合材料的力学性能	148
6.3.1	热固性复合材料	148
6.3.2	热塑性复合材料	149
6.4	聚合物基复合材料的应用	150
6.4.1	聚合物基复合材料在航空航天工业上的应用	151
6.4.2	聚合物基复合材料在其他工业产品上的应用	151
6.5	聚合物基复合材料的切削加工	152

6.5.1	聚合物基复合材料的常规机械加工方法	152
6.5.2	聚合物基复合材料的特种加工方法	153
6.5.3	聚合物基碳纤维复合材料的切削加工	153
6.5.4	聚合物基玻璃纤维复合材料的切削加工	154
6.5.5	聚合物基复合材料的钻削分层对策及钻削优化试验	156
6.5.6	CFRP 复合材料制孔过程仿真与试验分析	160

第7章 碳/碳复合材料

169

7.1	碳/碳复合材料概述	169
7.2	碳/碳复合材料的制造工艺	170
7.2.1	预制件的制造	170
7.2.2	碳/碳的致密化工艺	173
7.2.3	石墨化	175
7.3	碳/碳复合材料的性能及应用	175
7.3.1	碳/碳复合材料的性能	175
7.3.2	碳/碳复合材料的应用	177
7.4	碳/碳复合材料的切削加工	178
7.4.1	碳纤维复合材料的切削加工工艺	178
7.4.2	切削工艺对复合材料表面质量的影响	181
7.4.3	碳/碳复合材料切削加工实例	182
7.4.4	碳/碳复合材料的特种加工技术	185
7.4.5	复合材料表面质量评价	186

第8章 复合材料高效加工刀具技术

187

8.1	复合材料的孔加工刀具	187
8.1.1	碳纤维复合材料的孔加工	187
8.1.2	芳纶纤维、纸蜂窝及其夹层结构复合材料的孔加工	189
8.1.3	山特维克可乐满复合材料孔加工刀具	191
8.1.4	伊斯卡复合材料孔加工刀具	192
8.2	复合材料的铣削加工刀具	193
8.2.1	碳纤维复合材料的铣削加工刀具	193
8.2.2	芳纶纤维、纸蜂窝及其夹层结构复合材料的铣削加工刀具	195
8.3	复合材料的车削加工刀具	197
8.4	加工复合材料的类金刚石涂层刀具	198
8.4.1	类金刚石涂层	198
8.4.2	DLC 涂层刀具加工实例	199
8.4.3	加工碳纤维复合材料用整体硬质合金涂层刀具	199
8.5	复合材料加工刀具面临的挑战	200

参考文献

201



第1章

先进复合材料加工技术概述



1.1 先进复合材料概述

材料、能源和信息技术是当前国际公认的新技术革命的三大支柱，一个国家材料的品种、数量和质量，已成为衡量该国科学技术、国民经济水平和国防力量的重要标志。现代科学的发展和技术的进步，对于材料性能的要求日益提高，希望材料既具有某些特殊性能，又具有良好的综合性能。长期以来，人类不断地研究改进原有材料，研究出许多新的材料，并且积累了丰富的应用经验。但发现所使用的任何一种单一材料尽管有其若干突出的优点，但在一定程度上存在一些明显的缺点，很难满足人类对各种综合指标的要求。因此，采用人工设计和合成的当代新型工程材料应运而生。人类发现将两种或两种以上的单一材料，采用复合的方式可制成新的材料，这些新的材料利用其特有的复合效应，进行优化设计，保留了原有组分材料的优点，克服或弥补了缺点，并且显示出一些新的性能，这就是复合材料。

目前，随着复合材料制作工艺日益成熟，原材料来源丰富、成本下降、可靠性提高，越来越多地取代传统金属材料，我们已经进入了复合材料时代。材料是人类文明发展的里程碑，从天然材料、冶金材料、合成材料到复合材料，可以说材料科学是现代科技进步的基础、支柱和先导。随着现代高新技术的迅猛发展，特别是国内外航空航天领域的发展，材料的使用环境越来越恶劣，对材料的要求也越来越苛刻。新材料技术是为了满足高技术发展需求而开发的高性能新型材料。复合化是新材料的重要发展方向，也是新材料最具生命力的分支之一，复合材料已经发展成为与金属材料、无机非金属材料、高分子材料并列的四大材料体系之一。

20世纪以来，高度成熟的钢铁工业已成为现代工业的重要支柱，在已使用的结构材料中，钢铁材料占一半以上，随着宇航、导弹、原子能等现代科学技术和工业的飞速发展，现有的钢铁和有色合金材料已很难满足需求，这就对材料提出了质量小、功能多、价格低等要求。与此同时，人类已掌握了丰富的知识和生产技能，在新材料的研制方面取得了巨大的成就。

复合材料具有原组成材料所不具备的，并且能满足实际需要的特殊性能和综合性能，同时有很强的可设计性。采用复合的方式在一定程度上是研究新材料的捷径，使材料研究逐步摆脱靠经验和摸索的方法研制材料的轨道，向着按预定性能设计新材料的方向发展。

自然界中存在许多天然的“复合材料”。例如，树木和竹子是纤维素和木质素的复合体；动物骨骼则由无机磷酸盐和蛋白质胶原复合而成。人类很早就接触和使用各种天然的复合材料，并且效仿自然界制作复合材料。例如，世界闻名的传统工艺品漆器就是由麻纤维和土漆复合而成的，至今已有四千多年的历史。纵观复合材料的发展历史，复合材料的发展大致可以分为早期复合材料和现代复合材料两个阶段。早期复合材料，由于性能相对较低、生产量大、使用面广，也称为常用复合材料。现代复合材料是材料发展中合成材料时期的产物。学术界开始使用“复合材料”（composite materials, CM）一词大约是在20世纪40年代，当时出现了

玻璃纤维增强不饱和聚酯树脂，并且在第二次世界大战中被美国空军用于制造飞机构件，开辟了现代复合材料的新纪元。后来随着高技术发展的需要，在此基础上又发展出高性能的先进复合材料。材料科学家们认为，就世界范围而论，1940~1960年玻璃纤维和合成树脂大量商品化生产，玻璃纤维复合材料发展成为具有工程意义的材料，同时相应地开展了与之有关的科研工作，至20世纪60年代，在技术上趋于成熟，在许多领域开始取代金属材料，称为复合材料发展的第一代。20世纪60年代后陆续开发出多种高性能纤维。20世纪80年代后，进入高性能复合材料的发展阶段。1960~1980年是先进复合材料飞速发展的时期，被称为复合材料发展的第二代。1960~1965年英国研制出碳纤维，1971年美国杜邦公司开发出Kevlar49。1980~1990年是纤维增强金属基复合材料的时代，其中以铝基复合材料的应用最为广泛，这一时期是复合材料发展的第三代。1990年以后则被认为是复合材料发展的第四代，主要发展多功能复合材料，如机敏（智能）复合材料和梯度功能材料等。随着新型复合材料的不断涌现，复合材料不仅应用在导弹、火箭、人造卫星等尖端工业中，在航空、汽车、造船、建筑、电子、桥梁、机械、医疗和体育等各个领域也都得到应用。

1.2 复合材料的分类

根据国际标准化组织（ISO）的定义，复合材料是由物理或化学性质不同的有机高分子、金属或无机非金属等两种或两种以上材料经一定的复合工艺制造出来的一种新型材料。从定义出发，决定复合材料性能和质量的主要因素是：原材料组分的性能和质量；原材料组分的比例及复合工艺；复合材料的界面粘接及处理。

复合材料组成之间的复合模式主要分为宏观复合和细观复合两种。宏观复合主要是指两层以上不同材料之间发生的叠合（也称为层合）。从某种意义上讲，这种叠合复合材料实际上是一种复合结构，如铝合金薄板和碳纤维或玻璃纤维复合材料薄片的叠合等，主要按结构形式分类。细观复合是指一种或几种制成细微形状的材料均匀分散于另一种连续材料中，前者称为分散相，后者称为连续相。通常按连续相的性质和按分散相的形状、性质分类，可通过对原材料的选择、各组分分布的设计和工艺条件的设计等，使它既能保留原组成材料的主要特色，又能通过复合效应获得原组分所不具备的性能，原组分材料性能互相补充并彼此关联，因而呈现了出色的综合性能，与一般材料的简单混合有本质的区别。

复合材料在世界各国还没有统一的名称和命名方法，比较共同的趋势是根据增强体和基体的名称来分类。当强调基体时，以基体材料的名称为主，如树脂基复合材料、金属基复合材料、陶瓷基复合材料等；当强调增强体时，以增强体的名称为主，如玻璃纤维增强复合材料、碳纤维增强复合材料、陶瓷颗粒增强复合材料等；也可以基体材料名称与增强体名称并用，这种命名方法常用以表示某一种具体的复合材料，习惯上把增强体的名称放在前面，基体材料的名称放在后面，如玻璃纤维增强环氧树脂复合材料，或简称为玻璃纤维/环氧树脂复合材料，或玻璃纤维/环氧，而我国则常把这类复合材料通称为“玻璃钢”。

国外还常用英文编号来表示，如MMC（metal matrix composite）表示金属基复合材料，FRP（fiber reinforced plastics）表示纤维增强塑料，而玻璃纤维/环氧树脂则可表示为GF/Epoxy，或G/E_p（G-E_p）。

复合材料一般由基体与增强体或功能组元组成，依据金属材料、无机非金属材料 and 有机高分子材料等的不同组合，可构成各种不同的复合材料体系，所以其分类方法也较多。如根据复合过程的性质分类，复合材料可分为自然复合材料、物理复合材料和化学复合材料；按性能高低分类，复合材料可分为常用复合材料和先进复合材料，后者主要由碳纤维、芳纶纤维、陶瓷

纤维和晶须等高性能增强体与耐高温的高聚物、金属、陶瓷和碳（石墨）等构成，通常用于各种高技术领域中，用量少而性能要求高。

(1) 按用途分类 复合材料按用途可分为结构复合材料和功能复合材料。对于结构复合材料，是由能承受载荷的增强体组元与基体组元构成的，主要用于承力和次承力结构，通常增强体承担结构使用中的各种载荷，基体则起到粘接增强体予以赋形并传递应力和增韧的作用。要求它质量小，强度和刚度高，而且能耐受一定温度，在某种情况下还要求有膨胀系数小、绝热性能好或耐介质腐蚀等性能。

功能复合材料目前正处于发展的起步阶段，具备非常优越的发展基础。功能复合材料是指除力学性能以外还提供其他物理性能的复合材料，是由功能体（提供物理性能的基本组成单元）和基体组成的。基体除了起赋形的作用外，在某些情况下还能起到协同和辅助的作用。功能复合材料品种繁多，包括具有电、磁、光、热、声、机械（指阻尼、摩擦）等功能作用的各种材料。目前结构复合材料占绝大多数，但已有不少功能复合材料付之应用，而且有广阔的发展前途。

(2) 按基体类型分类 复合材料所用基体主要是有机聚合物、金属、陶瓷、水泥及碳（石墨），常用复合材料按基体类型分类如图 1.1 所示。

(3) 按增强体形式分类 复合材料通常也可以按增强体形式分类，如颗粒增强型、纤维增强型、晶须增强型、片材增强型和层叠式复合材料，如图 1.2 所示。其中短纤维在复合材料中的排列方式又有随机排列和定向排列之分；按纤维的种类，可分为玻璃纤维增强、碳纤维增强、芳纶纤维增强、氧化铝纤维增强、氧化锆纤维增强、石英纤维增强、钛酸钾纤维增强和金属丝增强等；而按金属丝的种类，又可分为钨丝增强、铜丝增强、不锈钢丝增强等；按增强作用的机制，增强颗粒复合材料可分为弥散增强型和颗粒增强型两类；按层压板增强材料的不同，可分为纸纤维层压板、布纤维层压板、木质纤维层压板、石棉纤维层压板等。

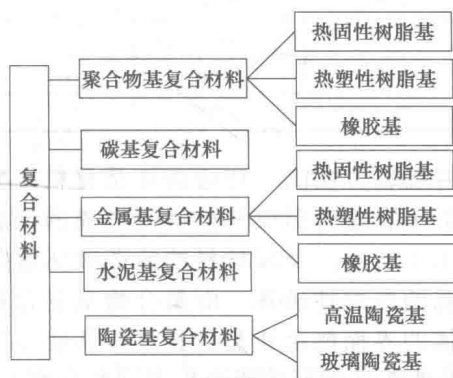


图 1.1 常用复合材料按基体类型分类

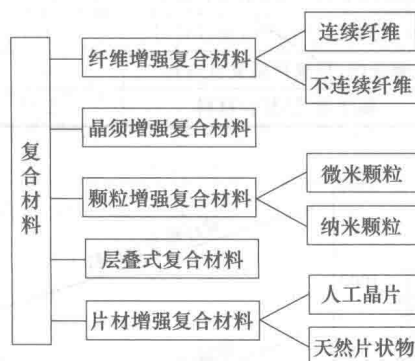


图 1.2 复合材料按增强体形式分类

1.3 先进复合材料的性能

复合材料是由有机高分子、无机非金属或金属等几种不同物理、化学性质的材料，通过复合工艺，以微观、细观或宏观等不同的结构尺度与层次，经过复杂的空间组合而形成的新的材料系统。它与一般材料的简单混合有本质区别，可以通过材料设计使原组分的性能相互补充并彼此关联，从而获得更优越的性能，既保留原组成材料的重要特色，又通过复合效应获得原组分所不具备的性能。

先进复合材料是指用高性能纤维、织物、晶须等增强基体材料所制成的高级材料。通常增

强基体有碳纤维、碳化硅纤维、氧化铝纤维、硼纤维、芳纶纤维、高密度聚乙烯纤维等高性能增强材料；先进复合材料具有高比强度、高比模量和性能可设计等特点，能有效地减小导弹和航天器的结构质量，并且赋予某些特殊功能（如防热、吸波等），是用于飞机、火箭、卫星、飞船等现代航空航天飞行器的理想材料，也是当今航天新材料研究和发展的重点。先进复合材料的使用，不仅极大地提高了现代飞行器的性能，使得人类飞天、登月的梦想变成现实，同时也创造了巨大的经济效益。先进复合材料的性能优越性主要表现为以下几点。

(1) 复合效应 克服单一材料的缺点，具有高强度、高韧性、适中的弹性模量等。复合材料既是一种材料，又是一种结构，其结构可根据需要进行设计，易于实现结构与功能一体化。

(2) 比强度与比模量高 比强度和比模量是用来衡量材料承载能力的性能指标。比强度越高，同一零件的自重越小；比模量越高，零件的刚性越大。复合材料的突出优点是比强度和比模量高，有利于材料的减小质量。表 1.1 为几种金属和复合材料的比强度和比模量值。先进复合材料的力学性能呈现轻质高强的特征，其比强度和比模量都比钢和铝合金高出许多。例如，玻璃纤维增强树脂基复合材料的密度为 2.0 g/cm^3 ，只有普通碳钢的 $1/5 \sim 1/4$ ，约为铝合金的 $2/3$ ，而拉伸强度却超过普通碳钢的拉伸强度，这是现有其他任何材料所不能比拟的。

表 1.1 几种金属和复合材料的比强度和比模量值

材料	密度/ (g/cm^3)	拉伸强度 $/\times 10^3 \text{ MPa}$	弹性模量 $/\times 10^5 \text{ MPa}$	比强度 $/\times 10^7 \text{ cm}$	比模量 $/\times 10^9 \text{ cm}$
钢	7.8	1.03	2.1	0.13	0.27
铝合金	2.8	0.47	0.75	0.17	0.26
钛合金	4.5	0.96	1.14	0.21	0.25
玻璃纤维增强树脂基复合材料	2.0	1.06	0.4	0.53	0.20
碳纤维 I /环氧树脂复合材料	1.6	1.07	2.4	0.67	1.5
碳纤维 II /环氧树脂复合材料	1.45	1.50	1.4	1.03	0.97
有机纤维/环氧树脂复合材料	1.4	1.4	0.8	1.0	0.57
硼纤维/环氧树脂复合材料	2.1	1.38	2.1	0.66	1.0
硼纤维/铝复合材料	2.65	1.0	2.0	0.38	0.57

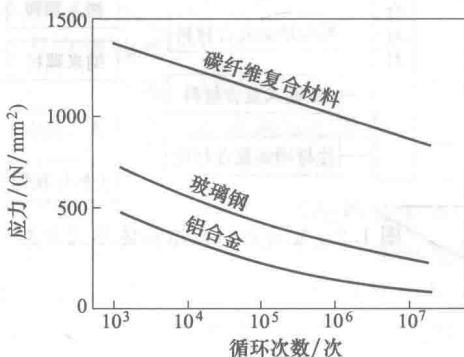


图 1.3 材料的疲劳强度
($1\text{N/mm}^2 = 1\text{MPa}$)

(3) 良好的抗疲劳性能 疲劳破坏是材料在变载荷作用下，由于裂缝的形成和扩展而形成的低应力破坏，如图 1.3 所示。金属材料的疲劳破坏常常是没有任何预兆的突发性破坏。而聚合物基复合材料中纤维与基体的界面能阻止裂纹扩展，其疲劳破坏总是从纤维的薄弱环节开始逐渐扩展到结合面上，因此，破坏前有明显的预兆，不像金属那样来得突然。大多数金属材料的疲劳强度极限是其拉伸强度的 $40\% \sim 50\%$ ，而碳纤维增强聚酯树脂复合材料则达 $70\% \sim 80\%$ 。

(4) 耐腐蚀性能好 很多复合材料都能耐酸、碱腐蚀，如玻璃纤维增强酚醛树脂复合材料，在含氯离子的酸性介质中能长期使用，可用来制造耐硫酸、盐酸的化工管道、泵、容器、搅拌器等设备；而用耐碱玻璃纤维或碳纤维构成的复合材料能在强碱介质中使用，在苛刻环境条件下也不会腐蚀。复合材料耐化学腐蚀的优点使其可以广泛用在沿海或海上的军用、民用工程中。

(5) 减振性能好 受力结构的自振频率除与结构本身形状有关外，还与材料的比模量的平方根成正比。复合材料比模量高，故具有高的自振频率，避免了工作状态下共振而引起的早期

破坏。同时,复合材料界面具有较好的吸振能力,使材料的振动阻尼高,减振性好。根据对相同形状和尺寸的梁进行的试验可知,轻金属合金梁需 9s 才能停止振动,而碳纤维复合材料梁只需 2.5s 就会停止同样大小的振动。

(6) 良好的高温性能 聚合物基复合材料可以制成具有较高比热容、熔融热和气化热的材料,以吸收高温烧蚀时的大量热能。碳化硅纤维、氧化铝纤维与陶瓷复合,在空气中能耐 1200~1400℃ 高温,要比所有超高温合金的耐热性高出 100℃ 以上。同时,增强纤维、晶须、颗粒在高温下又都具有很高的高温强度和模量,并且在复合材料中起着主要承载作用,纤维强度在高温下基本不下降,所以纤维增强金属基复合材料的高温性能可保持到接近金属熔点,并且比金属基体的高温性能高许多。如钨丝增强耐热合金,其 1100℃、100h 高温持久强度仍为 207MPa,而基体合金的高温持久强度只有 48MPa。

(7) 良好的导电和导热性能 金属基复合材料中金属基体占有很高的比例,一般在 60% (体积分数) 以上,因此仍保持金属所具有的良好导热性和导电性,可以使局部的高温热源和集中电荷很快扩散消失,减少构件受热后产生的温度梯度。良好的导电性可以防止飞行器构件产生静电聚集的问题,有利于解决热气流冲击和雷击问题;为解决高集成度电子器件的散热问题,也可以在金属基复合材料中添加高导热性的增强物,进一步提高其热导率。

(8) 耐磨性能好 复合材料具有良好的耐摩擦性能。例如,金属基体中加入了大量高硬度、化学性能稳定的陶瓷纤维、晶须、增强颗粒,不仅提高了基体的强度和刚度,也提高了复合材料的硬度和耐磨性。复合材料的高耐磨性在汽车、机械工业中有很广的应用前景,可用于汽车发动机、刹车盘、活塞等重要零件,能明显提高零件的性能和寿命。

(9) 大面积整体成型 采用共固化/共胶接等手段,可进行大面积整体成型。可以减少零件数目、连接件数目,减小质量,降低装配成本,增加可靠性,易于实现大型结构件的融合体布局,从而降低成本。

需要说明的是,对于不同的复合材料仍存在着许多优异的性能。例如,玻璃纤维增强塑料是一种优良的电气绝缘材料;有些复合材料中有大量增强纤维,当材料过载而有少数纤维断裂时,载荷会迅速重新分配到未破坏的纤维上,使整个构件在短期内不至于失去承载能力,有效地保证了过载时的安全性;作为增强物的碳纤维、碳化硅纤维、晶须、硼纤维等均具有很小的热膨胀系数,又具有很高的模量,尤其是石墨纤维只有负的热膨胀系数,可以保证复合材料的热膨胀系数小,具备良好的尺寸稳定性;而有些功能性复合材料具备特殊的光学、电学、磁学特性。

1.4 先进复合材料的研发动态

(1) 先进树脂基复合材料 先进树脂基复合材料是以高性能树脂为基体,高性能连续纤维等为增强材料,通过一定的复合工艺制备而成,是具有明显优于原组分性能的新型材料。与传统的钢、铝合金结构材料相比,它的密度约为钢的 1/5,铝合金的 1/2,而且比强度与比模量远高于二者。

先进树脂基复合材料常用的增强纤维包括碳纤维和其他高性能有机纤维,目前应用得最多和最重要的是碳纤维,其典型代表是环氧树脂基碳纤维复合材料。经过多年的使用验证,环氧树脂基体具有综合性能优异、工艺性能良好、价格低等诸多优点。为了提高先进树脂基复合材料的使用性能,在环氧(EP)的基础上,研究人员开发出了双马来酰亚胺(BMI)基和耐高温聚酰亚胺(PI)基等复合材料。与此同时,先进树脂基复合材料的成型技术也得到了发展。表 1.2 是一些常用的树脂基复合材料的成型技术特点和应用。

表 1.2 树脂基复合材料的成型技术特点和应用

成型技术	特点和应用
热压罐/真空袋	适于制备各种大尺寸、形状和结构复杂的复合材料构件,如整体厚壁板、加筋壁板、双曲度加筋壁板、骨架和蒙皮的整体结构等
纤维缠绕	适于制造各种复合材料管材、旋转体形状复合材料构件,如火箭发动机壳体、各种压力瓶、雷达罩、小型火箭等
RTM	适于制造各种精度要求高、内外表面光滑、不希望再加工的制件,如高性能机头雷达罩、各种形状的复合材料构件
模压	机械化程度高、生产效率高、制件重现性好。适于制造尺寸精确、表面光洁、无毛边、不希望进行再加工的中小型制件和先进热塑性复合材料
拉挤	连续生产、效率高、制品长度不受限制。适于制备断面复杂、厚度可变但宽度不变或断面形状可变但断面面积不变的制品及各种复合材料型材。产品具有较明显的方向性

(2) 金属基复合材料 航空航天领域所用到的金属基复合材料主要是指以 Al、Mg、Ti 等轻金属为基体,以高强度的第二相为增强体的复合材料。这类材料具有优良的导电性能、导热性能、耐高温性能、横向性能、低消耗和优良的可加工性能。尤其是纤维增强钛基复合材料,是先进航空承力部件的候选材料。凭借密度小、比刚度和比强度高、耐温性好等优点,碳化硅纤维增强的钛基复合材料在压气机叶片、整体叶环、盘、轴、机匣、传动杆等部件上已经得到了广泛应用。

(3) 陶瓷基复合材料 陶瓷基复合材料使陶瓷材料的韧性大大改善,同时其强度、模量有了提高。目前连续纤维增强陶瓷基复合材料是一个主要的发展方向,它具有密度小、比模量高、比强度高、热力学性能和抗热震冲击性能好等一系列优点,而且具有更高的断裂韧性及断裂功、完全的非脆性破坏形式、优异的耐烧蚀性能或者绝热性能,是未来航天科技发展的关键支撑材料之一,如碳纤维增强陶瓷 (C_f/Si_3N_4 、 C_f/SiC 、 C_f/SiO_2 、 C_f/Al_2O_3) 以及陶瓷纤维增强陶瓷 (SiC_f/SiO_2 、 Al_2O_3/SiO_2) 等。

(4) 碳/碳复合材料 碳/碳复合材料是以碳为基体,由碳纤维或其制品(碳毡或碳布)增强的一种复合材料。它兼有碳的惰性和碳纤维的高强度,具有热膨胀系数小、热导率较低、抗热冲击性能好、耐烧蚀性能好和耐含固体微粒燃气的冲刷等一系列的优异性能,而且其质量小,比强度和比弹性模量都很高,更重要的是这种材料在惰性环境下随着温度的升高(可达 $2200^{\circ}C$) 其强度不降低,甚至比室温条件下还高,这些都是其他材料无法比拟的。

制备碳/碳复合材料最关键的技术是坯体致密化,碳/碳复合材料的致密工艺一般采用化学气相渗透(CVI)或者液态树脂沥青浸渍、碳化的方法。碳化的方法有中压碳化和高压碳化,高温处理的方法有充气保护石墨化和真空石墨化。以上的这些方法可以交叉使用和循环使用,从而达到预定的致密化的密度指标。

1.5 先进复合材料的应用

先进复合材料具有优异的耐腐蚀性、高强度与抗冲击性,使其在航空航天、建筑、防腐等领域广泛应用。近年来,复合材料的应用领域更加广阔,在汽车、新能源、桥梁、建筑等市场大显身手。例如,在航空航天领域,由于复合材料热稳定性好,比强度、比刚度高,可用于制造飞机机翼和前机身、卫星天线及其支撑结构、太阳能电池翼和外壳、大型运载火箭壳体、发动机壳体、航天飞机结构件等。在汽车工业,由于复合材料具有特殊的振动阻尼特性,可减振和降低噪声、抗疲劳性能好,损伤后易修理,便于整体成型,故可用于制造汽车车身、受力构件、传动轴、发动机架及其内部构件。

此外,在化工、纺织和机械制造领域,有良好耐腐蚀性的碳纤维与树脂基体复合而成的材料,可用于制造化工设备、纺织机、造纸机、复印机、高速机床、精密仪器等。同时,碳纤维复合材料具有优异的力学性能和不吸收 X 射线特性,可用于制造医用 X 射线机和矫形支架等。碳纤维复合材料还具有生物组织相容性和血液相容性,在生物环境下稳定性好,也用于生物医学材料。复合材料还应用于制造体育运动器材和用于建筑材料等。在高载荷结构如桥梁上使用复合材料,满足了桥梁自身结构更轻巧的需求,从而实现制造和施工更便捷、使用寿命更长,对环境影响也更小。利用复合材料制造的桥梁对环境的影响远低于混凝土桥,仅为钢铁桥梁的 1/3。同时,复合材料因其质量小、刚度好且为环保型产品,将在建筑和基础设施行业有巨大的发展潜力,是风能等更清洁、更可持续发展能源的基础材料。

1.6 先进复合材料的切削加工特点

先进复合材料因具有轻质、高比强度、高比模量等优良特性在许多领域已取代金属材料获得广泛的应用。在过去几十年里,复合材料已大量应用于航天、航空和造船等工业,而且这种趋势仍在继续。这些材料成型后大都需要机械加工来获得所需的尺寸精度,但由于复合材料具有硬度高、强度大、导热性差、各向异性以及离散性等特点,属于难加工材料。

纤维增强树脂基复合材料的加工有一定难度,但难度尚不大,硬颗粒增强金属基复合材料的切削加工难度很大。主要问题是刀具急剧磨损和切出的表面质量差。绝大多数金属材料是均质和各向同性的,而复合材料往往是非均质和各向异性的。因此,复合材料应力与变形之间的关系比传统材料复杂得多,基体与增强体之间的协同效应对复合材料受力后的行为有重大影响。虽然复合材料的基体一般都是普通材料,但是复合材料的增强体通常都是高强度或高硬度的材料。因此,复合材料中的增强体是基体塑性变形的障碍,这使得复合材料的切削变形机制不同于普通金属材料,如何提高刀具的使用寿命和获得优良的切削表面成为加工复合材料的挑战性课题。

迄今,车、铣、刨、钻、铰、磨等多种传统工艺方法和放电、激光、电化学、磨料流等特种工艺方法都已被尝试用于复合材料零件成型加工。由于复合材料基体和增强体性能的差异,使得不论是应用传统工艺方法还是特种工艺方法,所加工的复合材料表面都显著地不同于普通均质材料表面,复合材料的已加工表面包含大量的加工所致的缺陷是其鲜明的特征。

复合材料的已加工表面包含大量的加工所致缺陷,增强体的特性和取向分布、刀具条件是决定复合材料已加工表面形貌的主要因素。对长纤维增强的复合材料,已加工表面上既有突出的纤维,也有失去纤维而留下的凹槽和孔洞,缺陷的类型和分布与加工方向密切相关。对短纤维或晶须增强的复合材料,在机械加工中增强体被拔出或脱落的现象比长纤维增强体时更常见。颗粒增强复合材料的已加工表面存在凹坑、碎颗粒、犁沟、基体涂沫等多种缺陷,增强颗粒粒度大小对复合材料的已加工表面形貌影响非常大。

复合材料表面层在加工中经受了切削高温,已加工表面包含大量加工所致缺陷,故表面硬度甚至低于未加工材料。加工中被切削表面的皮下层材料经历了比较大的塑性变形,而其温度低于表面,加工所致缺陷也少,所以此层材料通常发生显著的加工硬化。此层以下材料加工后硬度变化不大。含有细小增强体的复合材料加工硬化效应更显著。

切削热和基体塑性变形是复合材料加工后宏观残余应力的原因。由于增强体与基体的热膨胀系数、弹性模量相差悬殊,微观上复合材料切削变形区的应力状态很复杂,界面协同效应制约着增强体与基体之间的变形和恢复。加工后复合材料表层究竟残留拉应力还是压应力取决于复合材料的具体结构和实际加工条件两方面。理论上,凡使切削温度升高的因素都增大在已加

工表面残余拉应力的倾向。实践上,加工后复合材料表面常残余压应力,或表面加工缺陷使大部分热应力和弹性恢复应力均被释放。

1.7 先进复合材料切削加工技术的研究现状

复合材料的加工问题是加工金属时从未有过的,因此复合材料后加工工艺的研究已引起了国内外的广泛关注,学者们在复合材料切削机理、刀具材料和结构、特种加工、制孔工艺等领域开展了许多研究工作,取得了一些成果。

1.7.1 复合材料切削机理的研究

20世纪70年代以前,复合材料的加工基本上沿用金属材料的加工工具和切削工艺,后来在复合材料切削加工过程中遇到越来越多的问题,如刀具快速磨损、钻孔分层等。这些问题的出现给复合材料的加工提出了新的课题,70年代后国际上陆续发表了一些有关复合材料加工的论文,早期的复合材料加工技术的研究是塑料加工的延伸。80年代,Miner和Mackey在研究了两相复合材料切削工艺的复杂性后指出,不仅要更新刀具概念,而且也需要改进切削工艺。复合材料切削机理的研究是国内外学者研究的重要方向,在大量研究试验基础上,Koplev第一个提出复合材料切屑形成过程是材料断裂过程的观点,指出切削表面质量与增强纤维的取向有关,这一观点得到了复合材料切削加工领域学者们的支持。在此基础上,学者们将目光投向了切削力、切削热等研究方向上,并且取得了许多有价值的研究成果。

(1) 复合材料切削力的研究 与金属材料加工不同,复合材料中的增强纤维是切削过程中的主要磨损要素,复合材料中的基体在切削过程中主要将切削力传递到纤维上,材料的各向异性经常导致复合材料制品出现纤维拔出、内部脱黏、分层等缺陷,这可能导致复合材料力学性能降低和表面粗糙度变大,因此复合材料切削力的研究成为切削机理研究的热点。

研究初期有些学者试图将金属材料加工过程中切削力的概念引入复合材料加工,但复合材料的切削破坏形式与金属材料完全不同,因此学者们在研究总结的基础上提出了许多新的模型。Hocheng和Puw根据纤维增强复合材料含有两种力学性能和热学性能完全不同的两相材料的特点,在C/PEEK、C/ABS和C/E复合材料磨削试验的基础上提出了预测复合材料切削力的机械学模型,分析了纤维方向对切边、表面粗糙度和切削力的影响,推荐了纤维的磨削方向。C. W. Wern和M. Ramulu等用光弹法研究和分析复合材料切削过程中的应力场分布,他们发现不同切削方向的纤维表面通过剪切和拉伸断裂而破坏,当刀具与工件成一定角度时,纤维通过剪切和弯曲失效而破坏,在纤维与切削方向成 45° 夹角时可以明显观察到纤维与基体之间的黏结破坏,研究表明,纤维方向对切削力和应力场的分布有重要影响。

日本大阪大学的花崎伸作等通过CFRP切削试验得出结论:在碳纤维与切削方向成任何角度情况下,纤维被切断的原因都是由于刀具前进引起的垂直于纤维自身轴线的剪切应力超过剪切强度极限造成的。Koplev等在前人研究的基础上,观察到切削方向平行或垂直于纤维方向的区别,提出用垂直或平行纤维方向的合力来预测切削力大小。

北京航空航天大学的陈鼎昌教授等多年来开展了碳纤维复合材料钻削工艺的研究,针对单向CFRP初步建立了钻削力的理论模型。分析了纤维角 θ 与切削力之间的关系,试验结果验证了纤维方向对切削力的影响。同时提出了出口处分层缺陷的过程模型和检验方法。

以上从不同角度研究了纤维方向与切削力之间的关系,得出了切削过程中纤维的破坏模式,对于研究复合材料的切削机理做出了重要贡献,但是有关切削力对复合材料性能的影响、刀具材料和几何参数与复合材料的切削力之间的关系等尚缺乏深入细致的研究,这些理论基本

上以碳纤维复合材料的切削试验为基础，因此还不能解释所有复合材料的切削机理，尤其是C/C和陶瓷基复合材料。

(2) 复合材料切削热的研究 复合材料切削热一方面来自纤维断裂和基体剪切所消耗的功，另一方面来自切屑对前刀面的摩擦和后刀面与已加工表面的摩擦所消耗的功。鉴于复合材料切屑形成过程是基体破坏和纤维断裂相互交织的复杂过程，加上复合材料的导热性比金属材料差等原因，切削过程中切削热将主要传向刀具和工件，导致刀具的快速磨损，甚至损伤复合材料的性能。复合材料切削热的研究主要集中在切削温度的测量方法上，国外有成功测定孔出口侧一点温度的报道，北京航空航天大学复合材料加工技术研究课题组先后采用热像仪、红外测温仪、人工热电偶等手段测试C/E复合材料钻削过程中的切削热，他们用埋入人工热电偶的方法测量到钻头切削部分靠近中心和最外侧两点的温度，结果表明，C/E复合材料的钻削温度一般不超过150~200℃。就目前的研究情况，在复合材料切削热的研究方面处于切削温度测试方法的探索阶段，还有大量的工作要做。

(3) 切削工艺与复合材料性能之间的关系 切削工艺对复合材料性能的影响是复合材料加工技术研究中最重要内容，国内外在这方面的研究尚处于起步阶段，有许多工作有待进行。Koplev等最早开展这方面的研究工作，他们在研究中发现切削平行于纤维方向时，切削表面有可见的纤维，垂直于纵向的纤维全部破裂。当切削垂直于纤维方向时，在切削表面未发现纤维，相反他们发现整个切削表面有一层薄薄的基体材料，Koplev等还发现了在表层下面有一层材料断裂。此外，当切削垂直于纤维方向时，他们还观察到无断裂的凹槽，相反当切削平行于纤维方向时，凹槽前面有裂纹现象。Inoue和Kawaguchi报告了磨削过程中磨削表面的质量与纤维方向有关。以试验观察结果为基础，Koplev等指出，CFRP的切削方向垂直于纤维方向时，在刀尖附近出现了两种不同的结果，当刀具向前移动时，它对复合材料施加压力，引起复合材料断裂并产生碎裂，同时作用在刀具下的切削力在试样中，产生一个细小的裂纹（约0.01mm深），当切削方向平行于纤维方向时，刀具施加在工件上的力引起复合材料断裂。

上述结果研究了复合材料性能与切削工艺之间的某些关系，但没有深入分析切削工艺对复合材料性能的影响，因此不可能从改进切削工艺的角度来减轻复合材料的损伤，有必要深入开展这方面的研究。

1.7.2 复合材料切削刀具材料及结构参数的改进

聚合物基复合材料（如GFRP、CFRP、KFRP）的耐磨性好、硬度大、导热性差，在切削过程中，纤维作为切削硬质点连续磨耗刀具，因此刀具快速磨损，许多刀具难以完成复合材料构件的切削全过程。切削刀具材料及结构参数的改进成为复合材料切削工艺研究的又一热点。

复合材料的性能取决于不同的纤维和基体的性能、纤维方向、纤维和基体的体积比。刀具连续遭受基体和纤维的磨损，因此切削力变化很大，比如硼纤维增强铝基复合材料，刀具必须经受铝基体和硬的硼纤维的磨损。同样，玻璃/环氧复合材料中，刀具必须承受低温软的环氧基体和脆性的玻璃纤维的磨损。芳纶纤维增强环氧复合材料的硬度大，这需要切削刀具适应这些变化。纤维和基体的性能、纤维方向、材料各向异性、硬的耐磨纤维、高的纤维体积分数等因素使玻璃纤维、石墨纤维和硼纤维增强的复合材料切削加工时刀具快速磨损而切削困难。

对于玻璃纤维增强的复合材料，高速钢（HSS）、碳化物是最常用的刀具材料；芳纶纤维增强的复合材料是一种硬度更大的材料，切削刀具应保持锋利和洁净，应经常清洗以去除粘在刀具上的部分固化的树脂，在切削过程中这些树脂能快速磨损刀具，切削芳纶纤维增强复合材料时对刀具的需求不同于玻璃纤维或碳纤维增强复合材料，一般采用硬质合金刀具或PCD刀具。有些复合材料（如高硅氧纤维增强的复合材料）的切削加工不得使用金刚石刀具，目前