

材料科学与工程学科
研究生教学用书

复合材料教程

Composites Course

贾成厂 郭 宏 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

材料科学与工程学科
研究生教学用书

复合材料教程

Fuhe Cailliao Jiaocheng

Composites Course

贾成厂 郭 宏 编著



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书是材料科学与工程学科研究生教学用书。

本书是关于复合材料的教程,内容包括复合材料的概述、基本理论、原材料、制备方法与工艺、强韧化、界面与表面、热学行为、加工与连接、检测与评价、应用等。本书力求对复合材料作比较全面的介绍,并尽力反映该领域新的研究现状。

本书可以作为高等学校材料科学与工程等专业的本科生和研究生的教科书或教学参考书,也可以供从事复合材料领域工作的科研、生产等工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

复合材料教程 / 贾成厂, 郭宏编著. —北京: 高等教育出版社, 2010.11

ISBN 978-7-04-029847-5

I. ①复… II. ①贾… ②郭… III. ①复合材料-研究生-教材 IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 151239 号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	咨询电话	400-810-0598
邮政编码	100120	网 址	http://www.hep.edu.cn http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landracom.com http://www.landracom.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	畅想教育	http://www.widedu.com
印 刷	北京市朝阳展望印刷厂		
开 本	787×960 1/16	版 次	2010 年 11 月第 1 版
印 张	29.75	印 次	2010 年 11 月第 1 次印刷
字 数	560 000	定 价	55.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 29847-00

材料科学与工程学科研究生教学用书顾问委员会

(以姓氏拼音为序)

胡壮麒	雷廷权	李龙土	柳百新	潘健生
单平	吴林	徐惠彬	徐祖耀	张立同

材料科学与工程学科研究生教学用书专家委员会

主 任	周 玉
副主任	冯吉才 吴春京
委 员	(以姓氏拼音为序)
	陈延峰 耿 林
	韩 民 胡绳荪
	蒋 青 雷明凯
	刘 敏 刘正堂
	孟祥康 唐子龙
	王 敏 熊惟皓
	余志明 张 跃
	张建勋 张政军
	赵建青
秘 书	宋 晓

前 言

复合材料具有优异的性能,近年来得到了迅速的发展,现已成为材料领域的四大支柱(金属材料、无机非金属材料、高分子材料和复合材料)之一。

本书的编著者近 20 年来一直讲授材料科学与工程专业的硕士研究生与本科生的复合材料课程(近 5 年听讲的硕士研究生已超过 1 000 人),并具有多年从事复合材料科学研究工作的经验。为促进材料科学的发展,加强材料科学工作者间的交流,为高等学校相关专业提供教材或参考书,特编写了此书。

复合材料是一门新兴的材料学科,有日趋完善与成熟的理论体系,并不断开发出新的复合材料。本书着重介绍复合材料的基本理论、原材料、制备方法与工艺、强韧化、界面与表面、热学行为、加工与连接、检测与评价、应用等,并结合实例介绍复合材料的发展现状与应用。

本书由北京科技大学贾成厂、北京有色金属研究总院郭宏编著。

在编写过程中得到了北京有色金属研究总院石力开教授的热情指导和帮助,在此表示衷心的感谢。北京科技大学林涛教授与尹海清教授参与了部分工作,并提出了有益的意见与建议,在此表示感谢。编写中参考了国内外一些专著与文献,在此特向作者致谢。本书得到了北京科技大学研究生教育发展基金的资助,在此表示感谢。在定稿的过程中,得到了聂俊辉博士(第 1、2、5、8、9、10 章)、褚克博士(第 6、7 章)、梁雪冰博士(第 3 章)、陈惠博士(第 4 章)的帮助,在此表示感谢。同时,向在本书编写、出版过程中给予帮助和支持的单位和同志表示感谢。

由于编著者水平有限,书中难免有疏漏之处,敬请读者批评指正。

编著者

2010 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 复合材料概述	1
1.1.1 复合材料的定义和分类	1
1.1.2 复合材料的历史	6
1.2 复合材料在社会发展中的作用	8
1.2.1 为信息技术提供服务	9
1.2.2 为提高人类生活质量作贡献	9
1.2.3 在解决资源短缺与能源危机方面的贡献	10
1.2.4 在治理环境中所起的作用	11
1.3 复合材料的特性	13
1.3.1 力学性能	13
1.3.2 物理性能	15
1.4 复合材料发展的新领域	16
1.5 复合材料迅速且稳步发展的前提	19
1.6 我国复合材料的发展现状与前景	20
思考题	21
参考文献	22
第 2 章 复合材料基本理论	24
2.1 力学性能的复合法则	24
2.1.1 增强原理	24
2.1.2 基于弹性论的复合法则	39
2.1.3 应力解析	44
2.2 物理性能的复合法则	45
2.2.1 加和特性	45
2.2.2 乘积特性	50
2.2.3 结构敏感特性	53
2.3 复合材料力学解析模型简介	54
2.3.1 层板模型	54
2.3.2 切变延滞模型	58
2.3.3 连续同轴柱体模型	62
2.3.4 有限差分与有限元模型	64

思考题	69
参考文献	69
第3章 复合材料的原材料	71
3.1 纤维	71
3.1.1 陶瓷纤维	71
3.1.2 玻璃纤维	73
3.1.3 高熔点金属纤维	76
3.1.4 碳纤维	77
3.1.5 硼纤维	81
3.1.6 SiC 纤维	82
3.1.7 Al_2O_3 纤维与铝硅酸盐纤维	83
3.1.8 氧化锆 (ZrO_2) 系纤维	85
3.1.9 Si_3N_4 系纤维	87
3.1.10 BN 系、AlN 系纤维	87
3.1.11 芳纶纤维	88
3.1.12 作为复合材料强化体的陶瓷纤维	89
3.2 晶须	91
3.2.1 SiC_w 、 Si_3N_{4w}	91
3.2.2 钛酸钾晶须	92
3.2.3 硼酸铝晶须	95
3.2.4 氧化锌晶须	96
3.2.5 石墨晶须	97
3.3 强化材料的强度	98
3.3.1 热稳定性	98
3.3.2 压缩强度	99
3.3.3 纤维断裂与柔软性	100
3.3.4 纤维强度的统计处理	102
3.4 基体	103
3.4.1 聚合物基体	105
3.4.2 金属基体	106
3.4.3 陶瓷基体	107
思考题	120
参考文献	121
第4章 复合材料的制备方法与工艺	123
4.1 复合材料制备方法概述	123
4.2 树脂基复合材料	124
4.2.1 概述	124

4.2.2 液态状树脂的含浸	129
4.2.3 预浸料坯成形	131
4.2.4 复合树脂成形	132
4.2.5 热塑性塑料的注射成形	133
4.2.6 热塑性树脂的加热成形	133
4.3 金属基复合材料的制备方法	134
4.3.1 金属基复合材料主要的液相工艺	135
4.3.2 金属基复合材料主要的固相工艺	147
4.3.3 金属基复合材料主要的气相工艺	151
4.4 陶瓷基复合材料的制备方法	152
4.4.1 陶瓷基复合材料主要的固相工艺	153
4.4.2 陶瓷基复合材料主要的液相工艺	165
4.4.3 陶瓷基复合材料主要的气相工艺	168
思考题	171
参考文献	172
第5章 复合材料的强韧化	174
5.1 复合材料的强度	174
5.1.1 长纤维复合材料的断裂模式	174
5.1.2 受到非轴向载荷的单层板的断裂	191
5.1.3 叠层板的强度	195
5.1.4 受到内压的圆管的破损	200
5.2 复合材料的韧性	204
5.2.1 材料断裂机理	204
5.2.2 对断裂能量的贡献	210
5.2.3 准临界裂纹的扩展	216
5.3 陶瓷基复合材料的韧化	222
5.3.1 韧化的分类与特征	222
5.3.2 相变及微裂纹韧化	224
5.3.3 裂纹偏转	233
5.3.4 裂纹弯曲	238
思考题	241
参考文献	242
第6章 复合材料的界面与表面	244
6.1 复合材料的界面特征与分类	244
6.1.1 界面特征	244
6.1.2 界面分类	244
6.2 复合材料界面的结合机理	245

6.2.1 吸附与润湿	245
6.2.2 内部扩散与化学反应	246
6.2.3 静电吸引	247
6.2.4 力学结合	247
6.2.5 残余应力	247
6.3 复合材料的界面反应	249
6.3.1 研究界面反应的重要性	249
6.3.2 界面相容性	249
6.3.3 界面反应的种类	249
6.4 复合材料的界面强度	251
6.4.1 界面粘结强度的重要性	251
6.4.2 界面强度的试验测定	251
6.5 复合材料的界面行为	257
6.5.1 界面的脱粘与剥离	257
6.5.2 界面的滑移	259
6.5.3 界面特性与裂纹扩展	260
6.6 复合材料界面的控制	262
6.6.1 改变强化材料表面的性质	263
6.6.2 向基体添加特定的元素	264
6.6.3 强化材料的表面涂层	265
6.7 复合材料的表面强化	271
6.7.1 化学气相沉积	271
6.7.2 离子镀	274
6.7.3 熔射	274
6.7.4 离子注入	274
6.7.5 其他方法	275
思考题	275
参考文献	276
第7章 复合材料的热学行为	277
7.1 复合材料的热膨胀与热应力	277
7.1.1 热应力与应变	277
7.1.2 热膨胀	279
7.1.3 定向强化材料的热膨胀	282
7.1.4 叠层板的热循环	285
7.2 复合材料的蠕变	288
7.2.1 基体与纤维的行为	288
7.2.2 长纤维复合材料的轴应力蠕变	289

7.2.3 横向蠕变与连续强化复合材料	290
7.3 复合材料的热传导性	293
7.3.1 热传导的机理	293
7.3.2 复合材料的热传导性	295
7.3.3 界面的热阻	297
7.4 复合材料的热应力	300
7.4.1 耐热材料	300
7.4.2 由均匀的温度差所引起的热应力	301
7.5 复合材料的热冲击	311
7.5.1 非稳态热应力分析	312
7.5.2 断裂力学的方法	314
7.5.3 由材料的复合提高耐热冲击性	319
思考题	323
参考文献	324
第8章 复合材料的加工与连接	326
8.1 树脂基复合材料的加工	326
8.1.1 热固性树脂基复合材料的加工	326
8.1.2 热塑性树脂基复合材料的加工	327
8.2 金属基复合材料的加工	331
8.2.1 挤压与拉拔	332
8.2.2 轧制、锻造及热等静压	334
8.2.3 超塑性及薄板成形工艺	334
8.2.4 机加工	335
8.3 陶瓷基复合材料的加工	336
8.3.1 加工裂纹的生成	336
8.3.2 单刃金刚石划痕的裂纹生成	337
8.3.3 多刃金刚石划痕的裂纹生成	340
8.3.4 金刚石砂轮研磨加工时的裂纹生成	342
8.4 金属基复合材料的连接	345
8.4.1 概述	345
8.4.2 铝基复合材料的连接方法	346
8.5 陶瓷与金属的接合	351
8.5.1 概述	351
8.5.2 研究热点简介	359
思考题	366
参考文献	366
第9章 复合材料的检测与评价	369

9.1 复合材料的力学性能	369
9.1.1 弹性模量	369
9.1.2 塑性应变	372
9.1.3 断裂韧性	375
9.1.4 磨损	380
9.1.5 疲劳	383
9.2 复合材料的物理与化学性能	387
9.2.1 密度	387
9.2.2 导热性和导电性	388
9.2.3 热膨胀	390
9.2.4 耐腐蚀性	391
9.3 微观组织特征	396
9.3.1 金相试样	396
9.3.2 透射电镜试样	397
9.3.3 衍射法测内应力	399
9.3.4 光弹性法测内压力	400
9.3.5 增强体参数的表征	402
9.3.6 内损伤现象	404
9.4 无损检测应用简介	406
9.4.1 强度与断裂位置结合的概率分布函数及三点弯曲试验的解析结果	407
9.4.2 无损检测理论	410
思考题	414
参考文献	414
第10章 复合材料的应用	416
10.1 树脂基复合材料	416
10.1.1 树脂基复合材料的优良性能	416
10.1.2 树脂基复合材料的应用	417
10.2 金属基复合材料	427
10.2.1 金属基复合材料的性能	427
10.2.2 金属基复合材料的应用	430
10.3 陶瓷基复合材料	438
10.3.1 陶瓷基复合材料力学性能的应用	438
10.3.2 陶瓷基复合材料物理性能的应用	457
思考题	460
参考文献	461

第1章

绪 论

1.1 复合材料概述

1.1.1 复合材料的定义和分类

1. 复合材料的定义

关于复合材料,有着不同的定义方式。

国际标准化组织:“由两种以上在物理和化学上不同的物质组合起来而得到的一种多相固体材料。”

《材料科学技术百科全书》:“复合材料是由有机高分子、无机非金属或金属等几类不同材料通过复合工艺组合而成的新型材料。它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。可以通过材料设计使各组分性能互相补充并彼此关联,从而获得更优越的性能,与一般材料的简便混合有本质区别。”^[1]

《材料大辞典》:“复合材料是根据应用的需要进行设计,把两种以上的有机聚合物材料,或无机非金属材料,或金属材料组合在一起,使之互补性能优势,从而制成的一类新型材料。一般由基体组元与增强材料或功能体组元所组成,因此亦属于多相材料范畴。”^[2]

在不同的专著与教科书中,对复合材料的定义也有所不同。例如:

“由两种以上不同的原材料组成,并使原材料的性能得到充分发挥,通过复合化而得到单一材料所不具备的性能。”^[3]

“把一些个体典型或基本的特性组合而得到的物质。”^[4]

“为了达到目标性能,对材料的组织结构进行设计而制得的多相材料。”^[5]

“经过一定的操作,将复数个原材料合体,或者是由复数个相生成,且具有比原材料优异的性能。”^[6]

一般认为,复合材料是两个或两个以上的不同化学性质的组元或不同组织

相组成的结合体,是不同的材料在宏观尺度上组合而成的一种有用的材料,并应满足以下三个条件:

- ① 各组元含量都大于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。^[7-13]

对于复合材料,应该强调正面效果,即复合后的整体性能应超过组分材料,同时保留了所期望的性能(如高的强度、刚度),抑制了所不期望的特性(如低延性),复合材料应该是多功能的材料系统,可提供任何单一材料所无法获得的特性。也就是说,并非随意将不同种类的原材料混合在一起都能够得到复合材料。

复合材料是不同于合金的一种材料。在合金中,每一种组分都保留着它们独自的特性,而构成复合材料时,仅取它们的优点而避开其缺点,从而获得一种性能得到改善的材料。

有人认为,可将复合材料划分为广义复合材料和狭义复合材料。

从广义上讲,复合材料是由两种或两种以上不同化学性质的组分组合而成的材料。但在现代材料学界,复合材料专指由两种或两种以上不同相态的组分所组成的材料。

复合材料是用经过选择的、含一定数量比的两种或两种以上的组分(或称组元),通过人工复合组成多相、三维结合且各相之间有明显界面的、具有特殊性能的材料。

可以看出,尽管定义的细节有所不同,但其要点是共同的,即

- ① 含两种以上不同的化学相。
- ② 具有每个组分所不具备的优良性能。

至于天然的骨骼、竹子、木材等是否应属于复合材料的范畴,尚有不同的看法。但一般认为,它们应属于具有复合材料形态的天然材料。这样,复合材料的含义就还应该包括人工制造,成分由人们有意识地选择,具有重复的几何形状等。

复合材料应具有以下特点:

① 复合材料的组分和相对含量是由人工选择和设计的,即复合材料具有可设计性。

② 组成复合材料的某些组分在复合后仍然保持其固有的物理和化学性质(区别于化合物和合金)。

③ 复合材料不仅能保持原组分的部分优点,而且能产生原组分所不具备的新性能。就是说,复合材料中各组元不但保持各自的固有特性,而且可最大限度地发挥各种材料组元的特性,并赋予单一材料组元所不具备的优良特殊性能。

④ 复合材料的性能取决于各组成相性能的协同,复合材料具有新的、独特

的和可用的性能。这种性能是单个组分材料性能所不及或不同的。

⑤ 复合材料是各组分之间被明显界面区分的多相材料,即组元之间存在着明显的界面。

⑥ 复合材料是非天然形成的,以区别于具有某些复合材料形态特征的自然物质。

2. 复合材料的命名^[1,4,6,8,9]

复合材料的结构通常是一个相为连续相(称为基体),而另一相是以独立的形态分布在连续相中的分散相。与连续相相比,这种分散相的某些性能优越,会使材料的性能显著增强,故常称为增强体(也称为增强材料、增强相等)。

在大多数情况下,分散相较基体硬,强度和刚度较基体大。分散相可以是纤维及其编织物,也可以是颗粒状或弥散的填料,在基体与增强体之间存在着界面。

复合材料在世界各国还没有统一的名称和命名方法,常用的方法是根据增强体和基体的名称来命名,通常有以下三种情况:

① 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。

② 强调增强体时以增强体材料的名称为主,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。

③ 基体材料名称与增强体材料并用。这种命名方法常用来表示某一种具体的复合材料,习惯上把增强体材料的名称放在前面,基体材料的名称放在后面。

3. 复合材料的分类^[1,4,6]

材料的分类在历史上有许多方法,例如:

① 按材料的化学性质分类,有金属材料、非金属材料之分。

② 按物理性质分类,有绝缘材料、磁性材料、远光材料、半导体材料、导电材料等。

③ 按用途分类,有航空材料、电工材料、建筑材料、包装材料等。

复合材料的分类方法也很多,常见的分类方法有以下几种。

1) 按基体材料分类

可以分为金属基复合材料、陶瓷基复合材料、树脂基复合材料等,如图 1.1 所示。

2) 按增强材料分类(图 1.2)

① 纤维状分散相复合材料

a. 连续纤维增强复合材料 作为分散相的长纤维的两个端点都位于复合材料的边界处,连续纤维也可以编织形态作为增强体。

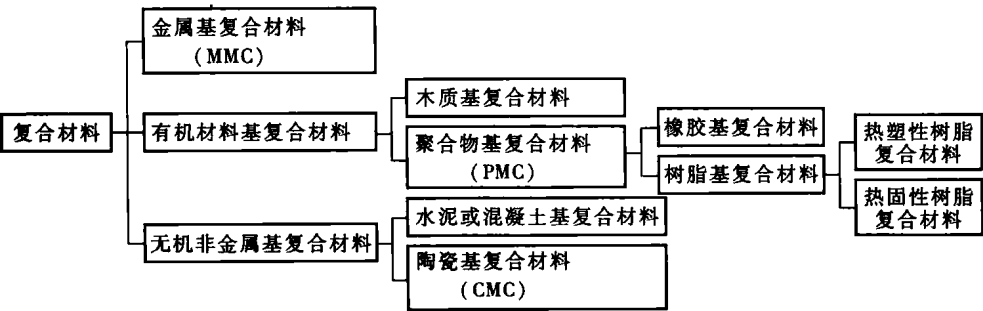


图 1.1 按基体材料分类

b. 非连续纤维增强复合材料 短纤维、晶须无规则地分散在基体材料中。

② 颗粒状分散相复合材料 微小颗粒状增强材料分散在基体中。主要包括分散强化复合材料、颗粒增强复合材料、片晶增强复合材料。

复合材料按增强材料的具体分类如图 1.2 所示。

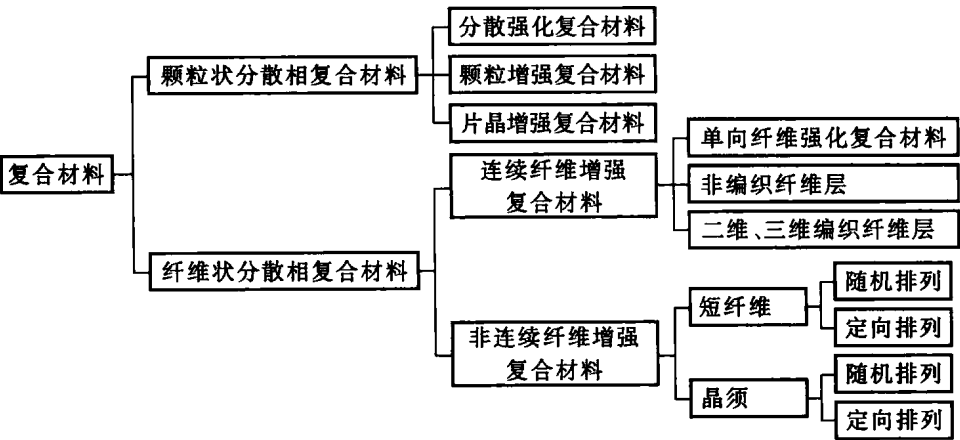


图 1.2 按增强材料分类

3) 将基体材料与增强材料综合考虑进行分类

如果将基体的材质、第二相的材质进行综合考虑,则复合材料的分类如表 1.1 所示。当然,零维和三维之间难以画出严格的界限,主要是尺寸的差别,三维一般指结构体。

4) 按照制备工艺分类

复合材料按制备工艺的分类如表 1.2 所示。

表 1.1 复合材料按基体材料与增强材料综合考虑进行分类

基体材料 增强材料		有机材料	金属	无机材料
零维	有机材料	聚合物		
	金属	防静电塑料	合金粉末(Fe、Cu等)	金属陶瓷
	无机材料	导电陶瓷	分散强化合金 自润滑材料	陶瓷混凝土
一维	有机材料	环氧树脂	建筑灰泥、木质水泥	
	金属	防静电地毯	不锈钢/铝、超导线 磁性材料、触点 W/硬质合金	铁丝强化水泥 钢筋混凝土
	无机材料	玻璃纤维强化塑料 (GFRP)、碳纤维强化 塑料(CFRP)	SiC/Al、C/Al Al ₂ O ₃ /硬质合金	玻璃纤维/水泥 C/灰泥、石棉水泥 C/C
二维	有机材料	化妆板	装饰钢板、防震钢板	石膏板、强化玻璃
	金属	Al-PE 薄板、电路板	双金属、包层材料	
	无机材料		绝热涂层、表面处理	刹车衬里
三维	有机材料	三维编织物		
	金属	三明治形材料 三维电路板	三明治形材料	半导体、IC
	无机材料	三明治形材料 泡沫材料	三明治形材料 海绵金属	C/C、泡沫陶瓷 发泡水泥

表 1.2 复合材料按制备工艺分类

大分类	构成	有机材料	金属材料	无机材料
混合系	积层	FW,冷压、热压	扩散接合	热压
	混合		粉末冶金	混凝土
	含浸	含浸	溶浸	高分子混凝土
	被覆	涂层	电镀	化学气相沉积(CVD)
	发泡	发泡剂	发泡剂、烧成	搅拌
	机械加工	注射成形	拔丝、挤压	压延
生成系	生成系	自增强	定向凝固、反应扩散	定向凝固、反应扩散

5) 按照材料的作用分类

按材料的作用可分为两类:结构复合材料与功能复合材料。

① 结构复合材料 结构复合材料主要是作为承力结构使用的复合材料,它基本上是由能承受载荷的增强体组元与能连接增强体成为整体承载同时又起分配与传递载荷作用的基体组元构成。结构复合材料的特点是:可根据材料在使用中受力的要求进行组元选材和增强体排布设计,从而充分发挥各组元的效能。

② 功能复合材料 指具备各种特殊物理与化学性能(如声、光、电、磁、热、耐腐蚀、零膨胀、阻尼、摩擦、屏蔽或换能等)的材料。功能复合材料中的增强体又称为功能体组元,它分布于基体组元中。功能复合材料中的基体不仅起到构成整体的作用,而且能够产生协同或加强功能的作用。当然,许多功能材料也是以提高力学性能为前提的。

6) 按照组成的原材料是否同质分类

可分为同质复合材料和异质复合材料。

① 同质复合材料 增强材料和基体材料属于同种物质,如碳-碳复合材料。

② 异质复合材料 前面提及的复合材料多属此类。

4. 复合材料发展现状

① 玻璃钢和树脂基复合材料非常成熟,已广泛应用。

② 金属基复合材料处于开发阶段,可用于制造某些结构件的关键部位。

③ 陶瓷基复合材料及功能复合材料等尚处于研究阶段,有不少科学技术问题有待解决。

可能作为实用材料的陶瓷基复合材料按其基体和增强材料的组合,并结合使用温度进行分类,如图 1.3 所示。陶瓷基复合材料与金属材料和金属间化合物相比,其可以在更高的温度下使用。如果从使用性能上进行分类,可以分为利用其力学性能的结构材料和利用其热、光、电、磁等物理性能的功能材料。

1.1.2 复合材料的历史^[4, 6]

从广义上讲,复合材料已有很久的历史。远古时代人们用稻草掺入黏土做土坯,古代人们用钢铁层压法制成刀剑等。近代的复合材料是以 1942 年制出的玻璃纤维强化塑料为起点的,随后为了提高纤维的弹性,开发了硼纤维、碳纤维、耐热氧化铝纤维等。另外,为了改善树脂的耐热性,对金属基复合材料也开展了研究。纤维强化金属(FRM)的耐热温度已达 450 ℃,强度在 1 500 MPa 以上。同时,对陶瓷等无机材料作为复合材料的基体也有了重新的认识,在研究开发的基础上有了广泛的应用。

人类很早就接触和使用各种天然复合材料,并仿效自然界制作各种各样的