

高等学校材料类专业系列教材

F U H E C A I L I A O

聚合物基复合材料

倪礼忠 陈 麒 / 编著

华东理工大学出版社

中国材料科学与工程出版社

POLYMER-BASED COMPOSITE

聚合物基复合材料

第二版 曹 彬、曹 强

ISBN 7-5026-2511-0

高等学校材料类专业系列教材

聚合物基复合材料

倪礼忠 陈麒 / 编著

华东理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

聚合物基复合材料/倪礼忠,陈麒编著. —上海:华东理工大学出版社,
2007.2

(高等学校材料类专业系列教材)

ISBN 978-7-5628-2027-7

I. 聚... II. ①倪... ②陈... III. 高聚物-复合材料-
高等学校-教材 IV. TB333

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 004390 号

高等学校材料类专业系列教材

聚合物基复合材料

.....
编 著 / 倪礼忠 陈 麒

责任编辑 / 胡 景

封面设计 / 王晓迪

责任校对 / 金慧娟

出版发行 / 华东理工大学出版社

地 址:上海市梅陇路 130 号,200237

电 话:(021)64250306(营销部)

传 真:(021)64252707

网 址:www.hdlgpress.com.cn

印 刷 / 常熟华顺印刷有限公司

开 本 / 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 / 20

字 数 / 481 千字

版 次 / 2007 年 2 月第 1 版

印 次 / 2007 年 2 月第 1 次

印 数 / 1—4050 册

书 号 / ISBN 978-7-5628-2027-7/TB·16

定 价 / 35.00 元

(本书如有印装质量问题,请到出版社营销部调换。)

前 言

复合材料是由两种或两种以上的材料,用适当的方法复合制成的一种新材料,其性能优于单一材料。因此,复合材料是一种内容和形式都非常广泛的材料。“聚合物基复合材料”是指由聚合物基体与增强材料(如玻璃纤维、碳纤维、有机纤维等)复合制成的一种性能优异的材料。聚合物基复合材料优异的轻质高强特性、耐热性能、耐腐蚀性能、介电性能及成型加工的多样性和方便性,使其在航空航天、汽车、船舶、火车、建筑、化工防腐、电机、电子、体育等领域得到越来越广泛的应用。

复合材料是材料领域中的后起之秀,是科学技术发展的重要物质基础和先导,从航空航天到电子计算机等高技术领域,复合材料的应用已成为传统单一材料不可替代的关键技术材料。世界上各先进国家都将复合材料列为国家发展的关键技术,我国“863”计划、国防科技发展战略及国家建材 2010 年发展规划都把复合材料列为重中之重。我国复合材料工业产量从 20 世纪 80 年代初至今一直保持着较高的增长率,近几年发展速度更快,至今已有 3 500 多家研究和生产单位。在今后相当长的一段时期内,复合材料仍将成为我国工业体系中最有发展前途的增长点。

本书是根据复合材料与工程专业和高分子材料与工程专业的教学计划和教学大纲,在《复合材料基体与界面》和《复合材料工艺与设备》的基础上,并参考国内外的有关资料和最新科研成果编写的。其特点是:(1)将基体材料、增强材料和成型工艺编在一本书中,使原材料和成型工艺更有机地结合在一起;(2)本书内容既有理论性又有实用性,并注重理论联系实际。

参加本书编写工作的有华东理工大学倪礼忠(第 1、3、4、5 章)、陈麒(第 2 章)。

鉴于聚合物基复合材料的相关科研成果仍在不断丰富和发展的过程中,书中的不当之处,恳请读者批评指正。

编 者

内 容 简 介

本书是根据复合材料与工程专业和高分子材料与工程专业的教学计划和教学大纲编写的,主要介绍复合材料基体(如不饱和聚酯树脂、环氧树脂、酚醛树脂和高性能树脂等)的结构、合成及固化,增强材料(如玻璃纤维、碳纤维、有机纤维等)的结构与性能、制造方法及复合材料的各种成型工艺(如手糊成型、层压、模压、缠绕成型、拉挤成型等)。

本书为高等院校复合材料与工程专业和高分子材料与工程专业的教材,也可作为复合材料专业的师生和从事复合材料科研、设计、生产及应用人员的参考书。

目 录

1 绪论	1
1.1 复合材料的定义和分类	1
1.2 复合材料的特性	1
1.3 复合材料的应用	3
1.4 复合材料的发展	5
2 增强材料	8
2.1 概述	8
2.2 玻璃纤维	9
2.2.1 玻璃纤维的分类	9
2.2.2 玻璃纤维的结构及组成	9
2.2.3 玻璃纤维的物理和化学性能	10
2.2.4 玻璃纤维及其制品的生产工艺	13
2.2.5 玻璃纤维制品的性能	14
2.3 芳纶纤维	18
2.3.1 概述	18
2.3.2 芳纶纤维的制备	18
2.3.3 芳纶纤维的结构与性能	18
2.3.4 芳纶纤维的应用	19
2.4 碳纤维	20
2.4.1 概述	20
2.4.2 碳纤维的制造方法	21
2.4.3 碳纤维的性能	26
2.4.4 碳纤维的表面处理	26
2.4.5 碳纤维的应用	27
2.5 聚苯并双噁唑纤维	28
2.5.1 概述	28
2.5.2 PBO 纤维的制造	28
2.5.3 PBO 纤维的结构与性能	29
2.5.4 PBO 纤维的应用	29
2.6 超高相对分子质量聚乙烯纤维	30
2.6.1 概述	30
2.6.2 UHMW-PE 纤维的制造	31

2.6.3	UHMW-PE 纤维的性能	33
2.6.4	UHMW-PE 纤维的表面处理	33
2.6.5	UHMW-PE 纤维的应用	34
2.7	M5 纤维	35
2.7.1	概述	35
2.7.2	M5 纤维的制备	35
2.7.3	M5 纤维分子结构特征和性能	35
2.7.4	M5 纤维应用与展望	36
2.8	陶瓷纤维	36
2.8.1	氧化铝纤维	37
2.8.2	碳化硅纤维	38
2.8.3	氮化硼纤维	40
2.9	硼纤维	41
2.10	晶须	42
2.10.1	碳化硅晶须	43
2.10.2	碳晶须	44
2.10.3	钛酸钾晶须	44
3	复合材料基体	45
3.1	不饱和聚酯树脂	45
3.1.1	概述	45
3.1.2	不饱和聚酯树脂的合成	45
3.1.3	不饱和聚酯树脂的固化	54
3.1.4	其他类型的不饱和聚酯树脂	59
3.2	环氧树脂	76
3.2.1	概述	76
3.2.2	缩水甘油醚类环氧树脂	78
3.2.3	缩水甘油酯类环氧树脂	90
3.2.4	缩水甘油胺类环氧树脂	92
3.2.5	脂环族环氧树脂	94
3.2.6	脂肪族环氧树脂	97
3.2.7	含其他元素的环氧树脂	97
3.2.8	环氧树脂通过逐步聚合反应的固化过程	99
3.2.9	环氧树脂通过离子型聚合反应的固化过程	113
3.2.10	环氧树脂通过其他反应的固化过程	117
3.2.11	环氧树脂稀释剂和增韧剂	117
3.3	酚醛树脂	122
3.3.1	概述	122
3.3.2	酚醛树脂的合成原理	122
3.3.3	酚醛树脂的合成方法	131

3.3.4	酚醛树脂的固化	133
3.3.5	酚醛树脂的改性	139
3.4	高性能树脂	149
3.4.1	聚酰亚胺树脂	149
3.4.2	聚苯并咪唑树脂	160
3.4.3	氰酸酯树脂	163
3.4.4	聚苯乙烯吡啶树脂	165
3.4.5	苯并环丁烯树脂	167
3.4.6	聚醚醚酮	170
3.4.7	聚砜和聚芳醚砜	170
3.4.8	聚苯醚	172
3.4.9	聚苯硫醚	173
3.4.10	聚(苯基硅烷-二乙炔基苯)	174
3.5	其他类型的热固性树脂	176
3.5.1	1,2-聚丁二烯树脂	176
3.5.2	热固性丁苯树脂	178
3.5.3	有机硅树脂	181
3.5.4	呋喃树脂	185
3.5.5	脲醛树脂	189
3.5.6	三聚氰胺甲醛树脂	195
4	热固性复合材料成型工艺	199
4.1	手糊成型工艺	199
4.1.1	概述	199
4.1.2	原材料	199
4.1.3	模具	204
4.1.4	手糊成型工艺	208
4.1.5	喷射成型工艺	215
4.1.6	袋压成型工艺	217
4.1.7	复合材料夹层结构的制造	219
4.2	模压成型工艺	235
4.2.1	概述	235
4.2.2	模压料的制备	236
4.2.3	片状模塑料、团状模塑料	244
4.2.4	短纤维模压料的成型工艺	253
4.2.5	片状模塑料的模压成型工艺	259
4.2.6	片状模塑料制品的常见缺陷	259
4.3	层压成型工艺	260
4.3.1	概述	260
4.3.2	增强材料的浸胶工艺	261

4.3.3	层压板成型工艺	265
4.3.4	复合材料卷管成型工艺	271
4.4	缠绕成型工艺	274
4.4.1	概述	274
4.4.2	缠绕规律的分析	275
4.4.3	缠绕成型工艺	287
4.5	树脂传递模塑(RTM)成型工艺	290
4.5.1	原材料	290
4.5.2	RTM 成型工艺	291
4.6	拉挤成型工艺	291
4.6.1	概述	291
4.6.2	拉挤成型工艺	292
5	热塑性复合材料的成型工艺	296
5.1	概述	296
5.1.1	定义和分类	296
5.1.2	热塑性复合材料的特性	297
5.1.3	热塑性复合材料的成型方法分类	298
5.2	预浸料或片状模塑料的制备	298
5.2.1	预浸渍技术	299
5.2.2	后浸渍技术	299
5.2.3	热塑性片状模塑料的制备	300
5.3	热塑性复合材料的冲压成型工艺	301
5.4	热塑性复合材料的拉挤成型工艺	302
5.4.1	预浸纤维拉挤成型工艺	302
5.4.2	纤维拉挤成型工艺	304
5.5	热塑性复合材料的模压成型工艺	304
5.6	热塑性复合材料缠绕成型工艺	305
	参考文献	306

1 绪 论

1.1 复合材料的定义和分类

复合材料(composite materials)是指将两种或两种以上的不同材料,用适当的方法复合成的一种新材料,其性能比单一材料性能优越。一般来说,复合材料是由基体和增强材料组成的。增强材料是复合材料的主要承力组分,特别是拉伸强度、弯曲强度和冲击强度等力学性能主要由增强材料承担;基体的作用是将增强材料粘合成一个整体,起到均衡应力和传递应力的作用,使增强材料的性能得到充分发挥,从而产生一种复合效应,使复合材料的性能大大优于单一材料的性能。

复合材料的性能主要取决于:①基体的性能;②增强材料的性能;③基体与增强材料之间的界面性能。

复合材料的分类方法较多,常用的有以下三种。

(1) 按基体类型分类

可分为树脂基复合材料、金属基复合材料和无机非金属基复合材料等。

(2) 按增强材料类型分类

可分为玻璃纤维复合材料(玻纤增强的树脂基复合材料,俗称玻璃钢)、碳纤维复合材料、有机纤维复合材料和陶瓷纤维复合材料等。

(3) 按用途不同分类

可分为结构复合材料和功能复合材料等。

1.2 复合材料的特性

复合材料是由多种组分材料组成,许多性能优于单一组分材料。以纤维增强的树脂基复合材料为例,它具有质量轻、强度高、可设计性好、耐化学腐蚀、介电性能好、耐烧蚀及容易成型加工等优点。

(1) 轻质高强

普通碳钢的密度为 7.8 g/cm^3 ,玻璃纤维增强树脂基复合材料的密度为 $1.5 \sim 2.0 \text{ g/cm}^3$,只有普通碳钢的 $1/5 \sim 1/4$,比铝合金还要轻 $1/3$ 左右;而机械强度却能超过普通碳钢的水平。若按比强度计算(比强度是指强度与密度的比值),玻璃纤维增强的树脂基复合材料不

仅大大超过碳钢,而且可超过某些特殊合金钢,碳纤维复合材料、有机纤维复合材料具有比玻璃纤维复合材料更小的密度和更高的强度,因此具有更高的比强度。几种材料的拉伸强度见表 1.2.1。

表 1.2.1 几种材料的密度和拉伸强度

材料种类	密度/(g·cm ⁻³)	拉伸强度/MPa	比强度/10 ³ cm
高级合金钢	8.0	1 280	1 600
A ₃ 钢	7.85	400	510
LY ₁₂ 铝合金	2.8	420	1 500
玻纤增强环氧树脂	1.73	500	2 890
玻纤增强聚酯树脂	1.80	290	1 610
玻纤增强酚醛树脂	1.80	290	1 610
玻纤增强 DAP 树脂	1.65	360	2 180
Kevlar 纤维增强环氧树脂	1.28	1 420	11 094
碳纤维增强环氧树脂	1.55	1 550	10 000

(2) 可设计性好

复合材料可以根据不同的用途要求,灵活地进行产品设计,具有很好的可设计性。对于结构件来说,可以根据受力情况合理布置增强材料,达到节约材料、减轻重量的目的。对于有耐腐蚀性能要求的产品,设计时可以选用耐腐蚀性能好的基体树脂和增强材料,对于其他一些性能要求,如介电性能、耐热性能等,都可以方便地通过选择合适的原材料来满足。复合材料良好的可设计性还可以最大限度地克服其弹性模量、层间剪切强度低等缺点。

(3) 电性能好

复合材料具有优良的电性能,通过选择不同的树脂基体、增强材料和辅助材料,可以将其制成绝缘材料或导电材料。例如玻璃纤维增强的树脂基复合材料具有优良的电绝缘性能,并且在高频下仍能保持良好的介电性能,因此可作为高性能的电机、电器的绝缘材料;这种复合材料还具有良好的透波性能,被广泛地用于制造机载、舰载和地面雷达罩。复合材料通过原材料的选择和适当的成型工艺可以制成导电复合材料,这是一种功能复合材料,在冶金、化工和电池制造等工业领域具有广泛的应用前景。

(4) 耐腐蚀性能好

聚合物基复合材料具有优异的耐酸性能、耐海水性能,也能耐碱、盐和有机溶剂。因此,这是一种优良的耐腐蚀材料,用其制造的化工管道、贮罐、塔器等具有较长的使用寿命,极低的维修费用。

(5) 热性能良好

玻璃纤维增强的聚合物基复合材料具有较小的导热系数,一般在室温下为 0.3~0.4 kcal/(m·h·K)^①,只有金属的 1/1 000~1/100,是一种优良的绝热材料。选择适当的

① 1 kcal = 4.184 × 10³ J。

基体材料和增强材料可以制成耐烧蚀材料和热防护材料,能有效地保护火箭、导弹和宇宙飞行器在 2 000℃以上承受高温、高速气流的冲刷作用。

(6) 工艺性能优良

纤维增强的聚合物基复合材料具有优良的工艺性能,可以通过缠绕成型、接触成型等复合材料特有的工艺方法制造制品。它能满足各种类型制品的制造需要,特别适合于大型制品、形状复杂、数量少制品的制造。金属基和陶瓷基复合材料的工艺性能相对要差一些。

(7) 弹性模量

金属基和陶瓷基复合材料具有较高的弹性模量,但是聚合物基复合材料的弹性模量低得多,虽然比木材大两倍,但仅为结构钢的十分之一。因此,制成制品后容易变形。用碳纤维等高模量纤维作为增强材料可以提高复合材料的弹性模量,另外通过结构设计也可以克服其弹性模量差的不足。

(8) 长期耐热性

金属基和陶瓷基复合材料能在较高的温度下长期使用,但是聚合物基复合材料不能在高温下长期使用,即使耐高温的聚酰亚氨基复合材料,其长期工作温度也只能在 300℃左右。

(9) 老化现象

在自然条件下,由于紫外光、湿热、机械应力、化学侵蚀的作用,会导致复合材料的性能变差,即发生所谓的老化现象。复合材料在使用过程中发生老化现象的程度与其组成、结构和所处的环境有关。

1.3 复合材料的应用

与传统材料(如金属、木材、水泥等)相比,复合材料是一种新型材料。如上所述,复合材料具有许多优良的性能,并且其成本在不断地下降,成型工艺的机械化、自动化程度不断提高,因此,复合材料的应用领域日益广泛。以下是其主要的应用领域。

(1) 在航空、航天方面的应用

由于复合材料的轻质高强特性,因此它在航空航天领域得到广泛的应用。在航空方面,主要用作战斗机的机翼蒙皮、机身、垂尾、副翼、水平尾翼、雷达罩、侧壁板、隔框、翼肋和加强筋等主承力构件。美国在各种型号战斗机上使用复合材料的比例如表 1.3.1 所示。

表 1.3.1 美国战斗机使用复合材料的比例

飞机型号	F4	F15	F16	F18	AV-8b	F117	B-2	ATF
复合材料比例/%	0.8	2.0	2.5	10	26	42	38	59

在战斗机上大量使用复合材料的结果是大幅度减轻了飞机的质量,并且改善了飞机的总体结构。特别是由于复合材料构件的整体性好,因此极大地减少了构件的数量,减少连接,有效地提高了安全可靠。某飞机使用复合材料垂尾后减轻的结构质量见表 1.3.2。

表 1.3.2 飞机使用复合材料垂尾后减轻的结构质量

构件名称	铝合金设计质量/kg	复合材料设计质量/kg	质量变化
翼梁	220	157.5	-62.5
肋	67.9	58.4	-9.5
蒙皮	87.5	61.7	-25.8
口盖	18.5	16.6	-1.9
其他	28.7	15.4	-13.3
合计	422.6	309.6	-113

在各种型号的民用飞机上(如波音 737~767、空中客车 A310~A340 等),复合材料也使用较多,主要用作雷达罩、发动机罩、副翼、襟翼、垂直尾翼和水平尾翼的舵面、翼根整流罩,以及内部的通风管道、行李架、地板、压力容器、卫生间等。

复合材料在宇航方面的应用主要有火箭发动机壳体、航天飞机的构件、卫星构件等。

碳/碳复合材料是载人宇宙飞船和多次往返太空飞行器的理想材料,用于制造宇宙飞行器的鼻锥部、机翼、尾翼前缘等承受高温载荷的部件。固体火箭发动机喷管的工作温度高达 3 000℃~3 500℃,为了提高发动机效率,还要在推进剂中掺入固体粒子,因此固体火箭发动机喷管的工作环境是高温、化学腐蚀、固体粒子高速冲刷,目前只有碳/碳复合材料能承受这种工作环境。

人造地球卫星的质量减轻 1 kg,运载它的火箭可减轻 1 000 kg,因此用轻质高强的复合材料来制造人造卫星有很大的优势。用复合材料制造的卫星部件有:仪器舱本体、框、梁、桁、蒙皮、支架,太阳能电池的基板,天线反射面等。

(2) 在交通运输方面的应用

复合材料在交通运输方面的应用已有几十年的历史,发达国家复合材料产量的 30% 以上用于交通工具的制造。用复合材料制造的汽车质量减轻,在相同条件下的耗油量只有钢制汽车的 1/4;而且在受到撞击时复合材料能大幅度吸收冲击能量,保护人员的安全。

用复合材料制造的汽车部件较多,如车体、驾驶室、挡泥板、保险杠、引擎罩、仪表盘、驱动轴、板簧等。

随着列车速度的不断提高,火车部件用复合材料来制造是最好的选择。复合材料常被用于制造高速列车的车箱外壳、内装饰材料、整体卫生间、车门窗、水箱等。

(3) 在化学工业方面的应用

在化学工业方面,复合材料主要被用于制造防腐蚀制品。聚合物基复合材料具有优异的耐腐蚀性能。例如,在酸性介质中,聚合物基复合材料的耐腐蚀性能比不锈钢优异得多。

用复合材料制造的化工耐腐蚀设备有大型贮罐、各种管道、通风管道、烟囱、风机、地坪、泵、阀和格栅等。

(4) 在电气工业方面的应用

、聚合物基复合材料是一种优异的电绝缘材料,广泛地用于电机、电工器材的制造。例如,绝缘板、绝缘管、印刷线路板、电机护环、槽楔、高压绝缘子、带电操作工具等。

(5) 在建筑工业方面的应用

玻璃纤维增强的聚合物基复合材料(玻璃钢)具有优异的力学性能、良好的隔热、隔音性能、吸水率低、耐腐蚀性能好和很好的装饰性。因此,这是一种理想的建筑材料。在建筑上,玻璃钢被用作承重结构、围护结构、冷却塔、水箱、卫生洁具、门窗等。用复合材料制备的钢筋代替金属钢筋制造的混凝土建筑具有极好的耐海水性能,并能极大地减少金属钢筋对电磁波的屏蔽作用,因此这种混凝土适合于制造码头、海防构件等,也适合于制造电信大楼等建筑。

复合材料在建筑工业方面的另一个应用是建筑物的修补。当建筑物、桥梁等因损坏而需要修补时,用复合材料作为修补材料是理想的选择,因为用复合材料对建筑物进行修补后,能恢复其原有的强度,并有很长的使用寿命。常用的复合材料是碳纤维增强的环氧树脂基复合材料。

(6) 在机械工业方面的应用

复合材料在机械制造工业中,用于制造各种叶片、风机、各种机械部件、齿轮、皮带轮和防护罩等。

用复合材料制造叶片具有制造容易、质量轻、耐腐蚀等优点,各种风力发电机叶片都是由复合材料制造的。用复合材料制造齿轮同样具有制造简单的优点,并且在使用时噪声很小,特别适用于纺织机械。

(7) 在体育用品方面的应用

在体育用品方面,复合材料被用于制造赛车、赛艇、皮艇、划桨、撑杆、球拍、弓箭、雪橇等。

以上是复合材料应用的部分例子,由于复合材料的应用领域非常广泛,实际的应用远不止这些。

1.4 复合材料的发展

材料是人类用来制造工具等有用器件的一类物质,人类在征服自然、创造文明的过程中,衣、食、住、行都离不开材料。随着人类的不断进步,材料的发展经历了从石器到合成材料的各个阶段。历史学家以人类使用材料的变化来划分历史时代,如:石器时代、青铜时代、铁器时代。人类发展到今天,已经开发利用了种类繁多的材料,但是单一材料的性能已经不能满足人类进一步发展的需要,因此将多种材料用适当的方法组合起来,得到一种性能优于单一材料的复合材料,是历史发展的必然。

人类使用复合材料已经有几千年的历史,但是以合成材料作为基体、纤维作为增强材料制成的复合材料是20世纪40年代发展起来的一种新材料。现在复合材料从开发、制造到应用已经发展成一个较为完整的体系。以下几个方面是复合材料今后的发展方向。

(1) 降低成本

与传统材料(金属材料、无机非金属材料、高分子材料等)相比,使用复合材料的绝对量

是非常小的,阻碍复合材料发展的主要障碍是其成本大大高于传统材料。由于复合材料的性能优于传统材料,如能降低复合材料的成本,其应用前景是非常广阔的。

降低复合材料的成本可以从以下几方面着手:

① 原材料。原材料成本高是复合材料价格高的主要原因。因此今后的发展方向是尽量降低现有原材料的成本,以及开发新的低成本的原材料。

② 成型工艺。复合材料的成型工艺还存在着生产周期长、生产效率低、有些成型工艺还需要较多的劳动力,这些因素都提高了复合材料的成本。因此,为了降低复合材料的生产成本,提高复合材料的机械化、自动化程度,开发高效率的成型工艺是发展方向。

③ 设计。复合材料具有较好的可设计性,复合材料的设计包括原材料设计、成型工艺设计和结构设计,通过复合材料合理的设计可以降低其成本。

(2) 高性能复合材料的研制

高性能复合材料是指具有高强度、高模量、耐高温等特性的复合材料。随着人类向太空发展,航空航天工业对高性能复合材料的需求量越来越大,而且也会提出更高的性能要求,如更高的强度要求、更高的耐温要求等,因此高性能复合材料的进一步研究和开发是复合材料今后的发展方向之一。

(3) 功能复合材料

功能复合材料是指具有导电、超导、微波、摩擦、吸声、阻尼、烧蚀等功能的复合材料。功能复合材料具有非常广的应用领域,这些应用领域对功能复合材料不断有新的性能要求,而且许多功能复合材料的性能是其他材料难以达到的,如透波材料、烧蚀材料等。功能复合材料是复合材料的一个重要的发展方向。

(4) 智能复合材料

智能复合材料是指具有感知、识别及处理能力的复合材料。在技术上通过传感器、驱动器、控制器来实现复合材料的上述能力,传感器感受复合材料结构的变化信息,例如材料受损伤的信息,并将这些信息传递给控制器,控制器根据所获得的信息产生决策,然后发出控制驱动器动作的信号。例如,当用智能复合材料制造的飞机部件发生损伤时,可由埋入的传感器在线检测到该损伤,通过控制器决策后,控制埋入的形状记忆合金动作,在损伤周围产生压应力,从而防止损伤的继续发展,大大提高了飞机的安全性能。

(5) 仿生复合材料

仿生复合材料是参考生命系统的结构规律而设计制造的复合材料。由于复合材料结构的多样性和复杂性,因此,复合材料的结构设计在实践上十分困难。然而自然界的生物材料经过亿万年的自然选择与进化,形成了大量天然合理的复合结构,这些复合结构都可作为仿生设计的参考。

复合材料仿生可分为三个步骤:仿生分析、仿生设计和仿生制备。已有的复合材料仿生设计实例有:仿竹复合材料的优化设计;仿动物骨骼的哑铃型增强材料;复合材料内部损伤的愈合等。

复合材料仿生的发展方向是要向更深的层次发展,即从宏观观测到微观分析,然后再回到宏观的设计、制造,而且复合材料的仿生除了结构仿生外,还应进行功能仿生、智能仿生和环境适应仿生的研究和开发。

(6) 环保型复合材料

从环境保护的角度考虑,要求废弃的复合材料可以回收利用,以节约资源和减少污染,但是目前的复合材料大多注重材料性能和加工工艺性能,而在回收利用上存在与环境不协调的问题。因此,开发、使用与环境相协调的复合材料,是复合材料今后的发展方向之一。