

复合材料技术

The Technology of Composite Materials

魏化震 李恒春 张玉龙◎编著

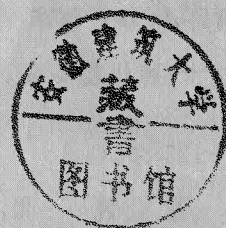
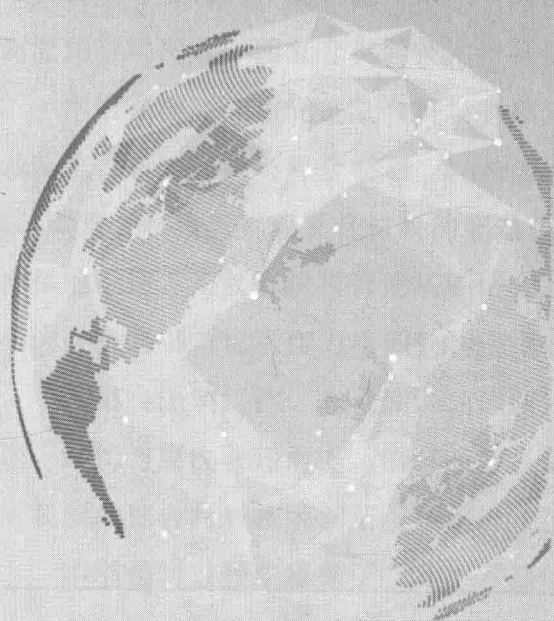


化学工业出版社

复合材料技术

The Technology of Composite Materials

魏化震 李恒春 张玉龙◎编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书重点介绍了树脂基复合材料成型工艺、树脂基结构复合材料、树脂基功能复合材料、树脂基纳米复合材料,同时也对陶瓷基复合材料、金属基复合材料、碳/碳复合材料、智能复合材料的制造技术、性能和应用等进行了论述,既包含传统结构材料,又有功能材料,内容全面具体。

本书可供从事复合材料研究、生产和应用的各类技术人员参考,同时也可作为相关企业和行业的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

复合材料技术/魏化震等编著. —北京:化学工业出版社, 2017.10

ISBN 978-7-122-30513-8

I. ①复… II. ①魏… III. ①复合材料 IV. ①TB33

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第209889号

责任编辑:赵卫娟

装帧设计:王晓宇

责任校对:宋 夏

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 刷:三河市延风印装有限公司

装 订:三河市胜利装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张31 字数834千字 2018年2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:148.00元

版权所有 违者必究

复合材料是指由两种或两种以上不同物质以不同方式组合而成的材料，它可以发挥各种材料的优点，克服单一材料的缺陷，扩大材料的应用范围。由于复合材料具有高比强度、高比模量、耐化学腐蚀和耐候性好、耐烧蚀、抗弹、透波、隐身、制造技术先进等特点，已逐步取代木材及金属合金，广泛应用于航空航天、汽车、电子电气、建筑、健身器材等领域，在武器装备和高新技术装备研制中具有不可替代的作用。近年来随着高新技术在复合材料设计、研究、制造等方面应用日趋深入，使复合材料技术得到快速发展，呈现出光明的发展前景。

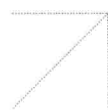
本书在扼要介绍先进复合材料基础知识的前提下，对树脂基复合材料、陶瓷基复合材料、金属基复合材料、结构复合材料、功能复合材料、纳米复合材料、碳/碳复合材料与智能复合材料的制造技术、性能特点和应用实例等进行了较为详尽的论述，是复合材料行业从事研究、设计、制造、管理、经营与教学人员等必读必备之书，也可作为培训教材使用。

本书突出实用性、先进性，理论叙述从简，侧重于用实例和实用数据说明问题，结构与层次合理严谨，语言通俗易懂，数据翔实可靠，若本书的出版发行能对我国的复合材料技术创新与技术进步起到促进作用，作者将感到十分欣慰。

本书编写过程中得到了李萍、石磊的大力协助，在此表示感谢！文中不妥之处在所难免。敬请读者批评指正。

编者

2017. 12



目 录

Contents

第一章 复合材料基础	1
第一节 基础知识	1
第二节 复合材料的特点与优势	1
第三节 复合材料的功能作用	4
一、在国防建设中的功能作用	4
二、在国民经济建设中的功能作用	7
三、在高新技术工程中的功能作用	8
第四节 复合材料发展趋势	9
第二章 树脂基复合材料成型工艺	16
第一节 预浸料制造技术	16
一、预浸料基础知识	16
二、连续纤维（或织物）预浸料	19
三、短切纤维预浸料	30
四、预成型坯体的制造	35
五、模塑粉料的制造	37
第二节 模压成型技术	37
一、成型设备	38
二、模压成型模具	39
三、模压成型工艺	41
四、模压成型中易出现的问题与解决方法	48
第三节 纤维缠绕成型技术	52
一、简介	52
二、缠绕设备	52
三、芯模	60
四、缠绕成型工艺	63
第四节 复合材料低压成型技术	66
一、手糊成型技术	67
二、喷射成型技术	75

三、铺层成型技术	80
第五节 热压罐成型工艺	84
一、简介	84
二、模具	86
三、热压罐成型工艺过程	87
第六节 挤拉成型技术	87
一、简介	87
二、挤拉成型设备	88
三、成型工艺过程	93
四、挤拉成型中应注意事项, 常见缺陷和改进方法	96
第七节 树脂传递模塑	97
一、简介	97
二、设备及参数	99
三、预成型工艺	100
四、RTM 工艺过程	101
第八节 发展中的制造技术	104
一、三维纺织复合材料制造技术	104
二、真空辅助成型工艺	105
三、微波辅助挤拉工艺	105

第三章 树脂基结构复合材料 106

第一节 玻璃纤维及其树脂基结构复合材料	106
一、玻璃纤维	106
二、玻璃纤维增强热塑性树脂基复合材料	109
三、玻璃纤维增强热固性树脂基复合材料	122
第二节 碳纤维及其树脂基结构复合材料	133
一、碳纤维	133
二、碳纤维增强热塑性树脂基复合材料	139
三、碳纤维增强热固性树脂基复合材料	144
第三节 芳纶纤维及其树脂基结构复合材料	150
一、全芳香聚酰胺纤维及其树脂基复合材料	150
二、芳纶共聚纤维	158
三、其他芳纶纤维及其树脂基结构复合材料	160
第四节 超高分子量聚乙烯纤维及其树脂基结构复合材料	165
一、超高分子量聚乙烯纤维	165
二、超高分子量聚乙烯纤维增强树脂基复合材料	167

第五节 无机纤维及其树脂基结构复合材料	169
一、硼纤维及其树脂基复合材料	169
二、碳化硅纤维及其树脂基复合材料	171
三、氧化铝纤维及其树脂基复合材料	174
四、高硅氧纤维与石英纤维及其树脂基复合材料	176
第六节 晶须及其树脂基结构复合材料	178
一、晶须	178
二、晶须增强树脂基复合材料	179
三、钛酸酯晶须及其树脂基复合材料	179
第七节 混杂纤维增强树脂基结构复合材料	181
一、基本特点	181
二、制造方法	182
三、性能	182

第四章 树脂基功能复合材料 185

第一节 树脂基压电复合材料	185
一、简介	185
二、压电陶瓷/聚合物复合材料设计	186
三、压电陶瓷/聚合物复合材料的制备工艺	186
四、压电陶瓷/聚合物复合材料的性能	189
五、几种类型的压电复合材料	191
第二节 树脂基磁性复合材料	194
一、铁氧体类磁性树脂基复合材料	194
二、稀土型磁性复合材料	197
三、纳米永磁复合材料	200
第三节 树脂基隐身复合材料	205
一、隐身技术简介	205
二、隐身技术途径	206
三、结构型吸波材料	207
四、结构隐身复合材料的设计	213
五、碳纤维结构隐身材料	215
第四节 树脂基透波复合材料	217
一、透波材料基础	217
二、树脂基透波复合材料	219
三、典型的树脂基透波复合材料	222
第五节 树脂基装甲防护复合材料	226

一、轻型装甲用纤维复合材料·····	226
二、防弹纤维复合材料最佳树脂含量·····	229
三、防弹复合材料性能·····	231
四、混杂纤维复合材料及其弹道性能·····	233
五、新型抗弹纤维复合材料·····	236
第六节 树脂基耐热耐烧蚀复合材料·····	241
一、酚醛耐热耐烧蚀复合材料·····	241
二、有机硅耐热耐烧蚀复合材料·····	254
三、聚芳基乙炔耐烧蚀耐热复合材料·····	258

第五章 树脂基纳米复合材料 ····· 263

第一节 纳米增强改性剂·····	263
一、纳米增强黏土改性剂·····	263
二、纳米碳酸钙增强改性剂·····	264
三、无机纳米粒子增强改性剂·····	265
四、纳米碳管增强改性剂·····	266
五、纳米纤维增强改性剂·····	267
第二节 热固性树脂基纳米复合材料·····	269
一、环氧树脂基纳米复合材料·····	269
二、酚醛树脂基纳米复合材料·····	274
三、不饱和聚酯基纳米复合材料·····	277
四、聚氨酯基纳米复合材料·····	280
第三节 热塑性树脂基纳米复合材料·····	283
一、聚酰胺纳米复合材料·····	283
二、纳米 SiO_2 /聚碳酸酯复合材料·····	289
三、纳米 CaCO_3 /聚甲醛复合材料·····	291
四、聚对苯二甲酸乙二醇酯纳米复合材料·····	293
五、聚对苯二甲酸丁二醇酯纳米复合材料·····	297
六、纳米蒙脱土/聚对苯二甲酸丙二醇酯复合材料·····	301
第四节 特种树脂基纳米复合材料·····	303
一、聚酰亚胺纳米复合材料·····	303
二、聚四氟乙烯纳米复合材料·····	309
三、聚苯硫醚纳米复合材料·····	311
四、聚醚醚酮纳米复合材料·····	312
第五节 本征聚合物基纳米复合材料·····	313
一、纳米黏土改性聚苯胺复合材料·····	313

二、聚吡咯纳米复合材料	314
三、纳米 TiO_2 /聚乙烯吡咯烷酮导电复合材料	316

第六章 陶瓷基复合材料 318

第一节 基础知识	318
一、简介	318
二、原材料	319
第二节 陶瓷基复合材料制造技术	323
一、连续纤维增强陶瓷基复合材料制造技术	323
二、晶须(短纤维)增强陶瓷基复合材料制造技术	328
三、颗粒分散型陶瓷基复合材料制造技术	332
第三节 陶瓷基结构复合材料	336
一、连续纤维增强陶瓷基结构复合材料	336
二、晶须(短纤维)增强陶瓷基结构复合材料	340
第四节 陶瓷基功能复合材料	344
一、陶瓷基透波复合材料	344
二、梯度陶瓷装甲防护材料	347
三、陶瓷基耐热耐烧蚀复合材料	353
第五节 陶瓷基纳米复合材料	357
一、纳米颗粒复合陶瓷的强韧化机制	357
二、沉淀法制备高性能纳米 $\text{SiC}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷基复合材料	359
三、添加法制备纳米 Al_2O_3 陶瓷基复合材料	360
四、微波烧结法制备纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ (3Y) 陶瓷基复合材料	361
五、刀具用纳米 Al_2O_3 /亚微米 TiC 复合材料	363
六、纳米 $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 粒子增强复合材料	364
七、纳米 $\text{TiO}_2\text{-MnO}_2$ 复合材料	366
八、纳米 TiN/TiC 复合材料	368
九、 $\text{TiC}/\text{Si}_3\text{N}_4$ 纳米复合材料	370

第七章 金属基复合材料 372

第一节 金属基复合材料制造技术	372
一、简介	372
二、固态制造技术	373
三、液态制造技术	376
四、原位自生成技术	383

五、物理气相沉积技术·····	384
六、化学气相沉积技术·····	385
七、电镀、化学镀和复合镀技术·····	385
第二节 纤维增强金属基复合材料·····	386
一、简介·····	386
二、碳纤维增强金属基复合材料·····	388
三、纤维增强铝基复合材料·····	390
四、石墨纤维增强铜基复合材料·····	393
第三节 颗粒增强金属基复合材料·····	394
一、碳化硅颗粒增强金属基复合材料·····	394
二、 $\text{Al}_2\text{O}_3/6-6-3$ 青铜复合材料·····	397
第四节 金属基纳米复合材料·····	400
一、铁基纳米复合材料·····	400
二、铝基纳米复合材料·····	402
三、纳米 SiO_2 改性 Cu、Co 基复合材料·····	409
四、纳米 TiO_2 -Co 复合材料·····	411

第八章 碳/碳复合材料····· 414

第一节 基础知识·····	414
一、简介·····	414
二、性能特点·····	414
三、碳/碳复合材料的应用·····	415
第二节 碳/碳复合材料制造技术·····	420
一、碳/碳复合材料用碳纤维·····	420
二、碳/碳复合材料的基体先驱体·····	422
三、碳/碳复合材料的制备·····	426
第三节 耐烧蚀碳/碳复合材料·····	436
一、碳/碳复合材料-酚醛双基体烧蚀防热材料·····	436
二、钎改性碳/碳烧蚀复合材料·····	438
三、碳/碳复合材料固体发动机喷管·····	439
第四节 碳/碳复合材料刹车盘(片)与生物应用·····	441
一、航空用碳/碳复合材料刹车盘·····	441
二、用梯度式 CVD 致密技术制造碳/碳复合材料刹车盘·····	444
三、用改进型 CVD 工艺制造碳/碳复合材料刹车盘·····	444
四、碳/碳复合材料的生物应用·····	446

第九章 智能复合材料	450
第一节 基础知识	450
一、基本概念与范畴	450
二、主要品种与分类	451
三、基本特点	452
四、作用与长远意义	453
第二节 智能复合材料结构与系统	454
一、基础材料	454
二、结构与系统	459
三、应用	463
第三节 智能压电材料	467
一、主要品种、结构与性能	467
二、在智能复合材料系统中的作用	468
三、应用	469
第四节 智能磁致伸缩材料	471
一、简介	471
二、智能磁致伸缩材料的应用	471
三、超磁致伸缩合金	474
第五节 智能形状记忆材料	476
一、形状记忆合金	476
二、形状记忆陶瓷	479
参考文献	481

第一章

复合材料基础

第一节 基础知识

1. 基本概念与范畴

所谓复合材料是指那些由两种或多种“不同质、不同性、不同相”的材料，通过适当的方法，将其组合成具有整体结构和优良使用性能的一类材料。先进复合材料是那些具有高比强度、高比模量、耐烧蚀、抗侵蚀、抗核、抗粒子云、透波、隐身、抗高速撞击、防弹及良好的电磁功能特性的复合材料。经过多年的研究与应用，目前已基本形成以树脂基复合材料、陶瓷基复合材料、金属基复合材料、碳/碳复合材料、功能复合材料、纳米复合材料和智能复合材料等构成的新型复合材料体系。

2. 主要类型与分类

复合材料品种较多，性能各异，用途广泛，其分类方法也不尽一致，常用的分类方法有：按基体分类、按增强体（材料）分类和按增强体形态分类的方法。

（1）按基体分类法 按基体分类可分为树脂基复合材料、陶瓷基复合材料、金属基复合材料、碳/碳复合材料和智能复合材料等。

（2）按增强体分类法 按增强体分类可分为纤维增强复合材料、颗粒（填料）增强复合材料、混杂增强复合材料、纳米增强复合材料与智能复合材料等。

（3）按增强体形态分类法 按增强体形态分类可分为连续纤维增强复合材料、短切纤维或晶须增强复合材料、颗粒或填料增强复合材料、纳米增强复合材料与智能复合材料等。

第二节 复合材料的特点与优势

1. 制品轻质高强，具有突出的比强度和比模量

复合材料，特别是纤维增强制品相对密度仅有 1.4~2.0，只有普通钢的 1/4~1/6，比铝合金还轻 1/3，而力学性能却达到或超过普通钢的水平。如玻璃纤维（以下简称玻纤）增强环氧复合材料拉伸和弯曲强度达 400MPa 以上。复合材料的比强度和比模量是金属材料无法比拟的，碳纤维增强环氧复合材料比强度为 $1.03 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ，比模量为 $1.0 \sim 1.5 \times 10^9 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ，而普通钢的比强度为 $0.13 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ，比模量为 $0.27 \times 10^9 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ，可见复合材料的比强度比钢高 3~8 倍，比模量高出 3~6 倍。比强度（拉伸强度/密度之比）和比模量（弹性模量/密度之比）对于导弹、火箭和空间技术是极为重要的参数。

另外，C/C 复合材料相对密度也低于 2.0 以下，其优越的耐高温性、耐烧蚀性是弹药发动机、热机等不可缺少的优质材料。

纳米复合材料的相对密度更低，树脂基纳米复合材料的相对密度均低于 1.5。

2. 材料的形成与制品的成型同时完成

复合材料的生产过程,也就是复合材料制品的生产过程。在复合材料制品的成型中,增强材料的形状虽然变化不大,但基体的形状有较大改变。复合材料的工艺水平直接影响材料或制品的性能,如复合材料的薄弱环节是层间剪切强度,它除与纤维的表面质量有关外,重要的影响因素是制品中的孔隙率。试验表明,当制品孔隙率低于4%时,孔隙率每增加1%,层间剪切强度降低7%。而孔隙率与工艺操作水平密切相关。又如在各种热固性复合材料的成型方法中都有固化工序,为使固化后的制品具有良好的性能,首先应科学地制订工艺规范,合理确定固化温度、压力、保温时间等工艺参数,这些参数主要决定于选用的树脂体系。工艺过程中对工艺参数的控制直接影响制品的性能。成型过程中纤维的预处理(物理或化学方法的处理),纤维的排列,驱除气泡的程度,是否挤胶,温度、压力、时间控制精确度等都直接影响制品性能。工艺方法的确定与制品结构有关,应该根据制品结构和使用受力情况来选择成型工艺。如成型单向受力杆件和梁应采用拉挤法,因为拉挤成型可保证制品在顺着纤维方向上具有最大的强度和刚度;板壳构件可采用连续纤维缠绕工艺,以实现各个方向具有不同的强度和刚度的要求。也可选取纤维织物(或方格布、预浸料或无纬布)铺叠得到各向异性的制品。对于载荷情况不很清楚或承受随机分布载荷的制品,选用短切纤维模压、喷射等成型方法可以获得近似各向同性的制品。利用复合材料形成和制品成型同时完成的特点,可以实现大型制品一次整体性成型,从而简化了制品结构并且减少了组成零件和联接零件的数量。这对减轻制品重量、降低工艺消耗和提高结构使用性能十分有利。

3. 可设计性、可配制性显著

树脂基体属线型高分子材料,具有可塑性,是一种可改变其原料种类、数量比例和排列方式的材料。可根据最终制品的应用要求和环境条件,任意设计原材料配方,配制出适应于不同要求的材料体系。此类材料的可设计、可配制性主要通过以下途径得以实现。

(1) 可根据产品性能要求,选择适当的树脂基体。为了加工方便或提高基体树脂的特性,还可采用改性技术(如掺混、合金化、复合化等手段)对基体树脂进行改性,以满足制品的使用要求为准。

(2) 根据制品设计要求,或进一步提高产品质量,应选择适当的增强材料(如玻纤、芳纶、碳纤维、超拉伸聚乙烯纤维等)、填料和其他助剂等来制备复合材料。

(3) 利用先进的增强技术(如长纤维增强、混杂增强、增强材料与填料复合添加等技术),通过对纤维与填料表面的适当处理就可制备界面性能好、整体效果优良的高质量产品。

(4) 通过改变纤维的排列、取向,也可使材料适应于不同方向强度设计要求。

(5) 改善树脂与纤维界面状况,以防止介质的渗透和扩散而引起的制品脱层,延长热固性塑料制品的使用寿命。

(6) 采用多层复合结构,制成厚层热固性塑料制品结构,以适应不同层次对热固性塑料制品强度及其他性能的需求,充分发挥材料的作用。

(7) 采用内嵌金属嵌件的方法,制备可满足特殊强度要求的制品。

4. 成型比较方便

因为树脂在固化前具有一定的流动性,纤维很柔软,依靠模具容易形成要求的形状和尺寸。有的复合材料可以使用廉价简易设备和模具,不用加热和加压,由原材料直接成型出大尺寸的制品。这对单件或小批量产品尤为方便,这是金属制品工艺无法相比的。一种复合材料制品可以用多种方法成型,选择余地大。在选择成型方法时应该根据制品结构、用途、生产量、成本以及生产条件综合考虑,选择最经济和最简便的成型工艺。尽管成型复合材料制

品的工艺比较简单,但具体工艺操作要求比较严格。如果材料组分、配比、纤维排布(或分布)不按设计要求,操作中形成皱折、气泡或其他缺陷,都将影响制品的质量。应当尽量避免那些降低性能的工艺操作(如钻孔和切断纤维等),尽量减少和消除性能薄弱区。如果成型过程中热固性基体的复合材料制品出现缺陷,多数情况会因不可修复而报废,材料也无法回收再利用。当前复合材料的原材料成本较高,尤其是用在国防上的高级纤维和特种树脂价格昂贵,只有在操作上小心仔细才能减少和避免浪费。工艺过程中操作人员要接触化学药品、飞纱和粉尘,生产中要采取防护措施和注意劳动卫生,保证人身安全和身体健康。

5. 原材料价格低廉,树脂可添加性好

复合材料(树脂基、碳基和陶瓷基复合材料以及纳米复合材料)中可添加大量的增强材料(如玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维等)和填料(如木粉、纸浆、矿石粉、布屑等)。这些填料来源广泛、价格低廉,对降低原材料成本具有很大的作用。

6. 尺寸稳定性好

由于复合材料,特别是热固性树脂基体在加工过程受热作用发生交联形成体型网状结构,其制品在常态下尺寸稳定性好,成型之后发生的后收缩性也很小。制品在长时间的连续载荷作用下其形状和尺寸变化极小,即蠕变性小。其蠕变性能主要取决于载荷的大小、温度高低和加载时间的长短诸因素。在固定的载荷和温度条件下,长时间加载后热固性塑料的蠕变量要比热塑性塑料小得多。

7. 优越的耐热耐高温性

复合材料,特别是热固性树脂基复合材料固化后再也不能软化,其制品耐热性相当稳定,用 1.86MPa 的载荷测定,一般其热变形温度在 150~260℃;而且纤维增强的热固性塑料属优良的绝热材料,其热导率一般为 0.35~0.47W/(m·K),只有金属的 1/100~1/1000,可用作良好的隔热材料和瞬间耐高温材料,材料的热变形温度可达 350℃,可用作常温和高温结构材料。玻纤/酚醛是火箭、导弹发动机优良的绝热材料。而 C/C 复合材料耐热、耐高温特性可达 2500℃左右。

8. 卓越的耐腐蚀性

树脂基复合材料与普通钢的电化学腐蚀机理不同,它不导电,在电解质溶液中不会溶解出离子,因而对大气、水和一般浓度的酸、碱、盐等介质具有良好的化学稳定性,特别是在非氧化性强酸和相当广泛的 pH 值范围内的介质中都具有良好的稳定性。因此目前广泛用于制造耐腐蚀制品,以用于不锈钢不能承受的某些介质(如盐酸、氯气、二氧化碳、稀硫酸、次氯酸钠和二氧化硫等)的腐蚀,并发挥了良好的作用。

9. 良好的表面特性

复合材料与化学介质接触时表面一般很少有腐蚀物产生,也很少结垢,因此常用其制造流体管道,其管道内阻力很小,摩擦系数低,节约了大量的动力。由于复合材料一般不会像金属那样容易生成金属离子污染介质,所以这也是食品和医药行业广泛采用复合材料制品的原因所在。

另外,复合材料具有很高的摩擦(μ)极限值,在水润滑条件下,其摩擦系数很小,约 0.01~0.03,所以也是耐磨制件的优选材料。

鉴于复合材料的上述优越特性,其多用于制造机械结构件、绝缘件、高频受力件和其他功能性结构部件。

随着新型树脂改性技术的发展,如纳米改性、互贯网络改性和其他功能化改进技术的发展,以及新型增强材料如碳纤维、芳纶纤维、超拉伸聚乙烯纤维、功能陶瓷纤维、PBO(聚苯并双噁唑纤维等)的使用,国外研制出纤维增强环氧复合材料战车车体,武装直升机

机体、舰艇壳体和全复合材料汽车等的新工艺。这些研究成果的出现将会把复合材料的应用和制品的质量提高到一个更高水平。

第三节 复合材料的功能作用

一、在国防建设中的功能作用

复合材料特别是树脂基复合材料是军用新材料技术发展的重点材料。它不仅具有结构材料优良的结构性能、良好的综合特性,而且还具备某些功能材料的特性(如耐腐蚀、不锈蚀、隐身性、电磁波屏蔽性、绝热耐热和优良的电绝缘性等),质量轻、比强度、比模量高等性能,是武器装备实现轻量化、小型化、功能化以及智能化的重要的材料技术,具有极其重要的军事实用价值,也是未来武器装备制造中极为重要的结构和功能材料。

1. 利用复合材料密度低,比强度、比模量高的特性,使武器装备轻量化与小型化

复合材料已应用多年,其轻质高强特性早已被军方认可,这是那些对质量要求十分苛刻的武器装备系统可选用的最佳材料。

(1) 航天武器装备 20世纪60年代初期,美国采用玻璃纤维增强环氧复合材料制备了“北极星”导弹第二级火箭发动机壳体,使其质量比原金属壳体质量减轻了310kg以上,使其射程由1600km提高到2400km。而采用石墨纤维增强环氧复合材料制备的三叉戟导弹仪器舱,比原用铝制备的仪器舱减重146kg,减重率达30%,且简化了部件组装工艺。还用此复合材料制备了陀螺仪支架、电池支架、发射筒支环等55个部件,使得此导弹增程达340km以上。美国的三叉戟-II型、飞马座和侏儒等导弹也大量采用碳纤维增强树脂基复合材料制备,使弹体质量减轻30%以上。美国爱国者和战斧导弹的仪器舱和发射筒等重要部件也采用高性能纤维增强树脂基复合材料制备,使其结构质量大幅降低。据设计计算,一枚洲际导弹如用高性能树脂基复合材料取代现用金属结构,可使其质量减轻300kg以上,射程提高1000km。

目前国外军事强国导弹弹头有效载荷与结构质量比已达4:1,固体火箭发动机质量比已达0.92~0.93。这都是采用高性能树脂基复合材料的成果。

(2) 航空武器装备 军用飞机也是最早采用复合材料的武器装备之一。作战飞机的机翼蒙皮、机身、垂尾、副翼、水平尾翼、侧壁板、隔框、翼肋和加强筋等主承力构件大量采用高性能纤维增强树脂基复合材料制备,不仅明显减轻了飞机结构质量,改善了机体总体结构和外形,而且减少零部件数量和组装工序,使飞机整体性和可靠性得到显著改善。就其减重效果而言,一翼梁采用铝合金设计为220kg,用纤维增强树脂基复合材料制备为157kg,减重率为28.6%;加强筋用铝合金制备为67.9kg,用纤维增强树脂基复合材料制备为58.4kg,减重率为14%;蒙皮用铝合金制备为87.5kg,用纤维增强树脂基复合材料制备为16.6kg,减重率为29.5%;而铝合金口盖为18.5kg,纤维增强树脂基复合材料口盖则为16.6kg,减重率为10%左右。

(3) 陆军武器装备

① 坦克装甲车辆 坦克装甲车辆,特别是主战坦克是陆军主战武器装备,也代表一个国家的武器装备水平和威慑力。目前主战坦克战斗全重超过60t以上,已超过地面武器装备极限质量,再无限地加厚装甲,会给坦克机动性和生存力带来极大的危害,坦克装甲车辆轻量化已势在必行。轻量化的途径除结构设计外,关键技术仍是采用轻结构材料技术。

美国和英国近年来研制并通过演示试验的全纤维增强树脂基复合材料装甲车车体,与原

金属车体相比,可减重 33%。为采用高性能纤维增强树脂基复合材料制备坦克装甲车辆奠定了技术基础。

各国目前应用的复合装甲,由于采用了纤维增强树脂基复合材料,其抗弹能力比均质钢装甲有了明显提高,而且减轻质量 30%。用纤维增强树脂基复合材料为结构材料的电(磁)装甲,又进一步提高了抗弹水平,在使车体无损伤的情况下,可抗御大口径弹药或串联式弹药的攻击。最新研制的集成装甲,是采用树脂基复合材料成型的基本原理,将金属、陶瓷、橡胶组合成一装甲体系,其中的纤维增强树脂基复合材料主要起保持装甲结构的整体性和提高抗弹性能及隐身功能的作用。在同等体积下,比均质钢装甲减重 30%~50%。

美国 M1A1 主战坦克采用树脂基复合材料制备的 22 个零部件,与以前所采用的金属部件相比,减轻近 5t,降低制造成本 1.2 万美元。

② 战术导弹火箭 弹箭武器装备是对减重要求十分迫切的装备,轻质结构材料应用较早,也比较普遍。世界各国的反坦克导弹、火箭和防空导弹等均大量采用树脂基复合材料制备。所采用的树脂基复合材料,以玻璃纤维增强树脂基复合材料为主,芳纶增强树脂基复合材料和碳纤维增强树脂基复合材料也开始应用。可以说,战术弹箭已基本实现树脂基复合材料化。其质量比采用金属结构件减轻 40%~65%。特别是法国的“阿匹拉斯”反坦克火箭发动机壳体和发射筒采用芳纶增强树脂基复合材料制备,其他结构件采用通用树脂基复合材料和改性通用树脂基复合材料制备,除其中装药和战斗部及发动机外,几乎均用树脂基复合材料制成。其质量仅 3kg。

③ 火炮和枪械 火炮制造采用树脂基复合材料是从附件以树脂基复合材料代替金属开始的。到目前,已研制成功由碳纤维/环氧增强树脂基复合材料复合炮管、炮管延伸管等关键部件,其质量仅有钢炮管质量的 1/3。被称为战争之神的大口径火炮,由于本身质量极大,机动性较差,用树脂基复合材料代替原用钢构件,就能显著地减轻质量,提高机动性。例如,一个 122mm 口径的加农炮,原来尾臂装配重 1115kg,改用玻璃纤维树脂基复合材料后只有 445kg,比原来减少了 55%。再如步兵用迫击炮原来钢制底盘重 41kg,改用树脂基复合材料只有 28kg,一个战士可以背在背上机动。

枪械用树脂基复合材料是从以树脂基复合材料代替木制材料应用开始,而后,以树脂基复合材料代替金属,制备结构件和承力件。目前正在研制在钢衬筒上缠绕金属纤维或碳纤维/环氧的复合枪管。到目前为止,世界各国的枪械枪托、握把、护木、弹匣、刺刀等均采用尼龙制造,使枪体质量降低 50%以上,使用性能大幅度提高。最为典型的是奥地利的 AHG 步枪,其中 30 个零部件用 9 种树脂基复合材料制成,占全枪零件的 16%。法国的 FAMA3 步枪中 33 个部件用尼龙制成,占全枪部件的 30%。以上两种枪质量减轻程度高。美国雷明顿兵工厂研制出的全尼龙枪除枪管和自动结构外,其他部件均用尼龙制造而成。轻量化程度更高。

④ 单兵装具 树脂基复合材料在单兵装具制造中的广泛应用,将会引起装备的重大革新。战士的头盔由钢制改成工程塑料,不仅质量减轻,同时还提高防护能力,在阵地上构筑单人掩体,传统的办法是用锹镐挖坑填土,不仅费力,还要消耗时间,目前已用树脂基复合材料做成对步枪子弹有很好的防护能力、可随身携带作为装具的掩体,临战时展开即可参加战斗。此外还有用树脂基复合材料做成防弹衣、防弹盾牌、防地雷的防爆靴等,这些用树脂基复合材料制造的单兵装具一旦装备部队,无疑会大大地提高战士的作战能力。

2. 利用复合材料的功能特性使武器装备功能化

(1) 隐身性 复合材料特别是那些具有导电或导磁性能的导电树脂基复合材料和磁性树脂基复合材料对雷达波反射率低,且具有很高的吸波特性。一般认为,这类功能树脂基复合

材料对红外线和雷达波以及电磁波反射仅 30%，而吸波能力为 70%，且噪声小、振动低，隔热性优良。因而其良好的隐身功能，可防雷达波热成像仪等光电探测系统与热寻的弹头探测和寻的。运用树脂基复合材料可改性的特点，在加工过程中加入高性能吸收剂或纳米剂可制成武器装备隐身用结构件。

美国的 F-117A 飞机上采用了纤维增强树脂基复合材料为主体的结构吸波材料，使雷达反射截面降低到只有 0.1m^2 。

能够吸收雷达波的结构隐身材料，在设计中可能有如下几个措施：①在基体材料构筑环形或方形的电阻材料几何图形中，制成复合材料蜂窝结构，在蜂窝中填充能吸收电磁波的铁氧体材料；②在结构表面制成小的圆柱、半球或方形的凹坑，其中填充吸收材料；③在树脂基体材料中镶嵌环形天线等吸收单元。

另外，利用纤维增强树脂基复合材料的非均质性、可透射雷达波的特点，常用树脂基复合材料制造飞机或导弹雷达。

(2) 可保障战略武器突破热障难题 众所周知，导弹弹头是导弹的战斗部，在飞向敌方目标冲落时会受到高温气流的摩擦而产生极高温度，例如射程为 8000~12000km 的洲际导弹鼻锥驻点温度可达 10000°C ，这在战略武器上称为热障，不突破热障，威力再大的战斗部在未到达敌方目标之前都将被烧毁。早期的防热措施是采用高热容材料的热沉式结构和复杂的发汗冷却结构，这些办法使得弹头质量很大，影响战斗效应。采用纤维增强塑料烧蚀防热结构不仅有效地解决了防热问题，还减轻了头部质量。在未来战争中由于空中拦截技术的发展，要求导弹的弹头小型化，并可多头分导，能耐高温、抗核爆、抗中子浸沏、抗强激光，并具有隐身等功能，预计解决这一问题的唯一途径是在抗烧蚀纤维增强树脂基复合材料的基础上添加多种材料制成具有多功能的纤维增强树脂基复合材料。

另外，还可将纤维增强树脂基复合材料作为导弹和火箭发动机隔热绝热材料、耐烧蚀材料等。

3. 利用复合材料的机敏特性开发智能材料与结构使武器装备智能化

利用压电树脂基复合材料或压电陶瓷增强树脂基复合材料可以制备智能材料与结构中的驱动机构和传感机构。利用压电聚合物或增强压电聚合物材料制成的高速驱动机构可把电能转化为机械能，且不发生相变，而是通过改变材料的自发偶极矩来改变材料尺寸，此种效应可产生 $200\sim 300\text{ }\mu\text{m}$ 应变，88 层压电增强树脂基复合材料制成驱动器可在 20ms 内产生 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的应变位移。且可成膜，加工性良好。将这种材料制成传感器或自适应结构可感知压力、温度、冲击、弯曲等作用，并可利用不同模式识别出边、角、棱等几何特征，且具备热释放效应和温度传感作用。配合上形态化材料、电磁流变材料和电致材料技术可组成智能结构。此材料与结构在武器装备中具有很高的应用价值。

美国、德国等已研制出智能复合装甲和智能反应复合装甲，从被动装甲防护向主动装甲防护迈进了一大步。美国陆军预算投资 300 万美元开始研究把反应装甲与短距离传感器网络及一台计算机等组成一体，制成主动反应装甲系统。美陆军还把智能材料系统用于 M1 坦克防 120mm 动能弹、50mm 动能弹。德国已研制出制备计算机或火控系统的薄膜传感器、冲击传感器和加速传感器的被动装甲及反应装甲，并将其改造为主动装甲。英国也研制出类似的智能装甲。

美国用压电复合材料制造出直升机的固态自适应旋翼，这种智能压电材料应用于直升机后其隐身能力提高 2 倍，机动性提高 30%，速度提高 15%，可靠性大有增强。

美国运用电致变色高分子材料设计出自动变色服。这是采用电致变色织物制成的，可随外界环境变化而改变颜色，与背景保持一致，大大提高了伪装功能。

随着武器装备的智能化进程，智能材料系统将会发挥越来越大的作用。