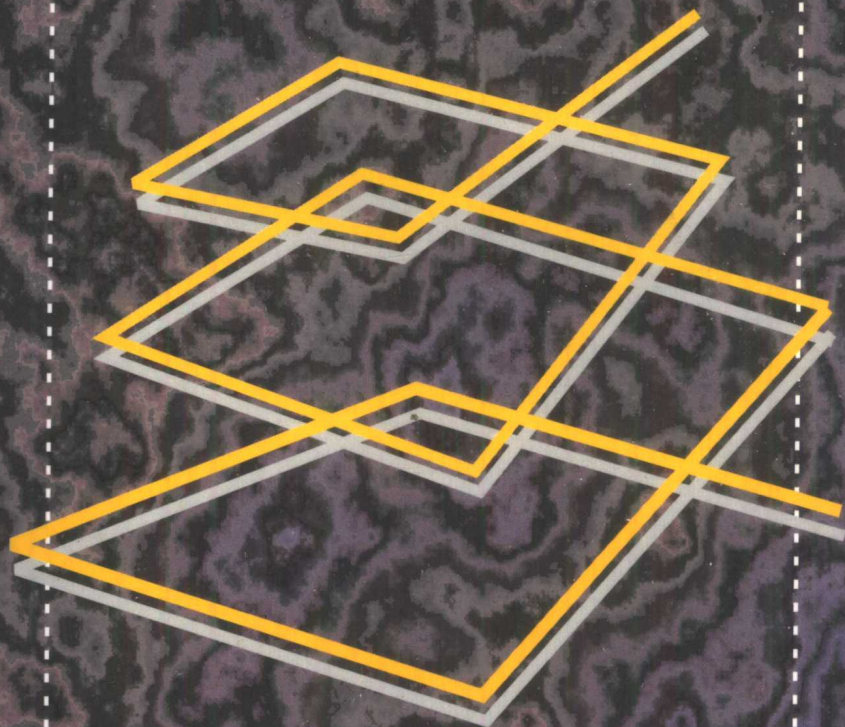


# 编织结构复合材料

## 制作、工艺及工业实践

杨 桂 敖大新  
张 志 姚学锋 等 编著



科学出版社

# 编织结构复合材料制作、 工艺及工业实践

杨 桂 敖大新 张志勇 姚学锋 等 编著

科 学 出 版 社

1999

CAH23/02  
序

1995年11月,我和七位专家组成的考察团到深圳对中华复合材料制品有限公司的碳纤维增强复合材料项目进行了实地考察,对该公司采用高新技术和先进材料对传统产业进行改造,生产出在国际上有竞争能力的产品,深受鼓舞。这不但是我国科学技术的一个发展方向,也是我国传统产业发生根本改变的一个重要途径。总结该项目所取得的经验,对推动我国科学技术转化为生产力,传统产业如何利用先进技术进行改造,无疑都有重要参考意义。

碳纤维增强复合材料是当前先进材料的前沿之一,它在航空、航天、汽车及高级体育用品等许多行业都得到应用,而且今后用量愈来愈大,要求愈来愈高,并将扩大其应用范围,很有发展前景。所以,将该项目的经验总结成书,对从事复合材料工作的科技人员、教师和工程技术人员在提高生产实践经验和理论联系实际等方面都会有很大帮助,对复合材料的认识也将发生改变,从而对碳纤维增强复合材料的发展也会起到推动作用。

材料涉及的领域极为广泛,品种繁多,形式各异,尤其是新材料在不断的研究开发,所以希望能有更多的科研成果转化为生产力的新葩出现。

师昌绪

## 前 言

编织工艺是人类发展史上使用最早的纺织技术之一。但是,将编织作为一种用于工程结构的工艺来研究,是 40 年代在美国开始的,而把编织技术与复合材料有机地结合是 70 年代以后的事情。由于纤维与纤维相互编织在一起形成整体的结构,编织结构复合材料显示出其独特的整体性,在剪切强度和抗冲击损伤等性能方面均优于层合复合材料。因此,研究开发编织结构复合材料日益引起人们的重视。

美国是研究编织结构复合材料最早的国家之一。进入 80 年代,二维编织设备在美国已得到了广泛应用。笔者是 1986 年作为访问学者到美国费城 Drexel 大学从事二维三轴向大型编织机的 CAD/CAM 系统的研究。研究期间,笔者得到了美国复合材料编织技术的先驱、Drexel 大学的 Frank Ko 教授的精心指导,掌握了编织结构和树脂传递模塑(RTM)复合材料成型工艺。编织+RTM 的复合材料制造技术是 80 年代末 90 年代初的成果,也是一种先进的接近无余量的复合材料制造技术。

1988 年,笔者在天津纺织工学院创立了复合材料研究室,开展国内编织结构复合材料的研究工作。在一次国内最高能量的打靶试验中,有笔者参加,与航天部 703 所合作研制的 15 片编织结构复合材料靶片,是所有参加试验靶片中唯一保持原形的靶片。这一结果为编织结构复合材料在航空航天上的应用奠定了基础。于是,笔者在天津纺织工学院建立了复合材料研究中心,致力于编织结构复合材料的研究与开发。

为了将科研成果转化为生产力,笔者 1992 年南下深圳,创建了中华复合材料制品(深圳)有限公司。经过两年的创业,终于开发出了一种用于自行车车架的可焊接编织结构碳纤维复合材料管(WCF 管)产品,同时还研制了我国第一台 144 线轴大型编织机,完成了将 WCF 管焊成车架的研究工作。

1995年,WCF管及其生产线通过了深圳市科学技术局和经济发展局以中山大学曾汉民教授为首的专家组主持下的科技成果和新产品两项鉴定。以中国科学院院士、中国工程院院士、中国科学院技术科学部主任、中国工程院副院长师昌绪教授为首的七位专家组成的考察团考察了WCF管的研制和工业化生产情况,作出了以下评价:“该项目具有国际先进水平。它不仅体现了从科研到生产的转移,而且具有广阔的发展前景,是我国用先进材料改造传统产业取得成功的一个典型范例。”

本书是以WCF自行车研制为主线,将理论与生产实际相互贯通,融为一体的专著。书中的一些经验数据和资料都是经过反复试验而得出的,具有很高的实用价值。本书由笔者组织并与张志勇、姚学锋、敖大新一起负责各章节具体编写,最后由笔者统一编辑整理而成。

本书是中华复合材料制品(深圳)有限公司产品开发经验的总结。WCF管主要是以下人员共同研制开发:杨桂、杨景、敖大新、张志勇、郭雷、万叔禹、陆培芳、朱国琪。在此,笔者向他们表示感谢。同时,还要感谢美国费城Drexel大学的Frank Ko教授对笔者的指导和关心;感谢贾路桥教授,吴远秀教授,黎义教授,刘方龙教授和黎观生教授,王震鸣教授等的指导和帮助。

笔者特别要感谢中国工程院副院长师昌绪教授对WCF管研究的关心,并热情为本书作序。

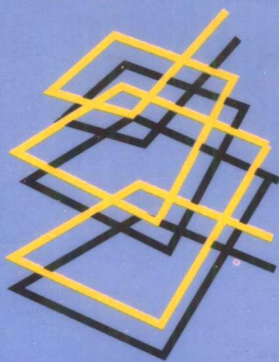
编织结构复合材料是一种新兴的复合材料制造技术,将不断发展前进。限于作者水平,书中难免有缺点或不完善之处,诚恳欢迎读者批评指正。

杨桂

1998年7月10日

(TB-0164.0101)

责任编辑：华凤媛  
封面设计：卢秋红



ISBN 7-03-006726-6



9 787030 067265 >

ISBN 7-03-006726-6/TB · 164

定 价： 18.00 元



1995年12月，江泽民总书记视察中华自行车(集团)股份有限公司，并喜获该公司所赠的WCF自行车



1995年11月，以中国科学院院士、中国工程院院士、技术科学部主任、中国工程院副院长师昌绪教授为首的专家考证组考察WCF管及WCF自行车生产线



1997 年，邹家华视察 WCF 自行车生产情况



1995 年，原广东省委书记谢非和原深圳市委书记  
厉有为听取 WCF 管生产汇报

# 目 录

|                           |    |
|---------------------------|----|
| <b>第一章 概论</b> .....       | 1  |
| 1.1 引言 .....              | 1  |
| 1.2 复合材料 .....            | 3  |
| 1.2.1 概述 .....            | 3  |
| 1.2.2 复合材料的分类 .....       | 4  |
| 1.2.3 复合材料的特点及优越性 .....   | 7  |
| 1.2.4 复合材料的应用 .....       | 10 |
| 1.3 先进复合材料 .....          | 11 |
| 1.3.1 概述 .....            | 11 |
| 1.3.2 先进复合材料的特点 .....     | 12 |
| 1.3.3 先进复合材料的应用 .....     | 12 |
| 1.4 编织结构复合材料的特点和性能 .....  | 14 |
| 1.4.1 概述 .....            | 14 |
| 1.4.2 编织结构复合材料的力学性能 ..... | 14 |
| 1.4.3 编织结构复合材料的其它性能 ..... | 17 |
| 1.5 编织结构复合材料制造技术 .....    | 18 |
| 1.5.1 编织技术 .....          | 18 |
| 1.5.2 编织机 .....           | 19 |
| 1.5.3 编织复合材料的成型技术 .....   | 20 |
| 1.6 编织结构复合材料的应用 .....     | 21 |
| 参考文献 .....                | 22 |
| <b>第二章 编织结构复合材料</b> ..... | 24 |
| 2.1 纺织结构复合材料概述 .....      | 24 |
| 2.1.1 纺织科学中织造的分类 .....    | 24 |
| 2.1.2 纺织复合材料的成型技术 .....   | 36 |
| 2.2 编织结构复合材料的发展概况 .....   | 37 |

|                                    |            |
|------------------------------------|------------|
| 2.2.1 二维编织结构复合材料 .....             | 37         |
| 2.2.2 三维编织结构复合材料 .....             | 40         |
| 2.2.3 编织结构复合材料的发展和应用 .....         | 40         |
| 2.3 编织结构复合材料的特点及优越性 .....          | 43         |
| 2.3.1 具有传统复合材料的所有优点 .....          | 43         |
| 2.3.2 二维编织结构复合材料的特点 .....          | 43         |
| 2.3.3 三维编织结构复合材料的特点 .....          | 51         |
| 2.4 编织工艺 .....                     | 56         |
| 2.4.1 二维编织工艺 .....                 | 56         |
| 2.4.2 三维编织工艺 .....                 | 60         |
| 2.4.3 控制方程 .....                   | 63         |
| 2.5 编织结构复合材料的应用 .....              | 68         |
| 参考文献 .....                         | 69         |
| <b>第三章 编织结构复合材料的成型技术及其特点 .....</b> | <b>75</b>  |
| 3.1 概述 .....                       | 75         |
| 3.2 编织结构复合材料成型工艺 .....             | 75         |
| 3.2.1 真空浸渍法 .....                  | 76         |
| 3.2.2 编织-拉挤成型 .....                | 77         |
| 3.2.3 热塑性基体编织复合材料的成型 .....         | 79         |
| 3.2.4 预浸纱成型技术 .....                | 83         |
| 3.2.5 树脂传递成型工艺 .....               | 83         |
| 3.3 RTM 成型技术 .....                 | 84         |
| 3.3.1 RTM 的发展过程 .....              | 84         |
| 3.3.2 RTM 概述和总工艺路线 .....           | 86         |
| 3.3.3 RTM 工艺中使用的原材料 .....          | 86         |
| 3.3.4 RTM 用注入设备 .....              | 94         |
| 3.3.5 RTM 模具 .....                 | 98         |
| 3.3.6 RTM 工艺参数 .....               | 106        |
| 3.3.7 RTM 工艺的特点、应用和发展 .....        | 110        |
| 参考文献 .....                         | 112        |
| <b>第四章 WCF 管的设计、生产工艺及其性能 .....</b> | <b>113</b> |
| 4.1 概述 .....                       | 113        |

|            |                             |            |
|------------|-----------------------------|------------|
| 4.2        | WCF 管的设计                    | 113        |
| 4.2.1      | WCF 管设计思想                   | 113        |
| 4.2.2      | WCF 管的结构设计                  | 116        |
| 4.2.3      | WCF 管的设计特点                  | 121        |
| 4.3        | WCF 管的生产工艺                  | 121        |
| 4.3.1      | 泡沫芯的制作工艺                    | 123        |
| 4.3.2      | 编织带的自动化工艺                   | 124        |
| 4.3.3      | 套管工艺                        | 127        |
| 4.3.4      | 注胶固化                        | 128        |
| 4.3.5      | 钢接头的制作工艺                    | 132        |
| 4.3.6      | 粘接前整理工艺                     | 132        |
| 4.3.7      | 粘接工艺                        | 133        |
| 4.3.8      | 粘接后整理工艺                     | 135        |
| 4.3.9      | 成品检验入库                      | 135        |
| 4.3.10     | WCF 管的评价                    | 136        |
| 4.4        | WCF 管的力学性能                  | 137        |
| 4.4.1      | 概述                          | 137        |
| 4.4.2      | WCF 管的力学性能特点                | 139        |
| 4.4.3      | WCF 管的承载能力                  | 140        |
| 4.4.4      | WCF 管的强度、模量                 | 143        |
| 4.4.5      | WCF 管胶接接头的力学问题              | 147        |
| 4.4.6      | WCF 管的疲劳性能                  | 149        |
| 4.4.7      | WCF 管的动态特性                  | 149        |
| 4.4.8      | WCF 管的蠕变特性                  | 155        |
| 4.5        | 结束语                         | 158        |
|            | 参考文献                        | 158        |
| <b>第五章</b> | <b>WCF 自行车车架的设计、生产工艺及性能</b> | <b>161</b> |
| 5.1        | 概述                          | 161        |
| 5.2        | WCF 自行车制作工艺设计要求             | 162        |
| 5.3        | WCF 自行车的设计思路                | 162        |
| 5.3.1      | 力学模型的建立                     | 163        |
| 5.3.2      | 载荷情况                        | 163        |

|            |                            |            |
|------------|----------------------------|------------|
| 5.3.3      | 各种载荷下车架受力变形时吸收应变能的情况 ..... | 166        |
| 5.3.4      | 自行车车架前三角的力学分析 .....        | 167        |
| 5.3.5      | WCF 自行车车架的总体设计 .....       | 167        |
| 5.4        | WCF 自行车车架的焊接工艺 .....       | 169        |
| 5.4.1      | 概述 .....                   | 169        |
| 5.4.2      | 氩弧焊 .....                  | 170        |
| 5.4.3      | 氩弧焊工艺规范 .....              | 170        |
| 5.4.4      | 焊前处理 .....                 | 171        |
| 5.4.5      | 焊前装配 .....                 | 172        |
| 5.4.6      | 最佳焊接工艺 .....               | 172        |
| 5.4.7      | WCF 自行车车架的后处理 .....        | 175        |
| 5.5        | WCF 自行车车架结构的力学问题 .....     | 176        |
| 5.5.1      | WCF 自行车车架的刚度分析 .....       | 176        |
| 5.5.2      | WCF 自行车车架的疲劳特性 .....       | 180        |
| 5.5.3      | WCF 自行车车架的冲击试验 .....       | 182        |
| 5.6        | 结束语 .....                  | 184        |
|            | 参考文献 .....                 | 184        |
| <b>第六章</b> | <b>质量保证体系 .....</b>        | <b>185</b> |
| 6.1        | 概述 .....                   | 185        |
| 6.2        | ISO 9000 .....             | 185        |
| 6.3        | 质量管理保证体系 .....             | 187        |
| 6.3.1      | 质量管理指导思想 .....             | 187        |
| 6.3.2      | 质量管理标准 .....               | 189        |
| 6.3.3      | 质量保证体系硬件 .....             | 194        |
| 6.3.4      | 质量管理体系的运作机制 .....          | 195        |
| 6.4        | WCF 管的质量保证体系 .....         | 197        |
| 6.4.1      | 原材料采购标准 .....              | 197        |
| 6.4.2      | 制造工艺标准要求 .....             | 197        |
| 6.4.3      | WCF 管的标志、包装、运输、储存 .....    | 202        |
| 6.4.4      | WCF 管的力学性能标准 .....         | 203        |
| 6.5        | WCF 自行车的质量保证体系 .....       | 204        |
| 6.5.1      | 引用标准 .....                 | 204        |

|            |                             |            |
|------------|-----------------------------|------------|
| 6.5.2      | 工艺质量保证体系 .....              | 205        |
| 6.5.3      | WCF 自行车质量保证体系 .....         | 205        |
| 6.5.4      | WCF 自行车整体刚度测试标准 .....       | 206        |
| 6.5.5      | WCF 自行车疲劳特性标准 .....         | 206        |
| 6.5.6      | WCF 自行车焊接标准 .....           | 206        |
| 6.6        | 小结 .....                    | 207        |
|            | 参考文献 .....                  | 207        |
| <b>附录一</b> | <b>编织结构复合材料的膨胀特性 .....</b>  | <b>208</b> |
|            | 参考文献 .....                  | 216        |
| <b>附录二</b> | <b>编织结构复合材料的耐腐蚀特性 .....</b> | <b>217</b> |
|            | 参考文献 .....                  | 219        |
| <b>附录三</b> | <b>编织复合材料产品系列 .....</b>     | <b>220</b> |

# 第一章 概 论

## 1.1 引 言

材料、能源、信息是当代社会发展的三大科技支柱,也是一个国家工业先进的标志。特别是材料,涉及的领域极为广泛,与人类社会的关系密切不可分割。高新技术的发展,资源和能源的有效利用,通信与信息进步,工业产品质量与环境保护的改善,人民生活水平的提高等无不与材料紧密相关。可以说,材料是人类从事生产和生活的物质基础,是人类文明的重要支柱。材料的进步,取决于社会生产力和科学技术的发展,同时,材料的发展又推动社会经济和科学技术的发展,因此,材料对于人类和社会具有极为重要的地位。世界各个发达国家都把材料的科学研究、新产品开发、工业化大生产和合理应用视为 21 世纪优先发展的关键领域之一。

就材料本身来说,其品种繁多,除了作为结构材料的金属材料、有机高分子、无机非金属、复合材料外,还有功能材料和锗、硅、某些化合物等半导体材料,以及由分子或原子尺度人工合成的薄膜材料、超晶格材料、原子簇材料等。这些材料所构成的材料群,在世界上许多重要的科技领域,例如航空航天、国防建设、汽车工业、民用飞机、桥梁、建筑以及医疗器材、体育用品等都显示出了广阔的应用前景。

新型材料又称先进材料,指新近研制成功和正在研制中的具有优异性能的材料,是相对于传统材料而言。它是高技术的一部分,同时又为高技术服务。目前,世界上最为关注的新型材料有光电子信息材料、先进复合材料、先进陶瓷材料、新型金属材料、高性能塑料、超导材料等六大类。它们具有以下特点:(1) 新型材料是知识密集、技术密集、资金密集的一类新型产业;(2) 新型材料的

发展与新技术密切相关,在新材料的设计、制备、质量控制、性能检验等方面往往都需应用高新技术,而某些未来的高新技术的实现往往依赖于新型材料的研制;(3) 新型材料是多种学科的相互交叉和渗透的结果;(4) 新型材料的生产规模一般都比较小,品种比较多,更新换代快,价格贵,其产业属于难度较大的产业。因此,新型材料是新技术发展的必要的物质基础,被称之为当代新技术革命的先导。特别是 80 年代以来,新型材料的研制开发得到了世界各国的重视。日本政府把新材料技术作为未来的关键技术,并提出一项为期 10 年、投资 4 亿美元的研究计划。美国在 1989 年 10 月成立了一个专门针对全美新型材料开发的国会核心小组。总之,新型材料的研制与开发,已经与一个国家的工业活力及国防实力建立了密切联系。

我国的新型材料研制工作起步于 50 年代,在核能、卫星发射等高科技领域取得了显著的经济效益和社会效益。据 1988 年不完全统计,新型材料的产值已超过 70 亿元,创利税 15 亿元,创汇 4000 多万美元。同时,国务院把基础材料作为国民经济发展的重点,在国家的“863”高科技发展计划中,新型材料研制为七个重点领域之一。

复合材料作为由有机高分子、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,涉及多学科的交叉、相互渗透、相互结合,为设计者在改善空间结构的性能提供了广泛的可能性,可以满足工程结构日益增长的需要,在许多工程领域中显示了其强大的生命力,已成为近代先进材料的重要组成部分,标志着一个国家的科技水平、经济优势和国防实力。而作为当代高新技术领域中的先进复合材料,又是发展航空航天领域和国防尖端技术必不可少的高技术新型材料,同时在汽车工业、民用飞机、桥梁、建筑以及体育用品等各个方面有着广泛的应用前景,特别是以其优异的性能、较高的科技附加值不断满足高科技产品的发展与要求,其研究深度和应用广度与生产发展速度和规模已成为衡量世界各国科学技术发展水平的重要标志之一。因此,了解复合材料的发展

历史、性能特点,对于进一步推动它们在高科技领域中的开发应用具有重要的意义<sup>[1,2]</sup>。

## 1.2 复合材料

### 1.2.1 概述<sup>[3~15]</sup>

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结合而成的多相新型材料。它不是不同组分材料的简单混合,而是在保留原组分材料的主要优点的情况下,通过材料设计使各组分的性能互相补充并彼此关联,从而获得新的优越性能。

根据复合材料的定义,复合材料中至少应有两相。其一是基体,在整个复合材料中是连续的,主要包含四类材料:高聚物(树脂)、金属、陶瓷(水泥)以及碳;其二是增强体,被基体所包围,主要包括各种纤维和颗粒等。

复合材料的使用已有悠久的历史。例如,公元前二千多年,人们就用草秸增强粘土来建造住房的四壁、屋顶和地面;古埃及人把木板按不同方向排列制成多层木板,并演变为至今仍然广泛使用的胶合板。随着人类社会的不断演化与发展,复合材料的制造工艺也得到迅速改进,奠定了现代复合材料的发展基础。

现代复合材料是以本世纪40年代生产的玻璃钢为标志,可以称之为复合材料发展的第一阶段,但是由于玻璃纤维增强复合材料刚度较低,限制了它在工程结构上的应用。60年代中期,伴随着高强度、高模量的碳纤维、硼纤维的问世,出现了碳/环氧树脂、硼/环氧树脂等先进复合材料,使复合材料发展到一个崭新的阶段,可以称之为复合材料发展的第二阶段。目前,先进复合材料不仅在宇航及飞机材料中应用,而且在所有的现代工业领域都将得到应用。

我国复合材料工业起始于1958年的玻璃钢生产,以后有许多长足进展,应用领域十分广泛。从70年代开始,先进复合材料领域已主要在航空航天范围得到发展。

目前,复合材料已广泛地应用到飞机、火箭、卫星、汽车、火车、赛车、舰艇制造等各个工业领域中,品种已达 10 万余种。随着复合材料科学的进一步发展,复合材料理论研究的不断深入、成本的不断降低、工艺的不断改善、设计水平的不断提高,必将迎来一个规模化的复合材料时代,实现“未来的 21 世纪将是复合材料的时代”这一科学预言。

### 1.2.2 复合材料的分类<sup>[16~22]</sup>

复合材料通常是由一种制成显微形状的材料充分地分散于另一种材料中形成的。前一种组分材料称为分散相,后一种称为基体相。复合材料的种类很多,可按不同的方式分类。

#### 1.2.2.1 按功能分类

##### 1. 结构复合材料

结构复合材料是作为承力结构使用的材料,基本上由能承受载荷的增强体组元与能联结增强体成为整体材料,同时又起传递力作用的基体组元构成。其特点是可根据材料在使用中受力的要求进行组元选材设计,更重要的是还可以进行复合结构设计,即增强体排布设计,能合理地满足需要并节约用材。

##### 2. 功能复合材料

功能复合材料具有某种特殊的物理或化学特性,可根据其功能来分类,如导电、磁性、阻尼、摩擦、换能等。功能复合材料一般由功能体组元和基体组元组成,基体不仅起到构成整体的作用,而且产生协同或加强功能的作用。

#### 1.2.2.2 按性能分类

##### 1. 一般复合材料

一般复合材料又称工程复合材料,主要是指玻璃纤维增强在工程上已广泛应用的复合材料。与先进复合材料相比,制造工艺简单、价格比较便宜,某方面的性能(比如刚度)较差。