



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

复合材料预制体 数字化三维织造成形

单忠德 刘丰 著

非
外
借

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

复合材料预制体 数字化三维织造成形

单忠德 刘 丰 著

机械工业出版社

本书主要从复合材料预制体三维成形技术国内外现状及发展趋势,复合材料预制体数字化柔性导向三维织造成形原理,三维织造成形工艺及复合材料三维织造参数影响规律研究,复合材料预制体数字化三维织造成形装备及典型应用案例等方面进行了系统论述,总结了复合材料预制体柔性导向三维织造成形技术及装备的最新应用基础研究成果,对于推动复合材料预制体三维织造成形技术向大型化、数字化、自动化、高效化、精确化成形方向发展具有重要指导意义。

本书适合从事先进复合材料成形技术与装备研究的工程技术人员使用,也可供高等院校相关专业师生以及科研院所、企业的研究人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

复合材料预制体数字化三维织造成形/单忠德,刘丰著. —北京:机械工业出版社, 2019.2

ISBN 978-7-111-62014-3

I. ①复… II. ①单… ②刘… III. ①复合材料—三维编织—研究
IV. ①TB301.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 028922 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:周国萍 责任编辑:周国萍 刘本明

责任校对:李 杉 封面设计:马精明

责任印制:张 博

三河市国英印务有限公司印刷

2019 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·11.5 印张·218 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-62014-3

定价:79.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

序 1

先进复合材料是航空航天等国家重大型号工程和国民经济发展中一类重要的工程材料，已在航空、航天等领域得到了广泛应用。美国、日本等工业发达国家高度重视并积极推进高性能复合材料技术研究及产业化应用。我国近年来在复合材料方面取得了创新突破并在航空航天等行业推广应用，同时先进复合材料成为《中国制造 2025》优先发展的重点领域及研发、产业化方向。

本书作者基于国家自然科学基金重点项目、高档数控机床与基础制造装备重大专项等科研项目研究成果，撰写复合材料预制体数字化三维织造成形技术方面的学术专著。针对航空航天、国防军工等大型、复杂复合材料预制体成形存在数字化和自动化程度低、生产周期长等问题，提出了一种复合材料预制体数字化柔性导向三维织造成形方法，开展了预制体数字化三维织造成形技术及装备研究，以及应用验证。该书重点论述了复合材料预制体织造成形技术现状及最新研究进展，数字化三维织造成形原理与方法、工艺及成形装备等方面的技术成果。可供从事先进复合材料及其成形技术与装备生产、教学、研究的企业、高校、科研院所等相关人员技术交流与学习参考。





序 2

复合材料因其轻质、比刚度高、比强度高、疲劳性能优异等特点，广泛应用于航空、航天等领域。“重点研究开发满足国民经济基础产业发展需求的高性能复合材料及大型、超大型复合结构部件的制备技术”，成为《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》先进制造领域优先主题。

在国家自然科学基金重点项目、高档数控机床与基础制造装备重大专项等课题支持下，本书作者发明了复合材料预制体数字化柔性导向三维织造成形方法，带领团队从复合材料预制体三维织造成形原理、成形工艺到成形装备进行了系统研究，并进行了工程化应用验证。基于上述研究成果，全书主要从复合材料预制体三维成形技术现状及国内外新发展，数字化三维织造成形原理与方法、成形工艺、成形装备和典型应用案例等方面进行了系统论述，可作为高等院校、科研院所和企业相关人员的重要学习参考资料，利于广大科技工作者及企业技术人员学习交流与应用。



前 言

复合材料具有轻质、高强度、抗疲劳、可设计性好等优点，在航空、航天等重要领域的应用越来越广泛，其制造水平是衡量一个国家科技实力的重要标志之一。我国现有复合材料预制体三维成形工艺与设备，存在成形周期长、用工密集、劳动强度大、自动化程度低、成形质量可控性差等问题，已成为我国大型、复杂复合材料构件制造的技术瓶颈。为了满足复合材料预制体尺寸大型化、结构复杂化、高纤维体积分数以及织造过程自动化的技术需求，作者发明了一种复合材料预制体柔性导向数字化三维织造成形方法。

本书从复合材料预制体三维织造成形原理、成形工艺到成形装备进行了系统的应用基础研究，取得了成形方法、导向结构以及织造装备三个方面的创新。提出了基于数字化导向模板的三维复合材料预制体降维织造方法以及直线型、曲线型、直曲型三种纤维铺缠方式，发明了三角形、四边形、六边形数字化导向模板，开发了复合材料预制体柔性导向三维织造成形工艺，研制出复合材料柔性导向三维织造成形设备，可实现大型复杂复合材料预制体数字化、自动化织造成形。

本书以国家自然科学基金重点项目、04 重大专项等国家科研计划项目的研究成果及作者培养的硕博士研究生的学术成果为主要内容，从复合材料预制体三维成形技术国内外现状及发展趋势、复合材料预制体数字化三维织造成形原理、成形工艺及成形装备等方面进行了系统论述，总结了复合材料预制体柔性导向三维织造成形技术及装备等方面的最新应用基础研究成果，为复合材料预制体三维织造技术提供了理论方法、工艺技术及系统装备等方面的参考借鉴。

本书由单忠德、刘丰合著。在本书撰写过程中，得到了战丽、吴晓川、张群、杜伟肖、乔娟娟、陈海波、秦绍衍、王争、师有玲、康怀镭、李志坤、陈瑞、刘云志、李平礼等的帮助，对上述同志表示衷心的感谢！

本书适合从事先进复合材料成形技术与装备研究的工程技术人员、高等院校相关专业师生以及科研院所、企业的研究人员教学科研与学习参考。

由于时间仓促和水平有限，书中内容不当之处敬请读者批评和指正。

单忠德 刘 丰

目 录

序 1

序 2

前言

第 1 章 引言	1
1.1 复合材料应用现状	1
1.2 复合材料织造成形工艺及装备	1
1.2.1 三维机织方法	2
1.2.2 三维编织方法	6
1.2.3 缝合方法	9
1.2.4 针刺成形、轴棒法和径棒法	12
1.2.5 柔性导向三维织造成形方法	17
1.3 复合材料织造成形发展趋势	17
第 2 章 复合材料预制体数字化三维织造成形原理	20
2.1 复合材料柔性导向三维织造成形方法及原理	20
2.2 复合材料结构件三维织造建模	21
2.2.1 直线型三维织造方法建模研究	22
2.2.2 曲线型三维织造方法建模研究	30
2.2.3 直曲型三维织造方法建模研究	42
2.2.4 不同织造方法成形的预制体纤维体积分数试验对比	51
2.3 复合材料结构件三维织造尺寸精度控制	56
2.3.1 正三角形点阵布局形状逼近误差分析	56
2.3.2 正四边形点阵布局形状逼近误差分析	58
2.3.3 正六边形点阵布局形状逼近误差分析	62
2.3.4 不同点阵布局形状逼近误差对比分析	69
2.4 复合材料三维织造防变形原理及方法	69
2.4.1 复合材料三维织造结构变形问题机理分析	70
2.4.2 导向套受纤维张紧力作用下变形问题建模研究	70
2.4.3 导向套与织造纤维一体化约束控形转移方法	72
2.5 本章小结	74

第3章 复合材料预制体数字化三维织造成形工艺	76
3.1 数字化导向模板	76
3.2 纤维织造路径规划算法	77
3.2.1 简单截面的纤维织造路径规划	80
3.2.2 复杂截面的纤维织造路径规划	81
3.3 三维多针织造成形工艺	85
3.3.1 同步放纱方法	87
3.3.2 张紧力施加方法	87
3.3.3 多执行系统协同工艺研究	89
3.3.4 预制体轮廓锁紧方法	91
3.4 纤维层间压实技术研究	92
3.4.1 碳纤维预制体压实试验原理和试验结果分析	93
3.4.2 纤维压实模型	100
3.4.3 压实回弹分析	106
3.5 本章小结	107
第4章 复合材料三维织造参数影响规律研究	109
4.1 导向模板与纤维铺缠方式对纤维体积分数的影响规律	109
4.2 导向模板与纤维铺缠方式对复合材料力学性能影响计算分析	112
4.3 导向模板与纤维铺缠方式对复合材料力学性能影响试验分析	116
4.3.1 对复合材料拉伸性能影响规律试验研究	116
4.3.2 对复合材料冲击性能影响规律试验研究	117
4.3.3 对复合材料层间剪切性能影响试验研究	120
4.3.4 对复合材料压缩性能影响试验研究	124
4.4 导向套结构对复合材料力学性能影响分析	128
4.5 本章小结	133
第5章 复合材料预制体数字化三维织造自动成形装备	134
5.1 数字化柔性导向单针织造成形系统与装备	134
5.1.1 成形机本体结构设计及优化	135
5.1.2 柔性导向三维织造运动系统结构设计及优化	136
5.1.3 送丝系统设计开发	138
5.1.4 三维织造成形设备控制系统及软件开发	142
5.1.5 数字化单针织造成形装备	144
5.2 数字化柔性导向多针织造成形系统与装备	145
5.2.1 多针织造成形机系统组成	145

5.2.2 纤维层致密化压实系统	146
5.2.3 多针夹持导向织造系统	147
5.2.4 控制系统设计	148
5.2.5 数字化多针织造成形装备	150
5.3 本章小结	151
第 6 章 复合材料预制体数字化三维织造成形典型案例	153
6.1 基础结构件试制	153
6.1.1 方形典型件试制	153
6.1.2 三角形典型件试制	154
6.2 数控机床 Z 梁试制	155
6.3 叶轮试制	158
6.4 工字形样件试制	160
6.5 喉衬预制体试制	164
6.6 本章小结	167
参考文献	168

第①章

引言

1.1 复合材料应用现状

复合材料因其综合了基体材料及增强材料的各项优点，广泛应用于电子、汽车、航空航天、国防军工、核能、建筑等诸多行业。复合材料具有轻质、高强度、高模量、抗疲劳、耐腐蚀、可设计性和工艺性好等特点，尤其适用于大型结构及整体结构。国外第四代战斗机中复合材料用量占结构重量的 24%~40%，干线客机中占 10%~15%，空客 A380 中超过 20%，波音 787 中达 50%。航天飞机发动机的叶片采用复合材料成形后重量可减轻 10%~15%，大大提高了发动机的推重比。复合材料的成形制造在科技的快速发展中具有举足轻重的作用，其成形制造技术水平是一个国家工业发展的重要评价指标。到 2020 年，我国航天用复合材料规划目标达到 10 万 t，航空用复合材料产品规划目标达到 70 万 t。

复合材料由于其优异的性能引起了美国、德国等国家的高度关注。与二维结构复合材料构件相比，三维结构复合材料构件具有损伤容限高、层间性能好、抗裂纹扩展能力强、结构设计灵活等优点，广泛应用于航空航天、国防军工等尖端领域。国际上采用复合材料成形技术已成功制作了飞行器、汽车等装置上的多种不同形状的承力梁、接头，例如波音公司的 J 型机骨架、麦克唐纳-道格拉斯公司的机翼和机身蒙皮等。美国、法国、俄罗斯等国都设有专门的企业和科研机构，研制了多种形式的耐烧蚀、承力的圆筒形、锥筒形的制件，如三维织造高压储气瓶。在人造生物组织方向，甚至采用此技术制作了人造骨、人造韧带和接骨板等。与国外发达国家相比，国内复合材料三维织造技术虽然发展迅速，但还存在较大的差距，结合三维织造成形复合材料零部件在航空航天、国防军工以及汽车等行业的巨大应用潜力，迫切需要大力发展新型的三维织造工艺技术，以满足复合材料主承力结构件的制造需求。

1.2 复合材料织造成形工艺及装备

目前国际上最先进和常用的三维结构复合材料成形技术基本原理是采用三维织造成形方法将纤维做成预制体，然后通过不同成形方法将树脂、碳等基体材

料浸入预制体中，获得复合材料制品。典型的三维织造成形技术主要有机织法、编织法、缝合法等。

1.2.1 三维机织方法

三维正交机织法中纤维的基本排布形式如图 1-1 所示，分别沿着三个正交方向（经向、纬向和轴向），通过控制纤维的引入动作和次序使得经向和纬向纤维互相交织，完成一层的交织后引入轴向纤维，对预制体进行层间交织，将得到的预制体经树脂浸渍后最终形成制件。

美国、澳大利亚、日本等国家开展了较多的研究。Shikishima Canvas 公司开发的正交机织制件如图 1-2 所示。该技术工艺简单，成本低，可在传统的二维编织机上加以改装以实现加工。然而，该技术的不足之处是预制体在分层上仅有几排纤维束互相交织，分层的厚度受到了限制，一般不适用于大尺寸制件的加工。

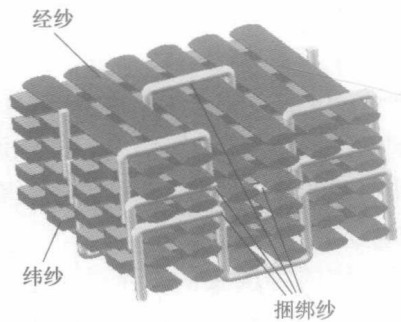


图 1-1 正交机织法纤维排布

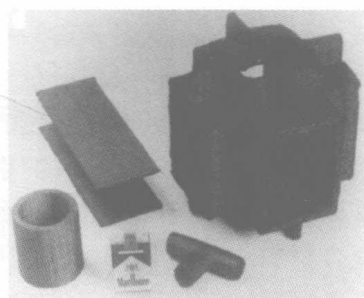


图 1-2 正交机织制件

Mohamed 基于多层经纱织机引纬机构创新设计出多剑杆织机，其织造原理如图 1-3 所示。经纱穿过钢箔与综框上的多眼棕丝，综框的升降使经纱形成多层梭口，纬纱穿过引纬剑并被夹持在织物的夹具上。在织造过程中，捆绑纱穿插其中，垂直于经纬纱方向，贯穿织物的厚度方向。由于经纱相互平行并不相互移动，三维正交机织技术相较于传统二维机织技术，减少了经纱的磨损，捆绑纱又由于综框的上下运动引入到预制体内，也减少了后期缝纫给预制体带来的损伤和断裂。

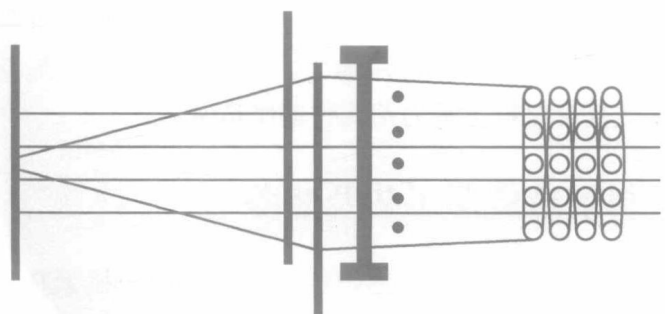


图 1-3 三维正交机织造原理图

Yasui 提出了一种可织造圆柱形织物的三维机织织造工艺及相应设备,如图 1-4 所示。虽然该织造工艺复杂,织造过程耗时较长,并不适用于批量化的产品生产,但是该工艺可实现形状较复杂的圆柱形、圆筒形织物的整体近净成形织造,从而扩大了三维机织工艺的应用范围,促进了机织工艺的进一步发展。

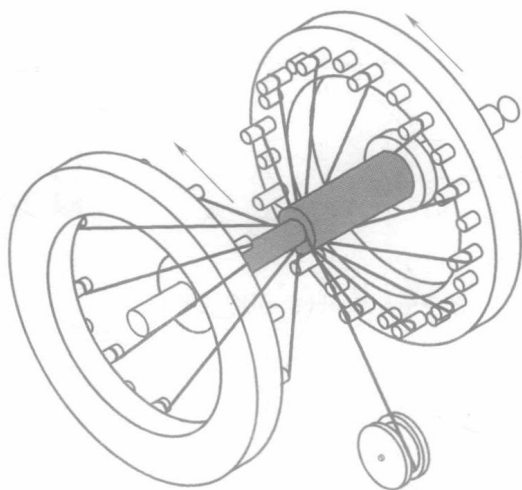


图 1-4 圆柱形织物织造工艺

Khokar 将三维无交织织物称为 Noobed (Non-interlacing, orthogonally orientating and binding) 织物,用于制造该织物的方法即 Noobing 织造法,其 Noobed 织物结构如图 1-5 所示。

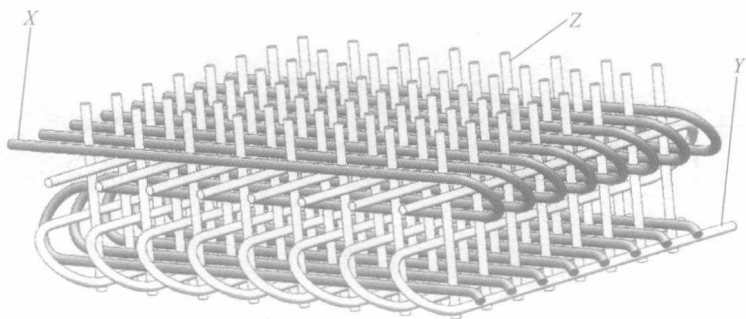


图 1-5 Noobed 织物

Noobing 织造法织造的织物由多组接结纱以及轴向纱相互垂直的纱线组成,通过轴向纱将多层排列的接结纱连接成相互不交织的整体结构三维织物。Noobing 织造法原理及设备如图 1-6 所示,由两组接结纱导纱器 X_1-X_6 与 Y_1-Y_6 交替着分别从横向以及纵向两个方向穿过预先排列好的轴向纱之间,直接形成织物。

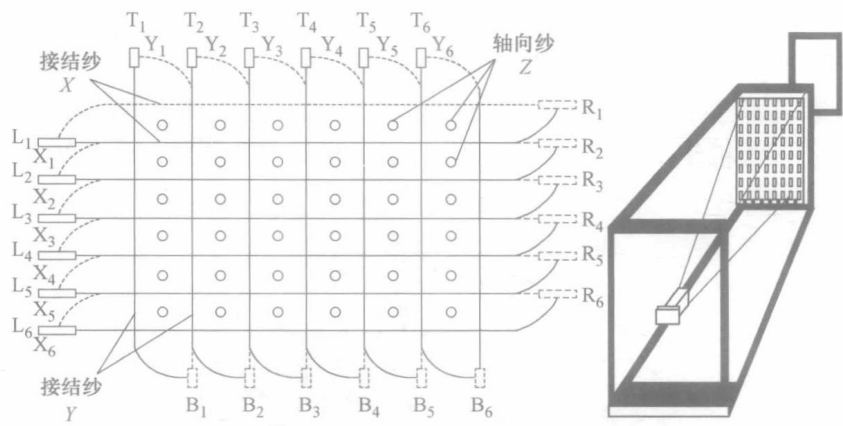


图 1-6 Noobing 织造法原理及设备

Fukuta 发明了一种三维正交单轴向织造法，如图 1-7 所示。 Y 向经纱穿过孔板平行阵列布置在水平方向上，引纬器将经纱引入 Y 向经纱阵列中，当引纬器送到织物对侧时，边纱针把边纱引入纬纱圈，引纬器返回时，边纱针握持纬纱圈而形成双纬， Z 向纱由引纱管引入织物中，形成织物。

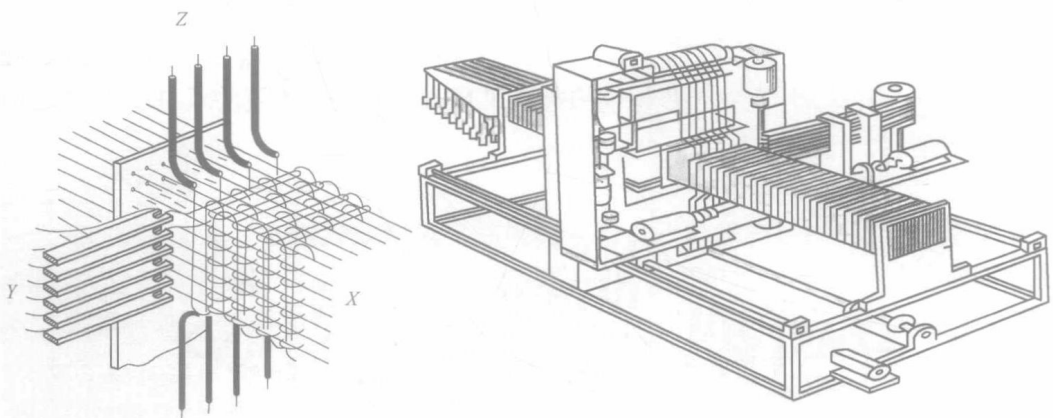


图 1-7 三维正交单轴向织造原理及设备

Weinberg 优化设计的三维织机（见图 1-8），可以在平面经纱层之间形成梭口，易于将纬纱插入指定方向，平面经纱穿过两个平行的孔板。顶板可以沿经纱滑动，底板固定经纱末端，使得织造过程更加简便。

日本采用碳纤维三向正交圆筒编织结构开发了 M-V 运载火箭一级发动机 3D-C/C 喉衬（见图 1-9），该结构径向、环向和 Z 向三个方向的纤维体积分数均为 16%，预制体密度约为 0.85g/cm^3 ，该结构外径尺寸达 1100mm，喉径尺寸约 600mm，高约 350mm。

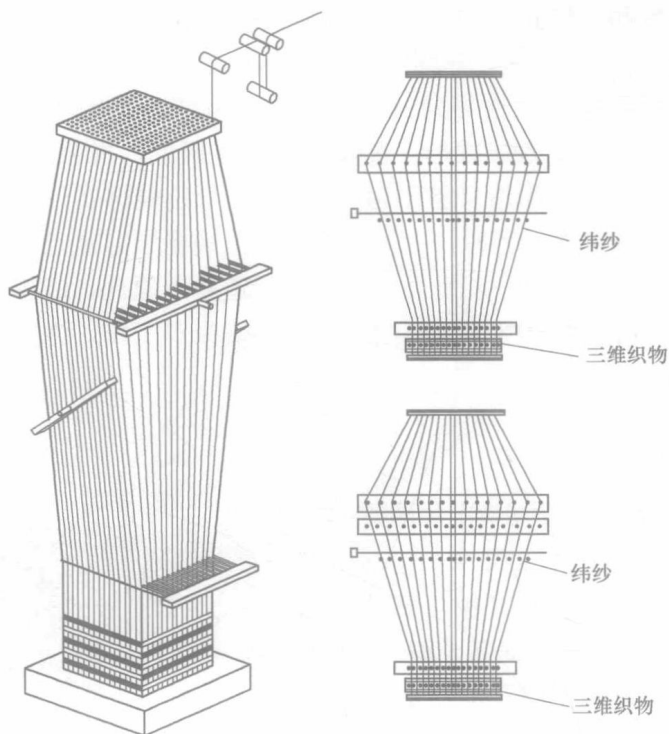


图 1-8 Weinberg 优化设计的三维织机示意图

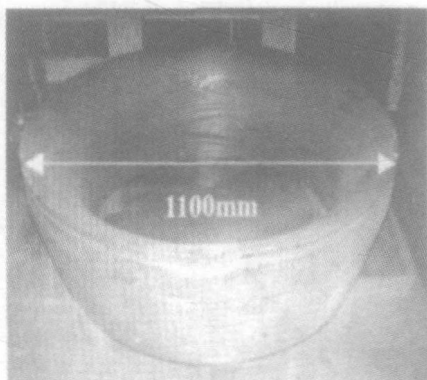


图 1-9 三向正交圆筒编织结构大型 3D-C/C 喉衬

在正交机织法方面，国内研究了三维全机织法，根据所需截面的形状，由目板定位 Z 向经纱，通过开口机构在需要引纬纱的位置形成 X 向或 Y 向梭口，打紧后最终得到织物。天津工业大学研究了三维多剑杆织机正交机织法，其特点是依靠综框的升降使得经纱形成多层梭口，继而引纬剑带动纬纱穿过梭口，最后由织边装置形成布边，重复如此循环最终得到织物。东华大学自 2005 年就成功试制

出我国第一台全自动三维正交织机,并开展了关于三维正交织机和织物的研究,可以织造截面为工字形、 π 形、三明治结构等各种三维结构件。机械科学研究总院提出了复合材料数字化柔性导向三维织造成形方法,开展了基于数字化导向模板的复合材料三维织造方法成形工艺及成形装备研究,并将基于 PMAC 卡的开放式数控系统用于三维织造试验平台的搭建。该系统能够实现 32 轴联动控制,非常适合织造设备的开发。同时,先进成形技术与装备国家重点实验室中建立了复合材料成形实验室,主要开展复合材料三维织造成形原理、成形工艺及装备研究,连续纤维复合材料增材制造成形技术及装备研究等工作,为大型复合材料构件数字化、高性能、精确化成形提供技术支撑。

1.2.2 三维编织方法

三维编织法中纤维的交叉情况如图 1-10 所示。纤维在三维空间中相互交织交叉在一起,不但在平面内相互交织,而且在厚度方向亦相互交织,从而形成了一个不分层的整体结构,提高了编织件的整体性能,将得到的预制体经树脂浸渍后最终形成制件。

Quadrax Advanced Materials 公司提出四步法加工工艺,杜邦公司开发了两步法加工工艺,对三维编织的工艺理论进行了研究。此项技术的发展促进了多向增强复合材料在航空工业中的应用,受到了各工业发达国家的极大关注,美国 3TEX 公司、德国 Herzog 公司的三维编织机如图 1-11 所示。

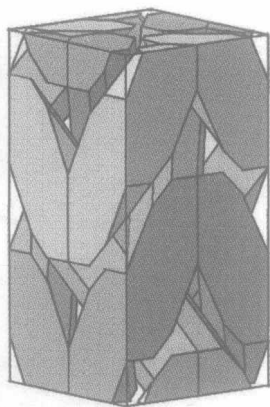


图 1-10 三维编织纤维交叉情况

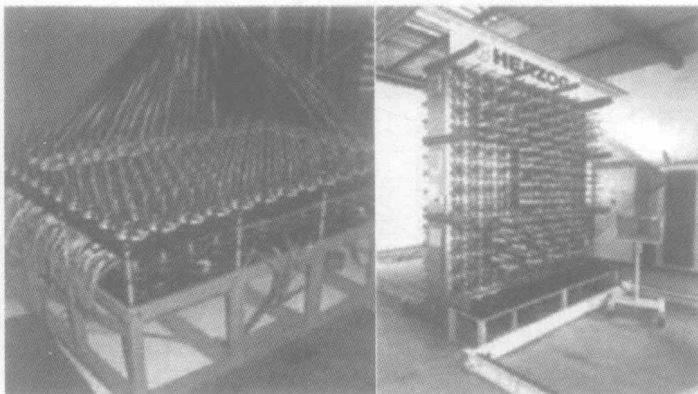


图 1-11 美国 3TEX 公司和德国 Herzog 公司的三维编织机

近几年,美国 3TEX 公司、德国 Herzog 公司、日本京都工艺纤维大学等都开发了先进的三维织造机,运行速度较高,配合专用的大容量携纱器可实现更大轴

向尺寸预制体的编织。美国 3TEX 公司发明了一种自动三维编织机和方法（见图 1-12），可生产复杂、无缝结构的预制体，且预制体是通过交错与非交错纤维系统编织而成，可编织 35 种截面形状的预制体结构。

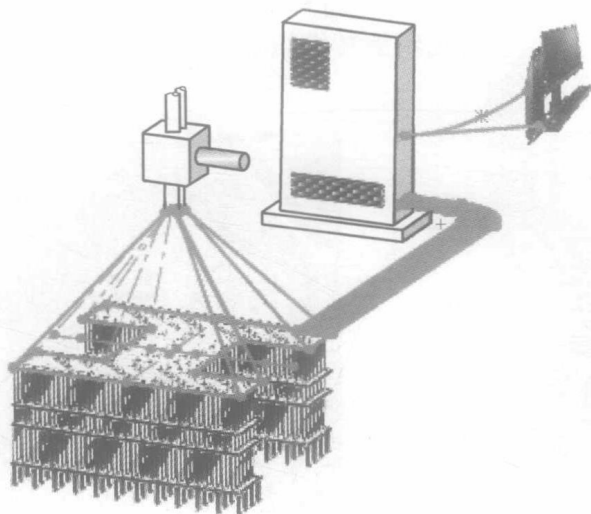


图 1-12 美国 3TEX 公司的自动三维编织机原理

法国国立高等纺织工艺学校（ENSAIT）开发了多轴三维编织机（其主要编织区见图 1-13），解决了织造带中纱线存在偏差的问题。

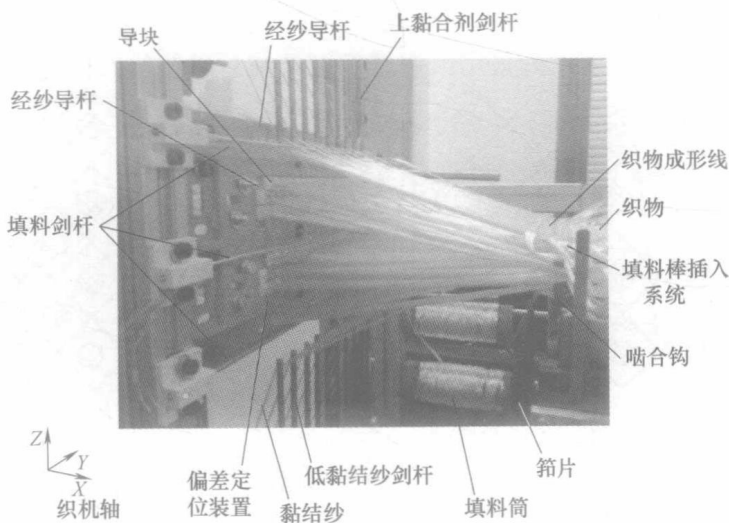


图 1-13 法国 ENSAIT 多轴三维编织机

图 1-14 所示为亚特兰大研究所生产的三维织造件。然而，三维编织技术多数情况下只用于制备截面尺寸变化较小的预制体，对于复杂结构的预制体需通过

在编织过程中改变纤维排布或数量，使得加工工序复杂化，不易于自动化控制。

随着国内对三维编织复合材料研究的逐渐深入，对三维编织复合材料成形技术的研究已经取得了许多成果，也相继开发了多种三维编织成形设备，常见的三维编织机主要有圆形模块式组合三维编织机和矩形模块式组合三维编织机。北京柏瑞鼎科技有限公司发明的三维旋转编织机实现了轴向尺寸更大的预制件的编织，如图 1-15 所示。

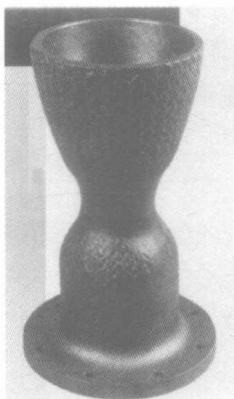


图 1-14 三维织造件

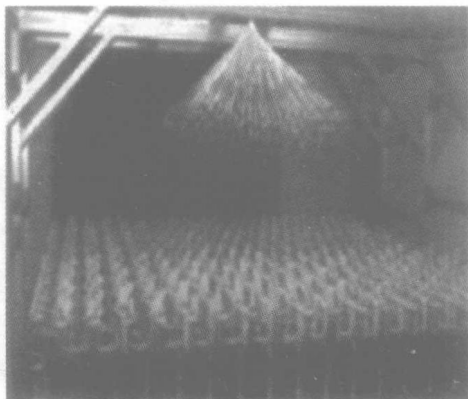


图 1-15 北京柏瑞鼎三维旋转编织机

北京航空航天大学对传统四步法三维编织工艺进行了改进研究，通过合理排布和增加轴向纱，使得加工得到的编织预制体不仅包含了传统四步法编织预制体中的所有轴向束，在其余的编织束交叉空隙中也加有轴向束，显著提高了预制体的轴向性能。图 1-16 所示为采用改进编织工艺前后纱线排布的对比。

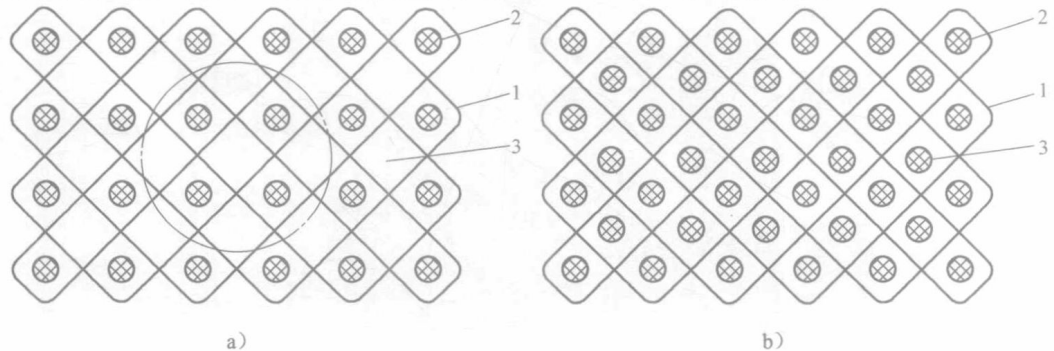


图 1-16 四步法三维编织的纱线排布

a) 传统四步法 b) 改进后的四步法
1—编织束 2—轴向束 3—空隙

天津工业大学开发了一种新型多轴三维编织预成形和编织技术，由多层不同的纱集，包括偏差、扭曲、填充并将 Z 向纱层排列和锁定在一个矩形框中。其预成形原理图如图 1-17 所示。