

特约专栏

# 高性能纤维预成形体的研究进展

陈利, 孙颖, 马明

(天津工业大学复合材料研究所 先进纺织复合材料教育部重点实验室, 天津 300160)

**摘要:** 高性能纤维预成形体是先进复合材料的增强结构相。各种方式获得的纤维预成形体在复合材料成形工艺过程中起着十分重要的作用, 影响着复合材料的成形和基体材料的浸渗, 同时决定了复合材料制品的最终性能。从纤维预成形体的制备技术角度出发, 介绍了机织、编织、针织、非织造等纤维预成形体的成形方法、结构特性, 分析总结了各种纤维预成形体的研究现状和进展, 提出高性能纤维预成型体需要进一步研究解决的关键问题。

**关键词:** 纤维预成形体; 机织; 编织; 针织; 非织造

**中图分类号:** TQ342.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2012)10-0021-09

## Development of High Performance Fiber Preforms

CHEN Li, SUN Ying, MA Ming

(Key Laboratory of Advanced Textile Composites, Ministry of Education, Institute of Composite materials, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

**Abstract:** The properties of high performance fiber reinforced composite materials are excellent, and they are widely used in aerospace, wind power, marine mining, machinery, electronics and other fields. High performance fiber preform is a reinforcing structural phase of advanced composite materials. Fiber preforms obtained by a variety of ways play an important role in the forming process of composites, affecting composites forming and the infiltration of the matrix materials, and determine the final performance of the composites. In this paper the development of high performance fiber preforms was reviewed. From visual angle of manufacturing methods, weaving, braiding, knitting and nonwoven, processing methods and structure characteristics of high performance fiber preforms were introduced. At the same time, briefly summarized recent research situation and progress in process technology. Finally, the key problems need to be solved in the future were proposed and emphasized.

**Key words:** fiber perform; weaving; braiding; knitting; nonwoven

## 1 前言

高性能纤维增强的树脂基、陶瓷基和碳基等复合材料具有低密度、高比强、良好韧性、耐高温、抗氧化等优异性能, 成为航空航天飞行器的主结构、发动机、制动装置以及热防护等主要系统的关键材料, 并广泛应用于风力发电、海洋开采、机械、电子等领域。

高性能纤维预成形体是先进复合材料的增强结构相。它是在复合材料结构成形之前, 利用编织、机织、针织等现代纺织工艺技术将高性能纤维束(长丝)或纱线定位分布, 形成具有特定结构、性质和形状的纤维集

合体。各种方式获得的纤维预成形体具有广谱的孔隙结构形貌、可大范围调节的纤维体积分含量和纤维取向分布、以及多样化的结构形态, 在复合材料成形工艺过程中起着十分重要的作用, 影响着复合材料的成形和基体材料的浸渗, 同时决定了复合材料制品的最终性能<sup>[1]</sup>。

在纤维预成形技术得到广泛应用之前, 纤维增强复合材料的增强结构相, 主要是短纤维和连续纤维两种形式, 增强纤维之间未能有效地缠结, 仅靠基体材料将其黏结, 材料横向强度和抗冲击损伤等性能较低。通过纺织方法, 将增强纤维加工成二维纤维预成形体, 使增强纤维按一定的规律在平面内相互交织和缠结, 显著提高了材料的面内强度, 改善了材料的面内抗冲击损伤性能。但是, 二维纤维预成形体具有非常小的织物厚度, 还需要通过叠层铺放方法以形成最终复合材料结构。这种层合结构复合材料由于层与层之间缺乏有效的纤维增强, 层间性能较差, 冲击损伤容限较低。三维纤维预成形体是采用独特的纺织技术将连续纤维束按照一定的规

收稿日期: 2012-04-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11072175); 天津市教委科研基金(20110309)

第一作者及通信作者: 陈利, 男, 1968年生, 教授, 博士生导师

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2012.10.04

律在三维空间相互交织形成一个整体的纤维网络结构,贯穿空间各个方向的纤维提供了增强结构的整体性和稳定性,显著提高了材料的层间性能和抗冲击损伤能力。

采用不同架构的纤维预成型体作为复合材料的增强结构骨架,就像建筑物中的钢结构框架一样,不仅从结构和性能上强化了复合材料,而且易于实现复合材料结构件的近净仿形成形,因而受到航空、航天、国防等高新技术领域的广泛重视,成为高性能复合材料制备的技术关键和前沿发展方向<sup>[2]</sup>。

本文从纤维预成型体的制备技术角度出发,简要介绍编织、机织、针织、非织造等纤维预成型体的成形方法、结构特性,分析总结各类纤维预成型体的研究现状和进展,提出高性能纤维预成型体需要进一步研究解决的关键问题。

## 2 机织预成型体

机织技术是复合材料中最广泛使用的纤维预成形方法。早在 20 世纪 50 年代初期,机织技术作为工业化的纺织技术被应用于玻璃纤维复合材料的制备。近二三十年来,机织技术有了较大的发展,二维碳纤维织物实现批量化生产,新的三维织造技术取得突破性进展。

### 2.1 二维机织织物

二维机织工艺为复合材料制备提供了一种大规模生产纤维预成型体的低成本方法,在成形过程中经纱和纬纱相互交织而形成织物。织造过程中,经纱在综框的作用下分成上下层,形成梭口,纬纱受载纬器的牵引进入梭道,然后由钢筘打紧并与经纱交织。织造高性能碳纤维的织机以有梭织机和剑杆织机为主。有梭织机织造的织物特征是在织物的两侧形成平整光滑的布边。但由于梭子的截面尺寸较大,对经纱的摩擦损伤较严重。剑杆织机的载纬器不具备贮纱功能,每次仅能携带一根纬纱通过梭口,因此会在织物的两侧形成“毛边”,但剑杆织机的剑头的截面尺寸较小,可有效减小经纱开口高度,减少对纱线的损伤,更适应于脆性的碳纤维等高性能纤维的织造,近年来得到较快的发展。

复合材料中使用的二维机织预成型体主要包括平纹、斜纹和缎纹等,如图 1 所示,结构形式以管状和平板状为主。织物在经纱和纬纱方向上具有很好的尺寸稳定性和优异的力学性能。

### 2.2 三维机织织物

三维机织技术是利用多层经纱织造方法,将若干经纱和纬纱层相互接结而形成具有一定厚度的三维整体预成型体,如图 2 和图 3 所示。采用分层接结的方法,将各相邻纱线层进行接结,称为层层角连锁结构,也称

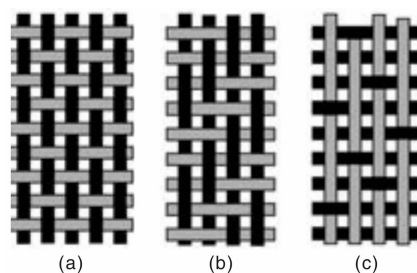


图 1 二维机织物的典型结构: (a) 平纹, (b) 斜纹, (c) 缎纹

Fig. 1 The typical structure of 2D woven fabrics: (a) plain weave, (b) twill weave, and (c) satin weave

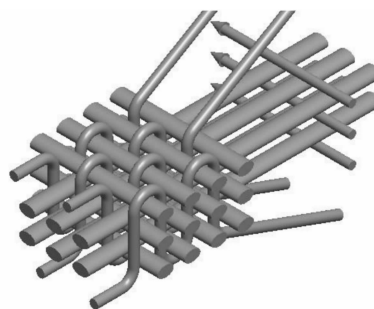


图 2 三维机织示意图

Fig. 2 3D weaving schematic diagram



图 3 三维机织设备(美国 3Tex)

Fig. 3 3D weaving machine (U. S. 3Tex)

2. 5D 机织结构;采用接结纱倾斜贯穿整个厚度的方法,将全部纱线层进行接结,称为贯穿角连锁结构;采用一组纱线垂直贯穿整个厚度的方法,将全部纱线层进行接结,称为正交接结结构,如图 4 所示。在 2. 5D 织物结构基础上,沿经向、纬向和  $z$  向(织物厚度方向)引入或同时引入纱线,形成多种变化的衍生结构,如图 5 给出的经向增强 2. 5D 织物结构。三维机织预成型体中仅含有经向和纬向纱线,非常适合织造具有一定厚度的宽幅织物。目前采用普通的多臂织机可以织造出由 17 层经纱和 18 层纬纱相互交织而成的三维机织预成型体。天津工业大学复合材料研究所设计研制了新型的三维机织设备可以织造 100 层经纱和 101 层纬纱交织的圆型、平板型和各种异型机织预成型体,最大厚度可达 90 mm。

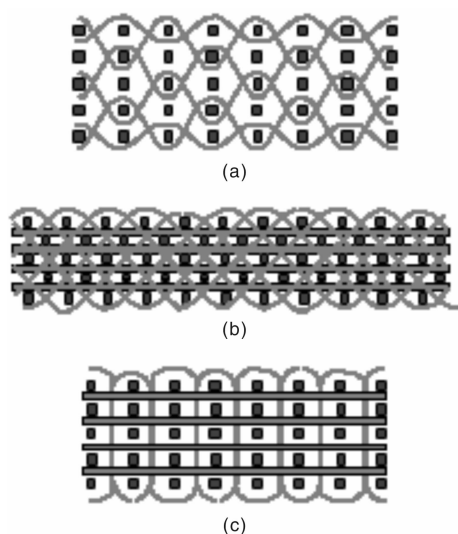


图 4 三维机织预成形体结构：(a) 层层角联锁结构，(b) 贯穿角联锁结构，(c) 正交交接结构

Fig. 4 3D woven preform structures: (a) layer upon layer angle-interlock structure, (b) through and through angle-interlock structure, and (c) orthogonal binder structure



图 5 经向增强 2.5D 结构

Fig. 5 Warp reinforced structure

三维机织预成形体中典型结构是三维正交结构，三组呈正交取向的纤维系统相互交叉排列形成，如图 6 所示。对于管状或棒状的预成形体，三个正交纱线系统是指沿芯轴方向排列的轴纱、沿圆周方向排列的周向纱和半径方向排列的径向纱。1974 年，日本 Fukutal<sup>[4]</sup> 最先发明三维方形织物织造专用设备。1988 年，Mohamed<sup>[5]</sup> 公布了一种三维多层织物织造设备，可以织造矩形、T 形、工字形断面织物。Yasui<sup>[7-8]</sup> 发明的圆形直接成形装



图 6 正交交接结构

Fig. 6 Orthogonal binder structure

置可以织造 24 层贯穿接结的圆形预成形体，但是这种方法需要较大的开口运动，对纤维容易造成损伤。由 Bruno<sup>[9]</sup> 提出的圆形置换法，采用金属杆作为预成形体骨架的临时轴向单元，待轴向和径向纱线连续铺放后，用纱线替代预置的轴向金属棒，从而制得空心管状正交织物。

多层多轴向机织技术是在多层机织结构基础上引入斜轴向纱线层，以提高材料的面内剪切性能。目前该技术研究十分活跃，但仍处于研究阶段，已开发的技术包括三轴机织、浮纹机织和分综织造等<sup>[10]</sup>。Farley<sup>[11]</sup> 改造了 Ruzand<sup>[12]</sup> 提出的采用传统织机在织物表面形成两组方向相反的斜向浮纹线的浮纹法，开发了多层多轴向三维织造技术，偏轴纱线层能够放置在织物中的任意位置。Bilisik<sup>[13]</sup> 等研制了一个多轴三维机织设备，斜向纱从纱筒拉出，经过剑杆装置在预型体中成为取向纱（剑杆型）。相对比较容易实现的是由 Addis<sup>[14]</sup> 研制的基于分离箱和提花机的三维多轴向织造设备，利用分离箱的特点可以容易地在织物中引入偏轴纱线。近年来，天津工业大学复合材料研究所也积极开展多层多轴向机织技术的研究，通过对现有多层机织设备的改造，在多层织物中成功引入了斜向纱线，并可根据设计引入到织物的任意层位置，其结构如图 7 所示，织物表面结构如图 8 所示，并成功研制了工程尺寸的平板织物如图 9 所示。

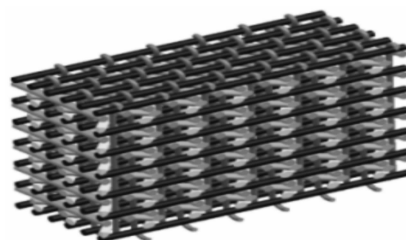


图 7 多层多轴向机织物结构示意图

Fig. 7 Multi-layer multi-axial woven fabric structure diagram

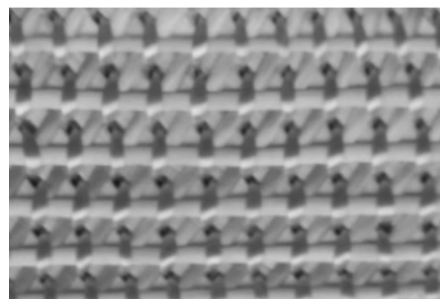


图 8 三维多轴织物实物照片

Fig. 8 3D multi-axial fabric

三维机织预成型技术有较强的仿形能力，能够一次成型具有异型截面的各种实心板、变厚度板、中孔结构盒式梁、桁架式结构梁、工字梁等。此外还有一类被称

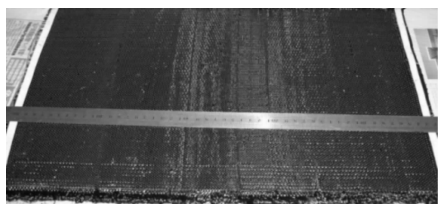


图 9 多层多轴向机织物

Fig. 9 Multi-layer multi-axial woven fabric

为间隔型或空心结构的三维织物,如图 10 和图 11 所示。这种类型的织物通常需要在具有双层梭口的织机上织造。对于空心结构或管状结构也可以采用“压扁-织造-还原”的方法先将管状结构转换为实心结构,在普通织机上织造,然后进行必要的裁剪、折叠、修饰或展开成型。这意味着三维机织预成形体有可能在更多的领域得到应用。

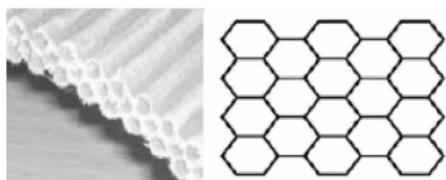


图 10 三维空心结构织物

Fig. 10 3D hollow structure fabric

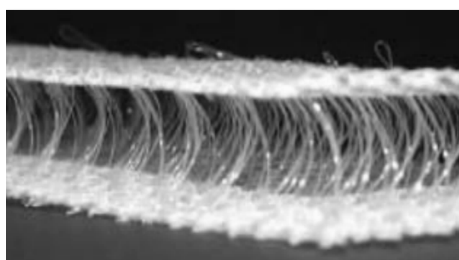


图 11 三维间隔织物

Fig. 11 3D-spacer fabric

### 3 编织预成形体

编织技术是一种古老的纺织技术,虽然在传统的纺织加工中不是一种主要的生产工艺,但它却是生产复合材料用纤维预成形体的最重要的一种方法。

#### 3.1 二维编织织物

二维编织物是由三根及其以上的纱线体系按不同的规律同时运动,相互交织而形成平面或管状织物。二维编织中,同一方向排列的纱线,在运动角轮和“8”字形导槽的控制下分为两组,沿相反的方向运动,使纱线相互斜向交织,如图 12 所示。沿编织方向加入一组不动的纱线,即形成三向编织物。

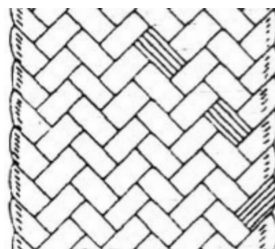


图 12 二维编织物

Fig. 12 2D braided fabric

二维编织技术便于实现自动化。德国的 Herzog 公司最新研制的大型自动化二维编织机是目前最先进的二维编织机,如图 13 所示。该设备的纱锭数量可达 196 锭,可适用于碳纤维、芳纶纤维、玻璃纤维等高性能纤维的编织。由于采用了创新的径向纱锭排列设计,有效地减少了纱线间的摩擦和损伤,并通过与控制机器的结合,完美地实现了各种异型件的编织。



图 13 二维编织机(德国 Herzog 公司)

Fig. 13 Two-dimensional braiding machine (German Herzog)

#### 3.2 三维编织织物

三维编织技术是二维编织技术的拓展。编织过程中纱线通过位置交换实现相互交织而形成整体结构织物。三维编织根据编织纱线的运动方式,分为角轮式和行列式两种,如图 14 和图 15 所示。角轮式编织设备具有高

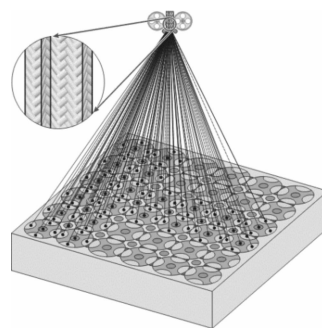


图 14 角轮式编织技术(美国 3Tex)

Fig. 14 Angle wheel braiding techniques (U. S. 3Tex)

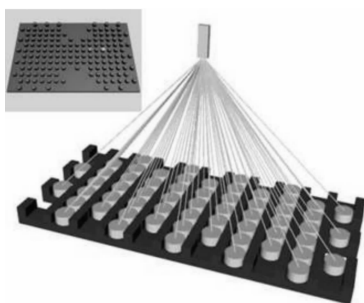


图 15 行列式编织技术(天津工业大学)

Fig. 15 Determinant braiding techniques (Tianjin Polytechnic University)

速编织成形的优势,而行列式编织设备具有结构紧凑、成本低、通用性好等特点。

行列式编织技术来源于 Florentine 在 1982 年提出专利方法<sup>[15]</sup>。编织纱线按行和列的方式排列成一个矩阵,每一根编织纱线由一个携纱器单独控制,携纱器沿行和列向交替运动,四步一个循环,使编织纱线在三维空间内相互交织交叉,形成具有一定形状和尺寸的整体预成形体,该方法又称四步法编织工艺<sup>[16]</sup>。四步法编织工艺制备的预成形体内包含有 4 种空间倾斜分布的编织纱线,称之为三维四向编织结构。编织过程中,可根据需要分别在长度、宽度和厚度方向上加入伸直的纱线,这样就可以形成三维五向、三维六向和三维七向编织结构,如图 16 所示。1994 年,美国 Atlantic Research 公司研制的圆形三维编织机可挂 1 万 4 千根纱线;1996 年,天津工业大学复合材料研究所成功研制出计算机控制的方形三维编织机(图 17),该设备可挂 4 万根纱线,是国内目前最大、最先进的编织设备,可编织工字梁、T 形梁、L 行梁等多种形状的预成形体,如图 18 所示。

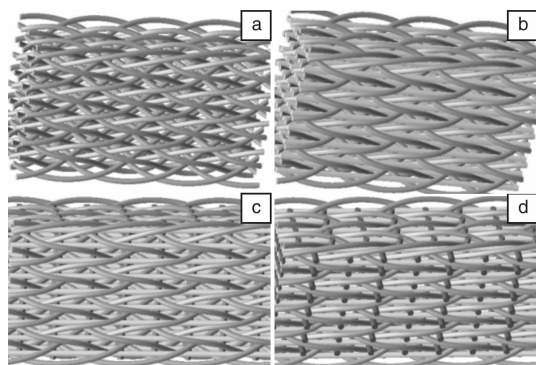


图 16 三维编织结构: (a) 三维四向, (b) 三维五向, (c) 三维六向, (d) 三维七向

Fig. 16 3D braiding structure: (a) 3D 4-directional structure (b) 3D 4-directional structure (a) 3D 4-directional structure

角轮式编织中携纱器按一定的规律安装在角导轮的



图 17 自动控制的行列式三维编织机(天津工业大学)

Fig. 17 Automatic control determinant 3D braiding machine (Tianjin Polytechnic University)

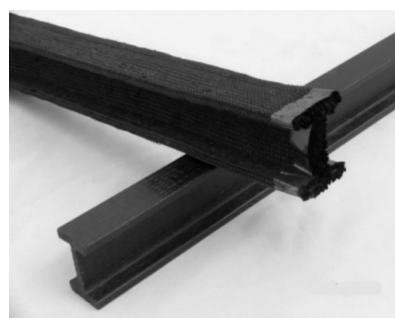


图 18 三维编织工字梁预成形体及其复合材料

Fig. 18 3D braided I-beam preform and its composite

缺口中,角导轮转动带动携纱器运动,将携纱器从一个角导轮传递到另一个角导轮上,从而使携纱器在机器底盘上有规律地运动,并带动纱线相互交织交叉,形成整体织物。但是由于现有的角轮式编织工艺设备所能安装的携纱器数量较少,使得采用该工艺所制备的三维编织物的尺寸和形状受到了一定的限制。最近,Albany 公司开发的角轮式三维圆形编织机,如图 19 所示,能够生产相邻层交织的编织预型件。Herzog 公司设计了三维实体编织机,它由布置在多行和多列方阵中的转子组成,由增加轴向纱和调整编织纱来改变织物的几何形状,可编织出各种复杂形状的预型件,如图 20 所示。



图 19 三维圆形编织机(Albany 公司)

Fig. 19 3D circular braiding machine (Albany Company)

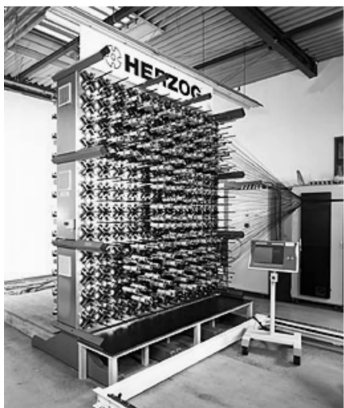


图 20 三维异型编织机(德国 Herzog 公司)

Fig. 20 3D shaped braiding machine (German Herzog)

三维编织技术具有超强的近净仿形编织能力,可以复杂异型结构的整体编织。新近的研究主要集中于生产更大尺寸、更复杂的三维编织预成型体。天津工业大学复合材料研究所成功研制了组合式三维编织机,标准化的编织单元可以灵活组合,满足不同形状和尺寸制件的编织需要。美国 3Tex 公司也推出组合式角轮式编织机,单元机如图 21 所示,可以连续织造截面为 T 形、I 行、L 行、矩形等制件。但是到目前为止,三维编织设备仍然处于发展阶段,可以商业化自动生产的大型三维编织机很少。



图 21 组合式编织单元机(美国 3Tex 公司)

Fig. 21 Combined braiding unit machine (U. S. 3Tex Company)

## 4 针织预成型技术

针织是将纱线沿经向或纬向形成线圈并相互串套而形成织物的过程。根据加工原理,针织分为纬编和经编两种。将纱线沿  $90^\circ$  (纬向) 方向喂入工作织针上,使纱线顺序地弯曲成圈,并相互串套形成织物的工艺称为纬编。将一组或几组平行排列的纱线沿  $0^\circ$  (经向) 方向喂入工作织针,同时进行弯曲成圈,并相互串套形成织物的工艺称为经编。针织物具有良好的成型性能,特别适

于作为柔性复合材料的增强结构。但是在针织过程中成圈纱线受到严重的弯曲,玻璃纤维、碳纤维等一类脆性纤维不适于用作成圈纱线,因此,普通的纬编和经编织物较少作为高性能复合材料的增强结构使用。为了充分发挥高性能纤维的潜能,特别是使碳纤维这一类高性能脆性纤维在织物中使其能扬长避短充分发挥作用,在普通针织技术基础上发展了轴向结构技术。

### 4.1 双轴向织物

双轴向织物是将玻璃纤维、碳纤维等作为衬垫纱线,沿经向和纬向衬入,并由另外一组纱线所形成的针织线圈结构绑缚在一起而形成织物。根据成圈纱线的成圈方式,双轴向织物分为双轴向经编织物和双轴向纬编织物,如图 22 所示。双轴向织物经树脂模塑固化处理后得到最终产品。由于织物中衬垫纱线平行顺直,因此该类织物不仅结构稳定,而且可以最大程度地发挥纱线的性能。双轴向经编技术已得到工业化应用,但该类织物的成型能力较差。天津工业大学复合材料研究所成功研制出了双轴向纬编织物织造设备(图 23)。双轴向纬编织物采用双面罗纹组织结构来捆绑多至五层的衬纬衬经纱,适于玻璃纤维、芳纶纤维和碳纤维的织造加工。

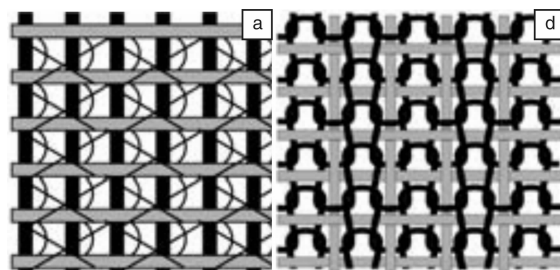


图 22 双轴向针织物:(a) 经编,(b) 纬编

Fig. 22 Bi-axial knitted fabrics (a) warp knitting (b) weft knitting



图 23 纬编双轴向织机(天津工业大学)

Fig. 23 Bi-axial weft knitting machine

### 4.2 多轴向织物

为了提高双轴向织物的面内剪切性能,发展了多轴

向针织技术。多轴向针织技术以 LIBA 公司开发的多轴向缝编技术为代表,如图 24 所示。该技术首先将纱线按经向、纬向和斜向铺放,铺好的纤维层经过缝编区,缝编针穿透织物,钩取缝编纱形成编链或经平组织,将多层纱线在厚度方向连接起来而形成织物,如图 25 所示。理论上,纱线的铺放顺序和层数为任意。但受可用设备限制,一般为 6 层,铺放角度为  $0^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $\pm 45^\circ$ 。多轴向经编织物的主要特点是增强纤维强度利用率较高,织物的成型性能较好,同时允许采用非织造织物作为多轴向经编织物的表面,这样可以提高浸渍性能。无卷曲织物被广泛应用于织造高性能游艇和风轮机叶片等,它在航天领域的应用正逐步增加,被认为是未来航空计划的主要候选材料。这种织物的优点是构造结构时所需铺层很少,从而减低劳动力成本。同时,因为其纱线无卷曲的特性,由此制作的层压板的面内性能优于相同纤维体积分含量的机织物层压板<sup>[17]</sup>。



图 24 多轴经编机 (LIBA 公司)

Fig. 24 Multi-axial warp knitting machine (LIBA Company)

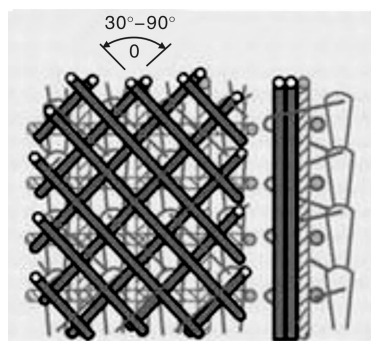


图 25 多轴向经编织物示意图

Fig. 25 Multi-axial warp knitting fabric diagram

值得一提的是还有在双针床拉舍尔经编机上将两个针织物面层用纱线连接而构成的夹芯织物,其中间隔纱线可以采用高性能纤维,如碳纤维、玻璃纤维等,成圈纱

线由于需要成圈弯曲通常采用涤纶、锦纶等纱线。最近,一种新型的纬编间隔针织物由东华大学开发出来<sup>[18]</sup>。该织物采用纬编技术结合衬经衬纬技术,在两个表面结构的平针地组织中都衬入了增强的经纱和纬纱,从经向方向喂入的间隔纱通过前后平针线圈的沉降弧把两个表面结构连成一体,形成间隔结构,如图 26 所示。采用这种方式生产间隔织物时,由于间隔纱不用成圈编织,所以纱线种类的应用范围更广,同时在纬编地组织中以衬经衬纬的方式织入平行和无卷曲的纱线提高了织物的面内性能。

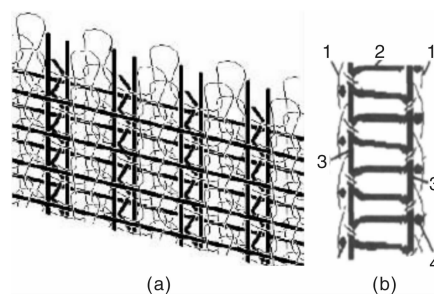


图 26 双轴向增强纬编间隔针织物的结构:

(a) 立体图, (b) 截面图

Fig. 26 Bi-axial weft knitted spacer fabrics: (a) stereoscopic image and (b) cutaway section

## 5 非织造预成型技术

### 5.1 非织造技术

非织造织物是指由纤维不经传统织造工序而直接形成的网状或絮状的纤维集合体。它是一种将增强纤维开松并制成网,然后借助于机械或化学的结合力将纤网内纤维固结而制成非织造织物的过程。与其它传统纺织加工技术(如机织、针织或编织)相比,这种工艺省去了纺纱与织造两个中间环节,直接将散状纤维制成絮片制品,生产成本低,生产效率高。

当纤维通过非织造工艺形成网状或絮状材料时,纤维之间的结合力很小,纤网的强力很低。要使其强力增大,必须使纤维间产生缠结。在制备高性能纤维毡时常用的纤维固结方法为针刺法。在针刺法中,刺针穿过纤维网,抓住纤维层表面的纤维,把它们带到絮片的中央,通过缠结改变纤网结构并增加非织造织物的强度。

20 世纪 80 年代法国动力公司(SEP)开发了 NOVOL-TEX 技术主要用于制造碳/SiC 陶瓷复合材料喷管的整体三维预成形体,如图 27 所示,通过改变基体、织物类型、刺针型号、针刺数目等,能够实现复合材料纤维取向和纤维体积分量的有效控制<sup>[18,19]</sup>。特别是解决了传统三维正交织物制造的喷管预成形体圆截面间的径向



纤维成辐射状而导致的径向纤维体积含量不匀的问题。采用该成型技术可以制备固体火箭发动机上的喷管喉衬、扩张段和延伸锥。

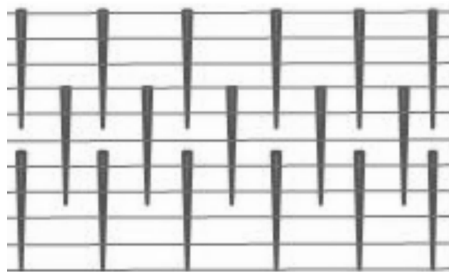


图 27 NOVOLTEX 技术针刺原理示意图

Fig. 27 Needle-punched principle diagram of NOVOLTEX technology

## 5.2 正交非织造技术

正交非织造工艺是在专有的设备上,采用三组呈正交取向的纱线系统相互交叉排列而形成三维整体织物的过程,分为直接成型方法和置换方法。

直接成型是以刚性预浸料棒和柔性纱束为原料,先将预浸棒排布成设计的阵列,然后引申到纱束按一定规律运动穿过或绕过预浸棒列阵而制成预成形体,如图 28 所示。AVCO/TEXTRON 公司在此工艺基础上,开发了全自动筒状旋转编织设备,典型制品为火箭发动机的出口锥和喷管连接器等<sup>[20-21]</sup>。

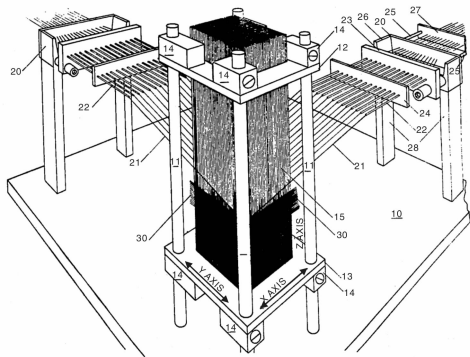


图 28 正交非织造设备

Fig. 28 Orthogonal nonwoven machine

置换方法是在一底板上按一定的间距和方式将一组空心管排列成设计的列阵,然后在底板平面内,以笛卡尔坐标方式或以圆柱坐标方式,将另外两组纱线交叉引入空心管间,当达到一定厚度后,用一组纱线将空心管阵置换,即形成三向正交织物。近年来,一种新的叠层穿刺方法成为制造三向正交织物的低成本生产工艺。叠层穿刺型工艺为:将平面织物裁剪叠层后用垂直于织物的  $Z$  向钢针矩阵整体组合穿刺,至一定尺寸后,用纱线逐根取代  $Z$  向钢针而形成立体织物,如图 29 所示。叠

层穿刺织物是一种结构特殊的立体织物,具有良好的整体结构和较高的纤维体积含量,是制作高性能纺织复合材料的优良基材。

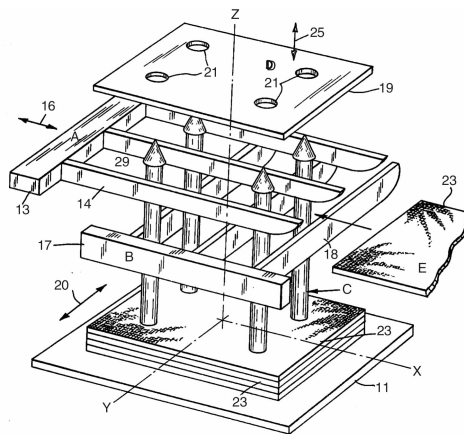


图 29 叠层穿刺工艺

Fig. 29 Layered fabric piercing process

## 6 结 语

碳纤维等高性能纤维具有强度高、刚度大、伸长小、表面不耐磨等特性,其纺织工艺性较差,对纺织工艺设备的依赖程度高。近年来,在航空航天工业发展的推动下,发达国家的高性能纤维纺织装备技术取得了突破性进展,高速的二维织机、自动控制的三维织机等关键技术装备的研制获得成功,碳纤维织物的品质和性能得到大幅度提升。我国高性能纤维纺织预成形技术研究始于 20 世纪 70 年代,经过 30 多年的发展,工艺装备技术水平有了很大的进步,针刺毡、机织布、多轴向织物等新品种都有工业化生产;剑杆织机、多轴向缝编机、二维编织机、缝合机器人等现代化纺织预成形设备国内已有引进;三维编织技术、多层机织技术、多轴向纬编技术已由天津工业大学自主开发成功。

虽然我国在高性能纤维纺织预成形技术发展方面取得了一定成就,但与国外先进水平相比,尚存在相当大的差距。表现为,自动化程度低、产品质量不高,使用功能远远落后于国外先进水平,每年仍需要进口相当数量的设备来满足高品质产品生产的需要。装备的落后制约着整体行业的产业升级。

发达国家一向对复合材料技术采取保护政策,他们不仅是出于经济利益的考虑,更重要的是出于军事和国家战略利益的考虑,遏制其他国家发展先进复合材料技术,特别是对应用于航空航天等领域的高性能纤维纺织预成形关键装备采取技术封锁。因此,我们不能寄希望于国外转让核心技术和设备,应积极组织社会力量,立



志攻关,自主创新。通过技术攻关,突破制约我国高性能纤维纺织材料产业发展的关键技术瓶颈,缩小我国同发达国家的差距,带动相关产业的技术升级和发展,提高我国高性能纤维纺织材料的设计、制造和开发应用的水平,提升我国复合材料产业的自主创新能力。

## 参考文献 References

- [1] Chen Li(陈利). 三维纺织技术在航空航天领域的应用[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术), 2008, (4): 45-47.
- [2] Yi Honglei(易洪雷), Ding Xin(丁辛). 三维机织复合材料力学性能研究进展[J]. *Advances in Mechanics*(力学进展), 2001, 31(2): 161-172.
- [3] Li Jialu(李嘉禄). 三维编织技术和三维编织复合材料[J]. *Advanced Material Industry*(新材料产业), 2010, (1): 46-49.
- [4] Fukuta K, Nagatsuka Y, Tsuburaya S, et al. *Three-Dimensional Fabric, and Method and Loom Construction for the Production thereof*; US 3834424[P]. 1974-09-10.
- [5] Mohamed M, Zhang Z H, Dickinson L. Manufacture of Multi-Layer Woven Preforms[J]. *The American Society of Mechanical Engineers*, 1988, 5: 81-89.
- [6] Poe C C, Dexter H B, Raju S. A Review of the NASA Textile Composites Research[C]//Editorial Committee of This Conference. *38th AIAA/ASME/ASCE/ AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit Adaptive Structures Forum*. Flanders; Kissimmee, 1997: 13-26.
- [7] Yasui Y, Anahara M, Omori H. *Three Dimensional Fabric and Method for Making the Same*; US 5091246[P]. 1992-02-25.
- [8] Yasui Y, Hori F, Amano M, et al. *Method and Apparatus for Production of A Three-dimensional Fabric*; US 5772821[P]. 1998-06-30.
- [9] Bruno P S, Keith D O, Vicario A A. Automatically Woven Three Dimensional Composite Structures[J]. *SAMPE Quarterly*, 1986, (17): 10-16.
- [10] Curiskis J, Durie A, Nicolaidis A. Developments in Multiaxial Weaving for Advanced Composite Materials[C]//Editorial Committee of This Conference. *Proc. of the 11th Int. Conf. on Composite Materials*, 87-96.
- [11] Farley G L. *Method and Apparatus for Weaving a Woven Angle Ply Fabric*; US 5224519[P]. 1993-07-06.
- [12] Ruzand J M, Guenot G. *Multiaxial Three-Dimensional Fabric and Process for Its Manufacture*; International Patent WO, 20658[P]. 1994.
- [13] Bilisik A, Mohamed M H. Multiaxial 3D Weaving Machine and Properties of Multiaxial 3D Woven Carbon/Epoxy Composites[C]//Editorial Committee of This Proceeding. *Proceedings of American Society of Composites*, 1994.
- [14] Addis S R. *A Bias Yarn Assembly Forming Device*; International Patent WO, 06213[P]. 1996.
- [15] Florentine R A. *Apparatus for Weaving a Three-Dimensional Article*; US 4312261[P]. 1982-01-26.
- [16] Tong L, Mouritz A P, Bannister M K. *3D Fibre Reinforced Polymer Composites*[M]. Elsevier, 2002: 55-68.
- [17] Hogg P, Ahmadnia A, Guild F. The Mechanical Properties of Non-Crimped Fabric-Based Composites[J]. *Composites*, 1993, (24): 423-432.
- [18] Wang Fukun(汪福坤), HU Hong(胡红), 双轴向增强纬编间隔针织物的性能特点[J]. *Knitting Industry*(针织工业), 2006(4): 9-11.
- [19] Montaudon M. *Novoltex Textures for Thermostructural Material*[R]. AIAA1991-1848.
- [20] Boury D, Filipuzzi L. *Sepcarb Materials for Solid Rocket Booster Nozzle Components*[R]. AIAA2001-3438.
- [21] Delneste I. *Improvements in Mechanical Analysis of Multi-Directional Sepcarb Carbon-Carbon Composites*[R]. AIAA84-13.

中国材料进展  
MATERIALS CHINA

Http://www.mat-china.com

欢迎订阅

全年定价: 国内240元/年 国际120美元/年  
邮局订阅: 国内邮发代号: 52-281 国际发行代号: M2980  
发行订阅: 传真邮寄信息至029-86282362

通信地址: 陕西省西安市未央路96号 710016 电话: 029-86226599 E-mail: materialschina@163.com rml@c-nin.com