第9卷 第4期 复合材料学报 Vol.9 No.4
1992年 10月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA October 1992

纺织结构用于先进复合材料增强物的发展

董孚允

(天津纺织工学院，天津300160)

摘要 本文介绍了纺织结构复合材料的发展和研究情况。主要内容有：二维纺织结构复合材料的发展和应用问题；多向纺织结构复合材料的研究和应用前景。最后，对它的发展提出粗浅看法。

关键词 纺织结构复合材料，机织，针织，编织

1 前言

纺织结构复合材料是以织物形式作为增强物的复合材料。

先进复合材料增强纤维和基体材料的排列，最初是以不同取向角的单向层板，叠合起来，制成层合板。由于破坏容限和造价的限制，不能广泛应用。为此，人们结合制造增强塑料的经验，利用纺织工艺和织物结构力学理论，开展了研究。认为改善纤维结构，将其织造成织物，或在空间形成多层构造，是有效途径。首先提出二轴机织物、三轴织物；相继又研制了三维机织物、三维编织物和多层多向经编针织物。这样，可达到所需的纤维排列，提供多向增强。因此，破坏容限和抗冲击能力都有了提高；整体性和横向抗剪切性能得到改善。由于采用了纺织工艺的成形方法，在构造上有较好的稳定性和对复杂外形的适应性。

2 二维纺织结构复合材料

二维织物结构主要涉及机织的成形方法。它是用两组纤维束相互垂直交织。又可分为平纹、斜纹和缎纹织物。

平纹织物是最简单结构，在正交机织物中，它的构造最稳定。但对双曲面不易适应。斜纹织物经纬纱联结不如平纹织物。最好的增强物是缎纹织物，已广为应用。

为研究二轴机织结构复合材料的力学性能，提出镶嵌式、卷曲式和桥式三种分析模型[1]。镶嵌式模型将复合材料看成由非对称交叉层合板组成。连续卷曲纤维简化成多段直纤维后，用层合板理论分析。卷曲模型考虑到纤维的连续性和卷曲。沿纤维方向取出板条作为基本单元，用层合板理论计算。桥式模型分交织区和周围区，后者是直纤维组成的交叉层板。交织区为卷曲纤维区，面内刚度低于直纤维区。周围区承受较多的载荷，象桥一样起传

本文1991年7月8日收到

递载荷作用。用这三种模型，对混杂和非混杂的织物复合材料的本构方程进行了分析[2]，得出的结果与用同样缎纹织物结构（碳/环氧树脂）复合材料实验结论很一致。

非线性问题，也进行了研究[3]。它涉及到纬纱的剪切变形、纯基体区的伸长变形和经纱区的横向裂纹三种非线性因素。用桥式模型分析缎纹结构（玻璃/聚酰亚胺）复合材料的本构关系，与实验得出的应力——应变曲线完全符合。分析中看到，随着桥式模型尺寸的增大，非线性影响显著减小。

由于二轴机织物的各向异性和面内剪切抗力差，制成松散结构也较困难，因之研制了由三组纤维束彼此相隔60°交织成的三轴机织物。它是准各向同性的二维织物，且提高了面内剪切刚度，即便是很松的结构，也有良好的整体性。

三轴机织物的力学分析，大多数采用卷曲模型。取三个在空间定向的浸渍纤维束和间隙区，看成波形单向板分析。以其集合描述复合材料的力学特性。最近Leaf[4]提出织物的锯齿形模型，简化了分析。现已用到三轴织物复合材料的模量研究[5]。

3 多向纺织结构复合材料

多向纺织物是在传统纺织品基础上发展起来的一种结构体。因结构的多样化，性能的综合化和形态的可设计性，作为复合材料的增强物很有前途。它可用针织、机织和编织作成薄壁的三维结构；也可制成整体三维机织、三维编织结构和多向经编织物的缝合体[6]。

3.1 薄壁三维结构

针织是将一根根纱线弯成线圈，相互串套联结而成，是一种连续纤维的增强。它便于自动化和在计算机控制下生产。能织出平面的、圆筒状、圆锥形和球形表面，还可进一步组合成所需形状的三维空间结构。它是制造三维薄壁结构的重要方法。

简单机织生产二维平面织物。但将普通织机作若干调整，采用多层织造工艺，即可织出双层织物，在两层之间加上衬垫即成为所需的空心或层状结构。

最简单的编织结构与平纹机织类似。两组纱线在交叉处交替穿过。增加一根衬纱即构成三轴编织物。若纱线在机器上排成圆圈，两组纱线相向交错形成8字形运动轨迹，则织成圆筒形构件。

3.2 整体三维机织复合材料 最简单形式是由三个纤维束构成正交结构，若束的材料或束内纤维数有所不同，则为混杂结构。用常规的织机，作小的改变，用多层织造的方法，即可实现这种织造工艺。若一组双排经线进入织造区后，沿着与织轴成45°方向送经，而多根纬纱往返穿梭于两根经纱之间，则形成多纬双经机织物（图1）。如一组经纱的走向成角度，另一组垂直于织轴，使织物的力学性能更加均匀，并有利于提高其强度。

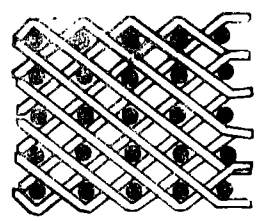

图1 多层三维机织物

整体三维机织物复合材料的力学分析可用极值法、层合板法和有限元法。极值法考虑到纤维束与基体材料之间的空隙和裂缝，将裂缝看成薄的平板，得出弹性特性的上限和下限。

Ilalpin等[7]假设三维机织复合材料由平纹正方形织造单元中穿过一根垂直织物平面的

纱线构成。将其投影到三个坐标面上，求得二维问题的性能，用其总的贡献表达三维复合材料的特性。

疲劳和损伤的分析，已引起重视。Schulte等[8]用碳纤维的缎纹织物复合材料，研究初始裂纹的产生和扩展，脱层和纤维的断裂，证实这种复合材料有较好的疲劳特性。

3.3 整体三维编织复合材料，适应了产品由简单的板状、块状发展成复杂异形体的要求。在材料的分布和取向上有很大灵活性。消除了层间面，因之提高了破坏容限和抗冲击性能。

整体三维编织的基本形式如图2。导纱管在ABCD平面内的任意方向运动，纱线以力P拉出，织成三维织物。由于纱线有一角度，织物被拉紧，不必再打纬。若导纱管作随机运动，将产生不规则的图案。目前的研究和使用集中在规则结构上。特别是四步编织和两步编织发展较快。

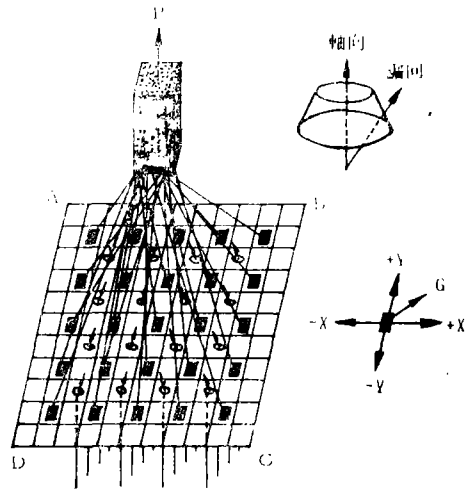

图2　三维编织原理

导纱管运动限于X，Y方向的编织机已经制成。它是四步编织或称笛卡编织。两步编织工艺中，轴向是该结构的主要成分，编织过程中在X、Y方向运动，垂直地穿过轴向纱线。若变化轴的方向，可得到各种形状的结构。Li等[9]对四步和两步编织结构的理论模型已建立，完成了予型件结构的几何分析，纤维取向、纱线的体积含量、予型件的尺寸等结构参数间的数学关系也已导出。

整体编织复合材料的力学分析，Yang等[10]提出倾斜纤维模型。它是由一个矩形平行六面体中的四个空间对角线方向纤维构成的理想单元，同一层内所有平行于对角线方向的纤维束，浸渍基体材料后，看成倾斜层板。用四个倾斜层板的集合，描述该复合材料的特性。

最近，Delneste等[11]用三维弹性体的有限元模型，分析在对角线方向加强的多维织物复合材料的力学性能。并可将其用到三维编织复合材料。

Magidi等[12]用能量法研究了机织和编织物的力学特性，并探讨了疲劳破坏机理，在实践中得到应用。他对金属基（Al纤维/Al-Li）三维编织复合材料的可靠性进行了分析[13]，结果表明它有较高的断裂韧性和抗冲击能力。面内刚度、强度也显示出优越性。

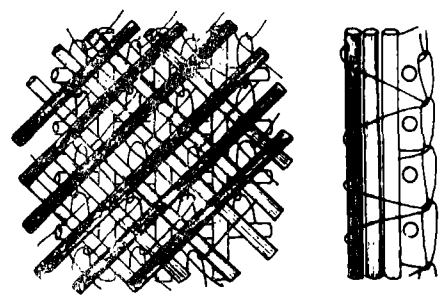

图3　多向经编针织物

3.4 随着纺织工艺的发展，多向经编针织结构有了发展[14]，开始于用薄层复合材料的增强。它由高模量的纬纱、经纱和各种直线形或曲线形的偏斜纱构成（图3）。其纵向强度和稳定性由衬经纱提供，织物横向尺寸稳定和强度由衬纬纱提供，斜

向稳定和强度由变角度的斜铺纱提供。若以该多向经编结构为基本单元，几块叠放在一起用纱线缝合，则构成多层多向经编针织结构复合材料。美国NASA对多层多向经编针织复合材料的特性进行了研究，并在航空航天部门应用。

4 结束语

纺织结构复合材料是纺织工业与材料科学相结合的产物。发展中，也提出一些课题，需深入研究，逐步解决。

基础研究方面，首要的是发展三维织物结构的拓扑学和几何学。它对控制予型件中纱线的位置和基体材料的流动都起指导作用。

当前结构力学的研究，应着重于一些结构参数对复合材料性能的作用问题。

涉及到损伤、疲劳、断裂、冲击和蠕变等引起材料的强度和刚度下降因素的研究也应加强。

纺织结构复合材料的实验和加工，尚需引进新技术、新工艺。许多设备的研制也应提到日程。

国内纺织结构复合材料的研制已经开始，但基本数据的测试，基础资料的积累与交流要给予重视。

参 考 文 献

1 Ishikawa T, Chou T W. Proc of ICCM-4. 1982:489
2 Ishikawa T, Matsushima M, Hayashi Y, Chou T W. J Comp Mater. 1985, 19:443
3 Ishikawa T, Chou T W. J Comp Mater. 1983, 17:399
4 Leaf G A, Kandil K H. J Text Inst. 1980, 71:1
5 董孚允. 三轴织物复合材料模量分析. 纺织基础科学学报.1991, 3:217
6 Hearle J W S, Du G W. J Text Inst. 1990, 81:369
7 Halpin J D, Jerina K L, Whitney J. J Comp Mater. 1972, 6
8 Schulte K, Resse E, Chou T W. Proc of ICCM-6. 1987, IV:89
9 Li W, Hammad M, Shiekh A E. J Text Inst. 1990, 81:491
10 Yang J M, Ma C L, Chou T W. J Comp Mater. 1986, 20:472
11 Delneste L. ATAA J. 1983, 21:443
12 Majidi A P, Yang J M, Chou T W. Proc of ICCM-5. 1985:1247
13 Majidi A P, Chou T W. Proc of ICCM-6. 1987, Ⅱ:422
14 吴健强译. 作复合材料用途的织物织造技术. 国标纺织品动态, 1991, 2:53

THE DEVELOPMENT OF TEXTILE STRUCTURE AS REINFORCEMENT FOR ADVANCED COMPOSITE MATERIALS

Dong Fuyun

(Tianjin Institute of Textile Science and Technology)

Abstract The development and research of textile structural composites are reviewed in this paper. The main topics include the development and application of two-dimensional textile structural composites, as well the research and application prospect of multidirectional textile structural composites. Finally, Some simple opinions on the further development of textile structural composites are presented.

Key words textile structural composites, weave, knit, braid

（上接第46页）

该特性在压缩强度方面表现特别明显，所以Compressive strength at hot and wet conditions（简称CHW）就成了筛选树脂的重要项目。在ACM零部件进行型式认证时，美国航空局（FAA）发布了Advisory circular A20-107（1978年制定，1984年改订A），制定了耐环境性，特别是考虑了湿度和温度影响的设计标准，并指示通过试验求取设计容许值。

"Bakelite" ERL 4617的出现，促使人们把眼光转向缩水甘油醚型以外的环氧树脂，这一点很有意义。环氧树脂在结构上有若干种，而工业生产的几乎都是缩水甘油醚型，此外则仅限于特殊用途。Narmco公司1973年发现四环氧丙基氨基二苯基甲烷（TGDDM，市售品Ciba Geigy公司为"Araldite" MY720)-DDS能给出与ERL4617-MPDA相同水平的高层间剪切强度，耐环境性也好，以"Rigidite" 5208加以发表。该树脂体系在此之前也曾用于耐热GFRP铺层板，但由于高价格、树脂调配困难、不易固化、预浸料粘性寿命短等原因，用量很少。但对CFRP来说当时的发表正合时宜，故T300/5208直接占据了航空航天设备用材料的主要地位。随后，各公司都在预浸料中仿效TGDDM-DDS体系，出现了Fiberite公司的934，Courtaulds公司的3501，还有受权该公司许可的Hercules公司的3501-6，Fothergil & Harvey公司（现在为Cyanamid公司）的69，东丽公司3601*等，都使用该体系的树脂。现在，T300/5208及"Magnamite" AS4/3501-6仍然在Boeing公司的737-300、757、767以及McDonnell Douglas公司的MD80、F15、AV8B等机种上使用，是第一代标准型材料，成为考虑新型CFRP的"基线"。

除吸湿和高温之外，对耐环境性还有诸多要求。例如，关于温度，在同温层飞行时的－45℃和宇宙空间的－150℃～＋180℃下，材料的性能会成为问题。对化学药品，有必要留意以下几点：尾翼或主翼常作油箱使用，CFRP会直接接触石油烃类；机械零部件以油压驱动，CFRP有时会接触液压油；涂装，由于采用含有机溶剂的腻子或涂料，基体树脂有时因