第11卷 第2期 复合材料学报 Vol.11 No.2
1994年 6月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA June 1994

三维编织多功能结构复合材料的发展

肖丽华 杨桂

(天津纺织工学院，300160)

摘 要 在某些实际应用中，需要复合材料不仅具有多种功能，例如抗烧蚀、抗冲击、隔热等，而且还能作为结构材料使用，这种复合材料可以称为多功能结构复合材料。在多功能结构复合材料设计中需要按不同的功能应用和力学特性进行分层设计。利用三维编织技术可以实现多功能结构复合材料的分层异形整体编织，为多功能结构复合材料的发展提供了可能性。本文介绍了三维编织复合材料的性能和制作多功能结构复合材料所采用的三维编织技术。

关键词 三维编织技术，复合材料，多功能结构复合材料

1 概 述

复合材料用途可以分为功能复合材料[1]和结构复合材料[2,3]。功能复合材料是利用复合材料的物理、化学和生物的功能为主要用途的复合材料。例如，可以利用电、磁、射线、声、热和放射性等物理性能，还可以利用耐酸、碱腐蚀等化学性能。而结构复合材料是利用它良好的力学性能，例如，比强度高、比刚度大、耐疲劳、抗冲击等，来制造结构的复合材料。

自从制作复合材料采用了纺织技术以后，发展了纺织复合材料。纺织复合材料同样可以分为纺织功能复合材料和纺织结构复合材料[4,5]。当然，作为结构复合材料也可能具有一些良好的非力学性能，例如，碳纤维三维编织结构复合材料就具有十分良好的耐烧蚀性能[6]。

在某些应用中，需要复合材料既具有多种功能，又具有良好的力学性能。例如，在航天应用中既需要复合材料具有耐烧蚀、隔热、耐老化、抗冲击等多种功能，又需要它能用来制作结构；在防护装甲应用中，既要求复合材料具有抗瞬间高温热蚀、阻挡放射性、抗冲击等多种功能，又要求复合材料能用来制作结构；另外，在仪器防护中，既要求复合材料具有很好的透X-射线、抗瞬间高温热蚀、抗冲击等多种功能，又要求复合材料能用来制作结构。还有许多其它的应用都有类似的情形，于是可以把这类复合材料称为多功能结构复合材料。定义多功能结构复合材料的原因还在于需要发展新工艺来制作这种复合材料。三维编织技术提供了制作多功能结构复合材料的手段。按照不同功能的需要选用不同的纤维再利用三维分

本文1992年5月31日收到

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

层整体编织工艺把具有不同功能的层整体地编织在一起，形成三维多层整体织物，在某种意义上说，这是复合材料的第二次复合，即功能与结构的复合。

2 三维编织结构复合材料的特性

2.1 显著提高复合材料的整体强度和刚度

采用三维编织制造的复合材料具有整体性和力学上结构的合理性两大特点。从编织、复合到成品，不分层，无机械加工，或仅做不损伤纤维的少量加工，从而保持整体性。

A.B.Macander等[7]，于1986年提出并且完成了一组实验，说明了三维编织物的整体性能大幅度地提高复合材料的强度和刚度这一事实。他们把碳/环氧复合材料试片分为两组，一组经过加工，另一组未加工。实验数据（表1）表明加工后的试片的拉伸强度和拉伸模量值有大幅度的下降。以表中的第一组数据为例，左边未加工的试片的拉伸强度为665.6MPa，模量为97.8GPa；而右边加工过的试片的拉伸强度仅为228.7MPa，模量仅为50.5GPa。这说明加工使试片的强度值下降65.6%，约为未加工的1/3，模量值下降48.4%，约为未加工的1/2。这充分说明了保持复合材料整体性的重要意义。

表1 保持整体性的重要意义

（三维编织碳/环氧复合材料性能数据）

特征	T300 1X1 未加工	T300 1X1 加工	T300 3X1 未加工	T300 3X1 加工
V_f(%)	68	68	68	68
拉伸强度(MPa)	665.6	228.7	970.5	363.7
弹性模量(GPa)	97.8	50.5	126.4	76.4

2.2 具有良好的抗损伤性

良好的抗损伤性是复合材料三维编织结构的突出特点。L.W.Gause等首先指出三维编织结构复合材料具有这一特点[8]。他们的实验是在试片上钻孔，然后再观察拉伸强度的变化，实验结果表明，复合材料三维编织结构钻孔后仍旧能保持90%以上的拉伸强度。然而铺层的准各向同性复合材料仅能保持50%的拉伸强度。F.K.Ko用玻纤/环氧[9]和碳纤/PEEK完成了类似的实验[10]。实验的结果表明，三维编织结构复合材料能有效地限制冲击损伤的面积。复合材料三维编织结构和层状结构的抗冲击性能比较数据为：在3000磅力/平方英寸的冲击之下，层状结构的损伤面积约比三维编织结构的损伤面积大10倍。

由天津纺织工学院编织、航空航天部北京材料研究所固化成型的三维整体编织结构试样进行了轻气炮冲击实验。在弹丸的速度为7000米/秒，弹丸动能为4480焦耳的条件下，复合材料三维整体编织结构试样是目前唯一未发生整体破坏的试样[11]。这表明采用三维整体编织技术制作的复合材料具有能承受高温高压冲击波的优良性能。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.3 具有良好的耐烧蚀性

采用三维整体编织技术制作的复合材料比三向正交复合材料和缠绕复合材料有更好的耐烧蚀性能。与三向正交复合材料相比烧蚀率下降约20%（表2）[11]。

表2　不同工艺制作的复合材料性能对比表

材料制作工艺	拉伸强度 (MPa)	拉伸模量 (GPa)	线烧蚀率 (mm/s)	背面升温 (°C)
三维编织碳/酚醛	>500	35.5	0.18	15
三向正交碳/酚醛	402	36.4	0.22	25
斜向缠绕碳/酚醛	24	7.8	0.22	

3　设计三维编织多功能结构复合材料的考虑

设计三维编织多功能结构复合材料要考虑到实际应用的需要，按照不同功能的要求进行分层设计。

在航天应用中既需要复合材料具有耐烧蚀、隔热、耐老化、抗冲击等多种功能，又需要它能用来制作结构。所以，基本上可以考虑分为三层设计：外层为耐烧蚀层，中间为隔热层，里层为结构层。耐烧蚀层采用碳纤维，隔热层采用玻璃纤维，结构层采用碳纤维。烧蚀是热化学和气流冲刷的综合效应，而三维编织的纤维呈四向分布，从侧面看纤维为直立倾斜交织状，而且纤维的体积密度可达68%，这样就形成致密而直立交织的碳纤维层，它具有良好的耐烧蚀性能（表2）。根据实验数据设计各层的厚度，再考虑到整体性的优势：良好的抗冲击性能和对结构的补充，可以设计出在该应用中较为理想的三维编织多功能结构层合材料。

在仪器防护中，既要求复合材料具有很好的透X-射线、抗瞬间高温热蚀、抗碎片冲击等多种功能，又要求复合材料能用来制作结构。在该应用中，透X-射线性能是需要保证的前提条件。任何材料都对X-射线吸收和散射，经过分析，碳纤维/环氧复合材料对X-射线的吸收比铝低10%，对X-射线的散射比铝低50%，而且碳纤维/环氧复合材料使用较为普遍，所以，决定以碳纤维/环氧复合材料为结构层。为了使材料具有抗瞬间高温热蚀和抗碎片冲击的功能，在碳纤维/环氧复合材料结构层的前面还设计了陶瓷阻挡层和石墨缓冲层。根据瞬间高温热蚀的强弱和碎片冲击的大小，阻挡层和缓冲层还可以有一定次数的循环。

以上所设计的多功能结构复合材料采用三维分层整体编织工艺将它们编织在一起，然后固化成型投入使用。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4 三维分层整体编织工艺

目前天津纺织工学院已经能实现三维整体编织工艺，其中包括厚壁管和异型管编织，T-梁、L-梁、工-梁、Π-梁、方盒梁等型材的编织。在编织以前使用CAD系统进行计算，以保证材料的几何尺寸和纤维的体积百分含量。根据实际应用的需要，又发展了大尺寸构件编织工艺、不同纤维混杂编织工艺、按要求百分比部分参与编织工艺，以及不同纤维分层整体编织工艺。

制作多功能结构复合材料比较好的方案之一是三维分层整体编织工艺。该工艺的实现方法有交织法和编织法两种。

4.1 交织法

在编织之前，按照每层厚度的要求分别计算出布线的排数和列数进行布线。每完成一轮编织之后，在层与层的交界处进行一次层边纤维的互相交织，依次循环直至结束。这种分层整体编织的结果是在分层的接触面上仅有一排纤维束互相交织，使得层与层之间的界线清晰，如果分层的厚度受到限制时，应该采用交织法。在编织机设计时，除了要考虑正常的编织驱动以外，还要考虑层间交织的特殊驱动，而且编织机还要适应分层厚度改变的需要。

4.2 编织法

编织法与交织法的主要区别是互相交织的纤维束的排数。在交织法中，互相交织的纤维束仅有一排，在编织法中，互相交织的纤维束多一些，它们自己形成一层混杂编织薄层。例如，在碳纤维层和玻璃纤维层之间可以形成碳纤维和玻璃纤维的混杂编织层，碳纤维层和玻璃纤维层中的纤维束都保持在自己的层内。编织法的混杂交织层具有一定的厚度，而且混杂编织在两层之间形成一个过渡，与交织法相比，编织法的层间结合更强、整体性更好一些。

5 结 论

多功能结构复合材料是多方面应用的需要，它是一类复合材料形式，或者说是发展复合材料的一个方面，单独提出和发展多功能结构复合材料形式在实际应用中会起很大的作用。三维分层整体编织技术为实现多功能结构复合材料提供了一种工艺手段，为发展多功能结构复合材料建立了基础。

参 考 文 献

1 森田干郎. 机能性复合材料的将来动向. 日本复合材料学会志, 1985; 11(5): 244-249
2 Angarwal B D, Broutman L J. Analysis and Performance of Fiber Composites. John Wiley and Sons, Inc. New York, 1980
3 Piggot M R. Advances in Composite Materials. Appl Sci Pub, London, 1978
4 Hamelin P, Verchery G. Textile Composites in Building Construction. editions pluralis, 1990
5 Chou T W, Ko F X. Textile Structural Composites. Elsevier Science Publishers B.V., 1989

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

6 杨桂，刘方龙等．复合材料三维整体编织结构技术与特性．复合材料学报，1992；9(1):85-91
7 Macander A B, Crane R M, Camponeschi E T. Fabrication and mechanical properties of multidimensionally (X-D) braided composite materials, in Composite Materials:Testing and Design (Seventh Conference), STP893, Whitney J M, ed., American Society for Testing and Materials, 1986: 422-443
8 Gause L W, Alper J. Mechanical characterisation of magnaweave braided composites, Paper presented at the Mechanics of Composites Review.Air Force Materials Laboratory,Oct.1983
9 Frank Ko, Hartman D. Impact behavior of 2D and 3D Glass/Epoxy composites, SAMPE, July/August 1986: 26-29
10 Frank Ko, Chou H, Ying E. Damage tolerance of 3D braided comingled Carbon/PEEK composites. Proceedings of the Advanced Composites Conference, 1986
11 航空航天部北京材料研究所实验报告，1991

THE DEVELOPMENT OF 3-D BRAID MULTIFUNCTION STRUCTURE COMPOSITES

Xiao Lihua　　Yang Gui

(Textile Composites Center Tianjin Instinite of Textile Science and Technology)

Abstract　Owing to the need of certain application a type of composite matarial is made not only to be a structural material but also to be provided with multiple functions, such as ablation resistance, impact resistance, thermal insulation etc. This type of composite material might be called "Multifunction Structure Composite Material" which should be designed by means of respective multilayers, so that different layers have different functions. The possibility to develop and apply multifunction structure composits materials is provided by 3-D braid technologies, because of the integrated and special-shaped 3-D braid technologies to make different layers interbraided. The performance of 3-D braided composites and 3-D braid technologies manufacturing multifunction structure composite materials are discribed in this paper.

Key words　3-D braid technologies, composite, multifunction structure composite

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net