

文章编号: 1000-6893(2007)04-0869-05

三维五向碳/酚醛编织复合材料的拉伸性能及破坏机理

李仲平^{1,3}, 卢子兴², 冯志海³, 李典森²

(1. 北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

(2. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

(3. 航天材料工艺研究所, 北京 100076)

Investigation of the Tensile Properties and Failure Mechanism of Integrally-braided 5D Carbon/ Phenolic Composites

LI Zhong-ping^{1,3}, LU Zi-xing², FENG Zhi-hai³, LI Dian-sen²

(1. School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and
Astronautics, Beijing 10083, China)

(2. School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and
Astronautics, Beijing 10083, China)

(3. Institute of Space Material Technology, Beijing 10076, China)

摘 要: 对不同编织角、不同体积含量的三维五向碳/酚醛编织复合材料进行了纵向(编织方向)拉伸实验和横向拉伸的对比实验,获得了这些编织复合材料的主要拉伸力学性能。实验后对拉伸试件的断口进行了照相和扫描电镜观察,分析了材料的变形及其破坏机理。实验结果表明:编织角仍是影响三维五向编织复合材料拉伸力学性能的主要因素,并且复合工艺的质量对复合材料的力学性能有重要影响。此外,发现三维五向碳/酚醛编织复合材料的横向拉伸与纵向拉伸具有完全不同的破坏机制。

关键词: 三维五向编织复合材料; 拉伸性能; 破坏机理; 碳/酚醛

中图分类号: V258; TB332 **文献标识码:** A

Abstract: Longitudinal (braiding direction) tensile tests were performed for integrally-braided 5D carbon/phenolic composites with different braiding angles and fiber volume fractions, and transverse tensile tests were also done for comparison. The main mechanical properties were obtained. After the test, fracture morphology and microstructure observation were performed to further understand the deformation and the failure mechanism. The experimental results show that the braiding angle still has a primary influence on the mechanical properties of 5D composites, and the processing quality of 5D composites has significant influence on their mechanical properties. In addition, it is found that the longitudinal tensile failure mechanism of the composites is very different from the transverse tensile failure mechanism.

Key words: integrally-braided 5D composite; tensile property; failure mechanism; carbon/phenolic

三维编织复合材料是近年来发展的新型高性能结构材料,具有高强度、高模量、高损伤容限、抗冲击、耐烧蚀等性能特点,在航空、航天等领域具有重要的应用价值^[1]。由于三维五向编织复合材料沿编织方向加入了不参与编织的纱线,所以改善了编织复合材料在此方向的力学性能,可满足某些特定结构件的设计需求。关于三维四向编织复合材料力学性能方面的实验研究国内外已有较多报道^[1-7],但对三维五向编织复合材料力学性能的实验工作报道甚少,并且多数工作是针对碳/环氧编织复合材料进行的^[8-10]。本文针对不同编织

角、不同体积含量的三维五向碳/酚醛编织复合材料进行了纵向(编织方向)拉伸实验,获得了这些编织复合材料的主要拉伸力学性能,研究了这类材料的力学行为;同时,还给出了三维五向编织复合材料横向拉伸的对比实验结果。实验后,对拉伸试件的断口进行了拍照和扫描电镜分析,探讨了材料的变形及其破坏机理。

1 实验描述

(1) 测试试件

三维五向碳/酚醛编织复合材料试件(5D试件)中增强体的编织纱为 T300 9k 碳纤维,轴纱为 T300 6k 碳纤维,基体为酚醛树脂。编织体采用四步法预成型,加轴纱比例为 1:1,经 RTM 复合固化制得复合材料试件。拉伸试件的尺寸为

收稿日期:2006-05-25; 修订日期:2006-11-06

基金项目:航空科学基金(04B51045)

通讯作者:卢子兴 E-mail:luzixing@buaa.edu.cn

150 mm × 20 mm × 4 mm, 两端贴有 1 mm 厚的玻璃钢加强筋片, 实验段标距长度为 50 mm。制得的复合材料试件实物图如图 1 所示。



图 1 拉伸试件的实物图

Fig. 1 Tensile specimen

(2) 测试标准及条件

根据 GB1447-83《玻璃纤维增强塑料拉伸性能试验方法》测定, 试验在 MTS 万能材料试验机上进行, 试件的拉伸加载速率控制在 5 mm/min; 试件的变形分别用电子引伸计和电阻应变计测量。测试温度为 24℃, 相对湿度为 60%。拉伸实验后, 试件的断口先照相, 后在扫描电镜 (S-570 型) 下进一步观测。

2 试件参数

根据实验方案, 试件分为纵向拉伸和横向拉伸两种。拉伸试件的参数见表 1。五向编织复合材料纵向拉伸试件分为 4 组, 横向拉伸试件 1 组, 每组共有 5 个试件。

表 1 试件参数

Table 1 Parameters of the specimens

编号	编织角/(°)	V_f /%	加载方式
5ZL1	20	45	纵向
5ZL2	30	50	纵向
5ZL3	40	50	纵向
5ZL4	20	55	纵向
5HL1	25	50	横向

3 实验结果与分析

从图 2 可以看出, 五向编织复合材料的纵向拉伸应力-应变曲线基本上呈线弹性特征, 材料表现为脆性。但是, 当编织角较大时 (如编织角为 40°), 纵向拉伸应力-应变曲线也会逐渐表现出非线性特征, 这与四向编织复合材料的实验结果一致^[5]。所不同的是, 五向编织复合材料由于轴纱的加入, 使材料的脆性更为明显。虽然五向编织复合材料的横向拉伸实验只对 1 组材料进行, 但从图 3 可以看出, 五向编织复合材料的横向拉伸应力-应变曲线特征与纵向拉伸不同, 呈现出非常明显的非线性特性, 且与相应的纵向拉伸情况相比其拉伸模量与拉伸强度均较低 (见图 4 和图 5), 破坏应变较大 (见图 6), 泊松比较小 (见图 7)。上述实验结果表明, 纵向拉伸与横向拉伸时五向

编织复合材料的破坏机理是完全不同的。

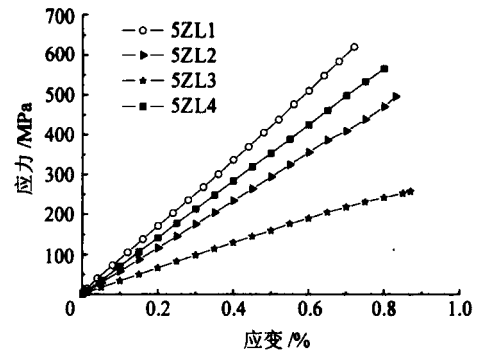


图 2 纵向拉伸应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of longitudinal tension

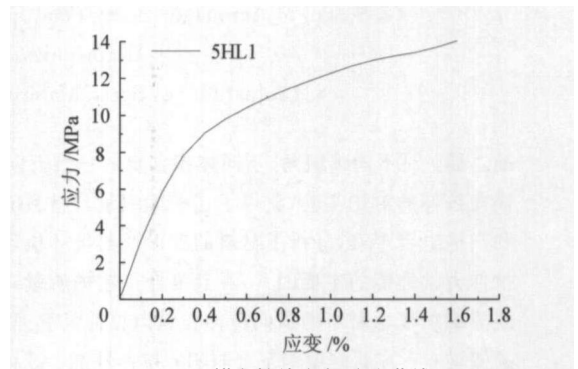


图 3 横向拉伸应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of transverse tension

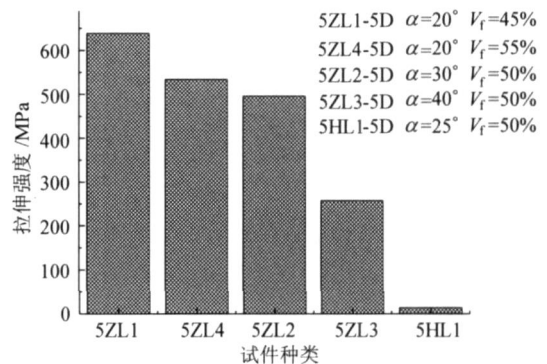


图 4 拉伸强度对比

Fig. 4 Comparison of tensile strength

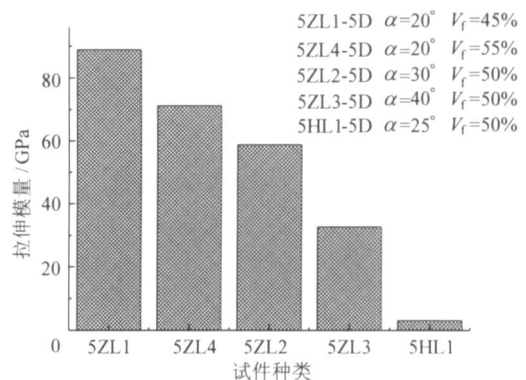


图 5 拉伸模量对比

Fig. 5 Comparison of tensile moduli

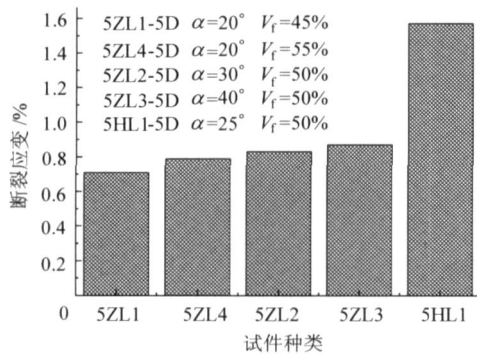


图6 破坏应变对比

Fig. 6 Comparison of failure strains

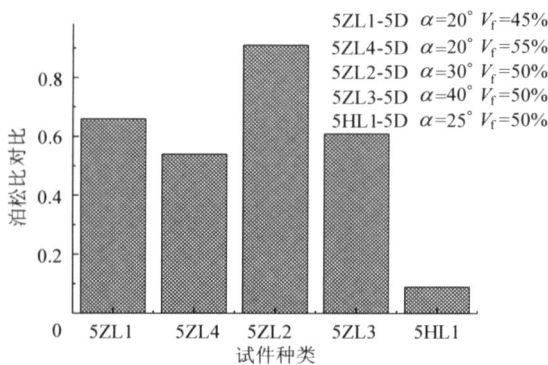


图7 破坏应变对比

Fig. 7 Comparison of Poisson ratios

图4~图7给出了五向编织复合材料的主要拉伸力学性能的测试结果(5个试件的平均值)。由图4和图5可见,五向编织复合材料的纵向拉伸强度和拉伸模量都较高,这是由于轴纱的加入,增大了编织方向的纱线比例,对轴向拉伸性能的贡献较大,使试件在轴向的承载能力得到增强的结果。此外,由图4和图5还可以看到,五向编织复合材料的纵向拉伸性能随编织角的增加而减小,这与四向编织复合材料随编织角变化的规律相同^[5],也与理论预测结果一致^[11]。之所以如此,是因为编织复合材料的编织角越大,编织纱线在轴向的承载贡献就越小。对比5ZL1和5ZL4两种材料,它们的编织角相同,纤维体积含量前者低于后者,但它们的拉伸模量与拉伸强度却是后者低于前者,与理论上的规律存在一定偏差^[11]。究其原因,可归结为复合工艺质量较差造成的问题。正如文献[12]的实验结果所表明的,随着纤维体积含量的增加,三维编织复合材料的渗透率会下降,尤其是沿编织轴向下下降的速度更快。因此,当材料的纤维体积含量过高时,会使材料的渗透率过低,由此造成复合材料的复合质量较差,在材料内部会产生缺陷和大量的孔隙,因而导致纤

维体积含量高的材料其力学性能反而下降的情况。对比5ZL4与5ZL2两种材料可知,虽然5ZL4的纤维体积含量比5ZL2稍大一些,而其编织角又比5ZL2小一些,但其拉伸强度和拉伸模量却比5ZL2的大一些(见图4和图5)。这一结果充分说明,编织角对五向编织复合材料的力学性能的影响是最主要的,比纤维体积含量提高可能导致的劣化影响大得多。关于编织角对五向编织复合材料的力学性能的影响的程度,从5ZL2和5ZL3的对比看得更为清楚(见图4和图5),因为两者的体积含量相同,编织角是不同的。图6给出了几种材料拉伸破坏应变的对比结果,可见,纵向拉伸时五向编织复合材料的纵向破坏应变随着编织角的增加而增大,这说明材料的变形能力是随编织角的增加而逐渐增强的。由5ZL1和5ZL4的对比可知,编织角相同而纤维体积含量增加时,材料的破坏应变有所增加,该结果与孔隙或缺陷导致模量和强度降低的影响解释是一致的。此外,一般而言,五向编织复合材料的破坏应变小于相应的四向编织复合材料的破坏应变^[5],这表明轴纱的加入,会限制材料的面内方向的形变,使得材料的破坏应变下降,同时也降低了材料的泊松比。由图7可看出,随着编织角的增大,五向编织复合材料的泊松比呈现先增大后减小的变化规律,这与理论预测的趋势是一致的,但测量值较高^[11]。但对比5ZL1和5ZL4的泊松比时发现,两者的编织角相同,而5ZL4的纤维体积含量较大,其泊松比却较低,这很可能也是材料的渗透率过低,复合质量较差造成的结果。

4 断口形貌及破坏机理分析

图8为纵向拉伸试件5ZL1的宏观断口照片,可见,编织角较小时,纤维束被拉断,断口比较平齐,断口表面上伴有一些碎裂。通过扫描电镜的进一步观察,由图9(a)可看到纤维单丝的拉断情景,一些地方纤维与树脂间界面的粘结强度较高,界面没有开裂,纤维也没有发生扭曲现象,但远离纤维的基体呈现一定的脆性特征;在断口附近也有一些地方的纤维表面出现了裂纹,这表明破坏起源于纤维表面有缺陷的部位。另外,可见断裂面上纤维的拔出较少,纤维基本上呈正应力作用下的脆断特征。同时,由图9(b)可见,分布在纤维周围的基体发生了屈服,有较明显的塑性变形痕迹,在纤维与树脂间界面形成较清晰的剪切滑移带。

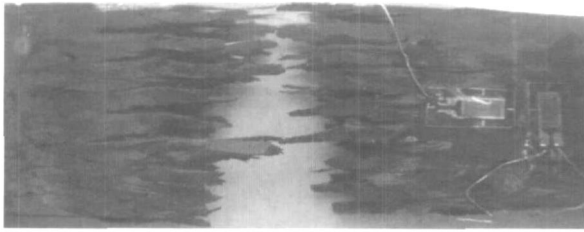


图8 5ZL1 试件断口宏观照片

Fig. 8 Photos of fracture surface of 5ZL1 specimen

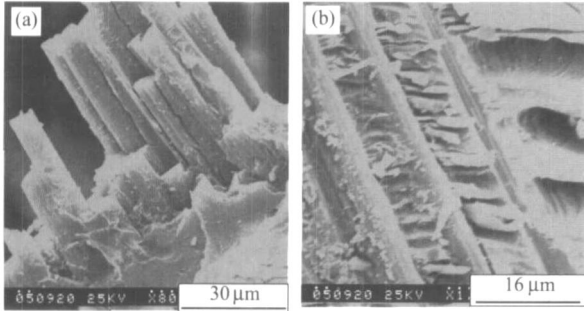


图9 5ZL1 试件断口 SEM 照片

Fig. 9 SEM of fracture surface of 5ZL1 specimen

图10为纵向拉伸试件5ZL3的断口照片,可见,随着编织角增大,会出现不规则的倾斜断面,纤维断裂时的不平整度增加,断口呈现一定角度的剪切断裂特征。从图11(a)的照片可以看出,纤维与基体粘结较好,但纤维发生了弯曲。同时还可以看出,树脂基体呈现明显的塑性变形特征,具有清晰的剪切带,这是由于基体的拉伸应变大于纤维,在拉剪应力作用下,首先在纤维间的基体中产生了剪切变形,表现为基体的塑性变形。电镜的观察还表明,拉伸过程中纤维拔出较多,有些纤维

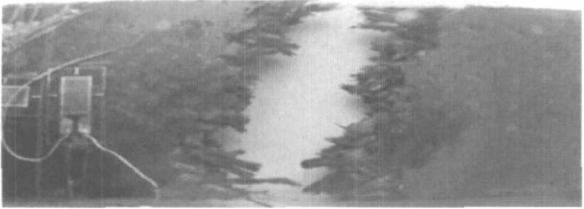


图10 5ZL3 试件断口宏观照片

Fig. 10 Photos of fracture surface of 5ZL3 specimen

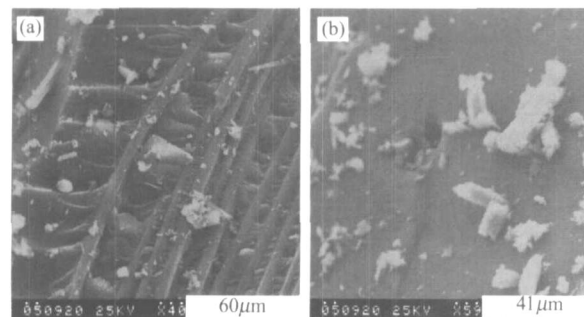


图11 5ZL3 试件断口 SEM 照片

Fig. 11 SEM of fracture surface of 5ZL3 specimen

呈剪切韧断。此外,如图11(b)所示,在界面附近存在孔洞,还存在白色状的基体脱落和纤维脆断的痕迹。这些表明编织角较大的复合材料纵向拉伸时破坏机理与编织角较小的情况是有所区别的。

图12为五向编织复合材料横向拉伸试件5HL1断口的照片。可见,破坏断口沿表面倾斜方向扩展,表现为基体和纤维的界面上存在一定的剪切破坏特征。图13(a)、(b)给出了5HL1材料横向拉伸断口的扫描电镜照片,从图13(a)可以看出,在纤维与基体的界面上开裂严重,成束的纤维从断口界面处拔出,呈分离状,且拔出的纤维较光滑,纤维与纤维之间基体粘附很少。这说明五向编织复合材料存在较多的界面孔隙缺陷,承载过程中纤维束基本完好,纤维间很容易发生严重的分离现象,从而降低材料的横向拉伸力学性能。从图13(b)可见,纤维束与基体的界面产生严重破坏,界面开裂,同时可以看到,界面上有大量的孔洞、微裂纹等,这表明纤维与基体界面结合质量较差。因此,横向拉伸破坏主要是由于基体受到较大的拉伸应力和较大的挤压应力,使基体屈服或开裂,丧失了对纤维束网络的支撑和约束作用,导致纤维束与基体之间的界面脱粘破坏,纤维横向被拉脱,从而降低了材料的承载能力,直至破坏,这也是造成横向拉伸应力-应变曲线呈非线性的主要原因。



图12 5HL1 试件断口宏观照片

Fig. 12 Photos of fracture surface of 5HL1 specimen

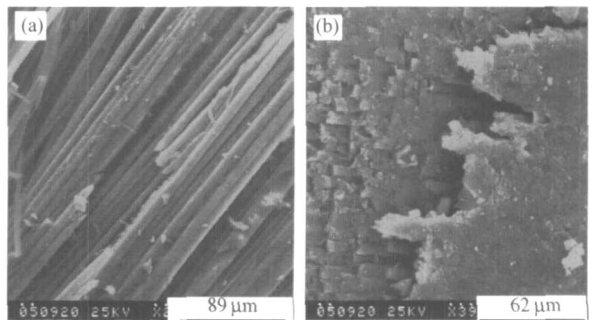


图13 5HL1 试件断口 SEM 照片

Fig. 13 SEM of fracture surface of 5HL1 specimen

综上所述,五向编织复合材料纵向拉伸时如果编织角较小,纤维可作为主要的承载体,又因纤

纤维与基体的界面结合强度较高,界面和纤维阻碍了裂纹的扩展,从而导致了较高的力学性能,最终使纤维基本上呈正应力脆性拉断特征。但当编织角较大时,在拉伸载荷作用下,编织纤维束会弯曲,并且由于纤维束的拉、剪断裂而拔出造成了界面破坏和轴纱的断裂,最终导致了较低的力学性能。因此,五向编织复合材料的纵向拉伸性能主要由纤维束的拉伸性能决定,若纤维束能更多地承受拉伸载荷,则宏观上就表现为较高的拉伸强度和模量。相反,五向编织复合材料的横向拉伸性能主要是由纤维束和基体界面的正应力拉伸破坏和基体的屈服破坏所决定的,同时,横向拉伸试件的切边破坏了编织复合材料纤维网络的完整性,因此,宏观上就表现为较低的拉伸强度和模量。

5 结 论

(1) 三维五向碳/酚醛编织复合材料由于轴纱的加入,会使纵向的拉伸力学性能增大,但脆性更为明显;

(2) 三维五向碳/酚醛编织复合材料拉伸力学性能的最主要影响因素仍是编织角,随着编织角的增大拉伸模量和强度呈下降的趋势;

(3) 复合工艺质量对复合材料力学性能有重要影响;

(4) 五向碳/酚醛编织复合材料的纵向拉伸应力-应变曲线基本上呈线性特征,而横向拉伸应力-应变曲线则表现出明显的非线性特性,且横向拉伸力学性能远小于其纵向拉伸力学性能;

(5) 通过拉伸试件的断口照片和扫描电镜的观察,分析了五向碳/酚醛编织复合材料的拉伸破坏机理,发现其横向拉伸与纵向拉伸具有完全不同的破坏机制。

参 考 文 献

- [1] 卢子兴,杨振宇,李仲平. 三维编织复合材料力学行为研究进展[J]. 复合材料学报,2004,21(2):1-7.
Lu Z X, Yang Z Y, Li Z P. Development of investigation into mechanical behavior of three dimensional braided composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2004,21(2):1-7. (in Chinese)
- [2] Yang J M, Ma C L, Chou T W. Fiber inclination model of three-dimensional textile structural composites[J]. Journal of Composite Material,1986,20:472-484.
- [3] Chen L, Tao X M, Choy C L. Mechanical analysis of 3-D braided composites by the finite multiphase element method[J]. Composites Science and Technology,1999,59(3):391-404.
- [4] Gu B H. Prediction of the uniaxial tensile curve of 4-step 3-dimensional braided perform[J]. Composite Structures,2004,64(2):235-241.
- [5] 卢子兴,冯志海,寇长河. 编织复合材料拉伸力学性能的研究[J]. 复合材料学报,1999,16(3):129-134.
Lu Z X, Feng Z H, Kou C H. Studies on tensile properties of braided structural composite materials [J]. Acta Materiae Compositae Sinica,1999,16(3):129-134. (in Chinese)
- [6] 王波,矫桂琼,潘文革. 三维编织 C/SiC 复合材料的拉压实验研究[J]. 复合材料学报,2004,21(3):110-114.
Wang B, Jiao G Q, Pan W G. Tensile and compress experimental investigation of three-dimensionally braided C/SiC composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2004,21(3):110-114. (in Chinese)
- [7] 庞宝君,杜善义,韩杰才,等. 三维四向编织碳/环氧复合材料实验研究[J]. 复合材料学报,1999,16(4):136-141.
Pang B J, Du S Y, Han J C, et al. An experimental investigation of three-dimensional and four-directional braided carbon/epoxy composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica,1999,16(4):136-141. (in Chinese)
- [8] Wu D L. Three-cell model and 5D braided structural composites[J]. Composites Science and Technology,1996,56:225-233.
- [9] 李学明,李嘉禄,王峥. 三维五向编织结构对复合材料性能的影响[J]. 天津纺织工学院学报,1997,16(5):7-12.
Li X M, Li J L, Wang Z. Effect of 3-D & 5-D braiding structure on mechanical properties of the composites[J]. Journal of Tianjin Institute of Textile Science and Technology,1997,16(5):7-12. (in Chinese)
- [10] 郑锡涛,叶天麒,郭稳学. 三维编织复合材料拉伸性能试验研究[J]. 机械科学与技术,2004,23(6):681-683.
Zheng X T, Ye T Q, Guo W X. An experimental investigation on the mechanical behavior of 3-D braided composites [J]. Mechanical Science and Technology,2004,23(6):681-683. (in Chinese)
- [11] 卢子兴,刘子仙. 三维五向编织复合材料的弹性性能[J]. 北京航空航天大学学报,2006,32(4):455-460.
Lu Z X, Liu Z X. Elastic properties for 3 dimensional and 5 directional braided composites [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2006,32(4):455-460. (in Chinese)
- [12] Wu X Q, Li J L, Shenoi R A, et al. Filling simulation of three-dimension braided composite in resin transfer molding[J]. Journal of Donghua University (Eng. Ed.),2005,22(4):109-113.

李仲平(1964 -) 男,博士研究生。主要研究方向:透波复合材料、多功能复合材料等。

(责任编辑:李铁柏)