复 合 材 料 学 报　　第24 卷　第1 期　2 月　2007 年
Acta Materiae Compositae Sinica　　Vol. 24　No. 1　February　2007

文章编号: 1000-3851(2007)01-0022-06

纤维分布均匀性对T300/BMP316 复合材料层压板力学性能的影响

杨进军, 张佐光*, 李　敏, 孙志杰
(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘　要: 采用三点弯曲法和数字化冲击仪, 研究了纤维分布均匀性对T300/BMP316 复合材料弯曲和冲击性能的影响, 用有限元方法分析了纤维分布不均匀复合材料弯曲变形时的应力分布, 提出了用纤维分布效应系数R 来评价纤维分布不匀复合材料的性能。结果表明, 纤维分布不均使T300/BMP316 复合材料的弯曲性能和冲击性能强烈地受到纤维分布方式和载荷方向的影响, 纤维分布效应系数R 反映了纤维分布与性能的关系。

关键词: 纤维分布; 弯曲性能; 冲击性能; 效应系数
中图分类号: TB332　　**文献标识码**: A

Effect of fiber distribution uniformity on the mechanical properties of composite laminates

YANG Jinjun, ZHANG Zuoguang*, LI Min, SUN Zhijie
(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The effect of fiber distribution on the flexural and impact properties of T300/BMP316 unidirectional composite laminates was studied through the bending test under three-point loading and using a digital impact test machine. The finite-element analysis was performed to investigate the stress distribution of the deformed model structure with nonuniform fiber distribution. An effect coefficient of fiber distribution R was put forward to characterize the mechanic properties of composite materials. The results show that the flexural and impact properties are greatly affected by the fiber distribution type and the loading direction, and the effect coefficient R can be used to justify the properties of the composite laminates with nonuniform fiber distribution.

Keywords: fiber distribution; flexural properties; impact properties; effect coefficient

在复合材料构件的成型过程中, 通过真空和外界施加压力使构件中的气体和多余树脂排出体系, 从而减小孔隙率、增加制件的纤维体积分数并使纤维均匀分布, 这一过程称为密实过程。在热压成型工艺中, 纤维的密实过程不仅受纤维/树脂体系的种类、树脂流变特性和体系渗透率等材料特性的影响, 而且还受温度、压力和加压时机等工艺因素的影响[1-3]。密实过程决定着增强纤维在层压板中的分布状态, 但由于密实过程的复杂性, 热压成型工艺容易造成纤维分布不均匀[3]。纤维的分布状态对复合材料的性能影响很大[4]。纤维分布不均匀给材料性能评价带来了很大困难, 目前, 还很少见到对纤维分布不均匀复合材料性能研究的报道。为了探讨纤维分布状态对单向复合材料弯曲和冲击性能的影响规律, 本研究中制备了在层压板厚度方向上具有不同纤维分布的T300/BMP316 单向复合材料, 采用三点弯曲法和数字化冲击仪对纤维分布不均匀的T300/BMP316 复合材料的弯曲、冲击性能进行了研究, 采用有限元方法分析了纤维分布不均匀复合材料弯曲变形时的应力分布, 提出了纤维分布效应系数的新概念, 揭示了纤维分布不均匀对复合材料弯曲和冲击性能的影响规律。

1　实　验

1.1　实验材料

原材料采用T300 炭纤维/BMP316 聚酰亚胺

收稿日期: 2005-12-12; 收修改稿日期: 2006-09-19
基金项目: 国家973 项目(2003CB615602)
通讯作者: 张佐光, 教授, 研究方向为先进复合材料制造与计算机模拟　E-mail: zgzhang@buaa.edu.cn

树脂预浸料，性能如表1 所示。

表1　T300/BMP316 预浸料的性能指标

Table 1　Properties of T300/BMP316 prepreg

Property	Value
Resin mass fraction/ %	50 ~55
Volatile mass fraction/ %	~15
Fiber area density/(g·m^{-2})	133 ±4
Layer thickness/ mm	0.120 ±0.010
Shelf life/ d	30

1.2　实验方法

将 T300/BMP316 预浸料单向铺层，通过吸胶、预处理和固化工艺[5] 制备了具有相同体积分数不同纤维分布方式的层压板 HL、LH、HLH、LHL 和 UNI(见图1)，图中 H 表示纤维含量高的铺层，L 表示纤维含量低的铺层，UNI 表示纤维均匀分布的层压板。进行弯曲和冲击测试时，HL 的受拉面是 H 面，LH 的受拉面是 L 面。

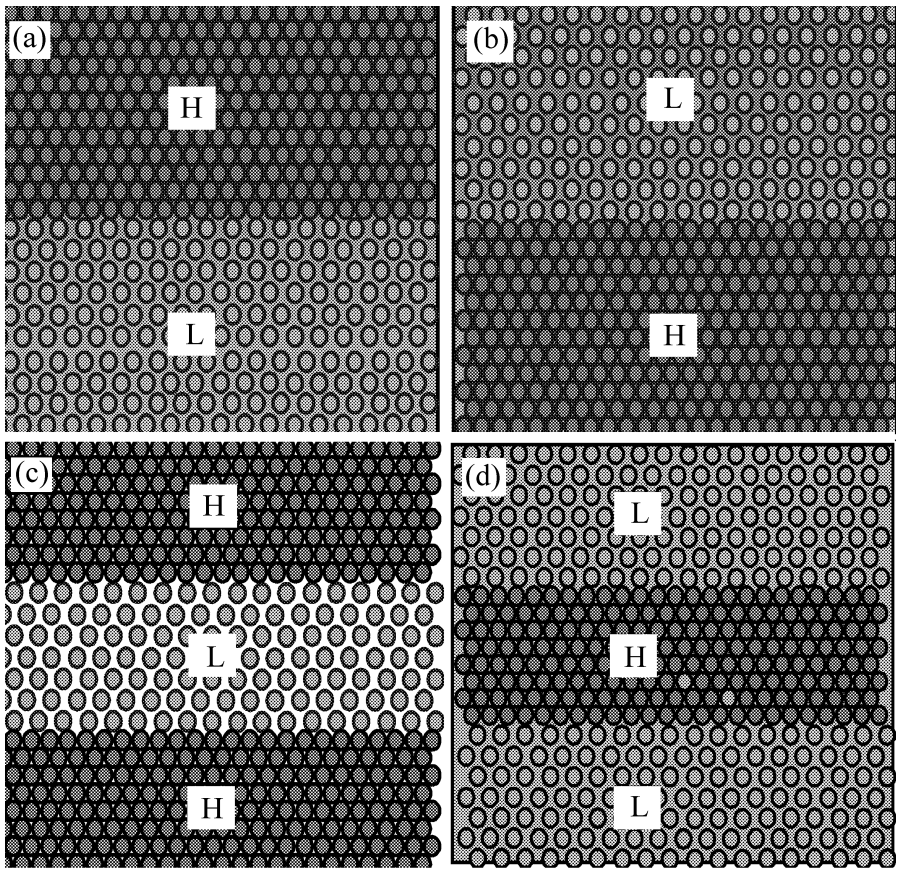


图1　层合板厚度方向纤维分布示意图

Fig.1　The schematic of fiber distribution through the thickness of the laminates

固化成型的层压板经过切割、封样、磨光、抛光、浸蚀制得金相试样，在数码光学显微镜下摄取层压板厚度方向的金相显微照片，纤维分布状态如图2 所示。利用自行开发的 MATLAB 程序，采用计算机图像识别技术，计算纤维体积分数。表2 给出了各层压板总的纤维体积分数以及 H 和 L 铺层的体积分数。从表2 可见，各层压板总的纤维体积分数基本相同，但是各铺层的纤维体积分数不同，纤维分布方式不同。

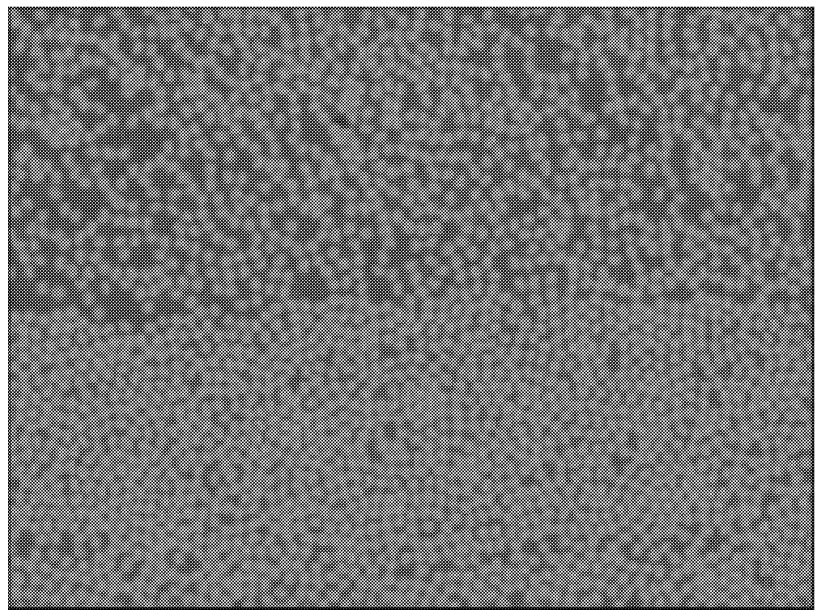


图2　层压板纤维分布

Fig.2　Fiber distribution in a laminate

1.3　性能测试

弯曲性能测试采用三点弯曲法，按标准 GB 3356-82 进行，冲击性能测试采用JCSJ30 型数字化非金属材料冲击实验机进行低速无缺口摆锤冲击实验。

1.4　应力分布分析

采用有限元方法分析了纤维分布不均匀复合材料试样在弯曲变形时的应力分布情况，分析结果见图3。分析模型采用四结点四边形单元，进行有限元网格划分后模型中有1008 个分析单元，1105 个结点，分析时的载荷为1000 N。有限元分析采用的数据见表3，不同体积分数下的数据根据细观力学理论进行计算。

表2　不同纤维分布方式层压板的纤维体积分数

Table 2　The fiber volume fraction of laminates with different fiber distribution types

		Fiber distribution type				
		HL	LH	HLH	LHL	UNI
Fiber volume fraction/ %	H layer	73.79	73.79	70.41	72.91	73.79
	L layer	46.20	46.20	47.57	45.46	46.20
	Laminate	56.82	56.82	56.78	56.01	56.82

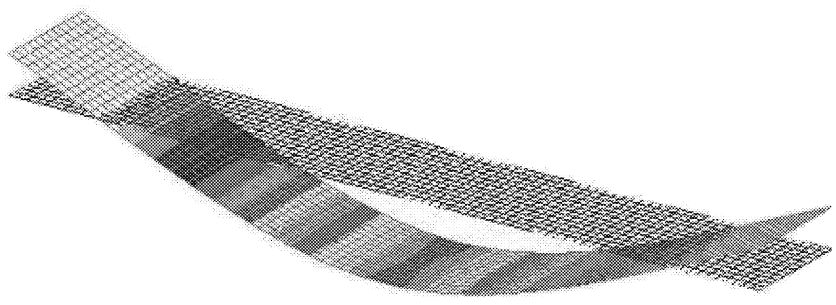


图3　弯曲试样应力分布的有限元分析

Fig.3　The finite element analysis of the flexural stress distribution of the laminates

表3　有限元分析采用的纤维和树脂的性能

Table 3　The mechanical properties of the fiber and resin used in the finite element analysis

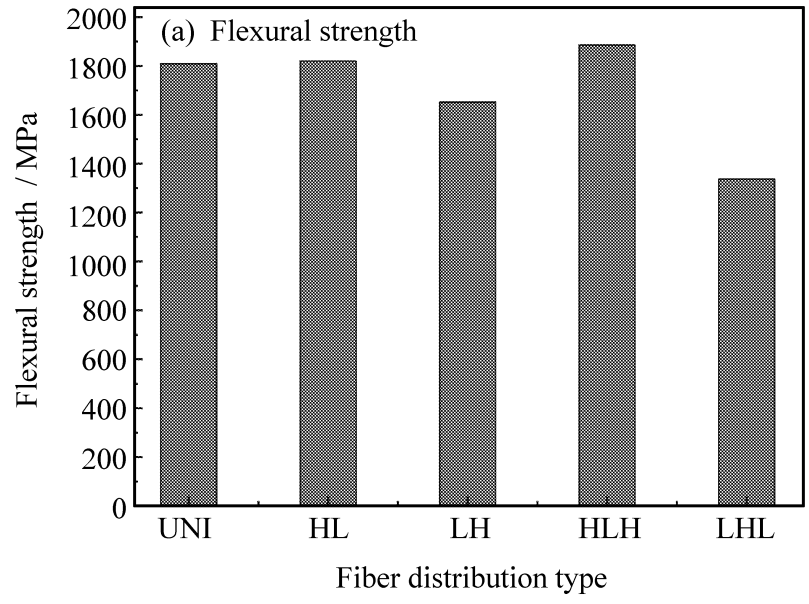
	T300 carbon fiber	BMP316 resin
Longitudinal modulus/GPa	221	3.04
Transverse modulus/GPa	13.8	
Shear modulus/GPa	9.0	
Poisson ratio	0.25	0.39

2　结果与讨论

2.1　纤维分布均匀性对弯曲性能的影响

复合材料在承受弯曲载荷时，既有拉伸应力，又有压缩应力和剪切应力，在局部区域内还存在着挤压应力。因此除增强纤维承受载荷外，树脂基体也要承受纤维之间的剪应力，应力状态比较复杂。纤维分布不均匀使得复合材料的弯曲行为更为复杂，可以预见，厚度方向上的纤维分布不均匀和加载方向会影响弯曲性能，本文中采用三点弯曲法测试了不同纤维分布方式复合材料的弯曲性能，测试结果见图4。

从图4(a)可以看出，HLH的弯曲强度最大，LHL的弯曲强度最小，HL的弯曲强度比LH的大，但是小于HLH的弯曲强度。UNI的弯曲强度大于LH和LHL的强度。从试样的破坏行为和破坏断面来看，情况基本相同，均为拉伸面破坏，试样脆性断裂。因此受拉面纤维含量高的层压板HLH、HL的弯曲强度比UNI的大，反之受拉面纤维含量低的层压板LH、LHL的弯曲强度比UNI的小，HLH因为受压面纤维含量也高，抗压能力增强，其弯曲强度最高，LHL由于受压面纤维含量也低，抗压能力降低，其弯曲强度最小。因此可以得出结论，增加受拉面纤维含量，能够最有效地提高T300/BMP316层压板的弯曲强度。



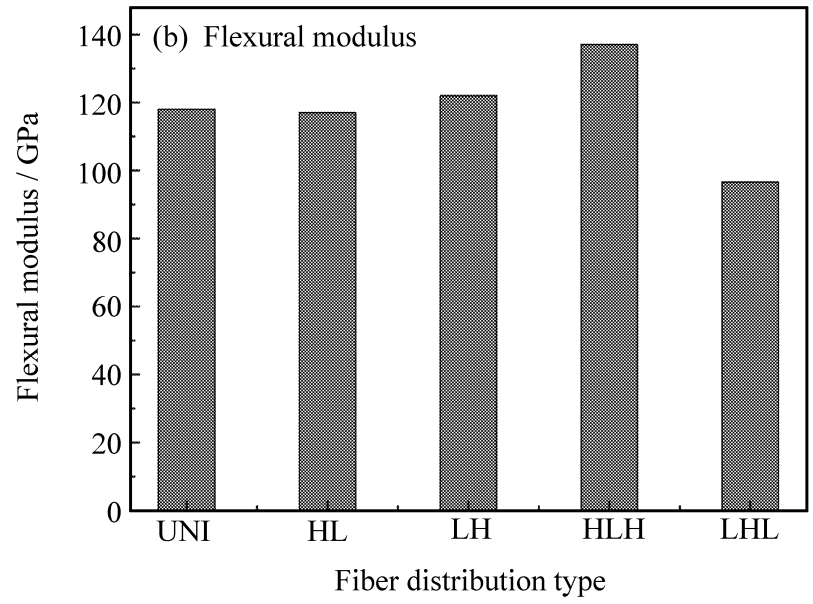


图4　纤维分布方式对弯曲性能的影响

Fig.4　Effect of fiber distribution type on the flexural properties

试样的弯曲行为与其内部应力分布有关，本文中采用有限元方法分析试样弯曲时的应力分布，得到了试样中点处在厚度方向上各铺层(共16层)的应力分布，分析结果见图5。

从有限元分析可以看出，纤维均匀分布的试样，应力从底面到表面是线性变化的，但是纤维分布不均匀试样的应力是非线性变化的。在相同弯曲载荷下，HL承受的拉应力比HLH的大，因此HL更容易破坏，所以其弯曲强度比HLH的低，同理，对于LH和LHL，由于在相同弯曲载荷下，LHL的拉应力比LH的大，所以其弯曲强度低。比较HL与LH可知，HL比LH承受更大的拉应力，这是因为HL的受拉面纤维含量高，模量高，但是由于H铺层的破坏载荷比L铺层的破坏载荷大，HL的弯曲强度还是比LH的大，同理可知，HLH比LHL承受的拉应力大，弯曲强度也比LHL的大。对于UNI板，其性能介于HLH、HL和LH、LHL

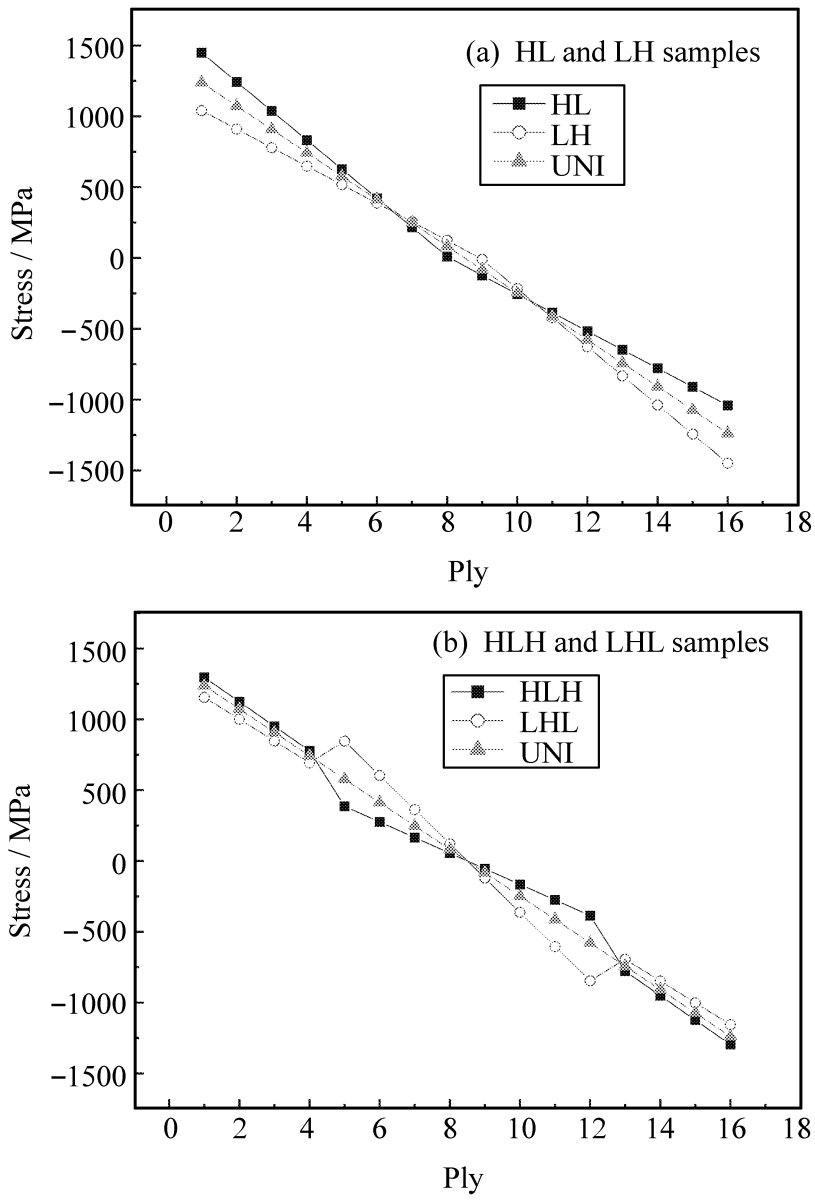


图5 复合材料弯曲变形时各层的应力分布

Fig.5 Stress distribution through the composite thickness

之间。以上分析表明，有限元分析结果与实验相符，有限元分析从微观应力分布的角度揭示了不同纤维分布方式层压板的性能差异性。

从图4(b) 可以看出，纤维分布对弯曲模量的影响小于对弯曲强度的影响。HLH 的弯曲模量最大，LHL 的弯曲模量最小，UNI 的弯曲模量介于二者之间。这是因为 HLH 的受拉面和受压面纤维含量都高，抵抗变形的能力强。对于LHL，其受拉面和受压面纤维含量都低，抗变形能力差，故其弯曲模量低。从图4 还可以看出，HL、LH 和 UNI 的模量相差不大。这可能是因为 HL 和LH 的纤维含量高的一面具有比 UNI 更高的抗变形能力，但是纤维含量低的一面抗变形能力弱，两种作用相互抵消，使得 HL、LH 的弯曲模量与 UNI 的弯曲模量相当。

2.2 纤维分布均匀性对复合材料冲击性能的影响

纤维增强复合材料比强度、比模量大，有良好的弹性，但塑性变形很小，对冲击载荷十分敏感，易受冲击损伤。当复合材料受到冲击载荷时，一部分冲击能量转变为可恢复的弹性形变，另一部分被材料的断裂、分层和损伤所吸收，造成不可恢复的损伤。在悬臂梁冲击中，面板处受拉，背板处受压，这两部分最容易发生断裂和破坏。本文中用下列参数表征材料的冲击性能[6]：破坏载荷，冲击实验过程中试样破坏时的载荷值与其横截面积之比；冲击能量，冲击实验过程中试样所吸收的总能量值与其横截面积之比；断裂引发能 E_I，载荷- 位移曲线上载荷达到最大值以前材料所吸收的能量；裂纹扩展能 E_P，载荷- 位移曲线上载荷达到最大值以后材料所吸收的能量；韧性指数 D_I，裂纹扩展能 E_P 与断裂引发能 E_I 之比，D_I 值越大，表明材料的韧性越好。纤维分布对冲击性能的影响见图6。

图6(a) 表明，HLH 的破坏载荷最大，LHL 的破坏载荷最小，另外从试样的破坏行为和破坏断面来看，冲击破坏形式主要为脆性断裂。主要由于，HLH 两面纤维含量高，破坏载荷最大，LHL 两面纤维含量低，破坏载荷最小。LH 由于受拉面纤维含量低，破坏载荷小，反之对于 HL，由于受拉面纤维含量高，破坏载荷大。

从图6(b) 还可以看出，HLH、LHL 和 HL 的冲击能量基本相等，LH 和 UNI 的冲击能量也基本相等，但均小于 HLH、LHL 和 HL 的冲击能量。这是因为，冲击能量由冲击载荷和位移两个因素决定，对于层压板中的 H 铺层，由于纤维含量高，其破坏载荷高，变形能力小，反之对于L 铺层，由于纤维含量低，其破坏载荷低，变形能力大，所以 HLH 和LHL 的冲击能量相当，由于LH 的破坏载荷小，而且 H 铺层限制了材料的变形，所以其冲击能量小。

韧性指数反映了材料的韧性，从图6(c) 可见，LHL 的 D_I 值最大，HLH 的 D_I 值最小，UNI 的 D_I 值介于二者之间，这是因为L 铺层的纤维含量低，树脂含量高，抵抗变形的能力强。

2.3 纤维分布效应系数 R 的概念及其应用

2.3.1 纤维分布效应系数 R 的基本概念

为了定量评价纤维分布不均匀复合材料与均质复合材料的性能差异，本文中提出纤维分布效应系数 R 的新概念。定义

$$R = \frac{R_{nonuni} - P_{uni}}{P_{uni}}$$

式中：P_{nonuni} 为纤维分布不均匀复合材料的性能；P_{uni} 是与纤维分布不均匀试样纤维体分数相等的均质复合材料试样的性能。

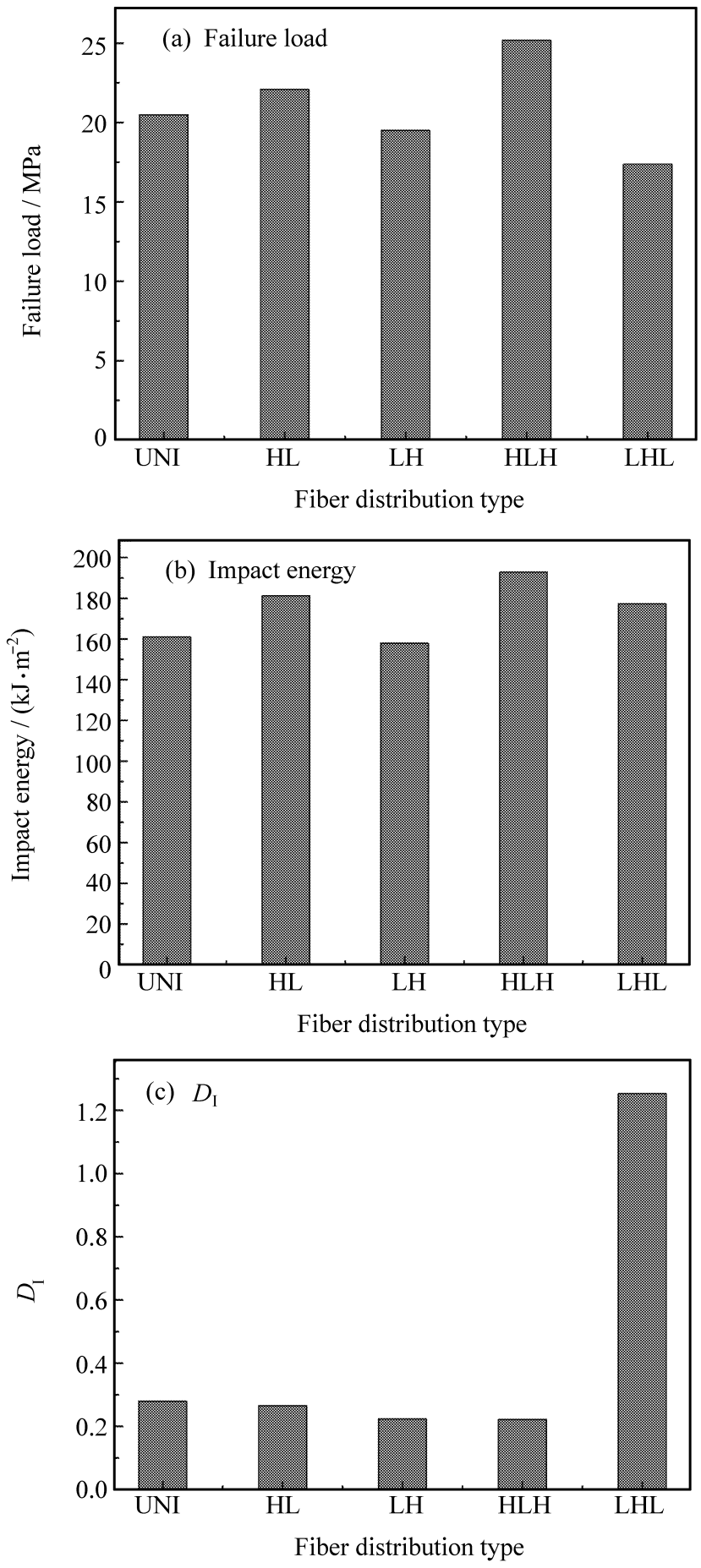


图6　纤维分布方式对冲击性能的影响

Fig.6　Effect of fiber distribution type on the impact properties

纤维分布的意义如下：R > 0 表示纤维分布正效应，材料性能提高，R < 0 表示纤维分布负效应，材料性能降低。R 的数值大小表示材料性能提高或降低的程度，反映了纤维分布对复合材料力学性能的影响程度。

2.3.2　纤维分布效应系数的应用

表4 列出了本文中所研究的纤维分布不均匀复合材料在不同纤维分布方式条件下，弯曲强度、弯曲模量、冲击能量以及韧性指数的纤维分布效应系数 R。

表4　不同纤维分布层压板力学性能的纤维分布效应系数

Table 4　The effect coefficient R of the properties of laminates with different fiber distributions

Sample	Effect coefficient R/ %			
	Flexural strength	Flexural modulus	Impact energy	D_I
UNI	0.00	0.00	0.00	0.00
HL	0.61	-0.85	12.58	-5.20
LH	-8.68	3.39	-1.90	-19.87
HLH	4.26	16.10	19.81	-20.62
LHL	-26.09	-18.14	10.14	348.44

从表4 中可以看出，不同纤维分布复合材料的纤维分布系数的大小不同，效应系数 R 具有明显的方向性特征，H 铺层处于受拉一侧时，弯曲强度的效应系数 R > 0。L 铺层处于受拉一侧时，弯曲强度的效应系数 R < 0。对于弯曲模量，HLH 的效应系数最大，LHL 的效应系数最小。HLH、LHL 和 HL 的冲击能量均表现出正的纤维分布效应，对于 D_I，LHL 的纤维分布效应系数最大，其余均表现出负的纤维分布效应。因此，HLH 的弯曲性能最好，LHL 的弯曲性能最差。HLH 的吸能特性最好，LHL 的韧性最好。以上分析表明，效应系数 R 能够定量反映纤维分布对复合材料力学性能的影响。当不均匀复合材料的纤维分布方式与其所受应力、应变分布相适应时，这类材料能充分发挥其性能优势。

3　结　论

(1) 纤维分布不均匀 T300/BMP316 复合材料的弯曲、冲击性能与纤维分布的不均匀性密切相关。有限元分析表明，不同纤维分布复合材料的性能差异与其内部应力分布相关。

(2) 对纤维非均匀分布的复合材料层板的弯曲和冲击力学性能研究发现，纤维非对称分布的 HL、LH 层板的性能随加载方向不同而变化显著，而纤维对称分布的 LHL、HLH 层板，其性能则基本不随载荷方向而变化。其中 HLH 的弯曲性能和冲击吸能特性较好，LHL 的弯曲性能较差，但其冲击韧性较好。

(3) 纤维分布效应系数 R 反映了纤维分布与性能的关系，可以用来评价纤维分布对复合材料性能的影响。

参考文献:

[1] 刘洪新, 张佐光, 顾轶卓, 等. 单向纤维布可压缩性的实验研究[J]. 复合材料学报, 2006, 23(3): 5-8.
Liu Hongxin, Zhang Zuoguang, Gu Yizhuo, et al. Experimental research on compressibility of unidirectional fiber cloth [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(3): 5-8.

[2] 简抗抗, 张佐光, 顾轶卓, 等. 不同纤维堆积状态下饱和渗透率实验研究[J]. 复合材料学报, 2006, 23(1): 31-36.
Jian Kangkang, Zhang Zuoguang, Gu Yizhuo, et al. Experimental research of saturated permeability with different fiber stacking states [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(1): 31-36.

[3] 龚 颖, 张佐光, 顾轶卓, 等. 热压工艺参数对单向复合材料层板密实状态的影响[J]. 复合材料学报, 2006, 23(1): 12-16.
Gong Ying, Zhang Zuoguang, Gu Yizhuo, et al. Effects of hot pressing process on fiber compaction of unidirectional composite laminates [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(1): 12-16.

[4] 贺鹏飞, 刘建萍, 戴 瑛, 等. 纤维分布不均匀对单向纤维增强复合材料横向拉伸强度的影响[J]. 机械工程材料, 2000, 24(1): 8-10.
He Pengfei, Liu Jianping, Dai Ying, et al. Influence of uneven distribution of the fibers in the matrix on the transverse tensile strength[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2000, 24(1): 8-10.

[5] 赵渠森. 先进复合材料手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

[6] 宋焕成, 张佐光. 混杂纤维复合材料[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1989: 368-387; 462-468.

KEYWORDS FOR COMPOSITES

A: MATERIAL

aramid fibre
carbon fibre
carbon-carbon composites
ceramic fibre
ceramic-matrix composites
discontinuous reinforcement
fabrics/textiles
fibres
foams
glass fibres
glasses
honeycomb
hybrid
intermetallics
lamina/ply
laminates
layered structures
metal-matrix composites
moulding compounds
nano-structures
particle-reinforcement
plates
polymer(textile)fibre
polymer-matrix composites (PMCs)
preform
prepreg
recycling
resins
smart materials
strand
tape
thermoplastic resin
thermosetting resin
thin films
tow
3-dimensional reinforcement
wood
yarn

B: PROPERTY

adhesion
anisotropy
buckling
chemical properties
corrosion
creep
cure behaviour
damage tolerance
debonding
defects
delamination
directional orientation
elasticity
electrical properties
embrittlement
environmental degradation
fatigue
fibre/matrix bond
fracture
fracture toughness
fragmentation
hardness
high-temperature properties
impact behaviour
interface/interphase
internal friction/damping
magnetic properties
mechanical properties
microstructure
optical properties/techniques
physical properties
plastic deformation
porosity
residual/internal stress
rheological properties
strength
stress concentrations
stress relaxation
stress transfer
surface properties
thermal properties
thermomechanical
transverse cracking
vibration
wear
wettability

C: ANALYSIS

analytical modelling

(下转64 页)