

文章编号: 1001-2486(2010)03-0016-06

# 多轴向织物层合板层间剪切强度有限元分析与实验研究\*

刘卓峰, 肖加余, 曾竟成, 江大志

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 用 VIMP 工艺制备了 UD、 $Q/45-45$ 、 $Q/45/90-45$  三种多轴向织物增强, 四种厚度的 GFRP 层合板试样, 采用短梁剪切实验考察了层间剪切强度和破坏模式。建立了 GFRP 层合板短梁剪切试样有限元模型, 计算了内部层间剪应力分布。结合计算和实验结果分析表明层合板存在由宽度方向层间剪应力变化导致的自由边缘效应, 含偏轴铺层的层合板更容易发生边缘开裂破坏。厚度相同时  $Q/45-45$  多轴向织物增强层合板的层间剪切强度最高。短梁剪切强度测试存在尺寸效应, 随着厚度的增加, 强度下降, 样品波动系数增大。

**关键词:** 多轴向织物层合板; 短梁剪切; 有限元分析; 尺寸效应

中图分类号: TB332 文献标识码: A

## FEM Analysis and Experimental Investigation on the Interlaminar Shear Strength of the Multi-axial fabric Reinforced Laminate

LIU Zhuo feng, XIAO Jia yu, ZENG Jing cheng, JIANG Da zhi

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** 3 kinds of laminate samples reinforced by UD,  $Q/45-45$ ,  $Q/45/90-45$  multi-axial fabric respectively, were manufactured by the vacuum infusion moulding process. Each laminate had 4 types of thickness. Experiment was made to investigate the short beam shear strength and the failure mode of them. The finite element model of the short beam shear sample was established, and the interlaminar shear stresses in different positions were calculated. The result shows that the free edge delamination failure is liable to occur with the increment of the off axis plies which is mainly due to the stress gradient through the width direction. The interlaminar shear strength of the  $Q/45-45$  laminate is the highest of the 3 kinds of laminate with the same thickness. There are size effects in the short beam shear strength test, the shear strength decreases while the sample coefficient of variation increases with the thickening of laminate.

**Key words:** multi-axial fabric reinforced laminate; short beam shear method; FEM; size effects

近年来玻璃纤维增强树脂基复合材料(Glass Fibre Reinforced Polymer, GFRP)以其较高的强度模量、制造简单、成本低等优点,作为大型主承力件已广泛应用于能源、船舶、建筑等工业,并显示出很好的应用前景<sup>[1]</sup>。做为目前大型 GFRP 构件大量采用的增强材料之一,多轴向玻纤织物是由一层或多层平行的无卷曲的未经织造的玻纤纱线层按照一定方向角度层叠而成,层间采用微量针织线圈进行固定的新型织物<sup>[2]</sup>。多轴向织物中纱线层平行排列,可认为是多层单向带按角度铺层的组合,承载性能要明显优于机织物<sup>[3]</sup>。多轴向织物制备大型复合材料主流制备工艺为真空导入模塑工艺(Vacuum Infusion Molding Process, VIMP),其优点为低成本、环保和一次整体成型等<sup>[4]</sup>。

GFRP 复合材料在拉伸、压缩和弯曲载荷下的强度均较高,但层间的剪切强度较低,这一点是工程设计中引起大多数工程师和设计师特别关注的问题<sup>[5]</sup>。层间剪切强度的测试与评估,为结构设计提供可靠参数,对于合理设计构件,确保其使用安全性是非常重要的课题<sup>[6]</sup>。近年来,多轴向织物大量地应用于工程 GFRP 复合材料的制备,但对于其剪切强度的实验研究鲜有见报。

理想的剪切实验方法其目的是能在试件中产生均匀的纯剪力区、可重复操作、无需特殊的实验装置

\* 收稿日期: 2010-01-27

基金项目: 国家 863 基金资助项目(2007AA03Z563); 湖南省重大科技专项项目(2006GK1002)

作者简介: 刘卓峰(1982-),男,博士生。

和可获得剪应力-剪应变全曲线<sup>[7]</sup>。而在所有测定复合材料力学性能的单应力实验中, 剪切实验是最困难的。在各种剪切实验方法中, 目前使用最多的是短梁剪切方法, 并已制定了相关的行业标准<sup>[8]</sup>。

本文用 VIMP 工艺实际制备了不同铺层织物, 不同厚度的多轴向织物增强 GFRP 层合板试样, 采用短梁剪切实验对其层间剪切强度和破坏模式进行了考察。并对不同铺层的层合板试样进行了有限元建模和计算, 考察了其内部层间剪应力的分布情况。结合实验和计算结果分析了织物铺层和厚度对层合板层间剪切强度和破坏模式的影响, 以为多轴向织物增强工程 GFRP 构件的结构设计提供有效参考。

## 1 实验

### 1.1 原辅材料

复合材料层合板基体树脂体系为 Huntsman1564/3486 真空导入模塑工艺专用低粘度环氧树脂体系, 其成分为改性双酚 A 环氧树脂配合多元混胺固化剂体系, 由美国 Huntsman 公司制造; 多轴向织物选择 3 种, 分别为 UD 单向织物、0/45/-45 三轴向织物和 0/45/90/-45 四轴向织物, 3 种织物的面密度均为 1200g/m<sup>2</sup>, 由重庆国际复合材料有限公司制造; 层合板制备用真空导入模塑工艺所用的真空袋膜、脱模布、导流网、注胶管、真空密封胶等真空辅材由上海沥高公司制造。

### 1.2 层合板试样的制备

采用 VIMP 工艺制备层合板试样, 模具为自制可控温电加热平板, 该工艺具有制备出的复合材料制件力学性能重复性好, 纤维体积分数高且不同批次制件性能波动性小等优点。

采用 VIMP 制备得到的层合板试样, 由于所采用的多轴向织物的面密度相同, 通过调节工艺参数, 可令制得的层合板单层厚度相同。为考察短梁剪切实验的尺寸效应, 通过调节织物铺放层数, 每种织物分别制备了 4 种厚度的层合板。

### 1.3 层合板试样的短梁剪切实验

0/45/-45 三轴向织物增强层合板垂直织物方向切割试样, 可认为是 90/45/-45 三向织物增强层合板。因此共制备了 16 种短梁剪切试样进行短梁剪切实验。试样长为 6h, 宽 2h, 跨距 4h (h 为试样厚度)。依据 ASTM D2344<sup>[8]</sup> 相关规定进行实验, 所用的实验机为长春试验机厂生产的 WDW-100 型万能力学性能试验机。实验压头直径为 6mm, 支座支架直径为 3mm。加载速度均为 1mm/min。

每种试样测试 4 个。单个样品的短梁剪切强度  $S_i$  按照式 (1) 计算, 式中  $P_i$  为最大破坏载荷; 每组样品的平均短梁剪切强度  $S$  为所测样品的算术平均值, 按照式 (2) 计算, 式中  $n$  为样品数; 样品波动系数 (Sample coefficient of variation)  $CV$  按照式 (3) 计算<sup>[8]</sup>。

$$S_i = 0.75 \times \frac{P_i}{bh} \quad (1)$$

$$S = \sum_{i=1}^n S_i / n \quad (2)$$

$$CV = \frac{100 \times \sqrt{\left( \sum_{i=1}^n S_i^2 - nS^2 \right) / (n-1)}}{S} \quad (3)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 铺层对剪切破坏模式的影响

测试短梁剪切试样的破坏模式可以归结为以下 4 种, 每种模式典型照片如图 1 所示。所有试样的破坏模式在表 1 中列出。

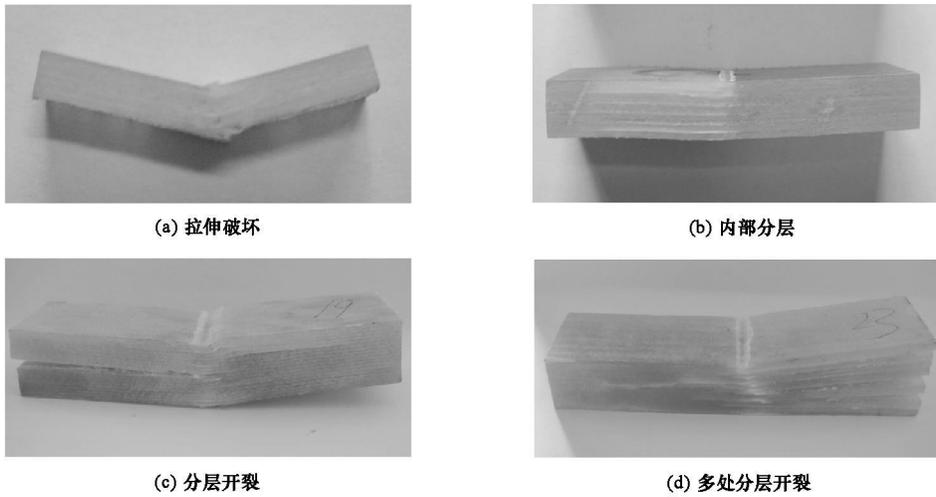


图1 短梁剪切试样的破坏模式

Fig. 1 The failure modes of the short beam shear samples

表1 短梁剪切试样的破坏模式

Tab. 1 The failure modes of the short beam shear samples

laminates	Thickness/mm	Number of the samples in failure modes			
		a	b	c	d
UD <sub>4</sub>	3. 4	3	1	—	—
UD <sub>12</sub>	10. 2	—	4	—	—
UD <sub>18</sub>	15. 3	—	4	—	—
UD <sub>24</sub>	20. 4	—	4	—	—
(0/45-45) <sub>4</sub>	3. 4	2	2	—	—
(0/45-45) <sub>12</sub>	10. 2	—	4	—	—
(0/45-45) <sub>18</sub>	15. 3	—	1	3	—
(0/45-45) <sub>24</sub>	20. 4	—	—	3	1
(90/45-45) <sub>4</sub>	3. 4	4	—	—	—
(90/45-45) <sub>12</sub>	10. 2	4	—	—	—
(90/45-45) <sub>18</sub>	15. 3	3	1	—	—
(90/45-45) <sub>24</sub>	20. 4	2	2	—	—
(0/45/90-45) <sub>4</sub>	3. 4	2	2	—	—
(0/45/90-45) <sub>12</sub>	10. 2	—	—	4	—
(0/45/90-45) <sub>18</sub>	15. 3	—	—	1	3
(0/45/90-45) <sub>24</sub>	20. 4	—	—	—	4

短梁剪切试样承载时, 试样承受3点弯曲载荷, 试样中线以上承受压应力, 中线以下承受拉应力, 下表面的拉应力最大, 内部承受剪应力, 失效主要由3种应力主导。当试样为拉压型破坏时, 失效由拉压应力主导, 此时测得强度并不能真实体现其层间剪切强度。通过表1和图2可见, 对于90/45-45铺层的层合板, 由于其没有0方向铺层, 拉伸破坏强度小, 其失效主要表现为下表面拉伸破坏, 虽然随着厚度的增加, 试样也会出现分层破坏的现象, 但其破坏仍是由拉剪两方面应力因素导致, 因此90/45-45实验测得强度不是剪切强度。从表1可以看出, 厚度为10.2mm、15.3mm和20.4mm的UD、0/45-45和0/45/90-45三种铺层的层合板表现为剪切破坏。

对比同一厚度不同铺层的层合板, 单向试样边缘不易发生分层, 基本不会出现开裂式的分层破坏。而随着偏轴铺层含量的增加, 层合板的边缘愈发容易发生开裂, 整体破坏模式向分层开裂转变。这是层合板的自由边缘效应, 与含孔板在单轴拉伸下的破坏模式一致<sup>[9-10]</sup>。

显然边缘效应对试样破坏模式有显著影响, 因此, 对测试得到的剪切强度也将产生影响。为了深入分析这一现象, 对短梁剪切实验条件下试样内部层间剪应力分布进行了计算。近年来在复合材料的力学分析上广泛采用的数值计算和模拟方法主要为有限元法(Finite Element Method, FEM), 这是一种离散化的数值方法, 其实质是用有限个单元体的组合代替连续体, 化无限自由度问题为有限自由度问题。用有限元法计算层合板内部应力是一种行之有效的办法<sup>[11]</sup>。

选取 20.4mm 厚层合板试样为典型, 基于通用有限元软件 Ansys 建立三维有限元模型并进行加载计算。模型坐标系  $X$  轴、 $Y$  轴和  $Z$  轴分别平行于试样长度方向、宽度方向和厚度方向。单元类型选用 SOLID 46, 这是一种 8 节点六面体三维层合单元, 每个节点有 3 个自由度, 可以用来建立叠层壳或实体的有限元模型。单元边长为  $(1/12)h$ , 每个单元内定义 2 层多轴向织物层。整个试样共划分了 20 736 个单元进行计算。施加边界条件模拟实际实验条件, 为在试样下表面距两端  $1h$  节点处即实际实验的支座位置处, 近原点一端施加  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个方向的全位移约束, 远原点一端施加  $Y$ 、 $Z$  两个方向的位移约束。施加载荷条件为在试样上表面长度中心  $Y$  向节点上施加力载荷。

施加的载荷  $P$  按照式(1)计算, 根据选定的短梁剪切应力水平来确定载荷值。在本文分析时选择短梁剪切应力水平为 40MPa。计算所采用的材料性能参数由实验确定, 在表 2 中列出。

表 2 短梁剪切试样材料性能参数

Tab. 2 Properties for the FEM calculation of the short beam test laminates

$E_x/\text{GPa}$	$E_y/\text{GPa}$	$E_z/\text{GPa}$	$G_{xy}/\text{GPa}$	$G_{yz}/\text{GPa}$	$G_{xz}/\text{GPa}$	$\mu_{xy}$	$\mu_{yz}$	$\mu_{xz}$
45	10	10	4	3.8	4	0.35	0.3	0.35

层间剪应力定义为  $S_{xz}$ , 对 3 种铺层短梁剪切  $S_{xz}$  进行了计算。计算结果以应力云图的形式在图 2 中给出。

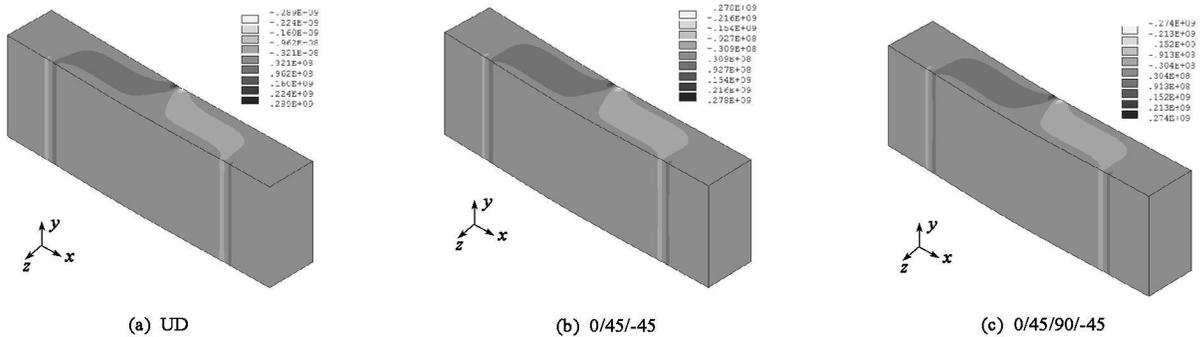


图 2 不同铺层短梁剪切试样层间剪应力云图

Fig. 2  $S_{xz}$  nephograms of different laminates under short beam shear loading

选择最具有代表性的位置提取  $S_{xz}$  进行具体分析, 如图 3 所示, 截取压头到全位移约束支座中间段试样,  $A$  为其长度方向中心位置,  $B$  为其宽度中心位置,  $C$  为其厚度中心位置。三处的  $S_{xz}$  计算结果在图 3 中给出。

根据计算结果, 在短梁剪切实验条件下, 试样内部层间剪应力分布并不均匀。如图 2 所示, 试样紧贴压头和支座处出现应力集中。造成这种现象的主要原因之一是本文有限元计算模型的加载方式是载荷和位移约束直接施加在试样在压头和支座位置处的节点上, 导致这些节点处出现明显的应力集中。这种应力集中现象一定程度上导致了压头和支座位置处的层间剪应力的降低, 如图 3(b) 所示。而在实际的实验测试中, 由于采用了光滑半圆压头和支座, 可以在一定程度上缓解这种应力集中现象。由图 2 和图 3(b) 可见, 层间剪应力在长度方向上的大部分区域是均匀分布的。如图 3(d) 所示, 在厚度方向上,

中心位置的剪应力最大;越靠近上下表面,剪应力水平越低,且剪应力分布相对中心位置呈近似对称。宽度方向剪应力情况和厚度方向恰好相反,如图3(c)所示,中心位置的剪应力最小;越靠近边缘,剪应力水平越高,剪应力变化相对中心位置同样呈近似对称。这种宽度方向的剪应力分布情况导致了层合板的自由边缘效应。

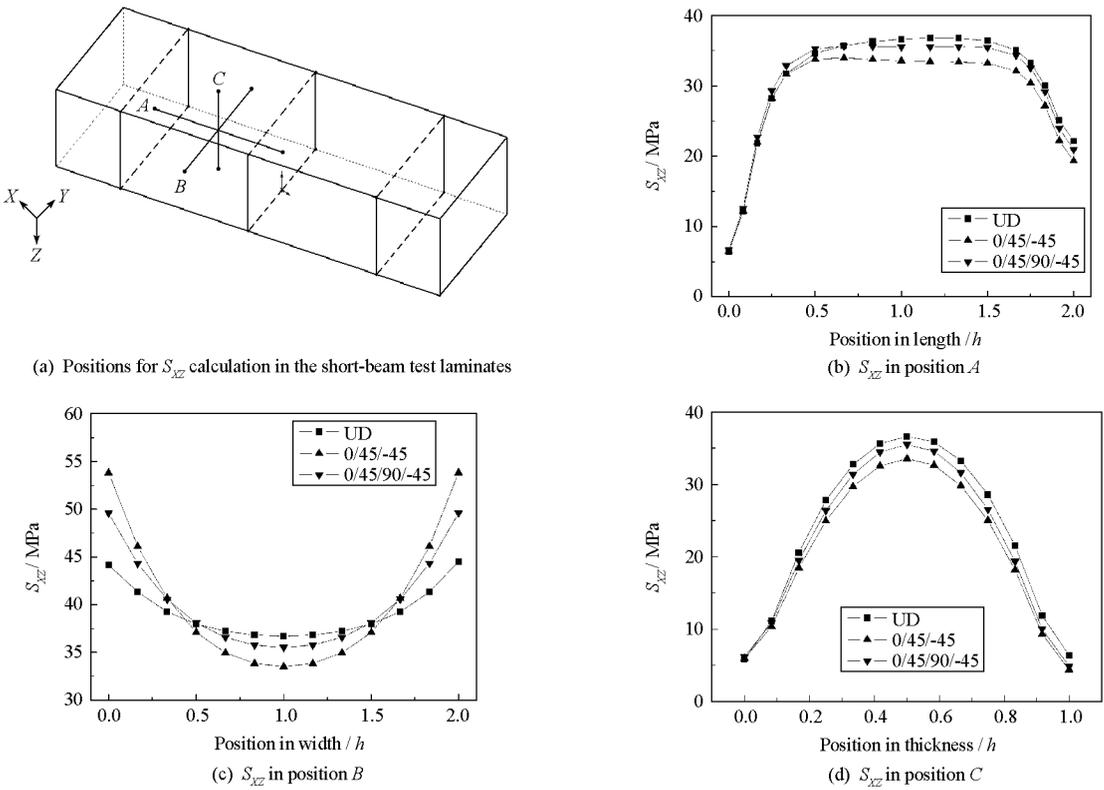


图3 短梁剪切试样内部剪应力分布图

Fig. 3 The calculated  $S_{xz}$  at different internal positions of the short beam test laminates

通过对不同铺层的层合板的计算结果对比可见,3种铺层在长度和厚度方向的剪应力分布情况差别不大,但在宽度方向UD层合板的剪应力变化明显小于0/45/-45和0/45/90/-45铺层层合板,因此不易发生边缘开裂破坏,这一点和实验结果一致。

### 2.2 厚度对剪切强度的影响

短梁剪切强度实验结果如图4所示,测试样品波动系数如表3所示。

表3 不同层合板短梁剪切强度的样品波动系数

Tab. 3 Sample coefficient of variation (CV) of the short beam Strength

laminates	CV/ %	laminates	CV/ %	laminates	CV/ %
UD <sub>12</sub>	2.627	(0/45/-45) <sub>12</sub>	1.456	(0/45/90/-45) <sub>12</sub>	1.397
UD <sub>18</sub>	3.827	(0/45/-45) <sub>18</sub>	2.391	(0/45/90/-45) <sub>18</sub>	2.867
UD <sub>24</sub>	4.025	(0/45/-45) <sub>24</sub>	2.549	(0/45/90/-45) <sub>24</sub>	3.208

通过图4可见,由于增强体种类和厚度的不同,层合板的层间剪切性能有明显的差异。采用0/45/-45三轴向铺层的层合板层间剪切强度最高。同种铺层的层合板随着厚度的增加,试样体积的增大,剪切强度有明显的下降,3种多轴向织物增强层合板厚度由10.2mm增至15.3mm和20.4mm时,UD铺层剪切强度分别下降3.24%和5.10%,0/45/-45铺层剪切强度分别下降3.85%和5.20%,UD铺层剪切强度分别下降5.92%和7.08%。Wisnom等人在研究单向玻璃纤维增强环氧树脂复合材料的拉伸和四点弯曲强度<sup>[10,12]</sup>及Green等人在研究层合板完好板和含孔板的拉伸强度<sup>[13]</sup>时同样发现随试样体积的增

大,导致其强度有不同程度的下降,并将造成这种现象的主要原因归结于纤维增强复合材料的尺寸效应。

材料的整体强度是由组成材料的各个环节中强度最小的那个环节决定,且材料的整体强度要随着材料组成环节的数目的增加而降低。这是脆性材料的“最薄弱环节”原则(the weakest-link scaling principle)<sup>[14]</sup>。同理,对于GFRP层合板而言,其强度正是由材料制造过程中不可避免的内部存在的缺陷、空隙等“最薄弱环节”的强度所决定的。根据这些“最薄弱环节”在材料内部分布的随机性,一般可以假定其均匀分布。随着剪切层合板试样厚度的增加,试样体积增大,则其内部存在的“最薄弱环节”的数目也有所上升,从而导致其强度的下降。这即是纤维增强复合材料的尺寸效应。本文所研究的层合板层间剪切强度随层合板厚度的增大而降低的现象正体现了这种尺寸效应。表3剪切试样的波动系数也同样可见这种效应,随厚度的增加,波动系数升高,厚层合板剪切强度测试数据的离散度要高一些。

### 3 结论

(1) 采用VIMP工艺制备了采用UD、0/45/-45和0/45/90/-45三种相同面密度多轴向玻璃纤维布增强,3.4mm、10.2mm、15.3mm和20.4mm四种厚度的GFRP层合板。制备了16组试样进行了短梁剪切实验。实验结果表明3.4mm厚层合板和90/45/-45方向铺层层合板短梁剪切时破坏由拉应力和层间剪应力两方面因素主导,测试强度不是有效层间剪切强度。

(2) 基于通用有限元软件Ansys平台建立了短梁剪切试样有限元模型,计算了不同铺层的层合板的内部层间剪应力分布。结果表明层合板内部层间剪应力场不均匀分布,存在宽度方向剪应力变化导致的自由边缘效应,含偏轴铺层的层合板更容易发生边缘开裂破坏。实验也证明了单向层合板不易发生开裂式的分层破坏,0/45/-45和0/45/90/-45层合板均发生开裂式分层破坏。

(3) 同种厚度层合板短梁剪切强度实验结果的对比表明采用0/45/-45多轴向织物增强的层合板层间剪切强度最高。

(4) 对不同厚度层合板短梁剪切强度的实验表明其存在尺寸效应,随着厚度的增加,强度下降,样品波动系数增大。

### 参考文献:

- [1] Kim H J, Hng C S. Buckling and Post Buckling Behavior of Composite Laminates with a Delamination [J]. Composites Science and Technology, 1997, 57: 555-564.
- [2] 钱程. 多轴向多层织物的定义[J]. 国际纺织导报, 2003(2): 80.
- [3] 魏光群, 蒋高明, 缪旭红. 多轴向经编织物的应用现状与发展展望[J]. 纺织导报, 2008(3): 70-72.
- [4] Sun X D, Li S J, James L. Mold Filling Analysis in Vacuum assisted Resin Transfer Molding [J]. Polymer Composites, 1998, 19(6): 807-828.
- [5] Whitney J M, Daniel I M, Pipes R B. Experimental Mechanics of Fiber Reinforced Composite Materials [M]. Prentice hall, 1984.
- [6] Wisnom M R, Hallett S R. The Role of Delamination in Strength, Failure Mechanism and Hole Size Effect in Open Hole Tensile Tests on Quasi isotropic Laminates[J]. Composites: Part A, 2009, 40: 335-342.
- [7] 王瑞, 陈海霞, 郭兴峰, 等. 层合板复合材料的层间剪切强度评价方法及其改进研究[J]. 玻璃钢复合材料, 2004, 3: 8-11.
- [8] ASTM D2344: Standard Test Method for Short Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates [S].
- [9] Sun C T, Zhou S G. Failure of Quasi isotropic Composite Laminates with Free Edges [J]. Journal of Reinforced Plastic Composites, 1988(7): 515-557.
- [10] Wisnom M R, Khan B, Hallett S R. Size Effects in Unnotched Tensile Strength of Unidirectional and Quasi isotropic Carbon/epoxy Composites [J]. Composites Structure, 2008, 84: 21-28.
- [11] 王国强. 实用工程数值模拟技术及其在ANSYS上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1999.
- [12] Wisnom M R, Atkinson J W. Reduction in Tensile and Flexural Strength of Unidirectional Glass Fibre epoxy with Increasing Specimen Size [J]. Composites Structure, 1997, 38: 405-411.
- [13] Green B G, Wisnom M R, Hallett S R. An Experimental Investigation Into the Tensile Strength Scaling of Notched Composites [J]. Composites Part A, 2007, 38: 867-878.
- [14] Wisnom M R. Size Effects in the Testing of Fibre composites Materials [J]. Composites Science and Technology, 1999, 59: 1937-1957.

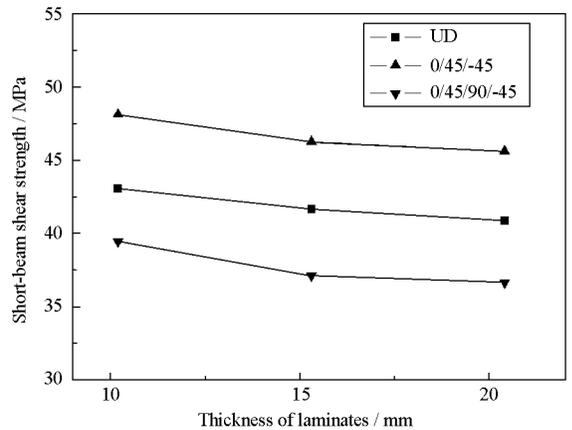


图4 不同厚度层合板的短梁剪切强度  
Fig. 4 Short beam Strength of the laminates with different thicknesses