

短玻璃纤维增强 PA66 的偏轴拉伸模量和强度研究*

THE EXPERIMENTAL STUDY ON THE OFF-AXIS TENSILE
MODULUS AND STRENGTH OF SHORT GLASS
FIBER REINFORCED PA66杨挺**¹ 贾普荣¹ 黄涛***¹ 陈汉军² 强超² 矫桂琼¹

(1. 西北工业大学 力学与土木建筑学院, 西安 710129)

(2. 泛亚汽车技术中心有限公司 底盘及动力总成集成部, 上海 201206)

YANG Ting¹ JIA PuRong¹ HUANG Tao¹ CHEN Hanjun² QIANG Chao² JIAO GuiQiong¹

(1. Northwestern Polytechnical University, School Of Mechanics And Civil. & Architecture, Xi'an 710129, China)

(2. Pan Asia Technical Automotive Center Co. Ltd, Chassis & PTI, Shanghai 201206, China)

摘要 对含 30% 质量分数短玻璃纤维注塑增强 PA66 材料,按照与注塑方向成 0°、30°、45°、60°和 90°裁取试验件,进行偏轴拉伸试验,得到了 5 组试验件的载荷-位移曲线、拉伸模量和拉伸强度。应用 45°偏轴拉伸测定了材料的剪切弹性模量。通过对偏轴拉伸模量和强度对比,以及应用复合材料计算剪切模量的结果对比应用各向同性计算的结果,证明了短纤维复合材料并不能当做传统各向同性材料来处理分析,是具有各向异性的材料。分析表明,连续纤维偏轴拉伸模量计算方法对于短纤维复合材料仍然适用,蔡-希尔失效判据也能较好的适用于这种材料。从试验结果和偏轴模量以及强度计算发现,60°是最差承载角。

关键词 短纤维 偏轴拉伸 实验研究 最差承载偏轴角

中图分类号 TB332

Abstract A series of off-axis tensile tests were conducted on the short glass fiber composite PA66 which contains 30% mass fraction, with cutting the test pieces in accordance with the angle of 0°, 30°, 45°, 60° and 90°. Then, the load-displacement curve, tensile modulus and tensile strength of five sets of test pieces were obtained. Moreover, the shearing modulus of elasticity of the composite was measured under partial tension from the angle of 45°. It demonstrated that short glass fiber composite, as anisotropic material, could not be analyzed in the way that the traditional isotropic material was done by comparing the off-axis tensile moduli and the strengths, and by comparing the results generated under the composite shear modulus method and the results generated under the isotropy shear modulus method. The results showed that the computing method of continuous fiber axial tensile modulus and Tsai-hill failure criterion could be also applied in short glass fiber composite. In addition, it was also testified that the load-bearing capability of the composite got worst at the angle of 60°.

Key words Short glass fiber; Off-axis tensile; Experiment research; The worst load-bearing angle

Corresponding author: HUANG Tao, E-mail: huangt@nupu.edu.cn, Tel: +86-29-88431026, Fax: +86-29-88431023

Manuscript received 20131212, in revised form 20140415

引言

短玻璃纤维增强复合材料由于加工工艺简单流程化、成本低及良好的力学性能而受到很大的关注^[1]。在汽车工业中,复合材料因具有轻质高强,可设计性强,不锈蚀,成型工艺好等优点,成为以塑代钢的理想材料^[2]。短玻璃纤维注塑 PA66 复合材料在进气管、入口气体压缩机出口和发动机引擎等结构上都得到了

应用,而 PA66 基体在确保较低成本的同时提供了很好的热强度。

大量研究者对短纤维增强复合材料的基本力学性能做了许多研究工作。短纤维复合材料的力学性能由基体和纤维的性能、纤维体积分数、纤维长径比取向等决定。而在注塑过程中,由于纤维和基体的相互作用、纤维和纤维之间的相互作用以及纤维和注塑设备的接触,会导致纤维出现破损或者断裂。Shao-Yun Fu

* 20131212 收到初稿, 20140415 收到修改稿。

**杨挺,男,1990年9月生,湖北荆州市人,汉,西北工业大学力学与土木建筑学院,硕士研究生。主要研究方向为复合材料和结构力学。

***黄涛,男,1976年8月生,重庆人,博士,西北工业大学力学与土木建筑学院,副教授,硕士生导师。主要研究方向为复合材料结构力学,材料科学,航空航天科学与工程。

等^{[3][4]}1117-1125从理论上研究了纤维体积百分比对纤维平均长度的影响,在对不同纤维百分比含量的复合材料拉伸实验中,研究了纤维体积百分比和纤维平均长度这两个重要因素共同对材料模量、强度和断裂应变的影响,并且给出了失效应变与纤维体积含量、纤维平均长度和纤维半径关系的半经验公式。康国政等^[5]7-12在其论文中以单纤维三维模型为基础,应用有限元方法,讨论了纤维取向变化对基体和纤维间应力传递的影响,研究了纤维取向对纤维增强效果的影响。Yuanxin Zhou 等^[6]着重研究了应变率对含 35% 质量分数玻璃纤维注塑增强 PA66 模量和强度的影响,并且给出了一个与应变率相关的单向拉伸本构模型。B. Mouhmid 等^[7]从试验中研究了纤维体积含量、温度和加载速度对其模量和强度的影响。A. Launay^[8,9]等对汽车中应用的短纤维复合材料进行了疲劳性能的研究。一般情况下,短纤维复合材料在纤维较短时可以看做为各向同性的,但是,在实际注塑成型过程中,由于短纤维在基体中的流动有取向性,导致短纤维复合材料存在各向异性,因此,有必要研究纤维取向对复合材料弹性性能和强度的影响。

本文设计了对短玻璃纤维增强 PA66 的偏轴拉伸试验,测得材料的正交各向异性弹性模量和偏轴拉伸强度,并进一步从各向异性材料力学的角度探讨了短纤维复合材料的偏轴拉伸弹性模量的预测方法和强度失效判据。

1 试验

材料试验件中纤维为 E 型短切玻璃纤维,基体为 PA66。试验采用 ISO 527-1 拉伸标准,试件形状和尺寸如图 1 所示。在成型的样板上按与注塑方向成 0°、30°、45°、60°、90°裁取试验件,以此来定义偏轴拉伸试验角度。其中,从 0°到 90°分别有 7 件、7 件、5 件、5 件和 5 件试样,采用 INSTRON5567 电子试验机来进行试验并记录载荷和位移等相关实验数据,拉伸试验示意图如图 2 所示。

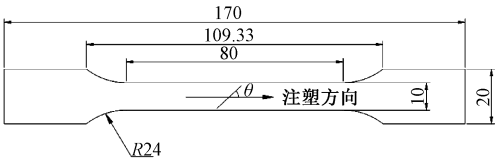


图 1 试件标准尺寸
Fig. 1 Dimensions of test specimens

试验分成两步,首先测量模量,模量测试阶段加载速度为 1 mm/min,用 0/90 度应变片采集应变,依照试验标准,当纵向拉伸应变达到 3 000 $\mu\epsilon$ 即停止加载;模量测试结束后,先进行卸载,然后测试强度,加载速

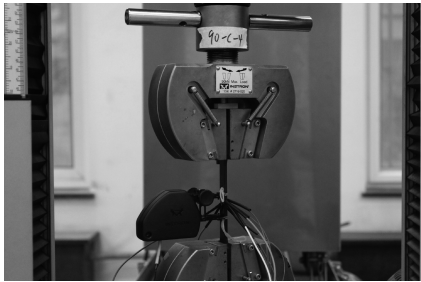


图 2 拉伸试验示意图
Fig. 2 Tensile experiment diagram

度为 50 mm/min,应用在试验件上夹持的引伸计来采集纵向拉伸应变,采集数据的速率应用 50 Hz 高频。试验结束后,用模量测试阶段采集的应变和载荷结果处理得到材料的模量和泊松比,用强度测试采集的载荷和应变处理得到最终强度、破坏应变和应力-应变曲线。

2 试验结果与分析

2.1 偏轴拉伸应力-应变曲线

5 组试验的代表性拉伸应力-应变曲线如图 3 所示,其中应变数值来自应变引伸计,应力数值取为工作段截面平均应力。所有曲线都在整体上表现出了很明显的非线性,在低载荷水平下,曲线表现出比较好的线性,属于材料的弹性阶段。随着载荷逐渐增大,由于基体是塑性材料,并且材料开始发生基体塑性变形和内部损伤,表现出非线性行为,切线模量逐渐降低,载荷增长变得更加缓慢。30°、45°和 60°试件在达到最高应力水平后,应变仍能持续增长,表现出了明显的韧性行为。30°、45°和 90°曲线在上升趋势上比较接近。

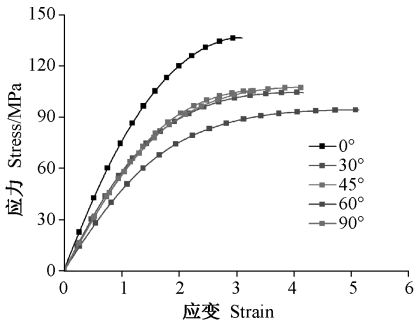


图 3 偏轴拉伸应力 - 应变曲线
Fig. 3 The stress-strain cruve of off-axis tensile test

5 组试验的拉伸模量、极限强度、泊松比和断裂应变的统计平均值见表 1 所示,可以看出,0°试样的拉伸模量和极限强度明显高于其他角度,60°试件拉伸模量和极限强度相对较低;0°、30°和 45°泊松比几乎一样,在偏轴角度大于 45°之后,泊松比随着角度增加而减小;0°和 90°的断裂应变小于其他三个偏轴角度。

表 1 试验结果对比
Tab.1 Comparison of test result

偏角 Angle/(⁰)	拉伸模量/离散系数 Modulus/GPa/Discrete coefficients/%	极限强度/离散系数 Ultimate strength/MPa/ Discrete coefficients/%	泊松比 Poisson's ratio	断裂应变 Breaking strain/%
0	8.60/2.96	136.40/3.70	0.39	3.258
30	6.10/3.66	104.50/2.51	0.40	5.057
45	5.93/2.60	106.30/5.32	0.39	5.314
60	5.54/4.70	96.40/2.05	0.33	5.200
90	6.01/4.12	103.80/2.50	0.23	3.560

从试验结果可以看出,0°试件和 90°试件的弹性模量的比值 $E_0/E_{90} = 1.43$,拉伸强度的比值 $X_0/X_{90} = 1.31$ 。从这两项比值可以看出 0°和 90°模量和强度的差异不大。由此可以看出,材料的各向异性较弱。

2.2 剪切模量

应用 45°偏轴拉伸试验,在测量纵向和横向应变的情况下,经过处理数据可以得到材料的面内剪切模量^[10]。

对于矩形截面的拉伸试件,试件宽为 b ,厚为 h ,轴向拉伸载荷为 P ,在试验中,试件上黏贴 0/90 度应变片,拉伸方向应变为 ε_x ,垂直于拉伸方向应变片采集的应变定义为 ε_y 。这样,应用偏轴 45°拉伸试验,在沿纤维方向的剪切应力 τ_{12} 可以表示为

$$\tau_{12} = \frac{P}{2bh}$$
(1)

材料的面内剪切弹性模量 G_{12} 为

$$G_{12} = \frac{P}{2bh(\varepsilon_x - \varepsilon_y)}$$
(2)

可以得到材料的剪切弹性模量,计算结果如表 2 所示。

如果按照传统各项同性的处理方法,剪切模量 G 计算公式为^[11]

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$
(3)

式中, E 为弹性模量, ν 为泊松比,这样应用表 1 中 0 度拉伸试验结果, $E = 8.6 \text{ GPa}$, $\nu = 0.39$,计算得到的剪切弹性模量为 $G = 3.09 \text{ GPa}$ 。

两种计算结果差别较大,更进一步说明了材料的

表 2 剪切模量计算结果
Tab.2 Calculate value of shear modulu

试件编号 Sample No.	剪切模量 G_{12} Shear modulus/GPa
45-1	2.10
45-2	2.08
45-3	2.13
45-4	1.90
45-5	2.03
平均 average	2.05

各向异性;同时也说明对于短纤维复合材料结构,如果按照各向同性分析,会因剪切模量偏高,得出剪切变形偏小的结果。

2.3 偏轴拉伸模量分析

从试验结果可以看出短纤维复合材料的性能是具有各向异性的,可以将连续纤维增强复合材料的非材料主方向的工程弹性常数预测方法应用于短纤维复合材料。

偏轴向模量预测公式^[12]

$$\frac{1}{E_x} = \frac{m^2}{E_L}(m^2 - n^2\nu_{LT}) + \frac{n^2}{E_T}(n^2 - m^2\nu_{TL}) + \frac{m^2n^2}{G_{LT}}$$
(4)

式中, m 和 n 分别为偏轴角的余弦和正弦值, E_x 为偏轴拉伸模量, E_L 和 E_T 分别为 0°和 90°拉伸模量, G_{LT} 为剪切模量, ν_{LT} 为 0 度拉伸泊松比,由于实际试验存在误差,所以由公式(5)计算得到 ν_{TL} 。

$$\frac{\nu_{LT}}{E_L} = \frac{\nu_{TL}}{E_T}$$
(5)

材料的基本性能均来自试验结果,剪切模量取计算平均值,各性能如表 3 所示。

表 3 模量计算基本性能
Tab.3 The basic value of modulus calculaion

弹性常数 Elastic constant	数值 Value
E_L/GPa	8.6
E_T/GPa	6.0
G_{LT}/GPa	2.05
ν_{LT}	0.39
ν_{TL}	0.27

模量变化趋势预测结果如图 4 所示,可以看出,材料的偏轴拉伸模量随角度增大逐渐下降,在偏轴角度为 60°时,拉伸模量达到最低值,然后又逐渐缓慢上升,从 30°、45°和 60°的拉伸试验结果也验证了这种规律。在偏轴角度大于 30°之后,曲线变化比较平缓,模量改变不大。说明材料在偏轴角度大于 30°后,纵向拉伸模量的大小受角度改变的影响不明显,造成这种现象的主要原因是因为纤维的尺寸太小,在偏轴角度大于 30°之后,纤维增强对材料模量的影响变弱,随着

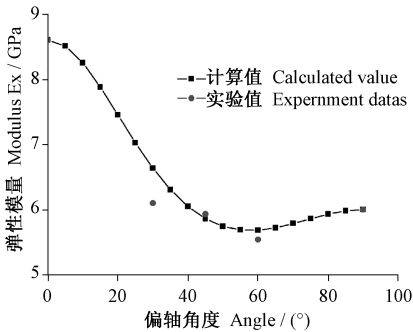


图 4 模量变化趋势
Fig. 4 Modulus variation trend

偏轴角度的增大,对材料拉伸模量影响并不大。

在康国政等^{[5] 7-12}的论文中,应用单纤维有限元模型分析了短纤维复合材料中的纤维取向对应力传递的影响,结果表明从 0°逐渐增加到 60°的过程中,纤维一直承受拉应力,并且随着偏轴角度增大基体和纤维之间的应力传递程度逐渐减弱,纤维的增强效果逐渐减小,到 60°时增强效果几乎为 0,纤维的增强作用几乎没有发生作用。在偏轴角度大于 60°之后,纤维承受的是压应力,并且随着角度的增大压应力越来越大,虽然纤维不能通过应力传递来对材料起到增强作用,但是由于泊松效应对于横向收缩的制约使得增强效果又逐渐增强。所以对于短纤维复合材料,纤维的最差取向角度是 60°。

Shao-Yun Fu 等^{[4] 1117-1125}对短玻璃纤维注塑复合材料在流动方向的拉伸断口拍摄了电镜照片,通过断口形貌研究,证明了短玻璃纤维注塑复合材料纤维的分布可以看做是混杂纤维和单向纤维的共同存在。所以文献^{[5] 7-12}中的结论在此适用。在设计试验中,参考了文献的结论。

从图 4 中模量变化的对比可以看到,材料在 0°方向的模量明显高于其他各角度,其他角度都差别不大,并且 60°的模量处于最低值,从图 4 的变化趋势可以看出符合文献理论,实验得到的结果证明了这个观点。

2.4 偏轴拉伸强度分析

从表 1 中的强度对比可以看出,0°方向的拉伸强度明显高于其他四个角度,在 60°时拉伸强度最低。而在偏轴角度大于 30°后,材料的拉伸强度改变不多,受角度变化的影响并不十分明显。

由于材料具有正交各向异性。本文采用蔡 – 希尔判据预测偏轴强度。蔡 – 希尔判据假设了正交各向异性材料的失效判据类具有类似于各项同性材料的 Mises 准则,综合考虑了材料主方向的三个应力和相应的强度对单层破坏的影响,尤其考虑了沿着纤维方向和纤维法向应力的相互作用,在工程用应用较多。式 (6)即为蔡 – 希尔判据

$$\frac{\sigma_L^2}{X^2} - \frac{\sigma_L\sigma_T}{X^2} + \frac{\sigma_T^2}{Y^2} + \frac{\tau_{LT}^2}{S^2} = 1 \tag{6}$$

式中, X 、 Y 分别为材料纤维方向和垂直纤维方向的拉伸强度, S 为材料的剪切强度。 σ_L 和 σ_T 分别为材料纤维和垂直于纤维方向的应力, τ_{LT} 为材料主方向的切应力。

应用蔡 – 希尔失效判据来预测材料偏轴拉伸角度的强度,偏轴拉伸失效的拉伸强度计算公式为

$$F_x = \frac{1}{\sqrt{\frac{\cos^4\theta}{X^2} + (\frac{1}{S^2} - \frac{1}{X^2}) \sin^2\theta \cos^2\theta + \frac{\sin^4\theta}{Y^2}}} \tag{7}$$

可以应用 45°拉伸强度代入式 (7) 反推出材料的剪切强度 S ,结合试验结果,可以得到所有应用蔡 – 希尔失效判据来预测偏轴拉伸强度的相关数据,如表 4 所示。

表 4 强度参数
Tab. 4 Strength paramaters

强度参数 Strength parameter	数值 Value/MPa
X	136
Y	104
S	62

应用蔡 – 希尔判据可以预测出偏轴拉伸的强度值,与试验值对比如图 所示,从图中可以看出,偏轴拉伸强度随偏轴角度增大迅速下降,在偏轴角度大于 30°之后,强度变化变得比较平稳,和模量预测相同,在偏轴角度达到 60°时,材料强度达到最低值。之后随着偏轴角度增加,强度值变化不大。而通过对比试验值可以发现,应用蔡 – 希尔失效判据预测的强度值与试验值比较接近,试验值相对于预测值偏小,但是在合理范围之内。因此,从工程角度,蔡 – 希尔判据对这种材料有较好的适用性。

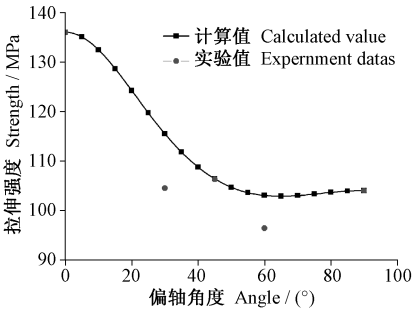


图 5 强度变化对比
Fig. 5 The contrast of strength change

3 结论

通过对 30% 纤维含量的短玻璃纤维注塑增强 PA66 进行了单轴和偏轴拉伸试验,可以得到以下

结论:

- 1)短玻璃纤维注塑增强 PA66 模量和强度的试验结果证明了短玻璃纤维增强 PA66 具有弱各向异性。
- 2)连续纤维复合材料的模量偏轴计算公式对于短纤维复合材料仍然适用,可以很好的对偏轴角度模量进行预估计算。蔡-希尔失效判据对于这种材料有较好的适用性,能满足工程要求。
- 3)从偏轴模量预测和强度预测可以看出,短纤维材料的模量和强度在偏轴角度是 60°时最低。所以 30% 纤维含量的短纤维复合材料最差承载角度是 60 度。

参考文献 (References)

[1] 赵丽军,黄宝宗,袁惠群. 层间短纤维增韧复合材料层板横向裂纹扩展的试验研究[J]. 机械强度, 2010, 32(4):646-650.
ZHAO LiJun, HUANG BaoZong, YUAN HuiQun. Test study on transverse matrix crack growth of composite laminates with interlaminar short fibers[J]. Journal of Mechanical Strength, 2010, 32(4):646-650(In Chinese).

[2] 王莉莉,高国强,李松. 国外汽车用复合材料近况和发展趋势[C]. 玻璃钢学会. 第十六届全国玻璃钢/复合材料学术年会论文集: F4, 安徽.,2006: 277-281.
WANG LiLi, GAO GuoQiang, LI Song. Recent situation and future trend of composite application in foreign auto industry[C]. Glass Fiber reinforced plastic society. Proceedings of 16th annual academic conference on fiber reinforced plastics/composites: F4, Anhui, 2006:277-281(In Chinese).

[3] Fu SY, Lauke B. Effect of fiber length and fiber orientation distributions on the tensile strength of short-fiber-reinforced polymers [J]. Composites and Science Technology, 1996, 56(10): 1179-1190.

[4] Fu SY, Lauke B. Tensile properties of short-glass-fiber- and short-carbon-fiber- reinforced polypropylene composites[J]. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2000, 31(10): 1117-

1125.

[5] 康国政,高庆,刘世楷. 纤维取向对短纤维复合材料中应力传递的影响[J]. 西南交通大学学报, 1998, 1(33): 7-12.
KANG GuoZheng, GAO Qing, LIU ShiKai. The effect of fiber orientation on stress transfer in short fiber reinforced metal matrix composites[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1998, 1(33): 7-12(In Chinese).

[6] Yuanxin Zhou, P. K. Mallick. A non-linear damage model for the tensile behavior of an injection molded short E-glass fiber reinforced polyamide-6.6[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 393(1-2): 303-309.

[7] B. Mouhmid, A. Imad. A study of the mechanical behaviour of a glass fibre reinforced polyamide 6,6;Experimental investigation[J]. Polymer Testing, 2006, 25(4): 544-552.

[8] A. Launay, Y. marco. Cyclic behavior of short glass fiber reinforced polyamide for fatigue life prediction of automotive components. [J]. Procedia Engineering, 2010, 2(1): 901-910.

[9] A. Launay, M. H. Maitournam. Cyclic behaviour of short glass fiber reinforced polyamide;Experimental study and constitutive equations [J]. International Journal of Plasticity, 2011, 27(8): 1267-1293.

[10] 陈封亮,万子松,周北斗. 正交各向异性体剪切弹性模量的测定方法及其实际工程测定[J]. 合肥工业大学学报, 1984, 2: 53-59.
CHEN FengLiang, WAN ZiSong, ZHOU BeiDou. The methods of measuring the shear modulus of an orthotropic material and measurement for an engineerinc [J]. Journal of Hefei Polytechnic University, 1984, 2:53-59 (In Chinese).

[11] 苟文选,金宝森,卫丰. 材料力学[M]. 北京: 科学出版社, 2004, 99-100.
GOU WenXuan, JIN BaoSen, WEI Feng. Mechanics of materials [M]. Beijing: Science Press, 2004, 99-100(In Chinese).

[12] 矫桂琼,贾普荣. 复合材料力学[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2008, 47-48.
JIAO GuiQiong, JIA PuRong, Mechanics of composite materials [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2008: 47-48(In Chinese).