

短纤维增强三元乙丙薄膜各向异性强度准则研究

谈炳东 郑 健 许进升* 贾云飞

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘 要 芳纶短纤维增强三元乙丙橡胶包覆材料是一种能与固体火箭发动机壳体连续缠绕固化成型的内绝热层材料。为了描述其在工作过程中表现的各向异性力学特性,通过单轴拉伸和偏轴拉伸实验,研究了材料的拉伸破坏机制。基于 Tsai-Hill 强度准则和余弦级数准则,预测了材料的抗拉强度、断裂伸长率和初始弹性模量随偏轴角度变化的曲线。结果表明,短纤维增强三元乙丙薄膜材料呈现出明显的平面正交各向异性,破坏机制复杂;45°偏轴拉伸法比多轴均值法预测误差小;余弦级数准则不需要通过实验或者计算获取面内剪切强度,且能够保证预测的准确性,实用性较强。

关键词 三元乙丙,各向异性,破坏机制,Tsai-Hill 强度准则,余弦级数准则

Study on anisotropic strength criterion of short fiber reinforced EPDM film

Tan Bingdong Zheng Jian Xu Jinsheng Jia Yunfei

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094)

Abstract Aramid short fiber reinforced EPDM coating material is a kind of heat-insulating material, which is wound and solidified with solid rocket motor case in general. In order to describe anisotropic mechanical properties during its working process, tensile failure mechanisms were studied by uniaxial tensile and off-axis tensile tests. Based on Tsai-Hill strength criterion and cosine series criterion, the curves of tensile strength, elongation at break and initial modulus with different off-axis angles were predicted. Results showed that short fiber reinforced EPDM film presented plane orthotropic properties obviously and had complex failure mechanisms. 45° off-axis tension method was more effective than multi-axis average method in the base of Tsai-Hill strength criterion. It was also concluded that cosine series criterion can ensure the accuracy of prediction and had strong practicality. Meanwhile, it was unnecessary to obtain in-plane shear strength by experiment or calculation.

Key words EPDM, anisotropy, failure mechanism, Tsai-Hill strength criterion, cosine series criterion

短纤维增强三元乙丙(EPDM)薄膜材料是一种用于解决固体火箭发动机自由装填式药柱包覆问题的新型复合材料。其是将高强度、低密度、耐高温的芳纶短纤维作为增强体,定向分布在 EPDM 橡胶基体中,制成的柔性内绝热层材料。目前,国内外对芳纶短纤维增强 EPDM 绝热包覆材料的研究侧重于,填料、配比等对热学性能、耐烧蚀性能等的影响^[1-2],缺少对其受载后呈现的力学特性的描述。

短纤维增强橡胶复合材料的力学性能取决于短纤维取向程度^[3],定向分布的短纤维取向程度较高、各向异性明显,但是其破坏机制复杂,尚无统一的强度准则。关于复合材料的各向异性强度准则形式繁

多^[4],基于 von-Mises 屈服准则导出的主要包括 Tsai-Hill 准则^[5]和 Tsai-Wu 准则^[6]。Tsai-Hill 准则适用于正交各向异性材料,形式直观,系数确定简单,但未考虑材料的拉压异性;而 Tsai-Wu 准则中包含应力的一次项,表征材料的拉伸、压缩强度不同的特性,但其交叉项系数 $f_{ij} (i \neq j)$ 难以获取。目前,国内对机织增强柔性复合材料的各向异性强度准则的研究成果颇多,卫东等^[7]对比国外双轴拉伸测试结果,验证单轴拉伸实验获取膜材料弹性常数的可行性;易洪雷等^[8]对 PES/PVC 膜材料的各向异性断裂机理和破坏准则进行研究,发现 Tsai-Hill 准则能较好预测出材料在纯拉伸或纯剪切下的断裂

基金项目:国家自然科学基金(51606098);中央高校基本科研业务费专项资金(30915118805)

作者简介:谈炳东(1992-),男,硕士生,研究领域为固体火箭装药结构完整性分析。

联系人:许进升(1985-),男,副教授,研究领域为结构完整性分析。

强度,但不适用于拉剪混合破坏模式;蒋邦海等^[9]将 Tsai-Hill 准则推广到动态,以描述材料屈服强度和破坏准则的应变率各向异性强化效应;汪泽幸等^[10]对机织物增强双层柔性复合材料的各向异性性能进行研究,对比分析 Tsai-Hill 准则和调和余弦级数准则的适用性。

本研究以单轴拉伸和偏轴拉伸实验为基础,研究短纤维增强 EPDM 薄膜材料的拉伸破坏力学行为,利用 Tsai-Hill 强度准则和余弦级数准则分别对材料在不同偏轴角度下的抗拉强度、断裂伸长率及初始模量进行预测,对比分析两种强度准则的适用性。

1 实验部分

1.1 材料

EPDM 薄膜材料是将长度约为 5mm、长径比约为 200 的芳纶短纤维作为增强体添加到 EPDM 橡胶基体中进行改性,严格控制工艺条件,使短纤维在基体橡胶中定向分布。定义平行于短纤维方向为 0°,垂直于短纤维方向为 90°,以短纤维方向为基准,分别沿偏离基准方向 0°、15°、30°、45°、60°、75°和 90°方向切取矩形试件。

1.2 实验方法

制备的试样尺寸为 80mm×10mm×0.5mm,标距为 40mm。由于此种薄膜材料的厚度较小,所以在试样与拉伸实验机接触的夹持端采用梯形铝块和高强度粘结剂进行粘结,减少拉伸过程中试样与夹头表面之间滑移的同时,能够有效防止超弹橡胶材料的塑性流动。

对短纤维增强 EPDM 薄膜材料进行了 7 组单轴拉伸和偏轴拉伸实验,所有实验均在室温下进行,有效实验样本为 3 组,结果取平均值,加载速率恒定为 5mm/min。

2 强度准则

2.1 Tsai-Hill 强度准则

基于各向同性材料的 von-Mises 屈服准则,Tsai-Hill 通过引入各向异性强度参数,将其推广到正交各向异性材料中,改写成式(1):

$$F(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + G(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + H(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 2L\tau_{23}^2 + 2M\tau_{31}^2 + 2N\tau_{12}^2 = 1 \quad (1)$$

式中, F, G, H, L, M, N 为各向异性强度参数, MPa^{-2} ; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_{23}, \sigma_{31}, \sigma_{12}$ 为材料主方向的应力分量, MPa 。

各向异性强度参数由 6 个基本强度决定,分别

是材料主方向的三个轴向强度 X, Y, Z 和三个剪切强度 S_{23}, S_{31}, S_{12} 。而对于此种薄膜包覆材料,其近似处于平面应力状态,即 $\sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{31} = 0$, Tsai-Hill 强度准则简化为式(2):

$$(G + H)\sigma_1^2 + (F + H)\sigma_2^2 - 2H\sigma_1\sigma_2 + 2N\tau_{12}^2 = 1 \quad (2)$$

对于定向短纤维增强 EPDM 薄膜来说,1 方向为纤维方向,2、3 方向均为垂直于纤维的横向方向。在垂直于纤维方向的横截面内,由于对称性可知,轴向强度 $Y = Z$ 。假设 1~2 平面内的剪切强度 $S_{12} = S$,根据简单应力状态下正交各向异性材料的屈服条件可得式(3):

$$G + H = \frac{1}{X^2}, F + H = \frac{1}{Y^2}, 2H = \frac{1}{X^2}, 2N = \frac{1}{S^2} \quad (3)$$

由此推出正交各向异性单向板的 Tsai-Hill 强度准则,如式(4):

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1 \quad (4)$$

短纤维增强 EPDM 包覆薄膜在非材料主方向拉伸时,与纤维方向具有一定的夹角 θ ,通过应力分量的坐标转换可得式(5):

$$\sigma_1 = \sigma_0 \cos^2 \theta, \sigma_2 = \sigma_0 \sin^2 \theta, \tau_{12} = \sigma_0 \cos \theta \sin \theta \quad (5)$$

由此得到正交各向异性单向板在非材料主方向上,受单向拉伸载荷时的 Tsai-Hill 强度准则^[11],如式(6):

$$\frac{\cos^4 \theta}{X^2} + \left(\frac{1}{S^2} - \frac{1}{X^2}\right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{\sin^4 \theta}{Y^2} = \frac{1}{\sigma_0^2} \quad (6)$$

式中, σ_0 为 θ 偏轴方向下的拉伸强度, MPa ; X, Y 为轴向强度, MPa ,可分别通过 0°纤维方向和 90°纤维方向的单轴拉伸实验来获取; S 为面内剪切强度, MPa ,通常由直接法或间接法获取。

2.1.1 面内剪切强度

复合材料的剪切强度包括面内剪切强度、面外剪切强度和层间剪切强度。剪切实验中,由于边界的存在、非纯剪切载荷和材料的非线性等因素,使得测试实验复杂、可靠性差,不能真实反映材料的剪切性能,没有形成统一的测试标准^[12]。目前存在的剪切测试方法主要有:扭转法、偏轴拉伸法和 Iosipescu 剪切法^[13]。对于面内剪切强度的获取一般通过已测偏轴抗拉强度间接计算。

(1) 45°偏轴拉伸法

45°偏轴拉伸法是基于试件在受单轴拉伸作用时,斜界面上存在剪应力场的原理。通过获取 45°偏轴方向上的抗拉强度代入 Tsai-Hill 强度准则间接计算获取面内剪切强度,如式(7):

$$S = \sqrt{\frac{Y^2 \sigma_{45}^2}{4Y^2 - \sigma_{45}^2}} \quad (7)$$

(2) 多轴均值法

通过已经获取的各个纤维方向上的抗拉强度,代入式(6)分别计算得到面内剪切强度,并进行平均化处理,如式(8):

$$S = \frac{1}{5} \sum_{\theta=15^\circ}^{75^\circ} \left[\frac{1}{X^2} + \frac{1}{\sin^2 \theta \cos^2 \theta} \left(\frac{1}{\sigma_\theta^2} - \frac{\cos^4 \theta}{X^2} - \frac{\sin^4 \theta}{Y^2} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (8)$$

以上两种方法计算 Tsai-Hill 强度失效准则中的面内剪切强度,在本质上是一样的,虽然预测值有所偏差,但没有从根本上提高预测精度^[14]。在通过 45° 偏轴拉伸法和多轴均值法获取面内抗剪强度下,基于受单向拉伸载荷时的 Tsai-Hill 强度准则预测不同偏轴方向 θ 下的理论抗拉强度,并与实验值进行比较。

2.1.2 初始弹性模量

对于正交各向异性的弹性材料,其拉伸时的初始弹性模量满足式(9)的本构关系^[15]:

$$\frac{1}{E_\theta} = \frac{\cos^4 \theta}{E_X} + \left(\frac{1}{G} - \frac{2\nu}{E_X} \right) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + \frac{\sin^4 \theta}{E_Y} \quad (9)$$

式中, E_X 和 E_Y 为两个主轴方向的杨氏模量, MPa; E_θ 为偏轴方向 θ 下的弹性模量, MPa; G 为剪切模量, MPa; ν 为泊松比。

由于剪切模量 G 无法通过实验得出,采用跟获取面内抗剪强度相同的方法,利用 45° 偏轴方向的初始弹性模量间接计算得到,最终得到偏轴方向 θ 下的单轴拉伸的初始弹性模量表达式(10)^[16]:

$$\frac{1}{E_\theta} = \frac{\cos^4 \theta}{E_X} + \frac{\sin^4 \theta}{E_Y} + \left(\frac{4}{E_{45^\circ}} - \frac{1}{E_X} - \frac{1}{E_Y} \right) \cos^2 \theta \sin^2 \theta \quad (10)$$

式中, E_{45° 表示 45° 偏轴方向的初始弹性模量, MPa。

2.2 余弦级数强度准则

Tan 等^[17]提出了一种适用于纤维各向异性材料的强度失效准则,用傅里叶余弦级数表示为式(11):

$$\sigma_\theta = \left[\sum_{n=0} A_{2n} \cos(2n\theta) \right]^{-1} \quad (11)$$

此余弦级数强度准则具有两个最重要的特征:

(1) 不需要确定剪切强度; (2) 允许任何程度的精度。剪切实验中由于夹具等引起应力集中,使得材料过早失效,测得的抗剪强度准确性差。而此准则在不需要确定剪切强度的基础上,能够准确预测纤维各向异性材料的抗拉强度,且通用性较强。

Pan 等^[18]利用此余弦级数强度准则研究织物抗拉强度的各向异性的同时,指出其精确程度可通过增加余弦级数分量来提高,织物中的各向异性必须用高阶分量来描述,并将适用范围扩展到断裂应

变和初始弹性模量。其基本思路就是,确定级数 n 的取值,将各个偏轴角度下的抗拉强度、断裂应变和初始弹性模量代入余弦级数强度准则,求解获取方程系数,即可实现对任意偏轴角度下的抗拉强度、断裂应变和初始模量进行预测。

3 结果与讨论

3.1 各向异性性能

图 1 所示为短纤维增强 EPDM 薄膜材料在 7 个偏轴角度下的单轴拉伸应力-应变曲线,其呈现出明显的各向异性力学特性。由于在橡胶中定向分布短纤维,使得材料在平行于短纤维方向上的力学性能不同于其他方向。从图中可以看出,在偏轴角度为 0° (即平行于短纤维方向) 时,其拉伸强度最大,断裂伸长率最小;随着偏轴角度的增大,抗拉强度减小,而断裂伸长率增大。由应力传递理论,复合材料在受外载荷作用时,基体材料首先受到力的作用,再通过某种方式传递到增强体或者界面相使之受载。当偏轴角度较小时,由于短纤维具有较大的刚度和模量,短纤维起主导作用传递应力;但随着偏轴角度增大,纤维作用削弱,应力传递规律被破坏,材料力学性能发生变化^[19]。

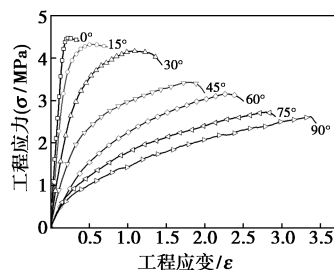


图 1 各偏轴角度下的应力-应变曲线图

实验过程中还发现,此种材料在不同偏轴角度下的破坏形式可以概括为纯拉伸破坏、纯剪切破坏以及拉剪混合破坏。纯拉伸断裂发生在偏轴角度为 0° 和 90° 的情况下,偏轴角度为 0° 发生纤维断裂,而偏轴角度为 90° 发生基体破坏;偏轴角度为中间值时,在基体和短纤维界面之间发生典型的界面剪切破坏或者基体剪切破坏;其他偏轴角度下,表现出拉剪混合型破坏,且试样在拉伸过程中产生明显的“扭曲”现象,主要是拉剪应力交互效应导致的。

3.2 抗拉强度预测

基于实验获取 7 个偏轴方向上的抗拉强度,通过 45° 偏轴拉伸法和多轴均值法获取面内抗剪强度,代入受单向拉伸载荷时的 Tsai-Hill 强度准则得到理论抗拉强度。同时,利用余弦级数强度准则

($n=6$) 获取理论抗拉强度,将两种准则的预测结果和实验结果进行对比分析,如图 2 所示。

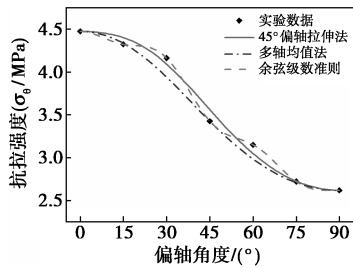


图 2 抗拉强度预测结果对比

从图 2 中可看出,利用余弦级数准则获取的理论抗拉强度值与实验结果吻合度较高;而利用 Tsai-Hill 强度准则获取的理论值与实验值存在一定的误差,但其曲线趋势相对于余弦级数准则较好。对于 45° 偏轴拉伸法和多轴均值法,都是 Tsai-Hill 强度准则中获取面内抗剪强度的方法,而 45° 偏轴拉伸法比多轴均值法获取的预测值更接近实验值。主要是因为获取面内抗剪强度时,多轴均值法采用的是平均化的原则,必然会导致些许误差。

3.3 初始弹性模量预测

单向短纤维增强 EPDM 薄膜材料,忽略其厚度方向上的力学性能,可被看成一种平面正交各向异性弹性体,其对称面为平行于纤维方向和垂直于纤维方向的平面。基于正交各向异性板的弹性理论,对 7 个偏轴方向的初始弹性模量进行预测,从而验证短纤维增强 EPDM 薄膜材料的平面正交各向异性特性。

由于剪切模量 G 无法通过实验得出,利用 45° 偏轴方向以及两个主轴的初始弹性模量作为已知量,间接计算预测各偏轴方向的初始模量,同时给出了利用余弦级数准则获取的初始弹性模量值,如图 3 所示。对比分析看出,与抗拉强度预测结果相似,余弦级数预测值与实验值吻合度较高,但是其曲线趋势较差。基于正交各向异性弹性体力学关系得到的初始模量预测值在中等偏轴方向上误差较大,

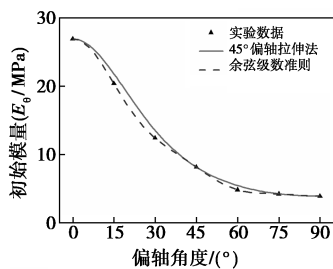


图 3 初始弹性模量预测结果对比

但是在小偏轴角度或者大偏轴角度时,预测精度较高。两种方法对初始模量的预测结果充分验证,此种短纤维增强 EPDM 薄膜材料可近似被认为是一种平面正交各向异性材料。

3.4 余弦级数准则预测

采用余弦级数强度准则($n=6$)预测此种材料在各偏轴角度下的理论抗拉强度、断裂伸长率及初始模量,并分析曲线变化趋势,与实测值进行对比,如图 4 所示。各偏轴角度下的抗拉强度、断裂伸长率以及初始模量的实测值如表 1 所示,其对应的余弦级数准则的拟合系数如表 2 所示。

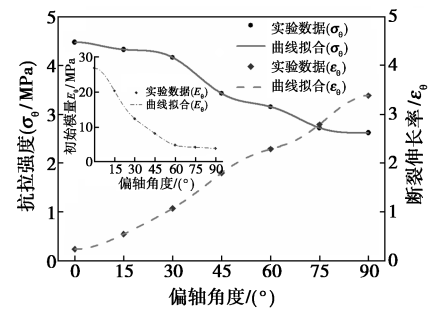


图 4 抗拉强度、断裂伸长率和初始模量预测值

表 1 各偏轴角度下的抗拉强度、断裂伸长率和初始模量

偏轴角度 $\theta / (^{\circ})$	抗拉强度 $\sigma_{\theta} / \text{MPa}$	断裂伸长率 ϵ_{θ}	初始模量 E_{θ} / MPa
0	4.4758	0.2414	26.9219
15	4.3253	0.5501	20.4251
30	4.1647	1.0764	12.4623
45	3.4305	1.8023	8.2068
60	3.1546	2.2922	4.8874
75	2.7261	2.7939	4.2706
90	2.6233	3.3846	3.9539

表 2 余弦级数准则拟合系数

	A_{2n}	B_{2n}	C_{2n}
A_0	3.55844	B_0	1.72131
A_2	0.93876	B_2	-1.37426
A_4	-0.00497	B_4	-0.00056
A_6	-0.02795	B_6	-0.1186
A_8	-0.06841	B_8	0.08633
A_{10}	0.01543	B_{10}	-0.07874
A_{12}	0.06451	B_{12}	0.00588
		C_0	10.94816
		C_2	9.75389
		C_4	3.63473
		C_6	1.30303
		C_8	0.87403
		C_{10}	0.42708
		C_{12}	-0.01913

注: A_{2n} 、 B_{2n} 和 C_{2n} 分别为抗拉强度、断裂伸长率和初始模量的余弦级数拟合系数。

由图 4 可知,随着偏轴角度的增大,短纤维增强 EPDM 材料的抗拉强度和初始模量不断减小,而断裂伸长率不断增大,其呈现的拉伸各向异性性能

显。利用余弦级数强度准则得到的预测值与实测值吻合度较高,曲线变化趋势良好。对比 Tsai-Hill 强度准则,余弦级数准则不需要通过实验或者计算获取面内剪切强度,且能够保证预测的准确性,实用性较强。

4 结论

通过单轴拉伸和偏轴拉伸实验对短纤维增强 EPDM 薄膜材料的平面正交各向异性和破坏机制等力学特性进行研究。实验分析结果可归纳如下:

(1)短纤维增强 EPDM 薄膜材料具有显著的平面正交各向异性,抗拉强度和初始弹性模量随偏轴角度的增大而减小,而断裂伸长率随偏轴角度的增大而增大。

(2)短纤维增强 EPDM 薄膜材料在偏轴加载过程中,呈现出复杂的破坏形式,可分为纤维断裂、基体拉伸破坏、界面剪切破坏和基体剪切破坏。

(3)基于正交各向异性单向板的 Tsai-Hill 强度准则,45°偏轴拉伸法比多轴均值法的预测值误差较小,但两种方法都是通过间接计算面内抗剪强度从而获取抗拉强度,没有从根本上提高精度。

(4)相对于 Tsai-Hill 强度准则,余弦级数准则不需要通过实验或者计算获取面内剪切强度,精确程度与余弦级数分量有关,实用性较强。

参考文献

- [1] Natali M, Rallini M, Puglia D, et al. EPDM based heat shielding materials for solid rocket motors: a comparative study of different fibrous reinforcements[J]. *Polymer Degradation & Stability*, 2013, 98(11): 2131-2139.
- [2] 王纪霞, 张志鹏, 赵荣, 等. 三元乙丙橡胶绝热层力学性能改善[J]. *航天制造技术*, 2013(4): 41-44.
- [8] Mostafazadeh A K, Rahimpour M R, Shariati A. Vapor-liquid equilibria of water + triethylene glycol (TEG) and water + TEG + Toluene at 85 kPa[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2009, 54(3): 876-881.
- [9] Rose M, Palkovits R. Isosorbide as a renewable platform chemical for versatile applications—Quo Vadis? [J]. *ChemSusChem*, 2012, 5(1): 167-176.
- [10] Chrysanthos M, Galy J, Pascault J P. Preparation and properties of bio-based epoxy networks derived from isosorbide diglycidyl ether[J]. *Polymer*, 2011, 52(16): 3611-3620.
- [11] Hong J, Radojčić D, Ionescu M, et al. Advanced materials from corn: isosorbide-based epoxy resins[J]. *Polymer Chemistry*, 2014, 5(18): 5360-5368.
- [12] Eo Y S, Rhee H W, Shin S. Catalyst screening for the melt polymerization of isosorbide-based polycarbonate[J]. *Journal*

- [3] 郑元锁, 张文, 芳纶短纤维增强天然橡胶耐磨材料的研究[J]. *高分子材料科学与工程*, 2000, 16(4): 92-95.
- [4] 张飞飞, 陈劫实, 陈军, 等. 各向异性屈服准则的发展及实验验证综述[J]. *力学进展*, 2012, 42(1): 68-80.
- [5] Hill R. A Theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals[J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1948, 193(1033): 281-297.
- [6] Tsai S W, Wu E M. A general theory of strength for anisotropic materials[J]. *Journal of Composite Materials*, 1971, 5(1): 58-80.
- [7] 卫东, 王臣, 向阳, 等. 建筑膜材的材性试验研究[J]. *空间结构*, 2002, 8(1): 37-43.
- [8] 易洪雷, 丁辛, 陈守辉. PES/PVC 膜材料拉伸性能的各向异性及破坏准则[J]. *复合材料学报*, 2005, 22(6): 98-102.
- [9] 蒋邦海, 张若棋. 一种碳纤维织物增强复合材料应变率相关的各向异性强度准则[J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(4): 333-338.
- [10] 汪泽幸, 蒋金华, 陈南梁, 等. 机织物增强双层柔性复合材料拉伸异向性能及其失效准则[J]. *纺织学报*, 2014, 35(8): 38-43.
- [11] 张少实. 复合材料与粘弹性力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [12] 李佳, 肖岩, 杨瑞珍, 等. 典型胶合竹剪切强度试验研究[J]. *工业建筑*, 2015, 45(4): 7-12.
- [13] 徐琪. 复合材料面内剪切性能测试方法的研究[J]. *玻璃纤维*, 2012(3): 6-10.
- [14] 陈守辉. 机织建筑膜材料拉伸性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2008.
- [15] Chaw K K. Composite materials: science and engineering[J]. *Composites*, 1987, 20(3): 286-286.
- [16] 邹宗勇, 韩建, 刘杭峰, 等. PVC 建筑膜材拉伸异向性能研究[J]. *浙江理工大学学报*, 2010, 27(2): 186-190.
- [17] Tan S C, Cheng S. Failure criteria for fibrous anisotropic materials[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1993, 5(2): 198-211.
- [18] Pan N, Yoon M Y. Structural anisotropy, failure criterion, and shear strength of woven fabrics[J]. *Textile Research Journal*, 1996, 66(4): 238-244.
- [19] 谈炳东, 许进升, 贾云飞, 等. 短纤维增强 EPDM 包覆薄膜超弹性本构模型[J]. *力学学报*, 2017, 49(2): 317-323.

收稿日期: 2017-06-08

(上接第 189 页)

- [8] Mostafazadeh A K, Rahimpour M R, Shariati A. Vapor-liquid equilibria of water + triethylene glycol (TEG) and water + TEG + Toluene at 85 kPa[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2009, 54(3): 876-881.
- [9] Rose M, Palkovits R. Isosorbide as a renewable platform chemical for versatile applications—Quo Vadis? [J]. *ChemSusChem*, 2012, 5(1): 167-176.
- [10] Chrysanthos M, Galy J, Pascault J P. Preparation and properties of bio-based epoxy networks derived from isosorbide diglycidyl ether[J]. *Polymer*, 2011, 52(16): 3611-3620.
- [11] Hong J, Radojčić D, Ionescu M, et al. Advanced materials from corn: isosorbide-based epoxy resins[J]. *Polymer Chemistry*, 2014, 5(18): 5360-5368.
- [12] Eo Y S, Rhee H W, Shin S. Catalyst screening for the melt polymerization of isosorbide-based polycarbonate[J]. *Journal*

of Industrial and Engineering Chemistry, 2016, 37: 42-46.

- [13] 王田田, 常雪松, 田恒水. 熔融酯交换法合成异山梨醇型聚碳酸酯[J]. *工程塑料应用*, 2016, 44(5): 39-42.
- [14] Noordover B A J, Haveman D, Duchateau R, et al. Chemistry, functionality, and coating performance of biobased copolycarbonates from 1,4:3,6-dianhydrohexitols[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2011, 121(3): 1450-1463.
- [15] Shi J, Shan Y, Tian Y, et al. Hydrophilic sulfonic acid-functionalized micro-bead silica for dehydration of sorbitol to isosorbide[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(16): 13514-13521.
- [16] 尹俊侨. 商业双酚 A 基聚碳酸酯的表征[J]. *信阳师范学院学报*, 2002, 15(3): 305-308.
- [17] 杜振霞, 饶国瑛, 南爱玲, 等. 聚碳酸酯的热行为[J]. *高分子材料科学与工程*, 2003, 19(3): 164-165.

收稿日期: 2018-03-16

修稿日期: 2018-06-17