复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第35卷 第6期 6月 2018年
Vol. 35 No. 6 Jun 2018

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20170824.001

短纤维增强三元乙丙薄膜拉伸破坏率相关 Tsai-Hill 强度准则

谈炳东[1]，郑健[1]，许进升*[1]，贾云飞[1]，李宏文[2]
（1. 南京理工大学 机械工程学院，南京 210094；2. 晋西工业集团有限责任公司，太原 030027）

摘　要： 短纤维增强三元乙丙(EPDM)薄膜材料是一种应用于固体火箭发动机装药的新型绝热结构材料，其密度小、耐烧蚀且力学性能良好。基于正交各向异性单向板的 Tsai-Hill 强度准则，引入率相关函数法和率强度因子法改进，预测材料在不同偏轴方向下的抗拉强度，从而建立一种适用于准静态条件下的率相关各向异性通用准则。研究表明：轴向强度和抗剪强度随应变率的增加而增加；相比于率强度因子法，基于率相关函数法的 Tsai-Hill 强度准则对材料抗拉强度的预测精度较高；率强度因子法预测抗拉强度的误差与参考速率的选取和率强度因子的函数表达式有关。

关键词： 三元乙丙；各向异性；抗拉强度；率相关；Tsai-Hill 强度准则
中图分类号： V435　**文献标志码：** A　**文章编号：** 1000-3851(2018)06-1646-06

Rate dependent Tsai-Hill strength criterion for short fiber reinforced EPDM film in tensile failure process

TAN Bingdong[1], ZHENG Jian[1], XU Jinsheng*[1], JIA Yunfei[1], LI Hongwen[2]
(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Jinxi Industries Group Co. Ltd., Taiyuan 030027, China)

Abstract: Short fiber reinforced ethylene propylene diene monomer(EPDM) film material is a new type of thermal insulation and structural materials, which is applied in the cladding of solid rocket motor with low density, ablative resistance and good mechanical properties. In order to establish a general criterion for rate dependent anisotropy in quasi-static conditions, rate dependent function and rate intensity factor methods were introduced to extend Tsai-Hill strength criterion, which was used to predict the tensile strength in different off-axis directions. Studies show that axial strength and shear strength increase with the strain rate. Compared with rate intensity factor method, Tsai-Hill strength criterion based on rate dependent function method has higher prediction accuracy. Meanwhile, the prediction error of rate intensity factor method has strong relations with selection of reference rate and function expression of rate intensity factor.

Keywords: ethylene propylene diene monomer(EPDM); anisotropy; tensile strength; rate dependent; Tsai-Hill strength criterion

短纤维增强三元乙丙(EPDM)薄膜材料，是一种应用于固体火箭发动机绝热层缠绕成型工艺的新型复合材料。其作为热功能材料，绝热性能良好且耐烧蚀；作为结构材料，耐老化、密度小且力学性能优异[1]。在高温烧蚀过程中，炭化的短纤维“镶嵌”在残渣中，利用自身的结构特性“团结、增强”碳化层[2]，而碳化层的性能又与短纤维和基体的界面性能相关[3]。

短纤维的填充势必改善了绝热层的耐烧蚀性能，但又会影响材料的力学性能。由于在混炼加工

收稿日期： 2017-05-25；**录用日期：** 2017-08-14；**网络出版时间：** 2017-08-24 09:12
网络出版地址： https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170824.001
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)
通讯作者： 许进升，博士，副教授，硕士生导师，研究方向为装药结构完整性分析　E-mail：xujinsheng@njust.edu.cn
引用格式： 谈炳东，郑健，许进升，等. 短纤维增强三元乙丙薄膜拉伸破坏率相关 Tsai-Hill 强度准则[J]. 复合材料学报，2018，35(6)：1646-1651.
TAN Bingdong, ZHENG Jian, XU Jinsheng, et al. Rate dependent Tsai-Hill strength criterion for short fiber reinforced EPDM film in tensile failure process[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(6): 1646-1651 (in Chinese).

http://fhclxb.buaa.edu.cn

过程中，短纤维会在炼胶机辊筒的剪切力作用下，沿着压延方向取向成型，从而表现出明显的各向异性力学特性。国内对于芳纶短纤维/EPDM 绝热材料的研究起步于 1980 年，但大多是对于其烧蚀性能、绝热性能和黏接性能等的研究[4-6]。对于此种材料的力学性能描述甚少，郑元锁[7]以芳纶短纤维增强橡胶复合材料为研究对象，结合宏观性能和微观结构对其增强机制进行研究；凌玲等[8]通过改变芳纶纤维的长度和用量，对 EPDM 绝热层的抗拉强度、伸长率和初始模量等进行研究；余家泉等[9]、张中水[10]和 Jiang 等[11]分别建立了 EPDM 包覆层材料在准静态、动态和热解后条件下的本构模型。由于此种材料各向异性明显，破坏机制复杂，Tsai-Hill 强度准则适用于正交各向异性材料，形式直观，参数确定简单。易洪雷等[12]利用 Tsai-Hill 强度准则对 PES/PVC 建筑膜材料的断裂机制和破坏行为进行预测；蒋邦海等[13]提出一种在动态压缩条件下适用于碳纤维增强织物复合材料的应变率相关各向异性强度准则；Chen 等[14]通过偏轴拉伸实验对涂层织物材料的各向异性破坏强度进行研究，采用 Tsai-Hill 强度准则进行结果分析，发现其存在拉伸破坏、剪切破坏和拉剪混合破坏三种失效机制；Zhang 等[15]采用双轴拉伸实验研究 PTFE 涂层织物的破坏机制和强度准则，发现其拉伸强度和断裂应变与应变率对数呈线性关系，而温度对力学性能影响不大。

本文在对短纤维增强 EPDM 超弹性本构模型研究[16]的基础上，重点研究其在拉伸破坏过程中抗拉强度的率相关各向异性，用率相关函数法和率强度因子法对 Tsai-Hill 强度准则形式进行改进，从而建立一种能够描述短纤维增强 EPDM 薄膜材料在准静态条件下呈现的拉伸破坏率相关各向异性强度准则。

1 实 验

1.1 实验材料和方法

短纤维增强 EPDM 薄膜材料属于短纤维增强橡胶基复合材料，其将长度约为 5 mm、长径比约为 200 的芳纶短纤维(质量分数约为 5%)添加到 EPDM 橡胶中，在炼胶机辊筒的剪切力作用下，沿着压延方向发生取向，形成具有定向分布的短纤维增强 EPDM 薄膜材料。薄膜厚度控制在 5 mm±0.2 mm，其微观结构如图 1 所示。

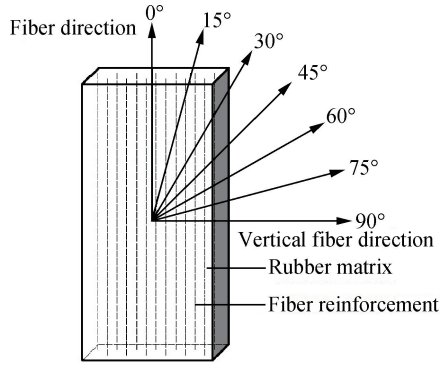

图 1 短纤维增强三元乙丙(EPDM)薄膜材料微观结构示意图

Fig. 1 Diagram of micro-structure of short fiber reinforced film materials

定义平行于纤维方向为 0°即纵向，垂直于纤维方向为 90°即横向，每隔 15°切取带宽状试件，试件尺寸为 80 mm×10 mm×0.5 mm，标距为 40 mm。在万能材料试验机(倾技 QJ-211，中国上海)上进行单轴拉伸和偏轴拉伸实验，拉伸速率分别为 1 mm/min、5 mm/min、20 mm/min 和 100 mm/min，实验温度为常温(忽略温度影响)。

1.2 结果分析

对实验数据汇总后，得到短纤维增强 EPDM 薄膜材料在 4 种拉伸速率下不同偏轴方向的应力-应变曲线，如图 2 所示。可知，短纤维增强 EPDM 薄膜材料呈现出明显的拉伸破坏各向异性力学特性，其抗拉强度随着偏轴角度的增大而减小。由复合材料应力传递理论[17]可知，在短纤维增强 EPDM 材料中，短纤维和基体橡胶之间的界面及短纤维承担主要载荷作用，因此偏轴角度越小，短纤维的应力传递主导作用越明显，材料的抗拉强度越大。

短纤维增强 EPDM 薄膜材料拉伸破坏不仅呈现出各向异性，还表现出率相关特性，即随着应变率的增加，其抗拉强度增加。但是其应变率强化效应在偏轴角度较小的情况下更明显，分析其原因是短纤维或界面的率响应比基体橡胶的率响应大。

2 Tsai-Hill 强度准则

Tsai-Hill 在各向同性 von-Mises 准则基础上，引入各向异性强度参数，将其推广到正交各向异性材料中。考虑到此种短纤维增强 EPDM 包覆薄膜材料厚度方向上的应力可以忽略不计，近似等效为平面应力状态，即 $\sigma_3=\tau_{23}=\tau_{13}=0$(3 方向为材料厚度方向)，由此得到适用于平面正交各向异性的屈服准则：

http://mdxb.buaa.edu.cn

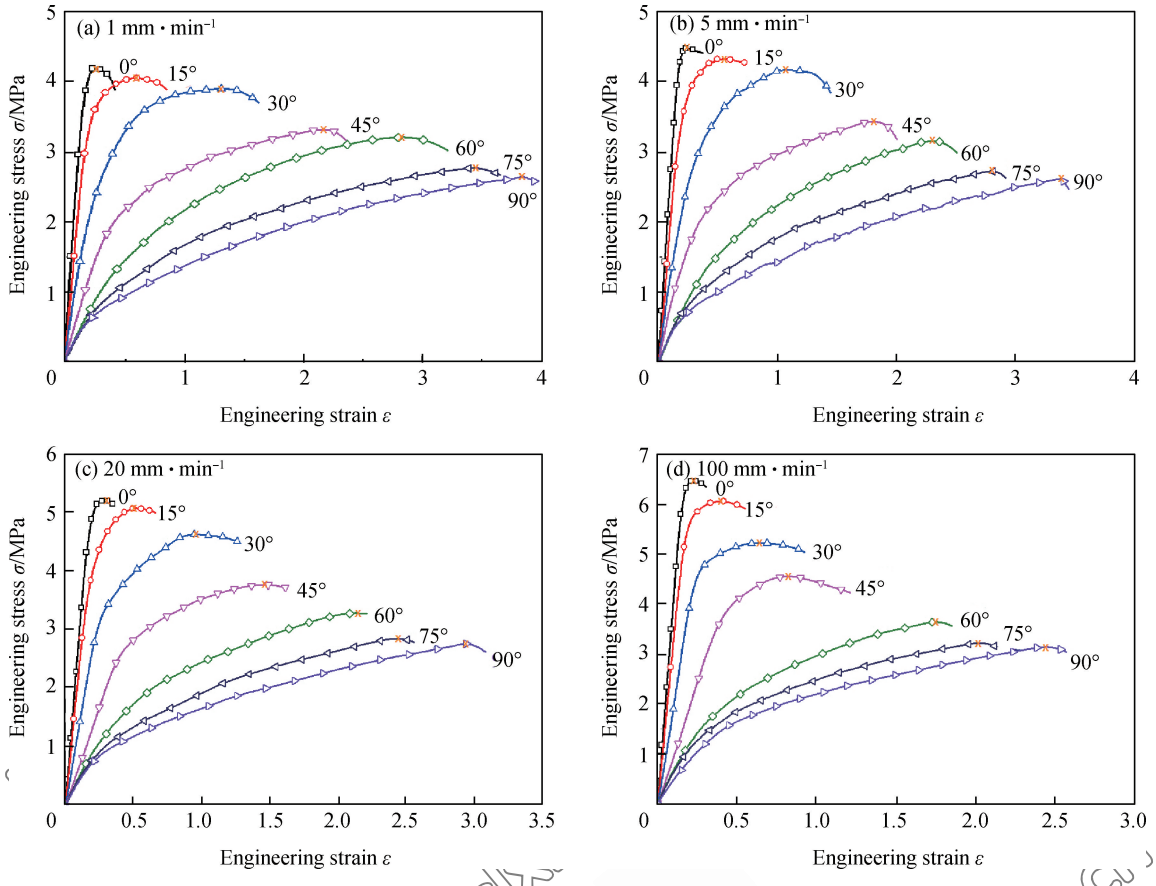

图 2　短纤维增强 EPDM 薄膜材料在 4 种拉伸速率下不同偏轴方向的应力-应变曲线

Fig. 2　Stress-strain curves of short fiber reinforced EPDM film materials under different off-axis directions at 4 tensile rates

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

式中：F、G、H 和 N 为各向异性强度参数；σ_1、σ_2 和 τ_{12} 为 1-2 平面内的主应力分量。

各向异性强度参数由六个基本强度决定，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}。对于此种定向短纤维增强 EPDM 薄膜来说，1 方向为纤维方向即纵向，2 方向为与纤维垂直方向即横向。垂直于纤维方向的横截面属于各向同性面，轴向强度 Y 和 Z 相等，则此种薄膜材料又可定义为横观各向同性材料。假设 1-2 平面内的剪切强度 $S_{12}=S$，由简单应力状态下正交各向异性材料的屈服条件可得：

$$\begin{cases} G+H=\dfrac{1}{X^2} \\ F+H=\dfrac{1}{Y^2} \\ 2H=\dfrac{1}{X^2} \\ 2N=\dfrac{1}{S^2} \end{cases} \tag{2}$$

代入替换可得正交各向异性单向板的 Tsai-Hill 强度准则：

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2}-\frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2}+\frac{\sigma_2^2}{Y^2}+\frac{\tau_{12}^2}{S^2}=1 \tag{3}$$

短纤维增强 EPDM 包覆薄膜在非材料主方向受力时，与纤维方向的夹角定义为 θ，通过应力分量的坐标变换得

$$\begin{cases} \sigma_1=\sigma_\theta\cos^2\theta \\ \sigma_2=\sigma_\theta\sin^2\theta \\ \tau_{12}=\sigma_\theta\cos\theta\sin\theta \end{cases} \tag{4}$$

根据式(4)可知，轴向强度 $X=\sigma_{0°}$，$Y=\sigma_{90°}$。最终得到平面正交各向异性材料在非材料主方向上，受单向载荷时的 Tsai-Hill 强度准则[18]：

$$\frac{\cos^4\theta}{X^2}+\left(\frac{1}{S^2}-\frac{1}{X^2}\right)\sin^2\theta\cos^2\theta+\frac{\sin^4\theta}{Y^2}=\frac{1}{\sigma_\theta^2} \tag{5}$$

式中，σ_θ 为 θ 偏轴方向下的拉伸强度，轴向强度 X 和 Y 可分别通过 0°偏轴方向和 90°偏轴方向的实验来获取，而面内剪切强度 S 采用多轴均值法间接计算得到[19]。

http://fhclxb.buaa.edu.cn

3 率相关强度准则

对此种短纤维增强 EPDM 薄膜材料的微观结构分析及对其呈现的力学特性的研究发现，该材料不仅具有平面正交各向异性，而且表现出强烈的应变率强化效应。因此为了避免计算步骤重复、材料参数增多，对 Tsai-Hill 强度准则进行率相关拓展，使其能够预测材料在不同拉伸速率和偏轴角度下的抗拉强度，更准确地描述其拉伸过程中的破坏力学行为。

3.1 率相关函数法

对实验结果进行分析，发现短纤维增强 EPDM 薄膜材料在各个方向上的抗拉强度随着应变率的增大而增大，因此需要考虑材料主方向的轴向强度 X、Y 和 1-2 面内抗剪强度 S 的应变率强化效应，定义为率相关的函数，即 $X(\dot{\varepsilon})$、$Y(\dot{\varepsilon})$ 和 $S(\dot{\varepsilon})$，代入平面正交各向异性材料在非材料主方向上受单向载荷时的 Tsai-Hill 强度准则[20]：

$$\frac{1}{\sigma_\theta^2(\dot{\varepsilon})}=\frac{\cos^4\theta}{X^2(\dot{\varepsilon})}+\frac{\sin^4\theta}{Y^2(\dot{\varepsilon})}+\left(\frac{1}{S^2(\dot{\varepsilon})}-\frac{1}{X^2(\dot{\varepsilon})}\right)\sin^2\theta\cos^2\theta \tag{6}$$

式中，轴向强度 $X(\dot{\varepsilon})$ 和 $Y(\dot{\varepsilon})$ 可通过任意应变率下的 0°和 90°偏轴方向的实验来测得，面内抗剪强度 $S(\dot{\varepsilon})$ 在单一应变率下通过多轴均值法计算获取，$\sigma_\theta(\dot{\varepsilon})$ 表示不同应变率下 θ 偏轴方向的抗拉强度。最终，得到轴向强度和抗剪强度随应变率的变化规律，并采用幂函数形式进行拟合，如图 3 所示。可知，轴向强度和抗剪强度随应变率的增加而增加，表现出明显的应变率强化效应；抗剪强度在准静态条件下小于轴向强度。利用幂函数形式对轴向强度和抗剪强度的应变率强化效应进行描述[13, 20]，其相对误差远小于 1%，结果如下：

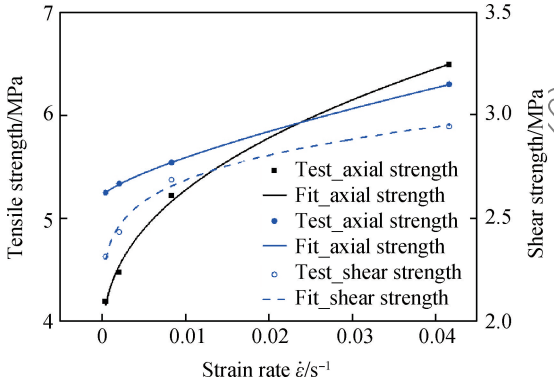

图 3 短纤维增强 EPDM 薄膜材料轴向强度及抗剪强度 S 的变化规律

Fig. 3 Change regulations of axial strength and shear strength S of short fiber reinforced EPDM film materials

$$\begin{cases} X(\dot{\varepsilon})=10.17649\dot{\varepsilon}^{0.41132}+3.74472 \\ Y(\dot{\varepsilon})=5.75479\dot{\varepsilon}^{0.74108}+2.6069 \\ S(\dot{\varepsilon})=2.04423\dot{\varepsilon}^{0.19142}+1.84041 \end{cases} \tag{7}$$

通过引入幂函数形式的率相关函数法，建立率相关各向异性 Tsai-Hill 强度准则的改进形式，并在式(6)的基础上对短纤维增强 EPDM 薄膜材料的各向异性抗拉强度进行预测，结果如图 4 所示。可见，预测结果与实验数据吻合度较高，表明基于率相关函数法的 Tsai-Hill 强度准则能够有效预测短纤维增强 EPDM 薄膜材料在不同方向上表现的抗拉破坏极限。此外，应变率强化效应对轴向强度的变化影响较大，从微观结构层面分析，短纤维强度高、延伸率小，在偏轴角度较小的情况下，短纤维起主导传递载荷作用；在偏轴角度较大的情况下，橡胶基体受力传递载荷。相比于橡胶基体，短纤维具有更强的应变率强化特性，因此随着应变率的增加，轴向强度变化较大。

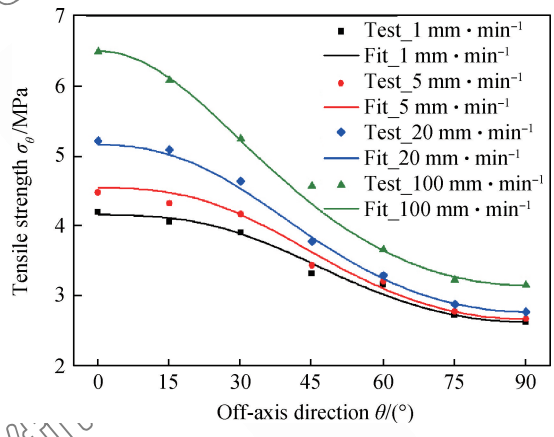

图 4 率相关函数法预测短纤维增强 EPDM 薄膜材料在不同拉伸速率和偏轴方向下的抗拉强度

Fig. 4 Prediction of tensile strength of short fiber reinforced EPDM film materials at different tensile rates and off-axis directions by rate dependent function method

3.2 率强度因子法

在引入率相关函数的基础上，提出一种率强度因子等效法，其基本思路是：假设轴向强度 X、Y 和抗剪强度 S 随应变率变化的规律相同，即

$$\begin{cases} X=R(\dot{\varepsilon})X_0 \\ Y=R(\dot{\varepsilon})Y_0 \\ S=R(\dot{\varepsilon})S_0 \end{cases} \tag{8}$$

式中，$R(\dot{\varepsilon})$ 为率强度等效因子，且与应变率相关，

http://mdxb.buaa.edu.cn

定义成幂函数形式。将式(8)代入受单向载荷时的 Tsai-Hill 强度准则得

$$\frac{R(\dot{\varepsilon})}{\sigma_\theta^2(\dot{\varepsilon})}=\frac{\cos^4\theta}{X_0^2}+\frac{\sin^4\theta}{Y_0^2}+\left(\frac{1}{S_0^2}-\frac{1}{X_0^2}\right)\sin^2\theta\cos^2\theta \tag{9}$$

式中，率强度等效因子 $R(\dot{\varepsilon})$ 可由同一方向不同拉伸速率的实验结果获得，为提高其普遍性和准确性，对某拉伸速率下的七个偏轴角度率相关因子取算术平均值确定。即选定某个参考应变率，则 $R(\dot{\varepsilon})=1$，轴向强度 X_0、Y_0 和抗剪强度 S_0 保持恒定，根据式(9)可得率相关因子的表达式：

$$R(\dot{\varepsilon})=\frac{1}{7}\sum_{\theta=15n,\ n=0}^{6}\frac{\sigma_\theta^2(\dot{\varepsilon})}{\sigma_\theta^2(\dot{\varepsilon}_0)}R(\dot{\varepsilon}_0) \tag{10}$$

图 5 是分别选用 5 mm/min 和 20 mm/min 两种速率作为参考值，获取对应的率强度因子表达式。图 6 是将两种参考速率下的率强度因子表达式代入到式(9)中，对各偏轴角度下的抗拉强度进行预测，并与实验结果进行对比。结果表明，率强度因子随着应变率的增大逐渐减缓；引入率强度因子法虽然能在某种程度上描述短纤维增强 EPDM 薄膜材料的率相关各向异性力学特性，但其准确度有待提高。究其原因是假设轴向强度 X、Y 和抗剪强度 S 随应变率变化的规律相同，提取率强度因子，然而实际中，轴向强度 X、Y 和抗剪强度 S 随应变率变化规律不可能相同，必然跟偏轴方向 θ 存在某种联系。

进一步对比两种率强度因子法预测的抗拉强度曲线，发现以选取的参考速率预测的抗拉强度值与实验值吻合较高，但其他速率下预测值误差较大，误差主要是与率强度因子的拟合表达式有关(不考虑实验误差的影响)。当然，率强度因子法也有优点，其函数形式简洁，能够快速有效地预测材料抗拉强度的取值范围，存在参考价值。

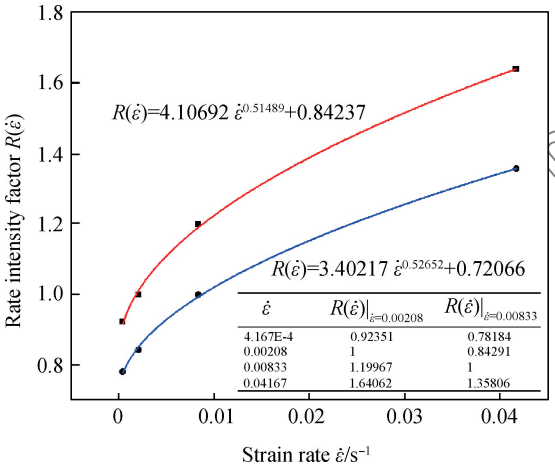

图 5　基于两种参考应变率下率强度因子的确定

Fig. 5　Determination of rate intensity factor based on two reference strain rates

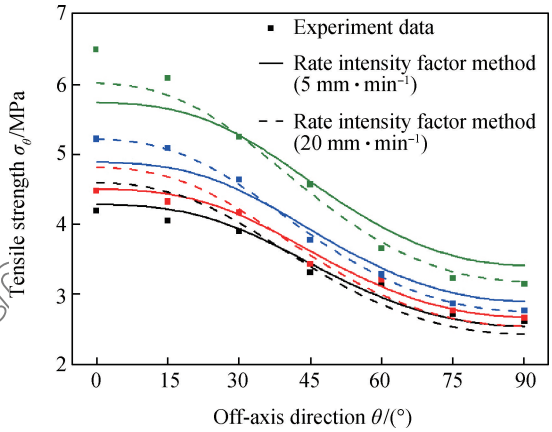

图 6　率强度因子法预测短纤维增强 EPDM 薄膜材料在不同拉伸速率和偏轴方向下的抗拉强度

Fig. 6　Prediction of tensile strength of short fiber reinforced EPDM film materials at different tensile rates and off-axis directions by rate intensity factor method

4　结　论

(1) 短纤维增强三元乙丙(EPDM)薄膜材料不仅呈现出明显的拉伸破坏各向异性力学特性，其抗拉强度随着偏轴角度的增大而减小；而且还表现出率相关特性，但应变率强化效应在偏轴角度较小的情况下更明显，是由于短纤维或界面的率响应比基体橡胶的率响应大。

(2) 相比于率强度因子法，基于率相关函数法的 Tsai-Hill 强度准则对材料抗拉强度的预测精度较高，原因是在率强度因子法中假设轴向强度 X、Y 和抗剪强度随应变率变化的规律相同。

(3) 率强度因子法预测抗拉强度的误差与参考速率的选取和率强度因子的函数表达式有关，其精度较低，但函数形式简洁，具有参考价值。

参考文献：

[1] 宋月贤，郑元锁，袁安国，等. 芳纶短纤维增强橡胶耐烧蚀柔性绝热层材料的研究进展[J]. 橡胶工业，2001，48(11)：697-699.
SONG Yuexian，ZHENG Yuansuo，YUAN Anguo，et al. Research progress of ablative flexible thermal insulation materials with aramid short fiber reinforced rubber[J]. China Rubber Industry，2011，48(11)：697-699 (in Chinese).

[2] 徐义华，胡春波，李江，等. 纤维和 SiO_2 填料对 EPDM 绝热材料烧蚀性能影响的实验研究[J]. 西北工业大学学报，2010，28(4)：491-496.

http://fhclxb.buaa.edu.cn

XU Yihua, HU Chunbo, LI Jiang, et al. Improving performance of EPDM material against ablation through adding suitable fibre-SiO_2 filling[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2010, 28(4): 491-496 (in Chinese).

[3] JIA Xiaolong, LI Gang, SUI Gang, et al. Effects of pretreated polysulfonamide pulp on the ablation behavior of EPDM composites[J]. Materials Chemistry & Physics, 2008, 112(3): 823-830.

[4] 耿小鹏，王有道. 芳纶短纤维增强 EPDM 弹性体及其烧蚀性能的研究[J]. 材料工程，1992(s1)：85-87.
GENG Xiaopeng, WANG Youdao. Study on aramid short fiber reinforced EPDM elastomer and its ablative properties [J]. Journal of Materials Engineering, 1992(s1): 85-87 (in Chinese).

[5] 张劲松，凌玲，朱学文. 填充纤维及阻燃剂对 EPDM 绝热层耐烧蚀性能的影响[J]. 固体火箭技术，2002，25(4)：38-40.
ZHANG Jinsong, LING Ling, ZHU Xuewen. The effects of filler fiber and flame retardant on ablative performance of EPDM insulation [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2002, 25(4): 38-40 (in Chinese).

[6] 赵晓莉，岳红，张兴航，等. 三元乙丙橡胶绝热层耐烧蚀性能的研究评述[J]. 材料科学与工程学报，2005，23(2)：310-312.
ZHAO Xiaoli, YUE Hong, ZHANG Xinghang, et al. Progress and prospect of ablation resistance of insulation of EPDM rubber[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2005, 23(2): 310-312 (in Chinese).

[7] 郑元锁. 芳纶短纤维增强橡胶复合材料及增强机理研究[D]. 西安：西安交通大学，1999.
ZHENG Yuansuo. Study on aramid short fiber reinforced rubber composite and its strengthening mechanism[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1999 (in Chinese).

[8] 凌玲，陈德宏，陈梅，等. 芳纶纤维对 EPDM 绝热层力学行为的影响[J]. 固体火箭技术，2016，39(4)：555-559.
LING Ling, CHEN Dehong, CHEN Mei, et al. Effects of aramid fiber on mechanical behavior of EPDM insulation[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2016, 39(4): 555-559 (in Chinese).

[9] 余家泉，陈雄，周长省，等. EPDM 薄膜橡胶包覆材料的粘超弹本构模型研究[J]. 推进技术，2015，36(3)：465-470.
YU Jiaquan, CHEN Xiong, ZHOU Changsheng, et al. Visco-hyperelastic constitutive model for filmy EPDM inhibitor [J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(3): 465-470 (in Chinese).

[10] 张中水. EPDM 绝热包覆层热解特性及本构模型研究[D]. 南京：南京理工大学，2016.
ZHANG Zhongshui. Research on pyrolysis properties and constitutive model of EPDM insulation[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016 (in Chinese).

[11] JIANG Jing, XU Jinsheng, ZHANG Zhongshui, et al. Rate-dependent compressive behavior of EPDM insulation: Experimental and constitutive analysis[J]. Mechanics of Materials, 2016, 96: 30-38.

[12] 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.
YI Honglei, DING Xin, CHEN Shouhui. Orthotropic behavior and strength criterion of PES/PVC membrane materials under tensile loading[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(6): 98-102 (in Chinese).

[13] 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.
JIANG Banghai, ZHANG Ruoqi. Strain rate dependent Tsai-Hill strength criteria for a carbon fiber woven reinforced composite[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(4): 333-338 (in Chinese).

[14] CHEN Shouhui, DING Xin, YI Honglei. On the anisotropic tensile behaviors of flexible polyvinyl chloride-coated fabrics [J]. Textile Research Journal, 2007, 77(6): 369-374.

[15] ZHANG Xingying, ZHANG Qilin, ZHOU Chuanzhi, et al. Mechanical properties of PTFE coated fabrics[J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites, 2010, 29(29): 3624-3630.

[16] 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.
TAN Bingdong, XU Jinsheng, JIA Yunfei, et al. Hyperelastic constitutive model for short fiber reinforced EPDM inhibitor film [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, 49(2): 317-323 (in Chinese).

[17] 王安强，万建松，苟文选，等. 单纤维界面强度光弹性实验和理论研究[J]. 复合材料学报，2003，20(6)：147-150.
WANG Anqiang, WAN Jiansong, GOU Wenxuan, et al. Study of interfacial stress of single-fiber composite by photoelastic experiment [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2003, 20(6): 147-150 (in Chinese).

[18] 张少实，庄茁. 复合材料与粘弹性力学[M]. 北京：机械工业出版社，2011.
ZHANG Shaoshi, ZHUANG Zhuo. Composites and viscoelastic mechanics[M]. Beijing: China Machine Press, 2011 (in Chinese).

[19] 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.
XU Qi. Study on testing methods for in-plane shear properties of composite materials[J]. Fiber Glass, 2012(3): 6-10 (in Chinese).

[20] XU Jinsheng, YU Jiaquan, CHEN Xiong, et al. Research of strain rate-dependent Tsai-Hill strength criterion for ethylene propylene diene monomer film[J]. Open Materials Science Journal, 2015, 9(1): 102-106.

http://fhclxb.buaa.edu.cn