



编织角对玄武岩复合材料管力学性能的影响

唐 俊, 刘宜胜

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘 要: 以玄武岩纤维/环氧树脂复合材料(BFRP)为研究对象, 分别对编织角度为 30° , 45° 和 60° 的玄武岩复合材料圆形管件进行低速横向冲击试验。通过实验曲线图、试样破坏情况, 结合有限元仿真, 分析编织角度对玄武岩复合材料管件力学性能的影响。结果表明: 在相同的冲击载荷下, 编织角度小的复合材料管具有更高的峰值载荷; 当编织角为 30° 时, 复合材料管由于纤维的编织方向靠近轴向而承受过多的剪力, 导致玄武岩纤维容易发生断裂; 当编织角为 45° 时, 复合材料管纤维断裂数少于 30° , 但冲击区域出现部分塑性变形; 当编织角为 60° 时, 复合材料管由于编织角度大而引起应力集中, 表现出塑性变形; 有限元仿真显示, 力在 30° 复合材料管的传播速度大于 60° , 且冲击损伤集中于管上半部两侧。上述结果为后续玄武岩复合材料管冲击力学性能研究提供实验指导和理论基础。

关键词: 玄武岩复合材料管; 编织角; 横向冲击; 力学性能; 破坏模式; 有限元分析

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2021)01-0056-08

Influence of braiding angle on mechanical properties of basalt composite pipe

TANG Jun, LIU Yisheng

(Faculty of Mechanical Engineering & Automatic, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Basalt fiber/epoxy resin composite (BFRP) was taken as the research object, and low-speed lateral impact tests were carried out for circular pipe fittings made of basalt composites with braiding angles of 30° , 45° and 60° . The influence of braiding angle on the mechanical properties of basalt composite pipe fittings was analyzed through experimental graphs, sample failure conditions and finite element simulation. The results showed that under the same impact load, the composite pipe with a small braiding angle had a higher peak load. When the braiding angle was 30° , the composite pipe suffered excessive shear force because the fiber braiding direction was close to the axial direction, causing fracture of the basalt fiber. When the braiding angle was 45° , the number of fiber fractures of the composite pipe was less than 30° but some plastic deformation occurred in the impact area. When the braiding angle was 60° , the composite pipe caused stress concentration due to the large braiding angle, showing plastic deformation. The finite element simulation showed that the force propagation speed of the composite pipe was faster than 60° at 30° , and the impact damage concentrated on both sides of the upper half of the pipe. The above research provides experimental guidance and theoretical basis for the subsequent research on the impact mechanical properties of basalt composite pipes.

Key words: basalt composite pipe; braiding angle; lateral impact; mechanical properties; failure mode; finite element analysis

收稿日期: 2020-10-11 网络出版日期: 2020-11-30

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY18E050018); 浙江理工大学基本科研业务费专项项目(19022202-Y)

作者简介: 唐 俊(1996-), 男, 湖南永州人, 硕士研究生, 主要从事织物增强复合材料方面的研究。

通信作者: 刘宜胜, E-mail: lysleo@zstu.edu.cn

0 引 言

玄武岩纤维是一款新型的高性能纤维,具有高强度、抗高温热振性、耐腐蚀等优异性能,在国内外得到广泛应用^[1-2]。玄武岩增强复合材料是以玄武岩纤维为增强体,树脂基或其他材料为基体的新型复合材料,广泛应用于防火、石油化工、汽车和建筑工程等领域^[3-4]。

复合材料的性能研究一直都是材料领域的热门方向。随着复合材料在各个领域的应用不断扩大,其工况愈发复杂多变。在实际生产应用中材料不可避免会发生碰撞,分析研究复合材料的冲击力学性能对提高安全生产具有重大意义。板状和管状都是实际应用中零部件常见设计形状,目前在复合材料冲击性能研究领域,更多偏向于板状材料。

对于板状复合材料,Saghafi 等^[5]研究预紧力对弯曲复合板冲击响应的影响,结果表明:压缩应力限制了基体裂纹的扩展,而拉应力则使基体裂纹扩展;增加预紧力会造成更大的损坏面积,总吸收能量会减少。Ghelli 等^[6]对碳纤维/环氧树脂复合材料层压板进行低速冲击和压缩试验,结果表明:试样尺寸和支撑夹具的不同会产生不同的冲击响应和损坏;在相同的冲击能量下,较小的圆形试样比较大的矩形试样分层现象更明显。Shi 等^[7]模拟低速冲击下复合材料层压板的损伤演化,试验表明,层压板受冲击后层间的裂纹发展与冲击时的能量级紧密相关。对于管状复合材料,Sebaey 等^[8]通过 Charpy 冲击实验对玻璃纤维/环氧树脂复合材料管耐撞性进行研究,试验表明:相较于顶部冲击,侧面冲击对试样的破坏程度较小;冲击次数对耐撞性的参数结果影响有限。Jin 等^[9]对碳纤维/环氧树脂复合材料管进行低速冲击试验,结果表明,试样的损伤由纤维向两端发展,损伤区域和编织角度有一定关系。张帅等^[10]研究玄武岩纤维/树脂复合材料管静态压缩试验,结果表明:编织角度和截面形状对玄武岩增强复合材料管件的压缩吸能特性影响显著;而编织角影响管件的破坏模式与截面形状无关。

上述研究主要集中对碳纤维或玻璃纤维复合材料的力学性能研究,对复合材料管的冲击力学性能研究,尤其是玄武岩复合材料管的冲击力学性能研究较少。本文首先结合对板状和管状材料冲击的相关研究,采用玄武岩纤维编织预制件,利用真空辅助树脂传递模塑(VARTM)工艺浸润环氧树脂得到玄武岩纤维/环氧树脂复合材料管;然后通过落锤试验

机对不同编织角度的复合材料管进行低速横向冲击试验获取试验数据,再结合有限元仿真分析复合材料管损伤发展情况,来研究编织角度对玄武岩复合材料管的冲击力学性能的影响。

1 实验材料及方法

1.1 材料及试样

考虑玄武岩纤维性能和编织工艺复杂度,纤维材料选用海宁安捷复合材料公司生产的 2400 tex 玄武岩纤维,参数如表 1 所示。

表 1 玄武岩纤维参数

拉伸强度/MPa	弹性模量/MPa	断裂伸长率/%	纤维直径/ μm	密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	线密度/tex
2762	70.00	2.50	14.00	2.88	2400

基体采用的是法国葛科颂公司的 EPOLAM2040 树脂和 EPOLAM2042 硬化剂以 100:32 的质量比混合后的增强树脂。玄武岩纤维利用卧式环形编织机进行编织。通过改变电机的卷取速度,可得到不同的编织角度的玄武岩纤维编织预制件。

利用 VARTM 工艺浸润玄武岩纤维编织预制件,再加热固化。为确保固化剂的性能,固化条件设定为 65℃、5 h 和 80℃、3 h,最后将复合材料管在烤箱中保持 80℃脱蜡 1 h,得到玄武岩纤维/环氧树脂复合材料管。

1.2 纤维体积含量计算

在编织玄武岩纤维预制件时,编织角度会影响纤维编织方向。编织角度较小的管纤维缠绕次数会小于编织角度较大的管,从而影响玄武岩纤维预制件的面密度。预制件的面密度与复合材料管的体积分数呈正相关。为了更加全面分析编织角度对玄武岩复合材料管冲击力学性能影响,分别测试三种不同编织角度的复合材料管的纤维体积含量。根据编织角度将实验分成三组。为减小实验误差,每组取十份试样进行测试,取每组数据的平均值作为实验数据。

纤维体积含量利用燃烧法^[11]测得,计算公式如式(1)所示:

$$V_g/\% = \frac{m_2 \rho_c}{m_1 \rho_f} \times 100 \quad (1)$$

式中: V_g 为纤维体积含量; m_1 为煅烧前试样质量; m_2 为煅烧后试样剩余质量; ρ_c 为试样纤维体积密度; ρ_f 为玄武岩纤维密度。

测得 30°、45°和 60°试样的纤维体积含量如表 2 所示。

表2 不同编织角玄武岩复合材料管的纤维体积含量

编织角/(°)	纤维体积含量/%
30	16.25
45	20.34
60	29.49

1.3 试验设备

试验采用的是 RH-6011 落锤冲击试验机。下落重量包括锤杆、冲头(半径 5.00 mm)、配重块、用于获得加速度的加速度传感器以及用于测量冲击力的力传感器的质量,总质量为 5.97 kg。试验设定的高度为 1.10 m,根据式(2)计算出冲击能量 $E = 64.20 \text{ J}$ 。在冲击试验过程中,通过 LabVIEW 数据采集软件采集加速度传感器和力传感器的电压信号,采集频率为 20 kHz。

$$E = mgh \quad (2)$$

式中: m 为下落总质量; g 为重力加速度。 h 为下落高度。

1.4 低速横向冲击试验

低速横向冲击实拍照片如图 1 所示。试验被固定在落锤冲击试验机底部距冲头 1.10 m 处的位置。通过高速摄影机记录下冲头冲击试样的过程,采集加速度传感器和力传感器返回的电压数据。同样,试验根据编织角度不同分为三组,每组取 3 份试样进行冲击试验。

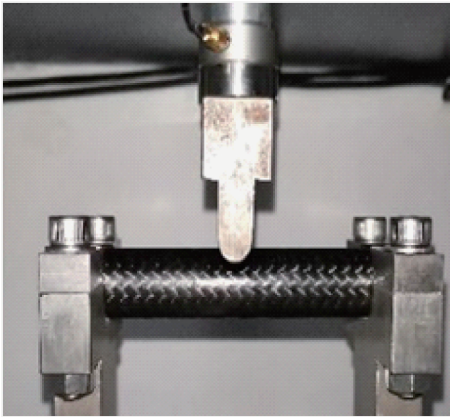


图1 低速横向冲击实拍照片

由冲击载荷和初始速度 v_i 根据式(3)~(5)计算出相对时间的速度 $v(t)$ 、位移 $u(t)$ 和吸收能量 $E(t)$,计算公式为:

$$v(t) = v_i + \int_0^t a(t) dt \quad (3)$$

$$u(t) = \int_0^t v(t) dt \quad (4)$$

$$E(t) = \int_0^t P(t) v(t) dt \quad (5)$$

式中: $a(t)$ 为加速度传感器采集到的信号值; $P(t)$ 为力传感器接收到的信号。

2 结果与讨论

2.1 力学响应

冲击过程中的部分试验数据如表 3 所示。选取载荷方差接近的一组作为分析组。通过分析冲击过程中的实验数据,根据式(3)~(5)得出时间-力曲线、时间-位移曲线和能量吸收图,再结合表 3 分析玄武岩复合材料管的冲击力学响应。

表3 不同编织角玄武岩复合材料管的冲击试验数据结果

编织角度/(°)	试样编号	冲击载荷峰值/N	冲击持续时长/ms	冲击载荷方差
30	1	4816.96	14.21	1312.14
	2	4854.71	14.09	1280.23
	3	4828.27	14.14	1235.75
45	1	4463.72	14.46	1191.47
	2	4512.65	14.63	1243.33
	3	4428.75	14.42	1159.64
60	1	4242.09	14.85	1083.78
	2	4297.36	15.02	1156.86
	3	4265.87	14.93	1205.49

三种不同编织角度试样在受到 64.20 J 冲击载荷时,各个时刻的受力图如图 2(a)所示。图 2(a)分为三个阶段,可以看出三种试样在冲击过程中的受力大致趋势是相同的:第一阶段试样受力迅速增大;第二阶段试样受力相对平稳;第三阶段急剧下降。当冲头接触试样的瞬间,试样承受的冲击载荷迅速增大,曲线斜率呈上升趋势,并且由于树脂受到冲击后发生破裂,导致曲线呈现锯齿状,此时冲头动能转化成试样的弹性势能。而当冲击载荷到达峰值时,此时试样形变量也达到最大,冲击载荷呈下降的趋势。最后在试样回弹过程中,试样的弹性能又转换成冲头的动能。由图 2(a)结合表 3 可以看出,30°试样的峰值载荷是最大的,其次是 45°试样。这是因为编织角度影响了复合材料的面密度,而面密度又和纤维体积含量呈正相关。编织角度小的试样,纤维体积含量低,在试样未失效的情况下,纤维吸收的能量小,冲头动能损失小;编织角度大的试样,纤维体积含量高,大量冲击动能被玄武岩纤维吸收,冲头动能损失大。

由图 2(b)中的时间-位移曲线得知,30°、45°和 60°试样的最大位移量分别是 28.07、26.16 mm 和 23.33 mm。因为在相同冲击载荷作用下,编织角度较小的试样由于动能损失小,产生的弹性形变大,最

大位移量也会随之增加。从最大位移量也可以体现出, 编织角度较小的试样韧性相对来说更高。

试样在冲击过程中, 吸收的能量也是作为评估损伤程度的一个指标。在图 2 (c) 能量吸收图中得

知, 30° 、 45° 和 60° 试样吸收的能量分别为 61.29、62.71 J 和 63.21 J。试样吸收的能量表明了非弹性形变的程度, 而 60° 试样吸收的能量最多, 间接表明了 60° 试样塑性变形和破坏都是最严重的。

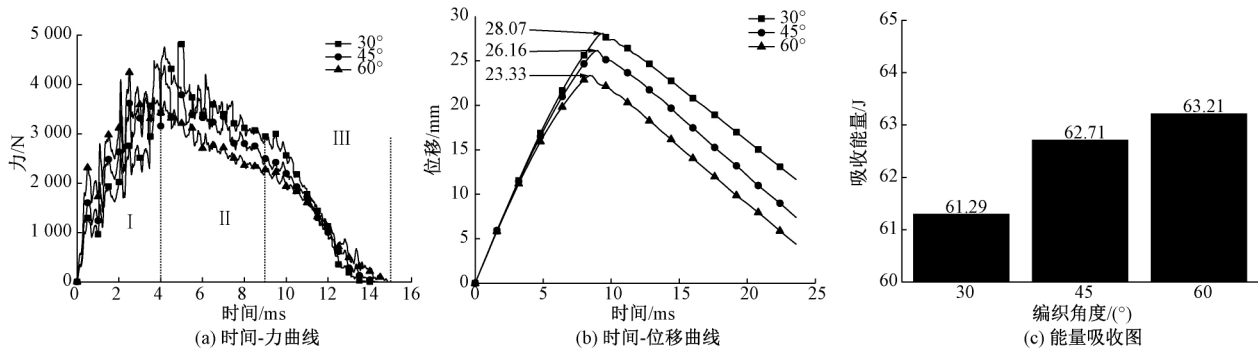


图 2 低速冲击力学响应图

2.2 破坏形貌分析

通过对试样在冲击过后的破坏形貌进行分析, 研究其破坏机理。 60° 试样在冲击过程中

不同时刻的形变如图 3 所示。 30° 、 45° 和 60° 试样冲击后损伤样貌形态图如图 4 (a) — (c) 所示。

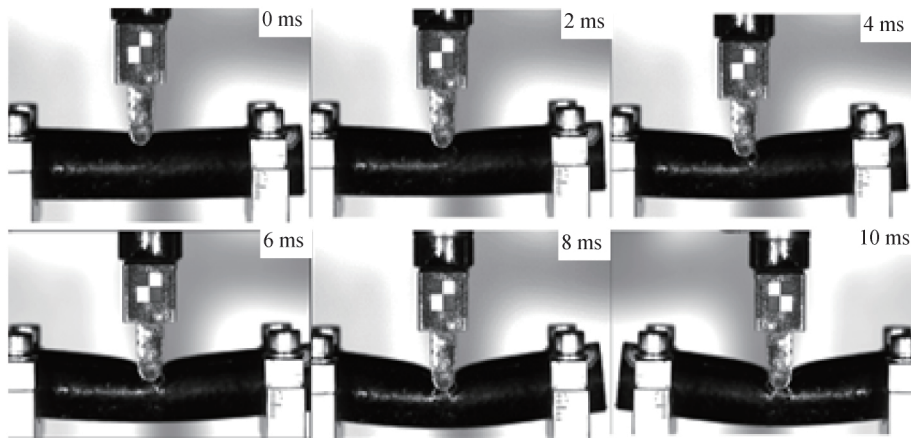


图 3 60° 试样冲击形变图

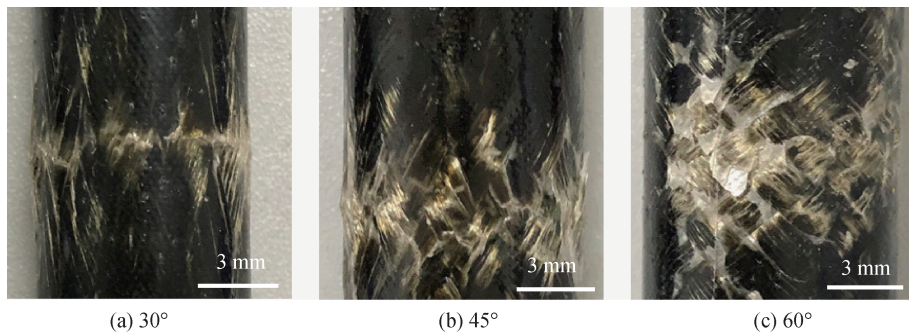


图 4 试样损伤样貌图

由图 4 可以看出, 试样表面都出现裂纹, 但是 30° 试样相较于 45° 和 60° 试样, 树脂破坏并不明显。而在 60° 试样中, 冲击区域树脂破坏严重, 且出现明显的塑性变形。在 30° 试样中, 冲击区域纤维发生断裂。这是由于编织角影响了复合材料管中纤维的

编织方向, 30° 试样编织纱线方向偏向于轴向, 在冲击过程中, 纱线承受更大的剪力, 导致纤维断裂的更加明显。而 60° 编织纱线方向偏向于径向, 吸收的冲击能量更大, 产生的弹性形变小, 导致冲击区域树脂大量剥离而产生塑性变形。

3 有限元仿真分析

3.1 建立有限元分析模型

采用 SolidWorks 三维建模软件建立试样的仿真模型。由于编织角度小的复合材料管在编织时纤维缠绕次数较少,而编织角度大的管纤维缠绕次数多结合更加紧密,从表面上看编织角度较小的管纤维宽度会大于编织角度大的管。在建模过程中为了体现这一现象和避免纤维之间发生干涉,对模型的纤维宽度进行调整优化,三维模型参数如表 4 所示。

表 4 三维模型参数

编织角度/(°)	纤维数量/根	纤维宽度/mm
30	24	3.60
60	24	2.50

将模型导入有限元分析软件 Abaqus 进行有限元分析。其中分析包括对试样的三维模型创建、网格划分、载荷条件、边界条件、求解和后处理分析。

首先对三维模型进行网格划分,试样的几何模型网格数如表 5 所示。

表 5 几何模型网格数

编织角度/(°)	编织纱网数/个	树脂网格数/个	冲头网格数/个	总数/个
30	3423	547354	3120	553897
60	2365	685973	3120	691458

再根据表 6 和表 7 的材料属性对模型进行材料属性赋值。确立试样的本构方程和破坏准则。由于玄武岩纤维/环氧树脂复合材料属于各向异性材料,但在有限元分析中假设树脂基体为各向同性材料,可沿任意方位从树脂基体中截取一部分作为研究对象;对于编织纱线则视为横向各向同性材料,其中包括玄武岩纤维和树脂基体。

表 6 树脂的材料属性

树脂类型	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E_m/GPa	μ_m	G_m/GPa
Epoxy resin	1.30	3.00	0.30	0.78

表 7 玄武岩纤维的材料属性

线密 度/tex	$E_{11}/$ GPa	$E_{22}=E_{33}/$ GPa	$G_{12}=$ $G_{13}/$ GPa	$G_{23}/$ GPa	$\mu_{12}=$ μ_{13}	μ_{23}	$\rho/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
2400	70.00	14.00	9.00	5.00	0.25	0.30	2.78

采用混合模型计算编织纱线的力学性能,计算公式为:

$$E_{11} = \delta_f E_{11}^f + \delta_m E_m \quad (6)$$

$$E_{22} = E_{33} = E_m / \left[1 - \sqrt{\delta_f} \left(1 - \frac{E_m}{E_{22}^f} \right) \right] \quad (7)$$

$$\mu_{12} = \mu_{13} = \delta_f \mu_{12}^f + \delta_m \mu_m \quad (8)$$

$$\mu_{23} = \delta_f \mu_{23}^f + \delta_m \mu_m \quad (9)$$

$$G_{12} = G_{13} = G_m / \left[1 - \sqrt{\delta_f} \left(1 - \frac{G_m}{G_{12}^f} \right) \right] \quad (10)$$

$$G_{23} = G_m / \left[1 - \sqrt{\delta_f} \left(1 - \frac{G_m}{G_{23}^f} \right) \right] \quad (11)$$

$$\delta_m + \delta_f = 1 \quad (12)$$

式中: E_{11} 为编制纱线的等效纵向模量; E_{22} 为编制纱线的等效横向模量; $\mu_{12}, \mu_{13}, \mu_{23}$ 为编制纱线的泊松比; G_{12}, G_{13}, G_{23} 为编制纱线的剪切模量。 E_{11}^f 为玄武岩纤维的等效纵向模量; E_{22}^f 为玄武岩纤维的等效横向模量; μ_{12}^f, μ_{23}^f 为玄武岩纤维的泊松比; G_{12}^f, G_{23}^f 为玄武岩纤维的剪切模量。 δ_m (0.3) 树脂填充因子; δ_f 为玄武岩纤维填充因子。

由于试样的横向冲击破坏满足 Abaqus 中的韧性准则和剪切准则,故在 Abaqus 有限元分析中,采用二者来模拟计算编织纱线和树脂的破坏产生和发展过程。

对于韧性准则,应当满足:

$$\omega_D = \int \frac{d\bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_D^{pl}(\eta, \dot{\bar{\epsilon}}^{pl})} = 1 \quad (13)$$

式中: ω_D 为塑性变形单调增加的韧性损伤的状态变量, $\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$ 是等效塑性应变率, η 为应力三轴度。

$$\bar{\epsilon}_D^{pl}(\eta, \dot{\bar{\epsilon}}^{pl}) = \frac{\bar{\epsilon}_D^+ \sin[k_0(\eta^- - \eta)] + \bar{\epsilon}_D^- \sin[k_0(\eta - \eta^+)]}{\sin[k_0(\eta^- - \eta^+)]} \quad (14)$$

式中: $\bar{\epsilon}_D^{pl}$ 为等效塑性应变; $\bar{\epsilon}_D^+$ 为单轴拉伸变形时的等效塑性应变; $\bar{\epsilon}_D^-$ 为单轴压缩变形时等效塑性应变; $\eta^+ = 1/3$, 为单轴拉伸变形状态下的应力三轴度; $\eta^- = -1/3$, 为单轴压缩变形状态下的应力三轴度; $k_0 = 5.227$, 为材料参数。

对于剪切准则,应当满足:

$$\omega_s = \int \frac{d\bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_s^{pl}(\tau_s, \dot{\bar{\epsilon}}^{pl})} = 1 \quad (15)$$

式中: ω_s 为塑性变形单调增加的剪切损伤的状态变量。

$$\bar{\epsilon}_s^{pl}(\tau_s, \dot{\bar{\epsilon}}^{pl}) = \frac{\bar{\epsilon}_s^+ \sin[f_s(\tau_s - \tau_s^-)] + \bar{\epsilon}_s^- \sin[f_s(\tau_s^+ - \tau_s)]}{\sin[f_s(\tau_s^+ - \tau_s^-)]} \quad (16)$$

式中: $\bar{\epsilon}_s^{pl}$ 为等效塑性应变; $\tau_s = 1 - k_s \eta / \varphi$, 其中 $\varphi = \tau_{\max} / \sigma_{eq}$; 等效塑性应变率 k_s 为 0.3, 材料参数

f_s 为 3.04; τ_s^+ 为 $\eta = \eta^+$ 时在 τ_s 处的值; τ_s^- 为 $\eta = \eta^-$ 时在 τ_s 处的值; τ_s^+ 为单轴拉伸变形时初始等效塑性应变; τ_s^- 为单轴压缩变形时的初始等效塑性应变。

采用材料损伤演化规律用来描述当试样达到相应的破坏准则时材料刚度的衰减速度。在 Abaqus 中, 损伤变量 d_i 随塑性位移呈线性变化:

$$d_i = \frac{L \dot{\epsilon}^{pl}}{\bar{u}_f^{pl}} = \frac{\dot{\bar{u}}_f^{pl}}{\bar{u}_f^{pl}} \quad (17)$$

式中: \bar{u}_f^{pl} 为失效时等效塑性位移, $\bar{u}_f^{pl} = 2G_f / \sigma_{y0}$; σ_{y0} 为达到破坏准则的屈服应力值; G_f 为在拉伸载荷下材料断裂所做的功, 即断裂能。

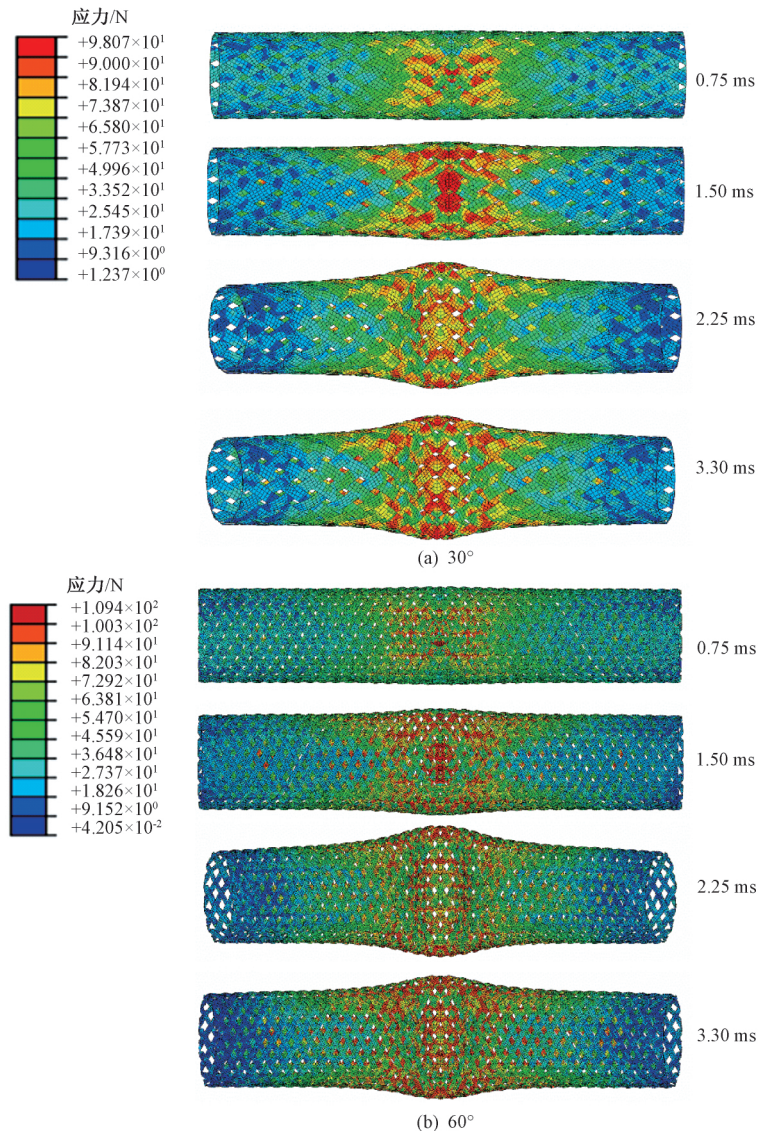
在试样损伤分析中的任何时刻, 应力张量 σ 都满足标量损伤方程:

$$\sigma = (1 - D)\bar{\sigma} \quad (18)$$

式中: D 为总体损伤变量; $\bar{\sigma}$ 为未损伤条件下材料的应力张量。

3.2 应力分布

30°和 60°玄武岩复合材料管的应力分布图以及在对的时间点纤维的应力发展及分布如图 5 所示。通过分析管的应力分布, 可以得出应力是沿纤维编织传播的; 对不同时间点的应力分布, 可以看出 30°管应力传播速度要大于 60°管。这是由于 30°管的编织角小于 60°, 纱线编织方向更加靠近轴向, 当管受冲击载荷时, 应力能迅速的往管两端传播; 而 60°管由于纤维编织方向偏向于径向, 应力会更集中于冲击区域。在图 4 试样损伤样貌图中, 可以看到在冲击区域, 出现比较明显的纤维受损现象, 而 60°试样中, 冲击区域塑性变形明显。这一点与图 5 仿真得出结果是相互吻合的。



(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>
图 5 30°和 60°管编织纱线应力分布图

在冲击试验过程中,管的顶部由于受到冲头的冲击,承受压缩应力,底部则承受拉伸应力。 30° 和 60° 管编织纱线三轴应力分布如图6所示,

仿真结果表明:在 $t=1.00\text{ ms}$,无论 30° 管还是 60° 管,对于管顶部都承受压缩应力,底部承受拉伸应力。

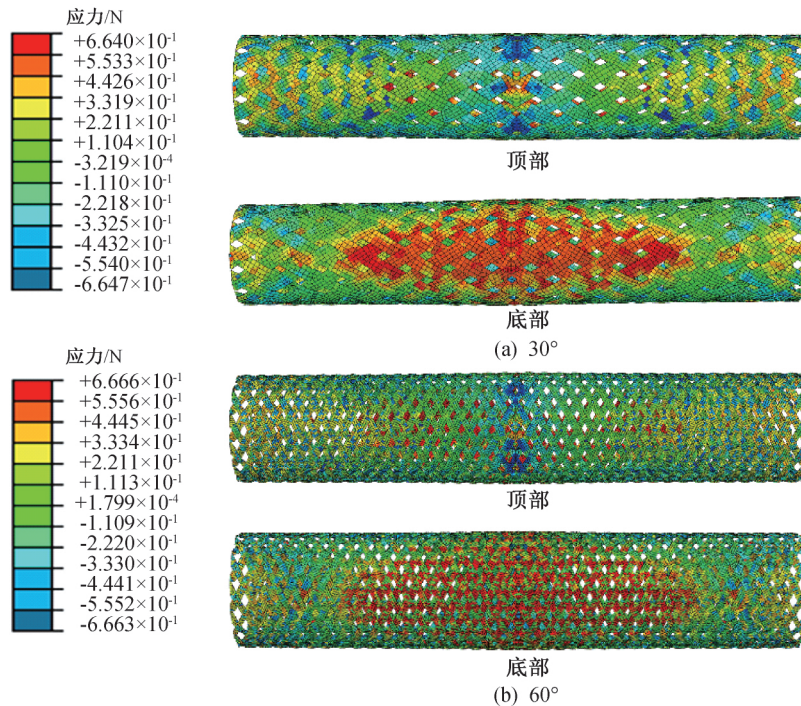


图6 30° 和 60° 管编织纱线三轴应力分布图($t=1.00\text{ ms}$)

3.3 树脂裂纹扩散情况

树脂裂纹扩散图如图7。由图7可以看出,应力主要集中在管的上半部两侧。这是由于在冲击过程中,由于圆管的结构效应,管的两侧支撑冲头,承受了大部分冲击载荷,出现应力集中现象。但是由于 30° 和 60° 管编织角度的差异, 30° 管的损伤面积要小于 60° 管的损伤面积。在图4试样损伤样貌图中,试样在冲击区域都发生了树脂破坏现象,且 60° 试样破坏现象更加明显。

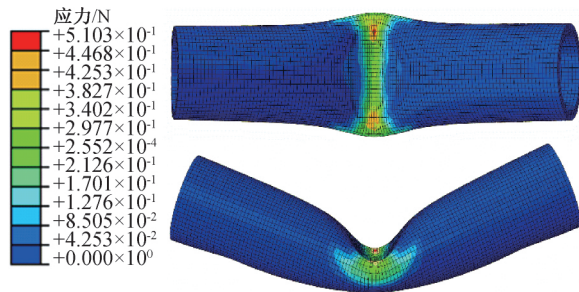


图7 树脂裂纹分布图

4 结论

本文对编织角为 30° 、 45° 和 60° 的玄武岩纤维/环氧树脂复合材料圆形管件分别进行低速横向冲击试验,得到试验结果;再利用有限元分析软件对试验

结果进一步仿真验证。综合试验数据和有限元分析结果,得出以下结论:

a) 编织角度会影响复合材料管的面密度,而面密度和复合材料管的纤维体积含量正相关。 30° 管的纤维体积含量小于 45° 和 60° 管,在承受冲击时,吸收的冲击能量小于 45° 和 60° 管,动能损失小,会有更高的峰值载荷,产生更大的弹性形变量,因而具有更好的韧性。

b) 30° 复合材料管的纤维编织方向靠近轴向,在冲击过程中,纤维承受更大的剪力,纤维损伤情况会更加明显; 45° 复合材料管纤维损伤要小于 30° 管但塑性变形较 30° 管更为明显;而 60° 复合材料管的纤维编织方向靠近径向,应力会更加集中,冲击区域树脂破坏更加严重,发生塑性变形现象。

c) 有限元结果分析显示,在冲击过程时,力沿纤维编织方向传导。由于 30° 复合材料管的纤维编织方向更偏向于轴向,力在向两端传导时的速度会大于 60° 试样。

d) 仿真结果显示在冲击过程中,复合材料管的顶部都承受压缩应力,底部承受拉伸应力。因为圆管的结构特性,冲击损伤区域会集中于管的上半部分两侧位置。

参考文献:

- [1] 石钱华. 国外连续玄武岩纤维的发展及其应用[J]. 玻璃纤维, 2003(4): 27-31.
- [2] Monaldo E, Nerilli F, Vairo G. Basalt-based fiber-reinforced materials and structural applications in civil engineering[J]. Composite Structures, 2019, 214: 246-263.
- [3] 李新娥. 玄武岩纤维和织物的研究进展[J]. 纺织学报, 2010, 31(1): 145-152.
- [4] 魏晨, 郭荣辉. 玄武岩纤维的性能及应用[J]. 纺织科学与工程学报, 2019, 36(3): 89-94.
- [5] Saghafi H, Minak G, Zucchelli A. Effect of preload on the impact response of curved composite panels [J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 60: 74-81.
- [6] Ghelli D, Minak G. Low velocity impact and compression after impact tests on thin carbon/epoxy laminates[J]. Composites Part B: Engineering, 2011, 42(7): 2067-2079.
- [7] Shi Y, Swait T, Soutis C. Modelling damage evolution in composite laminates subjected to low velocity impact [J]. Composite Structures, 2012, 94(9): 2902-2913.
- [8] Sebaey T A, Mahdi E. Crashworthiness of pre-impacted glass/epoxy composite tubes[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 92: 18-25.
- [9] Jin Y L, Wu Z Y, Pan Z X, et al. Numerical and experimental study on effect of braiding angle on low-velocity transverse punch response of braided composite tube[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2020, 29(4): 667-686.
- [10] 张帅, 刘宜胜, 徐光逸. 玄武岩纤维增强复合材料管件准静态压缩试验[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2020, 43(1): 9-16.
- [11] 石宝, 张林彦. 玻璃纤维复合材料纤维体积分含量的测定方法[J]. 上海纺织科技, 2012, 40(9): 61-62.

(责任编辑:唐志荣)