



玄武岩纤维增强复合材料管件准静态压缩试验

张 帅, 刘宜胜, 徐光逸

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘 要: 以三维四向编织玄武岩纤维/树脂复合材料(BFRP)为研究对象, 分别对编织角为 30° 、 45° 和 60° 的圆形和方形两种类型的玄武岩增强复合材料管件进行准静态压缩试验。结果表明: 不同的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均有显著的影响。方形和圆形两种截面类型管件的最大承受载荷均随着编织角增大而降低; 在保证纤维含量近似相等的条件下, 圆管的峰值载荷大于方管, 其中编织角 30° 时圆管的峰值载荷相较于方管高出了 50% 左右; 能量吸收方面, 圆管的比能量吸收值较高, 整体的吸能特性要优于方管; 管件的破坏模式与编织角有关, 与管件截面形状关系不大。

关键词: 玄武岩纤维; 截面形状; 力学性能; 吸能特性; 破坏模式; 准静态压缩

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2020) 01-0009-08

Quasi-static compression test of basalt fiber reinforced composite pipe fittings

ZHANG Shuai, LIU Yisheng, XU Guangyi

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

Abstract: Three-dimensional four-way braided basalt fiber/resin composite material (BFRP) was taken for the object of study, and quasi-static compression tests were conducted for circular and square basalt composite pipe fittings with the braiding angle of 30° , 45° and 60° respectively. The results showed that different cross-section shapes and weaving angles had significant effects on the compressive energy absorption characteristics of basalt composite pipe fittings. The maximum bearing load of the square and round pipe types decreased with the increase of the braiding angle. Under the condition that the fiber content was approximately equal, the peak load of the round pipe was larger than that of the square pipe. When the braiding angle was 30° , the peak load of the pipe was about 50%, higher than that of the square pipe. In terms of energy absorption, the specific energy absorption value of the round pipe was higher, and the overall energy absorption characteristic was better than that of the square pipe. The failure mode of the pipe fittings was related to the braiding angle and had little relationship with the cross-sectional shape of the pipe fittings.

Key words: basalt fiber; cross-sectional shape; mechanical properties; energy absorption characteristics; failure mode; quasi-static compression

收稿日期: 2019-04-09 网络出版日期: 2019-07-02

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY18E050018); 国家自然科学基金项目(51705466)

作者简介: 张 帅(1993—), 男, 安徽淮北人, 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

高性能纤维的制造是未来低碳化、轻量化、抗腐蚀等领域的共性核心技术,玄武岩纤维是其中的关键性材料之一^[1]。玄武岩纤维是以火山喷出岩为原料,在熔窑中经 1440~1500 °C 高温熔融后利用合金拉丝漏板拉制而成的连续纤维^[2]。与碳纤维和玻璃纤维相比,玄武岩纤维具有三个突出的优点:耐低温和耐高温性能(-269~700 °C),在低温和高温环境中仍能保持优异的力学性能;环境友好性,玄武岩纤维在生产过程中不会产生硼和其他碱金属氧化物等有害物质,克服了传统玻璃纤维材料在制造过程中产生有害物质的缺陷,而且它在废弃后,能自动降解为土壤母质,对环境无污染;良好的经济价值,玄武岩纤维的拉伸强度相当于 T300 碳纤维,价格仅为碳纤维的 1/8 或 1/6,力学性能比普通玻璃纤维普遍高出 15%~20%,是综合性价比最好的高性能纤维之一^[3-6]。

玄武岩纤维作为一种新型高性能纤维,其相关研究是当前国内外研究的热点。Živković等^[7]将玄武岩纤维和亚麻的混合物作为增强体,制备了乙烯基酯复合材料,研究表明,混合纤维增强复合材料的力学性能相较于单一复合材料有明显增强。Lu等^[8]研究了高温对玄武岩粗纱增强聚合物板材的力学性能影响,与玻璃纤维增强板材相比,玄武岩增强聚合物板材显示出更好的机械拉伸性能和耐温性。赖艳等^[9]研究了影响 PP/玄武岩纤维针刺土工布性能的主要因素,试验表明影响土工布样品主要性能的因素从大到小依次为纤维比例、针刺密度、热轧温度、针刺深度。刘可欣等^[10]通过对玄武岩纤维进行酸性处理,改善了玄武岩纤维悬浮液分散效果和玄武岩纤维湿法毡的拉伸性能。贾崇等^[11]利用 KBL24-2-90 编织机验证了玄武岩纤维在三维空间的可编织性,发现通过调整编织节距和编织速度可以大幅度减少玄武岩纤维在编织过程中发生的断裂问题。丁浩等^[12]利用真空压力渗透技术,将玄武岩纤维编织布和 Al-12Si 合金箔交替叠层制成三明治结构的纤维增强铝基层状复合材料,通过三点压弯试验测试其弯曲力学性能。杨智明等^[13]制备了两种不同树脂基的玄武岩纤维布增强复合材料,并对试件进行准静态拉伸和三点弯曲力学性能分析,试验结果表明玄武岩纤维布增强环氧树脂复合材料的准静态拉伸强度与三点弯曲强度均高于玄武岩纤维布增强乙烯基酯树脂复合材料。孔春风等^[14]采用

玄武岩纤维、玻璃纤维和丙纶的混合纤维作为增强体来制备复合材料,并测试了混合纤维增强复合材料的抗冲击性能。上述研究制备的玄武岩增强复合材料,主要是将玄武岩纤维布或混合玄武岩纤维作为增强体,以不同树脂基为基体,通过浸渍和模压等方式制成二维平面结构的纤维增强复合材料。这类玄武岩增强复合材料的平面结构形式单一,应用范围受限较大,已不能满足玄武岩纤维增强复合材料在管材、车体、支撑件等三维空间结构工程化应用的需求,深入开展玄武岩纤维增强复合材料结构件的制备和性能分析研究,是顺应其工程化应用必然趋势。

管材是工程应用领域中广泛使用的材料,但目前大多数管材存在耗能高、污染环境等问题。玄武岩纤维与可降解树脂结合制成的复合材料管材,可逐步取代厚重的钢材以及难降解的塑料制品,并且玄武岩纤维突出的耐高温特性可提高管件防火性能。

在实际工程应用中,复合材料管件过载破坏的主要方式有准静态压缩破坏、压弯破坏和冲击破坏等多种形式,其中准静态压缩破坏是最为常见的破坏失效方式之一,是管材在外界载荷的影响下进而产生变形,当形变量超出复合材料的极限弹性性能时,管件产生破坏失效。本文以 2400 Tex 玄武岩纤维为增强体,环氧乙烯基树脂为基体,制备了三种不同编织角度的玄武岩增强复合材料圆管和方管,并通过准静态压缩试验,研究不同编织角和不同截面类型对玄武岩增强复合材料管件力学性能的影响,并分析复合材料管件的破坏失效模式。

1 试验准备

本试验的复合材料管件是在玄武岩纤维编织预制件的基础上,采用真空辅助树脂传递模塑(Vacuum assisted resin transfer molding, VARTM)工艺制备而成。VARTM 成型法^[15]是一种高性能低成本的复合材料制备工艺,具有良好的浸润性能,并且能有效排出模具与增强纤维之间的空气,减少气泡、干斑等对复合材料管件性能的影响。

1.1 纤维原材料参数

试验选用 2400 Tex 的玄武岩无捻粗纱(海宁安捷复合材料),纤维原材料参数如表 1 所示;环氧导入树脂 EPOLAM2040 和环氧导入树脂配套固化剂 2042 (AXSON)。

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	2.5	14	2.88	2400

1.2 仪器设备

试验中主要仪器设备有环形编织机(浙江本发科技有限公司)、2 极 1500×2 无油空气压缩机(台州市奥突斯工贸有限公司)、UTP-313 电子天平(上海花潮电器有限公司)、GSJ-1000C 高低温交变湿热试验箱(上海苏盈试验仪器有限公司)、XBD5105 微机控制电子万能试验机(上海标克仪器科技有限公司)、迷你小台锯(永康市新纪元工贸有限公司)、真空注蜡机(顶兴机械有限公司)以及不锈钢圆芯轴等。

1.3 芯模与编织角

本试验采取注蜡工艺来制备芯模,可解决芯模外形多变难加工、固化成型复合材料管件与圆芯轴难剥离等工艺难题。在实际制备过程中,将圆芯轴放入模具,利用压力差使融化的蜡注入到模具中,自然冷却后即可形成所需形状的芯模。

编织角是预制件编织的一个重要参数。当编织角较小时,纤维接近平行,预制件不易成型;编织角过大时,纤维缠绕的张力变大,编织过程中纤维束易发生断裂。实际编织预制件中,常用的编织角度为 $20^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 。本文选用 30° 、 45° 和 60° 三种应用较为广泛的角度作为预制件的编织角。编织过程可以看作纤维以固定的芯模为中心做螺旋运动,其运动路径和电机卷取速度以及携纱器旋转角速度的关系如图 1(a)所示,速度矢量如图 1(b)所示。

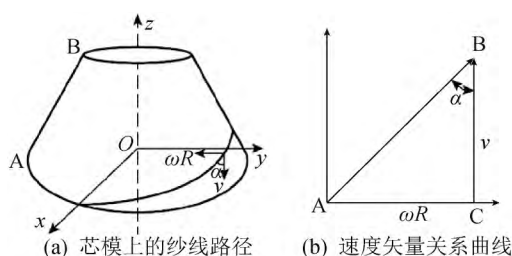


图 1 编织角参数关系

编织角计算如式(1)所示^[16]:

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\omega R}{v}\right) \quad (1)$$

式中: α 为编织角; R 为芯模的有效半径,其中方管的芯模半径 R 为对角线的 $1/2$, mm; v 为电机的卷取速度, mm/s; ω 为纱线筒管的平均角速度, $^{\circ}/\text{s}$ 。

1.4 预制件编织

预制件编织的工艺流程如图 2 所示。由于玄武

岩纤维具有较大的脆性,在机器缠绕过程中常因二次缠绕导致玄武岩长丝发生断裂,因此本试验采用手动缠绕。

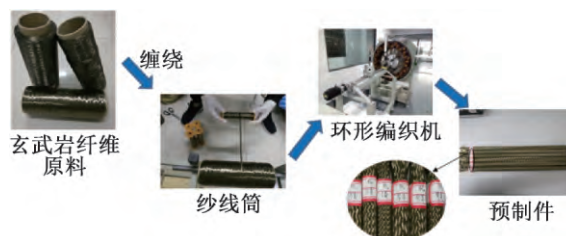


图 2 预制件编织流程

2 试验与结果分析

2.1 复合材料管件制备

a) 预制件编织:将玄武岩纤维缠绕在 24 根纱线筒上,放入环形编织机进行编织。通过改变电机的卷取速度和芯模的截面形状,编织出具有不同编织角和不同截面形状的预制件。

b) 复合成型:采用 VARTM 制备工艺,将环氧导入树脂 EPOLAM2040 和配套的固化剂按质量比 100:32 混合后注入到编制的预制件中,在 65°C 的加热箱中固化 16 h,最后加热至 80°C ,达到蜡的熔点,2~3 h 后蜡融化,圆芯轴和复合管件分离,得到复合材料管(见图 3)。

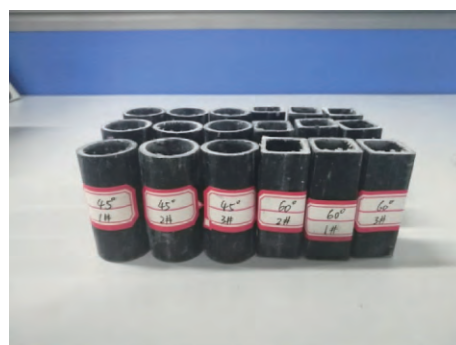


图 3 复合材料试件照片

将脱蜡后的复合材料管件切割成均等的 50 mm 试样,同一编织结构试样均有 3 个。本试验设置的总压缩位移为 20 mm,加载速度为 2 mm/min。为防止管件轴端平面不平整对试验轴向压缩结果产生影响,试验采取砂纸研磨的方法进行预处理。在微机控制电子万能试验机(图 4 所示)上进行准静态压缩试验,将试样放置于压缩机圆盘中心,调整试验机压溃平面,当系统采集到初始压力数据时进行位移载荷校零。

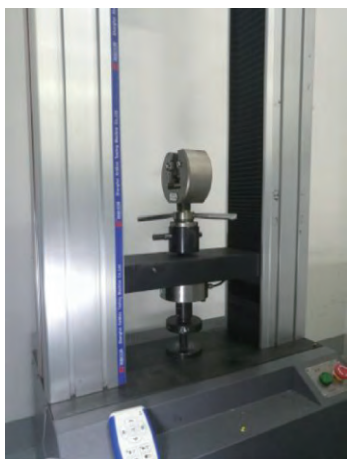


图4 微机控制电子万能试验机

2.2 纤维体积含量计算

纤维体积含量是影响复合材料管件力学性能的重要因素之一。因此在保证纤维体积含量在近似相等的情况下,才能更准确分析不同截面对复合材料管件力学性能的影响。试验中使用的不同编织结构类型的复合材料管,其纤维体积含量可以通过密度法^[17]测得,计算公式如式(2)所示。

$$V_f = \frac{\rho_c - \rho_m}{\rho_f - \rho_m} \quad (2)$$

其中: V_f 为纤维体积含量,%; ρ_c 为复合材料管件密度, g/cm^3 ; ρ_f 为纤维密度, g/cm^3 ; ρ_m 为树脂密度, g/cm^3 。测得的圆形和方形管件制备参数见表2。

表2 圆形和方形管件参数

管件类型	卷取速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	芯模半径/mm	峰值载荷/kN	质量/g	纤维含量/%	$C_0/(\text{kN} \cdot \text{g}^{-1})$
S30	6.84	19.3	14.24 ± 1.6	10.00	15.16	9.39
S45	3.95	19.3	12.4 ± 0.39	10.67	19.57	5.95
S60	2.28	19.3	11.5 ± 0.26	11.10	28.98	3.59
R30	8.51	24.0	22.1 ± 0.48	10.44	16.25	13.07
R45	4.91	24.0	13.9 ± 0.42	10.75	20.34	6.38
R60	2.84	24.0	12.2 ± 0.14	11.30	29.49	3.67

注:R和S分别代表圆形截面和方形截面管件,R和S后面的数字表示编织角度, C_0 为峰值载荷与纤维质量的比值。

2.3 压缩试验结果分析

为得出同一截面下不同编织角度对复合材料管件力学性能的影响,将载荷除以管件单位体积内的纤维克重,以得出的每单位克重纤维所能承受的负载 C_0 为变量,绘制管件压溃过程中的载荷-位移曲线。图5为方形和圆形复合材料试件在 $2 \text{ mm}/\text{min}$ 下压缩过程中的载荷-位移曲线。从图5中可以看出:a)初始阶段圆管和方管承受的载荷都迅速上升到最大值,达到峰值后载荷开始下降,圆管易发生应力骤减现象;b)方管的压溃应力初始峰值均低于圆管,当编织角为 30° 时,截面形状对复合材料管件的力学性能影响最大,圆管的峰值载荷比方管高出50%左右,而另外两种编织角其力学性能差异较小,影响范围在10%左右;c)应力稳定阶段,两种截面类型管件的应力特性均随着编织角度的增大而增大。

试件在压缩过程当中的载荷位移曲线反映了试件在该过程中所承受载荷的变化,为更好研究试件的压缩性能,本文将从比能量吸收值SEA、破坏模式和载荷比来分析试件的压缩性能,其相关计算公式如下^[18-20]。

P_{\max} (单位kN)是曲线初始峰值的载荷,总吸收能量 A_e (单位J)是对载荷-位移曲线的积分,由式

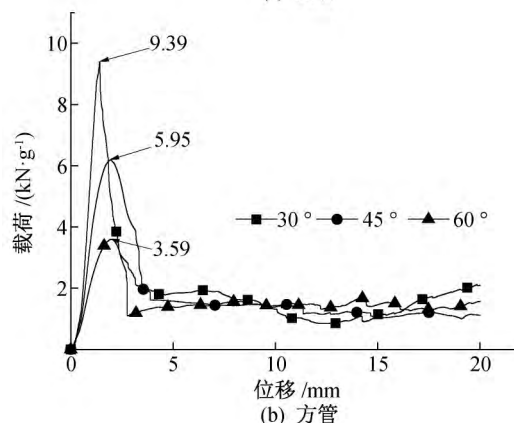
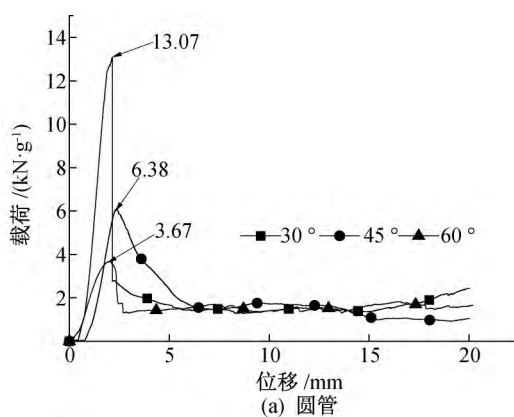


图5 复合材料管件的载荷-位移曲线

(3) 得出, 其中 $P(l)$ 是压缩位移 l 时的载荷。

$$A_e = \int_0^{l_{\max}} p(l) dl \quad (3)$$

P_{mean} (单位 kN) 为压缩过程的平均载荷, 以每个样品长度 l_{\max} (单位 mm) 的总吸收能量来计算, 公式为:

$$p_{\text{mean}} = \frac{A_e}{l_{\max}} \quad (4)$$

比能量吸收值 SEA (单位 J/g) 为总吸收能量与试件质量的比值, 可以通过式 (5) 来进行计算:

$$SEA = \frac{A_e}{M} = \frac{A_e}{Al\rho} \quad (5)$$

式中: A 为试件的横截面积, cm^2 ; ρ 为试件密度, g/cm^3 。

试件压缩过程中的最大载荷 (P_{\max}) 与平均载荷 (P_{mean}) 的比值称为载荷比 (L_0), 是衡量材料能量吸收性能的重要指标, 载荷比越小, 材料的压缩吸能效率越高, 计算公式如下:

$$L_0 = \frac{P_{\max}}{P_{\text{mean}}} \quad (6)$$

表 3 复合材料试件的压缩参数

类型	破坏模式	P_{\max}/kN	$P_{\text{mean}}/\text{kN}$	载荷比	总能量/J	比能量/($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)
R30	块状断裂	22.18 ± 0.48	3.53	6.28 ± 0.14	70.60	6.76
R45	分瓣破坏	13.95 ± 0.42	4.13	3.23 ± 0.25	82.60	7.68
R60	局部屈曲	12.24 ± 0.14	5.39	2.27 ± 0.03	107.80	9.54
S30	块状断裂	14.24 ± 1.60	2.90	4.91 ± 0.55	58.00	5.80
S45	分瓣破坏	12.42 ± 0.39	3.57	3.53 ± 0.06	71.40	6.69
S60	局部屈曲	11.56 ± 0.26	4.91	2.35 ± 0.06	98.2	8.85

由表 3 可知, 相同编织角的 R/S 型管件中, R 型管件的比能量吸收值均高于 S 型管件, R30、R45、R60 型管件的比能量吸收分别比 S30、S45、S60 高出 16.5%, 14.8% 和 7.8%, 是吸收能量较好的管件。不同截面类型管件试样的比能量吸收值 SEA 均随着编织角增大而增大。对比图 5 压缩过程中复合材料圆管和方管的载荷-位移曲线可以看出, 在应力稳定阶段, S 型管件的曲线波动相比于 R 型管件更大, 这表明 R 型管件在压缩过程中更稳定。

综上所述, R60 型管件具有最小的载荷比和最高的比能量吸收值, 是所有测试管件中能量吸收性能最好的管件。当编织角为 30° 时, R 型管件比 S 型管件具有更高的峰值载荷, 高出了 50% 左右; 当编织角为 45° 和 60° 时, 相同编织角的 R 型和 S 型管件其峰值载荷之间的差异变小, 在 10% 范围以内。

2.4 管件失效形式分析

图 7 所示为玄武岩增强复合材料圆管和方管在静态压缩后管件的失效形式。通过对管件压缩过程

图 6 所示为理想条件下的轴向压缩载荷-位移曲线示意图, 由此可知, 实现复合材料编织管高能量吸收性能的前提为: a) 高水平的最大载荷; b) 低水平的载荷比 L_0 。

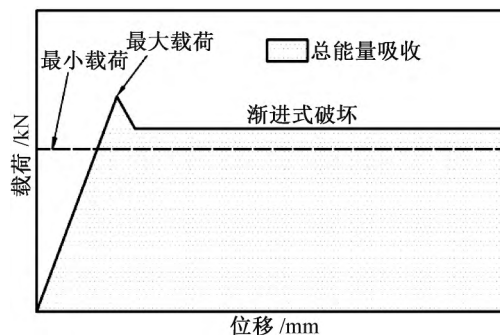


图 6 理想轴向压缩载荷-位移曲线示意图

将压缩过程的试验数据按照上述公式计算得到不同编织角的方形和圆形管件的最大载荷、平均载荷、载荷比、比能量吸收值如表 3 所示。

中形状变化的宏观分析, 管件的失效方式主要分为三种: 分瓣破坏、局部屈曲和块状断裂。不同编织角度的复合材料管件, 其出现的破坏方式会产生较大的差异。同时, 试验中发现截面形状与管件的破坏模式并没有直接关系, 编织角相同条件下, 方管和圆管其破坏模式也近似相同。玄武岩复合材料的圆管和方管压缩后试样如图 8 所示。

当编织角度为 30° 时, 圆形和方形这两种截面类型管件的失效形式均为块状断裂 (图 8(a) 和图 8(d)), 其主要特点为失效时管壁会产生许多块状碎片。其主要成因是: 在压溃过程中试件管壁首先产生许多裂纹并无规则向其它方向扩展, 随着试验机载荷的不断增大, 由于试件内含有的玄武岩纤维体积分数较少, 在应力作用下试件易被拉断和剪断成很多小块, 纤维束的完整性遭到严重破坏。这类破坏的能量耗散主要是大量小裂纹的扩大、纤维和基体的断裂等。圆管的均匀性会使得统一性较好, 不易产生应力集中现象, 相对于方管产生的块状碎片较少, 能量的吸收效率较高, 其破坏主要表现为试

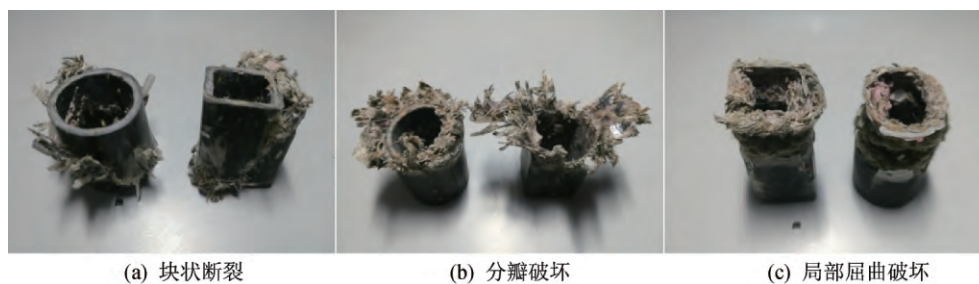


图7 试件失效形式图

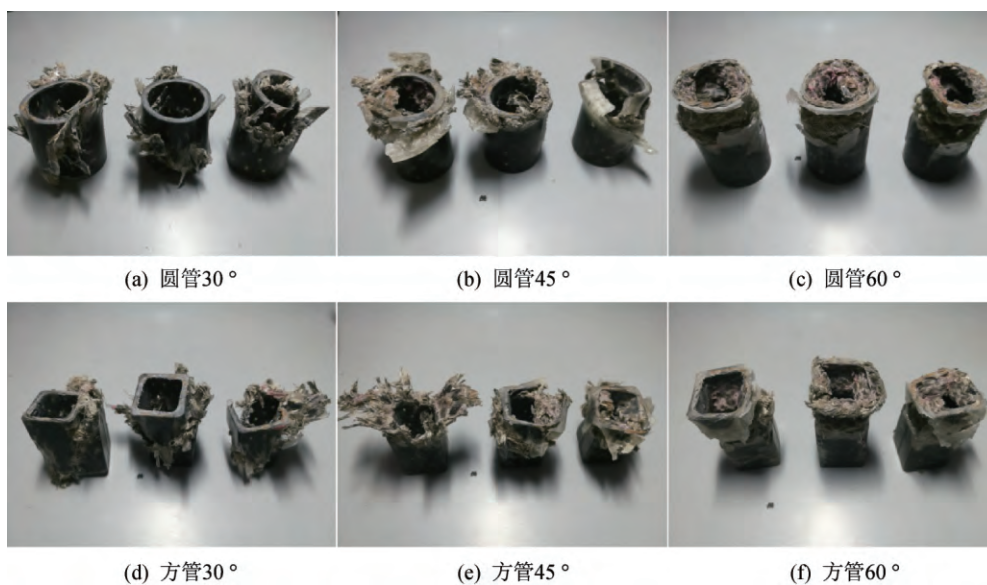


图8 圆管和方管的压缩试样图

件在中间部分被剪切两段,载荷-位移曲线上表现为应力的骤降。方形试件易在边角处产生应力集中现象,裂纹首先沿着边角出扩展,边角最先破裂成块状,大大降低了试件的能量吸收效率。

当编织角度为 45° 时,圆形和方形这两种截面类型管件的失效形式为分瓣破坏(图 8(b)和图 8(e))。与块状断裂模式不同,分瓣破坏模式初始阶段在外壁面会产生许多周向分布的裂纹,管壁被分裂成几瓣。由于纤维含量高,叶瓣不会迅速拉断或者剪断成块状碎片,随着载荷的增加,叶瓣向外弯曲角度变大,裂纹不断向下扩展。试件内壁面同时也会产生大量裂纹,纤维在应力作用下被拉断,从而导致能量不断耗散,当撤去载荷时叶瓣根部会产生部分回弹。在 45° 圆管和 45° 方管中分瓣破坏模式较为明显,该模式下试件的纤维含量和内部约束力相对较大。在压溃过程中管件的破损程度随着编织角的增大而降低,在应力曲线上可以看到其下降幅度也逐渐减小。

当编织角度为 60° 时,圆形和方形这两种截面类型管件的失效形式为局部屈曲破坏(图 8(c)和图

8(f)),这类破坏模式主要发生在编织角度较大的管件中,特点是压溃过程中试件管壁在受轴向压缩时产生的许多褶皱现象。与其它两种破坏模式不同,局部屈曲破坏会在某些区域产生大量的细小裂纹,使试件被破坏成更小的碎片。当载荷增大,管壁在应力和剪切作用下发生断裂,随着变形程度的不断扩大,区域内的纤维受到挤压和拉伸而断裂。由于管件的纤维体积含量较大,在压溃过程中仅有一部分纤维遭到破坏,还有部分纤维继续支撑试件的基体结构。这种模式在破坏区域存在较大的弹性区,载荷卸载后会产生明显的回弹。由于局部屈曲破坏模式仅破坏了少部分纤维,还有许多纤维保持了管件结构的完整性。因此在载荷稳定阶段仍能承受较大的载荷,从载荷-位移曲线可以看出稳定阶段局部屈曲破坏模式下管件所承受的载荷要高于分瓣破坏和块状断裂模式。

对玄武岩增强复合材料管件破坏模式分析发现,试件的力学性能与管件所在的压溃破坏模式有较为密切的联系,其中分瓣破坏和块状断裂模式的比能量吸收值较低,但峰值载荷较高,破坏程度较为

彻底;屈曲破坏模式的比能量吸收值最高,但管件的峰值载荷较低。

2.5 复合材料管与环氧乙烯基树脂管对比分析

本文采用同样的工艺制作了方形和圆形的环氧乙烯基树脂管,并在相同的试验平台上对其进行压溃试验,压缩位移和加载速度与复合材料管试验相同,图9所示为环氧乙烯基树脂圆管和方管的载荷-位移曲线。

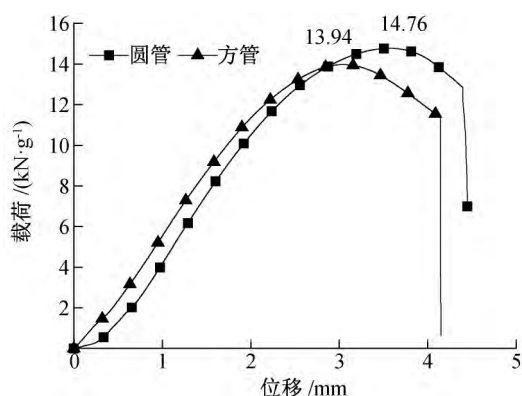


图9 环氧乙烯基树脂圆管和方管载荷-位移曲线

比较图5和图9可以看出,当编织角为 30° 时,圆形和方形截面复合材料管的初始峰值载荷均高于对应的环氧乙烯基树脂管。通过复合材料管和环氧乙烯基树脂管的对比,可以得出:a)在较小的编织角度下,玄武岩纤维可以提高乙烯基树脂的力学性能,圆管的初始载荷峰值提高50%左右,方管提高10%左右;b)在应力上升阶段,复合材料管的曲线倾斜率大于树脂管,复合材料管具有更强的抵抗变形能力;c)复合材料管在压缩过程中管件不会出现彻底的失效,玄武岩纤维的加入增强了管件内部的约束力,使得管件压溃收缩到一定位移(或距离)后仍有承载力,而树脂管在压缩过程中由于内部缺少纤维束的约束会出现彻底的失效,管件被压溃成碎片,失效后承受载荷为零。

3 结 论

利用万能试验机对不同截面类型和编织角的三维四向编织玄武岩纤维增强树脂基复合材料试件进行准静态压缩试验,经过分析得出以下几点结论:

a)增强复合材料圆管的压溃应力初始峰值均高于方管,这是由于圆管的均匀性会使得统一性较好,不易产生应力集中现象,相较方管承载的载荷也更大,尤其当编织角度为 30° 时,圆管的初始峰值高出方管50%左右,圆管相较于方管具有良好的力学性能。

b)试件在压缩过程中主要发生三种破坏模式:块状断裂,局部屈曲和分瓣破坏。其中以局部屈曲能量吸收能力最高,主要表现在 60° 的圆形和方形管中,块状断裂和分瓣破坏能量吸收值较低,主要分布在 30° 和 45° 圆管方管中。相同编织角的圆形和方形管件,圆形管件的比能量吸收值均高于方形管件,在应力稳定阶段,方管件的曲线波动相比于圆管件更大,表明圆管件在压溃过程中能量吸收更稳定。

c)玄武岩纤维能增强乙烯基树脂的内部的约束力,当纤维含量低时,管件具有良好的力学性能,使得管件压溃收缩到一定位移(或距离)后仍有承载力,而未加入玄武岩纤维的环氧乙烯基树脂管在压缩过程中由于内部缺少纤维束的约束会出现彻底的失效,失效后承载力为零;纤维含量高时,管件的能量吸收能力增大,而峰值载荷降低。

参考文献:

- [1] 钱伯章. 高性能纤维产业必须加快迈向高质量[J]. 合成纤维, 2018, 47(5): 54.
- [2] 李红杰, 赵世海, 张新建, 等. 连续玄武岩纤维的研究进展及其应用[J]. 装备制造技术, 2016(11): 256-259.
- [3] 递春. 高性能玄武岩纤维的性能及应用[J]. 上海纺织科技, 2014, 42(1): 12-14.
- [4] M. novotná, 陈玉伟. 几种无机纤维的性能对比[J]. 国际纺织导报, 2016, 44(2): 14-16.
- [5] 齐凤杰, 李锦文, 李传校, 等. 连续玄武岩纤维研究综述[J]. 高科技纤维与应用, 2006, 31(2): 42-46.
- [6] Fiore V, Scalici T, di Bella G, et al. A review on basalt fibre and its composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 74: 74-94.
- [7] Živković I, Fragassa C, Pavlović A, et al. Influence of moisture absorption on the impact properties of flax, basalt and hybrid flax/basalt fiber reinforced green composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 111: 148-164.
- [8] Lu Z Y, Xian G J, Li H. Effects of elevated temperatures on the mechanical properties of basalt fibers and BFRP plates[J]. Construction and Building Materials, 2016, 127: 1029-1036.
- [9] 赖艳, 张得昆. PP/玄武岩纤维针刺土工布制备及性能分析[J]. 纺织高校基础科学学报, 2019, 32(01): 7-11.
- [10] 刘可欣, 张得昆. 玄武岩纤维湿法毡的制备工艺[J]. 西安工程大学学报, 2018, 32(1): 1-5.
- [11] 贾崇, 孟琳, 高翼强. 玄武岩长丝可编织性能的试验研究[J]. 现代纺织技术, 2018, 26(5): 11-15.

- [12] 丁浩,崔喜平,许长寿,等. 连续玄武岩纤维增强铝基层状复合材料的制备与力学特性[J]. 金属学报, 2018, 54(8):1171-1178.
- [13] 杨智明,刘金旭,冯新娅,等. 玄武岩纤维布增强不同树脂基体复合材料的制备与力学性能[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(6):655-660.
- [14] 孔春风,田伟,刘双双,等. 纤维混杂增强复合材料的制备及其抗冲击性能研究[J]. 现代纺织技术, 2015, 23(4):20-23.
- [15] 张条兰,邱再明. VARTM工艺中树脂与试剂配比的确 定[J]. 山东工业技术, 2018(1):236.
- [16] 刘静,王益轩,王永强,等. 三维编织机虚拟样机研究 [J]. 产业用纺织品, 2017, 35(12):21-27.
- [17] 石宝,张林彦. 玻璃纤维复合材料纤维体积含量的测定 方法[J]. 上海纺织科技, 2012, 40(9):61-62.
- [18] 马岩,阳玉球. 圆-方异形截面复合材料管件物能量吸 收机制[J]. 复合材料学报, 2015, 32(1): 243-249.
- [19] 牟浩蕾,任健,邹田春,等. 复合材料薄壁管轴向压溃吸 能特性数值分析[J]. 航空制造技术, 2015, (19):83- 87.
- [20] Esnaola A, Ulacia I, Aretxabaleta L, et al. Quasi-static crush energy absorption capability of E-glass/polyester and hybrid E-glass-basalt/polyester composite structures[J]. Materials & Design, 2015, 76:18-25.

(责任编辑:唐志荣)