

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.09.012

苧麻纤维增强复合铝管的轴向压缩性能研究

张显¹, 蔡明^{1,3}, 孙宝忠³, 马其华^{2,3}, 周天俊²

(1. 上海工程技术大学航空运输学院, 上海 201620; 2. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620;

3. 东华大学高性能纤维及制品教育部重点实验室, 上海 201620)

摘要: 为大力发展绿色环保材料, 将苧麻与铝管混合制备苧麻纤维增强复合铝管 (AI-RFRP)。通过实验研究了不同卷绕角度与卷绕厚度对 AI-RFRP 的准静态轴向压缩作用下的破坏模式和吸能性能的影响。结果表明: AI-RFRP 复合管在轴向载荷的压溃下, 铝管发生渐进叠缩变形, 而 RFRP 多为脆性断裂与界面分层。RFRP 明显改善了纯 AI 管的轴向压缩性能, 相比纯 AI 管, AI-RFRP 复合管的峰值载荷、总吸能有所增加; 其中 45° 卷绕方向的 AI-RFRP 复合管的各项吸能指标都优于 90° 的卷绕方向, 并且卷绕厚度对 90° 卷绕方向的 AI-RFRP 复合管的吸能效果影响较小。通过有限元仿真模拟出 AI-RFRP 复合管的轴向压缩过程, 其结果与实验吻合较好, 进一步结合实验与仿真结果, 通过复杂比例评价法优选出 45° 方向卷绕 14 层的 AI-RFRP 复合管吸能效果最好。该复合材料混合薄壁管因其轻质与高吸能性, 以期应用于汽车、飞机等机械系统的承力部件中。

关键词: 植物纤维; 轴向压缩; 复合管; 吸能特性; 失效模式

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)09-0060-08

Study on Axial Compressive Properties of Ramie Fiber Reinforced Composite Aluminum Tube

Zhang Xian¹, Cai Ming^{1,3}, Sun Baozhong³, Ma Qihua^{2,3}, Zhou Tianjun²

(1. School of Air Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. School of Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

3. Key Laboratory of High Performance Fibers & Products, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract : In order to vigorously develop green environmental protection materials, ramie with aluminum tubes was mixed to prepare ramie fiber reinforced composite aluminum tubes (AI-RFRP). The effects of different winding angles and winding thicknesses on the failure mode and energy absorption performance of AI-RFRP under quasi-static axial compression are studied through experiments. The experimental results show that the AI-RFRP composite tube undergoes progressive telescopic deformation under the axial load, while the RFRP is mostly brittle fracture and interface delamination. RFRP significantly improves the axial compression performance of pure Al tubes. Compared with pure Al tubes, the peak load and total energy absorption of AI-RFRP composite tubes are increased, and the energy absorption index of the 45° winding direction is better than that of the 90° winding direction, and the winding thickness has little effect on the energy absorption effect of the AI-RFRP composite tube in the 90° winding direction. The axial compression process of the AI-RFRP composite tube is simulated by finite element simulation, and the results agree well with the experiment. Further combining the experimental and simulation results, the complex ratio evaluation method is used to optimize the AI-RFRP composite tube of 14-layer winding in the direction of 45° has the best energy absorption effect. Due to light weight and high energy absorption, composite material hybrid thin-walled tubes are promising to be used in mechanical systems of mechanical systems such as automobiles and airplanes.

Keywords : plant fiber ; axial compression ; composite tube ; energy absorption characteristics ; failure moderetardant

通信作者: 蔡明, 讲师, 主要从事航空复合材料的应用及绿色复合材料的界面与耐久性研究

收稿日期: 2021-07-06

引用格式: 张显, 蔡明, 孙宝忠, 等. 苧麻纤维增强复合铝管的轴向压缩性能研究 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(9):60-67, 81.

Zhang Xian, Cai Ming, Sun Baozhong, et al. Study on axial compressive properties of ramie fiber reinforced composite aluminum tube[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(9):60-67, 81.

薄壁管结构由于比吸能大、便于安装、价格低、稳定的变形模式,在飞机、汽车和海洋应用等领域越来越多地被用作能量吸收结构^[1]。近几十年来,国内外学者致力于研究各种薄壁管状结构的耐撞性,发现影响薄壁管能量吸收性能的重要因素为:薄壁管的几何构型、薄壁管的材料和界面条件^[2]。纤维增强复合材料因其高的比强度、比模量和可设计性在近些年开始逐渐使用在薄壁管结构中^[3-4]。传统薄壁管多为金属管,其破坏与能量吸收机制与纤维增强复合材料薄壁管有着明显不同,由金属制成的部件大多具有延展性,通过渐进塑性变形吸收冲击能量^[5],而复合材料结构则通过脆性破坏机制吸收能量,复合材料的失效破坏模式多为基体开裂、分层和纤维断裂^[6],所以金属与复合材料的混杂效应能有效提高混合薄壁管的耐撞性和吸能特性。

传统的人工合成纤维如碳纤、玻纤等,其复合材料与金属管混合制成薄壁管作为吸能构件,在轴向压缩、横向弯曲载荷下的吸能与耐撞特性和压缩后的变形失效模式已有大量的研究^[7-10]。但是人工合成纤维难以回收和降解,其废弃物带来的环境问题也越发严重,目前国内外学者和企业都致力于开发与研究环境友好型材料。以植物纤维为代表的天然纤维不仅来源丰富、价格低廉、生产过程能耗低、可生物降解^[11-12],且具有可比拟玻纤的比强度和比模量,以及良好的吸声^[13]、隔热^[14]和阻尼性能^[15]。但是植物纤维复合材料作为能量吸收装置,其耐撞性设计和分析是困难的,这是因为植物纤维与基体之间较弱的界面粘结力和其本身的天然脆性断裂,因此植物纤维复合薄壁管适用于对性能强度要求不高的次承力结构中。国外学者已经开始探索植物纤维增强复合材料用于薄壁管结构的破坏失效模式与吸能特性^[16-18],而国内却少有研究。A. B. M. Supian 等^[19]采用湿法缠绕的方法制备了红麻/玻纤复合管,发现其压溃效率与比吸能都要好于纯玻纤复合管。Yan Libo 等^[20]研究了亚麻纤维增强环氧复合管的轴向压溃下的能量吸收性能,发现试件失效方式多为脆性破碎,并且主要能量吸收机制是薄壁层的弯曲和复合材料的断裂与压缩。目前对于植物纤维复合管的研究多为纯纤维增强复合管,而与其与金属管混合的研究相对较少。

笔者选用苧麻纤维增强复合材料(RFRP)与Al管混合制备Al-RFRP复合管。因为苧麻纤维在我

国十分丰富,年产量约占世界的90%以上,在国际上被称为“中国草”,其力学性能优异,拉伸强度为400~938 MPa,拉伸弹性模量为61.4~128 GPa,是植物纤维中适合作为聚合物增强材料使用的品种之一^[21-22]。通过不同的铺层角度和铺层厚度来研究在准静态轴向载荷作用下对Al-RFRP复合管的破坏模式与对Al-RFRP复合管吸能性能的影响,并对Al-RFRP复合管的破坏过程进行了有限元仿真,通过模拟仿真与实验相结合的方法研究金属/植物纤维复合管的内部破坏失效模式和吸能特性并选取最优卷绕角度与厚度使得Al-RFRP复合管的吸能效果最好。

1 实验部分

1.1 主要原材料

Al管:Al6061,上海佳译金属制品有限公司;

苧麻平纹织布:PR5258,规格为21×21英寸(36×36公支),经向纬向密度分别为64和66(10 cm内纱线根数),面密度为140 g/m²,湖南华升洞庭麻业有限公司;

环氧树脂:E-51,黏度11 000~14 000 mPa·s,昆山久力美电子材料有限公司。

1.2 主要设备及仪器

万能试验机:WANCE605A型,深圳万测试验设备有限公司;

全数字闭环控制系统试验机:DTC-500型,深圳万测试验设备有限公司。

1.3 样品制备

Al-RFRP复合管由纯Al管外层卷绕RFRP组成,其中Al管外径为40 mm,壁厚为1.5 mm,样件长度为60 mm。笔者设计的铺叠层数为2,4,6,8层,通过人工卷绕工艺,将苧麻织布卷绕在铝管上,卷绕方向分为两种:一是苧麻织布经纱与铝管轴向的夹角为90°,二是苧麻织布经纱与铝管轴向的夹角为45°,卷绕方向如图1所示,详细几何结构参数列于表1,每种样件制作3个。

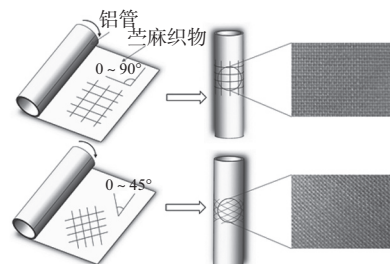


图1 Al-RFRP复合管卷绕方向

表 1 试件的几何结构参数

实验样件	卷绕方向	卷绕层数	壁厚 / mm	质量 / g
纯 Al 管	90°		1.5	19.58
		2	0.5	34.31
		4	1	40.28
		6	1.5	45.44
AL-RFRP 管	90°	8	2	54.44
		2	0.5	34.54
		4	1	39.89
		6	1.5	45.32
	45°	8	2	54.83
		2	0.5	
		4	1	
		6	1.5	

在卷绕前先用砂纸将 Al 管轻微打磨以增强 RFRP 与 Al 管的表面粘接强度,然后用丙酮溶液对 Al 管进行擦拭,去除表面杂质。将制备好的苧麻织布预浸料平铺在实验桌上,通过手工卷绕将苧麻织布卷绕在 Al 管上。制备好的 Al-RFRP 复合管放入烘箱中 25℃ 固化 12 h 后取出。为了方便,将不同方向与不同卷绕层数的 Al-RFRP 复合管命名为 AR-90-L*i* 和 AR-45-L*i*, *i* 为铺层层数。

1.4 性能测试

采用万能试验机,分别对纯 Al 管、Al-RFRP 复合管进行轴向压缩实验,如图 2 所示,将试件竖向放置在下端刚性平台中心处,上端受刚性平台加载,加载速度为 2 mm/min,轴向压缩位移量为 35 mm,为管件总长的 58.3%,通过压头上安装的力、位移传感器,记录试件在准静态轴向压缩时的轴向压缩力-压缩位移曲线,然后利用该数据得到初始破坏载荷并计算总吸能,同时利用相机记录试件在不同位移时的变形模式。为评价 Al-RFRP 复合管在轴向压缩作用下吸收能量的性能,主要采用吸能评价指标,见表 2。表 2 中 *m* 为质量,kg ;*d* 为加载位移,m ;峰值载荷 *F*_{max} 可从载荷-位移曲线上直接得到。

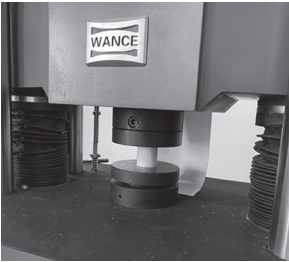


图 2 轴向压缩实验图

表 2 耐撞性评价指标及公式

吸能指标	公式
吸能 (EA)	$E_A = \int_0^d F(x) dx$
平均载荷 (MCF)	$MCF = E_A / d$
比吸能 (SEA)	$SEA = E_A / m$
压溃效率 (CFE)	$CFE = MCF / F_{max}$

2 结果与讨论

2.1 失效变形模式

表 3 为 Al-RFRP 复合管不同卷绕方向下的轴向压缩变形失效过程。

表 3 90° 与 45° 方向下 Al-RFRP 复合管的轴向压缩变形失效过程

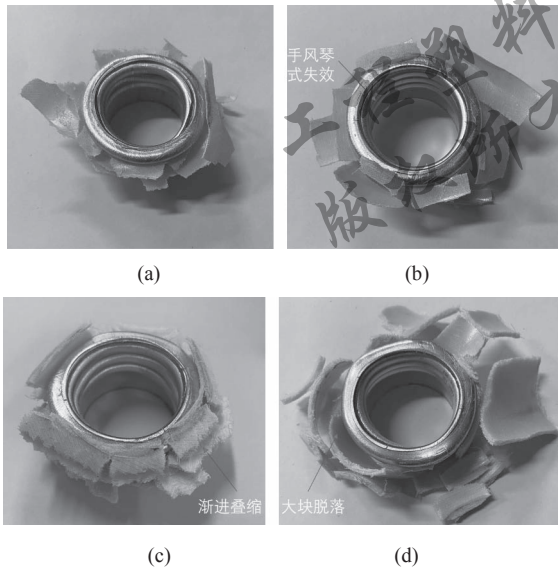
	5 mm	15 mm	25 mm	35 mm
Al				
AR-90-L2				
AR-45-L2				
AR-90-L4				
AR-45-L4				
AR-90-L6				
AR-45-L6				
AR-90-L8				
AR-45-L8				

从表 3 可以看出,纯 Al 管在压缩时,主要表现为“手风琴”式^[23] 塑性失效变形; Al-RFRP 复合管在被压缩时,内部 Al 管仍表现为渐进塑性变形失

效,而 RFRP 则表现为脆性断裂且对 Al 管的失效变形影响较小,这是因为 RFRP 的力学性能不如 Al 并且 RFRP 与 Al 管之间的界面粘结性较弱。

不同的卷绕方向对 Al-RFRP 复合管的破坏失效模式有着不同的影响。在 90° 卷绕方向下, Al-RFRP 复合管的主要破坏模式为纤维基体断裂, RFRP 沿纤维方向产生裂纹,然后扩展至基体开裂, RFRP 与 Al 管界面脱粘, RFRP 大面积断裂并脱落,不能有效吸收能量,所以吸能效果较差。而在 45° 方向下, Al-RFRP 复合管的主要破坏模式为复合叠缩失效模式: 压缩过程中, RFRP 层裂纹主要发生在复合管的径向方向,并贴合 Al 管在屈曲处基体发生脆性破碎,纤维与基体在裂纹处发生分层断裂,进而宏观上呈现出局部屈曲破坏, Al-RFRP 复合管整体呈现渐进叠缩变形。通过基体和纤维的断裂及内部 Al 管的渐进叠缩吸收能量,吸能效果较好。

此外,不同的卷绕层数对 Al-RFRP 复合管的变形模式也有一定的影响,如图 3 所示。



a—AR-45-L2; b—AR-90-L2; c—AR-45-L6; d—AR-90-L6

图 3 不同卷绕角度与厚度的 Al-RFRP 复合管轴向压缩破坏模式

当卷绕层数为 2 层时, RFRP 厚度较薄,力学性能较弱,在压溃时由于 Al 管的叠缩屈曲被挤压破坏成一块块的碎片,破坏的 RFRP 又被卷入 Al 管中,进而增加了 Al-RFRP 复合管的吸能效果。

而当卷绕层数为 6 层时, RFRP 的厚度增加,整体力学性能增强, 90° 卷绕方向的 RFRP 与 Al 管的粘接力较弱,所以在压溃时多为整块的断裂,降低吸能效果。

2.2 吸能性对比

Al 管及 Al-RFRP 复合管在准静态轴向载荷压缩过程中,都是由弹性阶段以及变形压溃阶段组成,其中弹性阶段试样发生弹性变形,载荷-位移曲线呈现出线性关系,具有较高的初始峰值载荷;载荷达到初始峰值后,压溃过程进入压溃变形阶段,此时由于外部的 RFRP 及内部的 Al 管相继发生失效破坏或塑性变形,其承载能力瞬间下降。

Al-RFRP 复合管的载荷-位移曲线如图 4 所示。

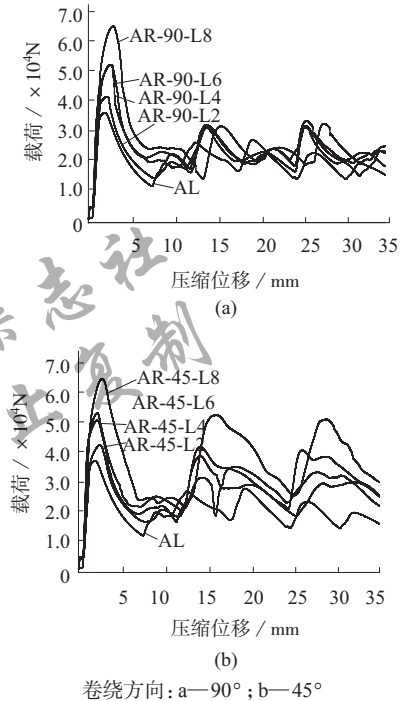


图 4 不同卷绕方向与厚度的 Al-RFRP 复合管轴向压缩载荷-位移曲线

由图 4 可知,在 90° 方向下不同的卷绕层数表现出来的差异性仅表现在随着层数的增加, Al-RFRP 复合管的峰值载荷随之增加,并且在第一个峰值之后的峰值载荷所对应的压缩位移较 Al 管都有所后移,这是因为 RFRP 的加入阻碍了 Al 管的塑性形变。而压缩位移在 10~35 mm 阶段,不同卷绕层数的 Al-RFRP 复合管载荷-位移曲线没有明显差异。表现出这一现象的原因是 90° 方向卷绕的 Al-RFRP 复合管,卷绕层数为 2,4 层的 RFRP 较薄,所以 RFRP 更脆,在压缩破坏时被挤压断裂成许多碎片,断裂的 RFRP 被卷入 Al 管屈曲的压缩环中,增加 Al 管的吸能效果;而卷绕 6,8 层的 RFRP 厚度较厚,整体刚度较强,抗弯强度较好,破坏时载荷压力使 RFRP 沿轴向纤维方向劈裂开,并使 RFRP 与铝管界面大面积脱粘,吸能能力没有充分应用,所以卷绕 6,8 层的 Al-RFRP 复合管和卷绕 2,4 层的

Al-RFRP复合管在轴向压缩的后半段载荷-位移曲线相差不大;在 45° 卷绕方向下,卷绕层数的增加不仅对Al-RFRP复合管的峰值载荷有所增加,而且压缩位移在10~35 mm阶段的载荷也随着卷绕层数的增加而增加。

试件的轴向压缩实验结果列于表4,从表4中可知,Al-RFRP复合管的吸能效果和纯Al管相比,都得到明显提高。其中,试件AR-45-L8的吸能

与平均载荷最多,分别为1333.7 J和38.11 kN,相比与纯Al的738.3 J和21.09 kN提高了80.64%和80.70%。试件AR-45-L2的压溃效率最高为60.33%,相较于Al的55.68%提升了8.4%。 90° 卷绕的Al-RFRP复合管的轴向压缩峰值载荷要高于 45° 卷绕的Al-RFRP复合管,而 45° 卷绕的Al-RFRP复合管的轴向压缩平均载荷要高于 90° 卷绕的Al-RFRP复合管。

表4 试件的轴向压缩实验结果

项目	Al	AR-90-L2	AR-45-L2	AR-90-L4	AR-45-L4	AR-90-L6	AR-45-L6	AR-90-L8	AR-45-L8
平均载荷/kN	21.09	23.71	26.01	25.38	29.61	26.09	31.80	27.96	38.11
峰值载荷/kN	37.88	43.28	43.11	54.23	51.49	54.36	54.11	67.46	65.61
吸能/J	738.3	830.0	910.6	888.3	1036.2	913.1	1113.1	978.6	1333.7
比吸能/(J·g ⁻¹)	28.18	24.19	26.36	22.05	25.98	20.09	24.56	18.11	24.32
压溃效率/%	55.68	54.78	60.33	46.80	57.50	47.99	58.77	41.45	58.09

图5为Al-RFRP复合管的比吸能、压溃效率对比。由图5可知,无论是 90° 卷绕还是 45° 卷绕,Al-RFRP复合管的比吸能都随着卷绕层数的增加而降低,并且 90° 方向卷绕的Al-RFRP复合管下降的幅度比 45° 方向卷绕多出17%,这是因为 90° 方向卷绕的Al-RFRP复合管破坏多为RFRP整块断裂,卷绕层数越多,吸能效果越差,比吸能越低;在压溃效率上,随着卷绕层数的增加表现为先下降再上升再下降的趋势。并且 45° 方向卷绕的Al-RFRP复合管的压溃效率都高于纯Al管,而 90° 方向卷绕的Al-RFRP复合管的压溃效率都要低于纯Al管。从比吸能和压溃效率都能够看出:无论卷绕层数的多少, 45° 卷绕的Al-RFRP复合管在轴向压缩中的吸能性能要优于 90° 卷绕的Al-RFRP复合管。

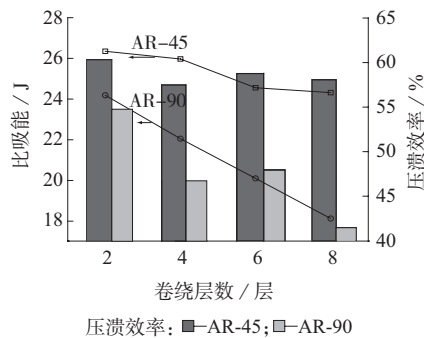


图5 Al-RFRP复合管的比吸能、压溃效率对比

3 有限元分析

3.1 有限元模型

基于ABAQUS有限元分析软件,建立了Al-RFRP复合管轴向压缩的仿真模型,通过仿真与实验相结合的方法可以更深入地了解Al-RFRP复合管的内在破坏机理。依据Al-RFRP复合管的吸能

效果,选取吸能效果最好且变形稳定的AR-45-L6为仿真模型,图6为该模型的细节图,模型中的上、下压盘为刚性面,上压盘的中心设立参考点用来记录在压缩过程中Al-RFRP复合管受到的支反力与位移。下压盘底部自由度全部约束,上压盘向下的压缩位移量为35 mm。上、下压盘的网格划分为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 。Al管与RFRP管、RFRP管与上、下压盘的接触采用面面接触,动摩擦系数为0.2,静摩擦系数为0.3。Al管采用网格大小为 $1.0\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ (网格沿轴向方向大小为1.5 mm)进行网格划分,网格类型采用带有沙漏控制的三维八节点线性缩减积分单元(C3D8R)模拟准静态压缩过程中Al管的弹塑性变形行为。RFRP采用多层壳模型,共为6层壳,层与层之间采用Cohesive粘结单元进行连接,网格划分与Al管相同为 $1.0\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$,网格类型采用带有沙漏控制的平面四节点线性缩减积分单元(S4R)。

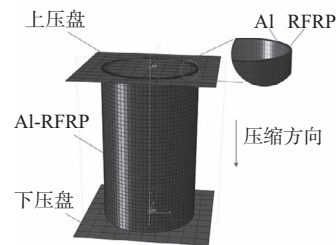


图6 Al-RFRP复合管仿真模型

Al管模型中输入的性能参数如下:密度为 2.7 g/cm^3 ,压缩弹性模量为69 GPa,泊松比为0.35,屈服应力为252.04 MPa。RFRP的性能参数为:弹性模量($E_1 \sim E_3$)分别为:10.8,10.8,3.5 GPa;泊松比($\mu_1 \sim \mu_3$)均为:0.09;剪切模量($G_1 \sim G_3$)分别为:

3.5, 3, 3.5 GPa^[22]。

3.2 失效准则

本模型采用 ABAQUS 中内嵌二维 Hashin 失效准则对 Al-RFRP 在压缩过程中的损伤失效状态进行判定,此材料模型中提供了四种基于铺层应力的失效模式^[24]:

(1) 纤维拉伸失效。

$$F_{mf} = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^T} \right)^2 + \alpha \left(\frac{\hat{\sigma}_{12}}{S^L} \right)^2 = 1, \hat{\sigma}_{11} \geq 0 \quad (1)$$

(2) 纤维压缩失效。

$$F_{fc} = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^C} \right)^2 = 1, \hat{\sigma}_{11} < 0 \quad (2)$$

(3) 基体拉伸失效。

$$F_{mt} = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^T} \right)^2 + \alpha \left(\frac{\hat{\sigma}_{12}}{S^L} \right)^2 = 1, \hat{\sigma}_{22} \geq 0 \quad (3)$$

(4) 基体压缩失效。

$$F_{mc} = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{2S^T} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y^C}{2S^T} \right)^2 - 1 \right] \frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^C} + \left(\frac{\hat{\sigma}_{12}}{S^L} \right)^2 = 1 \quad (4)$$

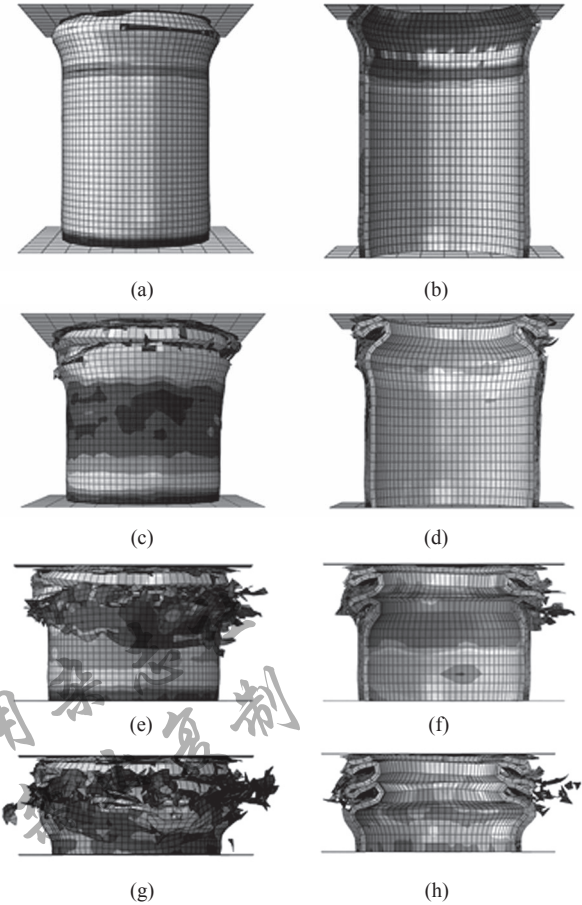
式中, X^T , X^C 为纤维方向拉伸、压缩强度, Y^T , Y^C 分别为基体方向拉伸和压缩强度, S^L , S^T 分别为纤维、基体方向剪切强度, σ 为剪应力在纤维拉伸损伤中的影响系数, $\hat{\sigma}_i$ ($i=1,2$) 为有效分力。当上述等式中任意一项成立时,就会出现相应类型的损伤。

3.3 有限元模型验证

图 7 为 Al-RFRP 复合管在轴向仿真压缩过程中不同位移量的应力云图和复合管的压缩形态截面图。从图 7 中可以看出,仿真的结果与实际实验的破坏模式相同,内衬 Al 管发生“手风琴”式折叠塑性变形。外侧 RFRP 层贴合 Al 管一起发生屈曲,并在屈曲处 Al 管 RFRP 之间粘接域单元发生大面积失效,导致 RFRP 发生屈曲使得单元失效并被删除,未失效的单元继续与 Al 管相连并被卷入屈曲的褶皱之中,对 Al 管的变形产生一定影响,从而吸收更多的能量。这与实验结果是一致的,进一步说明了有限元模型的可靠性。

图 8 给出了 Al-RFRP 复合管轴向压缩下仿真和实验的载荷-位移曲线,由图 8 可知,仿真结果与实验结果吻合较好。仿真中, Al-RFRP 复合管的总吸能为 1041.3 J,而实验结果为 1113.1 J,误差为 6%,这是由于试件制作中的人为误差所导致。

依据此仿真模型,考虑到加工工艺与成本,模拟出卷绕层数分别为 10,12,14,16 层的 Al-RFRP 复合管轴向压缩吸能性能,其仿真结果见表 6。



a, c, e, g—压缩位移量 5, 15, 25, 35 mm 应力云图;

b, d, f, h—压缩位移量 5, 15, 25, 35 mm 应力云图对应的截面图

图 7 Al-RFRP 复合管轴向压缩应力云图

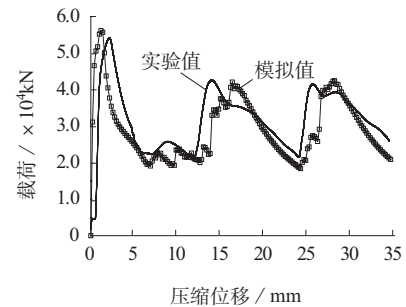


图 8 AR-45-L6 复合管轴向压缩载荷-位移曲线仿真与实验对比图

表 6 不同卷绕层数的 Al-RFRP 复合管吸能性能仿真结果

项目	AR-45-L10	AR-45-L12	AR-45-L14	AR-45-L16
峰值载荷/kN	78.65	90.88	105.42	126.25
吸能/J	1537.9	1709.0	1973.8	2201.3
比吸能/(J·g ⁻¹)	24.80	24.41	24.67	24.19
压溃效率/%	55.87	53.72	53.50	49.82

3.4 加权法选取最优结构方案

(1) 复杂比例评价方法。

为了优化资源配置、降低能耗、节约成本且提高效益,通常需要对候选材料性能进行综合评价并排序,从而得到最优的材料设计组合^[25]。对于薄

壁管件,其吸能性和耐撞性的好坏可以通过峰值载荷($F_{\max}$)、比吸能(EA)和压溃效率(CFE)进行综合评价, $F_{\max}$ 越低、EA和CFE越大,说明吸能效果越好。由2.2节可知,45°方向卷绕要比90°方向卷绕的Al-RFRP复合管吸能效果好,所以只需选取最优厚度即可。本节采用多目标的复杂比例评价法(COPRAS)^[26,27]来选取最优厚度,该方法被广泛应用于多目标问题决策中。评价方法如下:

①初始化处理。

将数据进行无量纲化处理,计算标准化决策矩阵 D 。

$$D = [d_{ij}]_{mn} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (5)$$

式中, x_{ij} 为第 i 个待选目标的第 j 个吸能性指标数值, m 为待选目标数目,研究8种不同卷绕层数,所以 m 为8, n 为指标数。这里为3种指标,所以 n 为3, d_{ij} 为 x_{ij} 的标准化数值。

②确定指标权重

采用标度法对吸能指标进行比较,总分为6,给出各项指标相应的分值,分值越大表明其越重要。

各指标权重设置见表7。表7中, $\omega_j = \frac{W_j}{\sum_{j=1}^n W_j}$, W_j 为第 j 个吸能性指标获得的总分值。

表7 各指标权重设置

指标	比较对数				W_j	ω_j
	1	2	3	4		
$F_{\max}$	1	1	1	—	3	3/24=0.125
EA	2	2	—	2	6	6/24=0.25
SEA	3	—	3	2	8	8/24=0.333
CFE	—	3	2	2	7	7/24=0.292

③计算加权的标准化决策矩阵 Y 。

$$Y = [y_{ij}]_{mn} = d_{ij} \times \omega_j \quad (6)$$

式中, y_{ij} 为第 i 个待选目标的第 j 个吸能性指标加权数值, ω_j 为第 j 个吸能性指标的权重因子。

④计算有利和不利属性下的吸能性指标加权标准化值。

$$S_{+i} = \sum_{j=1}^n y_{+ij} \quad (7)$$

$$S_{-i} = \sum_{j=1}^n y_{-ij} \quad (8)$$

式中, y_{+ij} 和 y_{-ij} 分别为有利和不利属性下的耐撞性指标加权标准化值。 S_{+i} 和 S_{-i} 分别为有利和不利属性下的加权标准化属性值。本文中SEA,CFE为有利属性, $F_{\max}$ 为不利属性。

⑤计算目标的相对重要性和量化效益。

$$Q_i = S_{+i} + \frac{\sum_{i=1}^m S_{-i}}{S_{-i} \sum_{i=1}^m (1/S_{-i})} \quad (9)$$

式中, Q_i 为第 i 个目标的相对重要性, Q_i 数值越大,表明该目标的优先级越高,即其在所有备选薄壁管结构中的吸能性最好。

(2) 最优卷绕厚度选择。

通过式(5)~式(9)分别计算出有利和不利属性下的加权标准化属性值 S_{+i} 和 S_{-i} ,以及目标的相对重要性 Q_i 值。复杂比例评价法计算结果见表8,根据 Q_i 值对不同卷绕角度的Al-RFRP复合管吸能性进行排序, Q_i 数值为越大,排名越靠前。由表8可知,卷绕14层的Al-RFRP复合管吸能性能最优。结合实验与仿真结果可以得到45°方向卷绕14层的Al-RFRP复合管吸能效果最好。

表8 复杂比例评价法计算结果

层数	S_{+i}	S_{-i}	Q_i	排名
L2	0.102 669	0.008 755	0.127 353	3
L4	0.102 845	0.010 457	0.123 512	6
L6	0.102 928	0.010 989	0.122 595	8
L8	0.106 751	0.013 324	0.12 297	7
L10	0.110 425	0.015 972	0.123 956	4
L12	0.111 998	0.018 456	0.123 707	5
L14	0.117 887	0.021 409	0.127 982	1
L16	0.119 496	0.025 639	0.127 925	2

4 结论

通过实验研究了不同卷绕角度与卷绕厚度对Al-RFRP的准静态轴向压缩作用下破坏模式和吸能性能的影响,实验结果表明:

(1) Al-RFRP复合管承载具有稳定的破坏模式且明显改善纯Al管轴向压缩性能,相比纯Al管,其峰值载荷、总吸能都有所增加。

(2) Al-RFRP复合管的主要破坏模式为复合叠缩失效模式:压缩过程中,Al管发生渐进塑性变形失效,RFRP层在复合管的径向方向发生裂纹,并贴合Al管在屈曲处基体发生脆性破坏。

(3) Al-RFRP复合管的比吸能要低于Al管并且Al-RFRP复合管的比吸能随着卷绕厚度的增加而下降。不同卷绕厚度对90°方向卷绕的Al-RFRP复合管吸能效果影响不大。

(4) 无论是平均载荷、比吸能还是压溃效率,45°卷绕的Al-RFRP复合管的性能都要优于90°卷绕的Al-RFRP复合管。结合实验与仿真,通过复杂比例评价法得出45°方向卷绕14层的Al-RFRP复合管吸能效果最好。

参考文献

- [1] 杨帆,王鹏,范华林,等. 薄壁管状吸能结构的吸能性能及变形模式的理论研究进展[J]. 力学季刊,2018,39(4):663–680.
Yang Fan, Wang Peng, Fan Hualin, et al. Review of theoretical models on the energy absorption and deformation modes of the thin-walled tubular structures[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2018,39(4):663–680.
- [2] 霍鹏,李建平,许述财,等. 基于轻量化与耐撞性要求的薄壁管状结构研究进展[J]. 机械强度,2020,42(6):1 377–1 388.
Huo Peng, Li Jianping, Xu Shucui, et al. A review on lightweight design and crashworthiness requirements of thin-walled tubular structure[J]. Journal of Mechanical Strength,2020,42(6):1 377–1 388.
- [3] Rajak D K, Pagar D D, Kumar R, et al. Recent progress of reinforcement materials:A comprehensive overview of composite materials[J]. Journal of Materials Research and Technology,2019,8(6):6 354–6 374.
- [4] Zheng Gang, Wang Zhen, Song Kai. Energy absorption on metal-composite hybrid structures:Experimental and numerical simulation[J]. Thin-Walled Structures,2020.doi.org/10.1016/j.tws.2019.106571.
- [5] Kumar A P, Maneiah D. Deformation studies on the significance of combined geometry tubes as energy absorbing structures[J]. International Journal of Civil Engineering and Technology,2019,10:2 812–2 820.
- [6] Eyvazian A, Mozafari H, Hamouda A M. Experimental study of corrugated metal-composite tubes under axial loading[J]. Procedia Engineering,2017,173:1 314–1 321.
- [7] Isaac C W, Ezekwem C. A review of the crashworthiness performance of energy absorbing composite structure within the context of materials, manufacturing and maintenance for sustainability[J]. Composite Structures,2020.doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113081.
- [8] Manoj P M, Rajini N, Ayirilmis N, et al.An overview of burst, buckling, durability and corrosion analysis of lightweight FRP composite pipes and their applicability[J]. Composite Structures, 2019.doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111419.
- [9] 马其华,周琪,甘学辉,等. 金属/碳纤维增强复合材料混合薄壁管的研究进展[J]. 工程塑料应用,2019,47(8):128–134.
Ma Qihua, Zhou Qi, Gan Xuehui. Research progress of carbon fiber composites-metal reinforced mixed thin-walled pipe[J]. Engineering Plastics Application,2019,47(8):128–134.
- [10] 董帆,马其华,周天俊. 纤维增强复合材料薄壁件轴向压缩吸能性研究进展[J]. 工程塑料应用,2020,48(6):137–144.
Dong Fan, Ma Qihua, Zhou Tianjun. Research progress on axial compression energy absorption of fiber-reinforced composite thinwalled parts[J]. Engineering Plastics Application,2020,48(6):137–144.
- [11] Li Yan, Mai Yiuwing, Ye Lin. Sisal fibre and its composites: A review of recent developments[J]. Composites Science and Technology,2000,60(11):2 037–2 055.
- [12] Bledzki A K, Gassan J. Composites reinforced with cellulose based fibres[J]. Progress in Polymer Science,1999,24(2):221–274.
- [13] Santoni A, Bonfiglio P, Fausti P, et al. Improving the sound absorption performance of sustainable thermal insulation materials: Natural hemp fibres[J]. Applied Acoustics,2019,150:279–289.
- [14] Liu Ke, Takagi H, Osugi R, et al. Effect of lumen size on the effective transverse thermal conductivity of unidirectional natural fiber composites[J]. Composites Science and Technology,2012,72(5):633–639.
- [15] Mahmoudi S, Kervoele A, Robin G, et al. Experimental and numerical investigation of the damping of flax–epoxy composite plates[J]. Composite Structures,2019,208:426–433.
- [16] Alkbir M F M, Sapuan S M, Nuraini A A, et al. Effect of geometry on crashworthiness parameters of natural kenaf fibre reinforced composite hexagonal tubes[J]. Materials & Design, 2014,60:85–93.
- [17] Eyvazinejad F S, Dizhur D, Jayaraman K, et al. Flax fabric-reinforced epoxy pipes subjected to lateral compression[J]. Composite Structures,2020.doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112307.
- [18] Mahdi E, Ochoa D, Vaziri A, et al. Energy absorption capability of date palm leaf fiber reinforced epoxy composites rectangular tubes[J]. Composite Structures,2019.doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111004.
- [19] Supian A B M, Sapuan S M, Zuhri M Y M, et al. Crashworthiness performance of hybrid kenaf/glass fiber reinforced epoxy tube on winding orientation effect under quasi-static compression load[J]. Defence Technology,2020,16(5):1 051–1 061.
- [20] Yan Libo, Chouw N. Crashworthiness characteristics of flax fibre reinforced epoxy tubes for energy absorption application[J]. Materials & Design,2013,51:629–640.
- [21] 温变英,李晓媛,张杨. 苧麻纤维/聚乳酸复合材料在不同 pH 环境下的水解行为[J]. 复合材料学报,2015,32(1):54–60.
Weng Bianying, Li Xiaoyuan, Zhang Yang. Hydrolysis behaviors of ramie fiber / polylactic acid composites under different pH conditions[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2015,32(1):54–60.
- [22] 倪楠楠,夏璐,张文宇,等. 苧麻纤维布和玻璃纤维布混杂铺层复合材料的力学性能[J]. 材料工程,2019,47(2):153–159.
Ni Nannan, Xia Lu, Zhang Wenyu, et al. Mechanical properties of ramie fiber cloth and glass fiber cloth hybrid laminated composite[J]. Journal of Materials Engineering,2019,47(2):153–159.

- pattern using shape memory TPU filament[J]. Textile Research Journal, 2020, 90(21-22):2 399-2 410.
- [5] Wang Jun, Yang Bin, Lin Xiang, et al. Research of TPU materials for 3D printing aiming at non-pneumatic tires by FDM method[J]. Polymers, 2020, 12(11):1 661-1 672.
- [6] 周旸, 陈枫, 谌东中. 无机纳米填料改性聚氨酯研究及其应用进展 [J]. 高分子通报, 2015(12):15-21.
Zhou Yang, Chen Feng, Chen Dongzhong. Research and application progress of inorganic nano-filler modified polyurethane[J]. Polymer Bulletin, 2015(12):15-21.
- [7] Gupta A, Maharjan A, Kim B S. Shape Memory Polyurethane and Its Composites for Various Applications[J]. Applied Sciences, 2019. doi:10.3390/app9214694.
- [8] Dogan S K, Boyacioglu S, Kodal M, et al. Thermally induced shape memory behavior, enzymatic degradation and biocompatibility of PLA / TPU blends: "Effects of compatibilization" [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2017, 71:349-361.
- [9] Le Duigou A, Chabaud G, Scarpa F, et al. Bioinspired electro - thermo - hygro reversible shape - changing materials by 4D printing[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 1903280. doi: /10.1002/adfm.201903280.
- [10] Meng Harper, Li Guoqiang. A review of stimuli-responsive shape memory polymer composites[J]. Polymer, 2013, 54(9):2 199-2 221.
- [11] Ehteramian M, Ghasemi I, Azizi H, et al. Functionalization of multi-walled carbon nanotube and its effect on shape memory behavior of nanocomposite based on thermoplastic polyurethane / polyvinyl chloride / multi-walled carbon nanotube (TPU / PVC / MWCNT)[J]. Iranian Polymer Journal, 2021, 30(4):411-422.
- [12] Jing Xin, Mi Haoyang, Huang Hanxiong, et al. Shape memory thermoplastic polyurethane (TPU) / poly (ϵ -caprolactone)(PCL) blends as self-knotting sutures[J]. Journal of The Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2016, 64:94-103.
- [13] Xiang Dong, Zhang Xuezhong, Han Zhuohang, et al. 3D printed high-performance flexible strain sensors based on carbon nanotube and graphene nanoplatelet filled polymer composites[J]. Journal of Materials Science, 2020, 55(33):15 769-15 786.
- [14] Stansbury J W, Idacavage M J. 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities[J]. Dental Materials, 2016, 32(1):54-64.
- [15] Meng Qinghao, Hu Jinlian. A review of shape memory polymer composites and blends[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009, 40(11):1 661-1 672.
- [16] Xu Xiaohui, Fan Peidong, Ren Jia, et al. Self-healing thermoplastic polyurethane (TPU) / polycaprolactone (PCL) / multi-wall carbon nanotubes (MWCNTs) blend as shape-memory composites[J]. Composites Science and Technology, 2018, 168: 255-262.

.....

(上接第 67 页)

- [23] 朱国华. 金属 / 碳纤维混合材料薄壁结构耐撞性研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
Zhu Guohua. On crashworthiness characteristics of metal / CFRP hybrid thin-walled structures[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [24] 董柏岩, 马其华, 姚远, 等. CFRP 缠绕薄壁铝圆管的轴向压溃吸能特性分析 [J]. 机械强度, 2020, 42(4):817-825.
Dong Boyan, Ma Qihua, Yao Yuan, et al. Energy absorption analysis of filament-wound cfrp / al hybrid thin-walled circular tube under axially crushing[J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42(4):817-825.
- [25] 张天云, 刘涛, 康玉虎. 工程选材组合评价模式的研究及其应用 [J]. 材料导报, 2009, 23(9):74-78.
Zhang Tianyun, Liu Tao, Kang Yuhu. Research and application of combined assessment model for engineering materials selection[J]. Materials Reports, 2009, 23(9):74-78.
- [26] 黄晗, 许述财, 陈传志, 等. 基于虾螯的仿生多胞薄壁管耐撞性分析及优化 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2021. doi:10.13229/j.cnki.jdxbgxb20200838.
Hang Han, Xu Shucai, Chen Chuanzhi, et al. Crashworthiness investigation and optimization of a bionic multi-cell tube based on shrimp chela[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2021. doi:10.13229/j.cnki.jdxbgxb20200838.
- [27] Dong Fan, Ma Qihua, Gan Xuehui, et al. Crashworthiness analysis of perforated metal / composite thin - walled structures under axial and oblique loading[J]. Polymer Composites, 2021, 42 (4):2 019-2 036.