

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.11.018

Al-CFRP 复合管的径向压缩性能

马其华^{1,2}, 查一斌¹, 周天俊¹

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620; 2. 高性能纤维及制品教育部重点实验室, 东华大学, 上海 201620)

摘要: 采用准静态径向压缩实验和有限元仿真相结合的方法, 对碳纤维增强复合材料 (CFRP) 缠绕薄壁铝管 (Al-CFRP) 复合管的径向压缩性能和破坏机理进行了研究。实验表明, Al-CFRP 复合管具有更稳定的失效破坏模式, 相比纯 CFRP 管, 其峰值载荷、总吸能和比吸能分别提高了 77.4%, 223.5% 和 39.6%, 且相较纯 Al 管和纯 CFRP 管总吸能之和仍提高了 41.6%。进一步对 Al-CFRP 复合管的破坏过程进行了有限元仿真, 仿真得到的载荷-位移曲线和总吸能-位移曲线与实验结果吻合较好, 验证了仿真模型的可靠性。通过结合 Al-CFRP 复合管实验结果与 Al-CFRP 复合管应力、应变分析, 发现由于外层 CFRP 的束缚作用抑制了内衬 Al 管管壁因弯折过大而断裂, 同时由于内衬 Al 管的支撑作用使得外层 CFRP 管未发生严重的纤维断裂和分层现象, 因此 Al-CFRP 复合管可以有效抵抗管壁变形, 提高径向压缩下的稳定性和吸能性。

关键词: 径向压缩; 有限元仿真; 碳纤维增强复合材料; 缠绕薄壁铝管; 复合管; 稳定性; 吸能性

中图分类号: TB333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)11-0099-06

Radial Compressive Properties of Al-CFRP Composite Tubes

Ma Qihua^{1,2}, Zha Yibin¹, Zhou Tianjun¹

(1. School of Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering and Technology, Shanghai 201620, China;

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

Abstract : Using the method of combining quasi-static radial compression experiment with finite element simulation, the radial compression characteristics and failure mechanism of the carbon fiber reinforced plastic (CFRP) wound thin-walled aluminum tube (Al-CFRP) composite tube were investigated. Test results show that the peak load, total absorbed energy and specific energy absorption of Al-CFRP composite tube are increased by 77.4%, 223.5% and 39.6% respectively compared to the pure CFRP tube, and the total absorbed energy is also increased by 41.6% compared to the sum of the pure aluminum tube and pure CFRP tube, and the failure mode become more stable. In addition, the failure process of Al-CFRP composite tube was simulated by finite element method, results show that load-displacement curve and energy absorption-displacement curve are in good accordance with experiment results so that the reliability of the simulation model is verified. Study result indicates that the fracture of aluminum tube wall was inhibited by CFRP binding and there were no serious fiber fracture and lamination occurred in the CFRP tube due to the supporting of the lining Al tube by combining the experimental results with the stress and strain analysis of the Al-CFRP composite tube. Therefore, the Al-CFRP composite tube can effectively resist the wall deformation and improve the stability and energy absorption under radial compression.

Keywords : radial compression ; finite element simulation ; carbon fiber reinforced plastic ; wound thin-walled aluminum tube ; composite tube ; stability ; energy absorption

碳纤维 (CF) 增强复合材料 (CFRP) 具有轻质高强等特性^[1-2], 已逐步应用于航空、汽车和轨道交通等行业, 且由覆盖件逐渐应用于主承力构件中^[3]。然而, CFRP 结构常出现脆性破坏, 主要表现为纤维

基金项目: 纤维材料改性国家重点实验室开放课题项目 (KF1826), 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2232018A3-02), 上海工程技术大学研究生科研创新项目 (19KY0144, 18KY0605)

通讯作者: 马其华, 副教授, 博士在读, 主要从事复合材料汽车轻量化的研究 E-mail : mqh0386@sues.edu.cn

收稿日期: 2019-08-12

引用格式: 马其华, 查一斌, 周天俊. Al-CFRP 复合管的径向压缩性能 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(11) : 99-104.

Ma Qihua, Zha Yibin, Zhou Tianjun. Radial compressive properties of Al-CFRP composite tubes[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(11) : 99-104.

断裂、分层和脱粘等现象^[4-5]。在高速公路及桥梁防护栏等安全防护设施中,汽车与防护栏的碰撞实际是汽车与护栏上金属管的径向碰撞^[6-7],然而传统金属已不能满足如今高速碰撞的吸能性要求,而轻质高强的CFRP因其脆性破坏也不能进行直接替代,因此,国内外学者通过金属与CFRP的混合形式来提高结构的径向压缩性能^[8-10]。

目前,很多学者对复合材料与金属及其它材料的混合形式展开了研究,其主要是通过两种材料混合使得复合材料以一种稳定、可控的方式产生变形,从而提升结构的能量吸收能力^[11]。Yan Libo等^[12]研究了聚氨酯泡沫填充亚麻织物复合材料圆管的径向压溃性能,结果表明,与相同尺寸的亚麻织物圆管和聚氨酯泡沫圆管相比,聚氨酯泡沫填充亚麻织物复合材料圆管的径向压缩性能有所提高;而蔡学瑜等^[13]研究了铝蜂窝填充CFRP圆管的径向压缩性能,同样发现,与CFRP圆管和铝蜂窝圆管相比,铝蜂窝填充CFRP圆管的总吸能和比吸能均有提高,并且破坏模式也较为稳定;陈光伟等^[14]研究了内衬聚偏氟乙烯热塑层的纤维缠绕复合材料管的径向压缩性能,结果表明,纤维缠绕角度、层厚度及碳纤维混杂比均是影响其径向压缩性能的重要因素;Song Hongwei等^[15]、H. C. Kim等^[11]分别对CFRP缠绕铝管(Al-CFRP)混合圆管和方管进行了轴向压缩的实验,研究表明,复合材料厚度以及铺层方式等对轴向压缩性能都有较大影响。作为防护以及管道使用时需考虑径向压缩下管件的吸能与承载能力,在这方面对于Al-CFRP混合圆管的研究较少。笔者采用实验和仿真相结合的方法,通过准静态径向压缩实验,分别对纯Al管、纯CFRP管以及Al-CFRP复合管破坏模式进行了研究,并进一步结合仿真和实验结果分别研究了Al-CFRP复合管内衬Al管和外层CFRP管的失效机理。

1 实验部分

1.1 主要原材料

Al管:AA6063T6,东莞市广美铝业有限公司;

CF:T700-12K,日本东丽株式会社;

环氧树脂(EP):BAC172,浙江百合航太复合材料有限公司。

1.2 主要设备及仪器

万能试验机:WANCE 605A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

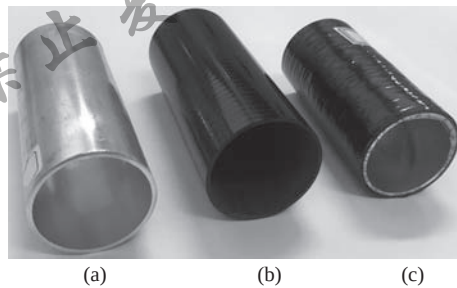
圳万测试验设备有限公司;

四轴数控纤维缠绕机:CRJ-12型,河北德科机械科技有限公司。

1.3 试件制备

通过湿法缠绕工艺,将预浸过EP树脂的CF丝束缠绕在芯模上,然后将缠绕好的CFRP管脱模并用真空袋密封好,最后放置于烘箱中固化成型,制得CFRP管。

Al-CFRP复合管由纯Al管外层缠绕CFRP组成,纯Al管的外径与纯CFRP管的内径相同,其中纯Al管内径为35.5 mm,壁厚为1.5 mm,样件长度为60 mm,而纯CFRP管内径为38.5 mm,铺层数为6层,根据现有缠绕机特点,本次实验设计的CF缠绕角度为 $[45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_2$,纯Al管、纯CFRP管和Al-CFRP复合管的结构如图1所示,纯Al管和纯CFRP管的性能参数列于表1,详细几何结构参数列于表2。



a—纯Al管; b—纯CFRP管; c—Al-CFRP复合管

图1 试件

表1 纯Al管和纯CFRP管的性能参数

项目	拉伸弹性模量 / GPa	拉伸强度 / MPa	密度 / (kg · m ⁻³)
纯Al管	67	215	2 700
纯CFRP管	123.34 (轴向) 7.78 (径向)	1632 (轴向) 34 (径向)	1 518

表2 试件的几何结构参数

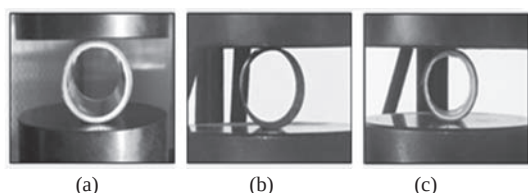
项目	缠绕角度	壁厚 / mm	质量 / g
纯Al管	/	1.5	25.6
纯CFRP管	$[45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_2$	1.5	19.7
Al-CFRP管	$[45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_2$	3	45.7

在进行Al-CFRP复合管样件制作时,为增加Al管外表面的粗糙度,提高Al管外表面与CFRP层的界面粘接强度,在进行复合管缠绕之前,首先需要使用砂纸将Al管的外表面进行打磨抛光处理;然后将打磨后的Al管浸泡在丙酮中进行清洗,去除表面杂物。通过湿法缠绕工艺将CFRP丝束缠绕在清洗后的Al管上,其中0°为沿管的轴向方向。最后将缠绕好的复合管用真空袋密封好放置于烘箱中固化成型。以预浸料中过量的树脂作为胶粘剂,实现

CFRP 和 Al 管之间的粘结,制得复合管。

1.4 性能测试

参考 GB/T 5352-2005,采用万能试验机,分别对纯 Al 管、纯 CFRP 管和 Al-CFRP 复合管进行径向压缩实验,如图 2 所示,将试件横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 5 mm/min,径向压缩位移量为 Al-CFRP 复合管平均直径的 65%,通过压头上安装的力、位移传感器,记录试件在准静态径向压缩时的径向压缩力—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。



a—纯 Al 管; b—纯 CFRP 管; c—Al-CFRP 复合管

图 2 径向压缩实验图

为评价 Al-CFRP 复合管在径向压缩作用下吸收能量的性能,主要采用如下吸能评价指标:

(1) 压缩至弹塑性末端时的载荷,即峰值载荷 $F_{\max}$,可从载荷—位移曲线上直接得到。

(2) 压缩过程中吸收的总能量 E :

$$E = \int_0^d F(x) dx \quad (1)$$

式中: d ——加载到某一点的位移量;

$F(x)$ ——瞬时加载载荷;

x ——加载位移。

(3) 压缩过程中,单位质量试件吸收的能量 (E_1):

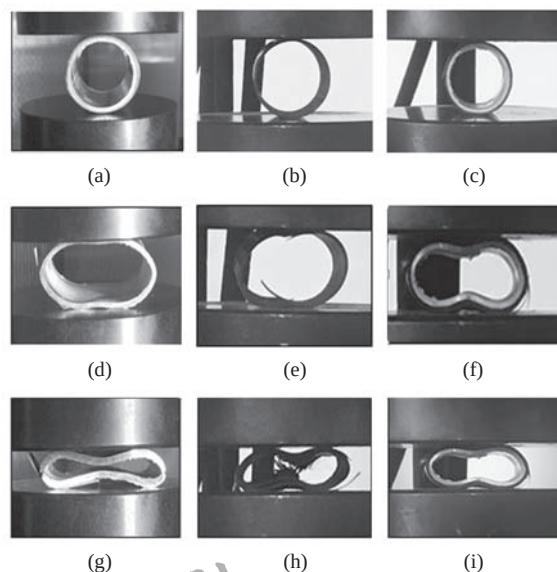
$$E_1 = \frac{E}{m} \quad (2)$$

式中: m ——试件质量。

2 结果与讨论

2.1 失效变形模式

如图 3 所示,试件的径向压缩变形模式主要分为三个阶段:弹性阶段、弹塑性阶段和平台应力阶段。在纯 Al 管径向压缩实验过程中,纯 Al 管首先进入弹性阶段,其载荷随压缩位移迅速提高,接着发生塑性变形处于弹塑性阶段,当达到初始破坏载荷之后进入平台应力阶段,随着压头向下压缩,纯 Al 管壁主要在塑性铰区域发生弯折,表现为稳定的渐进失效模式,随着继续压缩,纯 Al 管在左右两个塑



a, d, g—纯 Al 管,压缩位移分别为 5,15,25 mm;

b, e, h—纯 CFRP 管,压缩位移分别为 5,15,25 mm;

c, f, i—Al-CFRP 复合管,压缩位移分别为 5,15,25 mm

图 3 径向压缩实验过程

性铰区域发生断裂,但总体仍处于稳定的渐进破坏模式。

纯 CFRP 管在径向压缩实验过程中,破坏模式与纯 Al 管相似,呈稳定的渐进破坏模式,随着压缩位移量的增加,首先在上下两个与压头接触的塑性铰区域发生纤维断裂,随着进一步压缩,纤维持续断裂并出现分层现象。

对于 Al-CFRP 复合管,在径向压缩实验中同样呈稳定的渐进失效破坏模式,主要表现为塑性铰区域的弯折抵抗压缩,但外部 CFRP 管并未发生严重的纤维断裂和层间分层现象且内衬 Al 管也未发生断裂。因此,Al-CFRP 复合管有助于提高吸能结构径向压缩作用下的稳定性。

2.2 吸能性对比

试件载荷—位移曲线如图 4 所示,由图 4 可以看出,在径向压缩实验过程中,试件首先进入阶段 I 的弹性阶段,其载荷随压缩位移迅速提高,当压缩至阶段 II 弹塑性末端时达到载荷峰值,之后进入阶段 III 的平台应力阶段,其中纯 Al 管在左右塑性铰区域出现了断裂破坏,如图 5 所示,载荷出现明显下降;而纯 CFRP 管在四个塑性铰区域均出现了严重的纤维断裂破坏且出现分层现象,载荷也迅速下跌,如图 6 所示;相比纯 Al 管和纯 CFRP 管,Al-CFRP 复合管承载稳定,虽有纤维断裂、分层以及脱粘等现象但没有纯 CFRP 管严重,且由于外层 CFRP 管的抑制

作用,内衬 Al 管并没有出现断裂,如图 7 所示。因此,Al-CFRP 复合管的破坏模式更为稳定。

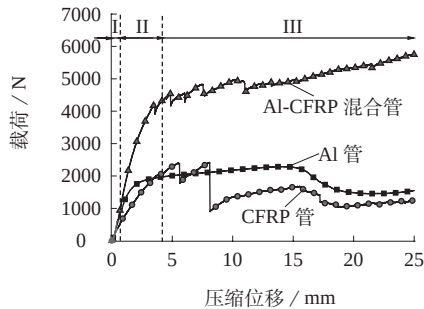


图 4 试件载荷-位移曲线

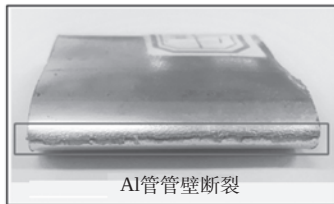


图 5 Al 管破坏模式

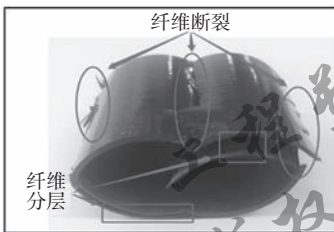


图 6 纯 CFRP 管破坏模式

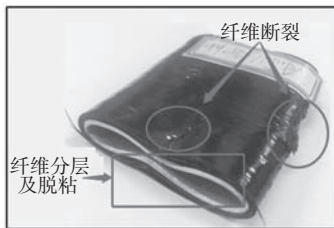


图 7 Al-CFRP 复合管破坏模式

在图 4 中阶段 I 的弹性阶段,由载荷-位移曲线得到纯 Al 管、纯 CFRP 管和 Al-CFRP 复合管载荷与位移的比值分别为 1002,759,1580 N/mm,可见 Al-CFRP 复合管具有更高的刚度,抵抗径向变形的能力更强。

试件的径向压缩实验结果列于表 3。由表 3 可知,相比纯 Al 管和纯 CFRP 管,Al-CFRP 复合管的峰值载荷为 4249 N,总吸能为 115.8 J,分别提高了 112.3%,77.4% 和 151.7%,223.5%。除此之外,纯 Al 管和纯 CFRP 管的总吸能之和为 81.8 J,而 Al-CFRP 复合管的总吸能相较两管总吸能之和仍提高了 41.6%,另外,相比纯 Al 管和纯 CFRP 管,Al-

CFRP 复合管的比吸能也得到了较大提高,分别提高 41.9% 和 39.6%。由此表明,Al-CFRP 复合管通过叠加效应使得径向压缩性能得到了明显提高,同时由于比吸能的提高达到了轻量化的效果。

表 3 试件的径向压缩实验结果

项目	质量 / g	峰值载荷 / N	总吸能 / J	比吸能 / (J·g ⁻¹)
纯 Al 管	25.6	2001	46	1.79
纯 CFRP 管	19.7	2395	35.8	1.82
Al-CFRP 复合管	45.7	4249	115.8	2.54

3 有限元分析

为了更深入地了解其内在破坏机理,建立了基于 ANSYS 和 LS-DYNA 两大显示动力分析软件对 Al-CFRP 复合管径向压缩的联合仿真模型。首先在 ANSYS 中建立双层壳模型并进行网格划分(纯 Al 管和纯 CFRP 管的网格大小均为 2 mm,上、下刚性板网格大小为 5 mm)和边界条件设置,试件横向放置在下刚性板上,上部受上刚性板的径向压缩。下刚性板底部自由度全部约束,上刚性板以恒定速度压缩试件。然后将其导入 LS-DYNA 中,进一步定义材料参数和接触条件,内衬 Al 管选取 MAT_24 PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY 材料模型;外层 CFRP 管选取 MAT_54 ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE 材料模型,内衬 Al 管和外层 CFRP 管的主要参数如表 1 所示。Al 管与 CFRP 管、CFRP 管与上、下刚性板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。模拟过程中设定径向压缩位移量为 Al-CFRP 复合管平均直径的 65%,即 25 mm,壳单元仿真模型如图 8 所示。

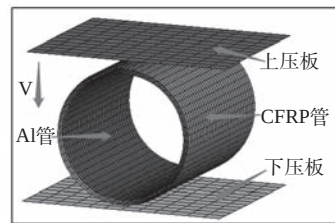


图 8 壳单元仿真模型

Al-CFRP 复合管径向压缩下仿真和实验的载荷/总吸能-位移曲线如图 9 所示,由图 9 可知,仿真结果与实验结果吻合较好。从曲线上可以看出,在弹性阶段,载荷随压缩位移的增加而迅速增大,在弹性阶段末端达到载荷峰值,仿真结果和实验结果分别为 4406 N 和 4249 N,误差为 3.7%,之后发生塑性变形进入平台应力阶段,呈稳定的破坏模式且载荷稳步提升。仿真中,Al-CFRP 复合管的总吸能为

120 J,而实验结果为 115.8 J,误差为 3.6%。因此,建立的仿真模型较为准确、可靠。

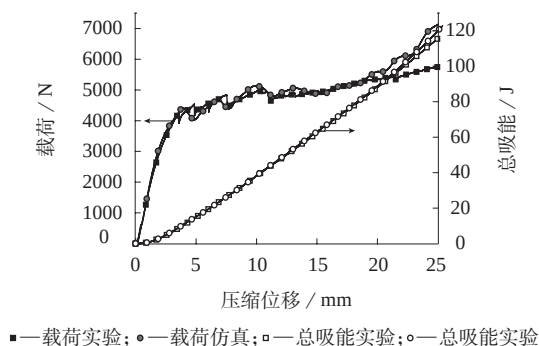
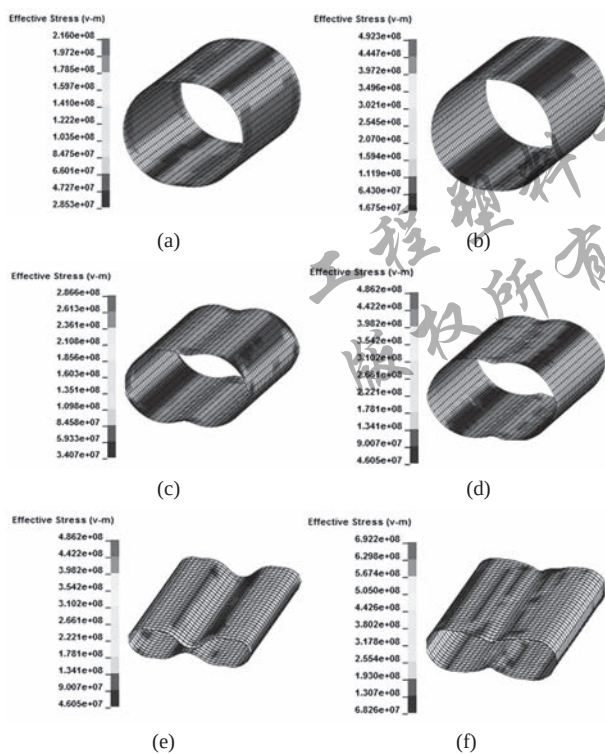


图 9 Al-CFRP 复合管载荷 / 总吸能 - 位移曲线

图 10 给出了 Al-CFRP 复合管的内衬 Al 管与外层 CFRP 管在径向压缩过程中不同位置的应力云图。



a, c, e—内衬 Al 管,位移分别为 5, 15, 25 mm ;

b, d, f—外层 CFRP 管,位移分别为 5, 15, 25 mm

图 10 Al-CFRP 复合管应力云图

由图 10 可以看出,当径向压缩为 5 mm, Al-CFRP 复合管处于弹性末端,外层 CFRP 管的受力点主要集中在上下两个塑性铰链区域,而内衬的 Al 管在上下左右四个塑性铰链区域均受力较大;随着上压板继续下压,当压缩到 15 mm 位移时,内衬 Al 管的应力主要集中在四个塑性铰区域且端口应力较大,结合实验可知,上下管壁向内凹陷,侧壁向外弯折,而外层 CFRP 管向内凹陷,其应力主要集中在中

间塑性铰区域,此时外层 CFRP 管由于中间凹陷部分应力集中产生裂纹和纤维断裂,而纯 CFRP 管由于没有内衬 Al 管的抑制作用,表现为载荷急剧下降;当下压至 25 mm 位移时,内衬 Al 管应力集中在左右塑性铰链区域,而外层 CFRP 管的应力主要分布在塑性铰区域,结合实验结果可知,对于纯 Al 管,由于侧壁弯折过大造成断裂,而纯 CFRP 管则在塑性铰区域发生纤维断裂、分层现象,导致承载力较低,反观 Al-CFRP 复合管,由于内衬 Al 管和外层 CFRP 管的相互抑制作用,内衬 Al 管并未发生断裂且外层 CFRP 管未发生严重纤维断裂、分层现象。

图 11 给出了 Al-CFRP 复合管内衬 Al 管与外层 CFRP 管中间塑性铰区域管径应变与应变之差随压缩位移量变化的曲线,由图 11 可以看出,在径向压缩位移大于 12 mm 时,内衬 Al 管中间塑性铰区域应变相对外层 CFRP 管增速急剧增加,此时载荷为 4808 N,表现为内衬 Al 管与外层 CFRP 管接触面出现明显脱粘现象,并随着继续压缩,内衬 Al 管与外层 CFRP 管的管径应变之差值持续增大,脱粘程度也更加严重,但 Al-CFRP 复合管仍承载稳定且载荷持续上升。因此,通过仿真分析分别对 Al-CFRP 复合管的内衬 Al 管和外层 CFRP 管径向压缩过程进行应力、应变分析,结合实验结果更好地阐释了 Al-CFRP 复合管径向压缩的破坏机理。

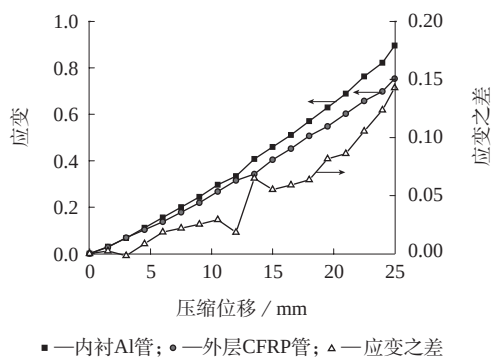


图 11 Al-CFRP 复合管应变 - 位移曲线

4 结论

采用实验和仿真相结合的方法,分别对纯 Al 管、纯 CFRP 管以及 Al-CFRP 复合管进行了准静态径向压缩实验,研究了其在径向压缩作用下的破坏模式和性能。实验结果表明, Al-CFRP 复合管承载具有稳定的破坏模式且明显改善纯 Al 管和纯 CFRP 管的径向压缩性能,相比纯 CFRP 管,其峰值载荷、总吸能和比吸能分别提高了 77.4%, 223.5% 以及 39.6%。进一步通过仿真分析并结合实验结

果,分别研究了 Al-CFRP 复合管的内衬 Al 管和外层 CFRP 管在径向压缩过程中的应力、应变变化,更好地解释了 Al-CFRP 复合管在径向压缩时的破坏机理,发现由于 Al 管和 CFRP 管的相互抑制作用,使得 Al 管并未发生侧壁断裂且改善了 CFRP 管的纤维断裂和分层现象,整个径向压缩过程更为稳定。因此,Al-CFRP 复合管可以有效地提高传统金属和复合材料管的径向压缩稳定性和吸能性并实现了轻量化。

参考文献

- [1] 孙政,付艳恕,詹博文,等. 复合材料吸能圆管轴向准静态压缩失效机理研究[J]. 塑料科技,2017,45(4):36-40.
Sun Zheng, Fu Yanshu, Zhan Bowen, et al. Study on failure mechanism of axially quasi-static compression of composite energy-absorption circular tube[J]. Plastics Science and Technology, 2017, 45(4):36-40.
- [2] 彭金涛,任天斌. 碳纤维增强树脂基复合材料的最新应用现状[J]. 中国胶粘剂,2014,23(8):48-52.
Peng Jintao, Ren Tianbin. The latest application status of carbon fiber reinforced resin matrix composites[J]. China Adhesives, 2014, 23(8):48-52.
- [3] Liu Qiang, Lin Yongzhou, Zong Zhijian, et al. Lightweight design of carbon twill weave fabric composite body structure for electric vehicle[J]. Composite Structures, 2013, 97:231-238.
- [4] 乔阳阳,白远利. 纤维增强复合材料断裂模型综述(英文)[J]. 汽车安全与节能学报,2018,9(1):1-10.
Qiao Yangyang, Bai Yuanli. A review on failure modeling methods of fiber reinforced polymer matrix composites[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2018, 9(1):1-10.
- [5] 马存旺,吴伟伟,鲁国富. 整体复合材料结构分层特性研究进展(三)[J]. 飞机设计,2015,35(1):13-24.
Ma Cunwang, Wu Weiwei, Lu Guofu. Development on delamination characteristics of integrated composite structures: Part III[J]. Aircraft Design, 2015, 35(1):13-24.
- [6] 曾杰. 金属管径向冲击数值模拟与吸能特性研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2010.
Zeng Jie. Numerical simulation and energy absorbing properties study on metal tube radial compaction[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [7] 黄志超. 侧向载荷下泡沫铝填充薄壁金属圆管的变形与吸能特性[D]. 太原:太原理工大学,2016.
Huang Zhichao. Deformation and energy absorption properties of thin-walled metal tubes filled with aluminum foam under lateral load[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [8] 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.
- [9] Boria S, Scattina A, Belingardi G. Axial crushing of metal-composite hybrid tubes experimental analysis[J]. Procedia Structural Integrity, 2018, 8:102-117.
- [10] Feng Peng, Hu Lili, Qian Peng, et al. Compressive bearing capacity of CFRP-aluminum alloy hybrid tubes[J]. Composite Structures, 2016, 140:749-757.
- [11] Kim H C, Dong K S, Lee J J, et al. Crashworthiness of aluminum / CFRP square hollow section beam under axial impact loading for crash box application[J]. Composite Structures, 2014, 112(5):1-10.
- [12] Yan Libo, Chou N, Jayaraman K. Lateral crushing of empty and polyurethane-foam filled natural flax fabric reinforced epoxy composite tubes [J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 63:15-26.
- [13] 蔡学瑜,邵超城,刘强. 铝蜂窝填充 CFRP 结构的侧向压缩性能研究[J]. 机械设计,2018,35(5):84-88.
Cai Xueyu, Shao Chaocheng, Liu Qiang. Research on lateral compression characteristics of CFRP tube filled with aluminum honeycomb[J]. Journal of Machine Design, 2018, 35(5):84-88.
- [14] 陈光伟,刘昌波,岳海亮,等. 内衬聚偏氟乙烯热塑层的纤维缠绕复合材料管径向平压性能[J]. 高分子材料科学与工程,2017,33(6):88-94,99.
Chen Guangwei, Liu Changbo, Yue Hailiang, et al. Radial compressive properties of fiber-reinforced thermoset composites pipe with thermoplastic polyvinylidene fluoride inner liner[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2017, 33(6):88-94, 99.
- [15] Song Hongwei, Wan Zhimin, Xie Zhimin, et al. Axial impact behavior and energy absorption efficiency of composite wrapped metal tubes[J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24(4):385-401.

本刊声明

近期有不法网站和个人假借本刊名义向广大读者征稿,同时收取高额注册费、审稿费。本刊特此声明:《工程塑料应用》为中国兵器工业集团第五三研究所(山东非金属材料研究所)主办,杂志社所在地为山东省济南市,本刊唯一合法投稿网址为 www.epa1973.com,本刊未委托任何机构和个人从事征稿和组稿业务。请广大作者牢记本刊投稿网址,辨别来电属地,不要给个人账号汇款,防止受骗。本刊保留对相关网站和个人追究法律责任的权利。

(工程塑料应用杂志社)