

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.08.027

金属 / 碳纤维增强复合材料混合薄壁管的研究进展

马其华^{1,2,3}, 周琪², 甘学辉^{1,3}, 翁文涛², 孟征云²

(1. 东华大学机械工程学院, 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. 高性能纤维及制品教育部重点实验室(B类) 东华大学, 上海 201620)

摘要: 薄壁结构广泛应用于汽车、飞机等机械系统的承力部件中。金属-碳纤维增强复合材料混合薄壁管兼顾了复合材料轻质与高吸能性, 以及金属成型与连接工艺可靠等双重特点, 是实现碳纤维复合材料替代金属结构的理想过渡性材料。笔者从混合薄壁管在不同载荷方式下的吸能性分析、失效模式以及影响因素等方面进行了综述。分析表明, 通过缠绕或卷绕工艺制成的金属-碳纤维增强复合材料混合薄壁管通过合理设计与工艺控制, 可以实现对于金属薄壁管的有效替代。

关键词: 金属 / 碳纤维增强复合材料; 混合薄壁管; 失效模式; 吸能特性; 影响因素

中图分类号: TG156 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)03-0128-07

Research Progress of Metal / Carbon Fiber Composites Reinforced Mixed Thin-walled Pipe

Ma Qihua^{1,2,3}, Zhou Qi², Gan Xuehui^{1,3}, Weng Wendi², Meng Zhengyun²

(1. School of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;

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

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

Abstract: Thin-walled structures were widely used in mechanical systems such as automobiles and airplanes. Metal-carbon fiber reinforced composites (CFRP) hybrid thin-walled tube takes into account the dual characteristics of light weight, high energy absorption and reliable metal forming and joining process. It is an ideal transitional material to replace metal structure with CFRP. The energy absorption analysis, failure modes and influencing factors of hybrid thin-walled tubes under different load modes were reviewed. The analysis shows that the metal-carbon fiber reinforced composite thin-walled pipe made by winding or rolling process can be effectively replaced by the metal thin-walled pipe through reasonable design and process control.

Keywords: metal / carbon fiber reinforced composite; mixed thin-walled pipe; failure mode; energy absorption characteristics; influence factor

随着汽车保有量的飞速增长, 环境污染与能源问题受到高度关注, 国际社会呼吁汽车轻量化技术^[1-2]。汽车轻量化技术不是单纯的降低车身质量, 而是在保证汽车强度与碰撞性能不变或更好的情况下减轻其重量, 可通过车身结构优化、采用先进生产工艺和轻质高强度材料等方法得以实现。碳纤维增强复合材料 (CFRP) 依靠其高的比强度与比刚度以及优异的能量吸收能力成为了替换传统金属材料的适宜选择^[3-4]。但复合材料作为脆性材料, 其一般呈现出不稳定的失效模式并且连接困难。一种新的研究趋势是将复合材

料与金属相结合制成一种异质混合结构, 既利用金属梁的渐进叠缩引导复合材料发生稳定失效, 从而吸收更多能量的优点, 同时混合结构在装配加工中也更易实现。薄壁管件是汽车等机械系统中典型的承力与吸能部件, 将金属 / CFRP 混合薄壁管件引入上述系统中, 可实现轻量化、并提高吸能性的双重目的^[5]。国内外学者通过理论、试验以及数值模拟的方法对金属 / CFRP 混合结构的失效模式与吸能特性进行了系统研究。笔者对金属 / CFRP 混合管失效模式、吸能特性及其影响因素进行了简要综述, 总结了目前建立的混合结构

基金项目: 纤维材料改性国家重点实验室开放课题 (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: 甘学辉, 教授, 主要从事高性能纤维成形理论及装备方面的研究 E-mail: xuehui@dhue.edu.cn

收稿日期: 2019-06-07

引用格式: 马其华, 周琪, 甘学辉. 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.

失效模式的预测模型,并对目前研究中的不足进行了总结,对未来的研究方向进行展望。

1 混合薄壁件的制备与吸能评价指标

金属薄壁管种类繁多,常见的有铜管、铝管、不锈钢管、铸铁管等,都有各自的优缺点,适用于不同的工程环境中。目前,一般通过卷绕或缠绕工艺将碳纤维复合材料与金属管相结合形成混合薄壁结构。卷绕工艺是将裁剪下来的碳纤维预浸布通过压板与芯模之间的摩擦力作用卷至芯模上,待达到设计厚度,取下制备件冷却、固化,如图1所示。缠绕工艺是将浸渍了树脂胶的纤维丝束或粗纱缠绕到旋转的芯模上然后在室温或加热条件下固化,如图2所示。其中金属管在制备工艺里都充当了芯模的作用。两种混合管的制备工艺都可以通过铺层设计满足轴向和环向的强度要求,显示出了CFRP设计性强的优点。

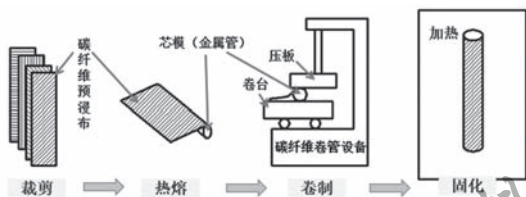


图1 卷绕成型工艺示意图

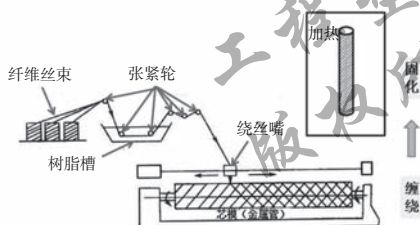


图2 缠绕成型工艺示意图

金属/CFRP混合管由于制备工艺、原料、铺层设计等的不同,在低速冲击工况下所表现出的性能也有差异。对于应用于能量吸收构件的混合管来说,吸能性和抗冲击性是其性能要求的考察重点。一般采用比吸能(SEA),即单位质量的吸能量评价其吸能性。采用峰值载荷($F_{\max}$)和载荷效率(CFE)评价其抗冲击性。 $F_{\max}$ 越大,冲击力越大,抗变形能力越强。但过高的 $F_{\max}$ 并不意味着载荷效率高。CFE值为平均载荷与峰值载荷的比值,是评价结构承载能力的重要参数,越小的CFE意味着载荷位移曲线波动小,对乘员的伤害就越小。

2 不同载荷下的失效模式与吸能机理

金属/CFRP混合管在不同加载方式下存在显著的失效差异,目前的研究多集中在轴向载荷和弯曲载荷下准静态和冲击两种情况下的失效模式^[6-7]。在对混合管吸能性的研究过程中,发现其吸能特性与其失效模式存在对应关系,渐

进破坏的管件吸能性明显强于坍塌破坏模式的管件。并且不同的失效模式其吸能机理亦存在差异。

2.1 轴向压缩失效模式

金属/CFRP混合管在准静态轴向压缩载荷下的失效模式呈现出两种材料叠加的失效模式特征。根据J.H. Gladstone等^[8]和Sun Guangyong等^[9]对混合管的轴压失效的研究,可将其典型的准静态轴压失效模式总结为三种,其中金属管由于CFRP层的约束一般发生非轴对称叠缩失效模式(钻石模式)^[10],而CFRP层根据细观破坏(基体开裂、纤维断裂、层内和层间裂纹拓展等)不同展现出不同的宏观破坏模式,如图3所示。

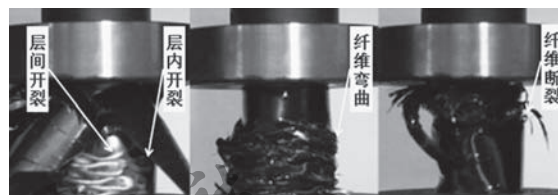


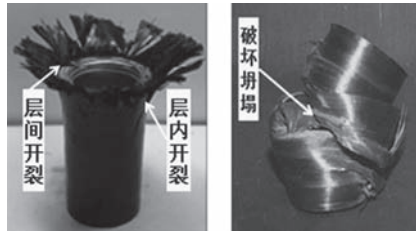
图3 金属/CFRP混合管准静态轴压失效模式^[8]

(1)脱胶开裂失效模式:多发生于接近 $[0^\circ]$ 铺层的混合管。压缩过程中,外CFRP管与金属管粘接界面产生层间裂纹并且CFRP管轴向产生严重的层内裂纹,进而拓展至层间与层内基体开裂,宏观上呈现出脱胶和轴向开裂破坏。其依靠内部金属管的渐进叠缩、层间和层内裂纹拓展吸收能量,由于存在大片未破损区域,其吸能效果较低。

(2)复合叠缩失效模式:多发生于接近 $[\pm 45^\circ]$ 铺层的混合管。压缩过程中,外CFRP层裂纹沿垂直于纤维的方向拓展,在屈曲处基体发生脆性破碎,纤维发生弯曲和部分断裂,进而宏观上呈现出局部屈曲破坏,混合管整体呈现渐进叠缩变形。通过基体和纤维的断裂、纤维弯曲及内金属管的渐进叠缩吸收能量,吸能效果较好。

(3)断裂失效模式:多发生于接近 $[90^\circ]$ 铺层的混合管。压缩过程中,外CFRP管出现大量层间与环向层内裂纹的萌发和拓展,形成的纤维层束在横向剪切作用下发生断裂,宏观上呈现横向剪切破坏。通过层内与层间的裂纹拓展和纤维断裂以及其内金属管的渐进叠缩吸收能量^[11],吸能效果较好。

而在动态冲击轴压载荷下,Song Hongwei^[12]、K.S. LEE^[13]和M.R.Bambach等^[14]分别以初始撞击速率为7.6, 5.5, 6 m/s进行金属/CFRP混合管轴压试验,从吸能特性角度来说,由于应变率效应和惯性力效应的影响,动态载荷的SEA值要比准静态的略高。从失效模式角度来说,当铺层角度趋向于 $[\pm 45^\circ]$ 或 $[90^\circ]$ 时,其失效模式近似于准静态轴压失效模式,当铺层角度趋向于 $[0^\circ]$ 或铺层过厚时,出现了两种新的失效模式,如图4所示。

图4 金属/CFRP混合管冲击轴压失效模式^[13]

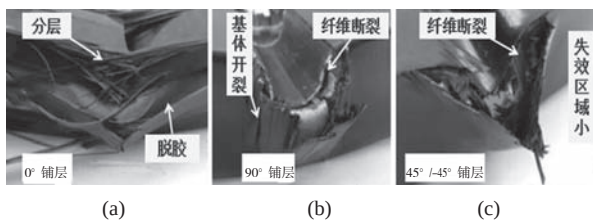
(4) 分层失效模式:多发生于接近 $[0^\circ]$ 铺层的混合管。

压缩过程中,外CFRP管出现了大量的层间裂纹进而发生分层现象,并且存在轴向层内裂纹,沿加载方向扩展而开裂成碳纤维层束并向外弯曲,宏观上呈现出层束弯曲破坏。其依靠内部金属管的渐进叠缩,外CFRP管层间与层内的裂纹拓展吸收能量,由于纤维断裂很少,其吸能效果较低。

(5) 坍塌失效模式:多发生于碳纤维铺层过厚的混合管。由于过厚的CFRP层抑制了金属管的渐进叠缩,最终导致外CFRP管中部出现破坏式纤维断裂。该模式下有大量未损坏区域,导致其吸能效果极低。

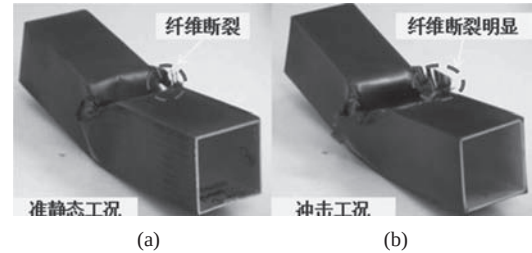
2.2 横向弯曲失效模式

对于金属/CFRP混合管的弯曲载荷下失效模式分析,研究重点在碳纤维铺层设计对其弯曲失效模式的影响,从K. Kim等^[15]的研究可以总结出不同角度铺层下其准静态弯曲失效模式的特点,如图5所示。 0° 铺层主要承受轴向载荷,受弯曲载荷后层间裂纹拓展,进而发生分层和脱胶现象,吸能效果很差。 90° 铺层用来承受横向载荷并控制泊松效应,在塑性铰处混合管产生大量的纤维断裂和基体开裂,吸能效果优于 0° 铺层。 $45^\circ/-45^\circ$ 铺层通常成对出现,主要承受剪切载荷,依靠纤维的交叉机制限制了应力波的传递,随着塑性铰的形成出现纤维断裂,但其失效区域最小且展现出相对好的吸能效果。

a— 0° ; b— 90° ; c— $45^\circ/-45^\circ$ 图5 不同铺层角度混合管弯曲失效特征^[16]

而在动态冲击弯曲载荷下,根据S. Y. Kim等^[16]的实验对比发现,从吸能特性角度看,准静态和动态弯曲载荷下的力-位移曲线相似且SEA值差异不大。从失效模式角度来看,两种工况下的弯曲失效模式相似,只是动态弯曲载荷下CFRP层损伤更严重,如分层、脱胶和纤维断裂等更明显,如图6所示,主要是因为冲击载荷下,基体中形成的裂纹增多。

在实际的铺层设计中,多角度结合的铺层方式更常见,



a—准静态工况; b—冲击工况

图6 铺层混合管在准静态冲击工况下失效模式对比图^[15]

如 $[0^\circ/90^\circ]_n$ 和 $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_n$ 等,因为它们结合了更铺层角度的优势,依靠金属管的稳定屈曲和纤维层的渐进破坏,表现出较高的吸能效果^[17]。

2.3 影响失效模式的主要因素

在实验研究过程中,真实的金属/CFRP混合管的失效模式并不是明确可分的,往往是几种典型失效模式的组合,其吸能特性也随着变化,这是由各种因素作用造成的。

(1) 几何形状与参数。

长细比对于受压构件的稳定性具有明显的影响,不同长细比下的峰值载荷也不同^[18]。M. R. Bambach等^[19]进行了大量的实验测试以研究钢/CFRP混合方管的轴向失效行为。他们发现CFRP应用于长细比为0.673~2.5的杆件中,可以有效延缓钢管局部屈曲,并导致混合管的峰值载荷和SEA值显著增加。

不同的宽厚比(径厚比)对金属/CFRP混合管失效模式有所影响,过大的宽厚比会引发坍塌失效,导致差的吸能效果。R. Alia等^[20]采用CFRP管内嵌于铝管的样件,在铺层厚度一定的情况下,通过改变铝管的厚度来实现不同径厚比,并研究其对SEA值的影响。实验结果显示,径厚比小的混合管以外层铝管的轴对称叠缩失效和内层碳纤维与基体的脆性断裂吸收能量。随着径厚比的增大铝管厚度增大导致质量的增加超过能量的吸收,所以径厚比小的样件SEA值较高。

不同截面形状的金属管的失效模式和吸能特性存在差异^[21],不同截面形状的混合管也存在差异^[22]。杨仁英等^[23]对铺层角度为 $[0^\circ/90^\circ]_4$ 的圆形、方形和帽形的混合管进行了研究,实验发现圆形截面的混合管峰值载荷和SEA值最高,主要以一种稳定的叠缩失效吸收能量。

(2) 混合方式。

CFRP的轻质与金属管的低成本相结合可以兼具两种优点,但两者有不同的混合方式,所呈现出的失效模式和吸能特性也有不同。

Zhu Guohua等^[24]对比了图7所示的CFRP管内嵌于铝管(H-I)、CFRP管外包于铝管(H-II)和CFRP管夹在两个铝管中间(H-III)的三种混合方式的样件在准静态轴向压

缩实验条件下的失效形式和吸能特性。H-I 样件外铝管呈现叠缩变形,内部 CFRP 发生屈曲和脆性破碎;H-II 样件外 CFRP 出现轴向开裂,内铝管呈叠缩失效;H-III 外铝管沿轴向开裂成三瓣并卷曲,中间 CFRP 发生脆断,内部铝管呈叠缩失效,如图 8 所示。



图 7 不同混合形式的铝/CFRP 混合圆管^[24]

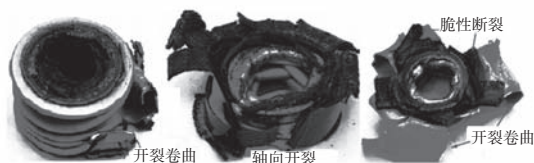


图 8 H-I 轴压失效模式、H-II 轴压失效模式、H-III 轴压失效模式^[24]

实验结果表明, H-I 样件的 SEA 和 CFE 比 H-II 样件分别增加了 40% 和 19%, 比 H-III 样件分别增加了 45% 和 29%。由上可知, 碳纤维管内嵌于金属管吸能效果最佳。M. Dlugosch 等^[25] 在轴向冲击试验下对 CFRP 矩形管嵌于矩形钢管内的混合结构进行了研究, 实验发现混合管以外钢管如花瓣状向外屈曲和卷曲和内碳管向内屈曲并脆性破碎吸收能量, 展现出了比纯钢管高的 SEA 值和 CFE 值。

(3) 铺层设计。

CFRP 是一种各向异性的材料, 其力学性能随铺层设计不同而存在差异, 包括铺层角度、厚度和顺序的设计, 进而产生不同的失效模式和能量吸收特性。国内外学者关于铺层设计对失效模式的影响研究比较深入。

对于轴向载荷下铺层设计对失效模式的影响方面, Hee Chul Kim^[26] 根据汽车低速碰撞标准, 对铺层角度为 $[0^\circ]_{2n}$ 、 $[90^\circ]_{2n}$ 、 $[0^\circ/90^\circ]_n$ 、 $[90^\circ/0^\circ]_n$ 和 $[+45^\circ/45^\circ]_n$ 的铝/CFRP 混合方管进行了抗撞性试验, 结果显示铺层角度 $[0^\circ/90^\circ]_n$ 样件由于 CFRP 在轴向和环向上均增强了方形铝管, 因此其 SEA 值和 CFE 值同时得到了很好的改善。其以内矩形铝管的紧凑叠缩变形以及外 CFRP 的纤维断裂、基体破碎及其所导致的纤维弯曲吸收能量。J. H. Kim 等^[27] 通过轴向压缩实验研究了 CFRP 的铺层角度对铝/CFRP 圆管的失效模式和能量吸收的影响。实验结果显示, 铺层角度为 $[0^\circ/90^\circ]_4$ 的样件具有最高的 SEA 值, 其依靠纤维的断裂、CFRP 层的裂纹扩展和铝的渐进叠缩变形吸收大量能量。

R. Kalhor 等^[28] 研究了 GFRP 厚度在准静态轴向载荷下对不锈钢/GFRP 混合管能量吸收的影响, 确定 GFRP 截面的厚度的变化可以改变失效模式和吸能特性。Zhu Guohua^[29] 等研究了不同厚度的金属/CFRP $[0^\circ]_n$ 混合管的失效模式和吸能特性。实验发现金属/CFRP 混合管 CFRP 层轴向开裂, 铝管呈对称式叠缩变形; 通过对 CFRP 层加厚可以改善混合管的 SEA 值 (最多增加 17.0%)。Hwang Woo-Chae^[30] 通过动态轴压实验研究了对金属/CFRP 帽型混合管的铺层角度和层数的抗撞性研究, 结果表明, $[15^\circ/-15^\circ]_4$ 铺层角度拥有最高的比吸能, 并且随着层数的增加, 比吸能也在增加, 但铺层到了 7 层以后, 比吸能出现下降趋势。由上可知铺层厚度的增加对吸能效果的增加是有限度的, 超过了一定限额, 吸能效果反而会下降, 因而在实际应用中要在一定厚度内进行选用。

对于弯曲载荷下铺层设计对失效模式的影响方面, J. H. Kim 等^[31] 分别进行了铝管、CFRP 管和铝/CFRP 混合管的三点准静态弯曲试验, 其中铝/CFRP 混合管以铺层角度和顺序为设计参数。测试结果表明, 单角度铺层 $[0^\circ]_8$ 和 $[90^\circ]_8$ 的样件在弯曲载荷下随着塑性铰的形成发生脱胶以及严重的纤维断裂失效行为, 能量吸收效果差; 而将各角度铺层优点集合的复合角度铺层 $[0^\circ/+45^\circ/90^\circ/45^\circ]_2$ 的 SEA 值和 CFE 值最高。其中 SEA 比铝管高 28%。Hee Chul Kim 等^[32] 对铝/CFRP 空心方形截面梁实施了弯曲准静态实验。以碳纤维铺层层数和角度为变量, 研究其失效模式和吸能特性。试验结果表明, 就铺层角度而言, 不同铺层角度的 CFRP 层都在发生渐进失效时抑制塑性铰的形成。就铺层厚度而言, 4 层和 8 层都表现出相似的弯曲失效行为, 但当铺层厚度为 12 层时内部塑性铰开始形成, 从而导致 CFRP 层吸能利用率差。以比吸能为评价标准, 结果表明采用 $[0^\circ/+45^\circ/90^\circ/45^\circ]_2$ 的铺层设计 SEA 值最好。

对于金属/CFRP 混合管来说, 粘结层的性能也属于铺层设计中的一种, 且在金属/CFRP 管的失效模式和能量吸收特性起到重要作用^[33]。Hee Chul Kim 等^[34] 采用三点弯曲试验研究了界面粘结强度对不同厚度铺层的铝/CFRP 方形管的失效模式和吸能特性的影响, 结果表明, 随着界面粘结强度的提高, 混合管吸能量的能力得到提升, 原因在于界面连接强度增加使得 CFRP 层和金属管之间脱胶失效延后, 使得 CFRP 层对铝管加强作用时间增长。但是对于不同厚度铺层的铝/CFRP 方形管, 有着不同的界面连接强度临界值, 超过这个临界值, 能量吸收能力便不会再有显著的上升。

(4) 触发机制

对于吸能结构件来说, 追求的不光是金属/CFRP 混合

管的峰值载荷,更重要的是载荷效率,理想的吸能结构件都具有高的载荷效率,载荷位移曲线波动小,对乘员的伤害小,而高的载荷效率一般都是由混合管的渐进叠缩变形产生的,但实际中混合管的失效形式并不规则,所以一般采用设置触发机制来诱导叠缩变形以获得高的载荷效率,目前有效触发机制有混合管口的倒角设置^[35]、混合管头部或中部的打孔^[36]。R. D. Hussein等^[37]通过实验对比了铝/CFRP方形管在有触发机制下和无触发机制下的失效模式和吸能特性。其触发机制为与压板相配合的楔形缺口,如图9所示。实验表明,铝/CFRP方形管失效模式都是张开式的渐进剪切破坏和横向剪切破坏,唯一不同的是无触发机制下样件向外和向内弯曲的叶片状碎片都为4片,而有触发机制的样件则为8片;存在触发机制的样件虽然峰值载荷较低,但其CFE高于无触发机制样件并且SEA提高23%。触发是一个引发失效的过程,选择适当的触发机制有助于渐进式压碎的形成。

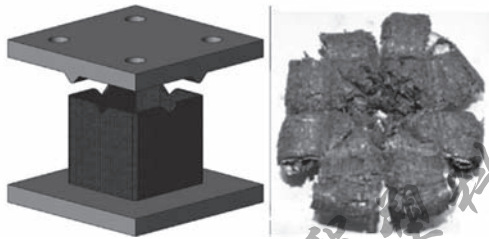


图9 楔形触发机制样件及触发机制样件的压溃失效模式^[38]

3 理论与预测模型

从工程应用角度来说,通过实验来验证设计的金属/CFRP混合管是否满足服役要求会耗费大量成本且工程效率低下,在设计初期就依靠预测模型对其失效模式和吸能特性进行分析,可节省大量成本和时间,以设计出满足需求的金属/CFRP混合管。

3.1 理论模型

在轴压失效方面,T. Wierzbicki等^[38]提出了经典金属薄壁管平均载荷理论模型:

$$P_m = 13.06\sigma_0 b^{1/3} t^{5/3} \quad (1)$$

其中, σ_0 为金属管的屈服应力, b 为金属管的宽度, t 为金属管的厚度。随后H. Akbarshahi等^[39]根据式(1),将复合材料的每一层独立分析,并用Tsai-Hill失效准则计算每一层的轴向和环向强度,推导出计算金属/复合材料混合管的平均载荷理论模型:

$$P_m = 24.33\sqrt{M_p^2 N_p c} \quad (2)$$

其中 M_p 为塑性弯矩, N_p 为面内载荷, c 为塑性铰宽度。该模型与试验对照,表现出良好的一致性。M. R. Bambach等^[40]将金属/CFRP混合方管的四个面和拐角分离分析,最后求得平均载荷计算的一般理论模型:

$$P_m = 4\left(\frac{2\pi M_p}{\alpha} + \sigma_{yc} A_c + \frac{\pi \sigma'_{yc} t_s \lambda}{4\beta}\right) \quad (3)$$

其中 M_p 为塑性弯矩, σ_{yc} 为面屈服应力, σ'_{yc} 为拐角屈服应力, t_s 为金属管厚度, λ 为有效的压溃距离,该设计方法直接适用于正交铺设碳纤维层加固的薄壁型金属管材。

在弯曲失效方面,D. Kecman等^[41]基于铰链理论对金属管弯曲变形性能进行了分析。随后Hee Chul Kim等^[34]基于塑性铰理论对混合管弯曲机理进行分析,他们提出了铝/CFRP(碳纤维复合材料)混合管侧向弯曲能量吸收模型:

$$W(\theta) = \sum_1^9 W_i(\theta) \quad (4)$$

其中 $W_i(\theta)$ 为弯曲过程中生成的第*i*条铰链线吸收的能量,该理论模型与实验结果表现出良好一致性。冯鹏等^[42]进行了铝/CFRP混合管准静态弯曲试验,基于平截面假定与层合板理论结合实验数据,建立了弹性阶段的抗弯刚度公式如下:

$$(EI)_A = \sum_{i=1}^n E_{Li} I_i + E_A I_A = \frac{E_A I_A}{K_1} \quad (5)$$

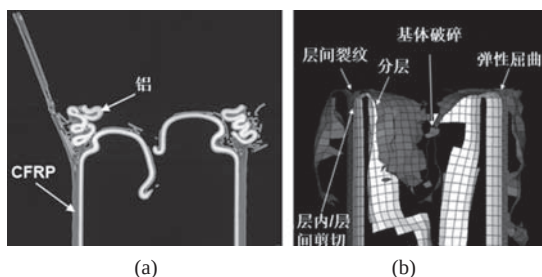
其中 K_1 为混合管截面抗弯刚度系数, $E_{Li} I_i$ 为第*i*层CFRP层的抗弯刚度, $E_A I_A$ 为铝合金管的抗弯刚度,其计算结果与实验非常吻合。

目前,混合管理论模型大多预测的是线性阶段的力学性能且不具备普遍适用性。能够预测非线性阶段力学性能的理论模型,如张彦等^[43]基于粘结域理论与连续介质理论建立的碳纤维层合结构层内与层间损伤起始与拓展的理论模型,只适用于碳纤维层合结构。具普遍适用性和可预测非线性阶段的金属/CFRP混合管理论模型有待补充和完善。

3.2 有限元模型

利用有限元仿真技术来对金属/CFRP混合管的力学性能及失效模式进行研究和预测,其中的难点便是CFRP结构的有限元模型建立。以Tsai-Hill, Hoffman和Tsai-Wu等理论模型为基础的宏观仿真模型,将CFRP层合结构看做均匀的各向异性材料分析其力学性能和损伤情况;在细观仿真模型方面,以单胞理论模型为基础的细观有限元仿真尚需进一步深入探索。

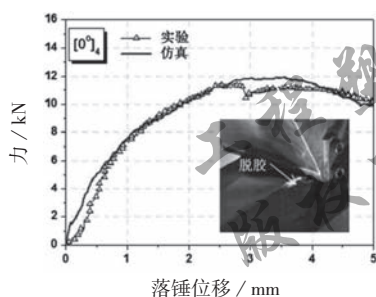
Corin Reuter等^[44]和M. Y. Huang等^[45]采用多壳单元模型(金属管与CFRP管用壳单元建立)对金属/CFRP混合管的轴压失效进行了数值模拟。通过接触定义来模拟粘结层的性能,采用chang-chang失效准则作为失效判断依据。如图10所示,多壳单元模型较好地模拟了压缩过程中的混合管失效模式。加载过程中由于层内与层间的剪切作用,出现层间裂纹,进而发生分层和基体破碎,铝管发生弹性屈曲。这种方法可以有效地预测铝/CFRP混合管件,仿真结果与实验结果吻合较好。



a—CT 截面图; b—仿真截面图

图 10 实验结果与仿真对照图^[44]

D. K. Shin 等^[46]采用有限元方法对铝/CFRP 混合管的弯曲失效模式进行了数值研究并与实验结果进行比较。采用体单元结构对金属/CFRP 混合管建模,并应用 Hashin 损伤起始准则的渐进损伤模型和基于能量的损伤演化模型来做失效判据。对于分层和脱胶的模拟,采用基于牵引分离定律定义的内聚区模型。有限元分析结果显示,CFRP 层在载荷作用下,应力集中发生于边缘,碳纤维层结构发生破坏和脱层,随塑性铰的产生,铝与 CFRP 之间的脱胶开始产生。通过对铝/CFRP 混合管的力-位移曲线的仿真结果与实验结果的分析对比,发现两条曲线吻合较好,如图 11 所示。

图 11 弯曲载荷下仿真与实验数据对比图^[46]

目前大都采用多壳单元宏观仿真模型来研究金属/CFRP 混合管的失效模式和吸能特性。在利用有限元方法对金属/CFRP 混合管的失效模式和吸能特性进行研究时,粘结层的模拟对仿真结果起着重要作用^[47]。

4 结论

对于金属-CFRP 混合管来说,CFRP 结构的不稳定局部屈曲失效模式可以通过金属管的限制转变为渐进式失效模式,而金属管又因为 CFRP 结构的增强提升承载能力,从而改善整个混合结构的能量吸收^[48]。

大量研究证明金属/CFRP 混合管的优点,但其存在大量相关设计变量,例如碳纤维取向,堆叠顺序以及金属部件的厚度等,这些都可能影响失效模式。这些因素使得碳纤维复材增强金属混合管的设计比单独的金属更加复杂。目前对金属/CFRP 混合管的研究还有许多不足。

(1) 就失效模式而言,由于碳纤维层合结构失效模式的多样性导致金属/CFRP 混合管的失效模式多而复杂,尤其

是在弯曲载荷下混合管的失效模式,需要对典型的失效模式进行合理分类,以便对复杂的失效模式进行分析,更好地了解其吸能特性。

(2) 就影响因素而言,首先不同加载方式对混合管失效模式影响的研究欠缺,如不同角度的轴压工况和不同角度的弯曲工况;其次弯曲载荷下不同截面形状的混合管的吸能特性研究甚少;最后不同触发机制对混合管 CFE 的影响也有待研究。

(3) 就预测模型而言,由于碳纤维层合结构损伤较金属结构复杂,且金属/CFRP 混合管更是两种材料的混合,其失效模式更是繁多且分析困难,导致预测其损伤产生于扩展的理论模型难以建立;目前,宏观仿真模型研究较为成熟,但由于细观特征直接影响宏观的力学性能及失效模式,所以建立宏观细观一体化的仿真模型是如今研究趋势。

参考文献

- [1] 范子杰,等. 汽车安全与节能学报,2014,5(1):1-16.
Fan Zijie, et al. Journal of Automotive Safety and Energy, 2014, 5(1):1-16.
- [2] 范军锋,等. 铸造,2006,55(10):995-998.
Fan Junfeng, et al. Foundry, 2006, 55(10):995-998.
- [3] 彭程,等. 汽车与配件,2016(24):67-69.
Peng Shi, et al. Automobile & Parts, 2016(24):67-69.
- [4] 郭玉琴,等. 锻压技术,2015,40(3):1-6.
Guo Yuqin, et al. Forging & Stamping Technology, 2015, 40(3):1-6.
- [5] Aoki Y, et al. Key Engineering Materials, 2007, 334-335:197-200.
- [6] Jacob, et al. Journal of Composite Materials, 2002, 36(7):813-850.
- [7] S.R.Reid, et al. International Journal of Mechanical Sciences, 1993, 35(12):1 035-1 052.
- [8] Gladstone J H, et al. International Society for Optics and Photonics, 2012, 58:412-442.
- [9] Sun Guangyong, et al. Composite Structures, 2018, 194:208-225.
- [10] Ahmad Baroutaji, et al. Thin-Walled Structures, 2017, 118:137-147.
- [11] Mamalis A G, et al. Composite Structures, 1997, 37:109-134.
- [12] Song Hongwei, et al. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24:385-401.
- [13] Lee K S, et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(s1):135-140.
- [14] Bambach M R, et al. Composite Structures, 2009, 87(3):282-292.
- [15] Kim K, et al. Elastomers Comp, 2012, 47:65-74.
- [16] Kim S Y, et al. International Journal of Crashworthiness, 2017, 22(2):190-201.
- [17] Kadhim M M A, et al. Composite Structures, 2018, 185: 94-104.
- [18] 丁磊,等. 长细比对 GFRP 加固型钢混凝土柱轴压性能的影响[D]. 合肥:合肥工业大学,2017.
Ding Lei, et al. Effect of slenderness ratio on axial compression behavior of steel reinforced concrete columns strengthened with

- GFRP[J]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [19] Bambach M R, et al. Thin-Walled Structures, 2009, 47(10):1112–1121.
- [20] Ra Alia, et al. Reinforced Plastics and Composites, 2015, 34(9):1–11.
- [21] 张立玲,等. 汽车技术, 2006(4):20–23.
Zhang Liling, et al. Automobile Technology, 2006(4):20–23.
- [22] 袁潘,等. 振动与冲击, 2010, 29(8):209–213.
Yuan Pan, et al. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(8):209–213.
- [23] 杨仁英,等. 计算与理论纳米科学, 2015, 12(5):774–779.
Yang Renying, et al. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2015, 12(5):774–779.
- [24] Zhu Guohua, et al. Composite Structures, 2017, 175:58–69.
- [25] Dlugosch M, et al. Composite Structures, 2017, 174:338–347.
- [26] Kim Hee Chul, et al. Composite Structures, 2014, 112(5):1–10.
- [27] Kim J H, et al. Materials Research Innovations, 2014, 18(S2):323–327.
- [28] Kalhor R, et al. Composite Structures, 2015, 130:44–50.
- [29] Zhu Guohua, et al. Mechanical Sciences, 2018, 135:458–483.
- [30] Woo-Chae Hwang, et al. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2011, 12(3):521–526.
- [31] Kim J H, et al. Advanced Materials Research, 2009, 83–86(1C):7.
- [32] Kim Hee Chul, et al. Composites Part B:Engineering, 2013, 51(Complete):345–358.
- [33] Bambach M R, et al. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(1):37–49.
- [34] Kim Hee Chul, et al. Composites Part B, 2014, 67:595–606.
- [35] M.A Jiménez, et al. Composite Structures, 2000, 48(1):107–111.
- [36] Jafar R, et al. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2018, 40(7):349–364.
- [37] Hussein R D, et al. Composite Structures, 2017, 171:403–418.
- [38] Wierzbicki T, et al. Journal of Applied Mechanics, 1983, 50(4):727–734.
- [39] Akbarshahi H, et al. Key Engineering Materials, 2011, 471–472:664–669.
- [40] Bambach M R, et al. Thin-Walled Structures, 2007, 45(2):159–170.
- [41] Kecman D, et al. International Journal of Mechanical Sciences, 1983, 25(9–10):623–636.
- [42] 冯鹏,等. 建筑钢结构进展, 2008, 10(1):34–43.
Feng Peng, et al. Progress in Steel Building Structures, 2008, 10(1):34–43.
- [43] 张彦,等. 纤维增强复合材料层合结构冲击损伤预测研究[D]. 上海:上海交通大学, 2007.
Zhang Yan, et al. Study on impact damage prediction of fiber reinforced composite laminated structures[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [44] Corin Reuter, et al. Thin-Walled Structures, 2017, 117:1–9.
- [45] Huang M Y, et al. Applied Composite Materials, 2012, 19(1):1–19.
- [46] Shin D K, et al. Composites Part B:Engineering, 2014, 56:397–407.
- [47] Ullah H, et al. Computational Materials Science, 2012, 52(1):147–156.
- [48] Zhao Xiaoling, et al. Engineering Structures, 2007, 29(8):1808–1823.

(上接第127页)

- [14] 吴涛,王胜广,李培国,等. 有机硅改性无卤膨胀型阻燃剂的制备及在聚丙烯中的应用研究[J]. 有机硅材料, 2012, 26(5):336–339.
Wu Tao, Wang Shengguang, Li Peiguo, et al. Preparation of silicone modified halogen-free intumescent flame retardants and its application in polypropylene[J]. Silicone Material, 2012, 26(5):336–339.
- [15] 贺婧,李果,王彦林. 丙基二甲氧基硅酸环磷酯的合成与应用[J]. 塑料科技, 2018, 46(4):122–125.
He Jing, Li Guo, Wang Yanlin. Synthesis and application of propyl dimethoxy silicic acid monocyclic phosphate[J]. Plastics Science and Technology, 2018, 46(4):122–125.
- [16] 李晓俊,刘小兰,刘宪增,等. 硅树脂阻燃聚碳酸酯的研究[J]. 工程塑料应用, 2005(2):16–18.
Li Xiaojun, Liu Xiaolan, Liu Xianzeng, et al. Study on flame retardant modification of polycarbonate with siloxane resin[J]. Engineering Plastics Application, 2005(2):16–18.
- [17] 曹东东,李果,王彦林. 甲基硅酸三环磷酯阻燃剂的合成与应用研究[J]. 苏州科技学院学报:自然科学版, 2016(4):44–47.
Cao Dongdong, Li Guo, Wang Yanlin. Methylsilicate tricyclic phosphonate flame retardant study on synthesis and application[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology: Natural Science, 2016(4):44–47.
- [18] 许梓轩,李果,王彦林. 阻燃剂有机硅酸单环磷酯的合成与应用[J]. 化学研究与应用, 2019, 31(4):658–662.
Xu Zixuan, Li Guo, Wang Yanlin. Synthesis and application of flame retardant organosilicic acid monocyclic phosphonate[J]. Chemical Research and Application, 2019, 31(4):658–662.
- [19] 仲柿成,杨珂珂,王彦林. 含硫笼状磷酯阻燃剂的合成与应用[J]. 化学研究与应用, 2018(12):1943–1947.
Zhong Shicheng, Yang Keke, Wang Yanlin. Synthesis and application of synergistic phosphorus and sulfur flame retardant[J]. Chemical Research and Application, 2018(12):1943–1947.