

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.04.010

诱导孔对 AL-CFRP 混合管轴向压缩变形行为影响

马其华^{1,2,3}, 王凯^{1,3}, 周天俊¹, 甘学辉²

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620; 2. 纤维材料改性国家重点实验室(东华大学), 上海 201620;

3. 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: 为了研究不同数量、位置和尺寸的诱导孔对铝-碳纤维复合材料混合管(AL-CFRP混合管)压缩变形模式与吸能特性的影响,建立了AL-CFRP混合管的有限元模型,并利用试验对有限元模型进行了验证。结果表明:诱导孔的数量、位置和尺寸均对AL-CFRP混合管压缩变形与吸能特性有较大影响;单排诱导孔时,混合管的变形模式随孔的数量增多逐渐由混合模式变化为手风琴模式,降低了初始峰值载荷,提高了吸能特性,但诱导孔数量不能过多;多排诱导孔时,诱导孔开设在管件端部能够使AL-CFRP混合管吸收更多的碰撞能量;同时,诱导孔尺寸从上往下依次降低能够使AL-CFRP混合管的吸能过程更加稳定,吸能效率更高,吸收的能量也越多;但过大的诱导孔尺寸,将降低管件的吸能能力,同时改变其变形模式。

关键词: 诱导孔;碳纤维复合材料;混合管;压缩变形;吸能特性

中图分类号: TB333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)04-0053-08

The Influence of Induced Holes on Deformation Behavior of AL-CFRP Tube Under Axial Compression

Ma Qihua^{1,2,3}, Wang Kai^{1,3}, Zhou Tianjun¹, Gan Xuehui²

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

2. State Key Laboratory for Modification of Chemical Fibers and Polymer, Donghua University, Shanghai 201620, China;

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

Abstract : To study the influence of different number, position and diameter of induced holes on the compression deformation mode and energy absorption characteristics of perforated aluminum-carbon fiber composites hybrid tube (AL-CFRP tube), the finite element model of perforated AL-CFRP tube was established and was verified by experiments. The results show that the number, position and diameter of the induced holes have great influence on perforated AL-CFRP tube. When there is one row of holes on AL-CFRP tube, with the increase of the number of holes, the deformation mode of perforated AL-CFRP tube gradually changes from the mixed mode to the concertina mode, which reduces the initial peak load and improves the energy absorption characteristics, but the number of induced holes should not be too much. When there are multiple rows of holes on AL-CFRP tube, the AL-CFRP tube can absorb more collision energy when the induced holes are set at the top end of the tube. Besides, decreasing the diameter of the induced holes from top to bottom can make the process of energy absorption more stable, the energy absorption efficiency higher and the energy absorbed more. However, if the diameter of the induced holes is too large, the energy absorption capacity of the tube will be reduced and the deformation mode will be changed.

Keywords : induced holes ; carbon fiber composites ; hybrid tube ; compression deformation ; energy absorption characteristics

薄壁结构在汽车、飞机等领域的防撞系统中起着重要的作用。近年来,随着该领域对于轻量化和安全性的要求逐渐提高,如何既能增强结构耐撞性

又能进一步降低质量成为专家们关注的焦点。碳纤维增强复合材料(CFRP)凭借其轻质、高比强度、高比模量、强吸能性的特点迅速成为了增强传统金属

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)

通信作者: 甘学辉,博士,教授,主要从事高性能纤维成形理论及装备的研究 E-mail: xuehuig@dhu.edu.cn

收稿日期: 2021-02-02

引用格式: 马其华,王凯,周天俊,等. 诱导孔对 AL-CFRP 混合管轴向压缩变形行为的影响[J]. 工程塑料应用,2021,49(4):53-60.

Ma Qihua, Wang Kai, Zhou Tianjun, et al. The influence of induced holes on deformation behavior of AL-CFRP tube under axial compression[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(4):53-60.

材料的重要材料^[1-2]。由金属与碳纤维复合材料混合制成的薄壁结构结合了两者的优势,兼顾了金属材料稳定的性能和 CFRP 材料轻量化的特点^[3-4]。

研究发现,对金属-碳纤维复合材料混合薄壁结构通过设置合理的结构形式,能够使其以稳定的可控的方式吸能碰撞能量^[5],诱导结构就是其中比较典型的一种方式。诱导结构就是在薄壁结构的适当位置去掉一些材料,产生吸能效应所需的应力集中,由于削弱处刚度降低,发生变形时的碰撞力就会降低,从而实现降低初始峰值力的作用^[6]。同时,合理地设计诱导结构还能够引导薄壁结构发生稳定渐进的破坏模式,提高其耐撞性能。诱导结构的形式多样,常见的有诱导孔、诱导槽、端部倒角等。

在金属-碳纤维复合材料混合结构方面,目前已经做了大量的研究:D. K. Shin 等^[7]、H. C. Kim 等^[8]、Song Hongwei 等^[9]研究了复合材料的铺层角度和壁厚对混合方管和混合圆管的吸能性和抗弯性的影响,结果显示铺层角度和厚度对混合管的性能影响较大。C. Reuter 等^[10]采用试验与数值模拟相结合的方法研究了轴向冲击载荷下 AL-CFRP 混合管的耐撞性,发现混合管比吸能相比纯铝管提升了 37%,同时也达到了轻量化目的。Shi Peilong 等^[11]研究了铝/碳纤维复合钢管在准静态轴向载荷作用下的破碎性能,发现混合管的吸能总量、比吸能和平均载荷均随铺层角度的增大先减小后增大,其中 $[\pm 45^\circ]_n$ 和 $[90^\circ/0^\circ]_n$ 等铺层角度分别表现出最差和最好的耐撞性。

在诱导结构对金属-碳纤维复合材料混合结构吸能性影响的研究方面,李晓南等^[12]建立了复合材料增强铝方管的双层壳单元模型,通过仿真分析发现顶部设置诱导孔比设置 45° 外倒角的诱导形式更能有效改善吸能特性。R. D. Hussein 等^[13-14]在 AL-CFRP 混合方管上设计了单、双 V 型槽口,采用与槽口相契合的特制单、双 V 压头进行轴向压缩试验,结果表明这种诱导结构能有效地降低混合管的初始峰值力,同时增强了吸能性。

综上所述,目前针对完整的金属-碳纤维复合材料混合结构的研究已经相对成熟,但对于在其上添加诱导结构的相关研究并不完善,且大多数研究集中在倒角结构和诱导槽结构,而关于诱导孔结构的研究不多。诱导孔的尺寸、数量、位置及排布形式均对混合管的压溃变形模式和吸能特性具有重要的影响,合理地设计诱导孔结构能够有效地改善金属

-碳纤维复合材料混合结构的耐撞性。笔者建立了 AL-CFRP 混合薄壁圆管的有限元模型,研究其在不同数量、位置和尺寸的诱导孔影响下的轴向压缩变形行为和吸能性能,为诱导结构对金属-碳纤维复合材料混合结构吸能性影响的研究提供参考。

1 混合管建模与试验验证

1.1 试件制备

试验样件采用卷绕成型工艺制备 AL-CFRP 混合管,以 AL 管作为芯模,在其外表面卷绕单向 CFRP 预浸料,由过量的树脂充当黏合剂实现 AL 管和预浸料的胶合,然后将试件真空密封处理并放入烘箱进行固化成型。AL-CFRP 混合管试件的尺寸为:长 100 mm、外直径 43 mm、壁厚 3 mm;其中内部 AL 管的外直径为 40 mm、壁厚 1.5 mm;外部 CFRP 层采用典型的铺层方式 $[45^\circ/-45^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ/45^\circ]$,共十层,每层厚度为 0.15 mm。AL 和 CFRP 材料的性能参数见表 1。

表 1 AL, CFRP 材料性能参数

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	拉伸弹性模量/ GPa	拉伸强度/MPa
AL	2 700	0.33	68.9	215
CFRP	1 518	0.27	123.3(纵向) 7.78(横向)	1 632(纵向) 34(横向)

开孔 AL-CFRP 混合管试验样件参考文献[15]的诱导孔设计,在管长 $l=100$ mm 的 AL-CFRP 混合管上开设四个直径 $d=3$ mm 的诱导孔,四个诱导孔以 90° 的角度间隔分布在距离试件端部 $h=10$ mm 的位置,如图 1 所示。

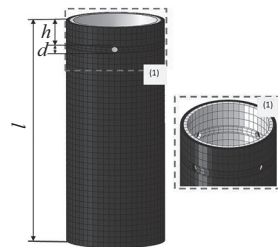


图 1 AL-CFRP 混合管的试验样件示意图

1.2 试验

根据 GB/T 1448-2005,在 WANCE 605A 万能试验机上对试件进行准静态轴向压缩试验,如图 2 所示。将试件轴向放置在试验机的支撑盘中心,通过试验机的压盘给试件施加轴向载荷。实验过程由位移控制,固定压盘下压位移为 60 mm,加载速率设置为 2 mm/min,试件承载过程的载荷-位移曲线由力-位移传感器记录,同时也记录下试件的压

缩变形过程。通过试件的载荷-位移曲线数据可得到试件承载过程中的初始峰值,也能够计算其他的各项吸能评价指标。

选择如下的评价指标,对开孔 AL-CFRP 混合管的吸能特性进行合理的评价:

(1) 初始峰值 ($F_{\max}$): 管件在承载过程中首次达到的最大峰值。

(2) 吸能量 (EA): 管件在承载过程中吸收的总能量,由载荷-位移曲线积分得到。

$$EA = \int_0^{\delta} F(x) dx \quad (1)$$

式中, $F(x)$ 表示瞬时载荷; δ 表示位移量; x 表示总的加载位移。

(3) 压溃效率 (CFE): 管件在承载过程中的平均载荷 (F_{avg}) 和初始峰值 ($F_{\max}$) 的比值,表征吸能过程的稳定性,较高的压溃效率能有效地降低碰撞对车内乘员或零部件的伤害。

$$CFE = \frac{F_{\text{avg}}}{F_{\max}} \quad (2)$$

式中: $F_{\text{avg}} = \frac{EA}{x}$ 。



图2 轴向加载试验

1.3 有限元模型

利用 ABAQUS/Explicit 软件,采用经典层合板理论,建立了开孔 AL-CFRP 混合管试件的轴向压缩有限元模型,如图 3 所示。固定支撑盘的所有自由度,压盘仅能沿轴向向下移动。压盘和支撑盘为刚体,网格大小均为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$; 内部 AL 管采用实体单元 (C3D8R), 外部 CFRP 管采用多层常规壳单元 (S4R), 一层壳单元代表一层碳纤维材料, 其网格大小均为 $2.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$, 共 46344 个网格, 设置单元失效删除; 各层之间由内聚力单元 (CZEs) 连接在一起, CZEs 与其一侧的一层壳共享节点, 而将其节点通过 TIE 绑定到另一侧的壳层上。采用通用接触算法对管与刚性表面以及不同层之间的接触进行建模, 摩擦系数设为 0.2。

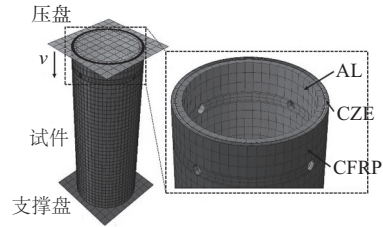


图3 开孔 AL-CFRP 混合管有限元模型

1.4 仿真结果与验证

轴向载荷下,开孔 AL-CFRP 混合管的试验与仿真载荷-位移曲线如图 4 所示。从图 4 可看出,仿真曲线与试验曲线具有相同的曲线走势,拟合程度较高,这说明仿真管件变形过程和试验过程基本一致;初始峰值均在 80 kN 附近,误差仅为 2.91%。

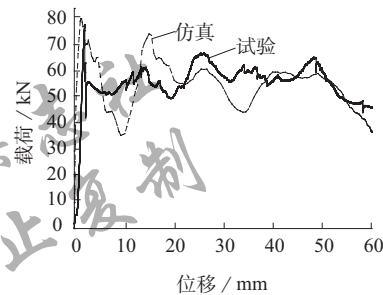


图4 开孔 AL-CFRP 混合管的试验与仿真载荷-位移曲线

如图 5 所示为轴向载荷下,开孔 AL-CFRP 混合管的试验与仿真变形模式对比,两者的起始变形位置一致,都在沿打孔的圆周处;从俯视角度看,内部铝管的最终变形模式一致;从主视角度看,仿真结果没有明显的纤维断裂现象出现,这是因为在仿真软件中输入的 CFRP 参数与其实际力学性能之间存在误差。同时,试验中破坏的纤维不会自动删除,故也无法看到仿真中的手风琴式变形。

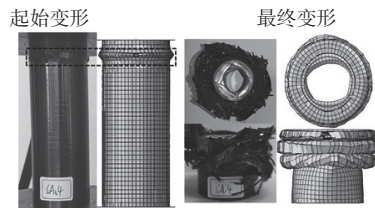


图5 开孔 AL-CFRP 混合管的试验与仿真变形模式

表 2 为 AL-CFRP 混合开孔管的试验与仿真评价指标。

表 2 AL-CFRP 混合开孔管的试验与仿真评价指标

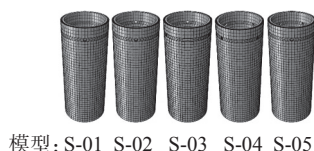
评价指标	试验结果	仿真结果	误差 / %
$F_{\max} / \text{kN}$	78.78	81.07	2.91
$F_{\text{avg}} / \text{kN}$	56.22	55.56	1.17
EA / J	3 373.46	3 333.77	1.18
CFE	0.71	0.69	4.06

从表2试验与仿真的评价指标计算结果来看,试验和仿真各项结果误差均小于5%,证明了仿真结果的可靠性。

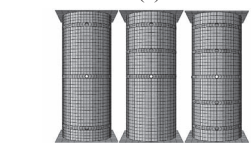
综上所述,笔者建立的有限元模型合理,可用于后续的研究。

2 诱导孔结构设计

图6为开孔AL-CFRP混合管示意图。为了研究诱导孔数量对AL-CFRP混合管的变形模式和吸能特性的影响,如图6a所示,在距离混合管上端面10 mm的位置开设直径为3 mm的五组数量不同的诱导孔,诱导孔数量分别为1,2,3,4,5个,从左至右编号依次为:S-01, S-02, S-03, S-04, S-05。

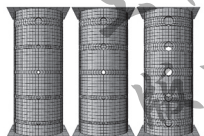


(a)



模型: M-01 M-02 M-03

(b)



模型: M-04 M-05 M-06

(c)

a—诱导孔数量变化; b—诱导孔位置变化; c—诱导孔尺寸变化

图6 开孔AL-CFRP混合管示意图

为研究诱导孔位置对AL-CFRP混合管的变形模式和吸能特性的影响,如图6b所示,王冠等^[15]设计了位置不同的三种诱导孔形式,孔径均为3 mm,第一排诱导孔在距离混合管上端面10 mm的位置开设,从左至右编号依次为:模型M-01,在第一排诱导孔之后每隔40 mm开设一排同样的诱导孔,共三排诱导孔;模型M-02,在第一排诱导孔之后每隔20 mm开设一排同样的诱导孔,共三排诱导孔;模型M-03,在第一排诱导孔之后每隔20 mm开设一排同样的诱导孔,共五排诱导孔。

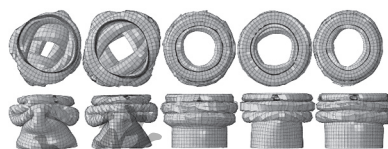
为研究诱导孔尺寸对AL-CFRP混合管的变形模式与吸能特性的影响,如图6c所示,王冠等^[15]设计了尺寸不同的三种诱导孔形式,第一排诱导孔在距离混合管上端面10 mm的位置开设,从左至右编

号依次为:模型M-04,第一排诱导孔直径为6 mm,随后每隔20 mm开设一排孔径均为3 mm的诱导孔,共五排诱导孔;模型M-05,第一排诱导孔直径为6 mm,随后每隔20 mm开设一排诱导孔,孔径依次递减为5,4,3,2 mm,共五排诱导孔;模型M-06,第一排诱导孔直径为8 mm,随后每隔20 mm开设一排诱导孔,孔径依次递减为7.5,7,6.5,6 mm,共五排诱导孔。

3 结果与分析

3.1 诱导孔数量的影响

图7为五组诱导孔数量不同的开孔AL-CFRP混合管的变形结果。

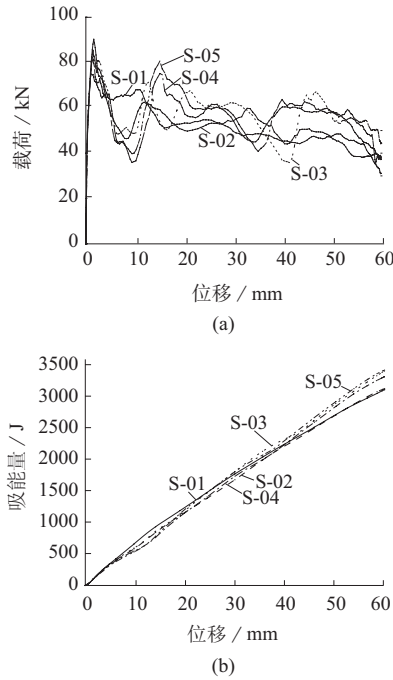


模型: S-01 S-02 S-03 S-04 S-05

图7 诱导孔数量不同的开孔AL-CFRP混合管的变形模式

从图7可以看出,五组模型的变形过程均为渐进过程,没有出现屈曲的变形模式。随着开孔数量增加,AL-CFRP混合管的变形模式也逐渐由金刚石模式转变为稳定的手风琴模式。在变形前期,诱导孔对开孔AL-CFRP混合管有局部刚度弱化的作用,故初期五组模型均在开孔处首先变形,并逐渐被压缩成圆环状。不同的是,S-01形成的是不规则的椭圆环形状,而随着诱导孔数量增加,圆环形状逐渐趋于规则、圆润的正圆。这是因为单个开孔会引起开孔处的周向受力不均匀,更多的应力集中在局部弱化的单开孔处,造成不规则的变形;而沿周向均匀分布的诱导孔数量增多,受力也就越均匀,变形模式自然更加规则。

图8为五组诱导孔数量不同的开孔AL-CFRP混合管的载荷与吸能的变化曲线。从图8a可以看出,S-01模型的载荷曲线走势一直向下,载荷水平最低,吸能力最差;其他模型曲线均有不同程度的波动,其中S-04和S-05的曲线载荷水平最高,其吸能力最好。五组模型的初始峰值随着孔数增加而降低,单孔模型的峰值最高为90.25 kN,五孔模型的峰值最低为74.89 kN;低初始峰值将有益于降低碰撞初期对乘员或零部件的伤害。但是需要注意的是,S-05中五个孔的弱化作用大幅度降低了初始峰值,使得第二峰值(80.66 kN)高于了初始峰值



a—载荷—位移曲线; b—吸能量—位移曲线

图 8 诱导孔数量不同的开孔 AL-CFRP 混合管载荷、吸能变化曲线 (74.89 kN), 略高的第二峰值在碰撞过程中有可能造成乘员或零部件二次伤害, 应该避免这种情况出现。

在图 8b 的吸能变化曲线图中可以发现, 诱导孔数量的不同将会影响 AL-CFRP 混合管的吸能性能, 其吸能性能随诱导孔数量的增加而逐渐增多。表 3 中的评价指标计算结果直观表明, 随着诱导孔数量增多, AL-CFRP 混合管的初始峰值载荷降低、吸能总量增多、压溃效率增大, 即 AL-CFRP 混合管的吸能性能逐渐增强。

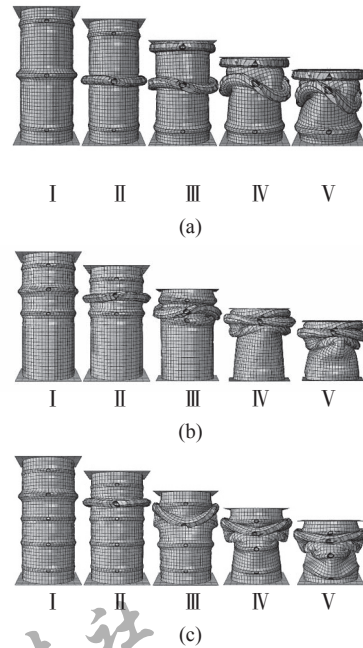
表 3 诱导孔数量不同的开孔 AL-CFRP 混合管的评价指标

模型	$F_{\max}/\text{kN}$	F_{avg}/kN	EA/J	CFE
S-01	90.25	52.16	3 129.37	0.58
S-02	85.46	52.47	3 148.39	0.61
S-03	82.29	57.10	3 425.78	0.69
S-04	81.07	55.56	3 333.77	0.69
S-05	74.89	57.41	3 444.40	0.77

3.2 诱导孔位置的影响

通过前五组仿真结果可以发现, 随着诱导孔数量增多, AL-CFRP 混合管的吸能性能逐渐增强。根据这一现象和上述对比分析, 选择采用四个诱导孔的形式进行接下来的研究。

图 9 为三组诱导孔位置不同的开孔 AL-CFRP 混合管变形过程。从图 9 可以看出, 在管壁上开设诱导孔, 削弱了此处的刚度, 形成了对此处的弱化效应, 故三组模型均从开孔处最先产生了变形褶皱, 表



a—M-01 变形模式; b—M-02 变形模式; c—M-03 变形模式

图 9 诱导孔位置不同的开孔 AL-CFRP 混合管的变形模式

明了诱导孔的存在具有诱导 AL-CFRP 混合管起始变形位置的作用。最终, 模型 M-01 和 M-02 为混合变形模式, 模型 M-03 为金刚石变形模式。

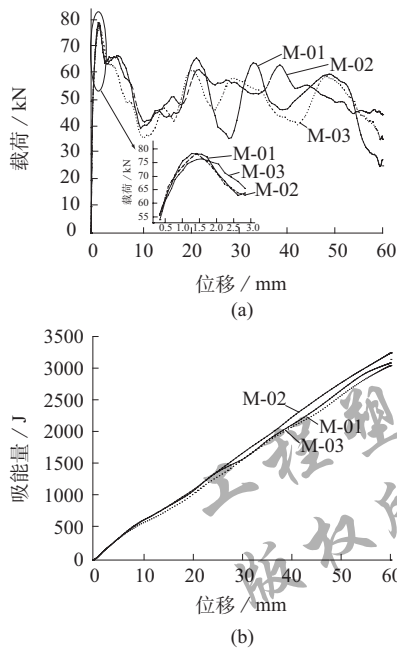
对比 M-01 和 M-02, 两组模型均有位置不同的三排孔, 其中 M-01 的三排孔均匀分布在管壁, M-02 的三排孔均匀分布在管件上端部。两组模型均在三排孔的中间开始发生变形, 随着加载逐渐形成一个圆环, 随后第一排孔也开始变形并逐渐形成了圆环。其中, M-02 的三排孔分布在管件上端且间距较窄, 故具有更加稳定的结构, 同时管件下端没有孔, 故呈现了上下不同的两种变形模式, 上端为手风琴模式变形, 下端为金刚石模式变形。而 M-01 的三排孔间距较大, 中间形成的圆环被过度压缩, 逐渐演变成左右扭曲的形状, 同时诱导孔中间的管壁发生一侧内凹、一侧外凸的变形, 并最终变成金刚石模式。

对比 M-02 和 M-03, 在变形前期, 两组模型在管件端部结构相同, 故均在第二排孔处先发生变形并逐渐形成圆环。不同的是, 由于 M-02 的诱导孔只分布在上端部, 故管件上端刚度小于下端, 所以继第一个圆环形成之后, 在刚度较弱的第一排孔处也逐渐变形并形成第二个圆环, 随着加载继续, 在第三排孔处开始以金刚石模式发生变形, 最终形成混合变形模式; 而 M-03 的诱导孔均布管壁, 上下端弱化

后的刚度一致,故从开始便在第一个圆环的基础上,随着加载的继续逐渐演变成金刚石变形模式,并持续到加载结束。

对比 M-01 和 M-03,两组模型以不同的孔间距均布在管壁上。而具有更小间距的 M-03 在结构上更加的稳定,使管件整体上的刚度分布均匀,故在载荷作用下能形成均匀的褶皱,使 M-03 发生渐进、稳定的金刚石变形模式。

图 10 为三组诱导孔位置不同的开孔 AL-CFRP 混合管的载荷与吸能的变化曲线。



a—载荷—位移曲线;b—吸能量—位移曲线

图 10 诱导孔位置不同的开孔 AL-CFRP 混合管载荷、吸能变化曲线

从图 10a 可以看出,三组模型的初始峰值接近,M-03 模型的诱导孔的分布位置较广,其故峰值略低一点。三组模型前期均形成了一个完整的圆环褶皱,随着加载继续,在曲线到达第二个峰值后,模型呈现了不同的变形模式,故曲线趋势也随之发生相应变化。其中 M-02 的变形模式使相对稳定的混合模式,故曲线表现出较高的载荷水平。如图 10b 所示,M-02 也吸收了更多的能量。表 4 为诱导孔位置不同的开孔 AL-CFRP 混合管的评价指标。在表 4 的评价指标数据中,M-02 的平均载荷、吸能总量和压溃效率均最高,分别为 54.24 kN,3 254.27 J 和 0.68。

表 4 诱导孔位置不同的开孔 AL-CFRP 混合管的评价指标

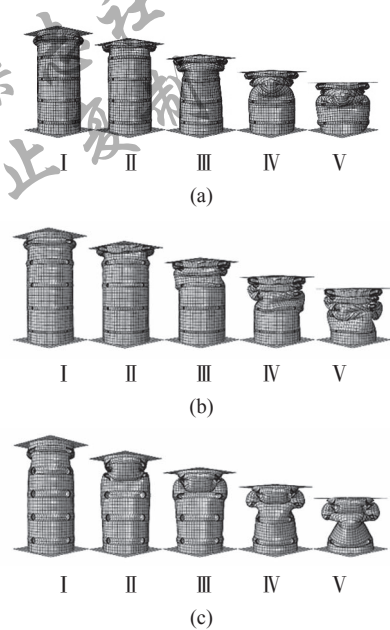
模型	$F_{\max}/\text{kN}$	F_{avg}/kN	EA/J	CFE
M-01	79.80	51.58	3 094.81	0.65
M-02	79.80	54.24	3 254.27	0.68
M-03	77.82	50.91	3 054.43	0.65

由以上仿真结果可以看出,诱导孔位置的不同对 AL-CFRP 混合管的变形模式有较大的影响,同时,为了能够吸收更多的碰撞载荷,应该将诱导孔尽可能的开设在管件的端部。

3.3 诱导孔尺寸的影响

通过前三组仿真结果可以发现,上端部开设诱导孔的 AL-CFRP 混合管能够发生相对稳定的变形模式,并吸收最多的能量。可以看出上端部有诱导孔、下端部无诱导孔(无诱导孔可以理解诱导孔径为 0 mm),这种诱导孔尺寸的变化可以对 AL-CFRP 混合管起到不同的弱化效果,从而诱导结构产生相对稳定的变形模式。针对这一现象,设计了诱导孔尺寸从上到下依次减小的三组模型。

图 11 为三组诱导孔尺寸不同的开孔 AL-CFRP 混合管的变形过程。



a—M-04 变形模式;b—M-05 变形模式;c—M-06 变形模式

图 11 诱导孔尺寸不同的开孔 AL-CFRP 混合管的变形模式

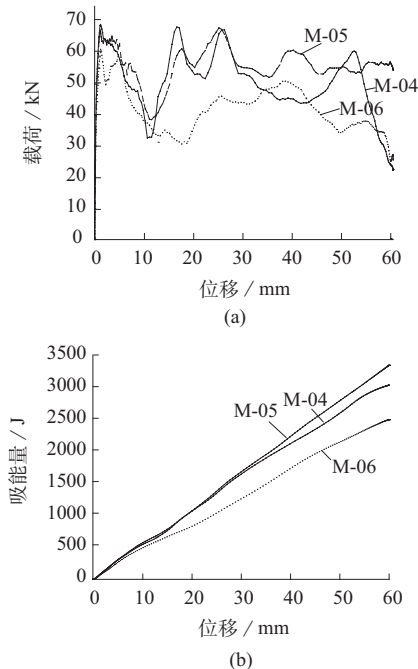
从图 11 中可以看出,由于第一排诱导孔直径较大,此处刚度相对较低,弱化效果更明显,应力也更容易集中,故在加载初期只在此处发生大变形,并不像前三组模型中每排孔都有明显的变形褶皱。最终,模型 M-04 和 M-05 为混合变形模式,模型 M-06 为金刚石变形模式。

对比 M-04 和 M-05,两组模型的变形过程基本一致,两者的第一排诱导孔尺寸相同且都为最大直径,在压缩初期的变形均发生在第一排孔处,管壁被压缩形成一个圆环。但两组模型的孔径变化规律不同,使得 M-05 的变形过程更加稳定,两排诱导孔中

间的管壁一侧内凹、一侧外凸,形成了对称的褶皱;虽然 M-04 呈现同样的变形模式,但褶皱产生位置并不受下边诱导孔的影响,没有稳定地发生在两排诱导孔之间。

对比 M-05 和 M-06,两组模型诱导孔尺寸变化规律相同,但 M-06 的每排诱导孔尺寸较大且梯度变化程度较小。大尺寸诱导孔极大弱化了 M-06 上开孔处的界面刚度,降低了其承载能力,使得在加载初期 M-06 不再形成圆环,而是直接形成了与 M-05 同样且完全对称的褶皱,并随着持续加载而向下逐层叠缩变形。

图 12 为三组诱导孔尺寸不同的开孔 AL-CFRP 混合管的载荷与吸能的变化曲线。从图 12 中可以明显看出 M-06 曲线的载荷水平最低,故其吸能能力也最差。M-04 和 M-05 的载荷曲线在压缩过程前 30 mm 内趋势基本一致, M-05 的第二排孔径大于 M-04,故其第二个峰值略低于 M-04; 30 mm 后的压缩过程,梯度变化的混合管 M-05 呈现处较高的载荷水平。结合图 12b,压缩进行到 30 mm 后, M-05 的吸能量明显与 M-04 拉开差距。在表 5 的评价指标数据中, M-05 的初始峰值最低、吸能总量最大、压溃效率最高,分别为 67.34 kN, 3 352.98 J, 0.83。由以上仿真结果可以看出,诱导孔尺寸的不同对 AL-CFRP 混合管的变形模式也有较大的影响,诱导孔尺寸从上往下依次降低使得 AL-CFRP



a—载荷—位移曲线;b—吸能量—位移曲线

图 12 诱导孔尺寸不同的开孔 AL-CFRP 混合管载荷、吸能变化曲线

混合管的吸能过程更加稳定,吸能效率更高,吸收的能量也越多。但是,诱导孔的尺寸也不能过大,大尺寸的诱导孔大幅度的降低管件的承载能力,同时改变管件的变形模式,降低其吸能能力。因此,需要合理的设计诱导孔尺寸的依次变化规律。

表 5 诱导孔位置不同的开孔 AL-CFRP 混合管的评价指标

模型	$F_{\max}/\text{kN}$	F_{avg}/kN	EA/J	CFE
M-04	69.13	50.67	3 040.09	0.73
M-05	67.34	55.88	3 352.98	0.83
M-06	61.14	41.67	2 500.01	0.68

另外,薄壁管件的压溃效率代表着在发生碰撞时管件承载过程的稳定性,综合对比诱导孔位置和尺寸变化对 AL-CFRP 混合管的影响发现,当诱导孔尺寸依次降低时,三组模型的压溃效率均高于其它三组不同诱导孔位置的模型,表明了 AL-CFRP 混合管上开设孔径从上往下依次降低的诱导孔,可以让混合管的吸能过程更加稳定,有益于降低碰撞对乘员或零部件的直接伤害。

4 结论

(1) 单排诱导孔的设计中, AL-CFRP 混合管的变形模式与吸能性能随孔数量的变化而变化,对诱导孔孔数进行合理的设计能使混合管发生稳定的手风琴式变形模式、降低初始峰值、增大吸能总量和压溃效率,即提高了混合管的变形过程与吸能过程的稳定性。

(2) 多排诱导孔的位置设计中,将诱导孔尽可能地开设在管件的端部能够使 AL-CFRP 混合管吸收更多的碰撞能量。

(3) 多排诱导孔的尺寸设计中,诱导孔尺寸从上往下依次降低使得 AL-CFRP 混合管的吸能过程更加稳定,吸能效率更高,吸收的能量也越多,但过大的诱导孔尺寸将大幅度的降低管件的承载能力,同时改变管件的变形模式,降低其吸能能力。

参考文献

- [1] 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, Wang Kai, Gan Xuehui, et al. Research progress of metal/carbon fiber composites reinforced mixed thin-walled pipe[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(8):128-134.
- [2] 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.

- [3] 崔政梁,刘强,赖丽萍. 碳纤维缠绕复合铝圆管轴向压溃力学性能研究[J]. 复合材料科学与工程,2020(2):5-9.
Cui Zhengliang, Liu Qiang, Lai Liping. Experimental investigation on the mechanical properties of the cfrp filament winding hybrid tubes under axial crushing [J]. Composites Science and Engineering, 2020(2):5-9.
- [4] 孙佳睿,马其华,甘学辉,等. 纤维缠绕角度对CFRP-Al混合圆管横向受载性能影响[J]. 宇航材料工艺,2019,49(6):76-81+90.
Sun Jiarui, Ma Qihua, Gan Xuehui, et al. Effect of filament winding angle on bending performance of cfrp-al circular tube[J]. Aerospace Materials & Technology, 2019, 49(6):76-81, 90.
- [5] 黄建城. 含薄弱环节复合材料圆管轴向吸能特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
Huang Jiancheng. On the axial energy absorption behaviour of composite tubes with crush triggers[D]. Nanjing :Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [6] 周宇,雷正保,杨兆. 基于预变形控制理论的汽车前纵梁仿真设计[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2005(4):34-38.
Zhou Yu, Lei Zhengbao, Yang Zhao. Simulative design of automobile's front rails based on the pre-distortion control theory[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology: Natural Science, 2005(4):34-38.
- [7] Shin D K, Kim H C, Lee J J. Numerical analysis of the damage behavior of an aluminum / CFRP hybrid beam under three point bending [J]. Composites Part B, 2014, 56:397-407.
- [8] 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(6):1-10.
- [9] 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.
- [10] Reuter C, Tröster T. Crashworthiness and numerical simulation of hybrid aluminium-CFRP tubes under axial impact[J]. Thin Walled Structures, 2017, 117(8):1-9.
- [11] Shi Peilong, Yu Qiang, Huang Rong, et al. Crashworthy and performance-cost characteristics of aluminum-CFRP hybrid tubes under quasi-static axial loading[J]. 2019, 20(2):384-397.
- [12] 李晓南,牟浩蕾,周建,等. 复合材料增强铝方管耐撞性数值模拟[J]. 航空材料学报, 2016, 36(2):56-64.
Li Xiaonan, Mou Haolei, Zhou Jian, et al. Numerical study on crashworthiness of aluminum-composite square hybrid tubes[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(2):56-64.
- [13] Hussein R D, Ruan D, Lu G, et al. An energy dissipating mechanism for crushing square aluminium / CFRP tubes [J]. Composite Structures, 2018, 183(1):643-653.
- [14] Hussein R D, Ruan D, Lu G. Cutting and crushing of square aluminium / CFRP tubes[J]. Composite Structures, 2017, 171(7):403-418.
- [15] 王冠,刘志文,徐从昌,等. 诱导孔对铝合金薄壁梁轴向压缩变形行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(3):494-506.
Wang Guan, Liu Zhiwen, Xu Congchang, et al. Effect of cut-outs on axial collapse behaviors of aluminum with thin-walled structure [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(3):494-506.
-
- (上接第 33 页)
- dified by a nitrogen-phosphorous reacting flame retardant[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2016. doi:10.1002/APP.43538.
- [23] 吕文晏,崔益华,张绪杰,等. 反应性 P-N 膨胀阻燃剂化学阻燃尼龙 66 的研究[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(7):20-24.
Lyu Wenyan, Cui Yihua, Zhang Xujie, et al. Study of chemical flame retardancy PA66 with a reaction P-N intumescent flame retardant[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(7):20-24.
- [24] 吕文晏,崔益华,张绪杰,等. 双酚 A 型 2,2-对氨基苯甲酸苯基氧化膦本质阻燃 PA66[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(5):760-766.
Lyu Wenyan, Cui Yihua, Zhang Xujie, et al. Essential flame retardancy PA66 polymerized with 2,2-(amino acid-phenyl phosphine oxide)propane[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 47(5):760-766.
- [25] 辛金菲. 共聚改性阻燃尼龙的合成与性能研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2014:1-63.
Xin Jinfei. Synthesis and properties of flame-retarded nylon modified by copolymerization[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2014:1-63.
- [26] Zhang Chen, Huang Junyi, Liu Shumei, et al. The synthesis and properties of a reactive flame-retardant unsaturated polyester resin from a phosphorus-containing diacid[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2011, 22(12):1 768-1 777.
- [27] 陈文华,闵利珍,华正坤,等. 硼酸锌对氮磷协效阻燃玻纤增强尼龙 66 性能的影响[J]. 工程塑料应用. 2017, 45(5):14-18.
Chen Wenhua, Min Lizhen, Hua Zhengkun, et al. Influences of ZB on properties of nitrogen-phosphorus synergistic flame retardant gf reinforced PA66[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(5):14-18.