吴鹏¹, 鲍海英^{2*}, 李爱群^{3,4}

(1.东南大学建筑设计研究院有限公司,南京 210096; 2.安徽工业大学 建筑工程学院,安徽 马鞍山 243002; 3.东南大学 土木工程学院,南京 210096; 4.北京建筑大学 土木与交通工程学院,北京 100044)

摘要:目的 研究截面构型及几何参数对泡沫铝夹芯双管结构在横向载荷作用下变形失效机制和吸能性能的影响。方法 运用有限元软件 Abaqus/Explicit 对泡沫铝夹芯双管构件受横向载荷作用进行数值仿真分析。结果 泡沫铝夹芯双管构件在横向压缩过程中表现出 3 个阶段:初始压缩阶段、塑性变形阶段和 致密化阶段,并发现外方内圆双管夹芯结构的耐撞性能显著强于双方管夹芯结构。随着外管径的增大、 内管径的减小,外方内圆双管夹芯结构的承载力和吸能能力越高;内管壁厚的增加使外方内圆双管夹芯 结构的能量吸收、比吸能、平均压溃载荷和压溃力效率均表现出增大趋势。结论 泡沫铝芯材的变形失 效模式受内管截面形状的影响,与传统双方管夹芯结构相比,外方内圆双管夹芯结构是一种更优秀的吸 能构件,在横向碰撞安全防护中展现出更大的应用潜力。通过增加内外管间距和内管壁厚,可以提高外 方内圆双管夹芯结构的吸能性能。

关键词:泡沫铝;夹芯双管;横向压缩;吸能性能;数值模拟

中图分类号: TB485.1; O347 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)23-0293-09 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.23.035

Energy Absorption Performance of Aluminum Foam Sandwiched Double-tube under Transverse Compression

WU Peng¹, BAO Hai-ying^{2*}, LI Ai-qun^{3,4}

(1. Southeast University Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210096, China;

2. School of Architecture and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China;

3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 4. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Architecture, Beijing 100044, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effects of section configuration and geometric parameters on the deformation mechanism and energy absorption performance of aluminum foam sandwiched double-tube under transverse load. Finite element software Abaqus/Explicit was used to carry out numerical simulation on the aluminum foam sandwiched double-tube under transverse load. The aluminum foam sandwiched double-tube exhibited three stages in the process of transverse compression, namely, the initial compression stage, the plastic deformation stage, and the densification stage. It was also found that the crashworthiness of a novel aluminum foam sandwiched double-tube structure. As the outer tube diameter increased and the inner tube diameter decreased, the load-bearing capacity and energy absorption capacity of the novel aluminum foam sandwiched double-tube increased. The increase in wall thickness of the inner tube resulted in an increasing trend in energy absorption, specific energy absorption, average crushing load, and crushing force efficiency. The

收稿日期: 2023-05-22

基金项目:安徽工业大学校自然基金青年项目(QZ202211)

deformation failure mode of aluminum foam core material is affected by the section shape of the inner tube. Compared with the traditional double square tube structure, the novel sandwiched double-tube is a better energy-absorbing component, which shows greater application potential in the safety protection of lateral collision. By increasing the tance between the inner and outer tubes and the wall thickness of the inner tube, the energy absorption performance of the novel sandwiched double-tube can be improved.

KEY WORDS: aluminum foam; sandwiched double-tube; transverse compression; energy absorption performance; numerical simulation

薄壁金属管结构具有比刚度和比强度高的优点, 在压缩过程中可以吸收大量的动能并将其转化为塑 性应变能^[1],常作为吸能元件应用于汽车、航空航天、 交通等领域,但存在易发生欧拉屈曲失稳、非轴向承 载能力差等问题。作为一种新型吸能材料,泡沫铝具 有低密度、阻尼性能好、吸能效果稳定等优点,在减 振、抗冲击及吸能方面有着优异的性能表现。将泡沫 铝与薄壁金属管结构相结合,制备出泡沫铝填充管复 合结构,可以在不明显增加总质量的同时大幅提高构 件承载能力和能量吸收性能,具有显著的工程应用价 值,得到越来越多学者的关注。

研究表明,在轴向压溃变形过程中,薄壁管结构与泡沫铝两者之间的相互作用使得复合结构的轴向平均压溃载荷远大于单独压溃薄壁管结构和泡沫铝的平均压溃载荷之和,且其能量吸收能力也显著增强^[2-5]。与泡沫铝填充单管相比,泡沫铝填充多管展示出更好的轴向吸能性能。张勇等^[6-7]对泡沫铝填充双方管的轴向压溃性能开展了研究,结果表明,与泡沫铝填充单管及空心双管相比,填充双管结构展示了更强的耐撞性能。Cenk等^[8]研究了轴向冲击作用下泡沫铝填充单圆波纹管及双圆波纹管的吸能特性,发现泡沫铝填充和圆波纹管的比吸能值最高。 Manmohan等^[9]研究发现,对于圆管和方管2种构型截面,泡沫铝填充双管结构的能量吸收能力较泡沫铝填充单管结构均更优秀。

然而,在实际使用过程中,吸能结构所受荷载的 方向具有随机性,除了轴向荷载外,还不可避免地受 到横向荷载的作用。因泡沫铝填充管结构在横向方向 上的受力情况与轴向完全不同,学者对其在横向方向 上的压缩性能也进行了研究。康建功等^[10]开展了泡沫 铝填充钢管的横向压缩试验,发现对比空管、填充管 的侧向承载能力和吸能能力都有显著的提高。黄志 超等^[11]研究了横向冲击载荷下泡沫铝填充薄壁金属 圆管的吸能性能,与空管相比,泡沫铝填充管的冲 击载荷、总吸能及比吸能显著增大。Yin等^[12]通过试 验和数值仿真发现,在横向冲击作用下,泡沫铝填 充多管结构在多数情况下都较单管结构表现更好。 Shen等^[13]对泡沫铝夹芯双圆管结构进行了横向压缩 性能研究,试验中观察到3种失效模式,得到了渐进 的倒塌过程和载荷-位移曲线,并发现夹芯管的能量 吸收能力大于单独内管、外管和芯层吸能之和。刘志 芳等^[14-15]通过数值模拟的方法研究了泡沫铝夹芯双 圆管结构在横向冲击载荷下的变形模式和吸能性能, 讨论了几何参数、泡沫铝的相对密度、冲击速度及横 向约束等对其力学行为的影响。于学会等^[16]对受"V 型"约束泡沫铝夹芯双圆管的准静态横压性能进行了 实验研究,发现夹芯管的承载和吸能能力随外管直径 的增加、内管直径的减小及约束夹角的增大而增加。

综上所述,与薄壁管结构相比,泡沫铝填充管结构综合了泡沫铝与薄壁管的优点,不仅有较高的承载能力,还具有良好的能量吸收特性,且夹芯双管结构 相对单管填充结构普遍具有更高的吸能性能。但目前 有关泡沫铝夹芯双管结构在横向压缩载荷下的吸能 性能研究主要集中于泡沫铝夹芯双圆管结构,对其他 截面构型的夹芯双管结构鲜有报道。单一的泡沫铝夹 芯双圆管结构难以满足不同应用场景的需求,故有必 要对其他截面构型的泡沫铝夹芯双管构件在横向压 缩载荷下的吸能特性进行研究。本文对外方内方的泡 沫铝夹芯双管结构和外方内圆的泡沫铝夹芯双管结 构的横向吸能过程进行分析,并讨论几何参数(内、 外管径和内、外管壁厚)对外方内圆双管夹芯结构耐 撞性的影响。

1 数值模拟及验证

1.1 有限元模型的建立

采用有限元软件 Abaqus/Explicit 模拟泡沫铝夹 芯双管构件在横向压缩载荷作用下的加载过程。图 1 为建立的泡沫铝夹芯双铝管试件的有限元仿真模型。 薄壁铝管采用 S4R 单元,材料模型为弹塑性模型, 模型参数采用文献[17]中铝材室温拉伸试验结果,其 中真实应力-塑性应变曲线如图 2 所示。泡沫铝采用 C3D8R 单元,材料模型选择可压扁泡沫材料 (Crushable Foam),应力-应变曲线选用文献[18]中准 静态压缩作用下的泡沫铝试验的关系曲线,如图 3 所 示。本文仅进行准静态压缩的有限元模拟研究,因而 材料模型中不考虑应变率效应。泡沫铝夹芯双管构件 放置于 2 个刚性板之间,刚性板使用离散刚体 (Discrete Rigid)模拟,支撑刚性板完全固定,加载 刚性板仅保留 y 轴方向(竖向)平动自由度。采用通 用接触(General Contact)来定义计算过程中所有可能的接触,接触的切向行为为罚函数形式的摩擦接触,摩擦因数为0.25,接触的法向行为采用硬接触。加载刚性板上需要施加一定的速度使其向下压缩构件,为减小加载速率不连续引起的波动,选择Smooth-Step幅值曲线对加载刚性板施加速度,速度-时程曲线如图4所示。这里幅值曲线中的v设置为1m/s,以提高计算效率。



图 1 泡沫铝夹芯双管构件的有限元模拟 Fig.1 Finite element simulation of aluminum foam sandwiched double-tube







本文研究了截面形状,内、外管径以及内、外管 壁厚对泡沫铝夹芯双管构件吸能性能的影响,试件参 数如表1所示。表1中 SSCT 表示夹芯双管的内、外

表 1 试件参数 Tab.1 Specimen parameters

试件编号	外管径(D _o)/mm	外管壁厚(T _o)/mm	内管径(D _i)/mm	内管壁厚(T _i)/mm	试件质量(<i>m</i>)/g
SSCT	50	1.3	30	1	102.5
SCCT-01	40	1.3	30	1	69.6
SCCT-02	50	1.3	30	1	104.9
SCCT-03	60	1.3	30	1	146.6
SCCT-04	70	1.3	30	1	194.6
SCCT-05	50	1.3	25	1	109.3
SCCT-06	50	1.3	35	1	99.3
SCCT-07	50	1.3	40	1	92.4
SCCT-08	50	0.8	30	1	92.3
SCCT-09	50	1.8	30	1	117.6
SCCT-10	50	2.3	30	1	130.4
SCCT-11	50	1.3	30	0.5	97.3
SCCT-12	50	1.3	30	1.5	112.4
SCCT-13	50	1.3	30	2	120.0

管均为方形铝管, SCCT 表示夹芯双管的外管为方形 铝管,内管为圆形铝管; *D*。为试件外管边长,*D*_i为 内管边长(方管)或直径(圆管); *T*。为外管壁厚, *T*_i为内管壁厚,所有试件的长度 *L* 均为 50 mm。

1.2 有限元模型及验证

为验证本文数值仿真的可靠性,对文献[17]在横 向压溃作用下薄壁方铝管试验和泡沫铝填充方铝管 试验进行了数值模拟。试验中的薄壁方管材料型号为 铝合金 T6063-T6,其弹性模量 *E*=56.28 GPa, 泊松比 ν=0.254,初始屈服应力 σ_y=181.66 MPa, 铝合金材料 塑性段的本构曲线如图 2 所示。试验中的泡沫铝密度 ρ=450 kg/m³,弹性模量 *E*=65 MPa,塑性泊松比为 ν_p=0.05,压缩屈服应力比α=1.643,屈服应力σ_y=6.95 MPa, 泡沫铝材料的应力-应变曲线如图 3 所示。对于泡沫铝填 充管构件,泡沫铝直接放入薄壁方管中,两者之间的界 面不做连接处理,利用万能试验机开展薄壁方管及泡 沫铝填充薄壁管试件的准静态横向压溃试验。试验曲 线由加载设备内置的力和位移传感器采集获得,用数 码相机记录加载试件的变形过程。

薄壁方铝管试件的几何尺寸:管的外边长 D=50 mm, 长度 L=50 mm,壁厚 t=1.3 mm,试验加载速率为4 mm/min。 图 6a 显示了方管横向压缩的有限元模型,模型的几何参 数设计与试验试样同步,采用 smooth-step 幅值曲线 施加速度。为了提高计算效率,将幅值曲线中的 v 设 置为 1 m/s。采用通用接触定义加载过程中所有可能 的接触,接触的切向行为为罚函数形式的摩擦接触, 摩擦因数为 0.25,接触的法向行为采用硬接触,网格 大小为 1 mm。方管横向压缩载荷-位移曲线的模拟结 果与试验结果如图 5a 所示。在上述薄壁方管的基础 上,泡沫铝填充方管试件中填充密度为 450 kg/m³的 泡沫铝,其余参数与方管保持一致。图 5b 为所得载 荷-位移曲线的数值模拟结果与试验结果的比较。

通过数值模拟得到的方管力-位移曲线和试验结 果基本吻合,初始峰值相差 8.82%左右,平台变化趋 势及平台段载荷值也相差不大,在可接受的范围内。 在整个加载过程中,总动能与总内能的比值都小于 5%。横向压缩泡沫铝填充方管的数值模拟与试验结 果吻合较好,两者曲线变化趋势及平台段载荷值基本 保持一致。此次有限元模拟的计算精度较高,符合数 值模拟计算要求。

2种试件试验变形与有限元模拟变形的对比如图 6 所示。由有限元模拟变形图可以看出,泡沫铝的填充使 空心方管的变形失效模式由"哑铃"形转变为两边凸起、 中间上下平行的"跑道"形,符合试验的变形模式。

综上所述,采用以上方法建立的有限元模型是可 靠的,可以进行下一步的分析。

2 结果与分析

2.1 吸能指标

本文采用能量吸收(*E*_{EA})、比吸能(*E*_{SEA})、平 均压溃载荷(*F*_m)以及压溃力效率(*E*_{CFE})4个指标 来定量评估泡沫铝夹芯双管构件在横向载荷作用下 的耐撞性。



Fig.5 Comparison of numerical simulation and experimental load-displacement curves



图 6 风湿 习候报的压缩变形过程对比 Fig.6 Comparison of compression deformation processes between experiment and simulation

能量吸收 E_{EA} 定义为结构在压缩行程内吸收的 能量, 定义为:

$$E_{\rm EA} = \int_{0}^{U} F \mathrm{d}u \tag{1}$$

式中: F 为结构承载力; u 为加载位移; U 为结 构的压缩行程,为便于对比不同结构间的能量吸收, 设其值为夹芯管外管边长的 50%。

比吸能 E_{SEA} 定义为单位质量的能量吸收,即:

$$E_{\rm SEA} = \frac{EA}{m} \tag{2}$$

S, Mises

(Avg: 75%)

Node: 502

S, Mises

Node: 3995

Node: 9953

式中:m为结构的总质量。ESEA越大表明结构的 能量吸收效率越高。

平均压溃载荷 F_m可由式(3) 计算。



$$F_{\rm m} = \frac{\int_0^U F \mathrm{d}u}{U} \tag{3}$$

压溃力效率 ECFE 为平均压溃载荷与峰值载荷 (F_{PCF}) 的比值。 E_{CFE} 值越大,峰值载荷与平均压溃 载荷之间的差异越小,表明压溃过程中构件的载荷波 动性较小,理想的吸能构件 ECFE 应为 1,其表达式为:

$$E_{\rm CFE} = \frac{F_{\rm m}}{F_{\rm PCF}} \tag{4}$$

2.2 截面形状影响分析

横向压缩作用下, SSCT 和 SCCT-02 构件的变形 过程如图7所示。由图7可知,2种不同截面构型的

S, Mises



Fig.7 Simulation of deformation process of aluminum foam sandwiched double-tube under transverse compression

夹芯双管构件外管的变形失效模式与泡沫铝填充单 管构件外管的横压变形模式类似。内管的截面形状影 响泡沫铝芯材的变形失效模式,方形内管的变形失效 模式与空心方管的变形失效模式类似,圆形内管的变 形失效模式与空心圆管的变形失效模式^[13]类似。在塑 性变形阶段,2种类型的夹芯双管内外管壁和芯材同 时发生变形。对于 SCCT-02 构件,压头下方区域的 芯材发生了压溃变形(图中虚线圈所标记),而在 SSCT 构件中,泡沫铝芯材未见明显的压溃现象。

2种不同截面形状的泡沫铝夹芯双管构件在横向 压缩作用下的载荷-位移曲线如图 8 所示。整个压缩 过程基本可分为3个阶段:第1阶段为压缩变形的初 始阶段,在此阶段卸载,结构的变形基本可以恢复; 第2阶段为塑性变形阶段,内外管和芯材一起发生变 形;第3阶段为致密化阶段,内管壁被压实,泡沫铝 芯材开始进入密实阶段。在初始变形阶段,2种夹芯 双管构件的压缩曲线基本重合,说明此阶段主要由外 管控制。进入塑性阶段后, SSCT 构件的载荷随加载 位移的增大先迅速减小后趋于平缓。SCCT-02 构件的 承载能力显著大于 SSCT 构件的, 且其载荷变化幅度 明显小于 SSCT 构件。说明相较于外方内方的泡沫铝 夹芯双管构件,外方内圆的泡沫铝夹芯双管构件是一 种更优秀的吸能构件。造成这种现象的原因可能在 于,在横向压缩作用下,塑性阶段的圆管发生硬化现象, 方管发生软化现象,两者展示出不同的变化趋势^[19]; 对于这2种类型的夹芯双管构件,圆形内管和芯材的 接触面积更大(如图7所示),相互作用更强。继续 增加压头位移,芯材进入密实阶段,内管壁发生自接 触,2种类型构件的载荷随位移增大均迅速增加。

如图 9 所示, SCCT-02 构件的 *E*_{EA}、*E*_{SEA}、*F*_m和 *E*_{CFE} 比 SSCT 构件的分别提高了 30.34%、27.36%、30.34%和 38.17%,说明外方内圆的泡沫铝夹芯双管构件的耐撞性能明显优于外方内方的泡沫铝夹芯双管构件的耐撞性能。由此可见,在外管固定、内管径 和壁厚相同的工况下,采用圆形截面的内管代替方形 内管将显著提升夹芯双管的吸能性能,从而节省材

料,更具有经济性。故选定外方内圆的泡沫铝夹芯双 管结构作为研究对象开展进一步的参数研究。



图 8 泡沫铝夹芯双管构件模拟载荷-位移曲线 Fig.8 Simulated load-displacement curve of aluminum foam sandwiched double-tube

2.3 参数讨论

为研究几何参数对外方内圆的泡沫铝夹芯双管 结构变形及吸能特性的影响,本节给出了 4 种不同 内、外管径和 4 种不同内、外管壁厚的分析结果。

2.3.1 内、外管径的影响

图 10 给出了不同内、外管径的泡沫铝夹芯双管 构件的载荷-位移曲线,可见随着外管径的增加和内 管径的减小,泡沫铝夹芯双管的横向压缩承载能力逐 渐增大。4 组不同管径的夹芯管构件横压载荷-位移曲 线变化趋势基本是一致的,说明管径的变化对夹芯管 构件横压变形模式未产生明显影响。

横向压缩荷载作用下,不同管径的 SCCT 构件能 量吸收、比吸能、平均压溃载荷和压溃力效率如表 2 所示。由表 2 可知,内、外管径对 SCCT 构件的横向耐 撞性能有显著影响,SCCT 构件的能量吸收、比吸能和 平均压溃载荷随着外管径的增加、内管径的减小而增 大,即芯材越厚,夹芯管的承载和能量吸收能力越大, 这与文献[14]中的结论一致。随着内、外管径的变化, SCCT 构件的压溃力效率基本都保持在 0.65 以上。



图 9 SSCT 和 SSCT-02 构件耐撞性的对比 Fig.9 Comparison of crashworthiness between SSCT and SSCT-02 components



图 10 内、外管径对 SCCT 构件载荷-位移曲线的影响

Fig.10 Effect of inner and outer tube diameters on the load-displacement curve of SCCT components

Tab.2 Crashworthiness of SCC1 components with different tube diameters								
管径/mm		$E_{\rm EA}/{ m J}$	$E_{\rm SEA} / (\mathbf{J} \cdot \mathbf{g}^{-1})$	$F_{\rm m}/{ m kN}$	$E_{\rm CFE}$			
	<i>D</i> _o =40	114.56	1.65	5.73	0.72			
Μ−20	<i>D</i> _o =50	242.27	2.31	9.70	0.78			
クト自任 Di-30	D _o =60	421.10	2.87	14.06	0.66			
	<i>D</i> _o =70	668.43	3.43	19.09	0.64			
	D _i =25	309.96	2.84	12.38	0.71			
内管径 D。=50	D _i =35	181.11	1.82	7.25	0.76			
	D _i =40	119.66	1.30	4.78	0.71			

表 2 不同管径的 SCCT 构件耐撞性能 Tab.2 Crashworthiness of SCCT components with different tube diameters

2.3.2 内、外管壁厚的影响

图 11 给出了不同内、外管壁厚的泡沫铝夹芯双 管构件的载荷-位移曲线。可见随着内、外管壁厚的 增加,泡沫铝夹芯双管的横向压缩承载能力基本也呈 增强的趋势。4 组不同壁厚的夹芯管构件横压载荷-位移曲线变化趋势基本是一致的,说明壁厚的变化对 夹芯管构件横压变形模式未产生明显影响。值得注意 的是,初始阶段的载荷曲线对外管壁厚的变化较为敏 感,表现为随外管壁厚的增加,初始阶段的承载能力 增加,这佐证了初始阶段主要由外管控制的推断是合理的。

在横向压缩荷载作用下,不同壁厚的 SCCT 构件 能量吸收、比吸能、平均压溃载荷和压溃力效率如表 3 所示。由表 3 可知,随着外管壁厚的增加, SCCT 构件的能量吸收和平均压溃载荷呈增大的趋势,比吸 能和压溃力效率却出现无规律的波动。与外管壁厚相 比,内管壁厚的增加不仅会显著增强 SCCT 构件的吸 能性能,压溃力效率也呈增大的趋势,意味着增加内 管壁厚还有利于降低 SCCT 构件的载荷波动性。





Tab.3 Crashworthiness of SCCT components with different wall thickness								
壁厚/mm		$E_{\rm EA}/{ m J}$	$E_{\text{SEA}}/(\mathbf{J}\cdot\mathbf{g}^{-1})$	$F_{\rm m}/{ m kN}$	$E_{\rm CFE}$			
	$T_{o} = 0.8$	236.10	2.56	9.46	0.73			
山 徳 睦 匡 エー1	$T_{o} = 1.3$	242.27	2.31	9.70	0.78			
介官堂序 1i-1	$T_{o} = 1.8$	268.46	2.28	10.72	0.78			
	$T_{o}=2.3$	311.65	2.39	12.46	0.56			
	$T_{\rm i} = 0.5$	210.08	2.16	8.39	0.68			
内管壁厚 To=1.3	$T_{i}=1.5$	287.18	2.56	11.47	0.81			
	$T_i=2$	337.21	2.81	13.47	0.83			

表 3 不同壁厚的 SCCT 构件耐撞性能

3 结语

本文采用 Abaqus/Explicit 非线性有限元软件建 立了泡沫铝填充双管构件在横向载荷下的模型,讨论 了截面形状和几何参数对夹芯双管构件变形和吸能 特性的影响。通过以上研究,本文主要得出以下结论:

1)无论是外方内方的泡沫铝夹芯双管,还是外 方内圆的泡沫铝夹芯双管,2种构件的横向压缩过程 均表现出3个阶段:初始压缩阶段、塑性变形阶段和 致密化阶段。泡沫铝芯材的变形失效模式与内管的截 面形状相关。在外管固定、内管径和壁厚相同的工况 下,采用圆形截面的内管替代方形截面的内管将极大 提高夹芯双管构件的耐撞性能。

2) 对于外方内圆的泡沫铝夹芯双管构件, 外管 径越大,内管径越小,即泡沫铝芯材厚度越大,结构 的承载力和吸能能力越高。

3) 与外管壁厚相比, 内管壁厚的变化对结构耐 撞性能的影响更为明显。随着内管壁厚的增加,外方 内圆的泡沫铝夹芯双管构件的能量吸收、比吸能、平 均压溃载荷和压溃力效率均呈现出增大的趋势。

参考文献:

- [1] PUGSLEY A. The large-Scale Crumpling of Thin Cylindrical Columns[J]. The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 1960, 13(1): 1-9.
- [2] HANSSEN A G, LANGSETH M, HOPPERSTAD O S. Static and Dynamic Crushing of circular Aluminium Extrusions with Aluminium Foam Filler[J]. International Journal of Impact Engineering, 1999, 24(8): 475-507.
- [3] LI Z B, CHEN R, LU F Y. Comparative Analysis of Crashworthiness of Empty and Foam-Filled Thin-Walled Tubes[J]. Thin-Walled Structures, 2018, 124: 343-349.
- [4] SU M M, WANG H, HAO H. Axial and Radial Com-

pressive Properties of Alumina-Aluminum Matrix Syntactic Foam Filled Thin-Walled Tubes[J]. Composite Structures, 2019, 226: 111197.

- [5] WANG L, ZHANG B Y, ZHANG J, et al. Deformation and Energy Absorption Properties of Cenosphere-Aluminum Syntactic Foam-Filled Tubes under Axial Compression[J]. Thin-walled Structures, 2021, 160: 107364.
- [6] 张勇,林福泳. 铝泡沫填充薄壁结构耐撞可靠性优化 设计[J]. 机械工程学报, 2011, 47(22): 93-99. ZHANG Yong, LIN Fu-yong. Crashworthiness Reliability Design Optimization of Aluminum Foam Filled Thin-Wall Structures[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(22): 93-99.
- [7] ZHANG Y, SUN G, LI G, et al. Optimization of Foam-Filled Bitubal Structures for Crashworthiness Criteria[J]. Materials & Design, 2012, 38: 99-109.
- [8] CENK K. Numerical Crushing Analysis of Aluminum Foam-Filled Corrugated Single and Double-Circular Tubes Subjected to Axial Impact Loading[J]. Thin-Walled Structures, 2015, 96: 82-94.
- [9] MANMOHAN D G. Deformation, Energy Absorption and Crushing Behavior of Single, Double and Multi-Wall Foam Filled Square and Circular Tubes[J]. Thin-Walled Structures, 2015, 90: 1-11.
- [10] 康建功, 石少卿, 张忠. 泡沫铝填充钢管横向压缩吸 能特性试验[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(7): 68-73. KANG Jian-gong, SHI Shao-qing, ZHANG Zhong. Experimental Studies on the Energy Absorption Property of Aluminum Foam Filled Steel Pipe under Transverse Compression[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2010, 33(7): 68-73.
- [11] 黄志超, 刘志芳, 路国运. 侧向冲击载荷下金属薄壁 圆管内填充泡沫铝的吸能特性研究[J]. 太原理工大学 学报, 2017, 48(2): 243-249.

· 301 ·

HUANG Zhi-chao, LIU Zhi-fang, LU Guo-yun. Study on Energy Absorption Properties of Aluminum Foam-Filled Thin-Walled Metal Tubes under Lateral Impact Loading[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2017, 48(2): 243-249.

- [12] YIN H F, XIAO Y Y, WEN G L, et al. Multiobjective optimization for Foam-Filled Multi-Cell Thin-Walled Structures under Lateral Impact[J]. Thin-Walled Structures, 2015, 94: 1-12.
- [13] SHEN J H, LU G X, RUAN D, SEAH C C. Lateral Plastic Collapse of Sandwich Tubes with Metal Foam Core[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2015, 91: 99-109.
- [14] 刘志芳,王军,秦庆华. 横向冲击载荷下泡沫铝夹芯 双圆管的吸能研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(11): 2259-2267.
 LIU Zhi-fang, WANG Jun, QIN Qing-hua. Research on Energy Absorption of Aluminum Foam-Filled Double

Circular Tubes under Lateral Impact Loadings[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(11): 2259-2267.

 [15] 崔尧尧,刘志芳,李世强.横向冲击载荷下不同约束 泡沫铝夹芯圆管的动态响应[J].应用力学学报,2021, 38(1): 26-34.

CUI Yao-yao, LIU Zhi-fang, LI Shi-qiang. Dynamic Response of Aluminum Foam Sandwich Circular Tubes with Different Constraints under Lateral Impact Loadings[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38(1): 26-34.

[16] 于学会,王茗仕,杨彦."V型"约束下泡沫铝夹芯圆管的准静态横向压缩性能研究[J].固体力学学报, 2023,44(2):197-208.

YU Xue-hui, WANG Ming-shi, YANG Yan. Study on Quasi-Static Transverse Compression Performance of Aluminum Foam Sandwich Circular Tube under "V" Constraint[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2023, 44(2): 197-208.

- [17] ZHU G, ZHAO Z, HU P, et al. On Energy-Absorbing Mechanisms and Structural Crashworthiness of Laterally Crushed Thin-Walled Structures Filled with Aluminum Foam and CFRP Skeleton[J]. Thin-Walled Structures, 2021, 160(1): 107390.
- [18] ZHU G H, WANG Z, HUO X T, et al. Experimental and Numerical Investigation into Axial Compressive Behaviour of Thin-Walled Structures Filled with Foams and Composite Skeleton[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 122: 104-119.
- [19] WANG X, YIN W L, ZOU L X, et al. Curved and Straight Combined Cross-Section Structure for Energy Absorption[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 224: 107333.

责任编辑:曾钰婵