有色合金 FOUNDRY **括估** 1123

基于熔体发泡法泡沫铝填充 管力学性能研究

王嘉峰,王录才,黄闻战,王 芳,游晓红

(太原科技大学材料科学与工程学院,山西太原 030024)

摘要:采用熔体发泡法制备闭孔泡沫铝,研究泡沫铝填充密度对铝合金薄壁管的压缩及吸能 性能提升作用,对比提升效果,确定最佳密度参数;并在最佳密度的基础上设计三类不同截 面的复合结构,研究填充管的截面结构对压缩性能及吸能性能的影响,确定最佳结构参数。 采用万能试验机进行准静态压缩试验,并利用有限元模拟结果与试验结果相对比,验证数据 准确性。结果表明:填充梯度泡沫铝会增加薄壁管的力学性能,如屈服强度、平均压溃载荷 和吸能性能,降低曲线波动性,密度为0.4805g/cm³的闭孔泡沫铝表现出最优结果;二次试验 中,复合结构能进一步提升薄壁管的力学性能,其中外方管内圆管的复合结构具有最高的屈 服强度、平均压溃载荷以及吸能效果。

关键词:泡沫铝;薄壁金属管;压缩;性能;复合结构;吸能

薄壁金属管因其具有非常稳定的变形及能量吸收特性,作为缓冲吸能材料广泛 应用于汽车、航天、船舶等领域^[1-2],但薄壁金属管易发生屈曲失稳^[3-4],导致变形及 能量吸收不充分。泡沫铝具有质量轻、比强度高、阻尼大和比吸能大等特点^[5-10],当 泡沫铝作为填充材料时,会与金属薄壁管产生相互作用,进一步提升材料的整体性 能,如压缩性能、吸能性能等,因此在薄壁金属管中填充泡沫金属能有效解决这类 问题。泡沫铝填充管作为一类高效的抗冲击、吸能和减震的构件^[11],因其出众的效 果与性能,受到众多学者的研究。

Huang等^[12]对泡沫铝填充铝合金管在轴向冲击载荷下的吸能进行研究;Ma等^[13]对 不同高径比和径厚化的铝合金空管及泡沫铝填充管进行准静态轴向压缩实验研究; Wang等^[14]分析了温度、泡沫铝密度、钢管厚度、截面长宽比等相关参数对泡沫填 充钢管构件破坏形态的影响;吉林大学Zhang等^[15]在矩形截面空管薄壁梁压溃理论 基础上,推导出了泡沫铝填充的矩形截面薄壁梁压溃力表达式,进一步解释了吸能 过程;Yu等^[16]对于泡沫铝填充管应变硬化和惯性效益进行了预测模型,揭示了管与 管之间相互作用的机理以及惯性影响;Elahi等^[17]研究了横向载荷作用下泡沫铝填充 管的吸能机理,并推导了泡沫铝填充管吸能大小与泡沫材料应力和体积的关系。总 体来说,泡沫铝填充薄壁金属管研究已有一定成果,主要集中于单管填充及数值模 拟,对不同截面结构的多管填充泡沫铝的研究较少,基于熔体发泡法制备的泡沫铝 填充管尤其是多管复合填充管具有很广阔的研究前景。

本文选取三种不同密度熔体发泡法梯度闭孔泡沫铝填充铝合金方管进行准静态 压缩试验,分析其力学性能提升与密度的关系,确定最佳泡沫铝填充密度;同时在 上述基础中依据最佳性能泡沫铝密度,在保证同等质量提升壁厚的情况下,设计三 种不同截面结构的泡沫铝多管复合填充方式,进行二次试验,研究截面结构对性能 提升的影响,确定最佳截面结构。

作者简介:

王嘉峰(1998-),男,硕 士生,研究方向为先进凝 固加工技术及新材料。电 话:16636115172,E-mail: 2302736857@qq.com 通讯作者: 王录才,男,博士,教授。 E-mail:283766362@qq.com

中图分类号:TG146.21; TG113.22⁺2 文献标识码:A 文章编号:1001-4977(2024) 08-1123-08

基金项目: 吕梁市引进高层次科技人 才专业科技创新平台建设 项目(2023RC02)。 收稿日期: 2024-01-15收到初稿, 2024-03-17收到修订稿。

1124 (前告) FOUNDRY 有色合金

1 试验材料与方法

1.1 试样制备

填充所用泡沫铝为实验室熔体发泡法[18-20]自制泡

沫铝,使用纯铝为基体、Ca粒为增黏剂、TiH₂为发泡 剂,通过熔体发泡法制备出闭孔泡沫铝,熔体发泡法 工艺流程图如图1所示。





将制备好的泡沫铝在DK7735电火花切割机上进 行切割,选取无实体层的闭孔泡沫铝,泡沫铝切割尺 寸为28 mm × 28 mm × 50 mm的方块形状,泡沫铝及填 充试样示意如图2所示。选取平均密度分别为0.5344、 0.480 5、0.385 5 g/cm³的泡沫铝,采用直接填充的方 法填充进薄壁铝合金管A1中,薄壁铝合金管件材料为 6063T5, 高度为50 mm, 外壁尺寸为30 mm × 30 mm, 内壁尺寸为28 mm×28 mm,壁厚为1 mm,填充过程 中不添加任何粘结剂,形成效果如图3所示,分别命名 为A_{II}、A_{IM}、A_{IS},其中A_{II}为平均密度0.534 4 g/cm³的 泡沫铝填充管, A_{IM}为平均密度0.480 5 g/cm³的泡沫铝 填充管,A_{1s}为平均密度0.385 5 g/cm³的泡沫铝填充管。 将壁厚提升为2 mm,在保证相同质量提升的前提下, 铝合金管采用内部添加同等材质的铝合金方管、铝合 金圆管两种复合结构方式进行性能提升,两种复合 结构质量均与壁厚2 mm铝合金空管A₂质量一致,复 合结构与壁厚2 mm空管A。内部均使用一次试验中最



图2 熔体发泡法泡沫铝及填充试样 Fig. 2 Diagram of hemelt-foamed aluminum foam and filling specifications

佳密度0.480 5 g/cm³的泡沫铝进行填充,分别命名为 A_{2M} 、 A_{sF} 、 A_{FY} ,其中 A_{2M} 为无复合结构的泡沫铝填 充管, A_{sF} 为双方管复合结构的填充管, A_{FY} 为外部方 管内部圆管复合结构的填充管,制备完成后如图4所 示。



图3 泡沫铝填充薄壁管示意图 Fig. 3 Schematic diagram of the thin-walled tube filled with aluminum foam



图4 泡沫铝填充薄壁复合管示意图 Fig.4 Schematic diagram of the thin-walled composite pipe filled with aluminum foam

1.2 力学性能测试

采用AG-100-Xplus型万能试验机在室温下进行准静态压缩试验,设备最大载荷100 kN,采用24位A/D转换器,载荷及应变测量采用一个量程,载荷精度显示值±0.5%,载荷速率0.000 5~1 000 mm/min,采样间隔0.2 msec;压缩速率设置为5 mm/min,准静态压缩试验压缩行程为40 mm,为填充管总体高度的80%,实现完全压溃。采用JSM-6510扫描电子显微镜观察试样的微观形貌。

2 结果及分析

2.1 薄壁管及填充管压缩性能分析

2.1.1 薄壁空管压缩性能分析

壁厚1 mm铝合金空管A₁压缩载荷-位移曲线如图 5所示,铝合金空管压缩曲线分为弹性变形、塑性变 形阶段和密实化三个阶段,共发生两次变形;第一 次峰值载荷P1的出现,代表铝合金管开始出现第一 次变形——屈服变形,空管由弹性变形转变为塑性变 形^[21],材料进入塑性变形阶段^[22];第二次峰值P2的出 现,代表塑性变形阶段内铝合金空管发生第二次塑性 变形,塑性变形完成后直接进入密实化阶段。两次变 形载荷P1、P2分别为33.4 kN、30.2 kN,表现为P1高 于P2,说明第一次塑性变形所需屈服载荷要高于第二 次塑性变形所需载荷,屈服强度代表材料最高压溃强 度。



Fig. 5 Load-displacement diagram of thealuminum alloy empty tube

2.1.2 填充管压缩性能分析

铝合金空管A₁、泡沫铝填充管A_{1L}、A_{1M}、A_{1S}压缩 的载荷-位移曲线如图6所示。填充管A_{1L}、A_{1M}、A_{1S}压 缩曲线与空管A₁压缩曲线整体趋势相同,分为弹性变 形阶段、塑性变形阶段和密实化三个阶段,共产生两 次载荷峰值,第一次载荷峰值为屈服强度,在该载荷 峰值之前填充管发生弹性变形,填充泡沫铝泡孔无坍 塌现象,峰值过后填充管发生塑性变形,填充泡沫铝



图6 A_1 、 A_{1L} 、 A_{1M} 、 A_{1S} 载荷-位移 Fig. 6 A_1 、 A_{1L} 、 A_{1M} 、 A_{1S} Load-displacement diagram

泡孔开始出现坍塌现象;第二次载荷峰值为二次塑性 变形应力载荷,此时填充管发生第二次塑性变形,此 阶段外部铝合金管产生二次变形,填充泡沫铝泡孔继 续坍塌,二次塑性变形完成后,填充泡沫铝泡孔全部 坍塌完毕后,进入密实化阶段。相较于空管A₁,A_{1L}、 A_{1M}、A_{1s}压缩曲线上移,填充管屈服强度载荷、二次 塑性变形应力载荷均上升;空管A1在产生第一次屈服 变形后出现载荷平台期,表现为最小载荷产生稳定的 塑性屈服变形,填充管A_{1L}、A_{1M}、A_{1s}二次塑性变形起 前于空管A₁,未出现平台期,经历第一次屈服变形之 后立即开始进入二次塑性屈服变形阶段,在达到二次 塑性变形应力峰值载荷之后发生二次塑性变形,这是 由于泡沫铝填充进入空管后,与空管结合产生相互作 用,泡沫铝为空管提供稳定力学支撑,使得平台期消 失,力学性能上升。

由载荷位移曲线可知,泡沫铝填充后可以有效减 小曲线波动性,提高变形稳定性。由图7二次峰值载荷 差值图所示,即二次塑性变形所需最大应力载荷与最 小应力载荷之差,添加泡沫铝之后的填充管在塑性变 形阶段中二次峰值之后的应力下降均远小于空管,塑 性变形阶段表现为稳定屈服。

 A₁, A_{1L}、A_{1M}、A_{1s}屈服强度与最低压溃载荷如图

 8所示, A₁, A_{1L}、A_{1M}、A_{1s}屈服强度分别为15.9 kN、



Fig. 7 Load difference diagram



图8 屈服强度与最低压溃载荷 Fig. 8 Yield strength and minimum crushing load diagram

20.9 kN、24.3 kN、25.1 kN, A_{1s}屈服强度为最高, A_{IL}、A_{IM}、A_{IS}屈服强度相对于A1分别提升31.4%、 52.7%、57.8%,表现为密度越小、孔隙率越高则屈服 应力越大; A1, AIL、AIM、AIS变形阶段所需最低压溃 载荷分别为3.9 kN、13.7 kN、13.5 kN、8.9 kN, A1、 A2、A3相对于A0分别提升251.3%、246.2%、128.2%, 薄壁金属管填充泡沫铝后会显著提升塑性变形稳定 性,这是因为泡沫铝在塑性变形阶段其内部孔洞稳定 坍塌,提供稳定承压载荷,提高整体承载能力,使 不稳定变形转变为稳定变形。试样A₁₁对比试样A₁屈 服强度提升5 kN,试样A_{IM}对比试样A_{II}屈服强度提升 8.4 kN,试样A₁₈对比试样A₁₁提升0.8 kN,在密度达到 0.480 5 g/cm³之后,泡沫铝密度下降引起的屈服强度提 升下降,说明填充泡沫铝密度过低的情况下,材料抵 抗形变的能力会下降。试样A₁, A_{1L}、A_{1M}、A_{1s}平均压 溃载荷运用公计(1)计算:

$$F_{\text{TF}} = \frac{\int_{0}^{x} F \mathrm{d}x}{x} \tag{1}$$

式中:F为位移对应载荷值,kN;x为位移,mm。

 A_{1} 、 A_{1L} 、 A_{1M} 、 A_{1s} 平均压溃载荷如图9所示,填充管 A_{1L} 、 A_{1M} 、 A_{1s} 的平均载荷相较于 A_{1} 提高明显,试样 A_{1} , A_{1L} 、 A_{1M} 、 A_{1s} 平均压溃载荷分别为7.9 kN、



图9 A₁、A_{1L}、A_{1M}、A_{1s}的平均压溃载荷 Fig. 9 Average crushing load diagram of A₁, A_{1L}, A_{1M}, A_{1s}

19.2 kN、20.4 kN、18.5 kN, A_{IL}、A_{IM}、A_{IS}平均压溃 载荷相对A_I分别提升143.4%、158.4%、133.7%,均提 高一倍以上,可以看出,相较于屈服强度的提升,泡 沫铝填充对于薄壁管材料整体抗变形能如平均压溃载 荷、最低压溃载荷等的提升效果更加显著。

2.1.3 结果分析

填充泡沫铝后薄壁金属管的力学性能如屈服强 度、平均压溃载荷等会上升,对于平均压溃载荷的提 升要显著高于屈服强度的提升,提升效果因泡沫铝密 度不同存在差异。对比试样,A_{1s}屈服强度25.1 kN最 高,与A_{1M}接近;A_{1M}平均压溃载荷20.4 kN为最高,曲 线的波动性小于A_{1L}、A_{1s},平台应力稳定性表现为A_{1M} 最佳,A_{1s}最差,通过综合对比,确定密度0.480 5 g/cm³ 的泡沫铝为最优填充材料。

2.2 薄壁壁厚及结构分析

2.2.1 压缩性能分析

A₁、A_{1M}、A₂、A_{2M}、A_{SF}、A_{FY}压缩载荷-位移曲线 如图10所示。A₂、A_{2M}、A_{SF}、A_{FY}相较于曲线A1、A_{1M} 均上移,所有载荷均高于A₁、A_{1M}。其中A₂、A_{2M}、A_{SF} 压缩曲线与空管A₁、A_{1M}压缩曲线趋势相同,分为弹性 变形阶段、塑性变形阶段和密实化三个阶段,产生两 次应力载荷峰值;A_{FY}压缩曲线未出现二次应力峰值载 荷,只有一次屈服强度峰值载荷,且位于所有曲线最 上方,表现出最好的稳定性。



Fig. 10 Load-displacement diagram

 A_1 、 A_{1M} 、 A_2 、 A_{2M} 屈服强度如图11所示, A_1 、 A_{1M} 、 A_2 、 A_{2M} 屈服强度载荷分别为15.9 kN、24.3 kN、 39 kN、40.7 kN,壁厚增加后对于屈服强度的提升效果 要高于泡沫铝填充。屈服强度 A_{1M} 对于 A_1 提升52.7%, A_{2M} 对于 A_2 提升4.4%; A_1 、 A_{1M} 、 A_2 、 A_{2M} 的平均压溃载 荷如图12所示, A_1 、 A_{1M} 、 A_2 、 A_{2M} 平均压溃载荷分别 为7.9 kN、20.4 kN、28.2 kN、33.9 kN,平均压溃载荷 A_{1M} 对于 A_1 提升158.2%, A_{2M} 对于 A_2 提升20.2%。屈服强



图11 A_1 、 A_{1M} 、 A_2 、 A_{2M} 的屈服强度 Fig. 11 Yield strength load diagram of A_1 、 A_{1M} 、 A_2 、 A_{2M}



图12 A₁、A_{1M}、A₂、A_{2M}的平均压溃载荷 Fig. 12 Average crushing load diagram of A₁、A_{1M}、A₂、A_{2M}

度与平均压溃载荷均是A_{1M}高于A₁,A_{2M}高于A₂,填充 试样A_{1M}、A_{2M}表现出更好的力学性能,说明在再进一 步提升壁厚之后,泡沫铝的提升作用依旧存在,提升 效果随壁厚增加而减少;相较于屈服强度的提升,填 充管平均压溃载荷的提升更为显著,与初次试验趋势 一致。

 A_1 、 A_{1M} 、 A_{2M} 、 A_{SF} 、 A_{FY} 屈服强度如图13所示, A_{2M} 、 A_{SF} 、 A_{FY} 分别为40.7 kN、37.9 kN、48.3 kN,试 样 A_{FY} 高于试样 A_{2M} 和试样 A_{SF} ;平均压溃载荷如图14所 示, A_{2M} 、 A_{SF} 、 A_{FY} 分别为33.9 kN、39.2 kN、48.7 kN, 试样 A_{FY} 高于试样 A_{SF} 和试样 A_{2M} 。屈服强度 A_{SF} 提升效果



图13 A_1 、 A_{1M} 、 A_{2M} 、 A_{SF} 、 A_{FY} 的屈服强度 Fig. 13 Yield strength load diagram of A_1 、 A_{1M} 、 A_{2M} 、 A_{SF} 、 A_{FY}



图14 A₁、A_{1M}、A_{2M}、A_{SF}、A_{FY}的平均压溃载荷 Fig. 14 Average crushing load diagram of A₁、A_{1M}、A_{2M}、A_{SF}、A_{FY}

低于A_{2M},而平均压溃载荷的提升效果,A_{2M}低于A_{SF}和 A_{FY};在采用双方复合结构试样A_{SF}时屈服强度低于试样 A_{2M} 7.4%,平均载荷高出A_{2M} 20.3%,说明采用双方管 的A_{SF}屈服强度略有不足,但整体的表现具有更加高效 的性能提升以及更加稳定的压缩变形。试样A_{FY}方管加 圆管的复合结构表现出了最好的力学性能,无论是屈 服强度和平均压溃载荷均最高,为最佳结构。

2.2.2 结果分析

对于壁厚提升及复合结构的实现,均能在填充 泡沫铝管后进一步提升性能,且相较于简单地壁厚增 加来提高力学性能,采用多管复合结构是一种更高效 地提升材料力学性能的方式,具有极佳的稳定结构。 相较于双方管的复合结构,方管加圆管表现出更好的 性能提升,无论是屈服强度还是平均压溃载荷均为最 高,主要原因在于截面为方形时,应力集中于四角, 而无法分散;与之相比,截面形状为圆形时,应力分 散,而非集中于一点,结构平均压垮载荷以及屈服载 荷等均会提升。

2.3 能量吸收分析

能量吸收一直是泡沫铝及薄壁空管的重要用途及 研究方向^[23-24],运用公式(2)计算可得表1试样吸能及

表1	试样吸能及增幅表
Table 1 Sample energy	y absorption and amplification table

试样	吸能数值/J	增长幅度/%	
A_1	2 282.4	0	
A _{1L}	4 658.1	104.1	
A _{1M}	4 978.6	118.1	
A _{1S}	4 105.2	79.9	
A_2	7 345.2	221.8	
A _{2M}	8 421.0	269.0	
A_{SF}	7 540.5	230.4	
A_{FY}	11 487.6	403.3	

增幅表。

$$W = \int_{a}^{b} F \mathrm{d}x \qquad (2)$$

式中: W为能量, J; F为位移对应载荷值, N; x为位 移, mm。

泡沫铝填充进入空管后,将大幅提升能量吸收作 用,试样A_{IL}、A_{IM}、A_{IS}能量吸收均超过铝合金空管 A₁,A_{IL}、A_{IM}相较于空管A₁提升率超过100%,A_{IS}的提 升率是填充试样中表现最差的,当密度达到0.480 5 g/cm³ 后吸能效果会降低,主要原因在于泡沫铝密度过低会 造成孔壁过薄,较小的载荷引起泡沫铝内部孔洞的破 裂,泡孔坍塌过快,导致能量吸收不充分,使得吸能 作用下降。相较于单管填充,多管复合结构A_{FY}的提升 幅度最高,相对于A_{IL}增幅146.6%,相较于A_{2M}增幅为 36.4%。说明采用复合结构是更稳定、更高效地吸能提 升方式。

2.4 断口分析

薄壁管压缩断口形貌扫描图如图15所示,由图 15a、b、c可见,薄壁管压缩断口形成撕裂韧窝,韧 窝大而深,说明薄壁管在变形过程中主要受撕裂力作 用,薄壁管强度低,变形量大;由图15d、e、f可见, 填充管压缩断口形成等轴韧窝,韧窝小而密,说明填 充管在变形过程中主要受正应力作用,薄壁管强度 高,变形量小;说明泡沫铝填充后与薄壁管产生极强 的相互作用力,改变了薄壁管的变形方式,阻碍薄壁 管变形过程中离面位移的产生,提高材料压缩性能。



(d)、(e)、(f)填充管断口形貌
 图15 薄壁管压缩断口形貌图
 Fig. 15 Morphological images of the compression fracture surface of the thin-walled tubes

3 数值模拟验证

3.1 模型建立

运用ABAQUS模拟软件进行有限元仿真模拟。

(1)进行模型建立。设立泡沫铝填充模型,并进行压缩试验下泡沫铝填充铝合金管参数化建模并进行有限元计算;外层铝合金管密度为2.7 g/cm³,杨氏模量70 GPa,泊松比0.3;泡沫铝密度为0.48 g/cm³,杨氏模量300 MPa,泊松比0.01。

(2)设立上下压板。将上下压板设定为刚体,上 下压板与填充管采用面与面接触,下压板保持不动, 上压板进行向下压缩。

(3)压缩距离以及压缩速度设定。压缩距离为填充管整体高度的80%,即压缩40 mm;压缩步数设置为 0.05 mm/s,总共压缩时间为800 s。

有限元模型图如图16所示,数值模型与试验模型 一致,主要区别在于数值模拟模型内部孔洞偏均匀。



图16 有限元模型 Fig. 16 Finite element model diagram

3.2 压缩模拟试验分析验证

有限元模拟分析与实际AIM试验载荷位移对比如图



图17 A_{1M}模拟对比 Fig. 17 Simulation comparison diagram 17所示,由图17模拟对比结果可知,ABAQUS模拟曲 线与实际A_{IM}压缩曲线变化趋势相同,屈服强度相近, 屈服强度略低于A_{IM}试样,模拟平台应力略高于A_{IM}试 样,主要原因在于模拟孔径相较于实际梯度泡沫铝较 均匀,性能稳定。A_{IM}模拟与试样变形对比如图18所 示,数据模拟与实际压缩变形结果相似,验证试验数 据准确。

4 结论

(1)填充泡沫铝后薄壁金属管的力学性能如屈服强度、平均压溃载荷等会上升,对于平均压溃载荷的



图18 A_{IM}模拟与试样变形对比 Fig. 18 Comparison diagram of the simulation deformationand sample deformation

提升要显著高于屈服强度的提升,提升效果因泡沫铝 密度不同存在差异,密度0.480 5 g/cm³的泡沫铝为最优 填充材料。

(2)对比三种不同截面方式的质量提升,不同截 面结构对性能影响存在差别,采用复合结构能更加有 效地提升材料的整体性能,降低应力波动,获得更稳 定参数,其中外方管内圆管的复合结构具有最佳优异 的效果。

(3)泡沫铝填充后会大幅增加薄壁管材料的吸能 效果,增幅超过一倍以上;不同截面结构对吸能效果 影响巨大,采用外方管加内圆管的复合结构吸能效果 最佳。

参考文献:

- [1] 李志超. 薄壁结构的吸能特性研究与抗撞性优化 [D]. 广州:华南理工大学, 2019.
- [2] 曹云飞,赵艳君,李留洋,等.泡沫铝填充管的研究进展[J].精密成形工程,2023,15(2):19-28.
- [3] 陈军红,张方举,谢若泽,等.泡沫铝填充薄壁金属管结构冲击吸能特性研究 [J].包装工程,2022,43 (11):154-160.
- [4] GOEL M D, KRISHNAPPA L. Deformation and energy absorption of aluminum foam filled square tubes [J]. Advanced Materials Research, 2012, 585: 34–38.
- [5] 张凯,吴引江,刘高建,等.高孔隙率金属多孔材料的制备技术与应用 [J].中国材料进展, 2023, 42 (10): 814-825.
- [6] 吴海臣,夏文科,王新华,等.泡沫铝技术在车身轻量化中的应用 [J].时代汽车, 2023 (6): 134-136.
- [7] 赵金凤. 密度梯度泡沫铝夹芯结构力学行为试验研究与仿真 [D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [8] 李思超,杨旭东,安涛,等.泡沫铝填充薄壁管复合结构压缩与吸能性能[J].航空材料学报,2019,39(05):120-127.
- [9] LEILEI Y, PENGBO S, YAGANG H, et al.Effects of aluminum foam filling on compressive strength and energy absorption of metallic Y-shape cored sandwich panel [J]. Metals, 2020, 10 (12) : 1670–1670.
- [10] CUI G, MENG L, ZHAI X. Buckling behaviors of aluminum foam-filled aluminum alloy compositecolumns under axial compression [J]. Thin-Walled Structures, 2022, 177: 109399.
- [11] 桂良进,范子杰,王青春. 泡沫填充圆管的轴向压缩能量吸收特性 [J]. 清华大学学报(自然科学版),2003(11): 1526-1529.
- [12] 黄睿. 轴向载荷下泡沫铝填充薄壁金属管吸能特性的研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- [13] 马骏. 泡沫铝填充管结构力学性能研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- [14] WANG T, SHAO J, XU T, et al.Study on axial compression properties of aluminum foam-filled steel tube members after high temperature
 [J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2022 (2): 883–900.
- [15] 张君媛,张秋实,刘卫国,等.泡沫铝填充矩形截面薄壁梁压溃力理论表达式 [J]. 吉林大学学报(工学版),2016,46(3):745– 750.

1130 116日 FOUNDRY 有色合金

- [16] DUAN Y, CHEN X P, DU P, et al. A predictive model for strain hardening and inertia effect of aluminum tubes filled with aluminum foam [J]. Composite Structures, 2022: 300.
- [17] ELAHI S A, BOUZEGAR J, NIKNEJAD A, et al. Theoretical study of absorbed energy by empty and foam-filled composite tubes under lateral compression loading [J]. Engineering Structures, 2017, 131: 136–147.
- [18] 黄绪. 泡沫铝熔体发泡制备工艺及其力学性能研究 [D]. 淄博:山东理工大学, 2018.
- [19] ZHOU X, LI Y X, CHEN X. Development of AlMg35-TiH2 composite foaming agent and fabrication of small pore size aluminium foams [J]. Journal of Materials Processing Technology., 2020, 283: 116698.
- [20] 张赞,王占忠,夏兴川,等.熔体发泡法制备闭孔泡沫铝的工艺研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (6): 732-739.
- [21] 何卫,吴昊,李德阁,等. 粒度和界面原子调控对SiC/AI复合材料强度的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2023,52(1):139-144.
- [22] 应文剑. 冲击下内嵌泡沫铝节点耗能性能试验研究及其优化设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [23] 周礼,王宇,蒋忠城,等.泡沫填充铝合金多胞防爬器的吸能机理 [J]. 塑性工程学报,2023,30(2):231-241.
- [24] SMH M, M S.Complementary and normalized energies during static and dynamic uniaxial deformation of single and multi-layer foam-filled tube [J]. Journal of Sandwich Structures and Materials, 2022, 24 (2): 1470–1490.

Study on the Mechanical Properties of Aluminum Foam Filled Pipe Based on Melt Foaming Method

WANG Jia-feng, WANG Lu-cai, HUANG Wen-zhan, WANG Fang, YOU Xiao-hong

(Department of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

Abstract:

The closed-cell aluminum foam was prepared by melt foaming method, and the effect of aluminum foam filling density on the compression and energy absorption performance of aluminumalloy thin-walled tubes was studied, and the optimal density parameters were determined by comparing the lifting effect. On the basis of the optimal density, three types of composite structures with different cross-sections were designed, and the influence of the composite structure of the filled tube on the compressive properties and energy absorption properties was studied, and the optimal structural parameters were determined. In the experiment, a universal testing machine was used to carry out quasi-static compression experiments, and the finite element simulation results were compared with the test results to verify the accuracy of the data. The results showed that the gradient aluminum foam increased the mechanical properties of the thin-walled tube, such as yield strength, average crushing load and energy absorption performance, and reduced the curve fluctuation, and the closed-cell aluminum foam with a density of 0.480 5 g/cm³ showed the best results. In the secondary test, the composite structure further improved the mechanical properties of the thin-walled tube, and the composite structure of the outer tube and the inner round tube had the highest yield strength, average crushing load and energy absorption properties of the thin-walled tube, and the composite structure of the outer tube and the inner round tube had the highest yield strength, average crushing load and energy absorption properties of the thin-walled tube, and the composite structure of the outer tube and the inner round tube had the highest yield strength, average crushing load and energy absorption effect.

Key words:

aluminum foam; thin-walled metal pipes; compress; performance; composite structures; energy absorption