

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.11.024

新型双轴压缩夹具下PMI泡沫的力学性能及吸能特性

施萌¹, 李兴豪², 刘文城², 黄甲², 崔浩²

(1.上海飞机设计研究院,上海 201210; 2.西北工业大学民航学院,西安 710072)

摘要: 聚甲基丙烯酸酯亚胺(PMI)泡沫在航空航天等轻量化抗冲击结构中应用广泛,其实际服役常处于复杂多轴应力状态。为揭示其在复杂应力下的吸能机制与变形规律,探究了PMI泡沫的双轴压缩力学性能与吸能特性。通过自主设计的新型双轴压缩夹具,在Herculi双轴试验机上实现了1:1,2:1,3:1等多种比例的可控加载,有效克服了传统装置中常见的干涉与应力不均匀问题。开展了PMI泡沫在不同双轴比例下的准静态压缩试验,分析了其应力-应变响应和能量吸收行为。实验结果表明,PMI泡沫在双轴加载下仍表现出典型的三阶段变形特征,但力学响应应具有显著的路径依赖性:随着加载非对称性提高,主方向吸能效率显著增大,次方向相应减小,而总吸能能力基本保持恒定(约0.50~0.53),表现出比例不敏感性。双轴加载显著改变了材料的压实应变演化规律:随着加载比例的增大,压实应变比从1:1时的0.98增至3:1时的2.67,表明非对称加载促进了主方向变形而抑制了次方向致密化进程。研究结果揭示了PMI泡沫在多轴载荷下的变形机制与能量吸收规律,为其在轻量化抗冲击结构设计中提供了重要的实验依据和参数支持。

关键词: 聚甲基丙烯酸酯亚胺泡沫;能量吸收;双轴压缩测试;力学特性;变形

中图分类号: TQ328.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)11-0176-06

Mechanical properties and energy absorption characteristics of PMI foam with new biaxial compression fixture

SHI Meng¹, LI Xinghao², LIU Wencheng², HUANG Jia², CUI Hao²

(1. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China;

2. School of Civil Aviation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract : Polymethacrylimide (PMI) foam is widely used in lightweight impact-resistant structures such as those in the aerospace field, where it is often subjected to complex multiaxial stress conditions during service. To elucidate its energy absorption mechanisms and deformation behavior under complex stress states, the biaxial compressive mechanical properties and energy absorption characteristics of PMI foam were investigated. Utilizing a novel self-designed biaxial compression fixture, The controllable loading at various ratios (1:1, 2:1, 3:1, etc.) was achieved on a Herculi biaxial testing machine, effectively mitigating common issues such as interference and stress inhomogeneity inherent in traditional devices. Quasi-static compression tests were conducted on PMI foam under different biaxial ratios, the stress-strain response and energy absorption behavior were analyzed. Experimental results indicate that PMI foam retains its typical three-stage deformation characteristics under biaxial loading, yet its mechanical response exhibits significant path dependence: as the loading asymmetry increases, the energy absorption efficiency in the primary direction markedly improves, while it correspondingly decreases in the secondary direction. However, the total energy absorption capacity remains largely constant (at 0.50–0.53), demonstrating ratio insensitivity. Biaxial loading notably alters the evolution of the material's compaction strain: with the increases loading ratios, the compaction strain ratio rises from 0.98 at 1:1 to 2.67 at 3:1, indicating that asymmetric loading promotes deformation in the primary direction while suppressing the densification process in the

通信作者: 崔浩, 博士研究生, 教授, 博士生导师, 研究方向为复合材料力学

收稿日期: 2025-09-01

引用格式: 施萌, 李兴豪, 刘文城, 等. 新型双轴压缩夹具下PMI泡沫的力学性能及吸能特性[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(11): 176–181.

SHI Meng, LI Xinghao, LIU Wencheng, et al. Mechanical properties and energy absorption characteristics of PMI foam with new biaxial compression fixture[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(11): 176–181.

secondary direction. These findings elucidate the deformation mechanisms and energy absorption patterns of PMI foam under multi-axial loads, providing critical experimental evidence and parametric support for the design of lightweight impact-resistant structures.

Keywords : polymethacrylimide foam ; energy absorption ; biaxial compression test ; mechanical property ; deformation

聚甲基丙烯酸酯亚胺(PMI)泡沫是综合性能最优异的硬质结构性泡沫材料之一,其核心应用背景源于航空航天、国防军工及高端工业领域对轻量化材料的迫切需求^[1]。PMI泡沫具有极高的比强度和比模量,耐高温性好,可作为复合材料夹层结构的芯材,广泛应用于飞机雷达罩、直升机旋翼、导弹弹体及高速轨道交通车辆中,能有效减轻重量并保持优异的结构稳定性^[1-6]。PMI泡沫在夹芯结构中发挥两大核心作用:其一,作为结构填充材料,它负责维持复合面板的形态与相对位置,保障结构在轻量化的同时具备优异的稳定性与抗失稳能力;其二,作为高效的吸能介质,在承受外部冲击时,它可通过自身的塑性变形来耗散能量,为内部组件提供可靠的缓冲保护。

针对泡沫材料的吸能效应,国内外专家学者开展了各种泡沫材料的单轴准静态和动态压缩试验来进行相关的理论研究。苏亚兴等^[7]对软质聚氨酯泡沫开展了单轴压缩试验,发现随着应变率的升高,最大吸能效率逐渐降低而比吸能明显升高。Hassanli等^[8]通过设计梯度孔排布,显著改善了低密度泡沫材料的能量吸收能力。Shivakumar等^[9]则研究了泡沫材料胞体大小和胞壁厚度对材料强度的影响,解释了材料强度参数随密度增大而增大的现象。这些研究大多主要针对各种泡沫材料在单轴加载的工况下研究相关吸能特性。然而,泡沫夹芯结构在受到冲击的时候,由于结构的约束往往受到双向复杂载荷,此时材料的屈曲模式、塌陷机制及能量吸收路径与单轴加载下显著不同。Zhou等^[10]通过拉伸剪切组合实验,发现铝合金泡沫的失效应力不对称。曲杰等^[11]通过静水压试验和围压试验对硬质聚氨酯泡沫进行多轴压缩试验,获得其在不同塑性应变下的屈服面。注意到关于多轴载荷对屈曲、塑性塌陷和脆性断裂等失效机制的影响的研究有限。Huluka等^[12]采用圆筒约束,表征了开孔泡沫铝在双轴压缩下的力学性能。由于多轴实验的困难性,Guo等^[13]基于单轴实验结果,对3D打印的聚合物材料与晶格结构的多轴性能进行仿真并进行了本构标定。尽管如此,现有研究仍存在明显不足:一方面,多数研究仍缺乏多轴实验数据,包含实

验的研究则基于单轴加载或受限的双轴约束,未能实现载荷比例连续可调的真实多轴应力状态;另一方面,研究对象主要集中在金属泡沫(如泡沫铝),而对PMI等高性能聚合物泡沫在多轴载荷下的失效行为与吸能特性研究仍较为缺乏。因此,有必要针对PMI泡沫等非金属材料开展系统性的复杂应力状态实验,深入揭示其在多轴载荷下的失效机理与能量吸收规律。

多孔材料的双轴力学性能测试一直是实验力学领域的重要难题。研究者们为此开发了多种测试方法,以期实现对材料真实受载状态的模拟,但均存在一定局限性。其中,基于单轴试验机改造的双轴“V”型夹具虽然结构简单、易于加工和安装,但由于其两向载荷通常依靠对称结构的几何传递实现,加载比例主要由夹具几何角度决定,缺乏独立调控手段,其相比于双轴夹具难以实现灵活可调的比例加载^[13-14]。另一类方法是利用双轴拉伸试验机改造夹具进行压缩测试,但由于加载面存在栅格结构,材料在受压过程中往往出现局部约束和应力集中,导致泡沫材料变形的不均匀性显著^[15]。此外,部分研究者通过特殊几何设计的试样(如圆环、十字形或带缺口结构)间接诱导双轴应力状态,虽然该方法能在一定程度上实现多轴加载模拟,但其应变范围通常较小(小于20%),且难以保证应力场的均匀性^[16-17]。相比之下,专用的多孔材料双轴压缩设备在加载精度、比例控制和测量同步性方面具有较大优势,但其系统复杂、造价高昂,且通用性较差^[18]。这些技术瓶颈严重制约了对多孔材料在多轴应力状态下力学行为的深入研究,特别是在研究大变形阶段的损伤演化和能量吸收特性时表现尤为突出。综上所述,开发一种具有良好通用性、能够实现精确比例加载的新型双轴测试夹具,有助于多孔材料双轴力学性能研究。

笔者对PMI泡沫材料开展了不同加载比例的准静态双轴压缩力学试验,系统分析了该材料在不同双轴应力状态下的力学响应行为及其能量吸收特性。针对PMI泡沫,设计了一套基于双轴试验机的能实现任意加载比例的夹具。实验涵盖了从线弹性阶段、塑性平台至致密化阶段的全过程应力-应

变响应,重点分析了双轴载荷比对泡沫失效机制、平台应力水平和能量吸收效率的影响。研究结果为PMI泡沫在复杂应力状态下的力学行为与能量吸收机制提供了重要的实验数据与方法支持,在多轴载荷主导的冲击防护与轻量化结构设计中具有明确的应用前景。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PMI泡沫:CMS-CP-403,密度为 $0.104\ 3\ \text{g/cm}^3$,上海飞机制造有限责任公司。

1.2 主要仪器及设备

双轴试验机:Mantis 1000,载荷量程 $10\ \text{kN}$,海崙力(苏州)装备技术有限公司;

CCD相机:分辨率 $1\ 980\times 1\ 200$,深圳市华腾威视科技有限公司。

1.3 试样制备

试样设计尺寸为 $10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$,由于PMI泡沫为闭孔刚性材料,所需试样通过线切割完成加工,加工精度为 $0.05\ \text{mm}$ 。试样制备完成后统一保存在恒温恒湿的干燥箱中。

1.4 测试与表征

泡沫胞体结构通过华腾威视CCD工业相机搭配微距镜头观察。PMI泡沫的准静态单双轴压缩试验在Mantis 1000双轴试验机上开展,如图1所示。试验机通过四个伺服电机驱动加载,四个电机之间相互独立,通过算法控制实现非对称比例加载。电机上配有高精度载荷传感器以及位移光栅尺,用以

获取加载过程中试样各个方向的载荷以及位移,数据采集频率为 $10\ \text{Hz}$ 。

通过一套带滑轨的夹具,避免了双轴压缩过程中夹具的干涉问题,夹具三视图以及相关尺寸如图2所示。

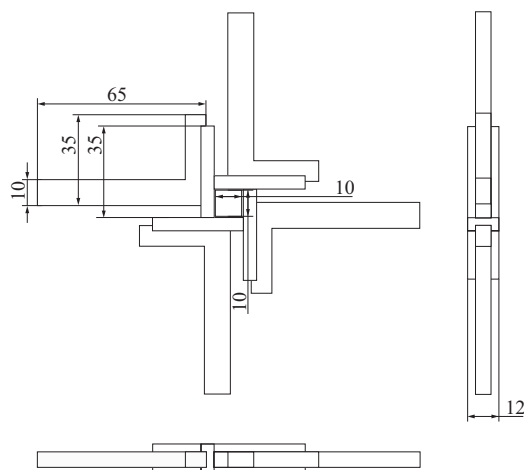


图2 双轴压缩试验夹具三视图

Fig. 2 Orthographic projections of biaxial compression test fixture

夹具加持臂与滑轨底座之间通过高强度螺栓实现刚性连接,该连接方式在约束其他自由度的情况下,仅允许滑轨沿单一指定方向平移。此项设计可有效防止试验过程中因夹具发生旋转而导致的试样表面压力分布不均问题。在加载过程中,当试验机沿某一方向施加荷载时,该方向上的滑块自由度被完全约束,从而将荷载传递至垂直于该方向的试样,驱动其沿既定轨迹运动,如图3所示。这种解耦机制确保了两个方向的加载机构互不干扰,实现了独立双轴同步加载,提高了复杂应力状态下材料

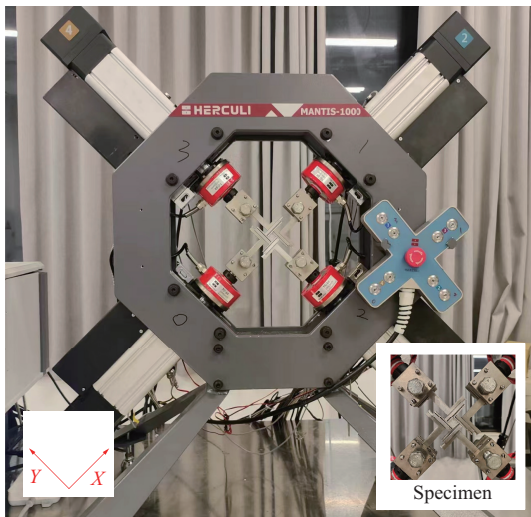


图1 双轴压缩试验平台:Mantis 1000双轴试验机及试样

Fig. 1 Set-up of biaxial compression test; Mantis 1000 biaxial testing machine and specimen

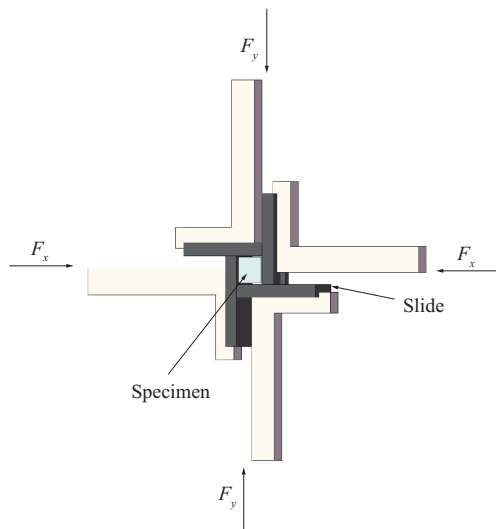


图3 双轴压缩试验夹具示意图

Fig. 3 Diagram of the biaxial compression test fixture

力学性能测试的准确性与可靠性。

为系统探究PIM泡沫材料在双轴压缩荷载作用下的变形行为与能量吸收特性,开展了四种不同位移比条件下的准静态力学试验,沿 x 轴方向的压缩位移(U_x)和沿 y 轴方向的压缩位移(U_y)之比分别为1:1,2:1,3:1以及1:0(单轴压缩工况)。试验过程中,采用双轴试验机每个电机以0.05 mm/s的位移速率进行加载,以确保在主导变形方向上实现恒定 $10^{-2}/s$ 的应变率。每一载荷工况均重复开展三次试验,以保障数据的统计可靠性与重现性。全部试验均在严格控制的恒温恒湿环境条件下进行,以最大限度减小外界波动对材料力学响应的影响。

2 结果与讨论

2.1 泡沫胞体结构

泡沫胞体细观结构如图4所示,胞体结构接近球形,胞体由胞壁相隔且相互独立,泡沫整体闭孔率为100%,胞体平均孔径为0.5~1 mm。

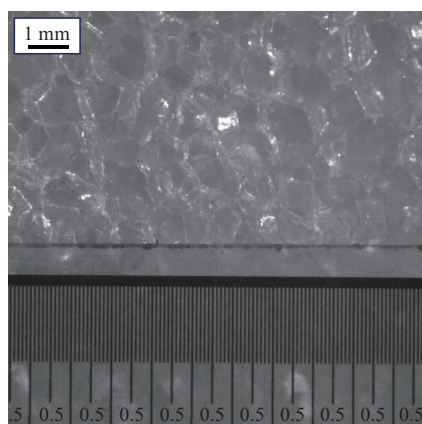


图4 泡沫胞体细观结构图像

Fig. 4 Microstructural image of foam cells

2.2 泡沫的压缩力学性能

为了度量泡沫材料的吸能特性,引入了能量吸收效率(η),其将最大吸能效率($\eta_{\max}$)对应的应变定义为密实化应变(ε_d)。材料的能量吸收效率可由式(1)计算^[19-20]。

$$\eta(\varepsilon) = \frac{\int_0^{\varepsilon} \sigma(\bar{\varepsilon}) d\bar{\varepsilon}}{\sigma(\varepsilon)} \quad (1)$$

式中: ε 为当前应变; $\bar{\varepsilon}$ 为积分变量; σ 为应力。

2.2.1 单轴加载

图5显示了PMI泡沫材料在单轴压缩条件下的应力-应变曲线及其能量吸收效率的变化规律。可以看出,试样在准静态单轴试验下表现出三个阶段的

变形特征,即线弹性阶段、屈服平台阶段和致密化阶段。其中,线弹性阶段的应变范围为0~0.10,弹性模量为20.1 MPa,对应泡孔壁的弯曲变形。屈服平台阶段的应变范围为0.10~0.60,平台应力为1.40 MPa,该阶段对应于对应泡孔结构的渐进坍塌,初始屈服点出现应力峰值(泡孔壁屈曲起始),后续波动反映泡孔层叠坍塌的间歇性特征。这是泡沫材料吸能的主要阶段,此时能量吸收效率呈增长趋势。当应变大于0.60,泡沫材料进入致密化阶段,应力急剧升高,能量吸收效率逐渐减小,对应泡孔结构完全坍塌,材料呈现实体压缩行为。

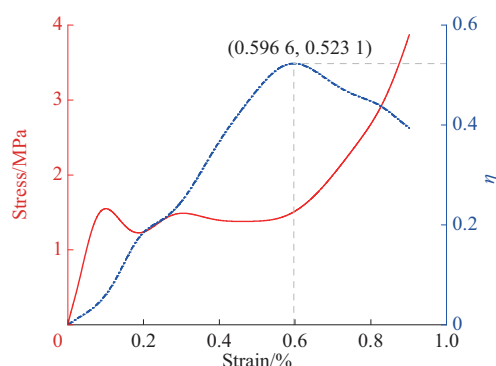


图5 单轴压缩的应力应变曲线与能量吸收效率变化

Fig. 5 Uniaxial compression stress-strain curve and variations of energy absorption efficiency

2.2.2 双轴加载

图6给出了PMI泡沫材料在1:1,2:1和3:1三种比例双轴压缩条件下的应力-应变曲线。在初始弹性阶段(应变<0.05),所有加载比例下的应力-应变曲线都表现出高度一致性。这种弹性行为的重合性可以从材料微观机制得到解释:在小应变范围内,泡沫材料的变形主要由孔壁的弹性弯曲主导,而这一过程对加载比例相对不敏感。由于泡沫结构的各向同性特征,在双轴加载初期,各方向的孔壁均处于弹性变形状态,尚未发生明显的择优取向。

不同于单轴加载,双轴加载在离开弹性段后呈现出独特的力学行为。在等比例加载(1:1)时,应力-应变曲线呈现缓慢上升的平台阶段;在非对称的2:1加载条件下,加载比例较大的方向(X 方向)出现了平台区域,且平台应力大致为1.65 MPa,而加载比例较小的方向(Y 方向)则表现为单调递增的硬化曲线,不再出现典型平台阶段;当加载比例进一步增大至3:1时,主加载方向的平台区域显著扩大,但平台应力下降至1.44 MPa,次加载方向的应力-应变

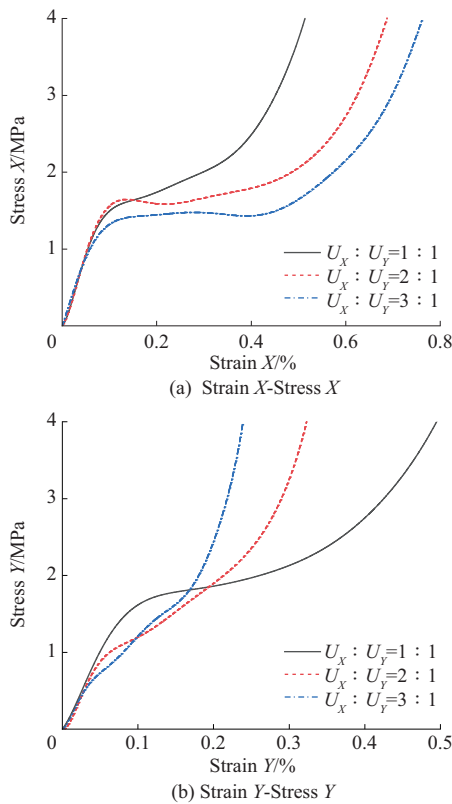


图6 不同比例加载下双轴压缩的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of biaxial compression at various loading ratios

曲线为斜率更大的单调递增模式。

这种从弹性段重合到平台段分化的转变过程,反映了泡沫材料变形机制随应变发展的演变:初始的弹性行为由材料本征属性决定,而后续的平台段响应则强烈依赖于加载比例导致的孔结构坍塌模式差异。弹性段的重合性为多孔材料的多轴本构建模提供了重要依据,表明在小应变范围内可以采用相对简单的各向同性弹性模型。

图7为不同比例加载下双轴压缩的能量吸收效率曲线。由图7可见,在加载初期,所有加载比例下的能量吸收效率均展现出良好的一致性,这证实了初期形变以弹性变形为主。而随后加载比例的增大会导致主加载方向能量吸收效率逐渐增大,并抑制了次加载方向的能量吸收效率。为了进一步探索双轴加载下材料的吸能特性,计算了不同比例加载下最大能量吸收效率及压实应变,见表1。随着加载比例的增大,主加载方向的最大能量吸收效率逐渐增大,次加载方向的最大能量吸收效率逐渐减小。尽管如此,最大能量吸收效率之和近似相同。这一现象揭示了泡沫材料在多轴加载条件下能量吸收的守恒特性:加载比例的改变仅影响能量在不

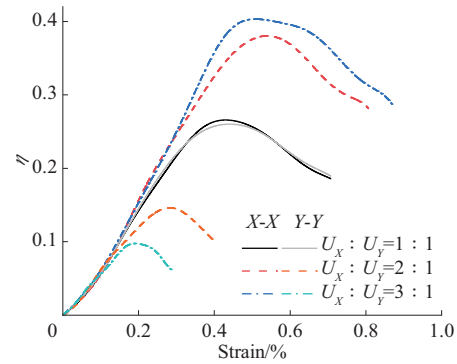


图7 不同比例加载下双轴压缩的能量吸收效率曲线

Fig. 7 Energy absorption efficiency curves of biaxial compression at various loading ratios

同方向的分配方式,而综合吸能效率基本保持不变。对比单轴(1:0)与等双轴(1:1)加载下的密实化应变可知,前者高达0.596 6,而后者两个方向均显著降低至约0.43。这表明,双轴约束效应促使泡孔结构更早地发生相互接触和挤压,从而显著提前了材料的致密化进程。此外,主加载方向的压实应变随着加载比例的增大而出现先增后减的趋势,这种先增后减的趋势可能与不同加载阶段孔结构坍塌模式的转变有关。相比之下,次加载方向的压实应变则随加载比例单调递减。压实应变比与加载比例的差异也随着加载比例的增大而增大。这表明非对称加载会显著影响材料的致密化行为。

表1 不同比例加载下最大能量吸收效率及压实应变

Tab. 1 Maximum energy absorption efficiency and its corresponding dense strain with various loading ratios

Loading ratio	$\varepsilon_{d,X}$	$\eta_{X,max}$	$\varepsilon_{d,Y}$	$\eta_{Y,max}$	$\varepsilon_{d,X} : \varepsilon_{d,Y}$	η_{max}
1:0	0.596 6	0.523 1				0.523 1
1:1	0.429 7	0.265 8	0.440 3	0.260 1	0.975 9	0.525 9
2:1	0.539 5	0.380 2	0.282 4	0.146 1	1.910 4	0.526 3
3:1	0.507 5	0.403 2	0.190 4	0.097 5	2.665 4	0.500 7

Notes: 1:0 represnet uniaxial loading; $\varepsilon_{d,X}$ is dense strain along X-axis; $\varepsilon_{d,Y}$ is dense strain along Y-axis; $\eta_{X,max}$ is the maximum energy absorption efficiency obtained through strainX-stressX curve; $\eta_{Y,max}$ is the maximum energy absorption efficiency obtained through strainY-stressY curve; $\eta_{max} = \eta_{X,max} + \eta_{Y,max}$.

3 结论

研究针对高性能聚合物泡沫设计了一种能实现任意双轴加载比例的夹具,并测试与分析了多种比例加载下PMI泡沫的多轴应力应变关系及其能量吸收机制。具体的研究结论如下:

(1)设计的新型双轴压缩夹具成功地实现了1:1, 2:1, 3:1等多种比例的可控加载,为多孔材料在复杂应力状态下的力学性能测试提供了稳定可靠的

实验平台。

(2)PMI 泡沫在双轴加载条件下的能量吸收行为表现出显著的路径相关性:随着加载非对称程度提高,主加载方向的吸能效率显著提升,而次加载方向则明显降低;但不同比例下两方向的吸能效率之和基本保持一致(0.50~0.53),这表明材料的吸能效率具备良好的比例无关特性。

(3)在不同双轴比例加载下,PMI 泡沫均呈现出典型的弹性、平台和致密化三阶段变形行为;但随着应变比增大,次加载方向的平台区逐渐缩短,反映出非对称应力状态对泡沫变形机制的显著影响。

参考文献

- [1] 秦朝红,侯传涛,康军,等.基于PMI泡沫的可重复使用结构隔声性能研究[J].振动与冲击,2025,44(2):344–350.
QIN Zhaohong, HOU Chuantao, KANG Jun, et al. Sound insulation performance of a reusable structure based on PMI foam[J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44(2):344–350.
- [2] 戴周军,钱栋祥,许漂,等. PMI 泡沫在直升机复合材料桨叶上的应用[J].航空精密制造技术,2021,57(6):38–41.
DAI Zhoujun, QIAN Dongxiang, XU Piao, et al. Application of PMI foam on composite blade of helicopter[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2021, 57(6):38–41.
- [3] 刘燕青,黄安民,刘婷,等.聚甲基丙烯酸酯亚胺泡沫塑料的制备及研究现状[J].塑料科技,2012,40(6):86–90.
LIU Yanqing, HUANG Anmin, LIU Ting, et al. Research situation of polymethacrylimide foam plastics and its preparation[J]. Plastics Science and Technology, 2012, 40(6):86–90.
- [4] 周昊,郭锐,姜炜.内嵌聚甲基丙烯酸酯亚胺泡沫的碳纤维增强复合材料蜂窝夹层结构水中抗爆试验研究[J].南京理工大学学报,2023,47(1):1–7.
ZHOU Hao, GUO Rui, JIANG Wei. Underwater blast resistance experiments of carbon fiber reinforced composite sandwiches with honeycomb core filled by polymethacrylimide foams[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2023, 47(1):1–7.
- [5] GNIP I Y, VAITKUS S, KERŠULIS V, et al. Analytical description of the creep of expanded polystyrene (EPS) under long-term compressive loading[J]. Polymer Testing, 2011, 30(5):493–500.
- [6] BOZORG-HADDAD A, ISKANDER M, WANG H L. Compressive creep of virgin HDPE using equivalent strain energy density method[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(12): 1 270–1 281.
- [7] 苏兴亚,周伦,敬霖,等.软质聚氨酯泡沫的动态压缩力学性能和本构模型[J].爆炸与冲击,2022,42(9):155–165.
SU Xingya, ZHOU Lun, JING Lin, et al. Dynamic compressive mechanical properties and constitutive models of flexible polyurethane foam[J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(9):155–165.
- [8] HASSANLI F, PAYDAR M H. Improvement in energy absorption properties of aluminum foams by designing pore-density distribution[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 14: 609–619.
- [9] SHIVAKUMAR N D, DEB A. Dependence of the mechanical properties of rigid PU foam on density[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2022, 41(9/10):355–363.
- [10] ZHOU Z W, WANG Z H, ZHAO L M, et al. Uniaxial and biaxial failure behaviors of aluminum alloy foams[J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 61:340–349.
- [11] 曲杰,胡焱松,岳凯,等.硬质聚氨酯泡沫在多轴压缩试验下的力学特性研究[J].机械工程学报,2017,53(20):89–97.
QU Jie, HU Yansong, YUE Kai, et al. Research on the mechanical properties of rigid polyurethane foam in the multiaxial compression experiment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(20):89–97.
- [12] HULUKA S, ABDUL-LATIF A, BALEH R, et al. Biaxial characterization of open-cell aluminum foams from macro to micro responses[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 868. DOI:10.1016/j.msea.2023.144588.
- [13] GUO X, WANG E D, YANG H, et al. Mechanical characterization and constitutive modeling of additively-manufactured polymeric materials and lattice structures[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2024, 189. DOI: 10.1016/j.jmps.2024.105711.
- [14] BRIEU M, DIANI J, BHATNAGAR N. A new biaxial tension test fixture for uniaxial testing machine—a validation for hyperelastic behavior of rubber-like materials[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2007, 35(4):364–372.
- [15] KOSSA A. A new biaxial compression fixture for polymeric foams [J]. Polymer Testing, 2015, 45:47–51.
- [16] SUN Z P, ZHANG J J, HUA T, et al. Experimental study on the post-yield responses and crushing patterns of additively manufactured Rhombic Dodecahedron lattices in biaxial compression[J]. Thin-Walled Structures, 2025, 213. DOI: 10.1016/j.tws.2025.113331.
- [17] GENG T J, QIANG H F, WANG Z J, et al. Biaxial compression mechanical properties of HTPB propellant under dynamic loading [J]. AIP Advances, 2022, 12. DOI:10.1063/5.0070331.
- [18] JIN L, YAN W X, FANG Q Z, et al. Experimental measurement and simulation of the biaxial mechanical properties of solid propellant HTPB[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2023, 48(12). DOI:10.1002/prep.202300157.
- [19] PAKA S D, KYRIAKIDES S. Biaxial crushing of honeycombs: Part 1: Experiments[J]. International Journal of Solids and Structures, 1999, 36(29):4 367–4 396.
- [20] 沈明杰,秦仙蓉.硬质聚氨酯泡沫动态压缩本构模型研究及有限元仿真[J].机电技术,2024,47(1):36–41.
SHEN Mingjie, QIN Xianrong. Research on constitutive model of rigid polyurethane foam under dynamic compression and finite element simulation[J]. Mechanical & Electrical Technology, 2024, 47(1):36–41.