

多层泡沫铝夹芯结构准静态压缩力学性能和吸能特性

邹田春, 管玉玺

(中国民航大学 安全科学与工程学院, 天津 300300)

摘要: 采用闭孔泡沫铝和铝合金板制备单层夹芯板和 6 种多层夹芯结构。通过分析胞孔变形模式和宏观变形模式, 研究了夹层板和芯层数量对结构准静态压缩力学性能和吸能特性的影响机制。结果表明: 夹层板通过调节芯层间应力状态使芯层逐层坍塌, 减少了由倾斜变形带形成和延伸所导致的多芯层同步变形、横向滑动以及两侧滑移, 使结构具有更高的坍塌应力、平台应力、单位体积吸能以及更小的致密应变; 芯层数量的增加导致无夹层板结构中变形带的长度和数量增加, 从而改变了其宏观变形模式, 致使结构两侧滑移现象加剧, 同时积累了有夹层板结构中多个芯层中的胞孔缺陷, 因而影响了逐层稳定变形, 导致致密应变增大, 坍塌应力、平台应力和单位体积吸能减小, 致密应变处的吸能效率降低。与其他结构相比, 三层泡沫铝夹层板具有最佳的抗压强度和吸能性能。

关键词: 泡沫铝夹芯结构; 准静态压缩; 力学性能; 吸能特性

中图分类号: TB383

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)11-3818-07

泡沫铝具有优异的隔热、吸声、减震和吸能性能, 在航空航天、汽车、船舶和国防中被广泛应用^[1-3]。随着安全性和经济性要求逐渐提高, 泡沫铝机械性能差和耐腐蚀性能差的缺点日益凸显。由泡沫铝和金属面板构成的泡沫铝夹芯结构不仅保持了泡沫铝诸多优良特性, 还具有较大的刚度、强度和较好的耐腐蚀性能, 受到学者的广泛关注^[4-7]。

由于传统的单层泡沫铝夹芯结构力学响应单一、能量吸收效率有限, 有学者基于试验和数值模拟对多层泡沫铝夹芯结构开展了研究。Shunmugasamy 等^[8]将 3 种不同相对密度的泡沫铝与铝板焊接, 制备了密度梯度分级的三层泡沫铝夹芯结构并对其准静态压缩变形行为进行了试验研究, 发现密度最小的芯层首先发生变形, 其他两个芯层按照密度顺序依次变形。刘雄飞等^[9]将不同相对密度的泡沫铝芯层通过界面粘接剂直接相连制备了 5 种三层梯度泡沫铝结构, 研究了密度梯度分级对结构的压缩性能、变形失效模式和压缩吸能的影响, 发现匀质结构沿泡沫铝壁厚最薄弱区域开始变形至破坏, 梯度结构发生逐层压溃失效破坏, 且单位体积能量吸收值相比于匀质结构最高降低 9%。Chen 等^[10]采用数值模拟的方法, 研究了三层密度梯度分级金属泡沫铝夹芯结构在准静态和动态压缩下的压溃响应, 发现密度梯度分级对准静态压缩下的坍塌变形行为影响有限, 在动态压缩下, 负梯度密度分级有助于降低结构静止侧的应力并使结构

最大限度地吸收能量。Lin 等^[11]使用三维 Voronoi 模型建立了五层密度梯度分级泡沫铝夹芯结构并对其在不同速度冲击下的吸能性能进行了数值分析, 发现在恒速冲击下, 正梯度结构的吸能性能优于负梯度和均匀密度的结构; 在致密化速度冲击下, 在冲击侧配置强度较高的芯层有利于能量吸收。

由上述研究可知, 具有密度梯度分级的多层泡沫铝夹芯结构因其潜在的可控力学响应而受到广泛关注, 与传统的单层泡沫铝夹芯结构相比, 其易于控制的压缩变形过程和力学性能可以满足工程应用的需要, 从而在缓冲和能量吸收领域具有很大的应用前景。在多层夹芯结构中, 夹层板影响了密度梯度分级所实现的受控变形, 芯层数量影响了密度梯度分级的步长^[12-13]。然而, 目前研究人员对多层泡沫铝夹芯结构的研究主要集中在密度梯度分级对其压缩性能的影响, 针对夹层板和芯层数量对其准静态压缩力学性能和吸能特性影响的研究较少。因此, 明确夹层板和芯层数量对多层泡沫铝夹芯结构准静态压缩力学性能和吸能特性的影响机制具有重要的研究意义。本实验在传统的单层泡沫铝夹芯板(AFS)的基础上, 制备了 6 种多层泡沫铝夹芯结构, 分析多层泡沫铝夹芯结构在准静态压缩试验下的力学性能、变形行为和吸能特性, 探究夹层板和芯层数量对其准静态压缩力学性能和吸能特性的影响机制。

收稿日期: 2023-03-16

基金项目: 国家自然科学基金(52071069)

作者简介: 邹田春, 男, 1976 年生, 博士, 副教授, 中国民航大学安全科学与工程学院, 天津 300300, E-mail: 2021091066@cauc.edu.cn

1 实验

采用相对密度为 0.5 的闭孔泡沫铝作为 AFS 的芯体以及多层泡沫铝夹芯板(MLAF)和多层泡沫铝夹层板(MLAFS)的芯层,采用 2024-T3 铝合金板作为 AFS、MLAF 和 MLAFS 的面板和 MLAFS 的夹层板,相对密度的定义为:

$$\bar{\rho} = \rho^* / \rho_m \tag{1}$$

式中: ρ^* 是泡沫铝密度, ρ_m 是基体密度。泡沫铝的平均孔径约为 2.5 mm。AFS 芯体的横截面积为 60 mm×60 mm, 厚度为 40 mm, MLAF 和 MLAFS 芯层的横截面积为 60 mm×60 mm, 厚度为 10 mm, AFS、MLAF 和 MLAFS 面板和夹层板的横截面积为 60 mm×60 mm, 厚度为 1 mm。

首先,使用砂纸打磨泡沫铝和铝合金板的粘接面。然后,用 10%的 NaOH 溶液浸泡 1 min, 擦净后立即用自来水冲洗 2 min 以清除残留的碱液并使用鼓风机干燥。最后,使用二酚基丙烷型环氧树脂作为粘接剂,制备 MLAF 和 MLAFS。三层、四层和五层的 MLAF 的高度分别为 32、42 和 52 mm, MLAFS 的则分别为 34、45 和 56 mm。AFS、MLAF 和 MLAFS 的示意图如图 1 所示。

使用 Instron 5982 电子万能试验机对 AFS、MLAF 和 MLAFS 进行准静态压缩试验, 参照标准为 ISO 13314-2011, 设置恒定应变率为 10^{-2} s^{-1} , 采用高分辨率 GE 4900 相机采集压缩过程中的图像, 采集频率为 1 帧/s^[14]。在压缩试验中, 通过与传感器相连的计算机记录载荷和位移, 使用载荷和位移分别除以试样的横截面积(3600 mm²)和高度计算名义应力和名义应变。对同一种结构进行 3 次试验以获得应力-应变曲线的平均值, 选择与其最接近的试验曲线以及对应的压缩过程图像进行对比分析。试验设备如图 2 所示。

2 结果与讨论

2.1 准静态压缩力学性能和变形行为

图 3 为 AFS、MLAF 和 MLAFS 的应力-应变曲线。AFS、MLAF 和 MLAFS 的压缩过程可分为 3 个阶段:

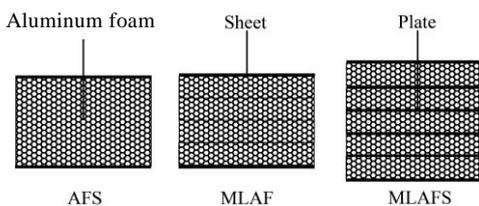


图 1 AFS、MLAF 和 MLAFS 示意图

Fig.1 Schematic diagram of AFS, MLAF and MLAFS

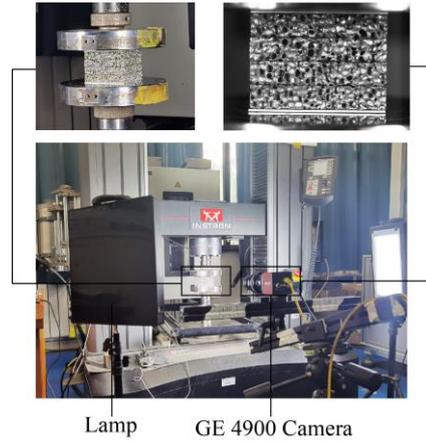


图 2 试验设备

Fig.2 Testing equipment

线弹性阶段、塑性阶段和致密化阶段。与 AFS 和 MLAFS 相比, MLAF 的应力水平较低, 从线弹性阶段到塑性阶段的过渡较为平滑, 与 AFS 和 MLAF 相比, MLAFS 的应力水平较高, 在塑性阶段表现出明显的应力振荡。

由图 3 可知, MLAF 的致密应变约为 60%, 为了详细观察 MLAF 的压缩变形行为, 拍摄了四层 MLAF 在 0、20%、40% 和 60% 应变下的宏观变形序列图, 如图 4 所示。压缩开始后, 坍塌始于上方 2 个芯层之间的交界处(图 4b 中箭头所示), 随着压缩的进行, 胞孔之间的挤压加剧并形成多条变形带, 这些变形带通过层间边界延伸至相邻芯层导致多个芯层同时发生坍塌变形(图 4c 和 4d 中箭头所示)。

与 MLAF 不同, MLAFS 在塑性阶段表现出明显的应力振荡(图 5), 使用点 1 至点 8 标记图 5 中应力振荡的波峰和波谷。为了说明 MLAFS 的变形行为, 评价夹层板的作用, 拍摄了四层 MLAFS 完整的压缩变形过程。图 6 为四层 MLAFS 的宏观变形序列图, 显

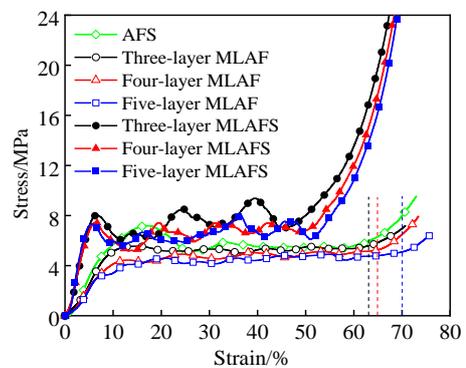


图 3 AFS、MLAF 和 MLAFS 的应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of AFS, MLAF and MLAF

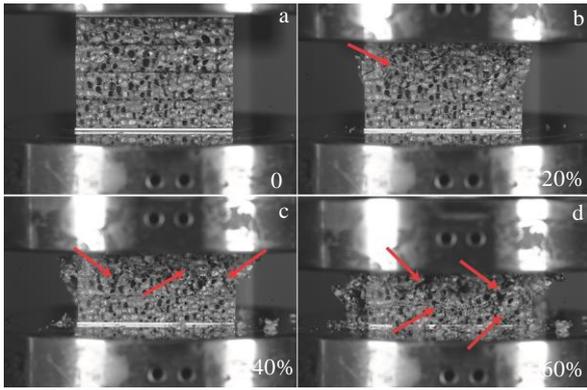


图 4 四层 MLAF 宏观变形序列图

Fig.4 Macroscopic deformation sequence diagram of four-layer MLAF: (a) 0, (b) 20%, (c) 40%, and (d) 60%

示了逐层坍塌变形过程。尽管 MLAFS 中所有泡沫铝芯层名义上的相对密度相同，但是内部胞孔仍存在差异，导致图 6a 和 6b 中标有红框的泡沫铝芯层在压缩过程中首先发生坍塌，此时其他芯层则几乎保持稳定，变形过程对应于图 5 曲线上从点 1 到点 3 的应变区域。随着压缩过程的进行，下一个最薄弱的芯层开始坍塌(图 6c 和 6d 中红框所示)，变形过程对应于图 5 曲线上点 3 至点 5 的应变区域。结构逐层坍塌变形的同时，应力随着胞孔的弹性挠曲而增加、坍塌而降低，这是 MLAFS 的应力-应变曲线在塑性阶段显示出明显的应力振荡且振荡数量与芯层数量一致的原因。当应变达到 54% 时，所有芯层已初步致密化，应力随着应变急剧增加。

为了定量分析 AFS、MLAF 和 MLAFS 的准静态压缩力学性能，需要获取 3 种结构的坍塌应力(σ_c)、平台应力(σ_{pl})和致密应变(ϵ_{cd})。AFS、MLAF 和 MLAFS 的坍塌应力被定义为应力-应变曲线上第一个最大的应力值，AFS 和 MLAF 的平台应力被定义为应变 0.2

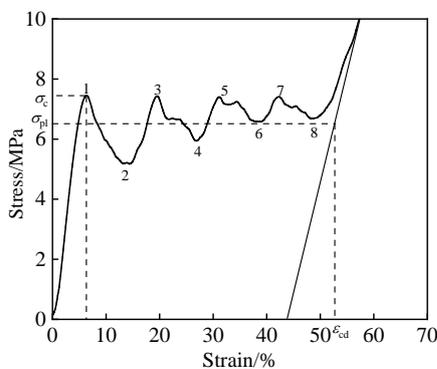


图 5 四层 MLAFS 的应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curve of four-layer MLAFS

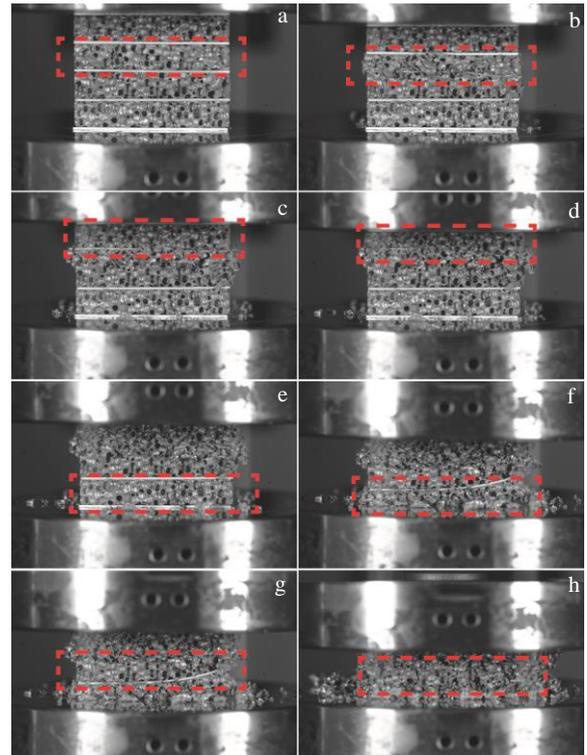


图 6 四层 MLAFS 宏观变形序列图

Fig.6 Macroscopic deformation sequence diagram of four-layer MLAFS: (a-b) collapse of the second layer; (c-d) collapse of the first layer; (e-f) collapse of the fourth layer, and (g-h) collapse of the third layer

至 0.4 之间的平均应力^[14]。MLAFS 的第 2 个压缩阶段出现应力振荡现象，故使用包含多个完整应力振荡的应变区间计算其平台应力：

$$\sigma_{pl} = \frac{1}{\epsilon_L - \epsilon_1} \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_L} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (2)$$

式中： ϵ_1 和 ϵ_L 分别对应于应力振荡阶段的第一个和最后一个峰值点，如图 5 中标记的点 1 和点 7。AFS、MLAF 的致密应变(ϵ_{cd})被定义为吸能效率达到最大值时所对应的应变，MLAFS 的致密应变(ϵ_{cd})被定义为致密化区域绘制的切线与平台应力的交点对应的应变^[15-16]。

AFS、MLAF 和 MLAFS 在准静态压缩下的坍塌应力(σ_c)、平台应力(σ_{pl})和致密应变(ϵ_{cd})如表 1 所示。由表中数据可知，与 AFS 和 MLAF 相比，MLAFS 具有较高的坍塌应力、平台应力和较小的致密应变，表明添加夹层板提高了多层泡沫铝夹芯结构的抗压强度，加快了其致密化进程。芯层数量的增加导致 MLAF 和 MLAFS 的坍塌应力和平台应力降低、致密应变增大，说明较多的芯层数量削弱了结构的抗压强度并减缓了致密化进程。

表 1 坍塌应力、平台应力和致密应变

Table 1 Collapse stress, σ_c plateau stress, σ_{pl} and densification strain, ε_{cd}

Layer number	Collapse stress, σ_c /MPa		Plateau stress, σ_{pl} /MPa		Densification strain, ε_{cd} /%	
	MLAF	MLAFS	MLAF	MLAFS	MLAF	MLAFS
AFS	7.17		5.63		59	
Three-layer	5.49	8.03	5.20	7.37	63	50
Four-layer	4.40	7.47	4.76	6.52	65	54
Five-layer	4.09	7.32	4.37	6.43	70	59

2.2 吸能特性

吸能能力是表征泡沫铝吸能特性的重要参数。在单轴准静态压缩下，单位体积吸能量(W_v)为特定应变下应力-应变曲线下的面积^[17]：

$$W_v = \int_0^{\varepsilon_0} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (3)$$

式中： ε 为应变， σ 为对应的应力， ε_0 为特定应变。由表 1 可知 MLAFS 的致密化应变约为 55%，为了在相同变形程度下比较不同结构的吸能能力，计算 55% 应变下各结构的单位体积吸能量，如表 2 所示。结果表明，具有较少芯层数量的 MLAFS 的单位体积吸能量更高、吸能能力更强。

吸能效率是泡沫铝所吸收能量与对应应力的比值^[18]：

$$\eta(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma(\varepsilon)} \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (4)$$

式中： η 为吸能效率， ε 为应变， σ 为对应的应力。图 7 是 MLAFS 的应力-应变与吸能效率曲线，不同于泡沫铝平滑的吸能效率曲线，该曲线上可以识别出几个突出的峰值，这些峰值对应于应力-应变曲线上的波谷，峰值数量与芯层数量一致。随着应变的增加，吸能效率先增加后降低，最大值在应力-应变曲线上最后一个波谷所对应的应变为 48%，此时压缩过程尚未进入致密化阶段。图 7 中的垂直虚线标示了不同 MLAFS 致密应变的位置，三层、四层和五层 MLAFS 在致密应变处的吸能效率分别为 44.0%、41.3% 和 37.9%，表明芯层数量较少的 MLAFS

表 2 AFS、MLAF 和 MLAFS 吸能能力

Table 2 Energy adsorption capacity (W_v) for AFS, MLAF and MLAFS (MJ/m^3)

Layer number	MLAF	MLAFS
AFS	2.91	
Three-layer	2.64	3.98
Four-layer	2.34	3.52
Five-layer	2.19	3.47

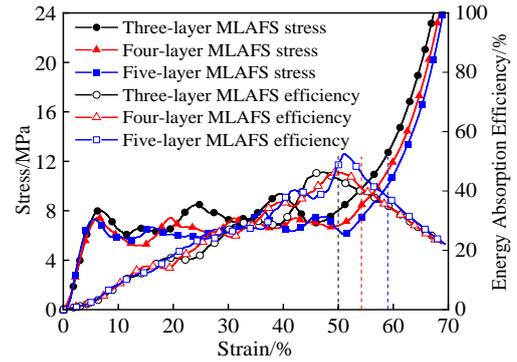


图 7 MLAFS 的应力-应变曲线与吸能效率曲线

Fig.7 Stress-strain curves and energy absorption efficiency curves of MLAFS

在致密应变处具有更高的吸能效率。综合考量吸能能力和吸能效率，三层 MLAFS 具有最佳的吸能性能。

3 变形模式

3.1 胞孔变形模式

图 8 为 MLAF 和 MLAFS 中的胞孔缺陷图。图 8a 和 8b 中可以观察到孔棱和胞壁中存在尺寸较小的微孔缺陷，MLAF 中相邻芯层的不连续也导致芯层交界处存在大量缺陷(图 8c)，这些缺陷导致 MLAF 芯层交界处胞孔相对薄弱。在 MLAF 的准静态压缩过程中，受力的泡沫铝孔棱和胞壁首先发生弹性挠曲，图 3 中可以观察到应力在较小的应变增量下以线性方式增加。因压缩变形速率极低，支撑点处达到应力平衡，胞孔通过球面拱结构实现了应力的传导和分解(图 9)。在胞孔破坏失效之前，泡沫铝中各个胞孔承受相同的应力，随着压缩过程的进行，应力逐渐增大，导致相对薄弱的芯层交界处的胞孔首先发生坍塌^[19-20]。

图 10 是 MLAF 和 MLAFS 中的胞孔变形图，断口、塑性铰和裂纹由箭头标示。由图可知，MLAF 坍塌过程中的胞孔变形模式主要分为 3 类：(1) 倾斜孔棱导致应力传递与压缩方向呈一定夹角，随着压缩的进行，应力逐渐增大，最终导致孔棱剪切破坏(图 10a~10c)；(2) 圆形胞孔受与压缩方向相同的压应力作用，两侧孔棱形成塑性铰，胞壁与孔棱在应力作用下围绕塑性铰相向移动，胞孔形状由圆形转变为椭圆形进而呈细长缝隙状(图 10d~10f)；(3) 与压缩方向平行的压应力和垂直的拉应力分别传递到胞孔的顶部和两侧，随着应力的增大，胞孔形状从近似圆形变为扁平的椭圆形，并且胞壁发生开裂(图 10g~10i)。对于第 1 类胞孔变形，孔棱的剪切断裂会导致应力的释放和重新分布，随后

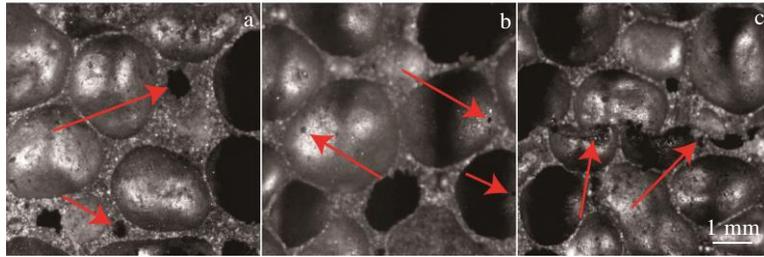


图 8 MLAF 和 MLAFS 中胞孔缺陷图

Fig.8 Cellular defect of MLAF and MLAFS: (a) cell wall, (b) cell membrane, and (c) interface

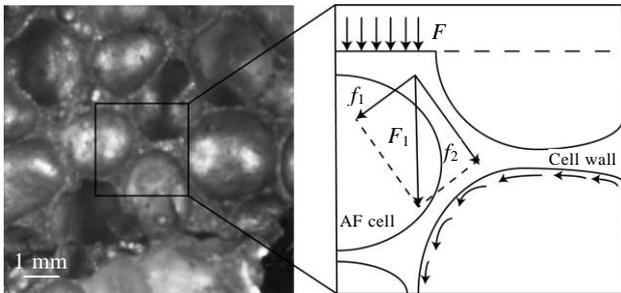


图 9 胞孔中应力分解传导示意图

Fig.9 Schematic diagram of decomposition and conduction of cellular stress

应力将传递到相同倾斜取向的胞孔上并导致下一个最薄弱的胞孔发生坍塌。坍塌胞孔连接形成的变形带沿着 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 的倾斜方向延伸, 变形带之外的胞孔大致保持其原始形状^[21]。对于第 2 类和第 3 类胞孔变形, 结构内部胞孔的胞壁和孔棱断裂、胞孔相连从而形成了平行变形带^[22]。

与 MLAF 坍塌过程中的胞孔变形模式不同的是, MLAFS 的拱形泡沫铝胞孔与夹层板相连, 由倾斜孔棱传递的应力达到夹层板后, 会被分解为垂直方向和水平方向的应力, 如图 11 所示。夹层板通过这种方式调节了界面应力状态, 对芯层之间应力的传递产生了明显的分离效果, 从而抑制了倾斜变形带跨层间边界的延伸, 最

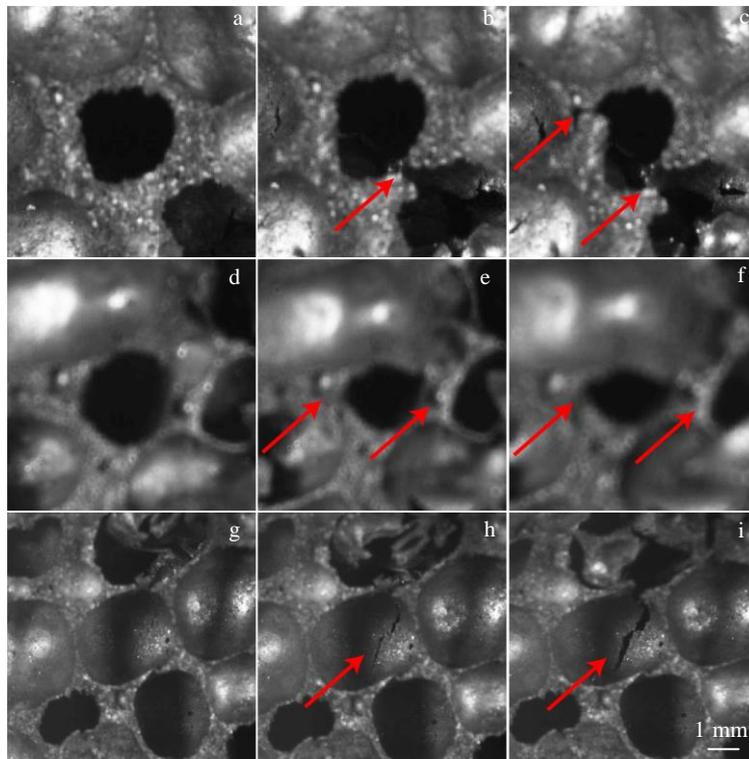


图 10 MLAF 和 MLAFS 中胞孔变形图

Fig.10 Cellular deformation diagram of MLAF and MLAFS: (a-c) shear failure, (d-f) hinge formation, and (g-i) cell crack

终导致平行变形带的形成与延伸以及芯层的逐层坍塌。被分解后的垂直方向上的力传递到下一个芯层的胞孔孔棱上并沿着孔棱传递到下一个夹层板上，水平方向上的力则受到芯层与夹层板之间横向结合力的限制。

3.2 宏观变形模式

图 12 是 MLAF 和 MLAFS 的宏观变形图。MLAF 的变形带以 30°~60° 的倾斜角度贯穿相邻的芯层(图 12a 和 12b)，导致多个芯层的坍塌变形同步发生，这是其应力-应变曲线相对平滑的原因。MLAFS 的变形带则几乎平行于夹层板(图 12c 和 12d)，夹层板抑制了倾斜变形带的形成和延伸，导致芯层坍塌所需的应力增加，提高了结构的坍塌应力和平台应力。此外，夹层板与芯层之间的横向结合力限制了压缩过程中芯层的水平滑动，使芯层被充分压缩吸能，加快了致密化进程并提高了吸能效率。

芯层数量通过影响 MLAF 和 MLAFS 在准静态压缩下的变形行为进而影响抗压强度和吸能性能。图 12a 是三层 MLAF 的宏观变形图，由于结构的芯层数量较少，倾斜变形带的数量和延伸长度有限，在结构左侧形成一个倒 V 型变形带，导致结构左侧出现滑移现象。图 12b 是五层 MLAF 的宏观变形图，由图可知，

多个倾斜变形带于中部某个芯层交界处形成并向两侧芯层延伸，两对变形带分别交叉形成两个 X 型变形带。一方面，一个 X 型变形带将部分结构分为 4 个部分，随着压缩过程的进行，变形带上方和下方的漏斗形部分保持相对完整的胞孔结构并不断挤压两侧的三角形部分，使其产生横向塑性应变^[6]；另一方面，延伸至结构两侧的 X 型变形带会导致结构两侧发生滑移现象，致使某些胞孔在压缩过程中未完全坍塌，削弱了结构的坍塌应力、平台应力和吸能特性，减缓了结构的致密化进程。图 12c 是三层 MLAFS 的宏观变形图，从图中可以观察到变形带与夹层板平行，图 7 中其应力-应变曲线上 3 个波峰值和波谷值依次升高，对应于 3 个强度略有差别的芯层逐层变形。图 12d 是四层 MLAFS 的宏观变形图，从图中可以观察到结构底部芯层中右侧部分并未完全坍塌，导致有呈小角度倾斜的变形带出现。图 7 中其应力-应变曲线上的 4 个波峰值几乎相同，波谷值逐渐升高，振荡幅度逐渐缩窄，表明各个芯层的坍塌并未严格逐层进行，芯层数量的增加削弱了夹层板对层间应力传递的分离效果，影响了 MLAFS 的逐层稳定变形，导致结构的坍塌应力、平台应力和吸能效率降低，致密应变增大。这种现象在四层和五层 MLAFS 压缩变形的后期较为常见，与多个芯层积累的大量胞孔缺陷有关^[23]。

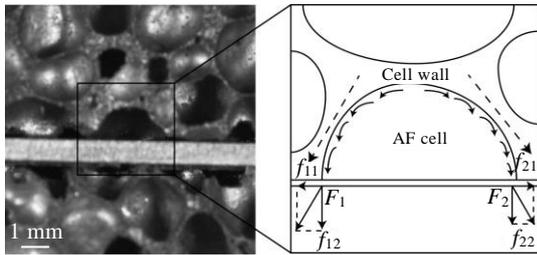


图 11 MLAFS 中夹层板作用

Fig.11 Functional diagram of plate in MLAFS

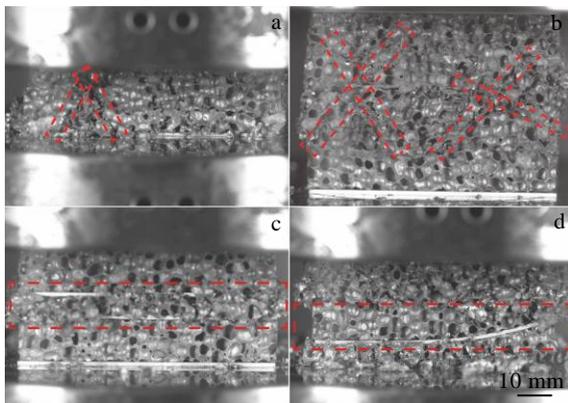


图 12 MLAF 和 MLAFS 宏观变形图

Fig.12 Macroscopic deformation diagram of MLAF and MLAFS: (a) three-layer MLAF, (b) five-layer MLAF, (c) three-layer MLAFS, and (d) four-layer MLAFS

4 结 论

1) MLAFS 中的夹层板对芯层之间应力的传递产生了明显的分离效果，抑制了倾斜变形带的形成和延伸，使芯层逐层坍塌，从而提高了结构的坍塌应力和平台应力，导致结构两侧的滑移减少并使胞孔被充分压缩，增加了单位体积吸能量；夹层板与芯层之间的横向结合力限制了压缩过程中芯层的水平滑动，加快了致密化进程并提高了吸能效率。MLAFS 具有更好的抗压强度和吸能性能。

2) 芯层数量的增加使 MLAF 变形过程中形成的变形带数量增加、长度增大，从而使其宏观变形模式发生改变，导致结构两侧滑移现象加剧，致使某些胞孔在压缩过程中未完全坍塌，削弱了结构的坍塌应力、平台应力和吸能性能，减缓了致密化进程；芯层数量的增加使 MLAFS 积累了大量胞孔缺陷，导致夹层板对层间应力的分离效果被削弱，逐层稳定变形受到影响，最终致使结构的坍塌应力、平台应力和吸能效率降低，致密应变增大。三层 MLAFS 具有最佳的抗压强度和吸能性能。

参考文献 References

[1] Zhang Chun(张 纯), Qi Chao(祁 超), Yan Leilei(闫雷雷) et

- al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(1): 36
- [2] Wang Zhaoming(王召明), Liu Yuan(刘源), Xu Fating(徐法庭) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(1): 119
- [3] Yan Leilei(闫雷霆), Zhang Qiancheng(张钱城), Han Bin(韩宾). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(12): 4365
- [4] Xin Yajun(辛亚军), Xiao Bo(肖博), Cheng Shuliang(程树良) *et al. Chinese Journal of Materials Research*(材料研究学报)[J], 2016, 30(9): 703
- [5] Latour M, D'aniello M, Landolfo R *et al. Thin-walled Structures*[J], 2021, 164: 107 894
- [6] Zhang Z C, Feng H M, Xu T *et al. Composite Structures*[J], 2022, 283: 115 090
- [7] Zhao Y, Yang Z H, Yu T L *et al. Construction and Building Materials* [J], 2021, 273: 121 996
- [8] Shunmugasamy V C, Mansoor B. *Materials Science and Engineering A*[J], 2018, 731: 220
- [9] Liu Xiongfei(刘雄飞), He Ximin(和西民). *Materials Reports* (材料导报)[J], 2023, 37(7): 202
- [10] Chen J Y, Zhang P, Cheng Y S *et al. Thin-Walled Structures*[J], 2020, 157: 107 085
- [11] Lin H, Lv L, Zhang J J *et al. Journal of Cellular Plastics*[J], 2019, 55(6): 589
- [12] Kılıçaslan C, Güden M, Odacı İ K *et al. Thin-Walled Structures* [J], 2014, 78: 70
- [13] Li S, Li Q M. *International Journal of Mechanical Science*[J], 2021, 210: 106 750
- [14] International Organization for Standardization. *ISO-13314*[S], 2011
- [15] Duan Y, Du B, Zhao X H *et al. International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2019, 164: 105 151
- [16] Aldoshan A, Khanna S. *Materials Science and Engineering A* [J], 2017, 689: 17
- [17] Lan Fengchong(兰凤崇), Zeng Fanbo(曾繁波), Zhou Yunjiao(周云郊) *et al. Journal of Mechanical Engineering* (机械工程学报)[J], 2014, 50(22): 97
- [18] Sun Y, Li Q M. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2018, 112: 74
- [19] Cheng Y, Li Y X, Chen X *et al. Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2018, 27(8): 4016
- [20] Zhu L, Guo K L, Li Y G *et al. International Journal of Impact Engineering*[J], 2018, 114: 123
- [21] Mu Y L, Yao G C, Liang L S *et al. Scripta Materialia*[J], 2010, 63(6): 629
- [22] Kader M A, Islam M A, Saadatfar M *et al. Materials & Design*[J], 2017, 118: 11
- [23] Jing L, Su X Y, Yang F *et al. Journal of Materials Science*[J], 2018, 53(20): 14 739

Quasi-Static Compression Mechanical Properties and Energy Absorption Characteristics of Multilayer Aluminum Foam Sandwich Structure

Zou Tianchun, Guan Yuxi

(College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Single-layer sandwich panels and six kinds of multilayer sandwich structures were prepared using closed-cell aluminum foam and aluminum alloy sheets. The cellular and macroscopic deformation modes were analyzed to study the influence mechanism of the plates and layer number on the quasi-static mechanical properties and energy absorption characteristics. The results show that the plates can adjust the stress state and make the cores collapse layer by layer, which reduces the multilayer synchronous deformation, lateral and bilateral slip caused by the formation and extension of the inclined deformation bands, so that the structure has higher collapse stress, platform stress, energy absorption per unit volume and smaller densification strain. The increase in the layer number leads to the increase in the length and number of the deformation bands in the structures without plate, and thus the macroscopic deformation mode changes, resulting in the aggravation of the slip phenomenon on both sides and the accumulation of cellular defects in the structures with plate, which affects the stable deformation and results in the increase in densification strain and the reduction of collapse stress, platform stress and energy absorption per unit volume, and thus the energy absorption efficiency at densification strain decreases. Compared with other structures, the three-layer structure with plates has the best compression resistance and energy absorption properties.

Key words: aluminum foam sandwich structure; quasi-static compression; mechanical properties; energy absorption characteristics

Corresponding author: Zou Tianchun, Ph. D., Associate Professor, College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, P. R. China, E-mail: 2021091066@cauc.edu.cn