

泡沫铝填充金属波纹夹芯梁弯曲破坏模式研究

闫雷雷^{1,2}, 张钱城², 韩 宾²

(1. 西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072)

(2. 西安交通大学 机械结构强度与振动国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 为了提高金属波纹结构的承载效率, 充分发挥泡沫铝在能量吸收方面的优势, 设计了泡沫铝填充金属波纹三明治夹芯梁。针对波纹结构各向异性的特点, 对其横向和纵向 2 个方向在三点弯曲载荷作用下的力学响应及破坏模式进行了试验研究。研究表明, 泡沫铝的填充可以有效改变金属波纹夹芯梁的弯曲破坏模式, 其弯曲刚度和峰值载荷均得到了大幅提升。和横向弯曲相比, 金属波纹夹芯梁在纵向弯曲时具有更强的承载能力, 且泡沫铝填充的增强效果更加显著。纵向弯曲时载荷在达到峰值后并不会突然下降而是呈现出很长的平台区, 表现出更强的后屈曲承载能力。

关键词: 泡沫金属; 波纹夹芯梁; 三明治结构; 三点弯曲; 力学性能; 破坏模式

中图分类号: TB383, TG115.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)12-4365-07

以泡沫铝和金属点阵为代表的金属多孔材料由于具有高比强度、高比刚度及高能量吸收率等力学特性, 加上多孔结构赋予的多功能可设计性使其在航空航天、车辆制造、船舶重工、高速列车等领域具有广泛的应用前景^[1-3]。但金属点阵结构在载荷达到峰值后芯体的单元屈曲导致的承载和吸能效率的大幅下降^[4-6], 而泡沫铝的强度往往处在一个较低水平不能直接用于结构材料^[7,8], 如何进一步提高它们的结构效率是拓展其工程应用亟待解决的瓶颈。

泡沫铝填充金属管件^[9,10]、帽型结构^[11]以及波纹夹芯三明治板^[12-15]等结构的研究表明, 泡沫铝的填充能够有效地提高结构的承载及能量吸收效率。泡沫铝填充金属管件耦合增强机理研究发现, 泡沫铝的填充改变了金属圆管在轴向压缩载荷作用下的屈曲变形模式, 使得其发生屈曲变形时的屈曲波长变短^[6,13], 这是导致其强度及能量吸收效率显著增强的根本原因。泡沫铝填充波纹板也表现出了明显的耦合增强效应, 原因在于泡沫铝的填充给予波纹芯体单元足够强的横向支撑, 使得其在准静态压缩载荷作用下峰值压缩强度及单位质量能量吸收得到大幅提升^[13]。此外, 金属和复合材料管件结构也被用来增强蜂窝夹芯结构^[16-18]和泡沫夹芯结构^[19,20]的力学性能。

夹芯结构作为工程结构材料使用往往会同时承受一定的弯曲载荷作用, 结构的弯曲性能在更大程度上影响着其工程应用范围。近年来, 国内外众多学者对

三明治夹芯结构的抗弯曲性能及其破坏机理进行了细致研究。其中芯体单元既有点阵芯体如波纹芯体^[21,22]、Y 型结构^[23,24]、蜂窝结构^[18,25]、金字塔结构^[26]等, 又有泡沫芯体如金属泡沫^[27,28]、聚合物泡沫^[29]等。泡沫铝填充金属波纹夹芯梁横向弯曲性能研究表明泡沫铝的填充可以有效提升其抗弯性能^[30]。但由于波纹板结构具有明显的各项异性, 其纵向弯曲性能往往会有更优异的表现, 因此需要对泡沫铝填充波纹夹芯梁纵向和纵向弯曲载荷作用下的力学响应及破坏模式进行进一步分析。

本研究设计并制备获得了空心及泡沫铝填充金属波纹夹芯梁, 对其横向和纵向 2 个方向的抗弯性能进行试验研究, 分析泡沫铝的填充对其横向和纵向弯曲力学响应以及 2 个方向的变形破坏模式的影响。

1 实验

本研究所有泡沫铝为熔体发泡法制备获得的闭孔泡沫铝, 其相对密度为 0.24。波纹夹芯梁芯体及面板均为 304# 不锈钢, 通过激光焊接将折弯获得的波纹芯体单元与面板进行焊接即可获得空心波纹夹芯梁。采用电火花将泡沫铝切割为与波纹芯体孔隙尺寸一致的泡沫铝棱柱, 再将其填充到波纹夹芯梁孔隙中并通过环氧树脂粘接即可获得泡沫铝填充波纹夹芯梁。空心及泡沫铝填充波纹夹芯结构的详细制备过程可参考文献^[6,13]。图 1 为制备获得的空心及泡沫铝填充波纹夹

收稿日期: 2020-12-23

基金项目: 国家自然科学基金 (11702326); 陕西省自然科学基金 (2020JQ-113); 中央高校基本科研业务费 (G2019KY05106)

作者简介: 闫雷雷, 男, 1985 年生, 博士, 副教授, 西北工业大学航空学院, 陕西 西安 710072, E-mail: yanleilei@nwpu.edu.cn



图 1 空心及泡沫铝填充波纹夹芯梁试样照片

Fig.1 Images of empty and foam-filled corrugated sandwich beam samples: (a) empty, transverse bending; (b) filled, transverse bending; (c) empty, longitudinal bending; (d) filled, longitudinal bending

芯梁三点弯曲试样。其中，1a、1b 分别为横向弯曲试样，图 1c、1d 分别为纵向弯曲试样。

图 2 为空心及泡沫铝填充波纹夹芯梁横向及纵向三点弯曲试样几何尺寸示意图。所有试样的波纹芯体单元几何尺寸保持不变，即波纹芯体单元厚度 $t=0.41$ mm，芯体单元与面板倾角 $\alpha=45^\circ$ ，芯体总厚度 $c=17$ mm。横向弯曲试样，其试样宽度 $b=40$ mm，长度 l 分别为 312 及 180 mm。分别对应于 2 种不同跨距的试样，分别包含 9 个及 5 个芯体胞元。考虑到波纹芯体单元与面板的焊接节点处（波纹顶端）为结构承载能力最强的点，因此三点弯曲试验过程中载荷施加在该节点处，如图 2a 所示。纵向弯曲试样，其试样宽度为 $b=76$ mm，包含 2 个芯体胞元，试样尺寸示意图及三点弯曲载荷加载方式如图 2b 所示。表 1 为三点弯曲试验涉及到的试样编号及其详细几何参数。

三点弯曲试验测试由西安交通大学强度与振动国家重点实验室 MTS-880 试验加载系统完成。试验过程参考 ASTM C393-11 及 D7249 三明治夹芯梁结构的弯曲性能测试标准。试验加载速率控制为 0.5 mm/min。试验过程中载荷及位移测量均为 MTS-880 试验加载系统自带的载荷及位移传感器获得。为了获得材料更真实的弯曲刚度，试验过程中在弹性段进行了多次加载卸载，采用卸载曲线的斜率表征其弯曲刚度。

考虑到三点弯曲加载过程中夹头部位可能会产生一定的应力集中从而影响结构弯曲性能表征，本研究设计了一副加载压头，其与被测试试样接触点有一个宽为 10 mm 的平台，这可以有效地防止试样加载过程中产生的应力集中。试验过程中还采用了高分辨率的摄像机对

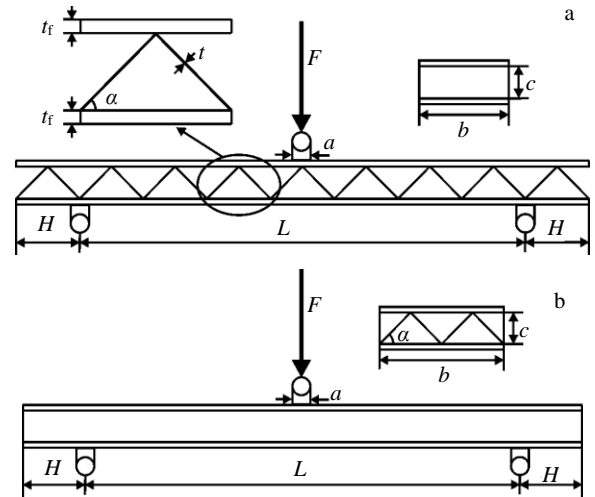


图 2 空心及泡沫铝填充波纹夹芯梁三点弯曲试样几何尺寸示意图
Fig.2 Schematic diagram of geometric parameters of empty and foam-filled corrugated sandwich beam: (a) transverse bending and (b) longitudinal bending

表 1 空心及泡沫铝填充波纹夹芯梁三点弯曲试样编号及几何尺寸

Table 1 Parameters of empty and aluminum foam-filled corrugated sandwich beams for three-point bending test

Specimen	Loading direction	Span, L /mm	Facesheet thickness, t_f /mm
a1/A1	Transverse	242	0.82
a2/A2			0.41
a3/A3		112	2.0
a4/A4			0.82
a5/A5			0.41
b1/B1	Longitudinal	242	0.82
b2/B2			0.41
b3/B3		112	2.0
b4/B4			0.82
b5/B5			0.41

Note: lowercase letters and capital letters indicate empty and related foam-filled specimens, respectively

整个试验过程进行拍摄，可以研究试样在加载过程中的变形破坏模式及其演化过程。

2 结果与讨论

2.1 典型载荷位移曲线分析

2.1.1 横向弯曲

图 3 为泡沫铝填充波纹夹芯梁在横向三点弯曲载荷作用下的典型载荷位移响应及其变形特征^[30]。为了对比，图中同时给出了对应空心波纹夹芯梁的三点弯曲试验结果。由图 3a 载荷位移曲线可以明显看出，泡沫铝填

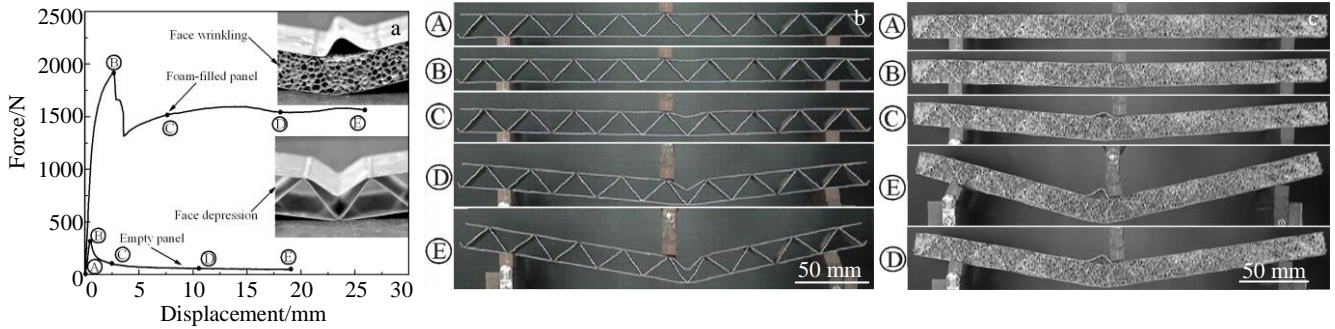


图 3 夹芯梁横向三点弯曲载荷作用下的力学响应

Fig.3 Responses of sandwich beams under transverse three point bending load^[30]: (a) force versus displacement curves and deformation evolution of sandwich beams; (b) empty, specimen a2; (c) filled, specimen A2

充结构与其对应的空心结构相比，在横向三点弯曲载荷作用下承载能力及能量吸收能力（载荷位移曲线下的面积）得到了显著的提高。

对于空心波纹夹芯梁，其载荷在经过一个线弹性上升后即达到其峰值载荷 325.2 N，此时对应的位移为 0.49 mm。达到峰值后载荷便发生迅速大幅下降从而丧失承载能力，原因在于此时波纹夹芯梁面板发生了凹陷，如图 3a 中空心波纹夹芯梁的变形模式所示。图 3b 为空心波纹夹芯梁在三点弯曲载荷作用下的变形过程。由图可以看出，波纹夹芯梁面板凹陷这一变形模式的演化过程主导着空心波纹夹芯梁三点弯曲过程中的变形行为。

对于泡沫铝填充波纹夹芯梁，其载荷在经历线弹性上升段后还会发生一个明显的非线性上升阶段才达到其峰值载荷 1920.7 N，此时对应的位移为 2.68 mm 明显大于空心波纹夹芯梁。随后在试样中心位置夹头右侧面板与泡沫铝接触的部位发生了局部脱胶，之后此处面板产生了一个明显的塑性褶皱，如图 3a 中泡沫铝填充波纹夹芯梁的变形模式所示。这一塑性褶皱的产生导致结构承受的载荷发生了一个明显的下降阶段。与空心波纹夹芯梁不同的是，下降后泡沫铝填充波纹夹芯梁载荷仍维持在一个较高的水平（1500 N），从而并没有完全丧失承载能力，表现出良好的承载及能量吸收特性。图 3c 为泡沫铝填充波纹夹芯梁在三点弯曲载荷作用下的变形过程。由图可以明显看出夹芯结构的面板褶皱这一变形模式的演化过程主导其变形。泡沫铝填充波纹夹芯梁与空心相比，除了峰值载荷的变化（大约为空心结构的 5 倍），其弯曲刚度也由空心波纹夹芯梁的 908.2 N/mm 提高到 2067.5 N/mm。从图 3b 与 3c 也可以看出三明治夹芯结构在三点弯曲试验过程中试样并没有发生焊接节点的脱离，主要是这里讨论的试样其面板和芯体相比较来说较弱，更容易发生面板的破坏，如面板凹陷及面板褶皱。

2.1.2 纵向弯曲

波纹结构是具有明显的各向异性，且在纵向具有更强的承载能力。图 4 为泡沫铝填充波纹夹芯梁在纵向三点弯曲载荷作用下的典型载荷位移响应及其变形特征。与横向弯曲相比，泡沫铝的填充使得金属波纹夹芯三明治结构的抗纵向三点弯曲能力得到了显著提升，载荷达到峰值后并没有发生下降，呈现出很高的应力平台，表现出很强的后屈曲承载能力。

对于空心波纹夹芯梁纵向弯曲，由于面板的屈服及芯体发生塌陷，其在三点弯曲载荷作用下，承受的载荷在经历一个线弹性上升后马上发生了下降。从图 4b 可以看出其弯曲过程中试样面板及芯体的变形过程，面板及芯体单元的屈服为其主要破坏模式。

对于泡沫铝填充波纹夹芯梁，其载荷在经历一个线弹性上升区后缓慢达到峰值，与空心波纹夹芯梁不同的是此时其载荷并没有发生下降，而是在峰值载荷附近一直维持在一个非常高的水平，表现出了非常好的承载及能量吸收特性，如图 4a 载荷位移曲线所示。与空心波纹夹芯梁相比，泡沫铝填充波纹夹芯梁其峰值载荷由 5059.7 N 增加到 9741.8 N，弯曲刚度则由 4205.9 N/mm 增加到 6457.0 N/mm。

泡沫铝填充波纹夹芯结构的压缩性能研究表明，泡沫铝的填充可以给予波纹芯体单元足够的横向支撑从而延缓了其屈曲行为的发生且其屈曲模式转化为更高阶的屈曲模式，导致波纹夹芯结构芯体单元的本身压缩强度得到了显著提升，因此泡沫铝填充结构芯体发生破坏比对应空心结构更困难^[6,13]。由图 4c 泡沫铝填充波纹夹芯梁的变形过程可以看出，在弯曲载荷作用下，泡沫铝的填充使得其变形模式发生了改变。由于芯体结构变强，和面板变形相比，泡沫铝填充波纹夹芯结构发生破坏更加困难。因此，其在弯曲载荷作用下会首先发生面板的破坏。与空心波纹夹芯梁不同的是，此时面板在两条焊

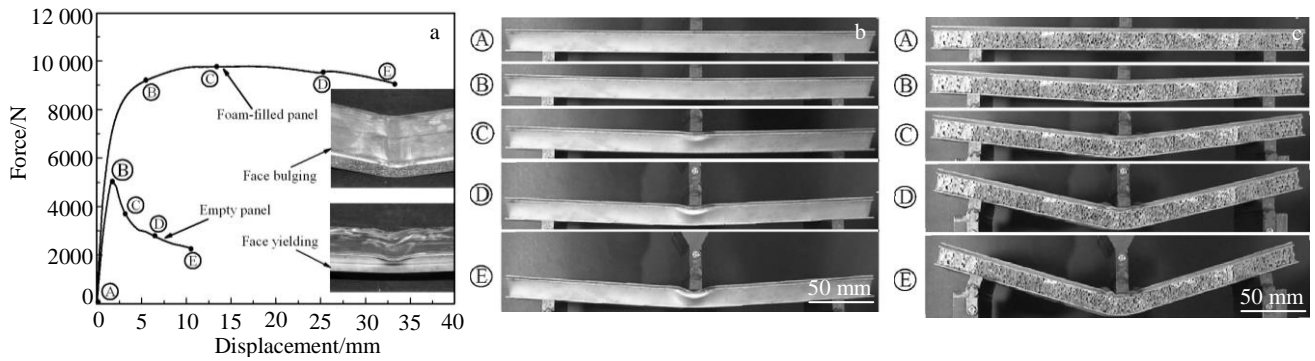


图 4 夹芯梁纵向三点弯曲载荷作用下的力学响应

Fig.4 Responses of sandwich beams under longitudinal three point bending load: (a) force versus displacement curves and deformation evolution of sandwich beams; (b) empty, specimen b2; (c) filled, specimen B2

缝之间鼓起了多个包，这种鼓包破坏主导了泡沫铝填充波纹夹芯梁的变形。这种鼓包破坏与横向弯曲的面板褶皱类似，不同的是对于纵向弯曲此时芯体单元与面板之间的焊缝起着非常显著的抑制作用，使得其不能产生类似横向弯曲的褶皱，而是鼓起多个小包。可以看出，泡沫铝填充波纹夹芯梁与空心波纹夹芯梁相比，变形模式的改变是其抗弯曲性能增强的根本原因。

2.2 破坏模式分析

图 5 及图 6 分别为试验观测到的空心及泡沫铝填充波纹夹芯梁在横向弯曲载荷作用下的典型破坏模式。对于空心波纹夹芯梁，面板凹陷、面板褶皱、面板屈服及芯体破坏为其主要破坏模式。而对于泡沫铝填充波纹夹芯梁，面板褶皱、芯体破坏、面板屈服及脱焊则为其主要破坏模式。面板的厚度对空心及泡沫铝填充波纹夹芯梁的变形模式均会产生很大影响。当面板较弱 ($t_f=0.41\text{ mm}$) 时其破坏模式主要为面板的破坏，如面板凹陷及面板褶皱，而对于较强面板 ($t_f=2\text{ mm}$) 其芯体破坏则是主要破坏模式。对于泡沫铝填充波纹夹芯梁，当面板厚度为

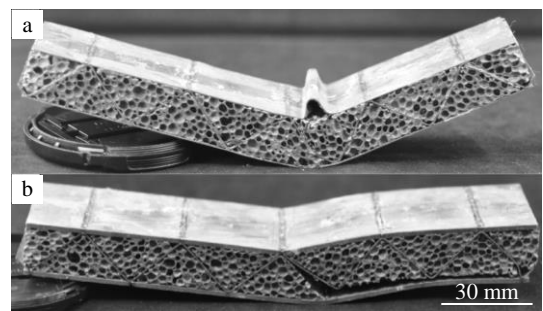


图 6 泡沫铝填充波纹夹芯梁横向弯曲典型破坏模式

Fig.6 Observed typical failure modes of foam-filled sandwich beam under transverse three point bending: (a) face wrinkling and core crushing, specimen A5; (b) face yielding and debonding, specimen A3

2 mm 时短梁试样在弯曲过程中还会发生脱焊破坏。原因在于此时试样弯曲过程中需要的载荷最大，超过了焊缝的临界破坏值从而导致脱焊的发生。

图 7 及图 8 分别为试验观测到的空心及泡沫铝填充波纹夹芯梁在纵向弯曲载荷作用下的典型破坏模式。对于空心波纹夹芯梁，面板屈服、压痕破坏及芯体破坏为其主要破坏模式。而对于泡沫铝填充波纹夹芯梁，面板鼓起、芯体破坏、压痕破坏、面板屈服及脱焊则为其主要破坏模式。泡沫铝的填充使得波纹夹芯梁产生了空心波纹夹芯梁所不具备的破坏模式。

面板与芯体相对强弱及试验过程中跨距的大小主导着波纹夹芯结构三点弯曲载荷作用下的破坏模式。对于空心波纹夹芯梁，当面板较强、芯体较弱时，其变形模式主要为芯体破坏，同时伴随有面板屈服破坏的发生；相反，当芯体相对面板较强时，则会产生压痕破坏。对于泡沫铝填充波纹夹芯梁，当面板较弱时，其主要破坏模式为面板破坏，由于此时波纹芯体单元与面板之间焊

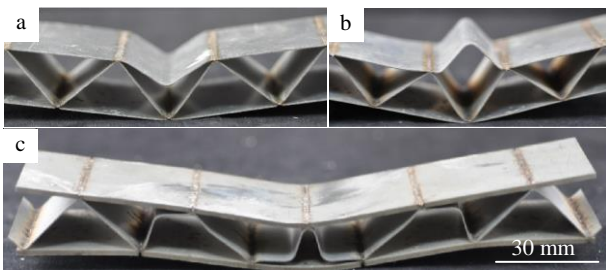


图 5 空心波纹夹芯梁横向弯曲典型破坏模式

Fig.5 Observed typical failure modes of empty sandwich beam under transverse three point bending: (a) face depression, specimen a2; (b) face wrinkling, specimen a5; (c) face yielding and core crushing, specimen a3

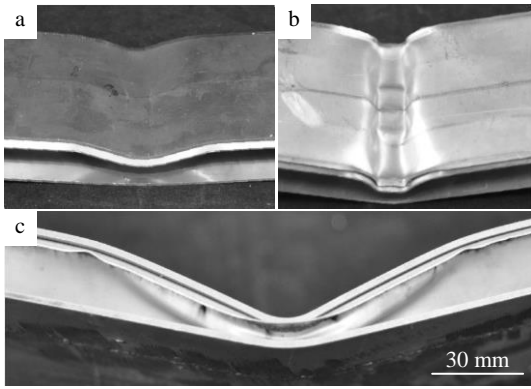


图 7 空心波纹夹芯梁纵向弯曲典型破坏模式

Fig.7 Observed typical failure modes of empty sandwich beam under longitudinal three point bending: (a) face yielding, specimen b4; (b) indentation, specimen b5; (c) core crushing, specimen b3

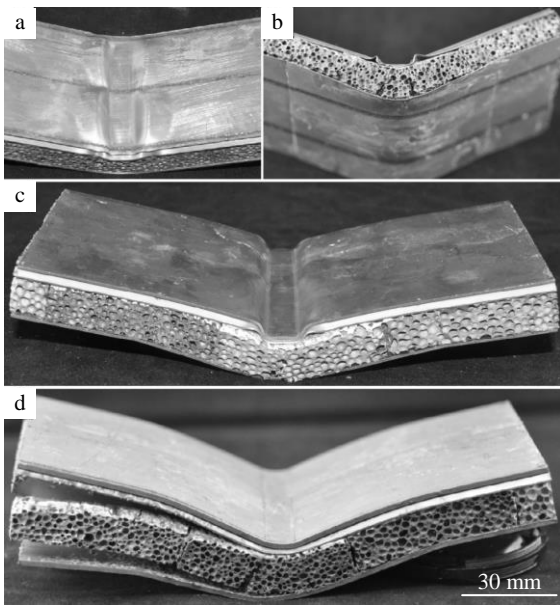


图 8 泡沫铝填充波纹夹芯梁纵向弯曲典型破坏模式

Fig.8 Observed typical failure modes of foam-filled sandwich beam under longitudinal three point bending: (a) face bulging, specimen B1; (b) core crushing, specimen B5; (c) indentation, specimen B4; (d) face yielding and debonding, specimen B3

缝的约束作用，使得面板不能产生类似横向弯曲的褶皱，而只能鼓起一个个小包，称之为鼓包破坏。相反，当面板相对芯体较强（如 $t_f=0.82\text{ mm}$ ）且跨距较小时，面板鼓包需要的载荷更大，超过了芯体的破坏需要的载荷，此时会发生压痕破坏；当面板进一步增强，其面板鼓包需要的载荷超过了焊缝的临界破坏载荷，此时便产

生脱焊。

需要指出的是，由于泡沫铝填充波纹夹芯梁，其发生面板褶皱及面板鼓包破坏时候均会伴随有面板与泡沫芯体的分离，即会产生脱粘，因此其粘接强度的大小将直接影响着其褶皱破坏及鼓包破坏的产生。因此，泡沫铝填充波纹夹芯梁在三点弯曲载荷作用下，环氧树脂的粘接强度对试验结果有着非常显著的影响，但在准静态面外压缩载荷作用下，由于此时变形模式主要为波纹芯体单元的变形模式主导，其对压缩性能的影响则比较小。

2.3 试验结果对比分析

表 2 为空心及泡沫铝填充波纹夹芯梁三点弯曲试验结果对比，包括弯曲刚度、峰值载荷及试验观测到的变形模式等方面。由表 2 可以明显地看出泡沫铝的填充能够使得波纹夹芯梁的抗弯曲性能得到大幅提升，表现在弯曲刚度及峰值载荷的大幅提升。短梁结构（试样 a4, a5, b4, b5 及 A4, A5, B4, B5）和对应的长梁结构相比（试样 a1, a2, b1, b2 及 A1, A2, B1, B2），无论横向弯曲还是纵向弯曲，泡沫铝填充波纹夹芯梁的弯曲刚度及峰值载荷均成倍增加。通过改变波纹夹芯梁面板厚度 t_f 及三点弯曲试验跨距 L 可以获得空心及泡沫铝填充波纹夹芯梁在三点弯曲载荷作用下的不同破坏模式。

由表 2 可以看出试验观测到的泡沫铝填充波纹夹芯梁的破坏模式与对应的空心梁有着明显的不同，也就是说泡沫铝的填充使得波纹夹芯梁在三点弯曲载荷作用下的变形模式发了改变。如空心波纹夹芯梁（试样 b5）的主要破坏模式为压痕破坏，而与之对应的泡沫铝填充波纹夹芯梁(试样 B5)的主要破坏模式则转变为面板鼓包。原因在于泡沫铝的填充使得金属波纹夹芯结构的芯体强度变大，在三点弯曲载荷作用下，芯体被压陷变得更加困难，需要的载荷更大，因此在芯体被压陷之前面板便发生了鼓包破坏。需要指出的是，除了试样 A3 及 B3，大部分试样试验过程中并没有发生脱焊，这也说明了试样焊缝具有良好的焊接强度。

综上所述，泡沫铝的填充还可以有效地改变波纹夹芯梁的变形破坏模式，和空心波纹结构相比，其弯曲刚度和峰值载荷均得到大幅提升。同时，和横向弯曲相比，本研究泡沫铝的填充对波纹夹芯梁的承载能力提升更为显著，尤其是后屈曲承载性能得到了大幅提升。另外，泡沫铝填充波纹结构与传统金属多孔材料相比，如空心波纹、金字塔结构、菱形结构、蜂窝结构等在比压缩强度和比能量吸收方面具有显著的性能优势^[30]。因此，本研究泡沫铝填充波纹夹芯结构和传统广泛采用的波纹夹芯结构相比具有更高的承载及能量吸收效率，在轻量化结构设计方面具有更大的应用潜力。

表 2 空心及泡沫铝填充波纹夹芯梁三点弯曲刚度, 峰值载荷及变形模式试验结果对比

Table 2 Summary of stiffness, peak load and failure mode of specimens subjected to three point bending loads

Specimen		Stiffness/N mm ⁻¹		Peak load/N		Failure mode	
Empty	Filled	Empty	Filled	Empty	Filled	Empty	Filled
a1	A1	2473.2	3487.5	747.9	4300.3	FY+CC	FW
a2	A2	908.2	2067.5	325.2	1920.7	FD	FW
a3	A3	3220.2	11 969.3	11 835.0	21 271.9	FY+CC	FY+DB
a4	A4	2835.4	12 033.4	10 119.2	20 360.5	FY+CC	FW
a5	A5	894.1	6232.2	2043.7	13 155.6	FW	FW+CC
b1	B1	4205.9	6457.0	5059.7	9741.8	FY+CC	FB
b2	B2	2036.5	3148.0	2499.0	5642.4	ID+CC	FB+CC
b3	B3	14 514.2	31 349.8	7797.4	25 337.3	FY+CC	FY+CC+DB
b4	B4	10 196.1	30 040.7	5088.8	19 858.8	FY+CC	ID+CC
b5	B5	9065.0	13 723.1	4386.9	13 447.4	ID+CC	FB+CC

Note: FY-face yielding; FB-face bulging; FW-face wrinkling; FD-face depression; CC-core crushing; DB-debonding; ID-indentation

3 结 论

1) 泡沫铝的填充除了可以大幅提升波纹夹芯梁的压缩性能及能量吸收能力外, 其抗弯曲性能也能得到显著提升, 表现为弯曲刚度、峰值载荷及能量吸收性能等方面。

2) 空心及泡沫铝填充波纹夹芯梁均表现非常明显的各向异性, 其纵向抗弯曲性能要明显优于横向。泡沫铝的填充使得波纹夹芯梁的破坏模式发生改变, 产生新的破坏模式如面板鼓包, 且破坏模式与面板和梁的尺寸有密切关系。

3) 泡沫铝填充金属波纹夹芯梁这一新型三明治夹芯结构在压缩及弯曲载荷下具有的优异的承载及吸能特性使得其在轻质能量吸收领域具有非常广泛的应用前景。

参考文献 References

[1] Jing Lin(敬霖), Wang Zhihua(王志华), Zhao Longmao(赵隆茂). *Mechanics in Engineering(力学与实践)*[J], 2015, 37(1): 1

[2] Evans A G, Hutchinson J W, Fleck N A *et al. Progress in Materials Science*[J], 2001, 46(3-4): 309

[3] Hao Q X, Qiu S W, Hu Y B. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2015, 44(3): 548

[4] Lu Yichen(卢毅晨), Sun Zhonggang(孙中刚), Guo Yanhua(郭艳华) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2020, 49(6): 2067

[5] Zhao Bing(赵冰), Li Zhiqiang(李志强), Hou Hongliang(侯红亮) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工*

程)[J], 2016, 45(8): 2189

[6] Yan L L, Yu B, Han B *et al. Composite Science and Technology* [J], 2013, 86: 142

[7] Ding Xiang(丁详), Liu Yuan(刘源), Wan Tan(万坦). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2020, 49(10): 3452

[8] Li Zhibin(李志斌), Li Xueyan(李雪艳). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2020, 49(9): 3203

[9] Zhang Y, He S Y, Liu J G *et al. Composite Structures*[J], 2019, 220: 451

[10] Song J F, Xu S C, Xu L H *et al. Thin-Walled Structures*[J], 2020, 155: 106 937

[11] Wang Q C, Fan Z J, Gui L J. *International Journal of Solids and Structures*[J], 2006, 43(7-8): 2064

[12] Zhang Wanbo(张万波), Yan Leilei(闫雷雷), Zhao Xue(赵雪) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2019, 48(12): 3911

[13] Yan Leilei(闫雷雷), Zhao Xue(赵雪), Zhao Jingbo(赵静波) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2018, 47(2): 503

[14] Yan L L, Yu B, Han B *et al. Journal of Sandwich Structures & Materials*[J], 2020, 22(4): 929

[15] Yu B, Han B, Ni C Y *et al. Journal of Applied Mechanics*[J], 2015, 82(1): 011 006

[16] Yan L L, Zhu K Y, Chen N *et al. Composite Structures*[J], 2021, 255: 112 946

[17] Zhang Y W, Yan L L, Zhang C *et al. Thin-Walled Structures*[J],

- 2021, 158: 107 188
- [18] Zhang Y W, Yan L L, Zhang W B *et al. Composites Part B: Engineering*[J], 2019, 171: 192
- [19] Yan L L, Jiang W, Zhang C *et al. Polymers*[J], 2019, 11(2): 372
- [20] Yan L L, Zhao Z Y, Han B *et al. Materials Letters*[J], 2018; 227: 70
- [21] Chen D H. *Thin-Walled Structures*[J], 2012, 51: 82
- [22] Tao Q, Wang C G, Wang K *et al. International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2020, 185: 105 848
- [23] St-Pierre L, Fleck N A, Deshpande V S. *Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME*[J], 2012, 79(1): 011 002
- [24] Liu J L, He Z P, Liu J Y *et al. Thin-Walled Structures*[J], 2019, 145: 106 387
- [25] Sun G Y, Huo X T, Chen D D *et al. Materials & Design*[J], 2017, 133: 154
- [26] Xiong J, Ghosh R, Ma L *et al. Composite Structures*[J], 2014, 116: 793
- [27] Rupp P, Elsner P, Weidenmann K A. *Journal of Sandwich Structures & Materials*[J], 2019, 21(8): 2654
- [28] Yu J L, Wang E H, Li J R *et al. International Journal of Impact Engineering*[J], 2014, 35(8): 885
- [29] Pyrzowski L, Sobczyk B. *Composite Structures*[J], 2020, 241: 112 122
- [30] Yan L L, Han B, Yu B *et al. Materials & Design*[J], 2014, 60: 510

Failure Mode of Aluminum Foam-Filled Corrugated Sandwich Beam Under Three-Point Bending Load

Yan Leilei^{1,2}, Zhang Qiancheng², Han Bin²

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aluminum foam-filled corrugated sandwich beam was designed using aluminum foam as filling material to improve the load bearing efficiency of metallic sandwich beam with corrugated cores. Considering the anisotropy of the corrugated structure, both transverse and longitudinal bending response and failure modes were studied by three-point bending test. The result shows that aluminum foam filling can effectively change the bending failure mode of corrugated sandwich beam, leading to a significant increase of bending stiffness and peak bending load. Compared with transverse bending, the enhancement effect of aluminum foam filling on longitudinal bending is more significant, and corrugated sandwich beam has stronger bearing capacity in longitudinal bending. The bending loads presents a long plateau region after its peak without notable decline, showing a stronger post-buckling Load-bearing capacity.

Key words: metal foam; corrugated sandwich beam; three-point bending; mechanical properties; failure modes

Corresponding author: Yan Leilei, Ph. D., Associate Professor, School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, E-mail: yanleilei@nwpu.edu.cn