

缓冲与隔振

EPE 泡沫填充圆形纸蜂窝异面缓冲性能的试验研究

孙玉瑾^{1a,b}, 孙德强^{1a,b}, 谭一², 安兴^{1a,b}, 郝静^{1a,b}, 赵琪^{1a,b}, 焦思涵^{1a,b}

(1.陕西科技大学 a.中国轻工业功能印刷与运输包装重点实验室 b.轻化工程国家级实验教学示范中心, 西安 710021; 2.北京城市学院, 北京 100083)

摘要: **目的** 为了研究 EPE 泡沫填充对圆形纸蜂窝异面缓冲性能的影响, 开展相关试验研究。**方法** 对 2 种排列方式(规则/交错)以及不同填充形式(未填充、全填充、5 种部分填充方式)的 EPE 泡沫填充圆形纸蜂窝结构, 进行异面准静态和动态压缩试验, 研究其异面变形模式和吸能特性, 比较不同排列方式和泡沫填充对其异面缓冲性能的影响。**结果** 静态压缩时, 与未填充蜂窝结构相比, EPE 填充使交错排列的平均平台应力和单位体积能量吸收分别增长了 10.1%和 8.9%, 规则排列分别增长了 7.1%和 7.5%。**结论** EPE 填充使圆形纸蜂窝所承受的最大静应力增大, 且交错排列时增长较明显; 相同填充率下, 填充方式对圆形纸蜂窝异面静态压缩的缓冲性能影响不大。动态压缩时, 排列方式和泡沫填充仅对大载荷下圆形纸蜂窝的动态缓冲性能影响明显。EPE 填充使圆形纸蜂窝异面缓冲性能得到改善, 且交错排列方式优于规则排列。

关键词: 泡沫填充; 圆形纸蜂窝; 异面; 缓冲性能; 评价参数; 能量吸收; 变形模式

中图分类号: TB484 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)13-0082-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.13.011

Experimental Study on the Out-of-plane Cushioning Performance of Circular Paper Honeycomb Filled with EPE Foam

SUN Yu-jin^{1a,b}, SUN De-qiang^{1a,b}, TAN Yi², AN Xing^{1a,b}, HAO Jing^{1a,b}, ZHAO Qi^{1a,b}, JIAO Si-han^{1a,b}

(1a.Key Lab of Functional Printing and Transport Packaging of China National Light Industry b.National Demonstration Center for Experimental Light Chemistry Engineering Education, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China; 2.Beijing City University, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: The work aims to carry out relevant experimental research to study the effect of EPE foam filling on the out-of-plane cushioning performance of circular paper honeycomb. A series of out-of-plane quasi-static and dynamic compression experiments were carried out on the circular paper honeycomb filled with EPE foam in two arrangements (regular/staggered) and different filling patterns (bare, fully filled, five kinds of partial filling), so as to study the out-of-plane deformation modes and energy absorption characteristics and compare the effects of different arrangements and foam filling on the out-of-plane cushioning performance. For static compressions, compared with the bare honeycomb

收稿日期: 2019-10-29

基金项目: 国家自然科学基金(51575327); 陕西省教育厅重点实验室及基地项目(16JS014); 陕西省教育厅 2014 陕西本科高校专业综合改革试点项目(陕教高[2014]16号)

作者简介: 孙玉瑾(1982—), 女, 博士生, 主要研究方向为二维多孔材料的力学性能。

通信作者: 孙德强(1976—), 男, 陕西科技大学教授、博导, 主要研究方向为多孔材料力学性能的测试与仿真、计算机辅助技术与软件开发。

structure, EPE filling increased the average plateau stress and the energy absorption per unit volume by 10.1% and 8.9% for the staggered arrangement pattern, and by 7.1% and 7.5% for the regular arrangement pattern, respectively. EPE filling increases the maximum static stress of circular paper honeycombs, and the growth is more obvious especially for the staggered pattern. At the same filling rate, the filling patterns have little effect on the cushioning performance of circular paper honeycombs under out-of-plane static compression. For dynamic compressions, the arrangement patterns and foam filling only significantly affect the dynamic cushioning performance of circular paper honeycombs under large loads. EPE foam filling can improve the out-of-plane cushioning performance of circular paper honeycombs, and the staggered arrangement pattern is superior to the regular one.

KEY WORDS: filled with foam; circular paper honeycomb; out-of-plane; cushioning performance; evaluation parameters; energy absorption; deformation mode

蜂窝结构作为一种流行的轻量化结构,具有良好的吸能性能和重量成本比,在过去几十年里被广泛应用于航空航天零部件、包装材料、军事装备、汽车零部件等行业领域^[1-5]。近年来,随着安全威胁的日益增加,对轻型防护结构的要求越来越迫切。科学家们提出了开发高能量吸收装置的新策略^[6-7],其中增加各单元能量吸收是促进整体结构能量吸收的有效途径,充填结构就在这样的条件下产生。其中一种充填方法是在蜂窝结构中填充轻质材料,如铝蜂窝、金属泡沫或聚合物泡沫^[8-9]。

张勇等^[10]将聚氨酯泡沫填充到六边形蜂窝纸板制得复合材料,利用落锤试验模拟空投物资过程,研究了复合材料的孔径大小、厚度、横截面积以及冲击速率对其异面动态缓冲性能的影响。鄂玉萍和张喜俊^[11]制备了泡沫填充型蜂窝纸板,利用准静态压缩试验研究了不同泡沫密度、填充方式、蜂窝结构边长比以及不同压缩速度对填充型纸板的影响,填充泡沫后蜂窝纸板的异面压缩性能和缓冲性能均得到提高。Liu 等^[12]用不同密度的 EPP 泡沫填充六边形铝蜂窝结构,进行准静态压缩试验,研究得到填充后的蜂窝异面平均抗压强度和能量吸收都得到大幅度的提高。

上面的研究对象均是六边形蜂窝填充结构,Oruganti 和 Ghosh^[13]利用有限元法研究了六边形和圆形蜂窝的蠕变变形,证明圆形蜂窝比同等密度的六边形蜂窝具有更优的共面吸能特性,由此可见,与目前研究较多的六边形蜂窝相比,圆形蜂窝结构更值得进一步研究其性能。关于圆形蜂窝结构的研究大都集中在共面破碎行为上,但在工程应用中,蜂窝通常被用作夹层板的夹芯,其异面方向比共面方向表现出更优越的力学性能,因此,研究圆形蜂窝结构异面力学性能,对其缓冲优化设计具有重要的实用价值。

在已有研究中,Royan 和 Waas^[14]将较软的聚氨酯填充到聚碳酸酯圆形蜂窝管当中,其异面负载能力得到提升;由于蜂窝管采用聚碳酸酯材料其韧性不够,在压缩过程中出现纵向撕裂现象,导致其承载能

力急剧下降。Hu 等^[5]采用理论分析和数值计算相结合的方法,在大范围冲击速度下对圆孔蜂窝面外冲击的动态破碎进行了研究,并通过试验进行了验证;此外,还对 2 种排列方式的圆形蜂窝结构进行了性能对比。这些研究都没有触及圆形蜂窝的缓冲性能。文中以 EPE 泡沫填充的圆形纸蜂窝为研究对象,研究泡沫填充对其缓冲性能的影响,为此制备了 2 种排列方式和 5 种不同 EPE 泡沫填充形式的圆形纸蜂窝试样,并对其进行异面准静态压缩试验和动态压缩试验,分析比较排列方式、泡沫填充和填充形式对圆形纸蜂窝异面缓冲性能的影响。

1 试验

1.1 材料

圆形纸管由内外 2 层牛皮纸和中间 1 层芯纸与轴向成一定角度卷制粘合而成,牛皮纸的定量为 160 g/m²,厚度为 0.2 mm,芯纸的定量为 400 g/m²,厚度为 0.6 mm。最终成型后的圆形纸管壁厚为 1 mm,半径为 10 mm,高度为 30 mm,由科力世展(天津)包装科技有限公司生产。EPE 泡沫是直径为 20 mm 的圆柱形发泡聚乙烯塑料,密度为 12 kg/m³,由广州市承丰包装材料有限公司生产。

圆形蜂窝分为规则排列和交错排列 2 种结构,见图 1。结构单元大于一定数量后,单元数对蜂窝平台载荷的影响可忽略^[14],根据试验需求制备 x_1 和 x_2 方

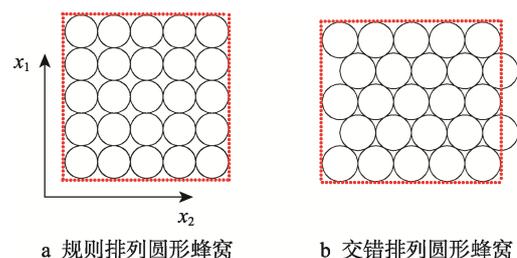


图 1 5×5 圆形蜂窝结构俯视图

Fig.1 Top view of circular honeycomb structure with 5×5 cells

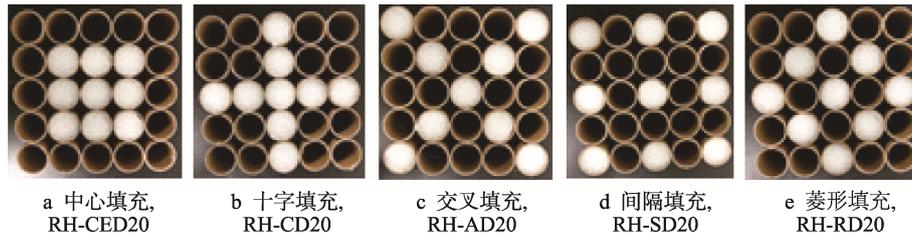


图2 部分填充试样俯视图及代码表示

Fig.2 Top views of the samples with different foam-filling patterns and code representation

向上分别为 5×5 个单元的试验样品, 异面方向是指垂直于 x_1-x_2 平面的方向。对于 2 种结构的圆形纸蜂窝, 纸管与纸管之间是利用汉高百得卓效型熊猫白胶粘合的。试验中使用了 9 种试样结构, 代码“SH-FD20”和“SH-ED20”分别表示交错排列全填充和未填充的试样; 代码“RH-FD20”和“RH-ED20”表示规则排列全填充和未填充的试样。此外, 规则排列下部分填充方式分别呈中心、十字、交叉、间隔、菱形等, 填充方式和代码见图 2。在所有代码中“D20”表示直径为 20 mm。

1.2 方法与设备

将制备的试样放置在温度为 $22.5\text{ }^\circ\text{C}$, 相对湿度为 50% 的大气环境下处理 24 h。参照 GB/T 8168—2008《包装用缓冲材料静态压缩试验方法》, 利用 SANS 微机控制电子万能试验机(型号 CMT4303, 量程 30 kN)对试样进行静态压缩试验, 压缩速度采用 12 mm/min , 其中每种结构取 3 个试样。

动态压缩试验参照 GB/T 8167—2008《包装用缓冲材料动态压缩试验方法》, 试验中对每种试样选择 9 种落锤质量, 由于该圆形纸蜂窝试样异面弹性恢复性差, 可采用变通试验方法^[15], 同一结构的试样在同一落锤下只进行一次冲击, 但每种结构取 5 个试样, 对试验数据求平均值。其中, 跌落高度为 400 mm, 试验设备为 XG-HC 型动态缓冲材料试验机。

2 数据处理方法

2.1 静态压缩

静态压缩试验后, 在电脑控制端获得圆形纸蜂窝的载荷-位移曲线, 利用式(1—2)在忽略蜂窝横向变形的情况下, 将其转变为工程应力-应变曲线。应力-应变曲线可以反映缓冲材料或结构在外力作用下的变形过程, 以及能量的传递和变换。应力的计算公式为:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

式中: σ 为应力 (MPa); F 为压缩载荷 (kN); A 为试样面积 (mm^2), 图 1a—b 中虚线框部分为受力面积。

应变的计算公式为:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l} \quad (2)$$

式中: ε 为应变; δ 为压缩位移 (mm); l 为试样原始高度 (mm)。

初始峰应力 (σ_{PS}) 指试样在弹性阶段受到的应力最大值, 是评价缓冲材料或结构缓冲性能的参数, 避免过大的初始峰应力可使被保护件免受损伤。

平均平台应力 (σ_{MCS}) 是评价缓冲材料或结构能量吸收能力的重要参数。平均平台应力越大, 其能量吸收能力越强。可定义为试样从平台区到密实化发生时的应力平均值, 其计算公式为:

$$\sigma_{\text{MCS}} = \frac{1}{\varepsilon_d - \varepsilon_i} \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (3)$$

式中: ε_i 表示初始峰应力 σ_{PS} 对应的初始应变; ε_d 表示密实化应变。密实化应变 ε_d 指材料或结构在压缩中发生密实化时的应变, 是评价材料力学性能的重要参数。其测定方法有很多^[16—18], 文中用最大能量吸收效率来确定, 即能量吸收效率取得最大值时所对应的应变。

能量吸收效率是某一应变 ε_a 下, 单位体积能量吸收 E_a 是该应变对应应力 σ_a 的比值。应变 ε_a 下, 单位体积能量吸收的计算公式为:

$$E_a = \int_0^{\varepsilon_a} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (4)$$

式中: E_a 表示单位体积能量吸收 (J/cm^3)。此时的能量吸收效率 E_{ca} 为:

$$E_{\text{ca}} = \frac{\int_0^{\varepsilon_a} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\sigma_a} \quad (5)$$

最大能量吸收效率 E_c 的计算公式为:

$$E_c = \frac{\int_0^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\sigma_d} \quad (6)$$

式中: σ_d 为试样发生密实化时的应力。

缓冲系数 (C) 是能量吸收效率的倒数。当缓冲材料承受相同应力时, 缓冲系数越小, 说明材料或结构单位体积吸收的能量越多, 缓冲效果越好, 反之, 缓冲效果越差。应变 ε_a 下缓冲系数 C_a 的计算公式为:

$$C_a = \frac{\sigma_a}{\int_0^{\varepsilon_a} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon} \quad (7)$$

密实化总能量吸收 (EA) 是试样密实化开始时所吸收的总能量,其计算公式应该为密实化时的单位体积能量吸收与试样初始体积 V_0 的乘积,即:

$$EA = V_0 \times \int_0^{\epsilon_a} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (8)$$

2.2 动态压缩

动态压缩试验后,在电脑控制端获得加速度-时间曲线,在不同落锤质量下得到相应的最大加速度 G_m ,通过数据拟合绘制出最大加速度 G_m 与静应力 σ_s 曲线图,称为动态缓冲曲线。动态缓冲曲线是描述缓冲包装材料或结构冲击能量吸收特性的一种手段,试验的目的是通过动态缓冲曲线比较具有不同排列方式的圆形纸蜂窝的异面动态缓冲性能。

静应力 σ_s 是落锤重力与试样受力面积的比值,其计算公式为:

$$\sigma_s = \frac{mg}{A} \times 10^3 \quad (9)$$

式中: σ_s 表示试样的静应力 (kPa); m 表示落锤质量 (kg); g 表示重力加速度 (9.8 m/s^2)。

3 结果与分析

3.1 EPE 泡沫填充结构的耦合

为了研究 EPE 泡沫填充圆形纸蜂窝结构的耦合作用,对单个 EPE 泡沫柱、空圆形纸管和 EPE 填充圆形纸管分别进行了异面静态压缩试验,试样高度均为 30 mm,得到应力-应变曲线(见图 3)。由图 3 可知,EPE 泡沫在压缩过程中,应力随应变线性缓慢增加,其屈服过程不明显,当应变达到一定值后,应力迅速增大,达到密实化。空管曲线在开始阶段应力增加迅速,应力-应变呈线性,当应力到达峰值之后持续下降,此时空管被压溃,缓冲性能下降,直至发生密实化。EPE 填充管的应力-应变曲线明显经历了弹性阶段、屈服阶段、平台阶段以及密实化阶段。在弹性阶段,曲线和空管曲线几乎重合,此时主要是圆形纸管在承受压缩载荷;随后进入屈服阶段,应力少量下降并进入平台阶段;当应变为 0.2~0.6 时,平台阶段的应力明显大于空管及 EPE 单独受压时的应力,且高于两者总和。由此可知,EPE 泡沫和空管之间存在耦合的作用,EPE 泡沫填充提高了空管的承载力和稳定性,同时也缩短了其有效压缩行程^[19]。

单个 EPE 泡沫柱、空圆形纸管和 EPE 填充圆形纸管的单位体积能量吸收-应变曲线见图 4。由图 4 可知,当应变小于 0.2 时,EPE 填充管的单位体积能量吸收和空管相同,说明此时 EPE 泡沫能量吸收很小;当应变大于 0.2 时,EPE 填充管的吸能优势显著增加,其单位体积能量吸收明显大于 EPE 及空管单独受压时的能量吸收,且比二者之和还大,进一步论

证了 EPE 泡沫与圆形纸管之间存在耦合作用,使得 EPE 泡沫填充圆形纸蜂窝的承载及能量吸收能力得到提高。

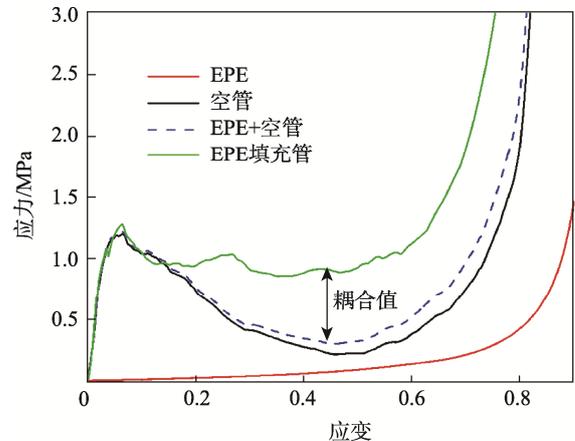


图 3 EPE 泡沫、空单管及填充单管的应力-应变曲线
Fig.3 Stress-strain curves of EPE foam, bare single tube and foam-filled single tube

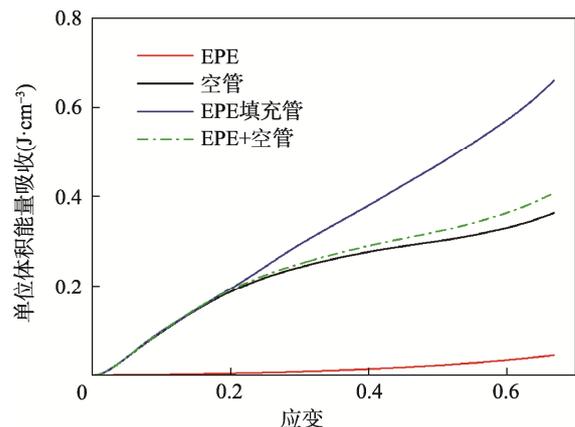


图 4 EPE 泡沫、空单管及填充单管的单位体积能量吸收-应变曲线

Fig.4 Energy absorption per unit volume-strain curves of EPE foam, bare single tube and foam-filled single tube

3.2 静态压缩过程

在规则排列下,未填充和全填充 EPE 泡沫圆形纸蜂窝结构的载荷-位移曲线见图 5,由图 5 看出,曲线均经历了弹性阶段、屈服阶段、平台区阶段以及密实化等 4 个阶段。弹性阶段,二者的曲线基本一致,载荷达到初始峰值力后发生屈服进入平台区,此时全填充圆形纸蜂窝曲线在未填充蜂窝的曲线上方,承载能力强。由于纸管和 EPE 泡沫的承载能力相差较大^[20],因此提高不明显。

全填充 EPE 泡沫圆形纸蜂窝结构轴向压缩的相应变形模式见图 6,其中图 6a、图 6b 和图 6c 分别对应图 5 中的 、 、 点。压缩开始发生时,试样处于弹性阶段,变形较小,压缩位移为 3 mm 左右时发生屈服,产生局部剪切变形(图 6a)。从载荷-位移

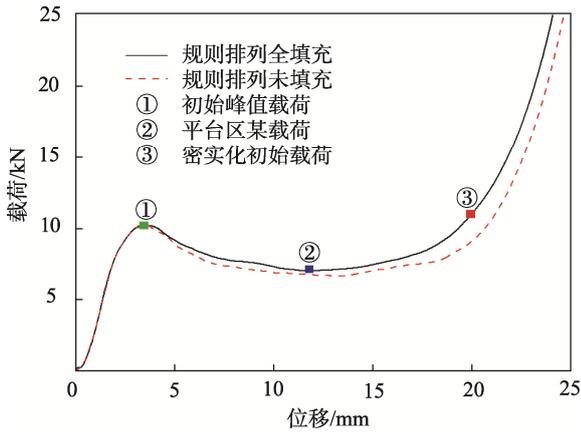


图5 静态压缩规则排列圆形纸蜂窝的载荷-位移曲线
Fig.5 Load-displacement curves of circular paper honeycomb with regular arrangement of cell layers under static compression



a 开始发生屈服时的变形



b 开始进入平台区时的变形



c 密实化初始时的变形



d 载荷撤离后的变形

图6 静态压缩规则排列圆形纸蜂窝的压缩变形过程
Fig.6 Compression deformation process of circular paper honeycomb with regular arrangement of cell layers under static compression

曲线来看,这个阶段主要是纸蜂窝结构承受载荷;随着压缩位移的增加,试样进入平台区,发生塑性坍塌,折曲产生塑性铰,EPE泡沫在压缩过程中开始承受一部分载荷,图6b是平台区某一时刻的变形,此时圆形纸蜂窝被压溃,受其生产工艺影响,变形沿一定角度发生扭曲;最后试样被压实发生密实化,蜂窝结构因EPE泡沫的支撑和挤压产生开裂甚至剥离,见图6c。撤掉载荷后,受EPE泡沫弹性恢复,蜂窝结构的变形也有所恢复,但破坏程度进一步加大(图6d),

此时可以清晰地看到圆形纸蜂窝结构的塑性铰压痕。

3.3 静态压缩性能比较

3.3.1 能量吸收特性

静态压缩下试样的能量吸收特性见表1。从表1数据得出,填充EPE泡沫后,圆形纸蜂窝结构的初始峰应力基本保持不变,从而可以避免产生过大的初始峰应力使被保护件遭受破坏。未填充EPE时,交错排列试样的平均平台应力和发生密实化时单位体积能量吸收分别高于规则排列试样的12.9%和12.5%。EPE全部填充后,规则排列试样的平均平台应力从0.7 MPa提高到0.75 MPa,增加了7.1%,单位体积能量吸收从0.40 J/cm³提高到0.43 J/cm³,增加了7.5%;对于交错排列试样,上述2指标分别增长了10.1%和8.9%。由此可见,EPE泡沫填充提高了圆形纸蜂窝结构的能量吸收特性,且交错排列方式要优于规则排列。这是因为交错排列试样中每1个圆管与其周围6个圆管均有接触,能更好地与他们产生相互作用,从而提高其性能,而规则排列时,每1个圆管只与周围4个圆管有接触,相互作用较小。

表1 试样参数及其吸能参数实验结果

Tab.1 Experimental results of sample parameters and their energy absorption parameters

试样类型	初始峰应力/ MPa	平均平台应力/ MPa	单位体积 能量吸收/ (J·cm ⁻³)
SH-FD20-S1	0.92	0.87	0.49
SH-FD20-S2	0.95	0.87	0.50
SH-FD20-S3	0.94	0.86	0.49
平均值	0.93	0.87	0.49
RH-FD20-S1	0.79	0.75	0.42
RH-FD20-S2	0.84	0.74	0.42
RH-FD20-S3	0.84	0.76	0.43
平均值	0.82	0.75	0.43
SH-ED20-S1	0.95	0.80	0.46
SH-ED20-S2	0.90	0.78	0.44
SH-ED20-S3	0.95	0.80	0.45
平均值	0.94	0.79	0.45
RH-ED20-S1	0.85	0.71	0.40
RH-ED20-S2	0.76	0.68	0.39
RH-ED20-S3	0.85	0.72	0.41
平均值	0.82	0.70	0.40

3.3.2 缓冲系数

试样的缓冲系数-最大静应力曲线见图7。由图7

可知，当应力较小时，交错排列的缓冲系数曲线相对规则排列小幅度右移，即同一应变下交错排列圆形纸蜂窝承受的最大静应力高于规则排列，且交错排列全填充圆形纸蜂窝结构所承受的最大静应力最大；随着应力的增大，缓冲曲线基本重合，缓冲性能变化不大。由此可见，虽然 EPE 泡沫填充提高了圆形纸蜂窝的静态缓冲性能，但在压缩后期几乎无影响。

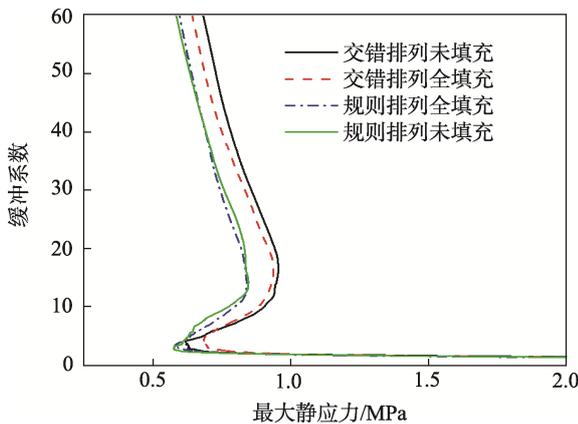


图 7 缓冲系数-最大静应力曲线

Fig.7 Cushioning coefficient-maximum static stress curve

3.3.3 不同填充形式圆形纸蜂窝结构性能比较

不同填充方式的规则排列圆形纸蜂窝平均平台应力和发生密实时单位体积能量吸收，以及密实化总能量吸收和最大能量吸收效率，见图 8—9。全填充圆形纸蜂窝的缓冲性能参数均高于部分填充，对于相同填充率的部分填充，其填充形式对上述参数影响不大，但是菱形填充较优于其它填充形式，这是因为 EPE 泡沫在菱形填充的蜂窝结构中分布更均匀，因而压缩时结构变形更稳定。

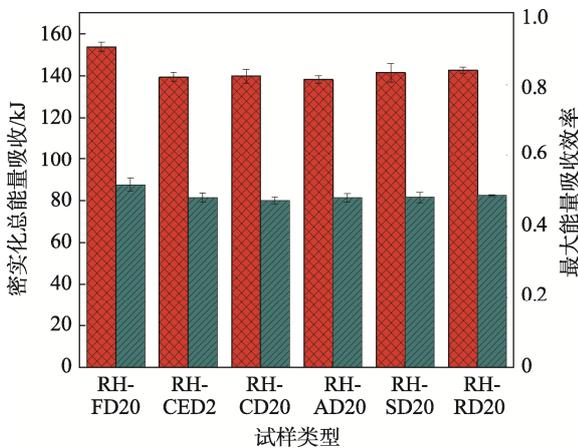


图 8 不同填充方式规则排列圆形纸蜂窝的平均平台应力和单位体积能量吸收

Fig.8 Mean plateau stress and energy absorption per unit volume of circular paper honeycomb under regular arrangement with different foam filling patterns

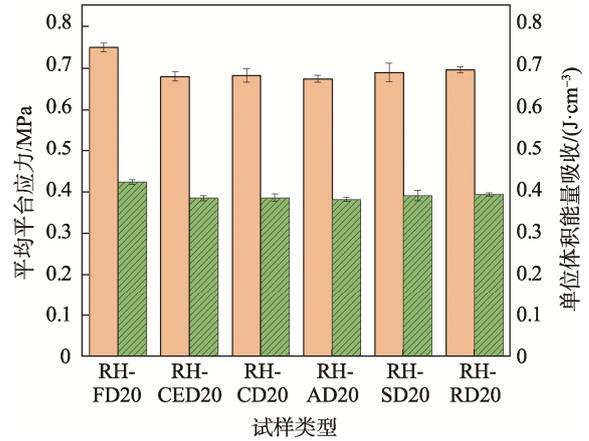


图 9 不同填充方式规则排列圆形纸蜂窝的密实化总能量吸收和最大能量吸收效率

Fig.9 Total energy absorption and maximum energy absorption efficiency of circular paper honeycomb under regular arrangement with different foam filling patterns

3.4 圆形纸蜂窝结构动态压缩性能比较

动态压缩试验所采用的落锤质量和静应力数据见表 2。试验后，拟合出最大加速度 G_m -静应力 σ_s 曲线，即动态缓冲曲线，见图 10。由图 10 可知，2 种排列圆形纸蜂窝结构的动态缓冲曲线变化趋势基本一致。当静应力较小时，EPE 泡沫填充对圆形纸蜂窝结构的动态缓冲性能几乎无影响，而随着静应力的增加，交错排列全填充圆形纸蜂窝结构的动态缓冲曲线位于最下方，即该结构在一定静应力范围内所产生的最大加速度最小。由此可见，排列方式和 EPE 填充对小载荷下圆形纸蜂窝结构的动态缓冲性能影响较小，但在较大载荷下的影响较为明显。

表 2 落锤质量和静应力
Tab.2 Drop hammer weights and static stresses

落锤质量/ kg	规则排列静应力/ kPa	交错排列静应力/ kPa
7	0.578 51	0.668 07
8.12	0.671 07	0.774 96
9.14	0.755 37	0.872 30
10.26	0.847 93	0.979 19
11.935	0.986 36	1.139 05
15.115	1.249 17	1.442 55
20.05	1.657 02	1.913 53
25	2.066 12	2.385 95
35	2.892 56	3.340 33

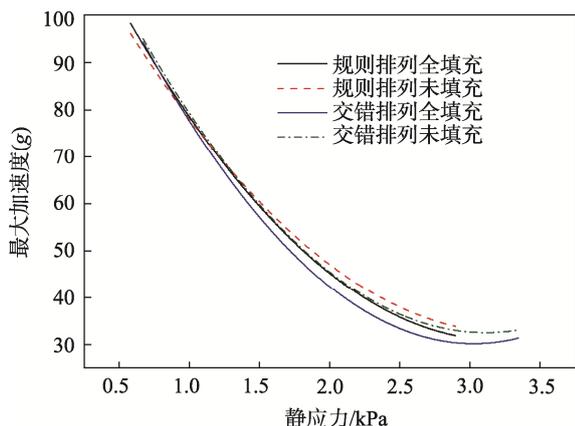


图 10 最大加速度-静应力曲线

Fig.10 Maximum acceleration-static stress curve

4 结语

通过对圆形纸蜂窝结构进行异面静态压缩试验,比较了排列方式和泡沫填充对其缓冲性能的影响。分析能量吸收特性,发现 EPE 泡沫填充提高了圆形纸蜂窝结构的静态缓冲性能,而且对交错排列结构提高更明显;在相同填充率下,填充形式对圆形纸蜂窝结构异面缓冲性能的影响并不显著。从静态缓冲系数-最大静应力曲线分析得到,当应力较小时,EPE 泡沫填充对圆形纸蜂窝结构的缓冲性能影响较大,而随着应力的增大,其影响变小。在动态压缩试验中,排列方式和 EPE 泡沫填充仅影响较大载荷下圆形纸蜂窝结构的动态缓冲性能。此外,不管是静态压缩还是动态压缩,交错排列圆形纸蜂窝的缓冲性能均优于规则排列的方式。

参考文献:

- [1] 张静静,陈满儒,孙德强. 蜂窝纸板异面动态冲击性能的实验分析[J]. 包装工程, 2017, 38(23): 106—110. ZHANG Jing-jing, CHEN Man-ru, SUN De-qiang. Experimental Analysis of Out-of-plane Dynamic Impact Properties of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(23): 106—110.
- [2] 杨瑞,郭彦峰,王冬梅,等. 纸蜂窝夹层板主共振频率的影响因素[J]. 包装工程, 2019, 40(5): 117—123. YANG Rui, GUO Yan-feng, WANG Dong-mei, et al. Influence Factors of Main Resonance Frequency for Paper Honeycomb Sandwich Plates[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(5): 117—123.
- [3] 宋卫生. 能量吸收图法在蜂窝纸板中的应用[J]. 包装工程, 2018, 39(15): 15—20. SONG Wei-sheng. Application of Energy Absorption Diagram in Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(15): 15—20.
- [4] LU G X, YU T X. Energy Absorption of Structures and Materials[M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2003, 198—226.
- [5] HU L L, HE X, WU G, et al. Dynamic Crushing of the Circular-celled Honeycombs under Out-of-plane Impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 75(1): 150—161.
- [6] WANG Z G, LU Z J, TIAN H Q, et al. Theoretical Assessment Methodology on Axial Compressed Hexagonal Honeycomb's Energy Absorption Capability[J]. Mechanics of Composite Materials & Structures, 2016, 23(5): 503—512.
- [7] WANG Z G, LI Z D, SHI C, et al. Mechanical Performance of Vertex-based Hierarchical vs Square Thin-walled Multi-cell Structure[J]. Thin-walled Structures, 2019, 134: 102—110.
- [8] WANG L, LIU W Q, WAN L, et al. Mechanical Performance of Foam-filled Lattice Composite Panels in Four-point Bending: Experimental Investigation and Analytical Modeling[J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 67: 270—279.
- [9] WU Z M, LIU W Q, WANG L, et al. Theoretical and Experimental Study of Foam-filled Lattice Composite Panels under Quasi-static Compression Loading[J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 60: 329—340.
- [10] 张勇,谢卫红,刘宏伟,等. 聚氨酯蜂窝纸板动力学性能及其本构模型[J]. 材料工程, 2015, 43(5): 27—32. ZHANG Yong, XIE Wei-hong, LIU Hong-wei, et al. Dynamic Mechanical Properties and Constitutive Model of Honeycomb Paperboard Filled with Polyurethane[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(5): 27—32.
- [11] 鄂玉萍,张喜俊. 泡沫填充型蜂窝纸板面外压缩性能实验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(20): 151—155. E Yu-ping, ZHANG Xi-jun. An Experimental Study on Out-of-plane Compressive Behavior of a Honeycomb Paperboard Filled with Foams[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(20): 151—155.
- [12] LIU Q, FU J, WANG J S, et al. Axial and Lateral Crushing Responses of Aluminum Honeycombs Filled with EPP Foam[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 130: 236—247.
- [13] ORUGANTI R K, GHOSH A K. FEM Analysis of Transverse Creep in Honeycomb Structures[J]. Acta Materialia, 2008, 56(4): 726—735.
- [14] ROYAN J D, WAAS A M. Synergistic Energy Absorption in the Axial Crush Response of Filled Circular Cell Honeycombs[J]. Composite Structures, 2012, 94(5): 1669—1676.
- [15] 言利容,谢勇. 蜂窝纸板/EPE 组合材料的动态缓冲性能[J]. 包装工程, 2010, 31(19): 21—24.

- YAN Li-rong, XIE Yong. Dynamic Cushioning Properties of Combination of Honeycomb Paperboard and EPE[J]. *Packaging Engineering*, 2010, 31(19): 21—24.
- [16] SUN Y L, LI Q M. Dynamic Compressive Behaviour of Cellular Materials: a Review of Phenomenon, Mechanism and Modelling[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 112: 74—115.
- [17] Li Q M, MAGKIRIADIS I, HARRIGAN J J. Compressive Strain at the Onset of Densification of Cellular Solids[J]. *Cell Plast*, 2006, 42: 371—392.
- [18] TAN P J, HARRIGAN J J, REID S R. Inertia Effects in Uniaxial Dynamic Compression of a Closed Cell Aluminium Alloy Foam[J]. *Materials Science and Technology*, 2002, 18(5): 480—488.
- [19] 李志斌, 虞吉林, 郑志军, 等. 薄壁管及其泡沫金属填充结构耐撞性的实验研究[J]. *实验力学*, 2012, 27(1): 77—86.
- LI Zhi-bin, YU Ji-lin, ZHENG Zhi-jun, et al. An Experimental Study on the Crashworthiness of Thin-walled Tubes and Their Metallic Foam-filled Structures[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2012, 27(1): 77—86.
- [20] WANG Z G, LIU J F. Numerical and Theoretical Analysis of Honeycomb Structure Filled with Circular Aluminum Tubes Subjected to Axial Compression[J]. *Composites Part B*, 2019, 165(5): 626—635.