

泡沫和橡胶组合层状结构静态吸能性能研究

宋云雪, 闫义伟

(中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

摘要: **目的** 提出一种新型的泡沫和橡胶组合层状吸能结构, 通过仿真对比分析该结构静态压缩特性和缓冲性能。**方法** 采用发泡聚苯乙烯(EPS)、三元乙丙橡胶(EPDM)2种材料, 以3种不同厚度比(1:3、1:1、3:1)、2种叠置顺序进行组合构建层状结构, 应用LS-DYNA进行组合层状结构静态压缩变形特性、吸能特性分析, 并与2种材料单独压缩时的特性作了对比。**结果** 2种材料相互组合的层状结构静态压缩力学特性、吸能能力与叠置顺序无关, 与2种材料的厚度比有关。组合层状结构的承载能力、总吸能和平台应力均优于单一EPS的; 组合层状的比吸能优于单一EPDM的, 比单一EPS的差, 是单一EPS比吸能的1/60~1/20。能量吸收率在不同应力水平存在差异, 调整EPS或EPDM子层厚度占比可提高组合层状结构的缓冲效率。**结论** EPS和EPDM 2种材料相互组合的层状结构具有较大的结构承载能力和吸能优势, 可为抗冲击的缓冲系统设计提供新思路 and 参考价值。

关键词: 发泡聚苯乙烯; 三元乙丙橡胶; 组合层状结构; 静态压缩; 吸能性能

中图分类号: TB484.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)05-0255-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.05.032

Static Buffering Energy Absorption Performance of Foam and Rubber Composite Lamellar Structures

SONG Yun-xue, YAN Yi-wei

(College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a new type of foam and rubber composite lamellar energy absorption structure and analyze its static compression characteristics and buffering performance by simulation. The structure was composed of expandable polystyrene (EPS) and ethylene propylene diene monomer (EPDM) with three different thickness ratios (1:3, 1:1, 3:1) and two kinds of stacking order. The results of its static compression deformation characteristics and energy absorption capacity were analyzed by LS-DYNA and compared with those of the two materials compressed separately. Both static compression deformation characteristics and energy absorption capacity of the two materials were unrelated to the stacking order, but only to the thickness ratio of the materials. Its bearing capacity, total energy absorption and platform stress were higher than single EPS, but the value of its specific energy absorption was between two single materials. It was 1/60-1/20 of that of single EPS. The buffering efficiency of composite lamellar structures varied at different stress levels, which could be improved by changing the proportion of EPS or EPDM sublayer thickness. The lamellar structure combining EPS and EPDM has certain advantages of bearing capacity and energy absorption, which provides a new idea and reference value for the design of buffer system against impact.

KEY WORDS: expandable polystyrene; ethylene propylene dene monomer; composite lamellar structure; static compression; buffer performance

收稿日期: 2022-10-10

作者简介: 宋云雪(1968—), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为航空运输过程仿真与智能化结构设计、故障诊断与结构修理、专家系统、知识表示。

发泡聚苯乙烯 (Expandable Polystyrene, EPS) 是一种用于包装的轻型防护材料, 具有质量轻、成本低、缓冲性能优良等突出特点, 主要应用于各类电器的缓冲包装、食品包装等^[1]。三元乙丙橡胶 (Ethylene Propylene Diene Monomer, EPDM) 是一种具有良好的耐老化性、绝缘性、高黏合性的弹性体材料, 广泛应用于汽车配件、密封制品、缓冲包装等领域^[2-3]。充分发挥 2 种固体材料的各自优势, 研发一种新式的组合层状吸能结构, 对提升产品的保护水平至关重要。层状吸能结构是由不同厚度比的 EPS 和 EPDM 组合而成的层合结构, 通过各子层不同程度的压缩变形来缓冲和吸收能量。胡俊等^[4]试验研究了 4 种不同密度 EPS 泡沫压缩力学性能, 提出了 EPS 颗粒压缩下的应力应变关系模型, 并对不同密度 EPS 缓冲吸能性能进行了评估。Shah 等^[5]、Rouillard 等^[6]分别对 EPS 和层状瓦楞结构进行准静态压缩试验得到了材料的力学特性曲线。刘晓艳等^[7]将 EPS 和 EPE 材料进行组合试验, 得出了组合结构样式对缓冲性能的影响规律。梁秀等^[8]通过静态压缩试验方法, 研究了泡沫塑料 EPS、EPE 与瓦楞纸板组合结构的变形特征、力学性能和缓冲性能。LU 等^[9]提出了预测串联复合缓冲材料压缩响应的虚拟参数法。潘丹等^[10-11]研究了由发泡聚乙炔 (EPE)、瓦楞纸板、蜂窝纸板组合层状结构的包装防护作用, 通过试验对比分析了这类结构在不同压缩速率下的变形特征和缓冲吸能特性。干年妃等^[12]、卢子兴等^[13]提出了新型聚氨酯组合泡沫缓冲结构, 通过试验研究发现组合结构的力学性能和吸能性能均有所提高。于泽明等^[14]采用动/静载联合同步声发射 (AE) 监测试验方法得到纤维-矿粉-聚苯乙烯混凝土微观吸能规律, 并基于响应面中心优化组合原理得到了吸能性能最优化的子材料配比。

传统的缓冲包装设计大多依据单一泡沫塑料结构、2 种泡沫塑料组合结构、纸板与泡沫塑料组合结构等, 忽视了橡胶材料的共同作用。文中通过模拟静态压缩试验分析了发泡聚苯乙烯泡沫和三元乙丙橡胶组合层状结构力学性能, 比较了不同组合层状结构的静态吸能特性, 为组合层状结构的缓冲包装设计及其应用提供理论和技术基础。

1 缓冲性能测试方法

1.1 静态压缩试验

静态压缩试验参照 GB/T8168《包装用缓冲材料静态压缩试验方法》, 利用 LS-DYNA 模拟万能试验机进行试验, 所有试样放置在下压板中心, 试样两端不固定, 试样与压板之间粗糙接触, 试验过程中无试样与压板发生相对滑移的现象, 上压板以恒定速度 480 mm/min 沿厚度方向进行静态压缩。试样由发泡

聚苯乙烯 (EPS) 和三元乙丙橡胶 (EPDM) 组合而成, EPS 密度为 12.5 kg/m³, EPDM 密度为 1 000 kg/m³, 选取 1:3、1:1、3:1 3 种层状结构厚度比组合。

1.2 缓冲性能评价指标

评价一种结构静态缓冲吸能性能的指标是多样的, 文中采用总吸能 E 、比吸能 E_{SEA} 、平台应力 σ_m 、能量吸收率 P 、行程利用率 P_{SE} 等 5 个指标来综合评价 EPS 和 EPDM 组合层状结构的缓冲吸能性能^[10]。

1) 总吸能 E (Total Energy Absorption), 定义为载荷-位移曲线下的面积:

$$E = \int_0^x F dx \quad (1)$$

式中: E 为总吸能; F 为载荷; x 为压缩位移。

2) 比吸能 E_{SEA} (Specific Energy Absorption), 即试样吸收的总能量除以试样质量:

$$E_{SEA} = \frac{\int_0^x F dx}{m} \quad (2)$$

式中: E_{SEA} 为比吸能; F 为载荷; x 为压缩位移; m 为试样质量。

3) 平台应力 σ_m (Platform Stress), 材料在被压缩密实化之前承受的平均应力:

$$\sigma_m = \frac{\int_0^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\varepsilon_d} \quad (3)$$

式中: σ_m 平台应力; σ 为应力; ε_d 为密实化应变。

4) 能量吸收率 P (Energy Absorption Efficiency), 材料压缩到一定应变时, 所吸收的能量与该应变所对应的应力的比值:

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

式中: P 为能量吸收效率; σ 为应力; ε 为应变。

5) 行程利用率 P_{SE} (Stroke Efficiency), 表示试样密实化之前的位移量和厚度的比值:

$$P_{SE} = \frac{\Delta T}{d} \quad (5)$$

式中: P_{SE} 为行程利用率; ΔT 为压缩位移量; d 为试样厚度。

2 基于有限元方法的数值模拟

2.1 模型建立

缓冲结构模型一共有 5 种, 包括 3 种不同厚度比的组合层状结构模型和 2 种单一结构模型。模型均是规则的方体结构, 上、下面结构尺寸均为 120 mm×120 mm, 组合结构和单一结构总厚度均为 60 mm, 使用 CATIA 建立模型。组合顺序分为 2 种, 一种为 EPS 置于上层、EPDM 置于下层, 称为 FR 顺序, FR 顺序的厚度比用 i_{FR} 表示; 另一种为 EPDM 置于上层, EPS 置于

下层, 称为 RF 顺序, RF 顺序的厚度比用 i_{RF} 表示。EPS 与 EPDM 单独受压缩时分别用 $i_F=1$ 和 $i_R=1$ 表示。

在 Hypermesh 中划分网格, 整个模型使用实体单元进行建模, 经验证刚度较低的材料使用六面体单元和缺省单元类型 1 在计算中易出现负体积现象, 从而中止计算。为了避免这一现象, 使用四面体单元和单元类型 10 建模, 并配合基于黏性的沙漏模式 2, 使得计算稳定性大幅提高。2 种材料成功组合的关键在于结合位置实现节点耦合以有效传力。通过布尔运算合并组合层状模型结合面, 网格划分时在结合面位置默认为共节点, 从而实现 2 种材料之间相互组合。

2.2 材料模型的确定

2.2.1 发泡聚苯乙烯泡沫模型

泡沫材料模型一直是仿真难点, 目前常用模型有 MAT53_CLOSED_CELL_FOAM、MAT57_LOW_DENSITY_FOAM、MAT63_CRUSHABLE_FOAM 等, 其中 MAT63 材料用于模拟时可以忽略循环特性的各向同性泡沫, 根据相关文献中发泡聚苯乙烯 (EPS) 力学特性叙述, 以及单轴压缩无循环特性的特点, 拟采用 MAT63 号模型作为 EPS 的数学模型。EPS 材料模型参数参考文献[5]中的数据, 如表 1 所示。

表 1 发泡聚苯乙烯材料参数 Tab.1 Material parameters of expandable polystyrene		
参数	值	单位
密度	1.25×10^{-11}	t/mm ³
弹性模量	2.2	MPa
泊松比	0	
拉伸截止应力	0.1	MPa
阻尼	0.5	

2.2.2 三元乙丙橡胶模型

LS-DYNA 中橡胶材料模型有 MAT7_BLATZ-KO、MAT27_MOONEY-RIVLIN、MAT77_OGDEN 模型等, 其中 MAT27 是目前工程上使用最广泛的模型, 选择 MAT27 号材料模型作为三元乙丙橡胶 (EPDM) 仿真材料模型。EPDM 材料模型参数源于文献[15]中的数据, 如表 2 所示。

2.3 边界条件的确定

LS-DYNA 中可以用刚性墙模拟压缩试验机的上、下压板, 由关键字 *RIGIDWALL 控制, 上压板是动压板, 通过 *RIGIDWALL_GEOMETRIC_FLAT_MOTION 确定初始位置与运动速度, 上压板初始位置与组合层状结构上表面位置一致, 运动方向垂直于组合层状结构指向下压板, 运动速率为 480 mm/min (应

变率为 0.133 s^{-1}); 下压板是静压板, 由关键字 *RIGIDWALL_PLANAR 确定初始位置并限制自由度, 下压板初始位置与组合层状结构下表面一致, 默认限制其全部自由度。

表 2 三元乙丙橡胶 (EPDM) 材料参数 Tab.2 Material parameters of ethylene propylene diene monomer (EPDM)		
参数	值	单位
密度	1×10^{-9}	t/mm ³
弹性模量	—	MPa
泊松比	0.499	
C_{10}	0.690 2	MPa
C_{01}	-0.236 68	MPa

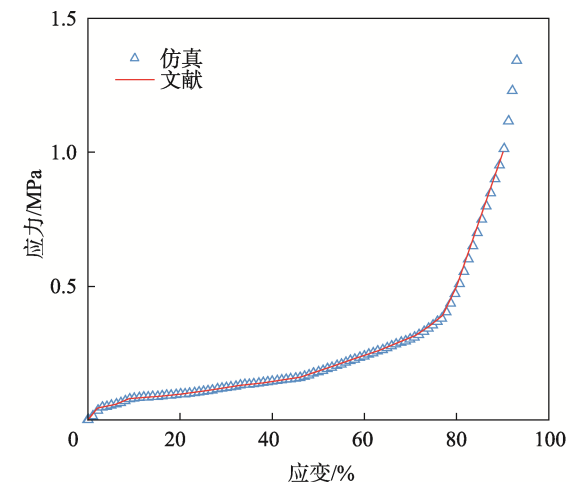
3 结果与分析

3.1 压缩变形特征

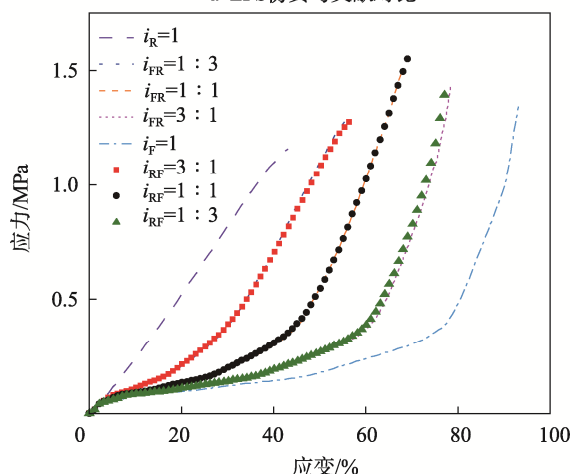
求解结果记录的载荷与位移数据经处理后得到单一结构和组合层状结构的压缩工程应力和应变数据, 见图 1。图 1a 为计算得出的单一 EPS 力学特性与文献[5]对比图, 可以看出两者高度吻合。缓冲结构在静态压缩作用下的变形过程如表 3 所示, 该数据体现出组合层状结构逐层压缩的变形特征。

图 1b 反映了不同组合顺序的层状结构和单一结构的力学特性。EPDM 在压缩时应力随应变接近线性变化, 在应变约 0.43 时达到峰值应力 1.16 MPa, 说明三元乙丙橡胶在压缩时始终处于弹性变形阶段。EPS 单一结构及组合层状结构的应力-应变曲线呈现明显的非线性变化, 其特性大致分为 3 个阶段: 第 1 个阶段为线弹性阶段, 材料表现出较好的弹性; 第 2 个阶段为塑性平台阶段, 随着载荷增加, 材料开始发生弹性屈曲变形, 随后曲线呈现出较长的平台阶段, 且应力对应变的变化率增长缓慢, 意味着材料发生了较大的塑性变形, 此阶段是缓冲材料主要吸能阶段; 第 3 个阶段为密实化阶段, 应力随应变的变化率急剧增大, 说明材料结构出现受损, 对能量的吸收减小, 材料传递的应力急剧上升^[9,16]。在压缩初期, 组合层状结构的曲线特征与单一 EPS 结构的基本保持一致, 由于 EPDM 的部分承载作用, 组合层状结构的屈服应力略微高于单一 EPS 结构的。除此之外随着 EPDM 厚度逐渐增大, 塑性平台阶段越短, 幅度越大, 表现为在相同应变时, 应力随 EPDM 厚度增加而增大, 意味着相较于单一泡沫结构, 组合层状结构提高了结构的承载能力。表 3 中组合层状结构特征是 EPS 位于上层, EPDM 位于下层, 因此, 先是 EPS 发生变形, 此时 EPDM 变形

很小, EPS 屈曲和密实化后, EPDM 开始发生屈曲, 直至结构密实。



a EPS仿真与文献对比



b 不同组合顺序缓冲结构对比

图1 缓冲结构静压应力-应变曲线

Fig.1 Static compressive stress vs strain curves of buffer structures

表3 静态压缩变形过程
Tab.3 Deformation process in static compression

应变/%	EPS	EPDM	$d(\text{EPS}) : d(\text{EPDM})$		
			1 : 3	1 : 1	3 : 1
0					
10					
30					
55					

组合层状结构为 FR 顺序时, 厚度比 $i_{FR}=1/3$ 、 $i_{FR}=1/1$ 、 $i_{FR}=3/1$ 的应力-应变曲线均分布于 $i_F=1$ 与 $i_R=1$ 的应力-应变曲线之间, $i_{FR}=1/3$ 的应力-应变曲线更靠近 $i_R=1$ 的, $i_{FR}=1/1$ 的应力-应变曲线大致介于 $i_F=1$ 与 $i_R=1$ 的应力-应变曲线中间, $i_{FR}=3/1$ 的应力-

应变曲线更靠近 $i_F=1$ 的, 这表明在 EPS 与 EPDM 组合层状结构在压缩面积不变的情况下, 某种单一材料厚度占比越多, 其组合材料应力-应变曲线越接近于该单一材料单独压缩时的应力-应变曲线, 即力学特性越接近该种单一材料的力学特性。

组合材料为 RF 顺序时应力-应变曲线分布与 FR 顺序相类似, 厚度比 $i_{RF}=3/1$ 、 $i_{RF}=1/1$ 、 $i_{RF}=1/3$ 的应力-应变曲线均分布于 $i_F=1$ 与 $i_R=1$ 的应力-应变曲线之间, 其中 $i_{RF}=3/1$ 与 $i_{FR}=1/3$ 、 $i_{RF}=1/1$ 与 $i_{FR}=1/1$ 、 $i_{RF}=1/3$ 与 $i_{FR}=3/1$ 的应力-应变曲线完全重合, 意味着组合顺序并不影响结构的力学特性。

3.2 吸能性能对比分析

3.2.1 总吸能结果比较

总吸能用来描述缓冲材料或结构对能量的吸收性。图2是 EPS 与 EPDM 在 3 种厚度比、2 种组合顺序下的总吸能曲线图。从图2可知, 任意缓冲结构的总吸能随压缩位移呈增长趋势, 且幅度变化逐渐增大; 组合结构厚度比 $i_{RF}=3/1$ 与 $i_{FR}=1/3$ 、 $i_{RF}=1/1$ 与 $i_{FR}=1/1$ 、 $i_{RF}=1/3$ 与 $i_{FR}=3/1$ 的总吸能对位移变化规律几乎重合, 这与不同组合顺序、各单一材料厚度占比相同时的应力应变规律相一致, 表明总吸能能力与 2 种材料厚度占比有关, 与组合顺序无关。基于以上结论, 只需取其中一种顺序作后续分析, 以 FR 顺序为例。在压缩位移相同情况下, 总吸能大小关系为 $E(i_F=1) < E(i_{FR}=3/1) < E(i_{FR}=1/1) < E(i_{FR}=1/3) < E(i_R=1)$, 可见组合层状结构的总吸能相较于单一 EPS 的更大, 且随着 EPDM 占比增大而增大。以压缩位移 25 mm 的总吸能为例, $i_{FR}=3/1$ 、 $i_{FR}=1/1$ 、 $i_{FR}=1/3$ 的总吸能值分别是单一 EPS 的 1.20、1.40、2.11 倍, 说明相较于单一泡沫结构, EPS 和 EPDM 组合结构可以有效提高吸能性能。

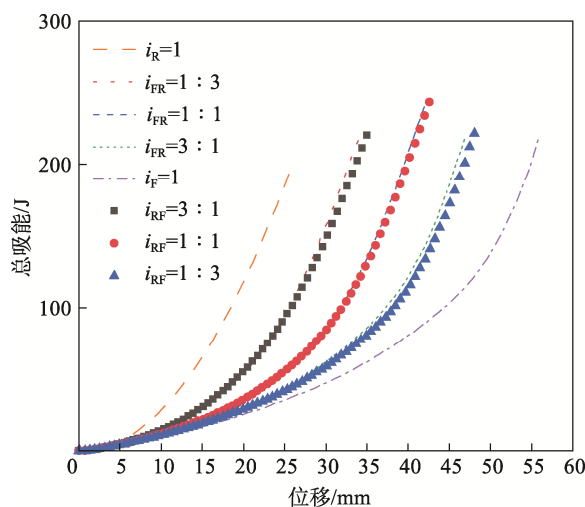


图2 缓冲结构总吸能对比

Fig.2 Total energy absorption diagram of buffer structures

3.2.2 比吸能结果比较

比吸能表现了结构单位质量的能量吸收能力,图 3 反映了不同缓冲结构的比吸能情况。不同组合层状结构比吸能与应力之间的变化规律由结构质量及静态压缩时的总吸能得到,如图 3a 所示。组合层状结构的比吸能随着应力的增加而增加,在弹性阶段和塑性屈服阶段增幅较大,直至结构出现密实化之后,增幅有所降低,在应力相同的情况下,比吸能大小关系为 $E_{SEA}(i_{FR}=1/3)<E_{SEA}(i_{FR}=1/1)<E_{SEA}(i_{FR}=3/1)$ 。不同结构类型的比吸能值如图 3b 所示,随着厚度比 i_{FR} 的增大,组合层状结构的比吸能值越来越大, $i_{FR}=1/3$ 、 $i_{FR}=1/1$ 、 $i_{FR}=3/1$ 的比吸能值分别是单一 EPDM 的 1.45、2.23、4.31 倍,说明在静态压缩条件下,随着 EPS 厚度比重增大,组合层状结构单位质量能量吸收性越好。由于单一 EPS 质量相对过小,导致单一 EPS 结构的比吸能远大于组合层状结构和单一 EPDM 结构的,其值约是组合层状结构的 20~60 倍,是单一 EPDM 结构的 87 倍。

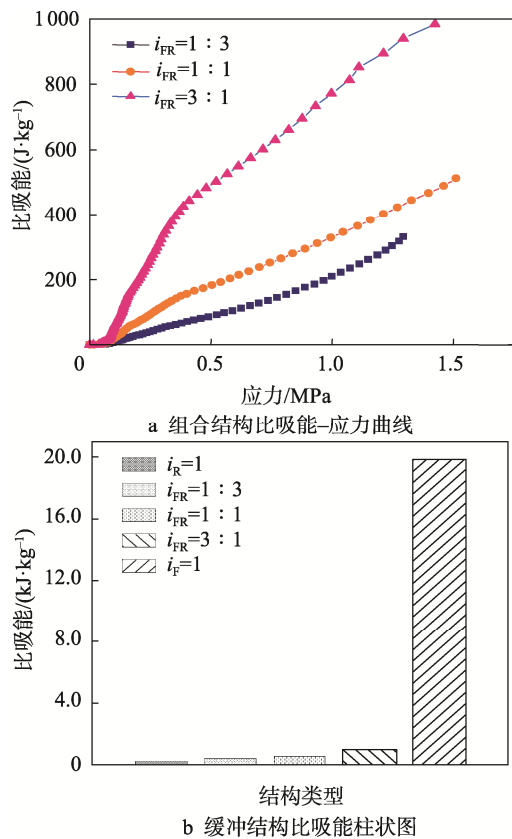


图 3 缓冲结构比吸能对比
Fig.3 Specific energy absorption
diagram of buffer structures

3.2.3 平台应力比较

平台应力是表征材料或结构能量吸收性能的重要指标,材料的变形主要集中于应力-应变曲线的平台阶段,平台应力越大材料吸收的能量越多,在进行

缓冲包装设计时应尽量增大平台应力值。组合层状结构和单一 EPS 结构的平台应力值如表 4 所示。从表 4 中可见,组合层状结构的平台应力值均高于单一 EPS 结构的,且与 EPDM 橡胶占比呈正相关, $i_{FR}=1/3$ 组合层状结构平台应力值最大,是单一 EPS 的 1.17 倍。

表 4 缓冲结构平台应力值
Tab.4 Platform stress value of buffer structures

缓冲结构	密实化应变 $\epsilon_d/\%$	平台应力 σ_m/MPa
单一 EPS	71.91	0.152
$i_{FR}=1/3$	31.85	0.177
$i_{FR}=1/1$	42.91	0.158
$i_{FR}=3/1$	57.03	0.153

3.2.4 能量吸收率比较

缓冲包装设计以尽量少的缓冲材料吸收尽量多的能量为原则,这对缓冲材料或结构的能量吸收率提出了较高的要求。图 4 反映了不同厚度比组合层状结构在静态压缩条件下的缓冲效率,由图 4 可知,不同厚度比组合结构的能量吸收率有所区别。从整体趋势看,能量吸收率曲线可以分为 4 个区:上升区 I、平台区 II、下降区 III、上升区 IV。 $i_F=1$ 、 $i_{FR}=3/1$ 、 $i_{FR}=1/1$ 的能量吸收率经历 I、II、III 阶段; $i_{FR}=1/3$ 的能量吸收效率经历 I、II、III、IV 阶段; $i_R=1$ 的能量吸收效率只经历 I 阶段。上升区 I 表示 EPS 或 EPDM 发生弹性变形;平台区 II 对应应力-应变曲线塑性平台阶段,其平台区域长度随着 EPS 厚度占比的增大而增大,这与应力-应变曲线塑性平台阶段的特性相一致;下降区 III 是由于结构密实化增加造成吸能效率显著下降;存在上升区 IV 的原因是在 $i_{FR}=1/3$ 组合层状结构中 EPS 占比过小, EPS 先被压缩至密实化继而压缩 EPDM,橡胶的弹性变形导致能量吸收率的增长大于由 EPS 密实化导致的能量吸收率的减小,所以整体保持了增长趋势,表现出稳定的吸能性能。

组合层状结构在不同应力水平下的能量吸收率有所区别,具体表现为:当应力 $\sigma < \delta_1$ 时,能量吸收效率大小关系是 $P(i_R=1)<P(i_{FR}=1/3)<P(i_{FR}=1/1)<P(i_{FR}=3/1)<P(i_F=1)$;当应力 $\sigma > \delta_1$ 时, EPDM 单独压缩的能量吸收效率开始依次超过 $i_{FR}=1/3$ 、 $i_{FR}=1/1$ 、 $i_{FR}=3/1$ 、 $i_F=1$ 的能量吸收效率;当应力 $\sigma > \delta_2$ 时,厚度比 $i_{FR}=1/3$ 的能量吸收效率开始依次超过 $i_{FR}=1/1$ 、 $i_{FR}=3/1$ 、 $i_F=1$ 的能量吸收效率;当应力 $\sigma > \delta_3$ 时, $i_{FR}=1/1$ 的能量吸收效率开始超过 $i_{FR}=3/1$ 的能量吸收效率。因此,当应力水平范围为 $0 < \sigma < \delta_2$ 时,提高泡沫的厚度占比对缓冲吸能效率有明显优势;当应力水平范围为 $\sigma > \delta_2$ 时,提高橡胶层厚度占比有利于提高缓冲吸能效率。由此可见,可以根据不同的应力水平改变 EPS 或 EPDM 子层厚度占比来提高组合层状结构的缓冲效率,这对缓冲包装设计具有重要的指导意义。

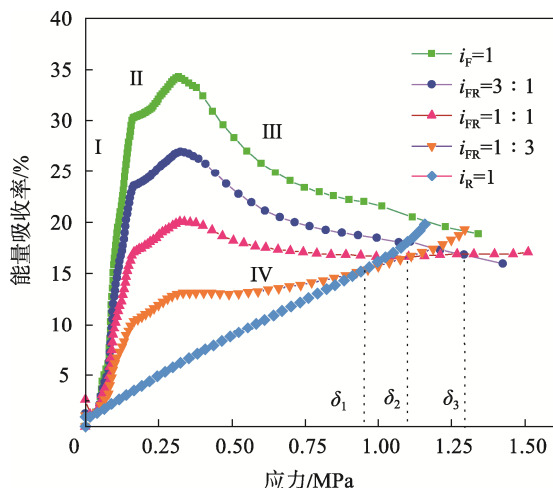


图4 缓冲结构静压能量吸收率—应力曲线

Fig.4 Static compressive energy absorption rate vs stress curve of buffer structures

3.2.5 行程利用率比较

行程利用率表示材料作为能量吸收结构的利用率,是一个无量纲的物理量。从图5可以看出,单一EPDM结构行程利用率最低,为43.05%;组合层状结构行程利用率随着厚度比 i_{FR} 的增大而增大;单一EPS行程利用率最高,达到93.12%。显然与单一EPS相比,组合层状结构能够有效降低其行程利用率,意味着在一些压缩空间受限的缓冲场合组合层状结构具有一定优势。

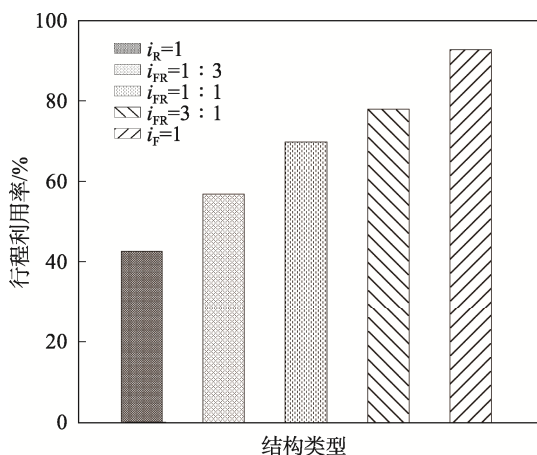


图5 缓冲结构行程利用率对比
Fig.5 Bar chart of stroke efficiency of buffer structures

4 结语

文中研究分析了EPS、EPDM及其组合层状结构在静态压缩时的变形特征和缓冲吸能特性,对缓冲系

统的设计具有重要意义,主要结论如下:

1) 组合层状结构的静态压缩力学特性与2种材料的厚度占比有关,与组合顺序无关。某种单一材料占比越多,其力学性能越接近于该单一材料的力学性能,区别在于随着EPDM占比越大,组合层状结构的塑性平台阶段越来越短,应力随应变变化率越来越大,结构的承载能力越高。

2) 组合层状结构的静态压缩吸能特性与2种材料的厚度占比有关,与组合顺序无关。组合层状结构的总吸能和平应力均高于EPS的,比吸能却并未表现出与总吸能相一致的规律。

3) 不同组合层状结构的能量吸收率存在明显差异。根据不同应力水平改变EPS或EPDM子层厚度占比,可以提高组合层状结构的缓冲效率。

4) 组合层状结构的行程利用率均高于EPDM的,低于EPS单独压缩的行程利用率,且随着EPS厚度占比增大而增大。

参考文献:

- [1] 都学飞, 欧阳效卓, 张汪年. EPS缓冲材料的静态压缩性能的试验研究[J]. 包装工程, 2012, 33(3): 39-41.
DU Xue-fei, OUYANG Xiao-zhuo, ZHANG Wang-nian. Experimental Research on Static Compression Properties of EPS Buffer Material[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(3): 39-41.
- [2] 林正伟. 湿气交联三元乙丙橡胶结构与性能研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2022: 2-3.
LIN Zheng-wei. Study on Structure and Properties of Moisture Crosslinked EPDM[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2022: 2-3.
- [3] 赵慧晖, 翟月勤, 杜焯, 等. 三元乙丙橡胶(EPDM)评价方法的确定[J]. 合成材料老化与应用, 2019, 48(1): 34-37.
ZHAO Hui-hui, ZHAI Yue-qin, DU Ye, et al. Determination of the Evaluation Procedure of Ethylene-Propylene-Diene Rubber(EPDM)[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2019, 48(1): 34-37.
- [4] 胡俊, 韦璐. 聚苯乙烯泡沫应力-应变模型及吸能性能研究[J]. 应用力学学报, 2015, 32(3): 430-434.
HU Jun, WEI Lu. Study on Stress-Strain Model and Energy Absorption Performance of Polystyrene Foam[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015, 32(3): 430-434.
- [5] SHAH Q, TOPA A. Modeling Large Deformation and Failure of Expanded Polystyrene Crushable Foam Using LS-DYNA[J]. Modelling and Simulation in Engineering, 2014(1): 1-7.
- [6] ROUILLARD V, SEK M. Behaviour of Multilayered

- Paperboard Cushioning Systems Under Impact Load[J]. Strain, 2007, 43(4): 345-347.
- [7] 刘晓艳, 郑华明, 曹国荣. EPS 与 EPE 组合使用的力学性能研究[J]. 包装工程, 2006, 27(6): 17-18.
LIU Xiao-yan, ZHENG Hua-ming, CAO Guo-rong. Study of the Mechanical Performance of EPS and EPE Combination[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(6): 17-18.
- [8] 梁秀, 王玉龙, 王柳. 泡沫塑料/瓦楞纸板组合结构的缓冲性能[J]. 包装工程, 2016, 37(15): 129-133.
LIANG Xiu, WANG Yu-long, WANG Liu. Cushioning Performance of Foam/Corrugated Board Composite Structure[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(15): 129-133.
- [9] LU Fu-de, LIU Xiong-jian, GAO De. Compression Response of Composite Cushioning Materials in Series by Virtual Parameter Methods[J]. Packaging Technology and Science, 2015, 28(10): 901-914
- [10] 潘丹, 郭彦峰, 付云岗, 等. 纸夹芯和泡沫复合层状结构的静态缓冲吸能特性研究[J]. 工程力学, 2019, 36(2): 249-256.
PAN Dan, GUO Yan-feng, FU Yun-gang, et al. Static Cushioning and Energy Absorption of Composite Layered Structures with Paper Sandwich Core and Plastic Foam[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(2): 249-256.
- [11] 钟玲珠, 陈安军. EPE/EPS 与蜂窝纸板组合静态缓冲性能的研究[J]. 包装工程, 2013, 34(9): 36-39.
ZHONG Ling-zhu, CHEN An-jun. Study on Static Cushion Performance of EPE/EPS and Honeycomb Paperboard Combination[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(9): 36-39.
- [12] 千年妃, 王多华, 冯亚楠, 等. 聚氨酯泡沫填充的碳纤维增强复合材料锥管吸能性能数值模拟及试验验证[J]. 中国机械工程, 2018, 29(5): 609-615.
GAN Nian-fei, WANG Duo-hua, FENG Ya-nan, et al. Numerical Simulation and Experimental Verification of Energy Absorption Performance of PU Foam Filled CFRP Cone Tubes[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(5): 609-615.
- [13] 卢子兴, 严寒冰, 王建华. 聚氨酯复合泡沫塑料的准静态压缩力学性能[J]. 中国塑料, 2004, 18(2): 31-34.
LU Zi-xing, YAN Han-bing, WANG Jian-hua. Mechanical Properties of Polyurethane Syntactic Foams under Quasi-Static Compression[J]. China Plastics, 2004, 18(2): 31-34.
- [14] 于泽明, 陈艳, 马嵘萍等. 动/静荷载作用纤维-矿粉-聚苯乙烯混凝土吸能特征研究[J]. 材料导报, 2021, 35(S2): 669-677.
YU Ze-ming, CHEN Yan, MA Rong-ping et al. Study on Energy Absorption Characteristics of BF-SP-EPS Concrete Under Dynamics/Static Load[J]. Materials Reports, 2021, 35(S2): 669-677.
- [15] 申展, 陈东, 罗俊杰. 聚乙烯泡沫缓冲系统跌落冲击过载仿真分析[J]. 包装工程, 2016, 37(19): 128-131.
SHEN Zhan, CHEN Dong, LUO Jun-jie. Simulation and Analysis of Dropping Impact Acceleration of Polyethylene Foam Buffer System[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(19): 128-131.
- [16] 王波, 吴本英, 周锡武, 等. 闭孔泡沫铝准静态压缩试验及吸能特性研究[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2022, 40(2): 29-35.
WANG Bo, WU Ben-ying, ZHOU Xi-wu, et al. Study on Quasi-Static Compression Test and Energy Absorption Characteristics of Closed-Cell Aluminum Foam[J]. Journal of Foshan University (Natural Science Edition), 2022, 40(2): 29-35.

责任编辑: 曾钰婵