

装备防护

高弹 EPE 泡沫两自由度连续冲击包装动力学响应研究

陈家璇¹, 周卫中², 张美², 林志杨², 卢富德^{1*}

(1. 湖南工业大学 包装与材料工程学院, 湖南 株洲 412007;

2. 金华市捷特包装有限公司, 浙江 金华 321000)

摘要: **目的** 基于产品在包装运输过程中经常遭受多次跌落冲击, 探究两自由度高弹 EPE 泡沫包装在连续冲击载荷下的动力学响应。**方法** 以密度为 34 kg/m^3 的 EPE 泡沫为研究对象, 建立高弹泡沫本构方程, 并通过 ABAQUS 构建两自由度高弹泡沫包装系统有限元模型, 并进行有限元模拟。利用 ABAQUS 中的 Hyperform 模型和 Mullins 效应来模拟高弹泡沫产品在连续冲击载荷下的加速度响应。**结果** 通过对比试验和仿真结果可知, 两自由度高弹 EPE 泡沫包装系统在连续冲击下, 其产品加速度变化趋势明显, 且泡沫的软化效应会降低其缓冲性能。**结论** 在两自由度包装系统中, 冲击对底层产品的影响持续时间较长, 并且冲击作用会导致泡沫出现软化现象。在泡沫压实阶段, 应力会急剧上升。

关键词: 两自由度; EPE 高弹泡沫; 连续冲击; 有限元分析

中图分类号: TB485.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)19-0318-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.19.032

Dynamic Response of Two-degree-of-freedom Continuous Impact Packaging for High Elasticity EPE Foam

CHEN Jiaxuan¹, ZHOU Weizhong², ZHANG Mei², LIN Zhiyang², LU Fude^{1*}

(1. School of Packaging and Material Engineering, Hunan University of Technology, Hunan Zhuzhou 412007, China; 2. Jinhua Jiete Packaging Co., Ltd., Zhejiang Jinhua 321000, China)

ABSTRACT: Considering that products often suffer from multiple drop impacts during packaging and transportation, the work aims to investigate the dynamic response of two-degree-of-freedom high elasticity EPE foam packaging under continuous impact loads. By taking EPE foam with a density of 34 kg/m^3 as the research object, the intrinsic equations of high elasticity foam were firstly established, and the finite element model of a two-degree-of-freedom high elasticity foam packaging system was constructed by ABAQUS for finite element simulation. The Hyperform model and Mullins effect in ABAQUS were used to simulate the high elasticity foam and study the acceleration response of the product under continuous impact load. The comparative experimental and simulation results showed that the two-degree-of-freedom high elasticity EPE foam packaging system had a significant trend of product acceleration change in continuous impact, and the softening effect of the foam reduced its cushioning performance. In the two-degree-of-freedom packaging system, the impact on the bottom product lasts for a long time, and the impact effect causes the foam to soften. During the foam compaction phase, the stress rises sharply.

KEY WORDS: two-degree-of-freedom; EPE high elasticity foam; continuous impact; finite element analysis

收稿日期: 2024-07-12

基金项目: 湖南省教育厅科学研究重点项目 (22A0397); 湖南省自然科学基金面上项目 (2022JJ30223)

*通信作者

聚合物泡沫塑料因其轻质和出色的能量吸收能力^[1-2], 在包装工业中备受喜爱^[3]。发泡聚乙烯 (EPE) 俗称珍珠棉, 具有非交联闭孔结构, 是一种新型环保包装材料, 通常呈现为半硬质的闭孔结构, 且密度较低。EPE 因其轻质、高弹性和优良的抗冲击性能, 以及可重复利用, 广泛用作缓冲包装材料^[4-5], 备受研究者的关注^[6-8]。材料力学性能的研究方法一般可以分为两大类。一种是通过实验测试, 获得泡沫材料的力学性能数据。ASTM D1596 是业界公认的标准试验方法, 用于评估包装缓冲材料的减震特性, 能够有效获取缓冲曲线, 然而该方法需要进行大量实验, 成本较高。为了降低成本、提高设计效率, 研究人员开始采用第 2 类方法, 即利用计算机模拟和数值计算技术, 对泡沫材料的力学行为进行仿真与预测。伍瑾等^[9]研究了易损件在连续跌落冲击载荷作用下的动力学响应特性, 分析了多次冲击对 EPE 缓冲材料性能的影响。Lu 等^[10]用函数描述了 EPE 在加载-卸载循环条件下的力学响应, 构建了一个本构模型, 该模型考虑了应变率和残余应变, 能够准确描述 EPE 在多次动态冲击下的变形行为。然而, 伍瑾和卢富德分别研究的 2 种方法都只关注了单自由度的垂直冲击情况, 并未涉及实际包装系统中两自由度运动耦合的动力学行为。Mills 等^[11]通过有限元模拟, 预测了低密度闭孔 EPE 在压缩冲击下的响应, 重点关注了 EPE 在载荷加载和卸载过程中的性能表现。卢富德等^[12]对梯形结构的聚乙烯泡沫进行了有限元分析, 并利用虚质量法^[13]分析了梯形结构的力学响应。数值模拟结果表明, 二维有限元模型能够准确预测任意梯形泡沫结构的力学行为及变形模式。Mills 和卢富德研究的 2 种方法均采用有限元分析, 这为深入理解更复杂的两自由度包装系统的动力学提供了重要的参考依据。高德等^[14]基于黏弹性理论, 构建了发泡聚乙烯缓冲材料的动态非线性本构模型, 并成功识别了相关参数, 推导出多自由度缓冲包装系统在单次冲击下的动力学方程, 为更准确地预测和分析复杂包装系统的动力学响应奠定了基础, 但是此研究局限于单次冲击载荷作用下的情况, 并未涉及两自由度包装在连续冲击条件下的动力学特性。上述研究为理解泡沫材料在冲击载荷下的动力学响应提供了重要基础, 但均未涉及两自由度缓冲包装在连续冲击载荷下缓冲材料的力学响应。

作者基于前人的工作, 进一步探讨此问题。在运输过程中, 连续冲击是不可避免的。基于此, 本文研究分析了密度为 34 kg/m^3 的发泡聚乙烯泡沫 (EPE) 在两自由度^[15]缓冲包装系统中的性能。通过构建聚乙烯泡沫本构模型, 利用有限元仿真模拟方法, 分析产品在单次冲击和连续冲击下加速度的变化情况, 并分析不同厚度泡沫对产品加速度的影响, 这对于优化设计具有两自由度的缓冲包装系统具有重要意义。

1 聚乙烯泡沫本构模型

高弹泡沫具有良好的缓冲性能, 常用于缓冲包装设计, 文献^[10]以 34 kg/m^3 的 EPE 泡沫为研究材料, 建立了相应的本构关系。其中, 高弹泡沫本构模型基于应变能密度函数提出, 所以在确定应变能函数后, 便能确定其应力-应变关系。代表性的应变能密度函数是由 Ogden^[16]提出的势函数, 此函数 U 是关于 3 个主伸长量 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 的函数, 见式 (1)。

$$U(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{i=1}^n \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} [\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i} (J^{-\alpha_i \beta_i} - 1)] \quad (1)$$

式中: U 为应变能, μ 、 α 、 β 为材料参数; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为 3 个主方向的伸长率, 即材料拉伸后长度与初始试样长度的比值; n 为多项式阶数; J 为体积变化率, $J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$ 。

在单轴加载下, 一阶应力应变关系见式 (2)。

$$\sigma = -\frac{2\mu}{\alpha} [(1-\varepsilon)^{\alpha-1} - (1-\varepsilon)^{-\alpha\beta-1}] \quad (2)$$

其中, 因为高弹泡沫为可压缩泡沫, 所以 β 近似为 0。将式 (2) 化为式 (3)。

$$\sigma = -\frac{2\mu}{\alpha} [(1-\varepsilon)^{\alpha-1} - (1-\varepsilon)^{-1}] \quad (3)$$

负号表示向下压缩为正方向。为了保证计算的精度, 采取二阶 Odgen 模型, 见式 (4)。

$$\sigma = -\sum_{i=1}^n \frac{2\mu_i}{\alpha_i} [(1-\varepsilon_i)^{\alpha_i-1} - (1-\varepsilon_i)^{-1}] \quad (4)$$

用 Mullins 效应模型定义了泡沫塑料的软化行为^[17-18], 以表征泡沫塑料的损伤现象。对于高弹泡沫, 引入损伤函数 η ^[19], 见式 (5), 便可以得到 Mullins 效应本构模型, 用来表示高弹泡沫的卸载, 见式 (6)。

$$\eta = 1 - \frac{1}{\gamma} \operatorname{erf}\left(\frac{U_m - U_0}{m + \beta U_m}\right) \quad (5)$$

$$\sigma = \left[-\sum_{i=1}^n \frac{2\mu_i}{\alpha_i} [(1-\varepsilon_i)^{\alpha_i-1} - (1-\varepsilon_i)^{-1}] \right] \eta \quad (6)$$

式中: U_m 为卸载阶段的最大应变能; U_0 为卸载阶段的瞬时应变能。

在式 (1)~(6) 构造的本构关系中, 一共有 μ_1 、 α_1 、 μ_2 、 α_2 、 γ 、 m 、 β 等 7 个待识别参数, 用来表征高弹泡沫的复杂力学行为, 见表 1^[10]。

2 有限元仿真模拟

在 ABAQUS 中, 利用 Hyperform 模型和 Mullins 效应来模拟高弹泡沫的力学响应。根据上述识别参数, 设置材料属性。

为了准确表示高弹泡沫的力学响应, 构建了二维有限元模型。如图 1 所示, 模型主要由产品块、泡沫、

表 1 高弹泡沫 EPE 本构方程参数
 Tab.1 Parameter values of constitutive equation for EPE high elasticity foam

参数	结果
μ_1/MPa	0.990
μ_2/Pa	845.400
α_1	29.780
α_2	-2.480
γ	1.500
m/MPa	0.002
β	0.900

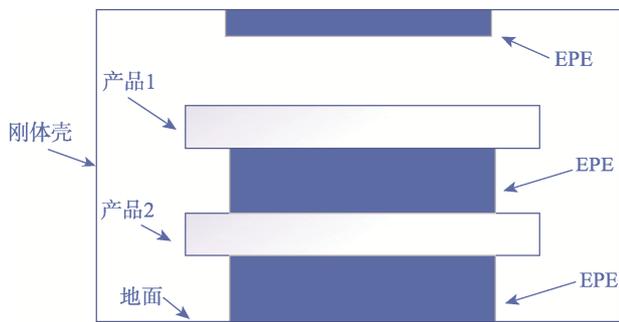


图 1 高弹泡沫包装二维有限元模型
 Fig.1 Two-dimensional finite element model of high elasticity foam packaging

刚体壳等部分组成。设置刚体壳的目的是高度还原实际运输过程，同时也为了约束产品向上运动，进而为连续冲击创造条件。将顶层泡沫与刚体壳绑定在一起，对产品只起到了约束作用，并不影响实际模拟结果。将地面及产品块设置成离散刚体，并赋予泡沫材料属性。

2.1 压缩速度的确定

在选择跌落试验的高度时，依据实际的物流运输环境进行了细致考虑。依据 GB/T 4857.18—92 和 ISO 4180/2—1980，典型的冲击速度对应的等效跌落高度区间被确定在 0.1~1.2 m 之间，这一区间反映了运输包装件在实际物流环节中可能受到的冲击强度。在此次模拟中，选择 0.6 m 为跌落高度，这是因为 0.6 m 的高度区间具有一定的代表性，在包装运输领域具有普适性。在模拟压缩实体的跌落过程时，假定它进行自由落体运动，且暂时忽略空气阻力等外部影响，从而简化模型。跌落高度与落体速度之间的基本物理关系满足式 (7)。经计算，初速度为 3.43 m/s。

$$v^2 = 2gh \tag{7}$$

2.2 设置模拟分析步及载荷

在分析步模块界面内，配置了动态-显式分析步，将持续时间设定为 0.03 s，用于模拟压缩实体在短时

间内的动态响应。

在 ABAQUS 的相互作用模块中，配置了 2 种不同的属性，分别命名为 IntProp-1、IntProp-2。其中，IntProp-1 定义了切向行为，采用罚函数法，将其罚系数设置为 0.3。IntProp-2 除了包含同样的切向行为，还额外定义了法向行为，该法向行为允许在接触后发生分离现象。基于这些设置，将产品块与泡沫之间的接触定义为面对面接触，使用 IntProp-1 属性；将泡沫与地面、泡沫与刚体壳之间的接触也设为面对面接触，采用 IntProp-2 属性。为了防止模拟泡沫材料过程中发生穿透现象，对泡沫材料施加了自接触约束。同时，将质量块的质量设定为 2.5 kg，确保模拟的准确性。在质量块与泡沫之间留有一定的空间，防止发生穿模，它对模拟的影响可以忽略不计。

在载荷应用环节，对产品块施加了速度载荷，将速度设置为 -3.43 m/s，负号表示其方向向下。同时，确保产品块在水平方向的位置不变，将地面、刚体壳设置为完全固定状态，以模拟实际的跌落情况。

3 冲击加速度分析

3.1 单次冲击加速度响应

为了研究两自由度泡沫包装系统在单次冲击下的加速度响应，采用参数 $m_1=2.5 \text{ kg}$ ， $m_2=2.5 \text{ kg}$ ， $A=0.01 \text{ m}^2$ ， $L=0.03 \text{ m}$ ， $v_0=3.43 \text{ m/s}$ ，取向向下方向为正。 m_1 、 m_2 为产品 1、2 的质量， A 为 EPE 衬垫横截面积， L 为泡沫厚度。利用 ABAQUS 进行仿真模拟，可以得到系统冲击下产品 1、2 的加速度响应。如图 2 所示。

由图 2 可见，产品 1 在受到冲击时，其加速度先呈线性增加，随后以非线性方式增至峰值，之后逐渐下降，最终稳定为零。与此同时，产品 2 在冲击初期

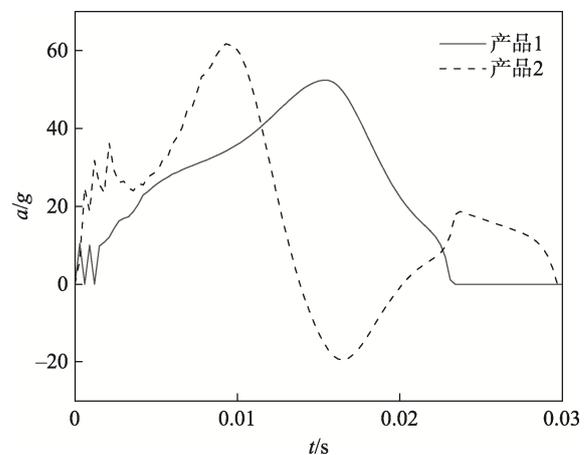


图 2 产品单次冲击加速度-时间曲线
 Fig.2 Single impact acceleration-time curve of product

的极短时间内其加速度线性增加, 并以非线性方式迅速攀升至第 1 个峰值, 随后逐步降至零, 接着开始反向加速至第 2 个峰值, 并持续降低至零, 然后再次正向加速到第 3 个峰值, 最后也逐渐降至零。

产品 2 能够在短时间内达到第 1 个加速度峰值, 表明在冲击初期底层泡沫发生了较大形变, 并吸收了能量。由于产品 1 和产品 2 具有相同的、方向向下的初速度, 冲击初期上层泡沫的形变相对较小, 因此吸收的能量较少, 导致产品 1 的加速度增加得较慢。当底层泡沫压缩至极限并开始回弹时, 上层泡沫开始大幅度压缩, 使得产品 1 的加速度显著增快, 同时也引起产品 2 的加速度逐步减小至零, 随后开始反向加速。当产品 1 达到加速度峰值并开始下降时, 表明上层泡沫在压缩至极限后也开始回弹, 其加速度逐步降至零。由于两层泡沫均处于回弹状态, 产品 2 此时被挤压, 导致其加速度在正向增大后逐渐较平稳。当产品 1 的加速度降至零时, 在惯性作用下, 产品 1 脱离泡沫, 上层泡沫也向上运动并脱离产品 2, 使得产品 2 只受到底层泡沫的作用, 加速度达到第 3 个峰值, 并逐渐降至零。

3.2 连续冲击加速度响应

泡沫在第 1 次冲击结束时的变形状态需要通过初始状态函数应用到第 2 次冲击分析中。采用参数 $m_1=2.5 \text{ kg}$, $m_2=2.5 \text{ kg}$, $A=0.01 \text{ m}^2$, $L=0.03 \text{ m}$, $v_0=3.43 \text{ m/s}$, 得到产品 1 连续 2 次冲击的加速度-时间曲线, 如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 产品 1 的加速度在第 2 次冲击初期持续为零。说明此时产品 1 尚未接触泡沫, 在接触泡沫后的极短时间内, 其加速度迅速增至峰值, 相较于第 1 次冲击, 加速度并未出现线性增加且第 2 次冲击下的加速度峰值是第 1 次冲击下加速度峰值的 3 倍, 说明 EPE 泡沫材料在第 1 次冲击下, 泡沫发生软化, 缓冲性能大幅降低。

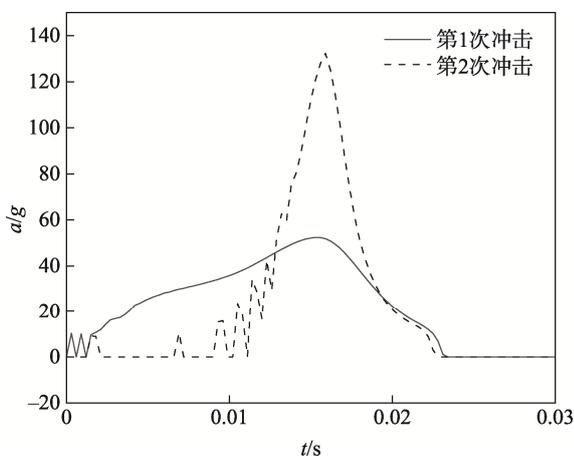


图 3 产品 1 在连续冲击下的加速度-时间曲线
Fig.3 Continuous impact acceleration-time curve of product 1

通过观察图 4 可以发现, 产品 2 第 2 次冲击下的加速度变化趋势与第 1 次冲击下加速度的变化趋势类似, 都经历了 3 次峰值。在第 2 次冲击初期, 逐渐跌落并开始压缩底层泡沫, 加速度逐渐增大。与产品 1 类似, 加速度此时均未出现线性变化阶段, 并且在第 2 次冲击下加速度峰值是第 1 次冲击下加速度峰值的 3 倍。说明底层泡沫也出现了泡沫软化现象, 导致泡沫的缓冲性能下降。

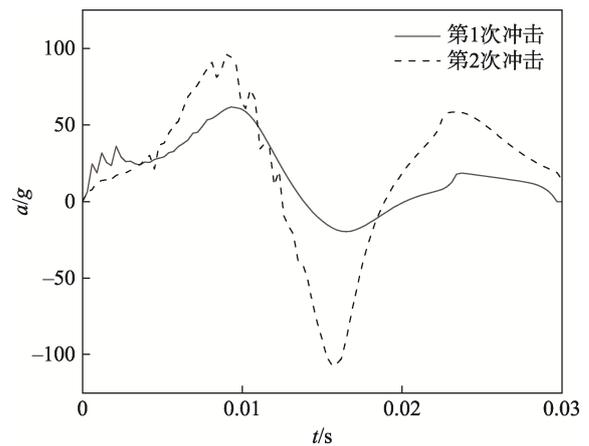


图 4 产品 2 在连续冲击下的加速度-时间曲线
Fig.4 Continuous impact acceleration-time curve of product 2

对比了第 2 次冲击下产品 1、2 的加速度, 如图 5 所示。在冲击初期, 产品 2 的加速度首先开始变化。在产品 1 的加速度恒为零后, 产品 2 的加速度逐渐减小, 说明第 2 次冲击对产品 2 造成影响的持续时间较长。通过观察产品 1、2 的第 2 次冲击加速度-时间曲线可以发现, 产品 1、2 基本同时达到最大峰值。这是由于此时底层泡沫开始回弹, 上层泡沫同时受到产品 1、2 的挤压作用, 泡沫进入压实阶段, 此阶段的应力急剧上升。

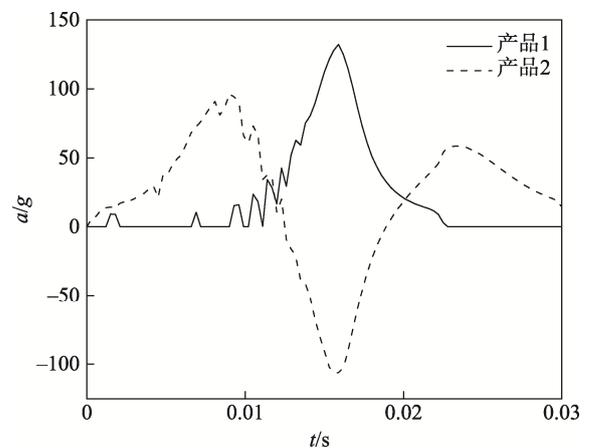


图 5 第 2 次冲击下产品的加速度-时间曲线
Fig.5 Acceleration-time curve of product under the second impact

3.3 试验结果验证

在试验过程中,产品1采用钢板,产品2采用铝板,上下2个泡沫均为尺寸100 mm×100 mm×30 mm、密度34 kg/m³的EPE泡沫。将其整体置于测量框架中,如图6所示。从高度60 cm的位置跌落,并用加速度传感器记录数据。通过计算机处理数据,测试2个板的加速度-时间曲线,如图7所示。

将试验结果与有限元仿真结果进行对比,包括单次冲击和连续冲击2种情况下,产品1和产品2的加速度-时间曲线如图8所示。在单次冲击条件下(图8a~b),试验测得的加速度曲线与有限元模拟的曲线

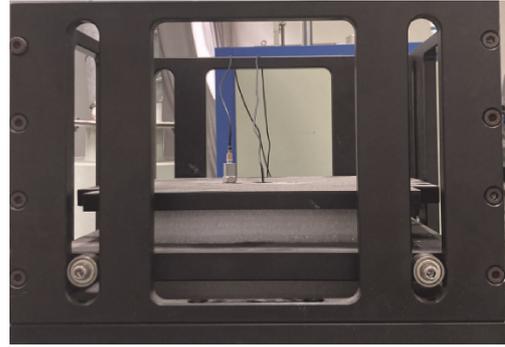


图6 实验装置
Fig.6 Experimental setup

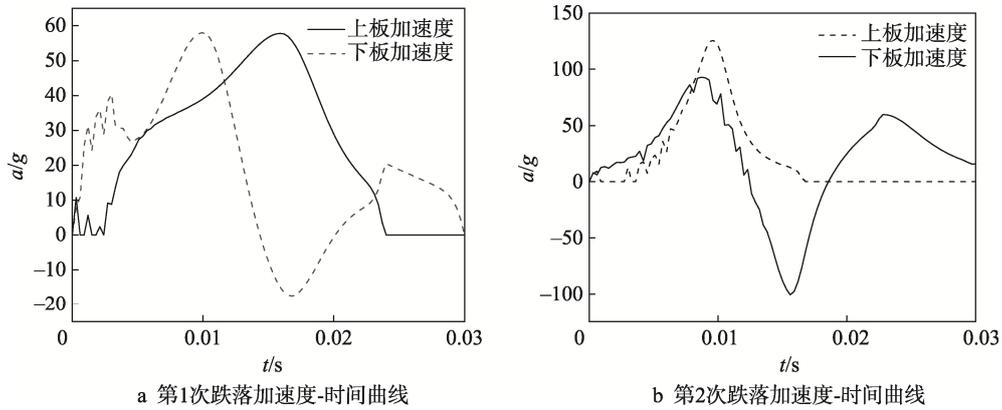


图7 试验结果
Fig.7 Test results

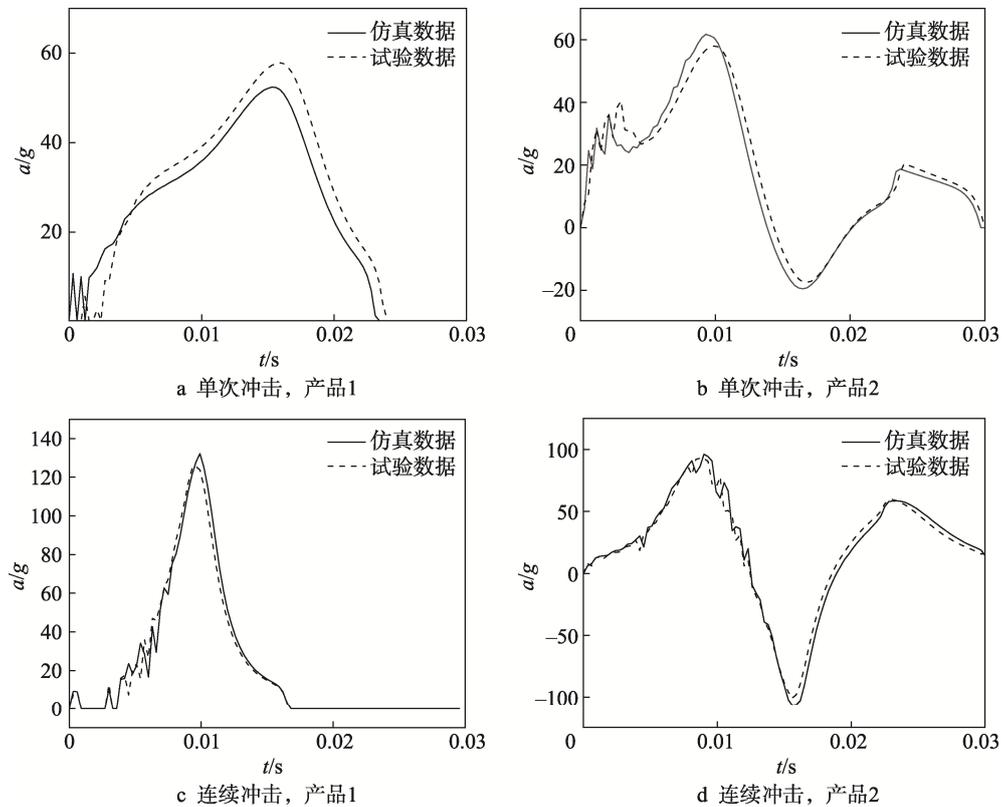


图8 试验结果与仿真验证结果
Fig.8 Test results and simulation verification results

高度吻合,表明模型能够准确捕捉单次冲击作用下产品 1 和产品 2 的动力学响应过程。在连续冲击条件下(图 8c~d),试验曲线与仿真曲线具有良好的一致性。说明该有限元模型能够精准模拟产品在连续冲击载荷作用下的动态行为。

在 2 种不同冲击情况下,试验结果与仿真结果高度吻合,充分验证了所建有限元模型的准确性和可靠性。

4 顶层泡沫厚度对产品加速度的影响

为了研究顶层泡沫厚度对产品加速度的影响,保持参数 $m_1=2.5\text{ kg}$, $m_2=2.5\text{ kg}$, $A=0.01\text{ m}^2$, $L=0.03\text{ m}$, $v_0=3.43\text{ m/s}$ 不变,取极限加速度 $a_j=80\text{g}$, $g=9.8\text{ m/s}^2$ 。由于在运动过程中,产品 2 并不会接触顶层泡沫,所以并未对产品 2 的加速度进行讨论。在冲击初期,顶层泡沫不会对产品 1 的运动造成影响,也就不会影响产品 1 的加速度,因此这里通过处理数据,直接从顶层泡沫作用于产品 1 时开始讨论。由于负号只影响加速度的方向,对加速度乘以负号,并不会影响数据分析结果。改变顶层泡沫厚度 d ,得到产品 1 的加速度-时间曲线如图 9 所示,取 $d_1=0.04\text{ m}$, $d_2=0.01\text{ m}$ 。

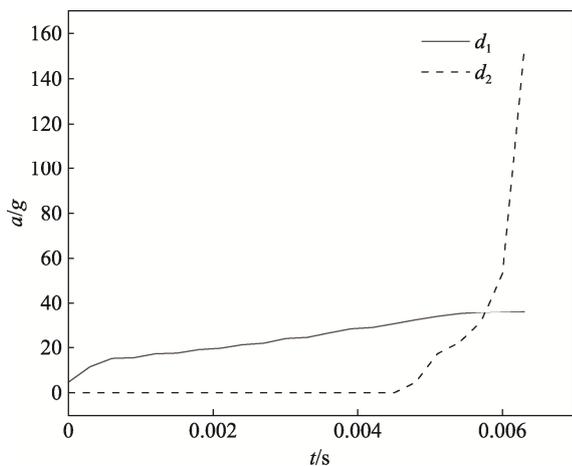


图 9 顶层泡沫厚度 d 影响产品 1 的加速度-时间曲线
Fig.9 Acceleration-time curve for effect of top foam thickness d on product 1

由图 9 可知,由于泡沫厚度不同,所以产品 1 的加速度响应亦不相同。由于 $d_1>d_2$,所以当顶层泡沫厚度为 0.04 m 时,产品 1 先接触泡沫,且其加速度开始变化。在接触初期可以看出,产品的加速度呈线性增加,之后呈非线性增加趋势。这与上文得出的产品在单次冲击作用下加速度开始呈线性增加的结论一致。出现这种情况主要是由泡沫的缓冲特性所致。在压缩过程中,泡沫一共经历了 3 个典型阶段:线弹性阶段、应力屈服平台阶段、压实阶段。在线弹性阶段,泡沫主要发生弹性形变,此阶段泡沫应力的变化呈线性趋势。继续压缩泡沫,则进入应力屈服平台阶段。此时加速度呈非线性增大。当顶层泡沫厚度为

0.01 m 时,短时间内产品尚未接触顶层泡沫,所以加速度持续为零。从图 9 可知,在产品接触泡沫后,加速度在极短时间内呈线性增加,之后呈非线性增加,并迅速呈爆发性增长。此时,加速度的峰值达到了 150g ,说明泡沫进入压实阶段,应力急剧上升,泡沫内部结构被破坏,其缓冲性能大幅度降低。通过观察加速度线性增长到非线性增长的转折点可以发现,在不同厚度下可达到的加速度基本相等,说明泡沫厚度并不会明显影响泡沫的屈服应力。

通过对比这 2 组不同厚度的顶层泡沫对产品加速度的影响可以发现,厚度较小的泡沫对产品的缓冲能力较弱,产品的加速度易达到一个较高峰值,超过产品的极限加速度,产品更易被损坏。选取厚度为 0.04 m 的泡沫可以观察到,产品的加速度为 40g ,远远达不到极限加速度,容易造成资源浪费,这在包装设计过程中极不可取。基于减量化原则设计缓冲包装时,常常需要多次实验,以确定最适合的缓冲衬垫厚度。采用仿真模拟可以有效减少实验成本,在确保满足缓冲要求的前提下,尽可能选择较薄的缓冲衬垫,避免不必要的过度包装。这样既节约了资源,又降低了包装成本。

5 结论

1) 在两自由度包装系统中,夹在产品中间的泡沫在冲击初期,其能量吸收较少,主要是底层泡沫发挥作用,且冲击对产品 2 的作用时间较长。

2) 在第 1 次冲击作用下,泡沫出现软化现象,EPE 的缓冲性能降低,保护作用减弱。在第 2 次冲击下,泡沫受到产品双重挤压,进入泡沫压实阶段。此阶段泡沫的应力急剧上升,因此会产生较大的加速度峰值。

参考文献:

- [1] NAVARRO-JAVIERRE P, GARCIA-ROMEU-MARTINEZ M A, CLOQUELL-BALLESTER V A, et al. Evaluation of Two Simplified Methods for Determining Cushion Curves of Closed Cell Foams[J]. Packaging Technology and Science, 2012, 25(4): 217-231.
- [2] PIATKOWSKI T, OSOWSKI P. Modified Method for Dynamic Stress-Strain Curve Determination of Closed-Cell Foams[J]. Packaging Technology and Science, 2016, 29(6): 337-349.
- [3] AVALLE M, BELINGARDI G, IBBA A. Mechanical Models of Cellular Solids: Parameters Identification from Experimental Tests[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(1): 3-27.
- [4] GE C F, HUANG H Q. Corner Foam Versus Flat Foam:

- An Experimental Comparison on Cushion Performance[J]. *Packaging Technology and Science*, 2015, 28(3): 217-225.
- [5] 卢富德, 张绍云, 杜启祥. 发泡聚乙烯隔振性能研究[J]. *包装工程*, 2011, 32(11): 1-4.
LU F D, ZHANG S Y, DU Q X. Study of Vibration Isolation Performance of EPE[J]. *Packaging Engineering*, 2011, 32(11): 1-4.
- [6] SERGI C, SARASINI F, BARBERO E, et al. Assessment of Agglomerated Corks and PVC Foams Cores Crashworthiness under Multiple-Impact Events in Different Loading Conditions[J]. *Polymer Testing*, 2021, 96: 107061.
- [7] RUMIANEK P, DOBOSZ T, NOWAK R, et al. Static Mechanical Properties of Expanded Polypropylene Crushable Foam[J]. *Materials*, 2021, 14(2): 249.
- [8] JOODAKY A, BATT G S, GIBERT J M. Prediction of Cushion Curves of Polymer Foams Using a Nonlinear Distributed Parameter Model[J]. *Packaging Technology and Science*, 2020, 33(1): 3-14.
- [9] 伍瑾, 卢富德, 王彪, 等. 易损件在连续跌落冲击载荷作用下的动力学响应[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(20): 275-279.
WU J, LU F D, WANG B, et al. Dynamic Response of Vulnerable Part under the Continuous Drop Impact Loads[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(20): 275-279.
- [10] LU F D, HUA G J, WANG L S, et al. A Phenomenological Constitutive Modelling of Polyethylene Foam under Multiple Impact Conditions[J]. *Packaging Technology and Science*, 2019, 32(7): 367-379.
- [11] MILLS N J, STÄMPFLI R, MARONE F, et al. Finite Element Micromechanics Model of Impact Compression of Closed-Cell Polymer Foams[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2009, 46(3/4): 677-697.
- [12] 卢富德, 滑广军, 王丽姝, 等. 梯形聚乙烯泡沫结构动态压缩响应有限元分析[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(14): 234-238.
LU F D, HUA G J, WANG L S, et al. Finite Element Analysis of Dynamic Compression Response of Trapezoidal Polyethylene Foam Structure[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(14): 234-238.
- [13] LU F D, TAO W M, GAO D. Virtual Mass Method for Solution of Dynamic Response of Composite Cushion Packaging System[J]. *Packaging Technology and Science*, 2013, 26(Sup.1): 32-42.
- [14] 高德, 卢富德. 聚乙烯缓冲材料多自由度跌落包装系统优化设计[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(3): 69-72.
GAO D, LU F D. Optimization Design of MDOF Package Cushioning System Made of Polyethylene[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(3): 69-72.
- [15] 高德, 卢富德. 两自由度正切非线性系统的冲击响应研究[J]. *哈尔滨商业大学学报(自然科学版)*, 2010, 26(6): 748-752.
GAO D, LU F D. Study of Shock Response Spectra Surface under Half-Sine Pulse of Two-Degree-of-Freedom Tangent Nonlinear System[J]. *Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition)*, 2010, 26(6): 748-752.
- [16] OGDEN R W. Large Deformation Isotropic Elasticity - on the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubberlike Solids[J]. *Proceedings of the Royal Society of London A Mathematical and Physical Sciences*, 1972, 326: 565-584.
- [17] GARCIA-ROMEU-MARTINEZ M A, SEK M A, CLOQUELL-BALLESTER V A. Effect of Initial Pre-Compression of Corrugated Paperboard Cushions on Shock Attenuation Characteristics in Repetitive Impacts[J]. *Packaging Technology and Science*, 2009, 22(6): 323-334.
- [18] SCHAEGLER T A, JACOBSEN A J, TORRENTS A, et al. Ultralight Metallic Microlattices[J]. *Science*, 2011, 334: 962-965.
- [19] OGDEN R W, ROXBURGH D G. A Pseudo-Elastic Model for the Mullins Effect in Filled Rubber[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1999, 455: 2861-2877.