基于发泡聚苯乙烯的缓冲曲线快速获取方法研究

李志强^{1a,1b},牛文倩^{1a},马淑芳^{1a,2}

(1.陕西科技大学 a.轻工科学与工程学院 b.轻化工程国家级实验教学示范中心,西安 710021; 2.山西浙大新材料与化工研究院,太原 030000)

摘要:目的 回顾传统获取缓冲曲线的理论、实践和简化方法,与利用能量密度和应力能量 2 种方法预测及实践得出的缓冲曲线进行误差对比分析,应用最简便的方法得到发泡聚苯乙烯(EPS)缓冲曲线。 方法 依据《包装缓冲材料:测试项目、动态压缩试验和静态压缩试验》(GB/T 8167—2008)中动态压 缩缓冲包装材料试验方法的要求,利用密度为 20、25 kg/m³,跌落高度为 250、350、460、760 mm,厚 度为 25、30、35、65 mm 的 EPS 材料,通过试验测得该曲线上不少于 5 个点的数据并由此绘制完整曲 线。基于能量守恒原理,分别求出该缓冲材料下的应力能量-静应力曲线、能量密度-静应力曲线等相应 的缓冲曲线,并进行绘制。在此基础上建立缓冲材料的静应力、动应力和单位体积吸收能量对应的关系 式,预测缓冲材料最大冲击加速度,从而得到快速获取缓冲曲线的方法。预测不同组合条件下的 EPS 缓冲曲线,并将其与试验所得缓冲曲线进行对比分析。结果 选择不同组合下的跌落高度和材料厚度预 测缓冲曲线,所得结果与试验缓冲曲线较为吻合。结论 这 2 种推导方法均可快速获取缓冲曲线,大幅 降低试验次数,也为快速得到缓冲曲线提供了更多可能。

关键词: EPS; 应力能量; 能量密度; 缓冲曲线

中图分类号: TB485.1 文献标志码: A **DOI**: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.05.029

文章编号: 1001-3563(2025)05-0228-07

Method for Fast Acquiring of Buffer Curve Based on Expanded Polystyrene

LI Zhiqiang^{1a,1b}, NIU Wenqian^{1a}, MA Shufang^{1a,2}

 (1. a. College of Bioresources Chemical & Materials Engineering, b. National Experimental Teaching Demonstration Center for Light Chemistry Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China;
 2. Shanxi-Zheda Institute of Advanced Materials and Chemical Engineering, Taiyuan 030000, China)

ABSTRACT: The work aims to review the theories, practices and simplified methods for obtaining the buffering curve traditionally, and conduct an error comparison analysis with the buffering curves predicted and obtained through the two methods of energy density and stress energy, so as to obtain the buffering curve of expanded polystyrene (EPS) by the most convenient method. According to the requirements of the dynamic compression test method for packaging buffering materials in "Packaging Buffering Materials: Test Items, Dynamic Compression Test and Static Compression Test" (GB/T 8167-2008), EPS samples with densities of 20 and 25 kg/m³, drop heights of 250, 350, 460 and 760 mm, and material thicknesses of 25, 30, 35 and 65 mm were used. At least five data points on the curve were measured through experiments and the complete curve was drawn. Based on the principle of energy conservation, the stress energy-static stress curve, energy density-static stress curve and other corresponding buffering curves under this buffering material were calculated

基金项目:山西浙大新材料与化工研究院项目(2021SX-AT007)

and drawn respectively. On this basis, the relationship formulas between the static stress, dynamic stress and unit volume absorbed energy of the buffering material were established to predict the maximum impact acceleration of the buffering material, thereby obtaining a method for fast obtaining of buffering curves. The buffering curves of EPS under different combination conditions were predicted and compared with the buffering curves obtained through experiments. The results showed that the predicted buffering curves under different combinations of drop height and material thickness were in good agreement with the experimental buffering curves. In conclusion, both of these two derivation methods can quickly obtain the buffering curve, significantly reducing the number of experiments, and also providing more possibilities for quickly obtaining the buffering curve.

KEY WORDS: EPS; stress energy; energy density; buffer curves

聚合物泡沫在家电物流包装中有诸多应用,其中 发泡聚苯乙烯(EPS)泡沫因良好的隔热性能、防潮、 耐用、导热系数低、成本低等优点被广泛用于家用电 器的包装^[1]。通过动态压缩试验装置对 EPS泡沫材料 进行动态压缩试验,探讨密度和跌落高度在不同厚度 和静应力下对材料动态压缩特性的影响。选取不同的 跌落高度和材料厚度组合进行传统的试验测试,得到 的缓冲曲线需要耗费大量材料且费时费力,迫切需要 研究一种可快速获取缓冲曲线的方法。

近年来,国内外学者对缓冲材料的动态缓冲特性 进行持续性研究。Burgess^[2]提出静应力-能量密度理 论,通过较少试验获取静应力、能量密度等参数,并 拟合相关方程,实现对最大加速度值的预测。在此基 础上, Burgess^[3]进一步提出一种新的利用冲击脉冲获 得速度变化值的方法,仅需一次试验便可得到能量密 度缓冲曲线。Daum 等^[4]提出一种基于应力-能量法的 泡沫缓冲曲线的快速获取方法,结果表明,动应力和 能量密度呈指数关系。Marcondes 等^[5]对采用应力-能 量法得到的缓冲材料的动态缓冲性能曲线进行试验 验证,结果证明其具有一定的准确性。Paulin 等^[6]指 出,目前有关应力-能量法对加速度值的预测精度及 其与 ASTM D1596 标准相比的准确性尚存争议。Ge^[7] 对缓冲曲线的预测方法进行全面分析与总结。张文武 等^[8]对各类吸能材料进行分类的同时深入探究缓冲 特性试验的方法,不同的缓冲动态曲线对应不同的跌 落高度、材料厚度, 若想得到不同的缓冲曲线, 需要 进行多次重复试验,从而得到大量的试验数据,极大 地降低了工作效率。陈满儒等^[9]根据3种不同密度的 EPS 动态压缩试验资料,采用应力-能量方法绘制不 同密度条件下 EPS 的动态缓冲特性曲线,并建立相 应的应力-能量关系式。李光等[10]以发泡聚乙烯为研 究对象,对其进行多项式拟合,在试验过程中采用能 量密度的预测方法,由于对能耗问题缺乏考虑,造成 曲线某个区域存在很大误差。宋卫生等[11]采用落锤式 冲击试验设备获取 5 种不同高度、不同厚度的发泡聚 乙烯的最大加速度-静应力曲线,在此基础上将 3 种 改进拟合方法与现有的动应力、动能量多项式拟合方法进行比较。陈磊^[12]利用动态压缩试验对 EPP 泡沫 塑料在不同发泡比例、不同粒径下的力学性能进行试 验研究,结果表明,采用应力-能量法可以测定 EPP 的动态缓冲性能。邢紫玉等^[13]探讨采用应力-能量法 来改善试验效率,分析 3 种不同夹层结构的聚丙烯板 材得出的动态缓冲曲线,并与普通蜂窝纸板的缓冲性 能进行比较。研究发现,随着聚丙烯夹层板厚度的增 加,凹点最大加速度的峰值减小,静应力增大。李超 等^[14]以空气柱为缓冲材料进行试验,通过对数据进行 分析与拟合,得出相关应力-能量关系式,并验证了 此方法适用于空气柱缓冲材料。

综上可知,能量密度法和应力能量法在获取缓冲 曲线方面都是比较便捷,但二者较之实践所得缓冲曲 线的预测精度有待商榷。本文通过这2种方法对缓冲 曲线进行预测,并与传统试验进行误差对比分析,为 后续相关人员在缓冲包装设计及软件开发应用方面 的选择提供一定参考。

1 缓冲曲线的理论背景

缓冲曲线根据动态压缩测试设备的测试数据进 行绘制。在试验过程中,重锤落在一块缓冲材料上的 瞬间,泡沫衬垫的动态变形吸收了原始势能,可用式 (1)表示。

$$mg \cdot h = e \cdot A \cdot t \tag{1}$$

式中: *m* 为重锤质量; *g* 为重力加速度; *h* 为跌 落高度; *A* 为缓冲材料的承载面积; *t* 为缓冲材料的 泡沫厚度; *e* 为缓冲材料在应力应变曲线下对应面积 的能量密度。

e也可以表示单位体积的重力势能,见式(2)。

$$=\frac{mg \cdot h}{A \cdot t} = \sigma_{\rm s} \cdot \frac{h}{t} \tag{2}$$

式中: o_s为静态应力。

е

在应力能量法中加速度 G 的最大值出现在动态 压缩试验中,此时泡沫材料的动应力达到最大值 om, 可以用式(3)表示。

$$\sigma_{\rm m} = \frac{mg \cdot G}{A} = \sigma_{\rm s} \cdot G \tag{3}$$

结合式(2)和式(3),得到G的表达式,见式(4)。

$$G = \frac{\sigma_{\rm m}}{e} \cdot \frac{h}{t} \tag{4}$$

能量密度法中的缓冲因子 C 可由式(4)中的 σ_m/e 进行定义,由此得到式(5)。

$$C = \frac{G}{h/t} = \frac{\sigma_{\rm m}}{e} \tag{5}$$

2 试验

2.1 原理

动态压缩试验是指将缓冲包装材料放置在冲击 台面上,在预定的跌落高度下释放重锤并对试样进行 自由冲击,通过重锤上安装的加速度传感器进行测 试,由此得到最大加速度、冲击波形等参数。

在试验过程中,若只改变重锤的质量,保持跌落 高度和缓冲材料厚度不变,即可得到一系列的静应力 和最大加速度,分别以此为横、纵坐标,可绘制相应 的缓冲曲线^[15]。

2.2 设备与材料

图 1 为缓冲材料的动态压缩试验机,其最大可承 受的跌落质量为 62 kg,可预设的最大跌落高度为 1 200 mm。文中所用材料均为 EPS,密度分别为 20、 25 kg/m³,厚度分别为 25、30、35、65 mm。

2.3 方法

根据《包装用缓冲材料动态压缩试验方法》



图 1 DY-3 冲击试验机 Fig.1 DY-3 impact testing machine

(GB/T 8617—2008),在试验前先测定 EPS 试样尺 寸,以实际测量的厚度为试验中缓冲材料的初始厚 度,然后将试样置于冲击试验机测试台面的中央位 置。取少量双面胶水对试样进行固定,在跌落高度为 250、350、460、760 mm 下用试验机的重锤对试样进 行冲击,得到的每条曲线取不少于 5 个试验数据点进 行拟合,最终得出最大加速度-静应力曲线。

2.4 结果

图 2 为 EPS 缓冲材料在 250、350、460、760 mm 跌落高度, 25、30、35、65 mm 厚度下的最大加速 度-静应力曲线。由试验测得的最大加速度值先迅速 减小,再逐渐增大,曲线整体呈现"U"形抛物线状。 缓冲材料的变形程度与重锤上的砝码质量有关,当 所加砝码质量很小时,EPS 缓冲材料变形程度小, 冲击时间变短,产生的加速度较大;反之,产生的 加速度较小,材料因冲击所吸收的能量随之变小。 随着砝码质量增加到一定程度,EPS 缓冲材料呈现 密实化,减小了变形空间,从而使加速度重新变大。



图 2 最大加速度-静应力曲线 Fig.2 Maximum acceleration-static stress curve

3 结果分析

3.1 缓冲曲线推导

将能量密度曲线和应力能量曲线作为快速获取 缓冲曲线的基础来设计 EPS 缓冲。以静态应力 σ_s为 行, h/t 为列, 建立能量密度矩阵,见表 1。选择能量 密度进行测试主要有 3 种方式:1)如果对某一特定 的 h/t 及其附近比值感兴趣,则选择单个 h/t 列;2)如 果希望得到一条完整的缓冲曲线,则选择位于矩阵对 角线处的能量密度点;3)如果希望曲线的右侧使用 较少的材料,则选择更多的高载荷点。根据所需选择 一组能量密度点作为测试点进行动压试验,分别得到 一组能量密度值和应力能量值,绘制相应曲线,如图 3 所示。

对其余不同 h/t 组合的缓冲曲线进行推导(表 2), 得到的曲线见图 4。由图 4 可知,不同 h/t 组合得到 的曲线走向基本保持一致,其中 h/t 组合为 30 的曲线 整体加速度值均高于其他组合,而 h/t 组合为 3 的曲 线整体加速度值均低于其他组合。不同跌落高度和材 料厚度进行组合得到的值越大,其加速度值整体偏大,反之其加速度值整体偏小。

综合对比图 4 可知, 2 种方法推导出的曲线误差 不大,皆呈"U"形,曲线的左侧下降趋势比较急,加 速度值迅速减小,右侧则呈缓慢上升状态。

3.2 预测缓冲曲线与试验缓冲曲线对比

3.2.1 同一跌落高度下不同材料厚度对比

选择 h/t 组合为 21、25、30,密度为 20 kg/m³, 材料厚度为 25、30、35 mm 的 EPS 缓冲材料,分别 采用能量密度法和应力能量法预测其缓冲曲线,得到 2 组相应的最大加速度-静应力曲线,与跌落高度 为 760 mm 的动态压缩试验得到的缓冲曲线进行对 比,见图 5。由图 5 可知,用能量密度缓冲曲线预测 厚度分别为 25、30、35 mm 的 EPS 缓冲材料,反推 得到能量密度法及应力能量法下的最大加速度-静应 力曲线,其曲线误差均未超过 5%,能量密度法的平 均误差为 2.24%,应力能量法的平均误差为 2.426 6%, 可见同一跌落高度下不同材料厚度对所预测曲线的精 准度影响较小,在应用时可任选其一进行曲线预测。

表 1 能量密度矩阵 Tab.1 Energy density matrix

$\sigma_{ m s}/{ m kPa}$ -	h/t								
	9	12	18	21	25	30			
0.013 357	0.120 213	0.171 733	0.240 426	0.290 037	0.333 924	0.406 052			
0.013 411	0.120 702	0.172 431	0.241 404	0.291 026	0.335 283	0.407 704			
0.030 6	0.275 4	0.393 429	0.550 8	0.664 02	0.765	0.930 24			
0.030 804	0.277 236	0.396 051	0.554 472	0.668 447	0.770 1	0.936 442			
0.043 86	0.394 74	0.563 914	0.789 48	0.951 762	1.096 5	1.333 344			
0.044 982	0.404 838	0.578 34	0.809 676	0.976 109	1.124 55	1.367 453			
0.053 04	1.006 376	0.681 934	0.954 72	1.150 968	1.326	1.612 416			

注:能量密度的单位为 N/m²。





表 2 预测不同 *h/t* 组合下的能量密度 Tab.2 Prediction of energy density at different *h/t* combinations

$\sigma_{ m s}/{ m kPa}$ -	h/t									
	3	5	7	9	12	18	21	25	30	
0.013 357	0.051 373	0.071 992	0.094 56	0.120 213	0.171 733	0.240 426	0.290 037	0.406 052	0.406 052	
0.013 411	0.051 582	0.072 215	0.094 911	0.120 702	0.172 431	0.241 404	0.291 217	0.407 704	0.407 704	
0.030 6	0.117 692	0.164 769	0.216 554	0.275 4	0.393 429	0.550 8	0.554 472	0.936 442	0.936 442	
0.030 804	0.118 477	0.165 868	0.217 998	0.277 236	0.396 051	0.554 472	0.809 676	1.367 453	1.367 453	
0.043 86	0.168 692	0.236 169	0.310 394	0.394 74	0.563 914	0.789 48	0.550 8	0.930 24	0.930 24	
0.044 982	0.173 008	0.242 211	0.318 334	0.404 838	0.578 34	0.809 676	0.789 48	1.333 344	1.333 344	
0.053 04	0.204	0.285 6	0.375 36	1.006 376	0.681 934	0.954 72	0.954 72	1.612 416	1.612 416	

注:能量密度的单位为 N/m²。







图 5 同一跌落高度下不同材料厚度预测缓冲曲线对比 Fig.5 Comparison of predicted buffer curves for different material thickness at the same drop height

通过分析发现,在曲线的最低值附近误差较大, 这与试验数据点的选取和对试验数据进行处理时的 拟合方法均有一定关系。本文采用多项式拟合法拟合 缓冲曲线,使用 2~5 次的平均值以及前 3 次的值分别 对其进行拟合,比较分析后得知,采用 2~5 次的平均 值进行多项式拟合效果更佳。此外,在实际试验操作 中存在能量耗散,从而造成一定的误差,而预测方法未 能避免此情况。曲线虽整体误差<5%,但在曲线的低谷 附近仍然有很大误差,可在后续研究中改善拟合方 式,从而更为准确地把握数据点的选取。

3.2.2 同一材料厚度下不同跌落高度对比

用密度为 25 kg/m³, h/t 组合分别为 3、5、7 的 EPS 缓冲材料,保持厚度始终为 65 mm,在 250、350、 460 mm 的跌落高度下分别对其采用能量密度法和应 力能量法进行预测。将初始设置的静应力值得到的 能量密度代入曲线中进行推导,得到所需的能量密 度,反推得到预测的最大加速度和所需静应力,绘 制相应曲线,与在不同跌落高度下的试验缓冲曲线进 行对比。

由图 6 可知,用能量密度缓冲曲线预测厚度为 65 mm,跌落高度为 250、350、460 mm 的 EPS 缓冲 材料,反推得到能量密度法及应力能量法下的最大加 速度-静应力曲线,其误差均不超过 5%,能量密度法 的平均误差为 2.331%,应力能量法的平均误差为 3.259 3%。由此可见,同一材料厚度下,预测的缓冲曲线精 度受不同跌落高度的影响不大,这 2 种方法皆简易快 速且不影响使用。



different drop height under the same material thickness 综合对比图 6 预测曲线误差情况可知,在曲线的 谷底处误差较大,两端趋势基本吻合,这可能是预测 时取点不够均匀所致。对于能量密度-静应力曲线, 缓冲材料吸收的能量密度通过式(2)计算,静应力 则通过相应曲线求出,由此得到相应的最大加速度。 由于式(2)只考虑重锤从预设的跌落高度到缓冲材 料表面过程的能量变化情况,并未考虑缓冲材料被重 锤冲击后的能量吸收,因此存在一定误差。对于整体 的能量耗散,理论公式上也没有体现,导致缓冲曲线 存在一定误差,后续相关研究可以从这 2 个方面进行 探讨和改进。

4 结论

通过对比分析可以得出如下几点结论。

1)通过试验得到一条缓冲曲线,划分能量密度 矩阵,设置不同组合的材料厚度、跌落高度等参数, 预测该曲线的静应力、能量密度,最终得到与之相关 的最大加速度,并绘制预测的缓冲曲线。试验推导出 的曲线准确性取决于如何选择测试点,即能量密度。

2) 在同一材料不同厚度、跌落高度下使用能量 密度法和应力能量法预测缓冲曲线,与试验所得缓冲 曲线进行对比分析可知,误差均<5%。在同一条件下 对比 2 种方法,能量密度法更准确。

3)在建立本构模型时,基于能量密度法和应力 能量法推导出的缓冲曲线相较于试验得到的动态缓 冲曲线,大大减少了试验次数,能够快速得到相应参数。建立相关曲线的本构模型参数方程,为后续研究 提供便捷,可极大地提高研究人员的工作效率。

参考文献:

- [1] 李志强,陈璇希,王哲,等.大尺寸冰箱运输包装设 计与仿真分析[J].包装工程,2024,45(17):226-233.
 LI Z Q, CHEN X X, WANG Z, et al. Design and Simulation Analysis of Transportation Packaging for Large Size Refrigerators[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(17): 226-233.
- [2] BURGESS G. Consolidation of Cushion Curves[J]. Packaging Technology and Science, 1990, 3(4): 189-194.
- [3] BURGESS G. Generation of Cushion Curves from One Shock Pulse[J]. Packaging Technology and Science, 1994, 7(4): 169-173.
- [4] DAUM M, PH. D. A Simplified Process for Determining Cushion Curves: The Stress-Energy Method[D]. East Lansing: Michigan State University, 1999: 1-8.
- [5] MARCONDES P, BATT G, DARBY D, et al. Minimum Samples Needed to Construct Cushion Curves Based on the Stress Energy Method[J]. Journal of Applied Pack-

· 234 ·

aging Research, 2008, 2(3): 191-198.

- [6] PAULIN K, BATT G, DAUM M. Statistical Analysis of the Stress-Energy Methodology Applied to Cushion Curve Determination[J]. Journal of Testing & Evaluation, 2012, 41(3): 20120155.
- [7] GE C F. Theory and Practice of Cushion Curve: A Supplementary Discussion[J]. Packaging Technology and Science, 2019, 32(4): 185-197.
- [8] 张文武,张丹,王珊珊,等.吸能材料缓冲性能评价 方法综述[J].包装工程,2022,43(5):143-151.
 ZHANG W W, ZHANG D, WANG S S, et al. Review of Evaluation Methods for Buffering Performance of Energy-Absorbing Materials[J]. Packaging Engineering, 2022,43(5):143-151.
- [9] 陈满儒,刘兰. 基于应力-能量法的缓冲包装材料性 能研究[J]. 包装工程, 2018, 39(5): 44-47.
 CHEN M R, LIU L. Properties of Cushion Packaging Materials Based on Stress-Energy Method[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(5): 44-47.
- [10] 李光,要志雯. 基于能量密度确定缓冲材料性能曲线的研究[J]. 包装工程, 2020, 41(23): 103-108.
 LI G, YAO Z W. Determining Performance Curves of Cushioning Material Based on Energy Density[J].
 Packaging Engineering, 2020, 41(23): 103-108.
- [11] 宋卫生,薛阳. 发泡聚乙烯最大加速度-静应力曲线快速 获取方法研究[J]. 包装工程, 2024, 45(5): 309-314.

SONG W S, XUE Y. Rapid Acquisition Method of Maximum Acceleration-Static Stress Curve for Foamed Polyethylene[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(5): 309-314.

- [12] 陈磊. EPP 包装材料静态压缩与动态缓冲性性能研究
 [J]. 今日印刷, 2021(4): 43-47.
 CHEN L. Research on Static Compression and Dynamic Buffering Properties of EPP Packaging Materials[J].
 Print Today, 2021(4): 43-47.
- [13] 邢紫玉, 宋海燕, 王立军, 等. 聚丙烯夹芯板动态缓冲 性能的研究[J]. 包装与食品机械, 2021, 39(6): 26-30.
 XING Z Y, SONG H Y, WANG L J, et al. Study on Dynamic Cushioning Characteristics of Polypropylene Sandwich Panel[J]. Packaging and Food Machinery, 2021, 39(6): 26-30.
- [14] 李超,张雄飞.应力-能量法在柱形空气衬垫中的应用研究[J].绿色包装,2023(10):26-30.
 LI C, ZHANG X F. Research on the Application of Stress-Energy Method in Cylindrical Air Cushion[J].
 Green Packaging, 2023(10): 26-30.
- [15] 余天丹,李志强,袁亮,等. EPE 的缓冲性能试验研究 及缓冲包装设计[J]. 轻工科技, 2021, 37(2): 94-96. YU T D, LI Z Q, YUAN L, et al. Experimental Research on Cushioning Performance and Cushioning Packaging Design of EPE[J]. Light Industry Science and Technology, 2021, 37(2): 94-96.