

EPE 棱跌落缓冲性能试验研究

沈伊淇, 康勇刚

(天津科技大学, 天津 300222)

摘要: **目的** 对EPE棱跌落的缓冲性能进行试验研究,验证现有棱跌落当量面积计算方法的局限性,并探索动态当量面积的计算方法。**方法** 通过动态冲击试验研究,对比棱线接触、V台接触和纸箱包装棱部冲击等3种接触方式对当量面积大小的影响程度,以及构成棱部缓冲结构中边长、棱长与缓冲作用的关系。**结果** 3种接触方式动态冲击试验获得的最大加速度-静应力曲线族表明:在构成的棱部缓冲结构中,在相同当量面积条件下,棱长的增加会降低冲击接触应力和加速度;边长变化对实际应用中缓冲效果的影响不显著。**结论** 现有当量面积计算方法无法作为可靠的缓冲设计依据。在棱跌落冲击状态下,棱垫的边长变化较棱长对缓冲性能有更大的影响。

关键词: 发泡聚乙烯; 棱跌落; 动态冲击; 当量面积

中图分类号: TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)21-0038-05

Experimental Research on Drop Cushioning Performance at the Edge of EPE

SHEN Yi-qi, KANG Yong-gang

(Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

ABSTRACT: The drop cushioning performance at the edge of EPE was experimentally studied to verify the limitation of the current calculation method for edge drop equivalent area, and to explore a calculation method for dynamic equivalent area. By conducting dynamic impact tests, the effects of three different contacting forms including edge contacting, V type contacting, and edge contact with corrugated paperboard container on the equivalent area were compared, and the relationship of the side-length and edge-length in the edge cushioning structure with the cushioning effect was studied. Acceleration level-static stress curves obtained by dynamic impact experiments with three different contacting forms showed that increasing side-length in the edge cushioning structure lowered both the acceleration and static loading under the condition of constant equivalent area, whereas the change of side-length had little contribution to the cushioning effect in actual application. The existing theory cannot be regarded as a reliable method in edge drop calculation in cushioning design. Change of edge length possesses more cushioning function compared to side length in edge drop state of a packaging.

KEY WORDS: EPE; edge drop; dynamic impact; equivalent area

缓冲包装材料在产品流通过程中起着保护产品的重要作用,其中发泡塑料缓冲材料应用广泛。国内外主要使用的发泡塑料缓冲材料有发泡聚苯乙烯、发泡聚乙烯、发泡聚丙烯、乙烯-醋酸乙烯共聚物橡塑、聚氨酯等^[1]。

发泡聚乙烯是目前市场上应用较广的一类发泡缓冲材料,广泛应用于各行各业^[2-4]。目前,缓冲材料的性能测试与评价方法主要有本构模型分析法、缓冲特性曲线法、应力-能量法和仿真分析法^[5]。对比缓冲特性曲线法和应力-能量法,前者更为经典可靠,分为

收稿日期: 2015-07-04

作者简介: 沈伊淇(1992—)女,浙江人,天津科技大学本科生,主攻运输包装材料及技术应用。

通信作者: 康勇刚(1957—),男,辽宁人,博士,天津科技大学教授,主要研究方向为运输包装材料及技术应用。

材料的静态压缩和动态冲击,后者则较为简便^[6]。缓冲材料的缓冲性能是材料选用的依据,其中,动态冲击是检验缓冲材料选择合理性的重要项目,发泡缓冲材料的动态冲击试验是目前模拟缓冲衬垫在受到冲击时缓冲性能表征的主要方法。环境温度、受力方式及冲击状态是材料缓冲特性研究的核心内容。利用动态冲击实验探究高低温对聚乙烯缓冲影响的结果显示,随着温度上升,聚乙烯发泡材料的缓冲能力下降,冲击加速度升高。随着环境温度的降低,聚乙烯发泡材料的缓冲能力有增强的趋势^[10-11]。Pan Min-Chun等^[12]对液晶显示器进行面、角、棱的跌落试验,评估并进行计算机仿真对比实验得到的数据和仿真结果,验证了计算机仿真系统的可靠性。刘晶等^[13]、李俊等^[14]对比EPE和EPS的弹性形变,在500 mm的跌落高度下,对22.1 kg/m³的EPE(厚度46 mm)和11.8 kg/m³的EPS(厚度47 mm)进行的动态冲击实验,结果显示EPE变形恢复速度快于EPS,且试样变形在第3次后达到极限。

在实验过程中,试样的尺寸设置会对实验结果造成影响。田芑、滑广军^[15]对4种不同的裁切方式利用静态压缩试验进行分析,结果表明尺度效应明显,气泡破坏会减小材料的缓冲效力。刘继飞等^[16]通过对单种EPE材料和瓦楞纸板/EPE组合材料的缓冲性能对比,证实了瓦楞纸板的存在会使动态冲击最大加速度降低5%~13%。FENG Yong^[17]对经过多层熔融粘合的EPE片材试样进行水平、竖直方向的静态压缩试验,结果显示静态压缩时竖直方向缓冲效果好,动态冲击时水平方向缓冲效果好。

目前,对缓冲材料性能的评价主要针对面跌落冲击条件下的缓冲作用,而棱跌落的缓冲效果只能够采用包装件的实际测试评价棱、角跌落条件下的缓冲效果。设计计算的方法普遍使用经典当量面积理论,即将产品与缓冲材料接触面积在受力方向上的投影面积作为材料的当量面积。这里,对EPE棱跌落的缓冲性能进行试验研究,以实验分析与理论计算相结合的方法,研究棱跌落状态下等效缓冲面积的计算方法,验证经典当量面积理论的适用性。同时,与相同静应力条件下的面跌落实验进行比较,探索棱跌落状态下当量面积的实际情况。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设备

采用密度为36 kg/m³、厚度为30 mm的发泡聚乙

烯作为实验原料(山东龙华有限公司提供),选择760 mm为实验跌落高度。瓦楞纸箱采用面纸、芯纸、里纸定量分别为200,170,170 g/m²的B楞3层瓦楞纸板。对等截面棱垫缓冲结构在室温条件下以90°的垂直方向进行棱跌落冲击实验,见图1。

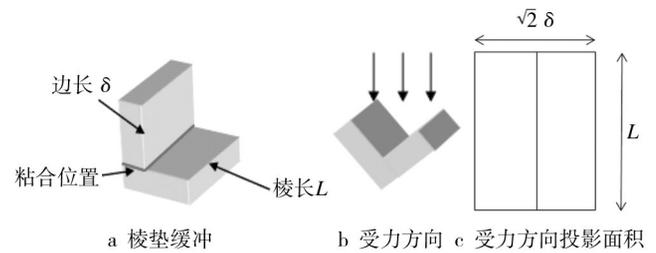


图1 棱垫试样及受力方向、投影面积示意

Fig.1 Impact direction and projected area of edge cushion

设备:缓冲包装材料冲击试验机(DY-2,陕西科技大学)、动态测试及信号分析系统(TP3, Lansmont, 美国)、激光位移传感器(LK-G400,基恩士有限公司)、切割机(BSM-400,天津芝华机械电子有限公司)、包装件跌落试验机(Lansmont PDT跌落台,美国)、自制质量可调式棱跌落实验台。

为了验证棱跌落情况下材料的缓冲性能和当量面积的计算方法,通过改变边长和棱长来改变当量面积值,见图1。在棱垫尺寸中,设定经典当量面积 A_e 为15 000 mm²、棱长 L 为200 mm和边长 δ 为60 mm的试样尺寸分别见表1—3。

表1 设定当量面积的试样尺寸

Tab.1 Sample dimensions of the same equivalent area

编号	边长 δ /mm	棱长 L /mm	数量/个
Ae-55-193	55.0	193	16
Ae-60-177	60.0	177	16
Ae-80-133	80.0	133	16
Ae-100-106	100.0	106	16
Ae-120-88	120.0	88	16

表2 设定棱长的试样尺寸

Tab.2 Sample dimensions of the same edge length

编号	边长 δ /mm	经典当量面积 A_e /mm ²	数量/个
L200-40	40.0	11 313.7	8
L200-50	50.0	14 142.1	8
L200-60	60.0	16 970.6	8
L200-80	80.0	22 627.4	8
L200-100	100.0	28 284.3	8

表3 设定边长的试样尺寸

Tab.3 Sample dimensions of the same side length

编号	棱长 L/mm	经典当量面积 A_e/mm^2	数量/个
δ 60-120	120	11 313.7	8
δ 60-140	140	14 142.1	8
δ 60-160	160	16 970.6	8
δ 60-180	180	22 627.4	8
δ 60-200	200	28 284.3	8

1.2 实验方法

参考 GB/T 8167—2008《包装用缓冲材料动态冲击试验方法》，使用5组确定当量面积的试样，以棱线接触、V台接触和瓦楞纸箱棱接触等3种测试方法的比较研究，说明当量面积($A_e = \sqrt{2}\delta L$)理论计算的适用范围。根据经典理论，缓冲材料棱跌落的当量面积由边长 δ 和棱长 L 按照受力方向的投影面积进行计算，即 $\sqrt{2}\delta$ 与 L 的乘积。

2 结果与分析

2.1 V台接触组冲击与当量面积的关系

为检验经典当量面积理论的适用范围，采用V型台作为冲击接触面，得到设定当量面积为 150 cm^2 时各棱长、边长变量小组试样的静应力-最大加速度(σ_s-G)曲线，见图2。在不同边长和棱长构成相同当量面积条件下，各试样测试结果符合经典当量面积理论的叙述，即适于采用刚性体外包装容器条件下的应用，而这样的包装形式在实际应用中极少存在，已经无法满足缓冲包装设计计算的要求。

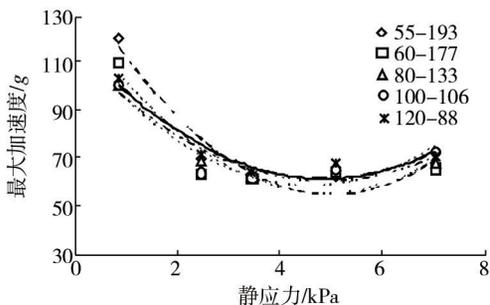


图2 V台组最大加速度-静应力曲线

Fig.2 $G-\sigma_s$ curves of V contact group

2.2 棱线接触冲击与投影面积的关系

边长和棱长作为变量而使投影面积相同时，样品

测试的最大加速度见图3。不同尺寸试样在同一静应力下，其最大加速度值随着边长和棱长的变化，材料体现的缓冲性能不同。同时与面跌落相比，棱跌落的各曲线在高静应力区加速度明显上升，高于面跌落。试验研究的测试证实，经典当量面积理论计算方法不适用于棱线接触冲击的评价。

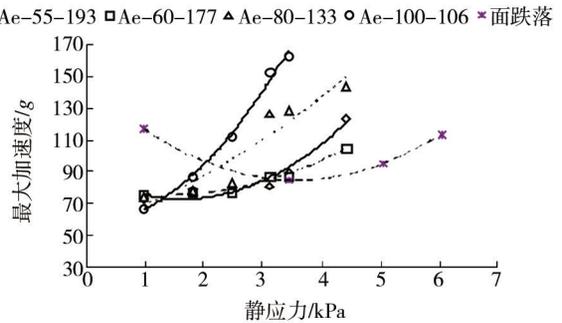


图3 棱线接触组最大加速度-静应力曲线

Fig.3 $G-\sigma_s$ curves of edge contact group

2.3 棱长和边长确定的投影面积与缓冲作用

在设定棱长和设定边长变量组的情况下，各组试样以经典当量面积计算方法和实验当量面积测试方法的结果分别见图4和图5。在试验验证棱线接触的棱跌落方式中，其边长的变化对受力投影面积的影响很小。棱长的变化是影响当量面积的主要因素。棱长和边长都会影响试样在冲击过程中的形变量，来改变受力投影面积，而棱长本身也起着决定受力投影面积的作用。

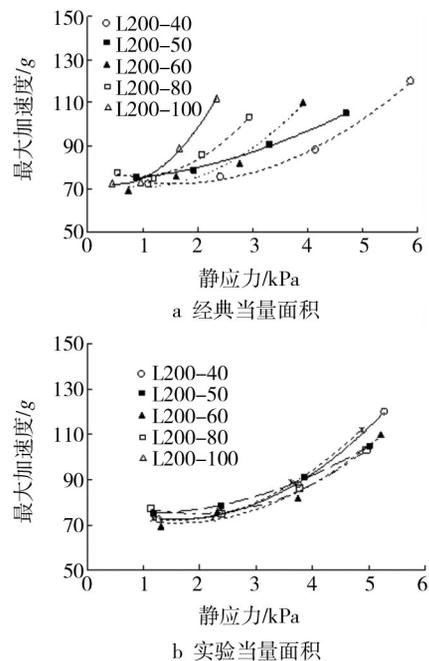


图4 设定棱长条件下不同当量面积测试曲线

Fig.4 Test curves with varied equivalent area at decided edge length

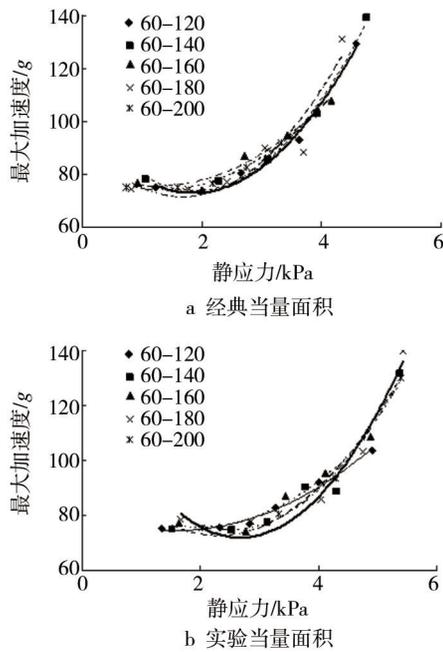


图5 设定边长组不同当量面积计算方法曲线

Fig.5 Test curves with varied equivalent area at decided side length

2.4 瓦楞纸箱棱接触与投影面积的关系

瓦楞纸箱棱接触组用于检验在实际物流流通环境中,瓦楞纸箱包装容器对棱垫结构在棱跌落情况下的缓冲性能,见图6。最低点静应力范围为2~3 kPa,各组最大加速度最高相差30g。

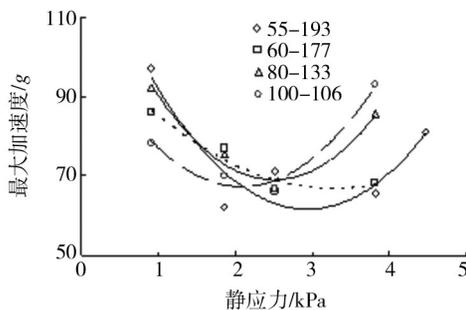


图6 瓦楞纸箱棱接触组缓冲性能曲线

Fig.6 G-σ curves of edge contact with corrugated paperboard group

综合几组实验数据分析见图7。相对于面跌落来说,V台组棱跌落测试中的加速度较低,而棱线接触和瓦楞组只在低静应力区有较低的加速度值,高静应力区则相反。对比瓦楞组与棱线接触组曲线可知,增加瓦楞纸箱使得缓冲材料在棱跌落的情况下,比单纯使用材料跌落时有更好的缓冲效果。

2.5 经典当量面积与实验当量面积比较

经典当量面积不能真实评价缓冲材料在棱跌落

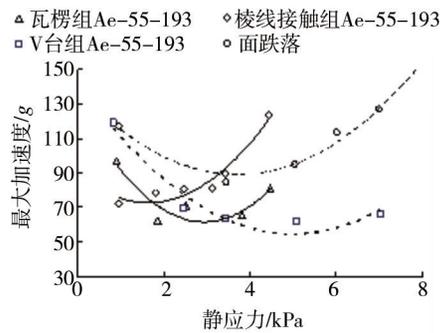


图7 不同棱跌落条件比较

Fig.7 Comparison among different edge drop conditions

下的缓冲性能。研究中将棱长和动态形变量作为实验当量面积计算的基础。

实验研究表明,经典当量面积 $A_e = \sqrt{2\delta L}$ 的计算方法只有在棱垫缓冲结构接触面是刚性体的情况下才有效,采用经典当量面积理论的计算方法无法评价棱垫结构的缓冲性能。实验当量面积 $A_1 = 2xL$ 由试样棱长和冲击过程中的形变量计算所得,是实验的动态形变面积。2种方法计算所得的当量面积随着边长、棱长变化有10%~59%不等的差异,对应静应力差异超出10倍。为解释这一实验现象,提出以棱长和形变量为因子的实验当量面积 A_1 的计算方法:

$$A_1 = 2xL \tag{1}$$

式中: A_1 为实验当量面积(mm^2); x 为试样形变量(mm); L 为试样棱长(mm)。

实际上, A_1 是一个动态变化的量,试样在进行棱跌落时,从棱边接触冲击底面到达到最大冲击形变的过程就是材料吸收能量的过程,每次冲击时的材料最大形变量结合试样棱长计算出实验当量面积 A_1 。实验当量面积 A_1 是对试样在每个不同重锤质量冲击下接受冲击响应的体现,这样的评价方式对于棱跌落来说更具有代表性和真实性。

3 设计与计算方法

在定棱长组和定边长组实验探索中,利用实验当量面积计算方法得到的定棱长组最大加速度-静应力曲线中的各曲线基本重合,同一重锤质量下相同棱长、变化边长的试样,其冲击作用下的形变量基本相同,表明棱长在当量面积的计算中起着主要的影响作用。由定边长组实验数据可知,试样冲击加速度和形变量的关系随着棱长的减小而增大。通过借助多元线性回归分析方法得到棱长、边长、重锤质量与形变量的三元线性回归方程:

$$z = -0.10891L - 0.11106\delta + 1.78214m + 51.51117$$

$$(R^2 = 0.81685; f = 33.70736; P = 8.24276 \times 10^{-8}) \quad (2)$$

式中: z 为形变量(mm); L 为试样棱长(mm); δ 为试样边长(mm); m 为重锤质量(kg)。

通过以上回归方程,可以简化评价过程中对棱部缓冲结构在外力作用下产生变形量的测量,直接建立试样尺寸、重锤质量与形变量的关系,从而转化得到受力投影面积,以方便对材料的评价。

4 结语

在棱跌落条件下,发泡缓冲材料经典当量面积的计算方法只局限于刚性容器包装的应用,无法满足缓冲包装设计中的技术与校核。以试验测试中缓冲垫在棱跌落情况下产生的实际变形为参考依据,在棱跌落条件下,材料可承受的最大加速度数值所对应的静应力数值是由动态变形量确定的实验当量面积决定。在棱线接触的跌落情况下,边长和棱长变化会产生不同的缓冲性能。棱长在棱部结构的形变量是影响材料性能的主要因素,边长的作用通过影响形变量来体现。增加瓦楞纸箱后边长效应有所增加。

参考文献:

- [1] 程琳,王伟. 常见缓冲包装材料的应用现状[J]. 上海包装, 2014(6): 53—54.
CHEN Lin, WANG Wei. Application Status of Common Cushioning Packaging Materials[J]. Shanghai Packaging, 2014(6): 53—54.
- [2] 勾波,周欣. 我国高密度聚乙烯的发展及研究现状[J]. 河南科技, 2013(11): 63—64.
GOU Bo, ZHOU Xin. Development and Research Status of High Density Polyethylene[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2011(11): 63—64.
- [3] 郭鹏,徐耀辉,张师军,等. 聚乙烯发泡材料的研究进展[J]. 石油化工, 2015, 44(2): 261—265.
GUO Peng, XU Yao-hui, ZHANG Shi-jun, et al. Progresses in Research of Polyethylene Foaming Materials[J]. Petrochemical Technology, 2015, 44(2): 261—265.
- [4] 重庆捷成塑胶有限责任公司国内市场部. 高发泡(EPE)包装材料应用及其设备制造技术现状分析[J]. 国外塑料, 2008, 26(3): 56—59.
Domestic Marketing Department of Chongqing Plastics Co., Ltd. Highly-expanded Polyethylene Application and Equipment Manufacturing Technology status[J]. World Plastics, 2008, 26(3): 56—59.
- [5] 刘继飞. 缓冲包装材料性能的分析方法与研究进展[J]. 包装工程, 2014, 35(7): 149—153.
LIU Ji-fei. Analysis Method and Research Progress in Cushioning Performance of Cushion Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(7): 149—153.
- [6] 张波涛. 应力-能量法在测定泡沫塑料缓冲曲线中的应用[J]. 包装工程, 2008, 29(1): 59—60.
ZHANG Bo-tao. Application of the Stress-Energy Method in Determining Cushion Curves of Foam Material[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(1): 59—60.
- [7] 刘乘,任亚东. 几种常用缓冲材料的性能研究[J]. 包装工程, 2010, 31(7): 117—119.
LIU Sheng, REN Ya-dong. Research on Properties of Several Cushion Materials[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(7): 117—119.
- [8] 方婷,康勇刚,杨帅. 环境温度对聚乙烯发泡材料动态缓冲性能的影响[J]. 包装工程, 2012, 33(21): 41—43.
FANG Ting, KANG Yong-gang, YANG Shuai. Dynamic Cushioning Property of EPE in Different Temperatures[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(21): 41—43.
- [9] 杨帅,康勇刚,齐菲. 低温对聚乙烯发泡材料动态缓冲性能的影响[J]. 包装工程, 2015, 36(7): 21—25.
YANG Shuai, KANG Yong-gang, QI Fei. Effect of Low Temperature upon Dynamic Cushioning Properties of EPE Foam Material[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(7): 21—25.
- [10] PAN Min-Chun, CHEN Po-Chun. Drop Simulation/experimental Verification and Shock Resistance Improvement of TFTLCD monitors[J]. Microelectronics Reliability, 2007, 47(12): 2249—2259.
- [11] 刘晶,刘乘. 动态冲击下EPE、EPS弹性变形的对比分析[J]. 陕西科技大学学报, 2010, 28(6): 76—78.
LIU Jing, LIU Cheng. Comparison Between EPE and EPS on Elastic Deformation under Dynamic Impact[J]. Journal of Shanxi University of Science & Technology, 2010, 28(6): 76—78.
- [12] 李俊. 发泡聚乙烯缓冲性能的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2010.
LI Jun. Cushioning Properties of EPE[D]. Hangzhou: Zhenjiang University, 2010.
- [13] 田芑,滑广军. 尺度效应对发泡聚乙烯静态缓冲性能的影响[J]. 包装学报, 2013, 5(4): 30—33.
TIAN Fan, HUA Guang-jun. Impact of Scale Effect on Cushioning Properties of Expanded Polyethylene[J]. Packaging Journal, 2013, 5(4): 30—33.
- [14] 刘继飞,韩雪山,陈志强. 外包装瓦楞纸箱对缓冲性能的影响研究[J]. 包装工程, 2015, 36(1): 111—115.
LIU Ji-fei, HAN Xue-shan, CHEN Zhi-qiang. Influence of Outer Box Corrugated Paperboard on Cushioning Properties[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(1): 111—115.
- [15] 冯勇. EPE缓冲材料及双向性能比较分析[J]. 中国包装工业, 2007(10): 47—48.
FENG Yong. Comparative Analysis of EPE Cushioning Material[J]. China Packaging Industry, 2007(10): 47—48.