文章编号：1000-5773(2012)05-0531-06

聚合物泡沫材料动态力学性能及其能量吸收研究*

姚小虎[1]，任会兰[2]，林　荣[3]，张晓晴[1]

(1.华南理工大学土木与交通学院工程力学系，广东广州　510640；
2.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京　100081；
3.暨南大学理工学院，广东广州　510640)

摘要：通过落锤实验，对发泡聚乙烯(EPE)、发泡聚丙烯(EPP)材料的动态力学性能进行了研究，提出了一种获得聚合物泡沫材料在恒定应变率下本构曲线的方法，建立了EPE的Low Density Foam本构模型。以此为基础，探索了在冰箱跌落过程中，聚合物泡沫包装材料的能量吸收以及对冰箱抗跌落冲击的保护能力。

关键词：聚合物泡沫；动态力学性能；本构模型；能量吸收
中图分类号：O347.1　　**文献标识码**：A

1　引　言

聚合物泡沫材料因具备优良的力学性能和隔音、隔热性能，而成为家用电器、精密仪器、通讯设备等产品首选的包装材料。近年来对聚合物泡沫材料的研究，加深了对其力学行为的理解。在理论和实验方面，2004年Subhash等[1]提出了聚合物泡沫行为的应变率效应和密度效应；2005年Viot等[2]提出发泡聚丙烯EPP泡沫的动力响应包括弹性阶段、应力平台段和泡沫致密化阶段，强调随着密度的增加，应力平台增高，应变率增加，应力阈值也会增加；2009年Lee等[3]通过研究3种不同密度EPP材料的动态力学性能，指出高、低密度EPP的应变率敏感性有很大不同。在数值模拟方面，Mills等[4]在2009年建立了闭孔聚合物泡沫的细观力学有限元模型；Alvarez等[5]在2009年分别建立了高、低密度聚合物泡沫的细观力学有限元模型。目前，已有多个大型通用有限元软件开发出了低密度泡沫材料模型，极大方便了聚合物泡沫的仿真计算。但是，由于聚合物泡沫材料在冲击载荷作用下很难保持恒定的应变率，如何获取恒定应变率下聚合物泡沫材料的应力-应变曲线，从而建立正确的率型本构模型，目前还未见报道。

本工作通过落锤实验，研究了发泡聚乙烯(EPE)和发泡聚丙烯(EPP)的动态力学性能，分析其力学行为的应变率相关性。在此基础上，建立EPE的Low Density Foam本构模型，并对EPE包装冰箱进行抗跌落分析。

2　聚合物泡沫材料的动态力学性能实验

落锤实验是一种简单、实用的获取低密度泡沫材料考虑中、低应变率的动态力学性能的实验方法。实验在Instron 9250落锤式冲击试验机上完成，采用固定重锤质量(锤重)、改变重锤下落高度的实验方法，以得到EPE、EPP在不同初始冲击速度下的应力-应变曲线。以EPE为例，表1为实验工况，图1给出了不同冲击速度下EPE材料的应力-应变曲线。

* **收稿日期**：2011-10-20；**修回日期**：2012-03-26
基金项目：国家重点基础研究发展计划(2010CB832706)；国家自然科学基金(11172045)
作者简介：姚小虎(1974—)，男，博士，副教授，博士生导师，主要从事冲击动力学、纳米力学研究. E-mail：yaoxh@scut.edu.cn
通讯作者：任会兰(1973—)，女，博士，副教授，博士生导师，主要从事冲击动力学研究. E-mail：huilanren@bit.edu.cn

表 1 EPE 的落锤实验工况

Table 1 The experimental conditions of EPE

Size of specimen /(mm×mm×mm)	Density of EPE /(kg/m^3)	Mass of drop-hammer /(kg)	The initial impact velocity /(m/s)
100×100×60	35	6.8	1,2,3,4

由图 1 可见,在弹性段,不同冲击速率对应的应力-应变曲线互相重合,说明 EPE 材料在弹性段的本构行为基本不受冲击速率的影响;而在应力平台段,当冲击速率提高时,平台应力也略有提高;当应变达到 0.5 以上时,EPE 材料的力学行为出现明显的强化特征,应力-应变曲线进入致密阶段。

在锤重为 6.8 kg、初始冲击速度为 3 m/s 的工况下,厚度为 40 mm 的 EPE 和 EPP 应力-应变曲线如图 2 所示。平台应力是衡量泡沫材料吸收能量能力的主要参数,由图 2 可见,EPP 材料的弹性极限约为 EPE 样本弹性极限的 2 倍,EPP 材料的平台应力大于 EPE 样本的平台应力,说明在平台应力满足包装要求的情况下,当应变相同时,EPP 吸收的能量大于 EPE。

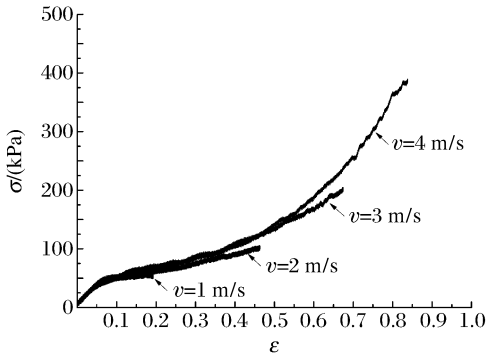


图 1 EPE 的应力-应变曲线

Fig. 1 The stress-strain curves of EPE

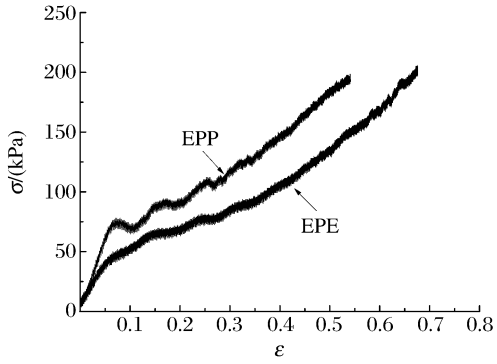


图 2 EPE、EPP 应力-应变曲线对比

Fig. 2 Comparison for stress-strain curves of EPE and EPP

3 聚合物泡沫材料本构模型

3.1 本构模型的建立

在仿真计算中,常用体单元模拟泡沫材料的宏观力学行为。Abaqus 材料库中的 Low Density Foam 模型,可用于实体单元、平面应变单元和一维实体(捆绑和加强筋)单元,是专门针对低密度、高应变率敏感性、高压缩率的泡沫材料而开发的,特别适用于聚合物泡沫材料抗冲击特性的仿真计算。因此,选用 Low Density Foam 作为 EPE 有限元计算的材料模型。

Low Density Foam 通过名义应变和名义应力来定义材料的本构行为。定义 Low Density Foam 时应注意:(1) 应力-应变曲线需要根据应变率按升序排序;(2) 不同应变率下的应力-应变曲线不能交叉,否则计算会因为材料丧失稳定性而无法进行;(3) 聚合物泡沫是硬化材料,必须满足 Drucker 稳定性条件,因此应力-应变曲线任一点的斜率都应大于零。

为了建立 EPE 本构模型,需要得到若干组对应于恒定应变率下的应力-应变曲线作为加载曲线。以表 1 所示实验工况为例,不同初始冲击速度对应的应变时程曲线如图 3 所示。

根据应变率计算公式 $\dot{\varepsilon}=\mathrm{d}\varepsilon/\mathrm{d}t$,得到的应变率时程曲线如图 4 所示。由图 4 可以看出,在试件与落锤接触的初始时刻,应变率与初始冲击速度成正比。随着加载的持续增加,材料进入应力平台阶段或强化阶段,同时落锤动能降低,试件的应变率不断减小,直至平稳地趋向于零。所以,在加载过程中,同一实验工况不同时刻样本的应变率是变化的,很难保持恒定应变率。

在 Low Density Foam 本构模型中,同一组应力-应变曲线只能对应一个恒定应变率。显然,一个实

验工况下的平均应变率并不能真实地反映材料的本构行为,特别是在应变率变化较大的高应变阶段,会产生很大的误差。

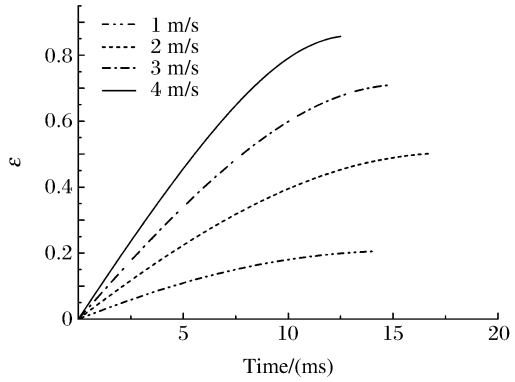


图 3 EPE 应变时程曲线

Fig. 3 The time-dependant strain curves of EPE

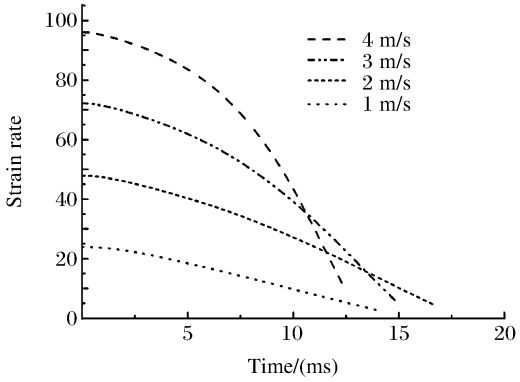


图 4 EPE 应变率时程曲线

Fig. 4 The time-dependant strain-rate curves of EPE

由图 4 可见,对于初始冲击速度为 1、2、3、4 m/s 等 4 种实验工况,均有一个时刻试件的应变率为 20。在图 3 中分别记录下各个工况在该时刻的应变,由图 1 中 EPE 试件的应力-应变曲线得到各工况在该时刻的应力-应变点。因这些点周围的一小段应力-应变曲线具有极其相近的应变率,故可得到 4 小段曲线。结合图 1 中 EPE 材料应力-应变曲线弹性段、应力平台段、强化段的一般特征,将各小段曲线用平滑曲线连接并略作修正,使其满足 Drucker 稳定性条件。于是,该曲线可作为 EPE 样本对应于应变率为 20 的应力-应变曲线。同理,选取其它合适的工况,可得到对应于其它恒定应变率的应力-应变曲线。该方法得到的应力-应变曲线具有一定的近似性,对应于同一应变率的工况越多,得到的应力-应变曲线越准确。根据仿真计算的应变率范围,选择 EPE 样本对应于应变率为 20、42、62 和 85 的应力-应变曲线作为加载曲线,以建立 EPE 本构模型,如图 5 所示。材料的粘滞行为和循环加载过程的能量吸收涉及卸载过程,可由与卸载应变率相对应的卸载曲线来定义。当没有指定卸载曲线时,将默认材料的卸载曲线与所输入的最低应变率加载曲线相重合。

3.2 本构模型的验证

为了验证 EPE 本构模型的适用性,建立三维有限元模型对落锤实验进行仿真计算。选取 EPE 试件厚度为 60 mm、锤重为 10.5 kg、初速度为 4 m/s 的实验工况,仿真计算结果与落锤实验结果的对比如图 6 所示。由图 6 可见,仿真计算结果与实验结果吻合度较高,说明 EPE 本构模型具有良好的适用性。

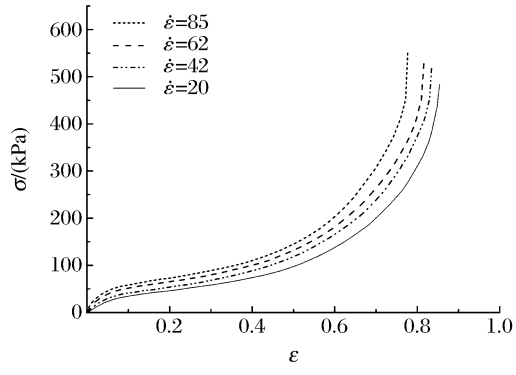


图 5 EPE 对应于不同恒定应变率的应力-应变曲线

Fig. 5 The stress-strain curves of EPE under various strain-rates

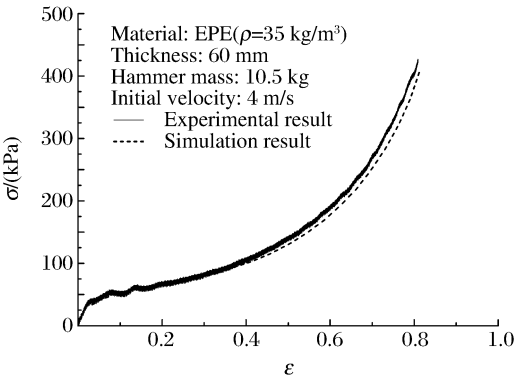


图 6 仿真计算与落锤实验结果对比

Fig. 6 Comparison of simulation and experimental results

4 聚合物泡沫材料包装冰箱抗跌落冲击分析

为了探索在冰箱跌落过程中聚合物泡沫材料的能量吸收及对冰箱的保护能力，分别对冰箱包装件及未包装冰箱的跌落进行仿真计算对比。建立某型冰箱包装件三维模型(见图 7)：包含冰箱、冰箱顶部及底部 EPE 缓冲泡沫、外层包装纸箱。冰箱外表面材料为钢铁，内表面材料为 HIPS(聚苯乙烯)。该型号冰箱包装件质量为 44.2 kg，根据 GB/T 16268－1996 及 GB/T 4857.5 的规定，冰箱跌落实验的跌落高度为 45 cm，本工作主要研究冰箱底部抗跌落冲击的情况。图 8 给出了包装冰箱及未包装冰箱在跌落过程中，整体应力达到最大时刻的 Mises 应力云图。

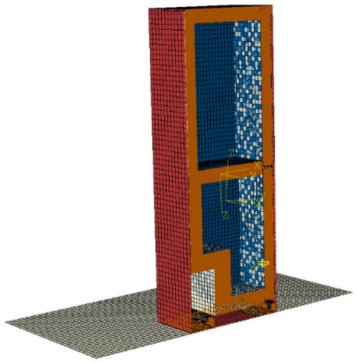
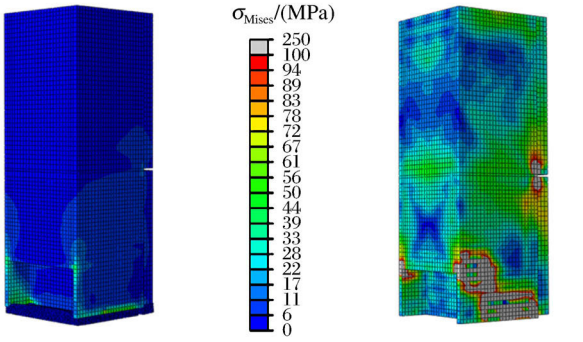


图 7 冰箱包装件模型剖面图

Fig. 7 Profile of the model of fridge packaging



(a) Packaged fridge(not shown carton) (b) Unpackaged fridge

图 8 冰箱的 Mises 应力云图

Fig. 8 The Mises-stress nephogram of fridge

由图 8 可见，当使用带有 EPE 泡沫底垫的缓冲包装时，跌落过程中只有冰箱底部局部出现 30～70 MPa的较大应力，其它部位应力值很小。当不使用缓冲包装时，跌落过程中在冰箱较大区域出现了 100～200 MPa 的较大应力。

压缩机罩与侧面板连接处在跌落过程中处于高应力区域，由图 9 可见，使用缓冲包装时，能明显降低此处的应力水平，并缩短高应力的持续时间。

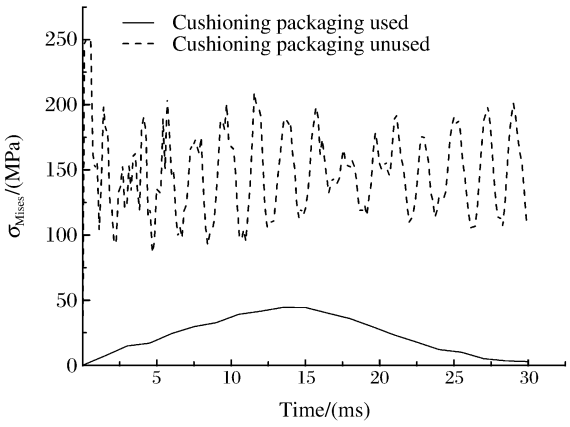


图 9 压缩机罩与侧面板连接处的 Mises 应力时程曲线

Fig. 9 The time-dependant Mises-stress curves at the joints

在冰箱包装件跌落过程的加载阶段，EPE 泡沫底垫 Mises 应力云图如图 10 所示。在冰箱包装件与地板接触后 15 ms 时，泡沫底垫达到最大荷载，说明泡沫底垫的缓冲作用很明显。使用缓冲包装时，跌落过程中冰箱包装件的动能大部分转化为 EPE 泡沫底垫的应变能，如图 11 所示。

当使用缓冲包装时，由于 EPE 泡沫底垫在加载阶段通过自身变形吸收了大量能量，在跌落过程中冰箱的应变能很小；当不使用缓冲包装时，冰箱与地板发生硬碰撞，很大一部分动能转化为应变能，并激起冰箱面板产生高频振动，使冰箱的应变能持续较长时间，如图 12 所示。说明缓冲包装明显降低了冰箱的变形，并避免了冰箱的高频振动。

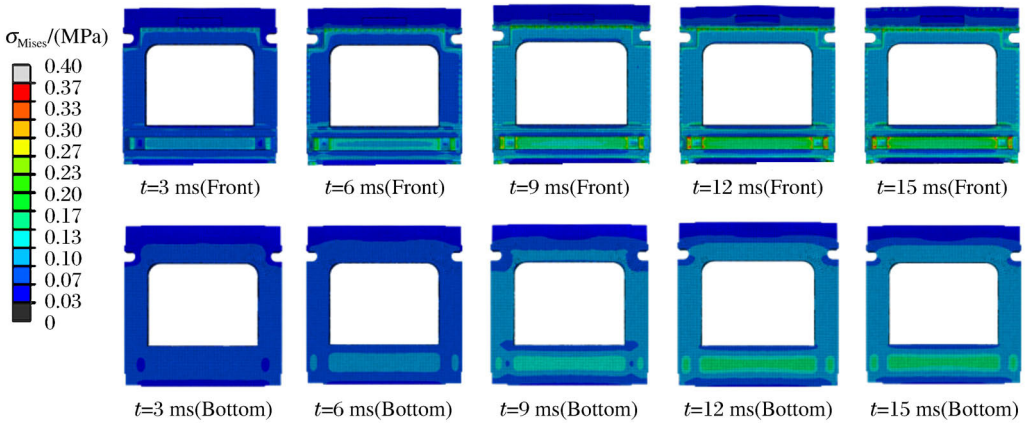


图 10　EPE 泡沫底垫 Mises 应力云图

Fig. 10　The Mises-stress nephogram of EPE foam pad

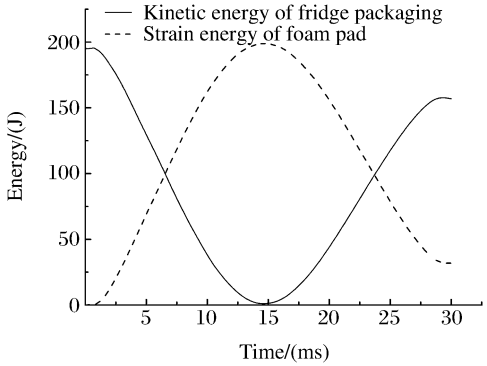


图 11　冰箱包装件跌落过程中的能量转换

Fig. 11　The energy transformation in the fall of fridge packaging

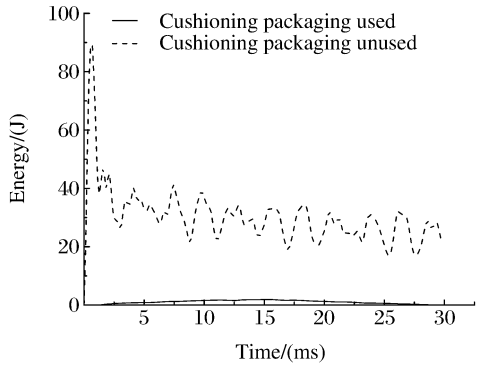


图 12　跌落过程冰箱应变能时程曲线

Fig. 12　The time-dependant strain-energy curves in the fall of fridge packaging

5　结　论

在通过落锤实验研究 EPE、EPP 动态力学性能的基础上,建立了 EPE 本构模型,并借以探索冰箱跌落过程中聚合物泡沫包装材料的能量吸收,得到以下结论。

(1) 在平台应力满足包装要求的情况下,EPP 比 EPE 具有更高的吸能性能。

(2) 落锤实验是研究聚合物泡沫材料动态力学性能的有效方法。通过不同实验工况获取恒定应变率时刻的应力、应变,可建立 EPE、EPP 等聚合物泡沫材料的本构模型。

(3) 在冰箱跌落过程中,EPE 缓冲包装能通过泡沫材料的变形来延长碰撞时间并吸收能量,从而降低冰箱的应力水平,减小冰箱的变形及避免高频振动,对冰箱有很好的保护作用,能明显提高冰箱的抗跌落能力。

References:

[1] Subhash G, Liu Q, Gao X L. Quasistatic and high strain rate uniaxial compressive response of polymeric structural foams [J]. Int J Impact Eng, 2006, 32(7): 1113-1126.

[2] Viot P, Beani F, Lataillade J -L. Polymeric foam behavior under dynamic compressive loading [J]. J Mater Sci,

2005,40(22):5829-5837.

[3] Lee Y S,Park N H,Yoon H S. Dynamic mechanical characteristics of expanded polypropylene foams [J]. J Cellular Plastics,2010,46(1):43-45.

[4] Mills N J,Stämpfli R,Marone F,et al. Finite element micromechanics model of impact compression of closed-cell polymer foams [J]. Int J Solids Struct,2009,46(3-4):677-697.

[5] Alvarez P,Mendizabal A,Petite M M,et al. Finite element modelling of compressive mechanical behaviour of high and low density polymeric foams [J]. Mater Sci Eng Technol,2009,40(3):126-132.

Study on Dynamic Mechanical Properties and Energy Absorption of Polymeric Foams

YAO Xiao-Hu[1],REN Hui-Lan[2],LIN Rong[3],ZHANG Xiao-Qing[1]

(1. *Department of Engineering Mechanics,School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology,Guangzhou* 510640,*China*;
2. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology,Beijing* 100081,*China*;
3. *College of Science & Engineering,Jinan University,Guangzhou* 510640,*China*)

Abstract: Foaming polyethylene(EPE) and foamed polypropylene (EPP) were tested in drop-weight experiments to study the dynamic mechanical behavior of polymeric foams. With the proposal of a method to obtain stress-strain curve under certain strain rate, constitutive model of EPE was established in Low Density Foam. Comparison was made between real experiment and simulation results and the accuracy was validated. Based on the constitutive model, energy absorption and protective performance of polymeric foam was evaluated in refrigerator package drop experiments.

Key words: polymeric foams; dynamic mechanical properties; constitutive model; energy absorption