# 发泡聚丙烯材料的动态力学行为研究

孙德强 <sup>a,b</sup>, 金强维 <sup>a,b</sup>, 李国志 <sup>a,b</sup>, 史英惠 <sup>a,b</sup>, 李耿 <sup>a,b</sup>, 李靖靖 <sup>a,b</sup>, 胡昕 <sup>a,b</sup>, 邢月卿 <sup>a,b</sup>

(陕西科技大学 a.陕西省造纸技术及特种纸品开发重点试验室 b.轻化工程国家级试验教学示范中心,西安 710021)

摘要:目的 研究发泡聚丙烯材料的厚度对其冲击性能的影响。方法 对4种不同厚度的发泡聚丙烯材料 进行动态压缩试验,分析其接触力、最大位移、最大应变以及吸收能,研究动态条件下发泡聚丙烯材料 的力学性能。结果 当冲击能一定时,增加发泡聚丙烯材料的厚度,其接触力会逐渐减小,接触时间会 逐渐增加;冲击能和厚度一定时,厚度与最大位移、吸收能成正比例相关,但对最大接触力和最大应变 无明显影响;任意厚度的发泡聚丙烯材料,其冲击能和厚度的增加会导致其最大接触力、最大位移、最 大应变、吸收能的增加。结论 在研究的冲击能量和厚度范围内,吸收能不受发泡聚丙烯材料厚度的影 响,由冲击能决定。

关键词:发泡聚丙烯材料;动态压缩;厚度;冲击能;吸收能 中图分类号:TB484.3 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2019)01-0063-06 DOI:10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.01.009

#### **Dynamic Mechanical Behaviour of Expanded Polypropylene Materials**

SUN De-qiang<sup>a,b</sup>, JIN Qiang-wei<sup>a,b</sup>, LI Guo-zhi<sup>a,b</sup>, SHI Ying-hui<sup>a,b</sup>, LI Geng<sup>a,b</sup>, LI Jing-jing<sup>a,b</sup>, HU Xin<sup>a,b</sup>, XING Yue-qing<sup>a,b</sup>

(a.Shaanxi Province Key Laboratory of Papermaking Technology and Specialty Paper b.National Demonstration Center for Experimental Light Chemistry Engineering Education, Shaanxi University Science & Technology, Xi'an 710021, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the influence of thickness of expanded polypropylene material on its impact performance. The dynamic compression tests were carried out on four kinds of expanded polypropylene materials with different thicknesses to analyze their contact force, maximum displacement, maximum strain and absorption energy. The mechanical properties of expanded polypropylene material under dynamic conditions were studied. When the impact energy was constant, the contact force would decrease gradually and the contact time would increase gradually as the thickness of the expanded polypropylene material increased. When the impact energy and thickness were constant, the thickness was directly proportional to the maximum displacement and absorption energy, but had no obvious influence on the maximum contact force and maximum strain. The increase of impact energy and thickness of expanded polypropylene material of any thickness would lead to the increase of its maximum contact force, maximum displacement, maximum strain and absorption energy. Within the range of impact energy and thickness studied, the absorption energy is not affected by the thickness of expanded polypropylene material, but is determined by impact energy.

收稿日期: 2018-05-22

基金项目:国家自然科学基金(51575327);陕西省教育厅重点实验室及基地项目(16JS014);陕西省教育厅 2014陕西本 科高校专业综合改革试点子项目(陕教高[2014]16号)

作者简介:孙德强(1976—),男,陕西科技大学教授、博导,主要研究方向为多孔材料力学性能测试与仿真、计算机辅助技术与软件开发。

KEY WORDS: expanded polypropylene materials; dynamic compression; thickness; impact energy; absorption energy

发泡聚丙烯材料具有良好的能量吸收性能、变形 回复性以及质轻、可降解等特性,广泛应用于汽车、 包装、建筑等领域,这些应用均利用了发泡聚丙烯材 料良好的能量吸收性能。发泡聚丙烯是一种高结晶型 聚合物,其外壁闭合,内部填充满气体<sup>[1—3]</sup>。在冲击 载荷的作用下,泡孔中的气体会受到压缩,从而产生 滞流现象。这种压缩、回弹和滞流现象会消耗冲击载 荷能量。此外,发泡聚丙烯还能以较小的附加速度, 逐步终止冲击载荷,呈现出优良的减振缓冲能力。由 此,研究发泡聚丙烯材料在冲击载荷条件下的缓冲性 能,对于资源的合理利用具有十分重要的经济意义。 然而,该材料的力学性能尚未得到充分的研究,对发 泡聚丙烯材料力学性能的研究仅限于静态压缩、剪 切、弯曲和蠕变,以及蜂窝结构的填充物等<sup>[4—6]</sup>。

Lee 等<sup>[7]</sup>采用分离式霍普金森压杆进行准静态压 缩试验和动态试验,探讨了材料的密度对冲击能量的 吸收和应力-应变曲线的影响,发现高密度发泡聚丙 烯会吸收更多的能量。Cronin 和 Ouellet<sup>[8]</sup>研究了低密 度聚乙烯、聚苯乙烯、聚丙烯的应变率和尺寸对力学 性能的影响,发现对于一个给定的量的应变,聚合物 泡沫材料的应力随变形率的增加而增加。密度变化在 样本水平上确定,较小的样品通常表现出较低的密 度。Bledzki 等<sup>[9]</sup>研究了注塑成型发泡聚丙烯材料的密 度和力学性能。宋吉威<sup>[10]</sup>通过 Ansys 有限元软件建立 模型,模拟了受力情况下泡孔周边应力-应变变化规 律和变形规律。沈训乐<sup>[11]</sup>通过对不同密度、跌落高度、 厚度的 PP 在不同静应力的试验条件下进行大量的动 态压缩试验,得到其动态压缩的最大加速度-静应力 曲线。霍银磊<sup>[12]</sup>通过发泡聚丙烯缓冲系统的振动试验 发现材料在任意简谐激振下振动传递率的可靠预测 值。Bouix 等<sup>[13]</sup>研究了工程应变率为 0.01~1500 s<sup>-1</sup>范 围内密度、应变速率对发泡聚丙烯吸能效率的影响。 以上文献在发泡聚丙烯厚度对其动态缓冲性能的影 响这一方面的研究很少,在冲击载荷下对发泡聚丙烯 缓冲性能和吸能效率的研究更少,基于该情况,这里 研究不同冲击载荷下发泡聚丙烯厚度对其缓冲性能、 吸能效率影响的规律。

# 1 实验

#### 1.1 材料与仪器

主要材料:发泡聚丙烯材料,密度为45 kg/m<sup>3</sup>, 大小为150 mm×150 mm的正方形,厚度分别取25, 35,40 和 60 mm,常州市华雨橡塑新材料有限公司。

主要仪器:DY-2 型冲击试验机,西安广博检测 设备有限公司。

## 1.2 方法

试验前参照 GB/T 8167—2008《包装用缓冲材料 动态压缩试验方法》<sup>[14]</sup>,将样品在温度为 24 ℃,相 对湿度为 79.5%的环境中放置 24 h 以上,然后随机抽 取符合规定尺寸的样品进行试验。在所有试验中,试 样均以下压板中心点为中心放置。

为了评价试样厚度对发泡聚丙烯动态力学性能的 影响,定义冲击能/厚度的概念<sup>[15]</sup>,为每个厚度选择几 个等级的冲击能以获得相同的比例,共测试 87 个样品。 试样编号、冲击能量、冲击能/厚度以及针对不同厚度 测试的试样数量见表 1。其中冲击器质量为 20 kg,试 验样品中 D45-25 表示发泡聚丙烯试样的密度为 45 kg/m<sup>3</sup>,厚度为 25 mm,同理可知 D45-35,D45-40, D45-60 的含义。文中分别取发泡聚丙烯材料厚度为 25, 35,40 和 60 mm,冲击能/厚度值为 980,1078,1225, 1479 J/m,通过动态压缩试验法研究发泡聚丙烯试样厚 度对接触力、最大位移、最大应变以及吸收能的影响。

表 1 动态压缩试验方案 Tab.1 Dynamic compression test scheme

	J.	•	
试验	理论	理论冲击能与	试验样
样品	冲击能/J	厚度比值/(J·m <sup>-1</sup> )	品数量
D45-25	29.4	980	7
	32.3	1078	7
	36.8	1225	7
	44.1	1479	7
D45-35	34.3	980	5
	37.7	1078	7
	42.9	1225	5
	51.5	1479	7
D45-40	39.2	980	4
	43.1	1078	3
	49	1225	4
	58.6	1479	4
D45-60	58.8	980	5
	64.7	1078	5
	73.5	1225	5
	88.2	1479	5

# 2 结果与讨论

动态压缩特性可以用来评价发泡聚丙烯材料在 冲击过程中对产品的保护能力及自身的吸能能力。动 态压缩试验确定了冲击器与试样之间的接触力,试样 的位移和应变,以及压缩过程中吸收的能量。理论冲 击能是用跌落起点的重力势能来匹配的,然而,当冲 击器接触试样时,由于在坠落期间发生摩擦,速度低 于预测速度,由此试验产生的冲击能与理论冲击能无 法完全重合,故在实际分析中,用实际冲击速度计算 冲击器接触样品时的冲击能。为了评估发泡聚丙烯材 料厚度对其动态压缩行为的影响,将所有变量的变化 作为冲击能/厚度的函数进行分析<sup>[15]</sup>。文中所有试验 均建立在弹性范围内。

#### 2.1 接触力

在动态压缩试验中,发泡聚丙烯材料吸收能 *E*(*t*) 表达为:

$$E(t) = \int_0^x F(t) \mathrm{d}x \tag{1}$$

$$F(t) = ma(t) \tag{2}$$

式中:*F*(*t*)为接触力;*x*为接触力位移;*a*为瞬时 加速度;*m*为冲击器质量。

在式(1)中,吸收能与接触力 *F*(*t*)和位移 *x* 有 关,故接触力是研究发泡聚丙烯材料吸收能的相关参 数<sup>[16]</sup>。对于每次试验,接触力作为接触时间的函数可 以计算出来。不同厚度的试样在冲击能为 45 J 时的接 触力-时间曲线见图 1。



图 1 不同厚度 EPP 冲击能为 45 J 的接触力-时间曲线 Fig.1 Contact force-contact time curve at an impact energy around 45 J for the different thicknesses

由图 1 可知,4 条曲线均有波动,但波动的幅度 不同。最小厚度为 25 mm 的试样的波动最大,可以看 出,随着试样厚度的增大,接触力逐渐减小,接触时 间增大。接触力随厚度的变化可能受材料阻尼的影响, 试样厚度越大意味着质量越大,会导致更大的阻尼, 这降低了冲击器的加速度并因此降低了接触力<sup>[16]</sup>,而 当速度的变化量一定时,加速度与冲击时间为反比关 系,故加速度降低会使接触时间增加。由图 1 可知, 厚度为 25 mm 的试样接触力最大,总接触时间最短, 厚度为 60 mm 的试样接触力最小,接触时间最长。

冲击能/厚度值为 980 J/m 时,接触力-时间曲线 见图 2,与图 1呈现的规律类似,所有曲线均表现出 一些波动,但波动的幅度不同。其中厚度为 25 mm 的试样曲线波动幅度较大,厚度为 60 mm 的试样曲 线波动幅度较小。试验过程中产生的阻尼导致接触力 随厚度变化,随着试样厚度的增大接触力逐渐减小, 但这种变化很微小,可以认为对于不同厚度的样品来 说,力的最大值是相似的,然而接触时间会随试样厚 度的增加而增加。



图 2 不同厚度 EPP 冲击能与厚度的比值为 980 J/m 时的 接触力-时间曲线

Fig.2 Contact force-contact time curve at a ratio of impact energy to thickness of 980 J/m for the different thicknesses

在试验过程中,最大接触力受到冲击加速度和冲击器质量的影响。试验得出的最大接触力-冲击能/厚 度曲线见图 3,最大接触力与冲击能/厚度呈正比关 系。虽然这个结果呈现出很大的分散性,但是对于相同的冲击能/厚度而言,最大接触力的值是相似的,这 与图 2 所呈现的规律一致,最大接触力随着冲击能/厚 度的增加而线性增加。图 3 中呈现出的分散性,一部 分由材料本身的特性导致不同试样之间的性质变化 造成,还有的受数据记录中的噪声影响,这些噪声的 存在阻碍力的最大值的估计,导致相同测试条件下力 值之间的差异增加<sup>[17]</sup>。发泡聚丙烯是一种优良的减震 器,因此在薄试样中力的波动最大。由图 3 可知,任 一厚度均出现较大分散,分散最大差值出现在厚度为 25 mm 的试样中。



图 3 不同厚度 EPP 冲击能与厚度的比值-最大接触力曲线 Fig.3 Curve of impact energy/thickness ratio vs. maximum contact force for the different thicknesses

## 2.2 位移

试验过程中,若忽略阻尼的影响,影响冲击位移 的因素与冲击过程中速度的变化量有关,而速度变化 量仅与冲击器跌落高度有关,因此,影响冲击位移的 因素为冲击器跌落高度<sup>[18]</sup>。当冲击能/厚度相同时, 厚度越大,冲击能越大,由能量守恒可得,冲击器跌 落高度越大,冲击速度越大,最大位移越大;反之亦 然。最大位移-冲击能/厚度曲线见图 4,对于不同厚 度的试样而言,当冲击能/厚度相同时,按照厚度的 递增,最大位移依次增大。对于 4 种厚度的试样而言, 冲击能/厚度值增加时,最大位移增加,试验结果与 理论分析一致。由结果可知拟合曲线具有不同的测定 系数  $R^2$ ,试样厚度为 25 mm 时,其测定系数为 0.755, 试样厚度为 40 mm 时,其测定系数为 0.975。





### 2.3 应变

应变计算公式为位移和试样厚度的比值,应变只 与位移和试样厚度有关。应变随冲击能/厚度的变化 见图 5,由图 5 可知,对于任意厚度试样来说,应变



图 5 不同厚度 EPP 冲击能与厚度的比值-最大应变曲线 Fig.5 Curve of impact energy/thickness ratio vs. maximum strain for the different thicknesses

随冲击能/厚度的增加而增加,但该变量分散在较大 区间,这种现象的出现由发泡聚丙烯材料细胞分布不 规则造成。

## 2.4 吸收能

在动态压缩试验中,冲击器冲击试样时的理想状态是将冲击能全部转化为试样的吸收能,根据能量守 恒有:

$$\frac{1}{2}mv^2 = E \tag{3}$$

式中:v 为冲击初速度; *E* 为发泡聚丙烯样品吸 收能。

由式(3)可以看出,冲击过程中发泡聚丙烯材 料总吸收能的大小仅和冲击能有关。将式(3)变形 为:

$$\frac{1}{2d}mv^2 = \frac{E}{d} \tag{4}$$

式中:d为试样厚度。

当冲击能/厚度相同时,试样的吸收能只与试样 厚度有关,厚度越大,吸收能越大。4种厚度的试样 的吸收能与冲击能/厚度之间的关系见图 6,能量吸 收性能与试样厚度有关。当冲击能/厚度相同时,厚 度为 25 mm 的试样吸收能最小,厚度为 60 mm 的试 样吸收能最大。当厚度一定时,冲击能/厚度增大, 吸收能也随之增大,故任意厚度的试样,吸收能随 冲击能/厚度的增大而增大。同时可以明显看出,图 6 中的数据与直线有良好的相关性, *R*<sup>2</sup> 在 0.978 和 0.999 之间,且随着试样厚度的增大,不同拟合线的 斜率变化不同。由此,在文中所研究的冲击能量范 围内,可以假定任意厚度的吸收能与冲击能/厚度呈 正比例变化。



图 6 不同厚度 EPP 冲击能与厚度的比值-吸收能曲线 Fig.6 Curve of impact energy/thickness ratio vs. absorption energy for the different thicknesses

由式(3)可知,冲击过程中发泡聚丙烯材料总 吸收能的大小仅和冲击能有关,与厚度无关,吸收能-冲击能曲线见图 7。由图 7 可知,任意厚度试样的吸 收能与冲击能均有良好的相关性, R<sup>2</sup>为 0.992, 因此 在研究的冲击能和厚度范围内,样品厚度对吸收能没 有显著影响。



图 7 不同厚度 EPP 吸收能-冲击能曲线 Fig.7 Absorption energy-impact energy curve for the different thicknesses

# 3 结语

研究了动态压缩下不同厚度的发泡聚丙烯材料 的动态行为,评估了厚度对发泡聚丙烯的能量吸收性 能的影响,并通过试验得到以下结论。

 1)因为发泡聚丙烯材料每个试样间的特性变化, 最大接触力及最大应变表现出很大的分散性,但这些 变量均随冲击能/厚度的增大而递增。

2) 最大位移随着冲击能/厚度的增大而递增。

3)试样厚度的增加降低了同一冲击能的接触力, 由于结果的分散,没有观察到应变的类似行为。

4)每个试样厚度的研究显示,吸收能随冲击能/厚 度的增大而增大。

5)在所分析的能量范围内,发泡聚丙烯材料的 能量吸收性能与样品的厚度无关。

#### 参考文献:

- 贾秀峰, 马懿, 孙颜文, 等. 国内外聚丙烯发泡材料 的发展概况[J]. 化工新型材料, 2001(8): 1—4.
   JIA Xiu-feng, MA Yi, SUN Yan-wen, et al. Development Situation of Polypropylene Foaming Material at Home and Abroad[J]. New Chemical Materials, 2001(8): 1—4.
- [2] 张泉. 发泡聚丙烯生产技术与市场分析[J]. 橡塑技术与装备, 2016, 42(4): 20—23.
   ZHANG Quan. Production Technology and Market Analysis of Foamed Polypropylene[J]. Plastics Technology and Equipment, 2016, 42(4): 20—23.
- [3] 靳新慧. 发泡聚丙烯的制备及其表征[J]. 化工管理, 2018(11): 66—67.

JIN Xin-hui. Preparation and Characterization of Foamed Polypropylene[J]. Chemical Enterprise Management, 2018(11): 66–67.

- [4] 郑梯和, 刘爱学, 张志军. 聚丙烯共混发泡材料研究 进展[J]. 塑料科技, 2009, 37(10): 84—87.
  ZHENG Ti-he, LIU Ai-xue, ZHANG Zhi-jun. Research Progress on PP Blend Foaming Material[J]. Plastics Science and Technology, 2009, 37(10): 84—87.
- [5] LIU Q, FU J, MA J, et al. Axial and Lateral Crushing Responses of Aluminum Honeycombs Filled with EPP Foam[J]. Composites Part B Engineering, 2017, 130: 236—247.
- [6] MAHMOUDABADI M Z, SADIGHI M. A Study on the Static and Dynamic Loading of the Foam Filled Metal Hexagonal Honeycomb-Theoretical and Experimental[J]. Materials Science & Engineering A, 2011, 530(12): 333–343.
- [7] LEE Y S, PARK N H, YOON H S. Dynamic Mechanical Characteristics of Expanded Polypropylene Foams
   [J]. Journal of Cellular Plastics, 2010, 46(1): 43—55.
- [8] CRONIN D S, OUELLET S. Low Density Polyethylene, Expanded Polystyrene and Expanded Polypropylene: Strain Rate and Size Effects on Mechanical Properties[J]. Polymer Testing, 2016, 53: 40—50.
- [9] BLEDZKI A K, FARUK O. Injection Moulded Microcellular Wood Fiber-polypropylene Composites[J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 2006, 37(9): 1358–1367.
- [10] 宋吉威. 微发泡聚丙烯材料力学性能研究及其模拟
   [D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2015.
   SONG Ji-wei. Mechanical Performance Research and Simulation of Micro-foaming Polymer[D]. Guiyang: Guizhou Education University, 2015.
- [11] 沈训乐.发泡缓冲材料本构模型研究及其 CAD 应用
  [D].西安:陕西科技大学,2012.
  SHEN Xun-le. Research and Its CAD Applications of Constitutive Model of Cushioning Packaging Materials[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2012.
- [12] 霍银磊. 低密度泡沫塑料的结构及其力学行为研究
  [D]. 无锡: 江南大学, 2008.
  HUO Yin-lei. The Study of Structure and Mechanics Behavior of Low Density Foamed Plastics[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [13] BOUIX R, VIOT P, LATAILLADE J L. Polypropylene Foam Behaviour under Dynamic Loadings: Strain Rate, Density and Microstructure Effects[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(2): 329—342.
- [14] GT/B 8167—2008, 包装用缓冲材料动态压缩试验方

法[S].

GB/T 8167—2008, Testing Method of Dynamic Compression for Packaging Cushioning Materials[S].

- [15] SANCHEZ-SAEZ S, GARCIA-CASTILLO S K, BARBERO E, et al. Dynamic Crushing Behaviour of Agglomerated Cork[J]. Materials & Design, 2015, 65: 743—748.
- [16] LANDRO L, SALA G, OLIVIERI D. Deformation Mechanisms and Energy Absorption of Polystyrene Foams for Protective Helmets[J]. Polymer Testing,

2002, 21(2): 17-28.

- [17] VIOT P, BEANI F, LATAILLADE J L. Polymeric Foam Behavior under Dynamic Compressive Loading[J]. Journal of Materials Science, 2005, 40: 29—37.
- [18] 张静静,陈满儒,孙德强.蜂窝纸板异面动态冲击性 能的实验分析[J]. 包装工程, 2017, 38(23): 106—110. ZHANG Jing-jing, CHEN Man-ru, SUN De-qiang. Experimental Analysis of Out-of-plane Dynamic Impact Properties of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(23): 106—110.