

密度对聚丙烯泡沫材料动态冲击性能的影响

金强维^{a,b}, 孙德强^{a,b}, 李国志^{a,b}, 邢月卿^{a,b}

(陕西科技大学 a.陕西省造纸技术及特种纸品开发重点实验室

b.轻化工程国家级实验教学示范中心, 西安 710021)

摘要:目的 以聚丙烯材料为研究对象, 研究密度对其动态冲击性能的影响。方法 对 4 种不同密度的聚丙烯材料进行动态压缩试验, 分析接触力、位移和应变以及吸收能、比吸能的变化, 从而研究动态条件下不同密度的聚丙烯材料的动态冲击性能。结果 当密度一定时, 最大接触力、最大位移、最大应变、比吸能随冲击能的增大而增大。当冲击能一定时, 最大接触力随密度的增大而增大, 最大位移、最大应变、比吸能随密度的增大而减小。结论 考虑到轻量化以及成本因素, 在安全范围内, 选择缓冲材料时可以选择密度较小的聚丙烯材料。

关键词:聚丙烯材料; 动态压缩; 密度; 冲击能; 吸收能

中图分类号: TB484 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2018)23-0088-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.23.015

Influence of Density upon Dynamic Crushing Behaviour of Polypropylene Materials

JIN Qiang-wei^{a,b}, SUN De-qiang^{a,b}, LI Guo-zhi^{a,b}, XING Yue-qing^{a,b}

(a. Shaanxi Province Key Laboratory of Papermaking Technology and Specialty Paper

b. National Demonstration Center for Experimental Light Chemistry Engineering Education,

Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to study the influence of density of polypropylene material on its impact performance, with the polypropylene material as the study object. The dynamic crushing experiment was conducted on the polypropylene materials of four different densities to analyze the contact force, displacement and strain, as well as the change of absorbed energy and specific energy absorption, thus studying the dynamic crushing behavior of polypropylene materials of different densities under dynamic conditions. With the increasing impact energy, the maximum contact force, maximum displacement, maximum strain and specific energy absorption increased gradually for the given density. When the impact energy was fixed, the maximum contact force increased with the increase of density, while the maximum displacement, maximum strain and specific energy absorption decreased with the increasing density. For the weight reduction and cost saving, it is possible to use the polypropylene material with low densities when selecting the cushioning materials within a safe range.

KEY WORDS: polypropylene materials; dynamic crushing; density; impact energy; absorbed energy

聚丙烯作为一种经济、环保且缓冲性能良好的绿色包装材料, 广泛应用于包装、建筑等各个领域^[1-3]。聚丙烯泡沫材料的颗粒外壁是闭合的, 内部充满了

气体, 当受到压缩时, 颗粒微孔也受到挤压, 与微孔体积变化成比例的回复压力就会开始消耗冲击载荷能量, 保护产品不受损害, 从而起到一定的缓冲

收稿日期: 2018-6-30

基金项目: 国家自然科学基金(51575327); 陕西省教育厅重点试验室及基地项目(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: 金强维(1991—), 女, 陕西科技大学硕士生, 主攻二维多孔材料动态缓冲性能的评价。

通信作者: 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。

作用^[4-6]。不同密度聚丙烯泡沫材料的颗粒微孔不同,缓冲能力也有所不同,因此,如何选取合适的密度,使其既能保护产品,又能降低成本、节约资源,具有重要的研究意义和经济价值。

目前对发泡材料吸能缓冲方面的研究,逐渐从单一材料发展到夹芯结构、从基本力学性能发展到实际应用的缓冲性能。周文管和王喜顺^[7]研究了泡沫塑料的主要力学性能及其力学模型。Cronin 和 Ouellet^[8]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。Bledzki 等^[9]注塑成型发泡聚丙烯材料,研究了聚丙烯的密度和力学性能。卢子兴等^[10]研究了不同密度下聚氨酯复合泡沫塑料的动态压缩力学性能。郑华明等^[11]对聚乙烯发泡塑料冲击能量的吸收及振动传递率进行了分析。Lee 等^[12]研究了聚丙烯泡沫材料密度对冲击能量的吸收和应力-应变曲线的影响。乌秀春等^[13]研究了轿车保险杠泡沫密度对行人腿部的保护程度。Liu 等^[14]采用准静态轴向压缩试验和有限元仿真相结合的方法,研究了填充聚丙烯泡沫对铝蜂窝结构压缩性能的影响。以上研究的重点都是材料自身的力学性能,并没有具体研究聚丙烯材料密度对其动态冲击性能的影响。为了研究密度对聚丙烯材料动态冲击性能的影响,文中采用动态压缩试验分析聚丙烯材料密度对其接触力、最大位移、最大应变及吸收能、比吸能的影响。

1 试验

1.1 材料与仪器

试验材料为聚丙烯材料,样品尺寸为 100 mm×100 mm,厚度为 35 mm,密度分别取 20, 40, 45 和 60 kg/m³,常州市华雨橡塑新材料有限公司。

试验设备为 DY-2 型冲击试验机,西安广博检测设备有限公司调试检修。

1.2 方法

试验前参照 GB/T 8167—2008^[15],将样品在温度为 28 ℃、相对湿度为 75.5%的环境中放置 24 h 以上,随后随机抽取符合规定的样品进行试验。所有试验中,试样均以下支撑板中心点为中心放置。

为了评价试样密度对聚丙烯动态力学性能的影响,共测试了 65 个样品。试样编号、冲击能量、以及试验样品数量见表 1。其中,冲击器质量为 23 kg,试验样品中 D20 表示聚丙烯试样的密度为 20 kg/m³,D40, D45, D60 以此类推。通过动态压缩试验研究密度对聚丙烯材料接触力、最大位移、最大应变以及吸收能的影响。

2 结果与讨论

动态冲击特性可以用来评价聚丙烯材料在冲击

表 1 动态压缩试验方案
Tab.1 Test scheme of dynamic crushing

试验样品	理论冲击能/J	试验样品数量
D20	61.9	5
	75.7	5
	84.5	5
	96.3	5
D40	58.4	5
	78.9	4
	103.5	3
	128.1	5
D45	60.2	4
	82.9	3
	110.1	3
	134.1	3
D60	60.2	3
	78.5	3
	106.4	4
	128.1	5

过程中对产品的保护能力及自身的吸能能力。试验过程中,通过改变冲击器跌落的高度来改变冲击能,从而确定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。

2.1 接触力

接触力是研究聚丙烯材料吸收能量的相关参数,也是关于接触时间的函数,每次试验的接触力可以计算出来。密度为 40 kg/m³的试样在不同冲击能下的接触力-时间曲线见图 1。为了更贴合实际运输情况,试验中关闭气泵,冲击器初次下落后又经多次回弹,发生多次冲击,曲线也出现多次波动,但仍以初次冲击最明显,当冲击能消耗完毕时,冲击器停止,曲线下降为零。由图 1 可知,在初次冲击试验范围内,当冲击能为 128 J 时,对应接触力最大为 5303 N;当冲击能为 58.4 J 时,对应接触力最小为 4053.05 N。

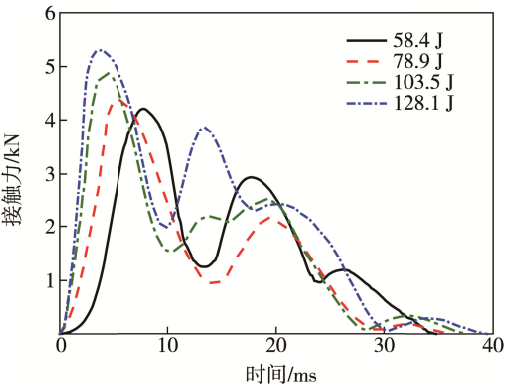


图 1 密度为 40 kg/m³的试样接触力-时间曲线
Fig.1 Contact force-time curve of samples at the density of 40 kg/m³

故初次冲击时,随着冲击能的增大,接触力增大,最大接触力出现的时间最短。在总的冲击范围内,随着冲击能的增大,总的接触时间越长。

冲击能为 132.3 J 时,不同密度试样的接触力-时间曲线见图 2。所有曲线均表现出多次冲击,但波动的幅度不同。当密度为 60 kg/m^3 时,最大接触力最大,为 6467.7 N,最大接触力出现的时间最久,且多次冲击总持续时间最长;当密度为 20 kg/m^3 时,最大接触力最小,为 5053.1 N,最大接触力出现的时间最短,且多次冲击总持续时间最短。图 2 显示,不同密度的曲线波动幅度不同,部分原因是材料本身发泡不均匀。

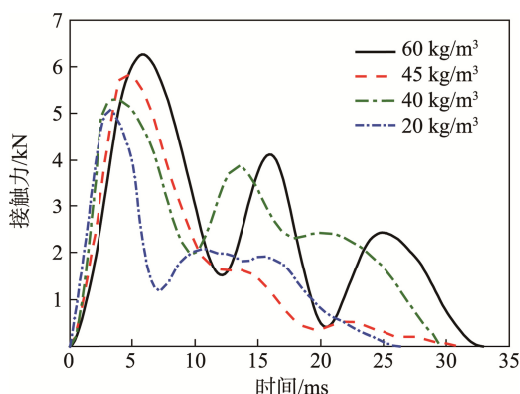


图 2 冲击能为 132.3 J 的接触力-时间曲线

Fig.2 Contact force-time curve at an impact energy of 132.3 J

在试验过程中,冲击加速度和冲击器质量会影响最大接触力。试验得出的最大接触力-冲击能曲线见图 3。密度一定时,最大接触力与冲击能呈正比关系,这与图 1 所呈现的规律一致。最大接触力随着冲击能增加而增加,且当冲击能相同时,密度越大,最大接触力越大。

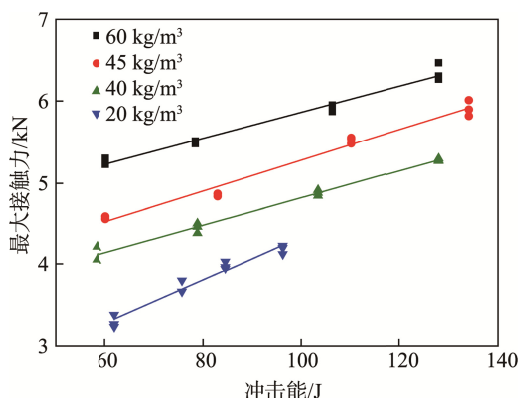


图 3 最大接触力-冲击能曲线

Fig.3 Maximum contact force-impact energy curve

2.2 位移和应变

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

的因素是冲击器跌落高度^[16]。最大位移-冲击能曲线见图 4,对于任意密度的试样而言,当冲击能增加时,最大位移增加。对于同一冲击能而言,密度越大,位移越小,反之亦然。由于结果存在差量,因此拟合曲线具有不同的测定系数 R^2 。试样密度为 20 kg/m^3 时,其测定系数为 0.955;在试样密度为 60 kg/m^3 时,其测定系数为 0.976。

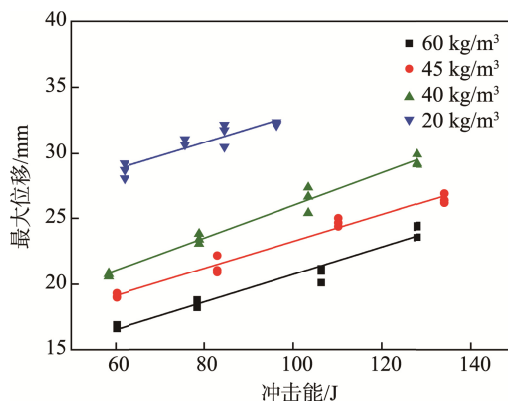


图 4 最大位移-冲击能曲线

Fig.4 Maximum displacement-impact energy curve

应变为变形量和厚度的比值,由于试样厚度均为 35 mm,故应变只与试样变形量有关。最大应变随冲击能的变化曲线见图 5。可知对于任意密度的试样来说,冲击能越大,试样最大应变越大,两者呈正比关系。对于相同冲击能而言,密度越大,应变越小,两者呈反比关系。

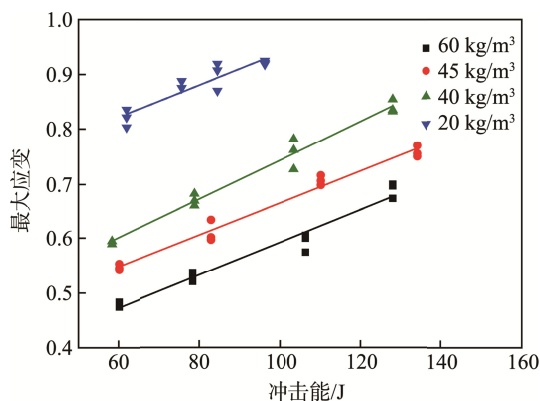


图 5 最大应变-冲击能曲线

Fig.5 Maximum strain-impact energy curve

2.3 吸收能

缓冲材料主要是通过冲击过程中材料的塑性变形与失效而耗散大量的能量来吸收冲击能,从而减小冲击力造成的损害,因此要求缓冲材料尽可能多地吸收冲击能。评估吸能的指标主要是总吸能与比吸能。

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。根据能量守恒定律,当冲击能相同时,理想状态下任意试样的吸收能是相同的,且等于冲击能,但实际由于摩擦损耗,

吸收能小于冲击能。文中研究的 4 种密度试样的吸收能与冲击能之间的关系见图 6。当密度一定时, 冲击能增加, 吸收能也随之增加, 故任意密度的试样, 吸收能随冲击能增加而增加, 呈正比关系。当冲击能为定值时, 任意密度的试样吸收能基本相同。同时可以明显看出, 图 6 中的数据与直线有良好的相关性, 测定 R^2 为 0.983。

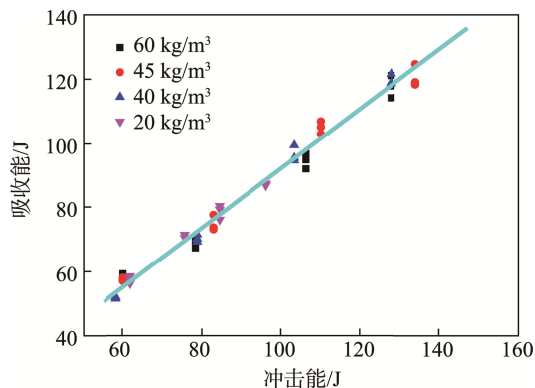


图 6 吸收能-冲击能曲线

Fig.6 Absorbed energy-impact energy curve

比吸能 E_{SEA} 定义为单位质量结构所吸收的能量, 是衡量材料与结构能量吸收的一个重要参数, 比吸能越大材料的吸能效果越好。比吸能为:

$$E_{SEA} = \frac{E}{m} \quad (1)$$

式中: E 为整个变形过程中吸收的总能量; m 为样品的质量。

4 种密度的比吸能-冲击能曲线见图 7, 可知对于任意密度的试样来说, 冲击能越大, 比吸能越大。对于相同冲击能而言, 试样密度越大, 比吸能越小。由于轻量化设计越来越受到包装行业的重视和关注, 这就要求吸能材料具有较大的比吸能。由图 6 知, 在研究的冲击能和密度范围内, 样品密度对吸收能没有显著影响。但是, 对于聚丙烯材料而言, 密度越大, 质量越大, 成本越高。考虑到轻量化以及成本因素, 在安全范围内, 选择缓冲材料时, 可以选择密度较小的聚丙烯材料。

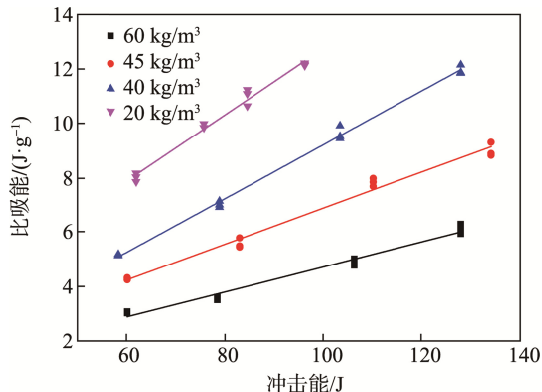


图 7 比吸能-冲击能曲线

Fig.7 Specific energy absorption-impact energy curve

3 结语

文中研究了动态压缩下不同密度聚丙烯材料的动态行为, 评估了密度对聚丙烯材料吸能效果的影响, 并通过试验得出以下结论。对于任意密度的聚丙烯材料而言, 随着冲击能的递增, 最大接触力随之增大, 且最大接触力产生的时间越短, 总接触时间越长; 当冲击能一定时, 随着密度的增加, 最大接触力随之增大, 且最大接触力产生的时间越久, 总接触时间越长。当密度一定时, 最大位移、最大应变、比吸能随冲击能的增大而增大; 当冲击能一定时, 最大位移、最大应变、比吸能随密度的增大而减小。对于任意密度的聚丙烯材料, 其吸收能基本相同, 在所研究的冲击能及密度范围内, 聚丙烯材料吸能的能力与材料的密度基本无关, 主要取决于冲击能量的大小。在实际应用中, 考虑到轻量化以及成本因素, 在安全范围内, 选择缓冲材料时可以选择密度较小的聚丙烯材料。

参考文献:

- [1] 李文光, 吴炳田, 王亚, 等. 中国 EPP 材料产业化发展前景展望[J]. 高分子通报, 2010(10): 106—110.
LI Wen-guang, WU Bing-tian, WANG Ya, et al. Prospective in Industrial Development of EPP Materials in China[J]. Chinese Polymer Bulletin, 2010(10): 106—110.
- [2] 韩德奇, 袁旦, 楚军, 等. 世界聚丙烯供需现状和我国聚丙烯应用前景[J]. 现代化工, 2000, 20(12): 48—51.
HAN De-qí, YUAN Dan, CHU Jun, et al. Status Quo of Worldwide Suply/Demand of Polypropylene and Its Developing Strategy in China[J]. Modern Chemical Industry, 2000, 20(12): 48—51.
- [3] 吴三清. 汽车用改性聚丙烯(PP)材料的开发与应用[J]. 汽车工艺与材料, 2004(2): 26—28.
WU San-qing. Development and Application of Automobile Used and Modified Polypropylene[J]. Automobile Technology & Material, 2004(2): 26—28.
- [4] 卢子兴, 严寒冰, 王建华. 聚氨酯复合泡沫塑料的准静态压缩力学性能[J]. 中国塑料, 2004(2): 33—36.
LU Zi-xing, YAN Han-bing, WANG Jian-hua. Mechanical Properties of Polyurethane Syntactic Foams Under Quasi-static Compression[J]. China Plastics, 2004(2): 33—36.
- [5] 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.
- [6] 卢子兴, 王嵩, 李忠明, 等. 空心微珠填充聚氨酯复合泡沫塑料的宏观力学性能[J]. 航空学报, 2006(5): 799—804.
LU Zi-xing, WANG Song, LI Zhong-ming, et al. Mac-

- roscopic and Microscopic Mechanical Properties of Polyurethane Syntactic Foams Filled with Hollow Microspheres[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2006(5): 799—804.
- [7] 周文管, 王喜顺. 泡沫塑料主要力学性能及其力学模型[J]. *塑料科技*, 2003(6): 17—19.
ZHOU Wen-guan, WANG Xi-shun. Main Mechanical Properties of Foamed Plastics and Its Mechanical Model[J]. *Plastics Science & Technology*, 2003(6): 17—19.
- [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(53): 40—50.
- [9] BLEDZKI A K, FARUK O. Injection Moulded Microcellular Wood Fibre-polypropylene Composites[J]. *Composites Part A: Applied Science & Manufacturing*, 2006, 37(9): 1358—1367.
- [10] 卢子兴, 严寒冰, 王建华. 聚氨酯复合泡沫塑料的动态压缩力学性能[J]. *中国塑料*, 2004(3): 69—72.
LU Zi-xing, YAN Han-bing, WANG Jian-hua. Mechanical Properties of Polyurethane Syntactic Foams Under Dynamic Compression[J]. *China Plastics*, 2004(3): 69—72.
- [11] 郑华明, 吴江渝, 曹国荣. 聚乙烯发泡塑料冲击能量的吸收及振动传递率的分析[J]. *包装工程*, 2008, 29(3): 30—32.
- ZHENG Hua-ming, WU Jiang-yu, CAO Guo-rong. Research on the Absorbing of Shock Energy and Vibration Transmissibility of Expanded Polyethylene[J]. *Packaging Engineering*, 2008, 29(3): 30—32.
- [12] 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.
- [13] 乌秀春, 周盼, 鲁宏升. 轿车保险杠泡沫密度对行人腿部保护研究[J]. *机械设计与制造*, 2016(3): 117—120.
WU Xiu-chun, ZHOU Pan, LU Hong-sheng. The Research on Vehicle Bumper Foam Density of Pedestrians Legs[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2016(3): 117—120.
- [14] 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.
- [15] GT/B 8167—2008, 包装用缓冲材料动态压缩试验方法[S].
GT/B 8167—2008, Testing Method of Dynamic Compression for Packaging Cushioning Materials[S].
- [16] 张静静, 陈满儒, 孙德强. 蜂窝纸板异面动态冲击性能的试验分析[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.