

内含气体对蜂窝纸板异面动态冲击性能的影响

张静静^{1,2}, 陈满儒^{1,2}, 孙德强^{1,2}

(1.陕西科技大学, 西安 710021; 2.轻化工程国家级实验教学示范中心, 西安 710021)

摘要: **目的** 以六边形蜂窝纸板为对象, 研究内含气体对其异面冲击性能的影响。**方法** 通过动态冲击实验分析内含气体对接触力、最大接触力、最大位移、最大应变和吸收能的影响, 得出不同孔隙率时, 蜂窝纸板的接触力-时间曲线, 最大接触力、最大位移、最大应变、吸收能与冲击能曲线和吸收能-孔隙率曲线。**结果** 在给定冲击能的情况下, 最大接触力与吸收能随着孔隙率的增大而减小, 最大位移及最大应变随着孔隙率的增大而增大。在孔隙率一定时, 最大接触力、最大位移、最大应变和吸收能随冲击能线性增大。此外, 冲击能越大, 接触力达到峰值的时间越短, 接触持续时间越长。**结论** 在动态冲击实验中, 内含气体使蜂窝纸板吸收冲击能的能力明显增强, 并且当冲击能一定时, 孔隙率越大, 蜂窝纸板越容易被压变形, 吸收能越少。

关键词: 蜂窝纸板; 内含气体; 动态冲击; 冲击能; 吸收能; 冲击性能

中图分类号: TB484.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)01-0030-05

Influence of Entrapped Air upon Out-of-plane Dynamic Impact Properties of Honeycomb Paperboard

ZHANG Jing-jing^{1,2}, CHEN Man-ru^{1,2}, SUN De-qiang^{1,2}

(1.Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China; 2.National Experimental Demonstration Center for Light Chemistry Engineering Education, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to study the influence of entrapped air on its out-of-plane impact properties with the hexagonal honeycomb paperboard as the object. The influences of entrapped air on contact force, maximum contact force, maximum displacement, maximum strain and absorption energy were analyzed through the dynamic impact experiment. Meanwhile, the contact force vs. time curve, the maximum contact force, the maximum displacement, the maximum strain, the absorption energy vs. impact energy curves, respectively, and the absorption energy vs. the percentage of holes curve for honeycomb paperboard were obtained for the different percentages of holes. For the specified impact energy, the maximum contact force and absorption energy decreased and the maximum displacement and maximum strain increased as the percentage of holes increased; for the given percentage of holes, the maximum contact force, maximum displacement and maximum strain as well as the maximum absorption energy linearly increased just as the impact energy increased. In addition, the higher the impact energy, the shorter time the contact force took to reach its peak value and the longer the contact duration. In the dynamic impact experiment, the ability of absorbing impact energy of honeycomb paperboard is obviously enhanced by the entrapped air, and for the given impact energy of honeycomb paperboard, it is concluded that the honeycomb paperboard will readily tend to be compressed and deformed and the absorption energy will be less as the percentage of holes increases.

KEY WORDS: honeycomb paperboard; entrapped air; dynamic impact; impact energy; absorption energy; impact properties

收稿日期: 2017-06-19

基金项目: 国家自然科学基金 (51575327)

作者简介: 张静静 (1993—), 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。

通讯作者: 陈满儒 (1957—), 男, 陕西科技大学教授, 主要研究方向为运输包装。

蜂窝纸板作为一种结构新颖、承载性能好、质量轻且具有良好缓冲性能的绿色包装材料,受到多领域的广泛关注,并已应用于包装、建筑、农业等诸多领域^[1]。蜂窝纸板由上下面纸和中间的蜂窝芯组成,呈正六棱柱状的蜂窝单元上下两端被面纸封闭,形成一个密闭气室,当蜂窝胞元受到压缩时,气室内的气体也受到挤压,与气体体积变化成比例的回弹压力就会反抗进一步的压缩,从而耗散能量,因此内含气体的影响不可以忽略,研究蜂窝纸板面纸内部受内含气体压力对其异面动态冲击性能的影响具有一定的理论意义和实用价值。

Gibson 等^[2]研究了蜂窝结构的基本力学性能和多孔材料的能量吸收;Wang^[3]研究了六边形蜂窝纸板面外压缩性能;张改梅^[4]通过静态压缩和动态压缩试验,研究蜂窝纸板的静态缓冲特性和动态缓冲特性与其蜂窝芯柱、蜂窝孔径的关系;Wang^[5]利用实验法研究蜂窝芯纸相对密度和高度对其缓冲性能的影响;姚著^[6]通过试验研究和有限元仿真相结合的方法,研究了蜂窝纸板的压缩变形机制和动态压缩性能;毕中臣^[7]分析了跌落高度、厚度及蜂窝芯规格对蜂窝纸板动态缓冲特性的影响。在产品运输过程中,作为产品包装材料的蜂窝纸板主要通过吸收冲击和振动所引起的能量而达到保护产品的目的。Wang^[8]研究蜂窝芯纸的冲击行为和能量吸收;王军^[9]研究了不同厚度、不同芯层、不同面层对蜂窝纸板面内能量吸收性能的影响;张宇^[10]基于跌落冲击试验分析了 3 种不同的蜂窝纸板的动态冲击曲线,并建立了其能量吸收图;王志伟^[11]应用试验方法分析蜂窝纸板的动态冲击压缩过程,研究了不同湿度下不同厚跨比的蜂窝纸板的冲击承载能力和能量吸收能力;王军^[9]提出了内含气体对能量吸收的影响;鄂玉萍^[12]研究了内含气体对平台应力的影响;康颖安^[13]等研究了开孔与闭孔这 2 种胞孔结构材料在准静态载荷下的压缩响应,得出开孔泡沫铝表现出明显的应变率效应,而闭孔泡沫不如开孔敏感;Xu 等^[14]研究面外动态压缩下内含气体对铝蜂窝强度的影响;Xu 等^[15]在动态载荷下研究了内含气体对铝泡沫和铝蜂窝强度的影响。

为了研究蜂窝纸板内含气体对其动态冲击性能的影响规律,实验分析蜂窝纸板在动态冲击过程中有、无内含气体对其接触力、位移、应变和吸收能的影响。文中实验通过改变冲击重锤的跌落高度,以获取不同的冲击能,得出蜂窝纸板有、无内含气体的接触力-时间曲线,最大接触力、最大位移、最大应变、吸收能与冲击能曲线,对比各曲线的变化规律,得出内含气体对蜂窝纸板的动态冲击性能的影响。在有内含气体的条件下,通过吸收能-孔隙率曲线,得出不同孔隙率对其冲击性能的影响。

1 实验

1.1 材料与仪器

主要材料:六边形蜂窝纸板,由定量为 130 g/m^2 的施胶高强度瓦楞纸制成的 B 孔(内径为 15 mm)蜂窝芯,裱覆定量为 200 g/m^2 的木浆纸,所得试样厚度为 40 mm 。主要仪器:动态冲击实验所用实验设备为 DY-2 包装缓冲材料冲击试验机,见图 1。实验时,在蜂窝纸板试样下放置带有漏气孔的支撑装置,保证在实验过程中蜂窝纸板试样中的气体能充分泄漏出去。

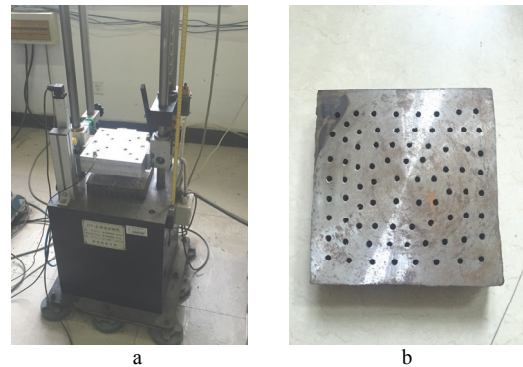


图 1 DY-2 包装材料冲击试验机和带有漏气孔的底部支撑装置

Fig.1 DY-2 impact tester for packaging materials and bottom-supporting device with holes

1.2 方法

实验前在温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度为 80%的条件下将所有样品处理 24 h 以上,选取无明显缺陷的试样进行实验,参照 GB/T 8167—2008《包装用缓冲材料动态压缩试验方法》^[16]制备面积为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 、厚度为 40 mm 的试样。通过将蜂窝纸板上下表面戳孔的方式,得到孔隙率为 0%, 50%, 100% 的试样,见图 2,其中孔隙率为 100%表示蜂窝纸板内无内含气体。选取 39.2, 52.3, 65.3 和 78.4 J 这 4 组冲击能分别对试样进行冲击试验,每组 3 个试样,取其平均值作为实验的结果。实验样品用 130B/200-40 表示,即由定量为 130 g/m^2 施胶高强度瓦楞纸制成的 B 孔蜂窝芯,裱覆定量为 200 g/m^2 的木浆纸所得的厚度为 40 mm 的蜂窝纸板。重锤质量取 25 kg 。

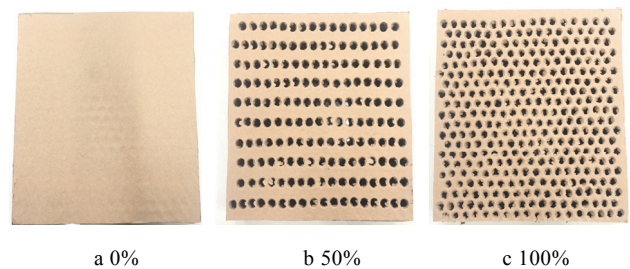


图 2 不同孔隙率实验样品

Fig.2 Specimens for tests at different percentages of holes

2 结果与讨论

动态冲击实验中,在冲击试验机上压头接触试样之前所有的势能转化为动能,通过改变重锤跌落高度,可以得到一系列的冲击能量。通过接触力-时间曲线、最大接触力-冲击能曲线、最大位移-冲击能曲线、最大应变-冲击能曲线、吸收能-孔隙率曲线和吸收能-冲击能曲线评估蜂窝纸板动态冲击性能,实验中所有试样均未压实。

2.1 接触力

通过改变冲击实验的跌落高度得出冲击能量分别为 39.2、52.3、65.3、78.4 J,孔隙率为 0%试样的接触力-时间曲线,见图 3。由于实验中没有回弹制动,所以冲击过程中发生二次冲击,其中第 1 次冲击为主要冲击,这种冲击形式更符合实际产品运输过程中的冲击情况。观察接触力-时间曲线,第 1 次冲击时接触力直线上升,很快达到峰值,随后接触力逐渐下降,下降过程中由于试样发生二次冲击,接触力又逐渐增大,最后当全部的动能转化为蜂窝纸板的变形能时,完成一次冲击实验。

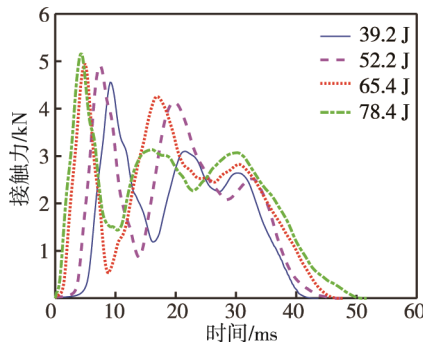


图 3 孔隙率为 0%时不同冲击能的接触力-时间曲线
Fig.3 Contact force vs. contact time at hole percentage of 0% under different impact energy

当冲击能分别为 39.2、52.3、65.3 和 78.4 J 时,对应最大接触力为 4555.775、4896.57、4947.53 和 5160.435 N,对应最大接触力出现时间为 9.12、7.41、4.94、4.37 ms。第 1 次冲击中冲击能为 78.4 J 时,接触力上升速度较快,达到接触力峰值的用时最短;冲击能为 39.2 J 时,上升速度较慢,达到接触力峰值用时最长,最大接触力出现时间随冲击能的增加而减小。冲击实验过程接触持续时间分别为 42.94、46.55、46.93、50.92 ms,可以看出,随着冲击能逐渐增大,接触持续时间逐渐增加。此外,在冲击过程中,冲击能为 78.4 J 时,孔隙率为 100%的试样位移和应变均最大,分别为 26.981 mm 和 0.67,且实验中所有试样均未压实。

冲击能为 78.4 J 时,不同孔隙率试样的接触力-时间曲线见图 4。可以看出,孔隙率为 0%时,最大

接触力最大,接触持续时间最短;孔隙率为 100%时,最大接触力最小,接触持续时间最长。曲线显示,实验依然发生二次冲击,但由于内含气体的存在,孔隙率为 100%的试样二次冲击接触力曲线的波动幅度远小于孔隙率为 0%的试样的接触力波动幅度。

不同孔隙率和冲击能时,最大接触力与冲击能之间的关系见图 5。可以看出,同一孔隙率时,冲击能越大,最大接触力越大,且最大接触力随冲击能的增加呈线性增加;同一冲击能时,孔隙率越小,最大接触力越大,孔隙率越大,最大接触力越小。此外,孔隙率越大,最大接触力随着冲击能增加的速度越慢。

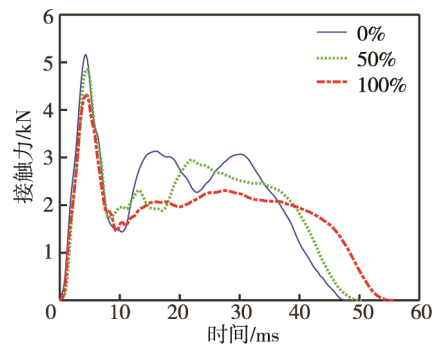


图 4 冲击能为 78.4 J 时不同孔隙率的接触力-时间曲线
Fig.4 Contact force vs. contact time at an impact energy of 78.4 J under different hole percentage

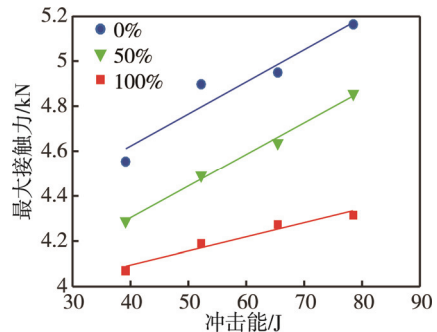


图 5 不同孔隙率的最大接触力-冲击能曲线
Fig.5 Maximum contact force vs. impact energy under different hole percentage

2.2 位移和应变

动态冲击过程中,忽略阻尼的影响,冲击位移只与冲击过程中速度的变化量有关,但速度变化量只与重锤的跌落高度有关,因此,影响冲击位移的因素是重锤跌落高度。冲击能越小,重锤跌落高度越低,冲击时速度就越小,最大位移也就越小。相反地,冲击能越大,重锤跌落高度就越高,冲击时速度就越大,最大位移也就越大。不同孔隙率试样最大位移-冲击能曲线见图 6,可以看出,对于任一孔隙率试样,冲击能越大,最大位移越大,最大位移随冲击能增加而增加,且与其呈线性关系。冲击能相同时,孔隙率为 0%的试样最大位移最小,孔隙率为 100%的试样最大

位移最大, 实验结果说明, 孔隙率越大, 蜂窝纸板越容易变形。

变形量与厚度之比称为应变, 应变与变形量和厚度有关。由于试验样品厚度均为 40 mm, 因此, 这里的应变只与变形量有关, 变形量越大, 应变越大。对于同一孔隙率试样, 冲击能越大, 最大应变越大, 最大应变随冲击能的增加而增加, 且与其呈线性关系。对于同一冲击能, 孔隙率为 0% 的试样最大应变最小, 孔隙率为 100% 的试样最大应变最大。

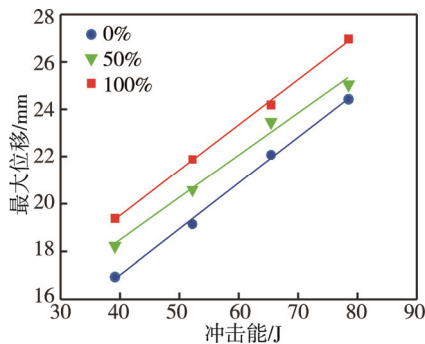


图 6 不同孔隙率的最大位移-冲击能曲线

Fig.6 Maximum displacement vs. impact energy under different hole percentage

2.3 吸收能

在动态冲击实验中, 最为理想的状态是将全部的动能转化为吸收能, 但是, 实际动态冲击实验中, 由于各种因素的影响, 吸收能小于冲击能。冲击能为 78.4 J 时, 孔隙率为 0% 的试样其吸收能最大, 约为 55.556 J, 孔隙率为 50% 的试样其吸收能约为 53.537 J, 孔隙率为 100% 的试样其吸收能最小, 约为 51.248 J。随着孔隙率的增加, 吸收能逐渐减小, 与理论结果相同。不同孔隙率试样吸收能-冲击能曲线见图 7, 可以看出, 任一孔隙率下, 吸收能随冲击能的增加而增加, 且与其呈线性关系; 任一冲击能下, 孔隙率为 100% 的试样吸收能最小, 孔隙率为 0% 的试样吸收能最大, 孔隙率越大, 吸收能越小。

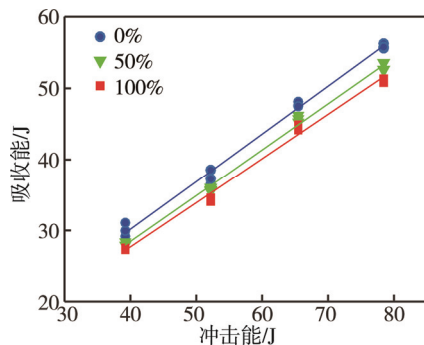


图 7 不同孔隙率的吸收能-冲击能曲线

Fig.7 Absorption energy vs. impact energy under different hole percentage

3 结语

研究了异面动态冲击载荷下, 内含气体对蜂窝纸板吸收冲击能力的影响。通过实验得出不同孔隙率蜂窝纸板的接触力-时间曲线, 最大接触力、最大位移、最大应变、吸收能与冲击能曲线和吸收能-孔隙率曲线, 由以上曲线得出以下结论: 对于任一孔隙率, 冲击能越大, 最大接触力达到峰值的时间越短, 接触持续时间越长; 当孔隙率一定时, 最大接触力、最大位移、最大应变和吸收能随着冲击能的增加而增加, 且与其呈线性关系; 当冲击能一定时, 孔隙率越小, 最大位移和最大应变就越小, 最大接触力和吸收能就越大, 蜂窝纸板越不容易变形。由此, 内含气体对蜂窝纸板冲击性能的影响不可以忽略, 进行产品包装设计时, 要考虑内含气体因素且根据实际情况设计包装。

参考文献:

- [1] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2013.
PENG Guo-xun. Logistics Transportation Packaging Design[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2013.
- [2] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids: Structure and Properties[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [3] WANG Dong-mei, WANG Zhi-wei. Out-of-plane Compressive Properties of Hexagonal Paper Honeycomb[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 20(2): 115—119.
- [4] 张改梅, 胡玉玲. 不同规格蜂窝纸板缓冲性能的研究[J]. 包装工程, 2008, 29(10): 77—79.
ZHANG Gai-mei, HU Yu-ling. Study on the Performance of Honeycomb Paperboard with the Different Size[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(10): 77—79.
- [5] WANG Dong-mei, WANG Zhi-wei. Experimental Investigation into the Cushioning Properties of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Technology and Science, 2008, 21(6): 309—316.
- [6] 姚著. 蜂窝纸板动态压缩性能研究[D]. 珠海: 暨南大学, 2011.
YAO Zhu. Investigation of Dynamic Compressive Properties of Paper Honeycomb[D]. Zhuhai: Jinan University, 2011.
- [7] 毕中臣. 蜂窝纸板缓冲机理及其动态缓冲特性研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2012.
BI Zhong-chen. Research on the Cushioning Mechanism and Dynamic Cushioning Property of Honeycomb Paperboards[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2012.
- [8] WANG Dong-mei. Impact Behavior and Energy Absorption of Paper Honeycomb Sandwich Panels[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(1): 110—114.

- [9] 王军. 蜂窝纸板承载/缓冲机理及其性能表征[D]. 无锡: 江南大学, 2011.
WANG Jun. Research on the Bearing/Cushioning Mechanism and Performance Characterization of Honeycomb Paperboards[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011.
- [10] 张宇, 王志伟. 蜂窝纸板动态缓冲特性的试验研究[J]. 包装学报, 2012(1): 9—12.
ZHANG Yu, WANG Zhi-wei. Experimental Research on Dynamic Cushioning Properties of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Journal, 2012(1): 9—12.
- [11] 王志伟, 姚著. 蜂窝纸板冲击压缩的试验研究和有限元分析[J]. 机械工程学报, 2012(12): 49—55.
WANG Zhi-wei, YAO Zhu. Experimental Investigation and Finite Element Analysis for Impact Compression of Honeycomb Paperboards[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012(12): 49—55.
- [12] 鄂玉萍. 湿度和应变率对纸质缓冲材料能量吸收特性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2010.
E Yu-ping. Influence of Relative Humidity and Strain Rate on the Energy Absorption Properties of Paper-based Cushioning Materials[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010.
- [13] 康颖安, 张俊彦. 开孔与闭孔泡沫铝的压缩力学行为[J]. 材料导报, 2005, 19(8): 122—124.
KANG Ying-an, ZHANG Jun-yan. Uniaxial Compressive Behavior of Open-cell and Closed-cell Aluminum Foams[J]. Materials Review, 2005, 19(8): 122—124.
- [14] XU S, BEYNON J H, RUAN D, et al. Strength Enhancement of Aluminum Honeycombs Caused by Entrapped Air under Dynamic Out-of-plane Compression [J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 47: 1—13.
- [15] XU S Q, RUAN D, LU G X. Strength Enhancement of Aluminum Foams and Honeycombs by Entrapped Air under Dynamic Loadings[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 74: 120—125.
- [16] GB/T 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].

《纳米材料》特色栏目征稿函

纳米技术作为一种最具有市场应用潜力的新兴科学技术,其潜在的重要性毋庸置疑,纳米技术正成为各国科技界所关注的焦点。在国内,许多科研院所、高等院校也组织科研力量,开展纳米技术的研究工作,并取得了一定的研究成果,纳米技术基础理论研究和新材料开发等应用研究都得到了快速的发展,并且在各领域均得到了广泛的应用。在包装领域,纳米材料也得到了诸多应用。

鉴于此,本刊拟围绕“纳米材料”这一主线,作系列的专项报道。本刊编辑部特邀请纳米材料领域的专家为本栏目撰写稿件,以期进一步提升本刊的学术质量和影响力。稿件以研究论文为主,也可为综述性研究,请通过网站投稿,编辑部将快速处理并优先发表。

编辑部电话: 023-68792294 网址: www.packjour.com

《包装工程》编辑部