

测试设备缓冲材料抗冲击性能的仿真和评估

郭琦¹, 杨江涛^{2,3}

(1. 中北大学 计算机与控制工程学院, 太原 030051; 2. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 太原 030051;
3. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

摘要: 缓冲材料的可靠性是影响设备工作稳定性的关键; 以泡沫铝和聚氨酯为研究对象, 用有限元分析法模拟两者在冲击环境下的力学响应; 采用 ANSYS/LS-DYNA 软件进行了弹体的侵彻环境分析, 针对子弹速度为 300 m/s 和 1 000 m/s 的情况分别进行动力学仿真实验, 研究了两者的抗冲击性能; 采用安全冲击速度 Janssen 系数和缓冲系数 C 作为衡量测试设备缓冲材料性能好坏的评价标准; 根据 ANSYS/LS-DYNA 的实际仿真结果可得, 当子弹速度为 300 m/s 时, 聚氨酯的 Janssen 系数为 0.8, 泡沫铝的 Janssen 系数为 1; 当子弹速度为 1 000 m/s 时, 聚氨酯的 Janssen 系数为 0.08, 泡沫铝的 Janssen 系数为 0.112; 且聚氨酯和泡沫铝的缓冲系数 C 分别为 0.61 和 11; 实验数据结果表明, 泡沫铝的抗冲击性能优于聚氨酯, 具有明显的优越性和广泛的应用前景。

关键词: 泡沫铝; 聚氨酯; 冲击; 有限元分析; 性能评估

Simulation and Evaluation on Impact Resistance Performance of Testing Equipment Buffer Materials

Wu Qi¹, Yang Jiangtao^{2,3}

(1. School of Computer Science and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China;
3. Key Laboratory of Instrumentation Science&Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Reliability of buffer materials is a key factor to influence the stability of equipment. Aluminum foam and polyurethane for the study, using finite element analysis method simulate the mechanical response in shock environment. Using ANSYS/LS-DYNA software analyses and simulates the bullet which the velocity is 300m/s and 1000m/s in the penetration environment, researching the impact resistance performance of aluminum foam and polyurethane. Janssen coefficient and the buffer coefficient are used to evaluate the performance of buffer materials. According to the actual simulation results of ANSYS/LS-DYNA, when the bullet speed is 300m/s, Janssen coefficient of polyurethane is 0.8, and Janssen coefficient of aluminum foam is 1. And when the bullet speed is 1000m/s, Janssen coefficient of polyurethane is 0.08, and Janssen coefficient of aluminum foam is 0.112. Besides, the buffer coefficient of polyurethane and aluminum foam are 0.61 and 11. Experimental results show that the impact resistance performance of aluminum foam is better than that of polyurethane, and it has obvious advantages.

Keywords: aluminum foam; polyurethane; impact; finite element analysis; performance evaluation

0 引言

随着现代社会人们的防护意识越来越高, 缓冲材料被制成各种各样的安全保护产品来满足人类的需求, 例如安全帽、安全带、护腕护膝及生活中的各种商品包装等, 可以说现代生活中处处都运用着缓冲技术^[1]。现代科技的进步, 促进了缓冲材料的发展, 为了防止商品的非正常损坏, 国内外许多专家学者均在研究缓冲材料及其性能, 寻找抗冲击性能更好的缓冲材料成了必然。在众多的缓冲材料中, 泡沫铝是一种新型材料^[2-3], 它是金属铝骨架与气孔的复合材料, 既具有金属的特性又有泡沫材料的特性, 使之兼顾了功能材料与结构材料的特点, 应用前景十分广泛; 而聚氨酯泡沫塑料^[4]与其他泡沫材料相比, 具有无臭、透气、气泡均匀、耐高温、耐老化、抗有机溶

剂侵蚀等特点, 广泛应用于绝热、防震、缓冲、隔音、轻质结构件、包装等方面。本文以泡沫铝和聚氨酯为研究对象, 采用 ANSYS/LS-DYNA 软件进行了弹体的侵彻环境分析, 并用有限元分析法模拟两者的动力学响应。针对子弹速度为 300 m/s 和 1 000 m/s 的情况分别进行动力学仿真实验, 研究了两者的抗冲击性能。采用安全冲击速度 Janssen 系数和缓冲系数 C 作为衡量测试设备缓冲材料性能好坏的评价标准。实验数据结果表明, 泡沫铝的抗冲击性能优于聚氨酯, 具有明显的优越性和广泛的应用前景。

1 基于 ANSYS/LS-DYNA 结构动力学的模拟分析与仿真

借助高速弹体侵彻缓冲材料靶板的仿真来模拟测试设备缓冲材料的高抗冲击环境。本文采用初速度为 300 m/s 和 1 000 m/s 的子弹进行试验仿真。通过 ANSYS/LS-DYNA 后处理软件 LS-PREPOST 来观察弹丸侵彻靶板的过程及靶板在高速弹丸冲击下的变形分析, 列出子弹的位移、剩余加速度

收稿日期: 2014-03-11; 修回日期: 2014-04-15。

作者简介: 郭琦 (1989-), 女, 山西大同人, 硕士研究生, 主要从事计算机仿真与图形图像处理方向的研究。

和最大加速度表格进行比较。

1.1 弹丸侵彻靶板的仿真

1.1.1 弹头的尺寸及形状

本文在研究侵彻问题时, 只需确定子弹头外部壳体形状, 不考虑弹头内部结构。子弹体选用钢制弹头, 头部形状为半球, 实验所用参数为 $\rho = 7.83 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $E = 206 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$ 。子弹尺寸为 $R = 26 \text{ mm}$, $l = 39 \text{ mm}$ 。由于弹头与靶板表面接触截面较小, 侵彻阻力不大, 且以中高速侵彻混凝土介质过程中, 弹丸变形很小, 可视为刚体。因此, 建立模型时弹体采用考虑应变率影响的各向同性弹塑性模型^[5]。

1.1.2 侵彻模型

弹丸高速侵彻靶板时, 靶板会出现破碎、成坑、崩落和贯穿等现象, 其变形属于大变形, 本文中靶板所采用的模型, 较真实的描述了其本构关系, 可在一定程度上模拟破碎、成坑、崩落和贯穿现象。考虑到弹头直径大小, 为简化计算, 取靶板尺寸 (1/4 模型) 为 $120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 进行计算, 用 SOLID164 单元划分网格, 在对称面上施加边界约束, 靶板边界施加固定约束。本实验中, 泡沫铝的参数为 $\rho = 0.37 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $E = 1.2 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$; 聚氨酯的参数为 $\rho = 0.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $E = 39.4 \text{ MPa}$, $\nu = 0.42$ 。

1.1.3 侵彻仿真结果

计算时间为 $80 \mu\text{s}$, 每 $4 \mu\text{s}$ 输出一个结果数据文件。计算结束后, 运行 LS-DYNA 后处理程序 LS-PROPOST 查看计算结果, 得到弹头在 300 m/s 和 1000 m/s 速度下的靶板破坏状态图, 并列出了子弹的位移、剩余加速度和最大加速度表格进行比较。

如图 1 所示, 子弹以速度 300 m/s 侵彻泡沫铝和聚氨酯的效果比较图: 时间相同, 泡沫铝受到的破坏比聚氨酯小, 这说明了泡沫铝的抗冲击强度比聚氨酯的抗冲击强度高^[6]。为了更明确地表示出泡沫铝和聚氨酯的抗冲击性能差异, 对两种材料的位移、剩余加速度和最大加速度 (取绝对值) 进行比较, 如表 1 所示。

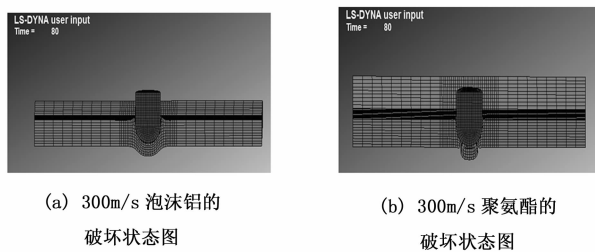


图 1 破坏状态比较图

表 1 300 m/s 下的子弹的位移、剩余速度和加速度表

缓冲材料	位移 (cm)	剩余速度 (cm/ μs)	最大加速度 ($e^{-3} \text{ cm}/\mu\text{s}^2$)
泡沫铝	1.9	0.185	0.225
聚氨酯	2.2	0.22	0.18

由表 1 可知, 在 300 m/s 的子弹冲击下, 泡沫铝的抗冲击性能要优于聚氨酯的抗性冲击性能。

下面是子弹以 1000 m/s 的速度冲击两种缓冲材料得到的侵彻比较图, 如图 2 所示。

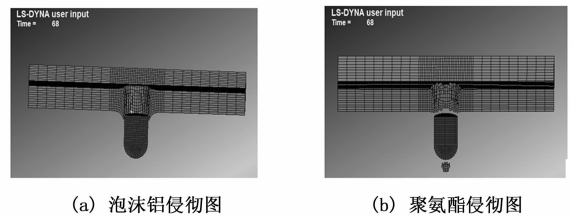


图 2 侵彻比较图

同样的对两种材料的位移、剩余加速度和最大加速度 (取绝对值) 进行比较, 如表 2 所示。

表 2 1000 m/s 下的子弹的位移、剩余速度和加速度表

缓冲材料	位移 (cm)	剩余速度 (cm/ μs)	最大加速度 ($e^{-3} \text{ cm}/\mu\text{s}^2$)
泡沫铝	7.6	0.094 5	0.28
聚氨酯	7.7	0.096 7	0.2

由以上数据可知, 子弹以 1000 m/s 冲击泡沫铝和聚氨酯, 泡沫铝对子弹的阻挡作用大于聚氨酯对子弹的阻挡作用, 也就是说, 在子弹以 300 m/s 和 1000 m/s 的速度下, 泡沫铝的抗冲击性能优于聚氨酯。

下面是泡沫铝和聚氨酯在子弹速度为 300 m/s 和 1000 m/s 下, 不同时刻的应力云图。其中, 图 3 中子弹速度为 300 m/s , 图 4 中子弹速度为 1000 m/s 。

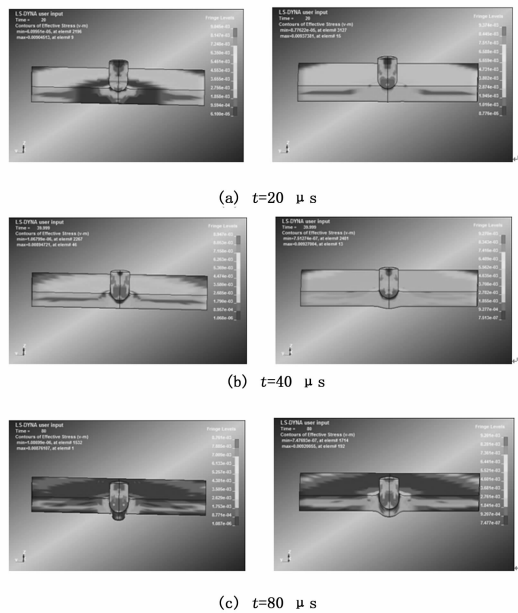


图 3 聚氨酯 (左) 和泡沫铝 (右) 应力云图比较 ($V_{\text{子弹}} = 300 \text{ m/s}$)

通过对图形对比发现, 在子弹速度为 300 m/s 的同一时刻下, 泡沫铝靶板受到的应力更大, 子弹对聚氨酯材料侵彻的更厉害。在侵彻时间 $t = 80 \mu\text{s}$ 时, 两种材料的侵彻效果对比最明显: 聚氨酯材料已经发生断裂, 而泡沫铝材料还未发生断裂。

通过图形对比, 在子弹速度为 1000 m/s 的情况下, 同一时刻, 泡沫铝靶板受到的应力更大, 子弹对聚氨酯材料侵彻的更厉害。在侵彻时间 $t = 32 \mu\text{s}$ 时, 两种材料的侵彻效果对比最明显: 聚氨酯材料已经发生断裂, 而泡沫铝材料还未发生断

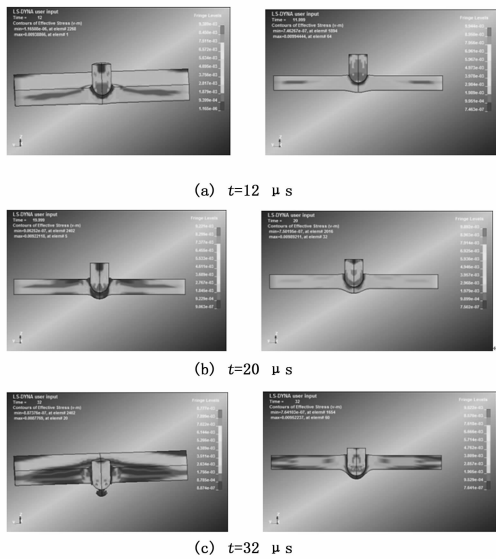


图 4 聚氨酯 (左) 和泡沫铝 (右) 应力云图比较
($V_{子弹} = 1\ 000\ \text{m/s}$)

裂。与子弹速度为 300 m/s 时相比, 子弹的侵彻速度更快, 子弹的剩余速度更大。以上两组实验体现了一致性, 并且都与现实结果相似。

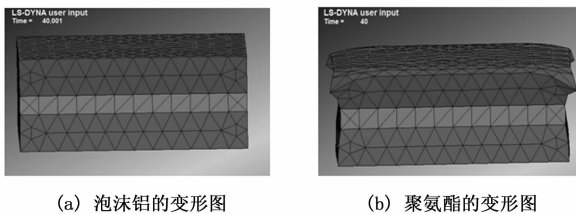
1.2 应力波冲击仿真

1.2.1 有限元模型

文中采用 SOLID164 单元划分网格, 在底面施加边界约束。1/4 模型尺寸为: 缓冲材料尺寸 $120\text{mm} \times 120\text{mm} \times 20\text{mm}$, 钢板尺寸 $120\text{mm} \times 120\text{mm} \times 10\text{mm}$ 。泡沫铝和聚氨酯的参数与 1.1 节相同。

1.2.2 冲击仿真结果

泡沫铝和聚氨酯的变形图如图 5 所示。



(a) 泡沫铝的变形图 (b) 聚氨酯的变形图

图 5 变形图比较

如图 5 所示, 在冲击波^[7]的作用下, 缓冲材料发生形变, 同样, 位于中间一层的钢板也将会有变化产生。本实验测量的就是中间一层钢板在冲击波的作用下产生的位移、加速度等变化。

由实验得出: 当泡沫铝作为缓冲材料时, 钢板产生的位移最大值约为 0.01cm, 而当聚氨酯作为缓冲材料时, 钢板的最大位移约为 0.18cm; 因此可知, 泡沫铝作为缓冲材料时, 钢板的稳定程度比聚氨酯做缓冲材料时更高, 泡沫铝的抗震效果更好。列出两者的实验数据表格进行比较, 如表 3 所示。

表 3 钢板经两种缓冲材料缓冲后的数据比较

缓冲材料	位移(cm)	最大加速度($\text{e}^{-3}\text{cm}/\mu\text{s}^2$)	应力(N)
泡沫铝	0.01	0.01	4
聚氨酯	0.18	4.5	6

下面是相同条件下, 不同时刻 (取 $t=20\ \mu\text{s}$ 和 $t=40\ \mu\text{s}$ 时刻) 的应力云图比较, 如图 6 所示。

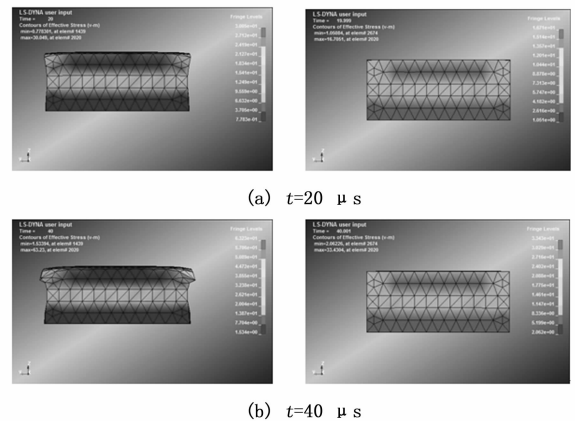


图 6 聚氨酯 (左) 和泡沫铝 (右) 应力云图比较

从上面这些不同时刻的动力屈曲模态可以发现: 由于缓冲材料的不同, 在 $t=20\ \mu\text{s}$ 时刻, 聚氨酯缓冲材料就已经在冲击端发生较小的屈曲现象, 而泡沫铝缓冲材料则没有明显变化; 在 $t=40\ \mu\text{s}$ 时刻, 聚氨酯缓冲材料已经在冲击端发生了较大的屈曲现象, 但是泡沫铝缓冲材料仍然没有明显变化。

2 缓冲材料的抗冲击性能评估

2.1 性能评估因数

本文采用安全冲击速度 Janssen 系数和缓冲系数 C 作为衡量测试设备缓冲材料性能好坏的评价标准。

(1) Janssen 系数: 描述多孔材料吸收外部冲击能量的有效性的参数之一就是 Janssen 系数:

$$J = \frac{a_p}{a_j} \quad (1)$$

其中: 峰值加速度 a_p 由侵彻仿真测得, 而理想泡沫加速度 a_j 则通过下式求得

$$a_j = \frac{v^2}{2t} \quad (2)$$

式中, v 为冲击速度, t 为泡沫厚度。

(2) 缓冲系数 C : 缓冲系数 C 主要是由大量泡沫材料的应力-应变曲线而来, 用于定义泡沫材料的能量吸收效率, 即缓冲系数 C 被定义为某一给定的峰值应力 σ_p 与在此应力下泡沫材料所吸收的能量 W 的比值, 即

$$C = \frac{\sigma_p}{W} \quad (3)$$

2.2 数值计算和 ANSYS/DYNA 仿真结果的验证

根据 ANSYS/LS-DYNA 的实际仿真结果, 列出两种缓冲材料的侵彻仿真和理想的子弹最大加速度表, 如表 4 所示。

表 4 两种缓冲材料的仿真加速度和理想加速度表

加速度	聚氨酯($\text{cm}/\mu\text{s}^2$)	泡沫铝($\text{cm}/\mu\text{s}^2$)
$a_p(V_{子弹}=300\text{m/s})$	$0.18\ \text{e}^{-3}$	$0.225\ \text{e}^{-3}$
$a_p(V_{子弹}=1000\text{m/s})$	$0.2\ \text{e}^{-3}$	$0.28\ \text{e}^{-3}$
$a_j(V_{子弹}=300\text{m/s})$	$2.25\ \text{e}^{-4}$	$2.25\ \text{e}^{-4}$
$a_j(V_{子弹}=1000\text{m/s})$	$2.5\ \text{e}^{-3}$	$2.5\ \text{e}^{-3}$

tromagnetic interference spectrum in an antenna under aircraft radome using models with artificial charged aerosol clouds [J]. Technical Physics Letters, 2011, 37 (9): 845 - 848.

[7] 郑会志, 胡小峰, 杜照恒, 等. 飞行器表面材料沉积静电成因分析及模拟试验 [J]. 高电压技术, 2011, 37 (10): 2612 - 2616.

[8] 黄建国, 韩建伟. 航天器内部充电效应及典型事例分析 [J]. 物理学报, 2010, 59 (4): 2907 - 2913.

[9] 刘进, 陈永光, 谭志良, 等. 静电放电电磁场的特性分布规律 [J]. 高电压技术, 2012, 38 (2): 435 - 443.

[10] 雷晓勇, 刘尚合, 王雷, 等. 静电放电电磁脉冲辐射场数值建模与仿真 [J]. 高电压技术, 2010 (11): 2749 - 2753.

[11] Sorokin A, Vancassel X, Mirabel P. Emission of ions and charged soot particles by aircraft engines [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2003, 3 (3): 325 - 334.

[12] Sorokin A, Mirabel P. Ion recombination in aircraft exhaust plumes [J]. Geophysical research letters, 2001, 28 (6): 955 - 958.

[13] Vatazhin A B, Golentsov D A, Likhter V A. Experimental study of body charging in combustion products with soot particles [J]. Journal of Aerosol Science, 2004, 35 (2): 477 - 488.

[14] 曹鹤飞, 刘尚合, 孙永卫, 等. 等离子体环境非偏置固体表面带电研究 [J]. 物理学报, 2013, 62 (11): 577 - 581.

[15] Yu F, Turco R P. The role of ions in the formation and evolution of particles in aircraft plumes [J]. Geophysical Research Letters,

1997, 24 (15): 1927 - 1930.

[16] Penner J E. Aviation and the Global Atmosphere: Special Report of the IPCC Working Groups I and III in Collaboration with the Scientific Assessment Panel to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: pp194 - 210.

[17] 黄勇, 林宇震. 燃烧与燃烧室 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.

[18] Popovicheva O B, Starik A M. Aircraft-generated soot aerosols: Physicochemical properties and effects of emission into the atmosphere [J]. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2007, 43 (2): 125 - 141.

[19] Mattingly J D, Heiser W H, Pratt D T. Aircraft engine design [M]. AIAA, 2002: 147 - 153.

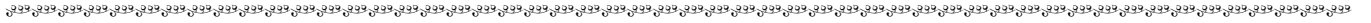
[20] 刘尚合. 静电理论与防护 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1999.

[21] 陆慧林, 赵广播, 别如山, 等. 管内气固两相流动的试验和模拟计算 [J]. 工程热物理学报, 1999, 20 (5): 627 - 631.

[22] 朱利, 刘尚合, 郑会志, 等. 航空发动机喷流起电机理建模与试验研究 [J]. 物理学报, 2013, 62 (22): 225201.

[23] 魏明, 王书平. 静电电位动态测量波形重建算法 [J]. 高电压技术, 2012, (9): 2230 - 2236.

[24] Chang J, Lawless P A, Yamamoto T. Corona discharge processes [J]. Plasma Science, IEEE Transactions on, 1991, 19 (6): 1152 - 1166.



(上接第 2140 页)

由上表数据并结合公式 (1) (2) 可以求出, 当子弹速度为 300 m/s 时, $J_1 = 0.8, J_2 = 1$, 其中, J_1 为聚氨酯作缓冲材料时的 Janssen 系数, J_2 为泡沫铝作缓冲材料时的 Janssen 系数。相应可得当子弹速度为 1 000 m/s 时, $J_1 = 0.08, J_2 = 0.112$ 。

对于应力波冲击仿真实验, 采用缓冲系数 C 来评估缓冲材料的性能, 分别对泡沫铝和聚氨酯进行实验仿真, 得出在 $t=40 \mu s$ 时, 泡沫铝和聚氨酯均达到最大应力和最大能量, 如表 5 所示。

表 5 两种缓冲材料的最大应力和最大能量表

缓冲材料	最大应力 (N)	最大能量 (MJ)
泡沫铝	45	27
聚氨酯	22	2

利用公式 (3) 可求得聚氨酯的缓冲系数为 $C_1 = 0.61$, 泡沫铝的缓冲系数为 $C_2 = 11$ 。

通过对计算结果的比较可得: 在相同的外部条件下, 泡沫铝作缓冲材料时的 Janssen 系数比聚氨酯作缓冲材料时的 Janssen 系数要大; 对于两种材料的缓冲系数 C , 泡沫铝同样大于聚氨酯。上述实验结果表明, 泡沫铝的缓冲性能^[8]要优于聚氨酯, 即泡沫铝的抗冲击性能比聚氨酯的抗冲击性能好, 具有明显的优越性。

3 结论

根据模型仿真分析结果得知, 对于测试设备中缓冲材料的评估主要是通过位移、速度、加速度、应力、应变、和能量变化几个方面决定。缓冲材料的可靠性是影响设备工作稳定性的

关键。本文以泡沫铝和聚氨酯为研究对象, 采用 ANSYS/LS-DYNA 软件进行了弹体的侵入环境分析, 并用有限元分析法模拟两者的动力学响应。针对子弹速度为 300 m/s 和 1 000 m/s 的情况分别进行仿真实验, 研究了两者的抗冲击性能。采用安全冲击速度 Janssen 系数和缓冲系数 C 作为衡量测试设备缓冲材料性能好坏的评价标准。仿真实验结果表明, 泡沫铝的 Janssen 系数和缓冲系数 C 均比聚氨酯大, 因此泡沫铝在抗冲击方面具有明显的优越性, 这正是缓冲材料所需的优良性能, 具有广泛的应用前景。

参考文献:

[1] 应宗荣, 黄瑞娇, 疏芳, 等. 硬质聚氨酯泡沫复合改性研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2013, 41 (2): 111 - 115.

[2] 陈志军, 施文康, 蔡增伸. 金属拉伸试验的测量与控制 [J]. 计算机测量与控制, 2005, 13 (12): 1322 - 1324.

[3] 何伟锋, 孙振忠, 陈海彬, 等. 泡沫铝金属材料两种制备工艺的探讨 [J]. 热加工工艺, 2012, 41 (6): 29 - 34.

[4] 谢卫红, 杜红涛, 李顺才. 聚氨酯泡沫铝复合材料动力学实验 [J]. 复合材料学报, 2011, 28 (3): 103 - 108.

[5] 景鹏. 高 g 值冲击测试关键技术研究 [D]. 太原: 中北大学, 2009.

[6] 荆鹏, 迟煜岷, 王建, 等. 泡沫金属材料制备技术及应用现状 [J]. 热加工工艺, 2012, 41 (22): 59 - 62.

[7] 王礼立. 应力波基础 (第二版) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.

[8] 曾斐. 泡沫铝缓冲吸能特性研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2002.