

某型舰载发射装置后坐缓冲仿真分析

吴凡, 宋向华, 王敏毅

(中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003)

摘要 为减小某新型舰载发射装置后坐力, 采用压溃式缓冲件进行模拟分析, 通过压溃式材料吸收发射装置后坐力。通过舰载发射装置实弹射击采集后坐力曲线, 运用有限元分析软件 LS-DYNA 对后坐力冲击及缓冲过程进行了仿真计算, 对比分析缓冲件在不同状态时的缓冲效果。仿真分析表明: 缓冲件为 30 mm×30 mm×20 mm 的立方体结构泡沫铝材料时, 后坐力峰值为基准峰值的 45.58%; 同等尺寸规格下, 厚度越大的缓冲件吸能缓冲效果越好; 同等厚度下, 截面积越大的缓冲件吸能缓冲效果越好; 同等截面积与厚度下, 方形截面比圆形截面缓冲件缓冲效果更好。

关键词 舰载发射装置; 后坐力; 缓冲技术; 泡沫铝

中图分类号 TJ391 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2021)01-0076-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2021.01.014

Simulation Analysis of Recoil Buffer for a Ship-borne Launcher

WU Fan, SONG Xianghua, WANG Minyi

(No.710 R&D Institute, CSIC, Yichang 443000, China)

Abstract In order to reduce the recoil of a new ship-borne launcher, this paper adopts crushed cushions for simulation analysis, in which the crushed material absorbs the recoil of the launcher. The recoil curve is collected by the live ammunition of the ship-borne launcher, and the finite element analysis software LS-DYNA is used to simulate the recoil impact and cushioning process to compare and analyze the cushioning effects of the cushions in different states. The simulation analysis shows that: when the cushion is made of 30×30×20mm cubic aluminum foam material, the peak recoil is 45.58% of the reference peak; when under the same size and specifications, the larger the thickness of the buffer is, the better the absorption and buffering effect is; when under the same thickness, the buffer with a larger cross-sectional area has better energy absorption and buffering effect; when under the same cross-sectional area and thickness, the buffer effect of square section is better than that of circular section.

Key words launcher; recoil; buffer technology; aluminum foam

0 引言

某型舰载发射装置采用膛压式发射技术, 可实现快速发射、装填等^[1], 但其发射后坐力影响到整个发射系统的作战效能, 有必要研究新型缓冲技术解决发射装置后坐力问题, 并减小缓冲结

构尺寸。发射装置后坐力主要来源于弹体发射过程中的膛合力, 膛合力使后坐部分进行后坐运动^[2]。目前, 身管武器系统后坐力缓冲方式主要有以下几种^[3-6]:

1) 炮口制退器。主要通过炮口(枪口)制退器分散火药燃气的流速、流向来减少后坐力, 减小

程度较小, 结构简单、成本较低, 适用于高膛压发射武器。

2) 独立式液压缓冲机。采用液压-弹簧缓冲系统, 结构相对复杂、尺寸和重量增加较多、成本高, 主要用于大、中、口径火炮。

3) 缓冲簧。利用复杂的缓冲弹簧组件进行缓冲, 设计复杂, 需要足够的安装尺寸和空间, 主要用于小口径枪械。

根据上述分析, 火炮等身管武器的缓冲结构虽然效果显著, 应用成熟, 但结构复杂、成本高昂、尺寸体积重量较大, 在本文所述的舰载发射装置尺寸、重量等约束下不太适用。

随着材料技术的发展, 一次性压溃式缓冲材料得到诸多应用^[7], 这类材料具有低密度、高孔隙率、良好的吸能性和阻尼减震性能, 能够较好地满足缓冲性能要求^[8]。刘春盟^[9]把泡沫铝填充管作为缓冲装置应用到汽车保险杠中, 验证了同体积的泡沫铝填充管吸能效果较普通空心铝的吸能效果能提升 1 倍; 彭文哲^[10]发现将泡沫铝填充到水工闸门中, 闸门的临界屈曲载荷得到明显提高; 张福增^[11]在桥梁防撞中应用泡沫铝柔性吸能措施有效减小了撞击力峰值。由此, 本文拟采用泡沫铝材料进行某型舰载发射装置的后坐缓冲仿真分析, 为其工程应用提供支撑。

1 舰载发射装置后坐力及缓冲

1.1 舰载发射装置形态

该型舰载发射装置为多管联装的形式, 外观结构形似德国 MASS 系统发射装置, 如图 1 所示。为简化建模过程, 现以单管及其内部弹体为研究对象。

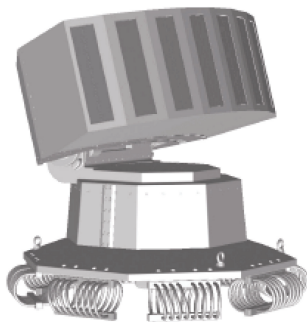


图 1 德国 MASS 系统发射装置
Fig. 1 German MASS system launcher

1.2 发射装置后坐力测试

弹体发射时的燃气压力作用时间很短, 但它对炮身的作用却很复杂。为分析单管发射时的后坐力情况, 采用卧式发动机试验台、数据采集系统、推力传感器及高速摄影机等设备进行该型舰载发射装置单管弹体发射试验。装配多发试验样机, 装填入试验发射管, 然后点火发射。通过固定在发射管后的推力传感器采集后坐力的时间历程数据, 同时应用高速摄影设备对弹体出膛过程进行摄录。试验装置如图 2 所示。



图 2 试验装置图
Fig. 2 Test device diagram

弹体发射试验中, 采集有效数据和图像, 试验后对高速影像资料分析, 得出出炮口时间 t 及推力等相关数据。对推力数据进行处理, 取多次试验平均值可形成弹射后坐力-时间曲线, 如图 3 所示, 并读取最大发射后坐力数据。

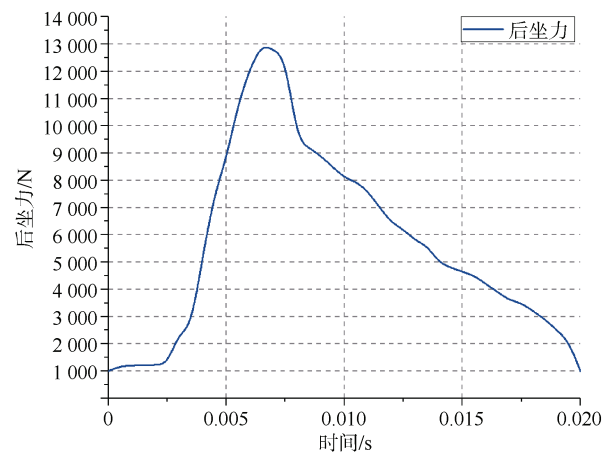


图 3 弹射后坐力-时间曲线
Fig. 3 Ejection recoil-time curve

试验结果表明: 单管发射时的后坐力峰值约为 13 kN, 作用时间约为 20 ms。

1.3 发射装置后坐缓冲形式

本文采用块状结构压溃式材料的缓冲形式,根据该型舰载发射装置弹种及尺寸设计相应外形结构置于弹体底部,通过压溃式材料吸收发射装置后坐力。

泡沫铝材料具备良好的缓冲特性,压缩过程中随着材料塑性变形的增大,大量的能量被吸收,单位体积材料吸收的能量 C 可由下式来表示:

$$C = \int_0^{\varepsilon_d} \sigma d\varepsilon$$

式中: ε_d 为材料压缩至致密化开始时应变量; σ 为流动应力; ε 为应变。

关于 ε_d , Gibson 给出了经验公式^[12]:

$$\varepsilon_d = 1 - 1.4 \left[\frac{\rho^*}{\rho_s} \right]$$

式中: ρ^* 为材料的实际密度; ρ_s 为孔壁实体材料的密度。

根据魏鹏^[13]的分析,泡沫铝材料实际吸能与密度之间并不是单调关系,密度为 560 kg/m^3 的材料具有最大的吸能能力。因此,本文直接采用此密度下的泡沫铝进行某型舰载发射装置后坐缓冲分析。

2 有限元仿真

为了模拟该型舰载发射装置后坐力的冲击效果及缓冲过程,本文采用有限元软件 LS-DYNA 进行缓冲块在后坐力加载下的有限元仿真。

2.1 仿真模型建立

依据缓冲块的真实几何结构,建立全尺寸有限元模型。由该型舰载发射装置的发射管及弹体设计,初步确定缓冲块安装于不大于 $\phi 80$ 的环状尺寸、厚度 20 mm 的限制条件内。根据上述分析,本文采用尺寸为 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的立方体泡沫铝块作为缓冲件。

为方便固定、施加边界条件与冲击载荷,更加真实地模拟缓冲件受冲击载荷的作用,在缓冲件上、下面均设置了薄板。上板模拟受到后坐力冲击的平面,中间是本文所述的泡沫铝缓冲件,下板用来模拟固定不动的底板。上、下板设为刚体,泡沫

铝设为可变形体。

2.2 网格划分

对缓冲件及上、下薄板进行网格划分是有限元模拟实施过程中的一个重要环节,网格的数量及质量是评价网格划分的重要指标。我们采用较细的网格划分,划分时使用智能网格划分工具,最终确定的网格数量为 317 440 个,划分网格后的模型如图 4 所示。

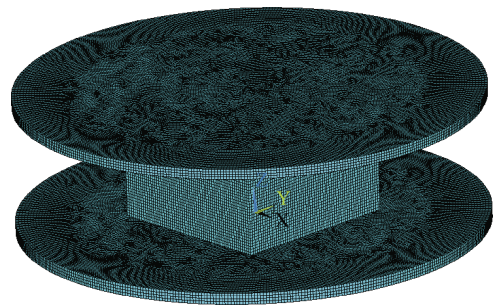


图 4 建模与网格划分
Fig. 4 Modeling and Meshing

3 参数设置

3.1 单元类型及材料参数

将立方体缓冲件划分为 8 节点六面体 3D solid 164 单元,材料属性定义为 LS-DYNA 材料库中提供的可压扁泡沫材料模型 (Crushable Foam Model),所需的材料参数如表 1 所示。上、下方刚体薄板也划分为 8 节点六面体单元,材料属性定义为 LS-DYNA 材料库中提供的 Rigid Material,密度 $\rho=7\ 800 \text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E=210 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.3$ 。

表 1 缓冲件材料 (闭孔型泡沫铝) 参数
Table 1 Parameters of buffer material

密度 / (kg/m^3)	弹性模量 / Pa	泊松比	屈服极限 / Pa
560	4.757e9	0.3	8.7e7

3.2 接触类型与算法设置

该仿真模型中,泡沫铝与上板及泡沫铝与下板之间均采用自动面面接触,泡沫铝自身定义自动单面接触,摩擦系数均设为 0.05。默认使用单点积分

算法, 为防止单点积分引起的沙漏问题, 在计算过程中设置沙漏开启选项。

3.3 边界条件及载荷

根据上述分析, 该型舰载发射装置后坐力峰值约 13 kN, 峰值力到达时间约为 7 ms, 整个变载荷作用时间约为 20 ms。弹丸压板在压力作用下向底部冲击, 弹底固定不动。

在该分析模型中, 缓冲件底部处于完全约束状态, 顶部约束旋转自由度, 下板施加固定约束, 上板施加后坐力载荷冲击缓冲件。后坐力载荷作用于顶面薄板沿 z 方向冲击, 总冲量 $I=110 \text{ N}\cdot\text{s}$, 最大峰值力约为 13 000 N, 作用时间约为 20 ms, 冲击载荷曲线如图 5 所示。

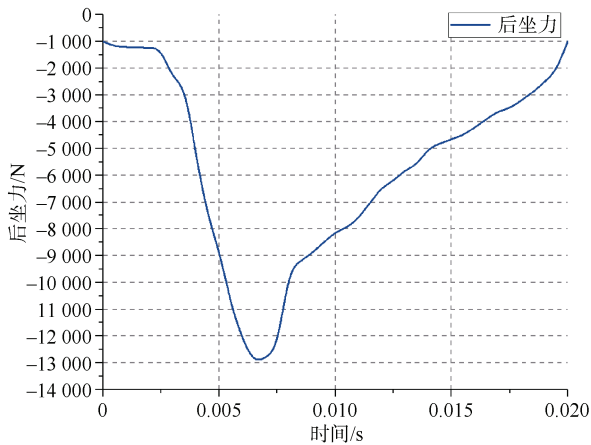


图 5 后坐力载荷冲击
Fig. 5 Recoil load impact

3.4 求解与计算设置

根据载荷作用时间设置计算时长为 20 ms, 结果文件与历程文件输出步数采用默认设置, 启动求解选项, 将生成的 K 文件代入求解器计算结果。

4 仿真结果分析

4.1 形变分析

用 LS-DYNA 进行该型舰载发射装置后坐力冲击仿真, 泡沫铝缓冲件在不同时刻轴向压缩过程变形情况如图 6 所示。分析发现缓冲件的轴向冲击发生轴对称的屈曲变形, 材料两边向外隆起, 同时沿冲击的方向向下压实。

通过 LS-PREPOST 后处理软件, 得到缓冲件

沿压缩方向位移随时间变化的曲线如图 7 所示。

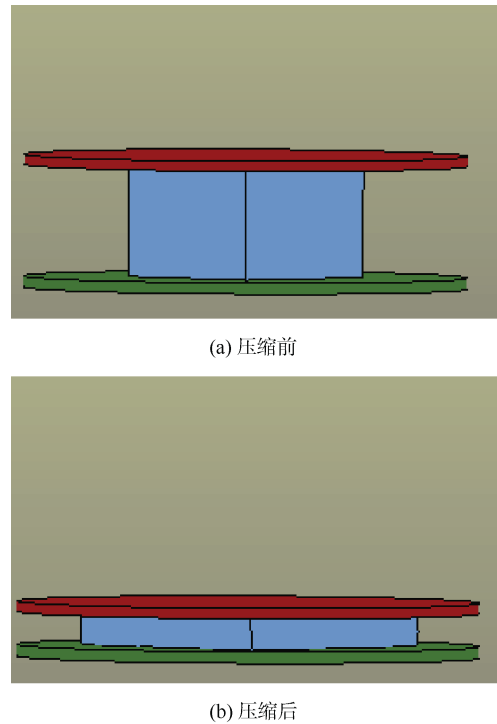


图 6 缓冲件轴向变形
Fig. 6 Axial deformation of buffer

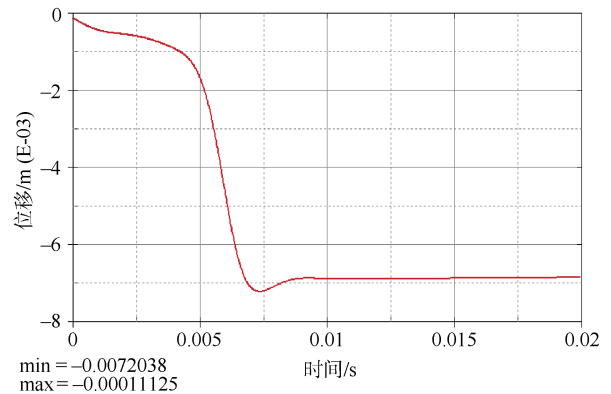


图 7 缓冲件轴向位移曲线
Fig. 7 Axial displacement curve of buffer

由轴向位移曲线可知, 缓冲块沿 $-z$ 方向逐渐被压缩, 7 ms 时压缩量达到最大值, 约为 7.2 mm, 在峰值力作用下产生塑性不可逆形变。

4.2 吸能分析

通过 LS-PREPOST 后处理软件, 得到缓冲件吸收能量随时间变化曲线如图 8 所示。从图中可以看出, 缓冲块整体吸能过程比较平稳, 最大吸能量可达 131.76 J。

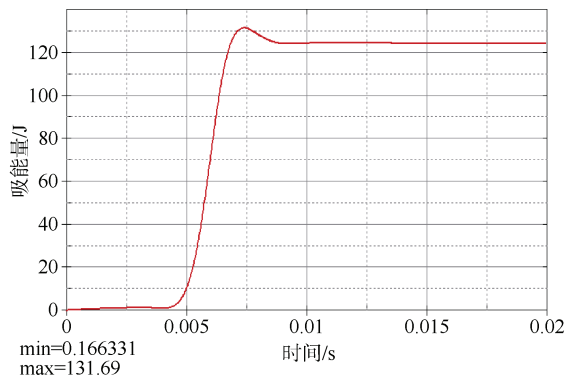


图8 缓冲件吸能曲线
Fig. 8 Energy absorption curve of buffer

4.3 受力分析

通过 LS-PREPOST 后处理软件, 得到缓冲件下方刚性板受力随时间变化曲线如图 9 所示。从图中可以看出, 缓冲后受力情况有一定程度减小, 最大峰值力为 5 925.4 N。

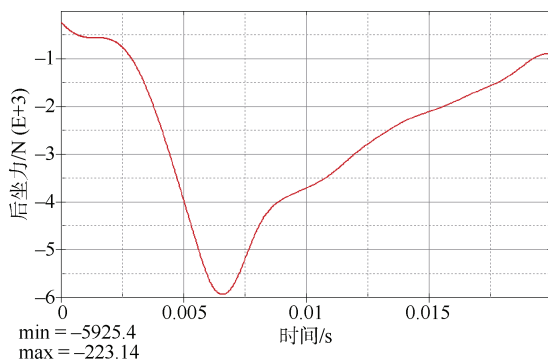


图9 刚性板受力曲线(30 mm×30 mm×20 mm 缓冲块)
Fig. 9 Force curve of rigid plate (30×30×20 mm buffer)

5 不同参数下的缓冲效果对比分析

分别采用尺寸为 30 mm×30 mm×10 mm、40 mm×40 mm×20 mm 的立方体缓冲件, 保持缓冲件截面积一定, 采用圆形截面, 半径为 17 mm (截面积与 30 mm×30 mm 截面积相等), 厚度为 20 mm 的缓冲件进行仿真。提取下方刚性板受力曲线进行对比分析, 如图 10 所示, 因曲线结果较为接近, 为更好地显示结果, 此处只截取了部分曲线段进行对比分析。

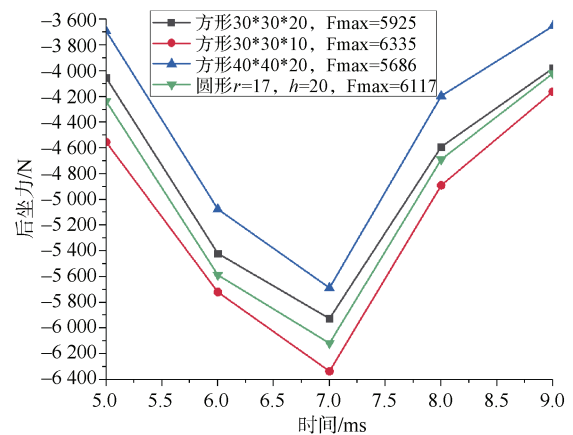


图10 不同参数缓冲件缓冲效果对比分析
Fig. 10 Comparative analysis of buffer effect of buffers under different parameters

提取上述分析数据整理如表 2 所示。

表2 仿真结果数据分析
Table 2 Data analysis of simulation results

序号	缓冲块外形	(边长/半径)/mm	厚度/mm	密度/(kg/m ³)	峰值力/N	基准力峰/N	峰值削减/%
1	立方体	30	20	560	5 929	13 000	45.58
2	立方体	30	10	560	6335	13 000	48.73
3	立方体	40	20	560	5 686	13 000	43.73
4	圆柱	17	20	560	6 117	13 000	47.05

分析上述仿真结果, 可以发现: 采用块状结构泡沫铝材料的缓冲形式, 对该型舰载发射装置后坐力具有削减效果, 削减率为 45%左右; 从峰值力削减情况来看, 当立方体缓冲件尺寸为 30 mm×30 mm×20 mm 时, 后坐力峰值为基准峰值的 45.58%; 当立

方体缓冲件尺寸为 30 mm×30 mm×10 mm 时, 后坐力峰值为基准峰值的 48.73%; 当立方体缓冲件尺寸为 40 mm×40 mm×20 mm 时, 后坐力峰值为基准峰值的 43.73%; 当圆柱体缓冲件尺寸为 $\phi 34$ mm×20 mm 时, 后坐力峰值为基准峰值的 47.05%。

6 仿真可信度分析

仿真计算结束后,分析整个过程的动能、沙漏能与内能。其中动能最大值为 3.58 J, 占内能的百分比为 2.72%, 说明该压缩过程外力所做功基本全部转化为缓冲件内能; 沙漏能最大值为 0.635 J, 占内能的百分比为 0.48%, 说明整个压缩过程的沙漏控制是有效的。尺寸为 28 mm × 28 mm × 10 mm 的立方体泡沫铝缓冲块落锤冲击试验采集的受力曲线如图 11 所示, 受力峰值为基准峰值的 42.95%, 与本文仿真结果较为吻合。根据上述分析, 可以认为此方法模拟的该型舰载发射装置后坐力冲击及缓冲过程是合理可靠的。

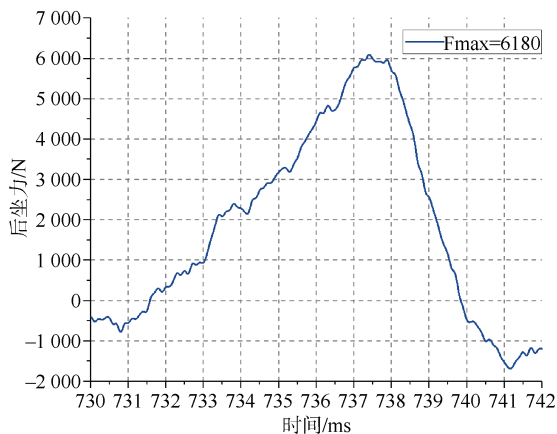


图 11 落锤冲击试验受力曲线

Fig. 11 Stress curve of drop weight impact test

7 结束语

本文通过对某型舰载发射装置实弹射击试验采集了后坐力曲线; 运用有限元分析软件 LS-DYNA 对后坐力冲击及缓冲过程进行了仿真计算, 验证了该型舰载发射装置后坐缓冲技术的有效性; 在进行仿真分析的同时, 还对比分析了缓冲件在不同状态时的缓冲效果, 可以得出以下结论:

1) 采用泡沫铝材料设计该型舰载发射装置后坐缓冲装置具有可行性, 缓冲效果良好;

2) 在该缓冲技术设定的缓冲件尺寸规格下, 缓冲件厚度较大时, 吸能缓冲效果更明显;

3) 在缓冲件同等厚度下, 缓冲件截面积较大时, 吸能缓冲效果更明显;

4) 在缓冲件同等厚度, 同等截面积时, 方形截面缓冲件比圆形截面缓冲件吸能缓冲效果更明显, 这与颜捷^[14]的试验结果相一致。

参考文献

- [1] 宋向华, 张雳. 多管火箭炮密闭发射内弹道仿真[J]. 计算机仿真, 2016, 33(7): 24-28.
- [2] 苏高峰. 某转管武器弹簧缓冲装置的优化与设计[D]. 太原: 中北大学, 2013.
- [3] 高跃飞. 火炮反后坐装置设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [4] 岳明凯, 刘欣宁. 炮口制退器现状及其发展趋势[J]. 兵工自动化, 2015, 34(3): 1-6.
- [5] 杜中华, 刘海林. 火炮与自动武器原理简明教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.
- [6] 谈乐斌, 侯保林, 陈卫民. 降低火炮后坐力技术概述[J]. 火炮发射与控制学报, 2006(4): 69-71.
- [7] 陈惠秀. 浅谈多孔泡沫金属材料的性能及其应用[J]. 石化技术, 2017, 24(9): 52.
- [8] 黄炼, 吕志强, 赵应龙. 泡沫铝填充圆管轴向动力屈曲及吸能特性研究[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(8): 55-59.
- [9] 刘春盟. 泡沫铝吸能特性及其在汽车保险杠中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [10] 彭文哲. 泡沫铝填充钢管的力学性能及在水工闸门中的应用研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019.
- [11] 张福增, 亓路宽, 赵梦. 夹芯泡沫铝结构在桥梁撞击中的应用[J]. 公路, 2017, 6(6): 94-98.
- [12] 龚成龙. 泡沫铝的制备及性能研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
- [13] 魏鹏. 泡沫铝材料的制备与有限元模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [14] 颜捷. 汽车梁结构撞击吸能试验分析与有限元仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

(责任编辑: 曹晓霖)