

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.08.012

采用泡沫铝填充薄壁结构的穿透器缓冲防护研究

骆海涛<sup>1,2</sup>, 孟祥志<sup>3</sup>, 李玉新<sup>3</sup>, 刘广明<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所 机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;  
2. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110169; 3. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 携带探测仪器的穿透器高速侵彻行星体,内部科学仪器将受到高  $g$  值冲击,极易损坏. 为了科学仪器的缓冲防护以提高自身存活率,本文设计了一种具有多层能量吸收结构的穿透器样机,将泡沫铝填充薄壁结构(简称 FTS)应用于内部载荷的缓冲防护设计上以提高存活率. 在 LS-DYNA 中模拟了穿透器侵彻星球介质的过程,通过冲击试验和仿真分析验证了该种措施的有效性. 研究结果表明:FTS 对隔离冲击和能量吸收效果明显,为穿透器工程样机的研发提供了重要的解决方案.

**关 键 词:** 穿透器;泡沫铝填充薄壁结构;缓冲防护;冲击响应;侵彻

中图分类号: P 111.49      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2020)08-1135-05

Study on Buffer Protection for Penetrator with Aluminum Foam-Filled Thin-Wall Structure

LUO Hai-tao<sup>1,2</sup>, MENG Xiang-zhi<sup>3</sup>, LI Yu-xin<sup>3</sup>, LIU Guang-ming<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Institute of Robot and Intelligent Manufacturing Innovation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China; 3. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: MENG Xiang-zhi, E-mail: xzhmeng@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** When a high-speed penetrator carrying detection equipment penetrates planetary bodies at high speed, the scientific instruments in it are impacted by high  $g$  value and easily damaged. The buffer protection structure for scientific instrumentation is essential for improving the survival rate. This work suggested a penetrator with a multi-layered energy absorbing structure where the foam-filled thin-wall structure (abbreviated as FTS) is applied to the penetrating vibration-damping structure to improve the survival rate of the penetrator. The penetrating process of the penetrator into the planetary medium is simulated in LS-DYNA. Then, the reliability of the penetrator's finite element model was verified by the impulse response test and simulation. The results suggest that FTS has a beneficial effect on isolation impact and energy absorption and provides an important solution for the research and development of penetrator engineering prototype.

**Key words:** penetrator; aluminum foam-filled thin-wall structure; buffer protection; impact response; penetration

为了探究行星的形成与演化规律,深空探测技术发展迅速<sup>[1]</sup>,贯入探测方式是近年的研究热点.贯入探测分为原位贯入与动能侵彻式探测,其中动能侵彻式探测方法以其成本低、覆盖面积广、侵彻深度大的特点引人关注.动能侵彻式探测即穿透探测器通过撞击进入星球表层以下,携带科学仪器完成指定的探测任务;在撞击过程中要承受上万  $g$ (文中  $g$  均指重力加速度)的冲击载荷,其内部科学仪器的生存是任务成败的关键.穿透探测已被成功用于多种地面应用,但作为行星探测运载工具只飞行过两次,而且在几十年的时间里,许多计划中的穿透器探测任务在不同的发展

阶段被取消<sup>[2-4]</sup>. 欧洲宇航局将其作为一种未来深空探测的重要技术,于 2006 年和 2013 年分别对两款穿透器进行了陆地测试,均成功完成预期任务<sup>[5-6]</sup>. 国内的研究还处于仿真模拟阶段,尚未见物理实验的相关报道.

文献[7]对穿透器的结构设计和侵彻仿真进行了初步探索. 本文是在上述工作的基础上,对已有穿透器样机结构进行了内部科学载荷的缓冲防护设计,将多种防护结构应用于原理样机,开展了穿透器有限元建模与仿真分析,并进行了冲击响应工况下的试验验证工作,证实了泡沫铝填充薄壁结构(foam-filled thin-wall structure, FTS)对于高速撞击穿透器内部科学载荷的缓冲防护能有较好的效果,为后续穿透器工程样机的成功研制提供了可靠的技术保障.

1 穿透器结构设计

泡沫铝填充结构广泛应用于航天工程的冲击防护<sup>[8-9]</sup>,本文对已有的实验样机进行了防护结构设计,并将泡沫铝填充铝壳薄壁结构应用到穿透器的防护设计上,穿透器的结构组成如图 1 所示.

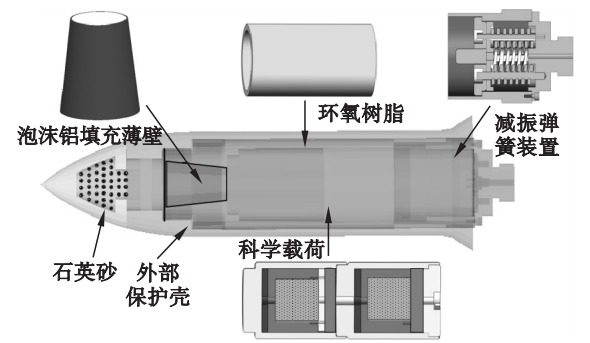


图 1 穿透器结构示意图

Fig. 1 Schematic of penetrator structure

穿透器主要包括外部保护壳、前部填充薄壁结构、内部科学载荷和尾部减振弹簧装置等. 科学载荷包括探测装置及其电源模块;外部保护壳是穿透器侵彻防护的重要保护结构,它将侵彻介质与内部结构隔离,是承受应力最大的部位. 本文的研究重点是泡沫铝填充薄壁结构在侵彻过程中的缓冲效果.

2 侵彻仿真分析

2.1 有限元模型

为了准确模拟穿透器对土壤的侵彻过程,采

用非线性动力分析软件 LS - DYNA 模拟土壤应力、应变的动态变化. 将上述几何模型导入 Hypermesh 软件进行前处理和网格划分,对结构进行简化,如去除倒角圆角,将弹簧减振结构用弹簧单元代替等,得到其有限元模型如图 2 所示. 最后在 LS - DYNA 中求解计算.

设定外部保护壳与土壤介质的接触类型为 ESTS 类型,内部科学载荷之间的接触类型为 ASTS 类型,摩擦系数设置为 0.1. 薄壁材料为铝合金 AA6060 - T4,壁厚  $t = 1\text{ mm}$ . 对整体赋予初速度以模拟着陆撞击过程,分别对两种填充不同密度的泡沫铝填充薄壁结构与单独铝薄壁结构进行分析.

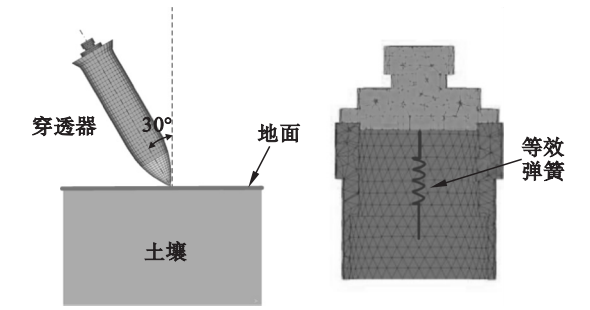


图 2 侵彻分析有限元模型

Fig. 2 Finite element model for penetrating analysis

2.2 有限元分析结果

图 3 为穿透器外部保护壳和内部科学载荷的加速度响应图,从图中可以看出,泡沫铝填充薄壁结构具有良好的隔冲效果,使科学载荷可以得到有效保护.

泡沫铝填充薄壁结构隔冲效果直接体现在内部载荷的峰值加速度和隔冲效率上<sup>[10]</sup>,两个参数不是孤立的,是可以相互转换的,都能体现隔冲效果. 隔冲效率  $\eta$  可表示为

$$\eta = \frac{A_n - A_m}{A_n} \times 100\% .$$

式中  $A_m$  和  $A_n$  分别为科学载荷、外部保护壳的碰撞加速度响应峰值.

不同结构的隔冲效果如表 1 所示. 可以看出,填充泡沫铝密度为  $0.4\text{ g/cm}^3$  时,隔冲效率为 84.5%,隔冲效果最好;没有填充泡沫铝的铝薄壁结构隔冲效果最差,隔冲效率为 35.1%.

表 1 泡沫铝填充薄壁结构的隔冲效果  
Table 1 Isolation efficiency of FTS structure

结构 ( $t = 1\text{ mm}$ )	$A_n/\text{g}$	$A_m/\text{g}$	$\eta/\%$
薄壁	10 500	6 812	35.1
FTS $\rho = 0.3\text{ g/cm}^3$	10 500	3 666	65.1
FTS $\rho = 0.4\text{ g/cm}^3$	10 500	1 625	84.5

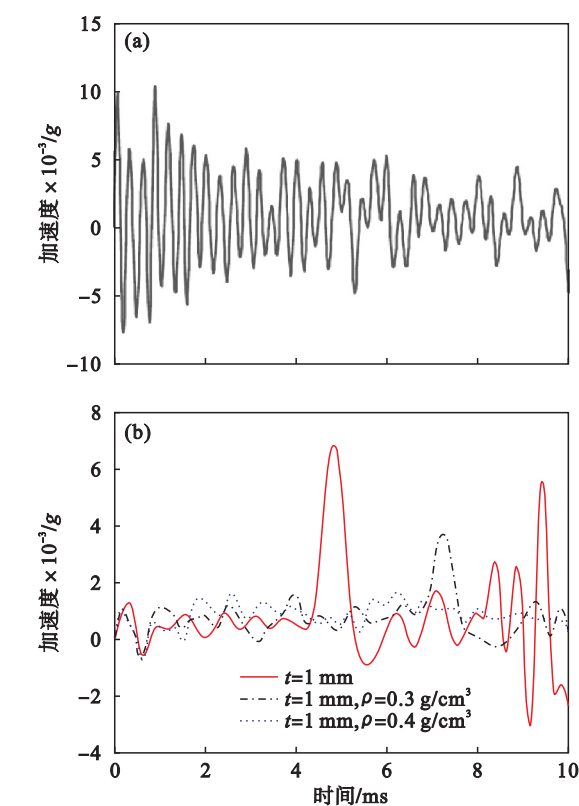


图 3 保护壳和科学载荷的加速度响应曲线  
Fig. 3 Acceleration response curves of the external protective case and scientific load  
(a)—保护壳；(b)—科学载荷.

### 3 冲击响应分析

#### 3.1 冲击响应试验

物理和仿真试验是验证有限元模型分析结果正确性的有效手段. 冲击响应试验是为了验证吸能结构的可靠性、吸能器的真实损伤情况, 以及测试内部载荷的局部响应. 冲击响应仿真分析可以清晰地再现吸能器变形的过程、冲击波的传播过程和内部载荷的局部响应. 相关文献的研究表明, 穿透器在撞击侵彻过程中所承受的冲击载荷可达上万  $g$ , 但是一般的冲击试验台无法达到这样的条件, 本文使用的仪器为气动冲击台, 其最大的冲击加速度为  $3 \times 10^3 g$ , 所以本试验为验证性试验, 主要是为了验证本文所建立的穿透器有限元模型的可靠性.

在冲击试验过程中需要选定两个测试点, 方便记录穿透器外壳结构和内部载荷结构的加速度. 测试点的选定既要方便两个测试点数据的对比, 又要保证传感器有较大的附着面积(保证传感器在冲击试验过程中固定牢靠). 加速度传感器的布局如图 4 所示.

穿透器与谐振板通过螺栓紧固在一起, 冲击

锤在气压杆的推动下对谐振板进行撞击.

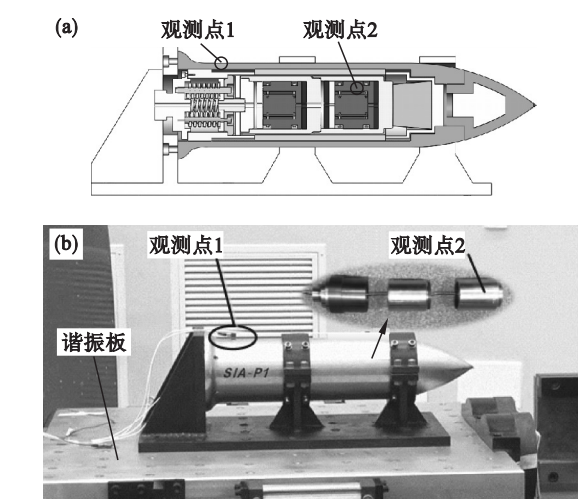


图 4 传感器观测点的布置  
Fig. 4 Distribution of sensor observation points  
(a)—设定观测点的位置；(b)—试验中的测点布置.

冲击加速度的峰值设定为  $3\,000 g$  (频域内), 低频阶段的上升斜率设定为  $6\text{ dB/Oct}$  (分贝每倍频程). 依次对装有壁厚为  $0.2, 0.3$  和  $0.4\text{ mm}$  的铝薄壁结构的穿透器, 以及装有壁厚为  $0.2\text{ mm}$  且填充了泡沫铝的薄壁结构的穿透器进行冲击响应谱试验.

#### 3.2 冲击响应试验结果

试验前的薄壁结构件如图 5a 所示, 图 5b, 5c, 5d 为不同厚度的薄壁试验后的变形情况. 在  $3\,000 g$  的激励下, 薄壁发生了不同程度的变形, 其中  $0.2\text{ mm}$  的薄壁变形最明显. 薄壁在冲击激励作用下呈现出折叠变形的趋势, 而且在局部出现多个凹坑. 图 5e 为泡沫铝填充薄壁试验后的试件.

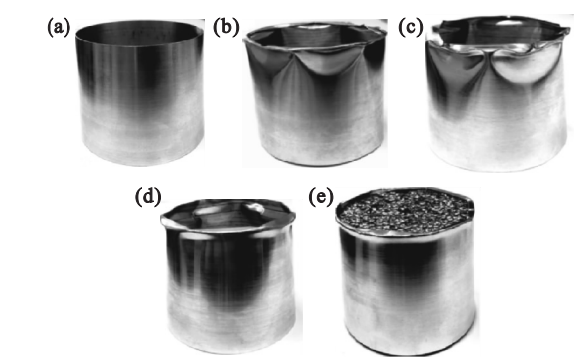


图 5 试验零件的变形  
Fig. 5 Deformation of the test parts  
(a)—试验前；(b)—壁厚  $0.2\text{ mm}$ ；  
(c)—壁厚  $0.3\text{ mm}$ ；(d)—壁厚  $0.4\text{ mm}$ ；  
(e)—泡沫铝填充铝壳.

不同壁厚的 4 种结构件的试验输入条件一致, 观测点 1 的加速度传感器检测得到时域的加速度信号基本一致, 此处只给出一种结构件的

输出结果,如图 6 所示. 加速度在 10 ms 内迅速衰减,加速度峰值达到了 4 000 g 左右. 此加速度响应将作为有限元分析的输入,获取科学载荷的加速度响应,即测点 2 的加速度响应仿真结果. 测点 2 的真实响应将在图 9 与仿真结果一同给出.

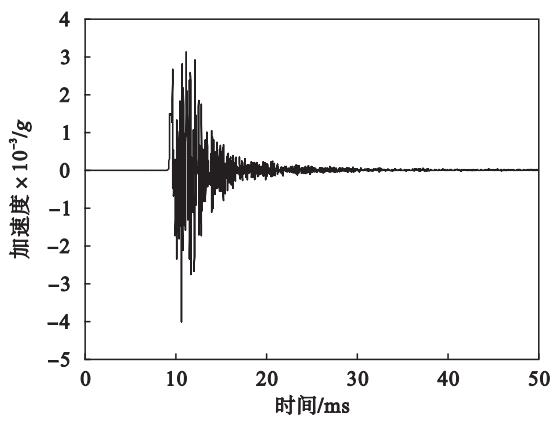


图 6 测点 1 的加速度响应

Fig. 6 Acceleration response of observation point 1

3.3 冲击响应有限元分析

将第 2 节经过侵彻分析的穿透器模型应用于冲击响应分析,将穿透器模型与夹具相连接,得到的有限元模型如图 7 所示. 将图 7 的加速度信号沿穿透器轴线方向施加给穿透器模型,与试验的输入方向一致. 将仿真得到的加速度结果与试验结果进行对比,以确定响应结果的准确性.

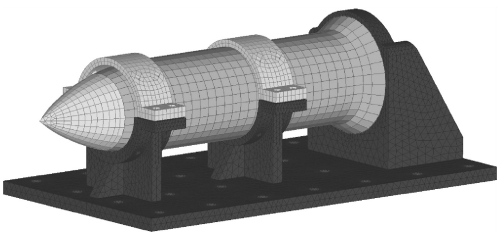


图 7 冲击响应分析有限元模型

Fig. 7 Finite element model for impact response analysis

3.4 冲击响应结果分析

铝壳薄壁在冲击载荷作用下会发生折叠变形,折叠过程中形成的褶皱对能量耗损有决定性的贡献;褶皱越多,意味着薄壁变形量越大,能量耗散越理想. 结构变形量如图 8 所示,可见铝壳的变形量随着壁厚的增加在非线性地减少,最大变形量为 15.4 mm;填充结构的变形量相对较小,变形的趋势也相对平缓. 与铝壳薄壁相比,填充结构抗冲击能力得到提高,冲击变形的稳定性也有所改良. 表 2 为有限元仿真和物理试验结构变形量的对比数据,最大误差为 9.3%.

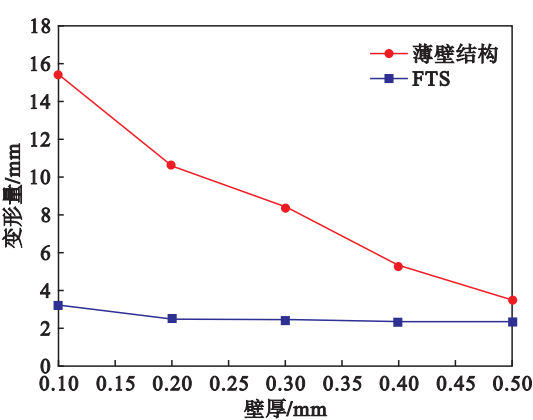


图 8 薄壁结构和 FTS 的变形量

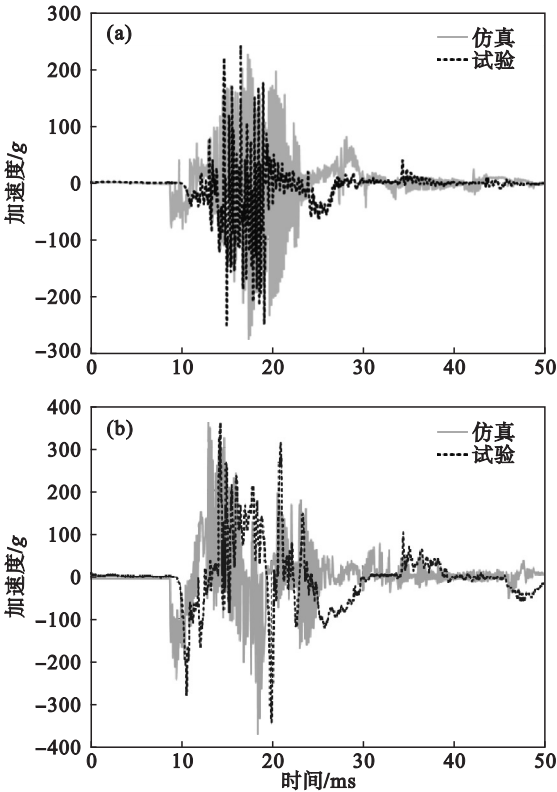
Fig. 8 Deformations of thin-wall structure and FTS

表 2 薄壁结构和 FTS 的变形量

Table 2 Deformation data of thin-wall structure and FTS

缓冲吸能结构	有限元分析 变形量/mm	物理试验 变形量/mm	误差/%
0.2 mm 薄壁	10.6	10.0	6.0
0.3 mm 薄壁	8.4	7.9	6.3
0.4 mm 薄壁	5.3	5.1	3.9
0.2 mm FTS	2.6	2.8	9.3

测点 2 获得的试验结果和仿真结果如图 9 所示. 在图 9a, 9b, 9c 中,从产生激励到衰减至稳态值的调整时间大约为 20 ms;图 9d 中,调整时间为 14 ms,这说明泡沫铝降低了调整时间,提高了缓冲吸能结构的稳定性,对于改良结构的性能有很大作用.





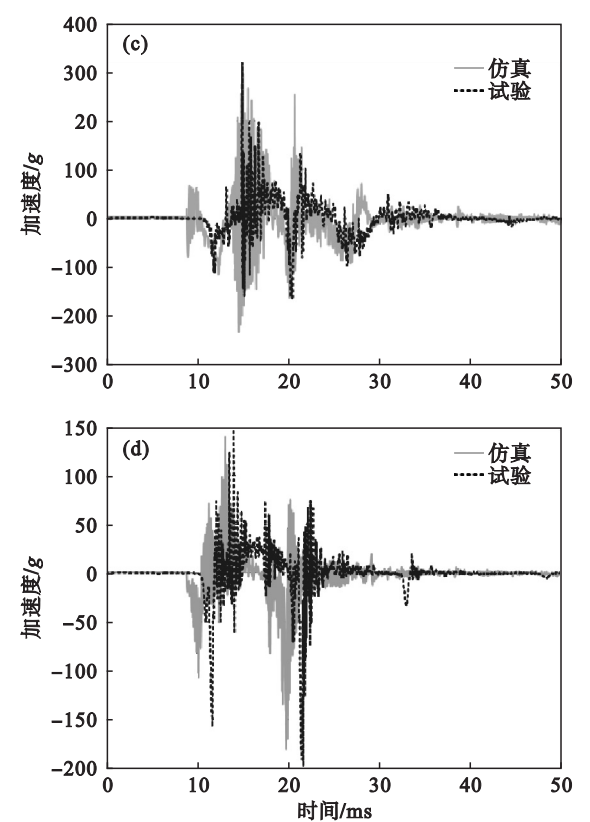


图 9 试验与仿真的加速度响应曲线  
Fig. 9 Acceleration response curves of test and simulation  
(a)—0.2 mm 薄壁；(b)—0.3 mm 薄壁；  
(c)—0.4 mm 薄壁；(d)—0.2 mm FTS.

物理试验与仿真分析的结果如表 3 所示:有限元分析得到的加速度响应结果与物理试验所得结果在趋势上拟合度较高,瞬态响应峰值出现的时刻和峰值大小均相差不大,误差小于 9%,说明采集和仿真的数据有参考意义.由此可见本文建立的穿透器有限元模型是可信的,为后期优化设计打下了基础.此外,泡沫铝填充薄壁结构方案能够起到更好的缓冲吸振效果,内部科学载荷的最大冲击加速度不超过 200g,缓冲效率达到 93.3%.

表 3 试验与仿真的峰值加速度 Table 3 Peak acceleration of test and simulation			
缓冲吸能结构	物理试验 加速度/g	有限元分析 加速度/g	误差/%
0.2 mm 薄壁	260	239	8.8
0.3 mm 薄壁	320	318	0.6
0.4 mm 薄壁	380	371	2.4
0.2 mm FTS	196	189	3.6

## 4 结 论

1) 根据星球探测的任务需求和探测方式,设

计了一种多层减振的防护结构,该防护结构包含橡胶、聚氨酯、弹簧和泡沫铝等减振材料并采用薄壁结构,其中泡沫铝填充薄壁结构是主要的减振隔冲结构.

2) 在侵彻仿真中,保护外壳的冲击加速度达到了万 g 以上,泡沫铝填充结构隔冲下的科学载荷,其加速度峰值远小于外部保护结构的加速度峰值,起到了明显的隔冲效果.

3) 对薄壁结构和泡沫铝填充薄壁结构进行了冲击响应谱物理试验和仿真分析.对比试验结果和数值模拟的结果,证明了数值模拟过程的准确性和泡沫铝填充薄壁结构方案的缓冲吸能效果,为穿透器工程型号样机的研制奠定了基础.

### 参考文献：

[ 1 ] 韩泉东,任建军,于杭健. 国外深空探测推进技术发展及启示[J]. 火箭推进,2017,43(4):1-6.  
(Han Quan-dong, Ren Jian-jun, Yu Hang-jian. Development and enlightenment of foreign deep space exploration propulsion technology[J]. *Rocket Propulsion*, 2017, 43(4):1-6. )

[ 2 ] Lorenz R D. Planetary penetrators: their origins, history and future[J]. *Advances in Space Research*, 2011, 48(3):403-431.

[ 3 ] Winglee R M, Truitt C, Shibata R. High velocity penetrators used a means for attaining core sample for airless solar system objects[J]. *Acta Astronautica*, 2017, 137:274-286.

[ 4 ] Shiraishi H, Tanaka S, Fujimura A, et al. The present status of the Japanese penetrator mission: LUNAR-A[J]. *Advances in Space Research*, 2008, 42(2):386-393.

[ 5 ] Vijendran S, Fielding J, Köhler J, et al. A penetrator for the Jupiter Ganymede Orbiter Mission [C/OL]//Proceedings of the 7th International Planetary Probe Workshop. Barcelona, 2010 [2019-07-15]. [https://www.researchgate.net/publication/228616030\\_A\\_penetrator\\_for\\_the\\_Jupiter\\_Ganymede\\_Orbiter\\_Mission](https://www.researchgate.net/publication/228616030_A_penetrator_for_the_Jupiter_Ganymede_Orbiter_Mission).

[ 6 ] Gowen R A, Smith A, Fortes A D, et al. Penetrators for in situ subsurface investigations of Europa [J]. *Advances in Space Research*, 2011, 48(4):725-742.

[ 7 ] 孟祥志,刘广明,付立新. 小型天体穿透器的冲击和侵彻分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(2):102-106.  
(Meng Xiang-zhi, Liu Guang-ming, Fu Li-xin. Simulation analysis of impact and penetration for small celestial body penetrator[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2019, 40(2):102-106. )

[ 8 ] Yu H, Guo Z, Li B, et al. Research into the effect of cell diameter of aluminum foam on its compressive and energy absorption properties[J]. *Materials Science & Engineering: A*, 2007, 454(16):542-546.

[ 9 ] Barnes A T, Ravi-Chandar K, Kyriakides S, et al. Dynamic crushing of aluminum foams: part I—experiments [J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2014, 51(9):1631-1645.

[ 10 ] 高猛. 高 g 值冲击下泡沫铝填充壳缓冲吸能多目标优化研究[D]. 太原:中北大学,2016.  
(Gao Meng. Multiobjective of buffer absorbing energy optimization for foam-filled thin-walled structures subjected to high g value impact [D]. Taiyuan: North University of China, 2016. )