

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2019.02.019

小型天体穿透器的冲击和侵彻分析

孟祥志¹, 刘广明², 付立新³

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中国科学院 沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016;
3. 承德石油高等专科学校, 河北 承德 067000)

摘 要: 设计了一种小型穿透器的结构样机, 目的在于提供一种用于月壤探测的高速撞击穿透器结构. 该穿透器结构质量轻、刚度高, 具有优良的减振性能, 能够有效地撞击穿透小天体. 利用理论、数值分析和仿真相结合的方法, 分析了小型穿透器撞击时的冲击响应以及正入射和斜入射靶体后的侵彻过程, 从而探索深空探测领域撞击探测任务的撞击防护要求. 结果表明, 所设计的穿透器可以有效保证内部元器件的生存, 其工作模块加速度响应小于输入值, 达到了减缓冲击的效果, 保护了内部仪器, 使其在冲击过后依然可以正常工作.

关 键 词: 穿透器; 月壤探测; 冲击响应; 侵彻; 数值分析

中图分类号: P 111.49 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)02-0251-05

Simulation Analysis of Impact and Penetration for Small Celestial Body Penetrator

MENG Xiang-zhi¹, LIU Guang-ming², FU Li-xin³

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China; 3. Chengde Petroleum College, Chengde 067000, China. Corresponding author: MENG Xiang-zhi, E-mail: xzhmeng@mail.neu.edu.cn)

Abstract: A prototype of a small penetrator was designed to provide a high-speed impact structure for lunar exploration. The advantages of this penetrator structure are lightweight, high stiffness and good vibration damping performance, which makes the penetrator effectively impact a small celestial body. The method of combining theory, numerical analysis and simulation was used for the analysis of the impact response of small penetrator and the penetration process of normal incidence and oblique incidence, so as to explore the needs of impact protection in the field of deep space exploration. The results show that the as-designed penetrator can effectively guarantee the existence of the internal components, and that the acceleration response of internal instrument module is less than the input value, which proves the effect of vibration damping. Moreover, the structure can protect the internal instrument so that it can work normally after the impact.

Key words: penetrator; soil detection; impact response; penetration; numerical analysis

高速撞击穿透探测作为一种天体探测的手段有别于围绕探测、着陆器探测等,其主要优点有:能量需求低、造价相对便宜,可以更加有效侵彻到天体内部,能够实现单次发射多点撞击以达到形成探测网络的目的.通过撞击穿透小天体,对小天体内部物质和结构开展科学探测,为揭开太阳系形成、演化,以及探索生命起源提供线索^[1].开展小型化高速撞击穿透器的研究还可以为深空探测

和天基武器系统的研究奠定基础.当撞击穿透器高速撞击星球表面时,穿透器既要保证能够有效穿透被探测介质一定的深度,又能保证其所携带的有效载荷和探测设备能够“存活”下来,这对于穿透器的结构设计将是一个严峻的挑战.

在深空探测领域,撞击穿透探测方式能够对探测目标表面以下的次表层结构进行探测,在深空探测史上一直受到国内外学者的普遍关注.美

国 NASA 的 DS-2^[2] 成功撞击到了彗星, 俄罗斯的 Mars-96 已经进行了火星穿透试验^[3]; 英国、日本等国已经开展了月球穿透器的相关研究, 并进行了地面试验^[4-5]. 在深空探测高速撞击穿透器方面我国的起步比较晚, 所开展的科学研究还不够深入, 中国空间技术研究院^[6] 对火星穿透器和月球穿透器进行了方案设计, 但专门针对深空探测任务的高速穿透器建模与仿真技术鲜有研究.

针对撞击穿透器高速精确撞击和撞击后其内部仪器的生存问题, 当前技术尚存在核心科学问题和关键技术瓶颈. 当穿透器以 300 m/s 的速度撞击天体表面时, 需要承受大于 10 000 g 的加速度, 必须要有强大的防护设计来支撑其内部仪器在这种速度撞击下的完整性.

本文主要针对穿透器撞击后生存的基础理论和共性技术开展研究工作, 研究撞击穿透器撞击防护的工作原理和技术, 解决撞击穿透器的建模、防护和设计等问题; 通过侵彻仿真, 减少实验成本, 为空间探测撞击穿透器的研制提供基础.

1 撞击穿透器的模态分析

撞击穿透器主要包括高速穿透器壳体、仪器安装模块、分离端盖、缓冲减振结构和潜头结构, 如图 1 所示.

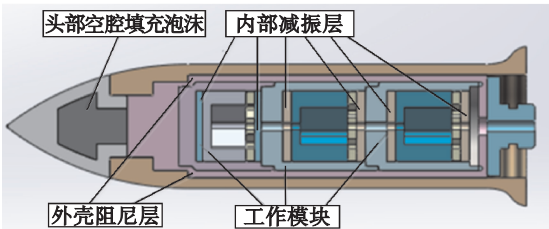


图 1 穿透器的几何模型
Fig. 1 Geometric model of the penetrator

1.1 网格划分

将上述几何模型导入 Hypermesh 软件中进行前处理和网格划分, 几何模型前处理主要是将模型中一些细小的倒角、倒圆弧和短边去掉以减少总体网格划分的数量, 得到的有限元模型如图 2 所示. 最终通过 Nastran 分析设置和求解计算.

网格划分后整个有限元模型共包括约 7.6 万个节点和 27.1 万个单元. 其中穿透器各部分均采用实体单元 (CTETRA), 组件之间的螺栓连接采用刚性单元 (RBE2), 阻尼层与组件之间采用胶

粘连接 (HEMMING).

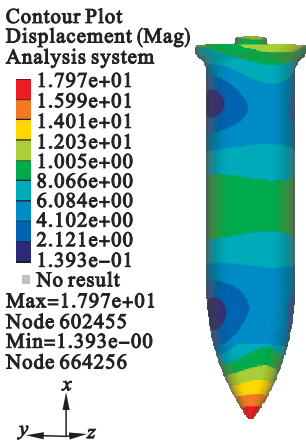


图 2 穿透器第 7 阶振型云图
Fig. 2 The seventh order vibration mode of penetrator

1.2 材料参数选择

为了进行后续的力学分析, 这里给出穿透器各零部件的材料属性. 其中, 穿透器壳体和潜头及分离端盖为合金钢, 内部安装模块为铝合金 7075. 减振阻尼层材料为聚氨酯和橡胶. 见表 1.

表 1 穿透器材料属性
Table 1 Material properties of penetrator

部件名称	弹性模量 GPa	泊松比	密度 $\times 10^9$ $t \cdot mm^{-3}$	剪切模量 MPa	阻尼因子
外壳潜头及分离端盖	210	0.28	7.7	—	—
安装模块	72	0.33	2.8	230	—
减振结构	—	0.45	10.0	1.5	1.05
工装模块	210	0.28	7.7	—	—

1.3 工况设定及结果分析

由于穿透器在空中飞行过程中没有固定约束, 其工况和自由状态类似, 因此在计算模态时并未对穿透器施加约束; 取穿透器的自由模态进行计算, 得到其固有频率及振型云图. 其中前 6 阶模态为刚体模态, 对应的振型分别是穿透器的 3 个刚体平动自由度和 3 个刚体转动自由度, 振动过程中没有产生弯曲和扭转变形, 对应的固有频率理论值为 0 Hz. 而从第 7 阶振型开始才是弯曲和扭转的组合振型弹性体模态. 在不考虑刚度条件改变时, 不需要用到刚体模态. 为了研究穿透器减振效果, 本文选取了弹性体模态进行分析, 图 2 为第 7 阶振型云图.

穿透器的第 7 阶到第 14 阶模态振型描述见表 2.

表 2 穿透器模态振型描述		
Table 2 Modal shape description of penetrator		
阶数	频率/Hz	振型描述
7	2 076	绕 z 轴扭转
8	2 086	绕 y 轴扭转
9	2 731	外壳侧壁拉伸压缩变形
10	2 733	外壳侧壁拉伸压缩变形
11	2 750	沿 x 轴压缩
12	3 617	前部扭转变形
13	3 617	前部扭转变形
14	3 836	沿 x 轴压缩

根据穿透器的振型特征及云图分析可知:穿透器的局部振型主要集中在减振结构上,说明此种材料可以很好地起到减振效果。

工作模块第 7 阶轴向振型的频率为 2 076 Hz,穿透器在飞行过程中的工作频域远远低于此值,因此在工作过程中工作模块不会发生共振,不会由于振动响应过大对结构造成损坏,影响其正常工作。

2 冲击响应试验分析

2.1 模型设定

为了验证内部缓冲阻尼结构的减振性能,利用 HYPERMESH 软件建立了冲击验证试验数值模型,如图 3 所示。它主要由穿透器本体和冲击试验工装两部分组成。冲击响应仿真模型是在模态分析模型的基础上完成的。在原来有限元模型上施加工装,并用刚性单元(RBE2)相连来模拟螺栓连接。在工装底部与冲击台相连的螺栓孔处建立固定约束点 (SPC),作为模拟冲击响应载荷的输入点。

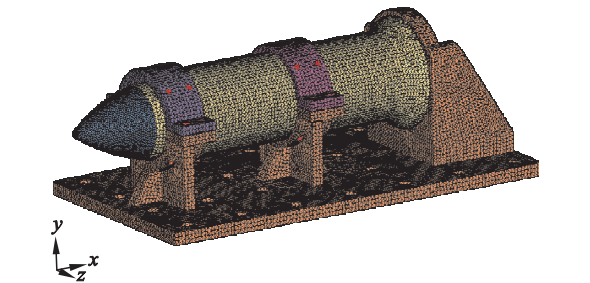


图 3 穿透器冲击响应有限元模型
Fig. 3 Finite element model of the impact response of the penetrator

冲击仿真试验中,穿透器各零部件的材料设置如 1.2 节所述,工装采用合金钢。

冲击仿真采用鉴定级冲击试验工况,其试验条件如表 3 所示。

表 3 冲击试验条件		
Table 3 Impact test conditions		
频率范围/Hz	起始段 100 ~ 400	峰值段 400 ~ 1000
冲击谱值	以斜率 + 12dB/oct 增加 峰值 400g	
试验方向	x	
冲击次数	x 向 1 次	

2.2 结果分析

将有限元模型导入 Nastran 软件进行求解,用 Patran 进行后处理,得到穿透器在 x 方向的冲击响应谱分析。当对工装底板施加 x 方向的冲击激励时,穿透器的潜头、外壳、工作模块和减振阻尼层的加速度响应云图如图 4 所示。

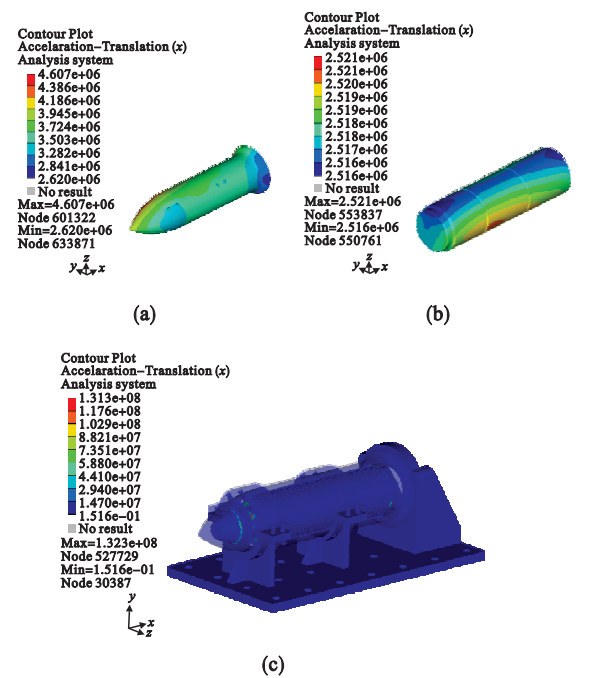


图 4 x 向冲击激励时的加速度响应
Fig. 4 Acceleration response to x-direction excitation
(a) —穿透器外壳和潜头; (b) —工作模块;
(c) —冲击试验整体振型。

- 从上述 x 向加速度响应云图可以看出:
- 1) 穿透器的最大加速度发生在中部缓冲结构的前端,最大值为 13 230g,放大倍数约为 22;
 - 2) 穿透器外壳和潜头的最大加速度响应发生在潜头侧部,最大值为 460.7g,放大倍数约为 0.77;
 - 3) 工作模块的最大加速度响应发生在中间模块的侧壁,最大值为 252.1g,放大倍数约为 0.42;
 - 4) 较大的加速度响应发生在缓冲和减振结构上,说明缓冲减振结构达到了预期的效果。

3 侵彻分析

3.1 模型参数设定

在进行侵彻分析时,穿透器本体沿用了模态仿真时所用的模型,仿真中基于穿透器三维模型进行建模,设置穿透器总长为 600 mm,直径为 140 mm. 使用 Hypermesh 对模型进行网格划分,只取弹体和靶体介质的对称模型进行建模. 靶体模型设定为圆柱形,考虑到计算的精确性和网格粗细的耗时性,在靶体中心半径为 5 m 区域内网格划分相对密集,区域外侧网格划分比较稀疏,并且对网格密集区和稀疏区交界处的网格进行过渡处理,避免应力波在交界面上的反射,同时加快计算速度. 为保证在侵彻过程中靶体不发生位置移动,建立模型时在靶体结构的四周采用对称约束,同时在靶体模型底边施加全约束,约束地面节点的六个自由度. 穿透器本体与靶体之间采用侵彻接触,假设靶体顶部网格为自由边界,其他为无限大区域,同时施加无反射边界约束,用以消除膨胀波和剪切波的影响^[7]. 由于穿透器在飞行过程中受到未知环境因素的影响,在与目标面接触时可能达不到理想的垂直侵彻状态,存在一定的入射角度. 而入射角度的大小又直接影响到穿透器的侵彻能力,本文针对穿透器在垂直状态、入射角为 45°和 60°三种状态下进行侵彻仿真. 在以上假设情况下建立的侵彻有限元模型如图 5 所示.

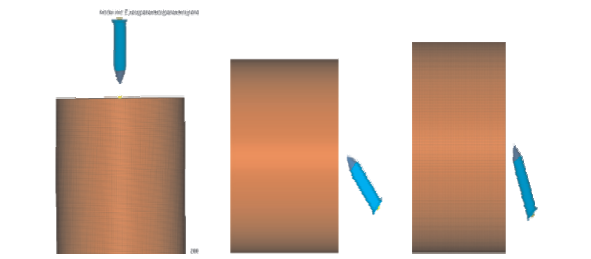


图 5 不同入射角侵彻分析有限元模型
Fig. 5 Finite element model for analysis of penetration with different incidence angles

模拟侵彻过程所选用的穿透器的材料参数见表 1;靶体选用土壤材料,参数如表 4 所示.

3.2 数值模拟结果分析

斜侵彻是穿透器撞击目标时不可避免的一种运动状态,穿透器在撞击前的飞行过程中由于环境因素的影响可能产生一定的偏斜角度. 这样就使得穿透器侵彻时产生不对称阻力,从而在侵彻过程中产生偏航,减小侵彻深度. 为了进一步分析入射角度对穿透器侵彻的影响程度,有必要对穿

透器斜侵彻进行运动分析,将有限元模型提交到 LS-DYNA 程序进行求解,利用 LS-PREPOST 程序进行后处理得到如图 6 所示结果.

表 4 靶体材料参数
Table 4 Material parameters of target

密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.8	A_0	3.3×10^{-3}
剪切模量/ kPa	0.16	A_1	1.31×10^{-7}
体积卸载模量/ GPa	0.132 8	A_2	0.123

注: A_0, A_1, A_2 均为塑性屈服函数的常数.

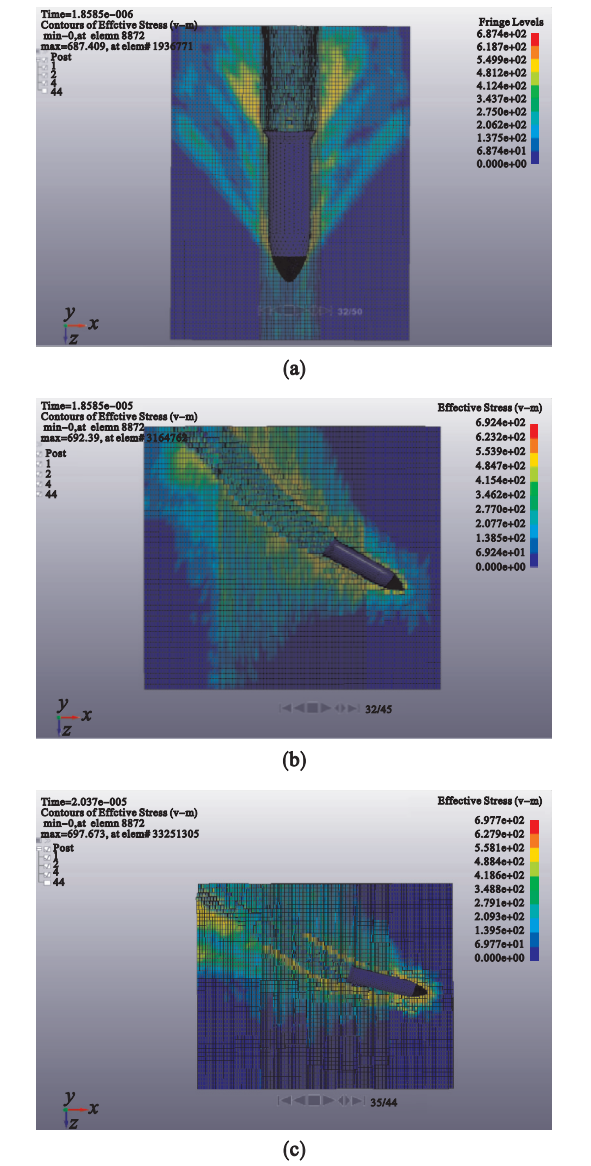


图 6 不同入射角穿透器侵彻云图
Fig. 6 Penetration nephogram with different incidence angles
(a) —垂直侵彻;(b) —入射角度为 45°;
(c) —入射角度为 60°.

由穿透器在土中的运动轨迹(图 6)可以看出,穿透器侵入靶体后,靶体内部分单元被删除,这说明靶体内部分质点被穿透器排开,排开主要是依靠潜头部分来完成的,而靶体的内部阻力也

主要作用在穿透器潜头上.同时可以看出,垂直侵彻时运动轨迹基本为一条直线;当斜侵彻发生时,随着入射角的增大,穿透器轨迹的偏转角度逐步增大,当入射角为 60° 时偏航最大.在开始阶段,穿透器在靶体中的运动轨迹近似于一条直线,此后穿透器的运动轨迹发生偏转.这是因为在斜侵彻中,穿透器的阻力主要来自头部,阻力可以分解成两个分力:一个是沿 z 方向的正面阻力,这个力使穿透器的下潜速度降低;另一个是沿 y 方向的法向阻力.在这两个力的作用下会导致穿透器产生一个偏转力矩,从而在侵彻过程中使穿透器偏离航线.由于初始速度一定,入射角越大, z 方向的速度分量越小;同时由于入射角越大,偏航情况越严重,这就使得侵彻深度降低,从而出现图 7 中所示的侵彻深度曲线.

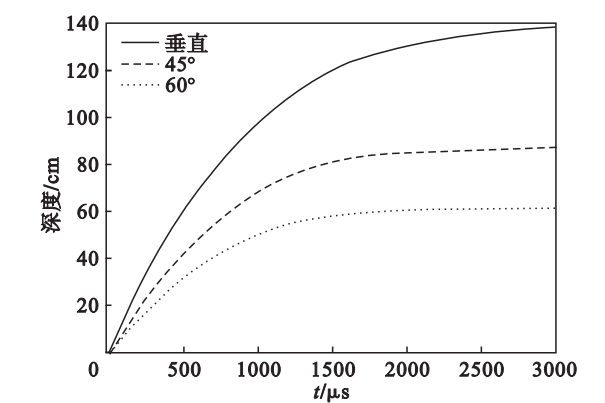


图 7 穿透器在 z 方向的侵彻深度
Fig. 7 Penetrating depth in the z direction

在穿透器刚开始侵彻时,其所受的阻力非常大,穿透器的速度急剧下降,如图 7 所示.因为这时各个角度下穿透器偏航均很小,而且其所受的阻力主要来自头部,所以加速度和速度变化基本一致.但是随着侵彻深度的逐步增加,穿透器在阻力矩的作用下会发生偏转,入射角为 60° 时偏转最大.穿透器的加速度随着入射角的增加不断增大,入射角为 60° 时穿透器的加速度值最大,在侵彻后面阶段速度下降最快.斜侵彻的侵入深度明显小于垂直侵彻的深度,也说明穿透器所受的加速度明显大于垂直侵彻.加速度最大值出现在侵彻靶体阶段,这是因为穿透器发生偏转,就会使穿透器与靶体作用面积增大,导致其所受的阻力增加,其载荷也随之增加.

4 结 论

本文针对深空多模式探测中的穿透器结构进行了仿真分析,通过撞击穿透器的建模、模态分析、冲击分析,以及侵彻分析,为穿透器的防护设计奠定了基础.撞击时的速度相同,穿透器垂直侵彻的深度大于斜侵彻的深度,当穿透器斜侵彻土壤时,穿透器的运动轨迹会在一定程度上偏离航向,且倾斜角度越大偏离越严重;所以若要更加有效地穿透到月球内部,应该通过控制穿透器的飞行轨迹,尽量减小穿透器的入射角度.由冲击试验可知,穿透器工作模块的加速度响应小于输入值,说明穿透器的减振层在撞击后可以有效地起到隔振作用,保护内部工作模块的完整性.

参考文献:

[1] 陈颖,周璐,王立.一种火星多模式组合探测任务设想[J].深空探测学报,2014,1(2):156-160.
(Chen Ying,Zhou Lu,Wang Li. A conception of Mars multi-mode combination exploration mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*,2014,1(2):156-160.)

[2] Blume W H. Deep impact mission design [J]. *Space Science Reviews*,2005,117(1/2):23-42.

[3] Linkin V,Harri A M,Lipatov A, et al. A sophisticated lander for scientific exploration of Mars: scientific objectives and implementation of the Mars-96 Small Station [J]. *Planetary and Space Science*,1998,46(6/7):717-737.

[4] 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.

[5] Yamada R,Yamada I,Shiraishi H, et al. Capability of the penetrator seismometer system for lunar seismic event observation[J]. *Planetary and Space Science*,2009,57(7):751-763.

[6] 张兴华,周璐,成正爱,等.火星穿透器结构与侵彻数值模拟研究[C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第十届学术年会论文集.北京:中国科学技术出版社,2013.
(Zhang Xing-hua,Zhou Lu,Cheng Zheng-ai, et al. Structure design and penetration numerical simulation for Mars probe [C]//Proceedings of the Tenth Annual Conference of the Deep Space Exploration Technology Specialized Committee of China Aerospace Society. Beijing:China Press of Science and Technology,2013.)

[7] 李勇.弹体侵彻过程仿真及影响因素分析[D].南京:南京理工大学,2014.
(Li Yong. The simulation of projectile penetration process and analysis of influencing factors [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology,2014.)