

文章编号: 2095-4980(2017)01-0115-05

钢板侵彻下电雷管损伤特性的数值模拟

李创新, 刘振宇, 刘 鹏, 严凤斌

(武汉军械士官学校, 湖北 武汉 430075)

摘 要: 利用ANSYS/LS-DYNA数值计算软件, 研究弹体冲击碰撞钢质靶板过程中某型号电雷管的损伤特性。结果表明, 在冲击碰撞过程中, 子弹受到230 000 g , 45 μs 的过载加速度, 导致电雷管火工品各部件之间发生相对移动, 其外壳受到较大应力, 药柱最大压缩幅度约2.7%, 火工品的损伤模式为机械材料损伤。仿真计算结果对电雷管的损伤特性研究和结构防护具有重要的指导意义。

关键词: 钢板侵彻; 高 g 值; 电雷管; 损伤

中图分类号: TN911.72; TJ45⁺2.3

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201701.0115

Simulation on damage property of electric detonator under steel penetration

LI Chuangxin, LIU Zhenyu, LIU Peng, YAN Fengbin

(Wuhan Ordnance N.C.O Academy of PLA, Wuhan Hubei 430075, China)

Abstract: Initiators function as the starting unit of ammunition, and thus their reliability is crucial to the combat efficiency of the weapon system. ANSYS/LS-DYNA numerical calculation software is used to study the damage characteristics of a certain type of electric detonators when the bullets impact on the steel target plates. The results show that the bullet is subjected to an overload acceleration of 230 000 g and 45 μs during the impact, leading to the relative motion of the electric detonator components; the shell suffers a large stress and the maximum compression rate of the grain is about 2.7%; the damage mode of the initiators is the mechanical material damage. The simulation results are instructive to the damage characteristics and structural protection research of the electric detonators.

Keywords: steel penetration; high- g ; electric detonator; damage

作为弹药的首发器件和装置, 火工品在武器系统中起着至关重要的作用^[1-2]。随着未来高技术战争的发展和战场环境的变化, 打击诸如地下掩体、加固装甲、加固工事和舰艇甲板等硬目标、深层次目标将成为常态^[3-6]。因此, 火工品大多是在高速冲击和侵彻等高过载条件下所形成的高温、高压和高速变形等状态下发挥其效能, 在这种环境下, 火工品的安全性和可靠性直接关系到弹药的安全性和可靠性。目前, 测试火工品在高过载条件下的稳定性主要有2种方法: a) 采用实弹射击, 优点是实验条件真实, 缺点是代价高昂; b) 采用霍普金森杆或者空气炮等实验装置模拟高过载条件, 对火工品进行测试, 优点是试验费用大大降低, 缺点是模拟的高过载条件离真实的实弹射击有一定差距。数值仿真的方法被广泛地应用于弹体侵彻钢板或混凝土等能够产生大变形、高度非线性冲击碰撞实验中^[7-14]。本文运用 ANSYS/LS-DYNA 数值仿真软件模拟弹体撞击钢质靶板过程中电雷管的受力情况和结构变化, 为电雷管在高 g 值条件下的损伤防护提供依据。因此, 对弹体冲击钢质靶板过程中火工品的损伤特性进行数值模拟分析具有重要的现实意义。

1 程序算法简介

LS-DYNA 作为世界上最著名的通用显式动力分析程序, 能够模拟真实世界的各种复杂问题, 特别适合求解各种二维、三维非线性结构的高速碰撞、爆炸和金属成型等非线性问题, 同时可以求解传热、流体和流固耦合问题。由于试验属于撞击试验, 需要分析瞬态动力问题, 因而要使用 LS-DYNA 显式动力分析功能, 其求解的基本原理是中心差分方法^[15]。

收稿日期: 2015-09-30; 修回日期: 2016-10-20

基金项目: 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ11 0271)

对于结构系统各节点在第 n 个时间步结束时刻 t_n 的加速度向量:

$$\mathbf{a}(t_n) = \mathbf{M}^{-1} [\mathbf{P}(t_n) - \mathbf{F}^{\text{int}}(t_n)] \quad (1)$$

式中: $\mathbf{P}$ 为第 n 个时间步结束时刻 t_n 结构上所施加的节点外力向量; $\mathbf{F}^{\text{int}}$ 为 t_n 时刻的内力矢量, 由下面几项构成:

$$\mathbf{F}^{\text{int}} = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \sigma d\Omega + \mathbf{F}^{\text{hg}} + \mathbf{F}^{\text{contact}} \quad (2)$$

式(2)右边的 3 项依次为: t_n 时刻单元应力场等效节点力、沙漏阻力和接触力分量。

根据中心差分法的基本思路, 加速度由速度的一阶中心差分给出, 速度由位移的一阶中心差分给出。于是有:

$$\frac{v(t_{n+1/2}) - v(t_{n-1/2})}{\frac{1}{2}(\Delta t_{n-1} + \Delta t_n)} = \mathbf{a}(t_n) \quad (3)$$

$$\mathbf{u}(t_{n+1}) - \mathbf{u}(t_n) / \Delta t_n = v(t_{n+1/2}) \quad (4)$$

式中时间步的步长以及时间步开始、结束的时间点方程为:

$$\Delta t_{n-1} = t_n - t_{n-1} \quad (5)$$

$$\Delta t_n = t_{n+1} - t_n \quad (6)$$

$$t_{n-1/2} = \frac{t_n + t_{n-1}}{2} \quad (7)$$

$$t_{n+1/2} = \frac{t_{n+1} + t_n}{2} \quad (8)$$

于是, 节点速度向量可以由程序计算出的加速度结合差分公式表示, 节点位移向量又可以由节点速度向量结合差分公式表示, 即:

$$\mathbf{v}(t_{1/2}) = \mathbf{v}(t_{n-1/2}) + \frac{1}{2} \mathbf{a}(t_n) (\Delta t_{n-1} + \Delta t_n) \quad (9)$$

$$\mathbf{u}(t_{n+1}) = \mathbf{u}(t_n) + \mathbf{v}(t_{n+1/2}) \Delta t_n \quad (10)$$

新的几何构型由初始 x_0 加上位移增量 $\mathbf{u}$ 获得, 即:

$$\{x_{t+\Delta t}\} = \{x_0\} + \{u_{t+\Delta t}\} \quad (11)$$

该程序的单元众多, 每种单元又有多种理论算法可供用户选择, 同时还拥有上百种金属和非金属材料模型, 并考虑了材料的失效、损伤、蠕变、粘性、各向异性、温度相关性和应变率相关性, 故其全自动接触分析功能强大, 可对弹体高速碰撞目标结构组件后的动力响应、打击深度等进行深入的模拟分析。其中, 由于考虑了材料失效和侵蚀接触, 该程序能够较为成功地进行高速穿甲弹对钢体的穿甲或打击的数值模拟计算。

2 数值模拟

2.1 材料参数的选择和模型建立

该模型由钢板、子弹和某型号电雷管(包括外壳、电极塞和药柱)组成, 电雷管组件的规格为 $\phi 5 \text{ mm} \times 12.7 \text{ mm}$, 子弹规格为 $\phi 36.5 \text{ mm} \times 97 \text{ mm}$, 钢板的尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 。其中, 钢板、子弹、外壳和电极塞均采用弹性材料模型, 电雷管的药柱采用弹塑性材料模型, 具体试验参数见表 1。

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

component	density $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Young modulus E/Pa	Poisson's ratio μ	tangent modulus E_T/Pa	failure modulus E_s/Pa	material model
steel target	7 800	210	0.29	—	—	linear elastic
bullet	7 800	210	0.29	—	—	linear elastic
shell	7 800	210	0.29	—	—	linear elastic
electric plug	7 800	210	0.29	—	—	linear elastic
powder column	8 930	1.17×10^{11}	0.35	4×10^8	1×10^8	elastic-plastic

由于采用拉格朗日算法有利于跟踪物体的运动, 容易识别物体的界面, 且能使界面保持清楚, 这对挤进问题的接触处理和新界面的生成都非常有利, 而且由于穿甲弹和防护甲板具有轴对称的结构特点, 故在使用 ANSYS/LS-DYNA 进行数值计算时可以进行简化, 穿甲弹和防护甲板均建立四分之一模型, 使用 Lagrange 网格, 采用轴对称算法和 $\text{cm-g-}\mu\text{s}$ 单位制建模, 数值仿真的三维模型见图 1。

2.2 仿真结果与分析

根据上述模型参数, 子弹在 60 m/s 速度冲击钢质靶板过程中, 子弹受到的加速度曲线见图 2。在冲击钢质靶板过程中, 子弹受到的加速度峰值约为 230 000 g, 加速度脉冲的宽度为 45 μs 左右。在此条件下, 火工品组件所受到的过载加速度曲线见图 3。

通过与子弹的加速度曲线相比较后发现, 在冲击加载的过程中, 电雷管所受到的加速度要远远大于子弹的过载加速度峰值, 约为 800 000 g, 但其加

速度脉宽小于子弹的过载加速度脉宽, 约为 10 μs 。这说明, 在冲击碰撞的过程中, 各个相对独立的部件之间由于质量或尺寸等的差异, 导致其受到的过载峰值互不相同。

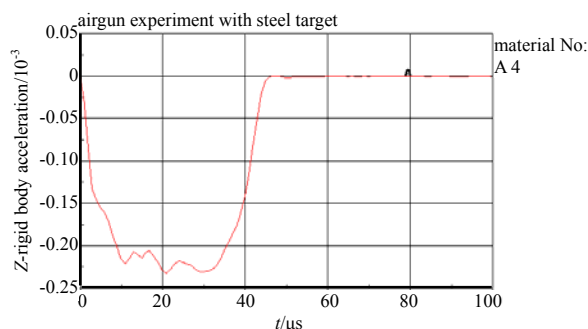


Fig.2 Acceleration curve of ball
图 2 子弹的加速度曲线

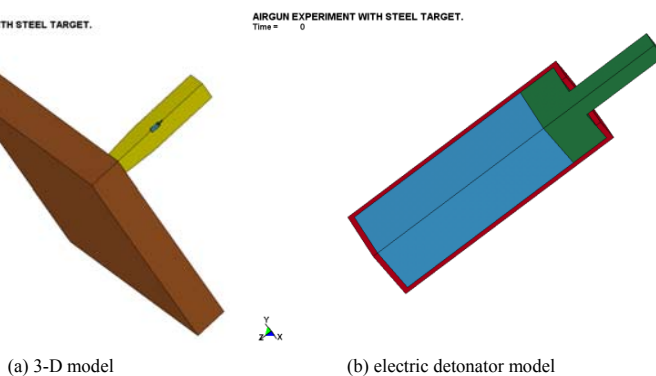


Fig.1 Three dimensional model of numeric simulation
图 1 数值仿真的三维模型

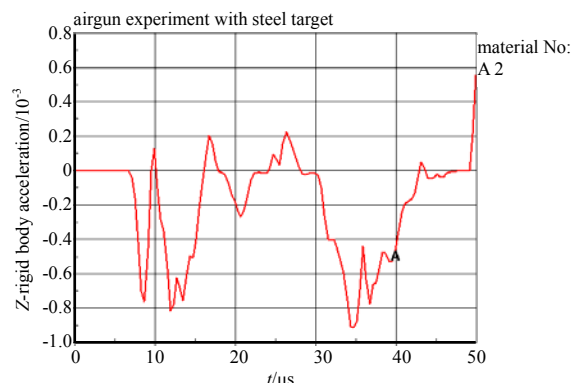


Fig.3 Overloading acceleration curve of powder column
图 3 药柱的过载加速度曲线

在该过载加速度峰值的加载下, 电雷管的应力云图见图 4。图 4 表征了不同时刻电雷管内部的应力分布。

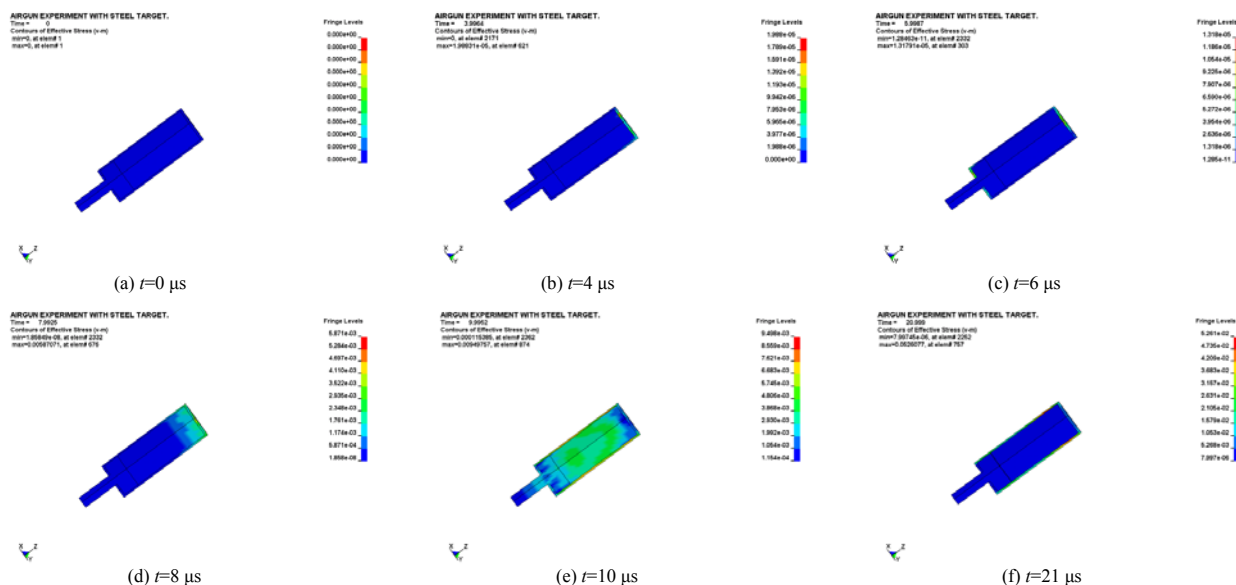


Fig.4 Available stress nephogram of initiator's components at different time
图 4 不同时刻火工品组件的有效应力云图

根据图 3 的结果, 电雷管应该在 8 μs 时刻受到应力加载, 但是由图 4 可看出在 8 μs 之前其已经处于受力状态。说明在运动过程中, 火工品组件已经与子弹发生相互作用。另一方面, 在该型号的电雷管组件的各部分中, 外壳所受到的应力较大, 因此在实际的电雷管设计中, 应该充分考虑外壳的防护。图 5 为电雷管组件在高加速度

加载之后的结构图,可以看出经过高 g 值的加载之后,电雷管内部结构的各个部分之间发生了位移。由于各个部分之间的相对运动,电雷管的药柱发生了塑性变形——其长度减小,见图6,在速度为 60 m/s 时,其长度从 0.75 cm 减少到大约 0.735 cm,压缩率约 2%。为了研究不同速度下药柱压缩量的变化规律,分别在 30 m/s, 45 m/s, 60 m/s, 75 m/s, 90 m/s, 105 m/s, 120 m/s 和 135 m/s 的速度下进行子弹撞击钢质靶板过程的数值模拟,见图7。结果表明随速度的增加,药柱长度压缩量增加,但增幅逐渐减少;药柱最大压缩幅度约 2.7%。因此对于那些极为敏感的装药来说,在高加速度加载的过程中很容易发生早炸等现象,严重影响其应有性能的发挥。

AIRGUN EXPERIMENT WITH STEEL TARGET.
Time = 36.999

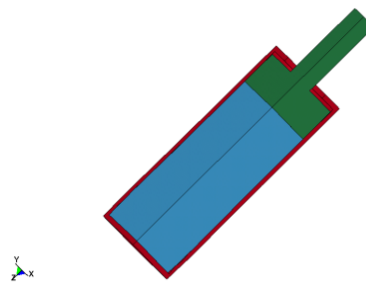


Fig.5 Structure changes of electric detonator after loading

图5 加载之后电雷管的结构变化图

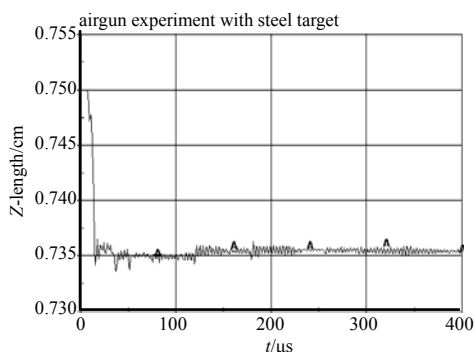


Fig.6 Change of powder column's length
图6 药柱的长度变化

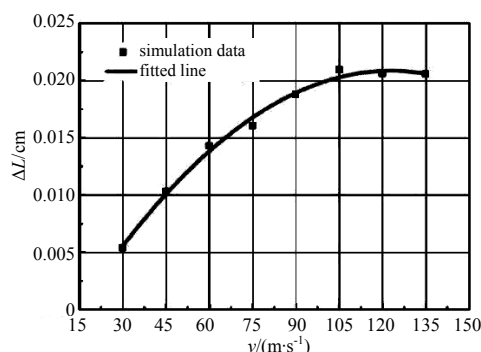


Fig.7 Relationship between length change of powder column and speed
图7 药柱长度变化与速度的关系

3 结论

本文利用 ANSYS/LS-DYNA 数值仿真软件,以某型号电雷管为样品,研究弹体冲击碰撞钢质靶板过程中该类型电雷管的损伤特性。结果表明:在速度为 60 m/s 冲击碰撞过程中,子弹受到峰值为 230 000 g、脉宽为 45 μs 的加速度过载,在该过载条件下,电雷管火工品各部件之间发生相对移动,其外壳受到较大应力,药柱受到压缩,尺寸减小;随速度的增加,药柱长度压缩量增加,但增幅逐渐减少。因此,数值模拟过程对于电雷管的损伤特性研究和结构防护具有重要指导意义。

参考文献:

- [1] 蔡瑞娇. 火工品设计原理[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1999. (CAI Ruijiao. Design Principles of Initiating Explosive Devices[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press, 1999.)
- [2] 戴实之. 火工技术[Z]. 北京:兵器工业部教材编审室, 1987. (DAI Shizhi. Pyrotechnic technology[Z]. Beijing:Teaching Materials Editing Room of Ministry of Ordnance Industry, 1987.)
- [3] 周义,王永良,王自焰. 地下堡垒克星—美军钻地弹的应用与发展[J]. 飞航导弹, 2005(4):41-45. (ZHOU Yi,WANG Yong liang,WANG Ziyang. Bunker buster—the application and development of earth penetrator of the USA army[J]. Cruise Missile, 2005(4):41-45.)
- [4] 李浩. 美国钻地弹现状及发展趋势[J]. 环球飞行, 2006(10):64-71. (LI Hao. The status and development trend of the United States of America earth penetrator[J]. World Flight, 2006(10):64-71.)
- [5] 何唐甫,卢晓江,刘恒,等. 美国坚实型钻地核弹的发展前景[J]. 中国人民防空, 2006(9):61-62. (HE Tangfu,LU Xiaojang, LIU Heng,et al. The prospect of the United States of America solid type nuclear earth-penetrating development[J]. Chinese People's Air Defense, 2006(9):61-62.)
- [6] 刘永远,姜正平,张进. 钻地弹及其发展趋势[J]. 飞航导弹, 2006(3):34-37. (LIU Yongyuan,JIANG Zhengping,ZHANG Jin. Earth penetrator and its development trend[J]. Cruise Missile, 2006(3):34-37.)
- [7] 杨海波,徐利明,张笑. 穿甲弹打击双层防护甲板数值模拟计算[J]. 四川兵工学报, 2009,30(4):52-54. (YANG HaiBo, XU Liming,ZHANG Xiao. The numerical simulation of double protective deck hit by armor piercing projectile[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2009,30(4):52-54.)

- [8] 纪霞,王利. 弹丸侵彻多层靶板数值分析[J]. 探测与控制学报, 2006,28(2):42-45. (JI Xia,WANG Li. The numerical analysis of multi-layer target penetrated by the projectile[J]. Journal of Detection & Control, 2006,28(2):42-45.)
- [9] FORRESTAL M J,FREW D J,HICKERSON J P,et al. Penetration of concrete targets with deceleration-time measurements[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003,28(5):479-497.
- [10] 虞青俊,李玉龙,金莲宝,等. 侵彻多层混凝土目标弹丸过载特性研究[J]. 探测与控制学报, 2007,29(1):13-17. (YU Qingjun,LI Yulong,JIN Lianbao. Research of deceleration-time curves during penetration of multi-plate concrete targets[J]. Journal of Detection & Control, 2007,29(1):13-17.)
- [11] FREWA D J,FORRESTALA M J,CARGILE J D. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006,32(10):1584-1594.
- [12] FORRESTAL M J,FREW D J,HANCHAK S J,et al. Penetration of grout and concrete targets with ogive-nose steel projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 1996,18(5):465-476.
- [13] RADIN J,GOLDSMITH W. Normal projectile penetration and perforation of layered targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 1988,7(2):229-259.
- [14] LIU X,LIU J,CHENG W. An experimental technique to measure projectile deceleration history during normal penetration[J]. Acta Mechanica Souda Sinica, 2000,13(2):112-118.
- [15] 尚晓江,苏建宇,王化锋. ANSYS LS-DYNA 动力分析方法与工程实例[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2008. (SHANG Xiaojiang,SU Jianyu,WANG Huafeng. Dynamic Analysis Method and Engineering Example of ANSYS LS-DYNA[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2008.)

作者简介:



李创新(1978-), 男, 湖南省永州市人, 硕士, 讲师, 主要从事弹药仓储技术、火工品性能测试技术教学与科研, 已发表学术论文 20 余篇, 其中 EI 检索 1 篇, 中文核心 4 篇.email: lcxjxsg@163.com.

刘振宇(1970-), 男, 山东省青岛市人, 本科, 副教授, 主要从事弹药仓储技术和弹药检测技术教学与科研.

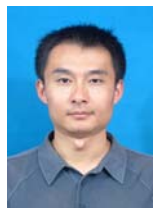
刘 鹏(1979-), 男, 重庆市人, 硕士, 讲师, 主要从事弹药仓储技术教学与科研.

严凤斌(1986-), 男, 河南省周口市人, 硕士, 讲师, 主要从事弹药仓储技术教学与科研.

(上接第 109 页)

- [14] PERIS-LOPEZ P,HERNANDEZ-CASTRO J C,ESTEVEZ-TAPIADOR J M E,et al. LMAP:a real lightweight mutual authentication protocol for low-cost RFID tags[J]. Proc. Second Workshop RFID Security, 2006(10):6.
- [15] JUANG W S,TSENG H C,SHUE Y Y. An efficient and privacy protection multi-server authentication scheme for low-cost RFID tags[C]// IEEE 2010 International Computer Symposium(ICS). Tainan,China:IEEE, 2010:279-283.

作者简介:



白 煜(1978-), 男, 山西省五台县人, 博士, 高级工程师, 研究方向为信号处理技术、信息安全.email: baiyu1978@tju.edu.cn.

滕建辅(1954-), 男, 山东省昌邑县人, 教授, 博士生导师, 研究方向为滤波器的理论与设计、电路设计、信号处理技术.

张立毅(1963-), 男, 山西省忻州市人, 教授, 博士生导师, 研究方向为信号检测与处理、智能计算与信息处理.

刘彦龙(1987-), 男, 河北省邯郸市人, 在读硕士研究生, 研究方向为信息安全.