

doi: 10.7690/bgzdh.2021.10.008

## 2 种方式装药弹丸侵彻混凝土的安全性仿真

王佳乐, 杨富锋, 王 燕, 刘 伟, 黎 超

(南京理工大学发射动力研究所, 南京 210094)

**摘要:** 为获得弹丸炸药装药动态响应规律, 以某型号舰炮为原型, 利用 LS-DYNA 进行原比例建模。构建圆柱形和圆台形 2 种装药方式的弹丸模型, 对其侵彻混凝土靶板过程进行仿真, 获得炸药装药应力曲线及炸药爆轰后的压力曲线。结果表明: 圆柱形装药弹丸未完全穿透靶板, 发生早炸; 圆台形装药弹丸完全穿透靶板, 未发生爆轰; 圆台形装药方式可有效减小侵彻时装药与弹壳相互碰撞的机率, 提高侵彻安全性。

**关键词:** 弹丸侵彻; LS-DYNA 仿真; 炸药装药; 动力学响应; 侵彻安全性

**中图分类号:** TJ410.5 **文献标志码:** A

## Safety Simulation of 2 Kinds of Charge Projectile Penetrating Concrete

Wang Jiale, Yang Fufeng, Wang Yan, Liu Wei, Li Chao

(Institute of Launch Dynamics, Nanjing University of Science &amp; Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to obtain the dynamic response law of projectile explosive charge, a certain type of naval gun is taken as the prototype, and the original scale modeling is established by LS-DYNA. The process of penetration into concrete target plate was simulated by building 2 kinds of projectile models of cylindrical and truncated cone-shaped charging modes, and the stress curve of explosive charge and the pressure curve of explosive detonation were obtained. The results show that the cylindrical charge projectile does not penetrate the target completely and early burst occurs. The truncated cone-shaped projectile completely penetrated the target plate without detonation. The simulation results show that the truncated cone-shaped charge can effectively reduce the collision probability between the charge and the shell, and improve the penetration safety.

**Keywords:** projectile penetration; LS-DYNA simulation; explosive charge; dynamic response; penetration safety

### 0 引言

对弹丸侵彻的研究是各国研究人员研究的重点之一。弹丸在侵彻过程中具有高速、高温、高压的特性; 同时, 炸药装药也受到高应变、高过载等环境考验。如果弹丸在穿透之前发生早裂早炸现象, 会大大降低其毁伤能力, 发生各种安全性事故<sup>[1]</sup>; 因此, 研究侵彻过程中弹丸炸药装药动力学响应具有重大意义。

B. ROBINS 在 1742 年针对弹丸侵彻靶板开展研究<sup>[2]</sup>。随后大量的侵彻试验及经验公式被提出<sup>[3-4]</sup>。D. J. FREW 等<sup>[5-6]</sup>做了大量的侵彻试验, 得出了包括弹头形状、靶板材料等对侵彻的影响规律; 国内侵彻试验始于 1993 年, 建立了对应的经验公式<sup>[7-9]</sup>。2009 年, 陈文等<sup>[10]</sup>回收侵彻后的弹丸内装药样品, 发现该种新型炸药装药在高速侵彻后头部和尾部外观出现明显损伤, 中间损伤不明显, 损伤程度随侵彻速度增加而变大; 李媛媛等<sup>[11]</sup>研制出一种可满足抗高过载的不敏感炸药, 并进行侵彻安全

性试验, 弹丸侵彻后炸药未发生爆炸, 弹体完整; 2018 年, 彭泓铮等<sup>[12]</sup>对 TKX-50 装药和 HMX 装药的安定性进行侵彻安全性试验, 回收弹丸及装药时发现: TKX-50 装药在侵彻过程中部分燃烧, 剩余大量残药; HMX 装药全部燃烧, 没有残药。试验法存在很多优点, 但其成本高、危险系数大、测试数据有限、周期长, 且需回收完整弹丸进行测试分析; 因此, 要结合数值模拟的方法来综合对比分析, 才能得出结论。

对于侵彻问题的数值方法分析通常使用 ANSYS/LS-DYNA 动力学软件进行仿真模拟。许多学者利用仿真法对典型的装药弹丸进行了侵彻安全性研究。乔相信等<sup>[13-14]</sup>利用 LS-DYNA 模拟了球形头部弹丸侵彻运动金属靶板及弹丸侵彻铝合金靶板过程中装药的应力变化, 发现侵彻运动靶板时, 弹丸会发生翻转, 且随着靶速度提高, 翻转幅度减小, 侵彻过程中装药头部发生明显塑性变形, 中部受损相对较轻; 贾宪振等<sup>[15]</sup>则使用动力学计算程序 AUTODYN 分析了弹丸侵彻混凝土过程中炸药所受

收稿日期: 2021-06-21; 修回日期: 2021-07-25

基金项目: 国家重点专项(14021002020202)

作者简介: 王佳乐(1996—), 男, 内蒙古人, 硕士, 从事侵彻安全性、装药安全性研究。E-mail: ILDWangjl@njust.edu.cn.

压力变化,发现弹丸尾部壳体和装药之间会出现强烈碰撞。数值仿真的方法较为方便,可详细地分析在侵彻过程中弹丸的速度、加速度、靶板的应力、应变随时间变化的规律,已成为研究侵彻和冲击问题的主要手段。

综上所述,国内外对侵彻问题研究较为成熟,但对弹丸装药侵彻安全性问题研究不多。由于试验法存在一定缺陷,目前大多采用数值仿真对侵彻问题进行研究。对于仿真的模型,常简化为缩比例半球形弹丸模型,而真实的弹丸头部是有一定的曲率比;因此,笔者以某型舰炮为原型,按照与真实弹丸相同比例进行侵彻混凝土靶板仿真。建立 2 种装药方式的弹丸模型,充分考虑弹丸头部的曲率半径和弹体长度,可较为真实地仿真侵彻过程,获得的弹丸炸药装药动态响应规律更为可靠。炸药装药的侵彻安全性问题可通过动态响应规律进行分析。

## 1 2 种装药方式的弹丸设计

圆柱形装药弹丸的结构如图 1 所示。

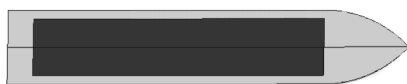


图 1 圆柱形装药弹丸

装药弹丸在侵彻时,弹壳厚度的大小会影响炸药装药的受力情况。如果弹壳足够厚,则弹体不会发生破坏,侵彻能力提高。壳厚  $h_p$  可由如下公式估算<sup>[16]</sup>:

$$h_p = h(\delta_{Si}^D / \delta_{VTP})(\tilde{m}/m)。 \quad (1)$$

式中:  $\tilde{m}$  为弹体前半部份的质量;  $m$  为弹体总质量;  $\delta_{Si}^D$  是靶元材料的动力剪切强度;  $\delta_{VTP}$  为弹体的拉伸屈服强度。

由上式可看出:弹体向前运动,  $\tilde{m}$  增大,所需弹壳厚度  $h_p$  也增大,弹壳变厚。靠近弹体尾部的弹壳变厚,可提高其保护能力。建立如图 2 所示的弹丸模型进行侵彻仿真,药柱长度及药柱前端直径不变,后端直径缩小一半。



图 2 圆台形装药弹丸

## 2 计算模型建立

### 2.1 弹丸和混凝土靶板有限元模型建立

以某型舰炮用弹丸为基础模型,建立头部曲率半径为 0.33 的卵形圆柱金属弹丸,弹丸长度为 690 mm。炸药装药直径为 100 mm,长 500 mm。混凝土靶板的尺寸为 100 cm×100 cm×3 cm。弹丸以 700 m/s 的速度垂直撞击靶板的中心。由于侵彻过程属于高速撞击问题,弹丸尺寸小于靶板尺寸,靶板的远端受到弹丸的作用力很小,可以认为靶板是无限域。为保证计算结果正确的同时减少计算时间,靶板中间部分网格适当加密,其他部分网格适当稀疏。接触方式采用面面侵蚀接触。弹丸和混凝土靶板均可视为轴对称结构;因此,取整个模型的 1/4 进行计算,采用 3 维 lagrange 方法进行模拟仿真。具体有限元模型如图 3、4 所示。

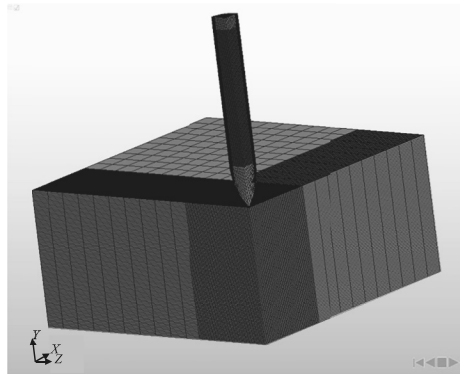


图 3 圆柱形装药弹丸和靶板有限元模型

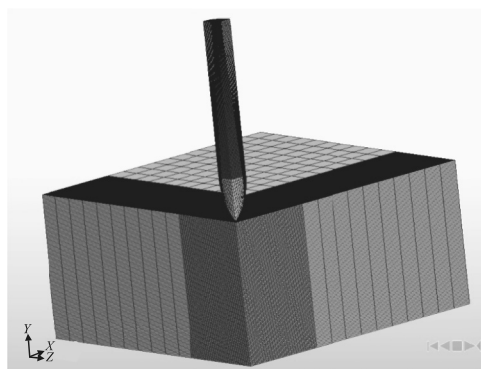


图 4 圆台形装药弹丸和靶板有限元模型

### 2.2 材料模型

弹丸的材料模型选择 Johnson-cook 塑性材料模型,其数值见表 1。

表 1 材料性能参数

弹丸材料参数	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$E/\text{GPa}$	$\mu$	$A/\text{MPa}$	$B/\text{MPa}$	$n$	$C$	$m$
参数值	7.83	77	0.3	792	510	0.26	0.014	1.03

炸药装药为 PBX 炸药(高聚物粘结炸药)。根据

文献[17]中对 PBX 炸药的反应率动力学本构的研

究，其状态方程通常使用 3 项 Lee-tarver 点火增长方程，用于计算冲击引发(或未能引发)固体高能炸药的爆轰波传播，是目前进行炸药冲击起爆数值模拟计算最常用的模型之一。其中装药未反应物和爆轰产物的 JWL 方程如下：

$$P = Ae^{-R_1V} + Be^{-R_2V} + \omega C_v T/V \quad (2)$$

式中： $A$ ， $B$ ， $R_1$ ， $R_2$ ， $\omega$ ， $C_v$ 均为常数； $V$ 为相对体积。炸药装药模型选择目前装药侵彻仿真中通常使用的\*MAT\_ELASTIC\_PLASTIC\_HYDRO 模型，其部分 3 项点火增长模型参数<sup>[18]</sup>见表 2。

表 2 装药材料 JWL 方程主要参数

方程参数	未反应物	爆轰产物
$A/\text{GPa}$	881 700.000 00	1 341.300 00
$B/\text{GPa}$	-3.550 00	32.700 00
$R_1$	15.000 00	6.000 00
$R_2$	1.410 00	2.000 00
$\omega$	0.894 00	0.190 00
$C_v/(\text{GPa/K})$	0.002 17	0.001 05

### 3 结果与分析

#### 3.1 圆柱形装药弹丸侵彻混凝土靶板

如图 5 所示，弹丸在侵彻过程中，装药由于惯性作用会与弹壳挤压，发生塑性变形。弹丸底部与炸药装药之间会出现 1 条空隙，空隙在 701  $\mu\text{s}$  时达到最大。随着侵彻的进行，底部空隙缓慢消失，在弹丸前端位置也出现 1 条空隙，在 1 650  $\mu\text{s}$  时达到最大。炸药装药与弹壳会发生 2 次碰撞，容易发生早炸现象。

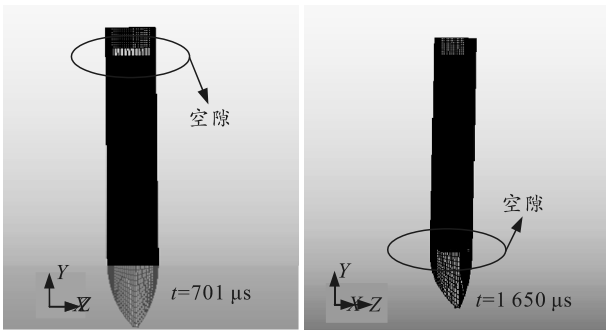


图 5 弹壳与装药出现空隙

图 6 是炸药与弹体的相对速度曲线，可以看到相对速度有 2 个峰值，说明装药和弹丸速度 2 次相差最大。在 250  $\mu\text{s}$ ，最大为 33.2 m/s 时，装药速度大于弹壳速度；在 1 461  $\mu\text{s}$ ，最大为 24.9 m/s 时，弹壳速度大于装药速度。相对速度曲线 2 个为 0 的点则代表装药速度和弹壳速度 2 次相等，分别在 701  $\mu\text{s}$  和 1 650  $\mu\text{s}$ ，该时间点与仿真动画中出现空隙最大的时间点相吻合。这是因为在速度时间曲线中，曲线与横坐标的面积代表位移，所以相对速度

曲线中面积最大的时刻代表其相对位移最大，即出现空隙最大。

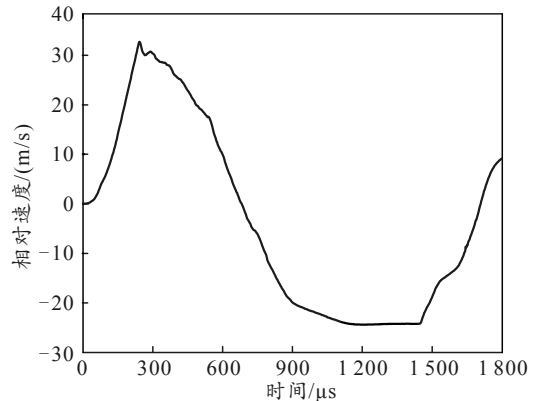


图 6 炸药装药与弹丸的相对速度

图 7 为炸药装药的过载曲线，最高峰值为 29 358 g，且持续时间较长(约 500  $\mu\text{s}$ )，这对炸药装药的承受过载能力提出了很高要求。在与弹壳后端碰撞后也产生了较快的加速度。

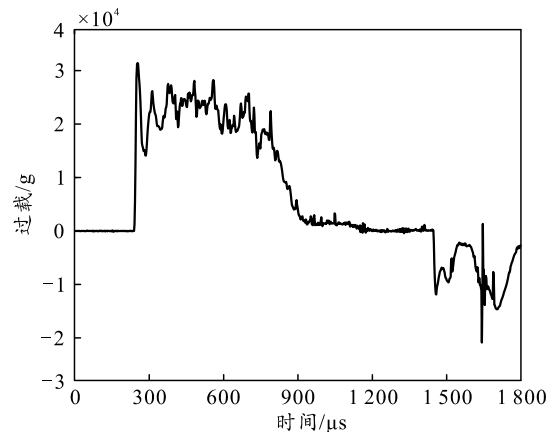


图 7 炸药装药过载

当侵彻进行到 1 872  $\mu\text{s}$  时开始发生爆轰，此时弹丸没有完全穿透混凝土靶板，且伴随大量的混凝土碎块。起爆位置为前端边缘的单元。图 8 为刚开始产生爆轰波的压力云图。

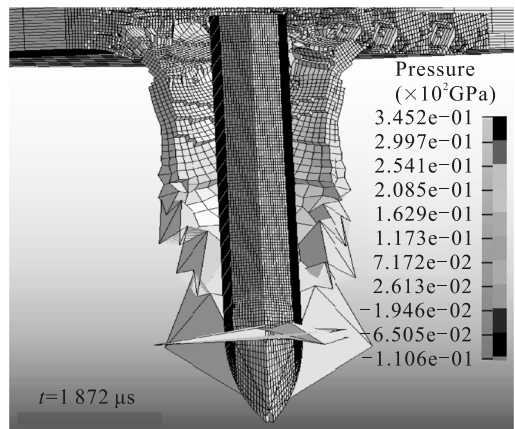


图 8 炸药装药在 1 872  $\mu\text{s}$  开始产生爆轰波

如图 9 所示，为分析炸药装药的动力学响应，在装药柱前端沿着径向从内部到边缘取标号依次为 31, 36, 7 231 的 3 个单元作为代表，装药中部沿着径向从内部到边缘取标号依次为 1 723、1 728、8 923 的 3 个单元作为代表，装药后端沿着径向从内部到边缘取标号依次为 3 595、3 600、10 795 的 3 个单元作为代表，其中 7 231 单元为最先起爆单元。由于炸药装药在 1 872  $\mu\text{s}$  时产生爆轰波，产生压力的数量级比之前由撞击产生的应力数量级高，所以在 1 幅曲线图中不能很好地看出由撞击产生的应力曲线的变化规律。故绘制时间分别为 1 872  $\mu\text{s}$  前后，如图 10—13 所示。

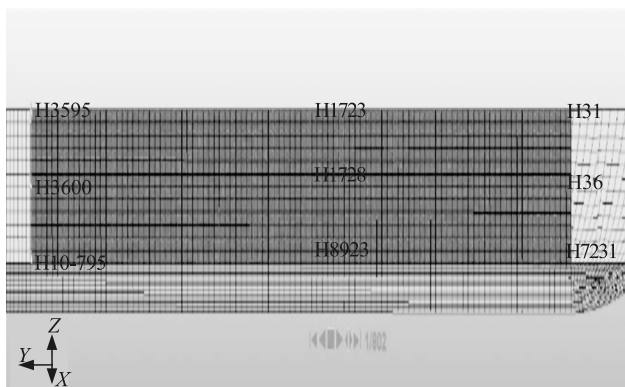


图 9 炸药装药上取 9 点

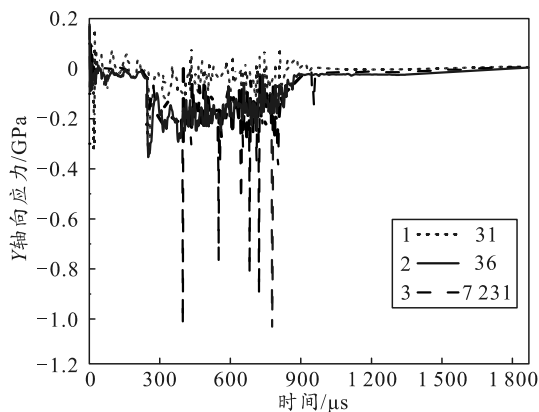


图 10 炸药装药前端单元轴向应力 (1 872  $\mu\text{s}$  前)

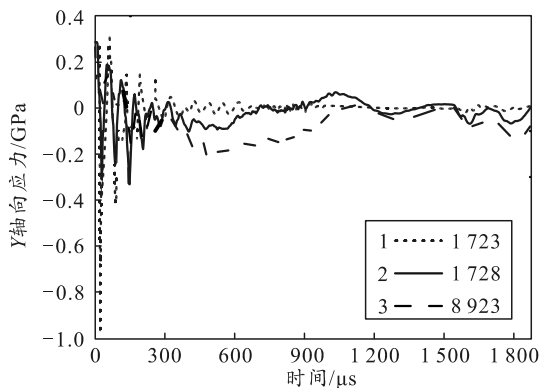


图 11 炸药装药中部单元轴向应力 (1 872  $\mu\text{s}$  前)

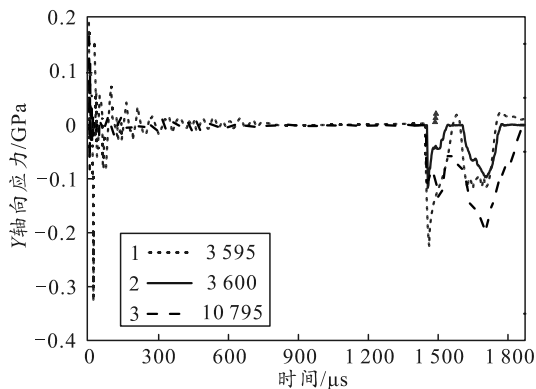


图 12 炸药装药后端单元轴向应力 (1 872  $\mu\text{s}$  前)

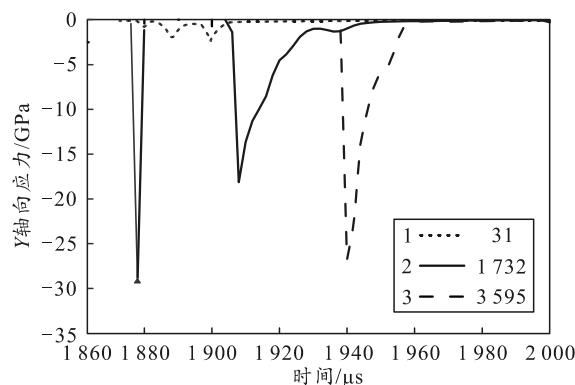


图 13 炸药装药沿轴向应力 (1 872  $\mu\text{s}$  后)

从上图中可知：装药前端单元主要受到压应力作用，起爆单元在 398  $\mu\text{s}$  时峰值可达 1.01 GPa。装药中部受到很强的振荡出现拉应力、压应力的交替作用，装药后端以拉应力为主，最高达 140 MPa。这是因为弹丸撞击靶板时，前端单元由于受到阻力作用，产生压缩应力波，从而产生压应力。开坑后，阻力作用降低，使得弹体和装药产生压力卸载波，从而产生拉应力。由于弹壳和装药后端会发生碰撞，所以，在 1 461  $\mu\text{s}$  时装药后端产生轴向压应力，最大为 230 MPa。轴向应力产生峰值的时间与图 6 中相对速度峰值时间区域相吻合。正是由于该区域弹壳与炸药装药产生高的相对速度，导致炸药装药与弹壳相碰撞时轴向应力急剧增大，可能会导致炸药发生早炸事故。

从上图中还可发现：弹丸沿径向从边缘到内部所受到的轴向应力会先增大后减小，沿轴向从前端到后端所受到的轴向应力会减小。出现这一现象是因为侵彻混凝土会有开坑期和稳定侵彻期，在开坑阶段，由于弹尖为卵尖形，故中间受到的轴向应力比边缘处大，当弹丸处于稳定侵彻期，两边会受到混凝土的阻力作用，而弹丸中轴附近混凝土崩落减少，弹丸受到阻力减小，轴向应力减小。在装药爆轰后，其压力可达到 29.2 GPa。由于阻力作用还会

产生剪切力，所以绘制 YZ 向剪切应力曲线，如图 14—15 所示。

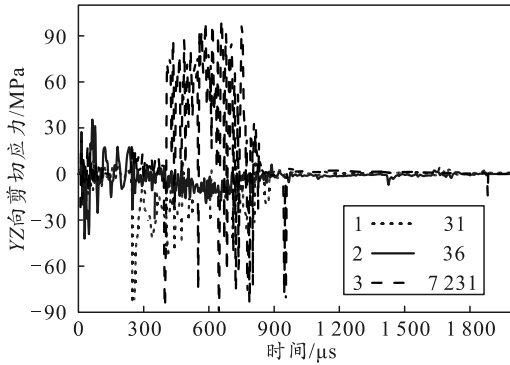


图 14 炸药装药前端单元 YZ 向剪切应力

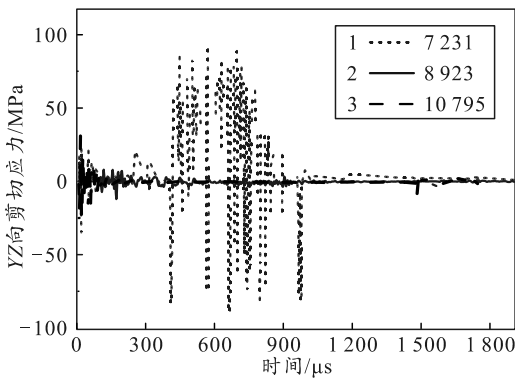


图 15 炸药装药上沿轴向 3 个单元 YZ 向剪切应力

从上图可以看到：沿径向中部单元受到的 YZ 剪切应力小于边缘两端，说明弹丸两端边缘单元变形较大。沿轴向前端单元剪切应力要大于后端，故边缘前端处的单元容易发生起爆，这与 1 872 μs 开始发生爆轰的单元位置相对应。如图 16 所示，剪切应力最大为 100 MPa，且为正值，表明装药的边缘向弹尖方向滑移，在仿真动画中也可观察到。

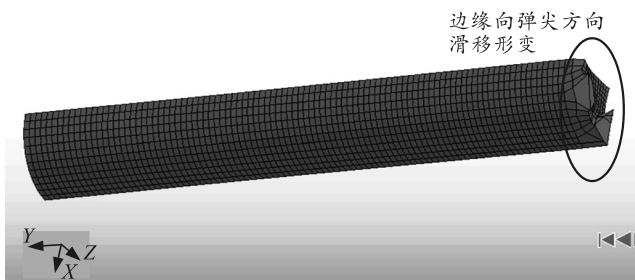


图 16 炸药装药滑移变形

### 3.2 圆台形弹丸侵彻混凝土靶板

根据仿真结果显示：弹丸在侵彻混凝土过程中，弹丸底部与炸药装药之间出现的空隙明显减小，图 17 为侵彻中产生的最大空隙。这是由于装药方式的改变，使得装药在弹丸内部更加稳定，装药与弹壳的相对速度变小。图 18 为装药和弹壳的相对速度曲

线，可以看到最大相对速度为 3.9 m/s，明显小于圆柱形装药弹丸侵彻。弹丸在 1 930 μs 时完全穿过混凝土，且没有发生早炸现象。

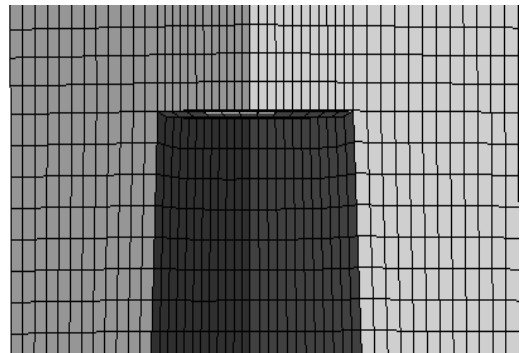


图 17 炸药装药与弹壳后端产生最大的空隙

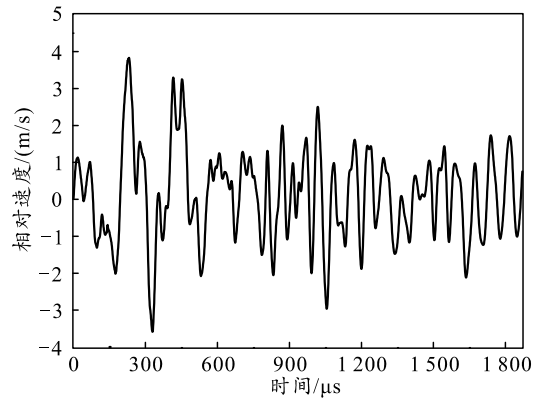


图 18 炸药装药与弹丸的相对速度

取如图 19 所示的单元，绘制如图 20—22 所示的轴向应力曲线。

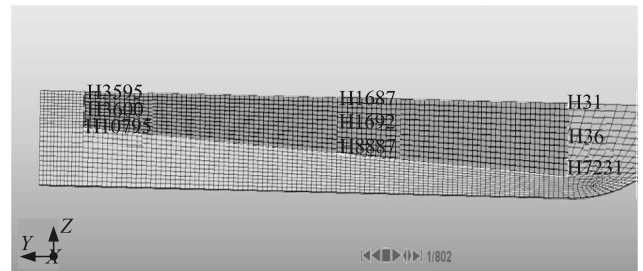


图 19 炸药装药上取 9 点

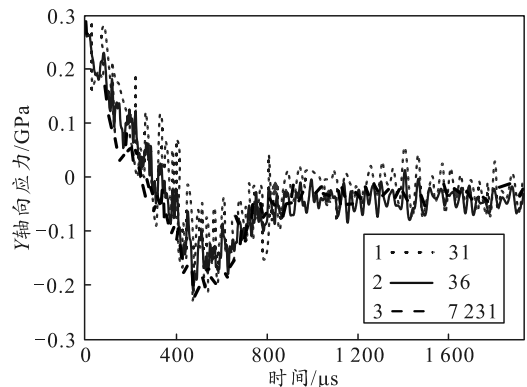


图 20 炸药装药前端单元轴向应力

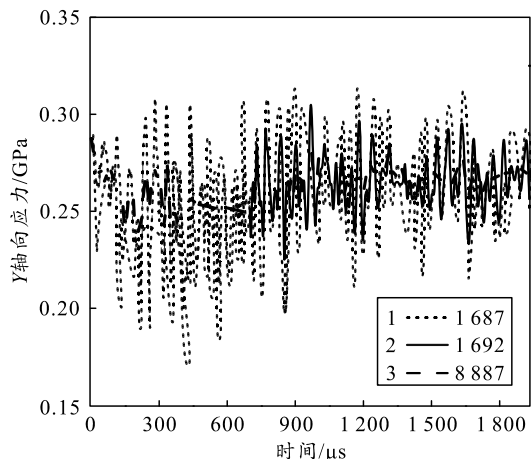


图 21 炸药装药中部单元轴向应力

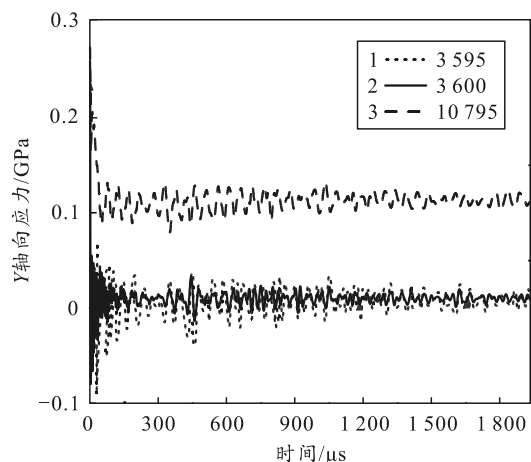


图 22 炸药装药后端单元轴向应力

从上图可看出：前端单元主要受到压应力，中部单元和后端边缘单元一直受到拉应力，后端中部单元受拉压应力交替。压应力最大值为 227 MPa，远小于圆柱形装药弹丸侵彻。拉应力最大值为 287 MPa。沿径向中部单元受到的应力比边缘单元大，充分符合卵尖形弹丸侵彻时受应力的特点。图 23 和 24 为 YZ 向剪切应力曲线。

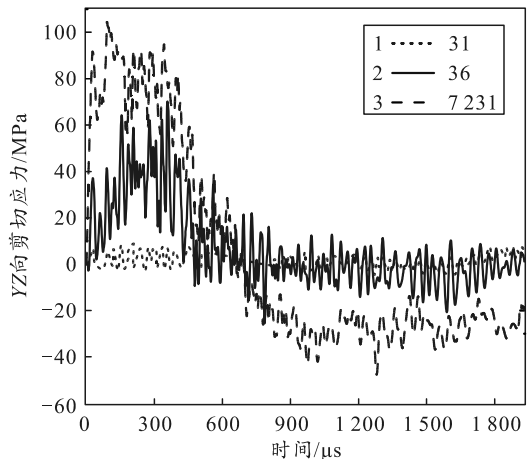


图 23 炸药装药前端单元 YZ 向剪切应力

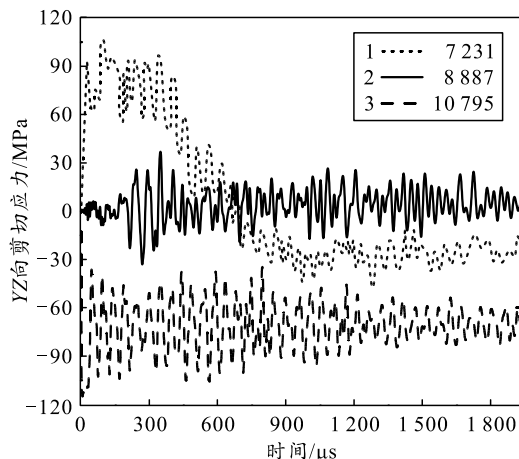


图 24 炸药装药上沿轴向 3 个单元 YZ 向剪切应力

从上图可以看到，沿径向中部单元受到的 YZ 剪切应力小于边缘两端。说明弹丸两端边缘单元变形大，其为负值，表明内部装药向弹尖方向移动，具体如图 25 所示。其中前端边缘单元 7 231 发生形变较严重，也是最容易起爆的危险单元。YZ 剪切应力最大值为 104 MPa。

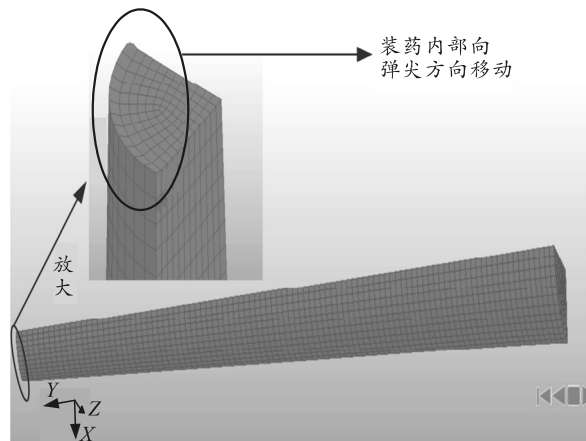


图 25 炸药装药滑移变形

#### 4 结论

笔者针对 2 种装药方式的弹丸侵彻混凝土靶板进行仿真模拟，获得了炸药装药的动力学响应规律，得出如下结论：

1) 侵彻过程中，由于靠近弹丸前端的炸药装药容易受到大的撞击阻力，前端炸药装药产生较大压应力，后端炸药装药产生拉应力，装药前端靠近边缘的位置容易发生起爆；因此，在装药侵彻安全性实验中应重点关注该部位的应力过程及其响应。

2) 侵彻过程中，装药的剪切应力沿径向从边缘到内部、沿轴向从前端到后端逐渐减小。说明弹体前端边缘处受到大的剪切力，容易发生大变形或脱粘等现象，容易引起安全事故。

3) 弹丸侵彻混凝土靶板时炸药装药与弹壳后端产生空隙较大, 导致装药前端受挤压产生裂纹和该处单元滑移摩擦产生热点, 引发安全事故。圆台形装药弹丸可使装药在弹体内部减小相对滑动, 有效提高其侵彻安全性。

### 参考文献:

- [1] 芮筱亭, 贡来峰, 王国平, 等. 弹药发射安全性导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 12-20.
- [2] JOHNSON W. Benjamin Robins new principles of gunnery[J]. International Journal of Impact Engineering, 1986, 4(4): 205-219.
- [3] 刘士践, 张继春, 左魁. 混凝土侵彻的研究进展[J]. 四川建筑, 2008, 28(6): 203-205.
- [4] 梁拯. 浅谈混凝土侵彻问题的研究现状[J]. 四川建材, 2018, 44(1): 6-7, 9.
- [5] FREW D J, FORRESTAL M J, CARGILE J D. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 32(10): 1584-1594.
- [6] 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.
- [7] 武海军. 弹体贯穿钢筋混凝土动态破坏实验研究及数值模拟[D]. 北京: 北京理工大学, 2003.
- [8] 黄民荣. 刚性弹体对混凝土靶的侵彻与贯穿机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- [9] 张国星, 强洪夫, 陈福振, 等. 钻地弹侵彻地下工事问题的研究与发展[J]. 飞航导弹, 2018(6): 34-38.
- [10] 陈文, 张庆明, 胡晓东, 等. 侵彻过程冲击载荷对装药损伤实验研究[J]. 含能材料, 2009, 17(3): 321-326.
- [11] 李媛媛, 高立龙, 李巍, 等. 抗过载炸药装药侵彻安全性试验研究[J]. 含能材料, 2010, 18(6): 702-705.
- [12] 彭泓铮, 黄开书, 万力伦, 等. 高氮含能化合物 TKX-50 侵彻安全性试验研究[J]. 兵工自动化, 2018, 37(12): 89-92, 96.
- [13] 乔相信, 郭克强, 洪晓文, 等. 球形头部弹丸侵彻运动靶板的数值模拟[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(3): 84-87.
- [14] 乔相信, 于锋, 李广. 弹丸侵彻铝合金靶过程中炸药的动态响应[J]. 火炸药学报, 2013, 36(6): 31-36.
- [15] 贾宪振, 李媛媛, 郭洪卫, 等. 弹体侵彻混凝土过程中炸药动态响应数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(11): 2528-2531.
- [16] 钱伟长. 穿甲力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984: 80-81.
- [17] 赵宏达. PBX 炸药的反应率动力学本构研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [18] 王宁. 弹体侵彻素混凝土过程中装药动态响应机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.