

弹体斜侵彻混凝土过程中炸药的动态响应

李媛媛, 贾宪振, 高立龙

(西安近代化学研究所, 西安 710065)

摘要:采用 AUTODYN 计算软件对弹体侵彻混凝土过程进行了数值模拟, 分析了弹体内部不同位置处炸药的受力情况及炸药与壳体的相互作用; 结果表明: 斜侵彻时装药的前端和后端是两个受力较明显的区域; 前端主要受压缩作用, 炸药产生明显的塑性应变; 后端装药受到拉伸和压缩作用, 装药和壳体尾部之间发生强烈碰撞; 斜侵彻过程中, 装药前端的受力中心位于靠近靶板一侧的边缘处, 而装药后端的受力中心仍然是端面中心; 根据计算结果, 侵彻炸药装药的防护不仅要考虑装药的前端面和后端面进行考虑, 还要考虑装药的侧面。

关键词:爆炸力学; 炸药; 斜侵彻; 动态响应; 数值模拟

中图分类号: O389; TJ55

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2013)09-0036-03

Dynamic Response of Explosive Charge During Projectiles Oblique Penetrating into Concrete Targets

LI Yuan-yuan, JIA Xian-zhen, GAO Li-long

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: The process of loaded projectile penetrated into the oblique targets was simulated using hydrodynamic code AUTODYN. It analyzed the pressure imposed on the explosive charge in different position and the interaction between the charge and the projectile shell. The results show that the fore and the tail of the charge are two areas enduring stress obviously. The force of the explosive charge mainly endures compressed effect which induce to plastic damage, while the tail of that endures both compressed and tensile effect inducing strongly shock effect on the tail of the charge during penetration. Otherwise, the force bearing center of the fore charge close to one side edge of targets, but the tail locates the end-face center. According to the investigation, the fore and the tail charge are not only protected in projectile used to penetration, but also the side face of the explosive charge needs to be taken into account.

Key words: mechanics of explosion; explosive; oblique penetration; dynamic response; simulation

斜侵彻是过载武器攻击目标过程中不可避免的一种运动状态。战斗部斜侵彻靶板时要受到靶板的阻力作用, 由于靶板的阻力与战斗部的运动方向不一致, 从而导致战斗部的运动方向不断发生改变^[1]。弹体着靶有一定的倾角, 这对弹体内装药是更严峻的考验。因此, 开展弹体斜侵彻过程中炸药的动态响应研究, 不仅对深入认识炸药响应机理、分析侵彻规律具有重要的理论意义, 同时, 对侵彻战斗部炸药装药的优化设计、提高弹药安全性能具有重要的参考价值。

实验证明 AUTODYN 非线性动力学有限元程序在计算

这种类似问题上可靠性较高^[2]。该程序包含了多种接触算法和材料库, 可以成功计算这种高速下的侵彻问题。贾宪振等^[3]利用该程序对侵彻混凝土过程中炸药动态响应进行了数值模拟。汪德武等^[4]开展了斜侵彻弹体运动分析与仿真研究。该程序包含了多种接触算法和材料库, 可以成功计算此类高速下的侵彻问题。

在此采用动力学计算软件 AUTODYN 对弹体斜侵彻混凝土过程进行了数值模拟。研究了斜侵彻过程中炸药的动态响应规律, 分析了弹体内炸药可能发生危险的部位, 为侵

彻类弹药设计提供参考。

1 计算模型

战斗部侵彻混凝土计算模型,如图1所示。战斗部壳体直径为10 cm,总长度为24.6 cm,壳体材料为高强度合金钢 SteelS-7。装药为铸装B炸药,装药形状为圆柱形,直径为8 cm,长度为15 cm。混凝土靶板为圆柱形,直径0.4 m,厚度为20 cm。战斗部以800 m/s的速度从靶板中心处以8°的侵彻角入射侵彻。在装药上设置9个观测点,用于读取所关心区域的物理参数,如图2所示。装药前端、中部和后端分别选取3个观测点,观察装药不同部位的动态响应情况。

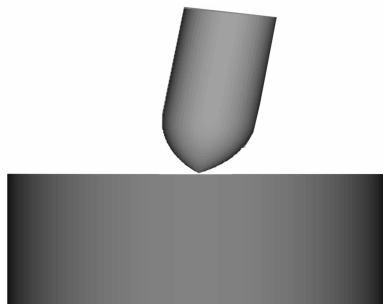


图1 斜侵彻模型

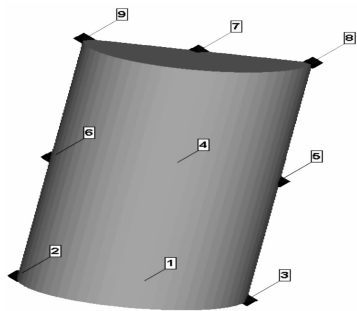


图2 装药上的观测点设置图

计算中认为装药(B炸药)为各向同性材料。装药的强度采用 Von-Mises 准则描述。装药的动态屈服应力为200 MPa。采用 Lee-Tarver 三项点火增长模型描述炸药在冲击作用下是否发生点火和爆轰,即:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = I(1-F)^b \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x + G_1(1-F)^c F^d p^y + G_2(1-F)^e F^f p^z \quad (1)$$

式(1)中, F 是反应率, $I, G_1, G_2, a, b, c, d, e, f, x, y, z$ 都是计算时须输入的参数。对于B炸药, $I = 44 \mu\text{s}^{-1}, G_1 = 514 \text{ Mbar}^{-2} \mu\text{s}^{-1}, a = 0.01, c = 0.2222, d = 0.6667, x = 4, y = 2, G_2, b, e, f$ 和 z 均为0^[4]。未爆炸药和已爆炸药的状态方程均采用JWL状态方程,即:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v} \right) e^{-R_1 v} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v} \right) e^{-R_2 v} + \frac{\omega e}{v} \quad (2)$$

式(2)中, e 为初始比内能, A, B, R_1, R_2 和 ω 均为JWL状态方程参数。

2 计算结果与分析

与垂直侵彻相比^[3],斜侵彻过程中装药的动态响应具有不同的特点,除了垂直侵彻时需要关注的冲击压缩作用以外,装药与壳体的摩擦作用、装药内部不同区域受力不均导致的剪切作用等也需重点关注。

读取了装药中不同观测点的压力时程曲线,从这些压力曲线可知斜侵彻时装药的前端和后端仍是两个受力较明显的区域,这些规律与垂直侵彻时是相同的^[3]。同时,斜侵彻过程中的压力分布规律与垂直侵彻时又有明显不同,药柱前端所受压力作用冲量最大的区域不再是中心处(观测点1),而是药柱前端靠近靶板的棱角处(观测点2)。

图3为装药前端面3个观测点的压力时程曲线,可见位于前端面中心的 gauge1 的峰值压力最小,而接近靶板一侧的 gauge3 的压力峰值最大。这说明在斜侵彻时距离战斗部壳体受力部位较近的装药受力较大。

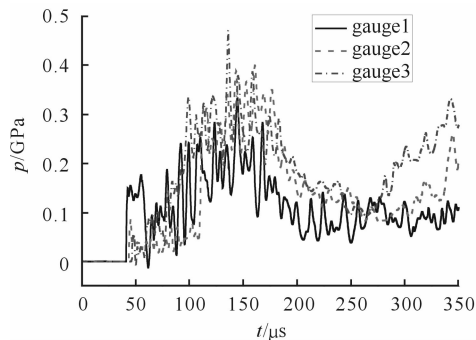


图3 装药前端3个观测点的压力时程曲线

图4为炸药装药尾部数值仿真压缩状态。弹体斜侵彻撞击着靶时的应力冲击并不是单纯的恒定应力加载,而是应力在炸药内部反复振荡过程。从图4中可以看出,弹体撞击靶板的动态过程中,炸药装药发生体积压缩,弹体尾部出现装药的位移间隙,产生轴向拉伸和压缩,使得炸药装药经受在高应力应变、较长持续时间内的冲击环境中,从而产生较大的能量积累。反复的压缩和拉伸,使炸药的损伤较严重,临界起爆压力大大降低^[5],所以弹体内炸药装药着靶时所受的应力相对于单一冲击加载时要复杂很多。

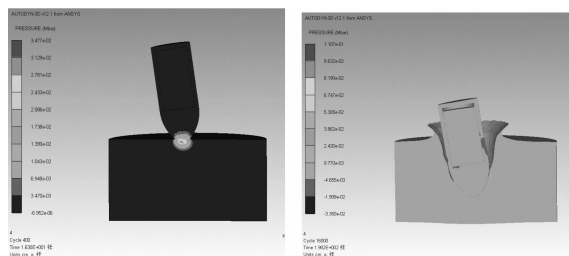


图4 炸药装药尾部数值仿真压缩状态

图5为斜侵彻过程中炸药装药的动态响应云图。在侵彻过程中,弹体内装药后端也出现了明显空隙。由于单日与靶板斜侵彻,所以在空隙消失过程中,装药后端面与壳体的碰撞不是正撞击,而是以一定角度撞击,这就导致接近靶板一侧的空隙先消失,另一侧的空隙随后才消失,在此过程中,装药的应力集中到装药底端远离靶板的一侧,使得该处装药与壳体之间的作用力陡增,最终导致炸药发生点火并有可能成长为爆轰。

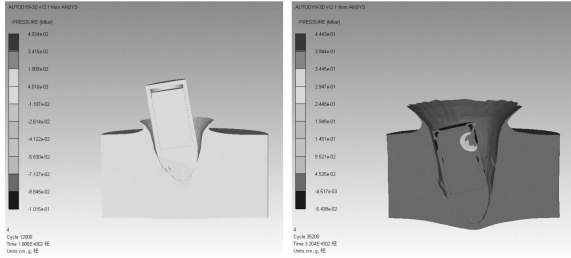


图5 斜侵彻过程中炸药装药的动态响应

图6为装药后端面3个观测点的压力时程曲线,可见位于于后端面中心的 gauge7 的峰值压力最大,而且该处的压力在210 μs 时呈现出突跃的特征,说明此时装药与壳体底端发生了碰撞,在装药中产生了应力波。对于斜侵彻而言,存在装药和壳体底端的碰撞,以及由碰撞而造成的装药发生点火的潜在危险。

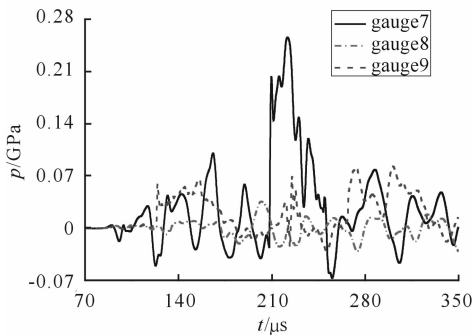


图6 装药后端3个观测点的压力时程曲线

图7为斜侵彻过程中装药的等效应变的分布云图。对比文献[3],可见斜侵彻所对应的等效应变分布与正侵彻之后的等效应变的分布规律是不同的。等效应变不再呈对称分布,表现为战斗部先与靶板碰撞一侧装药的等效应变较大,亦即首先受到压缩作用的一侧装药的等效应变更显著。正侵彻情况下,最大等效应变分布在装药中轴线,并且是紧靠装药前端面位置,而斜侵彻情况下,最大等效应变的分布位置也发生了倾斜。根据图7,斜侵彻时的最大等效应变不再位于装药前端面,而是前端面内部。

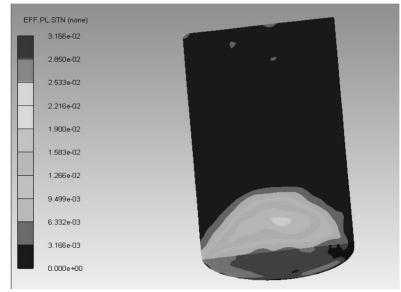


图7 斜侵彻过程中的装药等效应变分布

3 结束语

本文基于 AUTODYN 程序,计算了弹体斜侵彻过程中炸药装药的动态响应,能够预估弹体在倾斜侵彻硬目标过程中炸药的动态响应。根据计算结果,得到以下主要结论:采用的计算模型和方法可以用于研究弹体斜侵彻过程中的炸药装药的动态响应;斜侵彻时弹体内炸药装药的前端和后端仍是两个受力较明显的区域,并且侵彻过程中药柱后端面与壳体发生了碰撞,这些规律和垂直侵彻时相同。斜侵彻过程中,装药前端的受力中心不再位于装药的端面中心处,而是位于靠近靶板一侧的边缘处,而装药后端面的受力中心仍然是端面中心。主要是由于装药和端面碰撞受力。对于弹药设计,炸药装药的防护不仅要从装药的前端面 and 后端面进行考虑,还要从装药的侧面进行防护。

参考文献:

- [1] 余文力,王涛,董亮.战斗部对混凝土靶板的斜侵彻跳弹极限角的计算[J].弹箭与制导学报,2008,25(5):109-111.
- [2] Borvik T M, Langseth O S, Hopperstad, et al. Ballistic penetration of steel plates [J]. International Journal of Impact Engineering, 1999, 22(9/10): 855-866.
- [3] 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.
- [4] 汪德武,高洪泉,杜海霞,等.斜侵彻弹体运动分析与仿真[J].弹箭与制导学报,2006,26(3):121-123.
- [5] 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):321-324.
- [6] 袁亚楠,胡健,王少龙,等.钨合金长杆弹斜侵彻间隔靶的数值仿真与试验[J].四川兵工学报,2011(7):10-15.
- [7] 朱战飞,石全,王广彦,等.无攻角弹体斜侵彻多层间隔混凝土靶板特性[J].火力与指挥控制,2012(11):102-105.

(责任编辑 周江川)