

弹体斜侵彻多层混凝土靶的弹道特性研究

李江涛,高旭东

(南京理工大学 机械工程学院,南京 210094)

摘要:为了研究弹体斜侵彻多层混凝土靶板后的弹道特性,利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件,对弹体在不同着角和速度的初始条件下斜侵彻三层混凝土靶板的过程进行数值计算。结果表明:小着角对弹道偏转有一定的抑制作用,而大着角恰恰相反;速度较小时,增大初始速度会增大弹体的弹道偏转角;弹体贯穿每层靶板的速度随着初始着角的增大衰减加快,随着初始速度的增大近似为线性关系。

关键词:斜侵彻;数值仿真;混凝土靶板;弹道偏转角

本文引用格式:李江涛,高旭东. 弹体斜侵彻多层混凝土靶的弹道特性研究[J]. 兵器装备工程学报,2016(9):58-62.

Citation format:LI Jiang-tao, GAO Xu-dong. Trajectory Characteristics of Projectile Obliquely Penetrating Multi-Layered Concrete Targets [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2016(9):58-62.

中图分类号:TJ012.4

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2016)09-0058-05

Trajectory Characteristics of Projectile Obliquely Penetrating Multi-Layered Concrete Targets

LI Jiang-tao, GAO Xu-dong

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to study the trajectory characteristics of projectile penetrating into multi-layered concrete targets at oblique angle, projectile penetrating progress of three-layered concrete targets was simulated under different initial oblique angles and different initial velocity was numerically simulated by the finite element code ANSYS/LS-DYNA. The results show that the small oblique angle may reduce the deflection of penetration trajectory and the big oblique angle may enlarge its deflection. When the impact velocity is small, the deflection of penetration trajectory increases with the increase of the velocity. It also found that the velocity of the projectile penetrating through each layer of target is accelerated attenuation with the increasing of the oblique angle and it has approximate linear relation with the increasing of the initial velocity.

Key words: oblique penetration; numerical simulation; concrete target; trajectory deflection angle

在现代战争中,地面重要目标建筑物是弹体的主要攻击对象之一,而这些建筑物大部分是多层结构。因此,关于多层混凝土的侵彻问题便成为一个极具意义的课题。近年来,

尽管人们对弹体侵彻混凝土靶板进行了大量的研究,并且得到了一系列的经验公式,但研究的内容大多局限于弹体对单层混凝土靶板的侵彻^[1-3]。对于侵彻多层混凝土靶板的研

收稿日期:2016-05-09;修回日期:2016-05-25

作者简介:李江涛(1991—),男,硕士研究生,主要从事终点效应与目标毁伤研究。

究很少,朱战飞和王中原等^[4-5]分析了靶间距、靶板层数、弹体头部和曲径比对弹体侵彻多层混凝土靶时的弹道稳定性的影响。

初始着角和初速是弹体侵彻时最常考虑的两个因素,而其对弹体侵彻多层混凝土靶板的影响鲜有研究。本研究将分析初始着角和速度对弹体斜侵彻多层混凝土靶板弹道特性的影响。

1 有限元模型

1.1 材料模型及参数

弹体材料为 30CrMnSiNi2A^[6],由于基本不变形,将其视为刚体,取弹体里的填充物材料模型为线弹性模型,弹体及其填充物^[7]的材料参数如表 1 所示。混凝土采用 HJC 本构模型,材料参数^[8-9]如表 2 所示。HJC 模型能较好地描述混凝土撞击过程中出现的大应变、高应变率、高压强等情况。

表 2 混凝土材料参数

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	A	B	N	C	SMAX	μ_{crush}	μ_{lock}	$P_{\text{crush}}/\text{GPa}$	$P_{\text{lock}}/\text{GPa}$
2 520	0.79	1.6	0.61	0.007	7.0	0.007 4	0.063	0.012	0.8
F_c/MPa	D_1	D_2	G/GPa	FS	EFMIN	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa	T/MPa
36	0.04	1.0	8.76	-1	0.01	85	-171	208	3.24

2 模型验证

2.1 弹靶几何模型

侵彻弹体为卵形头部,直径为 280 mm,长细比为 4.1,头部形状系数为 3.3,质量为 276 kg。取靶体的 1/2 建模,图 1 为工况 1 的三维模型。为了提高计算的准确性,弹头部以及弹靶作用的区域的网格较密集,弹体其他部位及距离弹靶作用区域较远的网格较稀疏。

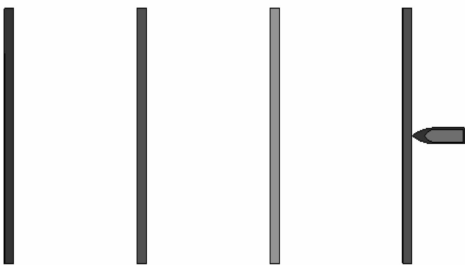


图 1 多层靶板三维模型

2.2 实验验证

对文献[6]实验的几种工况进行数值仿真,得其仿真结

果与实验结果如表 3 所示。

表 1 弹体及填充物参数

材料参数	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E/GPa	μ
30CrMnSiNi2A 弹体	7 850	21.58	0.3
填充物	1 850	3.05	0.3

1.2 计算模型

考虑靶板结构的对称性,同时为了减少计算周期,建立二分之一弹靶模型,并施加了对称和非反射边界约束条件。模型中所有实体均采用 8 节点实体单元(solid164)。弹体、靶板采用单点积分和沙漏控制,计算速度加快,能有效克服零能模式,对大变形和材料失效等非线性问题比较适用。采用拉格朗日算法,单位为 $\text{cm-g-}\mu\text{s}$,弹体与填充物采用面-面自由接触,弹体与靶板采用面-面侵蚀接触。

果与实验结果如表 3 所示。

由表 3 可见,工况 1 和工况 2 的仿真结果和实验结果的相对误差最大的为 5.73%,误差较小,对于工况 3,虽然相对误差为 25.7%,但是实验的剩余速度和模拟剩余速度的速度降的偏差为 1.9%。

表 3 实验结果与仿真结果的比较

工况	初始速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	靶板厚度/ m	剩余速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		侵彻深度/m		误差/ %
			实验	仿真	实验	仿真	
1	342		298	306			2.68
2	272	1.8			1.22	1.15	5.73
3	503	3.0	35	44			25.7

注:工况 1 靶板为 4 层间隔靶,厚度为 0.2 m,相邻间隔为 2.7 m。

2.3 理论验证

利用陈小伟^[10-11]无量纲计算公式对工况 1 进行计算,得出弹体贯穿各层靶后的剩余速度。刚性弹侵彻混凝土的剩余速度为:

$$v_* = \sqrt{\frac{d^3 S f_c I_*}{m}}$$

其中:

$$\begin{cases} I_* = \left\{ \left[\sqrt{\frac{I}{1+I/N}} - \left[\frac{2c}{f_c A_s \cos \delta} \sqrt{\frac{3k}{\pi} \left(1 + \frac{k\pi}{4N} \right)} \right]^{-1} \right]^2 - \frac{1}{N} \right\}^{-1}, & \frac{X}{d} \leq k \\ I_* = \frac{I+N}{\left(1 + \frac{k\pi}{4N} \right) \exp \left[\frac{\pi \chi}{2N} \left(1 - \frac{H^*}{H} \right) - \frac{k\pi}{2N} \right]} - N, & \frac{X}{d} > k \end{cases}$$

式中: m 为弹体的质量; v_0 为弹体的初始速度; d 为弹体的直径; ρ 为混凝土的密度; f_c 为混凝土的抗压强度; H 为靶板厚度; c 是常数。 S 是与 f_c 相关的经验常数, 其表达式为:

$$S = 72.0 f_c^{-0.5}$$

χ 为无量纲混凝土靶厚:

$$\chi = H/d$$

k 为定义侵彻深度的系数:

$$k = (0.707 + h/d)$$

其中 h 为弹体头部长度。

I 和 N 分别为撞击函数和弹头的形状函数:

$$I = \frac{m v_0^2}{d^3 S f_c}, \quad N = \frac{m}{d^3 \rho N^*}$$

其中: $N^* = \frac{1}{3\psi} - \frac{1}{24\psi^2}$ 为弹头形状因子; ψ 为弹体头部形状系数。

弹体侵彻薄板时, 会在薄板背面产生一个类似截锥形的塞块, A_s 、 H^* 和 δ 分别为塞块的表面积、高度和半锥角(塞块边沿和弹体轴线的夹角)。

$$A_s = \pi \frac{H^*}{\cos \delta} (d + H^* \tan \delta)$$

图2为弹体贯穿各层靶后剩余速度的仿真结果与理论结果的比较。两种方法得到的数据较接近, 最大误差为4.4%。

通过以上对比分析可得: 仿真结果与实验结果和理论结果相差都较小, 因此可判定数值仿真所选的有限元模型正确。

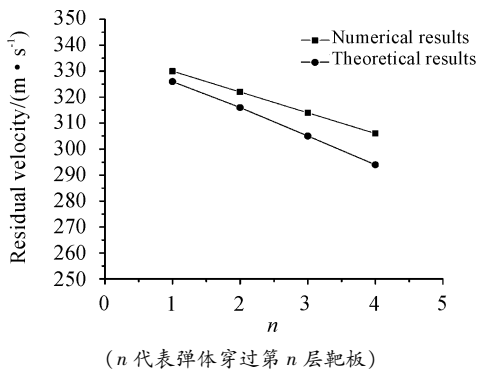


图2 弹体穿过每层靶相应的剩余速度

3 有限元模拟结果分析

本文采用的靶板为3层混凝土靶, 厚度均为0.2 m, 间隔为2.7 m。

图3为弹体贯穿混凝土薄靶示意图, α 为攻角, 即速度方向与弹体轴线的夹角; β 为着角, 即速度方向与靶板法线的夹角; θ 为弹道偏转角, 即贯穿靶板后的弹体弹轴与初始弹轴的夹角。

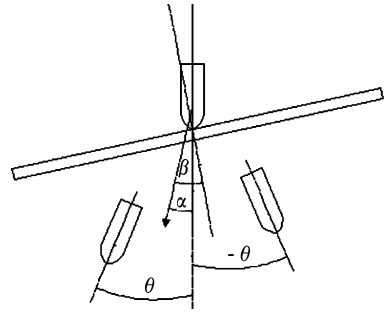


图3 弹体贯穿混凝土靶示意图

3.1 弹体着角对弹道特性的影响

取弹体速度为400 m/s、攻角为0°, 分别就弹体以10°、20°、30°、40°、50°初始着角侵彻3层混凝土靶板进行数值仿真。

图4和图5分别为着角20°和40°时弹体侵彻3层混凝土靶的仿真过程。当着角为20°时, 弹道偏转角为负值, 而着角为40°时弹道偏转角为正值(此处定义弹头朝下为负值, 弹头朝上为正值)。

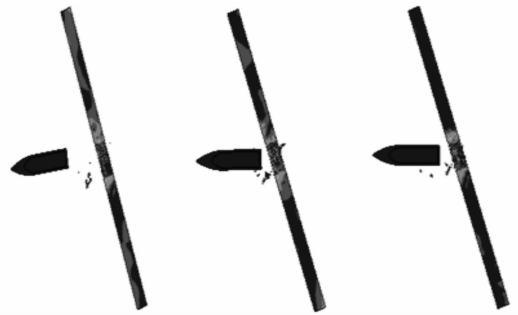


图4 着角为20°时弹体侵彻过程



图5 着角为40°时弹体侵彻过程

图6给出了弹体在贯穿每层靶板时的弹道偏转角随初始着角的变化关系。弹体在贯穿第一层靶时的弹道偏转角随着着角的增大而缓慢增大, 贯穿第二、三层靶板时的弹道偏转角随着初始着角的增大呈现先减小后增大的情况; 初始

着角小于 30° 时,弹体贯穿第三层靶板时的弹道偏转角均为负值,反之初始着角大于 30° 时,为正值,而且越来越大。由此可知:小着角对斜侵彻多层混凝土靶的弹道偏转具有一定的抑制作用,而大着角对斜侵彻多层混凝土靶的弹道偏转具有一定的放大作用。

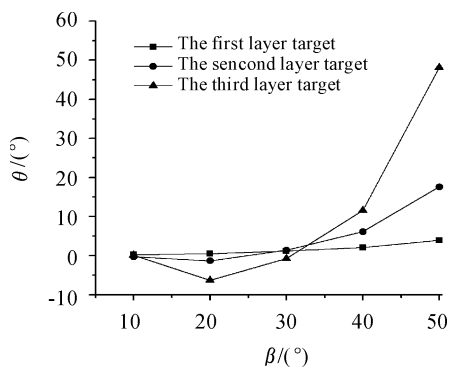


图6 弹道偏转角随弹体着角的变化

图7给出了弹体在贯穿每层靶板时的剩余速度随初始着角的变化关系。由图可得:初始着角为 10° 、 20° 、 30° 时,弹体贯穿每层靶板的速度衰减相对缓慢,而在初始着角为 40° 、 50° 时弹体贯穿每层靶板的速度衰减加快。这是由于随着弹体初始着角的增大,靶板与弹体接触的长度变长。而当着角增大到一定程度时,弹道偏转严重,使得速度衰减迅速。

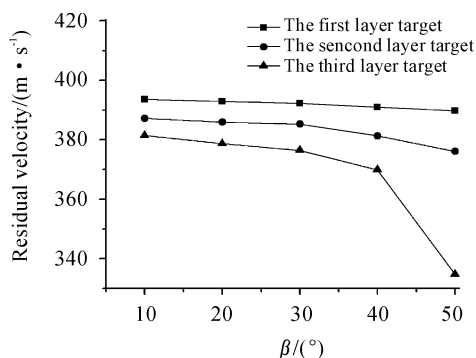


图7 剩余速度随弹体着角的变化

3.2 弹体初始速度对弹道特性的影响

取弹体着角为 20° 、攻角为 0° ,分别就弹体以400 m/s、500 m/s、600 m/s、700 m/s、800 m/s初始速度侵彻3层混凝土靶板进行数值仿真。

图8和图9分别表示速度400 m/s和700 m/s时弹体侵彻3层混凝土靶的过程。当速度为400 m/s时,弹道偏转角为负值,而速度为700 m/s时弹道偏转角为正值。

图10给出了弹体在贯穿每层靶板时的弹道偏转角随初始速度的变化关系。弹体在贯穿每层靶时的弹道偏转角随速度的变化规律基本一致,即随着速度的增大先增大后减小;速度在400 m/s时贯穿第二、三层靶时的弹道偏转角均为负值,即朝有利于弹体侵彻的方向偏转。

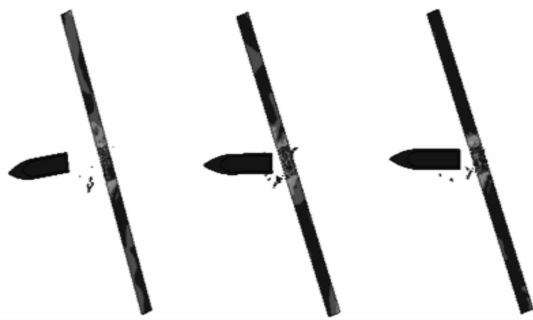


图8 速度为400 m/s时弹体侵彻过程



图9 速度为700 m/s时弹体侵彻过程

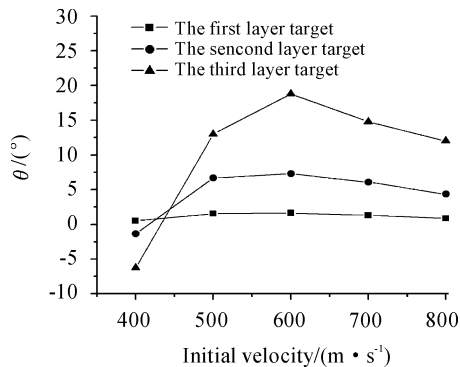


图10 弹道偏转角随速度的变化

图11给出了弹体在贯穿每层靶板时的剩余速度随初始速度的变化关系。弹体贯穿每层靶板的剩余速度随着初始速度的变化近似为线性关系。

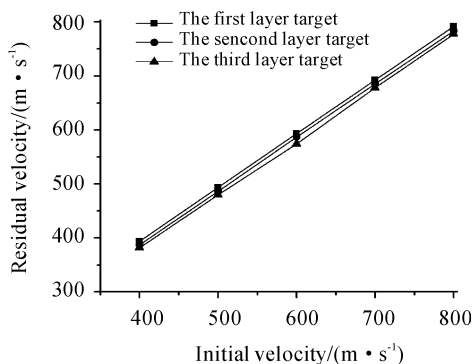


图11 剩余速度随初始速度的变化

4 结论

本文通过 LS-DYNA 软件研究了不同的着角和速度对于弹体贯穿每层靶时弹道偏转角的影响。结论如下:

- 1) 小着角对斜侵彻多层混凝土靶的弹道偏转具有一定的抑制作用,而大着角对斜侵彻多层混凝土靶的弹道偏转具有一定的放大作用。
- 2) 速度较小时,增大初始速度会增大侵彻多层混凝土靶时弹体的弹道偏转角,对弹体侵彻姿态带来不利影响,因此通过增大初始速度以提高弹体侵彻能力时,需要考虑其对弹道稳定性带来的不利影响。
- 3) 弹体贯穿每层靶板的速度随着初始着角的增大衰减加快,在初始速度增大的情况下近似为线性关系。

参考文献:

[1] 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.

[2] FORRESTAL M J, FREW D J, HICKERSON J P, et al. Penetration of concrete targets with deceleration-time measurement [J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(5): 479-497.

[3] FREW D J, FORRESTAL M J, CARGILE E R, et al. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32(10): 1584-1594.

[4] 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(37): 102-105.

[5] 王中原, 张紫龙, 周子鸣, 等. 钻地战斗部侵彻多层建筑物弹道稳定性分析[C]//第十三届全国战斗部与毁伤技术学术交流会论文集. 出版地不详:[出版社不详], 2013: 591-595.

[6] 段卓平, 刘世鑫, 欧卓成, 等. 弹体斜侵彻混凝土薄靶的姿态变化规律数值仿真[J]. 北京理工大学学报, 2013, 2(33): 35-38.

[7] 章冠人, 陈大年. 凝聚炸药起爆动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.

[8] 张凤国, 李恩征. 混凝土撞击损伤模型参数的确定方法[J]. 弹道学报, 2001, 4(13): 188-192.

[9] POLANCO-LORIA M, HOPPERSTAD O S, BERSTAD T, et al. Numerical predictions of ballistic limits for concrete slabs using a modified version of the HJC concrete model [J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35: 290-303.

[10] CHEN X W, FAN S C, LI Q M. Oblique and normal perforation of concrete targets by a rigid projectile [J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30: 617-637.

[11] 陈小伟. 穿甲/侵彻问题的若干工程研究进展[J]. 力学进展, 2009, 39(3): 316-350.

[12] 吴东旭, 姚勇, 刘筱玲, 离散元法侵彻混凝土靶板数值模拟研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2014(9): 64-67.

[13] 杨正有, 吕中杰, 邹保月. 带攻角弹体斜侵彻混凝土深度计算公式对比分析[J]. 四川兵工学报, 2014(1): 37-40.

[14] 葛超, 董永香, 陆志超, 等. 弹丸头部对斜侵彻弹道偏转影响研究[J]. 兵工学报, 2015(2): 255-262.

(责任编辑 周江川)

(上接第 49 页)

[6] SHUO WANG, MIN TAN. Research on architecture for reconfigurable underwater sensor networks [C]. Proc of IEEE Conf on Networking, Sensing and Control. Arizona, 2005: 831-834.

[7] CHAO LU, SHUO WANG, MIN TAN. Design and realization of sensor nodes for dense underwater wireless sensor networks [C]. Proc of the 17th World Congress of the Int Federation of Automatic Control. Seoul, 2008: 12819-12824.

[8] 刘玉梁, 潘仲明. 水下无线传感器网络能量路由协议的仿真研究[J]. 传感技术学报, 2011, 26(6): 905-908.

[9] 张剑, 黄本雄, 张帆, 等. 一种适合水下无线传感器网络的能量有效路由协议[J]. 计算机科学, 2008, 35(1): 38-41.

[10] 赵良明, 刘卫东. 水下网络中心战概念及框架研究[J]. 声学技术, 2009, 28(6): 136-139.

[11] 李本昌, 梁涛. 远程鱼雷的作战样式及其技术需求[J]. 鱼雷技术, 2008, 16(4): 54-57.

[12] 倪文玺, 邹启明, 等. 基于交互式仿真平台的网络鱼雷协同作战仿真系统[J]. 鱼雷技术, 2014, 22(6): 473-478.

[13] 涂华东, 冀邦杰, 等. 网络鱼雷概念及关键技术探讨[J]. 鱼雷技术, 2008(4): 5-8.

(责任编辑 周江川)