

钨合金弹侵彻运动圆柱壳靶板的数值模拟

吴世永, 宿德志, 王 坤

(海军航空工程学院 基础部, 山东 烟台 264001)

摘要:采用有限元软件,对钨合金弹以不同速度侵彻具有不同横向运动速度的圆柱壳靶板的过程进行了数值模拟。计算结果表明,钨合金弹的剩余速度和剩余动能随着靶板的横向速度的增大而急剧降低,随着钨合金弹的侵彻速度的增大而增大,而靶板横向速度对钨合金弹剩余速度的影响在低速侵彻时比高速侵彻要大。

关键词:侵彻;横向运动;剩余速度;数值模拟

中图分类号:O385

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2013)05-0020-04

Numerical Simulation of Penetration of Tungsten-Alloy Projectile Penetrating Moving Cylindrical Shell Target

WU Shi-yong, SU De-zhi, WANG Kun

(Department of Basic Sciences, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: The process of penetrating moving cylindrical shell target with tungsten-alloy projectile was numerically simulated by the finite element code. The simulation results show that: the residual velocity and residual kinetic energy decrease with the increasing of the transverse velocity of the moving target, and increase with the increasing of the velocity of the tungsten-alloy projectile. The transverse velocity of the target has greater effect on the residual velocity of the tungsten-alloy projectile in low-velocity penetration than high-velocity penetration.

Key words: penetration; transverse moving; residual velocity; numerical simulation

反导舰炮武器系统是舰艇反导防御的最后一道屏障,原理是利用舰炮弹丸的动能穿甲来摧毁来袭导弹。研究弹丸对战斗部壳体的侵彻能力,对反导舰炮武器系统和反舰导弹的研制都有一定的理论指导意义。目前对弹丸侵彻静止靶的实验和数值模拟的研究较多^[1-3],对弹丸侵彻运动靶板的研究还较少^[4-6]。这些研究几乎都是集中在弹丸对平板的侵彻能力的研究上,没有考虑目标靶板的具体结构。本文作者曾对带半球形弹头的圆柱形钨合金弹侵彻圆柱形壳体靶板进行数值模拟研究,分析了钨合金弹以不同的速度侵彻圆柱形战斗部壳体的不同位置时的侵彻效果^[7]。但是由于现代导弹的末端速度非常大,钨合金弹的侵彻能力不但与子弹和来袭导弹的结构有关,还与导弹的运动状态有关,因此需要研究钨合金弹对运动目标的侵彻能力。

本文利用非线性动力学分析软件 ANSYS/LS-DYNA,通过数值模拟的方法研究了带半球形弹头的长杆钨合金弹对具有横向运动的圆柱壳靶板的侵彻贯穿能力,分析了钨合金弹以不同的速度侵彻横向运动速度不同的圆柱壳靶板时的侵彻效果。

1 计算模型及材料参数

1.1 计算模型

计算模型由长杆钨合金弹和圆柱壳结构的目标靶板组成,假设钨合金弹垂直侵彻圆柱壳靶板,圆柱壳的运动速度与钨合金弹的运动方向相垂直,结构示意图如图1所示。钨合金弹的总质量为142 g,头部为半球形,直径为10 mm,总

长度为 105 mm。目标靶板以反舰导弹的战斗部为原型,采用简化的圆柱壳结构,材料为 30CrMnSiA,圆柱壳的外径为 360 mm,厚度为 16 mm。由于模型相对钨合金弹和圆柱壳靶板的轴向所在平面具有对称性,计算中采用二分之一模型,在对称面上施加对称约束。为了减少计算时间,提高计算精度,在圆柱壳靶板的被侵彻区域加密网格,而非侵彻区域采用粗网格。

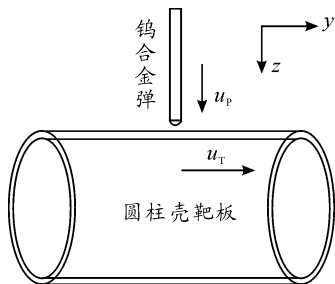


图1 钨合金弹侵彻圆柱壳

1.2 材料参数

计算中钨合金弹和圆柱壳靶板均采用随动塑性材料模型,此模型是各向同性、随动硬化或各向同性和随动硬化的混合模型,且与应变率相关,可考虑失效。应变率用 Cowper-Symonds 模型来考虑,屈服应力与应变率的关系为

$$\sigma_Y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/P} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_p^{off}), E_p = \frac{E_{tan} E}{E - E_{tan}}$$

式中: σ_Y 是屈服应力; $\dot{\varepsilon}$ 是应变率; C 、 P 是 Cowper-Symonds 应变率参数; σ_0 是初始屈服应力; β 是硬化参数; ε_p^{off} 是有效塑性应变; E_p 是材料的塑性硬化模量; E 是材料弹性模量, E_{tan} 是切线模量^[8]。

钨合金和 30CrMnSiA 的材料参数如表 1 所示,其中 ρ 为密度, μ 为泊松比, f_s 为损伤应变极限。

表1 钨合金和 30CrMnSiA 的主要计算材料参数

材料	$\rho /$ ($g \cdot cm^{-3}$)	$E /$ GPa	μ	$\sigma_0 /$ GPa	$E_{tan} /$ GPa	f_s
钨合金	17.60	360	0.20	1.21	36.0	1.51
30CrMnSiA	7.85	210	0.28	1.35	21.0	1.20

2 数值模拟结果及分析

2.1 圆柱壳靶板的横向运动速度对钨合金弹侵彻效能的影响

为了研究目标靶板的运动速度对钨合金弹侵彻效能的影响,分别计算了圆柱壳靶板的横向运动速度为 0、100 m/s、150 m/s、200 m/s 和 300 m/s 5 种情况下,钨合金弹以 1 000 m/s 的速度侵彻时,钨合金弹的侵彻效能以及圆柱壳靶板的破坏情况。图 2 和图 3 分别给出了 5 种情况下钨合金弹的

侵彻方向上的速度 v_z 和动能 E_k 随时间的变化关系,而图 4 给出了 5 种情况下圆柱壳靶板的破坏情况。从计算结果可以知道,长杆型钨合金弹以 1 000 m/s 的速度侵彻具有横向运动的运动靶板时,其侵彻效能随着运动靶板横向速度的增大而急剧降低。当目标静止时,钨合金弹的剩余速度为 773 m/s,是侵彻速度的 77.3%;钨合金弹的剩余动能为 37.1 kJ,是初始动能的 52.2%。当目标的横向速度为 100 m/s 时,钨合金弹的剩余速度为 547 m/s,是侵彻速度的 54.7%;钨合金弹的剩余动能为 20.6 kJ,是初始动能的 29.0%。当目标的横向速度为 200 m/s 时,钨合金弹的剩余速度为 94 m/s,是侵彻速度的 9.4%;钨合金弹的剩余动能为 2.5 kJ,是初始动能的 3.5%。当目标靶板的横向运动速度达到 300 m/s (约为 0.95 Ma) 时,钨合金弹将无法穿透圆柱壳体。可见利用弹丸的动能穿甲来摧毁具有超音速横向运动的来袭导弹是比较困难的。

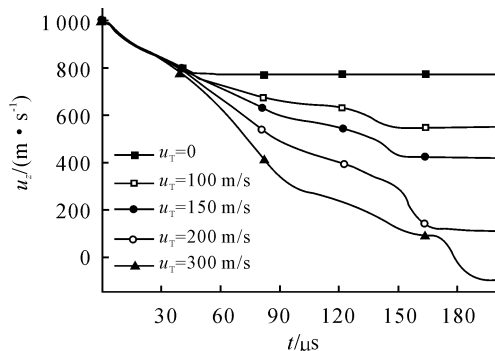


图2 钨合金弹速度随时间的变化关系

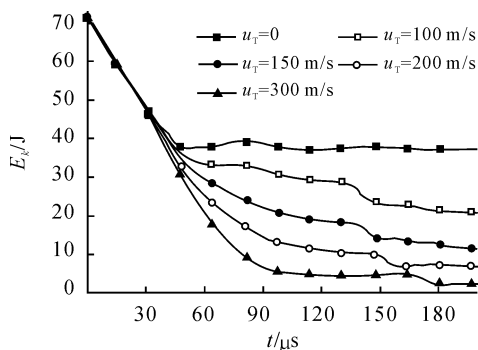


图3 钨合金弹的动能随时间的变化关系

从图 4 上可以看出,随着圆柱壳靶板横向速度的增加,靶板的破坏开孔逐渐变的不规则。在靶板静止时,靶板上形成较规则的圆形穿孔,孔径略大于钨合金弹的直径。而当目标靶板有横向速度时,靶板对钨合金弹有横向的相互作用,致使钨合金弹的形状发生弯曲变形,圆柱壳靶板上也形成不规则的弹孔。随着圆柱壳靶板横向速度的增大,钨合金弹会被侧向侵蚀,产生较大的质量损失,大大降低其侵彻效能。这也是目前军事上应用反应装甲来提高装备防护能力的原理^[9]。

从钨合金弹的速度曲线还可以看出,在钨合金弹的头部

穿透圆柱壳靶板之前,也即侵彻的前 $50 \mu\text{s}$,钨合金弹的速度变化趋势是相同的,也就是说在侵彻初期,圆柱壳靶板的横向运动速度对钨合金弹的侵彻过程的影响较小。圆柱壳靶板横向运动对钨合金弹侵彻效能的影响主要在后期的贯穿过程,在这个过程中,具有横向运动的靶板将持续给予钨合金弹侧向侵蚀作用,导致钨合金弹的侵彻效能降低。

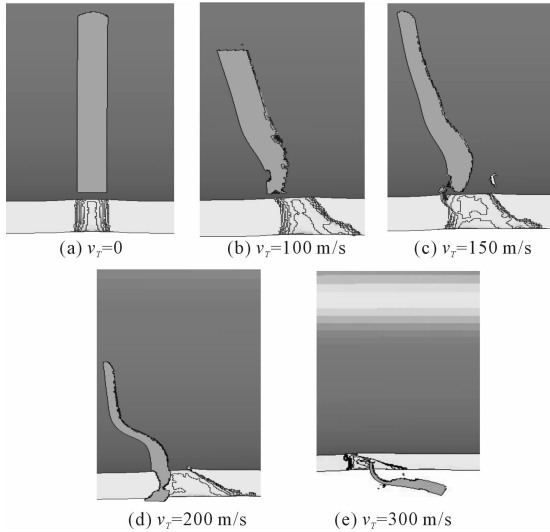


图4 不同横向速度下目标靶板及钨合金弹的破坏情况

2.2 侵彻运动圆柱壳靶板时,钨合金弹的侵彻速度对其侵彻效能的影响

为了研究钨合金弹以不同速度侵彻具有相同横向运动速度的圆柱壳靶板的效能,计算了当圆柱壳靶板以 200 m/s 的横向速度运动时,钨合金弹以不同速度侵彻的侵彻效能。图6和图7分别给出了钨合金弹的速度和动能随时间的变化曲线。从曲线上可以看出,当钨合金弹的侵彻速度小于 900 m/s 时,钨合金弹速度降为零,无法贯穿靶板。在能侵彻穿透的 900 m/s 到 1300 m/s 侵彻速度范围内,钨合金弹的剩余速度和剩余动能随着侵彻速度的降低而急剧减少。例如,侵彻速度从 1300 m/s 降到 1200 m/s 时,钨合金弹侵彻方向的剩余速度降低了 198 m/s ;而侵彻速度从 1200 m/s 降到 1100 m/s 时,剩余速度降低了 342 m/s 。

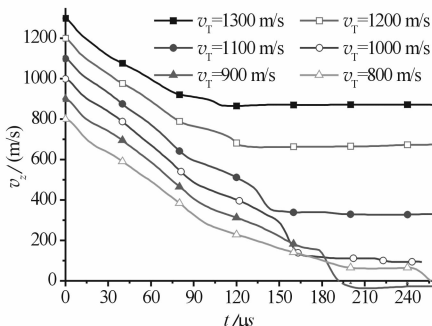


图5 钨合金弹速度随时间的变化关系

2.3 钨合金弹剩余速度与侵彻速度及靶板横向速度之间的关系

钨合金弹侵彻圆柱壳靶板后在侵彻方向上的剩余速度大小 v_{zr} 与钨合金弹的侵彻速度 v_{z0} 及靶板的横向速度 v_T 有关。为了分析侵彻速度和靶板横向运动速度对钨合金弹侵彻效能的影响,分别计算了钨合金弹以不同速度侵彻横向速度为 100 m/s 、 150 m/s 和 200 m/s 的圆柱壳靶板的过程。图7给出了靶板不同横向速度下,钨合金弹的剩余速度与钨合金弹的侵彻速度之间的关系。可以看出,钨合金弹的剩余速度随着侵彻速度的增大而增大,而在同一侵彻速度下,随着靶板横向速度的增加而减小。当钨合金弹的剩余速度为零时,表示没能贯穿靶板。

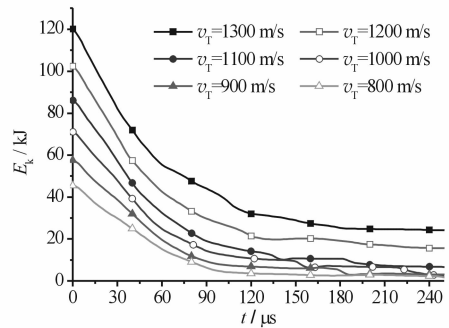


图6 钨合金弹的动能随时间的变化关系

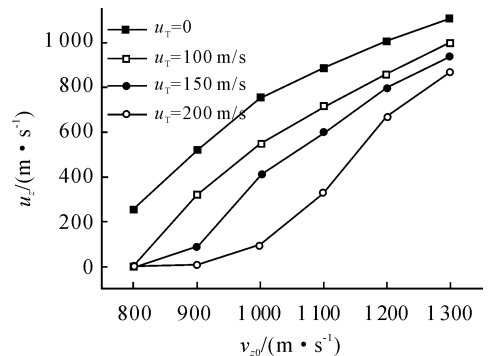
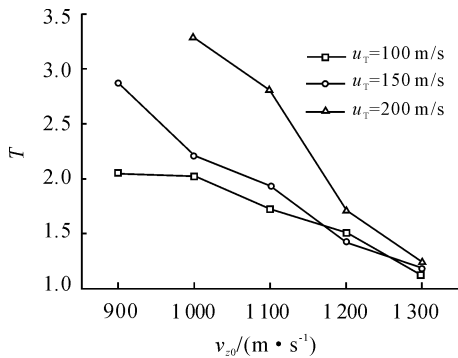


图7 钨合金弹剩余速度与侵彻速度的关系

为了描述横向速度对钨合金弹侵彻过程中损失速度影响的大小,引入物理量 T ,表示单位横向速度消耗的损失速度大小,定义为

$$T = \frac{(v_{z0} - v_{zr,0}) - (v_{z0} - v_{zr,v_T})}{v_T} = \frac{v_{zr,v_T} - v_{zr,0}}{v_T}$$

其中, $v_{zr,0}$ 和 v_{zr,v_T} 分别表示靶板横向速度为 0 和 v_T 时钨合金弹侵彻方向上的剩余速度大小。 T 越大,说明单位横向速度消耗的钨合金弹的损失速度越大,即靶板的横向运动对钨合金弹的侵彻效能影响越大。图8给出了 T 与侵彻速度之间的关系,当钨合金弹速度降为零的情况不再计算。从图上可以知道,在侵彻速度较低时, T 随靶板横向速度的影响较大;而侵彻速度较高, T 随靶板横向速度的影响较小。所以,靶板横向速度对钨合金弹侵彻效能的影响在低速侵彻比高速侵彻要大。

图8 T 与侵彻速度的关系

3 结束语

通过采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件,对钨合金弹侵彻具有横向运动的圆柱壳靶板的过程进行了数值模拟。分别计算了钨合金弹以不同的速度侵彻具有不同横向运动速度的圆柱壳靶板过程中钨合金弹的速度和动能随时间的变化关系,并给出了圆柱壳靶板的穿孔情况。通过分析钨合金弹的侵彻速度和靶板的横向速度对钨合金弹侵彻效能的影响,可以知道,钨合金弹的侵彻效能随着靶板的横向速度的增大而急剧降低,而钨合金弹的剩余速度和剩余动能随着侵彻速度的增大而增大。通过分析靶板单位横向速度消耗的钨合金弹的损失速度大小可以知道,靶板横向速度对钨合金弹侵彻效能的影响在低速侵彻比高速侵彻要大。

参考文献:

[1] Silsby G F. Penetration of Semi-Infinite Steel Targets by

Tungsten Rods at 1.3 to 4.5 km/s [C]//8th International Symposium on Ballistics. Orlando, Florida, 1984.

- [2] 周平,姚武文,侯日立. 柱形弹侵彻靶板剩余速度的有限元分析[J]. 弹箭与制导学报,2010,30(2):117-122.
- [3] 楼建锋,王政,洪滔,等. 钨合金杆侵彻半无限厚铝合金靶的数值研究[J]. 高压物理学报,2009,23(1):65-70.
- [4] E Lide, B Johansson, B Lundberg. Effect of Thin Oblique Moving Plates on Long Rod Projectiles: A Reverse Impact Studies [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006,32(10):1696-1720.
- [5] 薛鸿艳,王凤英,李长顺. 动能弹斜侵彻运动装甲目标的数值模拟[J]. 弹箭与制导学报,2010,30(2):149-151.
- [6] 邹运,刘天生,刘敏娜. 杆式动能弹斜侵彻横向运动靶板影响因素的数值模拟[J]. 弹箭与制导学报,2011,31(3):131-134.
- [7] 吴世永,王伟力,江炎兰. 钨合金弹侵彻圆柱壳靶板的数值模拟研究[J]. 四川兵工学报,2011,32(11):29-32.
- [8] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword User Manual [M]. Version 971. Livermore, USA, 2007.
- [9] 崔宝元,刘天生,许文梅. 爆炸反应装甲主动防长杆穿甲弹技术新探究[J]. 机械管理开发,2011,(1):29-31.
- [10] 朱峰,朱卫华,颜君来,等. 锥头弹弹尖角度对侵彻效果影响问题的数值分析[J]. 四川兵工学报,2011(3):139-141.
- [11] 朱生盛,方维凤,刘宏伟,等. LEFP 成型及侵彻过程的数值模拟[J]. 兵工自动化,2011(5):76-79.

(责任编辑 杨继森)

(上接第 11 页)

4 结束语

通过以上分析可以看出:运用 AHP 法和模糊综合评判法能够有效地对常规导弹部队战术模拟训练做出评价,使训练者和决策机构认识到现状,查漏补缺,不断提升部队的现代化训练水平和打赢能力,增强各级指挥员的自我调控和自我管理训练能力。经过实际运用证明,这种方法是科学的、合理的,具有较强的操作性和应用性。

参考文献:

- [1] 王庆林. 模糊控制与信息处理[M]. 北京:北京理工大学出版社,2002.
- [2] 吴冲华,滕宗平,李颖,等. 炮兵指挥系统模拟训练评估模型及其实现方法[J]. 火力与指挥控制,2011,36(8):141-144.

- [3] 陈琦,郭大鹏. 模糊综合评判法在干部教育培训评估中的应用[J]. 实践探索,2009,23(1):46-50.
- [4] 姜为学,邓钦,李宗良,等. 某型火控仿真系统模拟训练质量模糊评判[J]. 弹箭与制导学报,2007,27(2):300-303.
- [5] 郭伟,刘国玺. 空中机械师模拟训练评估系统研究[J]. 装备制造技术,2010(5):36-38.
- [6] 李雪飞,孙永侃,熊正祥. 舰艇作战模拟训练评估技术研究[J]. 指挥控制与仿真,2012,34(4):107-110.
- [7] 易昭湘,慕晓冬,张力,等. 弹箭与制导学报[J]. 弹箭与制导学报,2007,27(2):382-385.
- [8] 杨玉峰,方泉根. 海警船艇狭水道航行模拟训练评价系统[J]. 实践探索,2008,29(3):14-19.
- [9] 王鹏,方洋旺,张磊,等. 基于改进模糊综合评判法的飞行员综合能力研究[J]. 航空兵器,2010(3):34-37.

(责任编辑 周江川)