

高速长杆弹侵彻半无限混凝土靶深度分析模型^{*}

练兵^{1,2}, 蒋建伟¹, 樊虎², 门建兵¹, 王树有¹

(1 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

2 空军驻襄樊地区军事代表室, 湖北襄樊 441003)

摘要:将高速长杆弹对半无限混凝土靶的侵入过程分为开坑、侵蚀阶段侵彻和刚体阶段侵彻。侵蚀过程中计算长杆弹质量的减少量, 侵彻过程中计算侵彻深度的增加量, 对侵彻增量进行求和得到侵蚀状态侵彻总深度。刚性阶段侵彻混凝土时, 运用空腔膨胀理论计算侵彻深度。应用分析模型对钨杆侵彻半无限混凝土靶深度进行了计算, 与实验结果吻合较好。

关键词:高速; 长杆弹; 侵彻; 混凝土

中图分类号: O313.4 **文献标志码:** A

Depth Analysis Model of Penetration of High Speed Projectiles into Semi-infinite Concrete

LIAN Bing^{1,2}, JIANG Jianwei¹, FAN Hu², MEN Jianbing¹, WANG Shuyou¹

(1 State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, BIT, Beijing 100081, China;

2 Military Representative Office of Air Force in Xiangfan Area, Hubei Xiangfan 441003, China)

Abstract: The penetration of long-rod projectiles into semi-infinite concrete was divided into crater, penetration during eroding state and penetration during rigid state. The mass loss of projectiles was calculated in the eroding state while the increment of penetration of projectile was calculated in the penetration state. The total penetration depth during eroding state was obtained by summing the increment of penetration. When the projectiles penetrated concrete at rigid state, the penetration depth of projectiles was calculated based on cavity expansion theory. Penetration depth of tungsten alloy eroding projectiles into semi-infinite concrete was obtained by this analysis model and it was identical to the result obtained by the experiment.

Keywords: high speed; long-rod projectile; penetration; concrete

0 引言

低速(着速小于 1000m/s)弹丸对混凝土靶的冲击响应和破坏国内外进行了大量研究, 空腔膨胀理论在低速侵彻问题上获得了较好的效果。

高速(着速在 1000~3000m/s 之间)长杆弹侵彻混凝土既不同于低速刚性弹, 也不同于射流的侵彻。Vladimir M. Gold^[1]提出当着速小于 1000m/s 时, 可以作为刚体处理, 着速在 1000~1900m/s 时, 根据试验和修正的流体动力学理论计算得到侵彻深度随着速增大而减小。H. Khoda-rahmi^[2]在现有分析模型的基础上, 建立了一种新的可变形弹丸的侵彻模型, 得到的结果与试验、仿真结果吻合很好。

文中针对高速长杆弹侵彻混凝土问题, 在假设长

杆弹为理想刚塑性介质和弹坑坑底存在碎渣区的基础上推导考虑质量损失的侵彻深度分析模型。

1 长杆弹侵彻混凝土深度分析

将长杆弹对半无限混凝土靶的侵入过程分为开坑、侵蚀阶段侵彻和刚体阶段侵彻。侵彻深度由三部分组成: 表面弹坑深度 H_c 、侵蚀阶段深度 H_1 和刚体阶段深度 H_2 。定义 V_s 为临界侵蚀速度, 当长杆弹速度大于 V_s 时, 以侵蚀状态侵彻混凝土; 当长杆弹速度小于 V_s 时, 以刚体状态侵彻混凝土。

1.1 弹丸阻力

材料的屈服准则采用 Mohr-Coulumb 准则, 弹性区是不可压缩弹性体, 根据球形空腔膨胀理论得到空腔表面无量纲应力:

^{*} 收稿日期: 2010-03-30

基金项目: 重点实验室基金(ZDKT 08-4-10)资助

作者简介: 练兵(1980-), 男, 河南永城人, 博士研究生, 研究方向: 弹药终点效应。

$$S = A + B\rho_0 V^2 / \tau_0 \quad (1)$$

式中:

$$A = \gamma^{-2\alpha'} \left[\frac{2}{3} + \frac{(1 - \gamma^{2\alpha'})}{\gamma} \right]$$

$$B = \gamma^{-2(1+\alpha')} \left[\frac{3\tau_0}{E} + \eta^* \left(1 - \frac{3\tau_0}{2E} \right)^2 \right] + \gamma^{(1-2\alpha')}$$

$$\frac{[\gamma^3(1-2\alpha')(1-\gamma^{2\alpha'-4}) - 2(2-\alpha')(1-\gamma^{2\alpha'-1})]}{(1-\eta^*)(1-2\alpha')(2-\alpha')}$$

$$\alpha' = \frac{3\lambda}{3+2\lambda}$$

其中: η^* 为锁定体积应变; τ_0 为混凝土材料屈服极限; λ 为材料的强化模量; ρ_0 为介质的初始密度。

对于卵形弹经过推导可得弹丸阻力:

$$F = \alpha_1 + \beta_1 V^2 \quad (2)$$

式中:

$$\alpha_1 = \pi s^2 \tau_0 A \left[(1 - \sin\phi_0)^2 + \mu \left(\frac{\pi}{2} - \phi_0 \right) - \mu \frac{\sin 2\phi_0}{2} \right]$$

$$\beta_1 = \pi s^2 \rho B \left[\frac{\cos^4 \phi_0}{2} - \left(\frac{4}{3} \sin\phi_0 - 2\sin^2 \phi_0 + \frac{2\sin^4 \phi_0}{3} \right) + \right.$$

$$\left. \frac{\mu}{4} \left(\frac{\pi}{2} - \phi_0 \right) + \frac{\mu \sin 4\phi_0}{16} - \frac{2\mu \sin\phi_0 \cos^3 \phi_0}{3} \right]$$

1.2 弹丸质量侵蚀

长度为 L 直径为 D 的长杆弹以着速 V 撞击混凝土, 设在时刻 t_n 长杆弹的长度为 $L(t_n)$, 速度为 $V(t_n)$, 坑底的运动速度为 $U(t_n)$ 。

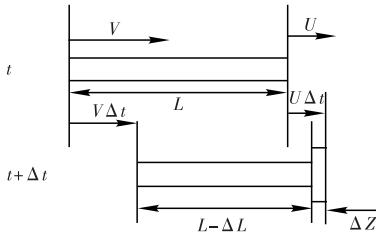


图 1 长杆弹刚性部分长度变化示意图

将长杆弹侵彻过程中形成的蘑菇头等效为短圆柱体, 时间间隔 Δt 内长杆弹刚性部分长度的变化如图 1 所示。记塑性区的平均工程应变为 e , 塑性区的增量为 ΔZ 。

根据工程应变的定义可得塑性区长度的增量:

$$\Delta Z = \Delta L(e + 1) \quad (3)$$

从图 1 的几何关系可知 t 与 $t + \Delta t$ 时刻长杆弹长度之间的关系为:

$$L + U\Delta t = V\Delta t + (L - \Delta L) + \Delta Z \quad (4)$$

将式(3)代入式(4), 并取极限可得:

$$\frac{dL}{dt} = \frac{V - U}{e} \quad (5)$$

长杆弹能够承受的最大应力为 Y_p , 在 Y_p 的作用下减速, 其运动方程为:

$$\rho_p L \frac{dV}{dt} = -Y_p \quad (6)$$

取坑底碎渣堆积体为隔离体, 作用在隔离体上的外力有弹丸压力和靶体抗力, 碎渣的运动方程可简化为:

$$Y_p + 2\rho_p (V - U)^2 = AP/A_0 \quad (7)$$

由式(5)~式(7)及初始条件 $L(t=0) = L, V(t=0) = V, m(t=0) = m, U(t=0) = 0$ 可求得任一时刻长杆弹速度为 $V(t_n)$ 时的弹长 $L(t_n)$, 则弹质量为:

$$m(t_n) = \frac{mL(t_n)}{L} \quad (8)$$

1.3 侵彻深度计算

1.3.1 侵蚀阶段侵彻深度 H_1 计算

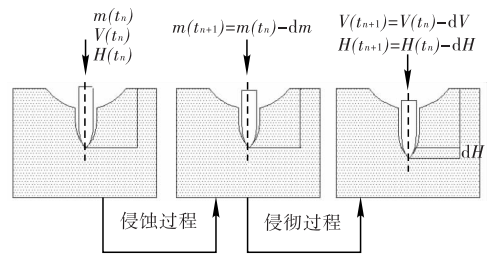


图 2 侵蚀阶段侵彻示意图

侵蚀阶段侵彻过程如图 2 所示。侵蚀过程中, 假定弹丸在极小的时间增量 dt 内, 弹丸质量损失为 dm ; 侵彻过程中, 假定弹丸在极小的时间增量 dt 内, 弹丸速度减小量不 dV , 侵彻深度增加量为 dH 。

$$V(t_{n+1}) = V(t_n) - dV \quad (9)$$

$$m(t_{n+1}) = m(t_n) - dm \quad (10)$$

$$H(t_{n+1}) = H(t_n) + dH \quad (11)$$

弹丸开坑和侵彻过程中的受力可通过以下方程表示:

$$\begin{cases} F = KH & (0 < H \leq 4R) \\ F = \alpha_1 + \beta_2 V^2 & (H > 4R) \end{cases} \quad (12)$$

开坑阶段利用牛顿第二定律有:

$$ma = KH \quad (13)$$

$$a = \frac{dV}{dt} = V \frac{dV}{dH} \quad (14)$$

$$\frac{mVdV}{KH} = dH \quad (15)$$

开坑结束即 $H = 4R$ 时, 利用初始条件 $H(t=0) = 0, V(t=0) = V, m(t=0) = m$ 和式(5)~式(11)、式(15) 可得此时弹丸速度和弹丸质量。

对侵蚀阶段利用牛顿第二定律有:

$$m \frac{dH^2}{dt} = \alpha_1 + \beta_1 V^2 \quad (16)$$

即: $mV \frac{dV}{dH} = \alpha_1 + \beta_1 V^2 \quad (17)$

对式(17)从 $V(t_n)$ 到 $V(t_{n+1})$ 积分,可得在极小的速度减小量 dV 内侵彻深度的增加量 dH ,对求得的侵彻增量 dH 进行求和可得到弹丸速度为 V_s 时侵蚀状态侵彻深度 H_1 。

1.3.2 刚性阶段侵彻深度 H_2 计算

弹丸速度为 V_s 时,以刚体状态侵彻混凝土,弹丸质量 m_s 由式(5)~式(8)联立求得。弹丸刚性侵彻阶段的受力可通过以下方程表示:

$$F = \alpha_1 + \beta_1 V^2 \quad 4R + H_1 < H \quad (18)$$

对刚性阶段利用牛顿第二定律有:

$$m_s \frac{dH^2}{dt} = \alpha_1 + \beta_1 V^2 \quad (19)$$

$$\frac{dH}{dV} = \frac{m_s V}{\alpha_1 + \beta_1 V^2} \quad (20)$$

对式(20)从 V_s 到 0 积分,得刚性阶段侵深:

$$H_2 = \frac{m_s}{2\beta_1} \ln\left(1 + \frac{\beta_1 V_s^2}{\alpha_1}\right) \quad (21)$$

2 算例及分析

应用文中建立的分析模型,对钨杆高速侵彻混凝土深度进行计算,并与实验结果^[5]进行对比。靶板为半无限混凝土,密度 $2350\text{kg}/\text{m}^3$,单轴抗压强度 35MPa ,弹丸为柱状结构,质量 3.4kg ,长度 470mm ,直径 23mm ,密度 $17400\text{kg}/\text{m}^3$,屈服强度 1506MPa 。

文中模型需要确定塑性区平均工程应变 e 的大小。Wang et al^[3]运用其建立的考虑蘑菇头效应的模型计算侵彻金属靶时 e 取 -0.8 ,考虑到混凝土材料的侵彻阻力小于金属材料的侵彻阻力,参考李志康^[4]建立的长杆弹侵彻混凝土模型,文中塑性区的平均工程应变 e 取 -0.7 。

V_s 的取值对计算结果产生影响,取 $V_s = 950\text{m/s}$ 、 1000m/s 和 1050m/s 三个值进行计算。图 3 是侵彻深度理论计算与实验结果对比,可以看出临界侵蚀速度取 1000m/s 时,计算结果与实验结果比较接近。

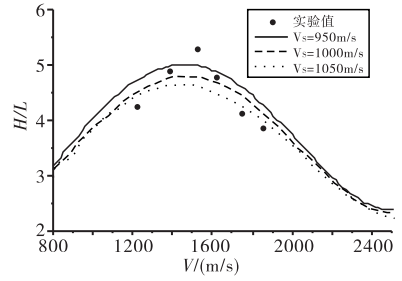


图 3 侵彻深度与着速关系

从图 3 还可以看出随着速增大,侵彻深度呈现先增大后减小的规律,着速约 1500m/s 时侵深最大。

3 结论

在假设长杆弹为理想刚塑性介质和弹坑坑底存在碎渣区的基础上,引入塑性区的平均工程应变描述侵彻过程中的“蘑菇头”效应,建立了考虑质量损失的侵彻深度工程分析模型。应用分析模型对钨杆高速侵彻混凝土深度进行了计算,计算结果与实验结果吻合较好,表明该模型可用于工程计算。

参考文献:

[1] Vladimir M Gold. Concrete penetration by eroding projectiles: Experiments and analysis, ADE 402791 [R]. 1996.

[2] H Khoda-rahmi. Incremental deformation and penetration analysis of deformable projectile into semi-infinite target[J]. International Journal of Solids and Structure, 2006,43(3):569-582.

[3] Wang P, Jones S E. An elementary theory of one-dimensional rod penetration using a new estimate for pressure [J]. International Journal of Impact Engineering, 1995, 18(3):265-279.

[4] 李志康. 弹体正侵彻半无限混凝土靶的理论分析[D]. 北京:北京理工大学, 2008.

[5] 练兵,蒋建伟,等. 侵蚀动能弹侵彻半无限混凝土深度研究[C]//战斗部与毁伤效率第十一届学术交流会论文集,湖北宜昌,2009.