

# 尖锥头长杆弹侵彻的界面击溃分析<sup>1)</sup>

李继承 陈小伟<sup>2)</sup>

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 绵阳 621900)

**摘要** 在 Alekseevski-Tate 模型基础上, 理论分析了尖锥头长杆弹的界面击溃过程, 分别给出在锥头侵蚀阶段和弹身侵蚀阶段的弹体速度下降及质量侵蚀计算公式; 随后分析弹体的动能损失, 讨论半锥角对弹体动能损失的影响. 通过分析小子弹撞击陶瓷 / 金属复合靶板的例子, 验证了该理论的正确性, 并对比分析了尖锥头长杆弹与小子弹及平头长杆弹在界面击溃中动能损失之间的差异.

**关键词** 尖锥头长杆弹, 界面击溃, 速度下降, 质量侵蚀, 动能损失, 理论分析

中图分类号: O315 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2011)01-0063-08

## 引 言

Hauver 课题组最先报道了陶瓷靶板侵彻试验的界面击溃 (interface defeat) 现象<sup>[1-4]</sup>, 即弹体材料在靶板表面向外流动而靶板未发生明显侵彻. 之后 Lundberg 课题组开展了许多针对长杆弹撞击不同种类陶瓷靶板的试验研究、理论分析及数值模拟等相关工作<sup>[5-9]</sup>, 涉及到弹体的界面击溃、常规侵彻以及由界面击溃向常规侵彻的转变等. Holmquist 和 Johnson<sup>[10-11]</sup> 也进行了相关数值模拟研究, 讨论弹体撞击不同围压陶瓷靶板的弹靶变形和破坏模式. 国内也开展了大量长杆弹撞击陶瓷靶板的相关研究, 但鲜有关于界面击溃现象的报道和相应分析.

在界面击溃过程中, 弹体由于其头部材料向外流动而发生质量侵蚀, 同时由于靶板阻力作用导致其撞击 (弹尾) 速度下降. 因此, 弹体损失其动能, 进而影响对靶板的侵彻 / 穿甲. Anderson 和 Walker<sup>[12]</sup> 开展了尖锥头小子弹 (small arms) 撞击陶瓷 / 金属复合靶板的数值模拟, 给出界面击溃过程和侵彻过程中子弹速度和位移的变化曲线, 并分别针对小子弹以及柱形 (平头) 长杆弹在界面击溃过程中的动能损失进行分析, 结合相关试验数据经验给出弹体损失动能相对于其初始动能的比例值随时间变化的关系, 并分别给出由于质量侵蚀及速度下降而导致的动能损失. 其相关理论分析主要基于平头长杆弹撞

击情形, 未考虑锥头形状在侵彻中的影响. 由于其所分析的小子弹锥头较粗 (半锥角  $\theta = 27.5^\circ$ ), 锥头长度较短 (0.71 cm), 尖锥头侵蚀所经历时间不长 (约  $8\mu\text{s}$ ), 其近似简化所引起的误差较小. 而若弹丸半锥角减小, 锥头长度增大, 则锥头侵蚀持续时间随即增加, 弹体质量侵蚀变缓, 如 Lundberg 等<sup>[9]</sup> 的尖锥头长杆弹撞击陶瓷靶板试验, 锥头长度达到约 2.86 cm (对应于弹身直径  $D = 0.5\text{ cm}$ ,  $\theta = 5^\circ$ ), 弹丸锥头发生界面击溃的持续时间大于  $15\mu\text{s}$ , 如图 1 所示. 此时若仍从平头杆弹撞击的理论模型出发, 则相应分析所引起的误差将不可忽略; 另外, 锥头侵蚀过程中弹体的质量侵蚀与平头杆弹侵彻的质量侵蚀有所不同, 因而也可能导致与平头杆弹互不相同的动能损失模式.

Alekseevski<sup>[13]</sup> 和 Tate<sup>[14]</sup> 给出了控制金属长杆 (平头杆弹) 对金属靶及陶瓷靶高速侵彻的修正 Bernoulli 方程. 在 Alekseevski-Tate 模型基础上, 本文考虑弹头形状, 进一步理论分析尖锥头长杆弹在界面击溃过程中的速度下降及质量侵蚀; 随后讨论弹体的动能损失, 分析半锥角对弹体动能损失的影响, 并讨论速度下降和质量侵蚀对弹体动能损失的贡献, 同时对比分析长杆弹与小子弹之间以及不同头形长杆弹之间其动能损失的差异; 最后结合相关分析, 给出针对陶瓷靶板侵彻 / 穿甲的弹体设计的一些建议.

2009-12-24 收到第 1 稿, 2010-04-15 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金资助项目 (10672152).

2) E-mail: chenxiaoweintu@yahoo.com

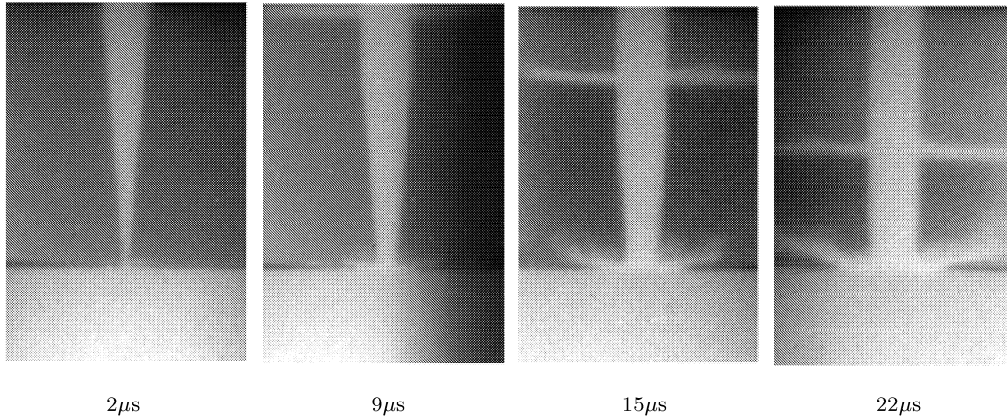


图 1  $\theta = 5^\circ$  尖锥头杆弹以 1022 m/s 速度撞击陶瓷靶板的界面击溃过程 [9]

Fig.1 Interface defeat of a conical-nosed long rod with half apex angle  $\theta = 5^\circ$  impacting onto ceramic target at impact velocity of 1 022 m/s[9]

1 界面击溃模型

Alekseevski<sup>[13]</sup> 和 Tate<sup>[14]</sup> 假设弹体呈刚性，但在弹靶界面区域呈半流体状，给出控制金属长杆（平头杆弹）对金属靶及陶瓷靶等高速侵彻的修正 Bernoulli 方程

$$\frac{1}{2}\rho_p(v-u)^2 + Y_p = \frac{1}{2}\rho_t u^2 + R_t \quad (1)$$

$$\rho_p l' \frac{dv}{dt} = -Y_p \quad (2)$$

$$\frac{dl'}{dt} = -(v-u) \quad (3)$$

$$\frac{dP}{dt} = u \quad (4)$$

式中， $\rho_p$  和  $\rho_t$  分别为弹材密度和靶材密度； $Y_p$  为弹材流动应力； $R_t$  为靶材侵彻阻力； $u, v, P$  和  $l'$  分别为侵彻速度 (nose velocity)、弹体速度 (tail velocity)、侵彻深度以及弹体长度，四者均为时间  $t$  的函数。  $t = 0$  时， $v = v_0, l' = L$ ，其中  $v_0$  和  $L$  分别为初始撞击速度及弹体初始长度。

在界面击溃过程中，式 (1)~ 式 (4) 中的  $u$  取为零值，且式 (1) 和式 (4) 不再适用。相应地，式 (3) 写为

$$\frac{dl'}{dt} = -v \quad (5)$$

同时可将式 (2) 表示为严格的牛顿第二定律表达式

$$m \frac{dv}{dt} = -Y_p S \quad (6)$$

其中， $m$  为弹体质量， $S$  为弹头横截面积。

式 (6) 为一般意义上的牛顿第二定律表达式，因此式 (5) 和式 (6) 即可决定任意头形弹体在界面

击溃过程中的力学行为。

2 界面击溃过程中弹体的速度下降以及质量侵蚀

根据式 (5) 和式 (6)，可具体讨论尖锥头长杆弹在界面击溃过程中的速度下降以及质量侵蚀。尖锥头长杆弹的结构如图 2 所示，图中  $R$  为弹身半径； $l$  为侵蚀长度； $r$  为锥头侵蚀长度为  $l$  时对应的弹头横截面半径，在锥头侵蚀阶段  $r = l \tan \theta$ ； $L_1$  和  $L_2$  分别为尖锥头杆弹的锥头长度和弹身长度，其中  $L_1 = R/\tan \theta, L_1 + L_2 = L$ 。

结合图 2，分析中以侵蚀长度  $l$  作为主要分析变

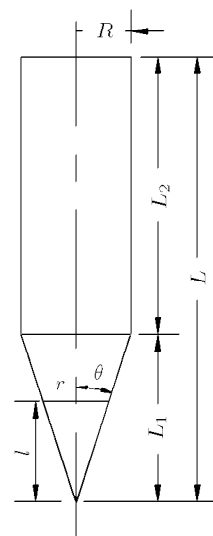


图 2 尖锥头长杆弹结构示意图

Fig.2 Geometry of a conical-nosed long rod

量, 相应地可将式 (5) 改写为

$$\frac{dl}{dt} = v \quad (7)$$

根据式 (7) 可将式 (6) 中  $dv/dt$  表示为

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dl/v} = v \frac{dv}{dl} \quad (8)$$

以下讨论弹体的速度下降以及质量侵蚀情况, 分析中将弹体初始质量表示为  $M$ . 尖锥头杆弹的质量侵蚀分为两个阶段——锥头侵蚀阶段和弹身侵蚀阶段, 通过图 1 也可发现该现象. 首先是锥头发生侵蚀, 待锥头全部侵蚀, 即侵蚀长度  $l = L_1 = R/\tan\theta$  时, 相应的弹体速度将下降为  $v_1$ ; 此后弹身开始侵蚀. 弹身的侵蚀与柱形长杆弹侵彻的情形相似, 仅弹体初始质量变为  $M_1 = M - \rho_p(\pi R^2 L_1/3)$ ; 初始撞击速度由  $v_0$  变为  $v_1$ .

### 2.1 锥头侵蚀阶段 ( $l \leq R/\tan\theta$ )

在锥头侵蚀阶段, 式 (6) 可表达为

$$\left[ M - \rho_p \left( \frac{1}{3} \pi l^3 \tan^2 \theta \right) \right] v \frac{dv}{dl} = -Y_p \pi (l \tan \theta)^2 \quad (9)$$

推导式 (9) 可得

$$\frac{1}{2} \rho_p (v^2 - v_0^2) = Y_p \ln \left[ 1 - \frac{\rho_p \left( \frac{1}{3} \pi l^3 \tan^2 \theta \right)}{M} \right] \quad (10)$$

因此可求得弹体侵蚀长度  $l$  与弹体速度  $v$  的关系

$$l = \left\{ \frac{M}{\rho_p \left( \frac{1}{3} \pi \tan^2 \theta \right)} \left\{ 1 - \exp \left[ \frac{\rho_p}{2Y_p} (v^2 - v_0^2) \right] \right\} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

将式 (11) 代入式 (9), 并结合式 (8) 可得

$$dt = - \left( \frac{M \rho_p^2}{9Y_p^3 \pi \tan^2 \theta} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{\exp \left[ \frac{\rho_p}{2Y_p} (v^2 - v_0^2) \right]}{\left\{ 1 - \exp \left[ \frac{\rho_p}{2Y_p} (v^2 - v_0^2) \right] \right\}^{\frac{2}{3}}} dv \quad (12)$$

定义一个常系数  $K$  (量纲 [T]) 和一个无量纲常量  $A$  为

$$K = \left[ \frac{M \rho_p^2}{9Y_p^3 \pi \tan^2 \theta} \right]^{\frac{1}{3}} v_0, \quad A = \frac{\rho_p v_0^2}{2Y_p} \quad (13)$$

$A$  的实质为 Johnson 破坏数. 结合式 (13), 对式 (12) 等号两边积分, 可得弹体速度  $v$  与时间  $t$  的关系

$$t = K \exp \left( -\frac{1}{3} A \right).$$

$$\int_{v/v_0}^1 \frac{\exp \left[ A \left( \frac{v}{v_0} \right)^2 \right]}{\left\{ \exp(A) - \exp \left[ A \left( \frac{v}{v_0} \right)^2 \right] \right\}^{\frac{2}{3}}} d \frac{v}{v_0} \quad (14)$$

由式 (13) 和式 (14) 可看出, 弹体的速度下降与其半锥角  $\theta$  相关.

### 2.2 弹身侵蚀阶段 ( $l > R/\tan\theta$ )

此阶段与柱形长杆弹侵彻的情况相同, 对应地可将式 (6) 表达为

$$(M_1 - \rho_p \pi R^2 l_1) v \frac{dv}{dl_1} = -Y_p \pi R^2 \quad (15)$$

式中,  $l_1$  为弹身侵蚀阶段的侵蚀长度, 即此阶段中弹体总侵蚀长度为  $l = L_1 + l_1$ . 与式 (9) 的推导相似, 理论推导式 (15) 可得到此阶段中侵蚀长度  $l_1$  和弹体速度  $v$  随时间变化的关系为

$$l_1 = \frac{M_1}{\rho_p \pi R^2} \left\{ 1 - \exp \left[ \frac{\rho_p}{2Y_p} (v^2 - v_1^2) \right] \right\} \quad (16)$$

$$t_1 = K_1 \exp(-A_1) \cdot \int_{v/v_1}^1 \exp \left[ A_1 \left( \frac{v}{v_1} \right)^2 \right] d \frac{v}{v_1} \quad (17)$$

式中  $v_1$  值可将  $l = L_1$  代入式 (11) 求得; 式 (17) 中常系数  $K_1$  (量纲 [T]) 和无量纲常量  $A_1$  分别为

$$K_1 = \frac{M_1 v_1}{\pi R^2 Y_p}, \quad A_1 = \frac{\rho_p v_1^2}{2Y_p} \quad (18)$$

需注意的是, 式 (15)~式 (18) 中的时间  $t_1$  为从弹身开始侵蚀的时间.

式 (14) 和式 (17) 中的积分项均不能得到解析表达式, 因此不能得到弹体速度  $v$  随时间变化的解析关系. 但通过具体的时间序列, 利用数值计算 (如 MATLAB 程序) 可求得对应的弹体速度  $v$  的变化. 结合锥头侵蚀阶段  $v$  随时间  $t$  变化的序列 (式 (14)) 和式 (11) 即可求得该阶段弹体侵蚀长度  $l$  的变化情况, 进而根据  $m = M - \rho_p \pi R^2 l/3$  可求得弹体侵蚀后的剩余质量. 同理, 结合式 (17) 和式 (16) 可求得弹身侵蚀阶段侵蚀长度  $l_1$  的变化情况, 通过  $m = M_1 - \rho_p \pi R^2 l_1$  可求得该阶段弹体侵蚀后的剩余质量.

## 3 模型验证

Anderson 和 Walker 等<sup>[12]</sup> 利用 CTH 程序开展了尖锥头小子弹撞击陶瓷 / 金属复合靶板的数值模

拟, 并给出了子弹速度变化曲线以及弹体位置变化曲线; 随后利用理论模型分析, 根据弹体的损失动能给出子弹仅发生界面击溃条件下弹体速度  $v$ 、长度  $l'$ 、质量  $m$  以及动能损失等随时间  $t$  的变化情况. 以下结合其相应的数值模拟和分析结果来验证式 (9)~ 式 (18) 的正确性.

文献 [12] 数值模拟中的子弹材料为  $R_c55$  钢, 弹体相关参数如表 1 所示, 子弹以  $v_0 = 701 \text{ m/s}$  和  $820 \text{ m/s}$  分别撞击  $7.24 \text{ mm B}_4\text{C}/6.35 \text{ mm 6061-T6}$

复合靶板以及  $7.62 \text{ mm B}_4\text{C}/6.35 \text{ mm 6061-T6}$  复合靶. 结合表 1 中弹体参数和式 (14), 式 (17)、式 (11), 式 (16) 可分别求得锥头侵蚀和弹身侵蚀阶段弹体速度  $v$  和侵蚀长度  $l$  的变化; 通过  $l' = L - l$  得到弹体剩余长度; 进而可求得弹体由于质量侵蚀所损失的动能  $(E_k)_E = (M - m)v_0^2/2$  以及由于质量侵蚀和速度下降所损失的总动能  $(E_k)_{E\&D} = Mv_0^2/2 - mv^2/2$ , 同时可求得两者相对于初始动能  $(E_k)_0 = Mv_0^2/2$  的比值.

表 1 小子弹相关参数 [12]

Table 1 Parameters of a small arms projectile [12]

Projectile material		Projectile geometry					$v_0/$	
$\rho_p/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$Y_p/\text{GPa}$	$R/\text{cm}$	$\theta/(\text{°})$	$L_1/\text{cm}$	$L_2/\text{cm}$	$L/\text{cm}$	$M/\text{g}$	$(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
7.8	2.1	0.37	27.5	0.71	2.1	2.81	8.13	701 820

理论计算结果同文献 [12] 数值模拟结果的对比如图 3~ 图 5 所示, 其中图 4 中弹体位置通过  $-(L-l)$  求得. 图中文献 [12] 的数值模拟数据表示为 “simulation in Ref.[12]”, 属于本文理论分析的参量使用相应表达式序号或标识 “theory” 标注, 以下分析也均采用相同的标注方式. 从图 3~ 图 5 可看出, 理论结果与数值模拟结果符合较好, 尤其是两种结果的弹尾位移曲线几乎重合. 在前期锥头侵蚀阶段, 理论分析表明弹体速度平缓下降, 而数值模拟中显示为一个近似平台阶段, 即弹体速度几乎不变. 理论结果与数值模拟结果之间的差异, 主要来自于理论分析中弹体作准定常运动的假设, 而数值模拟中的小子弹较为短粗 ( $L/D = 2.81 \text{ cm} / 0.74 \text{ cm} \approx 3.8$ ), 在撞击过程中未能满足准定常运动条件; 再者, 数值模拟中计及靶板的变形和破坏, 而理论分析中视靶板

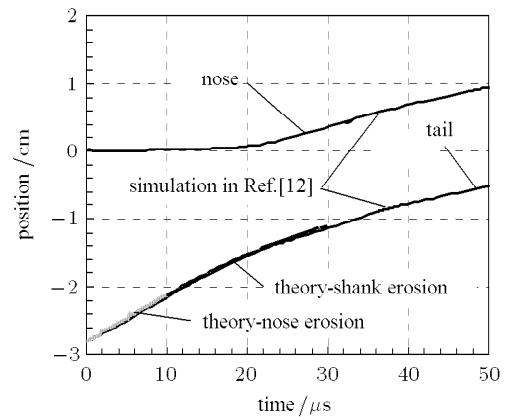


图 4 子弹以  $v_0 = 701 \text{ m/s}$  撞击靶板的弹体位置变化曲线  
Fig.4 Position of small arms projectile in the penetration under  $v_0 = 701 \text{ m/s}$  vs. time

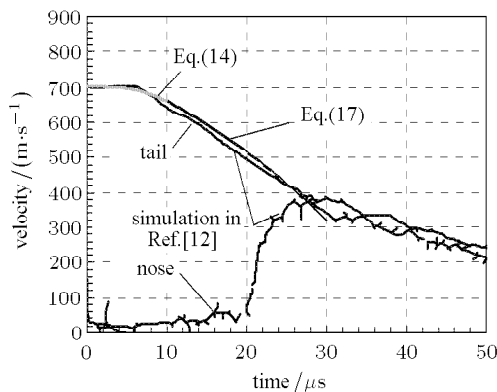


图 3 子弹以  $v_0 = 701 \text{ m/s}$  撞击靶板的弹体速度变化曲线  
Fig.3 Velocity of small arms projectile in the penetration under  $v_0 = 701 \text{ m/s}$  vs. time

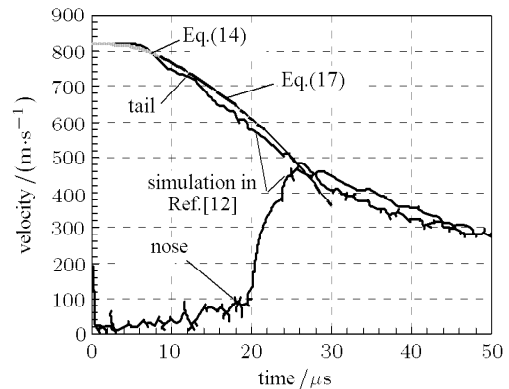


图 5 子弹以  $v_0 = 820 \text{ m/s}$  撞击靶板的弹体速度变化曲线  
Fig.5 Velocity of small arms projectile in the penetration under  $v_0 = 820 \text{ m/s}$  vs. time

为刚性. 但显然, 本文理论模型分析与文献 [12] 数值模拟结果在界面击溃阶段吻合甚好, 因此式 (9)~式 (18) 的正确性得到验证.

图 6~ 图 9 分别给出本文理论模型对小子弹以  $v_0 = 820 \text{ m/s}$  撞击靶板的弹体速度、长度和质量的变化以及对应的弹体动能变化的理论预期, 同时比较给出文献 [12] 的理论分析结果. 需指出的是, 由于文献 [12] 中相关理论分析基于平头长杆弹假设, 未计及弹头形状的影响, 本文理论模型预期 (图 6~ 图 9) 同其分析结果之间的差异稍大于其与数值模拟结果之间的比较 (图 3~ 图 5). 尤其是在锥头侵蚀阶段, 文献 [12] 分析中的弹体速度下降稍快于式 (14) 的分析结果, 导致锥头侵蚀完毕时 ( $\sim 8.5 \mu\text{s}$ ) 弹体速度  $v_1$  小于式 (14) 的预测值 (图 6). 而在此后的弹身侵蚀阶段中, 两种理论的弹体速度下降速率几乎相同. 由于式 (14) 的理论弹体速度稍大于文献 [12] 分析中的相应值, 结合式 (11) 和式 (16) 可知相应的弹体侵蚀速率和质量下降快于其相应分析结果 (图 7 和图 8), 进而由质量侵蚀导致的动能损失也快于其相应分析值, 而弹体的总动能损失则较其分析值慢, 尤其是在初期锥头侵蚀阶段 ( $t \leq 8.5 \mu\text{s}$ ) (图 9). 与文献 [12] 的分析相比较, 本文模型更为深入地考虑了弹头形状对计算结果的影响. 分析表明在尖锥头形下, 平头长杆弹假设将对分析带来较大误差, 但从两者变化趋势一致性而言, 图 6~ 图 9 再一次验证了式 (9)~式 (18) 的正确性.

需指出的是, 文献 [12] 中小子弹撞击陶瓷 / 金属复合靶板数值模拟同时包括了界面击溃及之后的侵彻过程, 由其数值结果可知, 界面击溃仅发生在前  $20 \mu\text{s}$  内. 另一方面, 文献 [12] 理论分析中给出了弹

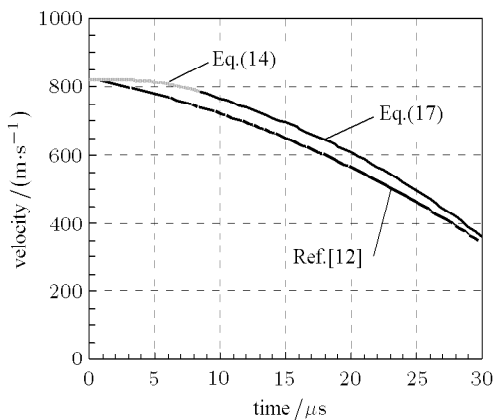


图 6 子弹以  $v_0 = 820 \text{ m/s}$  撞击靶板的弹体速度变化曲线  
Fig.6 Velocity of small arms projectile in the penetration under  $v_0 = 820 \text{ m/s}$  vs. time

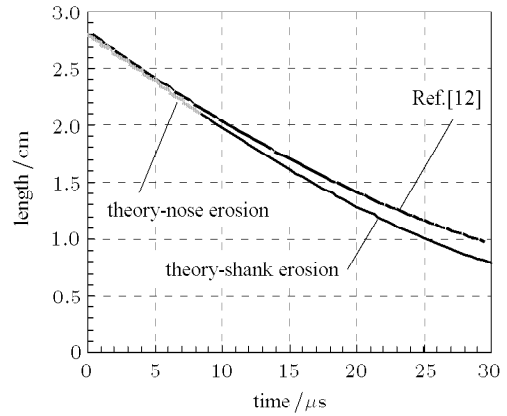


图 7 子弹以  $v_0 = 820 \text{ m/s}$  靶板的弹体长度变化曲线  
Fig.7 Length of small arms projectile in the penetration under  $v_0 = 820 \text{ m/s}$  vs. time

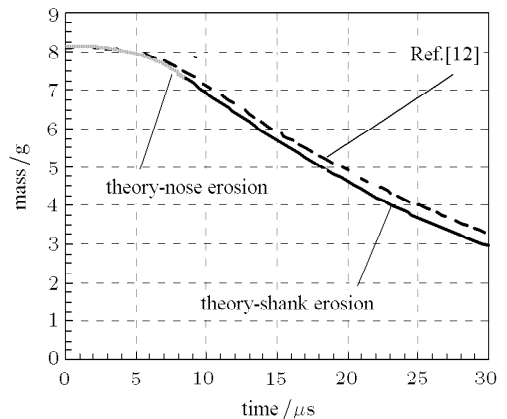


图 8 子弹以  $v_0 = 820 \text{ m/s}$  撞击靶板的弹体质量变化曲线  
Fig.8 Mass of small arms projectile in the penetration under  $v_0 = 820 \text{ m/s}$  vs. time

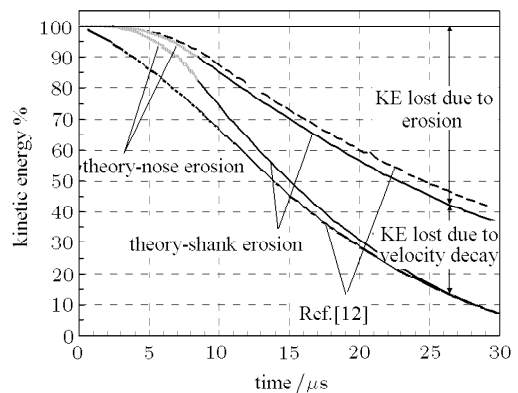


图 9 子弹以  $v_0 = 820 \text{ m/s}$  撞击靶板的动能变化曲线  
Fig.9 Kinetic energy of small arms projectile in the penetration under  $v_0 = 820 \text{ m/s}$  vs. time

体在仅发生界面击溃条件下前  $30\ \mu\text{s}$  内各参量的变化情况, 为方便对比分析, 本节的理论分析(图 3~图 9) 相应地将计算时间也取到  $30\ \mu\text{s}$ . 事实上, 界面击溃之后发生后继侵彻, 存在一定的转变条件, 并与弹靶材料、撞击速度和几何条件等紧密相关, 作者将在后续工作中专门对此进行研究.

#### 4 界面击溃过程中弹体的动能损失

本节结合第 2 节的理论工作, 具体分析不同头形弹体的动能损失情况, 并讨论半锥角  $\theta$  对弹体的速度下降、质量侵蚀以及弹体动能损失的影响. 分析结合文献 [9] 中  $R = 2.5\ \text{mm}$ ,  $\theta = 5^\circ$ ,  $L = 80\ \text{mm}$  钨合金尖锥头杆弹的结构. 为对比分析起见, 同时讨论平头杆弹相关参量的变化. 分析中统一假设所有弹体弹身半径为  $R = 2.5\ \text{mm}$ ; 弹体初始质量相同, 即  $M = 21.06\ \text{g}$ ; 取撞击速度  $v_0 = 1200\ \text{m/s}$ , 根据 Lundberg 课题组的相关工作 [5-9] 知, 在该撞击速度范围内, 对于大多数陶瓷靶板的撞击, 弹体均发生界面击溃现象. 为理论分析半锥角  $\theta$  的影响, 分别取  $\theta = 5^\circ, 15^\circ, 30^\circ$  和  $60^\circ$  等 4 种情况为例. 平头杆

弹和尖锥头杆弹的相关参数列出如表 2 所示.

结合表 2 中的相关参数以及第 2 节中相应参量的表达式, 可求得弹体相对速度  $v/v_0$ 、弹体的侵蚀长度  $l$  和相对质量  $m/M$  随时间的变化分别如图 10~图 12 所示; 结合图 10 和图 12 可求得弹体相对动能  $E_k/(E_k)_0$  的变化如图 13 所示.

由图 10 可看出, 尖锥头杆弹在界面击溃过程中, 弹体速度  $v$  的下降均比平头杆弹稍慢, 且半锥角  $\theta$  越小  $v$  的下降越慢, 但不同弹体其  $v$  值变化快慢的差异不大. 此外, 对于任何弹形, 在弹体完全侵蚀之前, 弹体速度的下降比较缓慢, 直到弹体接近完全侵蚀时  $v$  的下降幅值均比较小; 而在弹体接近完全侵蚀的瞬间, 弹体速度均急剧下降, 在短小时内由较大  $v$  值降为零值. 这表明, 在界面击溃过程中, 与第 3 节关于小子弹侵蚀非定常不同的是, 长杆弹的侵蚀基本保持准定常状态.

而根据图 11 可知, 尖锥头杆弹的侵蚀稍微快于平头杆弹, 半锥角  $\theta$  越小弹体的侵蚀越快, 但不同弹体的侵蚀速率差别较小, 因此导致了其质量侵蚀产生较大差异, 如图 12 所示. 尖锥头杆弹的质量侵

表 2 平头杆弹和尖锥头杆弹的相关参数

Table 2 Parameters of a flat-nosed and different conical-nosed long rods

nose shape	Long rod geometry					Long rod material		$v_0/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	
	$L_1/$ mm	$L_2/$ mm	$L/$ mm	$R/$ mm	$M$ g	$\rho_p/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^3$ )	$Y_p/$ GPa		
flat-nosed	—	—	60.95						
conical-nosed	$\theta = 5^\circ$	28.58	51.42	80	2.5	21.06	17.6	2.0	1200
	$\theta = 15^\circ$	9.33	57.84	67.17					
	$\theta = 30^\circ$	4.33	59.51	63.84					
	$\theta = 60^\circ$	1.44	60.47	61.91					

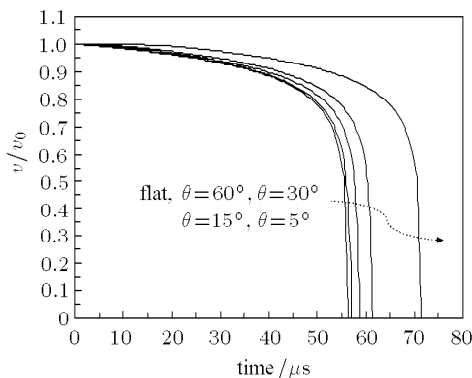


图 10 不同头形长杆弹的相对弹体速度变化曲线

Fig.10 Relative velocities of various long rods with different nose shapes vs. time

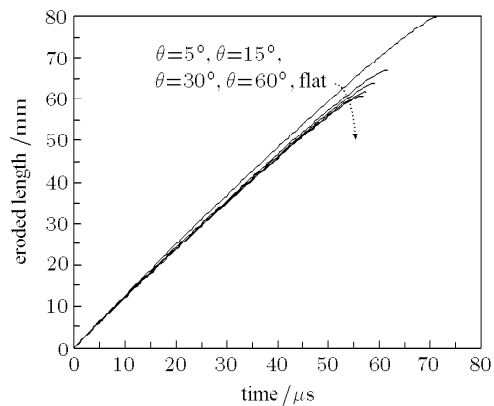


图 11 不同头形长杆弹的侵蚀长度变化曲线

Fig.11 Eroded lengths of various long rods with different nose shapes vs. time

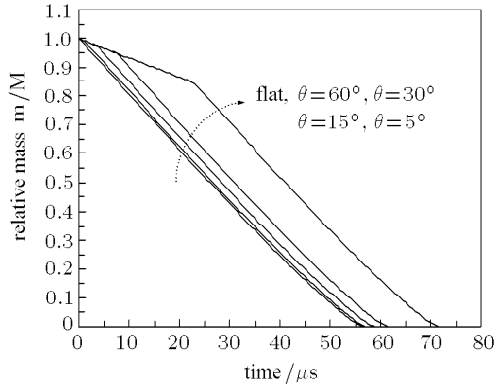


图 12 不同头形长杆弹的相对质量变化曲线

Fig.12 Relative masses of various long rods with different nose shapes vs. time

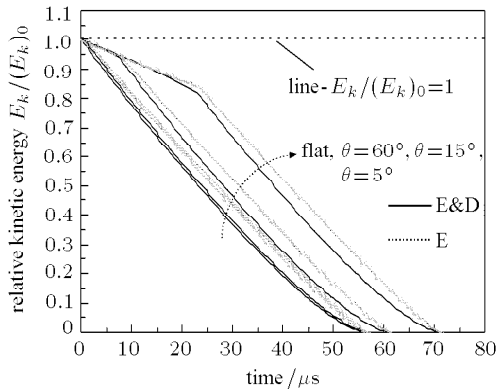


图 13 不同头形长杆弹的相对动能变化曲线

Fig.13 Relative kinetic energies of various long rods with different nose shapes vs. time

蚀显然较平头杆弹慢，特别是在其锥头侵蚀阶段差别更为明显；同样地，半锥角  $\theta$  越小弹体的质量侵蚀越慢。

因此，尖锥头杆弹的动能损失明显较平头杆弹慢，在锥头侵蚀阶段其差别尤为明显，如图 13 所示。根据文献 [12] 的数值模拟分析，弹体在一定  $v_0$  值范围内撞击陶瓷薄靶时，先发生界面击溃并持续约  $20 \mu\text{s}$  后才开始侵彻靶板 (图 3 和图 5); Lundberg 课题组 [5-9] 的试验也发现，在一定  $v_0$  值范围内，弹体也先发生界面击溃而后侵彻陶瓷靶板。可推知若弹体在前期发生界面击溃阶段所损失的动能越少，其后期侵彻 / 穿甲靶板的能力则越大。图 13 中，在  $t = 20 \mu\text{s}$  时， $\theta = 5^\circ$  尖锥头杆弹所损失的动能仅为弹体初始动能的 15%，远小于平头杆弹 43% 的动能损失，因此其在后期对靶板的侵彻 / 穿甲能力要远

优于平头杆弹。同理，其余尖锥头杆弹对陶瓷靶的侵彻 / 穿甲能力也优于平头杆弹。

为使图示清晰，图 13 中略去了  $\theta = 30^\circ$  弹体的动能变化曲线。另外，如前所述，弹体的动能损失一方面归因于其质量侵蚀，另一方面则是由于弹体的速度下降。图 13 中实线与虚线之间的范围即为弹体总动能损失占其初始动能的比例  $(E_k)_{E\&D}/(E_k)_0$ ；散点线与虚线之间的范围为由质量侵蚀引起的动能损失占弹体初始动能的比例  $(E_k)_E/(E_k)_0$ ；而实线与散点线之间的范围则为由速度下降引起的动能损失的相应比例  $(E_k)_D/(E_k)_0$ 。由图 13 可知，所有弹体在整个界面击溃过程中  $(E_k)_D/(E_k)_0$  值均远小于相应的  $(E_k)_E/(E_k)_0$  值，尤其是尖锥头杆弹体在其锥头侵蚀阶段，即弹体的动能损失主要由质量侵蚀引起。文献 [12] 针对小子弹的分析得知，对于小子弹的界面击溃， $(E_k)_E$  和  $(E_k)_D$  所占比例相当 (图 9)，该结论与图 13 所示不同，在于小子弹撞击不满足准定常条件，其在界面击溃过程中弹体速度下降较快，同时由于弹体质量较小，因此导致  $(E_k)_E$  和  $(E_k)_D$  大致相当；而表 2 中弹体弹身较长，弹体的运动满足准定常条件， $v$  的下降较慢，因此由速度下降引起的动能损失远小于由质量侵蚀引起的动能损失。

另外，由文中相应的  $v, m$  表达式还可看出，弹体的初始质量  $M$ 、弹材密度  $\rho_p$ 、弹材流动应力  $Y_p$  以及初始撞击速度  $v_0$  等均对弹体的动能损失产生影响。由上述表达式可大致推知， $M$  和  $\rho_p$  越大， $Y_p$  和  $v_0$  越小，弹体在界面击溃过程中的动能损失越慢。工程应用中，可同时结合这些参数以及弹头形状等对弹体结构和撞击条件等作优化设计，这对于增强弹体对陶瓷靶板的侵彻 / 穿甲能力将有重要意义。

## 5 结 语

本文在 Alekseevski-Tate 模型 [13-14] 基础上，考虑弹头形状，分析了尖锥头长杆弹在界面击溃过程中的速度下降及质量侵蚀。随后讨论弹体在界面击溃过程中的动能损失，分析发现对于满足准定常运动条件的长杆弹体，其动能损失中由速度下降引起的部分远小于由质量侵蚀引起的部分；尖锥头杆弹的动能损失较平头杆弹慢，且半锥角  $\theta$  越小 (即弹头越尖锐)，弹体的动能损失越慢。此外，弹体的初始质量  $M$ ，弹材密度  $\rho_p$ ，弹材流动应力  $Y_p$  以及初始撞击速度  $v_0$  等也对弹体的动能损失具有影响，对弹体各参量作综合设计，可提高弹体对陶瓷靶板的侵彻 / 穿甲能力。

## 参 考 文 献

- 1 Hauver GE, Netherwood PH, Benck RF, et al. Variation of target resistance during long rod penetration into ceramics. In: Proceedings of the 13th International Symposium on Ballistics, Stockholm, Sweden, 1992. 257-264
- 2 Hauver GE, Netherwood PH, Benck RF, et al. Ballistic performance of ceramic targets. In: Proceedings of Army Symposium On Solid Mechanics, Plymouth, MA, USA, 1993. 23-34
- 3 Hauver GE, Netherwood PH, Benck RF, et al. Enhanced ballistic performance of ceramic targets. In: Proceedings of 19th Army Science Conference. Orlando, FL, USA, 1994. 20-24
- 4 Rapacki EJ, Hauver GE, Netherwood PH, et al. Ceramics for armors – a material system perspective. In: Proceedings of 7th Annual TARDEC Ground Vehicle Survivability Symposium. USA, 1996. 26-28
- 5 Lundberg P, Renström R, Lundberg B. Impact of metallic projectiles on ceramic targets: transition between interface defeat and penetration. *International Journal of Impact Engineering*, 2000, 24: 259-275
- 6 Westerling L, Lundberg P, Lundberg B. Tungsten long-rod penetration into confined cylinders of boron carbide at and above ordnance velocities. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 25: 703-714.
- 7 Renström R, Lundberg P, Lundberg B. Stationary contact between a cylindrical metallic projectile and a flat target surface under conditions of dwell. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, 30: 1265-1282
- 8 Lundberg P, Lundberg B. Transition between interface defeat and penetration for tungsten projectiles and four silicon carbide materials. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31: 781-792
- 9 Lundberg P, Renström R, Lundberg B. Impact of conical tungsten projectiles on flat silicon carbide targets: transition from interface defeat to penetration. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 32: 1842-1856
- 10 Holmquist T.J, Johnson GR. Modeling prestressed ceramic and its effect on ballistic performance. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31: 113-127
- 11 Holmquist T.J, Johnson GR. Characterization and evaluation of silicon carbide for high-velocity impact. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97: 97,093502-1-12
- 12 Anderson Jr CE, Walker JD. An analytical model for dwell and interface defeat. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31: 1119-1132
- 13 Alekseevski VP. Penetration of a rod into target at high velocity. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1966, 2(2): 63-66
- 14 Tate A. A theory for the deceleration of long rods after impact. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1967, 15: 387-399

(责任编辑: 周冬冬)

## THEORETICAL ANALYSIS ON THE INTERFACE DEFEAT OF A CONICAL-NOSED PROJECTILE PENETRATION<sup>1)</sup>

Li Jicheng Chen Xiaowei<sup>2)</sup>

(Institute of Structural Mechanics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract** Based on Alekseevski-Tate model, the present paper theoretically analyses the interface defeat of a conical-nosed projectile in its penetration process, and the corresponding formulae of velocity decay and mass erosion of projectile are conducted out. The effects of half apex angle on the kinetic energy loss of conical-nosed projectile are discussed. A ballistic impact case of a small armor piercing projectile (APP) against ceramic/metal composite target validates the present theoretical scheme. In addition, the comparison of the kinetic energy loss during the interface defeat with among of a conical-nosed long rod, a small rod and a flat-nosed long APP is investigated.

**Key words** conical-nosed long rod, interface defeat, velocity decay, mass erosion, loss of kinetic energy, theoretical analysis

Received 24 December 2009, revised 15 April 2010.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (10672152).

2) E-mail: chenxiaoweintu@yahoo.com