

# 地下防护工程抗超高速长杆动能弹的若干问题

谢方<sup>1</sup>, 徐天涵<sup>2</sup>, 王明洋<sup>2</sup>

(1. 武汉理工大学 道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070;

2. 陆军工程大学 爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007)

**摘要:** 针对超高速长杆动能弹侵彻成坑的尺寸相似问题、成坑与地冲击耦合能量问题以及等效爆炸当量计算方法问题, 在前期研究的基础上, 厘清了侵彻成坑相似规律, 建立了地冲击能量与成坑范围关系, 得到了地冲击能量效率与弹体动能、长径比及介质特性关系, 提出了超高速动能弹地冲击等效接触爆炸当量及安全防护层厚度计算方法。结果表明, 超高速动能弹撞击的破坏区体积存在尺度效应, 与弹体半径的四次方成正比; 其他条件不变时, 地冲击能量效率随弹体质量增大而增大, 随弹体长径比和密度增大而减小。

**关键词:** 超高速动能弹; 地冲击; 能量效率; 防护层厚度

中图分类号: O38

文献标志码: A

methods for the equivalent yield of the penetration ground shock and the thickness of the safety protective layer are proposed. The results show that there is a scale effect in the volume of the penetration damage zone, which is proportional to the fourth power of the projectile radius, and that when other conditions remain unchanged, the ground shock energy efficiency increases with the increase of projectile mass, and decreases with the increase of projectile length-diameter ratio and density.

**Key words:** hypervelocity kinetic projectile; ground shock; energy efficiency; protective layer thickness

## Some Problems in Underground Protection Engineering Against Hypervelocity Long-Rod Kinetic Projectiles

XIE Fang<sup>1</sup>, XU Tianhan<sup>2</sup>, WANG Mingyang<sup>2</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge and Structure Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** Aimed at the cratering similarity of hypervelocity penetration, the relationship between the crater and the coupled ground shock energy, and the calculation method of the equivalent explosive yield, the similarity law of penetration crater is clarified and the formula of the ground shock energy based on crater volume is established. The relationship between the ground shock efficiency and the projectile kinetic energy, the length-diameter ratio of the projectile, and the material characteristics is obtained. The calculation

超高速动能武器末端打击速度可达 10 马赫以上(1 马赫 $\approx 340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )。在撞击地表的同时, 除了形成巨大的撞击坑, 还会产生强烈的地冲击作用, 对地下工程造成威胁。

弹靶在不同的侵彻速度下有不同的响应特征, 可用特征侵彻速度  $M_{ap} = v_0 / c_0$  ( $v_0$  为弹体撞击靶体的初速度,  $c_0 = (2H / \rho_t)^{1/2}$  为靶体介质特征速度,  $H$  为靶体动力硬度,  $\rho_t$  为靶体密度) 描述弹体侵彻阶段<sup>[1]</sup>。  $M_{ap} < 1.5$  时为固体侵彻阶段, 此时弹体变形很小, 可视为刚体, 靶体介质的压缩呈线性关系;  $M_{ap} > 1.5$  时, 弹体出现质量磨蚀, 靶体转入内摩擦拟流体状态; 随着速度进一步提高 ( $M_{ap} > 4.5$ ), 弹体与靶体均进入流体动力学状态。对于现有超高速动能弹侵彻岩石的情况, 对应特征速度约为  $2.0 < M_{ap} < 5.0$ , 处于从拟流体侵彻到流体侵彻的过渡范围<sup>[1]</sup>。

超高速弹体撞击地面后形成撞击坑, 称为侵彻成坑, 成坑大小与侵彻破坏区大小和地冲击能量密

收稿日期: 2023-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(52278419)

第一作者: 谢方(1982—), 女, 工学硕士, 主要研究方向为土木工程与防护工程。

E-mail: fangxie\_panda@163.com

通信作者: 徐天涵(1995—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为防灾减灾工程及防护工程。

E-mail: martinxu41@126.com



论文  
拓展  
介绍

密切相关。目前在侵彻成坑上已有大量试验和理论研究<sup>[2-8]</sup>,在地冲击能量分配上,现有研究主要针对陨石等天体撞击进行试验、理论和数值模拟研究<sup>[9-15]</sup>,但这些成果因弹靶作用差异难以适用超高速动能弹毁伤效应的计算。

本文在作者前期理论和试验研究基础上,简要阐明了超高速弹体侵彻成坑的相似关系,厘清了地冲击能量与成坑破坏范围的关系,得到了地冲击能量效率与弹体动能、长径比及介质特性关系,提出了超高速动能弹地冲击等效爆炸当量计算方法。

## 1 超高速动能弹侵彻效应

超高速动能弹的侵彻效应如图1所示,半径为 $r_p$ 的长杆弹撞击半无限地面,侵彻深度为 $h$ ,弹体周围岩石依次形成粉碎区、径向裂纹区和弹性区,并产生强烈冲击波。岩石介质属于脆性材料,其抗拉强度远低于抗压或抗剪强度,冲击波在自由面产生反射拉伸波,当达到一定强度时,自由面将发生层裂或剥离现象,由此产生的弹坑称为表观坑,当撞击速度高到一定程度,岩石表观坑呈现浅深度、大直径的漏斗形,其半径与裂纹区半径 $r_c$ 相当。瞬时弹坑为弹体撞击瞬间由于岩石的碎裂流动所产生,通常在试验中很难观测到,其半径与破碎区半径 $r_f$ 相当。成坑下方一定范围内形成破坏区,最深距成坑底部距离约为 $r_c$ <sup>[16]</sup>,破坏区外为弹性区,冲击波衰减为弹性地冲击向外辐射。

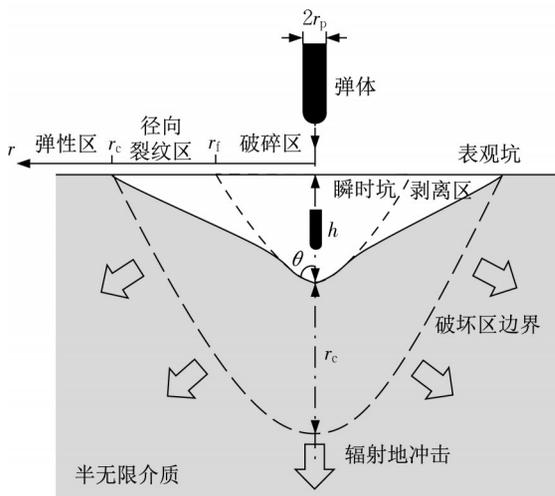


图1 超高速动能弹侵彻效应示意图

Fig. 1 Penetration effect of hypervelocity kinetic projectile

超高速动能弹撞地效应是复杂的能量转换过程,能量分配主要由两部分构成,一是在弹靶作用近区通过成坑效应消耗主要能量,二是成坑耦合地冲击能量向外传递。对防护工程主要关注的是成坑范围和地冲击能量大小的准确评估。

## 2 侵彻与成坑相似问题

### 2.1 侵彻深度相似问题

弹体在超高速侵彻时可简化为金属射流模型,对于岩石类靶体材料应考虑其内摩擦特性,由此可建立内摩擦拟流体侵彻模型,按此计算得到弹体侵彻深度 $h$ 为<sup>[16]</sup>

$$\begin{cases} \frac{h}{L} = \lambda_p \frac{\lambda_p - \varphi}{\lambda_p \varphi - \kappa} \\ \varphi = \sqrt{\kappa + \frac{1}{M_{ap}^2} \left(1 - \frac{\kappa}{\lambda_p^2}\right)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $L$ 为弹体长度; $\lambda_p = \sqrt{\rho_p / \rho_t}$ , $\rho_p$ 为弹体密度; $\kappa \leq 1$ 为靶体内摩擦系数,与介质性质和侵彻速度有关,可用 Boltzmann 函数表示为<sup>[1]</sup>

$$\kappa = \begin{cases} \frac{1}{3} \frac{1+\nu}{1-\nu}, & M_{ap} < 1.5 \\ \frac{2}{1+e^x} \left( \frac{1}{3} \frac{1+\nu}{1-\nu} - 1 \right) + 1, & M_{ap} \geq 1.5 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x = 2(M_{ap} - 1.5)$ ; $\nu$ 为介质泊松比。

根据式(1),侵彻深度和弹靶参数的关系可写为

$$\frac{h}{L} = f\left(\frac{\rho_t v_0^2}{H}, \frac{\rho_p}{\rho_t}, \kappa\right) \quad (3)$$

当弹靶介质性质与侵彻速度相同时,超高速侵彻深度满足以下相似关系

$$\frac{h_0}{h_1} = \frac{L_0}{L_1} \quad (4)$$

式中:下标0与1分别代表两组侵彻试验。

随着 $M_{ap}$ 增大, $\kappa \rightarrow 1$ , $\varphi \rightarrow 1$ ,则式(1)退化为

$$\frac{h}{L} = \lambda_p = \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_t}} \quad (5)$$

式(5)就是著名的射流侵彻的流体动力学模型计算公式。

### 2.2 成坑半径相似问题

超高速动能弹侵彻成坑破碎区半径 $r_f$ 与弹体半径 $r_p$ 具有以下关系<sup>[1, 8, 16]</sup>:

$$\begin{cases} r_f = r_p \sqrt{\frac{\vartheta_0 \delta_0}{\vartheta_0 \delta_0 - 1}} \\ \delta_0 = \sqrt{1 + \frac{1}{\kappa} \left(\frac{1}{M_{ap}}\right)^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\vartheta_0 = \frac{r_f^2 - r_a^2}{r_f^2 - r_p^2}$  为破碎介质喷射的压缩射流系数, 表征了介质向后喷射过程中粒子速度的变化情况,  $r_a$  为射流空腔半径。

根据计算<sup>[1, 17]</sup>, 超高速范围内 ( $M_{ap} > 2.0$ ) 射流系数  $\vartheta_0 > 0.9$ , 因此可取  $\vartheta_0 \approx 1.0$ , 式(6)可简化为

$$r_f = r_p \sqrt{\beta} \quad (7)$$

式中:  $\beta = \frac{\delta_0}{\delta_0 - 1}$ , 为侵彻速度  $M_{ap}$  的函数。

式(7)中  $M_{ap}$  仅与靶体介质和侵彻速度有关, 因此, 对于相同靶体介质、相同侵彻速度的两组侵彻试验, 成坑破碎区的相似关系可写为

$$\frac{r_{f0}}{r_{f1}} = \frac{r_{p0}}{r_{p1}} \quad (8)$$

裂纹区半径  $r_c$  与破碎区半径  $r_0$  的关系可写为<sup>[1, 4, 16]</sup>

$$\frac{r_c}{r_f} \approx 0.42 \left(\frac{r_f}{\Delta}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

式中:  $\Delta = K_c^2/H^2$ , 为裂纹尖端尺度, 是表征靶体裂纹区相对于破碎区的尺度效应参数,  $K_c$  为靶体介质动力韧度。

取靶体介质泊松比  $\nu$  为 0.25, 动力硬度  $H$  可写为<sup>[18]</sup>

$$H = \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu} \tau_s = 3\tau_s \quad (10)$$

式中:  $\tau_s$  为介质动剪切强度。

根据式(10), 可将  $\Delta$  写为

$$\Delta = \frac{K_c^2}{9\tau_s^2} \quad (11)$$

结合式(8)与式(9), 裂纹区半径的相似关系为

$$\frac{r_{c0}}{r_{c1}} = \left(\frac{r_{f0}}{r_{f1}}\right)^{\frac{4}{3}} = \left(\frac{r_{p0}}{r_{p1}}\right)^{\frac{4}{3}} \quad (12)$$

### 2.3 成坑破坏体积相似问题

如图1所示, 在超高速侵彻下, 瞬时坑成坑角度  $\theta$  满足以下关系:

$$\cot \theta = \frac{h}{r_f} \quad (13)$$

结合式(7), 可将  $\cot \theta$  表示为

$$\cot \theta = \frac{r_p}{r_f} \frac{h}{r_p} = \frac{2l_d \lambda_p}{\sqrt{\beta}} \quad (14)$$

式中:  $l_d = L/2r_p$  为弹体长径比。

由于  $\beta$  是侵彻速度  $M_{ap}$  的函数, 因此瞬时坑角度  $\theta$  也是随侵彻速度变化的量。

竖直方向上破坏范围  $r_{cd}$  可写为

$$r_{cd} = h + r_c = r_c (1 + \cot \theta') = r_c \alpha \quad (15)$$

式中:  $\alpha = 1 + \cot \theta'$ ,  $\cot \theta' = h/r_c$  反映了表观坑形状。

结合式(9)与式(14), 可将  $\cot \theta'$  写为

$$\cot \theta' = \frac{r_f}{r_c} \cot \theta = \frac{l_d \lambda_p}{0.21} \left(\frac{\Delta}{r_p}\right)^{\frac{1}{3}} \frac{1}{\beta^{2/3}} \quad (16)$$

可见  $\cot \theta'$  也是与侵彻速度有关的函数。

根据式(7)与式(9)可得裂纹区半径  $r_c$  与弹体半径  $r_p$  的关系为

$$\frac{r_c}{r_p} = 0.42 \left(\frac{r_p}{\Delta}\right)^{1/3} \beta^{2/3} \quad (17)$$

假设破坏区截面为抛物线型, 则破坏区体积可写为<sup>[7]</sup>

$$V_c = \frac{1}{2} \pi R_c^2 R_{cd} = \frac{1}{2} \pi R_c^3 \alpha = \frac{0.037}{\Delta} \pi \alpha r_p^4 \beta^2 \quad (18)$$

相同弹靶材料与侵彻速度情况下破坏区体积的相似关系可写为

$$\frac{V_{c0}}{V_{c1}} = \frac{\alpha_0 r_{p0}^4}{\alpha_1 r_{p1}^4} = \frac{r_{p0}^4 (1 + \cot \theta'_0)}{r_{p1}^4 (1 + \cot \theta'_1)} \quad (19)$$

式中:  $\theta'_0, \theta'_1$  与弹体长径比和半径有关。

综上显见, 在弹靶材料不变情况下, 侵彻深度、成坑半径和破坏体积的缩比试验具有相似关系, 在弹靶材料变化情况下, 通过相似变换也具有相似关系。

## 3 成坑耦合地冲击能量问题

### 3.1 地冲击能量与破坏体积关系

根据前期研究, 超高速动能弹产生的地冲击能量与靶体介质破坏区体积成正比, 即<sup>[8]</sup>

$$W_s = k M_c c_p^2 = k \rho_t c_p^2 V_c \quad (20)$$

式中:  $M_c = \rho_t V_c$  为破坏区介质质量;  $c_p$  为介质纵波波速;  $k$  为破坏区边界的量纲—能量因子, 可写为<sup>[7]</sup>

$$k = \frac{[5 + 3(1 + 24\nu)^2] \tau_s^2}{768 G^2} \approx 0.2 \frac{\tau_s^2}{G^2} \quad (21)$$

式中:  $G$  为介质剪切模量。

### 3.2 地冲击能量占弹体总动能的比例

超高速弹体侵彻地表瞬间的动能可写为

$$W_k = \frac{1}{2} m_p v_0^2 \quad (22)$$

式中: $m_p$ 为弹体质量。

根据式(20)与式(22)可得,超高速动能弹侵彻产生地冲击的效率为

$$\eta_s = \frac{W_s}{W_k} = \frac{2k\rho_t c_p^2 V_c}{m_p v_0^2} = \frac{2k}{M_{ap}^2} \frac{c_p^2 \rho_t V_c}{c_0^2 m_p} \quad (23)$$

以平头弹为例, $m_p = \pi r_p^2 L \rho_p = 2\pi r_p^3 l_d \rho_p$ ,将式(10)、(18)和(21)代入式(23),考虑 $G = \rho_t c_s^2$ , $c_p^2/c_s^2 = 3$ ( $c_s$ 为靶体介质剪切波速),并将弹体半径转化为弹体质量,可得

$$\eta_s = 4.5 \times 10^{-3} \frac{\sqrt{k}}{\Delta} \frac{\alpha}{\lambda_p^2} \left( \frac{m_p}{l_d^4 \rho_p} \right)^{1/3} \frac{\beta^2}{M_{ap}^2} \quad (24)$$

式(24)就是地冲击能量的占比份额,成坑消耗的能量则是总动能与地冲击能量之差。

对于花岗岩破坏区边界的能量因子, $k$ 约为 $(1 \sim 4) \times 10^{-7}$ ,从式(21)可以看出, $\sqrt{k}$ 的本质是靶体的极限剪应变。至此,式(24)中还需确定参数 $\Delta$ ,对于岩体材料,断裂韧度 $K_c$ 与剪切强度 $\tau_s$ 之比取值范围较大, $K_c/\tau_s = 1/100 \sim 1/60$ ,代入式(11)可得 $\Delta = (1.11 \sim 3.10) \times 10^{-5}$ ,可见 $\Delta$ 的变化范围十分有限。

以动能弹体侵彻花岗岩靶体( $\rho_t = 2670 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )为例,取 $k = 2 \times 10^{-7}$ , $\Delta = 2 \times 10^{-5}$ ,分析弹体质量、形状及密度对地冲击能量份额的影响。

#### 3.2.1 弹体质量影响

图2给出了长径比为5.0,密度为 $7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的钢弹在质量不同情况下 $\eta_s$ 的变化曲线,可以看出,其他条件不变时,弹体质量越大,地冲击能量效率越高。图中弹体最大质量为3t,对于更大质量的弹体,成坑效应还应考虑重力的影响<sup>[19]</sup>。

#### 3.2.2 弹体长径比影响

图3给出了弹体质量为3000kg,密度为 $7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的钢弹在不同长径比时地冲击能量效率随侵彻速度的变化曲线,可以看出,弹体长径比越大,弹体越细长,弹体侵彻能力越高但地冲击效应减小,因此地冲击能量效率越低。

#### 3.2.3 弹体密度影响

图4给出的是质量为3000kg,长径比为5,密度为 $7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的钢弹、 $11344 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的铅弹以及

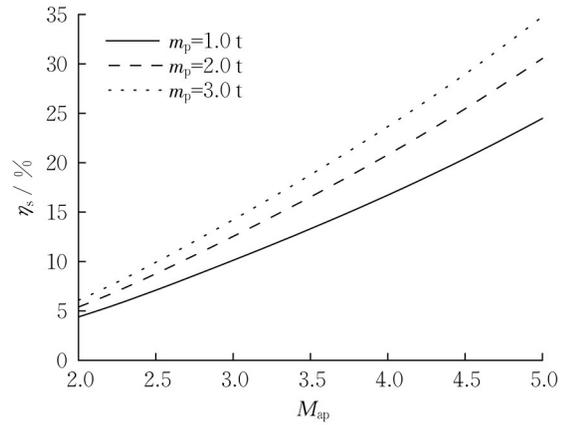


图2 不同弹体质量时地冲击能量效率曲线  
Fig.2 Ground shock energy efficiency versus projectile mass

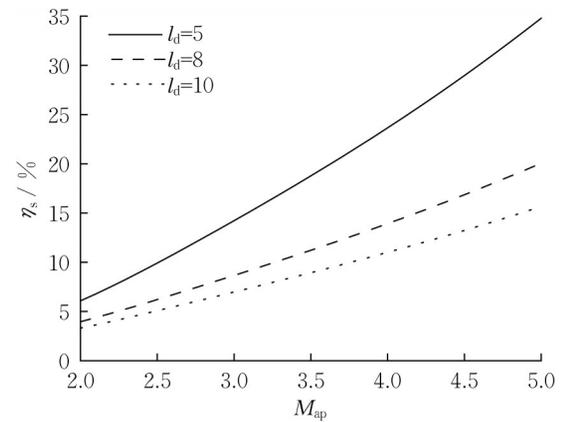


图3 不同弹体长径比时地冲击能量效率曲线  
Fig.3 Ground shock energy efficiency versus projectile length-diameter ratio

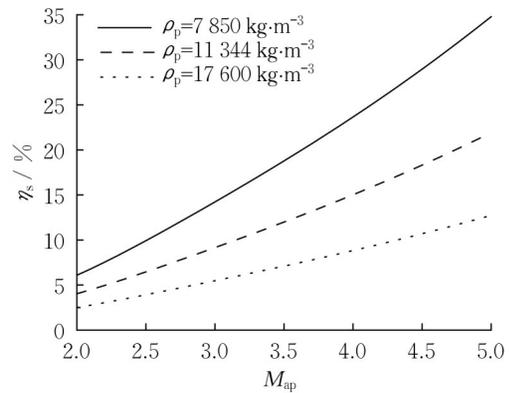


图4 不同弹体密度时地冲击能量效率曲线  
Fig.4 Ground shock energy efficiency versus projectile density

$17600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的钨合金弹的地冲击能量效率随侵彻速度变化曲线,可以看出,随着弹体密度增大,弹体尺寸减小,与靶体接触面减小,地冲击效应减弱。

从上述计算可以看出,超高速动能弹撞击引起的地冲击能量效率范围为5%~35%,该范围与Efimov等<sup>[13]</sup>利用数值模拟给出的结果一致,表明了本文理论的合理性。

#### 4 地冲击能量等效爆炸当量计算方法

超高速动能弹侵入地下后在垂直方向上的破坏范围为 $r_{cd}$ (式(15)),考虑到工程的震塌、层裂破坏,地下防护工程的最小安全层厚度 $H_m$ 应当大于 $r_{cd}$ ,可写为

$$H_m = h + k_c r_c \quad (25)$$

式中: $k_c$ 为震塌系数,可取2.5。

考虑 $m_p = 2\pi r_p^3 l_d \rho_p$ ,可将式(17)写为

$$r_c = \frac{0.186}{\Delta^{1/3}} \left( \frac{m_p}{l_d \rho_p} \right)^{4/9} \beta^{2/3} \quad (26)$$

对于花岗岩, $c_0$ 约为 $1\,500\text{ m}\cdot\text{s}^{-1[1]}$ ,可取 $M_{sp} = 4.5$ , $\rho_p = 7\,850\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,代入式(25)、(26)可得不同弹体质量与长径比条件下的破坏区半径 $r_c$ 和最小安全层厚度 $H_m$ ,见表1。

表1 最小安全层厚度与等效当量

Tab.1 Minimum thickness of safety protective layer and equivalent yield

弹体质量/ t	长径比	侵彻深度/ m	破坏半径/ m	最小安全层 厚度/m	等效封闭 爆当量/t
1.0	5	2.7	16.2	43.2	6.4
	8	3.7	13.1	36.6	3.4
	10	4.3	11.9	34.1	2.5
2.0	5	3.4	22.1	58.6	16.1
	8	4.7	17.9	49.4	8.6
	10	5.5	16.2	46.0	6.4
3.0	5	3.9	26.4	70.0	27.6
	8	5.4	21.4	59.0	14.8
	10	6.3	19.4	54.8	11.0

以弹体质量为横坐标,取长径比为5,可得不同速度下最小安全层厚度随弹体质量的变化曲线,如图5所示。

此外还可求得对应的等效爆炸当量。地下爆炸破坏区半径可写为 $r_c = nk_p Q^{1/3}$ , $k_p$ 为破坏系数,一般取0.53, $n$ 为填塞系数,因比例埋深接近于封闭爆, $n$ 取1.65,因此等效当量 $Q_{\text{eff}}$ 可写为

$$Q_{\text{eff}} = \left( \frac{r_c}{nk_p} \right)^3 = 1.5r_c^3 \quad (28)$$

根据式(28)计算等效封闭爆当量 $Q_{\text{eff}}$ ,结果见表1。

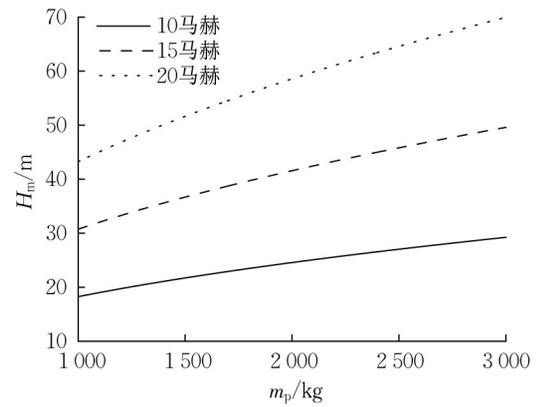


图5 不同速度下最小安全层厚度随弹体质量变化

Fig.5 Variation of minimum thickness of safety protective layer with projectile mass at different penetration velocities

#### 5 结论

通过研究超高速侵彻地冲击与破坏区尺寸关系,得到以下结论:

(1)在弹靶材料不变情况下,超高速动能弹的侵彻深度、成坑半径和破坏体积的缩比试验具有相似关系,在弹靶材料变化情况下,通过相似变换也可建立相似关系。利用实验室模拟可以实现超高速动能弹毁伤效应的研究。

(2)通过分析地冲击与破坏区尺寸关系,给出了超高速动能弹撞地耦合地冲击能量份额与弹体质量、弹体长径比、弹体密度及弹靶特征速度的关系。结果表明,其他条件不变时,弹体质量越大,地冲击能量效率越高;弹体长径比越大,弹体越细长,地冲击能量效率越低;弹体密度越大,弹体尺寸越小,与靶体接触面越小,地冲击能量效率越低。

(3)通过超高速撞击与地下爆炸的破坏区等效换算,给出了超高速动能弹最小安全防护层厚度与等效爆炸当量计算方法,该方法实现了与现有设计规范中最小安全防护层厚度计算方法的对接。

#### 作者贡献声明:

谢方:初稿撰写,理论推导。

徐天涵:初稿撰写,理论推导,稿件修改。

王明洋:理论推导,内容把关。

#### 参考文献:

- [1] 王明洋,邱艳宇,李杰,等.超高速长杆弹对岩石侵彻、地冲击效应理论与实验研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(3):564.

- WANG Mingyang, QIU Yanyu, LI Jie, *et al.* Theoretical and experimental study on rock penetration and ground impact effects of hypervelocity long rod projectiles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 564.
- [2] SHISHKIN N I. On the problem of the disintegration of rock by an explosion under the influence of a free surface[J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 1981, 22(3): 401.
- [3] SHER E N. Dynamic development of a radial crack zone during a camouflet explosion[J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 1988, 29(1): 155.
- [4] VOITISHEK Y V, SLEPYAN L I. Hydrodynamic model of the puncture of a brittle plate[J]. Soviet Mining Science, 1985, 21(3): 231.
- [5] DENCE M R, GRIEVE R A F, ROBERTSON P B. Terrestrial impact structures: principal characteristics and energy considerations [C]// Proceeding of Lunar and Planet Science Conference. New York: Pergamon Press, 1977: 247-275.
- [6] MELOSH H J. Impact cratering mechanics: relationship between the shock wave and excavation flow[J]. Icarus, 1985, 62(2): 339.
- [7] 王明洋, 李杰. 爆炸与冲击中的非线性岩石力学问题Ⅲ: 地下核爆炸诱发工程性地震效应的计算原理及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 695.
- WANG Mingyang, LI Jie. Nonlinear mechanics problems in rock explosion and shock. Part III: the calculation principle of engineering seismic effects induced by underground nuclear explosion and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 695.
- [8] SLEPYAN L I. Calculation of the size of the crater formed by a high-speed impact [J]. Soviet Mining Science, 1978, 14(5): 465.
- [9] MCGARR A, LATHAM G V, GAULT D E. Meteoroid impacts as sources of seismicity on the moon [J]. Journal of Geophysical Research, 1969, 74(25): 5981.
- [10] LOGNONNÉ P, LE FEUVRE M, JOHNSON C L, *et al.* Moon meteoritic seismic hum: steady state prediction [J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114(E12): 1.
- [11] DAUBAR I, LOGNONNÉ P, TEANBY N A, *et al.* Impact-seismic investigations of the insight mission [J]. Space Science Reviews, 2018, 214(8): 132.
- [12] WÓJCICKA N, COLLINS G S, BASTOW I D, *et al.* The seismic moment and seismic efficiency of small impacts on mars [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2020, 125(10): 1.
- [13] EFIMOV E A, SADOVSKII V M, SADOVSKAYA O V. Mathematical modeling of the impact of a pulse seismic source on geological media [C]//Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences: 12th International On-line Conference for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences — AMiTaNS' 20. New York: AIP Publishing, 2020: 1-8.
- [14] YASUI M, MATSUMOTO E, ARAKAWA M. Experimental study on impact-induced seismic wave propagation through granular materials [J]. Icarus, 2015, 260: 320.
- [15] KHAZINS V M, SHUVALOV V V, SVETTSOV V V. The seismic efficiency of space body impacts [J]. Solar System Research, 2018, 52(6): 547.
- [16] 王明洋, 李杰, 邓国强. 超高速动能武器钻地毁伤效应与工程防护[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- WANG Mingyang, LI Jie, DENG Guoqiang. Damage effect and engineering protection of hypervelocity kinetic energy weapons[M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [17] GUREVICH M I. The theory of jets in an ideal fluid [M]. London: Pergamon Press Ltd, 1966.
- [18] XU T, WANG M, LI J. Dynamic hardness of rock materials under strong impact loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 140(2020): 1.
- [19] SHISHKIN N I. Seismic efficiency of a contact explosion and a high-velocity impact [J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2007, 48(2): 145.