

# 超高速弹撞击岩石的地冲击效应等效计算

王明洋<sup>1,2</sup>, 岳松林<sup>1,3</sup>, 李海波<sup>4</sup>, 邱艳宇<sup>1,2</sup>, 李杰<sup>1</sup>

(1. 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; 2. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094; 3. 中国白城兵器试验中心, 吉林 白城 137001; 4. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 本文主要研究岩石中超高速撞击与浅埋爆炸的等效转换计算方法。基于超高速动能弹丸撞击岩石的地冲击效应与岩石中浅埋装药爆炸效应的相似性, 将表面弹坑作为引起地冲击的震源, 根据超高速撞击弹坑与浅埋爆炸弹坑辐射出的地冲击能量相等条件, 建立超高速撞击与装药爆炸的地冲击效应的等效关系。通过理论推导, 得到超高速撞击效应的等效装药量与无量纲撞击速度的关系, 并给出能量换算系数与无量纲撞击速度的简化表达式。依据超高速弹体撞击花岗岩的试验结果, 证明等效装药爆炸与超高速撞击的地冲击应力波形十分吻合, 验证等效方法的有效性。计算分析表明当弹丸撞击速度足够大( $M_a \geq 1.5$ )时, 可以进行爆炸等效转换, 撞击速度不断增大时, 等效装药量不断增大, 能量换算系数不断增大。根据本文提出的地冲击效应等效计算方法, 得到 5, 10, 15 马赫撞击速度下不同弹丸质量与最小防护层厚度间的关系曲线。

**关键词:** 岩石力学; 超高速撞击; 浅埋爆炸; 成坑效应; 地冲击效应

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2018)12 - 2655 - 09

## An equivalent calculation method of ground shock effects of hypervelocity projectile striking on rock

WANG Mingyang<sup>1,2</sup>, YUE Songlin<sup>1,3</sup>, LI Haibo<sup>4</sup>, QIU Yanyu<sup>1,2</sup>, LI Jie<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing, Jiangsu 210007, China*; 2. *School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China*; 3. *Baicheng Ordnance Test Center, Baicheng, Jilin 137001, China*; 4. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China*)

**Abstract:** The purpose of this paper is to investigate the equivalent ground shock effects of hypervelocity impact and shallow buried explosion in rock. Based on the similarity of craters resulted from hypervelocity impacts and shallow buried explosions, the crater can be regarded as the source of ground shock effects, and the equivalent relationship between hypervelocity impact and shallow buried explosion can be established assuming that ground shock energies of them are equal. The relationship between the equivalent charge and the dimensionless impact velocity was obtained, and a simplified expression of the energy conversion coefficient was given. Experimental results of hypervelocity impact on granite indicates that the ground shock waves of equivalent charge explosion and hypervelocity impact are highly similar, which verifies the validity of the equivalent method in the case of a large enough dimensionless impact velocity. When the dimensionless impact velocity increases, both the equivalent charge and the energy conversion coefficient increase. Based on the equivalent method, the relationship

**收稿日期:** 2018 - 05 - 14; **修回日期:** 2018 - 07 - 19

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51808552, 51808553)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51808552 and 51808553)

**作者简介:** 王明洋(1966 - ), 男, 1988 年毕业于工程兵工程学院防灾减灾工程及防护工程专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩石力学与工程、防护工程方面的教学与研究工作。E-mail: wmyrf@163.com。通讯作者: 岳松林(1987 - ), 男, 现任讲师。E-mail: yslseu@hotmail.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0473

curves between the safe thickness of protective layer and the mass of projectile were obtained with the impact velocity of 5 Mach, 10 Mach and 15 Mach respectively.

**Key words:** rock mechanics; hypervelocity impact; shallow buried explosion; crater effect; ground shock effect

## 1 引言

近年来, 高超声速技术已经从概念和原理探索阶段, 进入了以高超声速巡航导弹、高超声速飞机和空天飞机等为应用背景的先期技术开发阶段<sup>[1-2]</sup>。目前, 美国、俄罗斯、印度、法国、德国等国家经过多年研究已取得不少技术成果, 尤其在超高速动能武器方面实施多项研制计划<sup>[3-4]</sup>, 以期获得最大的军事效益。

超高速动能武器对地打击速度为 5~15 马赫, 与常规钻地武器相比, 侵彻深度受临界条件制约呈现递减、弹坑半径及射流影响面呈现非线性扩增现象<sup>[5]</sup>。超高速动能武器主要以地冲击效应的形式实现对地毁伤, 对深地下战略防护工程头部等关键部位构成严重威胁, 防护能力面临全新的挑战。目前国内外在工程抗超高速动能武器防护技术研发方面, 缺乏可靠的毁伤效应评估关键指标和系统的设计计算方法、以及相应的实用化技术手段作支撑。为此需要采用计算实验方法深入系统研究超高速动能弹的地冲击效应理论与计算方法, 为防护工程设计、计算及加固改造提供理论与技术支持。

本文以王明洋等<sup>[6]</sup>提出的流体弹塑性内摩擦理论为基础, 依据岩石中超高速侵彻深度、成坑范围计算方法及相应公式, 基于超高速动能弹丸撞击岩石的地冲击效应与岩石中浅埋装药爆炸效应的相似性, 给出超高速弹撞击岩石的地冲击效应的等效计算方法。

## 2 超高速弹撞击岩石的成坑效应

岩石类材料遭受弹体侵彻后最直观的表现就是形成弹坑, 弹坑直径、侵彻深度(弹坑深度)、弹坑体积是表征侵彻成坑效应的主要参数<sup>[7]</sup>。岩石介质受超高速弹体打击时, 随着弹体着靶速度的提高, 侵彻深度呈现出先增大→后减小→再增大并趋向极限的变化规律, 弹坑形状逐渐由拟流体侵彻的酒杯状, 过渡到流体侵彻的半球状、碟状<sup>[8-9]</sup>。超高速弹丸撞击地面后, 除了表面成坑效应外, 还会出现严重的地冲击效应, 其强度甚至可以达到小型核武器触地爆等级<sup>[6-10]</sup>。超高速地冲击作用下, 岩石介质破坏效应呈现如下特点: 在撞击面附近, 压力高达

几十甚至上百万大气压, 产生明显的压实、融化甚至汽化; 在超高压区外, 因应力超过弹性极限而破碎成晶粒大小的碎块; 在近表面撞击点附近区域, 因反射拉伸波而造成层裂破坏。

弹体撞击岩石问题不能完全采用流体动力学侵彻理论解决, 它在很长一个阶段内处于内摩擦状态或拟流体状态<sup>[5, 11]</sup>, 王明洋等<sup>[6]</sup>建立了能够描述 5~15 马赫的超高速弹撞击岩石的成坑计算公式。

(1) 冲击成坑深度计算公式为

$$\frac{h}{L} = \frac{1 - \sqrt{1 - \left(1 - \frac{\kappa}{\lambda^2}\right)(1 - \varpi)}}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{\kappa}{\lambda^2}\right)(1 - \varpi) - \frac{\kappa}{\lambda^2}}} \quad (1)$$

其中,

$$\lambda = \sqrt{\rho_p / \rho_t}$$

$$\varpi = 2Y / (\rho_p v_0^2)$$

式中:  $h$  为冲击成坑深度;  $L$  为弹体长度;  $\lambda$  为弹/靶密度比;  $Y$  为靶体材料的动力硬度;  $v_0$  为弹体速度;  $\kappa$  为岩石状态参数, 由弹丸撞击速度确定, 其表达式如下:

$$\kappa = \begin{cases} \kappa_0 = \frac{1}{3} \left( \frac{1+\nu}{1-\nu} \right) & (M_a \leq 1.5) \\ \frac{2\kappa_0 - 1 + e^x}{1 + e^x}, \quad x = \frac{M_a - 1.5}{3} & (1.5 < M_a < 4.5) \\ 1 & (M_a \geq 4.5) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $M_a = v_0 / c = \sqrt{\rho_t v_0^2 / (2Y)}$  为无量纲撞击速度, 它不是空气动力学中的马赫数(1 Mach = 340 m/s, 1 Ma ≠ 1 Mach);  $c = \sqrt{2Y / \rho_t}$ , 对于中等强度的花岗岩大约为 1 500 m/s。

(2) 冲击成坑半径计算公式为

$$\left. \begin{aligned} \frac{R}{R_0} &\approx 0.42 \left( \frac{R_0}{\Delta} \right)^{1/3} \\ R_0 &= r_0 \sqrt{\frac{k\delta}{k\delta - 1}} \\ \delta &= \sqrt{1 + \frac{1}{\kappa} \left( \frac{1}{M_a} \right)^2} \\ M_a &= \frac{v_0}{c} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:  $R$  为冲击成坑半径;  $R_0$  为粉碎区半径;  $\Delta = K_c^2 / Y^2$ ,  $K_c$  为介质断裂韧度,  $Y$  为粉碎区与裂

纹区边界压力，即材料动力硬度； $r_0$  为弹丸半径； $k$  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。借助 M. I. Gurevich<sup>[12]</sup> 的研究成果，压缩射流系数由下列公式确定：

$$k = \frac{\zeta^x}{1 - \frac{\zeta^x \sin(\pi x)}{\pi} \int_0^1 \left( \frac{1}{\xi + \zeta} + \frac{\zeta}{\xi \zeta + 1} - \frac{2}{\xi + 1} \right) \frac{d\xi}{\xi^x}} \quad (4)$$

式中： $x = \theta / \pi$ ， $\theta$  为半锥角， $\zeta^x = v / v_{out}$ ，为流场入口和出口速度的比值，根据伯努利方程：

$$\zeta^x = \sqrt{\frac{\frac{\rho_1 v_0^2}{2Y}}{1 + \frac{\rho_1 v_0^2}{2Y}}} = \frac{M_a}{\sqrt{1 + M_a^2}} \quad (5)$$

对于平头弹的情况，压缩射流系数：

$$k = \frac{\zeta^{1/2}}{1 - \frac{2\zeta^{1/2}}{\pi} \left( \frac{1}{\sqrt{\zeta}} \arctan \frac{1}{\sqrt{\zeta}} + \sqrt{\zeta} \arctan \sqrt{\zeta} - \frac{\pi}{2} \right)} \quad (6)$$

### 3 地冲击效应的等效计算方法

岩石中超高速撞击与浅埋爆炸具有相似性<sup>[13]</sup>：从宏观现象上，二者都伴随发光、放热、巨响的爆炸现象，在介质表面产生弹坑，在近区出现破碎区和径向裂纹区，对介质产生体积压实、高压粉碎、剪切破坏等作用，对于高能量密度的物理过程还可能出现汽化、液化现象；从力学本质上，二者都属于强动载作用下材料的动力学行为和过程的问题，近源区产生强冲击波，压力幅值较高，波传播过程中迅速衰减为短波、弹塑性波，二者可采用相同的物理力学方程描述；从作用机制上，二者均是高能量密度的载体向周围介质传递能量，造成介质的变形和破坏，所不同的是超高速撞击过程中弹丸动能具有定向性，而浅埋爆炸初始阶段是能量具有等向性，随后受自由面的影响，等向性被破坏。

岩石中超高速侵彻试验表明，随着撞击速度的增加，不再形成稳定侵彻弹道，只在表面形成半球形或碟形弹坑，撞击速度高到一定程度，其弹坑形态呈现为浅深度、大直径的碟形，这与金属类延性材料超高速撞击成坑形态存在明显区别。岩石中超高速撞击弹坑可以划分为两部分(见图 1<sup>[13]</sup>)：一部分为弹靶撞击过程中冲击压缩作用，对应于弹靶作用过程中介质粉碎区或流体动力学区；一部分为冲击波在自由面反射后演变为卸载拉伸波的作用，对应于弹靶作用过程中介质裂纹区。

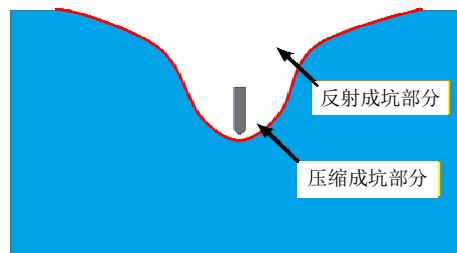


图 1 超高速撞击弹坑示意图<sup>[13]</sup>

Fig.1 Diagram of hypervelocity impact crater<sup>[13]</sup>

岩石中爆炸效应产生的弹坑同样可以划分为两部分(见图 2<sup>[13]</sup>)：锅形空腔和抛掷漏斗。锅形空腔主要是冲击波压缩作用产生的，可以认为是爆炸作用下介质压缩半径或空腔膨胀半径，对应超高速撞击弹坑中的冲击压缩部分；抛掷漏斗是冲击波、反射拉伸波和爆生气体共同作用下产生的，可以认为是爆炸作用下裂纹区范围<sup>[14]</sup>，对应超高速撞击弹坑中的反射拉伸部分。

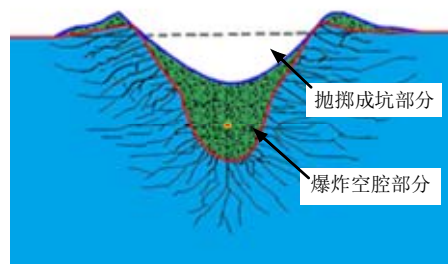


图 2 爆炸弹坑示意图<sup>[13]</sup>

Fig.2 Diagram of explosion crater<sup>[13]</sup>

V. V. Adushkin 等<sup>[15-16]</sup>的研究成果表明，对于地下化学爆炸，根据不同的状态方程计算爆轰产物的初始参数，爆轰波的压力 20~50 万个大气压(20~50 GPa)，爆轰波与炮孔周围介质相互作用产生冲击波，当冲击波传播至(2~3) $R_c$ ~(100~120) $R_c$ ( $R_c$  为装药半径)距离处，波阵面压力降至为 5~20 GPa<sup>[17-18]</sup>；对于 5~15 马赫的超高速弹撞击岩石，弹/靶相互作用过程中，在界面产生的冲击波压力范围为 5~20 GPa<sup>[6]</sup>；二者对应的压力范围均为中间过渡区域，岩石处于内摩擦或拟流体状态，其力学状态从弹性状态转到塑性状态，甚至转到流体动力学状态。因此，可以将 5~15 马赫超高速弹体撞击岩石效应，与岩石中浅埋化学装药爆炸效应进行等效转换，利用浅埋爆炸的理论成果和试验手段研究超高速撞击现象。

#### 3.1 等效计算方法

根据上文超高速弹撞击岩石表面成坑效应的理

论与计算方法,当弹速  $v_0/c \geq 1.5$  时,侵彻过程进入拟流体侵彻阶段,不再形成稳定的侵彻弹道,只在表面形成弹坑,其弹坑形态呈现为浅深度、大直径的碟形或漏斗形。因此,假设弹速  $v_0/c \geq 1.5$  为超高速撞击与浅埋爆炸等效转换的临界速度条件。

将表面弹坑作为引起地冲击的震源,只要冲击弹坑形态与爆炸弹坑体积和形态相同(弹坑深度相同、弹坑半径相同),即可认为二者辐射出的地冲击效应等效。因此,以弹坑体积和形态为等效指标,基于冲击成坑深度确定等效装药埋深,基于冲击成坑半径确定弹坑抛掷指数,进而计算等效装药当量,建立超高速撞击与标准装药爆炸的能量等效关系。岩土中爆炸弹坑计算公式,多为半理论半经验模型,应用最为广泛的有:列文斯顿(Livingston)漏斗计算公式、鲍列斯科夫(М. М. Боресков)公式、兰格福斯(U. Langefors)公式、弗拉索夫(О. Е. Власов)公式、波克罗夫斯基(Г. И. Покровский)公式等<sup>[19]</sup>。这些公式很相似,且研究方法也比较接近。

基于多种半经验半理论公式,综合分析得到<sup>[19]</sup>:

$$Q = (k_2W^2 + k_3W^3 + k_4W^4)[(1 + N^2) / 2]^2 \quad (7)$$

式中:  $Q$  为等效装药量;  $N = R/h$  为弹坑抛掷指数,  $R$  为弹坑半径;  $W$  为装药埋深;  $k_2W^2$  项代表表面力效应,表征为破碎岩块间的滑移摩擦,此项一般可以忽略;  $k_3W^3$  项代表强度效应,表征为岩石介质的变形破碎,此项为能量源的主要耗散项;  $k_4W^4$  项代表重力效应,表征为岩块抛掷飞散出爆破漏斗,此项对于规模较小化学爆炸成坑效应,一般可以忽略。亨利奇<sup>[19]</sup>给出 9# 硝铵炸药爆破花岗岩:  $k_4 = 2.2 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^4$ ,  $k_3 = 1.8 \sim 2.55 \text{ kg/m}^3$ ,  $k_2 = 0.35 \text{ kg/m}^2$ 。

超高速动能弹丸对地打击的毁伤效应接近于触地爆或浅埋爆,其地冲击能量主要耗散在介质的变形和破坏,因而可以忽略式(3)中的面力效应和重力

效应,令装药埋深等于冲击成坑深度,即  $W=h$ ,于是弹坑装药量的计算公式简化为

$$Q = k_3h^3[(1 + N^2) / 2]^2 \quad (8)$$

由式(1)和(3)可以计算超高速撞击成坑深度和成坑半径,抛掷指数也可以算得,  $h$ ,  $R$ ,  $N$  值已知,代入式(8)可以计算出等效装药量。

将等效装药的能量与超高速弹丸动能进行对比,得到超高速动能弹等效装药的能量换算系数:

$$\eta = \frac{QQ_v}{E_k} = \frac{k_3Q_vh^3\{[1 + (R/h)^2] / 2\}^2}{0.5Mv_0^2} = F(M_a) \quad (9)$$

式中:  $Q_v$  为炸药爆热, TNT 炸药的爆热均为 1 000 kcal/kg, 热功当量 4.18 J/cal;  $k_3$  按照经验取值 1.8~2.55 kg/m<sup>3</sup>;  $M$  为弹丸质量;  $v_0$  为撞击速度;  $h$  为冲击成坑深度,按式(1)计算;  $R$  为冲击成坑半径,按式(3)计算。

### 3.2 实验与算例分析

利用二级轻气炮,开展若干组超高速弹丸撞击花岗岩的成坑试验研究,试验后采用光学扫描仪定量测量冲击成坑尺寸。

弹体参数,弹体为尖卵形长杆弹,弹体长  $L = 36 \text{ mm}$ , 直径  $d_0 = 7.2 \text{ mm}$ , 弹体长径比为 5, 弹头形状系数  $CRH = 3.0$ , 材料采用 30CrMnSiNiA, 密度为  $\rho_p = 7 850 \text{ kg/m}^3$ , 弹体质量 9.67 g。

靶体参数,实验前测得花岗岩参数为,密度  $\rho_t = 2 670 \text{ kg/m}^3$ , 纵波速度  $c_1 = 4 200 \text{ m/s}$ , 单轴抗压强度约 150 MPa, 剪切强度  $\tau_s = 50 \text{ MPa}$ , 剪切模量  $G = 27 \text{ GPa}$ , 断裂韧度  $K_c = 2.7 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , 动力硬度  $H = 3 \text{ GPa}$ 。

将不同撞击速度下的成坑尺寸,按照式(8), (9)可计算出浅埋爆炸等效装药量和能量换算系数,如表 1 所示。

表 1 超高速撞击花岗岩试验结果与浅埋等效装药量的换算

Table 1 Conversion of hypervelocity impact granite test results and shallow equivalent charge

序号	撞击速度 $v_0(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	无量纲撞击速度 $M_a(1)$	弹坑深度 $h/\text{mm}$	弹坑半径 $R/\text{mm}$	抛掷指数 $N(1)$	等效装药量 $Q/\text{g}$	能量转换系数 $\eta(1)$
1	1 829	1.220	29.016	92.484	3.19	1.52	0.39
2	2 231	1.487	45.000	137.484	3.06	4.87	0.85
3	2 806	1.871	51.984	142.488	2.74	5.09	0.56
4	2 878	1.919	60.012	167.508	2.79	8.35	0.87
5	3 200	2.133	57.996	193.752	3.34	14.42	1.22
6	3 542	2.361	61.992	235.008	3.79	28.14	1.94
7	3 558	2.372	65.300	230.500	3.53	25.22	1.72
8	4 135	2.757	65.016	282.492	4.34	54.30	2.75

弹、靶材料参数确定情况下，超高速撞击的成坑深度  $h$  和半径  $R$  主要由无量纲撞击速度  $M_a$  决定，因而成坑效应的抛掷指数  $N$ 、等效装药量  $Q$ 、能量转换系数  $\eta$  都由无量纲撞击速度  $M_a$  决定，可以用无量纲撞击速度  $M_a$  的函数表示。经过计算，得到超高速撞击形成弹坑的抛掷指数与撞击速度间的关系曲线(见图 3)；将超高速撞击弹坑的抛掷指数和成坑深度，代入式(8)，算得浅埋爆炸等效装药与撞击速度间的关系曲线(见图 4)；将等效装药量代入式(9)，算得能量转换系数与无量纲撞击速度间的关系曲线(见图 5)。

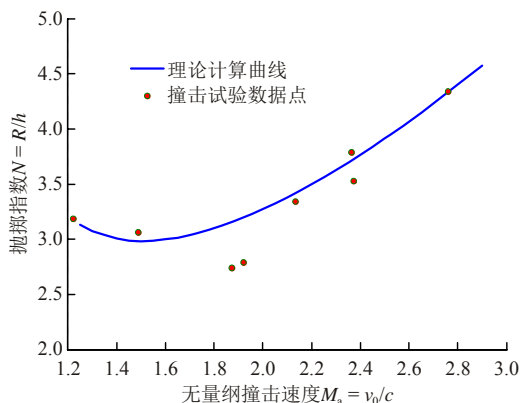


图 3 撞击弹坑抛掷指数与无量纲撞击速度的关系  
Fig.3 Relationship between impact crater throw index and dimensionless impact velocity

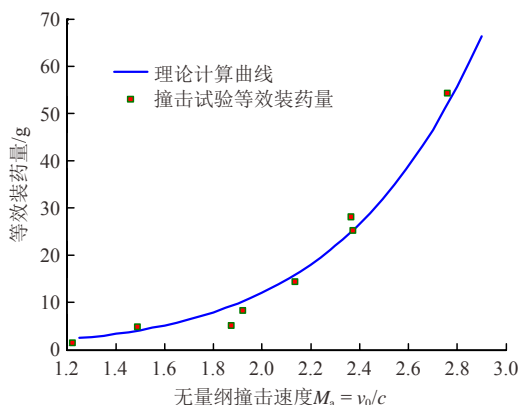


图 4 等效装药量与无量纲撞击速度的关系  
Fig.4 Relationship between equivalent charge and dimensionless impact velocity

无量纲撞击速度  $M_a < 1.50$  时，对应固体侵彻与拟流体侵彻的转换阶段，由于这个阶段依然存在侵彻弹孔，表面成坑形态与浅埋爆炸成坑形态区别较大，因而不能进行爆炸等效转换；无量纲撞击速度  $M_a > 1.50$  后，冲击成坑形态与浅埋爆炸成坑形态较为相似，可以进行爆炸等效转换。无量纲撞击速度  $1.50 \leq M_a \leq 1.88$  范围，随着撞击速度增加，成坑深度逐步增加，且成坑半径增加幅度较小，因而

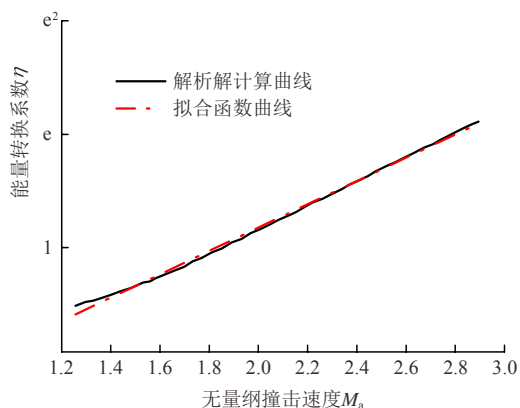


图 5 能量转换系数与无量纲撞击速度的关系曲线  
Fig.5 Relationship curve between energy conversion coefficient and dimensionless impact velocity

冲击成坑抛掷指数变小；无量纲撞击速度  $M_a > 1.88$  后，随着撞击速度增加，成坑深度增加缓慢，而成坑半径增加明显，冲击成坑抛掷指数不断增加，弹坑形态趋于浅深度、大直径的碟形。随着无量纲撞击速度  $M_a$  不断增大时，等效装药量不断增大，能量换算系数不断增大。

由于能量转换系数的解析解表达式十分复杂，显式表达既不实用也不必要。将能量转换系数  $\eta$  数值表示为自然对数坐标值，它与无量纲撞击速度  $M_a$  呈线性关系，通过分析得到能量转换系数与无量纲撞击速度的简化表达式：

$$\eta \approx e^{M_a - 1.88} \tag{10}$$

随着撞击速度的增加，冲击成坑体积不断增加，成坑深度和成坑半径不断增加，等效装药量不断增加，且等效装药的能量转换系数也变得越来越大。无量纲撞击速度  $M_a < 1.88$ ，能量转换系数  $\eta < 1$ ，即等效装药能量小于超高速弹体动能，表明等效装药耦合入岩体中的能量比动能弹撞击的耦合效率高；无量纲撞击速度  $M_a > 1.88$ ，能量转换系数  $\eta > 1$ ，即等效装药能量大于超高速弹体动能，表明炸药耦合入岩体地表和空气中的能量增加，等效装药耦合入岩体中的能量比动能弹撞击的耦合效率低。能量转换系数  $\eta > 1$ ，一方面表明超高速撞击能量定向性强，超高速撞击耦合入地下的地冲击能量效率更高；另一方面表明撞击能量或规模越大，等效装药爆炸耦合入地下的有效能量越小，超高速撞击越接近表面爆炸或者触地爆炸。

等效装药与超高速撞击的能量换算系数，即式(10)，可以表述为更普遍的形式：

$$\eta \approx k_a e^{M_a} \tag{11}$$

式中： $k_a$  为多方指数，由弹靶初始参数和边界条件确定，当弹/靶材料、弹丸质量、长径比、弹形系数固定时， $k_a$  值恒定不变，它表征等效装药能量与弹丸动能相同时的临界状态。

### 4 等效方法有效性验证

超高速弹体(以着靶速度 3 558 m/s 为例)撞击花岗岩试验过程中，通过内置于靶体中的 PVDF 薄膜传感器，得到花岗岩靶体内各层的地冲击压力时程，如图 6 所示。第一层传感器距离靶体表面 10 cm，大于测试的成坑深度。第一层压力峰值为 401 MPa，而花岗岩 Hugoniot 弹性极限超过 3 GPa<sup>[20]</sup>，按本文上文分析的岩石靶中冲击波传播规律，测试的地冲击波数据应处在拟流体区域之外的固体弹塑性区域。将压力峰值按幂指数拟合，衰减规律如图 7 所示，实测衰减指数  $n_3 = 1.4$ 。

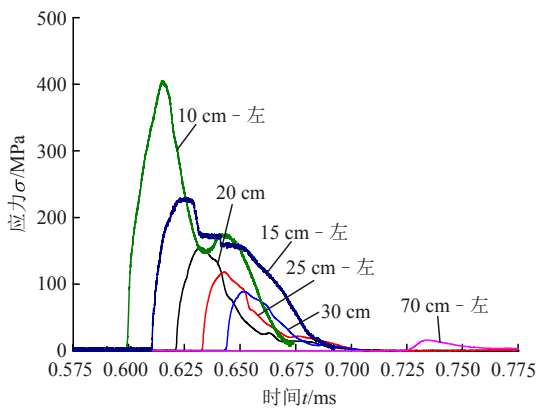


图 6 弹速 3 558 m/s 靶体各层应力波时程

Fig.6 Time history of stress wave 3 558 m/s in each layer of target

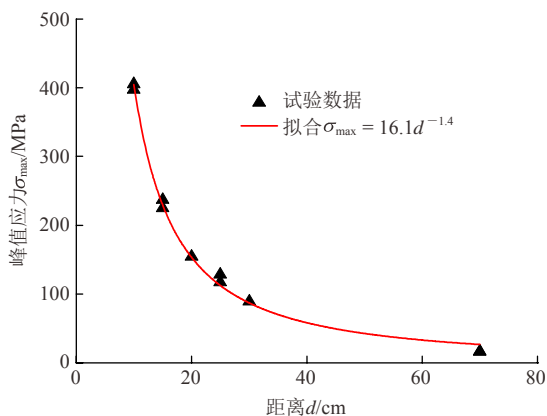


图 7 弹速 3 558 m/s 靶体中应力波衰减规律

Fig.7 Attenuation law of stress wave 3 558 m/s in target

按照岩石中爆炸应力波公式计算等效装药爆炸应力波形，考察其与超高速弹体撞击岩石应力波形的拟合情况。根据试验统计，岩土爆炸应力波成指

数衰减，其中应用最多的是邓国强等<sup>[13, 21]</sup>提供的计算公式：

$$\sigma(t) = \begin{cases} \sigma_{pk} t / t_r & (0 \leq t \leq t_r) \\ \sigma_{pk} e^{-\alpha(t-t_r)} & (t > t_r) \end{cases} \quad (12)$$

$$\sigma_{pk} = 48.77 f \rho_l c_l \left( \frac{2.8D}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-n} \quad (13)$$

式中： $\sigma_{pk}$  为峰值压力， $\alpha = 1/t_a$ ， $t_a = D/c_l$  为达到时间， $t_r$  为升压时间， $f$  为耦合系数， $\rho_l$  为材料密度， $c_l$  为纵波速度， $Q$  为等效装药量， $D$  为爆心至测点距离， $n$  为衰减指数。

根据超高速弹体撞击花岗岩的试验参数，选取等效装药爆炸计算参数：靶体密度  $\rho_l = 2\ 670\text{ kg/m}^3$ ，声速  $c_l = 4\ 200\text{ m/s}$ ，浅埋爆炸时取耦合系数  $f = 0.69$ ，可取  $\eta = 1.72$ ，即等效 TNT 当量为 1.72 倍弹体动能， $Q = 25.22\text{ g}$ ， $D$  分别为 10, 15, 20, 25, 30, 70 cm，考察区域对应岩石的弹塑性应力状态区，取衰减指数  $n = 1.4$ ， $t_r \approx 0.3t_a$ ， $\alpha = 1/t_a$ 。由式(12)拟合的等效装药爆炸应力波形时程曲线(见图 8)与超高速撞击应力波形时程曲线(见图 6)有很好的致性。

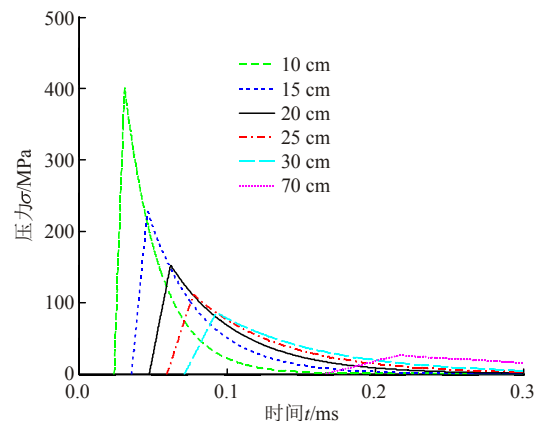


图 8 等效装药爆炸应力波时程曲线

Fig.8 Time history of equivalent charge explosion stress wave

但随着应力波传播距离的增加，爆炸应力波升压时间越来越长，峰值压力衰减得更快；超高速撞击中应力波升压时间变化并不明显，同一位置处压力时程曲线会出现二次波峰，升压段波形类似“馒头波”。出现上述现象的最主要原因是传感器与岩石存在界面耦合问题：试验中为了布设 PVDF 薄膜压力传感器，将花岗岩靶体切割为若干层，用 502 胶将传感器黏贴在分层界面中心位置，最后采用低黏度环氧树脂对两层靶面进行黏结，因而分层界面处波阻抗与岩石波阻抗必然存在一定差异。

将等效装药爆炸与超高速撞击应力波参数(峰

值压力和升压时间)列于表 2, 对比二者在相同位置处应力波拟合情况。从表 2 中可以看出, 应力波传播到相同位置处, 等效装药爆炸与超高速撞击产生的峰值压力十分吻合, 升压时间也较为接近。对于  $D = 10$  和  $15\text{ cm}$  位置处, 等效装药爆炸与超高速撞击的压力时程曲线的峰值压力、升压时间和正压时间几乎完全重合。等效装药爆炸应力波与超高速撞击应力波在空间位置上的衰减曲线几乎完全重合, 如图 9 所示, 二者在相同距离位置处的压力峰值相同, 随传播距离的衰减指数相同。综上, 等效装药爆炸应力波形与超高速撞击应力波形非常吻合, 这就间接证实了本文提出的等效方法基本合理有效。

表 2 等效装药爆炸与超高速撞击应力波拟合情况

Table 2 Fitting of equivalent charge explosion and hypervelocity impact stress wave

测点位置/cm	等效装药爆炸应力波		超高速撞击应力波	
	峰值压力/MPa	升压时间/ms	峰值压力/MPa	升压时间/ms
10	402	0.007 3	401	0.010 0
15	228	0.010 8	230	0.012 0
20	153	0.014 4	160	0.012 5
25	112	0.018 0	120	0.012 8
30	86	0.022 0	90	0.012 6
70	26	0.050 1	25	0.010 0

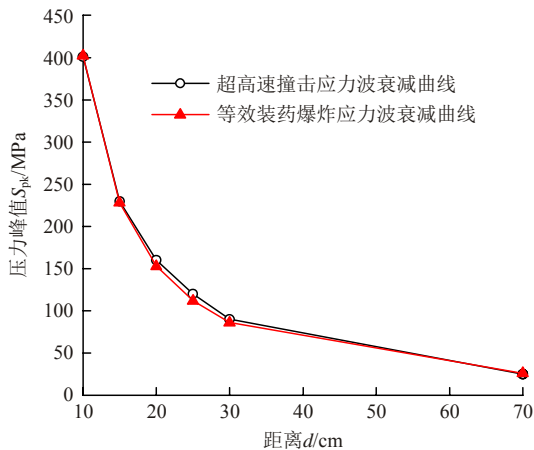


图 9 等效装药爆炸峰值应力拟合情况

Fig.9 Peak stress fitting of equivalent charge explosion

表 3 等效转换估算的最小安全防护层厚度(着靶速度 3 558 m/s)

Table 3 Minimum thicknesses of safe protective layer estimated by equivalent conversion(3 558 m/s)

序号	质量 $M/\text{kg}$	弹体半径 $r_0/\text{m}$	弹体长度 $L/\text{m}$	直接侵彻深度 $h/\text{m}$	等效装药量 $Q/\text{kg}$	堵塞系数 $m$	不震塌厚度 $h_s/\text{m}$	最小防护层厚度 $H_m/\text{m}$
1	100	0.074	0.740	1.25	1 135.60	1.30	17.97	19.22
2	200	0.093	0.933	1.57	3 064.85	1.30	25.02	26.59
3	400	0.118	1.175	1.98	8 281.28	1.30	34.85	36.83
4	600	0.135	1.345	2.27	14 819.25	1.30	42.31	44.58
5	800	0.148	1.481	2.50	22 398.77	1.30	48.55	51.05
6	1 000	0.159	1.595	2.69	30 861.78	1.30	54.03	56.72

## 5 超高速弹撞击岩石的最小防护层厚度估算

超高速撞击地冲击效应是造成地下工程破坏的主要因素。超高速弹撞击岩石时, 在弹/靶接触面形成冲击波, 波向下传播过程中迅速衰减, 并伴随介质的体积压实、高压粉碎、剪切破坏等作用, 其破坏范围远大于表面成坑范围。

依据本文提出的等效计算方法可以算得超高速撞击弹丸的等效装药能量, 进而依据爆炸地冲击效应进行安全防护层厚度的估算。超高速武器的最小防护层厚度  $H_m$  主要由冲击成坑深度  $h$  和冲击/应力波不震塌厚度  $h_s$  两部分构成, 可写成如下形式<sup>[10, 22]</sup>:

$$H_m = h + h_s \quad (14)$$

冲击成坑深度  $h$  按照王明洋等<sup>[6]</sup>提出的修正 A-T 模型进行计算, 见式(1)。冲击/应力波不震塌厚度  $h_s$  可利用如下关系式<sup>[13]</sup>来确定:

$$h_s = k_c r_c = k_c m k_p \sqrt[3]{Q} \quad (11)$$

式中:  $m$  为堵塞系数;  $k_p$  为破坏系数, 对中等强度岩石,  $k_p \approx 0.53$ ; 对有被覆的地下工程,  $k_c \approx 2.5$ ;  $Q$  为超高速撞击弹丸的等效装药能量, 按照式(8)计算。

超高速动能弹丸材料为 30 CrMnSiNiA, 密度为  $7\ 850\text{ kg/m}^3$ , 长径比为 5, 质量为  $0.1 \sim 1.0\text{ t}$ , 以着靶速度为  $3\ 558\text{ m/s}$ (10.5 马赫)打击  $150\text{ MPa}$  的花岗岩山体为例来进行估算, 密度为  $2\ 670\text{ kg/m}^3$ , 纵波速度  $4\ 200\text{ m/s}$ , 断裂韧度  $2.7\text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , 动力硬度  $3\text{ GPa}$ , 爆破指数  $2.0\text{ kg/m}^3$ 。等效装药能量转换系数理论分析在 1.72 左右, 等效转换估算的最小防护层厚度计算结果见表 3。

如表 3 所示, 地冲击效应影响范围, 即不震塌厚度, 占最小安全防护层厚度的  $93\% \sim 95\%$ , 从定量上表明: 超高速动能武器对地打击毁伤中, 最小防护层厚度主要由地冲击效应决定。

对于着靶速度为 3 558 m/s(10.5 马赫)的超高速动能弹丸撞击花岗岩时,弹丸质量从 100~1 000 kg 范围内变化,其最小防护层厚度在 20~60 m 范围内变化,因此该种条件下安全防护层厚度为 60 m。

为了提升防护工程抗超高速动能武器打击的防护能力,改变不断建设、不断技术加固改造的被动局面,在工程设计和建造时需要瞄准未来武器发展的水平。基于超高速动能武器发展水平和趋势,动能弹丸的极限速度大概在 5 100 m/s(15 马赫)左右,其质量不太可能超过 1 000 kg。图 10 直观地显示了最小防护层厚度与超高速弹丸的质量、速度间的关系。

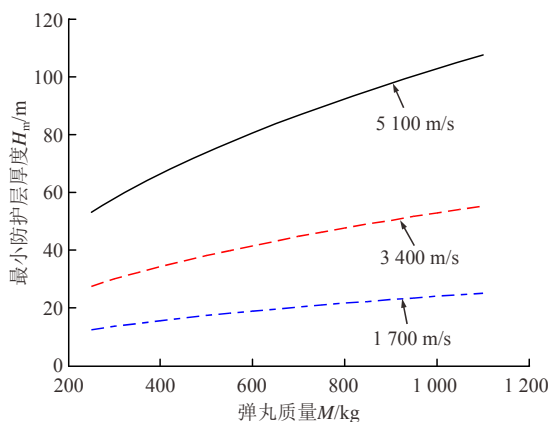


图 10 超高速弹丸撞击花岗岩的最小防护层厚度

Fig.10 Minimum thickness of protective layer for impact of hypervelocity projectile on granite

17 00 m/s(5 马赫)、3 400 m/s(10 马赫)、5 100 m/s(15 马赫)是超高速动能武器的典型速度;弹丸质量 1 000 kg 范围内时,对于被覆为花岗岩层时,最小防护层厚度不超过 100 m。该定量结果对国防工程建设具有一定的参考和借鉴意义。

## 6 结 论

(1) 系统阐述了岩石中超高速撞击与浅埋爆炸成坑效应的物理机制,提出以弹坑体积和形态为等效指标,建立超高速撞击与标准装药爆炸的能量等效关系。基于能够描述岩石中超高速撞击效应的成坑深度和半径计算公式,确定弹坑抛掷指数,进而计算等效装药当量,只要冲击弹坑形态与爆炸弹坑体积和形态相同(弹坑深度相同、弹坑半径相同),即可认为二者辐射出的地冲击效应等效。

(2) 在本文给定的弹/靶初始参数和条件下,得到以下结论:无量纲撞击速度  $M_a \geq 1.50$  后,可以进

行爆炸等效转换;无量纲撞击速度  $1.50 < M_a \leq 1.88$  范围,随着撞击速度增加,冲击成坑抛掷指数变小;无量纲撞击速度  $M_a > 1.88$  后,随着撞击速度增加,冲击成坑抛掷指数不断增加,弹坑形态趋于浅深度、大直径的碟形;无量纲撞击速度  $M_a$  不断增大时,等效装药量不断增大,能量换算系数不断增大;给出了能量换算系数的简化表达式。

(3) 依据超高速弹丸撞击花岗岩的地冲击试验数据,分析和验证了等效转换方法的有效性。通过对比相同位置处等效装药爆炸与超高速撞击应力波时程曲线,发现二者峰值压力十分吻合,升压时间也较为接近,证明本文提出的等效方法基本合理有效。

(4) 通过理论分析和计算,证明超高速撞击岩石过程中最小防护层厚度主要由地冲击效应决定,即冲击波/应力波影响范围远大于直接侵彻成坑范围。基于本文提出的地冲击效应等效计算方法,给出了 5 马赫、10 马赫、15 马赫特征速度下不同弹丸质量与最小防护层厚度间的关系曲线,得到定量结果;弹丸质量 1 000 kg 范围内时,对于被覆为花岗岩层时,最小防护层厚度不超过 100 m。

## 参考文献(References):

- [1] 张丽静,刘东升,于存贵.高超声速飞行器[J].航空兵器,2010,(2):3-16.(ZHANG Lijing, LIU Dongsheng, YU Cungi. Hypersonic vehicle[J]. AeroWeaponry, 2010, (2): 3-16.(in Chinese))
- [2] HARRY F. Hypervelocity then and now[J]. International Journal of Impact Engineering, 1987, (5): 1-4.
- [3] 付彩越.美国海军新概念武器现状和发展[J].舰船科学技术,2017,39(3):151-154.(FU Caiyue. U.S. Navy new concept weapon status and development trend[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(3): 151-154.(in Chinese))
- [4] 海天.未来海战的杀手锏:新概念武器之超高速、超空泡、反鱼雷鱼雷武器[J].舰载武器,2005,(12):72-80.(HAI Tian. New concept weapons in the future warfare[J]. Shipborne Weapons, 2005, (12): 72-80.(in Chinese))
- [5] 李干,宋春明,邱艳宇,等.超高速弹对花岗岩侵彻深度递减现象的理论与实验研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(1):60-66.(LI Gan, SONG Chunming, QIU Yanyu, et al. Theoretical and experimental studies on the phenomenon of reduction in penetration depth of hyper-velocity projectiles into granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(1): 60-66.(in Chinese))
- [6] 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-



- 572.(WANG Mingyang, QIU Yanyu, LI Jie, et al. Theoretical and experimental study on penetration in rock and ground impact effects of long rod projectiles of hyper speed[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 564 - 572.(in Chinese))
- [7] 李卧东, 章克凌, 施存程, 等. 侵蚀弹超高速撞击岩石类材料的成坑效应[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2016, 17(5): 418 - 423.(LI Wodong, ZHANG Keling, SHI Cuncheng, et al. Crater effect in rocky material target hypervelocity impact by erosive projectile[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science, 2016, 17(5): 418 - 423.(in Chinese))
- [8] 程怡豪, 王明洋, 施存程, 等. 大范围着速下混凝土靶抗冲击试验研究综述 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2015, 49(4): 616 - 625. (CHENG Yihao, WANG Mingyang, SHI Cuncheng, et al. Review of experimental investigation of concrete target to resist missile impact in large velocity range[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2015, 49(4): 616 - 625.(in Chinese))
- [9] 施存程. 地质类材料超高速撞击机制研究[博士学位论文][D]. 南京: 解放军理工大学, 2015.(SHI Cuncheng. Research on mechanisms of hypervelocity impacts on geological materials[Ph. D. Thesis][D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2015.(in Chinese))
- [10] 邓国强, 杨秀敏. 超高速武器对地打击效应数值仿真[J]. 科技导报, 2015, 33(16): 65 - 71.(DENG Guoqiang, YANG Xiumin. Numerical simulation of damage effect of hyper velocity weapon on ground target[J]. Science and Technology Review, 2015, 33(16): 65 - 71.(in Chinese))
- [11] 宋春明, 李 干, 王明洋, 等. 不同速度段弹体侵彻岩石靶体的理论分析[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(2): 250 - 257.(SONG Chunming, LI Gan, WANG Mingyang, et al. Theoretical analysis of rock targets at projectiles penetrating into different velocities[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(2): 250 - 257.(in Chinese))
- [12] GUREVICH M I. The theory of jets of an ideal fluid[M]. Moscow: Nauka, 1979: 536 - 537.(in Russian)
- [13] 邓国强, 杨秀敏. 超高速武器流体侵彻与装药浅埋爆炸效应的等效方法[J]. 防护工程, 2015, 37(6): 27 - 32.(DENG Guoqiang, YANG Xiumin. Effect equivalent method between fluid penetration of hyper velocity weapon and shallow detonation of explosive[J]. Protective Engineering, 2015, 37(6): 27 - 32.(in Chinese))
- [14] 岳松林, 王德荣, 范鹏贤, 等. 岩土中不同规模爆炸的抛掷成坑效应综述[C]// 第 3 届全国工程安全与防护学术会议. 武汉: [s. n.], 2012.(YUE Songlin, WANG Derong, FAN Pengxian, et al. A review on cratering effects of explosion in soils and rocks[C]// The 3rd National Conference on Engineering Safety and Protection. Wuhan: [s. n.], 2012.(in Chinese))
- [15] ADUSHKIN V V, SPIVAK A A, Underground explosions[R]. Washington, DC: Translated from Russian to English., Air Force Technical Applications Center Directorate of Nuclear Treaty Monitoring(HQ AFTAC/TT) Patrick Air Force Base, FL 32925. 2015
- [16] ADUSHKIN V V, KHRISTOFOROV B D. Action of the coastal 1000-Ton surface explosion on the environment[J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 2004, 40(6): 686 - 693.
- [17] Л. П. Орленко著. 爆炸物理学[M]. 3 版. 孙承纬 译. 北京: 科学出版社, 2011: 656 - 658.(ORLENKO L P. Explosion physics[M]. 3rd ed. Translated by SUN Chengwei. Beijing: Science Press, 2011: 656 - 658.(in Chinese))
- [18] A. H. 哈努卡耶夫. 矿岩爆破物理过程[M]. 刘殿中译, 北京: 冶金工业出版社, 1980: 63 - 82.(HANUKAYEV A H. Physical processes on rock blasting[M]. Translated by LIU Dianzhong, Beijing: Metallurgical Industry Press, 1980: 63 - 82.(in Chinese))
- [19] 亨利奇. 爆炸动力学及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001: 261 - 263.(HENRYCH J. The dynamics of explosion and its use[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2001: 261 - 263.(in Chinese))
- [20] ROSENBERG J T. Dynamic shear strength of shock-loaded granite and polycrystalline quartz[R]. Menlo Park, California: Stanford Research Institute, 1971.
- [21] U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, TM5-855-1 Fundamentals of protective design for conventional weapons[R]. Vicksburg, Mississippi: U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1986.
- [22] 邓国强, 杨秀敏. 抗超高速武器最小安全防护层厚度计算[J]. 防护工程, 2016, 38(1): 39 - 42.(DENG Guoqiang, YANG Xiumin. Estimation method of security protective layer depth resisted hyper velocity weapon impact[J]. Protective Engineering, 2016, 38(1): 39 - 42.(in Chinese))