

文章编号: 1001-1455(2009)03-0225-06

刚性弹侵彻不同靶材的侵彻深度比较*

李继承, 陈小伟

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 根据刚性弹侵彻动力学的量纲—侵彻深度公式, 通过比较刚性弹侵彻不同靶材的侵彻深度, 提出不同靶材之间可以互相替换进行实验研究的思想。讨论了相同弹丸在相同撞击速度下对不同靶材的侵彻深度的比例关系。结合现有相关实验中的数据来验证和分析对于不同靶材量纲—侵彻深度公式的实用范围以及不同靶材之间互相替换的可行性, 得出了具有工程实用意义的结论。

关键词: 爆炸力学; 量纲—侵彻深度; 靶体替换; 刚性弹; 靶材

中图分类号: O385

国标学科代码: 130·35

文献标志码: A

1 引言

缩比和同比的侵彻实验是深侵彻钻地弹预先研究和设计阶段中不可缺少的研究手段, 侵彻实验研究的靶材通常可包括金属、混凝土(加筋和素混凝土)、土壤和岩石等。针对不同战标的弹体, 有必要对靶体(靶材、靶体强度、靶体几何尺寸、靶体边界等)进行恰当设计。

靶体设计需要同时考虑实验成本和实验合理性(实验设计和实验结果)。选择的靶材不同, 相应的制作成本差异很大。另一方面, 不同靶材的实验数据可否外推和相互比较, 以保证实验结果的客观性, 也是实验分析中必须强调和注意的。在分析弹体屈曲时, 陈小伟等^[1]讨论了金属靶和混凝土靶的等效性。若能找到弹体侵彻不同靶材之间的相似性及转换关系, 便可从其中一类靶材实验的侵彻深度推知其他靶材的侵彻深度, 从而选择成本较低和实验操作方便的靶体代替高成本靶体, 这样既可降低实验成本, 又可增加实验效率。因此, 靶体等效性的分析是必要和值得开展的。

文献[2-3]已分别给出了不同弹头形状(圆锥形、半球形以及尖卵形等)的刚性弹侵彻不同靶材(金属靶、混凝土靶及土壤等)的量纲—侵彻深度公式。本文中沿用量纲—化的方法, 寻找相同弹丸以相同速度撞击不同靶材的侵彻深度之间的联系, 并推导其比例关系。结合 Forrestal 课题组开展的弹丸侵彻金属靶^[4-8]、侵彻混凝土靶^[9-11]和侵彻土壤^[12]的实验数据, 检验各种靶材之间侵彻深度的比例关系, 讨论不同靶材等效替换的可行性。

2 刚性弹撞击不同靶材的量纲—侵彻深度的类比性

文献[2-3]的研究表明, 刚性弹撞击不同靶材的量纲—侵彻深度仅由两个量纲—量(撞击函数 I 和弹头形状函数 N)控制, 并已分别给出不同弹头形状刚性弹侵彻不同靶材(金属靶、混凝土靶以及土壤等)的量纲—侵彻深度公式

$$X/d = (2/\pi)n \ln(1 + I/N) \quad (1)$$

式中: X 为侵彻深度, d 为弹径, I 为撞击函数, N 为弹头形状函数, 其表达式分别为

$$I = I^* / (AN_1), \quad N = \lambda / (BN_2) \quad (2)$$

式中: $I^* = m v_0^2 / (d^3 \sigma_y)$, $\lambda = m / (\rho d^3)$, σ_y 为靶材屈服强度; ρ 为靶材密度; A 、 B 为靶材的量纲—材料常数; N_1 、 N_2 为与弹丸头部形状和摩擦因数 μ 有关的量纲—形状系数, 文献[2]已分别给出不同弹头形状

* 收稿日期: 2008-01-17; 修回日期: 2008-04-22

作者简介: 李继承(1984—), 男, 硕士研究生。

的 N_1 和 N_2 的具体表达式; m 为弹丸质量; v_0 为初始撞击速度。 I^* 与 λ 分别称为量纲一撞击因子和量纲一质量比。对于混凝土靶,式(1)还应考虑前坑深度。

进一步,文献[2]的研究还表明, X/d 更依赖于撞击函数 I ,当弹头形状函数 N 足够大时(对应于细长尖头弹体的动能侵彻弹,如钻地弹等), X/d 对 N 则不敏感。大量的实验数据表明, X/d 与 I 有非常简单的线性关系

$$X/d = I/2 \quad (3)$$

基于式(3),沿用量纲一化方法,容易得知刚性弹侵彻不同靶材(金属靶、混凝土靶和土壤等)的侵彻深度之间具有一定的类比性和相互转换关系。

下述式子中加下标 m, c, s 的物理量分别表示与弹丸侵彻金属靶、混凝土靶和土壤相关的物理量,由式(3)出发,推导刚性弹侵彻不同靶材的侵彻深度的比例关系。由式(3)可知

$$\left(\frac{X}{d}\right)_i = \frac{1}{2} \left(\frac{I^*}{AN_1}\right)_i = \frac{1}{2} \left(\frac{mv_0^2}{d^3 N_1}\right)_i \frac{1}{(\sigma_y)_i A_i} \quad i = m, c, s \quad (4)$$

因此有

$$\frac{X_i}{X_j} = \frac{(mv_0^2)_i (d^3 N_1)_j (\sigma_y)_j A_j}{(mv_0^2)_j (d^3 N_1)_i (\sigma_y)_i A_i} \quad i, j = m, c, s \text{ 且 } i \neq j \quad (5)$$

若使弹丸大小、形状以及撞击速度均相同,则式(5)可简化为

$$\frac{X_i}{X_j} = \frac{(N_1)_j (\sigma_y)_j A_j}{(N_1)_i (\sigma_y)_i A_i} \quad i, j = m, c, s \text{ 且 } i \neq j \quad (6)$$

对于混凝土靶和土壤,分析中常忽略摩擦效应,因此有 $(N_1)_c = (N_1)_s = 1$,而金属靶有 $(N_1)_m \approx 1$ 。显然,相同弹体以相同速度撞击不同的靶材,其侵彻深度之比主要与靶材的强度参数 σ_y 和材料常数 A 有关。因此可推知,刚性弹侵彻不同靶材的实验之间可以相互替换,侵彻深度比例按式(5)、(6)作相应转换即可。

下面分别给出金属靶、混凝土靶和土壤的不同参数定义。

对于理想弹塑性金属,其量纲一材料因数 A 可由准静态球形空腔膨胀理论推导而得^[13]

$$A = \frac{2}{3} \left\{ 1 + \ln \left[\frac{E}{3(1-\gamma)\sigma_y} \right] \right\} \quad (7)$$

式中: E 为弹性模量, γ 为泊松比, σ_y 为屈服应力强度。对于应变硬化金属,其本构关系为

$$\sigma = \begin{cases} E\epsilon & \sigma < \sigma_y \\ Y(E\epsilon/\sigma_y)^n & \sigma > \sigma_y \end{cases} \quad (8)$$

其中不可压应变硬化金属的量纲一材料因数 A 有如下表达式^[14]

$$A = \frac{2}{3} \left[1 + \left(\frac{2E}{3\sigma_y} \right)^n J \right] \quad J = \int_0^{1-3\sigma_y/(2E)} \frac{(-\ln x)^n}{1-x} dx \quad (9)$$

式(8)中, $n=0$ 对应于不可压缩的理想弹塑性金属材料。

对于混凝土靶,由文献[3]可知,其 σ_y 可取为其单轴无围压压缩强度 f_c ,其量纲一材料因数 $A = S$,其中 $S = 82.6 f_c^{-0.544}$ 或 $S = 72.0 f_c^{-0.5}$ 。

而对于土壤,文献[12]根据 Tresca 屈服准则,将 σ_y 取为其剪切应力强度 τ_0 ,量纲一材料因数 A 可表示为

$$A = \frac{2}{3} \left\{ 1 - \ln \left[\frac{(1 + \tau_0/(2E))^3 - (1 - \eta^*)}{(1 + \tau_0/(2E))^3} \right] \right\} \quad (10)$$

式中: η^* 为锁定的体应变, $\eta^* = 1 - \rho_0/\rho^*$; ρ_0 和 ρ^* 分别为土壤的初始密度和锁定后的密度。对于软土, $\tau_0/E \ll 1$, A 可进一步简化为

$$A = \frac{2}{3} (1 - \ln \eta^*) \quad (11)$$

3 不同靶材的侵彻深度的实验比较和分析

结合不同靶材的侵彻实验数据,实验分析不同靶材的侵彻深度的相关性,并讨论其实用性,以期能直观地给出不同靶材之间侵彻深度的大致比例关系。

以 $\sigma_y=400$ MPa 的 6061-T651 铝合金^[4]、 $f_c=36.2$ MPa 的混凝土^[9]和 $\tau_0=10$ MPa 的软土^[12]为例,其相关参数分别为 $A=3.637、12、1.718$ ^[2-3]。由式(6)可理论求得不同靶材的侵彻深度比例为

$$X_m/X_c \approx 0.300, \quad X_m/X_s \approx 0.012, \quad X_c/X_s \approx 0.040 \quad (12)$$

若上式的侵彻深度比例关系成立,则可通过其中一种靶材实验的侵彻深度的实验值,结合相关的换算比例,预测其他 2 种靶材的侵彻深度的实验值。这样即可实现靶材替换的目的。

文献[4-8]、[9-11]、[12]分别开展了不同弹丸侵彻金属靶板、混凝土靶板和土壤的实验。实验涉及的相关参数见表 1,表中 ψ 为弹丸的弹头形状比, $D、m、v$ 分别为弹丸的直径、质量和侵彻速度。其余参数及相应侵彻深度可见相应文献。本文引用的实验数据,其弹体变形均可忽略,即满足刚性弹的假设;文献[2]针对这些实验数据作过详细分析,得出上述实验的弹丸量纲一形状系数 N_1 都可近似取为 1。

表 1 实验涉及的相关参数

Table 1 Various parameters of cited experiments

靶板材料	弹头形状	D/mm	m/g	$v/(m/s)$	参考文献		
金 属	半球形, $\psi=0.50$	7.10	23.3~24.0	400~1 000	[4]		
	6061-T651 铝 尖卵形, $\psi=3.00$	7.10	24.7~24.9	440~1 460			
	尖锥形, $\psi=1.51$	7.10	23.6~24.1	510~1 370			
	属	6061-T651 铝 (应变硬化) 半球形, $\psi=0.50$	7.11	23.36~23.44	359~1 009	[5]	
		半球形, $\psi=0.50$	5.08	11.72~11.85	253~980		
		半球形, $\psi=0.50$	7.11	12.00~12.09	318~945	[6]	
7075-T651 铝 半球形, $\psi=0.50$		7.11	24.7~24.8	372~1 258			
6061-T6511 铝 半球形, $\psi=0.50$		7.11	22.81~22.86	496~1 086			
混 凝 土	尖卵形, $\psi=3.00$	7.11	20.38~20.91	569~1 786	[8]		
	$f_c=13.5$ MPa	尖卵形, $\psi=3.00$	12.9	64.2	371~1 126	[9]	
		尖卵形, $\psi=4.25$	12.9	64.2	345~1 063		
	$f_c=32.4\sim40.1$ MPa	尖卵形, $\psi=2.00$	26.9	901~912	277~800		
	$f_c=90.5\sim108.3$ MPa	尖卵形, $\psi=2.00$	26.9	898~908	561~793		
	$f_c=21.6$ MPa	尖卵形, $\psi=3.00$	12.9	64	492~1 142		
		尖卵形, $\psi=4.25$	12.9	64	473~1 190		
	土	$f_c=62.8$ MPa	尖卵形, $\psi=3.00$	20.3	478	450~1 024	[10]
		$f_c=51.0$ MPa	尖卵形, $\psi=3.00$	30.5	1 600	405~1 201	
		$f_c=58.4$ MPa	尖卵形, $\psi=3.00$	20.3	478	442~1 165	[11]
尖卵形, $\psi=3.00$	30.5		1 620	445~1 225			
土壤	$\tau_0=10$ MPa	尖卵形, $\psi=3.00$	95.2	23 100	280	[12]	

下面讨论不同靶材侵彻深度的实验值。具体思路是:继续沿用上述文献中相关实验的弹丸相关参数和撞击速度,但将原来靶材参数更换为另一种靶材的相应参数,即将原来的金属靶侵彻实验分别用混凝土靶和土壤代替,原来的混凝土靶以金属靶和土壤代替,原来的土壤用金属靶和混凝土靶代替。统一假设靶体为半无限厚。为方便起见,替换靶材分别采用上述的 6061-T651 铝合金、混凝土和土壤。

侵彻深度的实验值可根据式(6)换算为替换靶的侵深实验估计值,同时根据式(1)和式(3)可分别计算给出相应替换靶的侵深理论分析值,给出相应的比较结果,若替换靶的侵深实验估计值与侵深理论分析值相近或相同,则表明不同靶材的等效性成立,实验中可将不同靶材互换以节约成本。

在靶材替换的计算过程中,对于混凝土靶和土壤的侵彻取磨擦因数 $\mu=0$;对于金属靶侵彻,尖卵形弹取 $\mu=0.02$,半球形弹和尖锥形弹取 $\mu=0.1$ ^[2]。

根据上述思路,分别利用公式(1)、(3)、(6)计算出替换靶的 3 个量纲一侵彻深度 X/d 的值,比较替换靶的侵深理论分析值和侵深实验估计值。参考文献[2-3]知,撞击函数 I 是控制刚性弹侵彻深度的最重要参数,因此以 I 为 x 轴,图 1~6 分别给出不同替换靶的侵深理论分析值和侵深实验估计值的比值 $\zeta_1 = X_{t1}/X_e$ 或 $\zeta_2 = X_{t2}/X_e$,其中 X_{t1} 、 X_{t2} 和 X_e 分别是按公式(1)、(3)计算的替换靶的侵深理论分析值和按公式(6)计算的侵深实验估计值。

观察图 1~6 可发现:

对于铝靶和混凝土靶互换的实验(图 1、2),分别与公式(1)、(3)的计算相关的侵深比值 ζ_1 和 ζ_2 大都接近于 1,且都有 80% 以上的数据处于 20% 的误差范围内,特别是铝靶替换混凝土靶的计算中处于

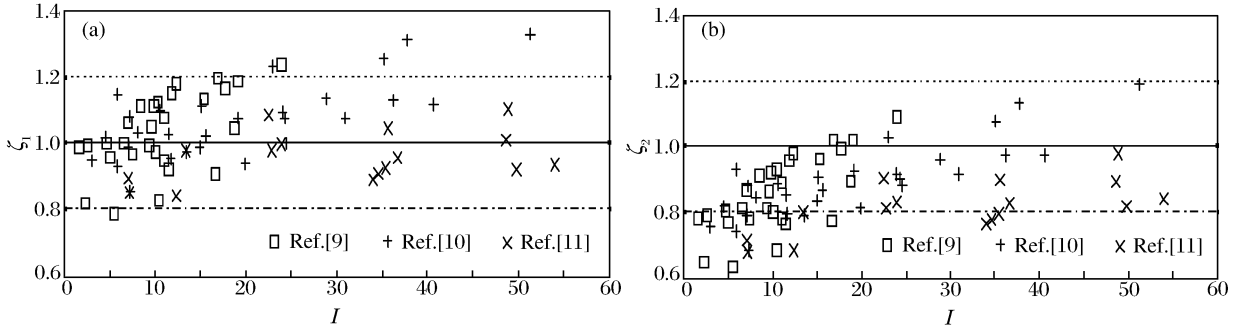


图 1 6061-T651 铝靶替换混凝土靶后侵深比值随撞击函数的变化

Fig. 1 Relationship between impact function and the ratio of DOP of 6061-T651 aluminium alloys being as substitute of concrete targets

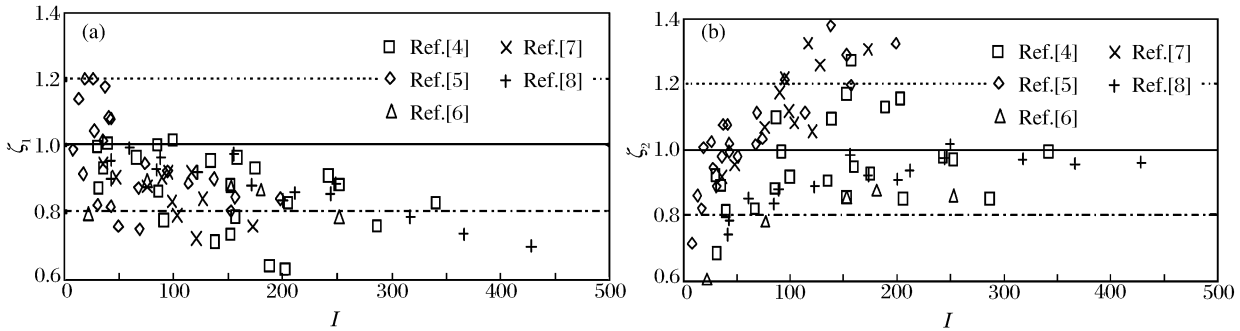


图 2 混凝土靶替换金属靶后侵深比值随撞击函数的变化

Fig. 2 Relationship between impact function and the ratio of DOP of concrete targets being as substitute of metallic targets

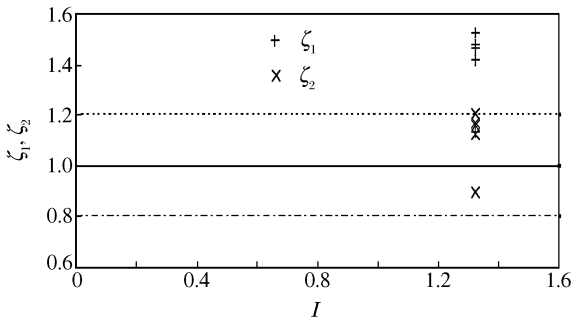


图 3 6061-T651 铝靶替换土壤后侵深比值随撞击函数的变化

Fig. 3 Relationship between impact function and the ratio of DOP of 6061-T651 aluminium alloys being as substitute of soil targets

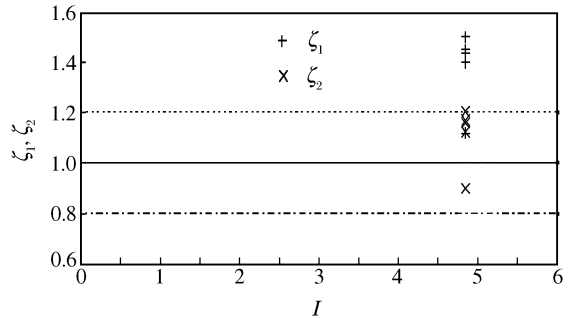


图 4 混凝土靶替换土壤后侵深比值随撞击函数的变化

Fig. 4 Relationship between impact function and the ratio of DOP of concretes being as substitute of soil targets

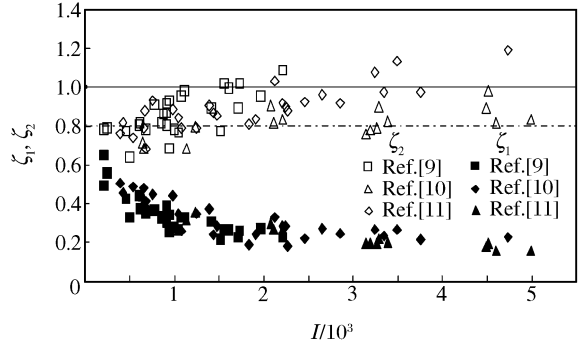
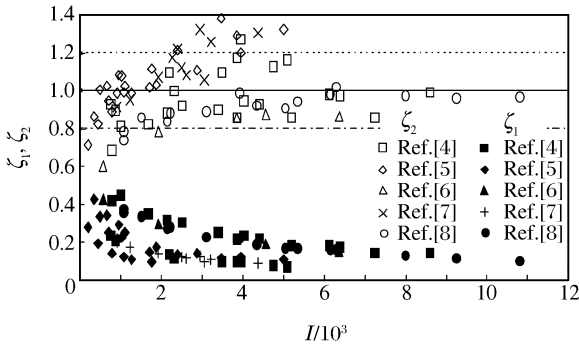


图5 土壤替换金属靶后侵深比值随撞击函数的变化

图6 土壤替换混凝土靶后侵深比值随撞击函数的变化

Fig. 5 Relationship between impact function and the ratio of DOP of soil targets being as substitute of metallic targets

Fig. 6 Relationship between impact function and the ratio of DOP of soil targets being as substitute of concrete targets

误差范围内的比例值的数量高达 90%。因此,铝靶和混凝土靶的等效性成立,实验可采用这 2 种靶材互换以节约成本。另外,图 1(b)所示的比例值大部分小于 1,而图 1(a)所示的比例值则比 1 大和比 1 小的数量相当,所以在作关于靶材替换的计算时,公式(1)比公式(3)更适用于铝靶替换混凝土靶。作为比较,对于混凝土靶替换铝靶的计算中(图 2),图 2(a)所示的比例值大部分小于 1,而图 2(b)所示的比例值则比 1 大和比 1 小的数量相当。由此可知,对于混凝土靶替换铝靶,公式(3)比公式(1)更适用。

对于铝靶和土壤互换以及混凝土靶和土壤互换的实验分析(图 3~6),均发现只有公式(3)适用。在铝靶和混凝土靶分别替换土壤的计算中,对于 5 发实验,公式(1)的计算结果只有 1 个数据处于 20% 误差范围内,其余值都较远地偏离 1,而公式(3)的计算数据则几乎完全处于误差范围内。对于土壤替换铝靶和混凝土靶的计算,公式(1)的结果偏差更大,如图 5、6,都远远超出工程误差范围,而公式(3)的计算结果对于两者仍然有 80% 以上的数据处于 20% 工程允许误差范围内。根据公式(1)计算的侵深进行靶材替换对比,导致较大差异的原因在于公式的非线性,且非线性随撞击函数 I 的增大而显著增加。根据文献[2]的分析,文献[12]的软土侵彻实验对应的撞击函数 I 值已大于 100,替换为铝靶和混凝土靶后(图 5、6),对应的 I 值更远大于 100。而由于公式(3)是线性关系,并不随 I 的变化而改变,因此对应的替换比例关系依然成立。

上述实验结果的分析表明,侵彻实验中,利用最简单的侵彻深度公式(3)分别预测不同靶材的侵深,然后对金属靶、混凝土靶和土壤靶等靶板之间进行互相替换的办法是可行的。值得注意的是:实际应用中利用上述分析和方法的前提是弹丸形状变化可以忽略,即需要满足刚性弹假设。同理可推知,对于其他靶材,如岩石、硬土等,或不同强度、物性的同类靶材,也可按本文的基本方法进行分析 and 替换。这在节约实验成本和简化实验设计等方面具有重要的作用。

4 结论

根据刚性弹侵彻动力学的量纲一侵彻深度公式,沿用量纲一化的方法,通过比较刚性弹侵彻不同靶材的侵彻深度,提出不同靶材之间可互相替换进行实验研究的思想。讨论相同弹丸在相同撞击速度下对不同靶材的侵彻深度的比例关系,相关的实验数据分析证实了不同靶材之间可以互相替换。

参考文献:

[1] 陈小伟,张方举,徐艾民,等.细长薄壁弹体的屈曲和靶体等效分析[J].爆炸与冲击,2007,27(4):296-305.
CHEN Xiao-wei, ZHANG Fang-ju, XU Ai-ming, et al. Buckling analysis of EPW and equivalent conditions of targets[J]. Explosion and Shock Waves, 2007,27(4):296-305.

[2] Chen X W, Li Q M. Deep penetration of a non-deformable projectile with different geometrical characteristics[J].

International Journal of Impact Engineering, 2002,27(6):619-637.

- [3] Li Q M, Chen X W. Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003,28(1):93-116.
- [4] Forrestal M J, Okajima K, Luk V K. Penetration of 6061-T651 aluminum targets with rigid long rods[J]. Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics, 1988,55(8):755-760.
- [5] Forrestal M J, Brar N S, Luk V K. Penetration of strain-hardening targets with rigid spherical-nose rods[J]. Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics, 1991,58(1):7-10.
- [6] Forrestal M J, Luk V K. Penetration of 7075-T651 aluminum targets with ogival-nose rods[J]. International Journal of Solids and Structure, 1992,29(12):1729-1736.
- [7] Piekutowski A J, Forrestal M J, Poormon K L, et al. Penetration of 6061-T6511 aluminium targets by ogive-nose steel projectiles with striking velocities between 0.5 and 3.0 km/s[J]. International Journal of Impact Engineering, 1999,23(8):723-734.
- [8] Forrestal M J, Piekutowski A J. Penetration experiments with 6061-T6511 aluminium targets and spherical-nose steel projectiles at striking velocities between 0.5 and 3.0 km/s[J]. International Journal of Impact Engineering, 2000,24(1):57-67.
- [9] Forrestal M J, Altman B S, Cargile J D, et al. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 1994,15(4):395-405.
- [10] Forrestal M J, Frew D J, Hanchak S J, et al. Penetration of grout and concrete targets with ogive-nose steel projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 1996,18(5):465-476.
- [11] Frew D J, Hanchak S J, Green M L, et al. Penetration of concrete targets with ogive-nose steel rods[J]. International Journal of Impact Engineering, 1998,21(6):489-497.
- [12] Forrestal M J, Luk V K. Penetration into soil targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 1992,12(5):427-444.
- [13] Forrestal M J, Luk V K. Dynamic spherical cavity-expansion in a compressible elastic-plastic solid[J]. Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics, 1988,55(3):275-279.
- [14] Luk V K, Forrestal M J, Amos D E. Dynamics spherical cavity expansion of strain-hardening materials[J]. Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics, 1991,58(1):1-6.

Comparison among depths of penetration of different targets subjected to rigid projectile impact

LI Ji-cheng, CHEN Xiao-wei*

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

Abstract: The present paper discusses the ratios of DOP (depth of penetration) of different targets under the same penetration condition according to the dimensionless formula of DOP of different targets penetrated by a non-deformable projectile. It is declared that various targets may be equivalent to each other. Finally we discuss the applicable range of the equivalence and the feasibility of targets substitution by integrating the available test data.

Key words: mechanics of explosion; dimensionless depth of penetration; target substitution; rigid projectile; target material

* Corresponding author; CHEN Xiao-wei
Telephone: 86-816-2485413

E-mail address: chenxiaoweintu@yahoo.com