

刚性弹丸撞击下岩石侵彻之理论研究^{*}

文鹤鸣, 徐海斌

(中国科学技术大学材料力学行为和设计重点实验室, 安徽合肥 230027)

摘要:对岩石在刚性弹丸撞击下的侵彻问题进行了理论研究。文章包括两个部分。首先, 对常用的预测岩石在刚性弹丸撞击下侵彻深度的方程进行了简单回顾和评论; 然后, 在实验观测的基础上, 对最近发表的一些预测在刚性弹丸撞击下, 混凝土和土壤的侵彻公式进行了修正, 推导出一个较为合理的剪切强度表达式。拟合结果表明: 该模型与 Frew、Forrestal 和 Hanchak 所得到的石灰岩侵彻的实验数据吻合得很好。

关键词:弹丸; 岩石; 撞击; 侵彻

中图分类号: O385

文献标识码: A

1 引言

岩石是自然形成的产物, 是由一种或几种矿物组成的固态集合体, 其力学性能复杂, 对岩石开展侵彻研究具有重要的理论意义。岩石也是防护工程和重要军事设施的常用建筑材料, 研究在弹丸撞击下岩石的侵彻破坏作用具有十分现实的意义^[1~5]。

在现今的军事应用上, 由于岩石分布极其广泛, 质地坚硬, 可以就地取材, 因此岩石往往是防护工程和重要军事设施的常用建筑材料, 有些重要的地下掩体建在离地面达几十米甚至几百米深的地方。

当前武器进入“点穴战”的时代, 高技术武器大量涌入战场, 在一系列现代局部战争中, 精确打击占有重要的地位。钻地弹是这些高技术武器中的一种, 是摧毁敌方指挥、控制、通讯、情报、计算机、监视、侦察中心(C⁴ISR)和战略导弹坑道系统等深埋地下坚固工程的主要武器, 特别是海湾、科索沃和伊拉克的战争表明, 利用钻地弹贯穿并摧毁敌方的机场跑道、或者破坏敌方的地下防护结构和指挥中心, 在战争中发挥着越来越重要的作用, 因此, 钻地弹受到了世界各国的广泛重视, 并对其投入了大量研究。

本文包括两个部分。首先, 对预测在弹丸撞击下岩石侵彻深度的常用方程进行了简单的回顾和评论; 然后, 在实验观测的基础上, 对文献[1]最近发表的预测在刚性弹丸撞击下混凝土和土壤的侵彻公式进行了修正, 推导出一个较为合理的剪切强度表达式。该模型与 Frew、Forrestal 和 Hanchak^[2]等人所得到的石灰岩侵彻的实验数据进行了拟合并进行了讨论。

2 岩石侵彻公式之研究状况

弹丸对混凝土结构、岩石和土壤的侵彻, 长期以来为军事工程师和土木工程师所关注^[1~5]。由于弹丸冲击的机理相当复杂, 所以在很长时间内, 都是以试验为基础, 建立计算侵彻深度、崩裂破坏和穿透的经验或半经验公式, 并用于工程设计。尽管 20 世纪 60 年代以来, 计算机的速度和容量不断增长, 计算技术与试验技术不断发展, 使数值模拟方法已成为研究弹丸冲击侵彻问题的有效方法, 但经验公式由于其特有的优点——简洁、实用、有一定的可靠性, 而一直受到人们的重视。目前在各国有关防护结构的设计手册中, 基本上还是采用经验方法来进行侵彻评估。

^{*} 收稿日期: 2003-08-05; 修回日期: 2003-12-23

作者简介: 文鹤鸣(1965—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事冲击动力学研究。

E-mail: hmwen@ustc.edu.cn.

2.1 Young 公式

美国圣迪亚国家实验室(Sandia National Laboratories)从1960年开始研究土、岩石等地质材料的侵彻项目,其目的是开发钻地核武器技术。40多年来,进行了约3000次实验,建立了重要的试验数据库。1967年,C. W. Young根据广泛的实验数据,提出了预测土中侵彻深度的经验公式,但直到1969年才在《土力学与基础杂志》上公开发表^[4]。大约在1979年,提出一个与岩石、混凝土的实验数据更吻合的新公式。事实上该公式与混凝土试验数据更吻合,而与岩石试验数据只限于现有数据是吻合的,并不普遍正确。直到1983年以后有了岩石中侵彻的数据,才发现这个问题,为此,1988年发表了一份新的报告,并首次提出了计算混凝土可侵彻性(S 值)的公式。后又发现混凝土的侵彻公式在 M/A 值非常高时,与获得的新数据并不相符。1997年Young在报告《侵彻公式》中提出了对土、岩石、混凝土使用形式相同的公式,只是其中系数不同。这些公式通常称为Young公式,可以写成^[5]

$$P = 0.3SN(W/A)^{0.7} \ln(1 + 2 \times 10^{-5} v_i^2) \quad v_i < 200 \text{ ft/s} \quad (1)$$

$$P = 0.00178SN(W/A)^{0.7} (v_i - 100) \quad v_i > 200 \text{ ft/s} \quad (2)$$

式中: P 为弹丸在厚目标中的侵彻深度(ft); N 为弹丸头部形状影响系数; W 为弹丸重量(lb); A 为弹丸的横截面面积(in²); v_i 为弹丸撞击速度(ft/s); S 为表征靶体材料可侵彻性指标。

对于卵形弹头(Ogival-Nosed Projectiles),可用下列公式计算 N

$$N = 0.56 + 0.18n \quad (3a)$$

$$N = 0.56 + 0.18(\psi - 0.25)^{0.5} \quad (3b)$$

对于锥形弹头(Conical-Nosed Projectiles)

$$N = 0.56 + 0.25n \quad (3c)$$

对于截锥弹头(Truncated Ogives or Cones),方程(3a)和方程(3c)可以分别写成

$$N = 0.56 + 0.09(1 + L'_N/L_N)n \quad (3d)$$

$$N = 0.56 + 0.125(1 + L'_N/L_N)n \quad (3e)$$

式中: $n = L_N/d$, L_N 为弹头部长, d 为弹体直径; $\psi (= \text{CRH})$ 为卵形弹头部表面曲率半径与弹丸横截面直径之比, L'_N 是截锥弹头部长($L'_N \leq L_N$)。

对重量较轻的弹丸,公式(1)和公式(2)需要修正。对岩石而言,当弹丸的重量小于400 lb时,方程(1)和方程(2)的右边需乘以系数 K

$$K = 0.4W^{0.15} \quad (W < 400 \text{ lb}) \quad (4)$$

$W < 400 \text{ lb}$ 的弹丸多数为缩尺模型弹,因此 K 又称为重量(或质量)比例换算系数。

在Young公式中,采用 S 作为表征靶体材料可侵彻性的指标。这是与其它公式不同之处。但将Young的 S 值用于Young公式以外的任何公式都是不恰当的。Young公式中与下面将要介绍的其它公式(如Forrestal公式)中所用的 S 值并不相关。获得 S 值的方法有两种:进行侵彻试验;或者用计算公式来估计。硬度大的目标物 S 值越小,硬度小的目标物其值越大。对于岩石其值可由下式计算

$$S = 12(\sigma_c Q)^{-0.3} \quad (5)$$

式中: σ_c 为岩石无侧限抗压强度; Q 为表征岩石质量的指标,与节理、裂缝等因素有关,主要根据工程判断来确定,而不是地质学上的专门术语,与 Q_{RD} (Rock Quality Designation)相类似。 Q_{RD} 的不足在于它只考虑了水平裂缝的影响,几乎完全忽略了铅直裂缝。公式(5)中的 Q 即考虑了水平裂缝又考虑了铅直裂缝的影响,其数值范围为0.1~1.0,可根据表1来估算 Q 值。

2.2 Bernard 公式

美国陆军工程兵水道实验站(WES)于1977年至1979年先后提出了3个计算岩石中侵彻深度的公式。1977年提出的侵彻深度公式通常称为Bernard公式。该公式是根据混凝土、花岗岩、凝灰岩、砂岩试验资料,进行回归分析提出的^[6]

$$\frac{\rho_i P}{M/A} = 0.2v_i \left(\frac{\rho_t}{\sigma_c} \right)^{0.5} \left(\frac{100}{Q_{RD}} \right)^{0.8} \quad (6)$$

式中: Q_{RD} 为岩石质量指标,是现场岩体中原生裂缝间距的一个度量,可由下面关系式确定

$$Q_{RD} = \frac{\text{长度大于等于 } 10 \text{ cm 的岩芯块长度总和}}{\text{岩芯总长度}} \times 100$$

式中使用国际制单位或下述英制单位： ρ_i 为 lb/in^3 、 v_i 为 in/s 、 σ_c 为 lb/in^2 、 A 为 in^2 。Bernard 指出，尽管在建立公式时使用了混凝土试验数据，但(6)式并不用于混凝土。由于侵彻数据有限，公式(6)适用于下列条件：(1) $x \geq sd$ ；(2) $Q_{RD} > 90$ 时， $d = 3 \sim 30 \text{ cm}$ ； $Q_{RD} < 90$ 时， $d = 10 \sim 30 \text{ cm}$ ，在此范围外公式的正确性未经验证；(3) $Q_{RD} < 20$ 时，公式不能用；(4) 弹头形状的影响较小，但建议不用于 $\psi < 1.5$ 的钝弹头。

表 1 岩石质量 Q 值

Table 1 Values of Q for rocks

Rock conditions	Q	Rock conditions	Q	Rock conditions	Q
Massive	0.9	Interbedded	0.6	Joint spacing $< 0.5 \text{ m}$	0.3
Joint spacing $> 0.5 \text{ m}$	0.7	Fractured, blocky or fissured	0.4	Highly fractured or jointed	0.2
Slightly weathered	0.7	Moderately weathered	0.4	Highly weathered	0.2
Frost shattered	0.2	Rock quality, very good/excellent	0.9	Rock quality, good	0.7
Rock quality, fair	0.5	Rock quality, poor	0.3	Rock quality, very poor	0.1

1978 年，Bernard 等人又提出了一个稍为复杂的计算公式^[7]

$$P = \frac{M}{A} \left[\frac{v_i}{b} - \frac{a}{b^2} \ln \left(1 + \frac{b}{a} v_i \right) \right] \quad (7)$$

式中： $a = 1.6 \sigma_c (Q_{RD}/100)^{1.6}$ ， $b = 3.6 (\rho_i \sigma_c)^{0.5} (Q_{RD}/100)^{0.8}$ ， M 为弹丸质量。公式(6)和公式(7)与实验数据的比较见图 1(a)。图 1(a)中，虚线为公式(6)，实线为公式(7)。在所考虑的无量纲参数量值的范围内以及对于所试验的岩石，两个公式看来很接近，且给出可信的结果。

公式(7)提出后不久，Bernard 等人于 1979 年根据微分面力模型，假定作用在弹丸上的力并据此得出一个更加复杂的计算公式^[8]

$$P = \frac{M}{A} \frac{N}{\rho_i} \left[\frac{v_i}{3} \left(\frac{\rho_i^{0.5}}{f_{cr}^{0.5}} \right) - \frac{4}{9} \ln \left(1 + \frac{3}{4} v_i \frac{\rho_i^{0.5}}{f_{cr}^{0.5}} \right) \right] \quad (8)$$

式中： $N = 0.863 [4\psi^2 / (4\psi - 1)]^{1/4}$ (卵形弹头)， $N = 0.805 \sin^{-1/2} \eta_c$ (锥形弹头)； $f_{cr} = \sigma_c (Q_{RD}/100)^{0.2}$ ； η_c 为锥尖半角，其它符号意义同前。公式(8)既可用于岩石，也可用于混凝土。该式对数据的拟合略优于公式(6)和公式(7)，如图 1(b)所示。只要对岩石具有地质学的描述，就可以根据表 2～表 4 估计岩石性能，利用这些估计的性能即可用公式(6)～公式(8)大概地估计侵彻深度。

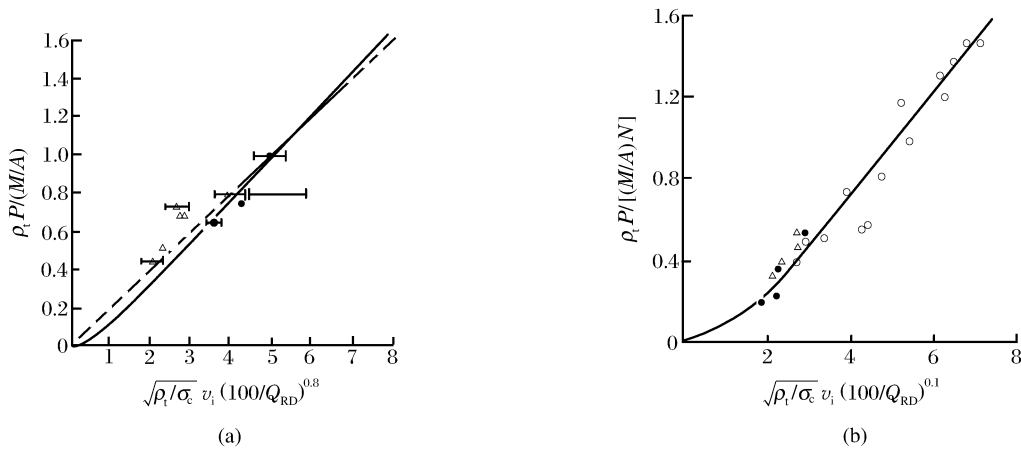


图 1 公式(6)～公式(8)与实验数据的比较

Fig. 1 Comparisons between equations (6～8) and experimental data

表 2 岩石质量分类

Table 2 Rock quality classification

Q_{RD}	Rock quality
0~25	Very poor
25~50	Poor
50~75	Fair
75~90	Good
90~100	Excellent

表 3 整体岩石的工程分类

Table 3 Engineering classification for intact rocks

Class	Compressive strength/(MPa)	Strength description
A	≥ 220	Very high strength
B	110~220	High strength
C	55~110	Medium strength
D	27.5~55	Low strength
E	≤ 27.5	Very low strength

表 4 整体岩石参数

Table 4 Parameters of intact rocks

Rock type	Density /(g/cm ³)	Strength /(MPa)	Rock type	Density /(g/cm ³)	Strength /(MPa)
Soft shale(clay shale,poorly cemented silty or shandy shale	2.3	1.4	Tuff(nonwelded)	1.9	14~21
Sandstone(large grain, poorly cemented)	2.0	7~21	Sandstone(fine to medium grain)	2.1	14~50
Sandstone(very fine to medium grain, massive,well cemented)	2.3	40~110	Shale(hard,tough)	2.3	14~80
Limestone(coarse,porous)	2.3	40~85	Limestone(fine grain, dense,massive)	2.6	70~140
Basalt(vesicular,glassy)	2.6	55~100	Basalt(massive)	2.9	>140
Quartzite	2.6	>140	Grain(coarse grain,altered)	2.6	55~110
Granite(competent, fine to medium grain)	2.6	100~190	Dolomite	2.5	70~140

2.3 Forrestal 公式

1994 年 Forrestal 等人^[8]提出了在卵形弹头弹丸撞击下混凝土侵彻深度的计算公式。根据实验观察,认为可把混凝土侵彻过程分为两个阶段,第一阶段为开坑区($z < 4a$);第二阶段为隧道区(Tunneling Region),对这两个区域,作用在射弹上的力(F)由下式给出

$$\begin{cases} F = cz & z < 4a \\ F = A(Sf_c + N\rho_t v^2) & z > 4a \end{cases} \quad (9)$$

根据上述力的假定,可得出最终侵彻深度的计算公式

$$P = \frac{M}{2A\rho_t N} \ln\left(1 + \frac{N\rho_t v_i^2}{Sf_c}\right) + 4a \quad (P > 4a) \quad (10)$$

式中: $v_i^2 = (Mv_i^2 - 4AaSf_c)/(M + 4AaN\rho_t)$, $N = (8\psi - 1)/24\psi^2$ 。方程(9)和方程(10)中, c 为常数; z 为侵彻深度; a 为弹体半径; S 为无量纲常数,与靶体抗压强度有关,必须通过试验确定; v 为弹体的速度。

Frew、Forrestal 和 Hanchak^[2]发现对石灰岩的侵彻深度预测公式的形式与此相同,不同的是用强度系数 R 代替“ Sf_c ”来描述岩石的性状。公式中, R 是唯一未知的参数,可以通过测量侵彻深度(以下所说的侵彻深度通常指最终的侵彻深度)和撞击速度来得到

$$R = \frac{N\rho_t v_i^2}{(1 + 4aAN\rho_t/M)\exp[2A(P - 4a)N\rho_t/M] - 1} \quad (11)$$

通过测量一组实验数据,并代入上式,从而求得其平均值。在对石灰岩的试验中,Frew、Forrestal 和 Hanchak^[2]发现,石灰岩的抗侵彻力随着射弹口径的增大而减小,并得到公式

$$R = K + k(2a_0/2a) \quad (12)$$

式中: K 和 k 是通过数据拟合得到的常数, $2a_0$ 为弹体参考直径。实验后获得 $K = 607 \text{ MPa}$, $k = 86 \text{ MPa}$, $2a_0 = 25.4 \text{ mm}$, 并发现对各项数据都相当吻合。

2.4 关于预测混凝土、土壤侵彻深度的公式

文鹤鸣^[1]最近对侵彻问题作了较全面的研究,提出弹丸在侵彻和穿透靶体时所受到的靶体阻力(压力) σ 由两部分组成:一部分是准静态压力,即靶体材料在弹塑性变形时产生的 σ_s ;另一部分是由速度效应引起的动压力 σ_d 。于是有

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_d \quad (13)$$

进一步设想有 $\sigma_s = \alpha \sigma_t$,而 σ_d 是与参数 $(\rho_t/\sigma_t)^{1/2} v_i$ 有关的函数,假定 $\sigma_d = \beta(\rho_t/\sigma_t)^{1/2} v_i \sigma_t$,于是得到

$$\sigma = [\alpha + \beta \sqrt{\rho_t/\sigma_t} v_i] \sigma_t \quad (14)$$

式中: σ_t 是靶体材料的强度量度, α 和 β 是由实验或理论确定的常数。

在侵彻过程中,可能会发生两种情况:一种是侵彻深度未达到弹头长度($P \leq L_N$),另一种是侵彻深度超过弹头长度($P > L_N$)。对此分两种情况讨论侵彻过程,利用能量守恒定律,最后得到的结论和公式中,卵形弹头的侵彻方程有两种情形^[1]。

(1) 情形 I, $P \leq L_N$

$$\rho_p (L + 8\psi^3 \eta a) v_i^2 = 16\psi^3 a \sigma \left[-\cos \varphi + \frac{1}{3} \cos^3 \varphi - \left(\varphi - \frac{1}{2} \sin 2\varphi \right) \sin \varphi_0 \right] - \sin^2 \varphi_0 \cos \varphi_0 + \frac{\pi}{2} \sin \varphi_0 + \eta \quad (15a)$$

$$P = (\sqrt{4\psi - 1} - 2\psi \cos \varphi) a \quad (15b)$$

式中: L_N 为弹头的长度, L 为弹体的长度, $\psi = R_n/2a$ 为弹头弧形部分的曲率半径(R_n)与弹径($d=2a$)之比(R_n 与 a 的定义见图 2)。

φ_0 和 η 由下列方程确定

$$\varphi_0 = \sin^{-1} [(2\psi - 1)/2\psi] \quad (15c)$$

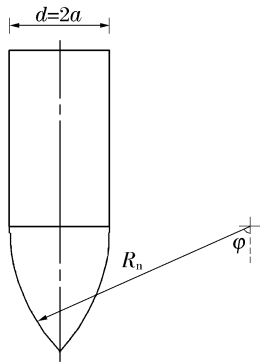
$$\eta = -\frac{\pi}{2} \sin \varphi_0 + \cos \varphi_0 - \frac{1}{3} \cos^3 \varphi_0 + \left(\varphi_0 - \frac{1}{2} \sin 2\varphi_0 \right) \sin \varphi_0 + \sin^2 \varphi_0 \cos \varphi_0 \quad (15d)$$

(2) 情形 II, $P > L_N$

$$\frac{P}{L + 8\psi^3 \eta a} = \frac{\rho_p}{\rho_t} \frac{\rho_t v_i^2}{\sigma_t} \frac{1}{2(\alpha + \beta \sqrt{\rho_t/\sigma_t} v_i)} + \frac{(\sqrt{4\psi - 1} - 8\psi^3 \eta) a}{L + 8\psi^3 \eta a} \quad (16)$$

图 2 卵形弹的几何尺寸

Fig. 2 Geometry of an ogival-nosed projectile



式中: α 、 β 和 σ_t 由下列表达式确定: $\alpha = \frac{2}{3} \left[1 + \ln \frac{E}{3(1-\nu)Y} \right]$,

$\beta = \frac{3}{4\psi}$, $\sigma_t = Y$ 。其中, E 和 ν 分别是靶体材料的 Young 氏模量和

Poisson 比, Y 为靶体材料压力相关的剪切强度, ρ_p 为弹体材料的密度。

3 岩石侵彻之理论研究

岩石是自然界综合地质作用的天然产物,其力学性能复杂,很多研究人员致力于该领域的工作,在研究过程中发现,岩石的侵彻公式与混凝土的侵彻公式极为接近^[2],可以通过修正其中的个别参数来获得预测岩石侵彻深度的公式。有鉴于此,本研究用文献^[1]中的关于预测混凝土和土壤的侵彻深度的公

式对 Frew、Forrestal 和 Hanchak^[2]所获得的石灰岩侵彻数据进行分析。

在 Frew、Forrestal 和 Hanchak^[2]所做的实验中,其侵彻深度都超过弹头长度,所以可以应用混凝土和土壤的预测侵彻公式(16),即

$$\frac{P}{L + 8\psi^3 \eta a} = \frac{\rho_p}{\rho_t} \frac{\rho_t v_i^2}{Y} \frac{1}{2(\alpha + \beta \sqrt{\rho_t/Y} v_i)} + \frac{(\sqrt{4\psi - 1} - 8\psi^3 \eta) a}{L + 8\psi^3 \eta a} \quad (17)$$

从该侵彻公式可以看出,侵彻深度是随 Y 的增大而减小的。通过文献[2]中得到的侵彻实验数据来看,侵彻深度随弹丸直径的增大而加大,剪应力 Y 随弹径的增大而减小。另外,显而易见, Y 又与无侧限单轴压缩强度 σ_c 有关,由此,假定 Y 由下面方程确定

$$Y = (d_0/d)^C (A\sigma_c + B) \quad (18)$$

式中: d_0 是参考弹径, A 、 B 、 C 是待定参数。通过对文献[2]的实验数据分析得到 Y 的值为:当 $d = 7.1 \text{ mm}$ 时, $Y = 232 \text{ MPa}$; $d = 12.7 \text{ mm}$ 时, $Y = 201 \text{ MPa}$; $d = 25.4 \text{ mm}$ 时, $Y = 171 \text{ MPa}$ 。于是可得到 Y 表达式中的待定参数: $d_0 = 152.4 \text{ mm}$, $A = 1$, $B = 50 \text{ MPa}$, $C = 0.24$ 。从而得到剪切强度 Y 的表达式

$$Y = (152.4/d)^{0.24} (\sigma_c + 50) \quad (19)$$

图3给出了方程(17)和方程(19)与文献[2]实验数据的比较。文献[2]分别对 7.1 mm 、 12.7 mm 、 25.4 mm 三种弹径进行了实验。具体的实验参数如下:

对于 $d = 7.1 \text{ mm}$ 的弹丸, $L = 59.3 \text{ mm}$, $\psi = 3$, $a = d/2$, $\rho_p = 7.85 \text{ g/cm}^3$, $\rho_t = 2.3 \text{ g/cm}^3$, $\sigma_c = 61 \text{ MPa}$, $\alpha = \frac{2}{3} \left[1 + \ln \frac{E}{3(1-\nu)Y} \right]$, $E = 36.7 \text{ GPa}$, $\nu = 0.25$, $\beta = 3/4\psi$ 。

对于 $d = 12.7 \text{ mm}$ 的弹丸, $L = 106 \text{ mm}$, $\psi = 3$, $a = d/2$, $\rho_p = 7.85 \text{ g/cm}^3$, $\rho_t = 2.3 \text{ g/cm}^3$, $\sigma_c = 61 \text{ MPa}$, $\alpha = \frac{2}{3} \left[1 + \ln \frac{E}{3(1-\nu)Y} \right]$, $E = 36.7 \text{ GPa}$, $\nu = 0.25$, $\beta = 3/4\psi$ 。

对于 $d = 25.4 \text{ mm}$ 的弹丸, $L = 212 \text{ mm}$, $\psi = 3$, $a = d/2$, $\rho_p = 7.85 \text{ g/m}^3$, $\rho_t = 2.3 \text{ g/cm}^3$, $\sigma_c = 61 \text{ MPa}$, $\alpha = \frac{2}{3} \left[1 + \ln \frac{E}{3(1-\nu)Y} \right]$, $E = 36.7 \text{ GPa}$, $\nu = 0.25$, $\beta = 3/4\psi$ 。

从图3可以看出,在 $400 \sim 1700 \text{ m/s}$ 的范围内,对于长径比为10、 ψ 为3的中小弹丸,该模型与实验数据相当吻合。

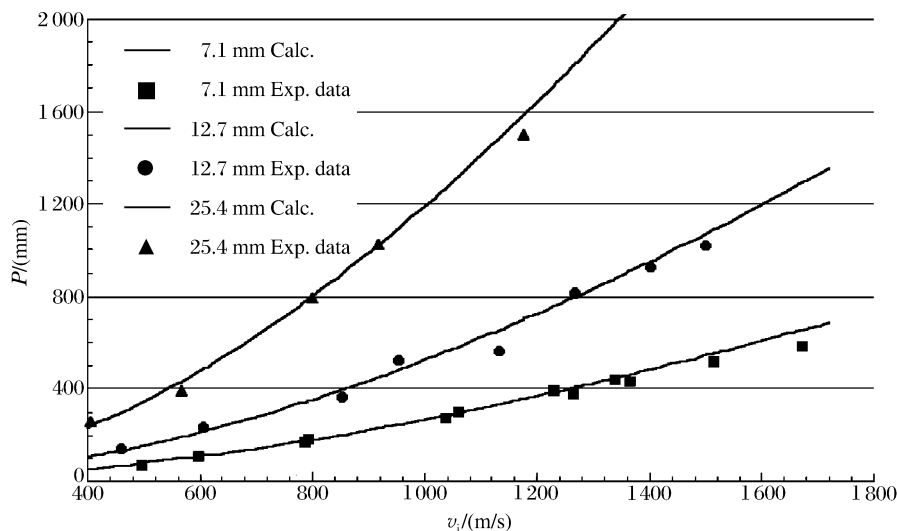


图3 理论预测与石灰岩实验结果^[2]比较

Fig. 3 Comparison between the present theoretical predictions and the experimental results for limestone^[2]

4 结 论

对岩石在刚性弹丸撞击下的侵彻问题进行了研究。首先,在文献调研的基础上,对岩石侵彻方程的发展及其国内外的研究状况进行了简单地回顾和评述。其次,利用 Frew、Forrestal 和 Hanchak^[2] 所获得的石灰岩侵彻实验数据,对文献[1]得出的关于预测混凝土和土壤侵彻深度的公式进行了修正,得出了公式中的剪切强度的一个表达式,建立了适用于预测卵形弹头弹丸对石灰岩侵彻深度的公式

$$\frac{P}{L + 8\phi\eta a} = \frac{\rho_p}{\rho_t} \frac{\rho_t v_i^2}{Y} \frac{1}{2(\alpha + \beta\sqrt{\rho_t/Y}v_i)} + \frac{(\sqrt{4\phi-1} - 8\phi^3\eta)a}{L + 8\phi\eta a} \quad (P \geq L_n)$$

式中: $Y = (152.4/d)^{0.24}(\sigma_c + 50)$, $\alpha = \frac{2}{3} \left[1 + \ln \frac{E}{3(1-\nu)Y} \right]$, $\beta = 3/4\phi$ 。将现有的实验数据代入到修正后的模型进行比较,发现在 400~1700 m/s 的速度范围内,此工程模型和实验结果吻合得较好。

岩石侵彻的研究是一个非常复杂的课题,从目前的研究现状来讲,虽然很多研究人员对此做了不少工作,但大部分都只是解决某一特殊问题,他们所得的公式或模型都受一定条件的限制,各种分析理论也是千差万别甚至相互矛盾。怎样把现有的这些局部领域内的研究成果统一起来成为一个系统,建立几个全面的指导性原则,应该是以后主要的努力方向。

References:

- [1] Wen H M. Predicting the Penetration and Perforation of Targets Struck by Projectiles at Normal Incidence [J]. *Mechanics of Structures and Machines*, 2002, 30(4): 543—577.
- [2] Frew D J, Forrestal M J, Hanchak S J. Penetration Experiments with Limestone Targets and Ogive-Nose Steel Projectiles [J]. *J Appl Mech*, 2000, 67: 841—5.
- [3] Heuze F E. An Overview of Projectile Penetration into Geological Materials, with Emphasis on Rock [A]. Schwer L E. *Computational Techniques for Contact, Impact, Penetration and Perforation of Solids* [C]. [s. l.]: ASME, 1989. 275—308.
- [4] Young C W. Depth Prediction for Earth Penetrating Projectiles [J]. *J Soil Mech and Foundation Div*, 1969, SM3: 803—817.
- [5] Young C W. Penetration Equations, Sandia National Laboratories, Albuquerque [R]. SAND-97-2426, 1997.
- [6] Bernard R S. Empirical Analysis of Projectile Penetration in Rock [R]. AD-A047989, 1977.
- [7] Benard R S. Depth and Motion Prediction for Earth Penetrators [R]. AD-A056701, 1978.
- [8] Benard R S, Creighton D. Projectile Penetration in Soil and Rock; Analysis for Non-Normal Impact [R]. AD-A081044, 1979.
- [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]. *Int J Impact Eng*, 1994, 15(4): 395—405.

A Theoretical Study on the Penetration of Rocks Struck by Rigid Projectiles

WEN He-Ming, XU Hai-Bin

(Laboratory for Mechanical Behaviour and Design of Materials,
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Rocks as natural building materials have been widely used in protective engineering and military fortification/installations. Hence, it is of great significance to carry out studies on the penetration of rock targets by projectiles. This paper contains two parts. The first part is an overview of the previous work with emphasis being placed on the formulas for the depth of penetration; the second part is a further development of the penetration model proposed by Wen by modifying the shear strength (Y) which has been found to be a function of both projectile diameter and target unconfined compressive strength based on the experimental observations. It is shown that the model correlates well with the penetration data for the limestone targets impacted by ogive-nosed projectiles.

Key words: depth of penetration; projectiles; rocks; impact