

文章编号: 1001-1455(2002)02-0174-05

# 长杆射弹侵彻混凝土实验研究

徐建波<sup>1,2</sup>, 林俊德<sup>2</sup>, 唐润棣<sup>2</sup>, 初哲<sup>2</sup>

(1. 国防科学技术大学应用物理系, 湖南长沙 410073;

2. 西北核技术研究所, 陕西西安 710024)

摘要: 利用轻气炮系统, 实验研究了速度为 0.2~0.6km/s, 长径比 1015, 直径 1040mm 的长杆射弹侵彻混凝土的一些主要现象。将实验结果与两种经验或半经验公式预估结果进行了比较, 明确了经验公式的适用范围。将实验结果与空腔膨胀模型预估结果比较表明, 认为混凝土靶是可压缩的是一种较好的近似。

关键词: 射弹; 混凝土; 侵彻实验\*

中图分类号: O385 文献标识码: A

## 1 引言

长杆射弹对混凝土等硬介质的侵彻近年来引起了武器研制和防护工程部门更多的关注。虽然以空腔膨胀理论为代表的近似解析法和利用现代数值计算方法的数值模拟法对于研究地质类材料侵彻问题有快捷经济的特点, 但是这两种方法都不能从根本上取代实验研究。弹体侵彻的复杂性和侵彻现象的多样性决定了研究侵彻问题时必须通过实验获取最根本最直接的弹靶侵彻特性和规律。目前工程上所采用的侵彻深度计算公式都属于通过实验得到的经验公式, 各种公式形式不同, 各自的适用范围和条件也有差别。特别在侵彻混凝土、岩石等脆性固体介质的侵深公式精确度还不高的情况下, 开展并加强侵彻规律和特征实验研究, 对考察、完善经验公式, 深入认识弹体材料性能、撞击速度、弹体长径比、弹头形状、撞击角等与侵彻深度的关系, 应该说是十分重要的。

## 2 实验与结果

实验分别在 57、130mm 口径的轻气炮上进行, 侵彻实验状态(如图 1)。射弹(图 2)是用 40CrNiMo 钢加工的, 热处理后洛氏硬度为 42~45, 屈服强度  $\sigma_y = 1150 \sim 1350\text{MPa}$ 。弹径分别为 10、20、40mm,

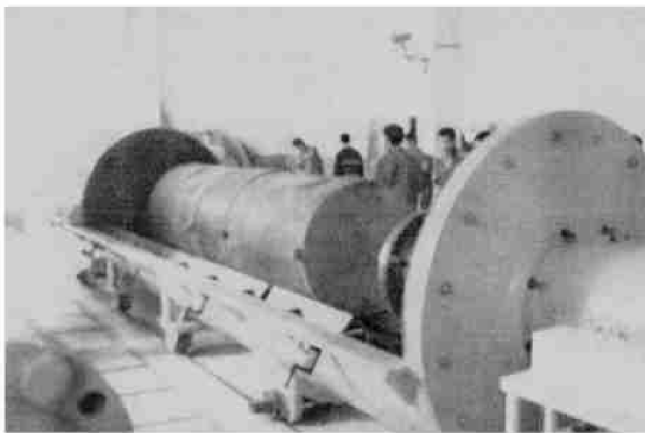


图1 射弹侵靶实验状态  
Fig.1 Penetrating experiment facility

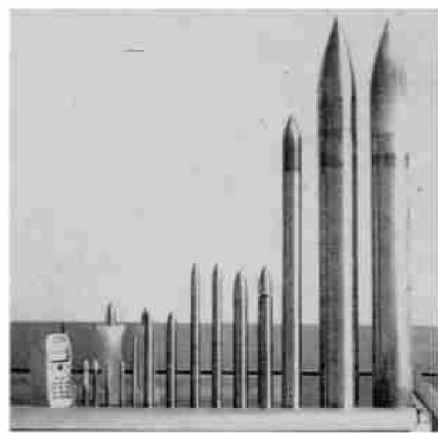


图2 实验中使用的射弹  
Fig.2 Steel projectiles

\* 收稿日期: 2001-06-15; 修回日期: 2001-07-12

作者简介: 徐建波(1962—), 男, 博士生, 副研究员。

长径比为 10~15, 弹头系数 CHR=3。靶分为两类：一类为水泥砂浆靶, 另一类为骨料直径小于 3cm 的素混凝土靶。为了避免硬度较高的弹体对炮管的划伤, 实验中所有射弹都是次口径的, 用弹托保证射弹定心并起到闭气的作用。弹托材料为尼龙, 对直径 30mm 以下的射弹使用一体弹托; 对直径 40mm 以上的射弹使用两体弹托。弹托的强度按极限压力下静态强度校核。在保证弹托强度的情况下, 尽可能减小弹托质量。着靶前弹托与弹体的分离依靠靶箱中的锥形脱壳装置完成。实验侵深数据列于表 1。

表 1 侵彻实验数据

Table 1 Penetrating data

<i>d</i> /mm	长径比	<i>M</i> /g	<i>v</i> /(m/s)	<i>H</i> /mm	<i>d</i> /mm	长径比	<i>M</i> /g	<i>v</i> /(m/s)	<i>H</i> /mm
10	10	58	330	145	20	10	460	206	145
		56.5	372	123			461	252	210
		58	382	175			460	312	248
		58	420	205			462	367	327
		58	450	205			459	408	357
		58	494	277			460	434	437
		58	560	335			460	475	475
40	15	6180	253	620	20	10	459	500	536
		6210	305	870			461	545	628
		6200	355	1120			460	602	730
		6200	403	1400			458	657	863
		6190	448	1690					

*d* 为直径; *M* 为弹托质量; *v* 为弹体着靶速度; *H* 为侵彻深度。

### 3 实验结果分析

#### 3.1 与半经验分析法预估结果的比较

假设在射弹侵靶初期, 靶面崩落区(约 2 倍弹体直径的深度)的侵彻阻力与侵彻深度成正比, 在崩落区之后, 弹的侵彻阻力主要来自与弹体直径平方成正比和与侵彻速度平方成正比的头部阻力<sup>[1]</sup>。用半经验分析的方法可以得出侵深关系式

$$H = \frac{2m}{\pi d^2 \rho N} \ln(1 + \frac{\rho N}{S \sigma} v_1^2) + 2d \quad H > 2d \quad (1)$$

$$v_1^2 = \frac{2mv^2 - \pi d^3 S \sigma}{2m + \pi d^3 N \rho} \quad (2)$$

$$N = \frac{8\psi - 1}{24\psi^2} \quad (3)$$

式中: *d* 为弹体直径; *m* 为弹体质量;  $\rho$  为混凝土密度;  $\sigma$  为混凝土无约束抗压强度; *v* 为弹体着靶速度;  $\psi$  为弹头系数(即 CHR); *S* 为需通过实验确定的与靶强度有关的系数。

为了确定 *S* 与混凝土强度  $\sigma$  的关系, 我们分析了 Forrestal 的多组侵深实验数据<sup>[2]</sup>, 并根据式(1)进行拟合, 得到

$$S = 70.12 \sigma^{-0.5} \quad (4)$$

将式(4)代入式(1), 就可以预估在上述实验条件下的侵彻深度。

#### 3.2 与美国陆军《抗常规武器设计规范》中的侵彻钢筋混凝土经验公式预估侵深的比较

美国陆军《抗常规武器设计规范》中的侵彻钢筋混凝土经验公式是

$$H = 3.5 \times 10^{-4} \times \frac{mv^{1.5}}{\sigma^{0.5} d^{1.785}} + 0.5d \quad (5)$$

式中各符号意义同前, 单位采用国际单位制。

两组实验的拟合曲线和用上面两种预估侵深关系式给出的结果如图 3。从图上可以看出, 虽然式(1)预估值比实测值稍微偏大, 但是在实验速度范围内整体变化趋势与实验拟合曲线一致性良好, 这证

明了通过分析国外已有实验数据而得出的靶材料强度系数  $S$  与靶无约束抗压强度  $\sigma$  的关系  $S = 70.12\sigma^{-0.5}$  比较准确地反映了靶强度对侵深的影响程度。因为侵彻公式中的弹体参数和靶密度非常容易得到,而在拟合  $S$  与  $\sigma$  的关系时靶强度涵盖了 13.5~100MPa 的范围,侵彻速度涵盖 300~1000m/s 的范围,所以可以说式(1)是一个便于应用而又能在很大范围内很好预估侵彻深度的公式。

对美国陆军《抗常规武器设计规范》中的侵彻钢筋混凝土经验公式来说,预估值比实测值要小,特别是在速度较高时误差更大。

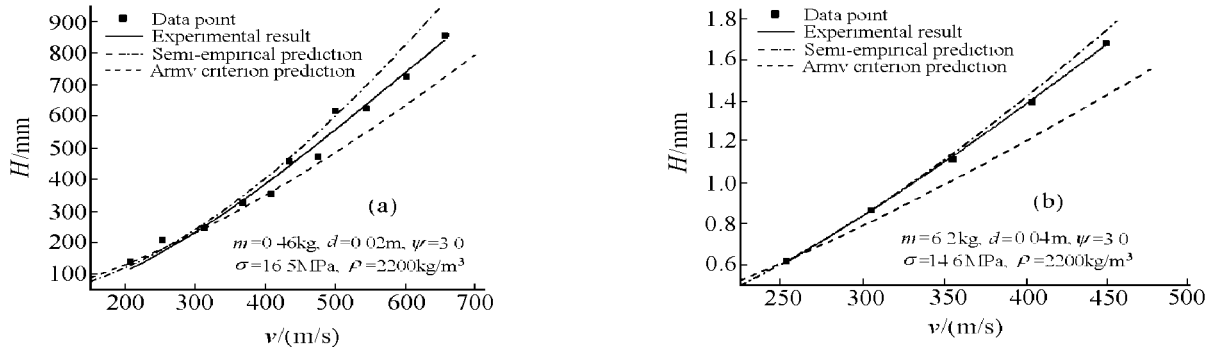


图3 实测侵深与预估侵深

Fig.3 Penetrating depth-measurement and empirical prediction

### 3.3 与球形膨胀近似理论预估结果的比较

球形空腔膨胀理论假设,侵彻弹丸的通道是由始发于运动弹体尖端的一系列球形空腔膨胀造成的。球形空腔膨胀理论是一种在假定条件下的近似分析方法,其理论要点是根据一维球形或柱形空腔膨胀过程中弹性波传播与介质压缩的解析结果,获得阻力与空腔膨胀速度的关系,将这一关系应用于弹体的侵入过程以求得侵彻深度等。在不考虑弹壁摩擦的情况下,球形空腔膨胀理论导出侵彻深度表达式为

$$H = \frac{m}{2\pi a^2 CN_2 \rho} \left\{ \ln \left[ 1 + \frac{BN_1}{A} \left( \frac{\rho}{\sigma} \right)^{1/2} v_1 + \frac{CN_2 \rho v_1^2}{A\sigma} \right] + \frac{2BN_1}{D} \left[ \arctan \left( \frac{BN_1}{D} \right) - \arctan \left[ \frac{2CN_2 (\rho/\sigma)^{1/2} v_1 + BN_1}{D} \right] \right] \right\} + 4a \quad H > 4a \quad (6)$$

式中

$$D = [4ACN_2 - (BN_1)^2]^{1/2} \quad (7)$$

$$N_1(\psi) = \frac{(4\psi - 1)^{3/2}}{3\psi} + \frac{(2\psi - 1)^2(4\psi - 1)^{1/2}}{2\psi} - \psi(2\psi - 1)(\pi - 2\theta_0) \quad (8)$$

$$N_2(\psi) = \frac{8\psi - 1}{24\psi^2} \quad (9)$$

$$\theta_0 = \arcsin \left( \frac{2\psi - 1}{2\psi} \right) \quad (10)$$

$v_1$  由下式给出

$$\left[ \frac{m}{4\pi a^3 \sigma} + \frac{CN_2}{(\sigma/\rho)} \right] v_1^2 + \frac{BN_1 v_1}{(\sigma/\rho)^{1/2}} + \left[ A - \frac{mw^2}{4\pi a^3 \sigma} \right] = 0 \quad (11)$$

式中: $v$  是弹着靶速度; $A$ 、 $B$ 、 $C$  值(表2)采用的是 Forrestal 拟合的靶材系数<sup>[3]</sup>;靶强度  $\sigma$  和密度  $\rho$  是实验中的实际数据。

图4是两种弹型的计算结果和实验结果。从图中可以看出,认为靶是可以压缩的计算结果比实测结果偏大,但变化趋势与实测曲线的一致性更好一些。认为靶是不可压缩的计算值比实测值偏小,尤其在侵彻速度较高时误差更大。所以在用球形空腔膨胀方法计算时认为靶是可以压缩的比较合适。

表2  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的值

Table 2  $A$ ,  $B$ ,  $C$  parameters

模 型	A	B	C
不可压缩 弹塑性	5.18	0	3.88
可压缩 弹塑性	4.50	0.75	1.29

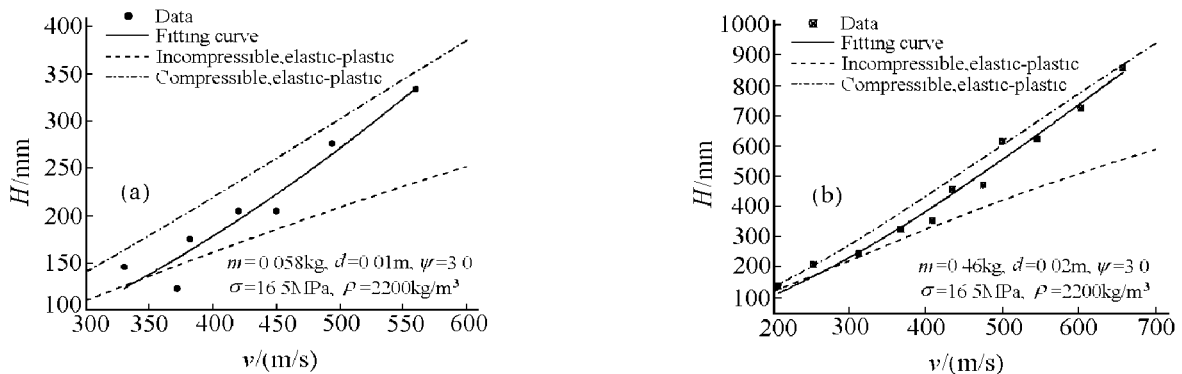


图 4 实测侵深与球形空腔模型预估侵深

Fig.4 Penetrating depth-measurement and prediction

实验中还发现了两个与空腔膨胀理论有关的实验现象。柱形空腔膨胀理论假设在侵彻过程中靶体材料没有与侵彻方向平行的运动，而实验中发现侵彻过程中存在着较大的沿侵彻方向的靶体材料的运动。图 5 是实验后分离两块密实对接的第二块靶侵彻部位的局部放大照片。从照片上可以看出，在侵彻部位，靶材有清晰的塑性变形凹陷，说明靶体材料在侵彻过程中存在明显的纵向牵连运动，这与假设是不一致的。

另一个实验现象则证实了柱形空腔膨胀方法推断的只有在弹头鼻部前二分之一处受压应力作用。从实验后回收的弹头能够看出(图 6)，弹头的前半部分擦蚀程度比后半部分严重得多，从而能够间接推断弹头前半部分比后半部分所受压应力大。

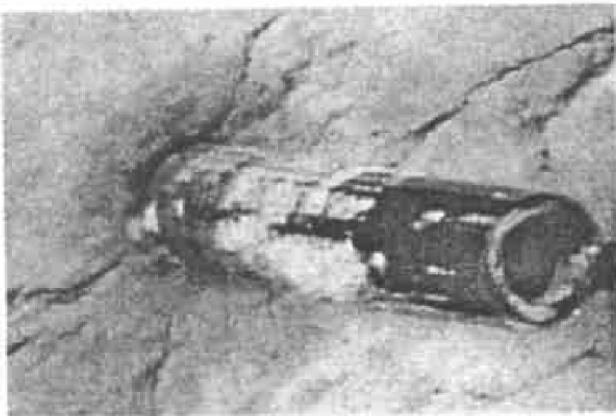


图 5 靶纵向运动留下的塑性变形凹陷痕迹

Fig.5 remain plastic deformation of the concrete target

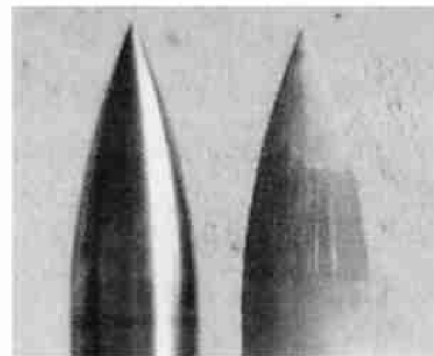


图 6 弹头部前二分之一处侵蚀最严重

Fig.6 Eroded more seriously at the one half of the head

参考文献：

[1] Forrestal M J, Altman B S. An Empirical Equation for Penetration Depth of Ogive-Nose Projectile into Concrete Targets [R]. SAND-92-1948C, 1993.

[2] Forrestal M J, Frew D J, Hanchak S J, et al. Penetration of Grout and Concrete Targets with Ogive-Nose Steel Projectiles [J]. Int J Impact Engineering, 1996, 18(5): 465—476.

[3] Forrestal M J, Tzou D Y. A Spherical Cavity-Expansion Penetration Model for Concrete Targets [J]. Int J Solids Structures, 1997, 34: 4127—4146.

## The Penetration of Steel Bar Projectiles into Concrete Targets

XU Jian-bo<sup>1,2</sup>, LIN Jun-de<sup>2</sup>, TANG Run-di<sup>2</sup>, CHU Zhe<sup>2</sup>

(1. *Department of Applied Physics, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;*

2. *Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shannxi, China* )

**Abstract:** The Penetration depth experiments into concrete targets had been studied experimentally with gas gun launched 40CrNiMo steel projectiles of speed 0.20.6km/s, diameter 1040mm, aspect ratio 1015. Experiment results indicate that the empirical predicted depth is greater slightly than the measured one. The assumption of the concrete targets being compressible is better than that being incompressible when the spherical cavity-expansion model is used to predict penetration depth.

**Key words:** projectile; concrete targets; penetration experiment