

文章编号: 1001-1455(2010)02-0159-05

# 弹体侵彻与贯穿有限厚度混凝土靶体的力学特性\*

葛涛<sup>1,3</sup>, 刘保荣<sup>2</sup>, 王明洋<sup>3</sup>

(1. 94600部队, 河南 郑州 450000;

2. 空军后勤部机场营房部, 北京 100720;

3. 解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 为了便于研究弹体贯穿混凝土靶体的力学本质, 首先假设钻地弹是刚性弹体。在水动力侵彻模型的基础上, 认为在弹体的冲击下, 靶体裂缝扩展到靶体背面时就开始不稳定增长。将此刻作为贯穿的发生时刻, 据此利用裂缝增长的耗能机制求得了发生贯穿时, 裂缝距靶体背面的临界距离。在求解贯穿发生后的侵彻阻力时考虑了由于靶体背面贯穿块的运动而造成的弹体相对速度的降低。计算表明, 弹体端部侵入靶体与贯穿发生后2阶段弹体的减加速度变化剧烈, 而弹体端部完全进入靶体后至发生贯穿阶段, 弹体的减加速度变化相对较小。将计算结果与前人实验做了对比, 验证了结果的可信性。

关键词: 爆炸力学; 侵彻与贯穿; 水动力学模型; 混凝土; 裂缝; 减加速度

中图分类号: O347.1; T J012.4

国标学科代码: 130·3520

文献标志码: A

## 1 引言

已有的关于混凝土中侵彻的研究成果集中于对侵彻半无限靶的研究, 且多为经验公式<sup>[1-3]</sup>, 而弹体贯穿靶体的研究却很少, 大多局限于弹体穿孔金属板的报道<sup>[3]</sup>。混凝土材料在贯穿时表现出来的力学特性比金属复杂得多, 研究也更困难。即使是何时被视为贯穿过程的开始, 即如何确定贯穿时刻, 迄今也没有确切的定论<sup>[4]</sup>。

本文中在侵彻水动力模型<sup>[5]</sup>的基础上, 参照空腔膨胀理论, 试图从混凝土裂缝的不稳定增长的角度来研究如何确定贯穿的发生时刻: 在裂缝超越出薄板背面以前, 弹头的抵抗力按照文献[5]来确定, 从裂缝超越出背面的那一瞬间, 裂缝开始不稳定增长, 弹头抵抗力的计算要考虑由于靶板背面发生崩落(虽然还与靶体相连)而造成的弹头相对速度的降低, 并求解贯穿过程中弹体的减加速度。

## 2 贯穿发生时刻的确定

对于弹头侵彻前方, 文献[5]中将靶体分为理想流体区域(粉碎区  $r \leq R$ )、径向裂缝弹性区( $R < r \leq R_c$ )和原始弹性区。在弹头运动前方, 裂缝朝着靶体背面的方向扩展, 裂缝区域将要扩大, 在某一个时刻就会变成不稳定的区域, 裂缝向球的外表面上扩展的动力过程就开始了。这个时刻被看作靶体背面对贯穿过程影响的开始时刻。基于以上分析, 设混凝土靶体的厚度为  $H$ , 现在来研究弹头侵彻到距靶板背面为  $R_b$  时的情形, 如图1所示。

在理想流体区与裂缝区的交界  $r = R$  处有边界条件

$$\sigma_r = -p, \quad \alpha_0 = \alpha_\varphi = 0 \quad (1)$$

式中:  $r, \theta, \varphi$  为球形坐标,  $\sigma_r$  为径向应力,  $\alpha_0$  和  $\alpha_\varphi$  为环向应力,  $p$  为边界压应力。

裂缝弹性区( $R < r \leq R_c$ )是楔形杆状的, 也就是由侧表面上没有应力、彼此间互相不发生作用的楔形杆组成, 根据弹性动力学方程

\* 收稿日期: 2008-12-01; 修回日期: 2009-03-24

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目

作者简介: 葛涛(1978—), 男, 博士。

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{2(\sigma_r - \sigma_\theta)}{r} = 0 \quad (2)$$

再利用边界条件式(1)可得

$$\sigma_r = -\frac{pr_0^2}{r^2} \quad (3)$$

在  $R < r \leq R_c$  的径向裂缝区域中, 径向位移和应力由弹性力学公式

$$\sigma_r = E \frac{du}{dr}$$

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}$$

确定

$$u(r) = u(R_c) + \frac{p}{E} R^2 \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{R_c} \right) \quad (4)$$

式中:  $u(r)$  为径向位移,  $E$  为弹性模量,  $\lambda$  与  $\mu$  为拉梅常数,  $u(R_c)$  为  $r = R_c$  处的径向位移。

原始弹性区域为  $R_c < r \leq R_h$ , 在它的边界  $r = R_c$  上作用的法向应力

$$\sigma_r(R_c) = -pR^2/R_c^2 \quad (5)$$

在  $r = R_h$  处显然有边界条件

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_{r\theta} = 0 \quad (6)$$

在  $R_c < r \leq R_h$  的区域中, 根据弹性力学方程式和条件(5)、(6), 同样可以得出

$$u(r) = \frac{pR^2}{(1/R_c^3 - 1/R_h^3)R_c^2} \left[ \frac{1}{4\mu r^2} + \frac{r}{(3\lambda + 2\mu)R_h^3} \right] \quad (7)$$

从式(7)中求出  $u(R_c)$ , 代入式(4)中可以求出  $R_c < r \leq R_h$  径向裂缝区中位移的表达式, 进而可以求出  $r = R$  处的位移

$$u(R) = \frac{pR^2}{(3\lambda + 2\mu)b} \left[ \frac{1}{1-d} \left( \frac{3\lambda + 2\mu}{4\mu} + d \right) + \frac{\lambda + \mu}{\mu} (b-1) \right]$$

$$d = (R/R_h)^3, \quad b = R_h/R \quad (8)$$

裂缝区的边界  $r = R_c$  处要根据裂缝增长的能量准则来确定<sup>[6]</sup>。  $R_c$  增加时所释放的能量与裂缝增长所需要的能量相等, 后者就是  $R_c$  变化时表面增大所需要的有效表面能  $\gamma$ , 释放出来的能量等于外力所做的功的一半, 所以若  $R_c$  增加, 则有

$$\frac{1}{2} \times 4\pi R^2 p \frac{\partial u(R)}{\partial R_c} = 2R_c \gamma \quad (9)$$

式中:  $l$  为裂缝与界面  $r = R_c$  交线的总长度,  $\gamma = \pi K_c^2(1-\nu)(1+\nu)/(2E)$ ,  $K_c$  为混凝土的断裂韧度,  $\nu$  为泊松比。将式(8)代入式(9)中得到

$$\frac{2\pi p^2(\lambda + 2\mu)R}{l \mu(3\lambda + 2\mu)b^3} \left( \frac{d + 0.5}{1-d} \right)^2 = 2\gamma \quad (10)$$

当  $p = \sigma$  时(  $\sigma$  为抗压强度, 已知), 根据稳定性定义, 式(10)的左边部分对  $R_c$  求导为 0 时, 裂缝就出现不稳定性增长, 也即裂缝已达到靶体背面, 由此求出

$$d = (\sqrt{33} - 5)/4 \approx 0.186, \quad R/R_h = d^{1/3} \approx 0.571 \quad (11)$$

根据式(8)第 2 式可知比值

$$R_h/r_0 = bd^{-1/3} \quad (12)$$

根据式(10)与式(12)可得临界状态时弹头到靶体背面的距离

$$\frac{R_h}{r_0} = \frac{R_h^*}{r_0} = e \left( \frac{p^2 r_0}{\gamma E} \right)^{1/3}, \quad e = \left[ \frac{2\pi(1-\nu)}{nd} \left( \frac{d+0.5}{1-d} \right)^2 \right]^{1/3} \approx 0.95 \quad (13)$$

式中:  $R_h^*$  为临界状态时弹头到靶体背面的距离。在求解  $e$  时, 取  $l = 6\pi$ , 相当于裂缝沿着通过球心的 3

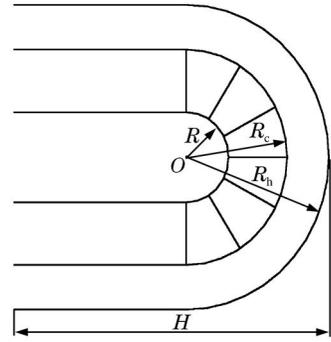


图 1 侵彻示意图

Fig. 1 Schematic diagram of penetration

个平面上扩展<sup>[7]</sup>, 泊松比  $\nu = 1/3$ 。

从上述公式中可以看出比例尺效应: 当弹体向前运动时, 临界距离  $R_h^*$  与  $r_0$  比值的临界值与  $r_0^{1/3}$  成正比例增长。可以利用公式(13)来计算临界距离  $R_h^*$ , 弹体侵彻到这个距离时, 裂缝超越出背面, 并且开始对弹头运动前方的阻抗力产生削弱影响, 也即进入了贯穿阶段, 称该时刻为贯穿的发生时刻。

### 3 贯穿过程分析

根据文献[5]中的论述, 转换为平面问题考虑时, 直到  $R_h > R_h^*$  以前, 弹体的运动都根据文献[5]计算。根据文献[5]中的式(14) 求出与圆柱形管  $R$  等效的槽宽  $L$  (弹体在其中运动) 为

$$L = r_0 \left\{ \frac{q^\phi}{\pi} \sin(\pi\phi) \int_0^1 \left[ \frac{1}{\xi+q} + \frac{1}{\xi+1/q} - \frac{2}{\xi+1} \right] \frac{d\xi}{\xi^\phi} \right\}^{-1} = r_0 \left[ \frac{(\sqrt{1+\eta^2} - \eta)^2}{Q_0} \right]^{-1} \quad (14)$$

式(14)各量参见文献[5]。在计算弹体端部进入混凝土靶体的阶段时, 所有公式中的半径  $r_0$  显然都应由与靶体表面重合的弹体端部截面的半径来代替, 该半径由侵彻深度决定。

假定  $t = t^*$  为贯穿发生时刻, 这时弹头距离靶体背面距离为  $R_h^*$  时, 裂缝超越出背面, 贯穿的崩落过程就开始了, 临界比值  $R_h^*/R$  按式(12)计算。严格地讲, 应当考虑裂缝超越背部的延迟作用, 也就是考虑裂缝扩展速度的有限性, 这里由于冲击时裂缝扩展速度很大, 就忽略了这一点。

当贯穿发生时, 要考虑贯穿块的滑动对侵彻阻抗力的消减作用, 可采用下式表述此时的阻抗力<sup>[7]</sup>

$$Q_1 = Q(1 - v_1/v)^2 \quad (15)$$

式中:  $Q_1$  为作用在弹头上的阻抗力, 也即作用在贯穿块上的推动力;  $Q$  为贯穿发生前的阻抗力, 可根据文献[7]确定;  $v_1$  为弹体前方贯穿块的滑动速度。

贯穿块的运动微分方程为

$$\frac{dv_1}{dt} = \frac{Q_1}{2LR_h^* \rho} \quad (16)$$

式中:  $t$  为侵彻时间,  $\rho$  为混凝土密度,  $2LR_h^* \rho$  为贯穿块质量。

弹体的运动微分方程为

$$\frac{d^2h}{dt^2} = - \frac{Q_1}{m}, \quad v = \frac{dh}{dt} \quad (17)$$

式中:  $h$  为侵彻深度,  $m$  为弹体质量,  $v$  为侵彻速度。

贯穿的初始条件为

$$v_1(t = t^*) = 0, \quad v(t = t^*) = v^* \quad (18)$$

式中:  $v$  为贯穿块形成时刻弹体的速度。

联合式(15)、(16)与式(17)结合初始条件(18)及可以求出贯穿过程的阻抗力  $Q_1$ 。将贯穿块速度与弹体速度相同视为贯穿过程的结束时刻。根据未贯穿时的阻抗力  $Q$  与贯穿过程中阻抗力  $Q_1$ , 可以求出弹体侵彻与贯穿混凝土靶体全过程中的减加速度  $-Q/m$  与  $-Q_1/m$ 。

### 4 弹体减加速度实例计算

由于弹体侵彻混凝土靶体的力学环境恶劣, 减加速度能达到数万个重力加速度, 测量起来很困难。

利用文献[8]中实验所用的弹体与混凝土材料, 断裂韧度  $K_c$ 。利用文献[6]中提供的数据。利用本文的侵彻与贯穿全过程的减加速度计算方法进行了计算, 并与文献[8]中的实验数据及该文中的模型做了对比。

实例 1 弹体质量  $m = 13$  kg, 弹径为 0.076 m, 长径比为 1.5, 侵彻初速度  $v_0 = 139$  m/s。混凝土靶体抗压强度  $\sigma = 23$  MPa, 断裂韧度  $K_c = 0.73$  MN/m<sup>3/2</sup>, 密度  $\rho = 2450$  kg/m<sup>3</sup>, 靶体厚  $H = 0.3$  m。计算结果如图 2(a) 所示。横坐标  $t$  为侵彻作用时间, 纵坐标  $a$  为减加速度值,  $g$  为重力加速度, 下同。

实例 2 选用与实例 1 相同的弹体, 侵彻初速度  $v_0 = 314$  m/s。混凝土靶体抗压强度  $\sigma = 39$  MPa,

断裂韧性  $K_{Ic} = 0.81 \text{ MN/m}^{3/2}$ , 密度  $\rho = 2450 \text{ kg/m}^3$ , 靶体厚  $H = 0.5 \text{ m}$ 。计算结果如图 2(b) 所示。

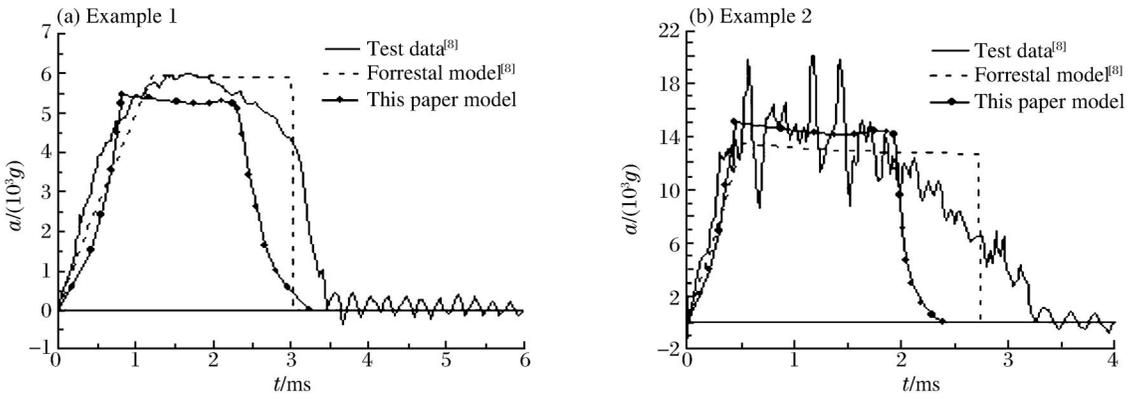


图 2 贯穿不同靶体的减加速度曲线

Fig. 2 Deceleration time curves for projectiles perforating concrete targets with different thickness

从图 2(a) 可以看出计算结果与实验结果相比偏小, 且没有 Forrestal 给出的模型更贴近实验数据, 这是由于当弹体的侵彻速度与靶体材料的弹性波速比大于 0.1 时, 近区破碎材料做为理想流体考虑最为合适<sup>[9]</sup>, 图 2(a) 弹体速度偏小, 使得减加速度值也偏小。从图 2(b) 中可以看出, 在弹体端部侵入靶体时减加速度上升迅速, 因为在弹体端部进入靶体时由受力面积增长而使阻力增长的影响因素大于速度减小产生的消减因素。弹体端部完全侵入靶体后及至发生贯穿这一段过程, 因弹体在类似于流体的“管道”中运动, 所承受的减加速度变化很小, 即遇到的阻力或者说侵彻所消耗的能量流变化很小, 形成一个平台效应, 而发生贯穿后减加速度下降很快。这是这种规律与在实验中所测得的曲线及拟合公式的计算结果也是相符的<sup>[10]</sup>。

## 5 结论

(1) 在水动力侵彻模型的基础上, 从理论上确定了贯穿发生的时刻, 并据此求出了贯穿发生的临界厚度。求解发生贯穿后的减加速度时, 考虑了靶体背面崩落对贯穿阻力的影响。

(2) 弹体端部侵入靶体时减加速度上升迅速, 弹体端部完全侵入靶体后及至发生贯穿这一段过程弹体的减加速度变化很小, 贯穿发生后减加速度又急剧下降。侵彻与贯穿全过程的减加速度计算结果与前人研究较吻合。

## 参考文献:

- [1] Longscope D B, Forrestal M J. Penetration into targets described by a Mohr Coulomb failure criterion with tension cutoff[J]. Journal of Applied Mechanics, 1983, 50(2): 327-333.
- [2] 文鹤鸣. 混凝土靶板冲击响应的经验公式[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(3): 267-274.  
WEN H e ming. Empirical equations for the impact response of concrete targets[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(3): 267-274.
- [3] Ambur D R, Jaunky N, Lawson R E, et al. Numerical simulations for high energy impact of thin plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25: 683-702.
- [4] 戎小力. 钻地弹在岩石中的侵彻与贯穿理论研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2005.
- [5] 葛涛. 弹体冲击混凝土半无限靶的侵彻阻力与深度计算[J]. 振动与冲击, 2008, 27(1): 107-110.  
G E T ao. Hydrodynamic model for concrete targets under impact of a projectile[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(1): 107-110.
- [6] 李军. 炮、航弹在混凝土类介质中的侵彻机理研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2004.
- [7] 王明洋, 郑大亮, 钱七虎. 弹体对混凝土介质侵彻与贯穿的比例换算关系问题[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(2): 108-

114.

WANG Ming yang, ZHENG Da liang, QIAN Qi hu. The scaling law problems of penetration and perforation for projectile into concrete media[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004, 24(2): 108-114.

- [ 8 ] Forrestal M J, Frew D J, Hickerson J P, et al. Penetration of concrete targets with deceleration time measurements [ J ] . *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28( 5 ) : 479-497.
- [ 9 ] 王明洋, 邓宏见, 钱七虎. 岩石中侵彻与爆炸近区问题研究[ J ] . *岩石力学与工程学报*, 2005, 24( 16 ) : 2859-2863.  
WANG Ming yang, DENG Hong jian, QIAN Qi hu. Study on the problems near the cavity of explosion and penetration in rock[ J ] . *Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24( 16 ) : 2859-2863.
- [ 10 ] 何翔, 刘瑞朝, 金栋梁, 等. 弹体侵彻混凝土过载特性研究[ C ] // 第五届全国结构安全防护学术会议. 南京: 解放军理工大学出版社, 2005: 238-246.

## Penetration and perforation of concrete targets with finite thickness by projectiles<sup>\*</sup>

GE Tao<sup>1,3</sup>, LIU Baorong<sup>2</sup>, WANG Mingyang<sup>3</sup>

(1. *Troop 94600, Zhengzhou 450000, Henan, China;*

2. *Airport and Barracks Department, Air Force Logistics Department,  
Beijing 100720, China;*

3. *Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology,  
Nanjing 210007, Jiangsu, China)*

**Abstract:** Projectiles were regarded as rigid ones to simplify the mechanics principle of the perforation for concrete targets. According to the hydrodynamics model, the cracks were considered to increase astatically when they expanded to the back of the target under the impact of a projectile. This time was defined as the moment that the perforating action began. The critical distance to the back of the target was deduced by the energy dissipation mechanism for crack extension. After the cracks arrived at the backs of the targets, the penetration resistance was calculated by considering the relative velocity between the projectile and the plug. The calculated result indicates that the deceleration changes remarkably when the warhead is intruding the target and after the perforating action begins, whereas the deceleration changes weakly between the above two stages. Comparison between the calculated results and the existent experimental results shows the calculated results are credible.

**Key words:** mechanics of explosion; penetration and perforation; hydrodynamics model; concrete; crack; deceleration

\* Received 1 December 2008; Revised 24 March 2009

Corresponding author: GE Tao, getaoge@163.com

(责任编辑 张凌云)