

文章编号: 1001-4888(2009)04-0283-08

刚性弹丸侵彻钢筋混凝土的实验和简化分析模型

黄民荣, 顾晓辉*, 高永宏

(南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 通过 $\Phi 57\text{mm}$ 半穿甲弹对钢筋混凝土的垂直侵彻实验, 得到了弹丸的撞靶速度、成坑深度、最大侵彻深度以及过载时程曲线等实验数据。对实验后钢筋的断裂特征进行分析, 得到钢筋的典型破坏模式。将钢筋的破坏简化为弯曲+剪切断裂和弯曲+拉伸断裂这两种模式。根据混凝土侵彻模型和梁断裂失效理论, 建立了刚性弹丸垂直侵彻钢筋混凝土的简化分析模型。将理论计算得到的侵彻深度、速度与过载时间历程分别与实验数据进行对比, 结果表明两者吻合较好。研究表明, 钢筋只对弹体侵彻过程产生局部影响, 混凝土的抗侵彻阻力仍是钢筋混凝土抗侵彻阻力的主要组成部分。

关键词: 爆炸力学; 刚性弹丸; 侵彻; 钢筋混凝土; 梁

中图分类号: O385 **文献标识码:** A

0 引言

刚性弹丸对混凝土的侵彻与贯穿, 国内外学者已做了大量的工作, 得到了众多的经验公式和理论模型^[1-3]。随着研究的深入, 以钢筋混凝土为目标的正、斜侵彻日益成为研究的热点问题。Dancygier^[4]通过高强度钢筋混凝土的侵彻实验, 分析了卵石类型和尺寸、钢筋直径和排布以及混凝土基体强度对侵彻结果的影响。周宁^[5-6]通过 $\Phi 100\text{mm}$ 弹垂直侵彻钢筋混凝土的实验研究, 获得了过载时程曲线以及最大侵彻深度等实验数据, 并进行了相应的分析。顾晓辉^[7]进行了 $\Phi 57\text{mm}$ 弹低速垂直侵彻钢筋混凝土的实验研究, 得到了最大侵彻深度和靶板破坏结果等实验数据。

弹丸对钢筋混凝土的侵彻问题, 最难的是如何分析混凝土基体和钢筋的协同关系以及它们与弹体之间的相互作用。LUK^[8]假设钢筋混凝土为各向同性均匀材料, 忽略钢筋的局部作用, 建立了弹丸对钢筋混凝土的侵彻模型, 但计算结果与实验相差较大。欧阳春^[9]、周宁^[10]在球形空腔膨胀模型的基础上, 计入了钢筋弯曲失效产生的直接阻力, 建立了弹丸垂直侵彻钢筋混凝土的工程分析模型。周宁^[11]将钢筋结构所在的混凝土简化为高强度混凝土层, 建立了弹丸侵彻钢筋混凝土的分层工程分析模型。

文献[9, 10]仅将钢筋的破坏失效简化为简支理想弹塑性梁受集中力作用的弯曲变形问题, 只适用于延性很好的钢筋材料。文献[12]认为当钢筋弯曲变形过大时, 中间发生断裂失效。尽管引入了钢筋的极限延伸率作为失效判据, 但在计算钢筋的直接阻力时, 并未考虑轴力对钢筋断裂过程的影响。实际上实验中钢筋结构的破坏模式非常复杂, 钢筋在弹击后还可能产生另外两种破坏模式(见图 2): 弯曲+剪切断裂和弯曲+拉伸断裂。需指出的是文中所指的钢筋断裂往往发生在配筋的绑扎处, 这与文献[12]是不同的。

* 收稿日期: 2009-03-02; 修订日期: 2009-06-10

基金项目: 国防“973”项目

通讯作者: 顾晓辉(1964-), 男, 博士生导师, 主要研究方向: 弹药系统工程, 灵巧与智能弹药。E-mail: gxiaohui@mail.njust.edu.cn

本文首先进行了 $\Phi 57\text{mm}$ 半穿甲弹垂直侵彻钢筋混凝土的实验研究,得到了弹丸的成坑深度、最大侵彻深度和过载时程曲线等实验数据。同时在文献[9—19]的基础上,将实验后钢筋的前一破坏模式简化为固支梁在阻尼介质中受局部冲击载荷的弯曲+剪切断裂的结构响应问题;将后一破坏模式简化为固支梁在阻尼介质中受局部冲击载荷的弯曲+端部拉伸断裂的结构响应问题。同时结合混凝土介质的球形空腔膨胀理论,建立了刚性弹丸垂直侵彻钢筋混凝土的简化分析模型。与实验数据进行对比,结果表明本文模型与实验吻合较好。

1 实验研究

1.1 实验方案

实验采用的弹丸为 $\Phi 57\text{mm}$ 的半穿甲弹,曲径比 4.0,弹长 456.4mm,弹重约为 4.43kg,弹尾为张开式尾翼,材料为 30CrMnSi。其中一发弹体内装有某单位研制的过载测试记录仪,对弹体的侵彻过载历程进行测试。混凝土靶板的抗压强度为 35MPa,密度为 $2600\text{kg}/\text{m}^3$ 。钢筋的密度为 $7850\text{kg}/\text{m}^3$,屈服应力为 500MPa。浇注时严格按照 GJB20419.2—98 整体式钢筋混凝土工事顶盖的设计规范,按照 1:5 的缩尺制作,卵石亦采用 1:5 的缩比进行选用,靶板整体尺寸 $1600\text{mm}\times 1600\text{mm}\times 600\text{mm}$ 。钢筋混凝土靶板四周用 5mm 厚的钢板箍紧。

如图 1 所示,钢筋混凝土靶内部分布 5 层钢筋,第一层钢筋距迎弹面 50mm,钢筋为直径 5mm 的螺纹钢,网眼尺寸为 $20\text{mm}\times 20\text{mm}$;第二、三层钢筋距迎弹面分别为 150mm、300mm,钢筋为直径 4mm 的螺纹钢,网眼尺寸为 $50\text{mm}\times 50\text{mm}$;第四层钢筋距迎弹面 450mm,钢筋为直径 6mm 的螺纹钢,网眼尺寸为 $50\text{mm}\times 50\text{mm}$;第五层为网眼尺寸 $10\text{mm}\times 10\text{mm}$ 的钢丝网,细钢筋直径为 2mm。配筋网眼尺寸最大为 50mm,可保证弹体在侵彻过程中能与每层配筋相碰撞。

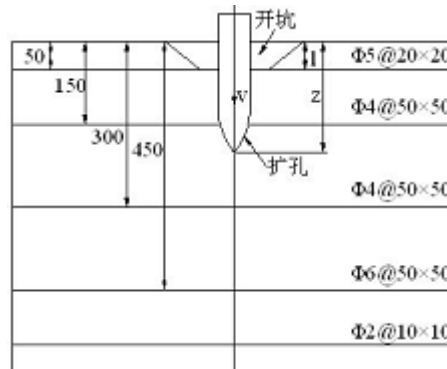


图 1 弹丸侵彻钢筋混凝土靶板瞬态示意图(mm)

Fig.1 Reinforced concrete target subjected to projectile impact

实验采用 $\Phi 57$ 滑膛炮,弹速控制在 $300\text{m}/\text{s}\sim 400\text{m}/\text{s}$ 。实验中,在弹丸弹道方向上垂直布置 4 层网靶和 HG202 多路数字测时仪,将测到的速度取平均作为弹丸的撞靶速度。用纸靶测量弹丸的撞靶姿态。实验后对靶板的破坏情况进行拍摄和分析,测量成坑深度、最大侵彻深度、成坑口径以及剥落直径等参数,从回收的弹体中取出过载记录仪,并对测试数据进行回放和处理。

1.2 实验结果

实验后的弹丸除弹尾断裂或脱落外,主体部分无明显的塑性变形。弹体头部受混凝土的摩擦,出现略微的钝粗、磨损,但卵形形状基本保持不变。除了速度较高的两次实验后靶板背面有微小的裂纹,其它几次实验后的靶板背面均无裂纹。从纸靶中的穿靶痕迹可知弹丸垂直于迎弹面撞靶,满足垂直侵彻的要求。图 2 为实验后钢筋典型破坏模式的照片,其它实验结果见第 4 节。

2 刚性弹丸侵彻素混凝土的理论模型

假设混凝土为各向均匀材料,考虑到混凝土中存在着众多的细微裂纹,这些裂纹会严重影响材料抵抗破坏的能力,因此认为混凝土的屈服满足 Griffith 强度理论。计算得到的球形空腔膨胀模型^[13]为:

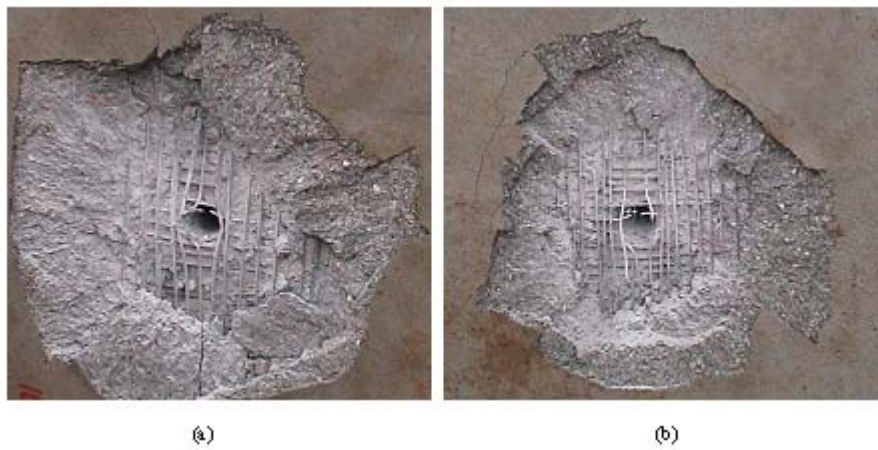


图 2 钢筋典型破坏模式的照片

Fig. 2 Photo of specific failure model of steel bars

$$\sigma_n = R + B\rho v_n^2 \tag{1}$$

式中： σ_n 为空腔壁膨胀压力； B 为拟合系数，值为 1.65； ρ 为混凝土材料密度； v_n 为空腔壁法向膨胀速度； R 为混凝土材料的静态抗侵彻阻力，可由式(2)，(3)联合计算得到：

$$-\frac{1}{4f_c} \sqrt{8f_c R + f_c^2} - \frac{1}{4} \ln(\sqrt{8f_c R + f_c^2} - f_c) = \ln[\eta \exp(-\frac{3}{4} - \frac{1}{4} \ln 2 f_c)] \tag{2}$$

$$\eta = \left[\frac{1 - (1 - \nu) \sqrt{\sigma_f / (2f_c)}}{E/3f_c} \right]^{1/3} \tag{3}$$

其中， f_c 为混凝土的抗压强度； ν 为混凝土材料的泊松比； σ_f 为混凝土材料的抗拉强度，根据 Griffith 强度理论，取抗压强度的 1/8； E 为混凝土材料的弹性模量。

如图 1 所示，假设弹丸是刚性的，弹头表面与混凝土介质紧密接触，根据卵形弹头部的特点，则作用在弹体的轴向阻力为^[9]：

$$F_z = 2\pi S^2 \int_{\phi_1}^{\phi_2} \sigma_n \left[\sin\phi - \left(\frac{S-a}{S} \right) \right] \cos\phi d\phi \tag{4}$$

式中： S 为弹头部的曲率半径； $\phi_2 = \begin{cases} \cos^{-1}(\frac{l-Z}{S}) & Z < l \\ \pi/2 & Z \geq l \end{cases}$ ； l 为开坑深度，根据实验后靶板的破坏模式

(图 1，图 2)，取第一层钢筋的埋设深度； Z 为弹丸的即时侵彻深度(图 1)； $\phi_1 = \arcsin(\frac{S-a}{S})$ ； a 为弹体半径。

3 刚性弹丸侵彻钢筋混凝土的理论模型

3.1 钢筋与弹丸的相互作用

钢筋受到弹体的高速撞击、挤压，沿着一定的方向挤入混凝土基体，在该过程中钢筋发生变形破坏，因此钢筋的运动和结构响应是一个非常复杂的问题。实验中弹丸的撞靶位置随机，而且弹体与钢筋相互作用过程非常复杂，钢筋的破坏失效并不只有文献[9]提出的弯曲失效这一种破坏模式。如图 2(a) 所示，头层钢筋向内或两侧弯曲且在中段断裂，断裂处有明显剪切的痕迹；由图 2(b) 可以看出，在弹丸的撞击下，头层钢筋同样向内或两侧弯曲，由于网眼处的后两根钢筋的阻碍作用，前两根钢筋在绑扎处弯曲最为明显，绑扎处钢筋的断裂有拉伸颈缩的痕迹。因此根据上述实验现象，类似文献[14, 15]的描述，假设钢筋在冲击载荷下的失效模式：模式 1—钢筋发生大塑性弯曲变形^[9]；模式 2—钢筋发生弯曲+剪切断裂；模式 3—钢筋发生弯曲+拉伸断裂，并且是在绑扎处发生断裂。

3.2 弹丸与钢筋的相互运动关系

假设钢筋与弹丸头部理想接触，且接触点不分离，则可以弹着点为坐标原点，建立坐标系 oyz ，其中

z 轴垂直于迎弹面。弹丸与钢筋相互作用的任意时刻为 t_i , 此时弹丸的侵彻深度、侵彻速度以及加速度为 $Z_i, \dot{Z}_i, \ddot{Z}_i$, 钢筋截面圆心 $g_i(y_i, z_i)$ 和弹丸弧形头部曲率中心 Q_i 的连线与 z 轴的夹角为 ϕ_i , 其位移、速度和加速度为 w_i, \dot{w}_i 和 \ddot{w}_i , dt 时间后, 引入中间计算变量 $Z'_{i+1}, \ddot{w}'_{i+1}$, 则有^[9]:

$$dZ_{i+1} = \dot{Z}_i + \frac{1}{2}\ddot{Z}_{i+1}dt^2, \quad Z_{i+1} = Z_i + dZ_{i+1}, \quad \dot{Z}_{i+1} = \dot{Z}_i + \ddot{Z}_{i+1}dt, \quad \ddot{Z}'_{i+1} = \ddot{Z}_i \quad (5)$$

$$w_{i+1} = dZ_{i+1} \cos \phi_i, \quad \dot{w}_{i+1} = \dot{Z}_{i+1} \cos \phi_i, \quad \ddot{w}'_{i+1} = \ddot{Z}'_{i+1} \cos \phi_i \quad (6)$$

$$d\phi_{i+1} = \frac{dZ_{i+1}}{S} \sin \phi_i, \quad \phi_{i+1} = \phi_i + d\phi_{i+1} \quad (7)$$

$$y_{i+1} = y_i - w_{i+1} \sin \phi_i, \quad z_{i+1} = z_i + w_{i+1} \cos \phi_i \quad (8)$$

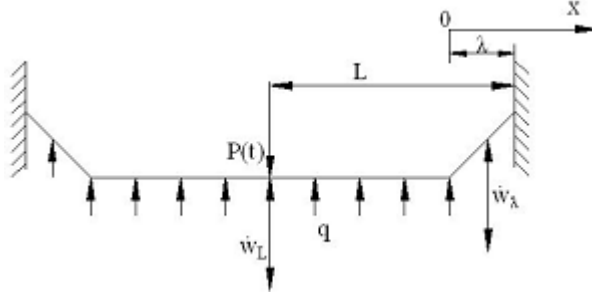


图3 钢筋剪切断裂模型

Fig. 3 Shear and rupture model of steel bar

3.3 钢筋塑性变形及断裂失效分析

在弹丸的撞击、挤压下, 钢筋发生破坏失效。钢筋产生弯曲变形直至失效^[9]即模式1只适用于延性很好的材料。本文仅针对模式2和模式3进行分析。

模式2力学模型的基本假设: 将钢筋与弹丸的相互作用简化为一固支梁在阻尼介质中受冲击载荷作用的动力响应问题。钢筋不仅发生弯曲变形而且发生剪切断裂失效。根据实验结果的分析, 假设钢筋剪切断裂与弯曲塑性变形同时发生。如图3所示, 固支梁在集中力的作用下的结构响应为^[16-18]:

$$\dot{w}_L = \dot{w}, \quad -L + \lambda \leq x \leq 0; \quad \dot{w}_\lambda = \dot{w}(1 - \frac{x}{\lambda}), \quad 0 \leq x \leq \lambda \quad (9)$$

在 $-L + \lambda \leq x \leq 0$ 区间, 钢筋所受阻力为:

$$F_L = (L - \lambda)(m\ddot{w} + q) + Q_0 \quad (10)$$

在 $0 \leq x \leq \lambda$ 区间, 钢筋所受阻力为:

$$F_\lambda = \int_0^\lambda m\ddot{w}_\lambda dx + q\lambda = \frac{1}{2}\lambda m\ddot{w} + \lambda q \quad (11)$$

在 $0 \leq x \leq \lambda$ 区间, 根据角动量守恒得:

$$\int_0^\lambda m\ddot{w}_\lambda x dx = 2M_0 - \frac{1}{2}q\lambda^2 \quad (12)$$

则

$$\lambda = \sqrt{\frac{12M_0}{m\ddot{w} + 3q}} \quad (13)$$

钢筋断裂失效判据^[18]:

$$w_L = \frac{L}{\sqrt{3}} - \frac{2d_s}{3\pi} \quad (14)$$

式中: w_L 为与弹丸头部接触点处的钢筋截面圆心的位移, 见式(6); m 为钢筋线密度; $2L$ 为梁的跨度, 取配筋网眼尺寸; 混凝土塑性流动时单位长度的极限压力 $q = d_s Y_c (2 + \pi)$ ^[9]; Y_c 为抗剪强度, 对于 35MPa 混凝土, $Y_c = 95$ MPa; d_s 为钢筋直径; 钢筋的塑性极限剪力 $Q_0 = \frac{\pi d_s^2 \sigma_s}{4\sqrt{3}}$; 钢筋的塑性极限弯矩 $M_0 = \frac{d_s^3 \sigma_s}{6}$; σ_s 为钢筋屈服应力。

模式3力学模型的基本假设: 将钢筋与弹丸的相互作用简化为一固支梁在阻尼介质中受冲击载荷

作用的动力响应问题。钢筋不仅发生弯曲变形而且发生拉伸断裂失效。根据实验结果的分析,假设钢筋弯曲塑性变形到一定程度时,梁在其固支端拉伸断裂,失去对弹丸的运动阻力。如图4所示,假设固支梁的跨度为配筋网眼尺寸。固支梁在两个支撑点断裂时总的拉伸应变为^[19]:

$$\epsilon_m = 2[(\omega_L/d_s)^2 + L/d_s - 1](d_s/2L) \quad (15)$$

钢筋断裂失效判据为:

$$\epsilon_m = \epsilon_f \quad (16)$$

式中: ω_L 为与弹丸头部接触点处的钢筋截面圆心的位移,见式(6); $2L$ 为梁的跨度,取配筋网眼尺寸; ϵ_f 为一维拉伸断裂应变。

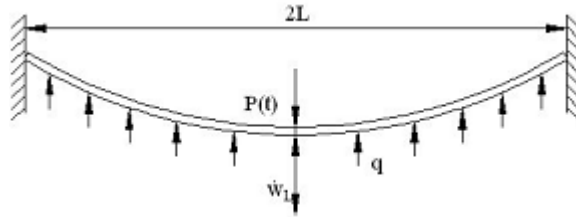


图4 钢筋端部拉伸断裂模型

Fig. 4 End tension and rupture model of steel bar

3.4 钢筋对弹丸的侵彻阻力

若钢筋的结构破坏属于第2种失效模式,根据牛顿第二定律和图3的几何关系可确定 t 时刻,钢筋对弹丸的侵彻阻力为:

$$P(t) = 2qL + 2Q_0 + (2L - \lambda)m\ddot{w}(t) \quad (17)$$

若钢筋的结构破坏属于第3种失效模式,根据牛顿第二定律和图4的几何关系可确定 t 时刻,钢筋对弹丸的侵彻阻力为:

$$P(t) = 2N_0 \sin\theta + 2qL + 2Lm\ddot{w}(t) \quad (18)$$

式中:固支端界面的转角 $\theta = \omega_L/L$ ^[18]; 钢筋的塑性极限轴力 $N_0 = \frac{\pi d_s^2 \sigma_s}{4}$ 。

3.5 弹丸的运动方程

假设弹丸侵彻钢筋混凝土靶的过程中,只有弹体头部与混凝土和钢筋相互作用。任意时刻 t ,弹丸受到混凝土侵彻阻力 $F_z(t)$ 和钢筋的阻力 $P(t)$,弹丸垂直通过网眼中心,并且四根钢筋同时与弹体头部相互作用,产生阻力 $P(t)$,与弹丸的轴向夹角均为 $\phi(t)$,则弹丸的运动方程为^[9]:

$$F_z(t) + 4P(t)\cos\phi(t) = -m_p \ddot{Z}(t) \quad (19)$$

当弹丸未与钢筋相互接触或钢筋已经断裂失效时, $P(t) = 0$ 。

4 实验验证与计算结果分析

采用文献[9,10]的计算步骤:根据实验弹靶条件对弹丸和钢筋截面圆心的几何位置、运动参数进行初始化,选取适当的时间步长 dt ,进行循环计算。若钢筋未与弹丸接触或钢筋断裂失效(由式(14)或(16)判断),仅需式(4),(5)计算弹丸的运动参数。若钢筋未失效且与弹丸头部接触,则由式(5)~(8)分别计算弹丸与钢筋截面圆心的运动参数,用式(17)或(18)计算单根钢筋对弹丸的侵彻阻力,由式(19)计算出新时刻弹丸新的加速度并由(5)式计算弹丸新时刻的侵彻速度与侵彻深度。若弹体侵彻速度减为0,则退出循环,即可得到弹丸的最终侵彻深度。

按照实验弹靶条件和本文建立的简化模型进行计算,可得不同撞靶速度 v 与最大侵彻深度 H 之间的关系,如图5所示。结果表明:两种模式下的理论计算结果几乎没有差别(其它方面的计算结果亦差别很小),且都与实验结果较为吻合。

撞靶速度为350m/s时,弹丸的侵彻过载 a 与时间 t 的关系,见图6。结果表明:两种模式下的理论计算结果与实验较为吻合。弹体头部撞击钢筋的过程中,其所受过载有所增加,比素混凝土计算值增大

约7%。理论计算结果在后期比实测值小,原因可能是应力波在弹体内叠加,造成实测过载的平均值反而有增大的趋势。实际上随着侵彻速度的减小,弹体所受的刚体过载应该是逐步减小的。

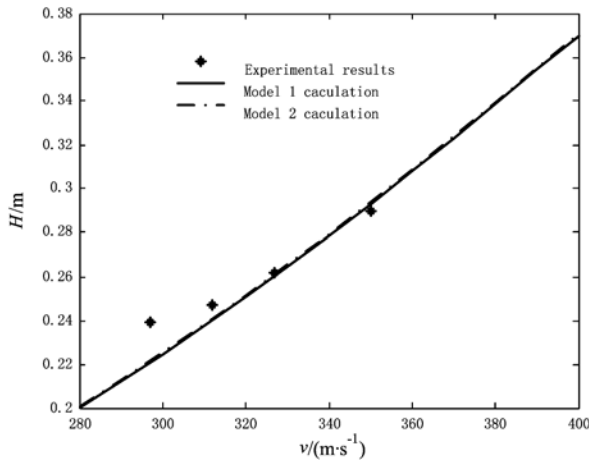


图5 侵彻深度与撞靶速度的关系

Fig. 5 Penetration depth vs striking velocity

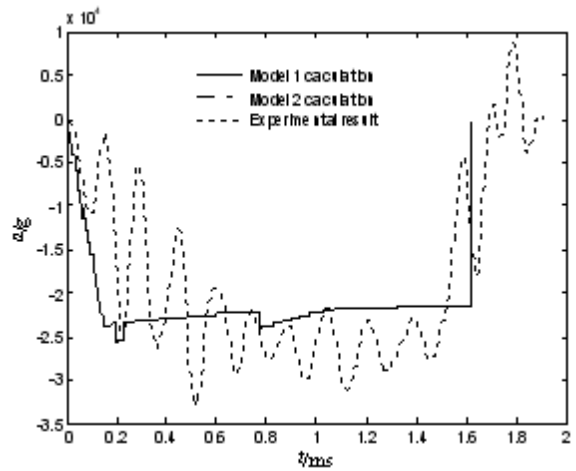


图6 侵彻过载与时间的关系

Fig. 6 Penetration deceleration vs time

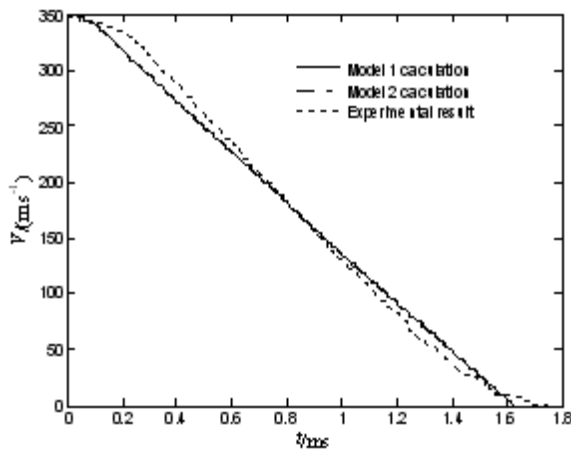


图7 侵彻速度与时间的关系

Fig. 7 Penetration velocity vs time

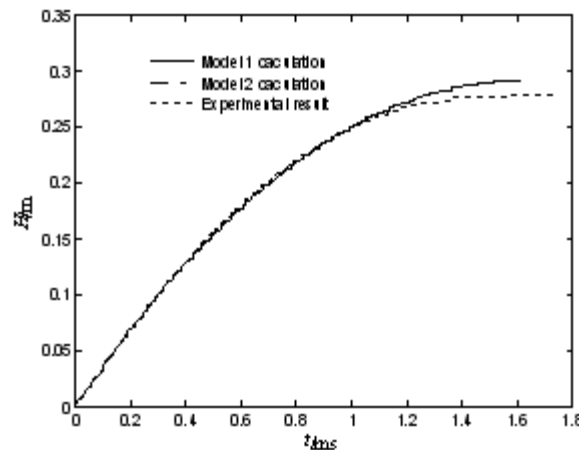


图8 侵彻深度与时间的关系

Fig. 8 Penetration depth vs time

由过载曲线一次积分得到的侵彻速度 v 与时间 t 的关系,如图7所示;二次积分得到的侵彻深度 H 与时间 t 的关系,如图8所示。结果表明:计算结果与实验数据吻合较好,只是在侵彻过程后期,由于过载的理论计算结果小于实测值,因此侵彻速度和侵彻深度比实验结果稍大,最大相对误差约为5%。

进一步分析表明,若以钢筋的后两种结构破坏模式为基础,在弹体头部与钢筋相互作用的过程中,计算得到的弹体过载确实有所增加,但增加幅度不大,混凝土对弹丸的侵彻阻力仍然是总侵彻阻力的主要组成部分。

5 结束语

(1) 以钢筋混凝土为目标,通过 $\Phi 57\text{mm}$ 半穿甲弹的垂直侵彻实验,得到了弹丸撞靶速度在 $300\text{m/s} \sim 400\text{m/s}$ 的成坑深度、最大侵彻深度以及钢筋典型破坏模式等实验数据。同时通过弹载记录仪获得了侵彻过载曲线,为分析弹丸侵彻钢筋混凝土机理即弹丸、钢筋和混凝土三者之间的相互作用提供了实验数据。

(2) 实验中钢筋在弹丸的撞击、挤压下,产生的结构破坏模式很复杂,可归纳为大塑性弯曲断裂;弯曲+剪切断裂和弯曲+拉伸断裂这三种典型的破坏模式。

(3) 在弹丸侵彻素混凝土理论的基础上,根据梁断裂失效理论,对钢筋的弯曲+剪切断裂和弯曲+拉伸断裂这两种破坏模式进行分析,建立了刚性弹丸侵彻钢筋混凝土的简化模型。计算结果与实测数据较为吻合,说明模型能较好地反映弹丸与钢筋混凝土的相互作用过程。进一步分析表明,若弹丸直接从钢筋网眼中穿过,钢筋的直接阻力对侵彻结果的影响不是很大,但当弹丸与钢筋相互碰撞的过程中,弹体内将产生峰值突出且具有一定持续时间的高过载,它将对弹载设备和装药产生严重的影响,攻坚武器设计时须对此予以重视。

参考文献:

- [1] 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 Engng*, 1994, 15: 395~405.
- [2] Forrestal M J, Tzou D Y. A spherical cavity-expansion penetration model for concrete targets[J]. *Int. J Solids Structures*, 1997, 34: 4127-4146.
- [3] Li Q M, Reid S R, Wen H M, et al. Local impact effects of hard missiles on concrete targets[J]. *Int J Impact Engng*, 2005, 32:224-284.
- [4] Dancygier A N, Yankelevsky D Z, Jaegermann C. Response of high performance concrete plates to impact of non-deforming projectiles[J]. *Int J Impact Engng*, 2007, 34: 1768-1779.
- [5] 周宁,任辉启,沈兆武,等. 侵彻钢筋混凝土过程中弹丸过载特性的实验研究[J]. *实验力学*,2006,21(5): 572-578 (Zhou Ning, Ren Huiqi, Shen Zhaowu, et al. Experimental study on overload characteristics of projectile penetration reinforced concrete[J]. *J Experimental Mechanics*, 2006, 21(5): 572-578(in Chinese))
- [6] 周宁,任辉启,沈兆武,等. 弹丸侵彻混凝土和钢筋混凝土的实验[J]. *中国科学技术大学学报*,2006,36(10): 1021-1027 (Zhou Ning, Ren Huiqi, Shen Zhaowu, et al. Experimental on the projectile penetration concrete targets and reinforced concrete targets[J]. *J University of Science and Technology of China*, 2006, 36(10): 1021-1027(in Chinese))
- [7] 顾晓辉,王小明,陈惠武,等. 动能弹低速垂直侵彻钢筋土的试验研究[J]. *南京理工大学学报*,2006,30(1):1-4 (Gu Xiaohui, Wang Xiaoming, Chen Huiwu, et al. Experimental studies on kinetic projectile's direct penetrations with low-speed against reinforced concrete targets[J]. *J Nanjing University of Science and Technology*, 2006, 30(1): 1-4(in Chinese))
- [8] Luk V K, Forrestal M J. Penetration into semi-infinite reinforced-concrete targets with spherical and ogival nose projectiles [J]. *Int J Impact Engng*, 1987, 6(4): 291-301.
- [9] 欧阳春,赵国志,杜中华,等. 弹丸垂直侵彻钢筋混凝土介质的工程解析模型[J]. *爆炸与冲击*,2004,24(3):273-277 (Ouyang Chun, Zhao Guozhi, Du Zhonghua, et al. An engineering analytical model for projectiles to penetrate normally into semi-reinforced concrete targets[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004, 24(3): 273 - 277 (in Chinese))
- [10] 周宁,任辉启,沈兆武,等. 弹丸侵彻钢筋混凝土的工程解析模型[J]. *爆炸与冲击*,2007,27(6):529-534 (Zhou Ning, Ren Huiqi, Shen Zhaowu, et al. An engineering analytical model for projectiles to penetrate into semi-reinforced concrete targets[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(6): 529-534(in Chinese))
- [11] 周宁,任辉启,沈兆武,等. 卵形头部弹丸侵彻钢筋混凝土的工程解析模型[J]. *振动与冲击*,2007,26(4):73-76 (Zhou Ning, Ren Huiqi, Shen Zhaowu, et al. Engineering analytical model for ogive-nose projectiles to penetrate into semi-reinforced concrete targets[J]. *J of Vibration and Shock*, 2007, 26(4): 73-76(in Chinese))
- [12] 欧阳春,赵国志,李文彬,等. 弹丸垂直侵彻钢筋混凝土介质的工程模型[J]. *弹箭与制导学报*,2004, 4:140-142 (Ouyang Chun, Zhao Guozhi, Li Wenbin, et al. An engineering model for penetration normally into semi-reinforced concrete targets[J]. *J Projectiles, Rockets, Missile and Guidance*, 2004, 4: 140-142 (in Chinese))
- [13] 黄民荣,高永宏,顾晓辉. 基于 Griffith 强度理论的动态空腔膨胀模型及其应用研究[J]. *力学与实践*,2009, 31(5)(Huang Minrong, Gao Yonghong, Gu Xiaohui. Dynamic cavity expansion model and its application study using Griffith strength theory[J]. *Mechanics in Engineering*,2009, 31(5)(in Chinese))
- [14] Menkes S B, Opat H J. Broken beams[J]. *Experimental Mechanics*, 1973, 13: 480-486.
- [15] 马晓青,韩峰. 高速碰撞动力学[M]. 北京:国防工业出版社,1998(Ma Xiaqing, Han Feng. *Dynamic mechanics*

- of high speed strike[M]. Beijing: Defence Industry Press, 1998 (in Chinese))
- [16] YU T X, Stronge W J. Large deflection of a rigid-plastic beam-on-foundation from impact[J]. *Int J Impact Engng*, 1990, 9(1): 115—126.
- [17] Forrestal M J, Hanchak S J. Perforation experiments on HY-100 steel plates with 4340 Rc38 and maraging T-250 steel rod projectiles[J]. *Int J Impact Engng*, 1999, 22: 923—933.
- [18] Wen H M, Reddy T Y, Reid S R. Deformation and failure of clamped beams under low speed impact loading[J]. *Int J Impact Engng*, 1995, 16(3): 435—454.
- [19] Liu J H, Jones N. Dynamic response of a rigid-plastic clamped beam struck by a mass at any point on the span. *Int J Solids and Structures*, 1988, 24: 251—270.

Experiment and Simplified Analytical Model for Penetration of Rigid Projectile in a Reinforced Concrete Target

HUANG Min-rong, GU Xiao-hui, GAO Yong-hong

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Experiments on perpendicular penetration of 57-mm-diameter semi-armor-piercing projectile in a reinforced concrete target were conducted. Striking velocity, impact crater depth, maximum penetration depth and penetration deceleration-time history of projectile were measured. Based on the analysis of rupture characteristics of steel bars subjected to projectile impact, a typical steel bar breakage model was obtained. The steel bars breakage model was simplified as following two models: bending plus shear rupture and bending plus tension rupture. A simplified analytical model for penetration in a reinforced concrete target subjected to rigid projectile impact was developed based on the penetration model for concrete target and the rupture failure theory for a beam. Prediction of penetration depth, velocity and penetration deceleration-time history from this model are in agreement with above-mentioned experimental data. Investigation indicates that the steel bars only contribute local effects on the penetration process. The resistance of concrete materials to penetration of projectile is the main component of resistance to penetration of projectile in a reinforced concrete target.

Keywords: mechanics of explosion; rigid projectiles; penetration; reinforced concrete targets; beam