文章编号：1000-5773(2010)05-0351-08

弹丸对钢筋混凝土中钢筋交汇处侵彻效应研究*

穆朝民，任辉启

（总参工程兵科研三所，河南洛阳 471023）

摘要：考虑弹丸在钢筋交汇处与钢筋直接发生作用的情况，提出了弹丸侵彻钢筋混凝土的近似模型。利用该模型得到了弹丸侵彻钢筋混凝土过程中弹丸的加速度时间历程。计算结果与实验结果符合较好。用该模型分析了不同配筋结构、配筋尺寸和网眼尺寸对侵彻深度和侵彻过程的影响，结果表明：弹丸从钢筋交汇处侵彻时，当弹丸动能相对较小时，随着网眼尺寸的减小，弹丸的大部分能量均消耗在侵彻第一层配筋结构中，当弹丸动能较大时，不管网眼尺寸多大，第一层配筋均只消耗掉弹丸的部分能量；配筋直径和网眼尺寸对侵彻深度的影响较大。

关键词：爆炸力学；侵彻；弹丸；钢筋混凝土

中图分类号：O385 **文献标识码**：A

1 引 言

为了有效打击地下工程、机场跑道等坚固目标，一般依靠精确制导弹药的动能侵彻来提高破坏效应。为达到对目标理想的破坏效果，弹头必须具有一定的侵彻能力，依靠侵彻弹头送到目标最佳爆炸位置(DOB)处爆炸。因此，研究弹头对钢筋混凝土侵彻深度和弹体在钢筋混凝土中的运动规律具有十分重要的意义。在弹体侵彻过程中，其受力环境非常恶劣，为了达到侵彻性能设计指标，对弹体的材料强度、引信强度、装药安定性等要求很高。必须保证在大过载情况下，弹体不变形、引信不被破坏、装药不会误爆，这就需要对侵彻过程中弹体的侵彻机理进行系统研究。侵彻机理研究是战斗部设计中的一项重要工作，深入开展侵彻机理研究不但可以提高战斗部的设计水平，而且对我国武器规划具有指导作用。在对侵彻机理有深刻理解的基础上，对待定毁伤目标可以合理选择弹种，针对不同弹种提出科学的改进意见[1-4]。

国外，Ballew[5]、Forrestal 等[6-8]测量了 13 kg 弹体以 140～460 m/s 的速度侵彻强度分别为 23 MPa 和 39 MPa 混凝土靶时的弹体加速度；Frew 等[9]研究了弹丸加速度和侵彻深度受混凝土靶尺寸的影响。国内，王琳等人[10]得到弹体以 150～300 m/s 的速度垂直侵彻无钢筋混凝土靶的应变时间历程曲线。任辉启、何翔等[11]测量了弹体速度在 200～600 m/s 范围内、质量为 20 kg 的弹丸侵彻混凝土和钢筋混凝土中的过载曲线，并进行了过载特性的理论计算。然而对钢筋混凝土侵彻过程中弹丸受配筋尺寸、配筋结构、网眼大小的影响等研究还很不充分[12]。

本研究提出了描述弹丸在钢筋交汇处与钢筋直接发生作用的钢筋混凝土侵彻的工程计算模型，运用该模型编程计算了不同配筋结构、配筋尺寸、网眼尺寸对侵彻深度和侵彻过程中弹丸负加速度的影响。结果表明：当弹丸在钢筋交汇处与钢筋直接发生作用时，随着网眼尺寸的减小，不同速度下的侵彻深度都迅速减小；弹丸动能相对较小，随着网眼尺寸的减小，弹丸的大部分能量均消耗在侵彻第一大层配筋结构中；弹丸动能较大，不管网眼尺寸多大，均只消耗掉弹丸的部分能量，配筋直径对侵彻深度的影响较大。

* **收稿日期**：2009-10-11；**修回日期**：2010-06-21

基金项目：国家自然科学基金(50874005，10402041，10572134)；教育部博士点基金(20070358073)

作者简介：穆朝民(1977—)，男，博士，主要从事工程安全与防护技术研究. E-mail：chmmu@mail.ustc.edu.cn

2 球形空腔膨胀模型

根据 Forrestal 假设，弹丸为刚体，混凝土为弹性不可压缩材料，服从 Tresca 强度准则和塑性锁应变，采用球形空腔膨胀理论。弹丸在混凝土中的负加速度、速度和位移表示如下

$$F_z = m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = -\pi r^2(R + N\rho v_1^2) \qquad (z > 4r) \tag{1}$$

式中：r 为弹丸半径，v_1 为弹体在成坑阶段结束后的速度，ρ 为混凝土材料靶体密度，N 为弹头形状系数，R 为混凝土靶体抗力系数(此数值可由一系列侵彻实验数据确定)。在大量实验的基础上，Forrestal 等给出了 R 的表达式

$$R = Sf_c \tag{2}$$

$$S = 82.6f_c^{-0.544}, \quad \text{或 } S = 72.0f_c^{-0.5} \tag{3}$$

式中：S 为实验拟合值，f_c 为混凝土材料的无侧限抗压强度。

速度-时间历程为

$$v = \left(\frac{R}{N\rho}\right)^{1/2}\tan\left\{\tan^{-1}\left[\left(\frac{N\rho}{R}\right)^{1/2}v_1\right] - \frac{\pi r^2}{m}(RN\rho)^{1/2}(t - t_1)\right\} \tag{4}$$

负加速度表达式

$$a = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = \frac{-(\pi r^2 R/m)}{\cos^2\left\{\tan^{-1}\left[\left(\frac{N\rho}{R}\right)^{1/2}v_1\right] - \frac{\pi r^2}{m}(RN\rho)^{1/2}(t - t_1)\right\}} \tag{5}$$

位移表达式

$$z = \frac{m}{\pi r^2 N\rho}\ln\left[\frac{\cos\left\{\tan^{-1}\left[\left(\frac{N\rho}{R}\right)^{1/2}v_1\right] - \frac{\pi r^2}{m}(RN\rho)^{1/2}(t - t_1)\right\}}{\cos\left\{\tan^{-1}\left[\left(\frac{N\rho}{R}\right)^{1/2}v_1\right]\right\}}\right] + 4r \tag{6}$$

3 弹丸与钢筋的相互作用

钢筋受弹丸的冲击作用大致可分为如图 1 所示的两个阶段[7]：(1) 弯曲段，此时，弹丸受钢筋与混凝土的阻力相对独立，钢筋具有明显的阻滞作用；(2) 断裂段，此时钢筋没有轴向约束，钢筋与混凝土介质对弹丸的阻力合为一体，可忽略钢筋微弱的阻滞作用。

假设混凝土与钢筋为理想粘接，且忽略两者之间沿钢筋轴线方向的相对位移；弹丸与钢筋点接触，且仅发生作用的接触点不分离；钢筋与弹丸接触点的动力响应集中体现钢筋的阻碍作用。

以弹着点为坐标原点，建立如图 2 所示的坐标系 yOz。弧形弹丸直径为 $2r$，弹头部曲率半径为 S，在 t_i 时刻弹丸在 L_i 点与钢筋发生作用，在 t_{i+1} 时刻弹丸在 L_{i+1} 点与钢筋发生作用，文献[8]给出了弹丸运动参数及钢筋运动参数。

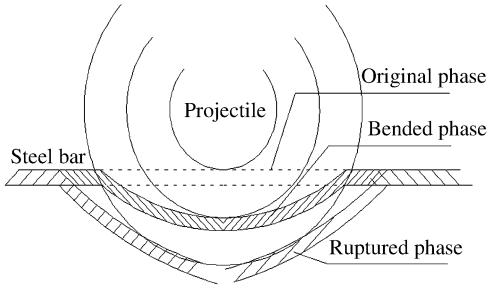


图 1 弹丸与钢筋的相互作用关系

Fig. 1 Collision between projectile and rebar

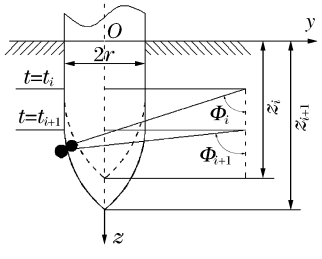


图 2 微小时间内弹丸与钢筋的相对运动

Fig. 2 Relative movement between projectile and rebar in short time

本工作研究的是弹丸直接打在钢筋网中的钢筋交汇处(如图 3 所示),此时弹丸必须将接触的钢筋打断才能继续前进,该极限情况下弹丸在侵彻过程中受到的阻力最大。

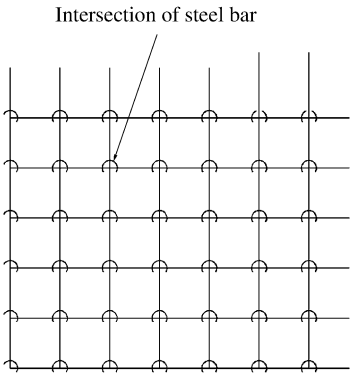


图 3　钢筋交汇处

Fig. 3　Intersection of steel bar

(1) 弹丸从钢筋交汇处侵彻时弹丸与钢筋的相互运动关系

钢筋没有发生断裂,此时弹丸和钢筋的运动参数相同,具体参数如下

弹丸　$\mathrm{d}z_{i+1}=z_i'\,\mathrm{d}t+\frac{1}{2}z_i''\,\mathrm{d}t^2$

$$z_{i+1}=z_i+\mathrm{d}z_{i+1}$$

$$z_{i+1}'=z_i'+\mathrm{d}z_{i+1}$$

式中:z 为弹丸在 z 轴方向的位移。

(2) 钢筋的弯曲变形及失效

将钢筋在弹丸撞击下的弯曲变形简化为集中力作用于理想简支弹塑性梁产生的弯曲变形问题。梁在集中力作用点的最大弯矩为

$$M_{\max}=l(t)[2p(t)-ql(t)]/8 \tag{7}$$

式中:q 为刚模单位长度上混凝土开始塑性流动时的极限压力,$q=dY(2+\pi)$;d 为钢筋直径;Y 为混凝土失效应力。圆形截面梁的最大塑性极限弯矩由理想弹塑性圆形截面梁的弯曲理论[8]可得

$$M_{\mathrm{p}}=16M_{\mathrm{e}}/3\pi=d^3\sigma_{\mathrm{s}}/6 \tag{8}$$

(3) 钢筋对弹丸的侵彻阻力

$$p(t)=q+\pi\rho d^2z'^2(t)/4 \tag{9}$$

(4) 弹丸的运动方程

$$m\ddot{z}(t)=-[F_z(t)+4p(t)\cos\varphi(t)] \tag{10}$$

4　弹丸从钢筋交汇处侵彻时弹丸与钢筋作用分析

(1) 对于 $x_i<z\leqslant x_{i+1}$ 时的情况

$$a_{i+1}=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=-\frac{A}{\cos^2(B+E-Dt)}-\frac{4p(t)\left(\frac{x_i-z_{i+1}}{S}\right)\cdot 2\left[\sqrt{S^2-(z_{i+1}-x_i)^2}-S+r\right]}{m} \tag{11}$$

$$v_{i+1}=v_i+a_{i+1}(t-t_i) \tag{12}$$

$$z_{i+1}=z_i+(v_i-a_{i+1}t_i)(t-t_i)-\frac{a_{i+1}}{2}(t^2-t_i^2) \tag{13}$$

从钢筋网交汇处侵彻时,从理论上讲每层钢筋网都会破坏,都会出现 $p(t)=0$ 的情况,因此每一个计算步都要进行判断。如果某时刻与弹丸接触的钢筋都发生断裂,则该作用过程结束,转入弹丸侵彻素混凝土的作用过程,此时 $z_{i+1}=z_i+(v_i-a_{i+1}t_i)(t-t_i)-\frac{a_{i+1}}{2}(t^2-t_i^2)$,$a_{i+1}=-\frac{A}{\cos^2(B+E-Dt)}$,$v_{i+1}=v_i+a_{i+1}(t-t_i)$,若该过程钢筋不发生断裂则转入下一过程。

(2) 对于 $x_{i+1}<z\leqslant x_i+l_1$ 时的情况

$$a_{i+2}=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=-\frac{A}{\cos^2(B+E-Dt)}-\frac{2p(t)_{x_1}\left(\frac{x_1-z_{i+2}}{S}\right)\cdot 2\left[\sqrt{S^2-(z_{i+2}-x_1)^2}-S+r\right]}{m}-$$

$$\frac{2p(t)_{x_2}\left(\frac{x_2-z_{i+2}}{S}\right)\cdot 2\left[\sqrt{S^2-(z_{i+2}-x_2)^2}-S+r\right]}{m} \tag{14}$$

$$v = v_{i+2} + a(t - t_{i+2}) \tag{15}$$

$$z = z_{i+2} + (v_{i+2} - at_{i+2})(t - t_{i+2}) + \frac{a}{2}(t^2 - t_{i+2}^2) \tag{16}$$

在计算中，每一个计算步都要对钢筋是否断裂进行判断，如断裂则 $p(t)=0$。

5 弹丸从钢筋交汇处侵彻的计算结果

5.1 实验结果分析

弹丸和靶板参数为：弹丸直径 $2r=100$ mm，头部曲率半径 $\Psi=4$，弹丸质量 $m=25$ kg。混凝土材料参数：$E=26.1$ GPa，$\rho_0=2\,500$ kg/m^3，标准圆柱体混凝土的单轴无约束抗压强度 $f_c=28$ MPa，抗剪强度 $Y=84$ MPa。钢筋材料参数：$E_s=200$ GPa，$\rho_s=7\,850$ kg/m^3，屈服应力 $\sigma_s=500$ MPa。实验中采用多层配筋半无限钢筋混凝土靶板，其配筋直径为 5 mm，网眼间距为 80 mm×80 mm。

实验测试了弹丸以 304、313、452、495 和 629 m/s 侵彻钢筋混凝土过程中弹丸负加速度时间历程。本工作对不同初速条件下弹丸从钢筋交汇处侵彻钢筋混凝土靶板进行了计算，结果见表 1。

表 1 侵彻深度实测值与计算值

Table 1 Measured values and calculated value of penetration depths

Initial velocity/(m/s)	P_{exp}/(m)	P_{cal}/(m)	Error/(%)	Initial velocity/(m/s)	P_{exp}/(m)	P_{cal}/(m)	Error/(%)
304	0.554	0.410	−25.99	452	0.960	0.811	−15.52
313	0.590	0.428	−27.45	492	1.041	0.928	−10.85
435	1.030	0.775	−24.75	629	1.550	1.329	−14.26

将表 1 中的数据综合绘制成弹丸初速与侵彻深度的关系，如图 4 所示，将从钢筋网眼中心侵彻的计算结果与考虑从钢筋交汇处侵彻的计算结果进行对比表明，考虑从钢筋网眼中心侵彻时的计算结果更接近实验值，侵彻深度随弹丸初速的变化规律均相同。

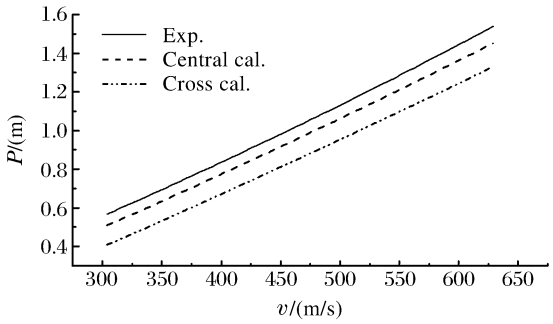
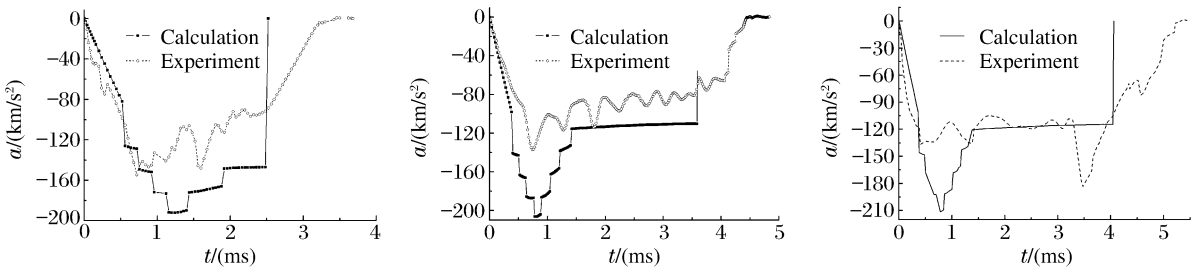


图 4 侵彻深度测量结果与计算结果对比图

Fig. 4 Measured and calculated value of penetration depth

图 5 为 304、435 和 452 m/s 初速下弹丸侵彻过程中的负加速度时程曲线，图中实线为计算值，虚线为实测值。从图 5 中可以看出：计算得到的峰值加速度比实测的峰值加速度出现稍早，峰值偏大。由于

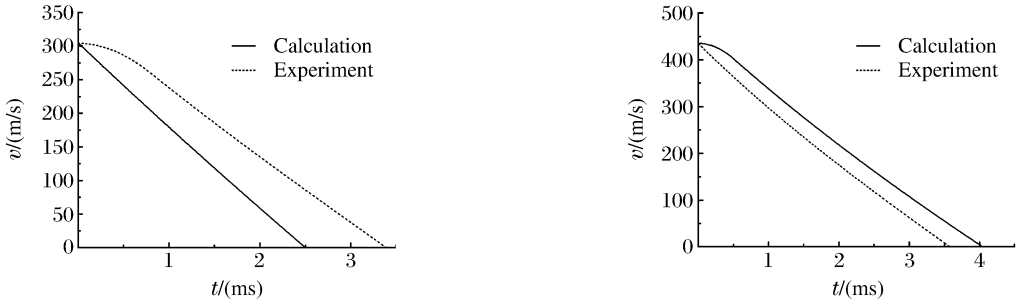


(a) 304 m/s (b) 435 m/s (c) 452 m/s

图 5 不同初速下侵彻过程中弹丸负加速度时程曲线

Fig. 5 Deceleration-time histories at different initial velocities

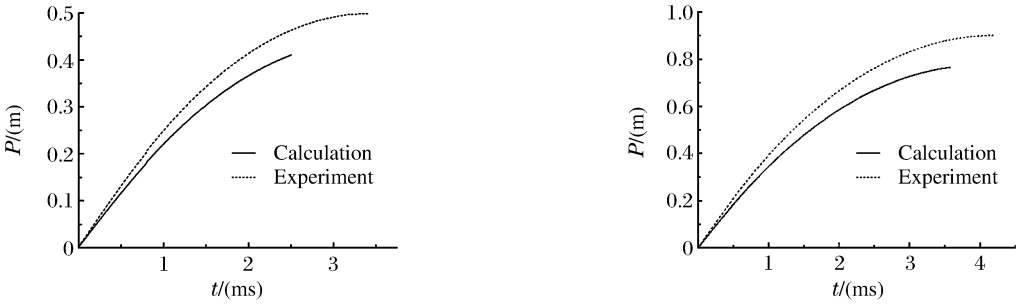
应力波在钢筋混凝土结构与弹丸间传播,从而引起实测弹丸负加速度曲线的毛刺较多。由于计算了钢筋的作用,从图 5 中可以看到在弹丸钢筋网所在位置的负加速度有所增大,这是符合实际情况的。图 6 为 304 和 435 m/s 初速下侵彻过程中弹丸速度的计算值和实测值;图 7 为 304 和 435 m/s 初速下侵彻过程中弹丸位移的计算值和实测值;图 8 为以 452 m/s 初速侵彻过程弹丸速度时程关系和位移的计算值和实测值,图中实线均为计算值,虚线均为实测值。结果表明:引入钢筋对弹丸的直接碰撞阻力,使模型更为合理,计算结果与实验数据吻合较好,理论上也更符合实际情况。



(a) 304 m/s　　(b) 435 m/s

图 6　不同初速下侵彻过程中弹丸速度时程曲线

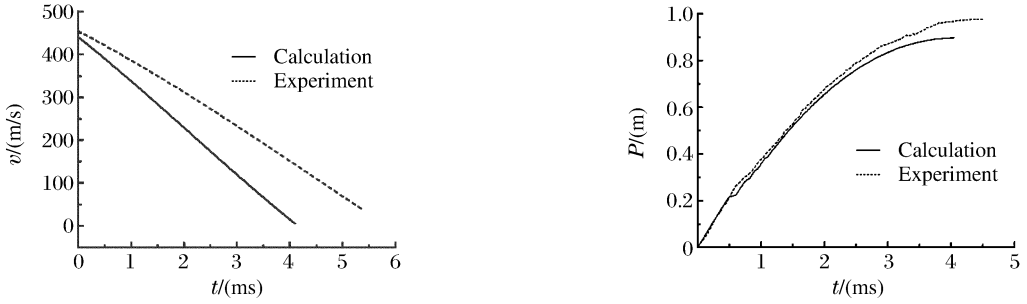
Fig. 6　Velocity-time histories of projectiles at different impact velocities



(a) 304 m/s　　(b) 435 m/s

图 7　不同初速下侵彻过程中弹丸位移时程曲线

Fig. 7　Displacement-time histories of projectiles at different impact velocities



(a) Velocity-time history　　(b) Displacement-time history

图 8　452m/s 初速下侵彻过程中弹丸速度、位移时程曲线

Fig. 8　Velocity-time and displacement-time histories of projectiles at different impact velocities

5.2　不同钢筋网眼间距时的侵彻结果及分析

不同网眼尺寸下的侵彻深度计算结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出,随着网眼尺寸的减小,不同速度下的侵彻深度均迅速减小,弹丸初速在 435～492 m/s 之间,网眼尺寸为 0.01 m 时的侵彻深度还不到网眼尺寸为 0.08 m 时侵彻深度的一半;弹丸初速大于 629 m/s 时,网眼尺寸为 0.001 m 时的侵彻深

度比网眼尺寸为 0.008 m 时侵彻深度减小了 0.5 m 左右，为初始侵彻深度的 2/3，这与我们所用的钢筋混凝土的配筋结构有关。实验中采用的配筋结构分为 3 个钢筋结构层，第 1 个钢筋结构层分 4 层钢筋网，距离靶面 5 cm 为第一层钢筋网，以后每间隔 5 cm 一层，到弹着面 20 cm 结束；第 2 个钢筋结构层分 3 层钢筋网，各层间隔也为 5 cm，最上边一层距弹着面 95 cm；第 3 个钢筋结构层分 4 层钢筋网，各层间隔也为 5 cm，最上一层钢筋网距弹着面 181 cm。从配筋结构可以看出，在弹丸初速度小于 492 m/s 时，弹丸动能相对较小，随着网眼尺寸的减小，弹丸的大部分能量都消耗在侵彻第一大层配筋结构中，而弹丸初速度大于 629 m/s 时，弹丸动能较大，不管网眼尺寸多大，都只能消耗掉弹丸的部分能量，弹丸穿过第一大层配筋结构后还有一定的速度，可以继续在下面的混凝土层中侵彻较大深度，因此在该配筋结构下，改变网眼尺寸对其侵彻深度的影响较小。

表 2 不同钢筋网眼间距下的侵彻深度计算值

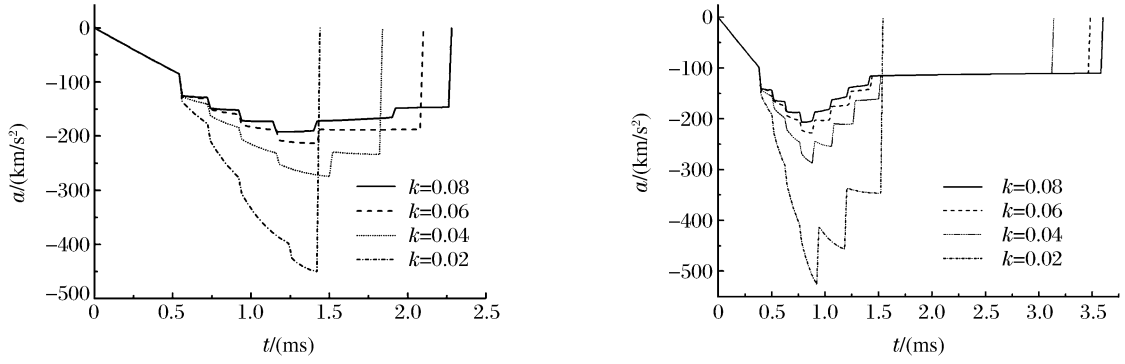
Table 2 Calculated values of penetration depth at different steel mesh sizes (Unit: m)

Dimension/(m)	Initial velocity/(m/s)						
	304	313	435	452	492	629	720
0.08	0.410	0.428	0.775	0.811	0.928	1.329	1.706
0.06	0.395	0.410	0.742	0.779	0.898	1.292	1.657
0.04	0.364	0.376	0.653	0.696	0.816	1.225	1.521
0.02	0.316	0.322	0.424	0.441	0.507	1.017	1.221

Note: The dimension in Table 2 is the length side of square steel mesh.

图 9、图 10 分别为弹丸以 304、435、452 和 629 m/s 的初速侵彻时，侵彻过程中弹丸的负加速度时程关系，图中 k 为钢筋网眼间距。从图 9 和图 10 中可以看出，弹丸初速为 304、435 和 452 m/s 时，不同网眼间距下侵彻过程中弹丸的负加速度时程曲线的规律是完全一致的，网眼间距越小侵彻过程的时间越短，峰值加速度越高。从图 9 和图 10 中能清晰地看出弹丸与多少层钢筋网发生了相互作用，因为弹丸与钢筋网发生作用时，弹丸的加速度都会出现一个明显的增大过程。

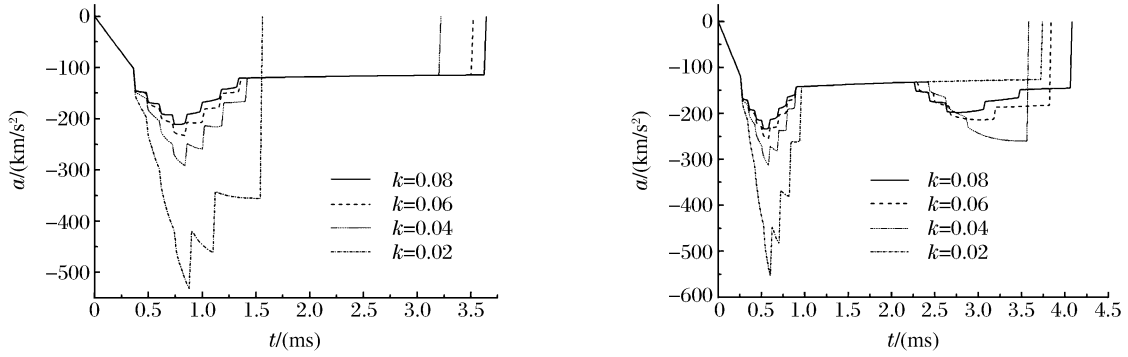
当弹丸初速增大到一定值后，弹丸侵彻穿过第一层配筋结构层和接下来的混凝土层之后还有剩余速度，并继续侵彻，整个侵彻过程中弹丸的加速度时程曲线则出现如图 10 所示的情况（网眼间距为 0.08 m），弹丸的负加速度先不断增大，在侵彻第 1 个配筋结构层时出现最大值 $-2.3\times10^4 g$，并且在侵彻配筋层时加速度出现振荡，穿过第一层配筋结构层后弹丸负加速度减小到 $-1.4\times10^4 g$，在侵彻第一层配筋结构层以下的混凝土层中始终保持在该值附近，直到弹丸开始侵彻第 2 个配筋结构层时，弹丸的负加速度又迅速增加，2.75 ms 时刻出现峰值负加速度，大约为 $-1.9\times10^4 g$。



(a) v=304 m/s (b) v=435 m/s

图 9 304 m/s、435 m/s 速度下不同钢筋网眼间距时弹丸的加速度时程曲线

Fig. 9 Deceleration-time histories at 304 m/s and 435 m/s initial velocities



(a) v=452 m/s　　(b) v=629 m/s

图 10　452 m/s、629 m/s 速度下不同钢筋网眼间距时弹丸的加速度时程曲线

Fig. 10　Deceleration-time histories at 452 m/s and 629 m/s initial velocities

5.3　不同配筋直径时的侵彻结果及分析

不同配筋直径下的侵彻深度计算结果列于表 3 中。由表 3 可以看出,考虑弹丸从钢筋交汇处侵彻时,配筋直径对侵彻深度的影响较大,当配筋直径由 0.006 m 增加到 0.030 m 时,侵彻深度减小了 30%～50%。弹丸初速较小(小于 350 m/s)和较大(大于 350 m/s)时,增大钢筋直径对侵彻深度的影响较小,其主要与配筋结构有关,实验时,钢筋结构分为 3 个主要钢筋结构层,第 1 个钢筋结构层布置有 4 层钢筋网,到距弹着面 20 cm 结束,因此弹丸初速较小时,弹丸本身侵彻深度就不大,增大钢筋直径后最多也只能使弹丸不能穿过第 1 个钢筋结构层;第 2 个钢筋结构层布置有 3 层钢筋网,最上一层距弹着面 105 cm,各层间距 5 cm,弹丸初速度较大时穿过第 1 个钢筋结构层后还有较大动能,因此侵彻一般能达到第 2 个钢筋结构层。

表 3　不同配筋直径下的侵彻深度计算结果

Table 3　Calculated values of penetration depth at different steel bar sizes　　(Unit:m)

Diameter/(m)	Initial velocity/(m/s)						
	304	313	435	452	492	629	720
0.006	0.410	0.428	0.775	0.811	0.928	1.349	1.706
0.012	0.348	0.360	0.625	0.665	0.785	1.20	1.472
0.018	0.320	0.327	0.478	0.516	0.638	1.117	1.282
0.024	0.300	0.306	0.407	0.424	0.490	1.001	1.197
0.030	0.285	0.290	0.367	0.379	0.414	0.832	1.135

Note: The diameter in Table 3 is the diameter of steel bar.

6　结　论

运用弹丸与钢筋直接发生作用的钢筋混凝土侵彻的工程计算模型分析了不同配筋结构、配筋尺寸、网眼尺寸对侵彻深度和侵彻过程中弹丸负加速度的影响。结果表明:弹丸从钢筋交汇处侵彻时,随着网眼尺寸的减小,不同速度下的侵彻深度都迅速减小;弹丸动能相对较小时,随着网眼尺寸的减小,弹丸的大部分能量都消耗在侵彻第一大层配筋结构中;弹丸动能较大时,不管网眼尺寸多大,都只能消耗掉弹丸的部分能量,配筋直径对侵彻深度的影响较大。

References:

[1] L iu X H, Liu J, Wang C, et al. Experimental Study on the Projectile Penetration Normally into a Plain Concrete [J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 10(4): 323-328. (in Chinese)
刘小虎,刘 吉,王 乘,等. 弹丸低速垂直侵彻无钢筋混凝土的实验研究 [J]. 爆炸与冲击,1999,10(4):323-328.

[2] Xu J B, Lin J D, Tang R D, et al. The Penetration of Steel Bar Projectile into Concrete Targets [J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 4(2): 174-178. (in Chinese)
徐建波,林俊德,唐润棣,等. 长杆射弹侵彻钢筋混凝土实验研究 [J]. 爆炸与冲击,2002,4(2):174-178.

[3] Wu H J, Huang F L, Jin Q K, et al. Numerical Simulation on Perforation of Reinforced Concrete Targets [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 11(6): 545-550. (in Chinese)
武海军,黄风雷,金乾坤,等. 弹体贯穿钢筋混凝土数值模拟 [J]. 爆炸与冲击,2003,11(6):545-550.

[4] Gold V M. A Study of Penetration of Concrete by High Velocity Projectiles [D]. Michigan: Polytechnic University, 1995.

[5] Ballew W D. Taylor Impact Test and Penetration of Reinforced-Concrete Targets by Cylindrical Composite Rods [D]. Blacksbury Va: The Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, 2004.

[6] Forrestal M J, Grady D E. Penetration Experiments for Normal Impact into Geological Targets [J]. Int J Solid Struct, 1982, 18(3): 229-234.

[7] Forrestal M J, Luk V K. Penetration into Soil Targets [J]. Int J Impact Eng, 1992, 12(3): 427-444.

[8] Forrestal M J, Frew D J. Penetration of Concrete Targets with Deceleration-Time Measurements [J]. Int J Impact Eng, 2003, 28: 479-497.

[9] Frew D J, Forrestal M J, Cargile J D. The Effect of Concrete Target Diameter on Projectile Deceleration and Penetration Depth [J]. Int J Impact Eng, 2006, 32(10): 1584-1594.

[10] Wang L, Wang F C, Wang L, et al. Strain Measurement in Hollow Projectiles Impacting Concrete Targets [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2002, 22(4): 453-456. (in Chinese)
王 琳,王富耻,王 鲁,等. 空心弹丸垂直侵彻混凝土靶体的应变测试研究 [J]. 北京理工大学学报,2002,22(4):453-456.

[11] Ren H Q, He X, Liu R Z, et al. A Study on the Overload Characteristics of Projectile Penetration Concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(1): 110-116. (in Chinese)
任辉启,何 翔,刘瑞朝,等. 弹丸侵彻混凝土过载特性研究 [J]. 土木工程学报,2005,38(1):110-116.

[12] 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.

Research on the Effect of the Projectile Penetrating into the Reinforced Concrete Targets at the Intersection of the Steel Bar

MU Chao-Min, REN Hui-Qi

(*Luoyang Institute of Hydraulic Engineering and Technology, Luoyang* 470123, *China*)

Abstract: Considering direct interaction of the projectile with the steel bar, the approximate model of the projectile penetrating into the reinforced concrete is established. Using this model, the acceleration-time history is obtained. Calculation data are in agreement with experimental data. The model is used to analyze the effect of steel bar size, steel bar mesh size and steel bar configuration on the penetration depth and the overload effect in penetration process. The results indicate that when the projectile penetrates into the reinforced concrete targets at the intersection of the steel bar, the steel bar mesh size and steel bar size have an important influence on the penetration; when the projectile has small kinetic energy, the first layer of steel consumes most of kinetic energy. On the other hand, no matter how much the steel bar mesh size is, part of kinetic energy is used up by the first layer of steel when the projectile has large kinetic energy.

Key words: explosion mechanics; penetration; projectile; reinforced concrete