文章编号: 1001-1455(2010)03-0269-07

新型头形弹体对混凝土的侵彻*

孙传杰,卢永刚,张方举,李会敏
(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 针对几种典型的新型头形弹体开展了对抗压强度为 9.0、28.4 MPa 的混凝土靶的侵彻实验,通过观测回收弹体和解剖靶体,初步认识了新型头形弹体侵彻混凝土介质的侵彻机理。在此基础上,提出了混凝土强度弱化量纲一因子 S_2 和头部小圆柱侵彻开孔半径 b_t,并基于空腔膨胀理论初步建立了新型头形弹体侵彻混凝土介质的理论分析模型。结果表明,对 28.4 MPa 混凝土,理论预测结果与实验数据具有较好的一致性;对9.0 MPa混凝土,理论预测结果与实验数据具有一定偏差,但仍可基本反映新型头形弹体的侵彻规律。最后分析了提高新型头形弹体侵彻性能的 2 个途径:减小 S_2 和增大 b_t。

关键词: 爆炸力学;侵彻性能;侵彻实验;小圆柱体头形;混凝土靶;强度弱化;空腔膨胀理论
中图分类号: O385 **国标学科代码**: 130·35 **文献标志码**: A

1 引 言

为提高弹体侵彻性能,学者们开展了许多工作。J. R. Mayersak[1] 提出了一种较新颖的侵彻研究思路,设想在常规卵形头形弹体头部加装一小圆柱形成新型头形弹体,使得新型头形弹体在侵彻过程中产生类似"超空泡效应"现象,减小弹体的侵彻阻力,以大幅度提高弹体侵彻性能。J. R. Mayersak 通过开展对水、沙介质的侵彻实验基本印证了他的设想。但对于与水、沙目标特性差异很大的混凝土、岩石等坚固介质是否具有类似侵彻效应,J. R. Mayersak 却未开展相应的研究工作。

本文中借鉴J. R. Mayersak 的研究思路,对强度为 9.0、28.4 MPa 的混凝土靶开展新型头形弹体的侵彻实验,观察新型头形弹体侵彻混凝土靶的侵彻效应,探索新型头形弹体的侵彻性能和侵彻机理。在此基础上,提出混凝土强度弱化量纲一因子 S_2 和头部小圆柱侵彻开孔半径 b_t,并基于空腔膨胀理论初步建立新型头形弹体侵彻混凝土介质的理论分析模型。最后初步探讨提高新型头形弹体侵彻性能的 2 个途径:在侵彻过程中实现 S_2 的减小和 b_t 的增大。

2 侵彻实验

2.1 实验弹及靶体状态

实验弹编号分别为弹 A、弹 B1、弹 C2 和弹 C3,其外形如图 1 所示,结构参数如表 1 所示,表中 D_n 和 L_n 分别为头部小圆柱体的直径和长度,L_p 和 D_p 分别为弹体长度和直径,ψ为曲径比,m 为质量。各实验弹的弹径相同,质量基本相等,弹材均为 D6A 高强度钢。

(a) Projectile A (b) Projectile B1 (c) Projectile C2 (d) Projectile C3

图 1 实验弹外形图

Fig. 1 Photographs of projectiles

实验靶体为素混凝土靶,侧表面用铁皮箍紧。靶体分为 A 靶和 B 靶,A 靶的尺寸为 ∅500 mm × 1 500 mm,平均轴心抗压强度实测值为 9.0 MPa;B 靶的尺寸为 ∅500 mm ×700 mm,平均轴心抗压强

* 收稿日期: 2009-2-24; 修回日期: 2009-4-10
作者简介: 孙传杰(1976 —),男,硕士,工程师。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

度实测值为 28.4 MPa。2 种靶体中的卵石直径均不大于 6 mm。

2.2 实验方法

采用 ∅25 mm 火炮作为加载平台开展正侵彻实验,侵彻速度约 300、800 m/s,通过靶网测试弹体着靶速度,利用高速摄像机记录弹体的着靶姿态。

表 1 实验弹参数

Table 1 Characteristic parameters of projectiles

实验弹	头部参数				弹体参数		ψ	m/g
	L_n/mm	D_n/mm	D_n/D_p	L_n/D_n	L_p/mm	D_p/mm		
A					160.7	25	6	246.1
B1	12.50	12.50	0.50	1	155.0	25	6	245.7
C2	12.50	6.25	0.25	2	164.0	25	6	245.6
C3	18.75	6.25	0.25	3	168.0	25	6	246.0

2.3 实验结果及初步分析

2.3.1 隧道开孔

实验观测发现,不同头形弹体以不同速度侵彻不同强度靶体获得的隧道开孔孔径无明显差异,与弹径相当。对新型头形弹体侵彻后的靶体进行解剖均未观测到有隧道开孔扩大现象。

2.3.2 侵彻深度

实验弹侵彻深度数据如表 2 所示,表中 f_c 为靶体抗压强度,v 为撞击速度,h 为侵彻深度。不同头形弹体撞击速度-侵深对比如图 2 所示。

表 2 侵彻深度实验数据

Table 2 Penetration data of projectiles

实验弹编号	f_c/MPa	v/m/s	h/mm	备注
A	9.0	348	233.5	
B1	9.0	334	155.0	
C2	9.0	369	294.0	
C3	9.0	294	208.0	
A	9.0	819	1247.0	
C3	9.0	781	1258.0	
A	28.4	330	138.5	
C2	28.4	350	131.0	弹体完整,落于靶前
C3	28.4	252	112.0	头部小圆柱断裂,弹体落于靶前
A	28.4	810	447.0	
C3	28.4	802	513.0	

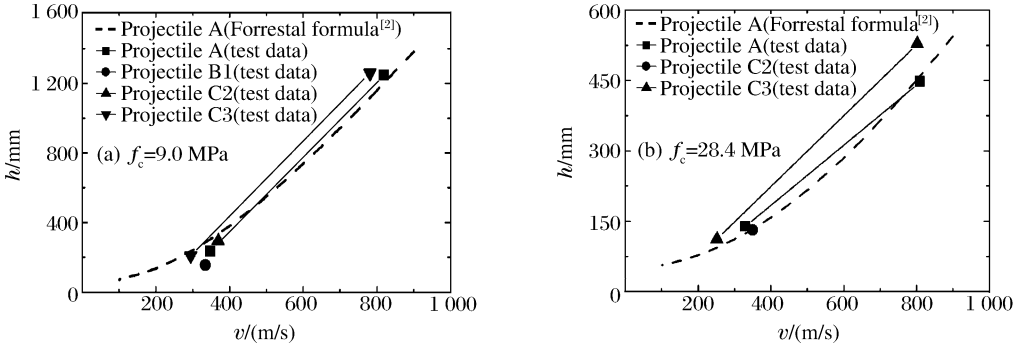

图 2 撞击速度与侵深的关系

Fig. 2 Relationship between impact velocity and penetration depth

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.3.3　新型头形弹体侵彻机理初步分析

由图 2 可初步发现,新型头形弹体的头部参数在一定范围时,其侵彻性能可优于常规头形弹体的侵彻性能,并且新型头形弹体的侵彻性能与其头部小圆柱的直径和长度有一定关系。

此外,通过观测回收弹体及靶体解剖,初步认为新型头形弹体的侵彻机理为:头部小圆柱对目标介质进行先期侵彻,造成弹体侵彻路径周围介质一定程度的强度弱化,有可能降低弹体总的侵彻阻力。

3　模型建立

3.1　假设条件

基本假设包括:

(1) 弹体弧形头部形状为正切卵形;

(2) 采用刚性假设,弹体在侵彻过程中无变形、无质量侵蚀,且忽略弹体摩擦力;

(3) 弹体头部小圆柱平头所受法向应力仍采用空腔膨胀理论计算其所受应力[3];

(4) 弹体头部小圆柱先行侵彻混凝土,并对混凝土造成一定强度弱化。

3.2　新型头形弹体侵彻过程及相关参数定义

图 3 为新型头形弹体侵彻混凝土的几个典型阶段,其中(a)～(c)分别为新型头形弹体头部小圆柱侵彻阶段、新型头形弹体头部卵形部分侵入阶段和新型头形弹体头部完全侵入阶段。

理论模型涉及的主要参数定义如下:L_1 为头部小圆柱长度;L_2 为头部卵形部分长度;L 为头部长度;a 为弹体半径;b 为小圆柱半径;s 为卵形部分圆半径;b_t 为小圆柱开孔半径;ϕ_1 为头部圆弧段与混凝土接触处的圆心角;ϕ_0 为头部圆弧段与小圆柱连接处的圆心角;ψ 为圆弧段曲径比,$\psi = s/(2a)$;q 为小圆柱半径与弹体半径之比,$q = b/a$;R 为小圆柱开孔半径与弹体半径之比,$R = b_t/a$;S、S_1、S_2、S_n 为混凝土强度量纲一因子,且 $S_1 = S$。

根据图 4 可推导如下协调关系式

$$L_2 = s\cos\phi_0, \qquad \sin\phi_0 = \frac{2\psi - 1 + q}{2\psi} \qquad \phi_0 = \arcsin\frac{2\psi - 1 + q}{2\psi}$$

且

$$L_2 = 2a\psi\cos\left(\arcsin\frac{2\psi - 1 + q}{2\psi}\right), \qquad L = L_1 + L_2$$

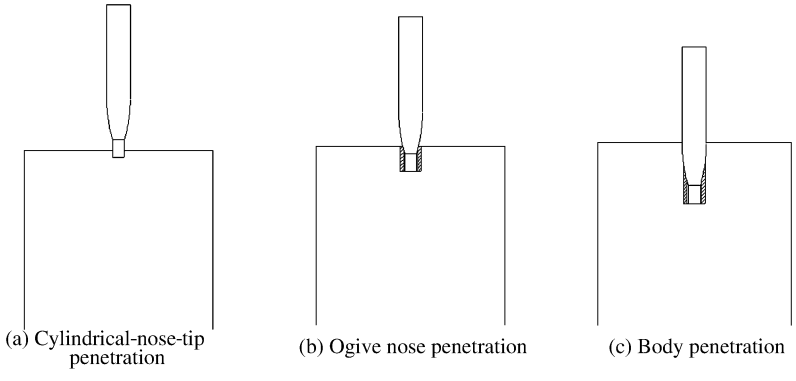

图 3　新型头形弹体侵彻过程

Fig. 3　Process of cylindrical-nose-tip projectiles penetrating into concrete

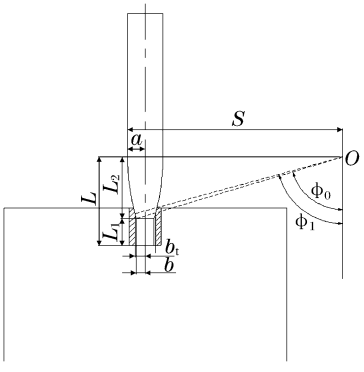

图 4　参数定义

Fig. 4　Parameter definition

3.3　侵彻过程及理论模型建立

以弹体与混凝土接触初始位置为坐标原点,弹体侵彻方向为 x 坐标正方向。

3.3.1　第 1 阶段(小圆柱头部侵彻阶段)

该阶段仅新型头形弹体头部小圆柱平头受力,头部卵形部分还未与混凝土接触。该阶段的初始和终了条件为:$0 \le x \le L_1$,$0 \le t \le t_1$,$v_1 \le v \le v_0$。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

根据空腔膨胀理论,弹体侵彻表面的法向应力为

$$P_r = A + Bv^2\cos^2\phi$$

式中:$A = Sf_c$,$S = 82.6(f_c/10^6)^{-0.544}$,$f_c$ 为混凝土抗压强度,MPa;$B = \rho$,ρ 为混凝土密度。

此阶段仅头部小圆柱平头受力(忽略摩檫力),则弹体轴向受力为

$$F_0 = \pi b^2 P_r = \alpha_0 + \beta_0 v^2$$

式中:$\alpha_0 = \pi b^2 A$,$\beta_0 = \pi b^2 B$。

根据牛顿第二定律 $m\mathrm{d}v/\mathrm{d}t = -F_0$,可求解得到第 1 阶段的位移、速度和加速度的表达式

$$x = \frac{m}{2\beta_0}\ln\left(\frac{\alpha_0 + \beta_0 v_0^2}{\alpha_0 + \beta_0 v^2}\right) \tag{1}$$

$$v = \sqrt{\frac{\alpha_0}{\beta_0}}\tan\left[\arctan\left(v_0\sqrt{\frac{\beta_0}{\alpha_0}}\right) - \frac{\sqrt{\alpha_0\beta_0}}{m}t\right] \tag{2}$$

$$a = -\frac{\alpha_0}{m}\sec^2\left[\arctan\left(v_0\sqrt{\frac{\beta_0}{\alpha_0}}\right) - \frac{\sqrt{\alpha_0\beta_0}}{m}t\right] \tag{3}$$

第 1 阶段结束后,

$$x_1 = L_1,\quad v_1 = \frac{\sqrt{e^{\frac{-2\beta_0 L_1}{m}}(1 + w^2 v_0^2) - 1}}{w},\quad t_1 = \frac{\arctan(wv_0) - \arctan\sqrt{(1 + w^2 v_0^2)e^{\frac{-2\beta_0 L_1}{m}} - 1}}{M}$$

式中:$w = \sqrt{\beta_0/\alpha_0}$,$M = \sqrt{\alpha_0\beta_0}/m$。

3.3.2 第 2 阶段(头部小圆柱完全侵入,卵形头部侵彻阶段)

该阶段新型头形弹体头部小圆柱完全侵入,而头部卵形部分开始侵入混凝土。假设卵形弧段侵入过程所受轴向力随位移线性变化。为便于获得解析解,假设小圆柱平头所受轴向力为常量,并等于第 1 阶段结束时小圆柱平头的轴向力。该阶段的初始和终了条件为:$L_1 \le x \le L$,$t_1 \le t \le t_2$,$v_2 \le v \le v_1$。

该阶段弹体的受力为

$$F_2 = F_1 + cx$$

式中:$F_1 = \pi b^2(A + Bv_1^2) = \mathrm{const}$。

由 $m\mathrm{d}v/\mathrm{d}t = -F_2 = -F_1 - cx$,求解得到以下关系

$$x = M_1\cos(w_2 t) + M_2\sin(w_2 t) - F_1/c \tag{4}$$

$$v = -M_1 w_2\sin(w_2 t) + M_2 w_2\cos(w_2 t) \tag{5}$$

$$a = -M_1 w_2^2\cos(w_2 t) - M_2 w_2^2\sin(w_2 t) \tag{6}$$

式中:

$$M_1 = \frac{x_1 w_2\sin(w_2 t_1) + v_1\cos(w_2 t_1) + \frac{F_1}{c}w_2\sin(w_2 t_1)}{w_2}$$

$$M_2 = \frac{x_1 w_2\cos(w_2 t_1) - v_1\sin(w_2 t_1) + \frac{F_1}{c}w_2\cos(w_2 t_1)}{w_2}$$

第 2 阶段结束后,

$$x_2 = L,\quad v_2 = \sqrt{v_1^2 + \frac{2F_1(x_1 - x_2) + c(x_1^2 - x_2^2)}{m}},\quad t_2 = \frac{\arcsin\frac{x_2 + F_1/c}{\sqrt{M_1^2 + M_2^2}} - \theta}{w_2}$$

式中:$\theta = \arcsin\frac{M_1}{\sqrt{M_1^2 + M_2^2}}$,$w_2 = \sqrt{\frac{c}{m}}$,系数 c 可由受力连续性条件在第 3 阶段求解。

3.3.3 第 3 阶段(新型头形弹体头部完全侵入阶段)

该阶段新型头形弹体头部完全侵入混凝土。假设小圆柱平头先行侵彻形成的开孔半径为 b_1,则卵形弧段所受轴向力的起始积分点处的圆心角为 ϕ_1(而非 ϕ_0),此外考虑小圆柱平头先行侵彻对混凝土产生一定强度弱化。该阶段的初始和终了条件为:$x \ge L$,$t \ge t_2$,$0 \le v \le v_2$。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

小圆柱平头受力为

$$F_{31} = \alpha_{31} + \beta_{31} v^2$$

式中: $\alpha_{31} = \pi b^2 A$, $\beta_{31} = \pi b^2 B$。

卵形弧段受力为

$$F_{32} = \alpha_{32} + \beta_{32} v^2$$

式中: $\alpha_{32} = \pi a^2 (1 - R^2) A'$, $\beta_{32} = \frac{\pi a^2 B}{24\psi}\{(8\psi - 1) - R^2[6(4\psi - 1) + 8R(1 - 2\psi) - 3R^2]\}$, 其中 $A' = S_2 f_c$, S_2 为混凝土强度弱化后的量纲一因子。

则该阶段弹体的受力为

$$F_3 = F_{31} + F_{32} = (\alpha_{31} + \alpha_{32}) + (\beta_{31} + \beta_{32}) v^2 = \alpha_3 + \beta_3 v^2$$

由 $m\mathrm{d}v/\mathrm{d}t = -F_3$ 求解得到以下关系

$$x = x_2 + \frac{m}{2\beta_3}\ln\frac{\alpha_3 + \beta_3 v_2^2}{\alpha_3 + \beta_3 v^2} \tag{7}$$

$$v = \frac{1}{w_3}\tan[\arctan(w_3 v_2) - M_3(t - t_2)] \tag{8}$$

$$a = -\frac{\alpha_3}{m}\sec^2[\arctan(w_3 v_2) - M_3(t - t_2)] \tag{9}$$

式中: $w_3 = \sqrt{\frac{\beta_3}{\alpha_3}}$, $M_3 = \frac{\sqrt{\alpha_3\beta_3}}{m}$。

第 3 阶段结束后, $x_3 = x_2 + \frac{m}{2\beta_3}\ln(1 + w_3^2 v_2^2)$。

根据第 2、3 阶段的速度和受力连续性关系可求得第 2 阶段中的常数

$$c = \frac{\alpha_3 - F_1 + \beta_3 v_1^2 + \frac{2\beta_3}{m}F_1(x_1 - x_2)}{x_2 - \frac{\beta_3}{m}(x_1^2 - x_2^2)}$$

至此推导获得了新型头形弹体侵彻混凝土的理论模型。

4　理论预测与实验结果的对比

根据对解剖靶体的观测, 分析认为新型头形弹体的侵彻过程无开孔扩大效应, 因此小圆柱开孔半径 b_1 等于小圆柱半径 b。

文献[4]中根据实验结果拟合了侵彻次数与混凝土强度弱化量纲一因子的关系

$$S_n = S_1(-0.446\,5\ln n + 1) \tag{10}$$

式中: S_1、S_n 分别为第 1、n 次侵彻对应的混凝土强度量纲一因子, 即 $S_1 = S$。由式(10)得到混凝土强度弱化量纲一因子 $S_2 = 0.690\,5S_1$。但由于式(10)仅是实验数据的拟合, 需谨慎外推。本文中采用最小二乘法对本次实验数据进行拟合, 以获得混凝土强度弱化量纲一因子 S_2。

拟合实验弹 C3 对 9.0、28.4 MPa 混凝土靶的侵彻实验数据分别得到 $S_2 = 0.23S_1$ 和 $S_2 = 0.64S_1$。由于受侵彻数据所限, 因此下面理论分析时暂假设其他不同头形参数的新型头形弹体在侵彻过程中对相同抗压强度的混凝土的强度弱化规律相同。

图 5、图 6 为理论预测的速度-侵深和实验数据的对比。由图 6 可见, 对于 28.4 MPa 的混凝土, 实验弹 A 和实验弹 C3 的理论预测值与实验数据在低速段和高速段符合程度均较好。对于实验弹 C2, 在低速段其理论预估值与实验数据的符合程度也非常良好。

对于 9.0 MPa 的混凝土, 实验弹 A 的理论预测值在高速段偏低。实验弹 C3 的理论预测值则与实验数据符合较好。实验弹 B1 和 C2 的理论预测值在低速段与实验值较接近, 由于无高速段实验数据, 因此在高速段理论预估与实验的符合程度暂无法比较。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

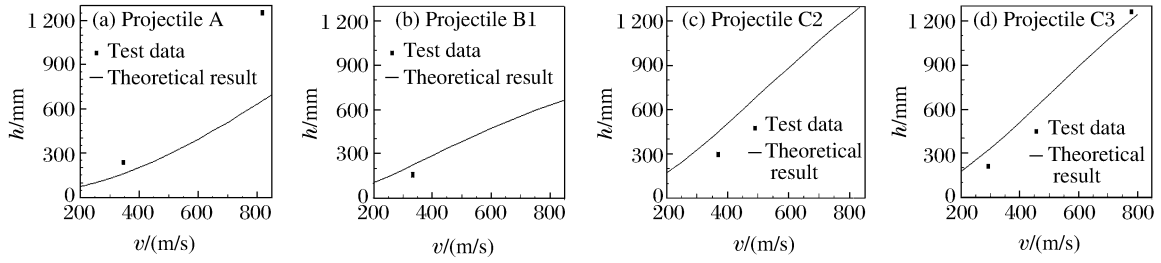

图 5 不同头形实验弹撞击速度-侵深关系(9.0 MPa 混凝土)

Fig. 5 Impact velocity vs penetration depth for the projectiles into concrete targets with the strength of 9.0 MPa

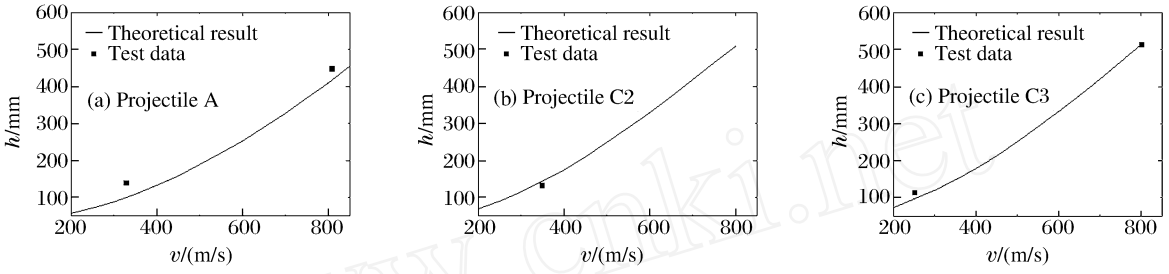

图 6 不同头形实验弹撞击速度-侵深关系(28.4 MPa 混凝土)

Fig. 6 Impact velocity vs penetration depth for the projectiles into concrete targets with the strength of 28.4 MPa

通过上述比较分析,可初步获得以下认识:(1) 对于 28.4 MPa 混凝土,理论预测结果与实验数据符合程度良好,可定性反映不同头形弹体的侵彻规律;(2) 对于 9.0 MPa 混凝土,理论预测结果与实验数据对不同头形弹体的符合程度出现一定的分散性(低速段和高段难以调和),但仍可基本定量反映不同头形弹体的侵彻规律。

5 讨 论

下面以新型头形弹体 C3 侵彻 28.4 MPa 混凝土为例,初步讨论混凝土强度弱化量纲一因子 S_2 和小圆柱开孔半径 b_t 对新型头形弹体侵彻性能的影响。

图 7(a)为在小圆柱开孔半径 b_t 等于小圆柱半径 b 时,不同混凝土强度弱化量纲一因子 S_2 条件下新型头形弹体的侵彻性能对比。由图可见,随着 S_2/S_1 的减小,弹体侵彻阻力随之降低,而弹体的侵彻性能则相应获得提高。图 7(b)为不考虑混凝土强度弱化时,不同小圆柱开孔半径 b_t 条件下新型头形弹体的侵彻性能对比。由图可见,随着头部小圆柱开孔直径的增大,弹体与混凝土介质的接触面积相应减小,弹体所受阻力降低,当开孔直径等于弹径时,弹体仅头部小圆柱与介质接触,弹体的侵彻性能将获得大幅度提升,这即是文献[1]所预期的最理想的侵彻方式。

因此,在侵彻过程中实现 S_2 的减小和 b_t 的增大是提高新型头形弹体性能的 2 个主要途径。

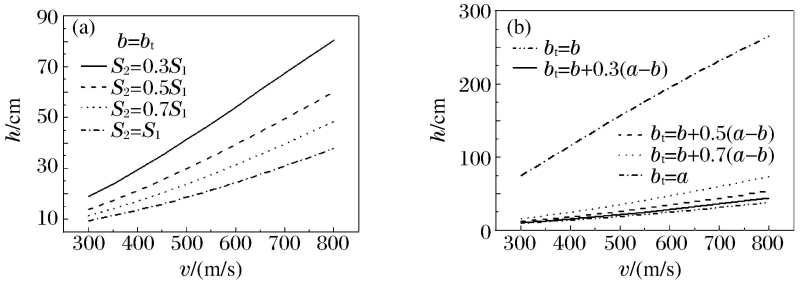

图 7 不同 S_2 和 b_t 时 C3 的撞击速度-侵深关系图

Fig. 7 Impact velocity vs penetration depth of projectile C3 into concrete in the case of S_2 and b_t

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

6 结 束 语

在实验研究的基础上,初步分析了新型头形弹体的侵彻过程和侵彻机理,提出了混凝土强度弱化量纲一因子 S_2 和头部小圆柱侵彻开孔半径 b_t,并基于空腔膨胀理论初步建立了新型头形弹体侵彻混凝土介质的理论分析模型。结果表明,对 28.4 MPa 混凝土,理论预测结果与实验数据具有较好的一致性。对 9.0 MPa 混凝土,理论预测结果与实验数据有一定偏差,但仍可基本反映新型头形弹体的侵彻规律。

此外,还初步探讨了提高新型头形弹体侵彻性能的 2 个途径,即在侵彻过程中实现 S_2 的减小和 b_t 的增大。

与陈小伟博士进行了很多有益的讨论,在此表示感谢。

参考文献:

[1] Mayersak J R. Kinetic energy cavity penetrator weapon[P]: US, US2004/0231552[R]. 2004-11-25. http://www.freepatentsonline.com/

[2] Forretal M J, Frew D J, Hanchak SJ, et al. Penetration of grout and concrete targets with ogive-nose steel projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 1996, 18(5): 465-476.

[3] Teland J A, Sjol H. Penetration into concrete by truncated projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30(4): 447-464.

[4] Gomez J T, Shukla A. Multiple impact penetration of semi-infinite concrte[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25(10): 965-979.

Penetration of cylindrical-nose-tip projectiles into concrete targets *

SUN Chuan-jie, LU Yong-gang, ZHANG Fang-ju, LI Hui-min

(Institute of Structural Mechanics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: Penetration experiments were conducted for several typical cylindrical-nose-tip projectiles (CNTP) into concrete targets with the compressive strengths of 9.0, 28.4 MPa. The penetration mechanism was elementarily obtained by observing the recovered projectiles and the post-test targets. Thereby, a dimensionless parameter S_2 was proposed to describe the target strength degradation and a parameter b_t was brought forward to picture the cylindrical penetration pore radius. And then, the two parameters were introduced into the penetration formula by Forrestal et al to develop a new theoretical model for the penetration of CNTP into concrete. For the 28.4-MPa-strength concrete, the theoretical predictions by the new model agree well with the experimental data. For the 9.0-MPa-strength concrete, the theoretical predictions do not accord well with the experimental data but can still reflect the penetration mechanism of CNTP. Finally, two approaches were put forward for the penetration improvement of CNTP by decreasing S_2 and increasing b_t.

Key words: mechanics of explosion; penetration resistance; penetration experiment; cylindrical-nose-tip; concrete targets; target strength degradation; cavity expansion theory

* Received 24 February 2009; Revised 10 April 2009

Corresponding author: SUN Chuan-jie, ballistic2000@sina.com

(责任编辑　曾月蓉)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net