

文章编号: 1001-1455(2010)01-0051-07

活性粉末混凝土基表面异形遮弹层的抗侵彻特性*

陈万祥, 郭志昆

(解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 为了探索新型抗钻地武器防护技术, 提出了一种由偏航层和基本层构成的活性粉末混凝土(reactive powder concrete, RPC)基表面异形遮弹层。采用 $\varnothing 57$ mm 半穿甲弹开展了初始速度 320~705 m/s 的弹道冲击试验, 获得了弹体破坏特征、弹体偏转角、最大侵彻深度、靶体破坏形态等试验结果, 并提出了弹体侵彻深度简化计算公式。研究表明, 由高强度、高韧性 RPC 材料构成的异形体可以显著削弱弹体侵彻威力。撞击时弹体均发生了不同程度的弯曲变形和破裂, 弹道明显偏转, 随着撞击速度的增大, 弹体偏转角先增大后减小, 当撞击速度为 505 m/s 时, 最大偏转角达到 61.4°。试验后的钢纤维 RPC 基本层没有出现大面积冲击弹坑和震塌现象, 裂缝浅而少, 保持了较好的完整性。计算结果与试验数据吻合较好, 验证了公式的合理性。

关键词: 爆炸力学; 抗侵彻; 弹道试验; 活性粉末混凝土; 偏转

中图分类号: O385; TB301

国标学科代码: 130·3530

文献标志码: A

精确制导钻地武器的迅猛发展对深地下坚固目标构成了严重威慑, 防护工程界正在积极探索新的防护措施。针对弹体偏转和破坏效应, 许多学者, 如 C. F. Austim 等^[1]、B. Rohani^[2-3]、M. D. Gelman 等^[4]、J. M. Underwood^[5]、刘瑞朝等^[6]、王明洋等^[7] 都进行过一系列研究。结果表明: 采用偏航措施或在普通防护结构中设置形状不规则的高强异形体, 非对称撞击力促使弹体发生弹道偏转和不同程度的弯曲破坏, 可有效地阻止钻地武器对结构的侵彻破坏。RPC 基表面异形遮弹层是一种新型偏航型复合遮弹层, 具有高强度、高韧性、表面硬度大以及便于伪装等优点。其基本思想: 一是采用高强度、高韧性的钢纤维活性粉末混凝土(reactive powder concrete, RPC)作为遮弹层基本层, 增大侵彻阻力; 二是依靠超高强度、高韧性的 RPC 半球(即异形体), 使来袭弹发生弹道偏转、弯曲变形甚至破裂, 达到削弱侵彻威力的目的; 三是采用陶瓷材料提高异形体的表面硬度, 同时避免电磁脉冲带来的负面效应。具有诱导来袭弹偏转功能的偏航型遮弹层的防护效能在很大程度上与弹体特征参数和异形体特征参数有关。其中弹体特征参数包括弹形、弹材、质量、长径比、撞击速度等; 异形体特征参数包括几何尺寸、强度、断裂韧性、分布形式等^[1,8]。弹体与异形体撞击问题属于高速撞击动力学问题, 弹体偏转和破坏的作用机理复杂, 受现有理论的限制, 弹体在表面异形遮弹层中的侵彻深度计算问题还没有完全解决, 有关的研究工作仍以试验研究为主^[7,9]。表面异形遮弹技术作为一种新的防护措施, 要研究其防护效能, 必须进行全面、系统的原型试验。试验不仅规模大, 而且耗资也大, 这显然是不现实的。在现有试验条件和相似理论支持下, 本文中拟对遮弹层进行缩比模型试验, 在给定弹形和弹材情况下, 研究不同速度的弹体侵彻特性, 研究结果为表面异形遮弹层的抗侵彻机理研究和工程应用提供参考。

1 试验设计

1.1 弹体

试验弹体为标准 $\varnothing 57$ mm 硬芯半穿甲弹, 弹长 456 mm, 长径比 $l/d=8.0$, 质心距 193 mm, 弹头长度 $l_r=103$ mm, 弹头曲率半径 $r=228$ mm, 弹头曲径比 $\varphi=4.0$, 弹体质量为 4.44 kg, 材料为 30CrMnSi, 布氏硬度为 241, 抗拉强度为 1 620 MPa, 屈服应力为 1 275 MPa, 弹体外形如图 1 所示。

* 收稿日期: 2008-12-02; 修回日期: 2009-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(50908228)

作者简介: 陈万祥(1977—), 男, 博士, 讲师。

1.2 靶体

试验共设计制作了6块材料、结构及尺寸完全相同的靶体,编号为T-1~T-6。靶体设计成圆形,尺寸为 $\phi \times h = 1\ 000\ \text{mm} \times 300\ \text{mm}$ 。在靶板中间呈正方形均匀布置5行5列由RPC球柱+陶瓷半球壳构成的偏航层,其中RPC半球直径为100 mm,陶瓷半球壳厚度为10 mm。RPC球柱抗压强度平均达到250 MPa;陶瓷抗压强度为3.9 GPa,弹性模量为355 GPa;钢纤维RPC(钢纤维体积掺量为6%)抗压强度为148 MPa。具体偏航层布置如图2所示,试验靶体如图3所示。



图1 试验弹体

Fig. 1 Experimental projectiles



图2 偏航层布置

Fig. 2 Scheme of yaw-inducing layer



图3 试验靶体

Fig. 3 Experimental target

1.3 试验装置

试验发射装置采用 $\phi 85\ \text{mm}$ 改装加农榴弹炮,炮口与靶体的距离为50 m,通过调整装药量,使弹体获得不同的速度。试验中,在距离加农榴弹炮炮口6 m处布置2个间距为10 m的铜丝网测速靶,时间由HG202A-III测时仪(计时精度为 $10^{-6}\ \text{s}$)测量。试验设计弹速范围为300~700 m/s,试验现场布置如图4所示。



图4 试验现场布置

Fig. 4 Scheme of experimental setup

2 试验结果与分析

2.1 弹体破坏特征及分析

试验弹体实测着靶速度为320~705 m/s,弹体破坏特征和偏转角如表1所示。弹体侵彻过程依次为撞击异形体、初始弹坑和隧道扩孔。在撞击过程中非轴向对称力作用使弹体产生攻角 δ (或方向角,即速度方向与弹体轴线之间的夹角)、角速度 ω 和偏转角 α 。在混凝土类靶体的斜撞击中,初始弹坑假定为沿轴线深度为 kd 的斜截锥形,并且有^[10-11]

$$k = (0.707 + l_r/d) \cos \alpha \quad (1)$$

式中: k 为斜侵彻靶体时初始弹坑沿轴线的深度因数, l_r 为弹头长度, d 为弹体直径, α 为弹体偏转角。根据试验6发炮弹的初始弹坑深度,按式(1)可近似估算相应的偏转角 α 。

表1 弹体破坏特征

Table 1 Failure characteristics of experimental projectiles

靶号	$v_0 / (\text{m/s})$	破坏特征	$\alpha / (^\circ)$
T-1	685	弹体弯曲,弹尖变形,后盖脱落,尾翼折断、破碎	33.7
T-2	705	弹体弯曲,弹头严重变形且破裂,后盖脱落,尾翼折断、破碎	28.1
T-3	505	弹体弯曲,弹体被卡在RPC球柱之间,后盖脱落,尾翼折断、破碎	61.4
T-4	373	弹体略微弯曲,弹头轻微变形,弹体被卡在RPC球柱之间,后盖脱落,尾翼折断、破碎	40.9
T-5	320	弹体形状完好,被垂直回弹2.7 m,尾翼折断、破碎	20.1
T-6	500	弹头磨损严重,后盖脱落,尾翼折断、破碎	0

注: v_0 为弹体撞击速度, α 为弹体最终偏转角,即弹体轴线与目标法线之间的夹角。

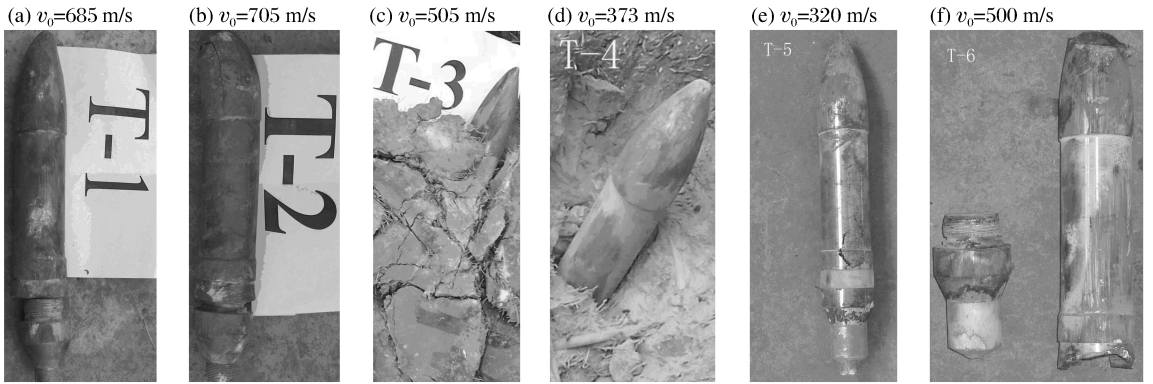


图5 试验后弹体

Fig. 5 Projectiles after ballistic experiments

研究表明^[12-13],弹体斜侵彻深度主要由2个量纲一物理量(即撞击函数 I 和弹头形状函数 N)、初始着角 β 及靶体量纲一厚度 χ 控制,若弹头曲径比 $\varphi \geq 4.0$,则侵深主要由撞击速度 v_0 、目标强度 f_c 和初始着角 β 控制。在弹体撞击目标初期,弹速下降较慢,但如果改变攻角和初始着角 β ,将使弹体侵彻阻力明显增大。此外,当撞击速度大于上限值,弹体将发生严重变形、不对称破坏等,导致侵彻能力显著下降^[12]。鉴于以上分析,采用陶瓷材料提高RPC半球的表面强度和硬度,增大弹体非对称撞击力,促使弹头弯曲变形,甚至破裂。同时,由于弹体与RPC基异形体撞击瞬间,弹体轴向速度被迅速分解,非对称撞击力对弹体质心产生巨大的惯性矩作用,弹体将产生攻角和角速度。从试验回收到的弹体(图5(a)~(e))发现,弹体后盖明显弯曲,后盖口呈椭圆形,为典型的惯性矩造成的弯曲破坏。弹体与异形体撞击后的入射姿态为含攻角和角速度的斜入射,且弹头出现了不同程度的变形破裂,进一步侵彻过程中非对称侵彻阻力使弹体不断偏转,最终表现为弹道弯曲,侵彻能力下降。由图5(f)可以观察到,当弹体由靶体背面入射时,未发现任何弹头弯曲迹象。由于应力波的自由面反射,弹体后端将产生反射卸载波(拉伸波),反射卸载波与人射波相互作用,材料响应阶段(微秒量级)的应力波作用将导致宏观的惯性效应,弹体后端由于拉应力作用发生拉伸断裂。

刚性弹假设下,较大的撞击速度对应较大的撞击力,因而弹体偏转角随撞击速度增大而增大^[13]。由表1和图5可以看出, $v_0 < 500$ m/s时,弹体偏转角随撞击速度增大而增大; $v_0 > 500$ m/s时,弹体偏转角随撞击速度增大而减小; $v_0 = 500$ m/s时,弹体最大偏转角达到 64.1° 。可见,在一定速度范围内($v_0 < 500$ m/s),弹体非对称撞击力随撞击速度增大而增大,最终偏转角也增大;当 $v_0 > 685$ m/s时,撞击速度将大于上限值(对于 $f_c = 250$ MPa的RPC,按文献^[12]方法计算得到弹体的撞击速度上限值为660 m/s),弹头发生严重弯曲变形和破裂,进入半流体撞击,这种现象随撞击速度增大而加剧,导致偏转角随撞击速度增大而减小。这就是弹体偏转角的理论值大于试验值的重要原因^[14]。

2.2 靶体破坏特征及分析

不同撞击速度下靶体破坏特征如表2所示。其中 H 为弹体侵彻深度, H_1 为迎弹面漏斗状弹坑深度, D_1 为迎弹面漏斗状弹坑直径。

由图6可以看到,T-1~T-5靶体中的弹道发生明显偏转,而T-6靶体中弹体垂直贯穿靶体。偏航层没有出现大面积异形体破碎或脱落现象,表明本遮弹层具有较好的整体性和较强的抗重复打击能力。由表2可以看出,弹体撞击速度大于685 m/s时,靶体被贯穿;当撞击速度为505、373和320 m/s时,对应的弹体侵彻深度分别为335、312和181 mm,表明侵彻深度并非随撞击速度增大而线性增加。这种规律显然是合理的,因为撞击速度越大,弹体撞击靶体表面时偏转程度越大,弹头弯曲变形越严重,必然导致侵彻阻力增大,相应的侵彻深度减小幅度也越大。以上清楚地说明了RPC基表面异形遮弹层由于其表面偏航层可以有效地诱导来袭弹产生攻角效应(攻角和角速度),并促使弹体发生不同程度的弯曲变形和弯曲破裂,进一步增大其在基本层中的侵彻阻力,导致弹道弯曲,侵彻威力被显著削弱,有效地提高了遮弹层的抗侵彻能力。

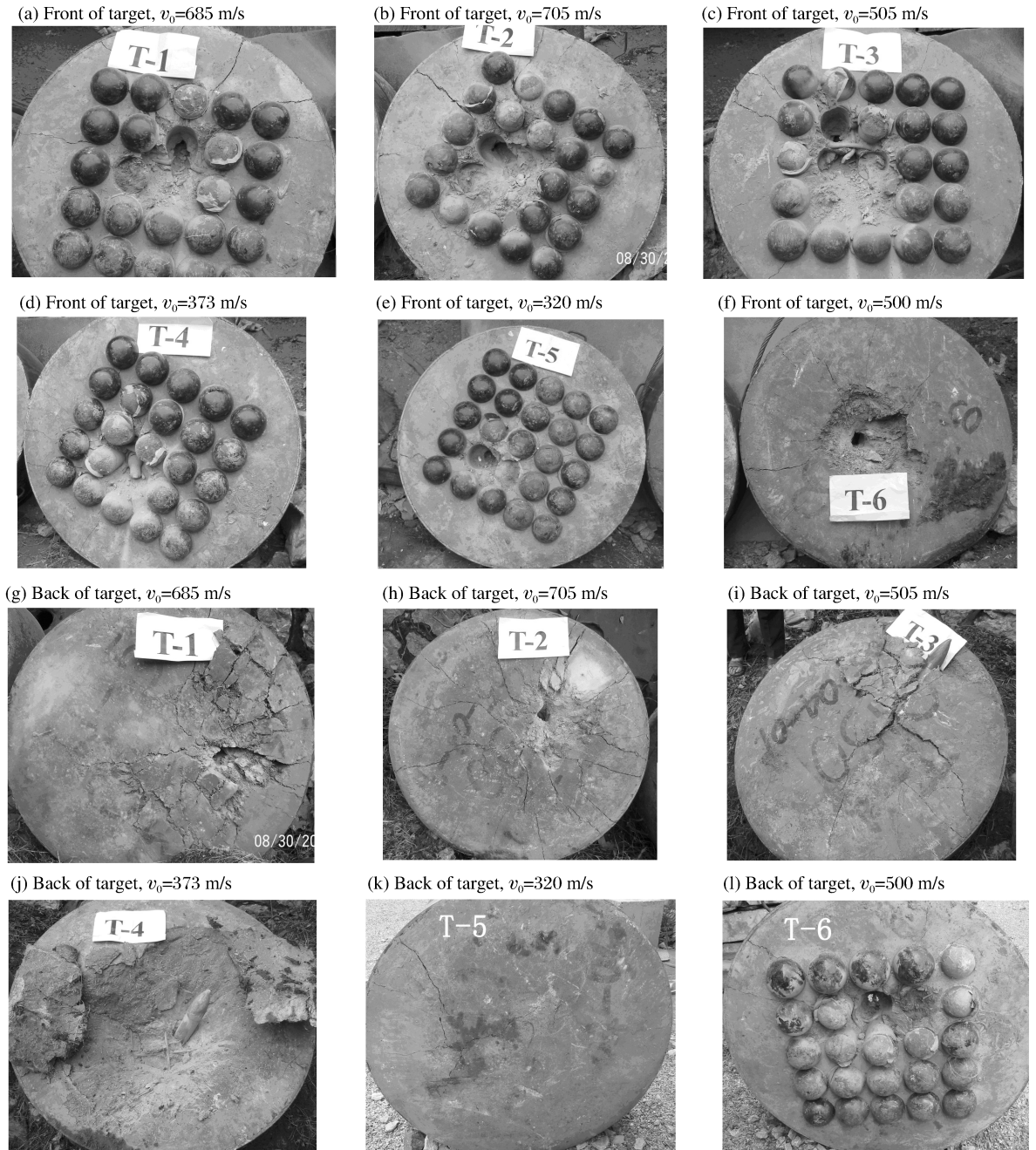


图 6 试验后靶体

Fig. 6 Targets after ballistic experiments

另外一个重要的现象是 RPC 基表面异形遮弹层与普通混凝土遮弹层的破坏形态有较大差别。弹体高速撞击混凝土类靶体后在弹着点附近产生高应力区,因弹体高速挤入介质而产生的剪切、挤压作用以及靶体的自由面效应,靶表面破碎的混凝土材料介质颗粒剥离而反向喷射,并产生一个漏斗状冲击弹坑;由于本遮弹层采用了高强度、高韧性的 RPC 材料作为基本层,有效地控制了靶表面混凝土破碎,试验中靶表面的冲击弹坑尺寸很小,局限于着靶点较近的椭圆形区域内,且只有当撞击速度较大时才有少量放射状裂纹由撞击点向靶边伸展,说明钢纤维 RPC 在承受弹体冲击时可有效阻止防护结构的开裂,具有良好的抗冲击剥落成坑性。

由试验宏观破坏现象还可以看出,靶体背面没有出现大面积震塌现象,只有当靶体被贯穿时才出现

较多放射状裂缝,靶体正面压缩漏斗坑与背面漏斗坑之间由侵彻孔互相贯通(如图 6(j)),而未被贯穿的靶体背面较完整,表明钢纤维 RPC 有效阻止了裂缝开展和相互连通,保持了靶体的完整性,大大降低了混凝土破坏碎片对结构内的人员和设备构成的威胁。靶板迎弹面弹坑直径小于背面漏斗坑直径,这主要是由 2 个漏斗坑的形成机理不同造成的:迎弹面弹坑主要是材料的压缩和剪切破坏造成的,而背面漏斗坑主要是靶板中的冲击压缩波反射形成拉伸波造成材料拉伸破坏形成的^[15]。

表 2 靶体破坏特征

Table 2 Failure characteristics of targets

靶号	$v_0/(m/s)$	H/mm	迎弹面漏斗状弹坑		破坏特征
			H_1/mm	D_1/mm	
T-1	685	贯穿	119	126	迎弹面弹坑尺寸较小,弹道偏斜,表面有 6 条裂纹; 背弹面有较多放射状裂纹,未出现震塌现象
T-2	705	贯穿	126	128	迎弹面弹坑尺寸较小,弹道偏斜,表面有 1 条明显裂纹; 背弹面有较多放射状裂纹,未出现震塌现象
T-3	505	335	68	122	迎弹面弹坑尺寸较小,弹道偏斜,表面有 2 条明显裂纹; 背弹面有较多放射状裂纹,未出现震塌现象
T-4	373	312	108	90	迎弹面弹坑尺寸较小,弹道偏斜,表面有 3 条裂纹; 背弹面有较多放射状裂纹,未出现震塌现象
T-5	320	181	134	65	迎弹面弹坑尺寸较小,弹道偏斜,表面有 1 条明显裂纹; 背弹面有 3 条明显的放射状裂纹,未出现震塌现象
T-6	500	贯穿	143	350	迎弹面有规则的漏斗状弹坑; 背弹面有 3 条裂纹,弹坑尺寸较小

3 弹体侵彻深度简化计算公式

在有关斜侵彻深度计算公式基础上^[16],通过引入偏航层偏转因数 λ 来综合考虑攻角和角速度对侵彻深度的影响

$$H = \lambda \frac{M}{d^2} \lambda_1 \lambda_2 K_q v_0 \cos\left(\frac{1+n}{2}\beta\right) \tag{2}$$

式中: H 为侵彻深度, M 为弹体质量, d 为弹体直径, λ_1 为弹形因数, λ_2 为弹径因数, K_q 为侵彻系数, v_0 为撞击速度, n 为偏转因数, β 为初始着角。

假定弹体垂直入射靶体, $M=4.44 \text{ kg}$, $d=0.057 \text{ m}$, $\lambda_2=0.94$, $n=2$, $K_q=2.65 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s/kg}$ 。撞击速度 v_0 为弹体与异形体撞击后对基本层的初始入射速度,初始着角 β 为弹体与异形体撞击后对基本层的初始偏转角,可按文献[14]方法计算得到;偏航层偏转因数 λ 需要考虑撞击速度、撞击姿态、弹头和异形体几何尺寸以及撞击概率等因素,具体分析可参考文献[17]。

通过引入偏航层偏转因数 λ 来综合考虑弹体与异形体撞击后所产生的攻角和角速度对斜侵彻深度的影响,计算结果与试验数据较接近,如图 7 所示。一般情况下,计算结果偏大。这是因为计算中假定弹体为刚性体,未考虑弹头弯曲变形和破裂对侵彻阻力的影响。事实上,若弹体发生弯曲变形,隧道轨迹也有不同程度的弯曲,且弯曲程度随弹体变形严重而加剧,弹体侵彻深度会明显减小,这就是高速撞击情况下理论计算值往往大于试验值的主要原因。

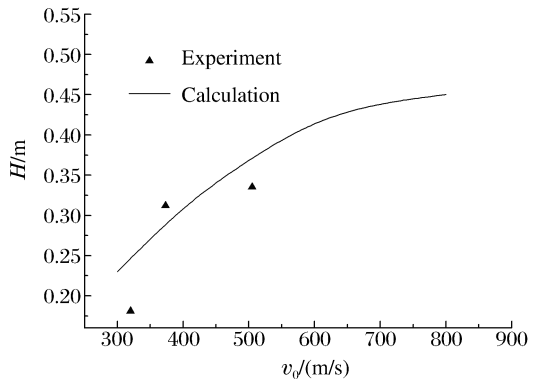


图 7 计算结果与试验数据的比较
Fig. 7 Calculational results compared with experimental data

4 结 论

提出了一种新型偏航型复合遮弹层,进行了弹道冲击试验。通过对试验现象和试验结果的分析可以看出:RPC基表面异形遮弹层可以有效地诱导来袭弹发生偏转和不同程度的弯曲变形,甚至破裂,弹道明显弯曲,弹体侵彻威力显著削弱,大大提高了遮弹层的抗侵彻能力。当 $v_0 < 500 \text{ m/s}$ 时,弹体偏转角随撞击速度增大而增大;而当 $v_0 > 500 \text{ m/s}$ 时,弹体偏转角随撞击速度增大而减小,最大偏转角达到 61.4° ,表明弹体偏转角并非与撞击速度呈线性关系。由于钢纤维RPC具有高韧性、高阻裂的特性,从根本上改变了普通混凝土的脆性特征,侵彻深度小,裂缝浅而少,且贯穿破坏后的整体性保持较好,可以有效地保障工事结构的安全。通过在已有的弹体斜侵彻深度计算公式中引入偏航层偏转因数 λ 来综合考虑弹体攻角效应的影响,提出了侵彻深度简化计算公式,计算结果与试验数据吻合较好。

参考文献:

- [1] Austim C F, Halsey C C, Clodt R L. Protection systems development[R]. Tyndall Air Force Base, Report ESL-TR-83-39, 1982.
- [2] Rohani B. Penetration of kinetic energy projectiles into rock-bubble/boulder overlays[R]. Waterways Experiment Station, 1987.
- [3] Rohani B. Shielding methodology for conventional kinetic energy weapons[R]. Waterways Experiment Station, 1987.
- [4] Gelman M D, Richard B N, Ito Y M. Impact of armor-piercing projectile into array of large caliber boulders[R]. Waterways Experiment Station, 1991.
- [5] Underwood J M. Effectiveness of yaw-inducing deflection grids for defeating advanced penetrating weapons[R]. Air Force Civil Engineering Support Agency, 1995.
- [6] 刘瑞朝,何满潮. 射弹侵彻中的攻角效应[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(1): 26-29.
LIU Rui-chao, HE Man-chao. Effect of attack angle on a projectile's penetration[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2003, 23(1): 26-29.
- [7] 王明洋,刘小斌,钱七虎. 弹体在含钢球的钢纤维混凝土介质中侵彻深度工程计算模型[J]. 兵工学报, 2002, 23(1): 14-18.
WANG Ming-yang, LIU Xiao-bin, QIAN Qi-hu. An engineering calculation method for the depth of penetration of projectile in steel fiber reinforced concrete embedded with steel spheres[J]. Acta Armamentarii, 2002, 23(1): 14-18.
- [8] Cargile J D, Cammins T R. Effectiveness of yaw-inducing bar screens for defeating low length to diameter armor-piercing[R]. Waterways Experimental Station, 1992.
- [9] 周布奎,陈向欣,唐德高,等. 单层紧密排列刚玉球砧侵彻特性试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(2): 173-177.
ZHOU Bu-kui, CHEN Xiang-xin, TANG De-gao, et al. An experimental study on anti-penetration characteristics of concretes shielded with single layer of tightly arrayed corundum spheres[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(2): 173-177.
- [10] Chen X W, Fan S C, Li Q M. Oblique and normal perforations of concrete target by rigid projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30(6): 617-637.
- [11] 陈小伟. 刚性弹对混凝土靶的斜/正穿甲和侵彻[R]. ZW-D-2003018. 绵阳:中国工程物理研究院总体工程研究所, 2003.
- [12] 陈小伟. 动能深侵彻弹的力学设计(I): 侵彻/穿甲理论和弹体壁厚分析[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(6): 499-505.
CHEN Xiao-wei. Mechanics of structural design of EPW (I): The penetration/perforation theory and the analysis on the cartridge of projectile[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(6): 499-505.
- [13] 陈小伟,张方举,杨世全,等. 动能深侵彻弹的力学设计(III): 缩比实验分析[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(2): 105-114.
CHEN Xiao-wei, ZHANG Fang-ju, YANG Shi-quan. Mechanics of structural design of EPW (III): Investigations on the reduced-scale tests[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(2): 105-114.

- [14] 陈万祥, 郭志昆, 钱七虎. 基于接触理论的弹体偏航机理[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2006, 7(5): 458-466.
CHEN Wan-xiang, GUO Zhi-kun, QIAN Qi-hu. Yawing mechanism of projectile based on contact theory[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2006, 7(5): 458-466.
- [15] Li Q M, Reid S R, Wen H M, et al. Local impact efforts of hard missiles on concrete targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 32(1-4): 224-284.
- [16] 纪冲, 龙源, 万文乾. 钢纤维混凝土抗侵彻与贯穿特性的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(2): 178-185.
JI Chong, LONG Yuan, WAN Wen-qian. On anti-penetration and anti-perforation characteristics of high strength steel fiber-reinforced concrete[J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(2): 178-185.
- [17] 陈万祥, 郭志昆, 邱艳宇, 等. 弹体在表面异形遮弹层中的侵彻深度简化计算公式[J]. 防护工程, 2008, 30(6): 41-46.
CHEN Wan-xiang, QUO Zhi-kun, QIU Yan-yu, et al. Simplified calculation formula of penetration depth for yaw-inducing bursting layer subjected to projectile impact[J]. Protective Engineering, 2008, 30(6): 41-46.

Anti-penetration characteristics of RPC shelter plates with irregular barriers on surfaces *

CHEN Wan-xiang, GUO Zhi-kun

(Engineering Institute of Corps of Engineers, PLA University of Science and Technology,
Nanjing 210007, Jiangsu, China)

Abstract: A reactive power concrete (RPC) shelter plate was proposed to develop a new protective technology for resisting penetration weapons. Ballistic experiments with the impact velocities of 320~705 m/s were carried out by using semi-armour-piercing projectiles with the diameter of 57 mm to investigate the anti-penetration capacities of RPC shelter plates with irregular barriers on their surfaces comprising yaw-inducing layers and basal plates. Some experimental results were obtained such as failure characteristics, deflexion angles and maximal penetration depths of projectiles, and failure modes of targets. And the simplified calculational formula for penetration depth was given. The penetration powers of the projectiles were weakened obviously by irregular barriers consisting of RPC with high strength and excellent toughness. Different buckling deformations and fractures occurred when projectiles impacted on irregular barriers. The trajectories were deflexed and penetration depths were reduced greatly. The deflexion angles of projectiles increased firstly and decreased subsequently with the increase of the impact velocity, the maximal deflexion angle was 61.4° in the case of 505 m/s impact velocity. There were not any impact craters with large size or any scabbing after ballistic experiments, and the integralities of targets were good for a small quantity of cracks. The calculational results are in good agreement with the experimental data, and the simplified formula is feasible.

Key words: mechanics of explosion; anti-penetration; ballistic experiment; reactive powder concrete; yaw

* Received 2 November 2008; Revised 27 March 2009

Supported by the National Natural Science Foundation of China (50908228)

Corresponding author: CHEN Wan-xiang, cwx_0806@sohu.com