DOI: 10.11883/1001-1455(2016)02-0253-06

蜂窝遮弹层抗弹丸侵彻实验研究*

王起帆[1,2],石少卿[1,2],王 征[1],孙建虎[1],储召军[1]
(1.后勤工程学院军事土木工程系,重庆 401311;
2.后勤工程学院岩土力学与地质环境保护重庆市重点实验室,重庆 401311)

摘要:为研究蜂窝遮弹层的抗弹丸侵彻性能,采用 15 mm 弹体对六边形单元蜂窝遮弹层结构进行了侵彻实验研究。实验结果表明,同钢筋混凝土遮弹层相比,蜂窝遮弹层的破坏仅发生在弹靶接触的六边形单元内,且破坏面积较小,同时弹体在侵彻蜂窝遮弹层过程中易发生偏航现象。应用应力波传播理论分析了实验结果,主要是六边形单元对其内的混凝土约束作用及其自身阻隔作用,使混凝土抗压强度和弹体在侵彻过程中受到的阻力增大,从而减小了弹体的破坏效应。

关键词:爆炸力学;侵彻;偏航;应力波;蜂窝遮弹层
中图分类号:O383 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

随着精确制导钻地武器打击精度的提高,侵彻能力逐步增强,这使防护工程面临着巨大的威胁[1]。遮弹层作为一种能提高防护工程生存能力的技术方法,引起了国内外防护专家的高度重视,相继研制出了如空心三棱柱遮弹层[2]、混凝土栅板遮弹层[3]、含高强 RPC 球柱的复合遮弹层[4]等许多遮弹层。目前,遮弹层材料、结构形式等研究成为当今防护工程研究的重要课题。石少卿等[5]依据贝壳珍珠层的结构及其增强机理研制了一种新型蜂窝遮弹层结构:以外部是六边形钢管、内部是混凝土的钢管混凝土为基本单元,多个单元钢管混凝土平行排列,且相互连接,形成了蜂窝状结构层[6],结构如图 1 所示。由于六边形钢管借助内填的混凝土增强了钢管的稳定性,而钢管内的混凝土借助钢管的约束作用,使混凝土处于三向受压状态,从而使核心混凝土具有更高的抗压强度和延性[7];另外可将 2 个以上结构层重叠组合成多层遮弹层结构,层与层应错开适当位置,交错布置,形成多层蜂窝遮弹层。本文中对单层蜂窝遮弹层的抗弹丸侵彻性能进行实验研究,结果表明同钢筋混凝土遮弹层相比,蜂窝遮弹层的破坏面积明显较小,且弹体发生了较明显的偏航现象。

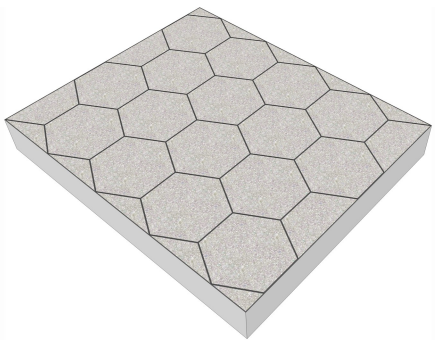


图 1 单层蜂窝遮弹示意图

Fig. 1 Schematic diagram of honeycomb layer

1 实 验

1.1 靶体

选用的混凝土抗压强度为 90 MPa;钢筋抗拉强度为 370 MPa;靶体厚度为 200 mm,直径为 640 mm。靶体有 2 类:(1)蜂窝遮弹层靶(honeycomb shelter target, HST),结构如图 2 所示,由 7 个六边形钢管混凝土单元组成,其中六边形钢管内边长 120 mm,高度 200 mm,钢板厚 4 mm;(2)钢筋混凝土靶(reinforced concrete target, RCT),在距离上下表



图 2 蜂窝遮弹层靶示意图

Fig. 2 Schematic diagram of HST

* **收稿日期**:2014-09-02;**修回日期**:2015-01-14
第一作者:王起帆(1979—),男,博士研究生,qifan_wang@126.com。

面 50 mm 处各设置 1 层规格为 70 mm×70 mm 的钢筋网,钢筋直径为 18 mm,如图 3 所示。

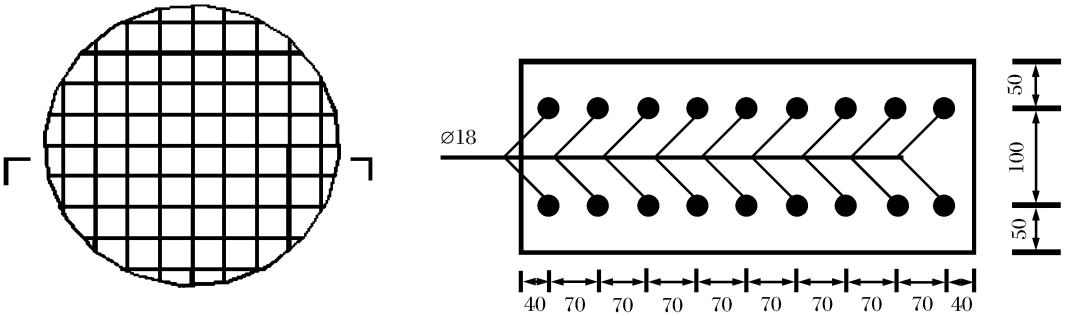


图 3 钢筋混凝土靶体示意图

Fig. 3 Schematic diagram of RCT

1.2 实验方法

弹体长度为 70 mm,中段直径为 10 mm,长径比为 7,距尾部端面 60 mm 长度内的直径为 15 mm,头部曲径比为 1。实验通过改变火药用量调整弹丸着靶速度,采用锡箔靶和电子测时仪测定弹丸着靶速度,实验现场布置见如图 4 所示。

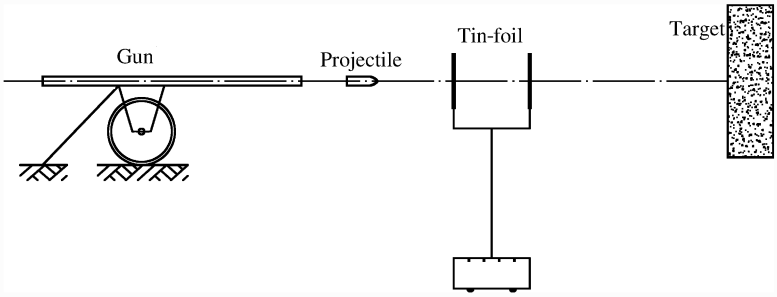


图 4 现场布置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the test layout

2 实验结果及分析

2.1 侵彻结果

对 2 种靶体进行侵彻实验,实验主要参数与结果,如表 1 所示,表中 v 为弹体速度,α 为弹体入射角,β 为弹体偏转角,H 为侵彻深度,其中正面为迎弹面,背面为背弹面。

表 1 实验数据

Table 1 Experimental data

No.	v/(m·s^{-1})	α/(°)	β/(°)	H/mm	靶体破坏描述
HST1	566.3	90	10	贯穿	正面:仅有 1 个六边形单元有漏斗坑,面积约 180 cm^2。背面:1 个单元有明显漏斗坑,周边单元局部混凝土被震落,面积约 500 cm^2。
HST2	681.7	90	18	贯穿	正面:仅有 1 个六边形单元有漏斗坑,面积约 190 cm^2。背面:1 个单元有明显漏斗坑,周边单元局部混凝土被震落,面积约 600 cm^2。
HST3	783.3	90	6	贯穿	正面:仅有 1 个六边形单元有漏斗坑,面积约 320 cm^2。背面:1 个单元有明显漏斗坑,周边单元局部混凝土被震落,面积约 650 cm^2。
RCT1	568.6	90	2	贯穿	正面:有明显漏斗坑,面积约 320 cm^2,有 7 条明显裂纹。背面:有明显漏斗坑,局部隆起,面积约 700 cm^2,有 3 条裂纹。
RCT2	696.6	90	10	贯穿	正面:有漏斗坑,面积约 450 cm^2,有 13 条裂纹,裂纹最宽 1 mm。背面:有明显漏斗坑,面积约 1 100 cm^2;有 10 条裂纹,裂纹最宽为 3 mm。

与钢筋混凝土靶体相比，钢管的存在会使弹体在侵彻过程中受到附加力的作用，从而使弹体更易发生偏航现象；同时六边形钢管对其内的混凝土约束作用，提高了混凝土抗压强度及其他性能，从而使蜂窝靶体的破坏面积较小；同时六边形单元把蜂窝靶体分为若干个独立单元，使各个单元之间的破坏相互影响小，因此破坏仅仅局限在弹靶接触的六边形单元内，在靶体上不会出现放射性裂缝，如图 5 所示。

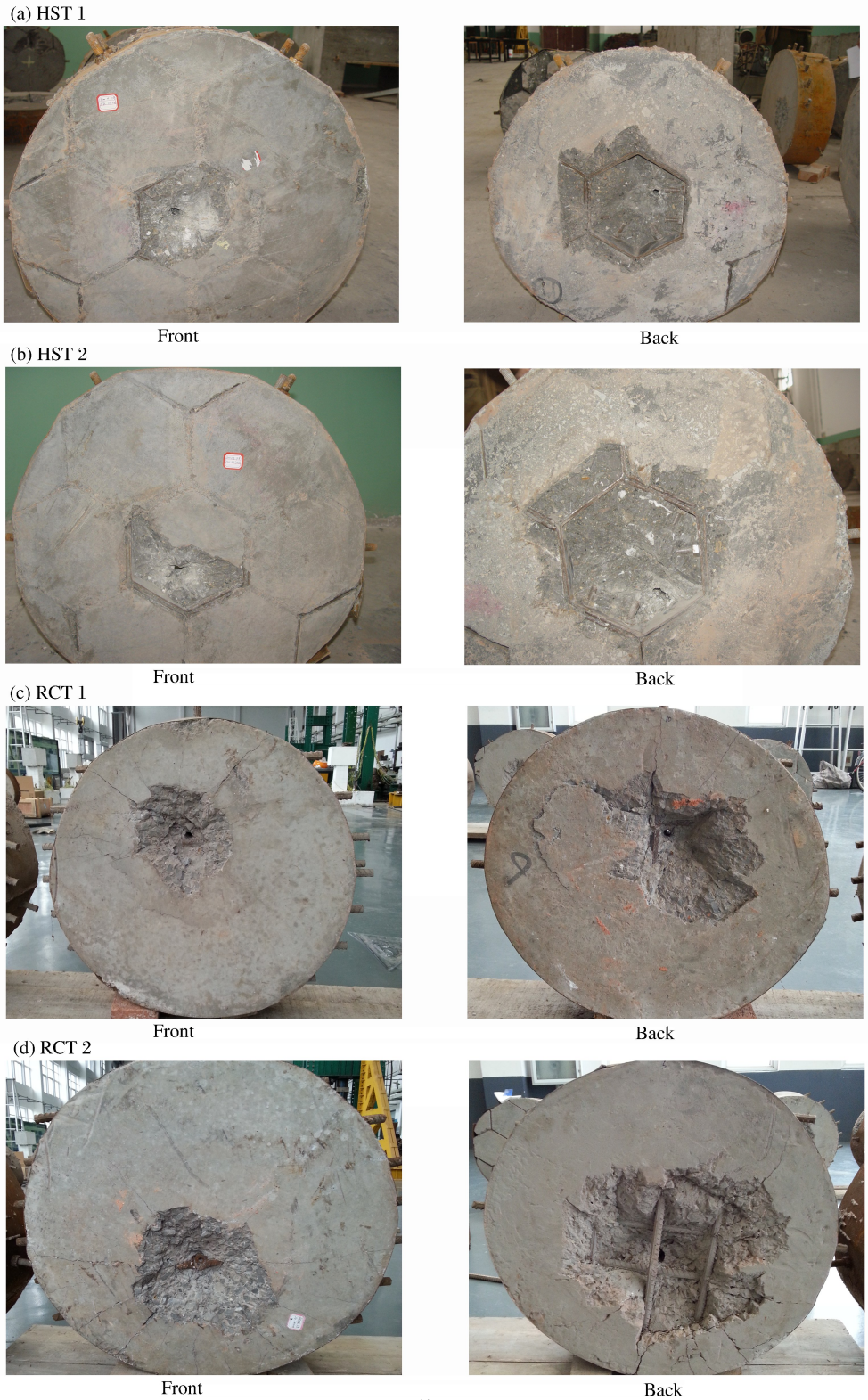


图 5　靶体破坏图

Fig. 5　Damage done to the targets

2.2 六边形单元抗侵彻分析

在冲击荷载的作用下,钢管混凝土结构能够很好地约束核心混凝土的变形以及裂缝的产生、发展,并且压缩波的出现也增强了核心混凝土抵抗冲击的能力,因此,钢管混凝土结构具有良好的动力性能以及抗冲击侵彻能力[8]。从应力波传播的角度来分析六边形蜂窝靶体抗侵彻实验结果。

在弹体侵彻六边形单元内的混凝土时,出现的应力波将以波阵面形式在构件中传播。根据应力波有关理论[9],应力波在 2 种介质界面处会产生反射波和透射波,同时应力波的入射波和反射波又遵循叠加原理。由于钢的介质密度大于混凝土的介质密度,反射波以压缩波的形式出现,所以混凝土又会受到 1 个压缩波的作用,这将提高混凝土的抗压强度及变形能力。从实验结果可以发现,在弹体速度相差不大时,蜂窝结构靶体的破坏面积都小于钢筋混凝土靶体的破坏面积,例如图 5(a)中正面破坏面积为 180 cm^2,而图 5(b)中正面破坏面积达 320 cm^2;在弹体侵彻过程中,弹体表面也会受到 1 个压缩波的作用。如果在弹体侵彻时弹着点不处于六边形单元中心的位置,这时弹体会受到不对称力的作用。当射弹的速度增大,产生的冲击波就变强,在界面处反射的压缩波幅值就高,不对称力就会越大,弹体偏航角就会越大。在侵彻 HST1 和 HST2 时弹着点都离六边形单元中心远,弹体速度从 566.3 m/s 增大到 681.7 m/s 时,弹体偏航角从 10°增大到 18°;当弹体速度为 783.3 m/s 弹体偏航角反而变小为 6°,这主要与弹着点处于六边形单元中心附近的有关。在侵彻钢筋混凝土靶体时,弹体偏转角较小,当弹体速度为 568.6 m/s 时,弹体偏航角为 2°;当弹体速度为 696.6 m/s 时,弹体偏航角为 10°,从图 5(d)靶体正面图可以看到,弹体恰好命中在钢筋上,这使弹体偏转角增大。从实验结果及分析可以看出,在侵彻蜂窝结构靶体时,弹体更易发生偏航现象。

2.3 蜂窝结构抗侵彻分析

蜂窝结构是由六边形钢管混凝土单元组合而成的。根据分析可知[6],当弹体以速度 v 垂直侵彻蜂窝遮弹层的六边形钢管混凝土构件时,会产生 1 个大小为 σ_n 的压缩波 σ_1;压缩波 σ_1 遇到钢管(界面 B 处)时,反射 1 个大小为 $0.63\sigma_n$ 的压缩波 σ'_{11},同时还向钢管中透射 1 个大小为 $1.63\sigma_n$ 的压缩波 σ_{21};透射波 σ_{21} 将继续前进并到达钢管与另一块混凝土的界面 C 处,在界面 C 处反射 1 个压缩波 σ'_{21},同时还向混凝土中透射压缩波 σ_{31};反射波 σ'_{21} 遇到界面 B,有 σ'_{12} 透过界面 B 返回第 1 块混凝土中,同时产生反射波 σ_{22} 再向界面 C 传播。所产生的透射波将继续前进并到达钢管与另一块混凝土的界面,反射与透射现象再次出现。这次前后介质的阻抗比变为上次阻抗比的倒数,如图 6 所示,图中 AB 和 CD 部分为混凝土,BC 部分为钢管。

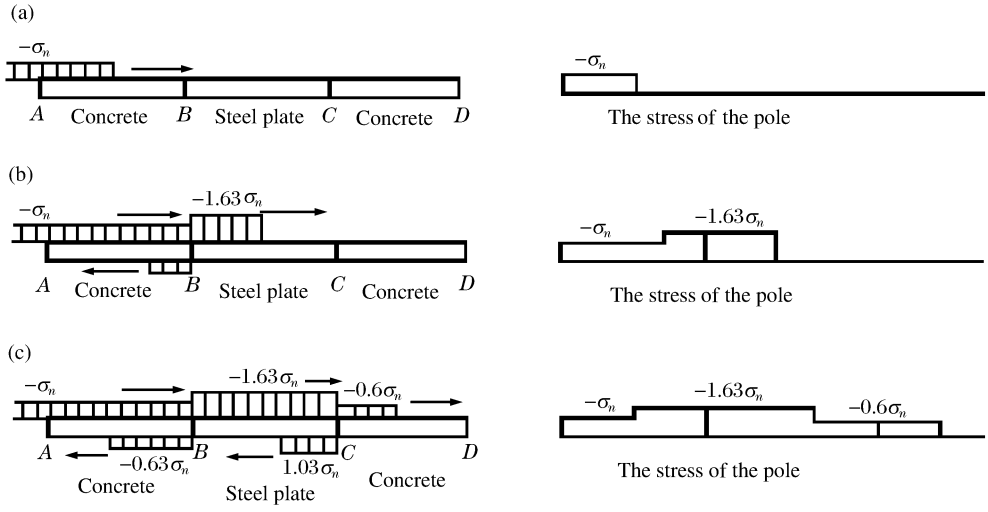


图 6 应力波在 2 种介质分界面上的传播

Fig. 6 Propagation of the stress wave at the interface of the two germplasm

假设六边形钢管的厚度为 h，则当时间 $t=\frac{h}{c^2}$（其中 c 为波在介质中的传播速度），这一透射应力波到达界面，产生反射应力波 σ'_{21} 以及透射入另一块混凝土中的 σ_{31} 为：

$$\begin{cases}\sigma'_{21}=\dfrac{A_1-A_2}{A_1+A_2}\sigma_{21}=-0.63\sigma_{21}\\ \sigma_{31}=\dfrac{2}{1+A_2/A_1}\sigma_{21}=-0.37\sigma_{21}=-0.6\sigma_{\mathrm{n}}\end{cases}\tag{1}$$

式中：$A_1=\rho_1 c_1$，$A_2=\rho_2 c_2$。

反射波 σ'_{21} 在 $t=\frac{h}{c^2}$ 时遇到界面 B，有 σ'_{12} 透过界面 B 返回第 1 块混凝土中，同时反射 σ_{22} 再向界面 C 传播，由于阻抗比没有发生变化，则有

$$\sigma_{22}=-0.63\sigma'_{21}=(-0.63)^2\sigma_{21}\tag{2}$$

图 7 所示为通过钢管后应力波的变化。由图 7 可以发现，透过界面 C 的应力每隔 $t=\frac{h}{c^2}$ 时间便增加一部分，而且由式(2)可以看出，进入第 2 块混凝土中的应力是按等比例增加的。从理论上分析，经过无穷次在钢管中两端界面上反射与透射之后，进入第 2 块混凝土中的压缩应力波应该会等于射弹在第 1 块混凝土中产生的压缩波 σ_{n}。然而在实际情况中的应力波也并非理想的弹性波，在传播过程中有衰减。因此，有了钢管的阻隔作用，射弹产生的压缩波经过钢管之后除了升压时间增长之外，其峰值压力也会减弱，这就使远处的混凝土不易发生破坏。

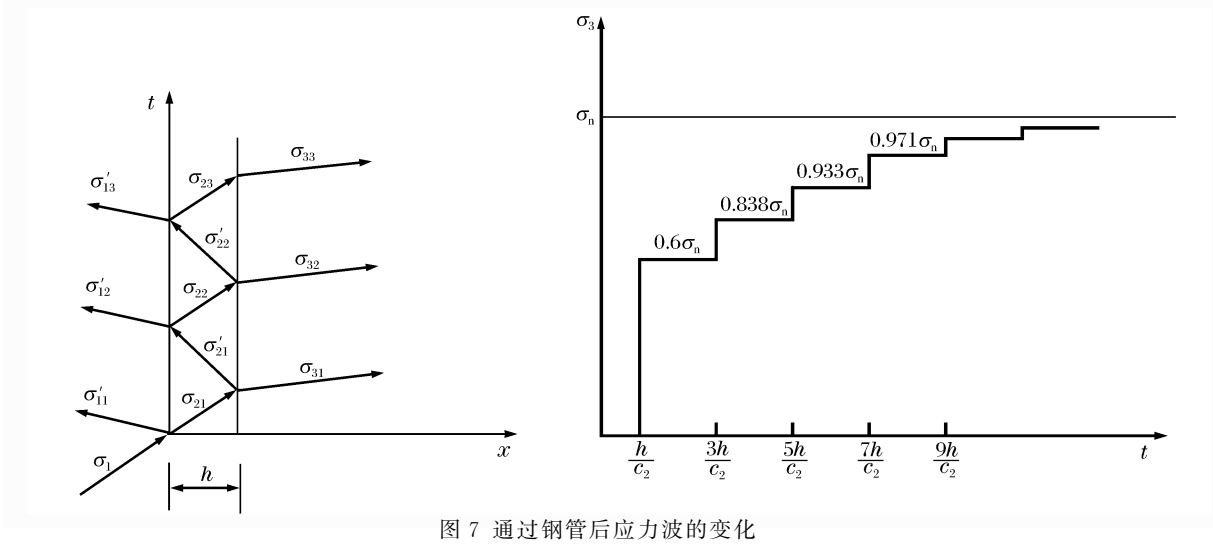


图 7　通过钢管后应力波的变化

Fig. 7　The change of stress wave after passing through the pipes

在实验中，蜂窝结构靶体正面混凝土的破坏都发生在弹靶接触的六边形单元内，其他单元内的混凝土都没有发生破坏；靶体背面混凝土的漏斗坑破坏也局限在弹靶接触的六边形单元内，其他六边形单元内的混凝土基本上没有发生破坏。而钢筋混凝土靶体内混凝土的破坏除了在弹靶接触的区域内有漏斗坑外，在整个靶体上都有多条放射性裂缝存在。因此有了六边形单元的阻隔作用，蜂窝结构靶体的混凝土破坏范围大大减小。

3　结　论

(1)相对钢筋混凝土靶体，在侵彻蜂窝靶体过程中，弹体更易发生偏航现象，偏转角的大小与弹体速度、弹着点等有关。

(2)六边形单元提高了其内部的混凝土抗压强度及变形能力，蜂窝结构靶体的混凝土破坏面积较钢筋混凝土靶体的混凝土破坏面积小。

(3)蜂窝靶体由若干个六边形单元组成,同时由于六边形单元的阻隔作用,蜂窝结构靶体的破坏范围小于钢筋混凝土靶体的破坏范围。

参考文献:

[1] 方秦,柳锦春. 地下防护结构[M]. 北京:中国水利水电出版社. 2009.

[2] 陈得兴. 层状遮弹层研究论证报告[R]. 总参工程兵科研三所,1995.

[3] Underwood J M. Effectiveness of yaw-inducing deflection grids for defeating advanced penetrating weapons[R]. Air Force Civil Engineering Suport Agency, 1995.

[4] 王起帆,郭志昆,田强,等. 含高强 RPC 球柱的复合遮弹层偏航试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2009,5(5):972-975.
Wang Qifan, Guo Zhikun, Tian Qiang, et al. Experimental study on anti-penetration capabilities of a composite shelter of RPC Pummel on surface[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009,5(5):972-975.

[5] 石少卿,刘颖芳. 蜂窝状钢管约束混凝土防护结构:ZL03233831.7[P]. 2004.

[6] 石少卿,王起帆,刘颖芳,等. 仿生蜂窝遮弹层抗侵彻机理及数值模拟研究[J]. 防护工程,2013(4):45-49.
Shi Shaqing, Wang Qifan, Liu Yingfang, et al. An analysis of anti-penetration characteristics of honeycomb shelter and its numerical simulation[J]. Protective Engineering, 2013(4):45-49.

[7] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京:人民交通出版社,2003.

[8] 王礼立. 应力波基础[M]. 2 版. 北京:国防工业出版社,2010.

[9] 石少卿,黄翔宇,刘颖芳,等. 多边形钢管混凝土短构件在防护工程中的应用[J]. 混凝土,2005(2):95-98.
Shi Shaoqing, Huang Xiangyu, Liu Yingfang, et al. Application of polygonal short steel tube filled with concrete on defense work[J]. Concrete, 2005(2):95-98.

Experimental study on penetration-resistance characteristics of honeycomb shelter

Wang Qifan[1,2], Shi Shaoqing[1,2], Wang Zheng[1],
Sun Jianhu[1], Chu Zhaojun[1]

(1. *Department of Military Civil Engineering, Logistical Engineering University of PLA, Chongqing* 401311, *China*;
2. *Chongqing Key Laboratory of Geomechanics & Geoenvironment Protection, Logistical Engineering University of PLA, Chongqing* 401311, *China*)

Abstract: To study the hexagonal honeycomb shelter's penetration-resistance performance, a series of experiments were done using a kind of projectile with a diameter of 15 mm. Compared with the steel reinforced concrete shelter, the penetration damage done to the honeycomb shelter occurs inside the hexagonal component element, the damaged area is relatively smaller, and the angle of the yaw in the honeycomb shelter is larger than the one found in the steel reinforced concrete shelter. Analyzing the experimental results based on the theory of the stress wave propagation, we studied the mechanism of the shelter's strength enhancement and found that, due to the steel pipe's restriction and counter-check, the compressive strength of the concrete and the resistance of the projectile were amplified in the process of the projectile's penetration, thus reducing the projectile's damaging effect on the honeycomb shelter.

Key words: mechanics of explosion; penetration; yaw; stress wave; honeycomb shelter

(责任编辑 王易难)