

钢管约束混凝土抗多发打击试验*

蒋志刚¹, 万帆^{1,2}, 谭清华¹, 刘飞¹, 宋殿义¹

(1. 国防科技大学 指挥军官基础教育学院, 湖南 长沙 410072;

2. 国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:为研究钢管约束混凝土抗多发打击性能,进行了12.7 mm穿甲弹多发打击钢管约束混凝土厚靶试验,得到靶的损伤模式和侵彻深度,并建立重复打击侵彻深度预测公式。结果表明:厚度为300 mm的小直径钢管约束混凝土靶能够有效防御3发12.7 mm穿甲弹的重复打击,第二、第三发较前一发侵彻深度的增幅分别小于20%和10%;重复打击侵彻深度预测公式与试验吻合较好。研究结果可为钢管约束混凝土防枪弹结构和遮弹层结构的研究提供参考。

关键词:约束混凝土;侵彻试验;多发打击;穿甲弹

中图分类号:O383;TB33 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2016)03-117-07

Multi-hit experiments of steel-tube-confined concrete targets

JIANG Zhigang¹, WAN Fan^{1,2}, TAN Qinghua¹, LIU Fei¹, SONG Dianyi¹

(1. College of Basic Education, National University of Defense Technology, Changsha 410072, China;

2. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To study the multi-hit performance of steel-tube-confined concrete, experiments of thick steel-tube-confined concrete targets normally impacted by 12.7 mm armor piercing projectile were carried out, the damage modes and the depth of penetration were obtained, and the formula for multi-hit depth of penetration was established. The results show that: steel-tube-confined concrete targets of 300 mm in thickness can effectively resist armor piercing projectile for 3 times, and the penetration depth increment for the second and third impacts to their former impact are less than 20% and 10%, respectively; the formula for multi-hit penetration depth is in good agreement with that of experiment. Results are beneficial to the studies of anti-bullet structures and bursting layer structures of steel-tube-confined concrete.

Key words: confined concrete; penetration experiments; multi-hit; armor piercing projectile

设置遮弹层是地下国防工程抗钻地弹的重要措施^[1]。随着钻地弹技术的发展,地下国防工程必须考虑抗钻地弹重复打击^[2],地面工事和重要设施(如核电站和重要建筑物)的混凝土防护结构必须考虑防御枪弹和爆炸破片重复打击。国内外对钢筋混凝土、钢纤维混凝土、高强混凝土和高性能混凝土抗弹丸一次打击的性能进行了大量研究^[3-8],表明配置钢筋和掺加纤维不能有效减小混凝土靶的侵彻深度,而提高混凝土强度虽然可减小侵彻深度,但由于混凝土脆性增大,因而弹丸一次打击下的损伤范围也会增大。钢管约束混凝土靶由于钢管对混凝土的约束作用,在弹丸侵彻过程中混凝土主要处于受压状态,从而侵彻阻力增大,裂纹减少,且钢管可以限制靶的损伤范围^[9]。为了将钢管约束混凝土应用于防御枪弹

和爆炸破片的防护结构,并拓展到抗钻地弹的遮弹层结构,必须对钢管约束混凝土抗多发打击性能进行系统研究。目前,关于混凝土抗弹丸多次打击性能的研究还很少。Gomez等^[10]较早进行了弹丸重复打击半无限混凝土靶试验和侵彻深度预测模型研究。最近,赖建中等^[11-13]开展了超高性能混凝土抗重复打击试验研究,并改进和拓展了文献^[10]侵彻深度预测模型;Wu等^[14]进行了含粗骨料的超高性能钢纤维混凝土抗重复打击试验。甄明等^[15]首次进行了12.7 mm钢芯穿甲枪弹单发和多发打击小直径钢管约束混凝土厚靶试验,结果表明:与半无限混凝土靶相比,钢管约束混凝土靶单发打击侵彻深度减小了15%左右,且其具有优良的抗多发打击性能。但是,文献^[15]仅进行了一种规格钢管(壁厚3.5 mm、外径

* 收稿日期:2015-07-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51308539)

作者简介:蒋志刚(1961—),男,湖南资兴人,教授,博士,硕士生导师,E-mail:13508489165@163.com

140 mm)的约束混凝土靶试验,且多发打击试验数量较少。

1 侵彻试验结果

侵彻试验在国防科学技术大学防护工程实验室进行,试验装置和方法同文献[15]。试验原理示意图如图 1 所示。

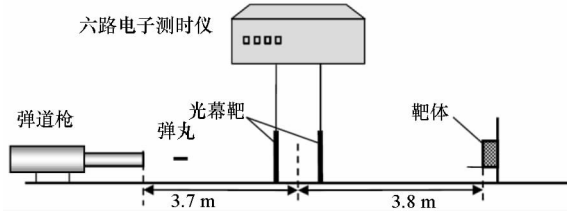


图 1 侵彻试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram for setups of penetration experiment

试验采用 12.7 mm 钨芯穿甲弹,如图 2 所示。弹丸重 47.4 ~ 49 g,长 59.5 mm;钨芯重 19.7 g,长 34.3 mm,直径 7.5 mm。弹丸出口速度 810 ~ 830 m/s。

靶体安装时使用了水平仪和瞄准镜,以确保弹丸正入射。试验共进行了 3 种规格钢管共 10 个小直径钢管约束混凝土厚靶的多发打击,如表 1 所示,其中 6 个靶(M1#, M3#, M4#, M6#, M7#和 M8#)为 2 发打击,3 个靶(M2#, M5#和 M9#)为 3 发打击,1 个靶(M10#)为 4 发打击。所有靶厚度



图 2 弹丸结构组成

Fig.2 Components of projectile

为 300 mm,钢管材料为 Q235 钢。混凝土无粗骨料,立方体和棱柱体抗压强度分别为 57.1 MPa 和 35.8 MPa,密度为 2140 kg/m³,配合比和基本力学性能试验详见文献[16]。表 1 中,第 3,4,5 栏中的数据按发次对应于第 1/2/3/4 发,如 M1#数据对应于第 1 发和第 2 发;侧面钢管发生鼓包或穿孔时(如图 3 所示),侵彻深度为鼓包或穿孔中心到靶正面(迎弹面)的距离;弹孔偏心 Δd 为每发打击后近似测量的弹孔中心与靶中心距离。图 4 给出了所有靶多发打击后的正面损伤情况,其中 M2#和 M6#弹坑体积比其他靶大得多,这可能与混凝土浇筑质量有关。除 M2#背面被第 3 发击穿外,其余靶背面混凝土没有损伤,其中 M5#和 M9#防住了 3 发重复打击。图 5 为 M9#第 1、第 3 发打击后正面和背面的情况。M2#被第 3 发击穿的原因除混凝土浇筑质量外,还可能与钢管直径(140 mm)较大而壁较薄(3.5 mm)以及第 2、第 3 发弹道重合等因素有关。

表 1 侵彻试验结果

Tab.1 Results of penetration test

编号	钢管规格/mm 外径/壁厚	撞击速度/ (m/s)	弹孔偏心 Δd/ mm	侵彻深度/ mm	靶的损伤情况描述	
					侧面钢管	背面混凝土
M1#	140/3.5	815.3/811.4	19.6/10.2	193.6/236.2	第 2 发鼓包	无损伤
M2#	140/3.5	823.4/820.0/816.7	27.0/16.5/17.2	197.8/198.5/300	第 2 发穿孔	第 3 发击穿
M3#	114/4.5	未测到/822.7	4.0/10.2	204.7/243.8	无损伤	无损伤
M4#	114/4.5	817.0/816.7	32.0/18.0	213.2/175.0	第 2 发穿孔	无损伤
M5#	114/4.5	822.0/827.1/812.7	12.2/16.3/12.0	201.5/216.8/169.9	无损伤	无损伤
M6#	114/3.5	817.0/826.8	21.2/12.5	225.3/262.8	无损伤	无损伤
M7#	114/4.5	826.4/827.3	10.0/7.5	203.5/227.5	无损伤	无损伤
M8#	114/4.5	825.6/826.4	11.3/10.4	154.1/237.5	第 1 发穿孔	无损伤
M9#	114/4.5	818.2/824.4/820.6	10.4/8.6/9.8	127.0/217.6/238.4	第 1 发鼓包	无损伤
M10#	114/4.5	822.2/821.7/ 816.5/824.8	22.4/3.4/ 4.6/4.8	180.0/192.4/ 215.6/187.0	第 1 发穿孔 第 2,4 发鼓包	无损伤

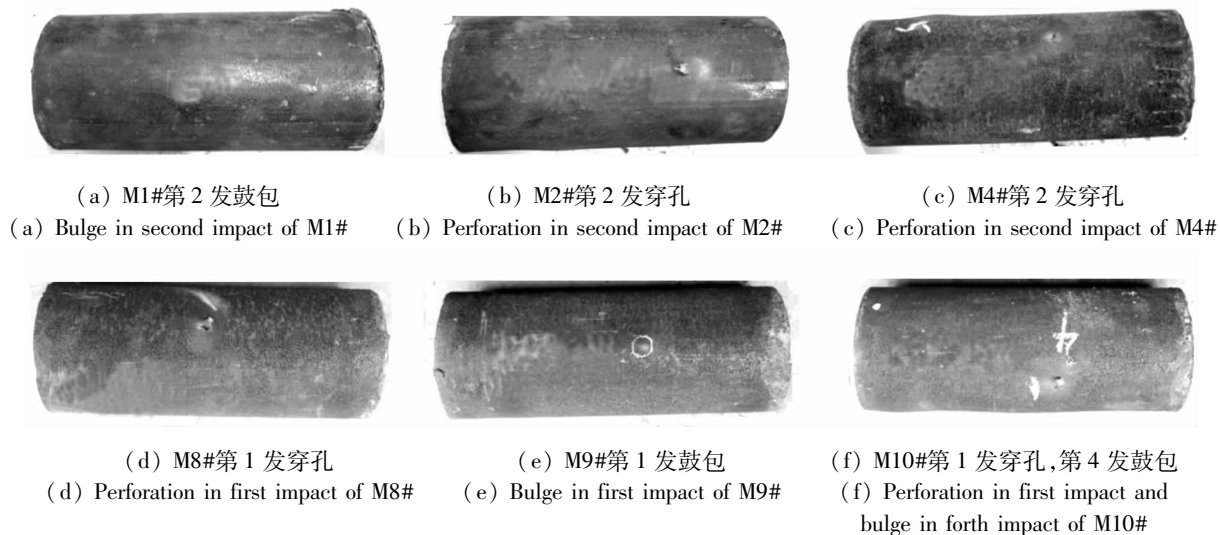


图3 侧面钢管鼓包和穿孔

Fig. 3 Bulge and perforation on the lateral face of steel tube

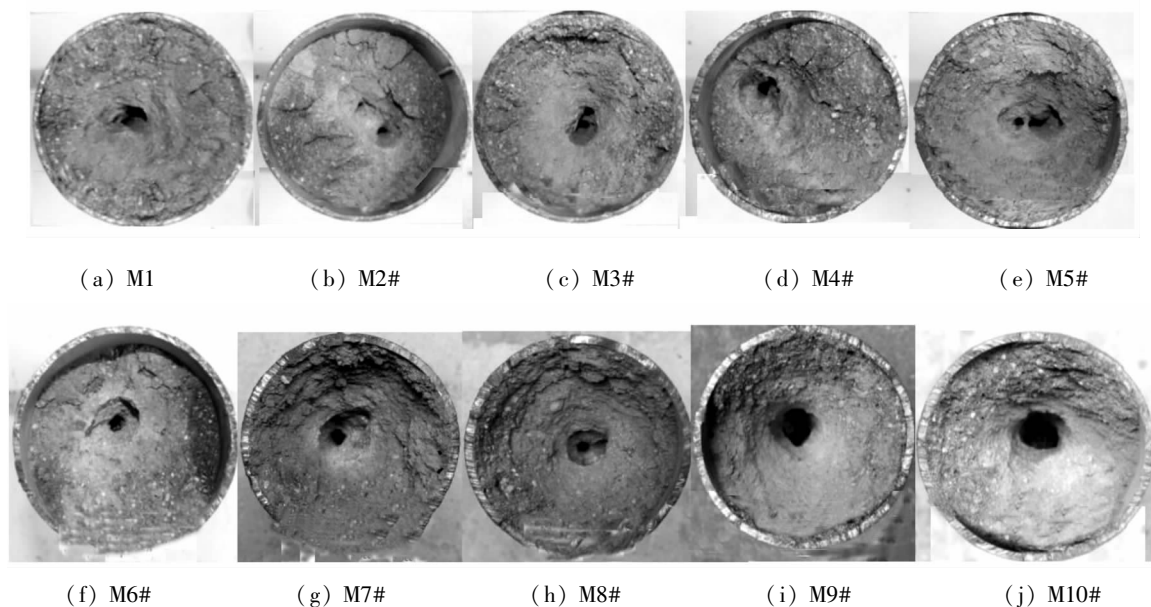


图4 多发打击后靶正面损伤

Fig. 4 Damage at the front face after multi-hit

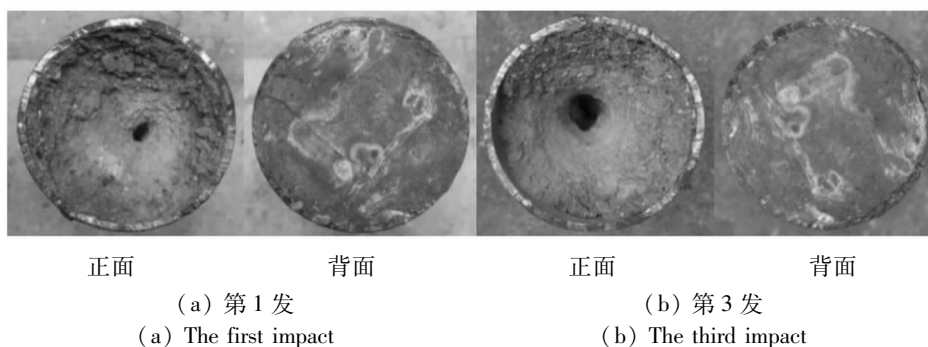


图5 M9#的正面和背面

Fig. 5 Front and rear face of M9#

2 试验结果分析

2.1 损伤模式

由表 1 和图 3~5 可知:

1) 所有靶正面混凝土产生了明显的漏斗状弹坑。弹孔偏心 Δd 较大时(如 M2#, M4#, M6#), 弹坑明显不对称, 偏心侧深度较大; 弹孔偏心相对较小时(如 M3#, M7#, M8#), 弹坑基本对称。因多发打击的交叉作用, 弹坑底部弹孔直径比单发打击大。2 发打击下, 6 个试件 M1#, M3#, M4#, M6#, M7# 和 M8# 均在弹坑底部形成了一个较大的弹孔; 3 发打击下, M9# 只有一个弹孔, M2# 和 M5# 有两个弹孔, 其中 M9# 的 3 发, M2# 的第 2 发和第 3 发, 以及 M5# 的第 1 发和第 3 发弹着点基本重合; 4 发打击下, M10# 在迎弹面形成了一个较大的弹孔。

2) 部分靶弹道偏转严重, 导致侧面钢管发生

了鼓包或穿孔。解剖靶后发现大部分弹芯的弹道发生了不同程度的偏转, 图 6 为典型的弹道剖面。可见: M1#, M4# 和 M7# 的两弹弹道均发生了偏转, 两弹的弹道不重合, 第 2 发弹的弹道偏转比第 1 发大, 弹芯撞击钢管使其产生鼓包(M1#)或穿孔(M4#); M3# 两弹弹道重合, 均发生了偏转, 而第 2 发弹撞击第 1 发弹后弹道发生改变, 弹芯断裂; M5# 3 弹弹道重合, 均有偏转, 第 2 发弹撞击第 1 发弹后弹道发生改变, 而第 3 发弹弹芯撞击第 1 发弹弹芯后断裂。弹芯弹道偏转的根本原因是弹芯在侵彻过程中受到非对称作用, 可能主要包括: 前一发弹打击造成的混凝土损伤不对称, 使得后一发弹受到非对称作用; 后一发弹弹芯撞击前一发弹弹芯而产生的非对称撞击力; 弹丸着靶姿态非正入射或弹丸钢套、铅套和铜皮与弹芯分离时对弹芯产生非对称作用, 如图 5 中 M9# 第 1 发的弹孔明显非对称; 弹着点偏心和混凝土材料不均等因素产生的非对称作用。

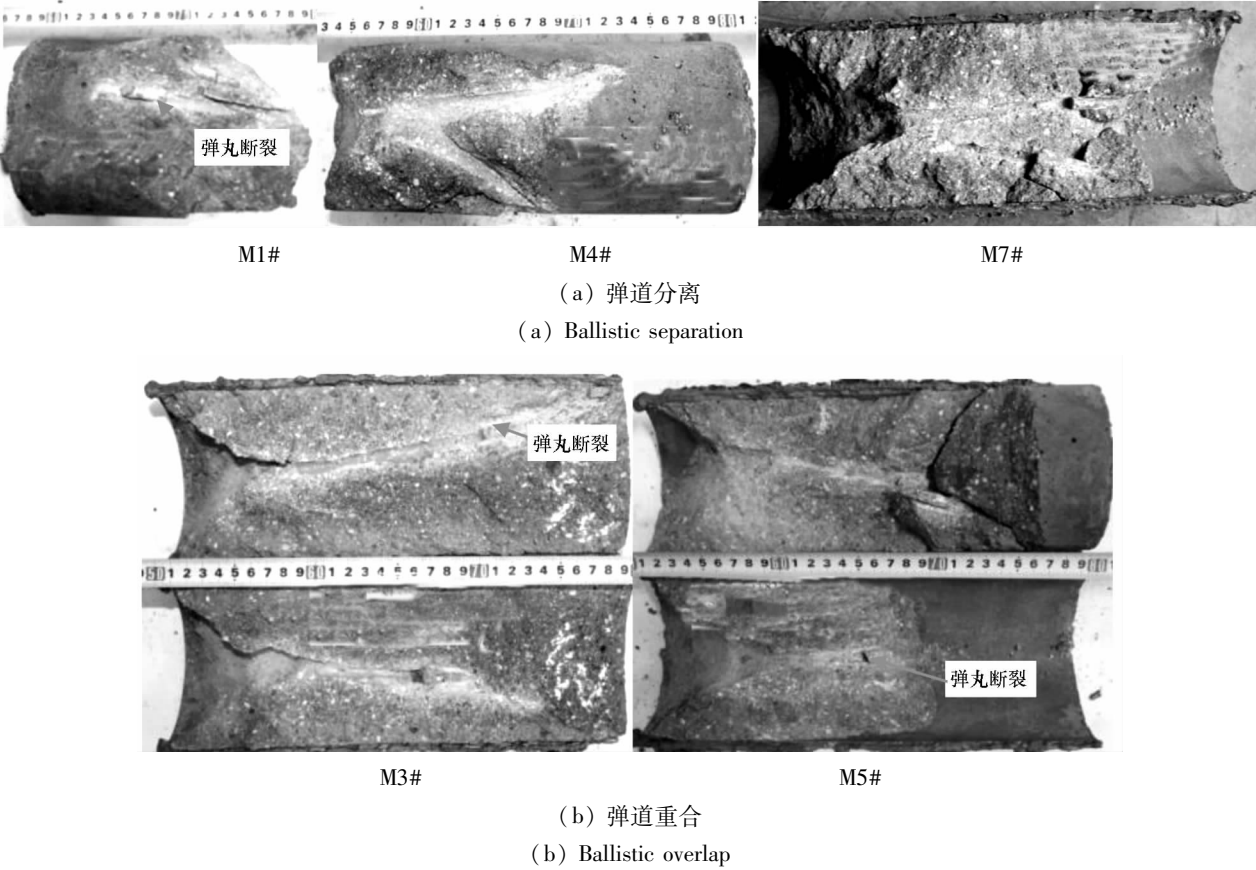


图 6 典型靶板的弹道剖面

Fig. 6 Profiles of ballistic trajectories for typical targets

2.2 侵彻深度

为了便于比较, 将表 1 中弹道严重偏转、钢管被弹芯撞击产生了鼓包或穿孔等情况的侵彻深度

数据视为无效, 即本文“重复打击”为后一次打击命中前一次打击形成的弹坑但弹道非完全重合且钢管无严重损伤的情况。表 2 给出了钢管外径

114 mm 靶的有效侵彻深度数据(单发分别侵深),但没有包括 M5#第3发。因为 M5#第3发侵彻深度(169.9 mm)明显偏小,近似等于第1发侵彻深度(201.5 mm)减去弹芯长度(34.3 mm),即第3发弹芯与第1发弹芯撞击后停止了侵彻。这表明,当弹芯正好撞击到残留在靶内的弹芯时,侵彻深度可能大大减小。

表2 侵彻深度有效数据

Tab.2 Valid data for depth of penetration mm

编号	钢管外径/壁厚	侵彻深度			
		第1发	第2发	第3发	
M3#	114/4.5	204.7	243.8		
M4#		213.2			
M5#		201.5	216.8		
M7#		203.5	227.5		
M8#			237.5		
M9#			217.6	238.4	
M10#				215.6	
平均值			205.7	228.6	227.0
M6#		114/3.5	225.3	262.8	

考虑到与有效侵彻深度对应的最大撞击速度(827.3 m/s)和最小撞击速度(816.5 m/s)相差仅约为1%,故可以忽略撞击速度的差别,同时忽略弹着点的影响,则由表1和表2可得:

1)对于钢管壁厚为4.5 mm的靶,第2发的平均侵彻深度比第1发增大了约11%,而第3发的平均侵彻深度与第2发相当;M3#第2发侵彻深度较第1发的增幅最大,约为19%;M9#第3发侵彻深度较第2发的增幅约为9.6%,小于第2发平均侵彻深度较第1发的增幅。这表明,前一发打击对混凝土的损伤会降低混凝土对后一发的侵彻阻力,但这种影响的相对程度随着打击发数的增加而减小。

2)M6#钢管壁厚为3.5 mm,与钢管壁厚为4.5 mm的靶相比,钢管的约束作用减小,混凝土的侵彻阻力减小,第1、第2发侵彻深度比钢管壁厚为4.5 mm靶的平均侵彻深度分别增大了约9.5%和15%;M6#第2发侵彻深度较第1发的增幅约为16.6%,也大于钢管壁厚为4.5 mm靶平均侵彻深度的增幅。这表明,增大钢管的约束作用可有效提高钢管约束混凝土抗单发和多发打击性能。

3)需指出,M1#和M2#钢管(外径140 mm、壁厚3.5 mm)的等效约束刚度 $K^{[16]}$ 最小,理论上,其约束作用也最小,侵彻深度应该最大。M2#第3发击穿了背面混凝土可能与钢管的约束作用偏小有关,M1#第2发侵彻深度(236.2 mm)大于钢管外径114 mm、壁厚4.5 mm靶的平均侵彻深度也与理论相符。但是,M1#和M2#第1发侵彻深度(平均195.7 mm)最小,M1#第2发侵彻深度(236.2 mm)小于M6#、M3#和M8#。这可能是靶的混凝土质量、弹丸着靶姿态和弹着点等因素的离散性所致。

3 侵彻深度预估公式

考虑混凝土靶在前发弹丸打击下产生损伤,侵彻阻力减小,后发弹丸侵彻深度增大,文献[10]在Forrestal等^[17-18]建立的单发侵彻深度模型基础上,提出了一个含粗骨料半无限混凝土靶多发重复打击侵彻深度预测公式。在文献[10]的基础上,文献[11]分别建立了含粗骨料和不含粗骨料半无限混凝土靶的多发重复打击侵彻深度预测公式。其中,多发打击的混凝土强度因子^[11]如式(1)所示。

无粗骨料半无限混凝土靶:

$$S_n = S_1 (-0.26 \ln(n) + 1) \quad (1a)$$

有粗骨料半无限混凝土靶:

$$S_n = S_1 (-0.62 \ln(n) + 1) \quad (1b)$$

式中: S_1 为未损伤混凝土靶的初始强度因子,即抗第1发打击的强度因子; S_n ($n \geq 2$)为抗第 n 发打击的强度因子。

在Forrestal等^[17-18]的模型基础上,文献[15]结合侵彻试验,建立了硬芯枪弹单发打击钢管约束混凝土靶侵彻深度的半理论半经验公式。本文考虑多发打击,在文献[15]公式里取 $R = S_n f_c$,漏斗坑深度部分按文献[16]实测数据取 $4d$,得到硬芯枪弹多发打击钢管约束混凝土靶侵彻深度公式为:

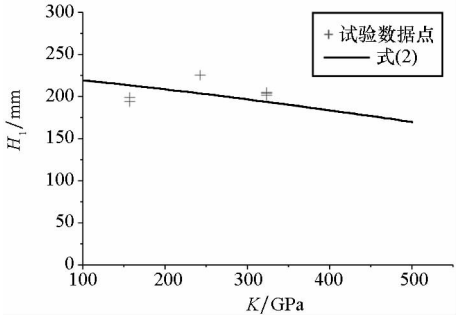
$$H_n = \frac{2m}{\pi d_w^2 N \rho_c} \ln \left(1 + \frac{N \rho_c V_0^2}{S_n f_c} \right) + 4d, \quad n \geq 1 \quad (2)$$

式中: m 为弹芯质量,kg; d_w 为弹芯直径,m; N 为弹芯的弹形系数; d 为弹丸直径,m; V_0 为弹丸撞击速度,m/s; ρ_c 为混凝土密度,kg/m³; f_c 为混凝土单轴抗压强度,MPa; S_n ($n \geq 2$)按式(1)计算。第1发打击的强度因子 $S_1 = S$ 由钢管约束混凝土单发打击试验数据得到^[16]:

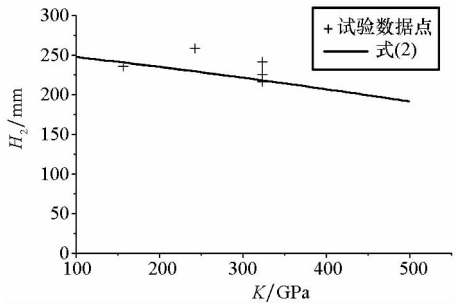
$$\begin{cases} S = 19.2 + 6.2 \times 10^{-3}K + 3.2 \times 10^{-5}K^2 \\ K = \frac{E\delta}{r_c^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中： K 为钢管等效约束刚度，GPa； E 为钢管材料的弹性模量，GPa； δ 为钢管壁厚，m； r_c 为靶的核心混凝土半径，m。

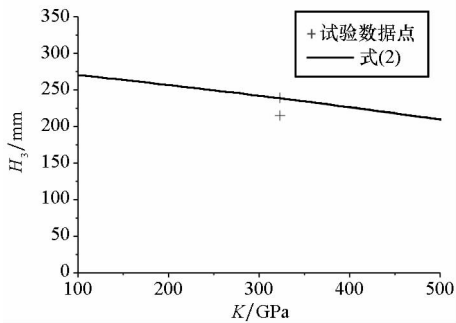
弹丸、弹芯和靶的参数按实际取值^[16]： $N = 0.26$ ， $m = 19.7 \text{ g}$ ， $d = 12.7 \text{ mm}$ ， $d_w = 7.5 \text{ mm}$ ， $f_c = 35.8 \text{ MPa}$ ， $\rho_c = 2140 \text{ kg/m}^3$ ， $V_0 = 820 \text{ m/s}$ （撞击速度平均值），按式(2)计算，其中 S_n ($n \geq 2$) 按式(1a)计算，图 7 给出了试验有效侵彻深度数据与预测公式的对比。可见：钢管约束混凝土靶侵彻深度预测值与试验值吻合较好，最大误差约为 10%，预测精度较高，适用于后一次打击命中前一次打击形成的弹坑但弹道非完全重合的情况。



(a) 第 1 发
(a) The first impact



(b) 第 2 发
(b) The second impact



(c) 第 3 发
(c) The third impact

4 结论

进行了 12.7 mm 钨芯穿甲弹多发打击小直径钢管约束混凝土厚靶试验，得到了靶的损伤模式和侵彻深度，建立了侵彻深度预测公式。结果表明：

1) 钢管约束混凝土靶抗多发打击性能优良，厚度为 300 mm 的小直径钢管（外径 114 mm，壁厚 4.5 mm）约束混凝土靶能够有效防御 3 发 12.7 mm 穿甲枪弹的重复打击，第 2、第 3 发较前一发侵彻深度的增幅分别小于 20% 和 10%；增大钢管约束刚度可以有效提高钢管约束混凝土抗单发和多发打击性能。

2) 硬芯枪弹多发打击小直径钢管约束混凝土侵深预测公式与试验数据吻合较好。

参考文献 (References)

[1] 于雪泳, 朱清浩. 美军钻地弹的发展使用及其防御技术综述[J]. 飞航导弹, 2012(11): 56-58.
YU Xueyong, ZHU Qinghao. The development and employment of the ordnance penetrator and review of its defense technology[J]. Winged Missiles Journal, 2012(11): 56-58. (in Chinese)

[2] 邓国强, 杨秀敏. 钻地弹重复打击效应现场试验研究[J]. 防护工程, 2012, 34(5): 1-5.
DENG Guoqiang, YANG Xiumin. Field tests on multi-impact of ordnance penetrator [J]. Protective Engineering, 2012, 34(5): 1-5. (in Chinese)

[3] 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. Experiments on concrete targets and reinforced concrete targets penetrated by projectiles [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2006, 36(10): 1021-1027. (in Chinese)

[4] 纪冲, 龙源, 邵鲁中. 钢纤维混凝土遮弹层抗弹丸侵彻效应实验研究与分析[J]. 振动与冲击, 2009, 28(12): 75-79.
JI Chong, LONG Yuan, SHAO Luzhong. Study on the experiments of penetration into steel fiber concrete shielding layer [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(12): 75-79. (in Chinese)

[5] 何翔, 徐翔云, 孙桂娟, 等. 弹体高速侵彻混凝土的效应实验[J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(1): 1-6.
HE Xiang, XU Xiangyun, SUN Guijuan, et al. Experimental investigation on projectiles' high-velocity penetration into concrete targets [J]. Explosion and Shock, 2010, 30(1): 1-6. (in Chinese)

[6] Zhang M H, Shimb V P W, Lu G, et al. Resistance of high-strength concrete to projectile impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31(7): 825-841.

[7] Dancygier A N, Yankelevsky D Z, Jaegermann C. Response

图 7 侵彻深度公式预估结果与试验结果对比

Fig. 7 Comparison for depth of penetration between formula predictions and test data

- of high performance concrete plates to impact of non-deforming projectiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(11): 1768 – 1779.
- [8] Abdel-Kader M, Fouda A. Effect of reinforcement on the response of concrete panels to impact of hard projectiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 63: 1 – 17.
- [9] 蒋志刚,甄明,刘飞,等. 钢管约束混凝土抗侵彻机理的数值模拟[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(11): 1 – 6.
JIANG Zhigang, ZHEN Ming, LIU Fei, et al. Simulation of anti-penetration mechanism of steel tube confined concrete[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(11): 1 – 6. (in Chinese)
- [10] Gomez J T, Shukla A. Multiple impact penetration of semi-infinite concrete [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 25(10): 965 – 979.
- [11] 赖建中,朱耀勇,徐升,等. 超高性能水泥基复合材料抗多次侵彻性能研究[J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(6): 601 – 607.
LAI Jianzhong, ZHU Yaoyong, XU Sheng, et al. Study on resistance of ultra-high-performance cementitious composites to multiple impacts[J]. *Explosion and Shock*, 2013, 33(6): 601 – 607. (in Chinese)
- [12] Lai J Z, Sun W, Xu S, et al. Dynamic properties of reactive powder concrete subjected to repeated impacts [J]. *ACI Materials Journal*, 2013, 110(4): 463 – 472.
- [13] Lai J Z, Guo X, Zhu Y Y. Repeated penetration and different depth explosion of ultra-high performance concrete [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 84: 1 – 12.
- [14] Wu H, Fang Q, Gong J, et al. Projectile impact resistance of corundum aggregated UHP – SFRC [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 84: 38 – 53.
- [15] 甄明,蒋志刚,万帆,等. 钢管约束混凝土抗侵彻性能试验[J]. *国防科技大学学报*, 2015, 37(3): 121 – 127.
ZHEN Ming, JIANG Zhigang, WAN Fan, et al. Steel tube confined concrete targets penetration experiments [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2015, 37(3): 121 – 127. (in Chinese)
- [16] 万帆. 钢管约束混凝土抗侵彻性能与机理研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2014.
WAN Fan. Investigation on the anti-penetration properties and mechanism of steel-tube-confined concrete targets [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)
- [17] Forrestal M J, Altan B S, Cargile D, et al. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectile into concrete targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1994, 15(4): 395 – 405.
- [18] Forrestal M J, Frew D J, Hanchak S J, et al. Penetration of grout and concrete targets with ogive-nose steel projectiles[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1996, 18(5): 465 – 476.