

## 钢管约束混凝土抗侵彻性能试验\*

甄明<sup>1,2</sup>, 蒋志刚<sup>1</sup>, 万帆<sup>1</sup>, 刘飞<sup>1</sup>, 谭清华<sup>1</sup>

(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:**进行了12.7mm穿甲枪弹侵彻钢管约束混凝土和PVC管约束混凝土厚靶试验,建立了硬芯枪弹侵彻深度公式,研究了钢管约束混凝土的抗侵彻性能。结果表明:钢管约束混凝土靶的破坏模式与无约束混凝土靶存在显著不同,其核心混凝土侧面出现了环向裂纹;相对于无约束混凝土靶,钢管约束混凝土靶的抗侵彻能力明显提高,并具有较强的抗多发打击能力。

**关键词:**约束混凝土;侵彻试验;工程模型;穿甲弹

**中图分类号:** O383;TB33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2015)03-121-07

## Steeletube confined concrete targets penetration experiments

ZHEN Ming<sup>1,2</sup>, JIANG Zhigang<sup>1</sup>, WAN Fan<sup>1</sup>, LIU Fei<sup>1</sup>, TAN Qinghua<sup>1</sup>

(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:** Experiments of steel tube confined concrete targets impacted by 12.7mm armor piercing projectile were firstly carried out, and then the depth formula of hard core projectile was established to explore the anti-projectile performance of steel tube confined concrete targets. The results show that the failure mode of steel tube confined concrete targets differs a lot from the failure mode of the unconfined concrete. The steel tube confined concrete targets develops hoop cracks on side face and works better in anti-projectile performance than the infinite concrete targets. Steel tube confined concrete targets also work well against multi-impact.

**Key words:** confined concrete; penetration experiments; engineering model; armor piercing projectile

设置遮弹层是地下国防工程防御钻地弹的重要措施<sup>[1-2]</sup>。随着深钻地弹技术的发展<sup>[3-4]</sup>,普通混凝土遮弹结构已难以满足防护要求,必须开发新型遮弹技术,提高遮弹层的抗侵彻能力,并考虑抗多发打击的能力。混凝土在遮弹结构中已得到广泛应用。但是,混凝土是一种脆性材料,抗拉强度很低,弹丸一次打击下损伤范围较大<sup>[5-6]</sup>,且不易修复。在混凝土中设置钢筋<sup>[7]</sup>或掺加钢纤维<sup>[8-10]</sup>可提高防护结构的抗冲击性能,减少弹丸一次打击下的损伤范围,但不能显著减小弹丸一次打击下的侵彻深度,且损伤范围仍较大。钢管混凝土利用钢管对核心混凝土施加侧向约束,使其处于三向受压状态,从而延缓混凝土微裂缝的发生和发展,可有效提高抗冲击能力<sup>[11]</sup>和抗爆能力<sup>[12]</sup>。文献[13-14]提出了一种抗弹丸沿钢管轴向侵彻作用的蜂窝状钢管混凝土遮弹结构,将

其称为钢管约束混凝土靶。数值模拟结果<sup>[13-15]</sup>表明钢管约束混凝土靶的抗侵彻能力高于无约束混凝土靶。现有侵彻试验常常采用在大直径钢管内浇筑混凝土的靶来模拟半无限靶<sup>[16]</sup>,但由于靶径弹径比很大,钢管主要起到消除自由边界影响和作为模板的作用,这些靶不是甄明等研究的钢管约束混凝土靶。目前,国内外关于约束混凝土抗侵彻性能的研究较少,尚未见到小直径钢管约束混凝土抗侵彻性能的试验研究。

甄明等首次进行了12.7mm穿甲枪弹侵彻小直径钢管约束混凝土厚靶试验,得到了靶的破坏模式及主要破坏参数,同时进行了PVC管约束混凝土厚靶比较试验;基于侵彻试验,建立了硬芯枪弹侵彻混凝土靶工程模型,并比较了钢管约束混凝土靶与半无限混凝土靶的抗侵彻能力。

\* 收稿日期:2014-10-12

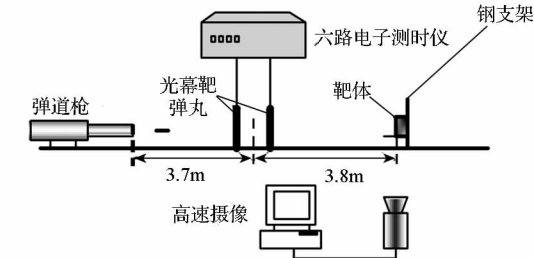
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51308539);国防科大优秀研究生创新资助项目(S1309011)

作者简介:甄明(1989—),男,山东泰安人,博士研究生,E-mail: zhenming1989118@hotmail.com;

蒋志刚(通信作者),男,教授,博士,硕士生导师,E-mail:13508489165@163.com

# 1 试验方案

侵彻试验在国防科技大学防护工程实验室进行,试验系统如图 1 所示,包括加载装置、测速装置、高速摄像系统和靶体固定装置等。测速装置由光幕靶和六路电子测时仪(计时精度 1 μs)构成;高速摄像用于辅助测量弹丸着靶姿态;靶体埋入砂箱,背面由钢支架支撑,并利用水平仪和瞄准镜调整靶位,尽量使弹丸沿靶轴线方向正入射。



(a) 示意图  
(a) Schematic diagram



(b) 实物图  
(b) Physical picture

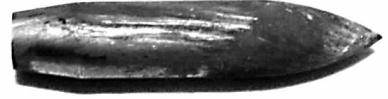
图 1 侵彻试验系统组成  
Fig. 1 System of penetration experiment

试验弹丸为 12.7mm 穿甲弹,通过改变装药量调节弹丸速度,设计着靶速度为两种:高速(全装药,约 840m/s),低速(减药,约 540m/s)。弹丸质量 48g,弹丸结构如图 2(a)所示,其中卵形头钢芯,直径 10.1 mm,长 53mm,质量 30 g,且侵彻试验后未产生明显变形,如 2(b)所示。

侵彻试验工况见表 1,所有靶的厚度为 300mm。为与钢管约束混凝土对比,制作了 PVC 管约束混凝土试件。PVC 管的强度和变形能力均很低,对混凝土的约束作用很小,PVC 管约束混凝土靶相当于无约束混凝土靶。为了考察迎弹面设置钢筋网的影响,部分试件迎弹面埋入了模拟钢筋网的铁丝网。铁丝网网格尺寸 5mm × 5mm,铁丝直径 0.7mm,设计埋深 10 ~ 30mm。



(a) 弹丸组成  
(a) Components of projectile



(b) 侵彻试验后钢芯  
(b) Steel core after penetration

图 2 12.7mm 穿甲弹弹丸  
Fig. 2 12.7mm APP

表 1 侵彻试验工况

Tab. 1 Penetration experiment conditions

试件类型	管外径/ mm	管壁厚/ mm	铁丝网 层数	试件 数量	打击工况
Q235 钢管 约束 混凝土	140	3.5	无	4	高速/低速, 单发打击
	140	3.5	单层	3	高速/低速, 单发/双发打击
	140	3.5	双层	3	高速/低速, 单发/三发打击
PVC 管 约束 混凝土	315	2	单层	3	高速/低速, 单发打击
	160	2	单层	3	高速, 单发打击

混凝土原材料为:P. 042.5 硅酸盐水泥;普通河砂,最大粒径 5mm,细度模数 2.63;硅灰,平均粒径 0.2 μm;聚羧酸型液体高效减水剂,减水率大于 40%。为了避免大尺寸石子对侵彻试验结果的影响,本次试验混凝土没有粗骨料,混凝土密度为 2200kg/m<sup>3</sup>。按《普通混凝土力学性能试验方法标准》<sup>[17]</sup>进行了混凝土静力性能试验,得到标准立方体抗压强度和劈裂抗拉强度分别为 62.3MPa 和 4.52MPa。

## 2 试验结果

### 2.1 钢管约束混凝土靶破坏模式

钢管约束混凝土试件典型破坏现象如图 3 ~ 6 所示。结果表明:所有试件迎弹面均形成了明显漏斗坑,而背面混凝土保持完好;高速单发打击下,核心混凝土侧面产生了环向裂纹区,且有 1 ~ 2 道明显的环向主裂纹(如图 3、图 4 所示);三发打击后,环向主裂纹形成了贯通裂纹(如图 5 所示);低速单发打击下,核心混凝土

侧面未发生明显破坏,仅产生了少许细微裂纹(如图6所示)。图7为钢管约束混凝土试件典型纵剖面,弹丸的铜皮、铅套嵌于弹孔中,弹孔周围有径向裂纹。



(a) 正面  
(a) Front face

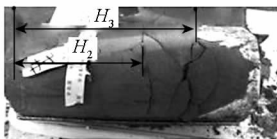


(b) 核心混凝土侧面  
(b) Side face of core concrete

图3 单发,无铁丝网,打击速度 838.2m/s  
Fig.3 Single impact, non-wire mesh, 838.2m/s



(a) 正面  
(a) Front face



(b) 核心混凝土侧面  
(b) Side face of core concrete

图4 单发,单层铁丝网,侵彻速度 833.3m/s  
Fig.4 Single impact, one layer-wire mesh, 833.3m/s



(a) 正面,首发 541.5m/s  
(a) Front face, first bullet at 541.5m/s



(b) 正面,次发 848.5m/s  
(b) Front face, second bullet at 845.5m/s



(c) 正面,第三发 840.0m/s  
(c) Front face, third bullet at 840.0m/s



(d) 核心混凝土侧面  
(d) Side face of core concrete

图5 三发,双层铁丝网  
Fig.5 Triple impacts, two layer-wire meshes



(a) 正面  
(a) Front face



(b) 核心混凝土侧面  
(b) Side face of core concrete

图6 单发,无铁丝网,侵彻速度 543.6m/s  
Fig.6 Single impact, non-wire mesh, 543.6m/s

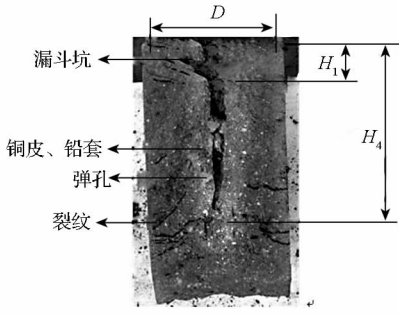


图 7 钢管约束混凝土试件典型纵剖面  
Fig. 7 Typical target profile



(a) PVC 管外径 160mm, 847.1m/s

(a) PVC tube with diameter 160mm, 847.1m/s



(b) PVC 管外径 315mm, 839.9m/s

(b) PVC tube with diameter 315mm, 839.9m/s

图 8 PVC 管约束混凝土靶的破坏

Fig. 8 Failure mode of concrete filled in PVC tube

由于 PVC 管的强度和变形能力均很低,在弹丸侵彻过程中因应力波或弹丸扩孔作用而破坏,因此 PVC 管约束混凝土靶不具备抗多发打击能力。在弹丸一次打击下,外径 160mm PVC 管约束混凝土试件严重破碎,如图 8(a) 所示;外径 315mm PVC 管约束混凝土试件也破坏较为严重,如图 8(b) 所示。

### 2.2 钢管约束混凝土靶破坏参数

根据图 4、图 7 对破坏参数进行测量记录,结果见表 2。其中: $D, H_1$  分别为漏斗坑直径和深度,  $H_2, H_3$  为环向主裂纹位置到迎弹面的距离,  $H_4$  为侵彻深度,  $v_0$  为着靶速度,  $\Delta d$  为弹着点偏心距,“空白”表示未进行测量。外径 160mm PVC 管约束混凝土试件未能测得侵深等数据;外径 315mm PVC 管约束混凝土试件根据混凝土上的弹痕近似测得弹丸飞离混凝土前的侵彻深度,见表 3。须指出,由于弹丸未能嵌于 PVC 管约束混凝土试件,弹丸飞离混凝土靶体时存在剩余动能,因此表 3 的侵深测量数据应比实际值偏小。此外,低速打击时,由于减小弹丸装药导致弹丸在飞行过程中漂移,弹丸着靶时为斜入射,侵彻深度小于正入射。

### 2.3 结果分析

由表 2 可得:

1) 弹着点偏心将使得远离弹孔一侧钢管的约束作用减小,而靠近弹孔一侧钢管的约束作用

表 2 钢管约束混凝土试件破坏参数

Tab. 2 Steel tube concrete targets

试件类型	试件编号	$v_0/(m/s)$	$\Delta d/mm$	$D/mm$	$H_1/mm$	$H_2/H_3$	$H_4/mm$
Q235 钢管 约束混凝土, 无铁丝网	1#	838.2	15.0	133.9	36.6	191.0/263.0	208.0
	2#	830.9	5.0	133.3	36.0	185.0/185.0	194.0
	3#	832.2	7.5	133.0	36.8	202.0/202.0	197.0
	17#	543.6	28.4	130.0	29.0	无环向裂纹	90.0
Q235 钢管 约束混凝土, 单层铁丝网	4#	833.3	0	133.3	32.5	174.0/226.0	214.0
	5#	829.2	9.7	133.4	30.5	204.0/204.0	205.0
	16#	540.9 第一发	5.0	133.3	21.5		80.0
836.0 第二发		11.0		189.0/254.0	216.0		
Q235 钢管 约束混凝土, 双层铁丝网	7#	837.9	16.2	134.6	29.0	199.0/249.0	215.0
	19#	839.3	5.0		29.0	199.0/199.0	199.0
		541.5 第一发					80.0
		848.5 第二发					214.0
	840.0 第三发					237.0/237.0	231.0

表3 直径315mm PVC管约束混凝土试件侵彻深度

Tab.3 Penetration depth of concrete filled in 315mm PVC tube targets

试件编号	10#	11#	12#
$v_0/(m/s)$	839.9	596.5	537.1
$H_4/mm$	175.0	105	94

增大,导致侵彻阻力与中心入射有所不同。弹着点偏心较小时( $\Delta d = 0 \sim 15mm$ ),侵彻阻力与中心入射时差别不大,弹着点对侵彻深度的影响不明显,且由于试验存在离散性,弹着点对侵彻深度的影响没有规律。如:高速打击下,5#( $\Delta d = 9.7mm, v_0 = 829.2m/s$ )的侵彻深度比4#( $\Delta d = 0mm, v_0 = 833.3m/s$ )小4.2%;1#( $\Delta d = 15mm, v_0 = 838.2m/s$ )比19#( $\Delta d = 5mm, v_0 = 839.3m/s$ )侵彻深度大4.5%。弹着点偏心较大时( $\Delta d > 15mm$ ),由于远离弹孔一侧钢管的约束作用减小较多,侵彻深度比小偏心时有所增加。如:高速打击下,7#( $\Delta d = 16.2mm, v_0 = 837.9m/s$ )比19#( $\Delta d = 5mm, v_0 = 839.3m/s$ )侵彻深度大8%;低速打击下,17#( $\Delta d = 28.4mm, v_0 = 543.6m/s$ )比16#第一发( $\Delta d = 5.0mm, v_0 = 540.9m/s$ )侵彻深度大12.5%。

2)单发打击下,钢管约束混凝土靶的漏斗坑直径达弹径的10倍以上,漏斗坑深度为弹径的2~3倍,均大于半无限混凝土靶(漏斗坑直径约为弹径的4倍<sup>[18]</sup>,深度约为弹径的1.5~2.5倍<sup>[19]</sup>)。主要原因是钢管约束混凝土靶直径较小,钢管波阻抗远大于混凝土,压缩波在混凝土与钢管界面产生反射压缩波,加剧了对迎面混凝土的挤压作用和混凝土的飞溅效应,导致漏斗坑尺寸增大。

3)迎弹面设置钢筋网可以减小漏斗坑深度。高速打击下,单层铁丝网靶的漏斗坑平均深度比无铁丝网靶减小约16%;双层铁丝网靶的漏斗坑平均深度比单层铁丝网靶减小约9%。但是,迎弹面铁丝网对漏斗坑直径的影响不大,且对单发打击侵彻深度的影响不明显。如:1#、7#和19#试件的侵彻速度和弹着点偏心距相差不大,但19#(双层铁丝网)的侵彻深度比1#(无铁丝网)小4.5%,而7#(双层铁丝网)的侵彻深度比1#(无铁丝网)大3.4%。

4)单发高速侵彻下,靶体环向主裂纹位置 $H_2$ 约为193mm, $H_3$ 约为218mm,而侵深 $H_4$ 约为205mm,即 $H_2 \leq H_4 \leq H_3$ 。

5)钢管约束混凝土具备较强的抗多发打击能力。4#、5#单发打击平均侵彻深度209.5mm,

16#、18#第二发打击平均侵彻深度215mm,18#第三发侵彻深度231mm,即钢管混凝土第二发打击侵彻深度比单发打击仅增加了约2.6%,第三发打击侵彻深度比第二发打击增加了约7.4%。这表明:当各发弹着点不是很靠近时(弹孔不重叠、不交叉),钢管约束混凝土抗第二发和抗第一发打击能力相当,而抗第三发打击的能力有所下降。

由于在弹丸侵彻过程中钢管对混凝土施加的侧向约束作用,使混凝土的径向压应力增大、环向拉应力减小,混凝土的强度极限和变形能力增大,因此钢管约束混凝土的抗侵彻能力明显优于无约束混凝土。对比表2中17#和16#、18#第一发与表3中11#、12#的侵彻深度,可知:低速打击下,钢管约束混凝土的侵彻深度明显小于PVC管约束混凝土,其中16#、18#第一发的侵彻深度比12#小约15%。

### 3 侵彻深度预估公式

#### 3.1 刚性弹侵彻半无限混凝土靶

Forrestal等<sup>[18]</sup>根据刚性卵形尖头弹侵彻半无限混凝土靶试验,将侵彻过程分为开坑阶段和隧道侵彻阶段,基于空腔膨胀理论计算隧道侵彻深度,建立了侵彻深度 $X$ 的半理论半经验公式:

$$X = \frac{2M}{\pi d^2 N^* \rho_c} \ln \left( 1 + \frac{N^* \rho_c V_1^2}{R} \right) + 2d, \quad X > 2d \quad (1)$$

$$\begin{cases} V_1^2 = \frac{MV_0^2 - 4\pi(d/2)^3 R}{M + 4\pi(d/2)^3 N^* \rho_c} \\ N^* = \frac{8\psi - 1}{24\psi^2} \end{cases} \quad (2)$$

其中:右边第一项为隧道侵彻深度,第二项 $2d$ 为漏斗坑深度( $d$ 为弹丸直径); $M$ 和 $N^*$ 分别为弹丸质量和弹头形状系数, $\psi = s/d$ 为弹头蛋形部曲率半径(Caliber Radius Head, CRH); $\rho_c$ 为靶板混凝土的密度; $V_0$ 和 $V_1$ 分别为弹丸的初始撞击速度和隧道侵彻初始速度; $R$ 为混凝土靶侵彻阻力经验值,需根据试验结果计算。

Li和Chen<sup>[19]</sup>取 $R = S f_c$ ,  $S = 82.6 f_c^{-0.544}$ 或 $S = 72.0 f_c^{-0.5}$ ,其中 $f_c$ 为混凝土无侧限抗压强度(单位MPa),将上述模型推广到任意头形刚性弹垂直侵彻半无限混凝土靶问题。

#### 3.2 硬芯枪弹侵彻深度公式

类似于刚性弹侵彻半无限混凝土靶,硬芯枪弹的侵彻过程也可分为开坑阶段和隧道侵彻阶段。由弹丸结构组成(如图2所示)和图7可知:

开坑阶段,主要是弹丸铜皮和铅套直接冲击混凝土产生开坑效应,钢芯在开坑阶段前期不直接侵彻混凝土,钢芯在开坑阶段速度损失不大;隧道侵彻阶段,铅套和铜皮已无侵彻能力,主要是钢芯侵彻混凝土。为简化计算,忽略开坑阶段钢芯速度损失,假定隧道侵彻深度等于钢芯初始速度为  $V_0$  的侵彻深度。

在式(1)中,取漏斗坑深度为  $k \cdot d$  ( $d$  为弹丸直径,  $k$  由试验得到);隧道侵彻阶段,取  $V_1 = V_0$ , 弹径取为钢芯直径  $d_c$ ,  $\psi$  为钢芯的 CRH, 用钢芯质量  $m$  代替弹丸质量  $M$ , 得:

$$X = \frac{2m}{\pi d_c^2 N^* \rho_c} \ln \left( 1 + \frac{N^* \rho_c V_0^2}{R} \right) + k \cdot d, \quad X > k \cdot d \quad (3)$$

其中:对于半无限混凝土靶,近似取  $k = 2, R = S f_c, S = 72.0 f_c^{-0.5}$ ;对于钢管约束混凝土靶,  $k$  根据试验确定,  $R$  根据试验结果按式(4)计算:

$$R = \frac{N^* \rho_c V_0^2}{\exp \left[ \frac{\pi d_c^2 N^* \rho_c (X - k \cdot d)}{2m} \right] - 1} \quad (4)$$

表 4 钢管约束混凝土靶侵彻深度

Tab. 4 Penetration depth of steel tube confined concrete targets

试件编号	$V_0 / (m/s)$	试验值/mm		$R / MPa$ 式(4)	计算侵深 $X / mm$ 式(3)
		$X = H_1$	$k \cdot d$		
1#	838.2	208	36.6	697	209.2
2#	830.9	194	36.0	749	205.8
3#	832.2	197	36.8	740	207.1
4#	833.3	214	32.5	647	203.2
5#	829.2	205	30.5	669	199.7
7#	837.9	215	29.0	637	201.5
19#	839.3	199	29.0	705	202.0
平均值			$k = 2.6$	692	

### 3.3 讨论

对于钢管约束混凝土侵彻试验,取棱柱体抗压强度  $f_c = 48.9 MPa, d = 12.7 mm, M = 48 g, d_c = 10.1 mm, m = 30 g, \psi = 3.4, \rho_c = 2200 kg/m^3$ 。先由表 2 高速打击试验数据和式(4)计算各单发打击的  $R$ , 然后把  $k$  和  $R$  取平均值,再由式(3)计算侵彻深度,计算结果见表 4。图 9 给出了硬芯枪弹侵彻半无限混凝土靶和钢管约束混凝土靶侵彻深度  $X$  与侵彻速度  $V_0$  关系曲线。计算中:钢管约束混凝土靶,  $k = 2.6, R = 692 MPa$ ;半无限靶,按文献 [18-19] 取  $k = 2, R = S f_c = 72.0 f_c^{0.5} = 503.5 MPa$ 。由表 4 和图 9 可得:

1) 硬芯枪弹侵彻深度公式与钢管约束混凝土靶高速打击试验结果吻合较好,最大误差约为 6.0%。

2) 当  $V_0$  大于  $500 m/s$  时,计算的钢管约束混凝土靶侵彻深度明显小于半无限混凝土靶,当  $V_0$  取值  $800 \sim 900 m/s$  时,钢管约束混凝土靶侵彻深度比半无限混凝土靶减小约 20%。

### 4 结论

本文进行了 12.7mm 穿甲枪弹侵彻小直径钢管约束混凝土厚靶试验,得到了靶的破坏模式及主要破坏参数,并建立了硬芯枪弹侵彻深度公式。结果表明:

1) 由于在弹丸侵彻过程中钢管对混凝土施加的侧向约束作用,钢管约束混凝土靶抗侵彻性能优于无约束混凝土靶,且在抗多发打击方面具有明显优势。

2) 由于弹着点偏心使得远离弹孔一侧钢管的约束作用减小,钢管约束混凝土靶的抗侵彻能

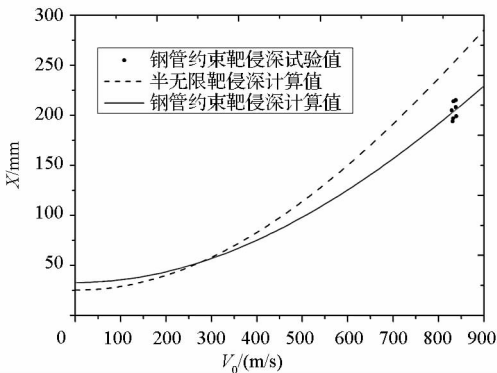


图 9  $X - V_0$  关系曲线

Fig. 9 Relation curves of  $X$  and  $V_0$

力与弹着点有关,弹着点大偏心时侵彻深度比小偏心时有所增加。

3) 钢管约束混凝土靶在弹丸高速打击下的破坏模式与半无限混凝土靶显著不同,钢管约束混凝土靶核心混凝土侧面产生了环向裂纹。

4) 硬芯枪弹侵彻深度公式与钢管约束混凝土靶高速打击试验结果吻合较好。

## 参考文献 (References)

- [1] 郭志昆,陈万祥,袁如飞,等. 新型偏航遮弹层选型分析与试验[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2007,8(5):505-512.  
GUO Zhikun, CHEN Wanxiang, YUAN Rufe, et al. Structural selection and testing of new yaw-inducing bursting layer[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007, 8(5):505-512. (in Chinese)
- [2] 陈万祥,郭志昆,吴昊,等. 表面异形遮弹层的诱偏机理与试验[J]. 弹道学报,2011,23(4):66-69,74.  
CHEN Wanxiang, GUO Zhikun, WU Hao, et al. Yaw-inducing mechanism and experimental investigation of shielding layer with irregular barrier on surface[J]. Journal of Ballistics, 2011, 23(4):66-69,74. (in Chinese)
- [3] 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 of american earth penetrator and the summary of its defense technology[J]. Winged Missiles Journal,2012(11):56-58. (in Chinese)
- [4] 夏元杰,段红建,刘志东,等. 美国陆军精确打击技术及其发展[J]. 兵工学报,2010(S2):88-91.  
XIA Yuanjie, DUAN Hongjian, LIU Zhidong, et al. Precision strike technology and its development in USA army[J]. Acta Armamentarii, 2010(S2):88-91. (in Chinese)
- [5] Zhang M H, Shim 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.
- [6] Dancygier A N, Yankelevsky D Z, Jaegermann C. Response of high performance concrete plates to impact of non-deforming projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(11):1768-1779.
- [7] 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. Experimental on the Projectile Penetration Concrete Targets and Reinforced Concrete Targets [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2006, 36(10):1021-1027. (in Chinese)
- [8] Almansa E M, Cánovas M F. Behaviour of normal and steel fiber-reinforced concrete under impact of small projectiles[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(11):1807-1814.
- [9] 纪冲,龙源,邵鲁中. 钢纤维混凝土遮弹层抗弹丸侵彻效应试验研究与分析[J]. 振动与冲击,2009,28(12):75-79,95.  
JI Chong, LONG Yuan, SHAO Luzhong. Study on the experiments of penetration into steel concrete shielding layer[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(12):75-79,95. (in Chinese)
- [10] 赵晓宁,何勇,张先锋,等. 杆弹侵彻钢纤维混凝土实验研究[J]. 实验力学,2011,26(2):216-220.  
ZHAO Xiaoning, HE Yong, ZHANG Xianfeng, et al. Experimental study of long-rod projectile penetration into steel fiber reinforced concrete [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(2):216-220. (in Chinese)
- [11] Shan J H, Chen R, Zhang W X, et al. Behavior of concrete filled tubes and confined concrete filled tubes under high speed impact[J]. Advances in Structural Engineering,2007,10(2):209-218.
- [12] Fujikura S, Bruneau M, Lopez-Garcia D. Experimental investigation of multihazard resistant bridge piers having concrete-filled steel tube under blast loading[J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(6):586-594.
- [13] 程华,黄宗明,石少卿,等. 应用仿生原理设计遮弹层及其抗侵彻数值模拟[J]. 应用力学学报,2005,22(4):593-597.  
CHENG Hua, HUANG Zongming, SHI Shaoqing, et al. Shielding layer applying bionics theory and the simulation of its anti-projectile performance[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2005, 22(4):593-597. (in Chinese)
- [14] 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 the defense work[J]. Concrete, 2005, 2:95-98. (in Chinese)
- [15] 武琨,王坚茹,陈志刚,等. 弹丸对钢管混凝土结构冲击效应的数值模拟[J]. 火力与指挥控制,2013,38(4):107-110.  
WU Jun, WANG Jianru, CHEN Zhigang, et al. Simulation study of projectile impact effects on concrete-filled tube structure [J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(4):107-110. (in Chinese)
- [16] Frew D J, Forrestal M J, Cargile J D. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006; 32(10):1584-1594.
- [17] 中华人民共和国行业标准. 普通混凝土力学性能试验方法标准(GB/T50081-2002)[S]. 北京:中华人民共和国建设部,2003.  
Industry standard of the People's Republic of China. Ordinary concrete mechanics performance test method standard (GB/T50081-2002) [S]. Beijing: Construction Ministry of the People's Republic of China,2003. (in Chinese)
- [18] 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.
- [19] Li Q M, Chen X W. Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile [J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(1):93-116.