

文章编号: 1001-1455(2006)02-0105-10

# 动能深侵彻弹的力学设计(III): 缩比实验分析\*

陈小伟<sup>1,2</sup>, 张方举<sup>1</sup>, 杨世全<sup>1</sup>, 谢若泽<sup>1</sup>, 高海鹰<sup>1</sup>, 徐艾明<sup>1</sup>, 金建明<sup>1</sup>, 屈明<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院结构力学研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 开展了 $\varnothing 25$  mm 火炮小尺寸缩比弹的正/斜侵彻实验。给出了实验方法、建议弹型和混凝土靶的设计。在 620~820 m/s 实验速度范围内, 缩比弹结构保持完整。结合动能深侵彻弹的力学设计理论和笔者先前的理论工作, 对正/斜侵彻的实验结果作进一步的总结, 包括着靶姿态、靶体终点效应以及弹体结构变形。

**关键词:** 爆炸力学; 弹体结构; 缩比实验; 钻地弹; 结构设计; 混凝土; 侵彻

**中图分类号:** O385

**国标学科代码:** 130·3530

**文献标志码:** A

## 1 引言

钻地武器(earth penetrating warhead, 简称 EPW)是穿甲/侵彻动力学的重要应用。目前美国的钻地武器已经发展到较高水平: 型号系列化, 常规与核兼顾, 发射平台可置换, 可实战设计等。一般钻地弹的设计速度上限是 900~1 000 m/s ( $2.5Ma \sim 3Ma$ ), 侵彻常规混凝土靶的深度不超过弹长的 4 倍。美国正在研制撞击速度  $> 1 500$  m/s、侵彻能力提高一倍以上的先进钻地弹<sup>[1~3]</sup>。

在穿甲动力学中, 常把深层钻地武器近似为刚性弹, 建立 EPW 的分析模型。绝大多数有关深层侵彻的文献集中在终点弹道的理论、数值分析和实验研究上, 未见有公开的有关钻地弹结构设计理论的报导。在深层侵彻的理论研究中, Sandia 国家实验室 M. J. Forrestal 小组的相关工作是国际冲击工程界同行公认的最有代表性的研究<sup>[4~6]</sup>。M. J. Forrestal 的理论和实验工作也集中在侵彻能力和减速度分析等方面, 未讨论弹体结构。笔者在 M. J. Forrestal 小组研究的基础上, 提出了撞击函数  $I$  和弹头形状函数  $N$  两个量纲一参数, 给出了更简便的量纲一刚性弹侵彻/穿甲的终点弹道公式, 进一步发展了刚性弹侵彻/穿甲动力学<sup>[7~11]</sup>。

笔者在关于刚性弹侵彻混凝土靶理论工作<sup>[7~11]</sup>基础上进一步开展钻地弹结构的力学设计, 明确了适合于钻地弹的撞击函数  $I$  和弹体形状函数  $N$  的有效范围<sup>[1~3]</sup>。分析确定侵彻弹体的极限壁厚, 给出斜撞击时的弹体最大临界斜角和弹体抗弯能力的最薄弱位置; 研究了弹体的抗压/拉和抗弯能力, 对弹体头部设计、战斗部后盖、装填比、弹形和弹材、侵彻效应中的尺度律、混凝土靶的设计等多方面开展了分析。并对弹体的壳体厚度、局部加固和焊接位置等提出了设计建议。

在相关理论支持下, 本文中开展 $\varnothing 25$  mm 火炮小尺寸缩比实验研究, 给出 6 个弹型和 2 种实验靶体的结构设计。分别完成正撞击、 $20^\circ$  和  $30^\circ$  斜撞击实验各一组, 共 18 发, 实验速度在 620~820 m/s。结合文献<sup>[1~3]</sup>及笔者先前的理论工作<sup>[7~11]</sup>, 对实验结果作进一步分析。

## 2 实验原理

### 2.1 实验方法

实验在 $\varnothing 25$  mm 弹道滑膛炮上进行, 其装置示意图 1。实验时弹体由 $\varnothing 25$  mm 弹道滑膛炮发射

\* 收稿日期: 2005-04-01; 修回日期: 2005-07-21

基金项目: 中国工程物理研究院国防预研基金项目;

北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室开放基金项目(KFJJ04-3)

作者简介: 陈小伟(1967—), 男, 博士, 副研究员。

进入靶室,分别通过挡火板、电磁线圈靶、网靶,最后撞击混凝土靶。出膛后的弹体速度由电磁线圈测量得到,网靶测速作为补充,同时网靶信号作为高速摄影机、闪光灯等的触发信号。实验中采用双光路平行反射镜系统以获取弹体着靶姿态的正视图 and 俯视图(见图 2)。实验中使用转镜等待式分幅高速摄影机,其最高幅频为  $1.80 \times 10^6$  f/s,本实验中使用幅频为  $2.0 \times 10^5$  f/s。

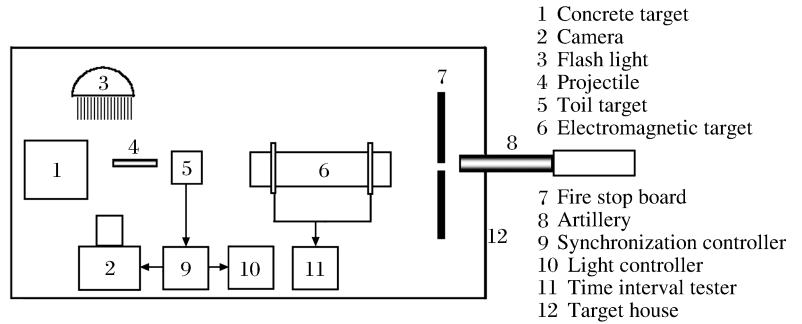


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic of the experimental set-up



图 2 靶体姿态和双光路平行反射镜系统

Fig. 2 Concrete target and parallel-reflection of double optical paths

## 2.2 混凝土靶

根据文献[1、3]设计混凝土靶,靶体为一端斜面的素混凝土圆柱体,外用铁皮箍紧(见图 2)。最大外形尺寸分别为  $\varnothing 640 \text{ mm} \times 765 \text{ mm}$  和  $\varnothing 640 \text{ mm} \times 885 \text{ mm}$ ,斜面角度分别为  $10^\circ$  和  $20^\circ$ ,卵石直径为  $3 \sim 8 \text{ mm}$ 。混凝土经 28 d 养护后平均单轴抗压强度为 45 MPa。实验中利用钢丝绳捆绑固定吊于起重机吊钩上,并在两侧安放木楔进行定位,如图 2 所示。分别利用混凝土靶体两端的正/斜截面作靶面可进行正侵彻、 $10^\circ$  和  $20^\circ$  斜侵彻实验;若将正截面端稍微抬高,可实现  $30^\circ$  斜侵彻实验。

## 2.3 弹体

相关实验弹型的结构示意图如图 3。弹体材料为 D6A 高强度合金钢,抗拉强度  $\sigma_b = 1570 \text{ MPa}$ ,内部装填物为高分子惰性材料(密度  $\rho = (1.65 \pm 0.05) \text{ g/cm}^3$ )。根据文献[1、3]的理论工作,共设计六种弹型,分别有三种不同的长径比( $L/d = 6, 8, 10$ )和两种壁厚设计( $h_t/d = 0.10, 0.15$ )<sup>[12]</sup>。对弹体采用三截断体焊接而成,明确焊接位置对弹体强度的影响。对弹体后段筒体采用厚壁设计,弹体后盖设计中考虑到拉伸可能引起的脱离,考虑了加强筋的作用,对弹体头部采用曲径比  $\text{CRH} = 3$  的尖卵形并由理论分析决定其中空形状。弹型设计中强调弹体几何结构对侵彻、装药和抗弯能力的影响。

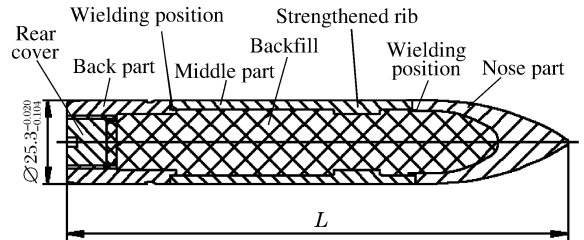


图 3 侵彻弹体结构示意图

Fig. 3 Structural scheme of reduced-scale projectile

### 3 实验总结

对六种弹体,均按 $\varnothing 25$  mm 弹道滑膛炮的最大安全装药量(70 g)进行实验,实验速度为 620~820 m/s,弹体质量不同导致速度不同。表 1 中给出 3 组实验 6 种弹型的共 18 发弹体的结构参数和侵彻初始条件,正侵彻、 $20^\circ$ 和  $30^\circ$ 斜侵彻的相应实验结果和根据以下各节给出的理论预期分别参见表 2~4。因弹 III-2 和 V-3 尚留存在靶体中以供展示用,表 3 和表 4 中未能给出其侵彻后弹体质量及质量损失实验值。

表 1 实验弹体的结构参数和侵彻初始条件

Table 1 Structural parameters of projectiles and impact conditions

实验号	$\frac{L}{d}$	$\frac{h_t}{d}$	$\frac{m}{g}$	$\frac{v_0}{/(m/s)}$	$\frac{\beta}{/(^\circ)}$	实验号	$\frac{L}{d}$	$\frac{h_t}{d}$	$\frac{m}{g}$	$\frac{v_0}{/(m/s)}$	$\frac{\beta}{/(^\circ)}$	实验号	$\frac{L}{d}$	$\frac{h_t}{d}$	$\frac{m}{g}$	$\frac{v_0}{/(m/s)}$	$\frac{\beta}{/(^\circ)}$
I-1	6	0.10	312.6	775	0	I-2	6	0.10	313.3	815	19.6	I-3	6	0.10	310.5	815	27.9
II-1	6	0.15	362.8	765	0	II-2	6	0.15	363.2	767	20.0	II-3	6	0.15	360.8	769	30.6
III-1	8	0.10	415.6	721	0	III-2	8	0.10	414.7	723	24.0	III-3	8	0.10	415.5	721	29.4
IV-1	8	0.15	488.2	674	0	IV-2	8	0.15	482.5	681	17.0	IV-3	8	0.15	488.9	676	30.1
V-1	10	0.10	516.3	656	0	V-2	10	0.10	516.4	657	19.0	V-3	10	0.10	519.4	656	30.1
VI-1	10	0.15	608.3	615	0	VI-2	10	0.15	602.7	613	18.0	VI-3	10	0.15	593.0	620	31.6

表 2 正侵彻的实验结果和理论预期

Table 2 Experimental results and theoretical predictions under the normal penetrations

实验号	I	N	X/d		m'/g	$(\Delta m/m)/\%$		初始弹坑尺寸/mm					侵彻弹体变形情况
			实验值	分析值		实验值	分析值	实验值					
								d <sub>fl</sub>	d <sub>fu</sub>	kd	d <sub>fl</sub>	kd	
I-1	25.36	78.82	15.81	15.26	304.1	2.72	5.25	280	350	70	295	60	完整
II-1	28.68	91.48	15.81	17.14	349.8	3.55	4.53	—	—	—	295	60	完整
III-1	29.18	104.79	17.79	17.65	403.7	2.86	3.95	340	355	70	295	60	完整
IV-1	29.96	123.09	—	18.33	475.7	2.56	3.36	340	340	—	295	60	完整
V-1	30.01	130.18	17.00	18.45	501.6	2.84	3.18	320	400	70	295	60	完整
VI-1	31.08	153.37	18.18	19.27	593.1	2.49	2.70	370	340	80	295	60	完整

表 3  $20^\circ$ 斜侵彻的实验结果和理论预期

Table 3 Experimental results and theoretical predictions under  $20^\circ$  oblique penetrations

实验号	I	N	X/d		m'/g	$(\Delta m/m)/\%$		初始弹坑尺寸/mm					$\delta/(^\circ)$		侵彻弹体变形情况
			实验值	分析值		实验值	分析值	实验值					分析	最终	
								d <sub>fl</sub>	d <sub>fu</sub>	kd	d <sub>fl</sub>	kd			
I-2	26.61	78.99	20.16	15.71	300.4	4.11	5.19	330	390	70	314	57	1.82	<2	完整
II-2	27.32	91.58	19.76	16.33	351.5	3.22	4.48	280	310	65	314	57	1.72	8.5	完整
III-2	27.71	104.56	18.58	16.76	—	—	3.92	350	440	60	314	57	1.59	12.9	轻微弯曲
IV-2	28.61	121.66	17.79	17.47	469.2	2.75	3.37	470	470	50	314	57	1.43	7	完整
V-2	28.50	130.20	16.21	17.51	502.9	2.61	3.15	280	310	65	314	57	1.52	9.9	轻微弯曲
VI-2	28.95	151.96	20.16	17.98	593.3	1.55	2.70	380	220	70	314	57	1.42	8	轻微弯曲

表4 30°斜侵彻的实验结果和理论预期

Table 4 Experimental results and theoretical predictions under 30° oblique penetrations

实验号	$I$	$N$	$X/d$		$m'/g$	$(\Delta m/m)/\%$		初始弹坑尺寸/mm					$\delta/(^\circ)$		侵彻弹体变形情况
			实验值	分析值		实验值	分析值	实验值			分析值		分析	最终	
								$d_{\text{fl}}$	$d_{\text{fo}}$	$kd$	$d_{\text{fl}}$	$kd$			
I-3	26.37	78.29	20.16	15.48	299.2	3.63	5.16	400	370	—	340	52	2.37	5.7	轻微弯曲
II-3	27.28	90.97	16.60	16.20	347.9	3.57	4.44	400	440	—	340	52	2.23	21.3	完整
III-3	27.61	104.76	16.21	16.62	402.7	3.08	3.85	380	400	—	340	52	2.13	26.8	弯曲
IV-3	28.56	123.27	18.18	17.37	475.6	2.72	3.27	310	450	60	340	52	2.01	18.1	轻微弯曲
V-3	28.58	130.96	15.81	17.47	—	—	3.08	380	440	60	340	52	1.98	21.9	弯曲
VI-3	29.14	149.52	15.81	17.96	577.8	2.61	2.70	410	380	—	340	52	1.91	21.3	弯曲且断裂

#### 4 着靶姿态

图4中分别给出弹体正侵彻、20°和30°斜侵彻的典型着靶姿态。图5中给出了III型弹体以着角29.4°斜侵彻的着靶过程(实验号III-3),各帧时间距是 $7.5 \times 10^{-5}$  s。共18发实验的高速摄影表明,弹体着靶姿态控制很好,没有明显攻角和摆角变化。从着靶过程可以看出,如图5所示,对于设计的6种实验弹型,其弹体侵彻过程中的姿态与着靶前姿态保持着较好的一致性,初始方向角变化很小。

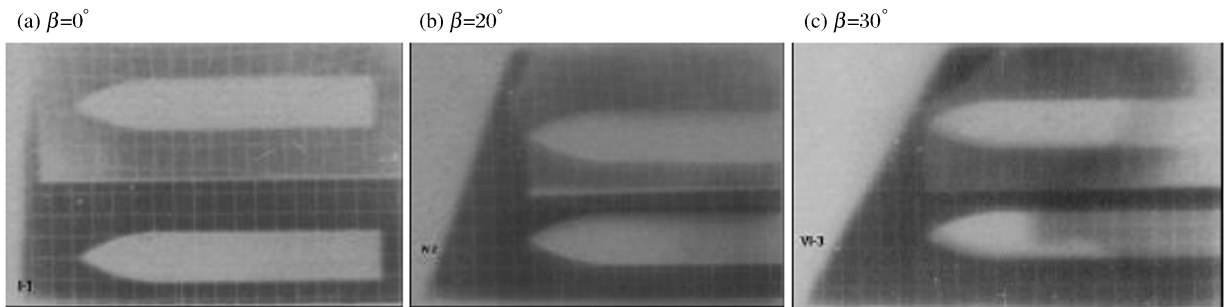


图4 侵彻实验中弹体着靶姿态

Fig. 4 Impact appearances of projectiles under the different penetrations

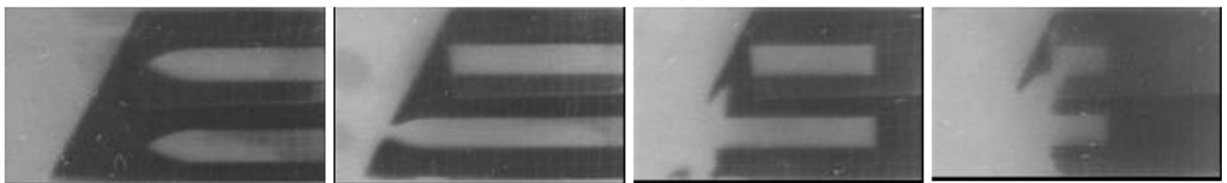


图5 III-3弹体30°斜侵彻混凝土的着靶过程

Fig. 5 High-speed photographs of projectile III-3 penetrating into concrete target at 30°

文献[9~10]中已给出刚性弹斜侵彻/穿甲混凝土靶的理论分析。对于无限厚靶,侵彻过程依次包括初始弹坑和隧道扩孔。该模型假定在初始弹坑形成阶段,因为非轴对称阻力作用而在靶体近表面发生方向角改变 $\delta$ 。当弹体头部完全进入混凝土后,即隧道扩孔阶段,仅有沿弹体轴向的阻力,可由动态空腔膨胀理论进行分析。初始方向角改变 $\delta$ 可写为<sup>[9~10]</sup>

$$\sin^2 \delta = \frac{k\pi}{4} \left( \frac{1}{I} + \frac{1}{N} \right) \delta \sin \beta \quad (1)$$

式中: $\beta$ 是初始着角, $k$ 是斜侵彻混凝土靶时初始弹坑沿轴线的量纲一深度, $I$ 和 $N$ 分别被定义为撞击函数和弹头形状函数<sup>[7~8]</sup>

$$I = \frac{mv_0^2}{d^3 S f_c} \quad N = \frac{m}{\rho d^3 N^*} \quad (2)$$

式中:  $m$  为弹体的质量,  $v_0$  为弹体的初始撞击速度,  $f_c$  为靶体无约束抗压强度,  $S$  为与  $f_c$  有关的一个量纲一常数,  $N^*$  是尖卵形弹头的形状因子

$$N^* = \frac{1}{3\psi} - \frac{1}{24\psi^2} \quad (3)$$

式中:  $\psi$  是尖卵形弹的曲径比 CRH(caliber-radius-head)。对 CRH=3 的 6 种实验弹型,  $N^* = 0.1065$ 。根据实验初始条件, 可计算相应侵彻弹的  $I$  和  $N$  值, 以及斜侵彻初始方向角改变值  $\delta$ , 如表 2~4 所示。6 种实验弹型在  $20^\circ$  和  $30^\circ$  斜撞击时  $\delta$  值很小, 一般有  $1.4^\circ < \delta < 2.4^\circ$ 。这与前面的实验结果(见图 5)是相符的, 也即, 合适的尖卵形弹体斜入侵过程中的姿态可与着靶前姿态保持较好一致。

式(1)定量表示了弹体形状、靶体材料、撞击速度及初始着角等因素的影响。撞击速度越大或弹体越尖细(也即  $I$  或  $N$  越大), 方向角改变  $\delta$  越小; 较小初始着角  $\beta$  对应于较小的方向角改变。反之亦然。刚性弹条件可保证随后隧道扩孔阶段的稳定性, 即其弹道保持直线轨迹。但是, 若弹体出现一定的弯曲变形, 虽然初始方向角改变  $\delta$  较小, 随后的隧道扩孔将不再稳定, 其弹道轨迹也将发生弯曲。

## 5 侵彻效应

### 5.1 侵彻深度

可根据式(2)计算各实验弹体的撞击函数  $I$  和几何函数  $N$ 。如表 1 所示, 在正侵彻、 $20^\circ$  和  $30^\circ$  斜侵彻三种条件下对应的形状函数  $N$  取值为  $78 < N < 153$ , 撞击函数  $I$  取值为  $25 < I < 31$ 。根据先前的理论分析<sup>[1~3]</sup>, 笔者建议深层钻地弹应有以下特点: 其弹头形状函数  $N$  的值为  $100 \sim 200$ , 撞击函数  $I$  的值为  $50 \sim 100$ , 而其量纲一侵彻深度  $X/d$  的值为  $25 \sim 50$ 。6 种设计弹型的形状函数基本接近或位于建议取值范围内, 弹型设计是比较合理的。但由于实验条件所限, 弹体发射初速较小, 撞击函数取值未能达标, 其深侵彻能力尚有待更高速度的侵彻实验验证。

根据文献[9~10], 正/斜深侵彻深度  $X$  可表示为

$$\frac{X}{d} = \frac{2}{\pi} N \ln \left( \frac{1 + \frac{I \cos^2 \delta}{N}}{1 + \frac{k\pi}{4N}} \right) + k \quad (4)$$

当  $N \gg I$  和  $N \gg 1$  时, 式(4)可简化为

$$\frac{X}{d} = \frac{2I \cos^2 \delta}{\pi} + \frac{k}{2} \quad (5)$$

尽管各弹体质量和几何结构的不同导致其几何函数值有较大差别, 初速差异也较大, 但如表 2~4 所示, 正/斜深侵彻深度  $X$  的实验值与理论分析是吻合的, 一般有  $15 < X/d < 20$ 。因为火炮装药量相等 ( $\sim 70$  g), 忽略火炮发射的膛内差异, 各弹体发射时的初始动能应大致相当。根据公式(2), 对应的撞击函数  $I$  值也是相当的, 又因为斜初始方向角改变  $\delta$  值很小 ( $1.4^\circ < \delta < 2.4^\circ$ ), 因此, 18 发正/斜侵彻实验的侵彻深度应该是接近的。实验证明, 当弹体几何函数  $N$  值较大时 ( $N \approx 100$ ), 量纲一侵彻深度  $X/d$  更敏感于撞击函数  $I$  的变化。

### 5.2 终点弹道

弹体侵彻混凝土靶体的弹道轨迹包括初始弹坑和隧道区, 如图 6 所示。实验中观测到, 若弹体无弯曲变形, 其隧道保持很好的直线轨迹; 但若弹体发生弯曲变形, 隧道轨迹也有不同程度的弯曲, 并随弹体弯曲的严重而加剧, 导致弹体最终位置与入射方向有一定夹角。这也是表 3-4 中最终方向角改变的实验值远大于初始方向角改变的分析值的原因。需指出的是, 因靶体没有按侵彻对称面进行解剖, 表 3~4 中最终方向角改变值的测试参考面比较随意, 其值有较大误差, 仅供参考。

特别注意到图 6(b), 在隧道区周围, 可明显观测到颜色趋白(尤以其中的卵石显著)的粉碎区, 其直



径约为弹径的3倍,粉碎区前沿与弹头形状相似,超前弹头尖约1~1.5倍弹径距离。粉碎区外有径向裂纹扩展区,该裂纹区的破坏特征也很典型。从混凝土着靶面破坏形貌照片(见图7)可知,对应于初始弹坑,混凝土靶面都有多条(一般7~8条)径向裂纹,从着弹处(严格地说,从粉碎区外)向外放射状发展至靶体边界。正侵彻时径向裂纹分布均匀。斜侵彻时径向裂纹分布则为上疏下密,上下靶面裂纹分布存在明显差异。这些裂纹均是贯穿性的。从靶体解剖看,从着靶面至弹体头尖部停止的稍前处,除隧道(初始弹坑)和粉碎区外,混凝土靶中存在径向裂纹区。该部分靶体易碎分裂成瓣状,靶体解剖就是按裂纹纹理进行的。

M. J. Forrestal 等<sup>[5]</sup>、S. Satapathy<sup>[13]</sup>利用动态空腔膨胀理论分析混凝土、陶瓷等半脆性和脆性材料靶体的侵彻问题,在靶介质的分区中,由里向外,依次为空腔(隧道)区、粉碎区、径向裂纹区、弹性区、未变形区。因此,实验观测与理论分析相符。

文献[1、3]中讨论了有界混凝土靶在侵彻中由于后边界的影响易形成减速度拖曳现象。减速度拖曳有可能导致实验失真,侵彻深度出现二阶放大;深侵彻实验设计中应避免后边界的影响。为此,建议取混凝土靶的设计厚度(侵彻极限) $f$ 为

$$f/d = X/d + \lambda \quad (6)$$

式中: $X/d$ 是理论侵深, $\lambda$ 是经验常数, $5 < \lambda < 10$ ,可忽略后边界效应。从实际效果看,该设计建议是经济合适的,混凝土靶足够厚,弹头尖前的混凝土靶夯实无裂纹破坏(见图6)。



图6 不同侵彻条件下的弹道轨迹

Fig. 6 Ballistic trajectories of projectiles in concrete targets under the different penetrations

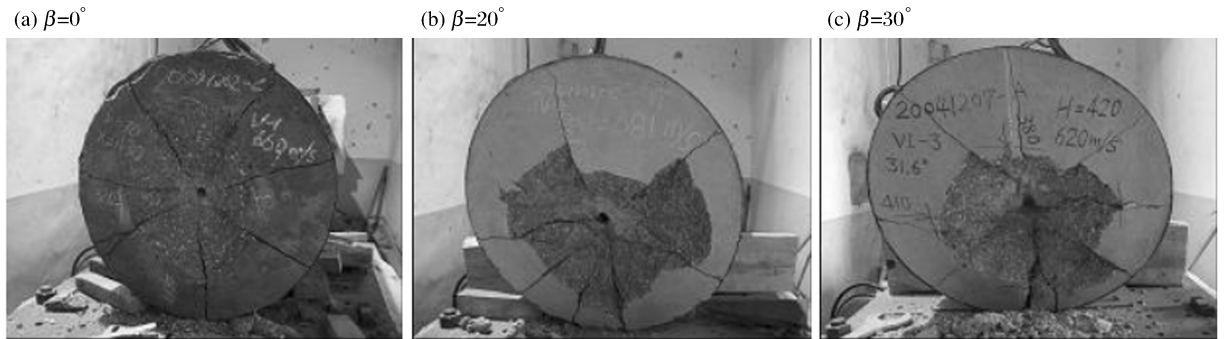


图7 不同侵彻条件下的着靶面破坏形貌

Fig. 7 Appearances of front surfaces of concrete targets under the different penetrations

### 5.3 初始弹坑

初始弹坑的实验测试数据较分散,采用平均分析。如图7所示,正侵彻时其初始弹坑是正截锥形,由表2可得锥正截面平均直径 $d_f \approx 340$  mm,平均深度 $kd \approx 70$  mm,其半锥角 $\alpha \approx 66^\circ$ 。斜侵彻时,初始弹坑是斜截锥形,如图7所示,靶体上部破坏范围(迎弹面)小于下部,其锥斜截面大于正侵彻弹坑的锥

正截面。根据表 3~4 可得, 锥斜截面水平平均直径  $d_{\text{H}} \approx 370$  mm, 竖直平均直径  $d_{\text{V}} \approx 390$  mm; 平均深度较正侵彻时小,  $kd \approx 60$  mm。

文献[7~10]中对刚性弹正/斜侵彻混凝土靶的初始弹坑已有分析。假设刚性弹正侵彻混凝土靶时形成的锥形弹坑深度是  $kd$ 。根据滑移线场分析[7~8]

$$k = 0.707 + h/d \quad (7)$$

式中:  $h$  为弹体头部长度的。M. J. Forrestal 等[4]建议  $k = 2.0$ 。而在混凝土靶的斜撞击中, 初始弹坑假定为沿轴线深度  $kd$  的斜截锥形[9~10]

$$k = (0.707 + h/d) \cos \beta \quad (8)$$

锥斜截面与正截面夹角等于撞击着角  $\beta$ 。针对本实验研究的 6 种弹型, 可分析得到正侵彻、 $20^\circ$  和  $30^\circ$  斜侵彻三种条件下初始弹坑的量纲一深度  $k$  分别为 2.37、2.23、2.05, 或者初始弹坑的深度分别为 60、57、52 mm。

前坑的形成与有界混凝土靶穿甲时后坑的形成相似, 由于应力波在自由表面的反射, 形成混凝土的拉伸破坏。混凝土的抗拉强度约为其单轴抗压强度的 1/10。文献[9~10]中利用剪切冲塞模型, 采用正截锥形或斜截锥形近似后坑对正/斜穿甲进行分析。Q. M. Li 等[14]利用 Mohr 圆的概念, 分析得到正穿甲时后坑的半锥角  $\alpha$ , 有  $45^\circ < \alpha < 73.3^\circ$ , 取平均值  $\alpha \approx 60^\circ$ 。而大量实验值也常为  $\alpha \approx 60^\circ$ [9~10]。类似文献[9~10、14], 若取前坑半锥角与后坑半锥角一致, 也即  $\alpha = 60^\circ$ , 针对本实验研究的 6 种弹型, 可分析得到正侵彻初始弹坑的正截面直径  $d_{\text{H}} = 295$  mm,  $20^\circ$  和  $30^\circ$  斜侵彻初始弹坑的斜截面在水平方向直径  $d_{\text{H}}$  分别 314、340 mm。

## 6 弹体结构

### 6.1 侵彻后的弹体观测

相关研究已表明[1~3, 15], 单纯动能弹侵彻存在侵彻深度上限。弹体的变形, 如弯曲、断裂、质量侵蚀等, 将会显著影响侵彻能力。另一方面, 为确保弹体到达目标后的有效性, 也要求弹体结构在侵彻过程中保持完整。考察侵彻后弹体结构是否完整, 与分析其侵彻能力一样, 都是本实验的重要目的。相关弹体的结构设计是根据文献[1~3]的理论工作进行的, 故本实验也是对钻地弹结构力学设计理论的验证。

图 8 所示是实验后的弹体, 实验后弹体完整。其中  $30^\circ$  斜撞击实验中, 与薄壁弹 V-3 弹体弯曲但完整过靶成对比的是, 厚壁弹 VI-3 弹体发生弯曲, 而且因焊接质量原因在尾段焊口处断裂。可观测到各弹体前 1/3 都有明显的质量侵蚀, 头部有钝挫感。 $20^\circ$  和  $30^\circ$  斜撞击实验中, 长径比为 8 和 10 的弹体分别有不同程度弯曲, 弯曲起始位置约在距头尖部 1/3 全弹长处。



图 8 侵彻后的弹体形貌

Fig. 8 Projectiles after penetrations

### 6.2 弹体的质量侵蚀

文献[1、3]中理论分析弹体头尖部由于承受过高载荷而发生质量侵蚀。对于尖卵头形弹体, 设侵蚀部分最大横截面半径为  $d_c$ , 侵蚀部分的量纲一高度

$$\frac{\Delta}{h} = 1 - \sqrt{1 - \frac{d_c \psi - 1/2}{d \psi - 1/4} \frac{d_c^2}{d^2} \frac{1}{4\psi - 1}} \quad (9)$$

式中： $h$  是弹体尖卵头部的高度。若  $d_c/d \ll 1$ ，式(9)可简化为

$$\frac{\Delta}{h} = \frac{1}{2} \frac{d_c \psi - 1/2}{d \psi - 1/4} \quad (10)$$

式中： $\left(\frac{d_c}{d}\right)^2 = \frac{Sf_c}{\sigma_{cr}} \left(1 + \frac{I}{N}\right)$ ， $\sigma_{cr}$  为弹体壳体材料的临界破坏(抗拉)强度。

据此可分析得到侵蚀质量。由表2~4可知，各实验弹体的质量侵蚀与弹体总质量之比  $\Delta m/m \approx 2\% \sim 4\%$ ，与理论分析值( $\Delta m/m \approx 2.7\% \sim 5.4\%$ )相当，也与 M. J. Forrestal 等<sup>[4]</sup>的实验结果接近。

### 6.3 弹体的抗压/拉和抗弯分析

根据文献[1~2]的强度分析，得到弹体壳体在抗压/拉条件下的量纲一极限厚度

$$\frac{h_t}{d} = \frac{1}{4} \frac{Sf_c}{\sigma_{cr}} \left(1 + \frac{I}{N}\right) \quad (11)$$

弹体斜侵彻混凝土靶体而不出现弯曲型破坏的最大理论着角计算公式是

$$\sin\beta \leq \frac{27}{2} \frac{d}{L} \frac{\sigma_{cr}}{Sf_c} \frac{N}{N+I} \frac{h_t}{d} \left(1 - \frac{3h_t}{d} + \frac{4h_t^2}{d^2} - \frac{2h_t^3}{d^3}\right) \quad (12)$$

6种弹型的设计壁厚  $h_t/d$  分别为 0.10 和 0.15，都大于或稍大于抗压/拉的理论极限壁厚，在距弹头尖全弹长 1/3 处还有加强筋。因此，在实验速度范围内，正侵彻时的抗压/拉强度是足够的。这与图8的弹体完整相符。但在不同撞击着角下，其抗弯能力不同。图9中给出了6种弹型在不同初始速度下斜侵彻发生弹体弯曲的临界理论着角曲线，以及正撞击、20°和 30°斜撞击实验中观测得到的弹体变形情况。针对 2.5Ma 速度以内的深侵彻，若弹体材料是 D6A、G50 等高强度合金钢，为确保足够大的形状函数( $100 \leq N \leq 200$ )和不出现弹体弯曲破坏，文献[1~2]中建议深侵彻弹体壁厚  $h_t/d \geq 0.15$ 。显然，实验结果与理论分析是吻合的。

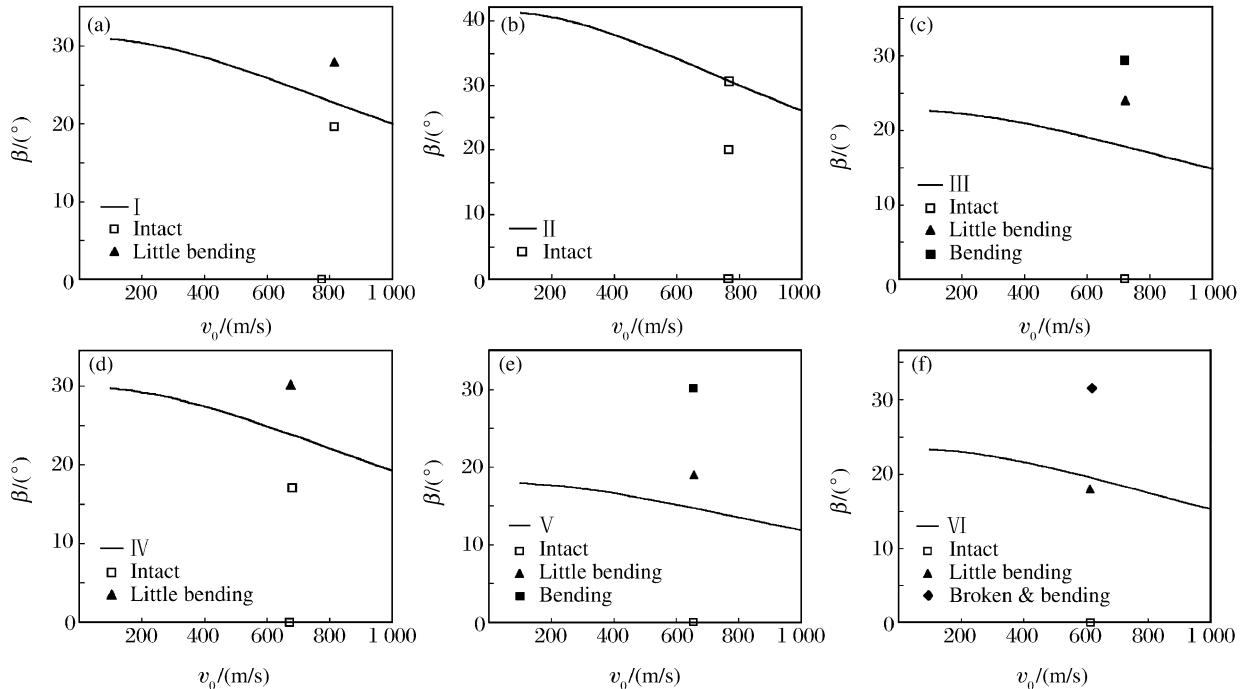


图9 不同弹型在不同侵彻速度时发生弯曲的临界着角及实验变形情况

Fig. 9 Critical oblique angles of bending of the different projectiles and corresponding experimental results



## 6.4 弹体的后盖

图8中还分别给出正侵彻、 $20^\circ$ 和 $30^\circ$ 斜侵彻的三组实验弹体的形貌。可以清楚地看到,大部分弹体后盖保持完整;少量弹体后盖螺纹破坏,后盖前冲并与装填物相抵。因此,6种弹型的后盖螺纹设计已接近处于临界状态。根据文献[1、3]后盖设计的强度校核,为确保后盖螺纹内径断面的抗拉承载,要求后盖(螺纹)材料的抗拉强度 $\sigma_b > 1.5Sf_c(1+I/N)$ 。对后盖采用硬铝2Al2,其抗拉强度小于理论分析值,可能是后盖螺纹的材料失效导致它破坏。

## 7 结 论

在钻地弹结构的力学设计理论工作的基础上,开展 $\varnothing 25$  mm 火炮小尺寸缩比弹实验研究。结合该设计理论和笔者先前的工作,对正/斜侵彻的实验结果进行了分析,包括着靶姿态、靶体终点效应以及弹体结构。理论分析与实验结果相互吻合,进一步证实了相关理论工作的合理性。研究表明,钻地弹结构的力学设计理论有助于理论指导钻地弹的结构设计和找寻合理的动能侵彻弹型。实验证实,靶体设计适用经济,6种弹型设计合理,可成为适用于不同目的的钻地侵彻弹建议弹型。

课题组成员还包括中国工程物理研究院结构力学研究所414室的梁斌、徐群、唐平,401室的翁桦、吴庆海、何鹏、王薇、田常津,412室的黄琨、衣志勇、郭静以及环境中心卫剑峰、李光宁等。感谢中国工程物理研究院结构力学研究所车间和907所完成弹体加工。作者同时感谢刘彤研究员、钱立新研究员、李思忠高工和蒋荣峰高工对本课题工作开展提供的便利。

## 参考文献:

- [1] 陈小伟. 钻地弹结构的力学设计[R]. ZW-D-2004083, 绵阳: 中国工程物理研究院总体工程研究所, 2004.
- [2] 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
- [3] 陈小伟, 金建明. 动能深侵彻弹的力学设计(II): 弹靶的相关力学分析与实例[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(1): 71—78.  
CHEN Xiao-wei, JIN Jian-ming. Mechanics of structural design of EPW(II): Analyses on the design of EPW projectiles, concrete targets and examples[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(1): 71—78.
- [4] Forrestal M J, Altman B S, Cargile J D, et al. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 1994, 15(4): 395—405.
- [5] Forrestal M J, Tzou D Y. A spherical cavity expansion penetration model for concrete targets[J]. International Journal of Solids and Structures, 1997, 34(31—32): 4127—4146.
- [6] Forrestal M J, Frew D J, Hickerson J P, et al. Penetration of concrete targets with deceleration-time measurements[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(5): 479—497.
- [7] 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.
- [8] 陈小伟. 刚性弹对混凝土靶的撞击和侵彻[R]. ZW-D-2003017, 绵阳: 中国工程物理研究院总体工程研究所, 2003.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] CHEN Xiao-wei. Dynamics of Metallic and Reinforced Concrete Targets Subjected to Projectile Impact[D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2003.
- [12] 陈小伟, 高海鹰, 金建明, 等. 一种钻地弹战斗部弹体结构[P]. 200510001433. X.
- [13] Satapathy S. Dynamic spherical cavity expansion in brittle ceramics[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38: 5833—5845.

- [14] 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.
- [15] Chen X W, Li Q M. Transition from non-deformable projectile penetration to semi-hydrodynamic penetration[J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 2004,130(1):123-127.

## Mechanics of structural design of EPW(Ⅲ): Investigations on the reduced-scale tests

CHEN Xiao-wei<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Fang-ju<sup>1</sup>, YANG Shi-quan<sup>1</sup>, XIE Ruo-ze<sup>1</sup>,  
GAO Hai-ying<sup>1</sup>, XU Ai-ming<sup>1</sup>, JIN Jian-ming<sup>1</sup>, QU Ming

1. Institute of Structural Mechanics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;
2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The normal and oblique penetration tests of reduced-scale earth penetrating weapon(EPW) are conducted. Various projectile structures and concrete targets as well as the experimental method are designed. The impact velocities vary in the range of 620~820 m/s, and the integrity of projectile structures are clarified. A large amount of experimental results of normal/oblique penetrations are summarized and the theoretical analyses are further conducted on the impact appearance, terminal ballistic effect and the damage of projectile bodies, etc.

**Key words:** mechanics of explosion; structural design; reduced-scale test; EPW; projectile structure; concrete target; penetration

---

\* Corresponding author: CHEN Xiao-wei  
E-mail address: chenxiaoweintu@yahoo.com  
Telephone: 0816-2485473