

文章编号: 1000-5773(2003)01-0069-06

模拟钻地弹的设计与实验研究^{*}

初 哲^{1,2}, 周 刚², 韩娟妮², 杨黔龙², 王可慧², 王金海²

(1. 北京理工大学机电工程学院, 北京 100081;

2. 西北核技术研究所, 陕西西安 710024)

摘要: 对钻地弹的弹体材料、弹体参数、气动性能、侵彻过载和侵彻深度等问题进行了研究。在此基础上, 设计了模拟钻地弹, 并进行了外场试验, 试验取得了成功, 且得到一些有益的结论。

关键词: 侵彻; 过载; 钻地弹; 气动特性

中图分类号: TJ413

文献标识码: A

1 引 言

钻地武器的研究自 1960 年美国的“土壤(包括岩石、砂、冰等地介质)动力学”研究计划开始, 历经 40 年, 取得了显著的进展, 多个国家已有型号装配。我国真正意义上的钻地弹研究, 还处于起步阶段。根据目前的需求, 我们设计了钻地弹的模拟弹, 并进行了侵彻试验。

2 模拟弹的设计

2.1 弹体设计

2.1.1 弹体材料

钻地弹使用环境恶劣, 弹体材料要求具备高强度和高韧性, 国外先后采用过 D6AC、E4340 钢, 现在采用 HP9-4 系列钢^[1]。

国内目前有高强高韧钢 F175 和 G50, 从表 1 列出的几种材料的典型机械性能看, G50 钢的断裂韧性 K_{IC} 值明显高于 HP-9-4-30、F175 等材料。故在模拟弹的设计中选用 G50 钢作为弹体材料。

表 1 几种弹体材料典型的机械性能

Table 1 Mechanical parameters of several materials for EPW

Materials	HRC	σ_b /(MPa)	$\sigma_{0.2}$ /(MPa)	δ (%)	ψ (%)	K_{IC} /(MPa/m ^{1/2})	a_{KU} (J/cm ²)
HP-9-4-30 ^[2]	44~48	1520~1650	1310~1380	12~16	35~50	99~115	24~34
HP-9-4-20 ^[2]	43~47	1380				148	
D-6AC	41~43	1630	1570	9.6	36.8		16
E4340	46	1500	1365	14	48	75	16
F175	45~48	≥1450	≥1350	≥10	≥45		≥45
G50	49.6	1790	1440	14	51	149	68

^{*} 收稿日期: 2001-12-21; 修回日期: 2002-11-12

作者简介: 初 哲(1971—), 男, 硕士, 助理研究员。

2.1.2 弹体参数

弹体的长径比 L/D 影响钻地弹侵彻的稳定性、面质量和飞行姿态的稳定性,尤其对侵彻稳定性的贡献最大^[2]。根据 SNL 研究表明,中等钝度的头部形状对于硬靶撞击可能是最好的^[3]。故选取弹体头形系数 $CRH=4.5$,模拟弹的长径比为 8。

2.1.3 弹体强度设计

根据空腔膨胀理论,可推得弹丸在撞击过程中所受阻力的方程^[4~6]

$$F = cz \quad z < 4D \quad (1)$$

$$F = \pi D^2 (Sf'_c + NB\rho v^2) \quad 4D < z < P \quad (2)$$

$$N = (8\Psi - 1)/(24\Psi^2) \quad (3)$$

式中: c 为比例常数; F 为侵彻阻力, N ; z 为侵彻深度, m ; D 为弹体外径, m ; S 为靶介质无侧限压缩强度无量纲经验常数; f'_c 为靶介质无侧限压缩强度, Pa ; Ψ 为卵形头部形状系数; B 为介质材料压缩系数; ρ 为介质材料的密度; kg/m^3 ; v 为撞击速度, m/s 。

由式(1)和式(2)推得

$$c = \frac{\pi D^2}{4} (Sf'_c + NB\rho v_1^2) \quad (4)$$

$$v_1^2 = \frac{mv_s^2 - 4\pi D^3 Sf'_c}{m + 4\pi D^3 NB\rho} \quad (5)$$

$$a_c = \frac{-(\pi D^2 Sf'_c/m)}{\cos^2 \left\{ \tan^{-1} \left[\left(\frac{NB\rho}{Sf'_c} \right)^{1/2} v_1 \right] - \frac{\pi D^2}{m} (Sf'_c NB\rho)^{1/2} (t - t_1) \right\}} \quad 4D < z < P \quad (6)$$

$$a_c = \frac{cz}{m} \quad 0 < z < 4D \quad (7)$$

式中: v_1 为弹坑区与弹洞区交接处的速度, m/s ; v_s 为初始速度, m/s ; t_1 为弹至弹坑区与弹洞区交接处经历的时间, s ; a_c 为加速度, m/s^2 。

由于应力最大值产生在弹底圆柱段和圆弧段的交接面,承受较大惯性力,是危险断面,因此,选取这一断面进行强度校核,如图 1 所示。

$$\sigma_z = 4n_{x, \max} G_g / [\pi(D_n^2 - d_n^2)] \quad (8)$$

式中: σ_z 为 $n-n$ 断面的应力, Pa ; $n_{x, \max}$ 为最大过载系数; D_n 为 $n-n$ 断面外径, m ; d_n 为 $n-n$ 断面内径, m ; G_g 为 $n-n$ 断面后部弹体的重量, kg 。

定义强度储备系数 f 为:材料的强度极限 σ_b 与设计载荷下结构内部应力 σ_{sj} 的比值,即

$$f = \sigma_b / \sigma_{sj} \quad (9)$$

在冲击载荷作用下, $f=1.5$ 。代入强度条件

$$\sigma_{sj} = \sigma_z = 4n_{x, \max} G_g / [\pi(D_n^2 - d_n^2)] = \sigma_b / f \quad (10)$$

求得最小壁厚。将 $d_n = D_n - 2\delta$ 代入上式,得出最小壳体壁厚为

$$\delta = \frac{D_n^2}{2} - \sqrt{\frac{D_n^2}{4} - \frac{G_g n_{x, \max} \eta}{\pi \sigma_b}} \quad (11)$$

2.2 模拟弹气动性能设计的分析

先分析单独弹体和单独尾翼的气动特性,然后考虑两者之间的相互干扰,再求出体翼组合体——即模拟弹的气动特性^[7]。

2.2.1 弹体气动性能分析

采用火箭弹气动特性分析的解析方法,计算弹体的阻力系数、升力系数和压力中心系数。图 2 为弹

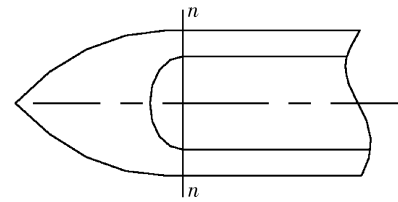


图 1 强度校核位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the strength examination location in a projectile

体的主要参数。计算结果见表 2。表 2 中: $C_{x,1B}$ 为弹体轴向力系数, $C_{x,1n}$ 为头部轴向力系数, $C_{x,1t}$ 为尾部轴向力系数, $C_{x,1b}$ 为底部轴向力系数, $C_{x,fB}$ 为摩擦阻力系数, $\Delta C_{x,F}$ 为由于引信增加的阻力; $C_{y,1B}$ 为弹体法向力系数, $C_{y,1n}$ 为头部法向力系数, $C_{y,1t}$ 为尾部法向力系数, $C_{y,1f}$ 为由粘性引起的附加法向力系数; $C_{x,B}$ 为弹体的阻力系数, $C_{y,B}$ 为升力系数; X_{cpB} 为弹体压心系数, X_{cpn} 为弹体头部的压心系数; X_{cpt} 为弹体尾部的压心系数。

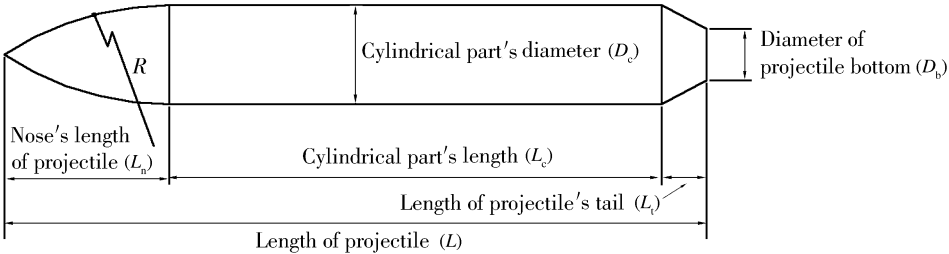


图 2 弹体气动外形示意图
Fig. 2 Schematic diagram of projectile's aerodynamic shape

表 2 弹体气动性能参数表
Table 2 Aerodynamic parameters of a model EPW

Axial draft coef.						Normal draft coef.				Draft coef.	Lift coef.
$C_{x,1n}$	$C_{x,1t}$	$C_{x,1b}$	$C_{x,fB}$	$\Delta C_{x,F}$	$C_{x,1B}$	$C_{y,1n}$	$C_{y,1t}$	$C_{y,1f}$	$C_{y,1B}$		
0.18	0.1	0	0.065	0	0.414	0.06	0	0	0.06	0.414	0.06
Pressure center coef.			Mass center coef.			Stability margin					
X_{cpn}	X_{cpt}	X_{cpB}	X_{cmB}								
0.27	1	0.36	0.4			-0.04					

计算结果表明:模拟弹弹体的稳定储备量为负值,不可能保持良好的飞行姿态,因此,必须加尾翼,调整压心位置,保证足够的稳定储备量。

2.2.2 尾翼的设计及气动性能分析

由于模拟弹用火炮发射,发射速度较高,发射过程中尾翼承受较高的膛压,故采用刀形张开式尾翼。尾翼设计为后张式结构,翼片张开后掠一定的角度,以保持尾翼的稳定性。翼片在炮膛内运动时,依靠轴向惯性力收束在一起,避免划伤炮膛,离开炮膛后,模拟弹受空气阻力突然减速,产生反向惯性力,翼片张开。计算结果见表 3。

表 3 尾翼气动特性参数
Table 3 Aerodynamic parameters of projectile empennage

Zero draft coef.	Induce draft coef.	Total draft coef.	Lift coef.	Pressure center coef.
0.097	≈0	0.097	0.04	0.5

2.2.3 模拟弹气动特性的计算

模拟弹由弹体和尾翼组合而成,但其气动特性不是两者气动特性的简单叠加,因为,体翼间存在气动互相干扰,产生额外的气动力,为求得较准确的气动特性数据,必须考虑互相干扰的影响。计算结果见表 4。

表 4 模拟弹气动特性参数

Table 4 Aerodynamic parameters of a model EPW

Projectile pressure center coef.	Projectile lift coef.	Fin pressure center coef.	Fin lift coef.	Combination lift coef.	Combination pressure center coef.	Combination stability margin
0.36	0.06	0.5	0.04	0.108	0.59	21.5%

实验表明,良好的尾翼稳定弹丸,其稳定储备量 $B=15\%\sim 28\%$,可见,我们设计的模拟弹的气动性能良好。模拟弹总体示意图见图 3。

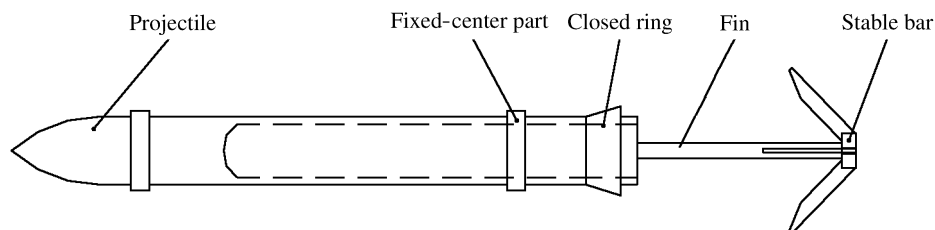


图 3 模拟弹总体示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a model EPW

3 结果及分析

试验采用 85 mm 滑膛炮作为发射工具,撞击强度为 30 MPa 的钢圈约束混凝土靶板,炮位距靶约 80 m,炮管垂直靶面,靶尺寸为 $\phi 2\text{ m}\times 1.5\text{ m}$,试验中对靶速度、侵彻过载、飞行姿态及终点弹道进行了测量。

图 4 为模拟弹以 530 m/s 的速度撞击混凝土靶的正面图。从弹洞观察,模拟弹着靶姿态基本垂直靶面,侵彻过程稳定。弹体尾部稳定杆折断,尾翼飞散,但尾翼与弹体的螺纹连接尚紧密。

图 5 为模拟弹穿过纸靶所留下的弹洞和尾翼片的切痕。弹洞与模拟弹直径几乎一致,切痕长度也与尾翼一致。由于纸靶与钢圈约束混凝土靶平行,图 5 表明模拟弹尾翼工作正常,弹飞行姿态垂直靶面。



图 4 速度为 530 m/s 的模拟弹撞击靶正面

Fig. 4 Target penetrated by a model EPW with a velocity of 530 m/s

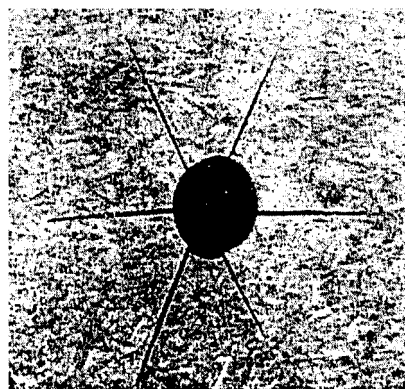


图 5 纸靶显示飞行姿态

Fig. 5 Situation of a model EPW penetrating through a paper target

图 6 为模拟弹内存储器所记录的侵彻过程的减加速度曲线,最大减速度约为 23 kg, 侵彻时间约 5 ms。

弹体强度 侵彻后的弹体保持完好,未发生塑性变形,这说明弹体强度足够,作为一种新型的高强度高韧钢,G50 钢可以满足这个着速范围内的钻地弹的要求。

侵彻过载 试验测试的侵彻峰值与计算值吻合得很好。

侵彻深度 目前推出的预示钻地弹的侵彻深度的公式较多,寻找适合我们实际情况的侵彻深度的计算公式是我们试验的目的之一。表 5 列出了用几种公式计算的侵彻深度,以及与试验值的比较,结果表明,Young 公式^[8]的计算结果与试验值符合较好。

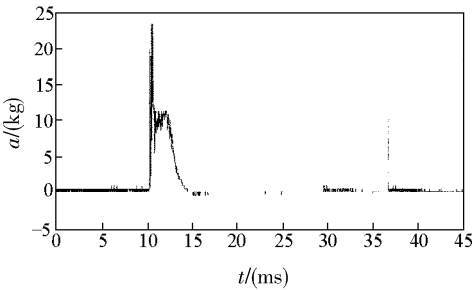


图 6 侵彻过载测试曲线
Fig. 6 Penetration deceleration curve

表 5 侵彻深度的计算值和实验值的比较分析
Table 5 Comparison of calculated penetration depths with experimental results

No.	Section mass /(kg)	v_{el} /(m/s)	Target yield strength /(MPa)	Experimental penetration depth L_0 /(m)	By using of Eq. Young	
					Calculated depth L /(m)	$(L_0 - L)/L_0$
1	1763	613	30	0.981	1.05	7%
2	1499	460	30	0.650	0.69	6%
3	1763	670	30	1.09	1.17	7.3%
4	1499	430	30	0.57	0.62	8.7%

No.	By using of Eq. SHT		By using of armour-piercing equation	
	Calculated depth L /(m)	$(L_0 - L)/L_0$	Calculated depth L /(m)	$(L_0 - L)/L_0$
1	1.56	58%	0.806	17.7%
2	0.89	37%	0.42	35.4%
3	1.69	55%	0.92	15.6%
4	0.90	57.8%	0.38	33%

4 结 论

在理论研究的基础上,设计了模拟钻地弹并进行了试验。试验证明,模拟弹具备足够的强度、良好的气动性能和预期的侵彻能力,试验测试的侵彻过载与计算值符合较好。通过试验发现,Young 方程是目前预估侵彻深度比较理想的方程。

衷心感谢兵器工业总公司 212 研究所康兴国高级工程师、张建刚研究员对试验的指导。

References:

- [1] Werne R W. Structure Response of an Earth Penetrator [R]. UCID-17327, 1982.
- [2] Bernard R S, Creighton D C. Projectile Penetration in Soil and Rock: Analysis for Non-Normal Impact [R]. AD/A070532, 1981.
- [3] Henderson D. Evaluation of High L/D Earth Penetrators [R]. AD/A 086220, 1974.
- [4] Henderson D. Impact and Penetration Technology Program Parametric Study [R]. AD/A 052700, 1979.
- [5] Forrestal M J. Penetration of Concrete Targets [R]. SAND 92-2513, 1992.
- [6] Forrestal M J. An Empirical Equation Penetration Depth of Ogive-Nose Projectile into Concrete Targets [J]. Int J Impact Engng, 1994, 15(4): 395—405.
- [7] Liu S H, Qiu G S. Design of Rocket Bomb [M]. Beijing: Publishing Company of National Defence Industry, 1983. (in Chinese)
刘树华, 邱光申. 火箭弹设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1983.
- [8] Young C W. Penetration Equations [R]. DE 98001508, 1998.

The Design and Experimental Examination of a Model EPW

CHU Zhe^{1,2}, ZHOU Gang², HAN Juan-Ni², YANG Qian-Long²,
WANG Ke-Hui², WANG Jin-Hai²

(1. College of Electron-Mechanics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;
2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: In this dissertation, a model EPW is designed on the basis of theoretical analyses. Shell material and parameters of a projectile body, such as slenderness ratio and CRH (caliber radius head), were studied. Strength check and aerodynamic properties of a projectile body were investigated. The experimental examination of a projectile on penetrating semi-infinite concrete medium was performed. The values from theoretical prediction have good coincidence with the experimental data. Young equation can be applied to estimate the penetration depth.

Key words: penetration; deceleration; model earth penetrator; aerodynamics property