

钽罩结构参数对 EFP 成型及侵彻性能的控制^{*}

郭腾飞, 李伟兵, 李文彬, 洪晓文

(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094)

摘要: 针对钽材料在成型装药战斗部中的应用问题, 采用 LS-DYNA 仿真软件, 研究了弧锥结合形钽药型罩结构参数(药型罩锥角、药型罩壁厚和药型罩圆弧半径)对 EFP 成型及侵彻性能的影响。揭示了各结构参数对 EFP 成型性能的控制规律, 其中药型罩锥角控制 EFP 的轴向拉伸及径向收缩的能力, 药型罩壁厚控制 EFP 的头部速度及尾部断裂与外张情况, 药型罩圆弧半径控制 EFP 的头部形态及其绝对实心长度。获得了成型性能较佳的钽罩结构参数取值范围, 其中药型罩锥角为 $143^{\circ} \sim 147^{\circ}$, 药型罩壁厚、圆弧半径分别为 0.024~0.026 倍和 0.7~0.8 倍装药口径。各结构参数对 EFP 侵彻深度及侵彻孔径影响的主次顺序分别为: 药型罩圆弧半径、药型罩锥角、药型罩壁厚和药型罩锥角、药型罩壁厚、药型罩圆弧半径。确定了 EFP 成型及侵彻性能均较佳的钽罩结构参数组合: 药型罩锥角为 145° , 药型罩壁厚、圆弧半径分别为 0.025、0.70 倍装药口径。

关键词: EFP; 钽; 药型罩; 实心长度; 数值模拟

中图分类号: TJ410.3 **文献标识码:** A

钽作为药型罩材料在聚能战斗部中的应用是当前成型装药技术研究的热点问题之一, 其研究的核心内容是确定毁伤元成型较佳的药型罩结构参数, 实现聚能战斗部的高效毁伤。目前国外灵巧弹药中已成功应用了钽药型罩, 如美国的 SADARM 末敏弹、德国的 SMART 末敏弹和瑞典的 BONUS 灵巧炮弹等^[1]。针对钽的动力学性能及钽罩侵彻体的应用研究, Zerilli 等^[2]基于位错动力学建立了钽材料 Zerilli-Armstrong 本构模型; Bergh 等^[3]研究发现钽罩爆炸成型弹丸(Explosively Formed Projectile, EFP)的拉伸长度较传统紫铜罩明显提高, 并通过 X 射线试验验证了钽形成 EFP 毁伤元的可行性。在侵彻行为中, 影响侵彻效率最关键的因素为弹靶材料密度比。钽的高密度决定了钽罩 EFP 的高效毁伤能力, 弹道试验表明, Ta 的侵彻性能较 Cu 高 30%~35%^[4]。Weimann 等^[5]通过试验和数值模拟对比了钽、铁 EFP 的侵彻威力, 得出同质量下长径比为 3 的钽 EFP 毁伤能力可等效长径比为 6 的铁 EFP。Rondot^[6]对比研究了空腔钽 EFP、密实钽 EFP 及优化的铁 EFP 的终点效应, 结果表明, 相较于铁 EFP 的侵彻能力, 空腔及密实的钽 EFP 分别提高了 14.2% 和 34.9%。国内前期主要对钽及钽合金的本构关系开展了大量研究, 如张廷杰等^[7-8]研究了钽-钨合金在高压加载下的动态响应和塑性变形机制; 郭扬波等^[9]通过改进 Z-A 模型建立了一种可描述动态应变时效现象的本构模型。上述文献未涉及钽罩结构参数对毁伤元成型及侵彻影响的研究, 结合国内外目前对钽罩 EFP 战斗部的研究现状, 开展钽药型罩结构参数对 EFP 成型及侵彻的控制研究, 揭示各结构参数对 EFP 成型及侵彻的控制规律, 确定毁伤性能较佳的钽罩结构参数匹配方案很有必要, 以为钽罩 EFP 的靶后效应研究提供参考依据。

本研究选取钽作为药型罩材料, 采用 LS-DYNA 仿真软件研究弧锥结合形钽药型罩结构参数对 EFP 毁伤元成型及侵彻性能的影响规律, 确定了 EFP 毁伤元成型及侵彻性能均较佳的钽罩结构参数组合。

* 收稿日期: 2017-10-30; 修回日期: 2017-11-16

基金项目: 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYCX17_0390); 江苏省“青蓝工程”项目

作者简介: 郭腾飞(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事聚能装药战斗部技术研究。E-mail: nustgtf@126.com

通信作者: 李伟兵(1982—), 男, 博士, 副研究员, 博士生导师, 主要从事弹丸的终点效应与目标毁伤技术研究。

E-mail: njstlwb@163.com

1 结构设计及方案选取

1.1 钽罩 EFP 战斗部结构设计

基于对弧锥结合形药型罩及船尾型装药结构的大量研究^[10-11],设计如图 1 所示的钽罩 EFP 战斗部结构,起爆方式为装药中心单点起爆。影响规律研究所涉及的结构参数有药型罩锥角 α 、药型罩壁厚 s 和药型罩圆弧半径 R ,装药及壳体结构参数(装药口径 D_k 、装药高度 H 、船尾倾角 β 和壳体厚度 t)设计如表 1 所示。

表 1 装药及壳体结构参数设计

Table 1 Design of charge and shell's structural parameters

D_k/mm	H/mm	$\beta/(\text{°})$	t/mm
100	90	45	5

1.2 仿真模型及研究方案

本研究所建立的有限元三维仿真模型如图 2 所示。由于成型装药毁伤元的形成存在高应变率、高过载过程,因此仿真中采用 ALE 算法来计算涉及网格大变形、材料流动问题的聚能侵彻体形成过程,炸药、药型罩、空气采用欧拉算法,炸药、药型罩、空气和壳体间的相互作用采用流固耦合算法。药型罩和壳体材料分别选用钽和 45 钢,本构方程选用 Johnson-Cook 模型,状态方程为 Grüneisen 方程;主装药采用 JH-2 炸药,状态方程选取 JWL (Jones-Wilkins-Lee)方程。钽材料的 Johnson-Cook 本构方程关键参数见表 2^[12],炸药、空气和壳体的具体参数见表 3^[13],其中: C 、 S_1 、 S_2 、 S_3 、 γ_0 为材料特性参数, A 为材料准静态下屈服应力, B 为应变硬化系数, n 为应变硬化指数, m 为温度系数, D 为爆速, p_{CJ} 为 Chapman-Jouguet 压力。

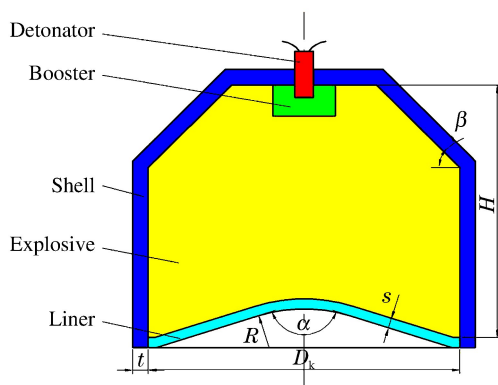


图 1 钽罩 EFP 战斗部结构图

Fig. 1 Diagram of tantalum liner EFP warhead

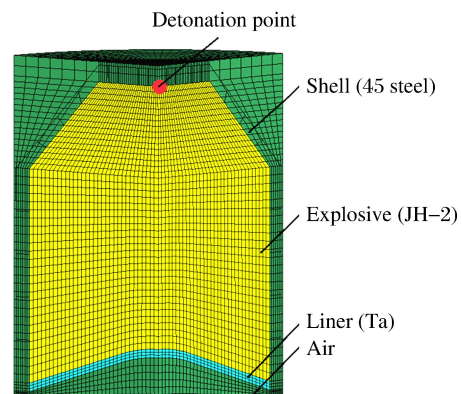


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

为了获得钽药型罩结构参数对 EFP 毁伤元成型及侵彻的影响规律,采取保持其余参数值不变,研究单一参数变化的影响规律的方法。选取药型罩锥角 α 的变化范围为 $135^\circ \sim 155^\circ$ (参量增量为 4°)、药型罩壁厚 s 的变化范围为 $2.0 \sim 3.0 \text{ mm}$ (参量增量为 0.2 mm)、药型罩圆弧半径 R 的变化范围为 $40 \sim 85 \text{ mm}$ (参量增量为 5 mm)。

表 2 钽材料 J-C 本构方程参数^[12]

Table 2 Parameters of J-C constitutive equation for tantalum^[12]

A/MPa	B/MPa	n	C	m
142	164	0.3148	0.057	0.8836

表 3 空气、壳体及炸药材料参数^[13]

Table 3 Parameters of air, shell and explosive^[13]

Air	C	γ_0	S_1	S_2	S_3	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
		0.344	1.4	0	0	0
Shell (45 steel)	A/MPa	B/MPa	C	n	m	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
	496	434	0.014	0.26	1.03	7.83
Explosive (JH-2)	D/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	p_{CJ} /GPa	A/GPa	B/GPa	G	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
	8.425	29.66	854.5	2.05	—	1.845

1.3 EFP 成型性能指标

为了便于后续的研究,根据文献[14],在图 3 中给出了 EFP 成型性能指标的定义。其中: l 为绝对实心长度,是指 EFP 实心部总长; d 为绝对实心直径,是指 EFP 实心部最大直径; L_p 为 EFP 长度,是指 EFP 总长; D_p 为 EFP 直径,是指 EFP 最大直径;相对实心长度用 l/L_p 表示,相对实心直径用 d/D_p 表示。

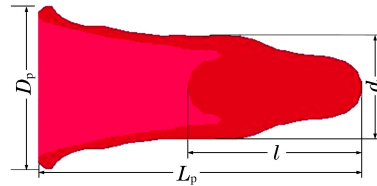


图 3 EFP 成型性能指标示意图
Fig. 3 Schematic diagram of molding performance indicator of EFP

2 钽罩结构参数对 EFP 性能的控制规律

2.1 成型性能的控制

2.1.1 药型罩锥角的影响

选取 $s=2.4 \text{ mm}$ 、 $R=50 \text{ mm}$,对药型罩锥角 α 的 6 个方案进行数值仿真,得出每个方案在 $200 \mu\text{s}$ 时刻 EFP 的头部速度 v_{tip} 及其成型形态,如图 4 所示。计算各方案下 EFP 毁伤元的成型性能指标,得出绝对实心长度 l 、绝对实心直径 d 、相对实心长度 l/L_p 、相对实心直径 d/D_p 随锥角的变化规律曲线,如图 5 所示。

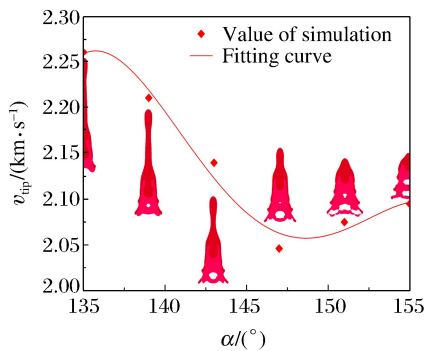


图 4 头部速度随药型罩锥角的变化
Fig. 4 Variation of v_{tip} along α

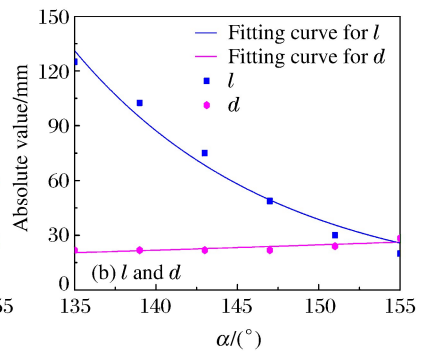
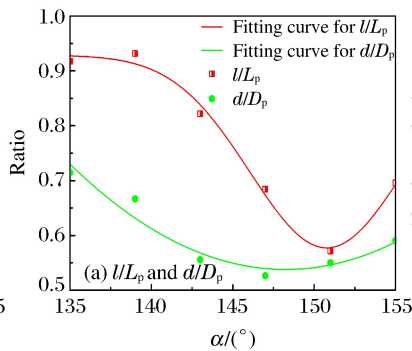


图 5 EFP 成型指标随药型罩锥角的变化曲线
Fig. 5 Variation of molding performance indicator of EFP along α

由图 4 可知:当药型罩锥角大于 143° 后,由于药型罩由压垮翻转作用逐渐转变为翻转变形,导致 EFP 的拉伸长度逐渐减小。在锥角为 147° 时,侵彻体头部速度变化趋势发生改变的原因也是由于药型罩成型模式转为翻转变形后,随着锥角的增加并接近于爆轰波对平板的作用机理,EFP 用于拉伸变形的能量减弱。

由图 5 可知:当药型罩锥角 α 由 135° 增加至 150° 时,随着药型罩压合作用的减弱,毁伤元整体的轴向拉伸及径向收缩能力减小,故其相对实心长度及直径逐渐降低;当药型罩锥角 α 大于 150° 时,药型罩成型模式转变为翻转变形,毁伤元整体的轴向拉伸及径向收缩能力大幅削弱,导致 EFP 长度及直径锐减,而绝对实心长度小幅下降,绝对实心直径基本不变,故其相对实心长度及直径略有增加。因此,药型

罩锥角主要通过控制药型罩的成型模式,进而控制毁伤元轴向拉伸及径向收缩的能力。

综合分析图4和图5:当药型罩锥角小于 143° 时,虽然侵彻体头部速度及相对实心长度、直径较大,但其头尾速度差过大,易拉断;当药型罩锥角大于 147° 时,毁伤元绝对实心长度过小,不利于侵彻。因此,综合考虑毁伤元的成型性能,选取钽药型罩锥角 α 为 $143^\circ\sim 147^\circ$ 。

2.1.2 药型罩壁厚的影响

选取 $\alpha=143^\circ$ 、 $R=50\text{ mm}$,对药型罩壁厚的6个方案进行数值仿真,得出各方案在 $200\ \mu\text{s}$ 时刻EFP的头部速度 v_{tip} 及其成型形态,如图6所示。计算各方案下EFP毁伤元的成型指标,得出绝对实心长度 l 、绝对实心直径 d 、相对实心长度 l/L_p 、相对实心直径 d/D_p 随壁厚的变化规律曲线,如图7所示。

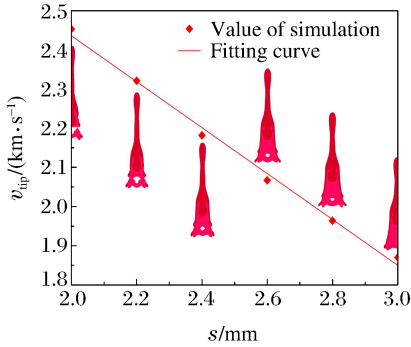


图6 头部速度随药型罩壁厚的变化

Fig. 6 Variation of v_{tip} along s

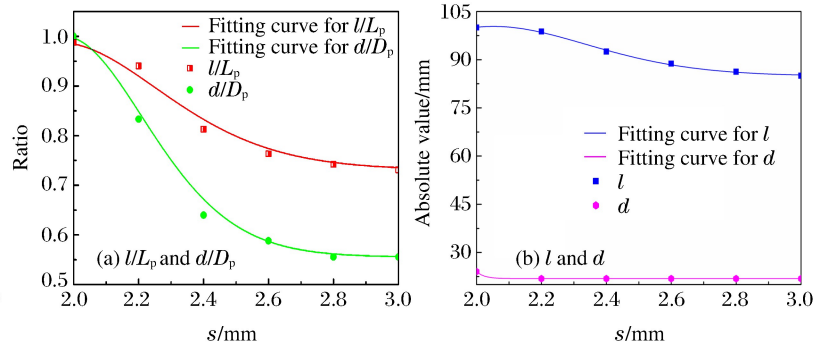


图7 EFP成型指标随药型罩壁厚的变化曲线

Fig. 7 Variation of molding performance indicator of EFP along s

由图6可知:随着药型罩壁厚的增加,EFP尾部的断裂现象逐渐减弱,且当药型罩壁厚 s 由 2.0 mm 增加至 3.0 mm 时,EFP的头部速度呈线性减小的变化趋势,且下降了 23.8% 。

分析图7:当药型罩壁厚 s 由 2.0 mm 增加至 2.6 mm 时,毁伤元尾部断裂现象不断减弱,尾部外张现象逐渐增强,导致EFP长度、直径逐渐增大,而绝对实心长度及直径小幅减小,故EFP相对实心长度、直径呈现快速下降的趋势;当药型罩壁厚 s 大于 2.6 mm 时,毁伤元尾部断裂现象微弱,尾部外张现象不再增强,实心部的轴向拉伸及径向收缩基本不变,故其相对实心长度、直径变化趋势趋于平缓。因此,药型罩壁厚主要控制EFP毁伤元的头部速度及其尾部的断裂与外张情况。

综合分析图6和图7:在保证EFP的相对实心长度、直径适中的情况下,考虑选取头部速度相对较大及尾部断裂质量相对较小的毁伤元为较佳毁伤元。形成较佳毁伤元的钽药型罩壁厚 s 的取值范围为: $0.024D_k\sim 0.026D_k$ 。

2.1.3 药型罩圆弧半径的影响

选取 $\alpha=143^\circ$ 、 $s=2.4\text{ mm}$,对药型罩圆弧半径的10个方案进行数值仿真,得出每个方案在 $200\ \mu\text{s}$ 时刻EFP的头部速度 v_{tip} 及其成型形态,如图8所示。计算各方案下EFP毁伤元的成型指标,得出相对实心长度 l/L_p 、相对实心直径 d/D_p 随圆弧半径的变化规律曲线,如图9所示。

观察图8可知:当药型罩圆弧半径大于 75 mm 后,由于药型罩的成型模式已转变为完全翻转型,故EFP毁伤元的头部射滴现象逐渐减弱至消失,毁伤元形貌变为整体较均匀的长杆形。当药型罩圆弧半径 R 由 40 mm 增加至 85 mm 时,EFP的头部速度呈线性减小的变化趋势,且下降了 11.5% 。

由图9可知:当药型罩圆弧半径 R 由 40 mm 增加至 85 mm 时,爆轰波对罩顶部压垮面积逐渐增大,使药型罩圆弧部分各微元获得的初始运动速度不断相近,拉伸时间逐渐缩短,进而导致EFP绝对实心长度大幅减小;在爆轰波对罩顶部压垮面积不断增大的同时,爆轰波对罩锥部的高压加载作用基本不变,使药型罩整体初始运动速度梯度逐渐下降,导致EFP总的拉伸长度有所减小。因此,圆弧半径 R 由 40 mm 增加至 85 mm 时,主要削弱了EFP实心部的轴向拉伸,且其绝对实心长度减小了 72.8% 。故,EFP相对实心长度随圆弧半径的增加呈现快速下降的变化趋势。当药型罩圆弧半径 R 大于 50 mm

后,毁伤元径向收缩能力基本不变,故其相对实心直径变化趋势趋于平缓。因此,药型罩圆弧半径主要控制 EFP 的头部形态及其绝对实心长度。

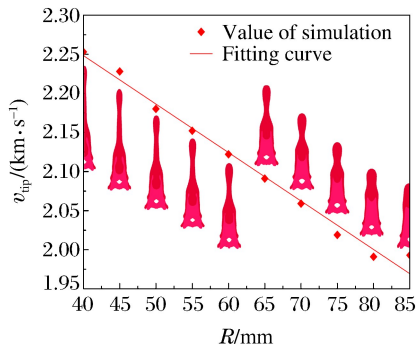


图 8 头部速度随药型罩圆弧半径的变化

Fig. 8 Variation of v_{ip} along R

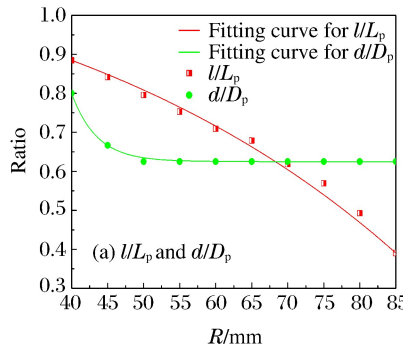
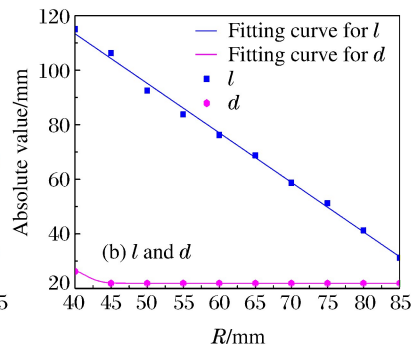


图 9 EFP 成型指标随药型罩圆弧半径的变化曲线

Fig. 9 Variation of molding performance indicator of EFP along R



综合分析图 8 和图 9:在保证 EFP 的头部速度适中的情况下,考虑选取成型形态相对较好及绝对实心长度相对较大的毁伤元为较佳毁伤元。形成较佳毁伤元的钽药型罩圆弧半径 R 的取值范围为 $0.7D_k \sim 0.8D_k$ 。

2.2 侵彻性能的控制

基于上述钽罩结构参数对 EFP 成型性能的控制研究,针对毁伤元成型较佳的钽罩结构参数取值范围,对 EFP 侵彻靶性能进行正交设计,靶板采用 45 钢,尺寸为 $160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$,厚度为 200 mm 。通过研究钽罩结构参数对 EFP 侵彻性能的控制规律,得出 EFP 成型及侵彻性能均较佳的钽罩结构参数组合方案。

2.2.1 正交设计方案

将钽药型罩结构参数(药型罩锥角 α 、药型罩壁厚 s 、药型罩圆弧半径 R)作为正交设计^[15]的 3 个因素,各因素选取 3 个水平,得到各因素水平方案见表 4。

2.2.2 计算结果及分析

正交设计就是从选优区全面水平组合中挑选出具有代表性的部分水平组合进行分析。针对表 4 中 3 因素 3 水平的情况,可利用正交表 L_9 (其中 L 表示正交表,9 表示表中安排的 9 种水平组合)进行计算分析。

L_9 保证了因素 α 的每个水平与因素 s 、 R 的每个水平各搭配一次,分布均衡、代表性强,能够较为全面地反映选优区的基本情况。 L_9 及 EFP 毁伤元侵彻性能指标(侵彻深度 P 、侵彻孔径 D)见表 5。

表 5 正交计算表($200 \mu\text{s}$)

Table 5 Orthogonal table ($200 \mu\text{s}$)

Project	Factor			Indicator of penetration performance	
	α	s	R	P/mm	D/mm
1	1	1	1	143.26	50.16
2	1	2	2	137.37	52.44
3	1	3	3	135.91	49.36
4	2	1	2	131.38	49.24
5	2	2	3	130.88	49.98
6	2	3	1	148.01	50.12
7	3	1	3	129.46	50.78
8	3	2	1	131.77	52.06
9	3	3	2	131.38	50.88

表 4 正交设计各因素水平表

Table 4 Orthogonal design at each level

Level	Factor		
	α	s	R
1	143	2.4	70
2	145	2.5	75
3	147	2.6	80

选取同一时刻的 EFP 侵彻性能指标进行比较,利用极差分析法^[16]对 9 次仿真结果进行分析,计算各列水平下的极差 S ,通过 S 的大小可得到各因素对各指标影响的主次顺序,极差分析结果见表 6,其中: $K_N(N=1,2,3)$ 表示正交表中各因素下 9 个方案中所有第 N 水平对应组合的侵彻性能指标之和。

表 6 极差分析表

Table 6 Polar difference analysis

Result of analysis	Indicator of P			Indicator of D		
	α	s	R	α	s	R
K_1	416.54	404.1	423.04	151.96	150.18	152.34
K_2	410.27	400.02	400.13	149.34	154.48	152.56
K_3	392.61	415.3	396.25	153.72	150.36	150.12
$K_1/3$	138.85	134.7	141.01	50.65	50.06	50.78
$K_2/3$	136.76	133.34	133.38	49.78	51.49	50.85
$K_3/3$	130.87	138.43	132.08	51.24	50.12	50.04
S	7.98	5.09	8.93	1.46	1.43	0.81

分析可得:药型罩圆弧半径 R 是影响钽罩 EFP 毁伤元侵彻深度的最主要因素,各结构参数对钽 EFP 侵彻深度影响的主次顺序分别为: R 、 α 、 s 。同样,采用极差分析法计算各因素对钽罩 EFP 毁伤元侵彻孔径的影响规律。结果表明,药型罩锥角 α 是影响钽罩 EFP 毁伤元侵彻孔径的最主要因素,各结构参数对钽 EFP 侵彻深度影响的主次顺序分别为: α 、 s 、 R 。

为了分析每个因素中各水平对两个侵彻性能指标的影响情况,现将各指标随因素水平变化的情况用图形表示,如图 10 所示。其中,A、B、C 分别代表药型罩锥角 α 、药型罩壁厚 s 、药型罩圆弧半径 R 等 3 个药型罩结构参数,1、2、3 分别代表各参数下 3 个水平,这样可以清楚地表明各因素对每个侵彻性能指标的影响规律和不同因素之间对同一指标的影响差异。

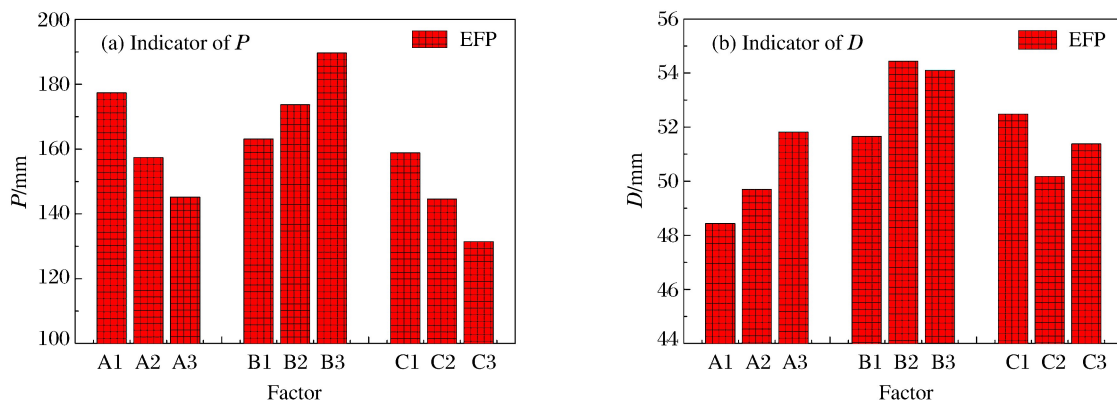


图 10 不同因素水平下的 EFP 侵彻性能指标


Fig. 10 Indicator of penetration performance from EFP along factors

由于药型罩锥角是影响评价指标最重要的因素,故优先确定锥角的取值。观察图 10 可知:药型罩锥角与侵彻深度指标具有负相关性,与侵彻孔径指标具有正相关性,因此综合考虑侵彻体对靶板的侵彻性能,选取药型罩锥角 α 为 145° ;药型罩壁厚过小会导致侵彻体尾部断裂现象严重、侵彻深度降低,因此选取药型罩壁厚 s 为 2.6 mm;药型罩圆弧半径与侵彻深度指标具有负相关性,而侵彻孔径在圆弧半径大于 70 mm 后小幅减小,因此选取药型罩圆弧半径 R 为 70 mm。但考虑到影响侵彻深度指标最重要的因素为头部速度、实心长度,而药型罩锥角及壁厚分别控制了侵彻体的轴向拉伸及头部速度,故两者不可同时选取较大值。综合分析各结构参数对两项侵彻性能指标的影响,选取药型罩锥角 α 为 145° 、药型罩壁厚 s 为 2.5 mm、药型罩圆弧半径 R 为 70 mm。故最终确定的参数组合方案为“A2B2C1”,由于

正交设计表中不存在此组合方案,因此按照优化后的方案重新进行数值计算,得出该方案下钽罩 EFP 毁伤元的成型及侵彻性能指标如表 7 所示。

表 7 优化方案下钽 EFP 的成型及侵彻性能参数

Table 7 Formation and penetration performance parameters of Ta EFP in optimization

Formulation picture	Parameter of forming performance			Parameter of penetration performance	
	$v_{ip}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	l/L_p	d/D_p	P/D_k	D/D_k
	1 973	0.55	0.67	1.46	0.51

3 结 论

通过仿真研究钽药型罩结构参数对 EFP 成型及侵彻性能的控制,得到以下结论。

(1) 揭示了钽药型罩结构参数对 EFP 成型性能的控制规律,其中,药型罩锥角控制 EFP 的轴向拉伸及径向收缩的能力,药型罩壁厚控制 EFP 的头部速度及尾部断裂与外张情况,药型罩圆弧半径控制 EFP 的头部形态及其绝对实心长度。

(2) 获得了 EFP 成型性能较佳的钽罩结构参数取值范围,其中药型罩锥角为 $143^\circ \sim 147^\circ$,药型罩壁厚、圆弧半径分别为 $0.024D_k \sim 0.026D_k$ 和 $0.7D_k \sim 0.8D_k$ 。

(3) 利用正交设计的方法得到了钽罩结构参数对 EFP 侵彻深度及侵彻孔径影响的主次顺序分别为 R, α, s 和 α, s, R ;确定了 EFP 成型及侵彻性能最佳的钽罩结构参数组合:药型罩锥角为 145° ,药型罩壁厚、圆弧半径分别为 $0.025D_k, 0.70D_k$ 。

参考文献:

- [1] 彭海建,闫晓东,李德富.钽在破甲弹药型罩中的应用[J].稀有金属,2006,30(5):678-681.
PENG H J, YAN X D, LI D F. Application of tantalum as shaped charge liner material [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2006, 30(5): 678-681.
- [2] ZERILLI F J, ARMSTRONG R W. Description of tantalum deformation behavior by dislocation mechanics based constitutive relations [J]. Journal of Applied Physics, 1990, 68(4): 1580-1591.
- [3] BERGH M, HELTE A. Materials models for tantalum—a validation study for EFP application [C]//26th International Symposium on Ballistics, Miami, FL, 2011: 93-103.
- [4] 王兵.爆炸成形弹用药型罩材料的研制动向[J].国外兵器动态,1996(3):10.
WANG B. Developing trends of material in shaped charge liner for explosively formed projectile [J]. Foreign Weapon Trends, 1996(3): 10.
- [5] WEIMANN K, BLACHE A. Terminal ballistics of EFPs with high L/D -ratio [C]//17th International Symposium on Ballistics, Midrand, South Africa, 1998: 215-224.
- [6] RONDOT F. Terminal ballistics of EFPs—a numerical comparative study between hollow and solid simulants [C]//19th International Symposium on Ballistics, Interlaken, Switzerland, 2001: 1455-1461.
- [7] 张廷杰,张德尧,丁旭.高钨含量钽基合金力学性能的研究[J].稀有金属材料与工程,1996,25(4):5-10.
ZHANG T J, ZHANG D Y, DING X. Study on mechanical properties of several tantalum alloys with higher tungsten content [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1996, 25(4): 5-10.
- [8] 张廷杰,张德尧,丁旭.强冲击载荷下 Ta-W 合金的塑变特征[J].稀有金属材料与工程,1997,26(2):12-17.
ZHANG T J, ZHANG D Y, DING X. Plastic deformation characteristic of Ta-W alloy at shock loading [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1997, 26(2): 12-17.
- [9] 郭扬波,唐志平,程经毅.一种基于位错机制的动态应变时效模型[J].固体力学学报,2002,23(3):249-256.
GUO Y B, TANG Z P, CHENG J Y. A dislocation-mechanics-based constitutive model for dynamic strain aging [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2002, 23(3): 249-256.

- [10] 李伟兵,李文彬,王晓鸣,等.药型罩结构参数对多模毁伤元形成的影响[J].弹道学报,2009,21(1):19-23.
LI W B,LI W B,WANG X M,et al. Effect of liner configuration parameter on formation of multimode penetrator [J]. Journal of Ballistics,2009,21(1):19-23.
- [11] 李伟兵,樊菲,王晓鸣,等.杆式射流与射流转换的双模战斗部优化设计[J].兵工学报,2013,34(12):1500-1506.
LI W B,FAN F,WANG X M,et al. Optimal design of dual mode warhead for jetting penetrator and jet conversion [J]. Acta Armamentarii,2013,34(12):1500-1506.
- [12] 樊雪飞.药型罩材料性能对双模毁伤元成型影响研究[D].南京:南京理工大学,2017:21-22.
FAN X F. Research on effect of dual-mode damage element formation from liner's material properties [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology,2017:21-22.
- [13] LI W B,LI W B,WANG X M. The effect of annular multi-point initiation the formation and penetration of an explosively formed penetrator [J]. International Journal of Impact Engineering,2010,37(4):414-424.
- [14] 刘建青,顾文彬,徐浩铭,等.多点起爆装药结构参数对尾翼 EFP 成型的影响[J].含能材料,2014,22(5):594-599.
LIU J Q,GU W B,XU H M,et al. Effects of multi-point initiation charge configuration parameters on EFP with fins formation [J]. Chinese Journal of Energetic Materials,2014,22(5):594-599.
- [15] 正交设计试验法编写组.正交试验设计方法[M].上海:上海科学技术出版社,1979.
Composer Group on Design Method for Orthogonal Test. Design method for orthogonal test [M]. Shanghai: Shanghai Publishing House of Science and Technology,1979.
- [16] 袁志发,周静芊.实验设计与分析[M].北京:高等教育出版社,2000.
YUAN Z F,ZHOU J Y. Design and analysis of experiment [M]. Beijing: Higher Education Press,2000.

Controlling Effect of Tantalum Liner's Structural Parameters on EFP Formation and Penetration Performance

GUO Tengfei,LI Weibing,LI Wenbin,HONG Xiaowen

(ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science
and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Aiming at the problems concerning the application of tantalum in a shaped charge warhead, we investigated the influences of the arc-cone tantalum liner's structural parameters (cone angle, wall thickness and radius of curvature) on the formation and penetration performance of EFP using the LS-DYNA finite element software, revealed how these various structural parameters affected the formation performance of EFP; the cone angle of the liner determines the capacity of the axial tension and the radial shrinkage of EFP, the head velocity and tail fracture and outward expansion of EFP are determined by the thickness of the liner, the head shape and the absolute solid length of EFP are determined by the radius of the curvature. The range of the structural parameters of the tantalum liner with better formation performance of EFP was obtained: the cone angle ranged from 143° to 147° , the thickness and radius of the curvature ranged from 0.024 to 0.026 and 0.7 to 0.8 times of the charge diameter. The order was found out in which various structural parameters exert their influence on the penetration depth and aperture of EFP; the radius of the curvature, the cone angle, the wall thickness and cone angle, the wall thickness, the radius of the curvature. The optimal combination of the structural parameters of the tantalum liner that would bring about a better formation and penetration performance of EFP was proposed: the cone angle is taken for 145° , the thickness and radius of the curvature are taken for 0.025 and 0.70 times that of the charge diameter.

Keywords: EFP; tantalum; liner; solid length; numerical simulation