

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.05.004

等壁厚球缺形装药结构优化设计\*

付 恒 陈智刚

中北大学地下目标毁伤技术国防重点学科实验室(山西太原,030051)

[摘 要] 针对串联战斗部前级装药兼顾侵深与开孔的要求,采用正交试验的极差分析方法,结合射流成型及侵彻钢靶的数值仿真结果,分析药型罩结构参数对于杆式射流侵彻性能指标影响的主次顺序,发现当相对壁厚值为 3.4% 时,侵彻深度达到最大。找到了一定侵彻深度条件下(1.7D),开孔能力最佳的等壁厚球缺罩结构参数的最佳组合( $h = 0.045D, r_1 = 0.579D$ )。简单提出了等壁厚球缺罩的设计方法,并进行了侵彻钢靶的静爆试验。数值模拟结果与试验结果吻合较好。研究结果为聚能装药技术的进一步研究提供了参考依据。

[关键词] 兵器科学与技术;聚能杆式射流;球缺罩;数值模拟

[分类号] TJ410.3

引言

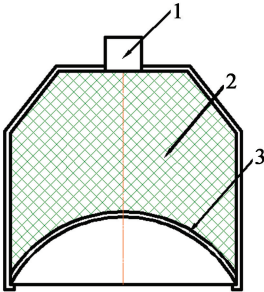
聚能装药结构被广泛应用于破-爆式串联战斗部的前级,其目的在于为后级提供良好的随进通道,而后级随进战斗部的侵彻深度和毁伤能力取决于前级的开孔孔径。因此,在给定侵彻深度的条件下,提高聚能装药结构扩孔能力的相关研究,具有重要的现实意义。近年来,关于如何提高聚能装药结构的扩孔能力,从而实现侵彻深度与开孔孔径的合理匹配,成为新的研究热点。谭多旺等<sup>[1]</sup>对聚能装药技术的研究进展进行了综述;张先锋等<sup>[2-3]</sup>对典型的聚能装药结构的侵彻能力进行了数值仿真研究,提出了一种新型聚能装药结构,成功实现了对钢筋混凝土目标的大开孔;肖强强等<sup>[4]</sup>结合理论计算及相关试验,提出了一种适用于扩孔计算的工程计算模型;辛春亮等<sup>[5]</sup>设计了一种新型的大开孔环形装药结构,并进行了数值仿真验证;郭俊等<sup>[6]</sup>以特征动能为研究基础,提出了大开孔聚能装药结构的设计方法;顾文彬<sup>[7-8]</sup>、张钧<sup>[9]</sup>等研究了变壁厚球缺罩的射流成型规律及侵彻能力,并进行了相关试验。

笔者在前人工作的基础上,运用 LS-DYNA 三维有限元软件,模拟等壁厚球缺罩射流的成型及侵彻钢靶过程,以射流头部速度和头尾速度差作为优化指标,得到一定侵彻深度条件下开孔能力最佳的药型罩结构,并通过试验验证具有最优参数组合的球缺形装药结构,从而实现预期的优化目的。

1 仿真计算模型

由于球缺罩在能量获取方面比球锥罩和截顶大

锥角罩更加优越,因此,选用等壁厚球缺形药型罩对射流的形成过程及其对钢靶的侵彻问题进行研究。聚能装药结构模型如图 1 所示。装药直径 88 mm,壳体厚度 2.5 mm,由于战斗部限制了长径比,装药高度 105 mm,圆柱部装药高度 85 mm。通过改变药型罩外壁曲率半径  $r_1$  和壁厚  $h$  设计方案,研究不同结构参数组合对射流成型的影响规律。由于药型罩形成射流的过程涉及高应变率、高过载过程,所以,装药、药型罩、空气采用 ALE (arbitrary Lagrange Euler) 算法。主装药采用 8701 炸药,密度为  $1.717\text{ g/cm}^3$ ,爆速为  $8\,425\text{ m/s}$ ,采用 \*Mat\_High\_Explosive\_Burn 模型和 JWL 状态方程,起爆方式采用中心点起爆。药型罩材料采用紫铜,密度为  $8.96\text{ g/cm}^3$ ,采用 \*Mat\_Johnson\_Cook 模型和 Gruneisen 状态方程。使用的单位制为:cm-g- $\mu\text{s}$ -Mbar。图 2 为数值

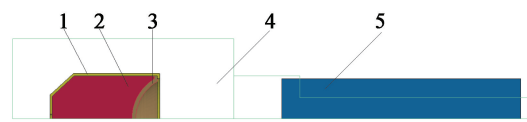


1 - 起爆装置;2 - 药柱;3 - 药型罩。

图 1 装药结构示意图

Fig. 1 Charge structure drawing

\* 收稿日期:2016-04-13  
作者简介:付恒(1992 - ),男,硕士,研究方向:弹箭控制与高效毁伤技术。E-mail: fuheng9999@163.com  
通信作者:陈智刚(1963 - ),男,教授,主要从事弹药高效毁伤技术研究。E-mail: tj85tj@163.com



1 – 壳体;2 – 炸药;3 – 药型罩;  
4 – 空气;5 – 靶板。

图 2 数值仿真几何模型

Fig. 2 Geometrical model in numerical simulation  
模拟模型。

2 仿真结果分析

药型罩是影响聚能侵彻体成型质量的最关键部分,其结构直接影响侵彻体的形态及性能。在装药结构长径比及各部分材料确定的条件下,选择主要结构参数外壁曲率半径 $r_1$ 和壁厚 $h$ 作为方案设计的主要因素,每个因素选取 5 个水平等级,进行方案

组合及数值仿真计算。球缺罩的外壁曲率半径取值需大于 41 mm,排除几何关系不存在的方案,每个因素及其对应的水平等级见表 1。在 25 种组合方案的数值仿真结果中,提取了 75  $\mu$ s 时刻射流的头部速度 $v_{up}$ 、尾部速度 $v_{tail}$ 、头尾速度差 $\Delta v$ 、侵彻深度 $P_L$ 、平均孔径 $d_a$ 等相关数据,计算结果如表 2 所示。

表 1 数值仿真各因素水平等级表

参数	因素水平				
	1	2	3	4	5
$r_1/\text{mm}$	42	45	48	51	54
$h/\text{mm}$	2	3	4	5	6

2.1 各因素对射流速度的影响

采用极差分析方法<sup>[10]</sup>对计算结果进行分析;将

表 2 数值仿真各方案的计算结果

Tab. 2 Computations of numerical simulation schemes						
曲率半径 $r_1/\text{mm}$	壁厚 $h/\text{mm}$	头部速度 $v_{up}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	尾部速度 $v_{tail}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	头尾速度差 $\Delta v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	侵彻深度 $P_L/\text{mm}$	平均孔径 $d_a/\text{mm}$
42	2	3 808	29.5	3 778.5	218.7	24.17
42	3	3 969	67.9	3 901.1	230.2	23.48
42	4	3 668	84.3	3 583.7	214.8	24.27
42	5	3 352	197.0	3 155.0	190.6	25.46
42	6	3 149	328.0	2 821.0	155.1	27.65
45	2	3 570	744.0	2 826.0	185.9	26.73
45	3	3 722	36.3	3 685.7	202.8	25.56
45	4	3 438	253.0	3 185.0	200.4	26.36
45	5	3 163	430.0	2 733.0	170.3	27.89
45	6	2 915	530.0	2 385.0	149.3	30.60
48	2	3 525	1 134.0	2 391.0	147.6	29.56
48	3	3 610	944.0	2 666.0	182.2	27.74
48	4	3 264	631.0	2 633.0	178.1	28.82
48	5	2 978	603.0	2 375.0	157.5	30.89
48	6	2 726	730.0	1 996.0	131.8	34.38
51	2	3 286	1 162.0	2 124.0	128.5	31.58
51	3	3 481	1 567.0	1 914.0	174.7	29.09
51	4	3 112	820.0	2 292.0	151.9	31.89
51	5	2 827	874.0	1 953.0	134.8	34.62
51	6	2 571	921.0	1 650.0	115.5	37.49
54	2	3 154	1 226.0	1 928.0	125.4	34.22
54	3	3 401	1 661.0	1 740.0	143.3	32.39
54	4	3 014	1 119.0	1 895.0	130.3	34.98
54	5	2 762	1 097.0	1 665.0	116.7	38.13
54	6	2 458	1 082.0	1 376.0	100.1	41.07

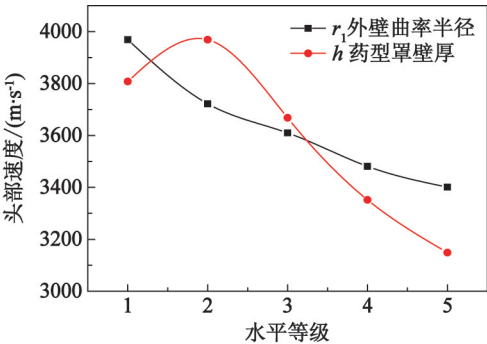
各列水平等级相同的结果相加,记为  $K$ ,5 个水平等级的结果分别记为  $K_1、K_2、K_3、K_4、K_5$ ,并除以 5,优化出每个影响因素的水平;用 5 个水平中的最大值减去最小值,即为极差  $S$ ,通过极差  $S$  即可得到各因素对各影响指标的主次顺序。

根据聚能射流侵彻理论<sup>[11]</sup>,药型罩被压垮后形成射流的头部速度越高,对提高侵彻深度越有利;作为串联战斗部的前级装药,射流尾部速度越高,对后级随进侵彻体的干扰效果越小;射流头尾速度差不能太大,从而在满足侵彻深度要求的同时兼顾开孔孔径足够大。所以在本文中,将射流成型后的头部速度  $v_{tip}$  和头尾速度差  $\Delta v$  作为侵彻体性能的评价指标。

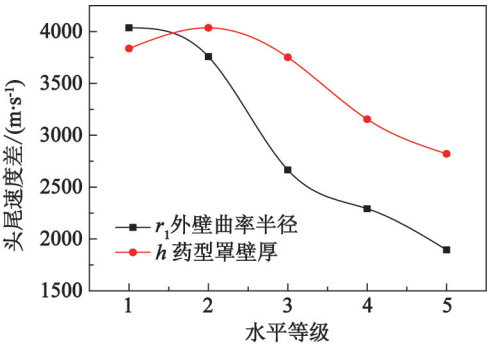
表 3 给出了在外壁曲率半径与壁厚影响下各个指标的极差  $S$ ,可以看出二者对于侵彻体主要性能指标影响的主次顺序。为了分析不同因素中各个水平等级对于两个评价指标的影响情况,计算得到了图 3 所示的头部速度和头尾速度差随不同因素水平

表 3 各个指标的极差

Tab. 3 Ranges of evaluation indexes				
参数	$S(v_{tip})/$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$S(\Delta v)/$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$S(P_L)/$ mm	$S(d_a)/$ mm
$r_1$	631.4	1 919.46	56.28	11.152
$h$	872.8	735.76	78.72	6.586



(a) 对头部速度的影响



(b) 对头尾速度差的影响

图 3 不同因素中的各水平等级对  $v_{tip}$  与  $\Delta v$  的影响

Fig. 3 Effects of factor levels on  $v_{tip}$  and  $\Delta v$

等级的变化关系。根据图 3 可以看出不同因素对于评价指标的影响规律,得到不同因素对同一指标的影响差别。

结合图 3 和表 3,从极差  $S$  和曲线斜率可以明显看出壁厚  $h$  和外壁曲率半径  $r_1$  对于射流头部速度和头尾速度差影响的主次顺序。

壁厚  $h$  是影响射流头部速度的最主要因素。当药型罩壁厚  $h$  不小于 3 mm 时, $h$  越小,射流头部速度越大,并且头尾速度差也越大;当壁厚小于 3 mm 时,射流头部速度出现下降,且头尾速度差过大,这是因为药型罩被压垮过程中出现翻转,射流成型时头尾距离过大,尾部出现大面积空心,射流密实性较差。

外壁曲率半径  $r_1$  是影响射流头尾速度差的最主要因素。结合仿真结果与图表数据可知, $r_1$  越小,射流头部速度越大,头尾速度差也越大,射流成型时被拉伸得越长,导致薄壁厚药型罩被压垮翻转,射流侵彻能力下降。

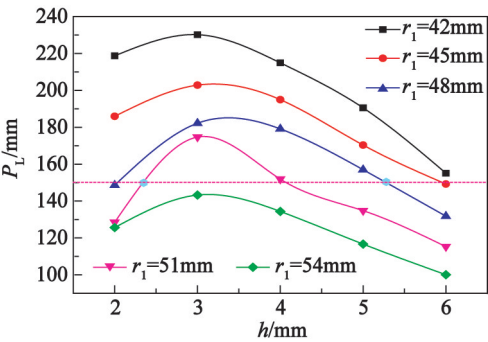
为了达到预期的优化目的,即满足一定侵彻深度条件下,提高开孔孔径,将形成最佳射流的等壁厚球缺形聚能装药结构条件,约束为较高的头部速度及较小的头尾速度差。

2.2 各因素对侵彻深度与平均孔径的影响

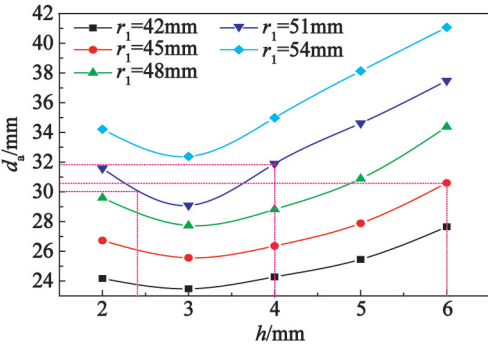
根据表 2 中侵彻深度与平均孔径的计算结果,得到侵彻深度、开孔孔径与影响因素之间的变化关系,如图 4 所示。从图 4 中可以清楚地看到侵彻深度与开孔孔径随着壁厚及外壁曲率半径的改变而变化的规律。

从图 4(a)中可以看出,保持药型罩壁厚不变,随着外壁曲率半径的逐渐增加,侵彻深度逐渐降低。无论外壁曲率半径取何值,壁厚取值为 3 mm 时(相对壁厚值 3.4%),射流侵彻深度均达到最大值。保持外壁曲率半径不变,随着壁厚的变化,达到某固定侵彻深度,药型罩的壁厚会出现多种选择,即曲线峰值 3 mm 的两侧。但壁厚在 3 mm 减低至 2 mm 过程中,侵彻深度的降幅较大;而壁厚由 3 mm 增大时,对于侵彻深度的降幅影响明显减小。结合表 3 中的关于侵彻深度的极差,可知侵彻深度受壁厚  $h$  的影响更大;同时,侵彻深度的变化符合射流头部速度的整体变化规律。

根据侵彻深度与孔径成反比的普遍关系,结合图 4(b)可知,对于球缺形药型罩结构而言,在壁厚不变的情况下,随着外壁曲率半径的增大,平均孔径逐渐增大,呈线性递增关系;但在曲率半径不变的情



(a) 对侵彻深度的影响



(b) 对平均孔径的影响

图 4 不同因素对  $P_L$  与  $d_a$  的影响

Fig. 4 Effects of different factors on  $P_L$  and  $d_a$

况下,平均孔径在壁厚3 mm时出现最小值,且随着壁厚从3 mm逐渐增大的同时,对于开孔孔径的增幅影响越来越大。

2.3 药型罩结构的选择

为验证本文研究规律,选取侵彻深度 $P_L=150$  mm,即侵彻深度 $P_L$ 与装药直径 $D$ 之间的关系为 $P_L=1.7D$ 的情况下,不同曲率半径及壁厚组合的5组药型罩结构,如图4(a)所示。进行射流侵彻靶板

的数值仿真并提取了侵彻深度 $P_L$ 、弹孔容积 $V$ 、平均孔径 $d_a$ 等计算结果进行对比,比较各组射流性能指标的优劣。结果如表4所示。

从表4中的仿真数据可以明显看出,对于壁厚小于3 mm的1#、2#两组,射流的头部速度很大,侵彻深度虽然达到了仿真误差范围的侵彻深度,但由于药型罩在形成射流的过程中被拉得过长,头尾距离过大,形成射流尾部的空心,导致侵彻开孔的能力很差;而壁厚大于3 mm的3#、4#、5#3组,第4#、5#两组的射流并未完全拉伸成型,因其尾部速度过低。第3#组的射流形状最为理想,头尾速度差随着曲率半径的增大而减少,射流侵彻靶板的平均孔径也随之增大。

对比相同外壁曲率半径的1#、4#和2#、3#两组,满足一定侵彻深度的同条件下,射流的头尾速度差随着壁厚的增加而减小,开孔孔径随着壁厚的增加而增大。壁厚大于3 mm时,对于侵彻深度的降幅影响更小,而对于开孔孔径的增幅影响更大。

根据射流形状,结合本文所研究并验证的影响规律,在达到1.7D侵彻深度的情况下,达到最大开孔孔径的目的,选择3#方案,射流成型时完全拉伸且密实性好,头部速度较高,头尾速度差最小,最终确定药型罩结构优化方案为外壁曲率半径 $r_1=51$  mm=0.579D,壁厚 $h=4$  mm=0.045D。

3 试验研究

3.1 试验布置

将LS-DYNA优化后确定出的等壁厚球缺罩结构,即 $h=0.045D$ , $r_1=0.579D$ ,进行静破甲试验。试验中所使用的装药结构为仿真模型,几何结构全

表 4 侵彻深度 150 mm 对照组仿真结果对比

Tab. 4 Comparison of simulation results of control group with 150 mm penetration depth

参数	方 案				
	1#	2#	3#	4#	5#
射流形状 (75μs)					
$h/\text{mm}$	2.0	2.4	4.0	5.3	6.0
$r_1/\text{mm}$	48	51	51	48	45
$v_{\text{tip}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	3 525	3 364	3 112	2 900	2 915
$v_{\text{tail}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1 134	1 158	1 002	672	530
$\Delta v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	2 391	2 206	2 010	2 228	2 385
$P_L/\text{mm}$	147.627	149.587	151.903	149.822	149.262
$V/\text{cm}^3$	102.2	106.3	121.3	113.2	108.8
$d_a/\text{mm}$	29.56	30.08	31.89	30.39	30.60



尺寸缩比为 1/1.5 倍,弹径为 62 mm,装药直径为 58.6 mm,装药高度为 70 mm,药柱采用 8701 炸药压制而成,起爆方式均采用中心点起爆;药型罩材料为紫铜,壳体采用钢壳,壳体厚 1.6 mm。炸高为 90 mm,靶板采用 45#钢,直径 120 mm,靶厚 90 mm。装药结构及试验布置如图 5 所示。



图 5 试验布置图  
Fig. 5 Test arrangements

3.2 试验结果分析

试验方案与试验数据见表 5。根据仿真结果及研究规律,在仿真误差不超过 10% 的情况下,3 组试验方案均应穿透靶板,其中方案 I 的开孔能力最差,方案 II 的开孔能力介于方案 I 与方案 III 之间,方案 III 的开孔能力最佳。

表 5 试验方案与侵彻结果

参数	方案		
	I	II	III
外壁曲率半径/mm	34	30	34
壁厚/mm	1.6	4.0	2.7
入口孔径/mm	25.76	25.17	24.67
出口孔径/mm	20.96	23.44	25.49
平均孔径/mm	20.70	21.41	22.78
1.5 倍平均孔径/mm	31.06	32.11	34.18

战斗部侵彻靶板试验结果如图 6 所示。从射流侵彻钢靶的穿深和孔径上来看,静爆试验侵彻钢靶的威力结果与优化结构方案的数值模拟结果基本一致,入口孔径均大于 0.42 倍装药直径,验证了数值模拟的合理性。其中,方案 III (即最终确定的优化结构) 在侵彻深度达到 1.7 倍装药直径的情况下,开孔能力最佳,平均孔径达到 0.39 倍装药直径。实现预期的优化目的。

4 结论

通过研究药型罩壁厚和外壁曲率半径两因素对等壁厚球缺形装药结构所形成的射流侵彻威力的影响,并进行了侵彻靶板的数值模拟和静爆试验研究,可以得出以下结论:

1) 仿真研究了等壁厚球缺形装药结构形成聚能侵彻体的过程,无论外壁曲率半径 $r_1$ 如何取值,

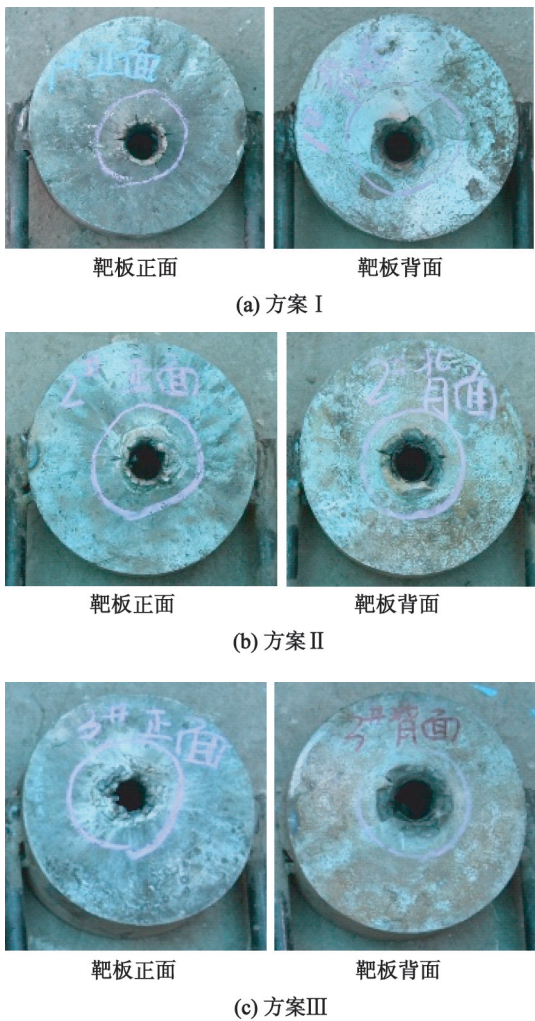


图 6 射流对靶板的侵彻情况  
Fig. 6 Results of jet penetration on target

在相对壁厚值为 3.4% 的情况下,侵彻深度最大。

2) 利用极差分析方法处理了数值模拟得到的仿真数据,通过极差  $S$  得出,等壁厚球缺罩主要结构参数对射流头部速度、头尾速度差、侵彻深度、开孔孔径影响的主次顺序,对头部速度和侵彻深度的影响的主次顺序依次是药型罩壁厚、罩外壁曲率半径;对头尾速度差和开孔能力的影响从主到次依次为罩外壁曲率半径、药型罩壁厚。

3) 获得了满足一定侵彻深度条件下,开孔能力最佳的药型罩结构参数的最佳水平组合。即  $h = 4 \text{ mm} = 0.045D$ ,  $r_1 = 51 \text{ mm} = 0.579D$ 。试验研究了该装药结构对钢靶的侵彻效果,达到  $1.7D$  侵彻深度的情况下,侵彻开孔的入口孔径达到  $0.42D$ ,平均孔径达到  $0.39D$ ,是较好的串联战斗部前级装药结构。

4) 进行等壁厚球缺罩结构设计时,可以首先由侵彻深度指标确定外壁曲率半径的大致范围,再进行壁厚的选取,以达到兼顾侵彻深度与开孔孔径的目的。

## 参 考 文 献

- [1] 谭多望,孙承纬. 成型装药研究新进展[J]. 爆炸与冲击,2008,28(1):50-56.  
TAN D W, SUN C W, Progress in studies on shaped charge[J]. Explosion and Shock Waves,2008,28(1):50-56.
- [2] 张先锋,陈惠武. 三种典型聚能射流侵彻靶板数值模拟[J]. 系统仿真学报,2007,19(19):4399-4401,4410.  
ZHANG X F, CHEN H W. Computational study of three typical shaped charge jets [J]. Journal of System Simulation,2007,19(19):4399-4401,4410.
- [3] 张先锋,陈惠武,何勇,等. 反钢筋混凝土串联聚能装药技术研究[J]. 爆炸与冲击,2008,28(3):207-212.  
ZHANG X F, CHEN H W, HE Y, et al. Study on a tandem shaped charge technique to reinforce concrete [J]. Explosion and Shock Waves,2008,28(3):207-212.
- [4] 肖强强,黄正祥,顾晓辉. 聚能装药侵彻混凝土的径向扩孔工程研究[J]. 兵工学报,2010,31(4):464-468.  
XIAO Q Q, HUANG Z X, GU X H. Engineering research on radial crater growth for the penetration in concrete target by shaped charge jet [J]. Acta Armamentarii,2010,31(4):464-468.
- [5] 辛春亮,龚苹,曹君蓬,等. 一种大开孔双药型罩聚能装药结构的数值模拟[J]. 兵工学报,2014,35(增2):203-206.  
XIN C L, GONG P, CAO J P, et al. Numerical simulation of a novel shaped charge with two liners [J]. Acta Armamentarii,2014,35(Suppl. 2):203-206.
- [6] 郭俊,张晓伟,张庆明. 大口径开孔聚能装药结构的设计方法研究[J]. 兵工学报,2014,35(增2):40-45.  
GUO J, ZHANG X W, ZHANG Q M. Design method for the shaped charge structures with large-radius perforation [J]. Acta Armamentarii,2014,35(Suppl. 2):40-45.
- [7] 顾文彬,刘建青,唐勇,等. 球缺型 EFP 战斗部结构优化设计研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版),2008,32(2):165-170.  
GU W B, LIU J Q, TANG Y, et al. Optimizing design of EFP warhead with hemispherical liner [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science),2008,32(2):165-170.
- [8] 顾文彬,胡亚峰,刘建青,等. 基于等质量变壁厚球缺罩聚能杆式射流成型特性研究[J]. 爆破器材,2013,42(4):14-19.  
GU W B, HU Y F, LIU Y Q, et al. Characteristic study on jetting projectile charge formation of variable thickness sphere liner based on equal-mass [J]. Explosive Materials,2013,42(4):14-19.
- [9] 张钧,陈智刚,李小军,等. 变壁厚球缺罩杆式射流的形成与侵彻性能研究[J]. 爆破器材,2016,45(1):39-42.  
ZHANG J, CHEN Z G, LI X J, et al. Formation and penetration performances of jetting penetrator charge of hemispherical liners with variable thickness [J]. Explosive Materials,2016,45(1):39-42.
- [10] 袁志发,周静萍. 试验设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社,2000.  
YUAN Z F, ZHOU J Y. Design and analysis of experiments [M]. Beijing:Higher Education Press,2000.
- [11] 黄正祥. 聚能装药理论与实践[M]. 北京:北京理工大学出版社,2014.  
HUANG Z X. Theory and practice of shaped charge [M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press,2014.

## Optimization Design of Hemispherical Charge Structure with Equal Thickness

FU Heng, CHEN Zhigang

National Defense Key Laboratory of Underground Damage Technology, North University of China (Shanxi Taiyuan,030051)

[ABSTRACT] According to the requirement of penetration depth and hole of tandem war-head precursor charge, influence of the charge structural parameters of liner on formation of the shaped jet was studied by orthogonal design test and extreme analysis. And it is found that at the relative thickness of 3.4% the maximum penetration depth was reached. The optimal combination of hemispherical charge structural parameters ( $h = 0.045D$ ,  $r_1 = 0.579D$ ) under fixed penetration depth ( $1.7D$ ) with biggest hole diameter ( $0.42D$ ) was obtained. A simple algorithm was presented for the hemispherical liner charge design of structures. Through the exploding experiment of shaped charge jet penetrating steel target, the simulation results are in good agreement with the experimental results, which provides a reference for the further study of shaped charge technique.

[KEYWORDS] armament science and technology; shaped charge jet; hemispherical liner; numerical simulation