

doi: 10.7690/bgzdh.2026.06.005

## 基于正交设计的圆锥-喇叭结合药型罩结构设计

刘会杰<sup>1</sup>, 赵欣扬<sup>2</sup>, 马 铎<sup>3</sup>, 李 嘉<sup>4</sup>, 沈国策<sup>5</sup>, 刘裕涛<sup>6</sup>, 王 岩<sup>7</sup>

- (1. 北方工程设计研究院有限公司工业工程设计院, 石家庄 050011; 2. 沈阳工学院能源与水利学院, 辽宁 抚顺 113122; 3. 中国人民解放军 32127 部队, 辽宁 大连 116003; 4. 辽沈工业集团有限公司装备保障部, 沈阳 110045; 5. 辽沈工业集团有限公司机动部, 沈阳 110045; 6. 辽沈工业集团有限公司弹体机加分厂, 沈阳 110045; 7. 沈阳亿赢机械零部件科技有限公司公司办, 沈阳 110043)

**摘要:** 为提高聚能装药射流成型质量, 提出一种圆锥-喇叭结合的药型罩结构。通过正交设计的方法研究组合结构药型罩射流成型过程, 确定以喇叭形药型罩曲率半径  $r$ 、喇叭形药型罩顶部直径  $d$ 、喇叭形药型罩高度  $h$ 、圆锥形药型罩锥角角度  $\alpha$  和药型罩厚度  $\delta$  共 5 个结构参数为正交设计的 5 个因素。每个因素选取 5 个水平进行正交方案设计, 并对所设计的正交方案进行数值模拟仿真。在得到仿真结果后, 以射流头部速度和有效射流长度为评价指标进行正交结果分析。分析结果表明: 最优的圆锥-喇叭结合药型罩结构参数为:  $r=4D$ 、 $d=0.6D$ 、 $h=0.7D$ 、 $\alpha=30^\circ$ 、 $\delta=0.0167D$ , 所形成射流的射流头部速度为 9 319 m/s, 有效射流长度为 170 mm, 能为装药成型提供借鉴。

**关键词:** 圆锥-喇叭结合; 数值模拟; 正交优化; 药型罩; 射流

**中图分类号:** TJ410.3+33 **文献标志码:** A

## Design of Conical-trumpet Combined Liner Structure Based on Orthogonal Design

Liu Huijie<sup>1</sup>, Zhao Xinyang<sup>2</sup>, Ma Duo<sup>3</sup>, Li Jia<sup>4</sup>, Shen Guoce<sup>5</sup>, Liu Yutao<sup>6</sup>, Wang Yan<sup>7</sup>

- (1. Industrial Engineering Design Institute, North Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Shijiazhuang 050011, China; 2. School of Energy and Water Resources, Shenyang Institute of Technology, Fushun 113122, China; 3. No. 32127 Unit of PLA, Dalian 116003, China; 4. Equipment Support Department, Liaoshen Industrial Group Co., Ltd., Shenyang 110045, China; 5. Mechanical Department, Liaoshen Industrial Group Co., Ltd., Shenyang 110045, China; 6. Projectile Machining Branch, Liaoshen Industrial Group Co., Ltd., Shenyang 110045, China; 7. General Office, Shenyang Yiyang Machinery Parts Technology Co., Ltd., Shenyang 110043, China)

**Abstract:** To improve the jet forming quality of shaped charge, a combined conical-flared liner structure was proposed. The jet forming process of the combined liner was investigated via the orthogonal design method, where five structural parameters were selected as the factors for the orthogonal design, including the curvature radius  $r$  of the flared liner, the top diameter  $d$  of the flared liner, the height  $h$  of the flared liner, the cone angle  $\alpha$  of the conical liner, and the liner thickness  $\delta$ . Each factor was set with five levels to formulate the orthogonal experimental schemes, and numerical simulation was performed for each designed scheme. After obtaining the simulation results, the orthogonal experimental results were analyzed with the jet head velocity and effective jet length as the evaluation indexes. The analysis results show that the optimal structural parameters of the conical-flared combined liner are as follows:  $r=4D$ ,  $d=0.6D$ ,  $h=0.7D$ ,  $\alpha=30^\circ$ , and  $\delta=0.0167D$ . The jet generated under such parameters achieves a head velocity of 9 319 m/s and an effective jet length of 170 mm, which can provide a reference for shaped charge design.

**Keywords:** conical-trumpet combination; numerical simulation; orthogonal optimization; liner; jet

## 0 引言

作为一种重要的反装甲方式, 破甲对目标的作用时爆轰产物沿装药表面法向向外飞散并相互挤压, 在轴线处汇聚形成高压高速高密度气流。随着气流对靶板作用面积减小, 能量密度提升, 可形成较深侵彻坑。这种利用装药端部空腔汇聚能量、增强局部破坏作用的效应, 即为聚能效应<sup>[1]</sup>。破甲正是利用这种效应对装甲目标进行毁伤的, 其发挥主

要毁伤作用的结构是聚能装药战斗部中的药型罩<sup>[2]</sup>。对于药型罩来讲, 其形状是影响射流成型质量和侵彻能力的最重要因素。

聚能装药设计中常用的药型罩结构有半球形、截锥形、喇叭形、圆锥形和球缺形等<sup>[3-5]</sup>。目前, 通过常用的药型罩结构设计来提升破甲弹破甲威力已经达到了瓶颈。为进一步提升破甲弹的侵彻效能, 笔者提出采用组合结构药型罩设计方案。从理论层面分析, 相较于传统单一结构药型罩, 组合式药型

收稿日期: 2024-12-07; 修回日期: 2025-01-07

第一作者: 刘会杰(1982—), 男, 河北人, 硕士。

通信作者: 赵欣扬(2005—), 男, 辽宁人。

罩的能量转换与吸收机制更为合理，能够更充分地利用炸药化学能，进而显著优化破甲性能，因此具备广阔的开发价值与应用潜力。Han 等<sup>[6]</sup>设计了一种基于爆炸压力耦合约束原理的球锥复合结构衬垫 (SCS 药型罩)，该结构能有效延缓爆压衰减、改善射流形态，提升侵彻能力。Selivanov 等<sup>[7]</sup>为了在航天抗气动测试中产生更高速度的抛射体，基于数值模拟优化了半球-缸套组合药型罩的结构，大幅度提高了射流的成型速度。Fedorov 等<sup>[8]</sup>通过闪光照相法研究组合钢药型罩形成的颗粒流，通过将半球形部分的改为变壁厚结构，增加了射流头部的速度和分离形成的颗粒速度。张博宇等<sup>[9]</sup>设计了一种新型柱-喇叭药型罩，通过试验与仿真研究发现所提结构的射流成型质量优于柱-锥和柱-球缺形药型罩。庞春阳等<sup>[10]</sup>为提高聚能破甲战斗部的毁伤能力，设计了一种圆柱-双锥结合药型罩，采用正交优化设计的方法设计了该组合形药型罩的最优结构。王一凡等<sup>[11]</sup>采用有限元软件 AUTODYN 对柱锥结合药型罩在爆炸载荷下的射流成型性能进行了研究，结果表明，该药型罩可形成速度更高、侵彻能力更强的射流。王庆华等<sup>[12]</sup>设计了一种圆柱-半球结合药型罩，由数值模拟结果发现该新结构药型罩形成的侵彻体在保持开孔能力的基础上侵彻能力也有所提升。白晶等<sup>[13]</sup>在球缺型药型罩基础上，提出了一种圆柱-球缺组合型药型罩，相比于球缺罩侵彻能力得到了大幅度提高。综上所述可以看出：目前，国内外学者对组合型药型罩的研究多采用圆柱、圆锥、半球形结合的较多，对喇叭形和圆锥形组合的研究较少，而文献<sup>[14]</sup>对喇叭-圆锥结合药型罩形成的射流进行了研究，其组合结构是上喇叭下圆锥形结合的药型罩，且证明了其结构相对于平顶罩在射流速度和侵彻性能方面均具有优势。为了进一步提高聚能射流的成型质量，笔者基于组合结构药型罩设计的思路，提出上圆锥下喇叭形药结合的新型组合药型罩结构，即圆锥-喇叭结合药型罩，并运用正交设计的方法，对笔者提出的圆锥-喇叭结合式药型罩结构实施优化设计，筛选出可形成优良聚能射流质量的结构形式，为破甲弹战斗部的设计工作提供相应的技术支持与参考依据。

## 1 模型建立

### 1.1 几何模型

所设计圆锥-喇叭结合药型罩的结构如图 1 所示。

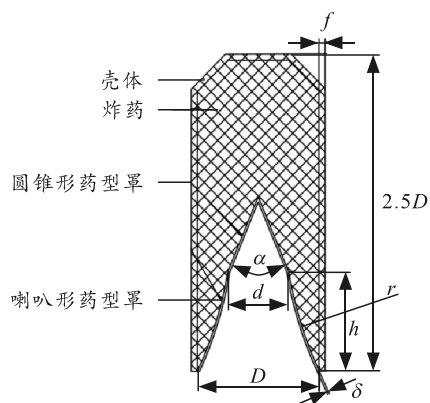


图 1 圆锥-喇叭结合药型罩

主要结构参数为：战斗部装药口径  $D=60\text{ mm}$ ，装药长度为  $2.5D$ ，壳体厚度  $f$  取  $3\text{ mm}$ 。装药结构采用梯形装药， $r$ 、 $d$ 、 $h$ 、 $\alpha$  和  $\delta$  分别为喇叭形药型罩曲率半径、喇叭形药型罩顶端直径、喇叭形药型罩高度、圆锥形药型罩锥角角度和药型罩厚度。在药型罩结构优化工作中，可通过调整这些结构参数构建不同设计方案，进而探究不同结构参数下药型罩对聚能射流成型质量的作用影响。

### 1.2 圆锥-喇叭结合药型罩仿真模型

从图 1 可以看出：圆锥-喇叭型聚能装药战斗部模型主要由壳体、炸药、喇叭形药型罩、圆锥形药型罩及空气域 5 部分构成，利用 AUTODYN 软件中的 Euler 算法<sup>[15]</sup>建立仿真模型并进行数值模拟仿真计算，其中空气域大小长为  $700\text{ mm}$ ，宽为  $50\text{ mm}$ ，采用理想气体模型描述，其参数如表 1 所示。

表 1 空气参数

$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$\gamma$	$C_v/(\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K})$	$T/\text{K}$
0.001 225	1.4	7.98	288

网格单元大小为  $0.25\text{ mm}\times 0.25\text{ mm}$ ，定义空气域边界条件为 Flow\_out，以防止由于材料在边界反射而导致的计算偏差；建立好空气域后将聚能装药战斗部的各个部分填充到空气域中，药型罩采用紫铜材料，壳体选用 SS-304 钢材，2 种材料分别采用 Linear 状态方程与 Shock 状态方程进行描述，具体参数如表 2 和 3 所示。

表 2 紫铜材料参数

$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$A/\text{GPa}$	$B/\text{MPa}$	$C$	$n$	$m$
8.96	0.09	0.29	0.025	0.31	1.09

表 3 SS-304 材料参数

$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$r$	$c/(\text{km}/\text{s})$	$S$
7.896	2.17	4.57	1.49

炸药选用 HMX，采用 JWL 状态方程表征，相关参数如表 4 所示。

表 4 HMX 炸药参数

$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$D/(\text{km}/\text{s})$	$P_c/\text{GPa}$	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$
1.891	9.11	42	778.3	7.07	4.2	1.0	0.3

所有材料均在 AUTODYN 材料库中选择。建模过程中计算单位采用 mm-mg-ms，起爆方式采用装药顶端中心起爆<sup>[16]</sup>。由于装药结构的对称性，计算中只建立 1/2 的模型<sup>[17]</sup>，所建立的圆锥—喇叭结合药型罩装药结构有限元模型如图 2 所示。

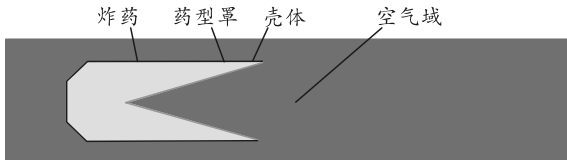


图 2 有限元模型

## 2 聚能装药战斗部射流成型分析

### 2.1 成型理论分析

成型装药发生爆炸后，爆轰波会推动金属药型罩向轴线方向运动，药型罩在轴线处相互碰撞后，会分解为射流与杆体 2 部分。在此过程中，炸药爆轰波作用于药型罩壁面的压力可达到几十 GPa，该数值远高于罩体材料本身的强度极限。

在理论分析中可忽略材料强度，将药型罩视为理想流体。同时，假定药型罩微元获得相同且不变的初速  $V_0$  向内压合。射流速度  $V_j$  和杆体速度  $V_s$  是衡量装药性能的关键参数，可由定常理论得出，其大小取决于炸药的爆速  $D$ 、药型罩的半锥角  $\alpha$  以及爆炸形成的压合角  $\beta$ ，图 3 为药型罩压垮过程。

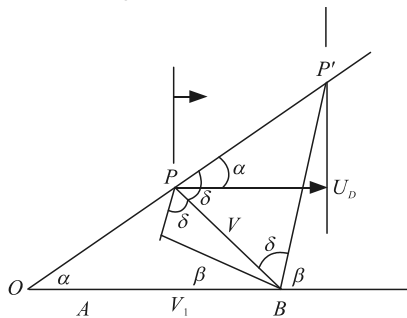


图 3 药型罩压垮过程

各个变量之间的关系表达式为：

$$V_j = \frac{D}{\cos \alpha} \sin(\beta - \alpha) \left[ \sin^{-1} \beta + \tan^{-1} \beta + \tan\left(\frac{\beta - \alpha}{2}\right) \right]; \quad (1)$$

$$V_s = \frac{D}{\cos \alpha} \sin(\beta - \alpha) \left[ \sin^{-1} \beta - \tan^{-1} \beta - \tan\left(\frac{\beta - \alpha}{2}\right) \right]. \quad (2)$$

同时，形成的射流质量与杆体质量分别为：

$$m_j = \frac{1}{2} m (1 - \cos \beta); \quad (3)$$

$$m_s = \frac{1}{2} m (1 + \cos \beta). \quad (4)$$

式中  $m$  为单位长度药型罩的质量。

由式(1)和(3)可知：药型罩的形状(具体体现为半锥角  $\alpha$ )对性能有决定性影响。对于圆锥形药型罩， $\alpha$  为固定值。当  $\alpha$  减小时，射流速度  $V_j$  增加，但射流质量  $m_j$  减小，当  $\alpha \rightarrow 0$  时，锥形罩趋近于圆柱形，此时射流速度接近最大值，但射流变得非常细长，质量很小。而喇叭形药型罩，圆弧的切线与轴线的夹角逐渐增大，这部分罩体的结构从“类圆柱”平滑过渡到“类锥形”，其中倾角较大的部分，其形成的射流元质量更大，但速度较低，这部分会形成射流的中部和尾部，同时被头部高速射流拉伸，形成了一个质量更大、更连续的射流，由于喇叭形药型罩的倾角是连续变化的，因此罩微元的压垮速度和射流速度也是连续变化的。这将避免传统锥形罩在压垮过程中可能因单一角度而产生的射流颈缩或断裂倾向，从而形成更稳定、更连续的射流；因此，采用上圆锥下喇叭的圆锥—喇叭结合的药型罩结构，能够使圆锥形结构药型罩在形成较高射流速度的基础上，既提高形成射流的药型罩质量，又能避免由于截顶型的喇叭形药型罩顶部半锥角过小形成的射流梯度过大而导致的不连续的问题，从而能够提高射流的成型速度和材料利用率。

### 2.2 成型过程分析

选取  $r=4D$ 、 $D=240\text{ mm}$ ， $d=0.5D$ 、 $D=30\text{ mm}$ ， $h=0.6D$ 、 $D=36\text{ mm}$ ， $\alpha=45^\circ$  和  $\delta=2.5\text{ mm}$ ，装药长径比为 2.5 分析圆锥—喇叭结合药型罩射流的成型特点如图 4 所示。

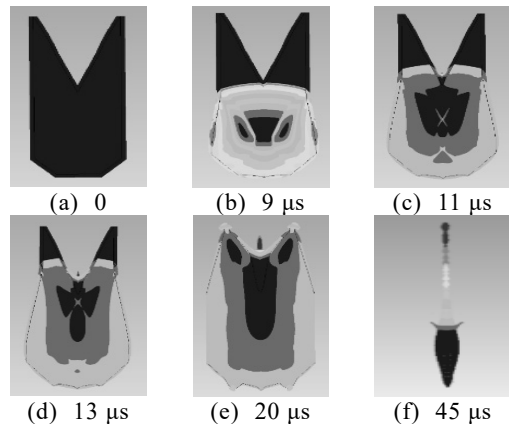


图 4 圆锥—喇叭结合药型罩射流成型过程

当炸药被引爆后，爆轰波从起爆点朝着药型罩

方向扩散，在 9 μs 时刻，爆轰波传播至圆锥形药型罩的顶部，致使圆锥形药型罩率先发生压垮变形，其两侧部位逐步向轴线方向汇聚，并且沿轴线方向开始向前移动；在 11 μs 时，随着材料在轴线的不断汇聚，圆锥形药型罩在轴线的挤压变形情况不断加剧，开始形成具有较高速度的金属射流，随着爆轰波的不断传播，在 13 μs 时，爆轰波传播达到圆锥形药型罩和喇叭形药型罩的交界处，此时，喇叭形药型罩部分开始被压垮，该部分药型罩材料开始逐渐向轴线汇聚，使之前圆锥形药型罩形成的射流速度继续增加，在 20 μs 时，喇叭形药型罩部分进一步向轴线方向汇聚，形成了清晰的射流分离界面，此时，圆锥形药型罩的材料基本已经在轴线汇聚完成，随着爆轰波的进一步作用，喇叭形药型罩材料继续向轴线汇聚，与先前形成的射流不断碰撞加速，逐渐在轴线形成具有一定速度梯度的金属射流，在 45 μs 时，圆锥—喇叭锥药型罩射流形成稳定的形态，此时射流头部速度为  $v=7\ 141\ \text{m/s}$ ，有效射流长度  $L=145\ \text{mm}$ ，在此时刻后，由于速度梯度的不断增加，射流将被拉断。

### 3 圆锥—喇叭结合药型罩正交优化

#### 3.1 正交设计方案及仿真结果

在聚能装药口径、长径比及各组成部分材料均确定的前提下，选取喇叭形药型罩曲率半径  $r$ 、喇叭形药型罩顶部直径  $d$ 、喇叭形药型罩高度  $h$ 、圆锥形药型罩锥角  $\alpha$  以及药型罩厚度  $\delta$ ，这 5 个结构参数作为正交设计的 5 个因素，每个因素设定 5 个水平，参与正交设计运算，所构建的正交实验各因素水平如表 5 所示。

表 5 正交设计的各因素水平

Level	喇叭形药型罩曲率半径 $r/\text{mm}$	喇叭形药型罩顶部直径 $d/\text{mm}$	喇叭形药型罩高度 $h/\text{mm}$	圆锥形药型罩锥角 $\alpha/(\text{°})$	药型罩厚度 $\delta/\text{mm}$
1	2D	0.3D	0.4D	30	0.016 7D
2	3D	0.4D	0.5D	35	0.025 0D
3	4D	0.5D	0.6D	40	0.033 3D
4	5D	0.6D	0.7D	45	0.041 7D
5	6D	0.7D	0.8D	50	0.050 0D

依据表 5 的因素水平表设计得到正交方案，如表 6 所示，并基于该正交方案构建仿真模型。按照射流侵彻机理，射流头部速度越高、有效长度越长，其侵彻效果越优<sup>[18]</sup>，选取射流头部速度  $v$  与有效射流长度  $L$ ，作为评价圆锥—喇叭组合药型罩射流成型质量的指标。

表 6 5 因素 5 水平正交表及仿真结果

工况	$r/\text{mm}$	$d/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	$\alpha/(\text{°})$	$\delta/\text{mm}$	$v/(\text{m/s})$	$L/\text{mm}$
1	2D	0.3D	0.4D	30	0.016 7D	8 634	111
2	2D	0.4D	0.5D	35	0.025 0D	8 339	123
3	2D	0.5D	0.6D	40	0.033 3D	7 794	146
4	2D	0.6D	0.7D	45	0.041 7D	7 212	147
5	2D	0.7D	0.8D	50	0.050 0D	6 593	130
6	3D	0.3D	0.6D	35	0.041 7D	7 274	135
7	3D	0.4D	0.7D	40	0.050 0D	7 412	137
8	3D	0.5D	0.8D	45	0.016 7D	8 626	131
9	3D	0.6D	0.4D	50	0.025 0D	7 520	155
10	3D	0.7D	0.5D	30	0.033 3D	8 538	166
11	4D	0.3D	0.8D	40	0.025 0D	8 144	147
12	4D	0.4D	0.4D	45	0.033 3D	7 461	120
13	4D	0.5D	0.5D	50	0.041 7D	7 329	178
14	4D	0.6D	0.6D	30	0.050 0D	7 930	156
15	4D	0.7D	0.7D	35	0.016 7D	8 846	165
16	5D	0.3D	0.5D	45	0.050 0D	6 488	136
17	5D	0.4D	0.6D	50	0.016 7D	8 001	144
18	5D	0.5D	0.7D	30	0.025 0D	8 971	149
19	5D	0.6D	0.8D	35	0.033 3D	8 144	149
20	5D	0.7D	0.4D	40	0.041 7D	7 463	150
21	6D	0.3D	0.7D	50	0.033 3D	7 221	152
22	6D	0.4D	0.8D	30	0.041 7D	8 088	147
23	6D	0.5D	0.4D	35	0.050 0D	7 357	134
24	6D	0.6D	0.5D	40	0.016 7D	8 481	159
25	6D	0.7D	0.6D	45	0.025 0D	7 697	150

#### 3.2 数据分析及最优结构确定

利用极差分析法<sup>[19-20]</sup>对 25 组工况的仿真结果进行分析，首先计算每个因素相同水平数在不同工况下所得评价指标数据的平均值，然后将射流头部速度和有效射流长度 2 个评价指标，在每个因素所得的平均值分别用  $K_{v1}$ 、 $K_{v2}$ 、 $K_{v3}$ 、 $K_{v4}$ 、 $K_{v5}$  以及  $K_{L1}$ 、 $K_{L2}$ 、 $K_{L3}$ 、 $K_{L4}$ 、 $K_{L5}$  表示，所得计算结果如表 7 所示。

表 7 各因素  $K$  值

因素	$K_{v1}$	$K_{v2}$	$K_{v3}$	$K_{v4}$	$K_{v5}$
$r$	7 714.4	7 874.0	7 942.0	7 813.4	7 768.8
$d$	7 552.2	7 860.2	8 015.4	7 857.4	7 827.4
$h$	7 687.0	7 835.0	7 739.2	7 932.4	7 919.0
$\alpha$	8 432.2	7 992.0	7 858.8	7 496.8	7 332.8
$\delta$	8 517.6	8 134.2	7 831.6	7 473.2	7 156.0

因素	$K_{L1}$	$K_{L2}$	$K_{L3}$	$K_{L4}$	$K_{L5}$
$r$	131.4	144.8	153.2	145.6	148.4
$d$	136.2	134.2	147.6	153.2	152.2
$h$	134.0	152.4	146.2	150.0	140.8
$\alpha$	145.8	141.2	147.8	136.8	151.8
$\delta$	142.0	144.8	146.6	151.4	138.6

在得到表 7 的结果数据后，通过计算可得到正交方案中 2 项评价指标射流头部速度、有效射流长度对应的极差值  $W_v$  和  $W_L$  如图 8 所示。

表 8 圆锥—喇叭药型罩各因素极差

因素	$W_v/(\text{m/s})$	$W_L/\text{mm}$
$r$	227.6	21.8
$d$	463.2	19.0
$h$	245.4	18.4
$\alpha$	1 099.4	15.0
$\delta$	1 361.6	12.8

根由表 8 的数据可知：对于圆锥—喇叭药型罩而言，各因素对射流头部速度  $v$  和有效射流长度  $L$  的影响主次顺序存在差异：影响射流头部速度  $v$  的

因素主次排序为  $\delta$ 、 $\alpha$ 、 $d$ 、 $h$ 、 $r$ ，而影响有效射流长度  $L$  的因素主次排序则为  $r$ 、 $d$ 、 $h$ 、 $\alpha$ 、 $\delta$ 。依据正交设计方法对多因素与评价指标间关系的分析思路，可进一步确定各影响因素的最优水平。尽管各因素对药型罩成型效果的影响权重已明确，但各因素具体选取哪个水平作为最优结构参数，仍需结合相关数据展开深入分析。结合表 6 中的基础数据，分别绘制出射流头部速度、有效射流长度随各因素不同水平变化如图 5 和 6 所示。

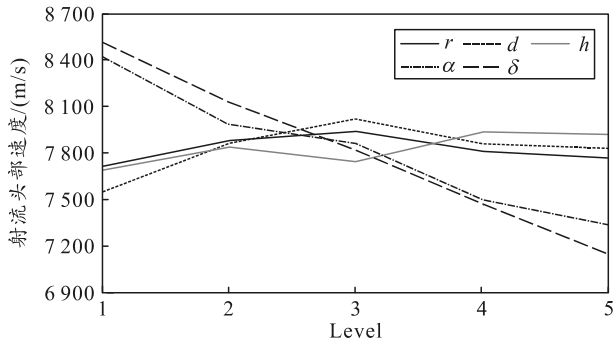


图 5 射流头部速度随因数水平的变化

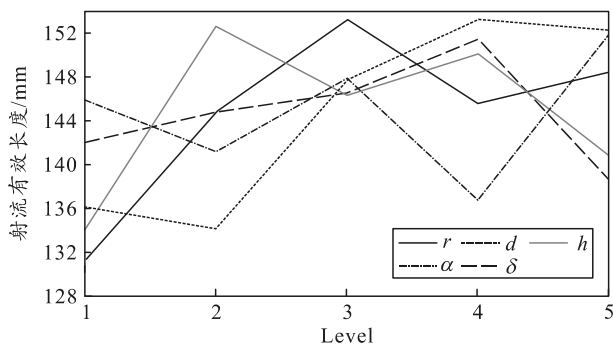


图 6 有效射流长度随因数水平的变化

通过表 8 数据与图 5—6 的综合分析，即可确定圆锥—喇叭药型罩的最优结构组合。具体来看，因素  $\delta$  是影响射流头部速度的首要因素，同时也是影响有效射流长度的最次要因素。其中，射流头部速度随  $\delta$  的增大呈逐渐下降趋势，而有效射流长度随  $\delta$  的增大则表现为先上升后下降的变化规律，且在水平 4 处达到峰值。从图 6 中有效射流长度在各水平的具体数值可见，水平 1 至 4 的数值差异较小；因此，确定因素  $\delta$  的最优水平为水平 1。因素  $\alpha$  是影响射流头部速度的第 2 重要因素，同时也是影响有效射流长度的第 2 次要因素。由图 5 可知，射流头部速度随  $\alpha$  的增大逐步减小；图 6 显示：有效射流长度随  $\alpha$  的变化呈现波动特征，整体趋势为“减小—增大—减小—增大”，并在水平 5 处达到最大值。结合数值来看，水平 1 对应的有效射流长度为第 3 大值，且与水平 5 的数值差距不大；因此，选

取水平 1 作为因素  $\alpha$  的最优水平。因素  $d$  对射流头部速度的影响程度位列第 3，对有效射流长度的影响则位列第 2。从图 5 可以看出：射流头部速度随  $d$  的增大呈先上升后下降的趋势，在水平 3 处达到最大值；而有效射流长度随  $d$  的增大呈现“减小—增大—减小”的变化，在水平 4 处达到峰值。由图 5 可知：水平 4 对应的射流头部速度虽为第 3 大值，但与最大值、第 2 大值的差距极小。综合考虑该因素对 2 项评价指标的影响，为实现二者的平衡，确定因素  $d$  的最优水平为水平 4。因素  $h$  对射流头部速度的影响排在第 4 位，对有效射流长度的影响则排在第 3 位。从相关图表可观察到：射流头部速度随  $h$  的增大呈现“上升—下降—上升—趋于平稳”的趋势，在水平 4 处达到最大值；有效射流长度随  $h$  的增大则表现为“上升—下降—上升—下降”的变化，在水平 2 处达到峰值。水平 4 对应的有效射流长度为第 2 大值，且与水平 2 的数值差异较小，综合考量后，确定因素  $h$  的最优水平为水平 4。最后分析因素  $r$ ，该因素是影响射流头部速度的最次要因素，却是影响有效射流长度的首要因素。从图 5 和 6 中可清晰看出：射流头部速度与有效射流长度均在水平 3 处达到最大值，因此，因素  $r$  的最优水平确定为水平 3。综上，通过对各因素的综合分析，最终确定圆锥—喇叭药型罩的最优结构参数为： $r=4 D$ 、 $d=0.6 D$ 、 $h=0.7 D$ 、 $\alpha=30^\circ$ 、 $\delta=0.016 7 D$ 。

由于上述最优结构组合未出现在正交设计表中，为验证该最优结构对应的射流评价指标效果，采用该最优结构参数开展数值模拟工作，模拟结果如图 7 所示。

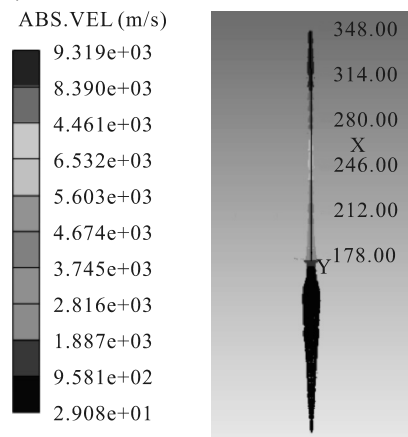


图 7 圆锥—喇叭结合药型罩最优结构射流成型结果

由图 7 可知：该最优结构的射流头部速度为 9 319 m/s，有效射流长度为 178 mm，其性能优于正交设计表中所有预设方案。

## 4 结论

笔者提出的圆锥—喇叭结合的组合结构药型罩, 采用正交优化的思想, 设计了5因素5水平的正交优化方案, 并应用数值模拟的方法对所设计的正交方案进行了数值仿真。对仿真结果以射流头部速度和有效射流长度为评价指标进行最优结构确定, 得出以下结论:

1) 通过对圆锥—喇叭结合药型罩的正交优化结果分析, 各因素对射流头部速度  $v$  和有效射流长度  $L$  2个评价指标的影响的重要度顺序分别为  $\delta$ 、 $\alpha$ 、 $d$ 、 $h$ 、 $r$  和  $r$ 、 $d$ 、 $h$ 、 $\alpha$ 、 $\delta$ 。

2) 综合分析正交优化的设计结果圆锥—喇叭结合药型罩放入最优结构参数为:  $r=4D$ 、 $d=0.6D$ 、 $h=0.7D$ 、 $\alpha=30^\circ$ 、 $\delta=0.0167D$ 。

3) 对所确定最优的药型罩结构进行数值模拟, 最优结构的射流头部速度为 9 319 m/s, 有效射流长度为 178 mm, 优于正交设计表中的有所方案。

## 参考文献:

- [1] 尹建平, 王志军. 弹药学[M]. 4版. 北京: 北京理工大学出版社, 2023: 130-132.
- [2] 王子明, 闫建文, 王羽翼, 等. 双锥药型罩结构参数对聚能射流的影响[J]. 工程爆破, 2020, 26(3): 24-29.
- [3] 曹涛, 顾文彬, 刘建青, 等. 药型罩形状对侧向环形射流性能的影响[J]. 火工品, 2017(6): 14-18.
- [4] 秦雨. 半球形药型罩聚能装药侵彻金属靶板的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
- [5] 郑贺龄, 岳明凯, 马超, 等. 两种结构药型罩对 MLEFP 成型及毁伤效能的影响研究[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(5): 33-38.
- [6] HAN J L, DU Z H, ZHENG C, et al. Study on Forming Law and Penetration of a Spherical Cone Composite Structure Liner Based on the Explosion Pressure-Coupling Constraint Principle[J]. Materials, 2022, 15(14): 4750.
- [7] SELIVANOV V V, LADOV S V, SILNIKOV M V, et al. Combined hemisphere-cylinder shaped-charge liner optimization for high-velocity metal fragments formation in anti-meteoroid resistance tests[J]. Acta Astronautica, 2021, 180: 149-154.
- [8] FEDOROV V S, LADOV V S, NIKOL'SKAYA M Y, et al. Formation of a high-velocity particle flow from shaped charges with a liner consisting of a hemisphere and a degressive-thickness cylinder[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2017, 53(4): 479-482.
- [9] 张博宇, 范少博, 韦利金, 等. 柱-喇叭药型罩射流成形过程及侵彻性能研究[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(12): 197-203.
- [10] 庞春阳, 任凯, 刘洋, 等. 圆柱-双锥结合药型罩结构参数对侵彻性能的影响规律[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(3): 144-150.
- [11] 王一凡, 王志军, 徐永杰. 柱锥结合药型罩射流成型及侵彻威力数值模拟[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(9): 261-265, 322.
- [12] 王庆华, 刘宁, 张建仁, 等. 一种新型圆柱-半球结合药型罩形成射流以及侵彻性能的数值模拟及试验验证[J]. 火炸药学报, 2018, 41(2): 208-212.
- [13] 白晶, 张国伟, 李岩, 等. 圆柱-球缺组合型药型罩结构优化研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2023, 44(2): 122-127, 153.
- [14] 阮光光, 雷伟, 岳继伟, 等. 一种喇叭-锥角结合药型罩形成射流的数值模拟[J]. 火炸药学报, 2018, 41(1): 93-96, 106.
- [15] 陈莉, 王志军, 尹建平, 等. 材料对截顶辅助药型罩形成聚能侵彻体的影响[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(7): 20-22, 27.
- [16] 龚超安, 陈智刚, 印立魁, 等. 双层药型罩不同材料对比对侵彻结果的影响[J]. 机械, 2016, 43(3): 66-69.
- [17] 胡新印, 龙源, 宋克健, 等. 锥角罩和球缺罩形成 EFP 的速度对比研究[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(23): 5669-5672.
- [18] 王珞冰, 焦志刚, 初善勇. 基于正交设计试验的双锥药型罩结构优化[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(17): 6737-6741.
- [19] 李昊, 尹建平, 毕广剑, 等. 截顶辅助双层药型罩射流成型影响研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(4): 31-35.
- [20] 李昊, 尹建平, 王志军, 等. 爆轰载荷下三层药型罩射流成型影响研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(11): 83-89.