

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.04.016

铝制药型罩对混凝土靶板的侵彻研究*

王可用¹, 蒋安^{1,2}, 鲍守志¹, 孙永¹, 王清标¹, 田成林^{1,2}, 施振跃¹, 李中辉³

(1. 山东科技大学 资源学院, 泰安 271000; 2. 山东科技大学 安全与环境工程学院, 青岛 266590;
3. 中铁十四局集团 第四工程有限公司, 济南 250000)

摘要: 采用现场试验、数值模拟以及工程应用的方法, 研究了6D炸高下不同锥角、壁厚的铝制药型罩聚能射流侵彻混凝土靶板的影响规律, 确定侵彻效果较好的结构参数, 应用于实际工程提升聚能间隔装药的起爆效率。研究表明: 现场试验中, 锥角 60° ~ 120° 范围内, 漏斗坑尺寸随锥角的增加先增大后减小, 其中锥角为 110° 且壁厚为2 mm时, 漏斗坑的直径和深度分别达到最大值48.88 mm和23.54 mm。数值仿真与试验结果在漏斗坑直径与深度变化规律上一致, 误差较小, 验证了侵彻试验的有效性与准确性。将 110° 2 mm药型罩应用于某隧道1#横洞, 经过十个循环的现场试验, 未出现拒爆现象, 有效引爆被发装药, 确保爆破作业的连续性和安全性, 研究结果为隧道爆破等相关领域提供技术参考。

关键词: 铝制药型罩; 聚能射流; 数值模拟; 试验研究; 隧道爆破

中图分类号: U455.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2025)04-0140-15

Research on Penetration of Aluminum Liner into Concrete Target Plates

WANG Ke-yong¹, JIANG An^{1,2}, BAO Shou-zhi¹, SUN Yong¹, WANG Qing-biao¹,
TIAN Cheng-lin^{1,2}, SHI Zhen-yue¹, LI Zhong-hui³

(1. School of Resources, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271000, China;
2. College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and
Technology, Qingdao 266590, China; 3. China Railway 14th Bureau Group Co., Ltd.,
Jinan 250000, China)

Abstract: This study employed field tests, numerical simulations, and engineering application methods to investigate the influence of the law of aluminum pharmaceutical-shaped jets with varying cone angles and wall thicknesses during penetration of a concrete target plate at a blasting height of 6D. The structural parameters responsible for producing favorable penetration effects were identified and subsequently implemented to improve the detonation efficiency of the shaped energy spacer charge in practical engineering applications. The results demonstrate that in the field test, the size of the funnel pit initially increases and subsequently decreases as the cone angle varies from 60° to 120° , with the maximum diameter (48.88 mm) and depth (23.54 m) of the funnel pit occurring at a cone angle of 110° and a wall thickness of 2 mm. The numerical simulation and test results align with the variation patterns of fun-

收稿日期 (Date of reception): 2025-05-09

网络首发日期 (Published online): 2025-08-15

作者简介: 王可用 (1973-), 男, 山东嘉祥, 教授, 主要从事地下工程关键技术研究和相关病害的预防和治理, (E-mail) skd996607@sdust.edu.cn.

通信作者: 孙永 (1971-), 男, 山东临朐, 教授, 主要从事隧道工程、爆破工程等方面的教学与科研工作, (E-mail) skd996768@sdust.edu.cn.

基金项目: 山东省博士后创新项目 (SDCX-ZG-202400203) 资助; 青岛市博士后项目资助 (QDBSH20230202074)

About the author: WANG Ke-yong (1973-), male, Jiexiang city, Shandong Province, professor, mainly engaged in the research of key technologies of underground engineering and the prevention and treatment of related diseases, (E-mail) skd996607@sdust.edu.cn.

Corresponding author: SUN Yong (1971-), male, professor, mainly engaged in tunnel engineering and blasting engineering related teaching and research work, (E-mail) skd996768@sdust.edu.cn.

Fund Programs: The Shandong postdoctoral innovation project (SDCXZG-202400203), Qingdao postdoctoral funding program (QDBSH20230202074)

nel pit diameter and depth, exhibiting minimal error, thereby validating the effectiveness and accuracy of the penetration test. The optimized structural parameters of the cover were implemented in the 1# transverse hole of a tunnel, and ten field test cycles confirmed successful detonation without explosion rejection, ensuring operational continuity and blasting safety. These findings offer a reference for tunnel blasting and related engineering applications.

Key words: aluminum liners; shaped jet; numerical simulation; experimental studies; tunnel blasting

隧道爆破常采用周边孔聚能光面爆破,其中周边孔采用的聚能起爆技术是通过主发炸药爆炸后压垮药型罩,并向轴线聚集形成高速金属射流,冲击被发炸药,实现对被发炸药的起爆。然而在实际工程中,炮孔环境复杂,常有炮孔积水或石屑堵塞,且聚能间隔装药技术中主发炸药与被发炸药传爆距离远大于最佳炸高 $2D \sim 3D$ (D 为药型罩直径),射流无法引爆被发炸药,容易发生拒爆现象。因此,本研究以 $6D$ 炸高的工况下,探讨不同锥角、壁厚的铝制药型罩聚能射流侵彻混凝土靶板的影响规律,旨在确定侵彻效果较好的结构参数,将其应用于实际工程来提升隧道爆破聚能间隔装药的起爆效率。

众多学者对聚能装药侵彻进行了大量研究。在理论与数值模拟方面,欧靖等采用多物质单元 ALE 法就锥形罩射流对水介质的侵彻进行数值模拟^[1],分析锥形装药结构中药型罩锥角和厚度对所形成的聚能射流侵彻水时运动参数的影响,结果表明,锥形罩锥角大小及药型罩厚度对聚能射流在水中的形状、射流速度、加速度等有着明显的影响。当锥角为 90° 时,罩厚为 4 mm 的药型罩所形成的射流在水中表现最好。胡枫等通过对比实验与数值模拟的侵彻深度和成坑尺寸^[2],验证了 ALE 算法、流固耦合算法、材料模型、状态方程及相应材料参数的准确性,分析了药型罩参数对聚能射流成形和侵彻混凝土靶体终点效应的影响,结果表明,铜罩侵彻深而孔小,铝罩反之。赵鑫等用 Autodyn 软件建立了装药直径为 60 mm 聚能装药的有限元模型^[3],进行数值仿真,分别从材料、锥角和壁厚等方面,研究不同药型罩射流的成型与侵彻性能。结果表明:当药型罩锥角为 60° ,壁厚为 2 mm ,材料为铜,与锥角为 50° ,壁厚为 2 mm ,材料为镍,这两组药型罩形成的聚能射流成型与侵彻性能相近,且对主装甲的侵彻性能优于其他药型罩所形成射流。王立蒙等对药型罩锥角这一影响金属射流性能的因素进行了详细的分析研究^[4]。利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件进行仿真计算,结果表明:在靶板速度一定的条件下,锥角为 110° 的圆锥形药型罩形成的射流对运动体的侵彻效果最好。宋静静等对不同装药结构形成射流的过程进行数值模拟^[5],取 1.5 倍炸高位置处的射

流头部剩余速度以及射流有效长度作为评判射流侵彻能力的依据,进行正交试验设计,结果表明:各因素对射流头部速度影响的主次顺序为:药型罩厚度 > 药型罩锥角角度 > 装药外壳厚度 > 装药长径比;对射流有效长度影响的主次顺序为:药型罩锥角角度 > 药型罩厚度 > 装药外壳厚度 > 装药长径比。在药型罩侵彻试验方面,王成等系统开展了不同药型罩材料、不同锥角、不同壁厚的聚能装药在不同炸高下侵彻混凝土试验^[6],研究了罩材料、锥角、壁厚、炸高等结构参数对漏斗坑直径、侵彻孔洞直径、漏斗坑深度以及侵彻深度等参数的影响规律;基于 AUTODYN 软件平台,采用与试验一致的聚能装药结构,开展侵彻体成形过程的数值模拟研究,结果表明,铝药型罩的开坑机理不同于钢、铜药型罩。郭萌萌等基于准定常侵彻理论^[7],得到了射流侵彻钢筋混凝土深度的计算方法。通过射流侵彻钢筋混凝土试验,得到了不同炸高下的侵彻深度,与理论计算结果进行对比,二者吻合较好,验证了侵彻深度计算方法的正确性。谢兴博等采用数值模拟方法对比研究了装药量、外径和药型罩壁厚相同条件下 60° 、 120° 锥形罩和曲率半径为 10.8 cm 曲面罩形成的射流或爆炸成型弹丸 (EFP) 运动特性及其对混凝土基座垂直侵彻过程和毁伤效应^[8],结果表明:不同聚能装药侵彻体对混凝土基座的侵彻方式不同,混凝土基座的破碎程度与侵彻孔直径相关,侵彻的孔径越大,破碎程度越高。

虽然国内外学者对药型罩结构、材料的聚能装药侵彻有大量的研究,但针对铝合金药型罩及其结构参数对聚能装药侵彻的研究尚显不足。铝合金作为一种轻质材料,在药型罩中的应用具有独特的优势。例如,铝合金药型罩在侵彻过程中能够形成孔径较大但深度较浅的侵彻孔,这种特性使其在需要减少对后级结构影响的串联战斗部中表现出色^[9]。此外,大多数研究试验炸药为 TNT 与 JH-2 等,本研究采用隧道爆破中常用的二号岩石乳化炸药更贴近隧道爆破施工现场。因此,本文通过数值模拟和试验验证相结合的方法,探究不同锥角和壁厚铝合金药型罩聚能装药对混凝土靶板的侵彻效果,为隧道爆破等相关领域提供更技术参考^[10-19]。

1 铝制药型罩聚能射流侵彻试验研究

1.1 试验方案设计

1.1.1 试验材料

试验中聚能装药的炸药采用 2#岩石乳化炸药, 单根炸药参数见表 1。药型罩的材料为 7075 铝合

金如图 1 所示, 药型罩材料参数见表 2。黑色外壳为 pvc 管, 内径 32 mm, 高度 40 mm, 用来固定药型罩与炸药。试验时, 用白色 pvc 管当作炸高筒固定外壳及炸药。靶板材料采用 C40 混凝土, 靶板尺寸为 150 mm × 150 mm × 150 mm。

表 1 2#岩石乳化炸药参数

Table 1 2# rock emulsion explosives parameters

直径 Diameter/mm	长度 Length/mm	质量 Mass/g	密度 Density/ (g · cm ⁻³)	爆轰速度 Detonation speed/(m · s ⁻¹)
32	300	300	1.24	4e3

表 2 药型罩参数

Table 2 Parameters of the liner

材料 Material	直径 Diameter/mm	锥角 Cone angle/°	壁厚 Wall thickness/mm
铝合金 7075	32	60	1
		70	
		80	
		90	
		100	2
		110	3
120	4		

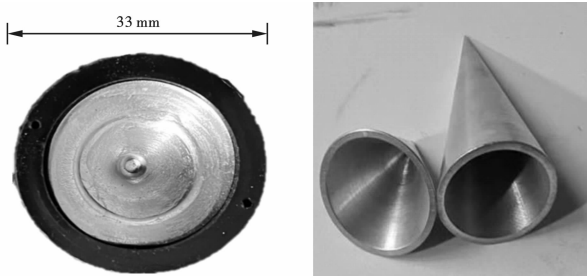


图 1 药型罩结构图

Fig. 1 Structure diagram of the liner

1.1.2 试验方案

在实际隧道工程, 隧道聚能间隔装药技术中传爆距离为 500 mm, 远超聚能装药的最佳炸高范围 (2D ~ 3D, D 为药型罩直径)。因此, 设置 6D 炸高, 准备炸药高度 32 mm (1D) 炸药, 在研究锥角以及炸高对侵彻效果的影响规律时, 选定壁厚 2 mm 铝制药型罩, 药型罩锥角 60° ~ 120°; 在研究壁厚对侵彻效果的影响规律时, 选定锥角 110° 铝制药型罩, 壁厚分别为 1 ~ 4 mm, 试验布置如图 2 所示。

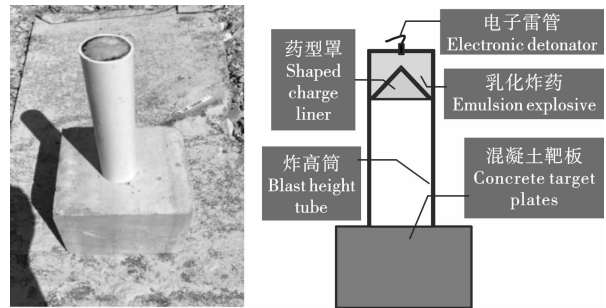


图 2 试验布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the test layout

1.2 试验结果分析

铝制药型罩聚能射流侵彻混凝土靶板, 在侵彻点附近的表面处形成漏斗坑。侵彻效果通过漏斗坑的直径和深度进行量化评估, 这两个指标是衡量聚能射流侵彻能力的关键参数。因此, 在试验中利用游标卡尺与定位尺测量了漏斗坑直径与漏斗坑深度, 如图 3 所示。

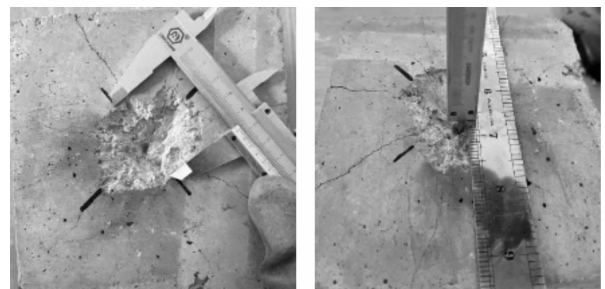


图 3 测量示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the measurement

在 2 mm 壁厚下, 不同锥角药型罩聚能射流侵彻后, 混凝土靶板的损伤情况如图 4 所示。

在 110° 锥角下, 不同壁厚药型罩聚能射流侵彻后, 混凝土靶板的损伤情况如图 5 所示。

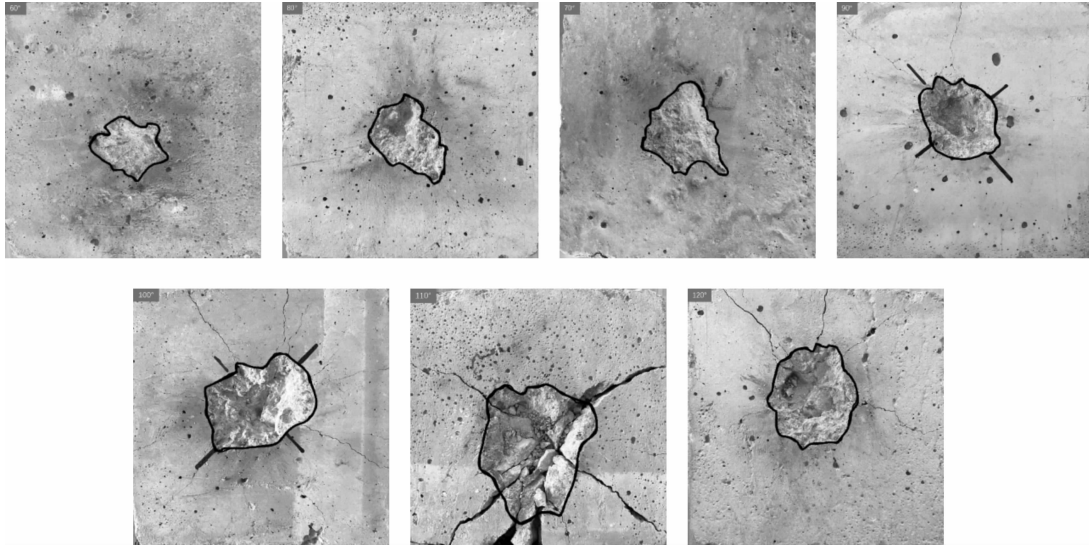


图 4 不同锥角试验结果

Fig. 4 Test results of different cone angles

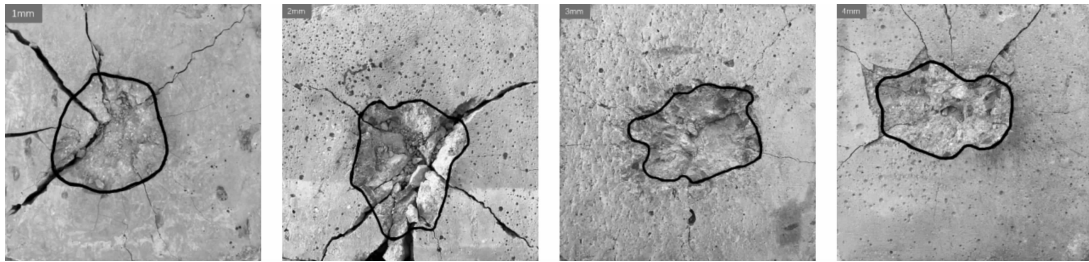


图 5 不同壁厚试验结果

Fig. 5 Test results for different wall thicknesses

1.2.1 靶板损伤分析

试验结果中混凝土靶板只出现漏斗坑, 未出现侵彻孔洞。这可能是由于炸药的装药高度小或炸高过大, 导致聚能射流的能量较小, 混凝土靶板受到的冲击力不足以形成侵彻孔洞。主要考虑混凝土是一种典型的脆性材料, 其抗压强度相对较高, 但抗拉强度较低, 若装药高度为 3D 时, 会导致混凝土直接崩开, 如图 6 所示。



图 6 试验结果

Fig. 6 Test results

由图 4、图 5 可知, 裂缝出现的原因可能是聚能射流侵彻混凝土靶板时, 会产生强大的冲击波和应力波, 这些波在靶板内部传播时, 会导致靶板内部的应力分布更加复杂和不均匀, 靶板局部区域的应力迅速增加, 超过混凝土的抗压强度和抗拉强度, 从而引发裂纹的产生和扩展, 随着侵彻深度的增加, 应力波的多次反射和叠加也会加剧靶板内部的应力状态, 进一步促进裂纹的扩展和连接, 削弱靶板的整体结构强度, 最终形成宏观裂缝。

1.2.2 不同锥角试验结果分析

壁厚 2 mm 不变, 不同锥角的铝制药型罩聚能射流侵彻混凝土靶板形成的漏斗坑尺寸结果见表 3, 漏斗坑直径变化规律与漏斗坑深度变化规律, 如图 7、图 8 所示。

由表 3 与图 7 可以看出, 随着锥角从 60° 增加到 110°, 漏斗坑的直径逐渐增大, 达到了最大值 48.88 mm (锥角为 110°)。然而, 当锥角增大到 120° 时, 直径开始减小到 36.6 mm。这是由于, 当锥角较小时, 随着锥角的增加, 聚能射流直径增大, 侵彻形态更好, 漏斗坑的尺寸也增大。锥角达到 110° 时, 聚能效应

最强,形成的漏斗坑最大。然而,超过这个临界点后,锥角进一步增加反而导致,药型罩的坍塌形态发生变化,射流的形成过程受到干扰,导致能量分散,侵彻效果下降。

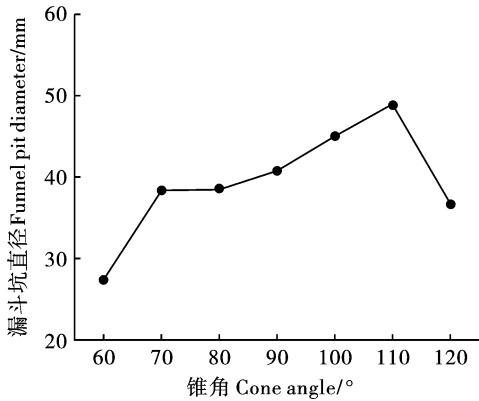


图 7 漏斗坑直径随锥角变化规律

Fig. 7 The diameter of the funnel varies with the cone angle

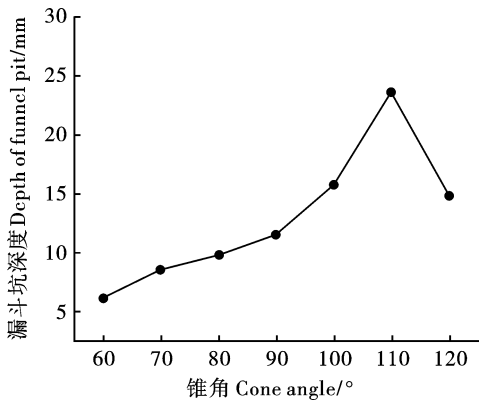


图 8 漏斗坑深度随锥角变化规律

Fig. 8 The depth of the funnel varies with the cone angle

表 3 不同锥角聚能射流侵彻漏斗坑尺寸试验结果

Table 3 Test results of shaped jets with different cone angles penetrating the funnel pit

锥角 Cone angle/°	漏斗坑直径 Funnel pit diameter/mm	漏斗坑深度 Funnel pit depth/mm
60	27.34	6.10
70	38.30	8.52
80	38.52	9.82
90	40.80	11.58
100	45.01	15.68
110	48.88	23.54
120	36.60	14.80

由表 3 和图 8 可以看出,漏斗坑深度都是在随锥角的增加而增大,110°锥角时,漏斗坑深度最大,达到 23.54 mm。当锥角达到 120°时,深度明显下降,减小到 14.80 mm,这与漏斗坑直径随锥角的变

化规律一致,这说明铝合金药型罩聚能装药结构,大锥角药型罩更有利于漏斗坑的形成,其中 110°为漏斗坑形成的最佳药型罩锥角。

1.2.3 不同壁厚试验结果分析

锥角 110°不变,不同壁厚铝制药型罩聚能射流侵彻混凝土靶板形成的漏斗坑尺寸结果见表 4,漏斗坑直径变化规律与漏斗坑深度变化规律,如图 9、图 10 所示。

表 4 不同壁厚聚能射流侵彻漏斗坑尺寸试验结果

Table 4 Test results of shaped energy jets with different wall thicknesses penetrating funnel sizes

壁厚 Wall thickness/mm	漏斗坑直径 Funnel pit diameter/mm	漏斗坑深度 Funnel pit depth/mm
1	35.38	15.45
2	48.88	23.54
3	45.34	15.64
4	41.65	12.82

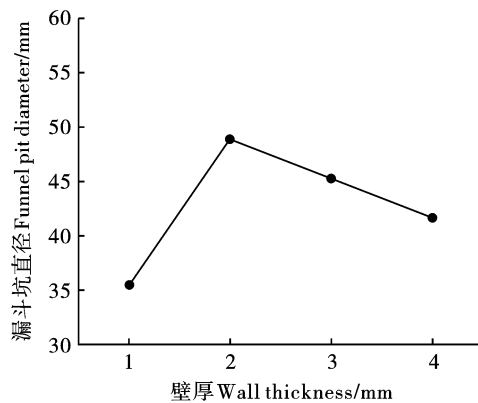


图 9 漏斗坑直径随壁厚变化规律

Fig. 9 The diameter of the funnel varies with the wall thickness

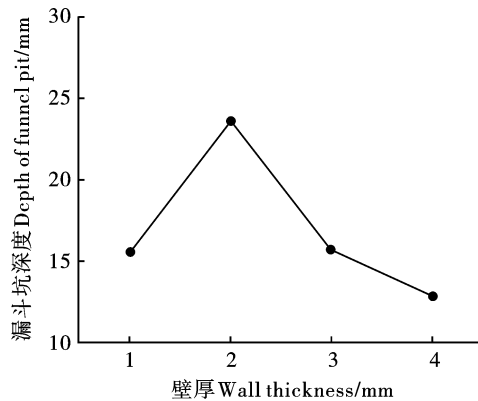


图 10 漏斗坑深度随壁厚变化规律

Fig. 10 The depth of the funnel varies with the wall thickness

根据表 4 与图 9 的数据分析, 我们可以清晰地观察到漏斗坑直径随壁厚的变化趋势。当壁厚从 1 mm 逐渐增加至 4 mm 时, 漏斗坑的直径首先呈现出增大的趋势, 并在壁厚为 2 mm 时达到最大值 48.88 mm。然而, 随着壁厚的继续增加, 漏斗坑的直径却开始逐渐减小, 当壁厚达到 4 mm 时, 直径减小至 41.65 mm。

从表 4 和图 10 中发现漏斗坑深度也随壁厚的增加表现出相似的变化趋势。随着壁厚从 1 mm 增加到 2 mm, 漏斗坑的深度逐渐增加, 并在壁厚为 2 mm 时取得最大值 23.54 mm。但之后, 随着壁厚的进一步增大, 漏斗坑的深度却开始减小, 当壁厚为 4 mm 时, 深度已减小至 12.82 mm。

可见, 壁厚 1 mm 过薄, 射流速度快, 但是整体分散, 侵彻效果不佳, 随着壁厚增加到 2 mm 时, 药型罩的强度提高, 射流形成稳定不发散, 头部直径变大, 侵彻效果提升。然而, 当壁厚过大, 药型罩强度会导致射流形成过程中能量减少, 射流速度会降低, 漏斗坑深度减小但直径较大。

2 铝制药型罩聚能射流侵彻数值模拟研究

2.1 模型建立

2.1.1 物理模型

物理模型由铝合金 7075 药型罩、二号岩石乳化炸药及 C40 混凝土三部分组成。装药部分的高度 H 为 32 mm, 直径 D 与药型罩直径一致, 均为 32 mm。混凝土靶板为边长为 150 mm 的正方体, 炸高保持在 200 mm, 聚能装药结构图 11 所示。

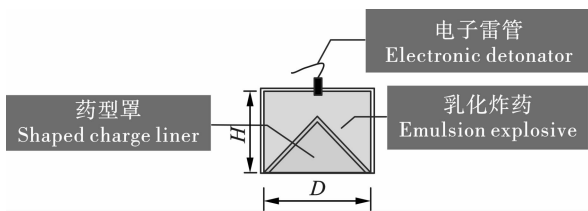


图 11 聚能装药结构图

Fig. 11 Shaped charge structure diagram

2.1.2 有限元模型

在利用 LS-DYNA 软件建立复杂结构的有限元模型时, 为了有效减少计算时间和资源消耗, 以锥角 110° 壁厚 2 mm 铝制药型罩为例, 充分利用模型的对称性, 仅对结构的四分之一部分进行详细的网格划分和材料属性定义。通过建立 1/4 对称模型, 并结合适当的对称边界条件设置, 能够准确模拟整个结构的动态响应, 同时极大地缩短了计算时间。数值模型单元采用 Solid 64 六面体实体单元, 模型的单位制为 g-cm- μ s, 炸药、药型罩、空气采用 Euler 网格, 并在药型罩、炸药与空气域的 Euler 网格交界处采用自适应网格加密技术, 以提高射流形成阶段的精度; 混凝土采用 Lagrange 网格, 并且单元采用 ALE 算法, 混凝土靶板的 Lagrange 网格在侵彻区域局部加密, 非关键区域适当粗化以节省计算资源, 共有节点数量 396 392 个, 单元数量是 375 214 个, 所有单元连接为共节点的方式, 如图 12 所示。

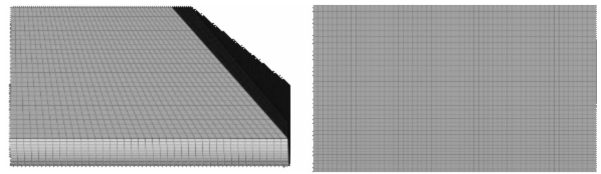


图 12 1/4 有限元模型网格划分

Fig. 12 Meshing of the 1/4 finite element model

2.2 材料参数与状态方程

2.2.1 乳化炸药材料参数及状态方程

炸药采用的是乳化炸药, 材料模型为 High_Explosive_Burn, 状态方程为 JWL 状态方程, 见式 (1)。材料以及式 (1) 中的输入参数见表 5 和表 6。

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中; P 为等熵压力; $V = \rho_0 / \rho = v_v / v_0$ 是相对比容; A, B, R_1, R_2, ω 为待定常数; E 为单位体积的内能。

表中: R_0 表示密度; D 表示爆速; P_{CJ} 表示爆压; $BETA$ 为燃烧标志; $A, B, R_1, R_2, OMEG$ 为炸药状态方程参数, 都是定值; E_0 是初始内能; V_0 是初始相对体积。

表 5 乳化炸药材料参数

Table 5 Emulsion explosive parameters

* 高能炸药燃烧材料 (Mat high_explosive_burn)				
材料编号 Material number	密度 Density $R_0 / (g \cdot cm^{-3})$	爆速 Detonation speed $D / (cm \cdot \mu s^{-1})$	爆压 Chapman-Jouguet $P_{CJ} / 10^2$ GPa	Beta
1	1.25	0.4	4	0

表 6 乳化炸药状态方程参数

Table 6 Parameters of the equation of state of emulsion explosives

* JWL 状态方程 (Eos_jwl)							
状态方程编号 EOS number	$A/10^2$ GPa	$B/10^2$ GPa	R_1	R_2	$Omeg$	初始内能 Initial internal energy $E_0/10^2$ GPa	初始相对体积 Initial relative volume V_0
1	2.144	0.00182	4.15	0.95	0.15	0.0419	1

2.2.2 药型罩材料参数及状态方程

模型中药型罩材料选择铝合金 7075, 采用 Johnson-Cook 材料模型进行描述, 该模型综合考虑了应变硬化、应变率强化以及温度软化效应, 适用于高速冲击和载荷条件下的材料模拟。同时, 为近似模拟铝合金 7075 在高压、高温、高应变率条件下的运动状态, 采用 Gruneisen 状态方程式 (2) 进行压力、内能等物理量的计算, 以确保仿真结果能够准确反映药型罩坍塌、射流形成及侵彻过程的物理特性。

材料以及式 (2) 中的输入参数见表 7 和表 8。

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E \quad (2)$$

式中: α 为热膨胀系数; μ 为相对体积变化参数; ρ_0 是初始密度; E 为单位体积的内能; S_1 、 S_2 、 S_3 为曲线的斜率参数; γ_0 是无量纲参数。

表 7 药型罩模型参数

Table 7 Metal material parameters

* Johnson-Cook 材料 Mat_johnson_cook											
材料编号 Material number	密度 Density $R_0/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	剪切模量 Shear Modulus $G/10^2$ GPa	泊松比 Poisson's ratio P_r	A/GPa	B/GPa	N	C	M	熔化温度 Melting temperature T_m/K	室温 Room temperature T_r/K	失效应力 Failure stress P_c
1	2.81	0.269	0.33	0.52	0.477	0.52	0.0025	1.61	893	293	9.0

表 8 药型罩状态方程参数

Table 8 Parameters of the equation of state of the drug form hood

* Gruneisen 状态方程 (Eos_gruneisen)								
状态方程编号 EOS number	C	S_1	S_2	S_3	$Gama_0$	A	初始内能 Initial internal energy E_0	初始相对体积 Initial relative volume V_0
2	0.524	1.4	0.0	0.0	1.97	0.0	0.0	1.0

表中: R_0 为密度; G 为基本剪切模量; P_r 为泊松比; A 、 B 、 N 、 C 、 M 为式的输入常数; T_m 为熔化温度; T_r 为室温; P_c 为失效应力。 C 为曲线的截断点, S_1 、 S_2 、 S_3 为曲线的斜率参数, $Gama_0$ 、 A 为 Gruneisen 参数, E_0 为初始内能, V_0 为初始相关量。

2.2.3 空气域材料参数及状态方程

有限元模型中存在空气域, 因此需对空气进行材料模型设置, 空气模型材料均选用 * MAT_NULL 材料模型, 模型密度为 $1.250E-3 g/cm^3$ 。状态方程采 * EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 模型, 材料以及式 (3) 中的输入参数见表 9 和表 10。

$$P = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E \quad (3)$$

式中: $\mu = \rho/\rho_0$, 若 $\mu < 0$, 则 $C_2 \mu^2 = C_6 \mu^2 = 0$, 线性多项式状态方程可用于伽马定律模拟气体状态方程。这可以设置: $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$, $C_4 = C_5 = \gamma - 1$ 。

表中: R_0 为材料密度; P_c 为截止压力; M_u 为动态粘度系数; $Terod$ 、 $Cerod$ 为相对体积; Y_m 为杨氏模量; P_r 为泊松比; C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 是多项式方程系数; E_0 为单位参考比容的初始内能; V_0 为初始相对体积。

表 9 空气材料参数
Table 9 Air state equation parameters

* 空气材料 (Mat_null)

材料编号 Material number	密度 Density $Ro/(g \cdot cm^{-3})$	截止压力 Cutoff pressure P_c	动态粘度系数 Dynamic viscosity M_u	相对体积 Relative volume $Terod$	相对体积 Relative volume $Cerod$	杨氏模量 Young's modulus Y_m	泊松比 Poisson's ratio P_r
3	1.25e-3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

表 10 空气状态方程参数
Table 10 Air state equation parameters

* 线性多项式状态方程 (Eos_linear_polynomial)

状态方程编号 EOS number	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	初始内能	初始相对体积
								Initial internal energy E_0	Initial relative volume V_0
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.40	0.00	0.00	1.00

2.2.4 混凝土材料参数

靶板材料为混凝土, 采用 Johnson_Holmquist_Concrete 模型, 材料参数见表 11。表中: Ro 为材料密度; G 为剪切模量; A 为规范内聚强度; B 为归一化压力; C 为应变速率系数; N 为压力硬化指数; F_c

为准静态单轴抗压强度。

MAT_ADD_EROSION 关键字作为混凝土材料模型添加额外的失效准则, 这些准则是独立应用的, 一旦单元满足足够数量的失效条件 (NCS), 单元就会从计算中删除, 这里设置的阈值是 0 ~ 1。

表 11 混凝土材料参数
Table 11 Concrete material parameters

* 混凝土材料 (Mat_concrete)

材料编号 Material number	密度 Density $Ro/(g \cdot cm^{-3})$	剪切模量 Shear modulus $G/10^2$ GPa	内聚强度 Cohesive strength A/GPa	归一化压力 Normalized pressure B	应变速率系数 Strain rate coefficient C	压力硬化指数 Pressure hardening index N	抗压强度 Compressive strength F_c/GPa
4	2.28	0.14	0.79	1.6	0.007	0.61	0.04

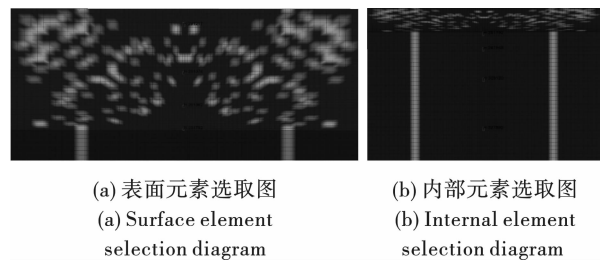
2.3 仿真结果分析

2.3.1 混凝土靶板应力分析

以 110° 锥角为例, 从侵彻中心开始, 由近及远选取两组元素进行分析: 一组为靶板表面元素 ($A_{291792}, B_{291962}, C_{291074}, D_{291217}$), 如图 13 (a) 所示; 另一组为内部垂直元素 ($A_{291792}, B_{297568}, C_{309120}, D_{327892}$), 如图 13 (b) 所示。通过这两组元素的应力波形图, 如图 14 所示, 可以观察到应力波在不同位置的传播特性。

从图 14 中可以看出, 混凝土靶板在受到聚能射流侵彻的过程中, 会产生应力, 且应力在侵彻初期迅速达到峰值, 随后逐渐衰减。这些应力波包括压缩波和拉伸波, 它们在混凝土中的传播和相互作用导致裂缝的产生和扩展。压缩波通常在侵彻初期产生, 由于其传播速度快, 能够迅速在混凝土内部传播, 造成初始的压缩破坏。而拉伸波紧随压缩波之

后产生, 由于混凝土材料抗拉强度较低, 拉伸波更容易导致裂缝的形成。在拉伸波的作用下, 混凝土内部的微裂缝逐渐扩展并相互贯通, 形成宏观裂缝。在侵彻中心由近及远选取的四个元素中, A_{291792} 元素承受了最大的峰值应力, 这意味着侵彻中心附近混凝土首先出现裂缝, 然后裂缝逐步扩展到其他元素区域。



(a) 表面元素选取图
(a) Surface element selection diagram
(b) 内部元素选取图
(b) Internal element selection diagram

图 13 元素选取图

Fig. 13 Element selection diagram

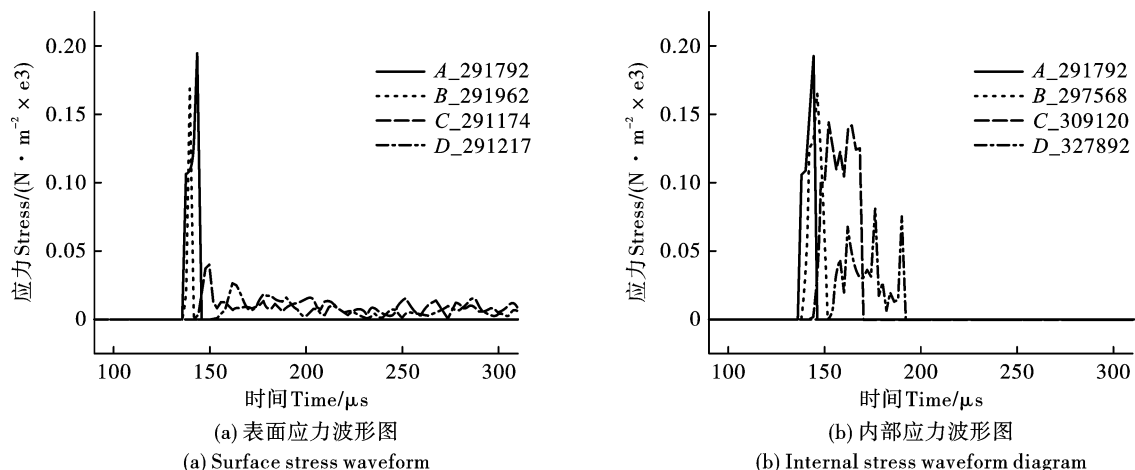


图 14 应力波形图

Fig. 14 Stress waveform diagram

2.3.2 不同锥角仿真结果分析

在 60°至 120°的锥角范围内,不同锥角铝制药型罩聚能射流侵彻效果表现出显著差异。随着锥角的增加,侵彻形成的漏斗坑直径和深度呈现出先增

大后减小的趋势,数值模拟结果见表 12、表 13。相关侵彻损伤云图、漏斗坑尺寸如图 15 所示,漏斗坑尺寸对比如图 16、图 17 所示。

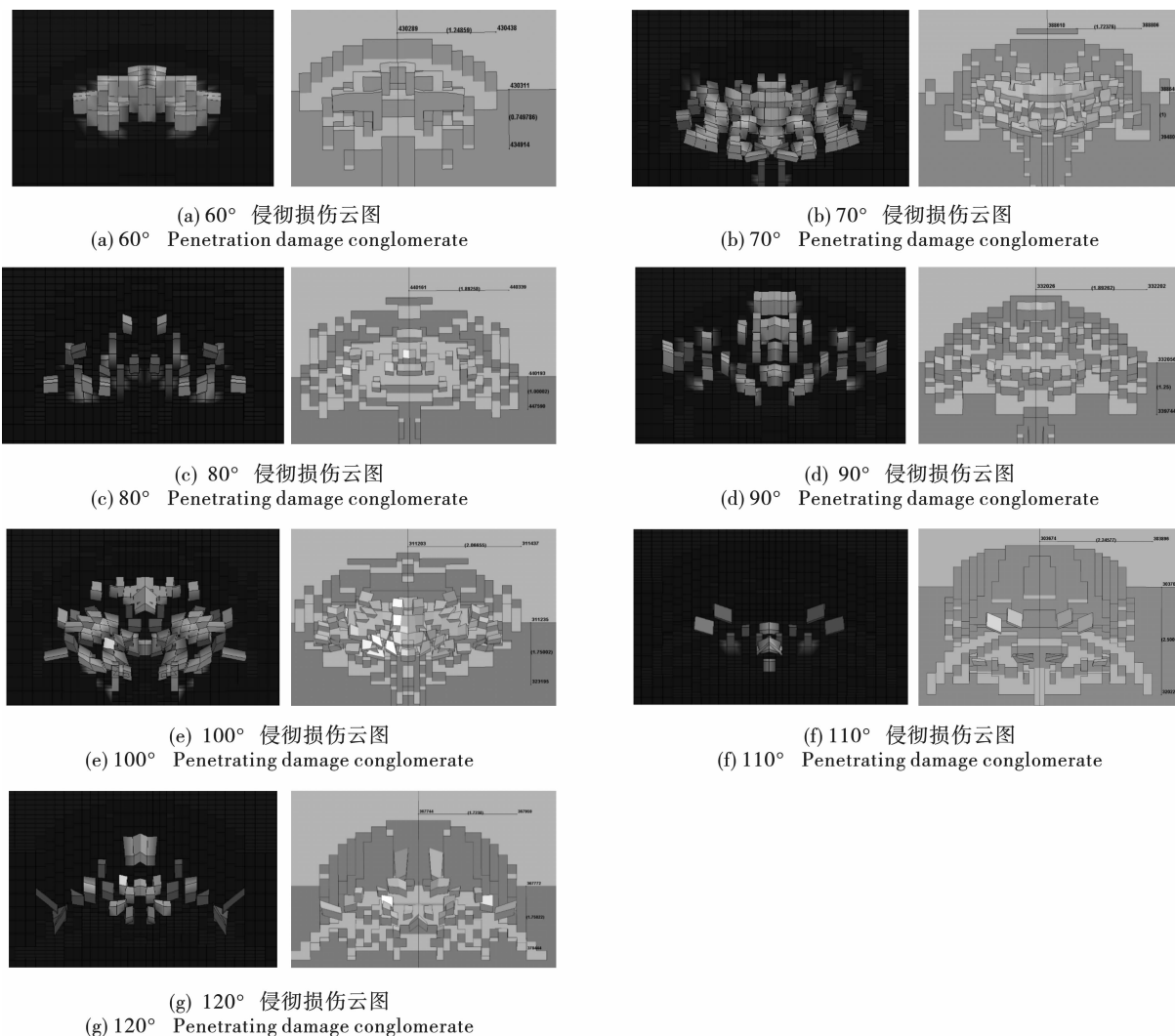


图 15 不同锥角聚能射流侵彻混凝土数值模拟结果图

Fig. 15 Numerical simulation results of shaped jets with different cone angles penetrating concrete

表 12 不同锥角漏斗坑直径数值模拟结果
Table 12 Numerical simulation results of funnel diameters with different cone angles

锥角 Cone angle/°	漏斗坑直径 Funnel pit diameter/mm	误差 Error/%
60	25.0	8.6
70	34.5	9.9
80	37.8	1.9
90	37.9	7.1
100	41.3	8.2
110	44.9	8.1
120	34.5	5.7

表 13 不同锥角漏斗坑深度数值模拟结果
Table 13 Numerical simulation results of funnel depths with different cone angles

锥角 Cone angle/°	漏斗坑深度 Funnel pit depth/mm	误差 Error/%
60	7.0	14.8
70	10.0	17.4
80	10.0	1.8
90	12.5	7.9
100	17.5	11.6
110	25.0	6.2
120	17.5	18.2

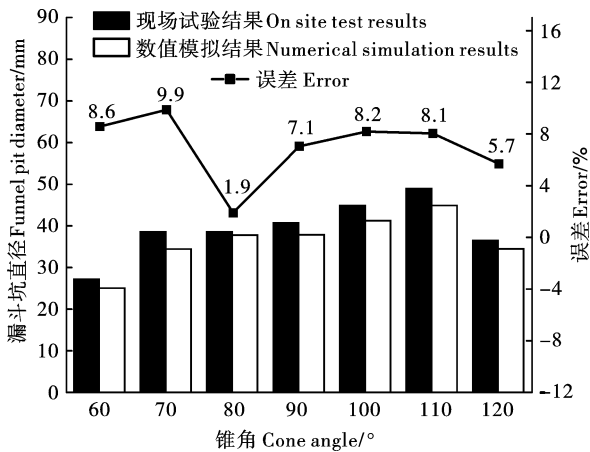


图 16 不同锥角漏斗坑直径结果对比图
Fig. 16 Comparison of the results of funnel diameters with different cone angles

由表 12 与图 16 可知,随着锥角从 60° 增加到 110°,漏斗坑直径逐渐增大,达到了最大值 44.9 mm (锥角为 110°)。然而,当锥角增大到 120° 时,直径开始减小到 34.5 mm。

由表 13 与图 17 可知,70° ~ 110° 间,70° 与 80° 的漏斗坑深度一样,其他锥角漏斗坑深度随锥角的增加而增大,110° 锥角时,漏斗坑深度最大,侵彻效

果最佳。当锥角达到 120° 时,深度明显下降,这与漏斗坑直径随锥角的变化规律一致,其中 110° 为该聚能装药结构侵彻效果最佳药型罩锥角。

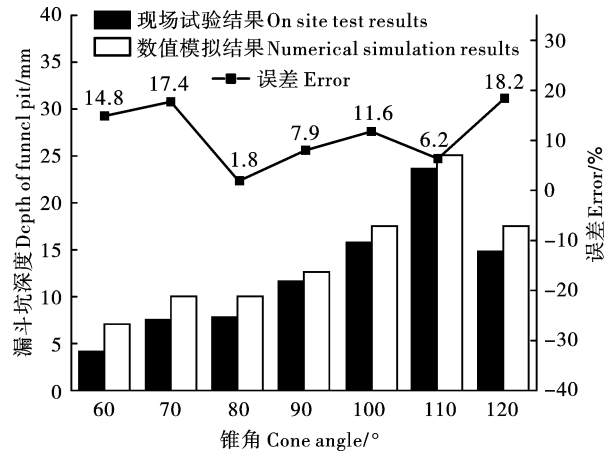


图 17 不同锥角漏斗坑深度结果对比图
Fig. 17 Comparison of the results of funnel depths with different cone angles

由图 16、图 17 可知,数值模拟结果呈现的漏斗坑直径、深度变化规律与试验结果总结出来的变化规律一致,且漏斗坑直径误差在 10% 以内,漏斗坑深度最大误差在 18.2%,这是因为深度值较小,所以误差百分比较大,实际误差值在 3 mm 以内,所以仿真值与试验值有较高的吻合性。

2.3.3 不同壁厚仿真结果分析

在 1 ~ 4 mm 范围内,不同壁厚的铝制药型罩聚能射流侵彻效果同样有很大差异。其中 2 mm 壁厚侵彻效果最佳,其余壁厚效果较差,数值模拟结果见表 14 与表 15。相关侵彻损伤云图、漏斗坑尺寸如图 18 所示,漏斗坑尺寸对比如图 19、图 20 所示。

表 14 不同壁厚铝制药型罩漏斗坑直径数值模拟结果
Table 14 Numerical simulation results of funnel diameter of aluminum liner with different wall thicknesses

壁厚 Wall thickness/mm	漏斗坑直径 Funnel pit diameter/mm	误差 Error/%
1	34.5	2.5
2	44.9	8.7
3	42.4	6.5
4	37.8	9.2

根据表 14 与图 19 可知,我们可以清晰地观察到漏斗坑直径随壁厚的变化趋势。当壁厚从 1 mm 逐渐增加至 4 mm 时,漏斗坑的直径首先呈现出增大的趋势,并在壁厚为 2 mm 时达到最大值 44.9 mm。然而,随着壁厚的继续增加,漏斗坑的直径逐渐减小,当壁厚达到 4 mm 时,直径减小至 37.8 mm。

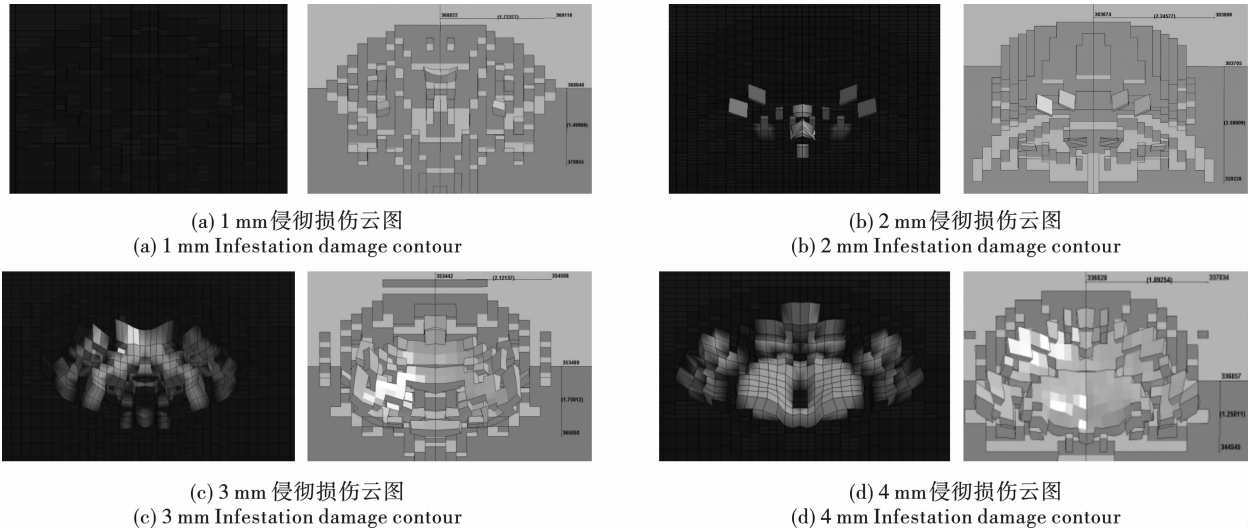


图 18 不同壁厚下的聚能装药侵彻混凝土数值模拟图

Fig. 18 Numerical simulation of shaped charge penetration of concrete under different wall thicknesses

表 15 不同壁厚铝制药型罩漏斗坑深度数值模拟结果
Table 15 Numerical simulation results of funnel depth of aluminum liner with different wall thicknesses

壁厚 Wall thickness/mm	漏斗坑深度 Funnel pit depth/mm	误差 Error/%
1	15.0	0.3
2	25.0	6.2
3	17.5	11.9
4	12.5	2.5

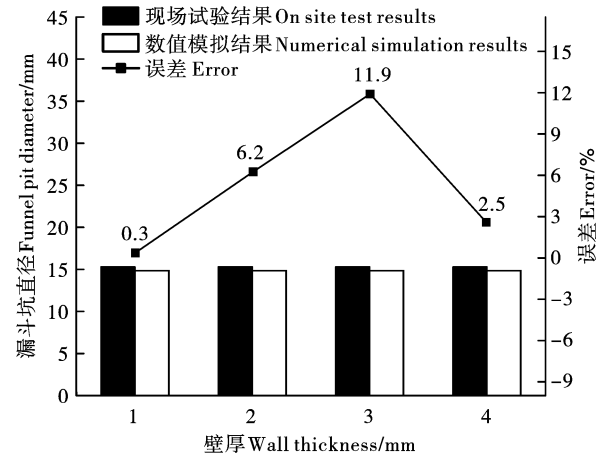


图 20 不同壁厚漏斗坑深度结果对比图

Fig. 20 Comparison of funnel depth results with different wall thicknesses

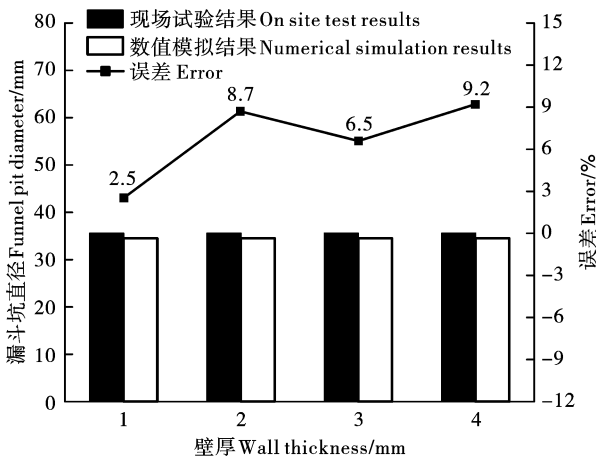


图 19 不同壁厚漏斗坑直径结果对比图

Fig. 19 Comparison of funnel diameters with different wall thicknesses

根据表 15 与图 20 可知,漏斗坑深度也随壁厚的增加表现出与直径相似的变化趋势。随着壁厚从 1 mm 增加到 2 mm,漏斗坑的深度逐渐增加,并在壁厚为 2 mm 时取得最大值 25 mm。但之后,随着壁厚的进一步增大,漏斗坑的深度却开始减小,当壁厚为 4 mm 时,深度最小为 12.5 mm。可见,2 mm 为本聚能装药结构最佳壁厚。

由图 19、图 20 可知,数值模拟结果呈现的漏斗坑直径、深度变化规律与试验结果总结出来的变化规律一致,且漏斗坑直径误差在 10% 以内,漏斗坑深度最大误差在 11.9%,这是因为深度值较小,所以误差百分比较大,实际误差值在 3 mm 以内,所以仿真值与试验值有较高的吻合性。

3 工程应用

针对某隧道 1#横洞施工过程中出现的拒爆问题,结合现场实际情况,根据围岩及岩性的变化,引入优化后的 110°、2 mm 铝制药型罩,且对爆破设计进行优化。该隧道现处于 IV 级围岩,岩体为灰岩,经优化,周边孔间距 65 cm,个数 33 个,炸药用量 197.7 kg,聚能间隔装药结构图如图 21 所示,炮眼布置如图 22 所示,药量分配见表 16。

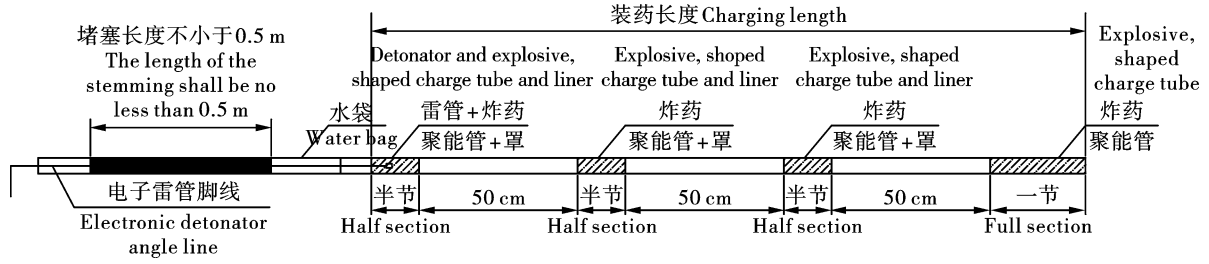


图 21 聚能间隔装药结构图

Fig. 21 Structural diagram of shaped energy spacer charge

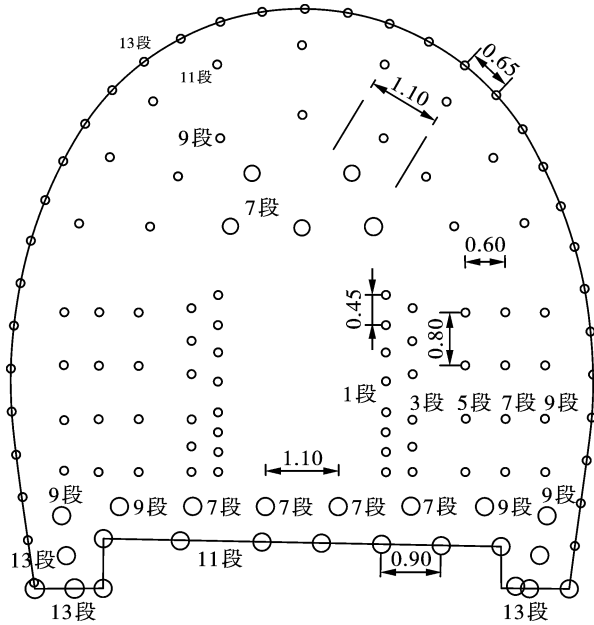


图 22 炮眼设计图(单位:m)

Fig. 22 Blast hole layout(unit:m)

爆破后技术人员现场观察, 未出现拒爆现象且爆破效果得到了提升, 如图 23 所示。周边孔半孔率达 89% 以上, 有效爆破深度 93% 以上, 爆破后的开挖轮廓更圆顺, 轮廓线周边岩石稳定安全, 有效减少超欠挖现象, 四周曲面圆顺平滑, 三面一体, 施工质量及安全得到有效控制。

3D 扫描结果如图 24 所示, 超挖面积 2.47 m², 欠挖面积 0.028 m², 最大超挖 0.34 m, 最大欠挖 0.322 m, 隧道线性平均超挖控制在 12 cm, 两炮错台控制在 15 cm 以内。



图 23 爆后效果图

Fig. 23 Blasting effect

表 16 药量分配表

Table 16 Charge allocation table

序号 Serial number	炮眼名称 The name of the blasthole	孔深 Hole depth/m	角度 Angle/°	数量 Number	装药系数 Charge factor	单孔药量 Single-hole charge/kg	小计 Subtotal/kg
1	掏槽眼 1 Pilot hole 1	4.0	69	16	0.40	1.6	25.600
2	掏槽眼 2 Pilot hole 2	4.5	75	12	0.41	1.8	22.140
3	辅助眼 Auxiliary hole	4.1	80	8	0.37	1.5	12.136
4	辅助眼 Auxiliary hole	4.1	85	8	0.29	1.2	9.512
5	辅助眼 Auxiliary hole	4.1	85	8	0.29	1.2	9.512
6	抬炮眼 Elevation hole	4.1	90	8	0.42	1.7	13.776
7	压炮眼 Compression hole	4.1	90	12	0.36	1.5	17.712
8	二圈眼 Second circle hole	4.1	90	9	0.36	1.5	13.284
9	周边孔 Perimeter hole	4.1	外插 3.8	33	0.31	1.3	41.943
10	底板眼 Floor hole	4.2	90	13	0.50	2.1	27.300
11	水沟眼 Drainage hole	4.1	90	2	0.58	2.4	4.756
断面面积 Cross-sectional area/m ²		开挖进尺 Excavated length/m		总钻孔数量 Total number of drill holes		炸药单耗 Powder factor/(kg · m ⁻³)	
60.05		4.1		129		0.91	

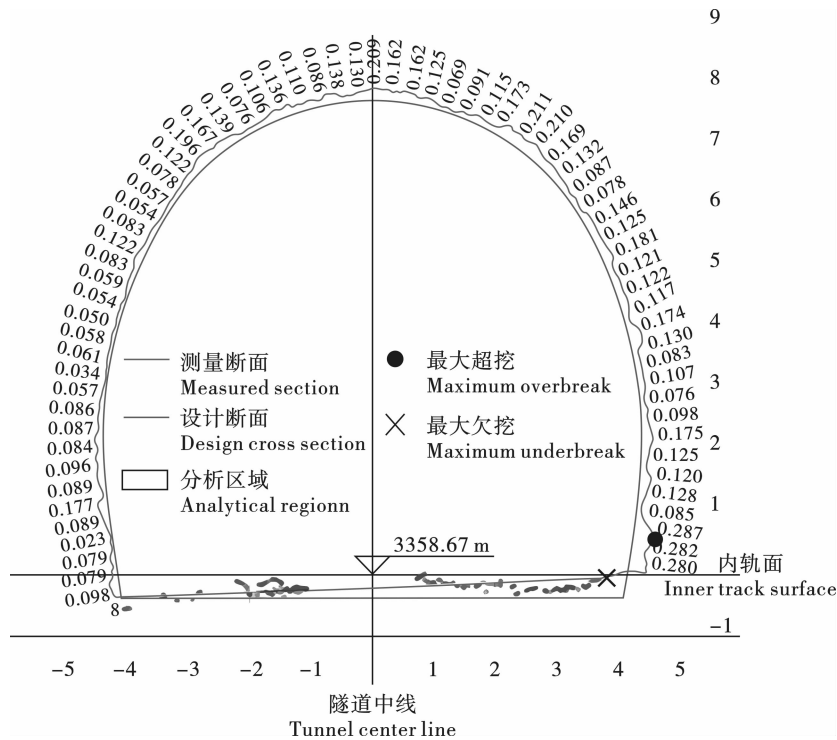


图 24 掌子面扫描数据

Fig. 24 Scan data of the working face

现场引入 110°、2 mm 铝制药型罩后,未出现拒爆现象且爆破效果较好,十个循环现场试爆的装药情况与爆后效果详细见表 17。多次试爆的周边孔

半孔率维持在 85%左右,炮孔利用率平均值在 93%左右,平均线性超挖值维持在 14 cm 左右,K 值 91%以上。

表 17 十个循环爆破效果统计表
Table 17 Ten cycle blasting effect stats

序号 Serial number	进尺 Advance/m	方量 Volume/m ³	实际用药量 Actual powder quantity/kg	炸药单耗 Powder factor	半孔率 Half-hole ratio/%	炮孔利用率 Blast hole utilization rate/%	平均线性超挖值 Average linear overbreak value/m
1	3.6	216.18	198	0.91	84.31	92.31	0.12
2	3.6	216.18	198	0.91	85.42	93.42	0.13
3	3.8	228.19	210	0.92	84.33	92.33	0.15
4	3.6	216.18	198	0.91	86.21	94.61	0.14
5	3.8	228.19	210	0.92	85.22	93.44	0.12
6	3.8	228.19	210	0.92	84.34	92.35	0.15
7	3.6	216.18	198	0.91	85.35	93.46	0.14
8	3.6	216.18	198	0.91	84.36	92.37	0.14
9	3.4	204.17	186	0.91	86.23	94.63	0.16
10	3.8	228.19	210	0.92	85.24	93.48	0.15

4 结论

通过开展不同锥角、壁厚铝制药型罩聚能射流侵彻混凝土试验与数值模拟,并将最佳结构参数药型罩进行现场应用,我们可以得出以下结论:

1)通过开展不同锥角、壁厚的铝制药型罩聚能

射流侵彻混凝土靶板试验,结果表明:随着锥角与壁厚的增加,漏斗坑尺寸都先增大后减小,且在锥角 110°和壁厚 2 mm 的结构参数下,药型罩侵彻性能最佳,形成的漏斗坑直径和深度最大。

2)对不同锥角和壁厚的铝制药型罩聚能射流侵彻混凝土靶板进行数值模拟,结果表明:锥角在

110°时,漏斗坑直径和深度均达到最大值,分别为44.9 mm和25.0 mm;壁厚为2 mm时,射流形成更加均匀,漏斗坑的直径和深度也达到峰值。试验结果与仿真结果在漏斗坑的直径和深度变化规律上一致,误差在3 mm以内,验证了试验结果的有效性和准确性。

3)采用侵彻效果最好的110°锥角、2 mm壁厚的铝制药型罩在某隧道1#横洞的现场应用,经过十个循环的现场试验,未出现拒爆现象,有效引爆被发装药,确保了爆破作业的连续性和安全性。

参考文献 (References)

- [1] 欧靖,杨易钊,郁文杰,等.药型罩参数对聚能射流水下运动的影响[J].装备环境工程,2023,20(2):1-9.
- [1] OU Jing, YANG Yi-zhao, YU Wen-jie, et al. Effect of medicinal hood parameters on underwater motion of shaped jet [J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(2):1-9. (in Chinese)
- [2] 胡枫,吴昊,方秦,等.聚能射流侵彻混凝土类靶体数值模拟研究[J].防护工程,2017,39(2):23-30.
- [2] HU Feng, WU Hao, FANG Qin, et al. Numerical simulation of shaped energy jet penetrating concrete targets [J]. Protection Engineering, 2017, 39(2):23-30. (in Chinese)
- [3] 赵鑫,徐永杰,郑娜娜,等.药型罩侵彻性能仿真与优化[J].兵器装备工程学报,2021,42(10):65-71.
- [3] ZHAO Xin, XU Yong-jie, ZHENG Na-na, et al. Simulation and optimization of penetration performance of pharmaceutical hood [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(10):65-71. (in Chinese)
- [4] 王立蒙,张国伟.不同锥角药型罩的金属射流性能仿真分析[J].机械工程与自动化,2016(2):91-93.
- [4] WANG Li-meng, ZHANG Guo-wei. Simulation analysis of metal jet performance of medicine form hood with different cone angles [J]. Mechanical Engineering and Automation, 2016(2):91-93. (in Chinese)
- [5] 宋静静,乐京霞,李晓彬,等.结构参数对聚能射流侵彻性能的影响[J].兵器装备工程学报,2023,44(7):150-155,169.
- [5] SONG Jing-jing, LE Jing-xia, LI Xiao-bin, et al. Effect of structural parameters on penetration performance of shaped jet [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(7):150-155,169. (in Chinese)
- [6] 王成,王万军,宁建国.聚能装药对混凝土靶板的侵彻研究[J].力学学报,2015,47(4):672-686.
- [6] WANG Cheng, WANG Wan-jun, NING Jian-guo. Study on penetration of shaped charge on concrete target plate [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, 47(4):672-686. (in Chinese)
- [7] 郭萌萌,张玉令,赵明哲.大炸高下聚能射流侵彻钢筋混凝土效能研究[J].弹箭与制导学报,2017,37(6):51-56.
- [7] GUO Meng-meng, ZHANG Yu-ling, ZHAO Ming-zhe. Study on the efficiency of shaped energy jet penetrating reinforced concrete under high blasting [J]. Journal of Projectiles, Missiles and Guidance, 2017, 37(6):51-56. (in Chinese)
- [8] 谢兴博,宋歌,张勃,等.聚能装药侵彻体对混凝土基座毁伤效应数值模拟研究[J].爆破,2023,40(1):147-153.
- [8] XIE Xing-bo, SONG Ge, ZHANG Qing, et al. Numerical simulation of the damage effect of shaped charge penetrating body on concrete foundation [J]. Blasting Reform, 2023, 40(1):147-153. (in Chinese)
- [9] 李召婷,王树有,孙圣杰,等.非对称中空环形聚能装药成型与侵彻特性影响因素分析[J].爆炸与冲击,2025,45(1):43-52.
- [9] LI Zhao-ting, WANG Shu-you, SUN Sheng-jie, et al. Analysis of influencing factors of forming and penetration characteristics of asymmetric hollow annular shaped charge [J]. Explosion and Shock, 2025, 45(1):43-52. (in Chinese)
- [10] 王贺,田成林,王清标,等.瓦斯隧道爆破方案优化及掌子面处瓦斯运移规律研究[J].爆破,2024,41(4):187-196.
- [10] WANG He, TIAN Cheng-lin, WANG Qing-biao, et al. Optimization of blasting scheme of gas tunnel and study on gas migration law at tunnel face [J]. Blasting, 2024, 41(4):187-196. (in Chinese)
- [11] 王清标,王涛,田成林,等.周边孔聚能装置间隔装药在光面爆破中的应用研究[J].爆破,2024,41(1):77-84.
- [11] WANG Qing-biao, WANG Tao, TIAN Cheng-lin, et al. Application of spacer charge in smooth blasting of peripheral hole concentrating device [J]. Blasting, 2024, 41(1):77-84. (in Chinese)
- [12] 王瑞聪,贾鑫,黄正祥.不同药型罩结构对环形EFP成型及侵彻性能影响的数值模拟[J].兵器装备工程学报,2024,45(10):83-90,129.
- [12] WANG Rui-cong, JIA Xin, HUANG Zheng-xiang. Numerical simulation of the effects of different drug mask structures on the molding and penetration performance of annular EFP [J]. Journal of Weapons and Equipment Engineering, 2024, 45(10):83-90,129. (in Chinese)
- [13] 王靖雯,袁浩,任凯.药型罩几何参数对新型聚能战斗部侵彻能力影响规律研究[J].弹箭与制导学报,2024,44(3):22-28.
- [13] WANG Jing-wen, YUAN Hao, REN Kai. Study on the influence of geometric parameters on the penetration capability of a new type of polycellular combatant [J]. Journal of Mis-

- siles and Guidance, 2024, 44(3):22-28. (in Chinese)
- [14] ZHAO Ping, CHEN Lang, YANG Kun, et al. Shaped-charge jet-initiation of covered RDX-based aluminized explosives and effect of temperature[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2020, 45(9):1443-1453.
- [15] 韩明蕾, 王 健, 周东康. 药型罩网格数量对数值模拟精度的影响[J]. 兵工自动化, 2022, 41(7):57-59.
- [15] HAN Ming-lei, WANG Jian, ZHOU Dong-kang. Influence of the number of drug mask grids on the accuracy of numerical simulation [J]. Military Automation, 2022, 41(7):57-59. (in Chinese)
- [16] 赵 鑫, 徐永杰, 郑娜娜. 药型罩侵彻性能仿真与优化[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(10):65-71.
- [16] ZHAO Xin, XU Yong-jie, ZHENG Na-na. Simulation and optimization of the intrusion and penetration performance of pharmaceutical mask[J]. Journal of Weapons and Equipment Engineering, 2021, 42(10):65-71. (in Chinese)
- [17] 焦志刚, 寇东伟, 杜 宁. 药型罩锥角对 JPC 与 JET 形成的影响[J]. 装备制造技术, 2015(12):38-40.
- [17] JIAO Zhi-gang, KOU Dong-wei, DU Ning. Influence of drug mask cone angle on JPC and JET formation[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2015(12):38-40. (in Chinese)
- [18] 崔魁文, 米双山, 高 敏. 药型罩锥角对聚能杆式侵彻体影响的数值分析[J]. 兵工自动化, 2018, 37(11):67-71.
- [18] CUI Kui-wen, MI Shuang-shan, GAO Min. Numerical analysis of the effect of drug mask cone angle on the polygonal rod intruder [J]. Military Automation, 2018, 37(11):67-71. (in Chinese)
- [19] WANG Yan-sheng, LI Wei-bing, HUANG Xuan-ning, et al. Orthogonal design of the liner structure in dual-mode charge warhead [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(4):045102.
- [20] CHEN Xing, LU Yong-gang, CHENG Xiang-zhen. Study on influence of liner's structure parameters on effects of JPC operating underwater[J]. Transactions of Beijing institute of Technology, 2022, 42(11):1127-1135.
- [21] 张雷雷, 朱鸿瑞, 黄风雷. 大锥角药型罩聚能装药结构对混凝土介质侵彻研究[J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27(3):134-136.
- [21] ZHANG Lei-lei, ZHU Hong-rui, HUANG Feng-lei. Study on the penetration of concrete media by large cone angle charge masks with polymerized charge structures [J]. Journal of Missiles and Guidance, 2007, 27(3):134-136. (in Chinese)
- [22] 许香照, 马天宝, 宁建国. 聚能装药侵彻混凝土数值模拟[J]. 计算机辅助工程, 2015, 24(2):29-35.
- [22] XU Xiang-zhao, MA Tian-bao, NING Jian-guo. Numerical simulation of concrete penetration by polymerized charge[J]. Computer Aided Engineering, 2015, 24(2):29-35. (in Chinese)
- [23] 王晓东, 徐永杰, 郑娜娜. 药型罩结构对线型聚能装药侵彻性能影响的仿真研究[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(3):128-134.
- [23] WANG Xiao-dong, XU Yong-jie, ZHENG Na-na. Simulation study on the effect of the structure of the drug hood on the penetration performance of the linear shaped charge[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2024, 45(3):128-134. (in Chinese)
- [24] 许香照, 马天宝, 郝 莉. 大口径聚能装药侵彻厚混凝土靶板的数值模拟及实验研究[J]. 中国科学:技术科学, 2016(4):339-348.
- [24] XU Xiang-zhao, MA Tian-bao, HAO Li. Numerical simulation and experimental study on the penetration of thick concrete target plate by large-caliber polycharge[J]. Science China: Technological Science, 2016(4):339-348. (in Chinese)
- [25] 郭 帅, 张国伟, 王一鸣. 聚能装药战斗部药型罩壁厚对有利炸高影响的数值分析[J]. 弹箭与制导学报, 2018, 38(1):132-134.
- [25] GUO Shuai, ZHANG Guo-wei, WANG Yi-ming. Numerical analysis of the effect of wall thickness of drug shield on favorable blow-up height of polymer-charged combatant[J]. Journal of Ballistic and Guidance, 2018, 38(1):132-134. (in Chinese)
- [26] 刘 露, 岳思阳, 冯小红. 变壁厚双层罩形成聚能射流的数值模拟[J]. 装备制造技术, 2019(11):138-139, 148.
- [26] LIU Lu, YUE Si-yang, FENG Xiao-hong. Numerical simulation of variable wall thickness double-layer hood forming a concentrated energy jet[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2019(11):138-139, 148. (in Chinese)
- [27] 王瑞聪, 贾 鑫, 黄正祥. 不同药型罩结构对环形 EFP 成型及侵彻性能影响的数值模拟[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(10):83-90, 129.
- [27] WANG Rui-cong, JIA Xin, HUANG Zheng-xiang. Numerical simulation of the effect of different flux cover structures on the molding and intrusion performance of annular EFP[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2024, 45(10):83-90, 129. (in Chinese)
- [28] LADOV S V N S Y M, FEDOROV S V. Numerical analysis of the formation of shaped-charge jets from charges with conical and semi-spherical liners of variable thickness[J]. Combustion, Explosion, Shock Waves, 2019, 55:466-470.
- [29] FEDOROV S V. Numerical simulation of the formation of shaped-charge jets from hemispherical liners of degressive thickness [J]. Combustion, Explosion, Shock Waves, 2016, 52:600-612.