

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2025.06.003

基于提高岩石穿透性能的药型罩的结构优化*

周 明 田 斌 李必红 李尚杰 鲁 坤
物华能源科技有限公司(陕西西安,710061)

[摘 要] 为了提高射孔弹在实际储层条件下的侵彻性能,提高油气井的采收率,基于砂岩储层岩石特性,结合数值仿真和多目标遗传算法,对药型罩的结构进行优化设计。确定了影响穿透性能的药型罩的关键尺寸参数为外壁开口角度 a 、外顶角半径 b 、内顶角半径 c 、内壁开口角度 d 。通过响应曲面法建立了侵彻深度与这些参数的显式表达式。结果表明,射孔弹的药型罩最优结构尺寸: a 为 40° 、 b 为3.837 mm、 c 为2.813 mm、 d 为 38.7° 。优化设计后的仿真计算和试验测试均表明,射孔弹的侵彻性能得到提升,对砂岩靶的侵彻性能分别提升了28.97%和20.60%。显著提升了射孔弹在岩石地层中的穿透性能,为油气田高效开发提供了相应的技术支持。

[关键词] 射孔弹;药型罩;优化设计;侵彻;数值仿真;多目标遗传算法

[分类号] TJ510.6

Structural Optimization of the Shaped Charge Liner to Improve Performances of Penetrating Rocks

ZHOU Ming, TIAN Bin, LI Bihong, LI Shangjie, LU Kun
Wuhua Energy Technology Co., Ltd. (Shaanxi Xi'an, 710061)

[ABSTRACT] In order to improve the penetration performance of perforating charges under actual reservoir conditions and enhance the recovery rate of oil and gas wells, combined with the rock characteristics of sandstone reservoirs, a method combining numerical simulation and multi-objective genetic algorithm was adopted to optimize the structure of the shaped charge liner. The key dimensional parameters that affect the penetration performance of the shaped charge liner have been determined to be the outer wall opening angle a , outer vertex angle radius b , inner vertex angle radius c , and inner wall opening angle d . A response surface methodology was used to establish an explicit expression for penetration depth in relation to these parameters. The results indicate that the optimal structural dimensions for the shaped charge liner of the perforating charge are: a at 40° , b at 3.837 mm, c at 2.813 mm, and d at 38.7° . The simulation calculations and experimental tests after structural optimization show that the penetration performance of the perforating charge has been improved, with penetration performance on sandstone targets increased by 28.97% and 20.60%, respectively. It significantly improves the penetration performance of perforating charges in rock formations, providing corresponding technical support for efficient development of oil and gas fields.

[KEYWORDS] perforating charge; shaped charge liner; optimized design; penetration; numerical simulation; multi-objective genetic algorithm

0 引言

射孔弹通过精准爆破为油气开采建立高效通道,它的性能直接影响单井产量和经济效益,鉴于射孔弹在地层中的侵彻深度受到具体储层岩石特性的

影响,近年来射孔技术的研究与地质工程结合日益紧密,射孔弹的性能评价也由API RP 19B标准的地面测试逐渐转为更加贴近地质条件的应力岩石测试^[1]。因此,针对不同储层条件与岩石特性进行射孔弹的研究,对于射孔完井设计和产能预测至关重要。徐浩等^[2]采用LS-DYNA软件建立了储层条件下HS

* 收稿日期:2025-06-01

第一作者:周明(1978—),男,硕士,高级工程师,研究方向为石油射孔器材的开发。E-mail: 175538895@qq.com

通信作者:田斌(1993—),男,硕士,工程师,研究方向为石油射孔器材的开发。E-mail: 1290100537@qq.com

35-5 射孔弹侵彻不同强度的混凝土的侵彻模型,发现混凝土靶强度越大,侵彻深度越低。李东传等^[3]使用同种射孔弹在不同强度的砂岩上进行负压射孔,然后进行流动试验;结果显示,砂岩颗粒和胶结物是射孔孔道体积与损害程度差异的主要因素。姚劲松^[4]对金属射流侵彻岩石的过程进行量纲分析,结合物理试验结果,分析了射孔孔眼周围裂缝的分布规律及围压、加载条件等参数对裂缝分布规律的影响。朱秀星等^[5]对砂岩储层射孔压实伤害进行了研究,发现孔道入口端轴向距离越远,压实带厚度、孔隙度与渗透率伤害程度越小;冲击载荷强度的增加或岩石强度降低时,压实伤害程度增大。陈书豪等^[6]按照 API RP 19B 标准的 PART-IV 程序研制了模拟储层复杂压力条件下的射孔试验装置,并设计了一套试验评价方法,能够较为全面地评价射孔弹的性能和射孔作业过程中的关键参数指标。

作为射孔弹中实现高效穿透性能的核心部件,药型罩的结构、材料、工艺等因素直接决定了射孔孔道的质量和油气产能。针对不同岩石的岩性,开展药型罩优化设计具有重要意义。李优等^[7]通过研究弧锥结合药型罩的爆炸成型弹丸,分析了药型罩圆弧-锥角部分的速度、长度、压实状况等对爆炸成型弹丸性能的影响。陈浩等^[8]利用数值模拟技术与 BP 神经网络,通过遗传算法优化了环形药型罩的结构,并得出影响环形聚能射流的关键参数,包括药型罩口径、锥顶角、顶厚、内外罩偏移量等。孙贺等^[9]通过正交设计法分析了药型罩锥角、壁厚、装药高度等参数对侵彻性能的影响,确定了双层药型罩的最佳结构;研究表明,药型罩的壁厚对侵彻效果的影响最大,其次是锥角,最后是装药高度。何卓朗等^[10]通过正交优化设计和 Autodyn 仿真计算优化了柱锥结合药型罩的结构,解决了射流稳定性差、侵彻能力弱的问题;研究表明,影响射流断裂前头部速度的关键因素依次为柱型药型罩的高度、材料、顶部厚度。

本文中,结合对砂岩的穿透性能,开展了药型罩的结构优化设计,并利用 LS-DYNA 数值模拟和多目标遗传算法,分析了药型罩关键结构参数对侵彻性能的影响,结合制造工艺,得到该尺寸下最优药型罩结构。为射孔弹的后期研制提供相应的技术指导。

1 数值模拟

1.1 计算模型

目前,超深穿透射孔弹型药型罩的设计主要以

锥形药型罩为主。锥形药型罩的关键尺寸主要包括口径 D 、外壁开口角度 a 、外顶角半径 b 、内顶角半径 c 、内壁开口角度 d 。假设药型罩口径 D 为 46 mm,目标岩石为砂岩,优化计算药型罩的最优结构。射孔弹模型及药型罩结构如图 1 所示。

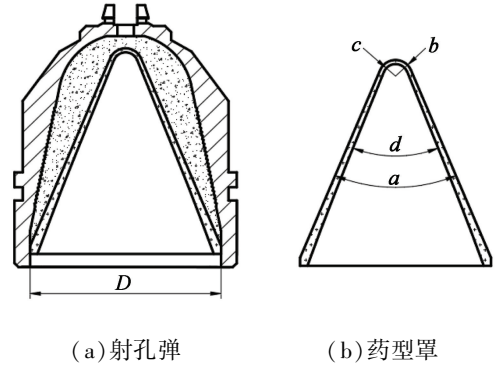
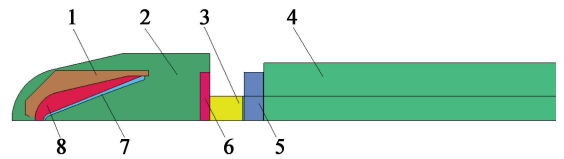


图 1 射孔弹及药型罩模型

Fig. 1 Models of the perforating charge and the shaped charge liner

建立射孔弹模拟装枪侵彻岩石靶有限元模型。模型中包括壳体、药型罩、炸药、模拟枪身、模拟套管、空气、水和砂岩靶。整体采用 1/4 轴对称模型。有限元结构见图 2。



1 - 壳体; 2 - 空气; 3 - 水; 4 - 砂岩靶;
5 - 套管片; 6 - 枪片; 7 - 药型罩; 8 - 炸药。

图 2 有限元结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the finite element structure

1.2 材料模型及参数

选用 RDX 炸药装药。

炸药、药型罩、空气和水采用欧拉网格,单元算法使用多物质 ALE 算法;RDX 炸药采用 JWL 状态方程;壳体、药型罩、模拟枪身和模拟套管采用 45# 钢,并使用 Johnson_Cook 模型,考虑高应变率条件下的应力、应变及失效关系;空气域和水选用无偏流体力学模型 Null,状态方程选用 * Eos_Linear_Polynomial;砂岩靶采用 RHT 模型。

具体参数如表 1 ~ 表 6 所示^[11-15]。

1.3 计算方法

模拟射孔弹起爆后药型罩各部位形成射流及杆体的情况,计算后使用 LS-PrePost 查看数值模拟结果,分析药型罩射流成型的规律。

表1 RDX材料模型及JWL状态方程

Tab. 1 Material model and JWL equation of state of RDX

$\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$A/$ GPa	$B/$ GPa	R_1	R_2	W
1.82	908.47	19.11	4.92	1.41	0.31

表2 45#钢材料模型

Tab. 2 Material model of 45# steel

$\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$A/$ GPa	$B/$ GPa	n	$C/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-3}$)	m
7.8	507	320	0.28	0.064	1.06

表3 药型罩材料模型

Tab. 3 Material model of the shaped charge liner

$\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$A/$ GPa	$B/$ GPa	n	$C/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-3}$)	m
7.8	90	25	0.25	0.025	0.1

表4 空气材料模型及线性多项式状态方程参数

Tab. 4 Material model and parameters of linear polynomial state equation of air

$\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
1.3×10^{-3}	0	0	0	0	0.4	0.4	0

表5 水材料模型及线性多项式状态方程参数

Tab. 5 Material model and parameters of linear polynomial state equation of water

$\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
1.0	0	0.020	0.084	0.080	0.439	1.394	0

表6 砂岩RHT材料模型参数

Tab. 6 Parameters of RHT material model of the sandstone

M_{ID}	R_0	S_{HEAR}	O_{NEMPA}	E_{PSF}	B_0	B_1	T_1
8	2.06	0.11	0	2.0	1.7	0.02	0.158
A	N	F_C	F_{S*}	F_{T*}	Q_0	B	T_2
1.6	0.56	8.6×10^{-4}	0.45	0.1	0.5	0.01	0
E_{OC}	E_{OT}	E_C	E_T	B_{ETAC}	B_{ETAT}	P_{TF}	
3×10^{-13}	3×10^{-12}	3×10^{19}	3×10^{19}	0.014	0.019	0.001	
G_{C*}	G_{T*}	X_1	D_1	D_2	E_{PM}	A_F	N_F
0.3	0.7	0.3	0.05	1	0.01	1.63	0.59
G_{AMMA}	A_1	A_2	A_3	P_{EL}	P_{CO}	N_P	A_{LPHA}
0	0.160	0.266	0.163	2.87×10^{-4}	0.005 5	5.8	1.12

2 药型罩结构的优化

2.1 单一参数对射孔深度的影响

在进行耦合优化前,分别研究外壁开口角度 a 、外顶角半径 b 、内顶角半径 c 、内壁开口角度 d 作为唯一变量对射孔深度的影响。

假设的药型罩各参数工艺范围和初始模拟参数如表7所示。

表7 药型罩参数工艺范围和初始模拟参数

Tab. 7 Range of process parameters and initial simulation parameters of the shaped charge liner

参数	$a/(\circ)$	b/cm	c/cm	$d/(\circ)$
工艺范围	40~45	0.35~0.50	0.25~0.40	40~43
初始参数	40	0.5	0.25	40

各参数计算结果如图3所示。图3中,蓝色圆圈为模拟得到的数据点;红色圆圈是模拟数据点中包含于工艺允许范围内的数据点;橙色五角星为工艺范围内最大深度所对应的点。

分析图3可知:内壁开口角度 d 在工艺范围内对射孔弹侵彻性能的影响较为平缓;外壁开口角度 a 、内顶角半径 c 和外顶角半径 b 在工艺范围内对射孔弹侵彻性能的影响较为剧烈。并且,可以确定单一变量变化时的最优参数为: $a=40^\circ$ 、 $b=0.35\text{ cm}$ 、 $c=0.35\text{ cm}$ 、 $d=41^\circ$ 。

射孔弹侵彻性能需分析多结构、多参数的共同影响。因此,需要继续分析多参数耦合作用对射孔弹的影响。通过图3可知, d 对射孔弹侵彻性能影响较小。为了节约计算量,将该参数作为从动变量,而不作为独立变量。

2.2 双参数对射孔深度的影响

分析图4(a)和4(b)可知:随着 a 、 b 增加,侵彻效果均减弱;并且当 $a=40^\circ$ 、 $b=0.35\text{ cm}$ 时,侵彻效果最优。此外, b 位于0.350~0.425 cm之间时,侵彻效果下降较为迅速。

分析图4(c)和4(d)可知:随着 b 的增加,侵彻效果减弱;但是随着 c 的增加,侵彻深度先增加、后减小。综合确定, $c=0.325\text{ cm}$ 、 $b=0.350\text{ cm}$ 时,侵彻效果最优。

分析图4(e)和图4(f)可知:随着 c 、 a 的增加,侵彻深度均先增加、后减小;并且,当 $c=0.325\text{ cm}$ 、 $a=42^\circ$ 时,侵彻效果最优。

图4分析只能定性判断并缩小药型罩的优化范围,未能精确化确定药型罩的具体参数。因此,针对

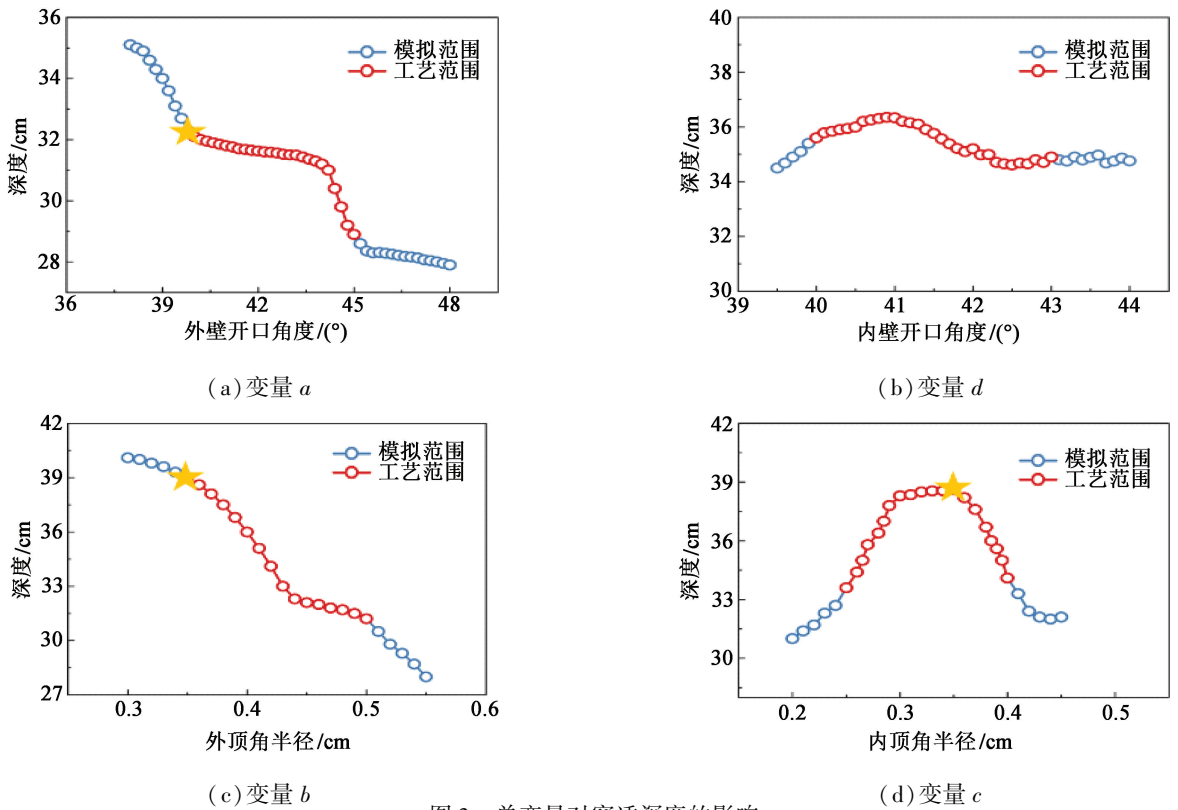


图 3 单变量对穿透深度的影响

Fig. 3 Effect of univariate on penetration depth

药型罩的结构参数开展更加详细的定量优化。

2.3 药型罩结构综合参数优化

通过 Matlab 软件分别计算射孔深度 L 随 a 、 b 的变化规律、射孔深度 L 随 a 、 c 的变化规律和射孔深度 L 随 b 、 c 的变化规律的响应曲面。图 5(c) 中, 红色圆圈内部分发生翘曲, 这是由于公式中无法排除外部顶角半径比内部顶角半径的不合理域, 产生了奇点。基于这一系列拟合曲面, 进一步获得了目标变量 L 关于 a 、 b 和 c 的显式表达式:

$$\begin{aligned}
 L = & 46.42 - 0.004307a + 28.06b - 20.86c - \\
 & 0.0869ab + 0.0388ac + 33.88bc - \\
 & 0.000418a^2 - 80.95b^2 + 31.83c^2 + \\
 & 0.0187abc - 0.000858a^2b + 0.001317a^2c - \\
 & 0.0557ab^2 + 0.0778ac^2 + 90.68b^2c - \\
 & 84.6bc^2 - 0.00000218a^3 - 31.05b^3 + \\
 & 10.78c^3 + 0.001216a^2b^2 + 0.000631a^2bc + \\
 & 0.001831a^2c^2 - 0.0578ab^2c - 0.0764abc^2 - \\
 & 78.42b^2c^2 + 0.00001766a^3b - 134.51b^3c + \\
 & 80.24b^4 - 47.02c^4. \quad (1)
 \end{aligned}$$

可利用 R^2 来评价所得表达式的可靠性^[16]。 R^2 越接近 1, 得到的结果越可靠。

经过计算, 目标函数显式表达式的多重决定系数 $R_L^2 = 0.9902$ 。

基于式(1), 通过多目标遗传算法得到 Pareto (帕累托) 最优解分布, 每个 Pareto 解对应一组 a 、 b 和 c 。图 6 中的每个蓝色数据点对应一组优化参数的组合。根据表 7 中设定的参数变化范围, 即 a 为 $40^\circ \sim 45^\circ$ 、 b 为 $0.35 \sim 0.50$ cm 和 c 为 $0.25 \sim 0.40$ cm。将工艺允许改变的范围用红色圆圈取代。橙色实心三角标记处为最优解: 深度 $L = 46.3$ cm, 孔径 $D = 1.14$ cm。得到最优解参数为: $a = 40^\circ$, $b = 0.3837$ cm, $c = 0.2813$ cm。对应最优解的其他参数为 $d = 38.7^\circ$ 。

采用 LS-DYNA 重新建立岩石射孔模型。将射孔弹药型罩按上述参数进行重新建模计算, 结果如图 7 所示。射孔深度达到了 46.3 cm, 与岩石参数优化前的 35.9 cm 相比, 增大了 28.97% 。这表明药型罩形状的优化效果显著增强。

3 试验测试

针对优化前、后的射孔弹, 开展模拟储层穿砂岩靶性能测试。变量即为优化前、后的药型罩, 变量如表 8 所示。主要通过自制的三相压力试验装置开展试验。测试的主要原理是将试验容器内部空间分隔成相互独立的两部分, 分别用于建立井筒压力、孔隙

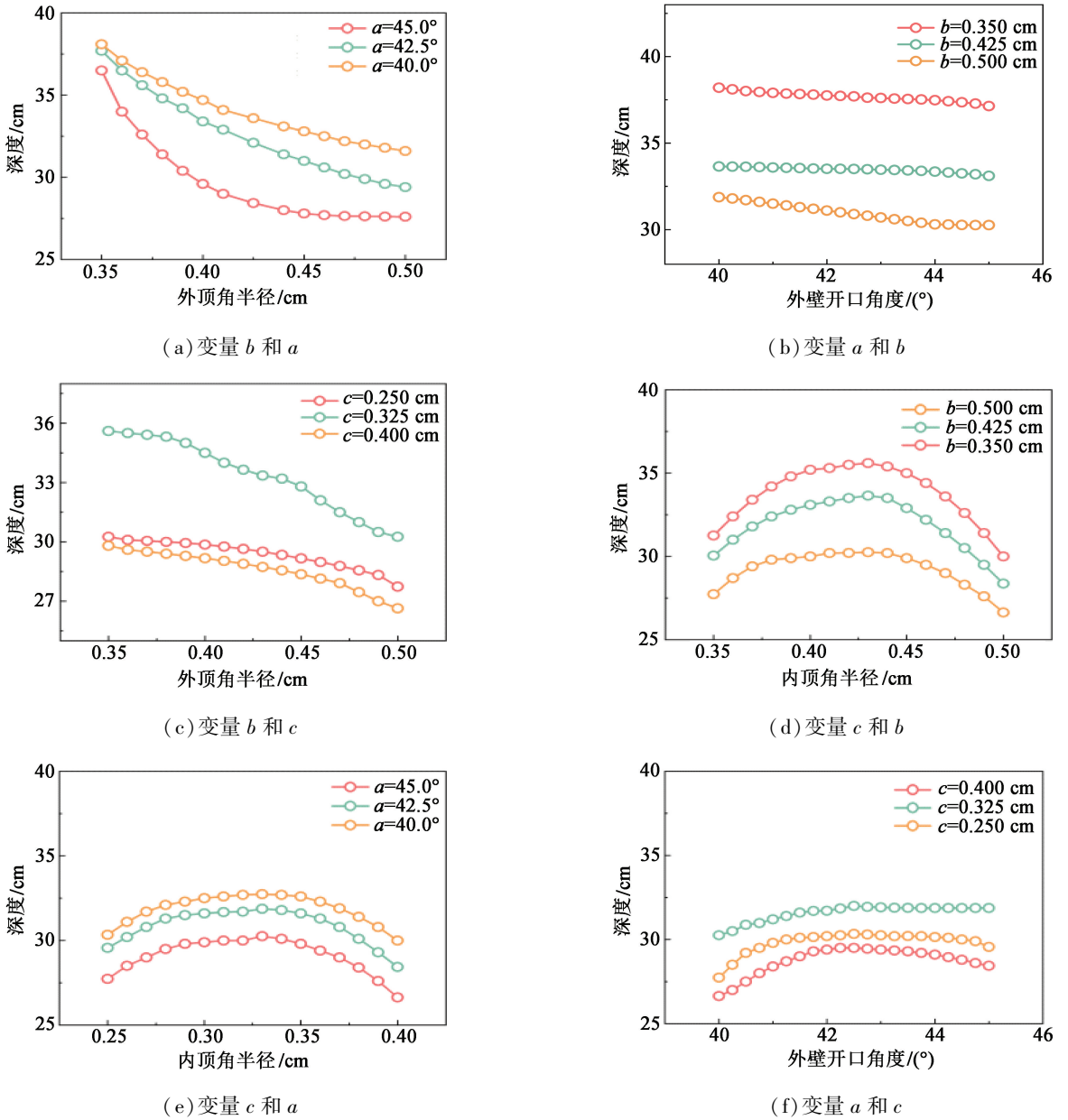


图 4 双变量对穿透深度的影响

Fig. 4 Effect of bivariate on penetration depth

压力和围压。在地面以模拟储层环境进行射孔试验,在井筒压力空间放置单元枪射孔器,在围压空间放置近似储层的试验靶。在试验靶外部施加围压,靶的底部施加孔隙压力,射孔弹的发射方向与砂岩靶的轴线平行。

试验装置结构示意图如图 8 所示。

试验目标靶及装置实物图如图 9 所示。试验结果如图 10 所示。

仿真结果及试验结果对比如图 11 所示。分析图 11 可知,药型罩优化后的侵彻效果得到提高。仿真计算中侵彻深度提高了 28.97%;试验测试中侵彻深度提高了 20.60%。说明基于 LS-DYNA 数值

模拟和多目标遗传算法可指导射孔弹的设计。

4 结论

基于 LS-DYNA 数值模拟和多目标遗传算法,对特定砂岩条件下的射孔弹结构进行了优化设计,得出以下结论:

1) 在工艺范围内,内壁开口角度 d 在工艺范围内对射孔弹侵彻性能的影响较为平缓,而外壁开口角度 a 、外顶角半径 b 和内顶角半径 c 对射孔弹的侵彻性能影响较为显著。

2) 采用响应曲面法建立了侵彻深度与 a 、 b 及 c

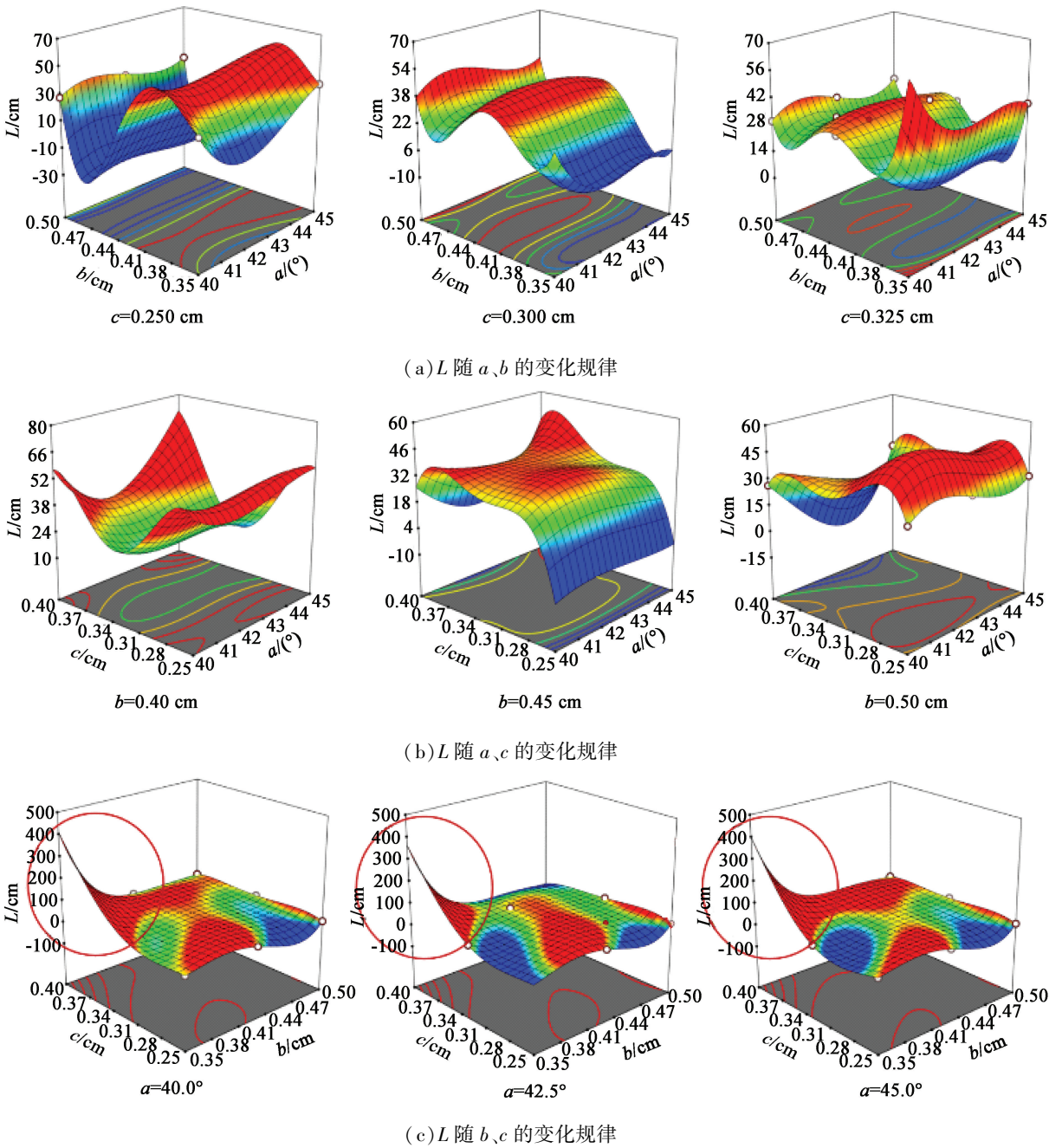


图 5 射孔深度随变量的变化规律

Fig. 5 Variation law of perforation depth with variables

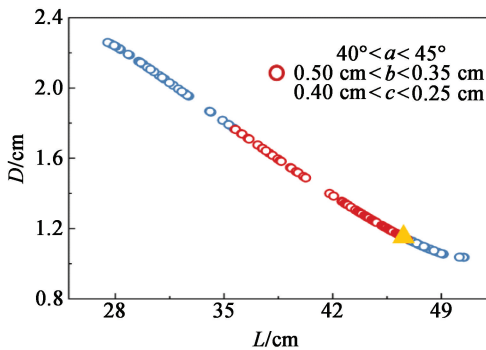


图 6 优化后侵彻效果

Fig. 6 Optimized penetration outcomes

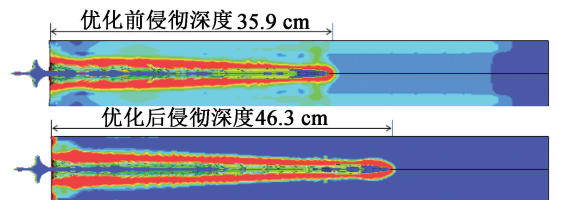


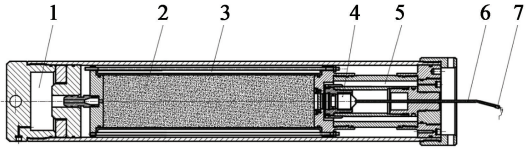
图 7 优化前、后侵彻效果对比

Fig. 7 Comparison of penetration outcomes before and after optimization

表 8 药型罩优化前、后参数

Tab. 8 Parameters before and after optimization of the shaped charge liner

参数	$a/(^\circ)$	b/cm	c/cm	$d/(^\circ)$
优化前(变量 1 [#])	40	0.500	0.250	40.0
优化后(变量 2 [#])	40	0.384	0.281	38.7



1 - 孔隙压力腔室; 2 - 砂岩靶; 3 - 地层围压腔室;
4 - 射孔弹, 5 - 井筒压力腔室; 6 - 导爆索; 7 - 磁电雷管。

图 8 试验装置结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of structure of the experimental device



(a) 真空饱和装置

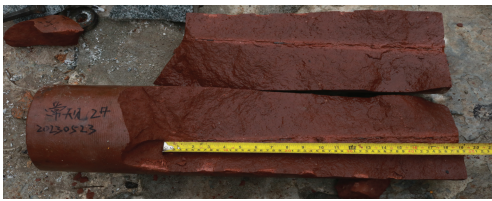
(b) 三腔压力模拟地层侵入装置

图 9 试验目标靶及装置实物图

Fig. 9 Experimental target and device



(a) 变量 1[#]



(b) 变量 2[#]

图 10 优化前、后试验测试结果

Fig. 10 Test results before and after optimization

的显式表达式。

3) 针对 46 mm 口径的射孔弹, 药型罩的优化结构参数为: $a = 40^\circ$ 、 $b = 0.3837 \text{ cm}$ 、 $c = 0.2813 \text{ cm}$; 最优解对应的 $d = 38.7^\circ$ 。

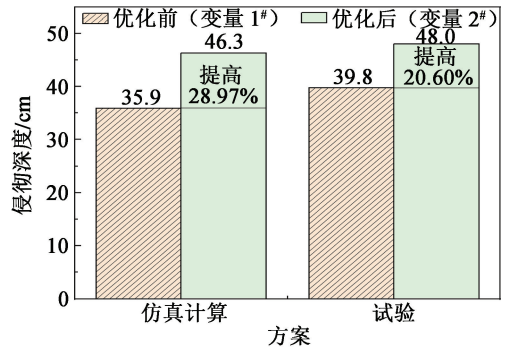


图 11 仿真计算与试验结果对比

Fig. 11 Comparison between simulation results and test results

4) 优化后的仿真测试结果表明, 侵彻性能提升 28.97%; 试验测试中, 侵彻性能提升了 20.60%。可为射孔弹的设计提供参考。

参考文献

[1] 吴焕龙, 唐凯, 彭科普, 等. 聚能射孔弹侵彻应力砂岩穿深预测[J]. 钻采工艺, 2020, 43(2): 135-138.

[2] 徐浩, 李明飞, 窦益华. 靶板强度对射孔弹穿深影响的有限元仿真[J]. 机电工程技术, 2021, 50(4): 105-109.

XU H, LI M F, DOU Y H. Finite element simulation of influence of target strength on penetration of perforating projectile [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2021, 50(4): 105-109.

[3] 李东传, 孙新波, 郭金荣, 等. 聚能射孔弹在不同砂岩上的射孔效果研究[J]. 断块油气田, 2007(1): 64-66, 93.

LI D C, SUN X B, GUO J R, et al. Study on perforation effectiveness of shaped charges on different sandstones [J]. Fault Block Oil and Gas Field, 2007(1): 64-66, 93.

[4] 姚劲松. 射孔作业对其周围岩石损伤规律数值模拟研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019.

YAO J S. Numerical simulation study on the damage law of surrounding rocks caused by perforation [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2019.

[5] 朱秀星, 张林, 薛世峰, 等. 砂岩储层射孔压实伤害评价[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(1): 137-142.

ZHU X X, ZHANG L, XUE S F, et al. Evaluation of perforation damage for sandstone [J]. Journal of China University of Petroleum, 2014, 38(1): 137-142.

[6] 陈书豪, 陈志德, 林立明, 等. 模拟致密油藏条件下复合射孔系统的试验评价[J]. 油气井测试, 2024,

- 33(5): 21-27.
- CHEN S H, CHEN Z D, LIN L M, et al. Experimental evaluation of a combined perforation system under simulated tight reservoir conditions [J]. Oil and Gas Well Testing, 2024, 33(5): 21-27.
- [7] 李优, 阮光光, 赵海平, 等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟计算对弧锥结合药型罩的优化设计 [J]. 火炸药学报, 2024, 47(10): 931-936.
- LI Y, RUAN G G, ZHAO H P, et al. Optimization of arc-cone liner based on ANSYS/LS-DYNA numerical simulations [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2024, 47(10): 931-936.
- [8] 陈浩, 祖旭东, 黄正祥. 基于 BP 神经网络和遗传算法的环形药型罩优化 [J]. 弹道学报, 2022, 34(4): 1-7.
- CHEN H, ZU X D, HUANG Z X. Optimization of annular liner based on BP neural network and genetic algorithm [J]. Journal of Ballistics, 2022, 34(4): 1-7.
- [9] 孙贺, 焦志刚, 梁德刚, 等. 基于正交设计的双层药型罩多参数结构优化 [J]. 沈阳理工大学学报, 2020, 39(6): 82-87.
- SUN H, JIAO Z G, LIANG D G, et al. Multi-parameter structure optimization of double-layer liners cover based on orthogonal design [J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2020, 39(6): 82-87.
- [10] 何卓朗, 王志军, 郝志伟. 基于正交设计的柱锥结合药型罩多参数结构优化 [J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(2): 70-75.
- HE Z L, WANG Z J, HAO Z W. Multi parameter structural optimization of cylindrical cone liner based on orthogonal design [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2024, 45(2): 70-75.
- [11] ROLC S, BUCHAR J, AKSTEIN Z, et al. Numerical and experimental study of the defeating the RPG-7 [C]//24th International Symposium of Ballistics. New Orleans, LA, US, 2008.
- [12] 陈刚, 陈小伟, 陈忠富, 等. 当 A3 钢钝头弹撞击 45 钢板破坏模式的数值分析 [J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(5): 390-397.
- CHEN G, CHEN X W, CHEN Z F, et al. Simulations of A3 steel blunt projectiles impacting 45 steel plates [J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(5): 390-397.
- [13] MARRS F, HEIGES M. Soil modeling for mine blast simulation [C]//13th International LS-DYNA Users Conference. Detroit, MI, US, 2014.
- [14] LEE S G, BAEK Y H, LEE I H, et al. Numerical simulation of 2D sloshing by using ALE2D technique of LS-DYNA and CCUP methods [C]//Proceedings of The Twentieth (2010) International Offshore and Polar Engineering Conference. Beijing, 2010.
- [15] 李洪超. 岩石 RHT 模型理论及主要参数确定方法研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.
- LI H C. The study of the rock RHT model and to determine the values of main parameters [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2016.
- [16] 王晶. 基于响应曲面法的多响应稳健性参数优化方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2009.
- WANG J. Robust parameter optimization for multi-response using response surface methodology [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.

版 权 声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部