

新型超深穿透射孔弹

乔亚波¹, 于秋来², 贺建磊¹, 石前¹, 张百燕³, 王佩³

- 1. 大庆油田射孔器材有限公司 黑龙江大庆 163853
- 2. 中国石油大庆油田有限责任公司试油试采分公司 黑龙江大庆 163412
- 3. 中国石油华北油田分公司第四采油厂 河北廊坊 065007

通讯作者: Email: qiaoyabo@cnpc.com.cn

引用: 乔亚波, 于秋来, 贺建磊, 等. 新型超深穿透射孔弹 [J]. 油气井测试, 2021, 30(4): 62-66.

Cite: QIAO Yabo, YU Qiulai, HE Jianlei, et al. A new type of ultra-deep penetrating perforating charge [J]. Well Testing, 2021, 30(4): 62-66.

摘要 为提升射流质量, 增加射孔穿深性能, 根据射流侵彻基本理论, 从射流微元形态对侵彻性能影响分析入手, 通过对新型装药结构、药型罩结构设计及药型罩配方的研究, 大幅提升了炸药利用率, 增加了炸药能量对药型罩的有效作用时间; 通过对壳体结构的调整, 提高与药型罩参数的匹配度, 提高了射流质量, 使 102 型射孔器混凝土靶平均穿深提高 27%。在大庆油田某区块 5 口生产井试验应用, 平均采液强度比相邻常规射孔弹射孔的井平均采液强度提高显著。新型超深穿透射孔弹的研制可以提高油田采收率, 为油田低渗透储层高效开采提供射孔弹新产品和新技术的支持。

关键词 射孔弹; 超深穿透; 射流; 穿孔深度; 药型罩; 壳体

中图分类号: TE353 文献标识码: B DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2021.04.011

A new type of ultra-deep penetrating perforating charge

QIAO Yabo¹, YU Qiulai², HE Jianlei¹, SHI Qian¹, ZHANG Baiyan³, WANG Pei³

- 1. Perforating Equipment Co., Ltd., PetroChina Daqing Oilfield, Daqing, Heilongjiang 163853, China
- 2. Well Testing & Perforation Company, PetroChina Daqing Oilfield Company Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163412, China
- 3. No. 4 Oil Production Plant, PetroChina Huabei Oilfield Company, Langfang, Hebei 065007, China

Abstract: In order to improve the jet quality and increase the perforation penetration performance, according to the basic theory of jet penetration, this paper optimizes the new charging structure, liner structure design and liner formula after the analysis of the impact of jet micro element shape on the penetration performance, and greatly improves the explosive utilization rate and increases the effective action time of explosive energy on the liner. In addition, by adjusting the shell structure, the matching degree with the liner parameters is improved, the jet quality is improved, and the average penetration depth of 102 perforator in concrete target is increased by 27%. This new perforating charge has been applied to 5 production wells in a block of Daqing Oilfield, and the average liquid production intensity is significantly higher than that of the adjacent wells perforated by conventional perforating charges. The development of new ultra-deep penetrating perforating charges can improve oil recovery and provide support of new products and new technologies for efficient exploitation of low permeability reservoirs.

Keywords: perforating charge; ultra-deep penetration; jet; perforation depth; liner; shell

随着油田勘探开发进入中后期, 油气开发难度不断加大, 中低渗透层、致密砂岩层在油气储层中占较大比例。射孔技术人员针对上述储层有关射孔工艺及射孔器材等问题, 进行了大量研究^[1-2]。如动态负压射孔研究^[3], 复合射孔技术研究^[4-6], 三射流射孔技术和定射角、定面射孔技术^[7-8]等。在提高射孔弹性能方面, 李东传等^[9]开展了聚能射孔器同孔重复射孔作用效果试验研究, 得出了三次重复射孔对穿孔性能的影响程度。但存在射孔施工

工艺复杂的问题。常一超等^[10]开展了具有前驱罩石油射孔弹研究, 提出了前驱药型罩和主药型罩相结合的新思路。但是, 给加工工艺带来了一定难度。本文主要针对油田应用较多的孔密为 16 孔/m 的 102 枪, 开展了对应的射孔弹提高穿深性能的研究。

1 方案设计

由于受射孔枪内装弹空间制约和出于对射孔

施工过程中安全因素的考虑,射孔弹的外形尺寸和装药量的可变性很小。为此,设计的出发点主要就是通过进一步挖掘炸药的能量利用率,提升射流质量,增加射孔穿深性能。

1.1 新型射孔弹壳体设计

壳体对射流形态的影响主要是通过壳体对爆轰波形的影响而产生的。柴艳军等^[11]分析了壳体壁厚线性变化对聚能射流形成的影响。刘晓蕾等^[12]分析了壳体厚度及壳体材料对射流头部速度及射流总能量的影响。得出通过改变壳体壁厚和材质可以达到对爆轰能量束缚能力提高的效果,在此基础上,笔者及研究人员进一步细致地研究了壳体材料性能及尺寸参数对射孔弹穿深的影响。一方面,通过优选力学性能更优的壳体材质,增加对炸药的束缚能力;另一方面,通过改变装药结构设计,提高射孔弹的射流头部速度和射流质量。设计开口尺寸为 45 mm,主要外形尺寸与常规产品保持一致,药量在 40 g 以下,性能的提升以提高炸药的利用率为主要目标,增加了壳体顶部的厚度,提高了顶部装药的利用率,从而提高了整体射流的头部速度。如图 1 所示为试验过程中使用的装药结构。

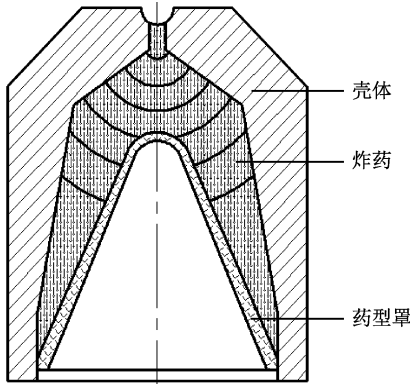


图 1 装药腔体结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of charging chamber structure

下面进行有限元计算与分析。

1.1.1 几何模型的建立

采用 AUTODYN 的二维计算。因此,在 CATIA 软件中,建立二维几何模型即可。

1.1.2 建立动力学模型

使用 ANSYSWORKBENCH 功能,将射孔弹的二维模型导入到 ANSYS 软件中,建立显示动力学分析模型。在显示动力学模块内,使用网格划分工具,对几何模型划分网格。

1.1.3 建立 AUTODYN 计算模型

通过 ANSYSWORKBENCH 功能,可以直接把划

分网格后的模型导入到 AUTODYN 中。在 AUTODYN 中,导入材料库中的材料,使用的材料有空气、壳体、铜、炸药。还需要利用软件的简单建模功能,建立空气模型。图 2 为通过射孔弹优化设计软件计算的两种装药结构的头部速度折线图。

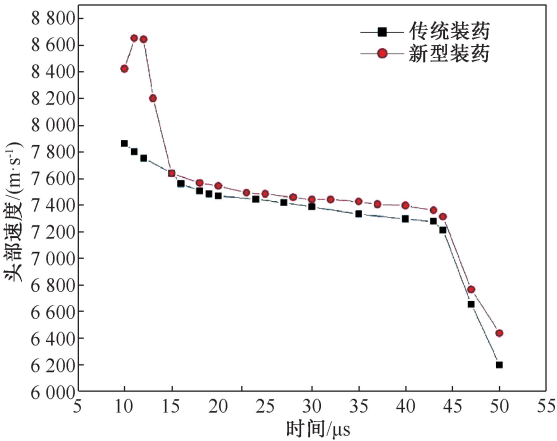


图 2 传统装药与新型装药软件计算头部速度折线图
Fig. 2 Line diagram of head speed calculated by traditional charging and new charging software

从图 2 速度分布中可以看出,传统装药结构与新型装药结构整个射流速度大部分都很相近,但在 10~15 μs 过程中,头部速度差别较大,传统装药最大头部速度为 7 865 m/s,时间在第 10 μs,随后速度逐渐降低;新型装药最大头部速度为 8 653 m/s,时间在第 11 μs,头部速度是先增大再降低的变化趋势,新型装药结构初始头部速度具有优势。

从图 3 和图 4 两种装药结构的射流形态图的对比中也可以看出,新型装药结构射孔弹延迟了射流从出现颈缩到断裂的时间,减少了杵体质量,增加了头部射流的有效质量,提高了射流的穿透性能。射流连续性也明显优于传统射孔弹射流。

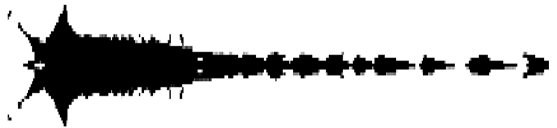


图 3 传统装药结构模拟射流形态
Fig. 3 Simulation of jet shape for the traditional charge

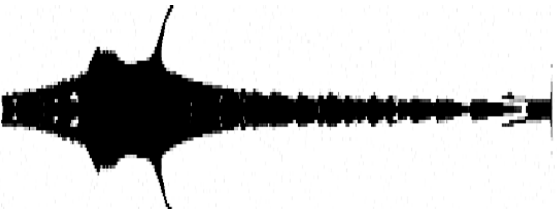


图 4 新型装药结构模拟射流形态
Fig. 4 Simulation of jet shape for the new charge

1.2 新型药型罩设计

聚能药型罩是射孔弹的核心部分,是形成金属射流的母体,其结构将直接影响金属射流的形态及有关参数,这些又与穿孔效果有直接关系。郁锐等^[13]研究了药型罩壁厚变化率对破甲威力影响。汪亮等^[14]研究了药型罩预加热对聚能射流的影响。高永宏等^[15]分析了粉末药型罩的材料密度和粉末药型罩孔隙度对聚能射流性能的影响。王凤英等^[16]提出了一种新型“M”形顶部结构药型罩的设计,得出了提高药型罩的密度和射流头部速度与提高穿孔性能的关系。在设计时,研究人员主要应确定药型罩几何形状、锥角、壁厚,以及合适的材料和加工成型工艺。其中等壁厚单锥药型罩为传统的药型罩设计方法,其特点是射流拉伸均匀,梯度变化合理,易于批量生产,且射孔弹穿深性能比较稳定;变壁厚单锥型药型罩的特点是射流梯度比较大,在装药结构合理的条件下,穿深性能比等壁厚单锥药型罩高。目前,国内外超深穿透射孔弹多采用多锥药型罩设计技术,它的主要优点是:药型罩母线增长,射流长度长,穿靶深度增加;药型罩的多锥变化,增加了射流速度梯度,使得射流得到有效拉伸而不断裂。通过模拟计算及现场打靶数据对比,找出了壁厚变化对射流头部速度、速度梯度及射流连续性的匹配关系。通过设计将罩顶到罩底的厚度逐渐加厚,使药型罩被压垮过程中,收缩更加均匀。射孔弹的穿靶深度与射流的有效长度成正比,而药型罩母线长度是影响射流的有效长度最关键因素。因此,如何在保证形成高速射流的情况下,增加射流的有效长度,是提高混凝土靶穿深的关键,通过结构设计实现合理的速度梯度分布,尤其是射孔穿深超过1 100 mm以上时,对药型罩的结构要求更为突出。根据准定常理想不可压缩流体动力学理论,金属射流的侵彻深度可用下式表示^[17],即

$$H = (\nu_j - \nu_s)t_p(\rho_j/\rho_s)^{1/2}$$

式中: H 为射流的破甲深度,m; ν_j 为射流头部速度,m/s; ν_s 为射流尾部速度,m/s; t_p 为射流断裂前持续时间,s; ρ_j 为药型罩材料密度,g/cm³; ρ_s 为目标靶材料密度,g/cm³。

通过侵彻穿深公式可以得出,靶体密度属于客观条件无法改变,只有通过能够改变的参数来增加侵彻穿深数值。一方面通过提高药型罩密度来提高射流密度;另一方面,通过调整药型罩结构和装药结构使射流速度梯度的分布更加合理,并调整药型罩粉材配方组成,通过完善高低熔点的金属粉材组成种类及比例,实现射流形态的连续性。新型超

深穿透射孔弹结构经过理论创新设计后,模拟计算各项指标与常规同类型射孔弹相比均有较大提高,其中药型罩总能量提高了27%左右,如图5所示。

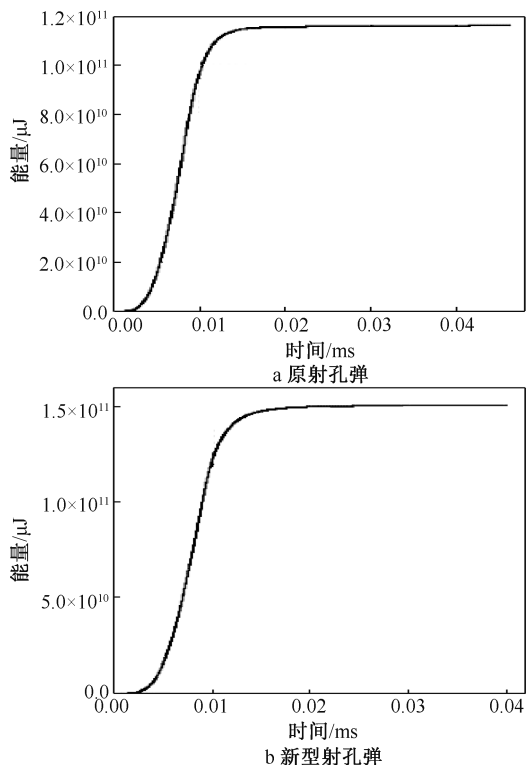


图5 射孔弹药型罩总能量曲线

Fig. 5 Total energy curve of perforating ammunition liner

1.3 压药工艺研究

通过工艺研究,提高炸药的密度和装药的密度均匀性是关键。射孔弹压药密度可以通过以下工艺参数描述,即

$$\rho = f(p, k, t, n, \rho_0)$$

式中: p 为输出压力,MPa; k 为压力上升率; t 为保压时间,s; n 为加压次数; ρ_0 为炸药散装密度,g/cm³。

要建立压药过程的具体解析表达是很困难的。但是,通过研究和实践可以得出,压药压力、加压速度、保压时间、加压次数等工艺参数是影响炸药成型密度的关键因素。压药压力进行调整测试,寻求预压-合压相结合的最佳压力组合,压力太大,会对药型罩造成微伤害,压力过小会影响炸药的压实密度,经分析和实验确定出预压和带罩压制两种压力的组合方案。

2 试验过程及结果

在设计参数确定及计算机模拟计算后,进行了模具及壳体的加工,对加工后的方案进行地面基础

试验,将实际打靶效果较好的射孔弹再进行装枪试验,如果与预期效果差距较大,则重新设计方案,如果差距不大,则进行罩重、药量等微调。首先,进行了新型壳体筛选,确定 4 种试验方案,进行打靶试验 14 次,最终优选出的壳体提高了对炸药的束缚能力,经调整后平均穿深较原产品提高 5.6%,见表 1。

表 1 壳体改进后试验结果

Table 1 Test results of improved shell

壳体类型	平均穿深/mm	提高/%
原壳体	1 308	5.6
新壳体	1 381	

在新壳体的基础上,设计了 12 种新型药型罩筛选试验方案,进行打靶试验 36 次,在结构设计上匹配了高密度药型罩的特性,在配方上摸索出材料性能与压制成型之间的平衡点,经调整后平均穿深在首轮方案的基础上提高 12.6%,见表 2。

表 2 药型罩改进后试验结果

Table 2 Test results of improved ammunition liner

药型罩类型	平均穿深/mm	提高/%
原药型罩	1 381	12.6
新药型罩	1 555	

最后又进行了压药工艺方案试验,为提高压药

成型质量,设计和试验了 6 种压力组合,进行打靶试验 8 次。经调整后在二轮方案的基础上平均穿深提高 7%,见表 3。

表 3 压药工艺改进后试验结果

Table 3 Test results of improved pressing process

压药工艺	平均穿深/mm	提高/%
原工艺	1 555	7.0
新工艺	1 664	

通过对射孔弹装药结构、药型罩结构的整体设计及壳体材质、药型罩配方的深入研究,大幅提高了射孔弹各参数的匹配度,实现了射流初始头部速度的较大提高。该速度为射流梯度的提高、射流长度的增加提供了保障,同时对压罩及压药工艺进行适应性调整,达到了高密度药型罩生产的可行性,最终新型射孔弹穿深与原来最好水平相比由 1 308 mm 提高到 1 664 mm,提高了 27%。

3 现场应用

通过现场应用显示无论在油田老区还是在外围难采区域都取得了显著的产能提升效果。以某区块的 5 口生产井试验应用情况为例加以说明。具体地层情况及投产数据见表 4。

表 4 喇区相邻井位投产数据对比

Table 4 Comparison of production data of adjacent wells in La area

射孔工艺	井号	层位	有效厚度/m	投产日期	日产液*/ (m ³ ·d ⁻¹)		日产油*/ (t·d ⁻¹)		采液强度*/ (m ³ ·(d·m) ⁻¹)		采油强度*/ (t·(d·m) ⁻¹)	
SDP45HM X-1 常规 射孔	喇 9-PS1803	SⅡ 12-14 至 SⅢ 3 ³	9.1	2019.10.20	48.05	53.08	0.53	0.32	5.28	5.91	0.058	0.04
	喇 9-PS1731	SⅡ 12-16 下至 SⅢ 3 ⁵	9.3	2019.09.19	47.04	46.32	0.42	1.11	5.06	4.98	0.045	0.12
	喇 8-PS1721	SⅡ 12-14 至 SⅢ 3 ⁴ 上	9.9	2019.10.20	47.04	48.57	1.18	0.34	4.75	4.91	0.119	0.03
	喇 9-PS1733	SⅡ 12-16 至 SⅢ 3 ²	11.2	2019.09.28	41.03	40.00	0.57	1.76	3.66	3.57	0.051	0.16
	喇 7-斜 PS1721	SⅡ 12-14 至 SⅢ 3	9.50	2019.12.18	/	37.00	0.57	0.96	3.66	3.89	0.051	0.10
DP44RD X-5 常规 射孔	喇 9-PS1703	SⅡ 13+14 至 SⅢ 3 ³	8.8	2019.09.12	37.28	32.09	0.30	0.22	4.24	3.65	0.034	0.03
	喇 9-PS1811	SⅡ 13+14 ¹ 至 SⅢ 3 ¹	11.3	2019.09.21	40.11	37.13	0.36	0.67	3.55	3.29	0.032	0.06

* 前一列数据为 2019 年 11 月统计结果;后一列数据为 2020 年 4 月统计结果。

该区块 5 口井的平均有效厚度为 9.88 m,平均渗透率在 400 mD 左右,为中渗地层,地层压力 15~20 MPa,以 SⅡ 12-16 油层为主要目的层,采用常规射孔完井方式。在投产初期收集该区块的投产数据,其中 5 口试验井平均采液强度为 4.69 m³/(d·m),相邻常规射孔弹射孔井的平均采液强度为 3.89 m³/(d·m),平均采液强度提高了 20.6%。在投产五个月后,第二次收集该区块的投产数据。其中 5 口试验井平均采液强度为 4.65 m³/(d·m),相邻常规射孔弹射孔井平均采液强度为 3.47 m³/(d·m),平均采液强度提高了 34.0%。

4 结论

- (1)在装枪空间和炸药装药量受限的条件下,提高炸药利用率,增加炸药能量对药型罩的有效作用时间是提高射孔弹性能的有效途径。
- (2)新型超深穿透射孔弹的研制可以提高油田采收率,为油田低渗透储层高效开采提供射孔弹新产品和新技术的支持。
- (3)聚能装药的大部分能量消耗在破坏壳体、膨胀枪身和损坏套管上,而没有对射流的形成起到积极作用,所以进一步挖掘炸药推动射流的潜力仍

有很大空间。

致谢:感谢大庆油田射孔器材有限公司同意本文公开发表。

参考文献

- [1] 李作平,孙宪宏,谢阳平,等. 三级装药多级复合射孔技术研究[J]. 测井技术,2014,38(1):120-123.
LI Zuoping, SUN Xianhong, XIE Yangping, et al. Research on composite perforation technology with three-stage gunpowder charge [J]. Well Logging Technology, 2014, 38 (1):120-123.
- [2] 张为雨,金冶,李东传. 复合射孔器爆炸冲击载荷的数学模型分析[J]. 油气井测试,2017,26(2):6-8,12.
ZHANG Weiyu, JIN Ye, LI Dongchuan. Analyzing the mathematical model of explosive impact load of composite perforating device [J]. Well Testing, 2017, 26 (2): 6-8,12.
- [3] 刘方玉,刘桥,蔡山. 动态负压射孔技术研究[J]. 测井技术,2010,34(2):193-195.
LIU Fangyu, LIU Qiao, CAI Shan. Dynamic under-balanced pressure perforating technology and its application [J]. Well Logging Technology, 2010,34(2):193-195.
- [4] 马英文,付团辉,吴泽林,等. 渤中34-2/4油田外置式复合射孔技术[J]. 油气井测试,2018,27(1):31-36.
MA Yingwen, FU Tuanhui, WU Zelin, et al. External composite perforation technology in the Bozhong Oilfield [J]. Well Testing, 2018,27(1):31-36.
- [5] 孙新波,刘辉,王宝兴,等. 复合射孔技术综述[J]. 爆破器材,2007,36(5):29-32.
SUN Xinbo, LIU Hui, WANG Baoxing, et al. Review of propellant perforation techniques [J]. Explosive Materials, 2007,36(5):29-32.
- [6] 章桂庭. 几种复合射孔器的原理差异与安全性分析[J]. 油气井测试,2009,18(4):59-61.
ZHANG Guiting. Analysis of different principles and safety of some composite perforators [J]. Well Testing, 2009,18 (4):59-61.
- [7] 于开勋. 三射流射孔技术[J]. 油气井测试,2016,25(6):70-72.
YU Kaixun. Triple jet perforating technology [J]. Well Testing, 2016,25(6):70-72.
- [8] 刘奉银,段鹏辉,苏良银,等. 定面射孔水力压裂影响因素研究[J]. 电网与清洁能源,2017,33(8):71-76.
LIU Fengyin, DUAN Penghui, SU Liangyin, et al. Research on the fixed surface perforating hydro-fracture [J]. Power System and Clean Energy, 2017,33(8):71-76.
- [9] 李东传,曹振斌. 聚能射孔器同孔重复射孔作用效果试验研究[J]. 油气井测试,2019,28(2):40-44.
LI Dongchuan, CAO Zhenbin. Test on effect of repetitive perforation of jet perforator with the same hole [J]. Well Testing, 2019,28(2):40-44.
- [10] 常一超,刘恩良. 具有前驱罩石油射孔弹研究[J]. 工程爆破,2014,20(2):14-16.
CHANG Yichao, LIU Enliang. Experimental study of petroleum perforation bullet with precursor liner [J]. Engineering Blasting, 2014,20(2):14-16.
- [11] 柴艳军,李如江,岳继伟,等. 壳体壁厚线性变化对聚能射流形成的影响[J]. 科技通报,2017,33(9):12-14.
CHAI Yanjun, LI Rujiang, YUE Jiwei, et al. The effect of varying linearly wall thickness cases on the formation of shaped charge jet [J]. Bulletin of Science and Technology, 2017,33(9):12-14.
- [12] 刘晓蕾,曹红松,张会锁,等. 弹丸壳体性能对聚能射流影响的数值模拟[J]. 弹箭与制导学报,2009,29(2):136-139.
LIU Xiaolei, CAO Hongsong, ZHANG Huisuo, et al. Numerical simulation on the effect of shaped charge jet with different performance of projectile shell [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009,29 (2):136-139.
- [13] 郁锐,李福金,薛鑫莹,等. 药型罩壁厚变化率对破甲威力影响的研究[J]. 弹箭与制导学报,2010,30(1):134-136.
YU Rui, LI Fujin, XUE Xinying, et al. Study on the influence of rate of liner thickness change on the penetration [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010,30(1):134-136.
- [14] 汪亮,王凤英,黄昊,等. 药型罩预加热对聚能射流侵彻能力的影响[J]. 兵器材料科学与工程,2013,36(2):85-87.
WANG Liang, WANG Fengying, HUANG Hao, et al. Effect of preheating liners on penetration capability of shaped charge jets [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2013,36(2):85-87.
- [15] 高永宏,王凤英,李如江. 粉末药型罩孔隙度对聚能射流侵彻性能的影响[J]. 铸造技术,2013,34(6):689-691.
GAO Yonghong, WANG Fengying, LI Rujiang. Effect of porosity of powder liner on penetration of shaped charge jet [J]. Foundry Technology, 2013,34(6):689-691.
- [16] 王凤英,阮光光,刘天生,等. 一种新型-形顶部结构药型罩的设计及形成射流的侵彻能力分析[J]. 火炸药学报,2017,40(4):76-80.
WANG Fengying, RUAN Guangguang, LIU Tiansheng, et al. Design of a new M-shaped top structure liner and analysis of penetration ability of its jet formation [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2017,40(4):76-80.
- [17] 陆大卫. 油气井射孔技术[M]. 北京:石油工业出版社,2012:37.

编辑 王军

第一作者简介:乔亚波,男,1985年出生,硕士研究生,工程师,2011年毕业于青岛科技大学机械专业,现从事射孔器研发与制造工作。电话:0459-4699069,18246786002;Email:qiaoyabo@cnpc.com.cn。通信地址:黑龙江省大庆市红岗区大庆油田射孔器材有限公司,邮政编码:163853。