

聚能射孔器同孔重复射孔作用效果试验研究

李东传,曹振斌

石油工业油气田射孔器材质量监督检验中心 黑龙江大庆 163853

通讯作者:Email:dqlidongchuan@petrochina.com.cn

引用: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.

Cite: 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.

摘要 现有技术条件下很难在砂岩靶上大幅提高聚能射孔深度,基于砂岩比水对射流影响更大的实际,模拟井下条件,开展了三次重复射孔试验。按 GB/20488-2006 要求干燥、饱和砂岩并固结在钢壳内,将 DP44RDX38-3 型聚能射孔弹放置在砂岩靶上射孔,然后将孔道内注满清水,对准孔道重复射孔。在 40 mm 炸高条件下,初次射孔深度为 384~394 mm,二次重复射孔后穿孔深度增加 28%~46%,孔容增加 220%~367%;在模拟外径 102 mm 射孔器、139.7 mm 套管居中条件下,做砂岩靶试验,初次射孔深度 452~534 mm,重复射孔穿孔深度增加 8%~11%,孔容增加 176%~185%。试验表明,同孔重复射孔能够提高穿孔深度和孔容,用铅柱模拟水泥环后穿孔深度增加明显,但重复射孔增加幅度相对减少。该试验为提高聚能射孔弹的射孔性能做了有益探索,有望应用于生产实际。

关键词 射孔;聚能射孔器;同孔重复射孔;穿孔深度;孔容;试验

中图分类号:TE257 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2019.02.007

Test on effect of repetitive perforation of jet perforator with the same hole

LI Dongchuan, CAO Zhenbin

Petroleum Industry Perforator Inspection Center, PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163853, China

Abstract: It is difficult to significantly increase the depth of the jet perforation on sandstone targets under the existing conditions. Since sandstone has a greater influence on jet than water, three repeated perforation tests were carried out under the condition of simulating downhole conditions. According to the requirements of national standard GB/20488-2006, the sandstone was dried and saturated, and then consolidated in the steel shell. Then the DP44RDX38-3 jet perforating projectile was placed on the sandstone target for perforating. After that, fill the water and repeat the perforation in this hole. Under the condition of 40 mm blasting height, the initial perforation depth was 384~394 mm, the perforation depth after the second repeated perforation increased by 28% to 46%, and the pore volume increased by 220%~367%. In the simulation of a perforator with an outer diameter of 102 mm and a centered casing with diameter of 139.7 mm, the sandstone target test was performed. The initial perforation depth was 452~534 mm, the depth of repeated perforation increased by 8%~11%, and the pore volume increased by 176%~185%. The test showed that repeated perforation of the same hole can increase the depth of perforation and pore volume. When the cement column was simulated by aluminum column, the depth of perforation increased obviously, but the increase of repeated perforation was relatively reduced. This test has made a useful exploration to improve the perforating performance of jet perforating bullets, and it is expected to be applied to actual production.

Keywords: perforation; jet perforator; repeated perforation for the same hole; perforation depth; pore volume; test

射孔孔道的深度是影响产量最重要的因素之一^[1-2],穿透射孔污染带是射孔的最基本要求。近年来,国内部分聚能射孔器的穿孔性能接近或已达到国外同类产品水平^[3],但将聚能射孔器在混凝土靶上的穿孔深度转换到井下穿深时会大幅度下降^[4-5]。在 215.9 mm 的钻井井径中下外径 139.7 mm 套管,水泥环厚度为 38 mm 左右,钻井污染带一般厚 100~300 mm,在某些条件下超过 500 mm^[6],可见部

分射孔并未穿透钻井污染带。受井下空间、产品能力的限制,射孔孔道的直径、深度不能满足油田勘探、开发的需求,致使后续的压裂等改造措施的费用较高。如水力压裂等措施虽然能够大规模的改造井筒周围的渗流状态,但成本较高,一般小型水力压裂需要 50 万元左右;而国内长 1 m、外径 102 mm 聚能射孔器(内装 DP44RDX38-3 型聚能射孔弹)一次电缆输送下井(目的层深度 1 000 m 左右)射孔的费

用仅为 0.6 万元左右。国内外的工程技术人员先后尝试利用负压射孔^[7]、复合射孔^[8-9]、动态负压射孔^[10]、子弹式同孔射孔^[11-12]、三射流射孔^[13]等技术,期望较低成本下获得更好的完井效果。这些技术均是在现场有射孔器材产品的基础上通过改善射孔孔道周围导流能力提高射孔效果。

马英文等^[14]在渤中 34-2/4 油田低孔低渗储层采用了外置式复合射孔技术进行补孔增产作业。罗宏伟等^[15]研制超深穿透射孔器、程维恒等^[16]研制大孔超深穿透射孔器,用提高穿孔深度的方法改善射孔施工效果。Dhahran^[17]用聚能射孔弹在同一位置多次重复射孔的方法提高穿孔深度,增强储层的水力压裂,增加天然气产量,但是没有给出能够提高穿孔深度的幅度。廖莎莎等^[18]采用电子探针方法测量射流在水中的速度衰减,得出了相同结构的铜钨药型罩产生的聚能射流对后效钢板的侵彻孔深比紫铜射流高 29% 以上。郭刘伟等^[19]针对三种不同药型罩形成的射流在水中的侵彻行为问题,采用电铜箔测速法和高速摄影法,得出了聚能射流的速度衰减率受药型罩的构型影响大、受材料的影响较小,但是实验中的水直径远远大于 10 mm 左右的射孔孔径。史进伟等^[20]针对聚能射流侵彻水夹层间隔靶影响问题,采用脉冲 X 光和计时仪测量多个侵彻阶段的射流头部速度,得出了射流在钢板(Steel Plate)中侵彻速度衰减率大于水中的衰减率;高泓超等^[21]针对间隔靶与靶之间对射流侵彻的影响问题,利用实验对水介质间隔靶影响射流侵彻能力的程度进行研究,得出了水介质对射流侵彻的确存在着比空气更不利的影响。但是水介质直径远远大于射流直径,且实验靶板与模拟井下的砂岩差别大。肖强强等^[22]针对聚能射流扩孔过程中轴向侵彻和径向扩孔问题,采用一个新的聚能射流扩孔方程并与 Szendrei-Held 模型比较,给出了冲击波对轴向侵彻的影响远小于对径向扩孔的影响,但是没有考虑在小孔中侵的情况。上述研究均未考虑油气井用聚能射孔弹、井下储层岩性及同孔重复等问题,本文基于砂岩比水对射流的影响更大的原则,在模拟井下条件下,开展了三次重复射孔试验,研究了重复射孔对穿孔性能的影响程度。

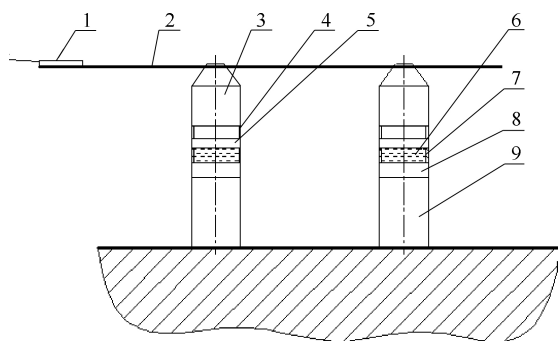
1 试验装置及方案

为了得到同一种聚能射孔弹在同一块靶相同位置重复射孔的效果,模拟井下射孔情况设计了试

验方案,制作了试验装置,并利用国内用量较大的 DP44RDX38-3 型聚能射孔弹进行了四组射孔试验。

1.1 试验装置

模拟试验装置组成如图 1 所示。从图 1 可知,试验装置主要由雷管、导爆索、聚能射孔弹、模拟枪靶板、清水、模拟套管靶板、靶等组成。



1-雷管;2-导爆索;3-射孔弹;4-炸高;5-模拟枪靶板;
6-清水;7-间隙;8-模拟套管靶板;9-靶
图 1 射孔弹穿靶试验结构示意图

Fig.1 Structural schematic diagram of perforating projectile penetrating steel target test

试验用靶为砂岩(天然岩石露头切割而成),直径 178 mm、长 690 mm,按 GB/T 20488-2006^[23]要求,在 93~99 ℃ 的恒温箱中进行干燥 24 h,饱和(在 133 Pa 条件下对砂岩抽空 6 h、在 6.6 kPa 压力下对 3% 的 NaCl 溶液抽空 0.5 h,然后将 NaCl 溶液缓慢浸入岩心,当 NaCl 溶液浸没砂岩后再在 6.6 kPa 压力下抽空 2 h)后用固结剂固结于内径 200 mm、长 700 mm、厚 10 mm 的钢壳内,室温下养护 48 h 待用。选用同一批生产的装药量为 38 g 的 DP44RDX38-3 型聚能射孔弹。

1.2 试验方案

模拟试验装置组合见表 1。从表 1 可以看出,第一组试验,砂岩射孔端覆盖 10 mm 厚固结剂层,聚能射孔弹与固结剂层的炸高为 40 mm;第二组试验,砂岩射孔端覆盖 10 mm 厚低碳钢板(中间缝隙充填固结剂),聚能射孔弹与钢板的炸高为 40 mm;第三组试验,砂岩射孔端覆盖 12 mm 厚低碳钢板、40 mm 厚铝柱(钢板、铝柱与砂岩间缝隙充填固结剂),聚能射孔弹下方依次为 16 mm 炸高、模拟射孔枪的 6 mm 厚低碳钢板、11 mm(充满清水)间隙和试验靶体;第四组试验,砂岩射孔端覆盖 2 mm 厚低碳钢板、40 mm 厚铝柱(钢板、铝柱与砂岩间缝隙充填固结剂),聚能射孔弹下方依次为 16 mm 炸高、模拟射孔枪的 6 mm 厚低碳钢板、11 mm(充满清水)间隙和试验靶体。

表 1 试验装置组合
Table 1 Combination of simulated test devices

组别	射孔弹型号	炸高/mm	模拟枪厚/mm	间隙/mm	模拟套管厚/mm	模拟水泥环/mm	靶/mm
第一组	DP44RDX38-3	40	-	-	-	10(水泥)	砂岩
第二组		40	-	-	10	缝隙浇注	砂岩
第三组		16	6	11	12	40(铝柱)	砂岩
第四组		16	6	11	2	40(铝柱)	砂岩

1.3 射孔试验

按设计要求试验,第一次射孔后,用游标卡尺测量穿孔孔径,用探针测量穿孔深度,用量筒将水测量孔容。然后,将射孔孔眼内注满清水,进行第二次射孔,重复第一次试验(第三、四组试验使用上次的模拟套管装置)。按照上述方法进行第三次射孔和测量。

表 2 试验结果统计表
Table 2 Statistical table of test results

项目	第一组			第二组			第三组			第四组		
	穿孔深度/ mm	穿孔孔径/ mm	孔容/ mL	穿孔深度/ mm	穿孔孔径/ mm	孔容/ mL	穿孔深度/ mm	穿孔孔径/ mm	孔容/ mL	穿孔深度/ mm	穿孔孔径/ mm	孔容/ mL
第一次射孔	384	19.4	30	394	12.3	33	452	12.3	40	534	12.0	41
第二次射孔	450	21.8	70	475	13.5	58	482	13.5	70	556	15.5	60
第三次射孔	559	24.0	140	503	15.5	107	501	15.5	114	575	17.8	113
备注	1 块靶射孔试验结果			3 块靶射孔试验平均值			2 块靶射孔试验平均值			2 块靶射孔试验平均值		

四种不同组合试验第一次射孔的穿孔深度差别很大,到第三次时已十分接近,平均值为 535 mm,与平均值间的波动为-6.4%~7.5%。考虑射孔弹产品性能间的差异、靶一致性等因素的影响,试验结果一致性非常好。试验后,将砂岩靶剖开,剖面情况如图 2 所示。

2 结果分析

四组试验结果见表 2。从表 2 可以看出,四种不同组合射孔试验中穿孔深度、穿孔孔径经过二次重复射孔后均有增加,增加幅度分别为 46%、28%、11%和 7%;孔容在第二次重复射孔后增加幅度较大,分别为 367%、220%、185%和 167%。

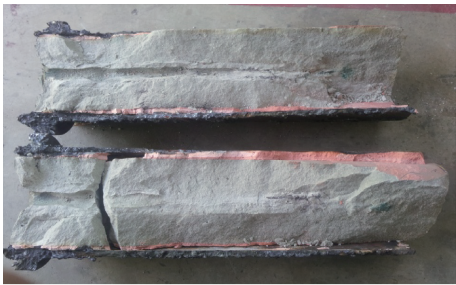
从图 2a 可以看出,射孔孔道前部(入口端)至中部直径明显扩大,孔道容积增加为原来的 176%~367%;从图 2b 可以看出,孔道后部(尾)有三道黑色痕迹,是射孔尾部形成的杵体,表明射孔后周围砂岩强度明显降低。

3 射孔孔道变化规律

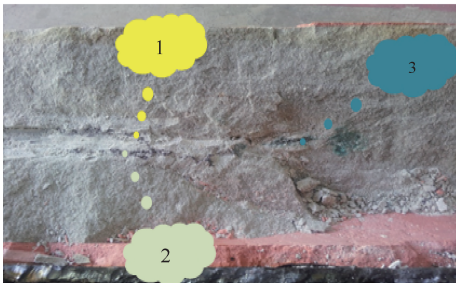
同种聚能射孔弹同孔重复射孔可以增加穿孔深度,三次同孔重复射孔后接近穿孔能力极限(500~600 mm),用铝柱代替水泥环来改变靶结构可以改变射孔效果,为提高穿孔深度、扩大影响区域提供了依据。

3.1 同孔重复射孔穿孔深度变化规律

重复射孔次数与穿孔深度的关系如图 3 所示。从图 3 可以看出,第一和第二组的试验中,DP44RDX38-3 型聚能射孔弹初次射孔穿砂岩靶的深度接近 400 mm,二次重复射孔后穿孔深度增加 27%~46%,表明在第一次射孔深度的基础上,穿孔深度还有增加的空间;第三、四组试验用铝柱代替水泥层进行优化,穿孔深度可以增加至 500 mm 以上,第三、四组试验中两次重复射孔后穿孔深度分别增加 11%、8%,表明铝柱代替水泥环能够提高穿孔深度,但重复射孔增加的幅度减小,主要是因为



a. 孔道前部



b. 孔道后部

图 2 砂岩靶剖面图

Fig.2 Sandstone target profile

该种型号的射孔弹的初次射孔深度已接近其极限,极限深度介于500~600 mm。

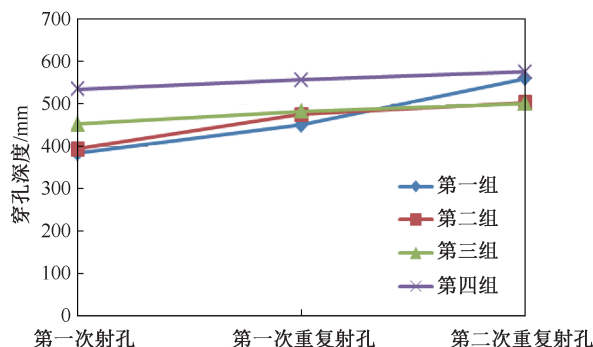


图3 重复射孔次数与穿孔深度的关系

Fig.3 Relationship between the number of repetitive perforations and the depth of perforation

第一、二组试验中只有砂岩上部的模拟水泥环厚10 mm与模拟套管厚10 mm部分不同,理论上钢板应比水泥对射孔的影响更大,第二组靶上的穿深应更低些,但第二组试验得到的穿孔深度分别增加10 mm、15 mm和降低56 mm,结果波动明显。第三、四组试验中只有模拟套管厚12 mm与2 mm部分不同,理论上第四组试验中的穿孔深度应比第三组更深,第四组试验靶的穿孔深度增加82 mm、74 mm和74 mm,增加幅度偏大(15%左右)。这是由于试验用聚能射孔弹和靶等材料性能波动产生的,但试验结果反映的穿孔深度变化趋势明显,在条件允许的情况下还可进一步修正、完善。

3.2 射孔影响区域扩大

初次射孔的孔容为30~41 mL,重复射孔过程中,射孔径向对砂岩孔道壁的持续挤压、冲击,扩大了孔径,使孔容明显增大,有利于流体的渗流。射流轴向在穿孔孔道中的清水继续前进,并不断消耗能量,当达到砂岩时继续撞击开孔,直至速度降低到某一临界值停止开孔,尾部低速的物质堆积形成杵堵。由于射流方向的微小差异,三个射流不重合,形成三个杵堵,即孔道后(尾)部的三道黑色痕迹,使周围砂岩强度明显降低,有利于提高流体的导流能力。如果在负压条件下试验,可以获得较好的流动效果。

目前,还不能在模拟井下压力条件下进行重复射孔、流动试验,无法给出更接近井下实际情况的结果。在现有试验条件下,利用重复射孔的方法研究聚能射孔弹在各种条件下的穿孔深度变化规律,可以给出相对合理的结果,下一步应建立试验装置研究重复射孔对流动性能的影响,并应完善现有的

聚能射孔器穿孔过程模拟计算软件,通过数值模拟研究来提高研究的效率。

4 结论

(1)同种聚能射孔弹在相同条件下重复射孔,穿孔深度、穿孔孔径和孔容均有不同程度的增加,穿孔深度增加幅度可达27.6%~45.6%。

(2)用铝柱代替水泥环能明显提高初次聚能射孔的深度,为改进井下施工设计提供了探索方向。

(3)试验中均采用同种聚能射孔弹,而重复射孔时射流穿过介质(清水)与砂岩不同,针对性的设计穿过液体介质再穿靶的聚能射弹,可使用聚能重复射孔的穿孔深度增加幅度进一步提高。

(4)建议进一步研究针对不同靶的射孔弹组合,以便与井下介质、地层匹配,从而开发出适用于特定条件下的聚能射孔弹及其它辅助完井工艺技术,满足现场需求。

致谢:石油工业油气田射孔器材质量监督检验中心提供试验平台及技术数据,并同意论文发表,在此一并致谢。

参考文献

- [1] 李龙龙,吴明录,姚军,等. 部分射开直井的产能计算方法[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(3): 80-89.
LI Longlong, WU Minglu, YAO Jun, et al. Calculation method of the productivity of partially perforated vertical well [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(3): 80-89.
- [2] 龚利平. 射孔参数的优化及应用[J]. 内蒙古石油化工, 2011(23): 145-146.
GONG Liping. Optimization and application of perforation parameters [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2011(23): 145-146.
- [3] 李东传,金成福,余海鹰. 聚能射孔器混凝土靶穿孔深度动态评价初探[J]. 石油工业技术监督, 2016, 32(8): 21-24.
LI Dongchuan, JIN Chengfu, YU Haiying. Preliminary study on dynamic evaluation for penetration depth of concrete targets made by jet perforators [J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2016, 32(8): 21-24.
- [4] OTT R E, BELL W T, HARRIGAN J W, et al. Simple method predicts downhole shaped-charge gun performance [C]. SPE 2742, 1994.
- [5] 李云,吴焕龙,付代轩,等. 超高温射孔弹高温高压条件下穿深性能试验研究[J]. 测井技术, 2017, 41(1): 123-126.
LI Yun, WU Huanlong, FU Daixuan, et al. Influence of the size distribution of tungsten powder on the penetrability of the jet [J]. Well Logging Technology, 2017, 41(1): 123-126.
- [6] 李建明,吴锡令,赵立新. 钻井泥浆对油层污染程度的测井评价方法[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(3):

- 318-319.
LI Jianming, WU Xiling, ZHAO Lixin. A well logging method for evaluating effect of drilling mud on formation contamination [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(3):318-319.
- [7] 潘金国, 盛江飞. 负压射孔联作工艺的研究与应用[J]. 江汉石油职工大学学报, 2009, 22(2):48-50.
PAN Jinguo, SHENG Jiangfei. Study and application of combination technology of negative pressure perforation [J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2010, 31(3):318-319.
- [8] 王艳萍, 黄寅生, 潘永新, 等. 复合射孔技术的现状与趋势[J]. 爆破器材, 2002, 31(3):30-33.
WANG Yanping, HUANG Yinsheng, PAN Yongxin, et al. Situation and tendency of combined perforating-fracturing techniques [J]. Explosive Materials, 2002, 31(3):30-33.
- [9] 赵开良, 吴永清, 魏永刚. 复合射孔器效能监测、对比分析及优化[J]. 测井技术, 2007, 31(1):66-71.
ZHAO Kailiang, WU Yongqing, WEI Yonggang. Effect monitoring, correlating and optimizing of composite perforator [J]. Well Logging Technology, 2007, 31(1):66-71.
- [10] 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.
- [11] 郭胜文, 张宣来. 子弹式复合射孔技术[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(2):112-113.
GUO Shengwen, ZHANG Xuanlai. Bullet compound perforation technology [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(2):112-113.
- [12] 于开勋. 子弹式二次爆炸射孔技术研究[J]. 测井技术, 2015, 39(6):807-809.
YU Kaixun. Bullet-like secondary explosive perforation technology [J]. Well Logging Technology, 2015, 39(6):807-809.
- [13] 于开勋. 三射流射孔技术研究与应用[J]. 测井技术, 2015, 39(5):665-668.
YU Kaixun. Research and application of triple-jet perforating technology [J]. Well Logging Technology, 2015, 39(5):665-668.
- [14] 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]. 2018, 27(1):31-36.
- [15] 罗宏伟, 郭鹏. 先锋超深透射孔器[J]. 石油科技论坛, 2013(2):63-65.
LUO Hongwei, GUO Peng. Pioneer super-deep perforator [J]. Oil Forum, 2013(2):63-65.
- [16] 程维恒, 陈勇, 王彦武, 等. 一种大孔超深穿透射孔器的设计[J]. 油气井测试, 2015, 24(2):68-69.
CHENG Weiheng, CHEN Yong, WANG Yanwu, et al. Design of a large-aperture ultra-deep penetrating perforator [J]. Well Testing, 2015, 24(2):68-69.
- [17] AL-GOUHI AL-WALEED ABDULLAH; SAUDI ARABIAN OIL CO. System and method employing perforating gun for sanme location multiple reservoir penetrations; US2014020896 A1[P/OL]. 2014-01-23. <http://www.pss-system.gov.cn/sipublicsearch/patentsearch/portal2HomeSearch-portalSearch>.
- [18] 廖莎莎, 吴成, 毕世华. 钨铜合金药型罩水介质中侵彻规律的实验研究[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(2):99-101.
LIAO Shasha, WU Cheng, BI Shihua. A penetrating feature investigation of shaped charge with tungsten copper alloy liner in water [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 31(2):99-101.
- [19] 郭刘伟, 曹仁义, 庞勇, 等. 聚能射流水中侵彻行为的实验研究[J]. 实验力学, 2015, 30(1):111-115.
GUO Liuwei, CAO Renyi, PANG Yong, et al. Experimental investigation on water penetration behavior of shaped charge jet [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(1):111-115.
- [20] 史进伟, 罗兴柏, 蒋建伟, 等. 射流侵彻水夹层间隔靶的理论和实验研究[J]. 含能材料, 2016, 24(3):213-218.
SHI Jinwei, LUO Xingbai, JIANG Jianwei, et al. Numerical simulation and experimental study on the cratering stage of shaped charge jet penetrating into target [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2016, 24(3):213-218.
- [21] 高泓超, 罗兴柏, 刘国庆, 等. 水介质间隔靶对射流侵彻影响的实验研究[J]. 价值工程, 2013(33):296-298.
GAO Hongchao, LUOXingbai, LIU Guoqing, et al. Experimental study of the impact of interval target with water to jet penetration [J]. Value Engineering, 2013(33):296-298.
- [22] 肖强强, 黄正祥, 顾晓辉. 冲击波影响下的聚能射流侵彻扩孔方程[J]. 高压物理学报, 2011, 25(4):333-338.
XIAO Qiangqiang, HUANG Zhengxiang, GU Xiaohui. Equation of penetration and crater growth by shaped charge jet under the influence of shock wave [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011, 25(4):333-338.
- [23] GB/T 20488-2006 油气井聚能射孔器材性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

编辑 刘振庆

第一作者简介: 李东传, 男, 1969 年出生, 高级工程师, 1989 年毕业于大庆石油学院石油地质勘查专业, 现从事油气井用射孔器材检测技术研究。电话: 0459-4696166, 13936840630; Email: dqlidongchuan@petrochina.com.cn。通信地址: 黑龙江省大庆市红岗区创业庄元丰路西 114 号, 邮政编码: 163853。