

射流着靶角度对射孔弹性能的影响

徐志国, 乔亚波

大庆油田射孔器材有限公司 黑龙江大庆 163853

通讯作者: Email: xuzhiguo@cnpc.com.cn

引用: 徐志国, 乔亚波. 射流着靶角度对射孔弹性能的影响[J]. 油气井测试, 2019, 28(5): 27-32.

Cite: XU Zhiguo, QIAO Yabo. Influence of jet target angle on the perforating charge performance [J]. Well Testing, 2019, 28(5): 27-32.

摘要 为分析聚能射孔弹爆轰后形成射流着靶角度的变化对定方位、定射角和定面等个性化射孔新技术的影响, 探索了射孔穿深下降的原因, 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, 结合三维仿真模拟计算和打靶试验, 分析了射流着靶角度对射孔弹性能的影响。当射流不垂直于靶体侵彻时, 射流会发生颤动并偏离运动轴线, 使得射流侵彻性能下降, 且随着角度的增大, 射流侵彻性能下降的趋势也会加大。结果表明, 改变布弹角度可以适应油层分布、减少地应力的影响, 同时也会造成聚能射孔弹穿孔性能的下降。在射孔方案中涉及倾角变化时, 射孔弹的设计应尽可能减少射流倾角变化的影响。

关键词 着靶角度; 射流; 斜侵彻; 穿深; 孔眼; 聚能射孔弹; 靶体

中图分类号: TE353 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2019.05.005

Influence of jet target angle on the perforating charge performance

XU Zhiguo, QIAO Yabo

Perforating Equipment Co., Ltd., Daqing Oilfield, Daqing, Heilongjiang 163853, China

Abstract: The cause of the penetration depth reduction was investigated by analyzing the influence of jet target angle in shale charge perforation on the new perforation techniques such as orientation, fixed angle and fixed surface. According to the basis theory of jet penetration, the influence of jet target angle on the perforating charge performance was studied from the effect of jet micro-element morphology on penetration performance by combining with 3D simulation calculation and target test. The result indicates that the jet penetration will vibrate and deviate from axis in case of non-vertical target penetration, which results in a reduction of jet penetration performance. The jet penetration performance decreases greatly with the increase of target angle. The results show that changing the target angle can adapt to the distribution of oil reservoir and reduce the influence of in-situ stress, and at the same time it will cause the decline of perforating performance of shaped charge perforating projectile. When the change of inclination is involved in the perforating scheme, the design of perforating projectile should minimize the influence of the change of jet inclination.

Keywords: target angle; jet; oblique penetration; penetration depth; hole; shaped charge perforator; target

我国油藏分布及藏储有其特殊性, 随着油田勘探开发进入中后期, 油气层的类型更加复杂, 中低渗透油层、致密砂岩油层在油气储量中占较大比例。近几年, 多家油田提出断层和错层油藏的开采。司丽^[1]分析了大庆长垣北部萨、葡、高油层北东向断层成因及对油田开发的作用。解素伟^[2]在喇嘛甸油田背斜构造西北部 17[#]断层边部开展大斜度井试验, 对断层发育较多的喇嘛甸油田挖潜断层边部剩余油具有重要意义。针对这些地层变化, 开发了定方位、定射角射孔技术等^[3]。魏晓龙等^[4]和张少程^[5]介绍了定方位、定射角射孔技术原理及应

用情况。王峰等^[6]为内定向斜井定方位、定射角射孔技术提供了一套可测量方位的自旋转起爆装置。崔永胜^[7]采用 Newman 叠加原理, 给出了单个射孔孔眼下地层压力分布表达式, 并用 Matlab 软件实现了地层压力可视化。另外, 随着开采难度逐渐增大, 实施水力压裂措施的井也越来越多。水力压裂技术是目前致密油气、页岩气等非常规油气藏进行压裂完井的主要工艺技术^[8-9]。韦海涛^[10]提出 Full-conFrac 全裂缝导流压裂新技术, 从使用新型超低密度支撑剂材料方面改善压裂效果。向洪^[11]提出通过人工裂缝对储层的全覆盖来实现提高储层动用

程度,以及单井产量的目的。而射孔工艺主要影响压裂裂缝的方向,为达到压裂改造效果出现了定面射孔技术。郭兴午等^[12]、张波^[13]和习传学等^[14]对该技术在国内页岩气井的实际应用效果进行了研究。刘奉银等^[15-16]、赵振峰等^[17]和王素玲等^[18]对定面射孔水力压裂裂缝扩展影响进行了研究。张儒鑫等^[19]和卢春辉^[20]对在采用定面射孔时射孔参数的优选方法进行研究。上述这些个性化射孔技术对射孔弹性能也提出了新的要求,这些特色技术都有一个共同点,射孔弹的射流不是垂直于靶体,而是斜侵彻靶体,这就造成射流在侵彻靶体的过程中会损失更多能量,射孔弹的性能将会受到较大影响。本文着重从射流着靶角度对射孔弹性能的影响进行分析。

1 侵彻理论分析

石油射孔弹利用爆轰聚能效应原理制造^[21]。射孔时,药型罩在爆轰波的作用下形成高速金属射流对目标物产生侵彻作用^[22]。聚能装药在侵彻作用时,空心部分的爆轰产物飞散,先向轴线集中,汇聚成一段速度和压力都很高的气流,爆轰产物的能量集中在较小的面积上,在目标物上就打出了深孔^[23]。由于靶体尺寸相对于射流直径要大得多,而冲击波速度远大于射流侵彻靶体的速度,这样冲击波将会使得冲击界面附近的靶体材料提前受到扰动,并在后续高速射流的不断撞击下使得侵彻深度不断增加。射流在经历一个高速侵彻过程后,侵彻速度逐渐放缓,使得冲击界面压力下降。

聚能装药射流速度从头部至尾部是逐渐减小的,而且越靠近尾部的位置速度梯度越大,正是因为速度梯度的存在,射流才会被逐渐拉长。当射流侵彻靶体时,可以把射流看作是由若干微元组成。为了便于分析,选取其中两个微元来进行对比侵彻角度的影响。当射流垂直侵彻靶体时如图 1 所示,射流微元 1 和微元 2 是同时着靶,两个微元在破靶过程中拥有同样的状态变化。另外,两个微元由于对称关系,射流速度梯度也是一致的。这样,后续射流能够很好的跟进和补充,减少相互间的作用干扰。随着侵彻的深入及后续射流的不断跟进,侵彻面的压力逐渐趋于稳定,整个射流动能可以得到有序的传递。当射流斜侵彻靶体时(图 2),由于着靶倾角的存在:一方面,射流微元在着靶的时刻会发生射流反射,侵彻压力发生分解,加大了开坑难度,

随着射流侵入靶体后,形成垂直射流的靶面,弹坑增长过程恢复正常;另一方面,射流微元 1 优先触靶,由于受破靶作用影响,射流形态发生变化,这样射流微元 2 及其后续射流将会受到来自射流微元 1 的干扰,射流由于颤动引起射流微元离散,这样就会加剧射流的断裂。射流一旦断裂,射流碎片就会离散并且颤动偏离运动轴线,使得射流能量的方向性下降,降低了射流的动能。射流破甲是射流各部分的动能和靶板连续交换的结果,最终直接降低了聚能装药的侵彻能力。

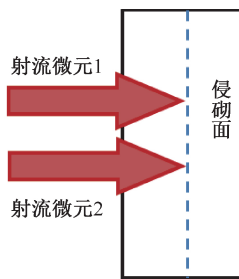


图 1 射流垂直侵彻靶体示意图

Fig.1 Schematic diagram of vertical target penetration with jet

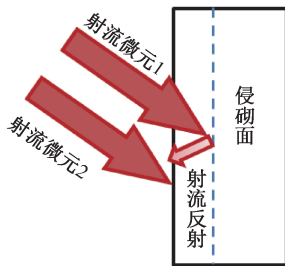


图 2 射流斜侵彻靶体示意图

Fig.2 Schematic diagram of oblique target penetration with jet

2 有限元数值分析

在理论分析的基础上,为进一步分析射流着靶倾角对射孔弹性能的影响,通过数值仿真模拟的方法进行了对比,分别建立了垂直侵彻靶体模型(图 3)和射孔弹与枪体径向平面间成 45° 夹角模型(图 4),对比了两种角度下爆轰形成的射流形态和轴线速度。

2.1 动力学模型建立

由于射流非垂直侵彻靶体时,整个过程处于非对称状态,使用二维建模不能满足计算要求。所以,只能建立三维模型进行仿真计算。将绘制好的三维模型导入 ANSYS 软件中,建立动力学分析模型。

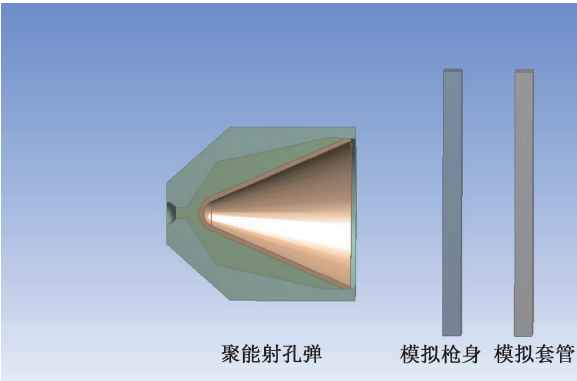


图 3 射流垂直侵彻靶体动力学模型建立

Fig.3 Dynamic model establishment of vertical target penetration with jet

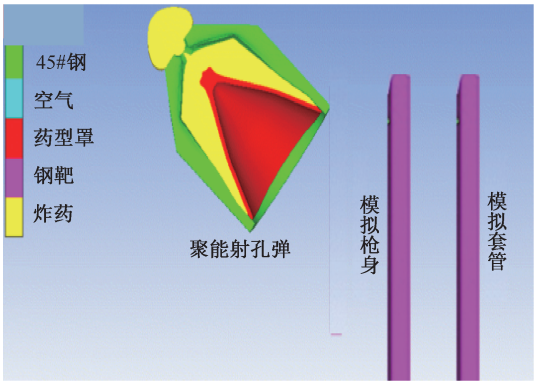
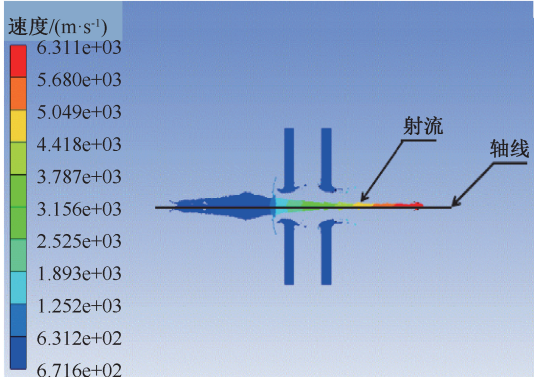


图 6 射流非垂直侵彻靶体计算模型

Fig.6 Calculation model of non-vertical target penetration with jet

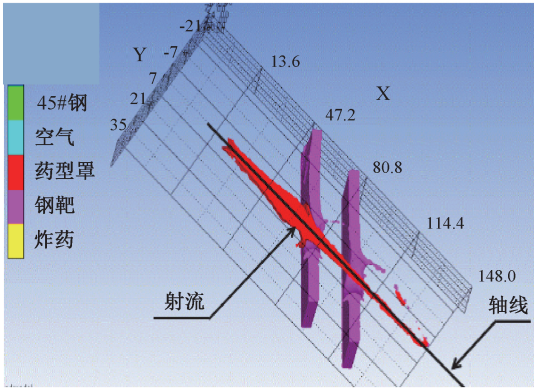
2.3 计算结果及分析

分别选取两种侵彻角度的射流中心轴线位置进行轴线处的速度对比(图 7)。



a. 射流垂直侵彻靶体轴线

a. Vertical penetration of jet into target axis



b. 射流非垂直侵彻靶体轴线

b. Non-vertical penetration of jet into target axis

图 7 射流轴线处的速度对比

Fig.7 Velocity comparison at axis

从图 8 和图 9 的速度曲线对比中可以发现,当射流垂直侵彻靶体时,射流轴线处速度曲线比较光滑,呈逐渐上升趋势,速度梯度分布比较理想,最大头部速度达到6 311 m/s;而当射流非垂直侵彻靶体时,射流轴线处速度曲线比较曲折,速度梯度分布

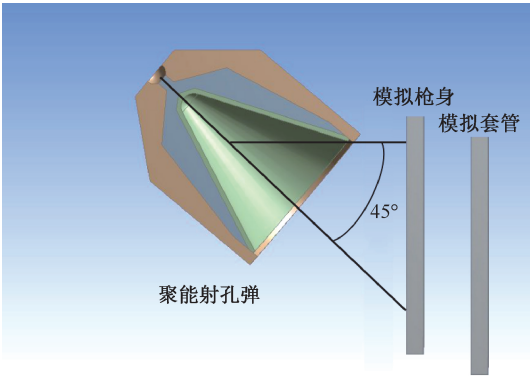


图 4 射流非垂直侵彻靶体动力学模型建立

Fig.4 Dynamic model establishment of non-vertical target penetration with jet

2.2 建立 AUTODYN 计算模型

首先,对几何模型进行网格划分;然后,将划分后的模型导入 AUTODYN 有限元分析程序中;再分别对弹壳、炸药、药型罩和靶体进行材料匹配;最后,建立空气模型。射流垂直侵彻靶体计算模型如图 5 所示,射流非垂直侵彻靶体计算模型如图 6 所示。

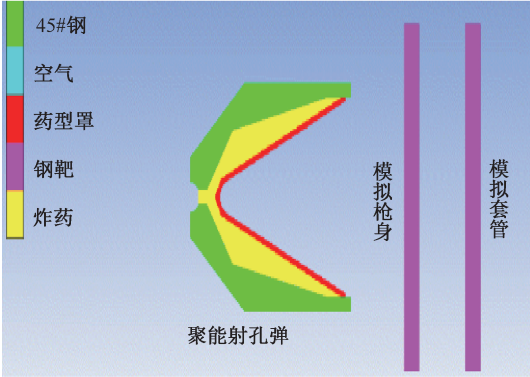


图 5 射流垂直侵彻靶体计算模型

Fig.5 Calculation model of vertical target penetration with jet

受到干扰,最大头部速度不到 5 000 m/s。由于倾角的存在,使得不同射流微元间受到非常大的相互影响,而且到一定距离时,轴线速度出现急剧下滑,说明射流已经偏离中心轴线,射孔弹穿深性能受到很大影响。

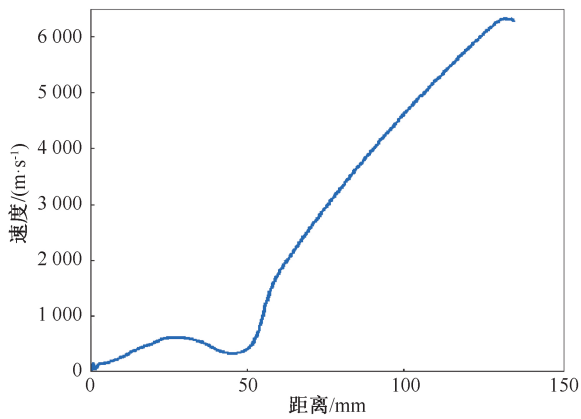


图 8 射流垂直侵彻靶体轴线速度
Fig.8 Axis velocity of vertical target penetration with jet

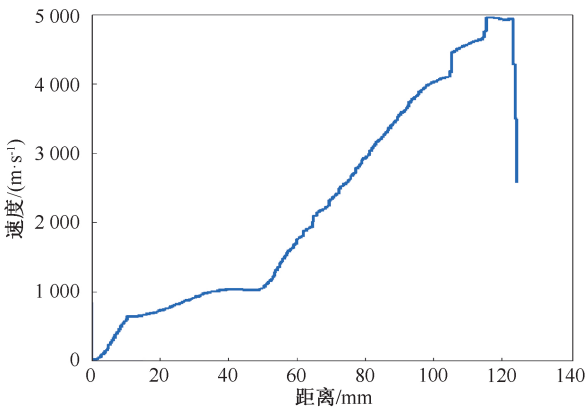


图 9 射流非垂直侵彻靶体轴线速度
Fig.9 Axis velocity of non-vertical target penetration with jet

通过对射流穿过靶板后的孔眼分析可以发现,非垂直侵彻后的孔眼呈椭圆形,如图 10 所示,而垂直侵彻后的孔眼是比较标准的圆形。

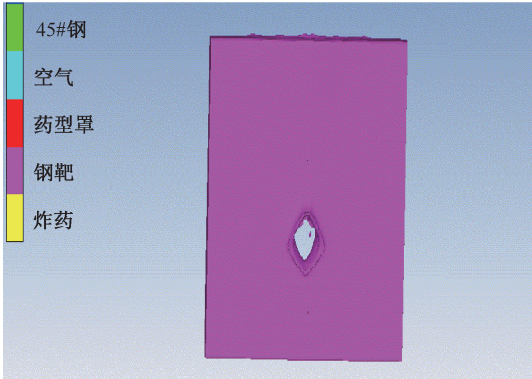


图 10 非垂直侵彻后的孔眼
Fig.10 Hole with non-vertical penetration

所以,非垂直侵彻后射孔孔眼形状也受到了比较大的影响。

3 混凝土靶试验

综合以上理论分析与有限元仿真计算结果,进行了地面模拟试验。采用 89 型射孔弹在模拟过枪身和套管的条件下,进行地面穿混凝土靶试验。试验数据见表 1。

表 1 射孔弹不同着靶角度地面混凝土靶试验数据表
Table 1 Perforating charge test data with ground concrete target under various target angles

着靶角度/ (°)	平均穿深/ mm	平均孔径/ mm	每组射孔弹数量
0	670	10.4	6
15	645	10.2	6
25	618	9.8	6
35	549	9.6	6
45	449	9.5	6
55	352	9.4	6

从表 1 中试验结果对比可知,随着射流着靶角度的增加,射孔弹穿深呈下降趋势,而且角度增加的越大,射流下降的趋势也越来越大。射孔弹穿深随侵彻角度变化曲线如图 11 所示。

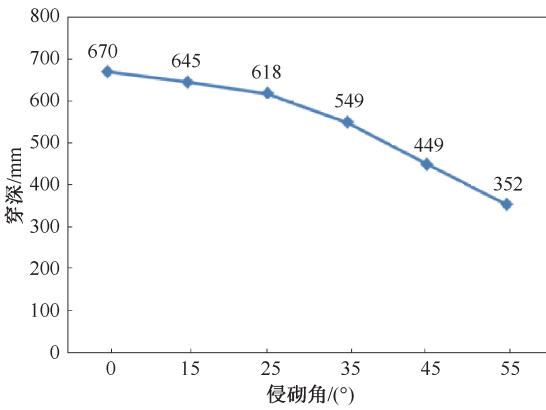


图 11 不同侵彻角度穿深折线图
Fig.11 Line chart of penetration depth under various penetration angles

通过对比射孔后套管上孔眼形状可以发现,射孔弹垂直侵彻靶体后套管上的孔眼呈圆形,如图 12 所示,孔眼周围只有很小一圈小坑;而非垂直侵彻靶体后套管上的孔眼呈椭圆状,如图 13 所示,与仿真计算结果一致,而且孔眼左侧出现一片散落的金属流侵彻的小坑,也说明了射流受到明显干扰,影响了射流轴线处的汇聚。

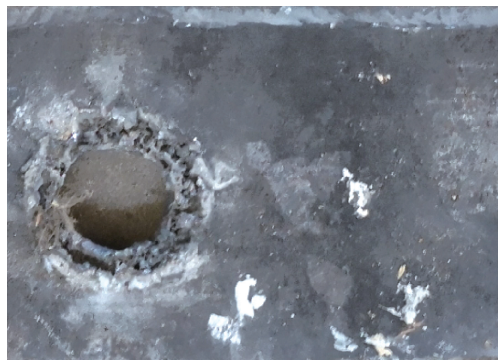


图12 垂直侵彻靶体套管上孔眼情况

Fig.12 Casing hole with vertical target penetration



图13 非垂直侵彻靶体套管上孔眼情况

Fig.13 Casing hole with non-vertical target penetration

4 结论

(1)当射孔弹爆轰产生的射流非垂直侵彻靶体时,射流在着靶时刻会发生反射,增大开坑难度,并造成射流微元运动状态不对称,引起射流相互干扰,使射孔穿深下降,孔径不规则。本文分析了定方位、定射角和定面等个性化射孔工艺中,射孔穿深下降的原因。

(2)随着射流着靶倾角的增大,射流微元间的着靶时间差增大,加剧了对后续射流的干扰,对射流轴线汇聚的影响增大,射孔弹穿深下降更加明显,孔径更加不规则。射孔方案中涉及倾角变化时,对倾角的选择有一定指导意义。

(3)随着个性化射孔工艺的增加,射孔弹的设计也应通过结构的优化、药型罩配方的改进尽可能减少射流倾角变化的影响,从而适应新的射孔工艺的发展。

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] 司丽. 大庆长垣北部萨、葡、高油层北东向断层成因及对油田开发的作用[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38

(1):66-70.

SI Li. Genesis of NE fault and its action to the oilfield development for Sapugao oil reservoirs in North Daqing placanticline [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(1):66-70.

[2] 解素伟. 喇4-斜1521井断层边部大斜度定射角射孔技术应用[J]. 化学工程与装备, 2017, 46(9):176-179.

XIE Suwei. Application of high inclination fixed angle perforation technology at Fault Edge of La 4-Xie 1521 Well [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2017, 46(9):176-179.

[3] 刘合,王峰,王毓才,等. 现代油气井射孔技术发展现状与展望[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(6):731-737.

LIU He, WANG Feng, WANG Yucai, et al. Oil well perforation technology: Status and prospects [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(6):731-737.

[4] 魏晓龙,田小存,王静,等. 定方位定射角射孔技术在薄层储层开发中的应用[J]. 测井技术, 2018, 42(3):367-370.

WEI Xiaolong, TIAN Xiaocun, WANG Jing, et al. Application of oriented fixed angle perforating technology in the development of thin-layer reservoirs [J]. Well Logging Technology, 2018, 42(3):367-370.

[5] 张少程,张锋,周翌,等. 定射角定方位射孔新技术[J]. 测井技术, 2012, 36(1):68-72.

ZHANG Shaocheng, ZHANG Feng, ZHOU Zhao, et al. On set shoot angle compass perforating technology [J]. Well Logging Technology, 2012, 36(1):68-72.

[6] 王峰,马涛,常昕,等. 内定向斜井定方位定射角射孔技术用可测量方位的自旋转起爆装置研究与应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(1):49-50.

WANG Feng, MA Tao, CHANG Xin, et al. Research and application of self-rotating detonation device with measured azimuth for azimuth and firing angle perforation technology in internal directional inclined shaft [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2018, 38(1):49-50.

[7] 崔永胜. 应用Newman乘积法研究定方位定射角射孔技术中的单孔流动问题[J]. 化学工程与装备, 2016, 45(8):75-79.

CUI Yongsheng. Application of Newman product method to study single hole flow in fixed azimuth and fixed angle perforation technology [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2016, 45(8):75-79.

[8] 刘合,孟思炜,苏健,等. 对中国页岩气压裂工程技术发展和工程管理的思考与建议[J]. 天然气工业, 2019, 39(4):1-7.

LIU He, MENG Siwei, SU Jian, et al. Reflections and suggestions on the development and engineering management of shale gas fracturing technology in China [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(4):1-7.

[9] 全少凯,高德利. 水力压裂基础研究进展及发展建议[J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(1):101-115.

- TONG Shaokai, GAO Deli. Basic research progress and development suggestions on hydraulic fracturing [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(1): 101-115.
- [10] 韦海涛. FulconFrac 全裂缝导流压裂新技术[J]. 油气井测试, 2018, 27(4): 42-48.
- WEI Haitao. FulconFrac —A new fracturing technology with the conductivity of full-fracture [J]. Well Testing, 2018, 27(4): 42-48.
- [11] 向洪. 马56区块致密油藏“缝控”体积压裂技术[J]. 油气井测试, 2018, 27(4): 49-54.
- XIANG Hong. ‘Fracture controlled’ volume fracturing technology for tight reservoirs in Ma56 block [J]. Well Testing, 2018, 27(4): 49-54.
- [12] 郭兴午, 刘强, 张乔, 等. 页岩定面射孔水力裂缝起裂特征探索及应用[J]. 断块油气田, 2018, 25(2): 254-257.
- GUO Xingwu, LIU Qiang, ZHANG Qiao, et al. Exploration and application of hydraulic fracture initiation characteristics of shale set surface perforating [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2018, 25(2): 254-257.
- [13] 张波. 涪陵深层页岩气井降低起裂压力用定面射孔器[J]. 火工品, 2017(6): 54-57.
- ZHANG Bo. Oriented side perforator used for reducing fracture initiation pressure in deep shale gas well at Fuling [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2017(6): 54-57.
- [14] 习传学, 高东伟, 陈新安, 等. 涪陵页岩气田西南区块压裂改造工艺现场试验[J]. 特种油气藏, 2018, 25(1): 155-159.
- XI Chuanxue, GAO Dongwei, CHEN Xin'an, et al. Field test of fracturing technology in the Southwest section of Fuling shale gas field [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2018, 25(1): 155-159.
- [15] 刘奉银, 王少宾, 徐楠. 定面射孔水力压裂裂缝扩展研究[C]. 中国力学大会-2017暨庆祝中国力学学会成立60周年大会, 2017: 1791-1800.
- LIU Fengyin, WANG Shaobin, XU Nan. Study on fracture expansion of hydraulic fracturing with fixed perforation [C]. China Mechanics Congress-2017 and Celebration of the 60th Anniversary of the Founding of China Mechanics Society, 2017: 1791-1800.
- [16] 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.
- [17] 赵振峰, 唐梅荣, 逢铭玉, 等. 定面射孔对压裂初始裂缝形态的影响研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(22): 60-63.
- ZHAO Zhenfeng, TANG Meirong, PANG Mingyu, et al. Impact of transverse perforations on the initial fracture shape of hydraulic fracturing [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(22): 60-63.
- [18] 王素玲, 隋旭, 朱永超. 定面射孔新工艺对水力裂缝扩展影响研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3393-3400.
- WANG Suling, SUI Xu, ZHU Yongchao. Effect of set surface perforating technology on hydraulic crack extension [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(12): 3393-3400.
- [19] 张儒鑫, 侯冰, 单清林, 等. 采用定面射孔时射孔参数的优选方法[J]. 钻采工艺, 2017, 40(3): 38-41.
- ZHANG Ruxin, HOU Bing, SHAN Qinglin, et al. How to decide optimum perforation parameters for coplanar perforation [J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(3): 38-41.
- [20] 卢春辉. 定面射孔时射孔参数的优选方法研究[J]. 石化技术, 2018, 25(8): 265.
- LU Chunhui. Study on the optimization method of perforation parameters in fixed surface perforation [J]. Petrochemical Industry Technology, 2018, 25(8): 265.
- [21] 赵海文, 林成财, 王峰, 等. 油气井射孔安全起爆技术的研究[J]. 成都电子机械高等专科学校学报, 2012, 15(1): 10-13.
- ZHAO Haiwen, LIN Chengcai, WANG Feng, et al. Research on Safety Perforation Initiating Technique for Oil-Gas Well [J]. Journal of Chengdu Electromechanical College, 2012, 15(1): 10-13.
- [22] 李艳圃. 石油射孔弹爆轰波间叠加和干扰的研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2010.
- LI Yanpu. Study on superposition and interference between detonation waves of petroleum perforating projectiles [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2010.
- [23] 陆大卫. 油气井射孔技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012: 37.

编辑 刘述忍

第一作者简介:徐志国,男,1965年出生,硕士,高级工程师,1987年毕业于佳木斯工学院机械专业,现从事射孔器研发与制造工作。电话:0459-4699069,13339390930; Email: xuzhiguo@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。