

◀“973”计划专题▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2013.04.009

## 水力喷射侧钻径向微小井眼技术

黄中伟<sup>1</sup>, 李根生<sup>1</sup>, 唐志军<sup>2</sup>, 牛继磊<sup>3</sup>, 吴仲华<sup>2</sup>

(1. 油气资源与探测国家重点实验室(中国石油大学(北京)),北京 102249;2. 中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院,山东东营 257017;3. 中国石油大学(华东)石油工程学院,山东青岛 266580)

**摘要:**为了验证水力喷射侧钻径向微小水平井眼技术的可行性,在胜利油田进行了现场试验。测试研究了不同排量下的高压软管沿程压耗,并根据设计的多孔喷嘴,测试了该喷嘴的自进力。结果表明,高压软管内压耗较大,排量、前后向喷嘴流量比和井筒直径对喷嘴自进力影响较大,为施工时的水力参数设计及泵压预测提供了理论依据。在制定现场施工工艺的基础上,在胜利油田 J17-1 井进行了现场试验,在井深 861.5 和 864.8 m 处两个平面上共喷射钻出了 4 个孔眼,一个长度为 20 m,其余 3 个为 50 m,达到了预期目标。现场试验验证了连续油管水力喷射侧钻径向水平井系统的技术可行性,为老井改造和低渗油藏增产提供了一种新的技术途径。

**关键词:**水力喷射 连续油管 侧钻 微小井眼 现场试验

中图分类号:TE248 文献标识码:A 文章编号:1001-0890(2013)04-0037-05

## Technology of Hydra-Jet Sidetracking of Horizontal Micro-Radial Laterals

Huang Zhongwei<sup>1</sup>, Li Gensheng<sup>1</sup>, Tang Zhijun<sup>2</sup>, Niu Jilei<sup>3</sup>, Wu Zhonghua<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting (China University of Petroleum (Beijing)), Beijing, 102249, China; 2. Institute of Drilling Technology, Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong, 257017, China; 3. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong 266580, China)

**Abstract:** A field test was carried out in a vertical Well J17-1 in Shengli Oilfield to validate the feasibility of hydra-jet sidetracking of micro-radial laterals, which could provide guidance for further research. The pressure loss in flexible hose was tested at different flow rates, and the ejecting force of self-propelled multi-port nozzle was tested. The results showed that the pressure loss in flexible hose was high, and the flow rate, ratio of the flow rate of the forward to that of backward port of the jet nozzle, and the wellbore diameter had significant effects on ejecting force, which provided guidance for hydraulic parameters design and pump pressure prediction during operation. Four laterals, one 20 m long and the other three 50 m long, were drilled in two different layers—861.5 m and 864.8 m based on well selection and the designed operation procedures, meeting the desired goals. The field test proved the reliability of the hydra-jet sidetracking of horizontal micro-radial hole, which provided a new way for stimulation of depleted oil wells and low-permeability reservoirs.

**Key words:** hydraulic jetting; coiled tubing; sidetracking; micro-hole; field testing

微小井眼水平井适应性强,可以提高钻井效率、大幅度降低钻井成本<sup>[1]</sup>。连续油管过油管开窗侧钻水平井技术,是一种对老井进行改造增产的有效方法<sup>[2]</sup>。利用连续油管,通过特殊的转向设备侧钻径向水平井技术,可快速地在油藏的某一层位或多个层位沿径向钻出多个水平分支井眼<sup>[3]</sup>,有效防止水锥和气锥,既可用于新井的开发,又适合进行老井改造,有利于薄油层、低渗透油气藏以及煤层气的增产<sup>[4]</sup>。早期的径向水平井技术已经在国内外多个油

收稿日期:2013-03-10;改回日期:2013-06-12。

**作者简介:**黄中伟(1972—),男,山东东明人,1994 年毕业于石油大学(华东)石油工程专业,2006 年获中国石油大学(华东)油气井工程专业博士学位,教授,硕士生导师,主要从事油气井工程流体力学、完井增产技术方面的研究。

**联系方式:**(010)89733379,huangzw@cup.edu.cn。

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“深井复杂地层安全高效钻井基础研究”(编号:2010CB226700)和国家科技重大专项“低渗油气田高效开发钻井技术”(编号:20011ZX05022-002)资助。

田进行了现场试验和应用<sup>[5-16]</sup>,但首先要段铣掉一段套管,然后进行井下扩孔,为转向器的伸展提供空间。该技术需要在0.3 m的超短半径内完成由垂直到水平的转向<sup>[17]</sup>,前期准备工作较为繁琐,施工周期较长、风险较大。

在测试流体在高压软管的压耗、喷嘴自进力等参数的基础上,采用自行研制的水力喷射侧钻径向水平井装置<sup>[18]</sup>进行了现场试验,顺利钻出了4个孔眼。与早期的技术相比,水力喷射侧钻径向微小井眼技术不需要段铣套管和扩孔,简化了作业程序,提高了作业效率,降低了施工成本。

## 1 水力参数设计

### 1.1 喷嘴结构设计

多孔喷嘴的作用是在压差作用下将流体分化成多股射流,流体流经孔眼后加速,依靠多个喷孔空间排列规律,使组合射流形成轴向、径向和切向三维速度分量和能量分布。钻孔时在合适喷距的切削面上,多股组合射流以单股射流轴心为破岩基本点,逐渐扩大破岩面积,最终形成一定直径范围内面积连通的孔眼<sup>[19]</sup>。其主要的结构参数有:喷嘴后向孔眼直径 $d_1$ ,后向孔眼扩散角 $\beta$ ,前向中心孔眼直径 $d_2$ ,前向周围孔眼直径 $d_3$ ,前向孔眼扩散角 $\alpha$ (见图1)。

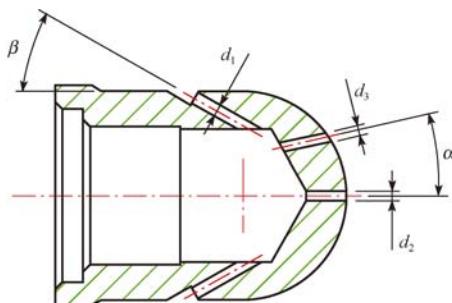


图1 多孔喷嘴结构

Fig. 1 Multi-port nozzle structure

设前向喷嘴当量直径为 $d_e$ ,前向喷嘴孔眼数为 $n$ ,且周向各孔眼直径相等,则有如下关系式:

$$md_1^2 = d_{e1}^2 \quad (1)$$

$$(n-1)d_3^2 + d_2^2 = d_{e2}^2 \quad (2)$$

式中: $m$ 为后向孔眼数; $d_1$ 为后向孔眼直径,mm; $d_{e1}$ 为后向孔眼当量直径,mm; $n$ 为前向喷嘴孔眼数; $d_2$ 为前向中心孔眼直径,mm; $d_3$ 为前向周围孔眼直径,mm; $d_{e2}$ 为前向孔眼当量直径,mm。

在中心孔眼直径以及前后流量比已知的情况下,根据式(1)和(2),可以确定出各孔眼直径的大小。

根据多孔喷嘴射流室内破岩实验<sup>[19]</sup>得出,扩散角 $\beta$ 取20°,孔眼数 $n$ 取6时(周围5个孔眼),可以达到良好的破岩效果。根据喷嘴自进力实验,喷嘴的正反流量比为2:3时,自进力可达120 N以上,因此在兼顾喷嘴的破岩效率和自进力大小的前提下,喷嘴的主要结构参数设计为:前向孔眼数量为5个,中心孔直径 $d_2=1.0$  mm,前向周围孔眼直径 $d_3=0.9$  mm, $\alpha=30^\circ$ ,后向均匀布置8个孔眼,直径 $d_1=1.0$  mm, $\beta=20^\circ$ 。

### 1.2 管汇沿程压耗测试

对高压软管的压耗和连续油管内的压耗进行了现场测试,测试方法为:将高压软管一端接柱塞泵出口并装有压力表,另一端放置于大气中,开泵后压力表所显示数值,就是这一段高压软管的压耗,对不同排量情况下的压耗进行测试,得出泵排量与单位长度高压软管压耗的关系曲线(见图2)。可以看出,随着排量的增大,单位长度高压软管的压耗近似呈线性增加,因此实际试验时设定的排量不宜过大。

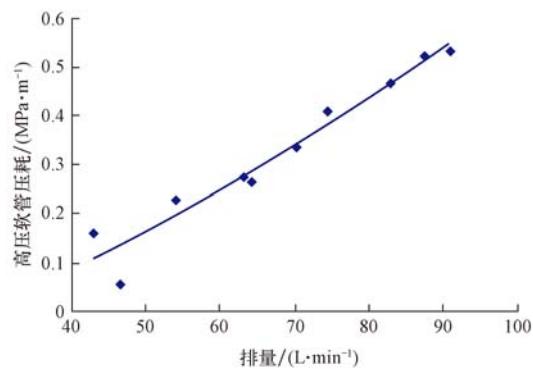


图2 高压软管压耗与排量的关系曲线

Fig. 2 Pressure loss vs. flow rate in flexible hose

施工时选择泵排量为60 L/min,按照以上方法测得该排量下4 000 m长的Φ25.4 mm连续油管的压耗为22 MPa。

### 1.3 喷嘴自进力测试

套管内转向径向水平井钻井技术采用高压软管作为钻杆,由于高压软管韧性较大、轴向力(即钻压)传递能力弱,从地面向井下送进较为困难。因此,采用自进式射流钻头带动高压软管向前钻进。自进式射流钻头是水力喷射侧钻径向微小井眼技术中的关键工具,既要完成破岩钻孔的任务,又要提供自进力,带动高压软管前进。通常,在自进式射流钻头上布置正向和反向孔眼,正向孔眼用于破岩钻孔,为射流钻头提供前进的通道;反向孔眼通过向后喷射流

体对射流钻头和高压软管产生向前的力,这个力就是射流钻头和高压软管的自进力。

采用自行研制的自进力测试装置(见图 3)进行多孔喷嘴自进力测试。实验台架固定于地面上,保证试验时模拟井筒不发生移动或转动。模拟井筒水平放置,并固定于实验台架上。多孔射流钻头与高压软管连接,放置于模拟井筒内,将拉力测试线一端连接于多孔射流钻头后端接头,另一端连接于拉力计上。拉力计固定于另一实验台架上,2 个实验台架高度相同,以确保拉力测试线水平。利用拉力计来测定自进式喷嘴的自进力大小。

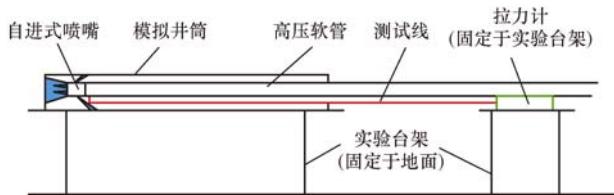


图 3 自进力测试装置

Fig. 3 Diagram of self-propelled force test apparatus

分别选取正反向流量比为 2:3, 1:2, 1:3 和 1:6 的射流钻头, 当正向喷距为 10 mm, 井筒直径为 49 mm 时, 自进力随着流量的增大而增大, 近似呈线性关系增大(见图 4)。在试验条件下, 流量从 0.71 L/s 增至 0.99 L/s, 4 种不同正反流量比下射流钻头所产生的自进力为 67.8~228.1 N。

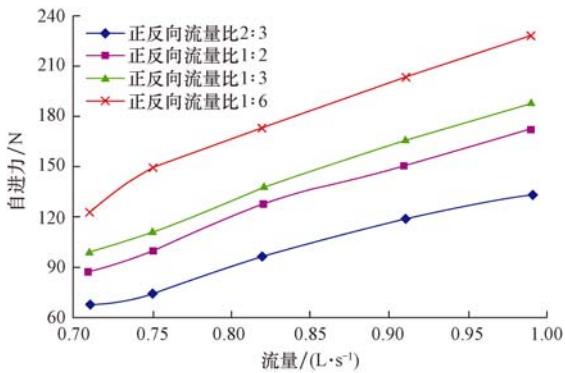


图 4 流量对自进力的影响规律

Fig. 4 Effect of flow rate on self-propelled force

图 5 为不同井眼直径条件下, 钻头自进力的测试结果。从图 5 可以看出, 井眼直径对自进力具有较大影响, 并存在一个较优的直径范围。井眼直径 30~50 mm 时的自进力要大于 50 mm 以上时的自进力, 这是因为井筒直径较小时, 正向射流冲击井底后形成的返流速度较快, 对射流钻头端面产生较大向后的推力, 故自进力相对较小; 自进力随着井眼直径的增大而减小, 是因为当井眼直径较大时, 井眼空

间变大, 反向射流的封隔能力减弱, 其降压效应变差, 因此自进力也减小。

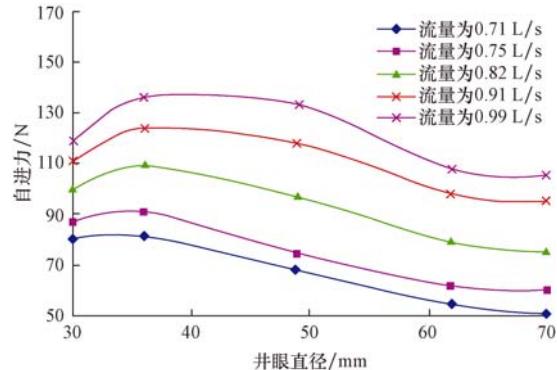


图 5 井眼直径对自进力的影响规律

Fig. 5 Effect of wellbore diameter on self-propelled force

## 2 现场试验

胜利油田 J17-1 井储层深度 860~870 m, 岩石薄片鉴定结果显示, J17-1 井储层岩石矿物以石英为主, 相对质量分数为 43%; 岩屑次之, 相对质量分数为 22%。胶结类型主要为孔隙式, 填隙物以泥质为主, 平均质量分数 11.7%。地层温度 48.3 °C, 地温梯度 3.9 °C/100m; 地层压力 8.35 MPa, 压力系数为 0.98, 属高温、常压稠油油藏。

根据 J17-1 井取心井常规物性分析结果,  $Ed_3^{363}$  层覆压孔渗压校正后平均孔隙度 35.9%, 平均渗透率 1 272 mD;  $Ed_3^{42}$  层覆压孔渗压校正后平均孔隙度 30.5%, 平均渗透率 225 mD;  $Ed_3^{43}$  层覆压孔渗压校正后平均孔隙度 35.4%, 平均渗透率 4 905 mD。可以看出,  $Ed_3^{363}$  和  $Ed_3^{43}$  小层的物性较好, 属于高孔高渗储层。

### 2.1 前期准备

J17-1 井侧钻径向水平井的所用的装备和工具主要有:  $\phi 25.4$  mm 连续油管作业机、柱塞泵(排量 60 L/min)、校深电测设备、方位电测设备、水泥车、水罐车、防喷设备;  $\phi 73.0$  mm 油管、油管短节、油管接箍、磨铣钻头、柔性轴、多孔射流钻头、转向器、油管锚、传感器和高压软管等(见图 6)。试验所用的工作液为添加有减阻剂的清水。

### 2.2 试验过程

1) 起出原井管柱, 打捞井内防砂管柱、冲砂、洗井、通井刮管至人工井底;

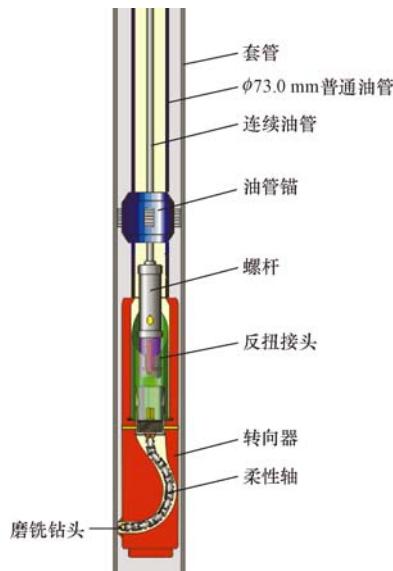


图 6 井下工具示意

Fig. 6 Schematic of downhole tools

- 2) 自下而上连接转向器+自配油管短节+定向接头+油管锚+1根油管+2 m 校深短节+Φ73.0 mm 油管柱, 确保转向器位置在井深 864.8 m 处;
- 3) 校深, 油管锚坐封锚定, 采用陀螺仪测方位;
- 4) 连接磨铣工具串(磨铣钻头+柔性轴+螺杆)+连续油管, 从 Φ73.0 mm 油管中下入到转向器位置, 控制连续油管下放速度 15~20 m/min;
- 5) 开泵, 泵排量 60 L/min 左右、泵压 30 MPa, 驱动螺杆带动磨铣钻头 30 min 钻开套管;
- 6) 起出连续油管及磨铣工具串, 更换磨铣钻头;
- 7) 连续油管下端连接带有喷嘴的高压软管, 边开泵边把软管下到转向器位置, 控制连续油管下放速度 10~15 m/min, 泵排量控制在 60 L/min 左右;
- 8) 控制连续油管送进速度约为 1 m/min, 每送进 1 m 上提连续油管 0.5~0.7 m, 反复划眼, 确保将岩屑清洗出孔眼;
- 9) 一个孔眼完成后, 起出带有高压软管的连续油管, 更换喷嘴;
- 10) 油管锚解封, 转动管柱, 改变转向器方位 90°, 重复上述过程;
- 11) 上提油管至井深 861.5 m, 重复 2 次喷射钻孔过程。

### 2.3 试验结果

按照施工设计, 在井深 861.5 和 864.8 m 两个平面上共完成 4 个径向水平井眼钻进, 每个平面钻 2 个孔眼, 井眼方位为 90° 和 180°。

通过前期地面试验可知, 磨穿套管时间大约为

15 min, 由于井下条件复杂, 为保证套管能被顺利磨穿, 设计套管磨铣时间为 60 min。地面试验时钻进速度约为 0.2 m/min, 所以现场试验时连续油管下放速度(即钻速)也控制在 0.2 m/min。由于首次进行连续油管径向水平钻井系统现场试验, 1 号径向水平井实际钻进长度为 20 m, 平均钻速为 0.23 m/min。2 号、3 号和 4 号径向水平井实际钻进长度均为 50 m, 平均钻速分别为 0.21, 0.19 和 0.20 m/min(见表 1)。

表 1 试验井径向水平井眼基本参数

Table 1 Wellbore parameters of horizontal micro-hole

径向分支 井眼	井深/ m	方位/ (°)	套管磨铣 时间/min	喷射钻进 时间/min	井眼长度/ m
1	864.8	90	60	93	20
2	864.8	180	60	229	50
3	861.5	90	60	236	50
4	861.5	180	60	247	50

### 3 结论与建议

1) 在试验条件下, 连续油管水力喷射侧钻径向水平井高压软管的压耗, 随排量的增大呈近似线性增大, 自进式射流钻头的自进力随流量的增大、喷嘴正反流量比的减小而增大, 井筒直径为 30~50 mm 时, 产生的自进力较大。

2) 胜利油田 J17-1 井现场施工表明, 连续油管水力喷射侧钻径向水平井系统可以满足在不同层位和方位快速钻出长达 50 m 径向微小水平井眼的要求, 可以为老井改造和稠油开发提供一种新的钻井手段。

3) 建议针对不同井深对连续油管和高压软管规格尺寸进行优选, 对射流钻头结构参数进行优化设计, 以最大限度地利用水力能量提高水平井眼的延伸能力。

### 参 考 文 献

#### References

- [1] 陈朝伟, 周英操, 申瑞臣, 等. 微小井眼钻井技术概况、应用前景和关键技术[J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(1): 5~9.  
Chen Zhaowei, Zhou Yingcao, Shen Ruichen, et al. Overview, application prospects and critical technologies of micro hole drilling technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32(1): 5~9.

- [2] 朱丽华,陈新,黄焰. 连续油管开窗侧钻水平井技术[J]. 钻采工艺,2002,25(3):19-22.  
Zhu Lihua, Chen Xin, Huang Yan. Technology of coiled tubing drilling in horizontal sidetracking [J]. Drilling & Production Technology, 2002, 25(3):19-22.
- [3] 施连海,李永和,郭洪峰,等. 高压水射流径向水平井钻井技术[J]. 石油钻探技术,2001,29(5):21-22.  
Shi Lianhai, Li Yonghe, Guo Hongfeng, et al. Radial horizontal drilling techniques with high pressure water jet [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2001, 29(5):21-22.
- [4] 侯玉品,张永利,章梦涛,等. 超短半径水平井开采煤层气的探讨[J]. 河南理工大学学报:自然科学版,2005,24(1):46-49.  
Hou Yupin, Zhang Yongli, Zhang Mengtao, et al. Inquiry into gas mining with ultrashort radial system [J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science, 2005, 24(1): 46-49.
- [5] 董秀军,冯云春,张全胜. 超高压射流破岩规律在钻头设计上的应用[J]. 石油钻探技术,2007,35(4):67-69.  
Dong Xiujun, Feng Yunchun, Zhang Quansheng. Application of rule of ultra-high pressure water jet on rock-cutting to bit design [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(4):67-69.
- [6] Dickinson W, Anderson R R, Dickinson R W. The ultrashort-radius radial system[J]. SPE Drilling Engineering, 1989, 4(3): 247-254.
- [7] Raúl Andrés Cirigliano, Juan Felipe Talavera Blacutt. First experience in the application of radial perforation technology in deep wells[R]. SPE 107182, 2007.
- [8] Stanislav Ursegov, Alexander Bazylev, Evgeny Taraskin. Design and initial performance of pilot cyclic steam stimulations of vertical wells with radial horizontal bores in low-permeable heavy oil carbonates[R]. SPE 115125, 2008.
- [9] 史怀忠,李根生,张浩,等. 塔河油田深井脉冲空化射流钻井试验研究[J]. 石油钻探技术,2013,41(3):85-88.  
Shi Huaizhong, Li Gensheng, Zhang Hao, et al. Experimental study on hydraulic pulsed and cavitating jet drilling technique in deep wells of Tahe Oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(3):85-88.
- [10] 吴德元,沈忠厚. 一种新型高压水力喷射径向水平钻井系统[J]. 石油大学学报:自然科学版,1994,18(2):128-130.  
Wu Deyuan, Shen Zhonghou. An ultrashort radius radial horizontal drilling system[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1994, 18(2):128-130.
- [11] 杨永印,沈忠厚,王瑞和,等. 径向水平钻进技术试验研究[J]. 石油钻探技术,1998,26(1):4-8.  
Yang Yongyin, Shen Zhonghou, Wang Ruihe, et al. Experimental studies on radial horizontal drilling technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 1998, 26(1):4-8.
- [12] 白艳明,刘鹏,刘明君. 应用水力深穿透技术缩短驱替距离[J]. 断块油气田,2011,18(3):406-408.  
Bai Yanming, Liu Peng, Liu Mingjun. Application of hydraulic deep-penetration technology in shortening displacement distance [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(3):406-408.
- [13] Li Yonghe, Wang Chunjie, Shi Lianhai. Application and development of drilling and completion of the ultrashort-radius radial well by high pressure jet flow techniques [R]. SPE 64756, 2000.
- [14] 倪益民,袁永嵩,赵金海,等. 胜利油田两口超短半径侧钻水平井的设计与施工[J]. 石油钻探技术,2007,35(6):57-59.  
Ni Yimin, Yuan Yongsong, Zhao Jinhai, et al. Design and implementation of two ultra-short radius side-tracking horizontal wells in Shengli Oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(6):57-59.
- [15] 马开良,吴福才,杨永印,等. 径向井技术在韦 5 井的应用[J]. 钻采工艺,2005,28(5):17-20.  
Ma Kailiang, Wu Fucai, Yang Yongyin, et al. Application of radial horizontal drilling technology in W5 Well [J]. Drilling & Production Technology, 2005, 28(5):17-20.
- [16] 林凤波,尚庆春,薛玲,等. 水力开窗径向水平孔技术研究与试验[J]. 石油钻探技术,2002,30(5):25-26.  
Lin Fengbo, Shang Qingchun, Xue Ling, et al. Research and experiments on cutting windows by water-jetting techniques [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2002, 30(5):25-26.
- [17] Dickinson W, Dickinson R W. Horizontal radial drilling system[R]. SPE 13949, 1985.
- [18] 李根生,黄中伟,沈忠厚,等. 水力喷射侧钻径向分支井眼的方法及装置:中国,101429848A[P]. 2009-05-13.  
Li Gensheng, Huang Zhongwei, Shen Zhonghou, et al. The method and apparatus for drilling radial horizontal holes by high-pressure water jet: China, 101429848A[P]. 2009-05-13.
- [19] 廖华林,牛继磊,程宇雄,等. 多孔喷嘴破岩钻孔特性的实验研究[J]. 煤炭学报,2011,36(11):1858-1862.  
Liao Hualin, Niu Jilei, Cheng Yuxiong, et al. Experiment study on water jet breaking rock by multi-orifice nozzle [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(11):1858-1862.

[编辑 滕春鸣]