

## 组合射流 PDC 钻头试验研究

杨永印<sup>1</sup>, 牛似成<sup>2</sup>, 徐希强<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东东营 257061; 2. 中国石化华北分公司工程技术研究院, 河南郑州 450006; 3. 中国石化胜利石油管理局黄河钻井五公司, 山东东营 257513)

**摘要:**为了将不同射流方式应用于PDC钻头以改变井底流场,并给钻头提供设计依据,通过数值模拟和室内试验分析了反向射流对井底流场的影响规律,并对旋转射流的破岩能力进行了评价。结果表明:PDC钻头加装反向射流喷嘴之后,钻头破岩部位压力降低,并且压降随着反向射流喷嘴距钻头底部距离的增大而减小,随反向射流流量的增大而增大,上部钻井液液柱压力对压降影响不大;在相同压降或排量下,旋转射流较普通直射流有更好的破岩能力。根据试验结论研制出了反向射流与旋转射流组合的PDC钻头,并在坨747井进行现场试验。结果表明,坨747井采用组合射流PDC钻头后,与采用普通PDC钻头的邻井相比,钻速提高40%以上。这表明,将反向射流和旋转射流组合应用于PDC钻头,可以明显提高机械钻速。

**关键词:**组合射流 PDC 钻头 数值模拟 机械钻速 坨747井

**中图分类号:**TE921 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2012)05-0100-06

## Experimental Study of Combined-Jet PDC Bit

Yang Yongyin<sup>1</sup>, Niu Sicheng<sup>2</sup>, Xu Xiqiang<sup>3</sup>

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Dongying, Shandong, 257061, China; 2. Engineering and Technology Research Institute, North China Branch, Sinopec, Zhengzhou, Henan, 450006, China; 3. Yellow River Drilling Company No. 5 Branch, Shengli Petroleum Administration, Dongying, Shandong, 257513, China)

**Abstract:** In order to apply different jet modes to PDC bits, numerical simulation and laboratory tests had been done to study the bottom-hole flow field affected by reverse jet. Rock breaking ability of swirling jet in the laboratory was evaluated, which could provide basis for bit design. The results showed that obvious pressure declined at rock breaking with backward jet nozzles on PDC. As the distance between reverse jet nozzle outlet and bit bottom decreased, and reverse flow rate increased and the degree of pressure drop increases at bottom holes. The pressure of drilling fluid column pressure had little effect on the pressure drop. Compared with conventional jet, swirling jet had better rock breaking ability at the same pressure drop and flow rate. According to the test results, a new combined-jet PDC bit, joining reverse jet and swirling jet, was developed and used on Well Tuo 747. The test results showed that it could improve ROP by more than 40% compared with the neighboring wells using conventional PDC bits. It was proved that the combination of reverse jet and swirling jet on PDC bit can improve ROP remarkably.

**Key words:** combined jet; PDC bit; numerical simulation; penetration rate; Well Tuo 747

利用射流的方式改变井底流场,促进岩屑破碎、脱离、上返,避免重复破碎,一直是提高钻速研究的一条重要途径。中国石油大学高压水射流中心利用水力脉冲空化射流取得了很好的效果<sup>[1-4]</sup>。美国 Chevron 石油公司采用非对称的喷嘴结构,改变井底的流场和压力分布,现场试验表明,该喷嘴结构机械钻速可提高20%以上<sup>[5]</sup>。当前,将反向射流、旋转射流和横向射流应用于钻头是改变井底流场的研究趋势之

**收稿日期:**2011-12-06; **改回日期:**2012-08-27。

**作者简介:**杨永印(1962—),男,山东东平人,1985年毕业于华东石油学院钻井工程专业,2003年获石油大学(北京)博士学位,教授,从事油气井工程流体力学与工程、高压水射流理论与技术及工程应用等教学与研究工作。

**联系方式:**(0546)8391672, yangyy@upc.edu.cn。

**基金项目:**中央党校基本科研业务费专项资金资助项目“调制钻头流场降低井底压力机理研究”(编号:09CX04017A)部分研究内容。

一。英国史科特油田采用横向射流钻头, 钻速提高了 20% 左右<sup>[6]</sup>。反向射流在钻头的应用目前仍处于室内试验阶段。对旋转射流特性研究较多, 但较少将其应用于 PDC 钻头。为此, 笔者研究了反向射流压降特性和旋转射流破岩特性, 将其应用于 PDC 钻头, 研制出组合射流 PDC 钻头, 并进行了现场试验。

## 1 反向射流数值模拟及室内试验

反向射流与常规井底射流方向相反, 产生于 PDC 钻头的侧面, 通过在 PDC 钻头主体或刀翼上加装反向喷嘴(见图 1)产生。反向射流利用射流泵的原理, 即抽吸井底流体使井底局部压力降低, 减小井底压差, 从而促进岩屑脱离井底并加速上返, 避免重复破碎, 最终实现提高钻速的目的。影响反向射流压降效果的主要参数为反向射流所占流量比、反向喷嘴距井底的位置、上部液柱压力、以及钻头与井壁的间隙<sup>[7-8]</sup>。笔者主要针对这几个参数进行研究。

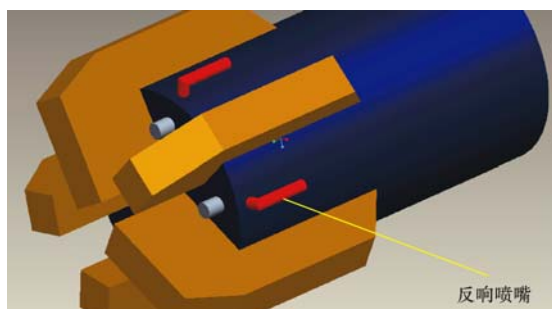


图 1 反向射流钻头物理模型

Fig. 1 Physical model of reverse jet bit

### 1.1 反向射流数值模拟

#### 1.1.1 物理模型及网格划分

建立反向射流钻头的物理模型(见图 1), 并对井底流场进行网格划分(见图 2), 因为流道结构复

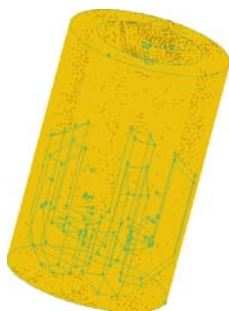


图 2 井底流场网格划分

Fig. 2 Meshing of bottom-hole flow field

杂, 所以采用了四面体网格。

#### 1.1.2 数学计算模型及模拟条件

PDC 钻头井底流场数学计算模型采用黏性  $k-\epsilon$  双方程紊流模型。

模拟条件: 入口边界条件设定为入口速度, 入口速度为 119.4 m/s; 出口边界条件为出口压力, 其值与上部液柱压力相同; 壁面条件为壁面, 无滑移无渗透。

#### 1.1.3 数值模拟结果及分析

运用 Fluent 软件对网格化的井底流场模型进行数值模拟, 得到井底的速度场和压力场。井底压降为井底压力与最初设定出口压力差。将井底压降与钻头压降的比值定义为无因次压降。图 3—6 为反向喷嘴距井底距离、流量比、围压和钻头与井壁间隙对无因次压降影响的模拟结果。图 4—6 中, 流量比是指向上的反向射流流量与向下的射流流量的比值, 围压是指上部钻井液液柱压力。钻头与井壁的间隙为 0 的情况在实际中并不会出现, 取用该点数

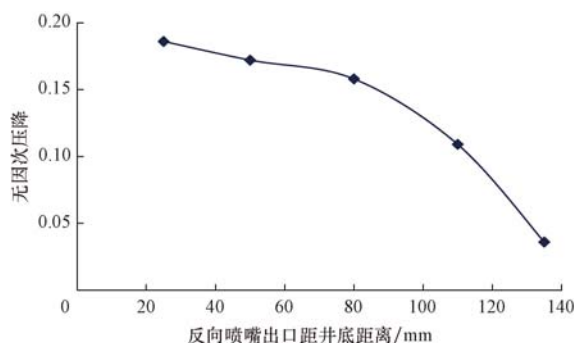


图 3 反向喷嘴距井底距离与无因次压降的关系

Fig. 3 Effect of reverse nozzle position on decrease of non-dimensional bottom-hole pressure

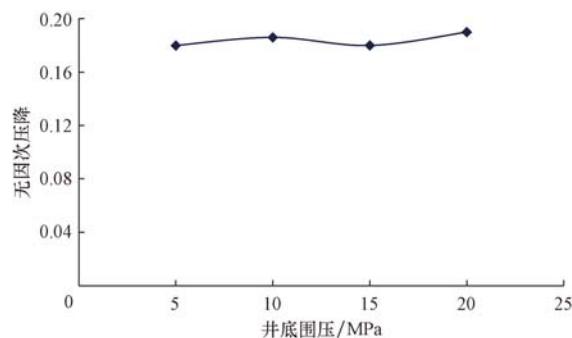


图 4 围压与无因次压降的关系

Fig. 4 Effect of confining pressure on decrease of non-dimensional bottom-hole pressure

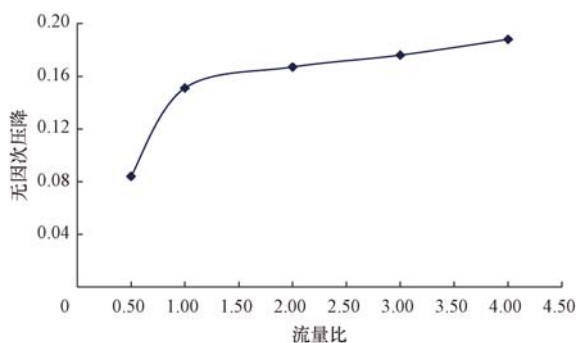


图5 流量比与无因次压降的关系

Fig. 5 Effect of flow ratio on decrease of bottom-hole pressure

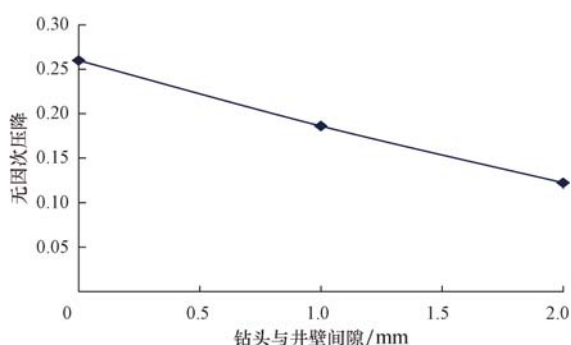


图6 钻头与井壁间隙对无因次压降的影响

Fig. 6 Effect of distance between bit and well on decrease of non-dimensional bottom-hole pressure

据是为了对比间隙增大对井底压降的影响程度。

从图3—6可以看出:反向喷嘴距井底越近,井底压降越大;流量比越大,井底压降越大;围压对井底压降的影响不大;钻头与井壁的间隙越小,井底压降越大。

## 1.2 室内试验验证

为验证数值模拟结果的准确性,设计了试验装置(见图7)和试验钻头(见图8)进行试验验证。

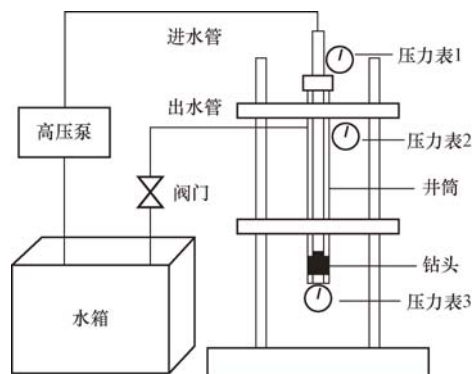


图7 试验装置

Fig. 7 Experiment setup



图8 试验钻头

Fig. 8 Experiment bit

图7中,压力表1测量泵压,压力表2测量围压,即实际钻井过程中的上部钻井液液柱压力,压力表3测量井底压力,中间压力表2与压力表3的差值即为井底压降。试验钻头设计了4个反向射流喷嘴及流道,通过改变反向喷嘴的数量及长度来模拟反向射流流量和反向喷嘴位置的变化。试验过程中钻头压降设为2 MPa。试验结果见图9—12。

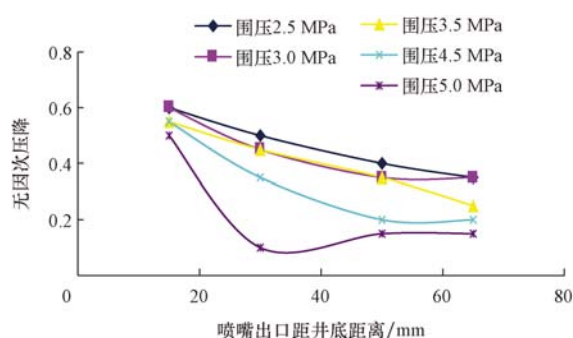


图9 不同围压下喷嘴出口距井底距离对井底压降的影响

Fig. 9 Effect of reverse nozzle position on decrease of bottom-hole pressure under different confining pressure

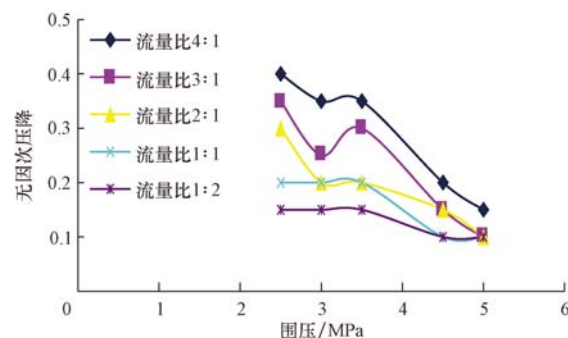


图10 不同流量比下围压对井底压降的影响

Fig. 10 Effect of confining pressure on decrease of bottom-hole pressure under different flow rate

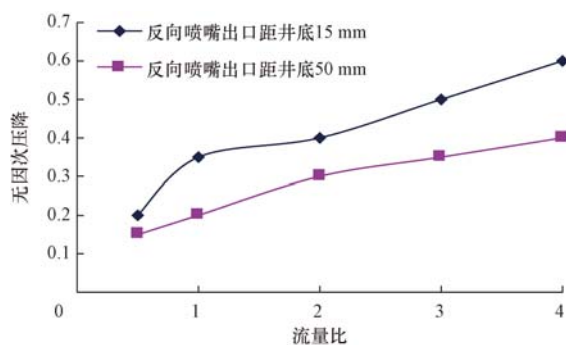


图 11 不同喷嘴位置下流量比对井底压降的影响

Fig. 11 Effect of flow ratio on decrease of bottom-hole pressure under different nozzle position

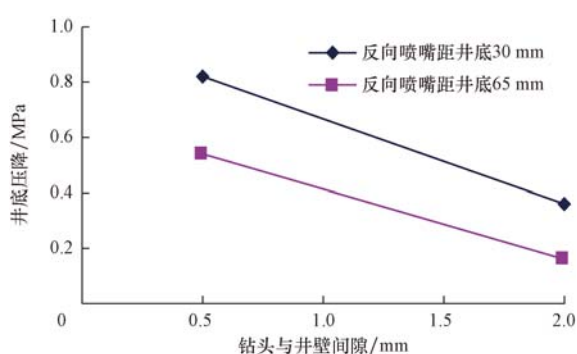


图 12 钻头与井壁间隙对井底压降的影响

Fig. 12 Effect of distance between bit and well on bottom-hole pressure

由图 9—12 可以看出:1)井底压降随围压增大而减小,反向射流流量越大减小的程度越明显;2)井底压降随反向喷嘴距井底距离的增大而减小;3)井底压降随反向流量的增大而增大;4)井底压降随钻头与井壁间隙的增大而减小。

数值模拟和室内试验结果对比发现:围压对井底压降的影响随着流量比的增大而增大,流量比低时影响不明显,与数值模拟结果一致;反向喷嘴距钻头底部距离、流量比和钻头与井壁间隙对井底压降的影响规律基本吻合。因此,可根据以上 3 个参数设计反向喷嘴的位置、直径、数量等,为反向喷嘴在钻头上的应用提供依据。

## 2 旋转射流破岩评价试验

国内外有很多学者对旋转射流进行过研究,其较强的扩散性和切向流动能力为清洗和冲蚀提供了良好的保障<sup>[9-13]</sup>。笔者通过破岩试验来验证旋转射流的各项能力,为将其应用于钻头提供依据。该试验分 2 个方面,分别是相同排量和相同喷嘴压降下

旋转射流和普通直射流的破岩效果对比。

### 2.1 相同排量

试验岩样采用水泥和砂按质量比 1:3 压制成的岩样,其抗压强度 42 MPa,其力学性质相当于中硬砂岩。采用 28 mm 喷嘴,以 160 L/min 排量冲蚀 4 min。由于旋转射流喷嘴流量系数小于直射喷嘴,旋转射流的喷嘴压降约为 9.5 MPa,高于直射流的喷嘴压降(约 7.2 MPa)。旋转射流和直射流破岩效果对比情况见表 1。

表 1 相同排量下旋转射流与直射流破岩效果对比

Table 1 Performance of nozzles at the same discharge rate

射流类型	破碎直径/mm	破碎深度/mm	破碎体积/mL
旋转射流	47.6	21	25
直射流	15	13	5

从表 1 可看出,在相同排量和喷嘴下,旋转射流破碎直径是直射流的 3 倍多,破碎体积为直射流的 5 倍。

### 2.2 相同压降

采用与上面相同的岩样,旋转射流和直射流喷嘴压降同为 7.0 MPa,采用 28 mm 喷嘴,冲蚀 5 min,破岩效果见图 13。

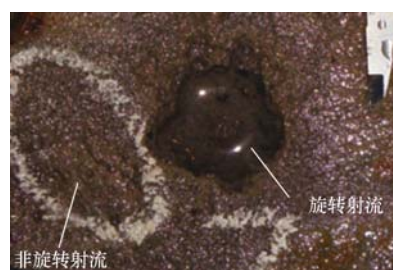


图 13 相同喷嘴压降下旋转射流和普通直射流破岩效果

Fig. 13 Rock breaking effects of swirling jet and conventional jet at the same nozzle pressure drop

由图 13 可看出,直射流的冲击区域无明显冲蚀痕迹,旋转射流冲击区域有破碎坑。这说明,旋转射流破岩的门限压力低于直射流,这与叶轮导向式旋转射流的破岩特点相同。由 2 组对比试验结果可明显看出,旋转射流比普通直射流具有更加良好的冲击力和扩散性。

## 3 组合射流钻头样机制造

根据前面研究的反向射流对井底流场的影响规



律和旋转射流的破岩评价试验,设计出组合射流 PDC 钻头样机(见图 14)。



图 14 组合射流 PDC 钻头喷嘴分布

Fig. 14 Nozzle distribution on combined-jet PDC bit

该钻头样机在钻头的两侧设计了 2 个反向喷嘴,并安装在刀翼的上侧(安装在刀翼之间会阻碍岩屑的及时排除,太过靠近井底抽吸力太大易形成泥包)。在井底喷嘴设计中,每两个刀翼之间设计一个旋转射流喷嘴,使旋转射流能够发挥其最大的功效,又不会使 2 个相邻的旋转射流喷嘴射流互相干扰,使岩屑流动复杂化。

## 4 现场试验

钻头样机在坨 747 井进行了现场试验。坨 747 井位于济阳凹陷东营凹陷坨-胜-永断裂带胜北大断层下降盘坨 747 砂体。试验井段 2 133.00 ~ 2 574.00 m,该井段的钻时和钻速曲线见图 15。

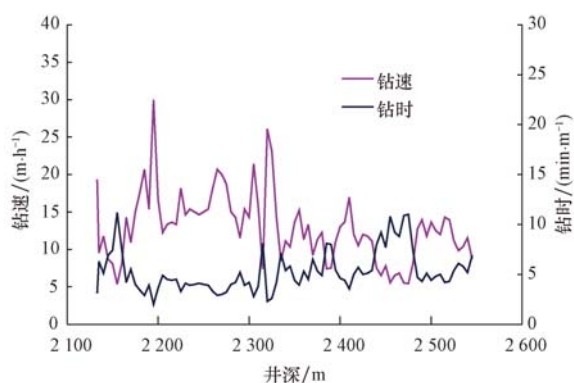


图 15 坨 747 井试验井段钻时钻速曲线

Fig. 15 Curves of drilling time and rate of penetration for Well Tuo 747

从图 15 可看出,组合射流 PDC 钻头钻进平稳,钻时在 5 min/m 左右,钻速大于 10 m/h,最大钻速可达 30 m/h。

坨 747 井试验井段的平均机械钻速为 11.38 m/h。邻井坨 128-70 井和坨 128-48 井相同层段采用的是普通 PDC 钻头,其平均机械钻速分

别是 7.90 和 7.49 m/h。与邻井坨 128-70 井和坨 128-48 井相比,坨 747 井机械钻速分别提高了 44.05% 和 52.34%。

## 5 结论及建议

1) 数值模拟和室内试验表明,反向射流应用于 PDC 钻头可有效降低井底局部压力,旋转射流比普通直射流具有更强的破岩冲蚀能力。

2) 将反向射流和旋转射流组合应用于 PDC 钻头,可明显提高机械钻速。

3) 反向射流与旋转射流的最佳流量比尚需进行进一步研究,以便在提高钻速的同时,尽可能延长钻头的使用寿命。

## 参考文献

### References

- [1] 张志云,李根生,史怀忠,等.超深井水力脉冲空化射流钻井试验研究[J].石油钻探技术,2009,37(4):11-14.  
Zhang Zhiyun, Li Gensheng, Shi Huaizhong, et al. Experiment study on ultra-deep well hydraulic pulsating cavitating water jet drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(4): 11-14.
- [2] 史怀忠,李根生,沈忠厚,等.水力脉冲空化射流发生器配合 Power V 防斜打快技术[J].石油钻探技术,2009,37(1):14-17.  
Shi Huaizhong, Li Gensheng, Shen Zhonghou, et al. Application of hydraulic pulsation-cavitating generator with Power V system in Well Fengcheng 1[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(1): 14-17.
- [3] 李根生,沈忠厚.高压水射流理论及其在石油工程中应用研究进展[J].石油勘探与开发,2005,32(1):96-99.  
Li Gensheng, Shen Zhonghou. Advances in researches and applications of water jet theory in petroleum engineering[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(1): 96-99.
- [4] 王学杰,李根生,康延军,等.利用水力脉冲空化射流复合钻井技术提高钻速[J].石油学报,2009,30(1):117-120.  
Wang Xuejie, Li Gensheng, Kang Yanjun, et al. Improvement of penetration rate with hydraulic pulsation-cavitation jet compound drilling technology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 117-120.
- [5] Veenhuizen S D, Kolle J J, Rice C C, et al. Ultrahigh pressure jet assist of mechanical drilling[R]. SPE/IADC 37579, 1997.
- [6] 吴彬,周永霞.横向喷射水力学与椭圆切削齿技术相结合提高 PDC 钻头性能[J].国外石油机械,1998,9(2):17-22.  
Wu Bin, Zhou Yongxia. Improving the property of PDC bit with lateral-jet hydraulics and ellipse cutting teeth technique [J]. Foreign Petroleum Machine, 1998, 9(2): 17-22.
- [7] 孙伟良.钻头分流降低井底压力的研究[D].东营:中国石油大

- 学(华东)石油工程学院,2009.
- Sun Weiliang. Mechanism study on the bottom-hole pressure reduction by drilling fluid shunt on bit[D]. Dongying: China University of Petroleum (Huadong), School of Petroleum Engineering, 2010.
- [8] 葛鹏飞. PDC 钻头横向射流流场的实验研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东)石油工程学院, 2007.
- Ge Pengfei. The experimental study on PDC bit lateral-jet flow field[D]. Dongying: China University of Petroleum (Huadong), School of Petroleum Engineering, 2007
- [9] 杨永印, 裴建忠, 孙伟良, 等. 利用射流改进井底流场的研究: 2010 年钻井基础理论与前沿技术开发新进展学术研讨会, 成都, 2010-10-24-26 [C].
- Yang Yongyin, Pei Jianzhong, Sun Weiliang, et al. Research on mechanism of improving bottom hole flow field by using jet: 2010 Basic Drilling Theory and New Development of Frontier Technology Conference Papers, Chengdu, October 24-26, 2010 [C].
- [10] 杜玉昆, 王瑞和, 艾飞, 等. 切向注入式旋转射流喷嘴携岩能力研究[J]. 钻采工艺, 2008, 31(6): 14-16.
- Du Yukun, Wang Ruihe, Ai Fei, et al. Study on cuttings-carrying capability of a tangential injection type of swirl jet nozzle[J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31(6): 14-16.
- [11] 王瑞和, 周卫东, 沈忠厚, 等. 旋转射流破岩钻孔机理研究[J]. 中国安全科学学报, 1999, 9(增刊 1): 1-5.
- Wang Ruihe, Zhou Weidong, Shen Zhonghou, et al. Study on mechanism of rock-breaking by swirling water jet[J]. China Safety Science Journal, 1999, 9(supplement 1): 1-5.
- [12] 曲洪娜, 黄中伟, 李根生, 等. 水平井旋转射流冲砂洗井水力参数设计[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(6): 39-43.
- Qu Hongna, Huang Zhongwei, Li Gensheng, et al. Hydraulic parameters of sand-flushing with rotating jets in horizontal well[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(6): 39-43.
- [13] 马清明, 王瑞和. 井底反向射流辅助破岩机理分析[J]. 钻采工艺, 2008, 31(1): 44-45, 65.
- Ma Qingming, Wang Ruihe. Mechanism analysis of bottom-hole reverse jet assist rock failure[J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31(1): 44-45, 65

## 关于稿件的几点要求

为了方便石油工程界的技术及管理人员投稿,并进一步加快稿件处理速度,缩短论文发表周期,从 2008 年 12 月 1 日起,本刊网上投稿审稿系统(在线办公系统)正式启用。现对所投稿件提出几点要求,请广大作者理解和支持。

1) 文章题目力求简洁、明了、切实。作者署名一般不超过 5 人,其余人员可以附言形式注明。将文章题目、作者姓名及所在单位名称译成英文。

2) 摘要 300~500 字,反映文章的主要论点和结论等,并译成英文。

3) 初选 3~5 个关键词。

4) 正文一般不超过 8 000 字。要求:主题突出,层次清楚;文字精炼,语句通顺;数据准确,文责自负。公式符号应分清语种、大小写、上下角、正斜体,易混淆的要注明,建议使用公式编辑器。图表要有中英文的表名和图名。

5) 参考文献请按照国家标准《GB 7714—2005 参考文献著录格式》(该标准可以从网上下载)可以要求著录,中文参考文献著录成中英文对照的形式。

6) 作者简介包括:出生年份,性别,籍贯,毕业(进修)时间及学校、专业,主要经历、成就及现任职务。

7) 本刊编辑部严禁一稿两投、一稿多发,一旦发现,会影响投稿者的信誉,将很难再在本刊刊发论文。

8) 请注明联系人详细通讯地址、电话(包括手机)、电子信箱等信息(论文最后注明)。

9) 请从网上投稿,本刊网站: <http://www.syzt.com.cn>; 联系电话: 010 - 84988356, 84988357, 84988317; 联系邮箱: [syzt@vip.163.com](mailto:syzt@vip.163.com)。

10) 如果稿件内容为自然科学基金、“863”计划、“973”计划或省部级以上科研项目,请务必在文章最后注明项目名称及编号。

《石油钻探技术》编辑部