

叶轮式旋转射流喷嘴的射流特性研究

牛似成¹, 王 翔¹, 杨永印²

(1. 中国石化华北分公司工程技术研究院, 河南郑州 450006; 2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东东营 257061)

摘 要:为提高 PDC 钻头钻进水平段时的井底射流辅助破岩能力, 开展了叶轮式旋转射流喷嘴的射流特性研究。利用 $k-\epsilon$ 双方程标准湍流模型, 对叶轮式旋转射流流场进行了数值模拟, 并采用旋流强度和流量系数评价了射流破岩能力。数值模拟结果表明, 叶片扭曲角为 $115^{\circ}\sim 140^{\circ}$ 、直柱段无因次长度为 $0.6\sim 0.8$ 、收缩角为 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 时, 流量系数和旋流强度可取得最佳值, 射流破岩能力最强。根据不同喷嘴距下的旋转射流破岩试验结果, 分析了叶轮式旋转射流喷嘴的破岩特性, 结果表明, 同压降下叶轮式旋转射流破岩直径是普通直射流的近 3 倍, 且喷嘴在 7~11 倍喷嘴出口直径时破岩直径最大。研究结果表明, 叶轮式旋转射流喷嘴的破岩能力优于普通直射流喷嘴, 且通过优化叶轮式旋转射流喷嘴几何参数可提高其破岩能力, 加强井底清岩和辅助破岩效果, 提高 PDC 钻头的破岩效率。

关键词:喷嘴 旋转射流 旋流强度 流量系数 数值模拟 几何模型 破岩效率

中图分类号:TE248 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2013)06-0110-05

Jet Characteristics of Impeller Swirling Jet Nozzle

Niu Sicheng¹, Wang Xiang¹, Yang Yongyin²

(1. Engineering and Technology Research Institute, Sinopec Huabei Branch Company, Zhengzhou, Henan, 450006, China; 2. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Dongying, Shandong, 257061, China)

Abstract: In order to improve bottom-hole jet-assisted rock breaking ability while drilling horizontal section with PDC bit, the characteristics of impeller swirling jetting were studied. Using $k-\epsilon$ standard turbulent flow equation, the impeller swirling jetting flow field was simulated. The swirling intensity and discharge coefficient were used to evaluate rock breaking capacity. Numerical simulation results showed that the discharge coefficient and swirling intensity were optimal under the condition of blade twist angle $115^{\circ}\sim 140^{\circ}$, dimensionless length of straight tube $0.6\sim 0.8$, and the falloff angle $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$, and the jet rock-breaking ability is the strongest. Those rock breaking tests showed that the hole diameter of impeller swirling jet was three times of that of straight jet under the same pressure drop, and the hole diameter was the maximum when the standoff distance was 7~11 times that of nozzle diameter. The studies above indicated that rock-breaking ability of impeller swirling jet was better than that of straight jet, and the rock breaking ability could be improved with the optimization of nozzle geometrical parameters. All these means could enhance bottom-hole rock cleaning and breaking effect, and also improve drilling efficiency of PDC bits.

Key words: nozzle; swirling jet; swirling intensity; flow coefficient; numerical simulation; geometric model; rock breaking

水平井水平段钻进速度一般比较低, 而水力射流辅助破岩钻进技术是提高钻井速度的有效途径之一^[1]。目前, 采用 PDC 钻头钻进水平段时采用普通直射流清洗井底, 清岩和辅助破岩能力有限, 极大地限制了钻速的提高。理论和试验研究表明^[2-5], 旋转射流具有较强的切向速度和径向速度, 在大幅增加

收稿日期: 2013-02-21; 改回日期: 2013-11-01。

作者简介: 牛似成(1987—), 男, 山东沂水人, 2009 年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业, 2012 年获中国石油大学(华东)油气井工程专业硕士学位, 助理工程师, 主要从事钻井、完井优化设计及油气井流体力学方面的研究。

联系方式: (0371)86001382, niusicheng@126.com。

清洗面积的同时提高了破岩能力,能够提高钻井速度。目前,国内外很多学者对旋转射流进行了研究,对旋转射流特性的了解也较为深入,但很少用来改进 PDC 钻头的井底流场^[6-8]。为此,基于叶轮式旋转射流喷嘴,参照 PDC 钻头喷嘴的特点^[10-13],通过优化喷嘴几何参数改进了射流流场。

1 叶轮式旋转射流流场数值模拟

叶轮式旋转射流喷嘴主要由喷嘴外壳和叶轮构成,流体进入喷嘴后,沿螺旋叶片流动具有了切向速度和径向速度,经收缩段和直柱段射出时,形成旋转射流。叶轮式旋转射流喷嘴独特的几何结构是产生旋流的根本原因,利用数值模拟软件对其主要几何参数进行了研究,用旋流强度和流量系数来表征射流特性,并用其评价流场优劣。

1.1 旋流强度和流量系数

旋流强度是表征流场旋转程度的量。旋流强度越大,则流场的旋转程度越强,射出的流体对岩石的横向剪切作用越明显。射流的旋流强度,以喷嘴出口处为基准,通过计算该处横截面的最大切向速度和轴向速度获得^[4]:

$$S = W_{\max}/U_{\max} \quad (1)$$

式中: S 为旋流强度; W_{\max} 为最大切向速度, m/s ; U_{\max} 为最大轴向速度, m/s 。

流量系数作为钻井水力参数设计中的一个重要参数,能够综合反映流体通过喷嘴时所受阻力的影响。在喷嘴出口处雷诺数超过某一临界值时,流量系数主要与喷嘴流道的形状和流体黏性有关^[1]。将数值模拟中设定的喷嘴压降和喷嘴出口平均轴向速度,代入式(2),可计算出流量系数。

$$\begin{cases} Q_a = CQ_t \\ \Delta p = \frac{1}{2} \rho U_t^2 \\ (Q_a, Q_t) = \pi D^2 (U_a, U_t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: Q_a 为实际流量, L/s ; Q_t 为理论流量, L/s ; U_a 为喷嘴出口处的实际平均轴向速度, m/s ; U_t 为喷嘴出口处的理论平均轴向速度, m/s ; Δp 为喷嘴压降, Pa ; C 为喷嘴流量系数; ρ 为流体密度, kg/m^3 。

1.2 几何模型及求解模型

1.2.1 几何模型的建立

图 1 所示为叶轮式旋转射流喷嘴结构。图中,

d 为喷嘴出口直径, S 为直柱段长度, α 为收缩角, L 为喷嘴整体长度。叶片扭曲角 ϕ 为叶片上边沿水平面投影为始边顺时针旋转至下边沿水平投影所转过的角度。根据叶轮式旋转射流喷嘴结构建立几何模型,如图 2 所示。

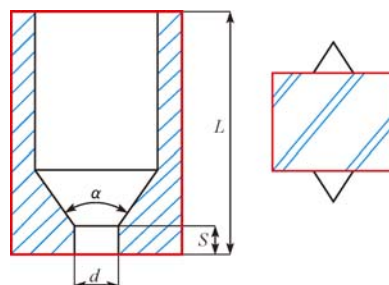


图 1 叶轮式旋转射流喷嘴结构

Fig. 1 Structure of impeller nozzle

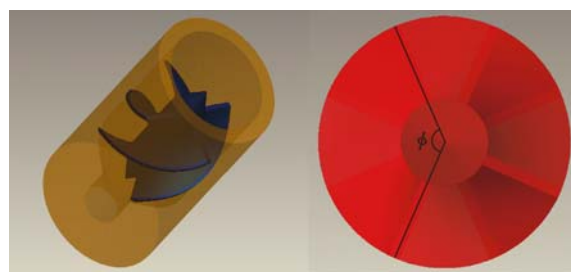


图 2 喷嘴和叶轮几何模型

Fig. 2 Geometric model of nozzle and impeller

1.2.2 求解模型的确定

1) 叶轮式旋转射流的流场较为复杂,采用六面体和四面体 2 种网格结构来划分流场区域,并在出口进行局部加密^[14]。

2) 采用 $k-\epsilon$ 双方程标准湍流模型,该模型包含连续性方程、动量方程和 $k-\epsilon$ 方程。

3) 计算条件:长度单位为 mm ,压力单位为 Pa ;流体为液态水,其流动为定常流动,流动速度为绝对速度;采用三维分离式求解器求解,采用隐式方案对控制方程进行线性化。

4) 边界条件:入口压力为 20 MPa ,出口压力为 10 MPa ;其他边界采用 Wall 边界设置,无滑移、无穿透。

1.3 数值模拟结果及分析

1.3.1 叶片扭曲角对射流特性的影响

流体在喷嘴中沿叶片流动,才具有了切向速度和径向速度,因此叶片扭曲角对喷嘴产生旋流作用。模拟喷嘴压降 10 MPa ,直柱段长度 6 mm ,收缩角

60°,喷嘴出口直径 6 mm,叶片扭曲角分别为 65°、90°、115°、140°、150°、180°、210°、230°、250°和 270°时喷嘴出口处流速。利用喷嘴出口速度(轴向速度和切向速度)计算出实际流量,再利用式(1)和式(2)计算出旋流强度和流量系数,绘制出旋流强度和流量系数随叶片扭曲角的变化曲线(见图 3)。

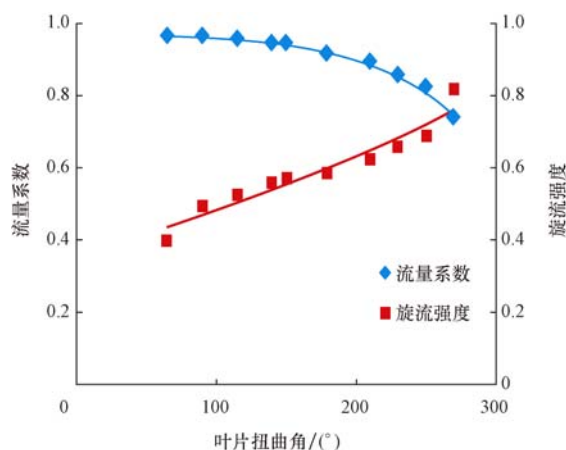


图 3 流量系数、旋流强度与叶片扭曲角的关系曲线

Fig. 3 Effect of twist angle of blades on discharge coefficient and swirling intensity

由图 3 可知,随着叶片扭曲角增大,旋流强度逐渐增大,流量系数减小,且叶轮式旋转射流喷嘴的流量系数低于普通锥形喷嘴(一般为 0.95)。这是因为,叶片扭曲角增大,流体在喷嘴内沿叶片的流动长度增加,切向速度和径向速度相应增大,流动阻力也增大,流量系数必然减小。综合考虑叶片扭曲角对旋流强度和流量系数的影响,选择叶片扭曲角为 115°~140°。

1.3.2 喷嘴直柱段长度对射流特性的影响

模拟喷嘴压降 10 MPa,收缩角 60°,喷嘴出口直径 6.0 mm,叶片扭曲角 210°(效果更明显),直柱段长度分别为 3.0、4.5、6.0、7.5、9.0 和 12.0 mm 时的速度场。根据速度场计算出实际流量,再利用式(1)和式(2)计算出旋流强度和流量系数,绘制出旋流强度和流量系数随直柱段无因次长度的变化曲线(见图 4)。其中,直柱段无因次长度为直柱段长度与直径的比。

由图 4 可知,随着喷嘴直柱段无因次长度的增加,旋流强度先增大后减小,流量系数的减小幅度不大,喷嘴直柱段无因次长度的最佳值为 0.6~0.8。

1.3.3 收缩角对射流特性的影响

模拟喷嘴压降 10 MPa,喷嘴出口直径 6.0 mm,

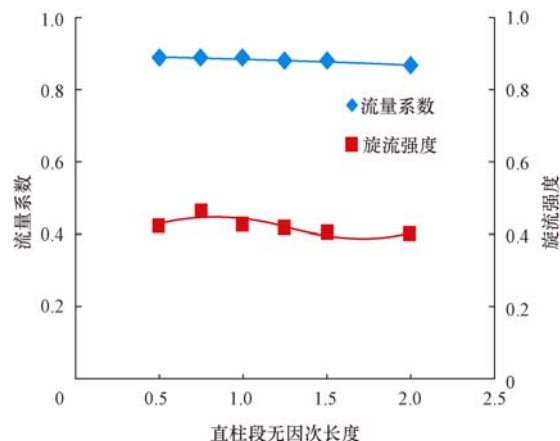


图 4 流量系数、旋流强度与直柱段无因次长度的关系曲线

Fig. 4 Effect of straight tube section on discharge coefficient and swirling intensity

叶片扭曲角 210°(效果更明显),直柱段长 6.0 mm,收缩角分别为 50°、55°、60°、65°、70°、75°、80°时的速度场,再根据前面的公式计算出旋流强度和流量系数,绘制出旋流强度和流量系数与收缩角的关系曲线(见图 5)。

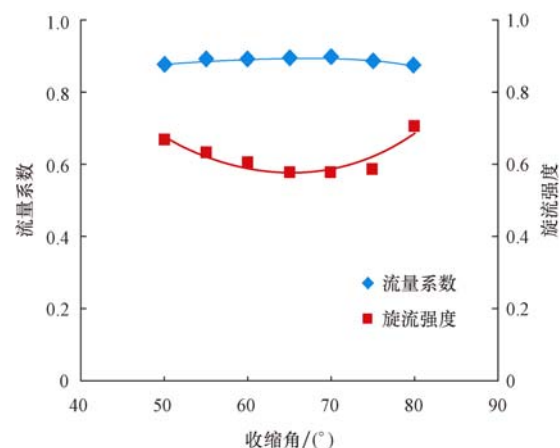


图 5 流量系数、旋流强度与收缩角的关系曲线

Fig. 5 Effect of nozzle convergence angle on discharge coefficient and swirling intensity

由图 5 可知,随着收缩角的增大,旋流强度先减小后增大,流量系数先增大后减小,但收缩角对旋流强度和流量系数的影响很有限。在旋流强度变化不大的情况下,以流量系数作为优选依据,收缩角在 60°~70°时流量系数有最大值。

2 叶轮式旋转射流破岩试验

叶轮式旋转射流在井底的辅助破岩和清岩能力很难通过室内试验直接反映出来,可采用室内软岩样破岩试验来间接反映,以破碎坑直径和深度为标准,

评价叶轮式旋转射流辅助破岩和清岩的能力^[7-8]。根据数值模拟结果得到的叶轮式旋转射流喷嘴几何尺寸,加工喷嘴外壳和叶轮。

2.1 射流对比试验

图 6 为叶轮式喷嘴射流(旋转射流)和普通直射流的射流形态示意图。从图 6 可以看出,旋转射流的扩展角度明显大于普通直射流。

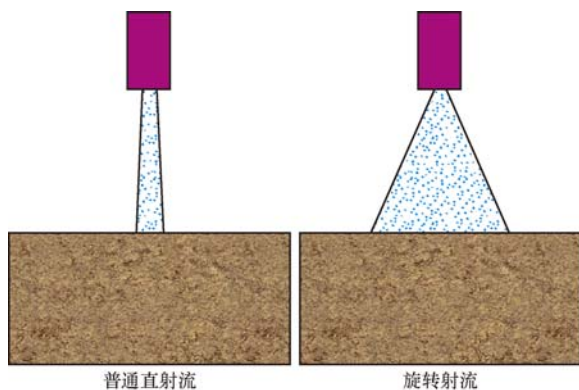


图 6 普通直射流与旋转射流的扩展角度

Fig. 6 Extended angle of swirling jet and conventional straight jet

采用自制水泥岩样,在相同喷嘴压降和喷距下进行破岩对比试验,破岩效果如图 7 所示。从图 7 可以看出,旋转射流的破岩直径是普通直射流的近 3 倍,破岩深度则小于普通直射流。这是因为,相同喷嘴压降和喷距下,旋转射流使射流轴线上的冲击力减弱,但大大增加了射流的冲洗面积。PDC 钻头钻进过程中,旋转射流的清洗范围和切向速度较大,能起到很好的辅助破岩和清除岩屑的作用。



图 7 普通直射流与叶轮式旋转射流的破岩效果

Fig. 7 Rock breaking effect of conventional jet and vane type swirling jet

2.2 叶轮式旋转射流破岩特性

淹没条件下,通过室内破岩试验研究叶轮式旋转射流喷嘴的破岩特性。不同喷距(岩样与喷嘴出

口之间的距离)下破岩直径和深度反映叶轮式旋转射流的破岩特性,可以间接验证数值模拟得到的速度分布特点。考虑到喷嘴直径的影响,以无因次喷距表征速度场空间分布,无因次喷距为实际喷距与喷嘴直径的比。图 8 为破岩直径和深度与无因次喷距的关系曲线。

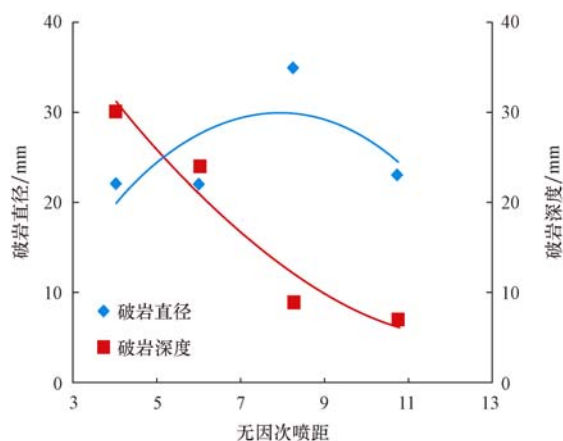


图 8 破岩直径、破岩深度与无因次喷距的关系曲线

Fig. 8 Effect of standoff distance on rock breaking diameter and depth

由图 8 可知,随着无因次喷距的增大,破岩深度迅速减小,破岩直径先增大后减小,最大破岩直径出现在 7~11 倍喷嘴出口直径之间。淹没条件下,射流射出喷嘴出口后,轴心线速度迅速衰减,导致破岩深度迅速减小;破岩直径受到切向速度和径向速度的影响,开始射流速度的衰减不明显,破岩直径减小幅度较小,随着速度衰减至无法破碎岩样,破岩直径必然减小。

3 应用分析

水平井实钻过程中,由于水平段长、摩阻大,无法施加足够的钻压,大大限制了机械钻速。统计某油田水平井直井段、定向段、水平段所用钻井参数发现,水平段的钻头压降、喷射速度等参数明显低于直井段和定向段。上述射流破岩试验结果表明,相同喷嘴压降下旋转射流的破岩能力优于普通直射流,且数值模拟结果表明,通过优化叶轮式旋转射流喷嘴几何参数,可使喷嘴的流量系数和旋流强度达到最佳,实现能量高效利用。因此,水平段钻进过程中 PDC 钻头采用叶轮式旋转射流喷嘴可以优化井底流场,提供射流辅助清岩和破岩能力,提高水平段机械钻速。

PDC 钻头采用叶轮式旋转射流喷嘴后,由于其流量系数一般小于普通锥形喷嘴(0.95 左右),需要根据

等流量系数钻头压降公式^[15],推导出不等流量系数下的钻头压降计算公式,进而确定其他水力参数:

$$\Delta p_b = \frac{0.05 \rho_d Q^2}{(C_1 A_1 + C_2 A_2 + \dots + C_i A_i)^2} \quad (3)$$

式中: Δp_b 为钻头压降,MPa; ρ_d 为钻井液密度,g/cm³;Q为实际排量,L/s; C_i 为各喷嘴流量系数; A_i 为各喷嘴出口截面积,cm²。

4 结论及建议

1) 数值模拟和室内试验研究表明,等压降和等喷距下叶轮式旋转射流破岩能力优于普通直射流。

2) 通过数值模拟可得到叶轮式旋转射流喷嘴主要几何参数对射流特性的影响规律,并可据此优选出叶片扭曲角、直柱段无因次长度、收缩角的最佳取值范围。

3) 建议下一步选取合适的叶轮式旋转射流喷嘴进行 PDC 钻头钻进水平段试验。

参 考 文 献

References

- [1] 沈忠厚. 水射流理论与技术[M]. 东营:石油大学出版社,1998:390-413.
Shen Zhonghou. Water jet theory and technique[M]. Dongying:Petroleum University Press,1998:390-413.
- [2] 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):1-4.
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): 1-4.
- [3] 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.
- [4] 杨永印,沈忠厚,王瑞和,等. 旋转磨料射流破岩钻孔试验研究[J]. 石油钻探技术,1999,27(4):4-7.
Yang Yongyin, Shen Zhonghou, Wang Ruihe, et al. Experimental study on rotary abrasive jet drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 1999, 27(4): 4-7.
- [5] 杨海滨,杨永印,沈忠厚,等. 磨料浆体旋转射流破岩钻孔特性试验研究[J]. 石油大学学报:自然科学版,2005,29(3):46-48.
Yang Haibin, Yang Yongyin, Shen Zhonghou, et al. Experimental study of rock drilling with abrasive suspension swirling jet[J]. Journal of the University of Petroleum, China; Edition of Natural Science, 2005, 29(3): 46-48.
- [6] 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,2010.

- 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.
- [7] 杨永印,裴建忠,孙伟良,等. 利用射流改进井底流场的研究[G]//苏义脑. 2010年钻井基础理论研究与前沿技术开发进展学术研讨会论文集. 北京:石油工业出版社,2010:1-5.
Yang Yongyin, Pei Jianzhong, Sun Weiliang, et al. Research on mechanism of improving bottom hole flow field by using jet[G]//Su Yinao. Proceedings of drilling basic theory and new progress of frontier development technology seminar, 2010. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 1-5.
- [8] 杨永印,牛似成,徐希强. 组合射流 PDC 钻头试验研究[J]. 石油钻探技术,2012,40(5):100-105.
Yang Yongyin, Niu Sicheng, Xu Xiqiang. Experimental study of combined-jet PDC bit[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(5): 104-109.
- [9] Yang Yongyin, Zhou Weidong, Wang Ruihe, et al. Rock drilling with abrasive suspension swirling jet and effects of additive polyacrylamide: Presented at the Proceedings of 2005 American Waterjet Conference, Houston, August 21-23, 2005[C].
- [10] 管志川,陈庭根,刘希圣. PDC 钻头水力结构研究进展[J]. 石油大学学报:自然科学版,1994,18(6):136-142.
Guan Zhichuan, Chen Tinggen, Liu Xisheng. Review of studies of PDC bit hydraulic configurations[J]. Journal of the University of Petroleum, China; Edition of Natural Science, 1994, 18(6): 136-142.
- [11] 管志川,陈庭根,刘希胜. PDC 钻头井底液流分布特性的实验研究[J]. 石油大学学报:自然科学版,1996,20(3):24-28.
Guan Zhichuan, Chen Tinggen, Liu Xisheng. Experimental study on the characteristics of fluid distribution at bottomhole of PDC bits[J]. Journal of the University of Petroleum, China; Edition of Natural Science 1996, 20(3): 24-28.
- [12] 朱海燕,王锡洲,刘时英,等. PDC 钻头水力学研究最新进展[J]. 石油钻采工艺,2009,31(5):23-28.
Zhu Haiyan, Wang Xizhou, Liu Shiyang, et al. The latest developments of the hydraulics research on PDC bit[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(5): 23-28.
- [13] 谢翠丽,杨爱玲,陈康民. PDC 钻头水力学研究初探[J]. 石油机械,2002,30(11):1-3.
Xie Cuili, Yang Ailing, Chen Kangmin. Hydraulics research on PDC bit[J]. China Petroleum Machinery, 2002, 30(11): 1-3.
- [14] 韩占忠. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用介绍[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004:1-20.
Han Zhanzhong. Fluent fluid engineering simulative calculation instance and applications[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004: 1-20.
- [15] 陈庭根,管志川. 钻井工程理论与技术[M]. 东营:石油大学出版社,2000:145-147.
Chen Tinggen, Guan Zhichuan. Drilling engineering theory and technology[M]. Dongying: Petroleum University Press, 2000: 145-147.

[编辑 刘文臣]