

# PDC钻头定向喷嘴井底流场数值模拟

黄英勇,李根生,宋先知,付加胜

(油气资源与探测国家重点实验室(中国石油大学),北京昌平102249)

**摘要:**为提高定向喷嘴PDC钻头清洗井底的效果,最大限度地减少钻头泥包的形成。利用计算流体力学理论和数值模拟方法,建立了定向喷嘴PDC钻头的物理模型,并确定了定向喷嘴PDC钻头的物理模型参数,对定向喷嘴和定向喷嘴PDC钻头的井底流场特性进行了分析。结果表明:在定向喷嘴的结构参数中,双通道的直径组合与侧向通道的倾角是影响流量分配的主要因素,侧孔倾角为45°时,既能满足流量分配的要求,又便于加工;定向喷嘴侧向射流将回流限制在新冲击区的上方,减小了井底漩涡区域,与漫流层的叠加补偿了其能量损失,刀翼切割面处的低速区也变小,对井底清岩起到较好的作用,有利于抑制泥包的形成。定向喷嘴与常规水力结构设计相结合可以在预防和清除PDC钻头泥包方面发挥自身的优势,达到提高机械钻速的目的。

**关键词:**PDC钻头 定向喷嘴 井底流场 数值模拟 钻头泥包

中图分类号:TE921<sup>+</sup>.1 文献标识码:A 文章编号:1001-0890(2011)06-0099-05

## Numerical Simulation of Bottomhole Flow Field of PDC Bit with Orientation Nozzle

Huang Yingyong, Li Gensheng, Song Xianzhi, Fu Jiasheng

(State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting (China University of Petroleum), Beijing, 102249, China)

**Abstract:** In order to improve bottom hole cleaning efficiency of PDC bit with orientation nozzle and to prevent bit balling farthest, a physical model of PDC bit with orientation nozzle was established, and the parameters of physical model were confirmed. The characteristics of bottom flow field of PDC bit and its orientation nozzle were analyzed using computational hydromechanics theory and numerical simulation. The results indicate that the diameter combination of two fluid-channels and the obliquity of the lateral channel are main factors for flow rate distribution in the structural parameters of orientation nozzle. When the inclination angle of lateral nozzle is 45°, the requirement of flow distribution of bit nozzle is satisfied and bit nozzle is easy to manufacture. The jet flow of lateral nozzle restricts the backflow in the upper impact zone and reduces the area of bottom vortex. Combined cross flow layer with impact zone can compensate the loss of energy. The low velocity zone at blade wing was reduced, which can give positive effects for cleaning bottomhole and restrain bit balling. Orientation nozzles coupled with conventional hydraulic structure can prevent or eliminate PDC bit balling and increase the penetration rate.

**Key words:** PDC bit; orientation nozzle; bottomhole flow field; numerical simulation; bit balling

在钻井作业中,抑制钻头泥包的形成和发展对提高钻井速度、保障钻井安全非常重要。PDC钻头定向喷嘴是一种带一个或多个侧孔的射流喷嘴,安装在PDC钻头上,通过多路射流清洗钻头,以最大限度防止泥包的产生和冷却切削齿。国内外对PDC钻头流场进行了较多的理论与数值研究<sup>[1-3]</sup>,并采用理论分析、室内实验或者数值模拟的方法,对PDC的本体结构、喷嘴布置、结构、组合等影响PDC钻头破岩和清岩效果的因素进行了大量的研究<sup>[4-8]</sup>,并取得了一定

收稿日期:2011-03-10;改回日期:2011-10-17。

**作者简介:**黄英勇(1975—),男,越南人,1998年毕业于河内地质-田大学石油系油气井钻探工程专业,2003年获河内地质-田大学油气井钻探工程专业硕士学位,油气井工程专业在读博士研究生,从事油气井工程研究。

**联系方式:**(010)89733988,huangyycup@163.com。

**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)部分研究内容。

的成果。笔者利用数值模拟的方法,建立了定向喷嘴 PDC 钻头物理模型,对 PDC 钻头定向喷嘴井底流场进行了数值模拟,分析了定向喷嘴的井底流场特性,并重点分析了侧向射流对钻头泥包形成的抑制作用,同时对定向喷嘴预防泥包的机理进行了探讨。

## 1 井底流场数值模拟方法

### 1.1 端流模型控制方程

利用 RNG  $\kappa-\epsilon$  紊流模型对紊流场进行求解,控制方程的具体形式为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial (\eta \partial u_i / \partial x_j - \rho u_i' u_j')}{\partial x_j} = 0 \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (2)$$

式中:  $-\rho u_i' u_j'$  称为雷诺应力,也称作紊流应力;  $u$  为紊流时均速度(两个坐标方向), $\rho$  为液体密度, $p$  为液体压力, $\eta$  为液体动力黏度。

### 1.2 离散方法

有限体积法是目前计算流体动力学领域广泛使用的离散化方法,其特点是计算效率高。

笔者采用有限体积法定义的二阶迎风格式对控制方程进行离散以保证计算过程中的精度,并应用压力耦合方程组的半隐式方法(即 SIMPLE 算法)进行求解,采用 Fluent 求解器进行具体计算。在流动中假设温度恒定,不考虑能量守恒方程<sup>[9-10]</sup>。

### 1.3 边界条件的设置

边界条件一般会影响数值计算的收敛速度,甚至决定计算是否收敛,因此选择合理的边界条件尤为重要。具体边界条件:喷嘴进口边界采用速度进口边界条件,环空部分出口边界采用压力出口边界条件(高斯压力为零),喷嘴 2 个出口流量根据计算环境分配,不具体限定;壁面边界设为光滑壁面,满足无滑移条件,即流体在壁面处的速度为 0。

## 2 定向喷嘴 PDC 钻头物理模型参数确定

定向喷嘴在结构上比常规喷嘴多了一个或多个圆形侧孔,如图 1 所示。侧孔的轴线与喷嘴主轴线在同一平面内,但不一定要垂直于主轴线,角度可以

控制在  $45^\circ \sim 90^\circ$ 。喷嘴内部由 2 个收缩断面促使流体压能向动能转换。侧孔位于两收缩断面间的腔室壁上,如图 2 所示。



图 1 用于 PDC 钻头的定向喷嘴

Fig. 1 The orientation nozzle of PDC bit

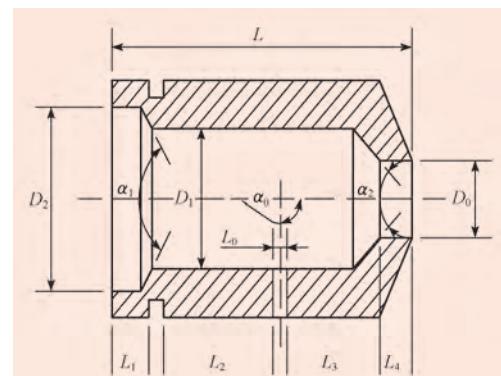


图 2 定向喷嘴结构

Fig. 2 The structure of orientation nozzle

定向喷嘴 PDC 钻头的物理参数体现在对钻头的水力结构设计上,针对这一点,在参数的确定上笔者主要考虑了以下几个方面:

1) 喷嘴组合布置要能确保喷嘴产生的射流冲击区最大程度地覆盖整个井底区域,使井底得到更好的清洗,体现在设计上就是使钻头各喷嘴的位置具有不同轴心距,并保持恰当的喷射角度<sup>[11]</sup>。

2) 由于定向喷嘴的特殊性,必须使喷嘴出露钻头表面一定高度,这里保证出露高度不大于冠部刀翼高度的  $1/3$ ;另外,喷嘴的方位也对 PDC 钻头切削齿的清洗效果产生影响<sup>[12]</sup>。

在此,笔者确定了喷嘴的方位,A、B、C、D 4 个方向喷嘴相对方位线 O-O 所夹的锐角分别为  $62^\circ$ 、 $38^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $35^\circ$ ,并处在不同半径圆周上。另外,为有利于清除切削翼部位的泥包,还确定了喷嘴侧向射流的射流方向,即射流方向与切削翼工作面平行,同时倾向井底一定角度,如图 3 所示。

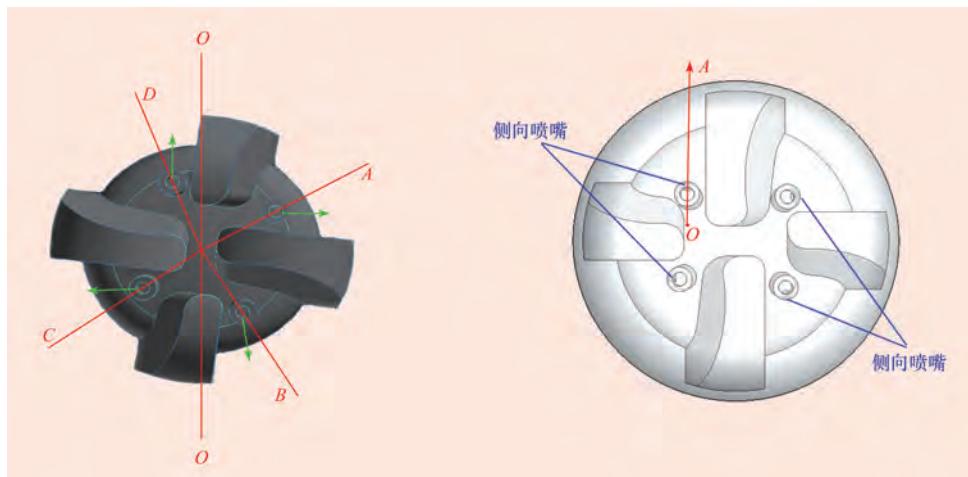


图3 喷嘴布置方式示意图(PDC钻头平面图)

Fig. 3 The arrangement diagram of nozzles(PDC bit plan)

在钻头冠部轮廓设计、切削结构设计和水力结构设计的基础上,利用 CAD 软件建立了定向喷嘴 PDC 钻头的几何计算模型,其具体参数为:钻头直径 215.9 mm,保径面距井筒距离 7.0 mm;4 片刮刀,两对喷嘴,喷嘴靠近钻头中心穹窿,与轴心线不等距,布置于各切削齿之间。

### 3 模拟结果分析

#### 3.1 定向喷嘴结构参数确定与分析

##### 3.1.1 计算条件的确定

为更好地说明定向喷嘴对孔道分流特征以及射流特性的影响,根据其结构特点,建立了定向喷嘴 PDC 钻头的三维物理模型,原点设在入口中心处,如图 4 所示。

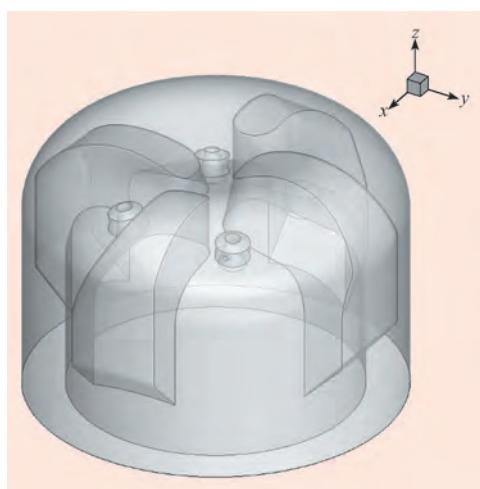


图4 定向喷嘴 PDC 钻头几何计算模型

Fig. 4 The geometric model of PDC bit with orientation nozzles

具体参数为:喷嘴入口直径  $D_1 = 16.0$  mm,主流道出口直径  $D_0 = 9.0$  mm,侧向流道出口直径  $L_0 = 3.0$  mm,两流道轴线夹角  $\alpha_0 = 45^\circ$ ,排量  $Q = 35$  L/s,入口速度  $v = 43.5$  m/s。

##### 3.1.2 定向喷嘴射流特性分析

喷嘴内部的流量分配问题是影响定向喷嘴性能的重要指标,侧孔倾角和直径作为流体分配的主要影响因素,在倾角较小的情况下即  $\alpha_0 = 45^\circ$ ,喷嘴内流量分配主要受出口直径比( $L_0/D_0$ )的影响,具有较大出口直径比的喷嘴侧向分流较大;当倾角  $\alpha_0$  大于  $45^\circ$  时,倾角成为影响流体侧向分流的主要因素,随着倾角增大,侧向流体的速度矢量方向与流道轴线方向夹角变大。定向喷嘴与主喷嘴之间的流量分配是在喷嘴内静压向动压转化时自动分配的,因而定向喷嘴侧孔倾角的增大会导致侧向分流量被抑制。侧孔倾角过小时,可以保证侧向射流的流量分配,但由于与主射流过近,射流的覆盖区域过小,清洗效果不佳;侧孔倾角过大时,射流的覆盖区域虽大,但侧孔分配到的流量小,清洗效果同样不佳。故在计算中两流道轴线夹角分别取  $45^\circ$  和  $60^\circ$ 。

侧向射流冲击区的覆盖范围是利用射流抑制钻头泥包形成和发展的关键。射流的等速核是射流能量最集中的区域,直接反映射流动能水头的大小。射流等速核覆盖的范围越大,抑制泥包的效果越好。

图 5 为定向喷嘴中心剖面动水头等值线。从图 5 可以看出,在相同条件下,侧向流道倾角较小的定向喷嘴具有较好的分流特征,侧向流道分流的流量

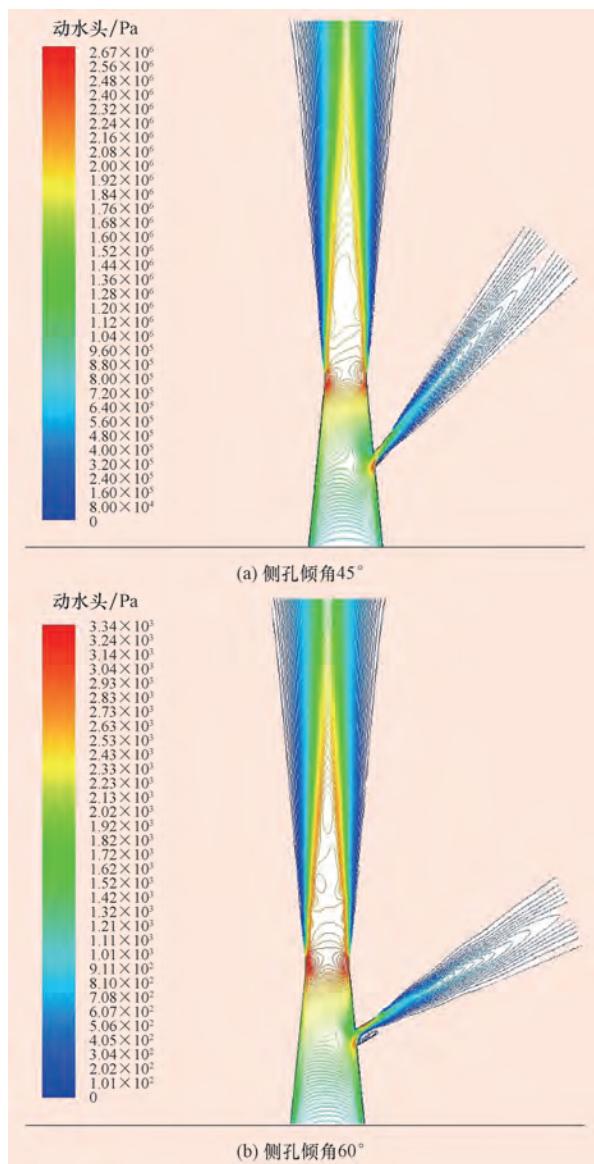


图 5 定向喷嘴中心剖面动水头等值线

Fig. 5 The isoline of orientation nozzle dynamic head in the center section

较多,产生的等速核较长,且在淹没条件下,侧向射流能量扩散均匀,能够覆盖较大的空间区域,容易泥包的钻头工作部位也处在侧向射流扩散区内,这对钻头泥包具有抑制作用。所以,侧孔倾角为45°时,既能够很好地满足流量分配的要求,又便于喷嘴加工,是比较合适的倾角。

### 3.2 定向喷嘴射流井底流场分析

常规喷嘴PDC钻头的井底流场包括射流区、漫流区、附壁上返区及回流漩涡区等4区域。侧向喷嘴使井底流场受到影响,产生变化,重点在两股射流冲击区叠加和漩涡区的弱化<sup>[13]</sup>。

图6为定向喷嘴PDC钻头与常规喷嘴PDC钻头井底横向速度等值线对比。由图6可知,自由射流与周围流体存在动量交换和卷吸作用并产生低压漩涡区,但引起的回流被侧向喷嘴射流限制于新形成的冲击区上方,漩涡区变小,能量耗散减轻。侧向射流在漫流层上方产生的新冲击区与漫流区在井底处有叠加,使漫流层能量损失得到补偿;同时侧向射流对漫流层厚度及速度梯度产生的影响很小,不会减弱井底漫流层的清岩作用。侧向射流平行于刀翼的切削面,并使低速区明显变小,有利于抑制泥包的发展。侧向射流的冲击对钻头底部流道口处泥包的堆积也起到抑制作用,进而抑制排屑槽处泥包的产生。这些结论与前人的研究结果相吻合。

## 4 结 论

1) 建立了定向喷嘴PDC钻头物理模型,并确定了模型参数和计算参数条件。

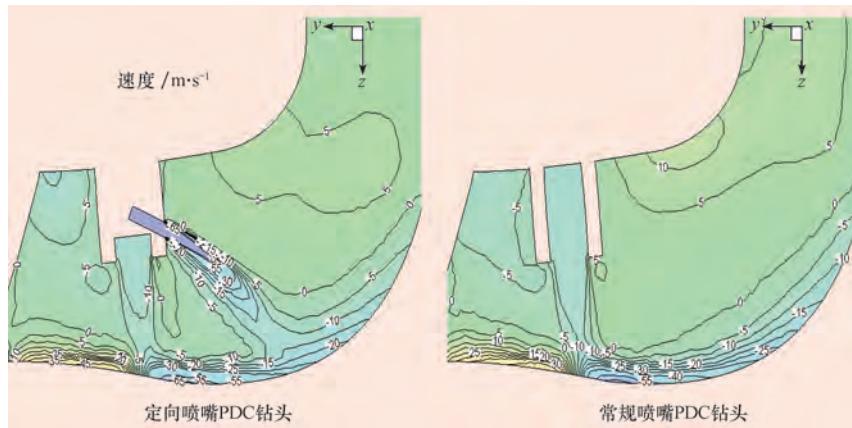


图 6 井底横向速度等值线对比

Fig. 6 The comparison of the isoline of lateral flow speed in nozzles in the center section

2) 在定向喷嘴的结构参数中,双流道的直径组合与侧向流道的倾角是影响分流特征的主要因素,是决定定向喷嘴工作性能的关键指标。双流道轴线夹角为45°时是比较合适的倾角,此时能够很好地满足喷嘴加工和流量分配的要求。

3) 定向喷嘴侧向射流将回流限制在新冲击区的上方,使井底漩涡区域变小,与漫流层的叠加补偿了其能量损失,刀翼切削面处的低速区也变小,对井底清岩起到较好的作用,有利于抑制泥包的形成和发展。

4) 定向喷嘴与常规水力结构设计相配合可以在预防和清除PDC钻头泥包方面发挥作用,达到提高机械钻速的目的。

## 参 考 文 献

### References

- [1] Watson G R, Barton N A, Hargrave G K. Using new computational fluid dynamic techniques to improve PDC bit performance [R]. SPE/IADC 37580, 1997
- [2] 高振果,董杰. PDC钻头井底水力问题的计算机模拟[J]. 石油钻采工艺,1995,17(6):19-24.
- Gao Zhenguo, Dong Jie. Computer simulating hydraulics of PDC bit on bottom of hole[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1995, 17(6): 19-24.
- [3] 李兆敏,沈忠厚. 轴对称紊流射流流场数值模拟[J]. 石油大学学报:自然科学版,1995,19(2):48-51.
- Li Zhaomin, Shen Zhonghou. Numerical simulation for turbulent axisymmetric jet flowfield[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1995, 19 (2): 48-51.
- [4] 易灿,李根生. 喷嘴结构对高压射流特性影响研究[J]. 石油钻采工艺,2005,27(1):16-19.
- Yi Can, Li Gensheng. Study of the influence of the nozzle structure on waterjet characteristics[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005, 27(1): 16-19.
- [5] 张云,陆波,王秋菊. 斜喷嘴的作用机理和应用效果[J]. 石油钻采工艺,1994,16(5):8-13,28.
- Zhang Yun, Lu Bo, Wang Qiuju. The action mechanism and application effect of slant nozzle[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1994, 16(5): 8-13, 28.
- [6] Dickey Winton B. Side port nozzle in a PDC bit: Europe, EP0959224A2[P]. 1999-11-24.
- [7] 管志川,刘希圣,陈庭根,等. PDC钻头条件下圆喷嘴撞击射流井底流场的数值模拟[J]. 石油大学学报:自然科学版,1995,19(5):30-35.
- Guan Zhichuan, Liu Xisheng, Chen Tinggen, et al. Numerical simulation on the bottomhole flow of axisymmetric impinging jets for PDC bits[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1995, 19(5): 30-35.
- [8] 黄志强,周已,李琴,等. 刮刀钻头喷嘴直径对井底流场的影响研究[J]. 石油矿场机械,2009,38(3):17-19.
- Huang Zhiqiang, Zhou Yi, Li Qin, et al. Study on the effect of the nozzle of drag bits on bottom hole flow field[J]. Oil Field Equipment, 2009, 38(3): 17-19.
- [9] Chorine A J. A numerical method of solving incompressible viscous flow problems[J]. Journal of Computational Physics, 1997, 135(2): 118-125.
- [10] Chorine A J. Numerical solution of the nervier-stokes equations [J]. Mathematics of Computation, 1968, 22(104): 745-762.
- [11] 管志川,周广陈,刘瑞文,等. PDC钻头倾斜射流的井底流动分布特性[J]. 石油钻探技术,1996,24(3):32-34.
- Guan Zhichuan, Zhou Guangchen, Liu Ruiwen, et al. Flow distribution characteristics of PDC bit inclined jet on the bottom-hole[J]. Petroleum Drilling Techniques, 1996, 24(3): 32-34.
- [12] 管志川,李春山,苑明顺. 多股撞击射流流场的数值模拟研究[J]. 石油学报,1998,19(2):117-121.
- Guan Zhichuan, Li Chunshan, Yuan Mingshun. An numerical study on flow fields of multi-jets impinging on the bottomhole [J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(2): 117-121.
- [13] 侯成,李根生,黄中伟,等. 定向喷嘴PDC钻头井底流场特性研究[J]. 石油钻采工艺,2010,32(2):15-18.
- Hou Cheng, Li Gensheng, Huang Zhongwei, et al. Research on characteristics of bottomhole flow field of PDC bit with side nozzles[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32(2): 15-18.

## 保护碳酸盐岩储层的表面活性剂胶束钻井液

针对常规钻井液中高分子聚合物及固相颗粒引起近井地带储层损害的问题,Baker Hughes公司开发出一种保护碳酸盐岩储层的新型钻井液——无固相、无聚合物表面活性剂胶束钻井液。该钻井液由有机酸(低黏、低腐蚀)、表面活性剂和内部破胶剂组成,典型配方为10.0%有机酸+2.0%表面活性剂+0.2%内部破胶剂。该钻井液在钻杆中流动时黏度较低,当其流出钻头以后,钻井液中的酸与储层中的碳酸盐发生反应,使钻井液的pH值升高,并产生Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>等二价离子,促使表面活性剂形成细长的胶束,钻井液黏度升高。钻井液黏度升高不但可以降低滤失量,而且有利于携带岩屑。当钻穿储层后,内部破胶剂使胶束钻井液破胶,其黏度降低,从而实现轻松返排,最终实现近井地带的零损害。