

喷嘴孔径对 PDC 钻头井底流场影响的研究*

杨 丽 陈康民

(上海理工大学动力学院 上海 200093)

摘要：PDC 钻头在实钻过程中井底流场非常复杂，而优化其水力学参数是提高钻头钻井能力的有效手段。根据实际钻头结构，建立了不同孔径的四喷嘴 PDC 钻头井底流场模型并对之进行了数值模拟，分析了流场的总体特点，得出了在相同出口射流速度和相同流量条件下喷嘴孔径对 PDC 钻头井底流场的各种影响，并通过试验进行了验证，为 PDC 钻头的水力学设计提供了一定的指导。

关键词：PDC 钻头 数值分析 喷嘴 流场

中图分类号：TG156

0 前言

PDC(聚晶金刚石复合片)钻头在 20 世纪 70 年代中期开始用于钻井行业，它的特点是寿命长、适应性广并且性能价格比高，在实践中明显减少起钻次数，从而可以大大节省钻井时间，提高劳动效率和节约生产成本。但是，PDC 钻头在使用中还存在一些问题，如适应地层的范围较窄、切削齿过热后快速磨损、钻头冲蚀损坏和钻头泥包等^[1~3]，因此很有必要开展这方面的研究。传统的方法是通过试验或实践得来的数据进行研究，但是，PDC 钻头在几百至几千米的地下进行工作，井底流动情况十分复杂，这种方法受到试验条件和仪器设备的限制。近年来，随着计算机技术的迅速发展，利用数值计算方法求解流体动力学问题已成为可能。其不受试验条件的限制、能灵活改变计算参数以及成本低等特点，已成为钻头水力学研究的新方向。采用 CFD 软件 MUMECA 和试验相结合的方法对某厂 $f215.9$ mm 的钻头井底流场进行分析，重点分析了喷嘴孔径对 PDC 钻头性能的影响，为 PDC 钻头的优化设计提出了一些建议。

1 控制方程的建立

求解流场的控制方程是旋转坐标系下的雷诺平均 $N \sim S$ 方程

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla F_l + \nabla F_v = Q \quad (1)$$

式中 U —— 待求守恒型变量

$$U = [\bar{r}, \bar{r}\omega, \bar{r}\omega^2, \bar{r}\omega^3, \bar{r}E]^T$$

t —— 积分变量时间

F_v —— 粘性矢量通量

F_l —— 非粘性矢量通量

Q —— 方程组的源项

F_v, F_l 在笛卡尔坐标系中可分解为

$$F_l = f_{l1}l_x + f_{l2}l_y + f_{l3}l_z \quad (2)$$

$$F_v = f_{v1}l_x + f_{v2}l_y + f_{v3}l_z \quad (3)$$

$$f_{li} = \begin{bmatrix} \bar{r}w_i \\ \frac{\bar{p}^*d_{1i} + \bar{r}\omega_i^2}{\bar{p}^*d_{2i} + \bar{r}\omega_i^2} \\ \frac{\bar{p}^*d_{3i} + \bar{r}\omega_i^2}{\bar{r}E\omega_i + \bar{p}^*} \end{bmatrix} \quad f_{vi} = \begin{bmatrix} 0 \\ t_{i1} \\ t_{i2} \\ t_{i3} \\ q_i + \omega_j t_{ij} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 “ $\bar{\quad}$ ” —— Renold 时均值

“ \sim ” —— 加权平均

r —— 流体密度

d —— Kronecker 数

v —— 速度

w_i —— 角速度

p^* —— 总压

E —— 总能量

q_i —— 热通量

t_{ij} —— 粘性应力

湍动能 E_k 表示为

$$\bar{p}^* = \bar{p} + \frac{2}{3}\bar{r}E_k \quad (5)$$

$$\bar{E} = \omega^2 \frac{1}{2}w_i^2 + E_k \quad (6)$$

式中 e —— 单位能量

p —— 静压

* 上海市科委高新技术(032912022)和上海市经委高新技术(2870)资助项目。20041109 收到初稿，20050301 收到修改稿

在关于湍动能 E_k 方程的基础上,引入一个湍动能耗散量 e 的方程,便形成了 $k \sim e$ 模型^[4]。 e 定义为

$$e = \frac{m}{r} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \quad (7)$$

式中 m —— 动力粘度

u'_i —— 时均速度

k —— 方向指标

湍动粘度 u_t 可表示成 k 和 e 的函数,即

$$u_t = rc \frac{k^2}{e} \quad (8)$$

式中 c —— 经验常数

k —— 湍动能的值

2 计算模型及参数选择

选取 $F215.9$ mm 的钻头来研究,根据此钻头,做出了不同的流场模型。图 1 为两个相似的流场模型,差别只是喷嘴的孔径不同,均为不对称的四喷嘴射流。流场底面为平面,井底和井壁是以一定的圆弧过渡,射流撞击距离为 40 mm。第一个模型四个喷嘴孔径均为 24 mm,位置分别在极坐标的 35° 、 120° 、 204° 和 298° 位置上。第二个模型四个喷嘴孔径为 12 mm,其位置和第一个模型相同。

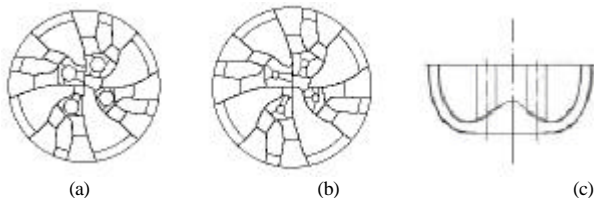


图 1 大小孔径喷嘴模型及其断面图

两个模型的定解条件为:进口速度 $v = 10$ m/s, 40 m/s; 出口压强 $p = 101$ kPa; 转速 $n = 100$ r/min。

3 数值计算结果及分析

3.1 喷嘴孔径对井底漫流特性的影响

通过分析计算所得的流场结果,这种非自由淹没多股射流的流场可以分为如图 2 所示的六个区域:自由射流区(A),撞击区(B),漫流区(C),附壁上返区(D),旋涡区(E)和多股射流干涉区(F)。

图 2 和图 3 是两个模型在出口射流速度相同的情况下(10 m/s)纵断面内的速度等值线图和矢量图,从结果来看,两个模型有相似之处,两者的撞击区的高度大致相当,均为撞击距离的 $1/4 \sim 1/3$,流场中心形成非常复杂的多股射流干涉区,使得喷嘴出

口的射流有向外偏射的趋势。这种射流干涉消耗了流体的能量,并可能引起岩屑的再次降落,从而损坏钻头和产生泥包,应该想办法来消除中心区的流体滞留,可以考虑在钻头中心再增加一个喷嘴,或者使周围喷嘴向外部以一定的角度倾斜射流。两者不同之处在于,大孔径喷嘴射流形成的旋涡范围较小喷嘴大,但其数量却较小喷嘴多,这可能是大喷嘴射流流量比小喷嘴大,所以在中心区形成的干涉更为复杂。另外,大喷嘴射流形成的自由射流区、撞击区的范围也较大,在漫流层的速度也较小喷嘴大,这在某种程度上提高了井底流场的清岩能力,但孔径过大不利于布齿,因此需要在合理布齿和提高清岩能力之间取得一个平衡。

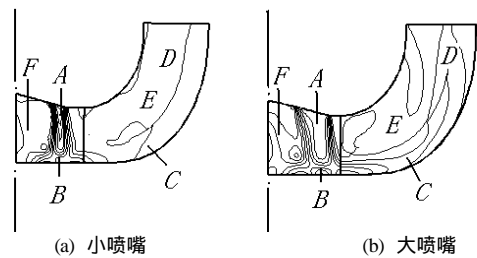


图 2 纵断面内流线对比图(等值线图)

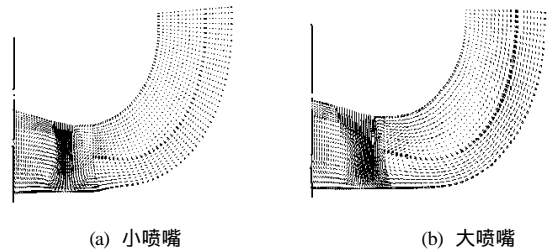


图 3 纵断面内流线对比图(矢量图)

3.2 漫流层高度和最大漫流层速度

漫流层高度和最大漫流速度是表征井底流场性质的重要参数。通过分析发现,采用相同的射流速度,喷嘴孔径不同时,流场的漫流厚度没有多大的变化,均为井底至钻头表面的 $1/5 \sim 1/4$ 。图 4 为采取不同喷嘴孔径射流时漫流层内的速度等值线和矢量对比图。

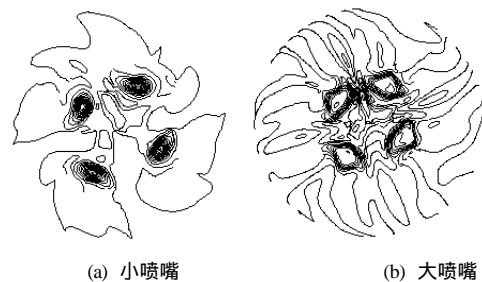


图 4 漫流层内速度等值线和矢量对比图

由图 4 可以看出,大孔径射流其速度梯度较小孔径大,且流动较小孔径射流复杂,在流场内部的

能量损耗应该较小孔径射流大，小喷嘴射流速度在喷嘴周围急剧下降，在其他范围内速度较均匀，两者具有相同的流动特性。

下表为流场内各点的速度对比，*a*~*h* 各点位于从射流区到撞击区最后沿漫流层流出的方向上。

表 不同孔径射流各位置射流速度对比

孔径 <i>d</i> /mm	不同位置的射流速度 <i>v</i> /(m · s ⁻¹)							
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
12	12.8	7.82	3.82	1.78	1.61	0.84	0.44	0.41
24	11.4	4.80	3.61	2.32	2.98	3.16	1.63	0.98

由表可以看出，在中心射流区，其速度会大于进口速度，但随着到达撞击区以及进入漫流区，其速度迅速降低。当采用相同的进口速度时，大喷嘴射流比小喷嘴射流速度稳定，其清岩能力也相应较强。大孔径射流其井底有效漫流速度比相同情况下小孔径大，这可以用能量守恒定律来解释。由于漫流层的厚度相差不大，所以其出口面积相等，而大孔径射流在单位时间内进入流场的流量较小孔径射流大，所以其总能量也较大，而大孔径喷嘴射流旋涡和干涉区的能量消耗不足以抵消这部分更大的能量。根据能量守恒定律，大孔径射流漫流层内的速度应该比小孔径射流大。

图 5 为小喷嘴模型在出口射流速度为 40 m/s 的条件下纵断面内的速度矢量和等值线图。对比图 2 和图 3，射流速度的增大，其流动特性基本不变，但速度梯度明显增大，且在中心干涉区出现较明显的旋涡，附壁上返区和旋涡区的变化不大。对于不同孔径的喷嘴，出口流量相同的情况下，小喷嘴射流撞击区范围和漫流层内速度较大喷嘴射流大。因此在出口流量相同的情况下，小喷嘴射流具有一定的清岩优势。

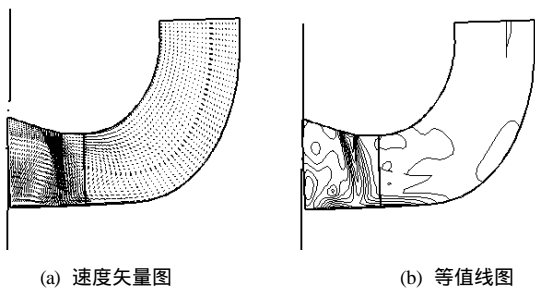


图 5 小喷嘴大出口速度射流速度矢量和等值线图

4 试验验证

试验采用的是双模粒子动态分析仪(Dual PDA)进行流场速度的测定。PDA 的工作原理是相位多普勒原理，从运动的粒子发出的散射光频率与照射在

此粒子上的光频率之间所产生的频差，正比于粒子的运动速度，由此可以得到粒子的运动速度。计算公式如下

$$f = 2v_p \sin(q/2)/l \tag{9}$$

式中 *f* —— 多普勒频移

v_p —— 粒子速度

l —— 激光波长

q —— 散射角

试验采用喷嘴直径为 12 mm 的钻头模型。试验结果表明，在漫流区和附壁上返区，流速降为喷嘴出口射流速度的 1/10~1/6，和图 5 的数值模拟结果相一致。

5 结论

(1) 不同孔径喷嘴其井底漫流特性相似，但大孔径射流流动更为复杂，在流场内部的能量损耗也较小孔径大。

(2) 在出口射流速度相同的情况下，喷嘴大小对漫流层的厚度影响不大，但大孔径喷嘴明显能够增大漫流层速度，且其沿漫流层的流动速度较为稳定。

(3) 针对流场中心多股射流干涉区，可考虑增加一个喷嘴或采取一定角度的倾斜射流。

(4) 在出口流量相同的情况下，小喷嘴射流具有一定的清岩优势。

参 考 文 献

- 1 高振果, 董杰. PDC 钻头井底水力问题的计算机模拟. 石油钻采工艺, 1995, 17(6): 19~24
- 2 谢翠丽, 杨爱玲, 陈康民. 非对称多喷嘴平底钻头射流三维流场的数值模拟. 石油学报, 2002, 23(6): 77~80
- 3 郑胜, 杨爱玲, 陈康民. 关于 PDC 钻头形态设计的探讨. 石油机械, 2003, 31(1): 21~23
- 4 王福军. 计算流体动力学分析. 北京: 清华大学出版社, 2004

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF NOZZLES WITH DIFFERENT DIAMETERS ON FLOW FIELD OF PDC BITS

Yang Li Chen Kangmin

(College of Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200092)

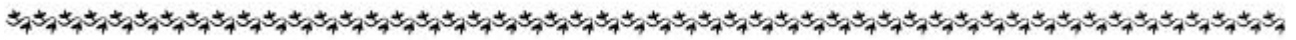
Abstract : The flow field of PDC bits is very complicated during drilling process, while optimizing its hydraulics parameters is an effective method to improve its drilling performance. According to the actual structure of the bits, flow field models for the PDC bits which have four nozzles with different diameters are established and then numerically simulated. The general features of the flow field are analyzed and the influences of nozzles with different diameters on flow

field of PDC bits under the conditions of same outlet velocity and same flux are obtained, thus provide some guidance for hydraulic design of PDC bits.

Key words : PDC bits Numerical analysis Nozzle
Flow field

作者简介:杨丽,女,1966年出生,博士研究生。主要研究方向为PDC钻头设计和流体对建筑的影响等。

E-mail : lgy@mail.tongji.edu.cn



(上接第 170 页)

provides an accurate profile of one side, the sample is rotated 180° to obtain the second image, which provides an accurate profile of the other side of the line. Keep the sidewall data for the better side of each image and neglect the data for the other side of each image to combine these better two sides to yield a new image which is more close to the real sample. Image registration based on an improved iterative closest point (ICP) method is applied to remove the position difference between these two images. The bilinear interpolation and the least

square fitting method are adopted to deal with the images after registration, and then the more accurate feature sizes than ever such as linewidth, sidewall angle, etc. can be calculated.

Key words: AFM Carbon nanotube
Dual image stitching method
Image registration

作者简介:褚巍,男,1973年出生,博士研究生。主要研究方向为纳米表面特征尺寸计量。

E-mail : chuwei@hit.edu.cn