

中心分区式 PDC 钻头流场数值模拟

于小龙¹, 祝效华², 贾彦杰², 邓福成², 童 华²

(1. 中海石油基地集团监督监理公司,天津 300450;2. 西南石油大学机电工程学院,四川成都 610500)

摘要:为证实 $\phi 215.9$ mm 中心分区式 PDC 钻头具有更好的冷却和携岩性能,根据钻头底部轮廓包络面建立了 $\phi 215.9$ mm 中心分区式与常规 PDC 钻头刀翼通道流场模型,对模型大压力梯度区域运用非均匀结构网格技术进行了局部细化,模拟了两种水力结构对井底流场及各通道内流量的影响。结果表明,中心分区水力结构形成的弱连通区域,使各流场区域的流量分配更加合理,并可缓解流体对钻头冠部的冲蚀,有利于流体及时冷却切削齿,减小钻头热磨损可能性,提高携岩能力和降低原生泥包发生概率。PDC 钻头采用中心分区水力结构不会增加钻头布齿及刀翼等结构设计和加工制造的难度,并能提高水力效率,推荐在适用 PDC 钻头地层的中深井段常规钻井和复合钻井中使用。

关键词:PDC 钻头 流场 数值模拟 数学模型

中图分类号:TE921⁺.1 文献标识码:A 文章编号:1001-0890(2011)04-0107-04

Numerical Simulation of Flow Field of Center Partition-Type PDC Bit

Yu Xiaolong¹, Zhu Xiaohua², Jia Yanjie², Deng Fucheng², Tong Hua²

(1. Supervision & Technology Co. CNOOC Oil Base Group Ltd., Tianjin, 300450, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China)

Abstract: In order to prove $\phi 215.9$ mm center partition-type PDC bit's cooling and cuttings carrying performance, the blades channel model for $\phi 215.9$ mm center partition-type and conventional PDC bit was developed according to bit envelope profile. The region with high pressure gradient was refined by local grids and non-uniform structure meshing. The impacts of two bit hydraulic types on bottom hole flow field were simulated. The results showed that the center partition-type bit formed a weak hydraulic connected region, so that the flow distribution was more rational which can ease the erosion of the bit profile, help cutter teeth cooling, reduce thermal wear, increase carrying capacity and reduce the risk of native rock balling. PDC bits with central partition structure will not increase the difficulties of bit design and manufacturing, while it can improve water efficiency. It was recommended in the application of PDC bits in mid-deep well drilling and combined drilling.

Key words: PDC bit; flow field; numerical simulation; mathematical model

PDC 钻头水力结构(主要指冠部水道和水眼的空间位置及其结构参数等)在很大程度上决定了 PDC 钻头的寿命。如果钻头水力结构不合理,则导致流体对钻头产生不良影响,可引起如下问题:1)钻头冲蚀现象严重,冲蚀易发生在钻头内锥或刀翼之间的本体上,常导致掉齿;2)钻头携岩效果不理想,重复破碎现象严重,易造成钻头泥包而丧失工作能力,严重影响钻进效率和钻头寿命;3)切削齿冷却效果不理想可能导致 PDC 片热裂或热磨损。钻头因大量摩擦热无法被顺畅携带出去而导致局部高温,

当 PDC 片的温度达到 $350\sim750$ ℃时,出现切削齿热磨损;当 PDC 片温度高于 750 ℃时,复合片内会出现因材料热膨胀系数不同而引起的内应力裂纹,

收稿日期:2010-04-22;改回日期:2011-06-08。

作者简介:于小龙(1976—),男,四川仪陇人,1999 年毕业于西南石油学院石油工程专业,工程师,工具公司经理,主要从事井下工具的研发与管理工作。

联系方式:(022)25803685,yuxl@cnooc.com.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目“气体钻井钻具与井壁碰撞机理及量化评价方法研究”(编号:50804040)资助。

直接丧失切削能力。因此,优化 PDC 钻头水力结构,增强流体对其清洗冷却能力就异常重要^[1-3]。中深井段使用的Φ215.9 mm PDC 钻头常存在冲蚀、热磨损与重复切削等诸多问题^[4],而中心分区式 PDC 钻头的 3 个主刀翼将钻头与井底的流体空间分为 3 个弱连通区(见图 1),该结构在改善钻头流场特性方面具有很大的潜在空间。近年来,随着计算流体

动力学数值模拟技术的飞速发展,该技术广泛应用于全井筒流场分析、气体钻井的携岩携水模拟、钻具冲蚀仿真以及钻头水力结构优化^[4-6]等方面。为此,笔者利用计算流体动力学数值模拟技术分析了Φ215.9 mm 中心分区式 PDC 钻头的流场流动规律,并与常规 PDC 钻头的流场流动规律进行了对比,验证了中心分区式 PDC 钻头的水力优势。

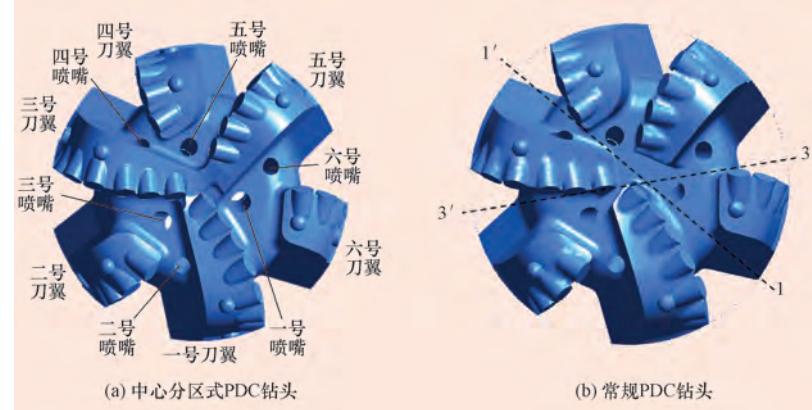


图 1 不同水力特征钻头的三维模型

Fig. 1 Bits' 3D model with different hydraulic features

1 模型建立与网格生成

Φ215.9 mm 中心分区式和常规 PDC 钻头三维模型及水力特征分别见图 1(a) 和图 1(b),除中心水力特征外钻头的其他几何参数相同。根据Φ215.9 mm PDC 钻头三维模型与井底轮廓包络面,建立其刀翼流道流场模型,并采用非均匀结构网格技术对其进行划分,对大压力梯度网格区域,即喷嘴出口周围流道及钻头冠部进行了局部网格细化。图 1(a) 中的剖面 1-1' 和剖面 3-3' 的位置与图 1(b) 相同。

2 控制方程的建立

控制流体流动的基本定律是质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律,由此可以得到连续方程、动量方程和能量方程,联立后所得到的 N-S 方程组是流体流动遵循的普遍规律。笔者采用标准 $\kappa-\epsilon$ 方程^[7]有限差分法求解流场问题。连续方程为:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

雷诺平均方程为:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial (v'_i v'_j)}{\partial x_i} \quad (2)$$

$\kappa-\epsilon$ 模式下的封闭方程为:

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + v_j \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} = P_\kappa + D_\kappa + \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + v_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = P_\epsilon + D_\epsilon + E_\epsilon \quad (4)$$

各系数的表达式为: $P_\kappa = -v'_i v'_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j}$, $D_\kappa = \frac{\partial}{\partial x_\kappa} \left[(\mu + \mu_T) \frac{\partial \kappa}{\partial x_\kappa} \right]$, $P_\epsilon = -C_{\epsilon 1} v'_i v'_j \frac{\epsilon}{\kappa} \frac{\partial v_i}{\partial x_j}$, $D_\epsilon = -\frac{\partial}{\partial x_\kappa} \left(\frac{\mu + \mu_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_\kappa} \right)$, $E_\epsilon = \frac{C_{\epsilon 2} \epsilon^2}{\kappa}$ 。

模型的涡团黏度 μ_T 为:

$$\mu_T = C_\mu \frac{\kappa^2}{\epsilon} \quad (5)$$

式中: v_i 为 x_i 方向上的流场速度, m/s; x_i 为流场的第 i 个空间坐标变量, m; t 为时间变量, s; μ 为流体黏度, Pa·s; x_j 为流场的第 j 个空间坐标变量, m; v'_i, v'_j 分别为 x_i, x_j 方向上的脉动速度, m/s; p 为流场压强, Pa; κ 为湍动能, J; ϵ 为湍动能的耗散率, m^2/s^3 ; P_κ, D_κ 分别为湍动能的生成项、扩散项; $P_\epsilon, D_\epsilon, E_\epsilon$ 分别为耗散率的生成项、扩散项、耗散项; μ_T 为涡团黏度, Pa·s。

将式(1)–(5)联立组成封闭方程组进行求解。

PDC 钻头内外环空流场可视为稳定的不可压缩湍流流场,钻头流场入口流量取 38 L/s,环境压力取

15 MPa, 介质密度为 1.3 kg/L, 动力黏度为 0.03 Pa·s, 钻头表面和井壁按固壁无滑移边界处理(因流体流速远大于钻头旋转线速度, 故忽略钻头旋转)。

3 数值仿真及分析

3.1 中心分区结构缓解滞留区冲蚀

钻头冠部的中心区域附近布置有多个喷嘴(一般为 3~5 个), 多股射流在井底相互干扰形成滞流区。该区域流体流动异常剧烈, 涡旋丛生, 钻井液和岩屑不容易向外流动, 切削齿破碎的新岩屑不断进入该区域, 致使该区域固相浓度增大, 喷嘴位置以内钻头中心部位易发生早期冲蚀破坏^[8]。

图 2(a)、(b) 分别为中心分区式 PDC 钻头和常规 PDC 钻头在剖面 1-1' 上的流场分布矢量图。从图 2 可看出, 中心分区式 PDC 钻头的结构设计能够保证切削结构从内锥到外锥始终与井底接触。同时, 其流场中心区域基本无漩涡, 岩屑能够及时排出, 既减少了重复破碎, 又缓解了滞流区对钻头中心的冲蚀, 有利于提高机械钻速和延长钻头寿命。

3.2 中心分区结构提高井底流场梯度

图 3 为钻头冠部流量及流场分布图, 图中数据为各流道内流量分布、云图为冠部流速分布, 根据流速与流场压力梯度的相关性可以求出井底流场压力

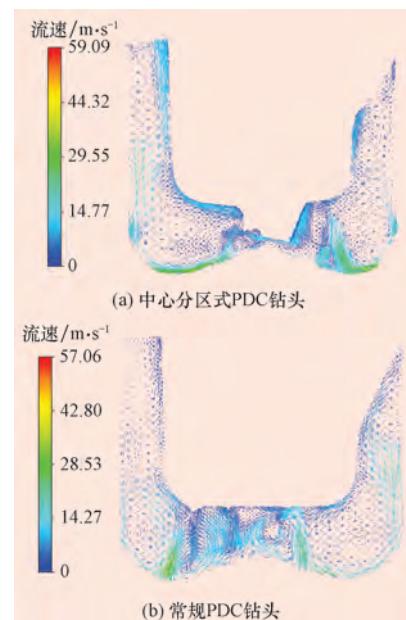


图 2 钻头 1-1' 剖面流场分布矢量图

Fig. 2 Flow field distribution vectors in the 1-1' section of bit

梯度分布。从图 3 可以看出: 常规 PDC 钻头底部中心高流速区不明显, 井底流场压力梯度较小, 其对主切削齿的冷却能力和携岩能力不足, 泥包萌生概率大; 中心分区式 PDC 钻头流场高速区沿径向分为 3 层, 井底流场压力梯度大, 可有效增强流体对岩屑的携能力; 高流速区分布在各刀翼的主切削齿附近, 可有效冷却主切削齿及避免泥包萌生。

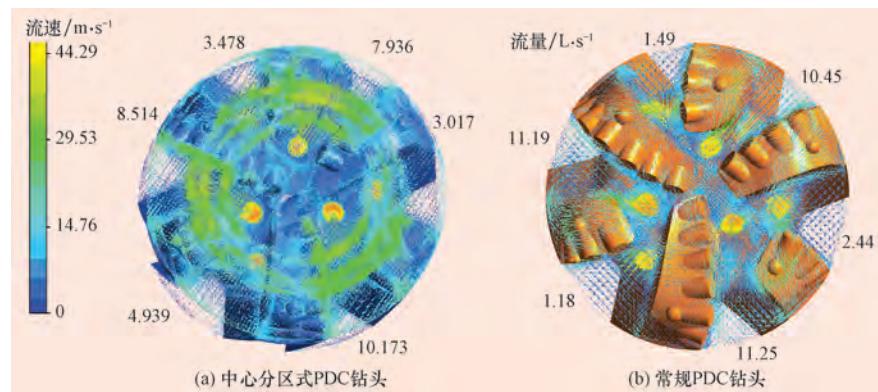


图 3 钻头冠部流量及流场分布

Fig. 3 Flow rate and flow field distribution on bit profile

3.3 中心分区结构优化各流道流场分布

井底流场的漫流横扫面积、漫流速度和压力梯度是衡量携岩能力的主要参数。漫流区域越大、漫流速度越高、压力梯度越大则携岩能力越好。PDC 切削齿传热系数通常与其表面流体流动速度的 0.8 次方成

正比, 因此漫流速度越高则切削齿冷却效果越好, 高漫流速度可防止或缓解 PDC 切削齿热磨损, 这对 PDC 钻头钻进强度大、研磨性高的地层尤为重要。

图 4 为中心分区式 PDC 钻头和常规 PDC 钻头 3-3' 剖面上 3# 流道内的流场矢量分布图。从图 4 可以看出, 中心分区式 PDC 钻头的漫流层厚度和流

速明显大于常规 PDC 钻头,水力能量可以更充分地用于携岩和对钻头的冷却。

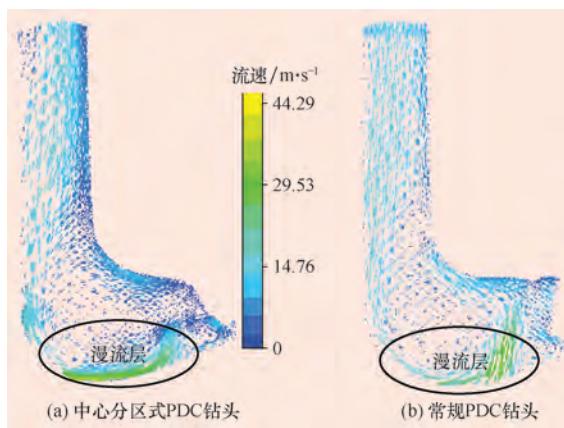


图 4 钻头流道内流场矢量分布

Fig. 4 Flow field distribution vectors in flow passage of bit

3.4 中心分区结构改善流道内流量分配

对钻头进行布齿设计时通常使用等磨损、等切削和等功率 3 个原则。等磨损原则要求每个切削齿的设计切削力大致等于实际切削力,而实际切削力是切深、速度和相邻齿互作用的函数,难以完全达到与设计切削力相等^[3]。目前国内钻头厂家以及科研院校多采用等切削原则布置切削齿,用等功率原则进行修正,以达到延长钻头寿命的目的。

表 1 为流道设计流量(即预期分配流量)及两种结构钻头的流道流量对比。由表 1 可知,相比常规水力结构,中心分区水力结构在流量分配上更加均衡,各流道的实际分配流量与设计流量匹配率均大于 90%,流量分配更加合理。

表 1 钻头各刀翼流量分配

Table 1 Bit flow field distributions

序号	各刀翼流量设计比率,%	各刀翼流量比率, %		匹配率, %	
		常规水力结构	中心分区结构	常规水力结构	中心分区结构
1	26.56	29.60	26.70	86.40	99.50
2	13.90	3.15	13.00	22.30	93.50
3	21.34	29.45	22.40	82.65	95.30
4	10.12	3.90	9.10	38.50	90.10
5	20.34	27.50	20.90	73.96	97.30
6	8.74	6.40	7.90	73.23	90.40

注:各刀翼流量设计比率按其切削工作量及切削功率确定。

4 结 论

1) 中心分区式 PDC 钻头的水力结构可有效增

大井底漫流速度和压力梯度以及减少滞留区的扩展空间,可增强对主切削齿的冷却,减少岩屑滞留、重复破碎及降低 PDC 复合片热磨损的发生概率。

- 2) 中心分区结构使各流道实际流量与设计流量的偏差更小。利用数值模拟辅助钻头水力结构设计,更易于得到各流道流量最优化的水力结构。
- 3) 中心分区式 PDC 钻头在不增加钻头布齿和刀翼结构难度的情况下,提高了水力效率。
- 4) 推荐在硬地层、机泵能力不足等工况下用中心分区式 PDC 钻头代替常规 PDC 钻头。

参 考 文 献

- [1] Watson G R, Barton N A, Hargrave G K. Using new computational fluid dynamics techniques to improve PDC bit performance[R]. SPE 37580, 1997.
- [2] Akin J E, Rice U, Dove N R, et al. New nozzle hydraulics increase ROP for PDC and rock bits[R]. SPE 37578, 1997.
- [3] 许杰, 安文忠, 徐荣强. PDC 钻头钻复合地层技术在旅大油田的应用[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(1): 76-79.
Xu Jie, An Wenzhong, Xu Rongqiang. Application of PDC bits in complex formations of Lvda Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(1): 76-79.
- [4] 况雨春, 曾恒, 周学军, 等. PDC 钻头水力结构优化设计研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(4): 60-62.
Kuang Yuchun, Zeng Heng, Zhou Xuejun, et al. Study on optimized design of hydraulic structure for PDC bits[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(4): 60-62.
- [5] 黄红梅, 翟应虎, 王辉, 等. 实体 PDC 钻头流场数值模拟与实验验证[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2005, 29(3): 49-52.
Huang Hongmei, Zhai Yinghu, Wang Hui, et al. Numerical simulation and experimental checking for downhole flow field of a real PDC bit[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Natural Science Edition, 2005, 29(3): 49-52.
- [6] 谢翠丽, 杨爱玲, 陈康民. 旋转钻头井底流场的初步数值研究[J]. 石油钻探技术, 2002, 30(3): 6-8.
Xie Cuili, Yang Ailing, Chen Kangmin. Preliminary numerical study of downhole flow field with rotary bits[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2002, 30(3): 6-8.
- [7] 王志斌, 陈文梅, 祚良银, 等. 旋流器流场的数值模拟及对流场特性的分析[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2006, 38(3): 59-64.
Wang Zhibin, Chen Wenmei, Chu Liangyin, et al. Numerical simulation and new understanding of the hydrocyclone flow field by computational fluid dynamics[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2006, 38(3): 59-64.
- [8] 管志川, 李春山, 范明顺. 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 implinging on the bottomhole [J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(2): 117-121.