

尖脊结构对孕镶金刚石钻头表面流场的影响研究

俞嘉宝¹, 赵建国², 孙鑫³, 陈宝义¹, 马银龙^{1,4*}

(1. 吉林大学, 吉林 长春 130026; 2. 中煤科工西安研究院(集团), 陕西 西安 710077; 3. 吉林省地质勘探技术研究所, 吉林 长春 130103; 4. 新疆大学, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要:孕镶金刚石钻头的唇面结构是影响其碎岩效率与钻进性能的关键因素,尖脊孕镶金刚石钻头的尖脊排布方式直接关系到孔底钻井液对唇面的冷却与清洗效果。为探究尖脊排布方式对钻头表面流体流动特性的影响规律,设计顺向、逆向、对称三种尖脊排布方式,外径78 mm、内径48 mm的尖脊孕镶金刚石钻头唇面。以清水为介质,利用ANSYS Fluent对钻头表面流体流动进行动力学仿真。在钻头62.83 rad/s转速的条件下对比研究不同尖脊排布方式下钻头表面流体的流动特性与钻头表面流速分布,阐明结构参数对钻头表面流体流动特性的影响规律。仿真结果表明:三种排布方式表面流体均在水口附近呈现流速最高,可达7.92~9.15 m/s;脊间高流速区域集中于尖脊迎向转动方向前端,顺向排布对脊间流体流动速度的影响最小,尖脊前端流速可达5.60 m/s,较逆向、对称两种排布方式分别提升了约17.89%和2.04%,且高流速区域能够覆盖三条尖脊前端高温区域;顺向排布脊间流速可达3.20 m/s,较逆向、对称两种排布方式分别提升了约102.50%和247.80%;同时,顺向排布方式尖脊对流体的流迹影响最小。综合研究表明,尖脊顺向排布最有利于维持钻头表面流速,并改善尖脊的冷却条件及脊间、孔底岩屑的清理效果。

关键词:孕镶金刚石钻头;唇面结构;尖脊结构;排布方式;流体流动特性;CFD;数值模拟

中图分类号:P634.4 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)S1-0064-06

Study on effect of ridge arrangement on surface flow field of an impregnated bit

CHOU Jiabao¹, ZHAO Jianguo², SUN Xin³, CHEN Baoyi¹, MA Yinlong^{1,4*}

(1. Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710077, China; 3. Jilin Provincial Institute of Geological Exploration Technology, Changchun Jilin 130103, China; 4. Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830046, China)

Abstract: The crown structure of an impregnated diamond bit is a critical factor affecting its rock-breaking efficiency and drilling performance. The ridge arrangement of a ridged impregnated diamond bit directly determines the cooling and cleaning performance of drilling fluid acting on the bit crown at the bottom hole. To investigate how ridge arrangement affects the flow characteristics of fluid over the bit surface, three ridge layouts (forward, reverse and symmetric) are designed for bit crowns of ridged impregnated diamond bits with an outer diameter of 78 mm and an inner diameter of 48 mm. Using clean water as the working medium, ANSYS Fluent is adopted to conduct hydrodynamic simulations of fluid flow on the bit surface. Under a bit rotational speed of 62.83 rad/s, the flow characteristics and velocity distribution of surface fluid with different ridge layouts are compared, and the influence of structural parameters on fluid flow behavior is clarified. The simulation results show that the maximum fluid velocity for

收稿日期:2026-09-09; 修回日期:2026-09-18 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.S1.007

基金项目:陕西省重点研发计划项目(编号:2025CY-YBXM-455)

第一作者:俞嘉宝,男,蒙古族,2001年生,硕士研究生,地质工程专业,研究方向为钻探机具与材料,吉林省长春市朝阳区西民主大街938号, laiwb24@mails.jlu.edu.cn。

通信作者:马银龙,男,汉族,1984年生,教授,地质工程专业,博士,主要从事钻探机具研究工作,吉林省长春市朝阳区西民主大街938号, ylma@jlu.edu.cn。

引用格式:俞嘉宝,赵建国,孙鑫,等.尖脊结构对孕镶金刚石钻头表面流场的影响研究[J].钻探工程,2026,53(S1):64-69.

CHOU Jiabao, ZHAO Jianguo, SUN Xin, et al. Study on effect of ridge arrangement on surface flow field of an impregnated bit[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1):64-69.

all three layouts occurs near the water ports, ranging from 7.92 to 9.15 m/s. High-velocity zones between ridges concentrate at the front edge of ridges facing the rotation direction. The forward layout imposes the weakest disturbance on inter-ridge fluid velocity. The flow velocity at ridge fronts reaches 5.60 m/s, approximately 17.89% and 2.04% higher than those of the reverse and symmetric layouts, respectively, and the high-velocity zone can cover the high-temperature regions at the front of the three ridges. The inter-ridge velocity of the forward layout reaches 3.20 m/s, which is about 102.50% and 247.80% higher than the reverse and symmetric layouts, respectively. Meanwhile, the ridges in the forward layout exert the least influence on fluid streamlines. Comprehensive analysis demonstrates that the forward ridge arrangement is optimal for preserving surface flow velocity, improving ridge cooling conditions and enhancing the removal of cuttings between ridges and at the bottom hole.

Key words: impregnated diamond bit; crown structure; ridge structure; layout; flow characteristics of fluid; CFD; numerical simulation

0 引言

孕镶金刚石钻头依靠胎体表面出露的金刚石颗粒磨削岩石实现钻进^[1-2]。在唇面设置尖脊能够增大岩石表面局部比压、提高碎岩效率;但钻进过程中尖脊唇面与孔底岩石的高速摩擦会在尖脊前端突出部位造成局部热聚集现象,进而导致钻头磨损加剧、钻进效率下降^[3]。钻头唇面既影响孔底岩石的应力分布与碎岩方式,也影响钻头表面钻井液的流动状态与冷却清洗效果,后者直接关系到尖脊在高温工况下的钻进寿命^[4]。因此,研究钻头唇面尖脊的排布方式对钻头表面流体流动的影响,进而优化钻头唇面结构,改善钻头表面流体流动,增强唇面尖脊冷却与孔底清洗能力,具有重要的现实意义。

针对通过优化钻头的表面形状设计以改善钻头表面流体流动,提高孔底清洗以及钻头冷却效率的问题,目前学者们已经开展了大量研究。在牙轮钻头表面流体流动的研究中,学者们综合运用CFD-DPM耦合、实钻试验等手段,研究了牙轮高度、喷嘴直径等结构参数对钻头表面岩屑清除效率的影响,为该类钻头的结构优化提供了理论依据^[5]。在PDC钻头结构参数的优化研究中,学者们采用调整喷嘴射流角、在钻头上安装环槽形PDC、斧形PDC和三脊PDC等方式,对PDC钻头的碎岩过程和水力结构进行了优化^[6-7]。在孕镶金刚石钻头的研究中,学者们同样通过改进水口结构、调整唇面形状等方式,提高钻头破岩效率并优化其水力结构^[8-9]。现有研究表明,钻头表面结构设计会显著影响钻头表面的流体流动方式和流速,进而影响钻头的孔底清理能力和钻头冷却能力^[10]。现有孕镶金刚石钻头唇面多设计为环槽形状,用以优化钻头唇

面水力结构,增强钻井液孔底清洁及冷却能力,但针对尖脊结构在唇面上的排布形式对钻头表面流体的流动方式和流速的影响目前尚缺乏研究。

计算流体动力学已经成为揭示钻进过程中钻具-井壁对孔底流体流动影响机理,展现钻进过程中流体流动过程的重要手段。其可以提供在钻进过程中难以直接观测、钻进后无法获取的重要数据,例如钻井液在钻头表面的流动速度,岩屑在孔底的运移速率等。这项技术广泛应用于各类钻头的水力结构设计及优化中。Esfahanizadeh等^[11]以旋转PDC钻头周围的流体流动与切削齿冷却为研究对象,采用realizable $k-\epsilon$ 湍流模型与DPM颗粒追踪耦合的CFD方法,模拟了CuO/ZnO纳米增强钻井液在钻头复杂几何流场中的非等温流动,揭示了纳米颗粒提升岩屑输运效率并降低切削齿表面温度的作用机理。Wu等^[12]以射流冲击器与钻头之间的液体动力相互作用为研究对象,采用动网格CFD方法替代常规稳态分析,揭示了冲击器往复运动对井底流场与环空上返流速的影响机理。曹龙龙等^[13]以密闭取心孕镶金刚石钻头的井底两相流流场为研究对象,采用 $k-\epsilon$ 湍流模型结合标量混合的CFD数值模拟方法,模拟了钻井液与密闭液在钻头底唇面的混流过程,揭示了密闭液漫流富集隔离岩心、钻井液覆盖唇面冲洗冷却的流场分布特征,验证了钻头双流道结构设计参数的合理性。孙祺斌等^[14]以特高多层胎体孕镶金刚石钻头的结构设计与水力性能为研究对象,采用数值模拟方法对挡水片对钻头水口流场的影响进行了研究,验证了挡水片结构在防止泥浆分流、保证钻头冷却冲洗方面的有效性。鉴于此,本文基于在井底流体流动计算中广泛使用的ANSYS Fluent平台,构建三脊孕镶金刚石

钻头表面流体流动有限元模型,旨在揭示尖脊排布方式对钻头表面流体流动特性的影响规律。

针对上述问题,本文以顺向、逆向、对称三种尖脊排布方式的孕镶金刚石钻头为对象,在600 r/min转速、72 L/min泵量的钻进参数下开展钻头表面流场三维数值模拟,从唇面冷却与清洗的角度分析尖脊排布方式的适用性,为倾斜尖脊孕镶金刚石钻头的唇面结构设计与水力学参数优化提供参考。

1 仿真模型建立

1.1 几何模型

构建三种外径78 mm、内径48 mm的尖脊孕镶金刚石钻头,分别设计为同心尖脊朝向钻头旋转方向偏转排布,逆钻头旋转方向偏转排布以及对称偏转排布,尖脊偏转角度设置为38°。三种钻头唇面表面的圆环分别以顺转动方向,逆转动方向,对称形式进行排布。根据圆环尖脊排布方式,三种钻头分别记为顺向排布钻头、逆向排布钻头和对称排布钻头,后文简称钻头顺、钻头逆和钻头对称。

构建钻头-流场模型,建立外径80 mm、内径46 mm的圆环以模拟岩心-钻头体-孔壁间的井底钻井液,随后将孔底钻井液模型切割为钻头表面流体模型与孔壁-钻头间钻井液模型,整体钻头表面流场模型如图1所示。

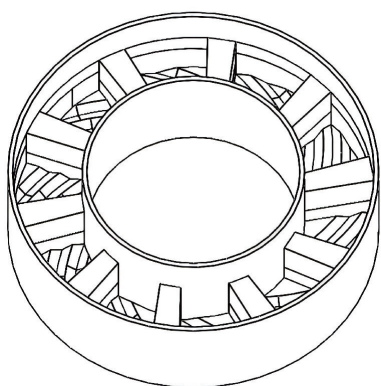


图1 钻头表面钻井液几何模型

1.2 数学模型

本文采用不可压缩流体的连续性方程及Navier-Stokes方程对流体的流动进行定义,如式(1)、式(2)所示^[11]:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho g \quad (2)$$

式中: $u=(u, v, w)$ ——流体速度矢量,m/s; ρ ——流体密度,kg/m³; t ——时间,s; p ——流体压力,Pa; μ ——流体动力黏度,Pa·s; g ——重力加速度,m/s²。

本文采用标准 k - ϵ 模型对湍流进行定义,标准 k - ϵ 对流体流动的定义如式(3)~(5)所示^[12]:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P_k + C_{3\epsilon} P_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (5)$$

其中:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

$$P_k = \mu_t S^2 = 2\mu_t S_{ij} S_{ij} \quad (7)$$

$$S = \sqrt{2S_{ij} S_{ij}} \quad (8)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

式中: S ——平均应变率张量,s⁻¹; S_{ij} ——平均应变率张量分量,s⁻¹; u_i, u_j ——流体速度分量,m/s; x_i, x_j ——直角坐标分量,m; $C_\mu, \sigma_k, \sigma_\epsilon, C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}$ ——经验系数,分别取: $C_\mu=0.09, \sigma_k=1.0, \sigma_\epsilon=1.3, C_{1\epsilon}=1.44, C_{2\epsilon}=1.92, C_{3\epsilon}=0^{[12]}$; Y_M ——可压缩性耗散项; P_b ——湍动能生成项; P_k ——浮力生成项; ϵ ——湍动能耗散速率; k ——湍动能。

1.3 数值模型

液体的相关属性见表1。

表1 流场模型材料参数

模型名称	材料	密度/(kg·m ⁻³)	黏度/(Pa·s)
钻井液	液态水	998.2	0.001003

1.3.1 网格无关性测试

为在保持计算精度的同时降低计算成本,减少计算时间,本文对同一流场模型分别采用0.50、0.40、0.30 mm三种尺寸的四面体网格进行0.2000 s仿真,仿真结果如图2所示。

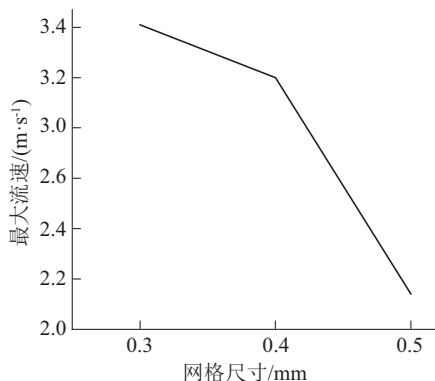


图2 流场网格无关性测试

当网格尺寸由0.30 mm增加到0.40 mm时,仿真计算所得钻头表面液体最大流速由3.41 m/s降低至3.20 m/s,变化幅度仅为6.15%,而当网格尺寸由0.40 mm增加到0.50 mm时,仿真计算所得钻头表面液体最大流速由3.20 m/s降低至2.34 m/s,变化幅度较大,达26.87%。因此为保持计算精度的同时降低计算成本,模型划分所用网格尺寸选用0.40 mm。

1.3.2 模型网格划分

由于钻头表面形状比较复杂,因此流场模型采用四面体网格结构进行网格划分,网格密度设置为0.40 mm,划分单元格数量及流场模型网格划分如表2、图3所示。

表2 各部件划分网格数量

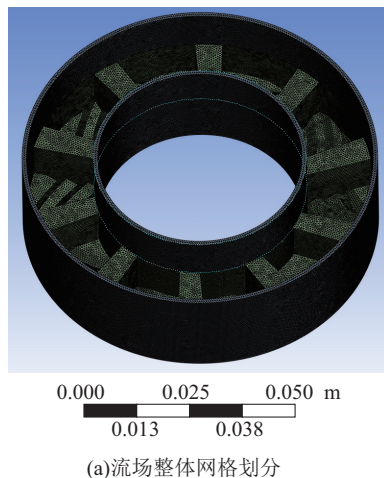
模型名称	钻头顺表面 流场	钻头逆表面 流场	钻头对称表 面流场
网格数量	2110449	2110449	1621931

1.3.3 边界条件

为模拟实际钻进工况,将岩心-钻头间截面设置为流体流入面,流速设置为3.82 m/s,将孔壁-钻头间截面设置为流体流出面,外部压力设置为0。随后将孔壁-钻头间钻井液模型设置为非旋转模型,再赋予钻头表面流体模型指向孔底62.83 rad/s的转速。同时模型整体考虑重力影响,为模型整体施加大小为9.8 m/s²、方向指向孔底的重力加速度。

2 流场模拟结果与讨论

三种钻头表面流场模型流体流出流速均在开始计算0.5000 s后达到最大并保持稳定,本文取



(a)流场整体网格划分



(b)流场内外层网格划分

图3 钻头表面流场网格划分示意

0.5000 s时刻的流场进行分析。钻头表面流场云图如图4所示。

根据钻头顺表面流速云图(图4a)可知,在转速62.83 rad/s、泵量72 L/min条件下,钻头顺水口处流速约为8.00 m/s,尖脊处最高流速约为5.60 m/s,最低流速可达3.20 m/s,高流速部分集中于三条尖脊前端与水口交界区域。

根据钻头逆表面流速云图(图4b)可知,在转速62.83 rad/s、泵量72 L/min条件下,钻头逆的尖脊对钻头表面液体流速的影响较大,水口处流速约为7.92 m/s,尖脊处最高流速约为4.75 m/s,最低仅能达到约1.58 m/s,高流速部分集中于钻头内侧第一条尖脊前端与水口交界区域。

根据钻头对称表面流速云图(图4c)可知,在转速62.83 rad/s、泵量72 L/min条件下,钻头对称的尖脊对钻头表面液体流速的影响最大,钻头表面流

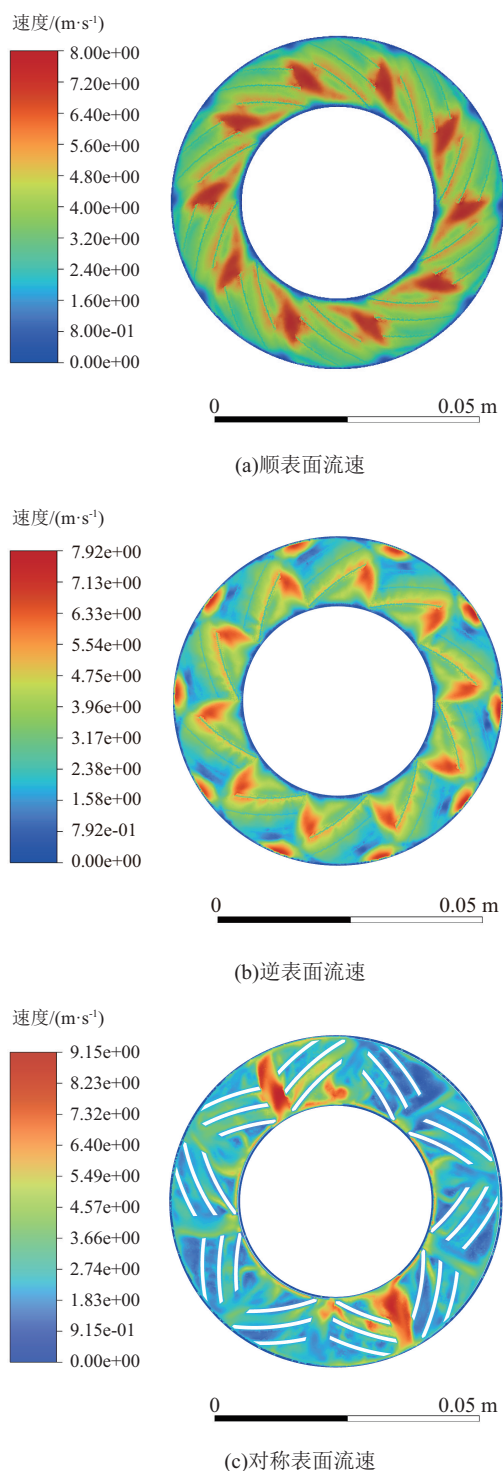


图4 三种钻头表面流速云图

体流速分布不均匀,水口处流速最高达 9.15 m/s ,尖脊处最高流速约为 5.49 m/s ,最低仅为约 0.92 m/s ,高流速部分集中于钻头表面水口处。

在转速 62.83 rad/s 、泵量 72 L/min 条件下,三种排布方式钻头表面的流速分布规律基本一致:水

口处流速最高,高流速区主要集中于水口及尖脊迎旋转方向的前端;流体沿尖脊间通道自尖脊前端流向尾端时,流速逐渐降低;沿钻头径向自内侧向外侧,尖脊间通道内的流速亦呈递减趋势。

图5为三种钻头的表面流场矢量分布图。矢量图进一步表明,尖脊在旋转过程中对钻头表面流迹有明显的扰动作用,且扰动程度由于尖脊排布方式不同有着明显差异。

顺表面的尖脊沿旋转方向排布,与水口排布角

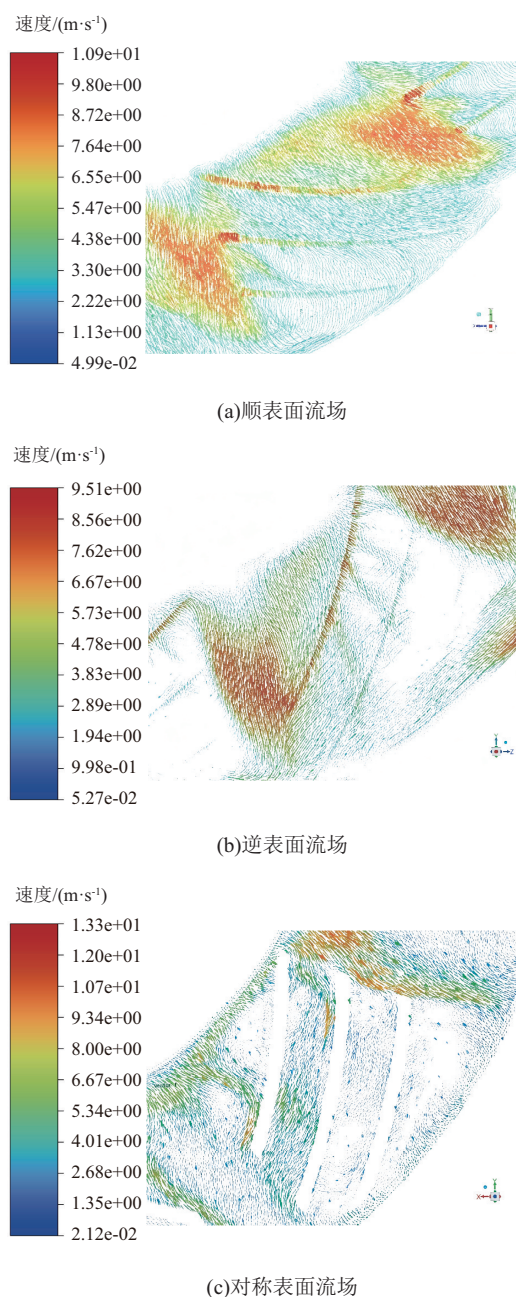


图5 三种钻头表面流场矢量图

度及钻头旋转方向一致,尖脊在旋转过程中由流体低压区切入高压区,对钻头表面流迹的扰动较轻。流体能够顺利地由水口高压区沿脊间通道进入尖脊间低压区,并从尖脊末端进入上一个水口排出。

逆表面的尖脊逆向于旋转方向排布,尖脊在旋转过程中由流体高压区切入流体低压区,对钻头表面流迹的扰动较严重。流体在流动过程中受尖脊阻拦及切割作用,流动方向在尖脊内侧区域发生滞留与偏转。流体逆旋转方向流动并沿尖脊前方重新汇集后排出,导致脊间通道中流体速度减缓。

对称表面的尖脊对钻头表面流场的扰动程度更为严重。尖脊在旋转过程中由流体高压区切入流体低压区,对流体的流动产生了阻拦以及切割作用,尖脊间流体流动方向产生了明显的偏转,部分区域形成了涡流,显著降低了脊间通道中流体速度。

3 结论

(1)孕镶金刚石钻头唇面尖脊的排布方式会显著改变钻头表面钻井液的流速分布。三种排布方式表面流体均在水口附近呈现流速最高,且高流速区域集中于尖脊迎向转动方向前端;尖脊顺向、逆向与对称排布方式下水口处最高流速分别约为8.00、7.92及9.15 m/s,但三者脊间流速差异显著,逆向及对称排布方式脊间最低流速仅为1.58和0.92 m/s,而顺向排布方式脊间最低流速达3.20 m/s,较逆向、对称两种排布方式分别提升了约102.50%和247.80%。逆向及对称排布方式脊间最高流速仅为4.75和5.49 m/s,而顺向排布方式脊间最高流速达5.60 m/s,较逆向、对称两种排布方式分别提升了约17.89%和2.04%。相较于逆向以及对称排布方式,顺向排布方式在提升脊间流速方面具有显著优势。

(2)孕镶金刚石钻头唇面尖脊的排布方式对流体流迹有着显著的影响,三种排布方式中,顺向排布尖脊脊间流体能够顺利地由岩心-钻头间通道流入,再顺旋转方向通过脊间流道由钻头-孔壁间通道流出。而逆向排布尖脊会通过旋转截断流体流动轨迹,推动流体逆旋转方向向水口处流动,汇集排出。对称排布尖脊则会阻拦切割流体的迹线,并诱导流体在脊间通道产生涡流,相较于逆向以及对称排布方式,顺向排布尖脊对流体流动轨迹的影

响最小。

参考文献:

- [1] Ma Y L, Ren J, Zhou Q Q. Exposure behavior and drilling efficiency of basalt fiber composite impregnated diamond bits in hard granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2024,183:105950.
- [2] Wang C H, Wang X M, Li S B, et al. Evaluation method for tooth wear of roller bits based on the fractal dimension of the rock surface[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022,210:110039.
- [3] Gorelikov V G, Lykov Y V, Gorshkov L K, et al. Investigation of thermal operational regimes for diamond bit drilling operations[J]. International Journal of Engineering, 2019,32(5):790-793.
- [4] 孙志刚.定向钻进单一包裹孕镶金刚石钻头研究[D].长春:吉林大学,2024.
- [5] Zou Y Q, Chen X Y, Gao D L. Flow field characteristics and cuttings removal mechanisms of a new type of hybrid bit with central-grooved single-cone and multi-blade[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2025,246:213637.
- [6] Chen X Y, Jin M, Yang J, et al. Numerical investigation on the flow field characteristics of a new type of double-stage jetting PDC bit for deepwater shallow formations drilling[J]. Ocean Engineering, 2024,313(Part2):119463.
- [7] Huang K L, Feng Y Q, Zhou C X, et al. Analysis of bit-balling failure and hydraulic structure optimization design of annular-grooved PDC bits[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2024,241:213134.
- [8] Zhang C, Gao K, Lü X S, et al. Experimental study on the rock-breaking mechanism of annular-grooved structure and rotary direction for impregnated diamond bits[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2025,249:213812.
- [9] 谢宗亮.环槽式金刚石钻头破岩机理研究[D].成都:西南石油大学,2018.
- [10] Zhu J, Huang Z Q, Ma Y C, et al. Hydraulic structure design and downhole flow field optimization of geophysical drill bits in a limestone stratum[J]. Science Progress, 2020,103(3):0036850420931257.
- [11] Esfahanizadeh L, Dabir B, Goharpey F. CFD modeling of the flow behavior around a PDC drill bit: Effects of nano-enhanced drilling fluids on cutting transport and cooling efficiency[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2022,16(1):977-994.
- [12] Wu D Y, Zhang S H, He Y. A dynamic mesh-based approach to analyse hydrodynamic interactions between a fluidic hammer and drill bit[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019,175:536-546.
- [13] 曹龙,张恒春,王稳石,等.密闭取心钻头两相流流场CFD模拟研究[J].钻探工程,2021,48(11):36-42.
- [14] 孙祺斌,沈立娜,杨甘生,等.特高多层胎体孕镶金刚石钻头设计与数值模拟[J].煤田地质与勘探,2020,48(3):225-230.

(编辑 王文)