

涡轮钻具叶片优化设计与性能研究

郭强¹, 翁炜^{1*}, 卢彤¹, 杨鹏¹, 赵志涛¹, 徐军军¹, 张杰丰², 陈晓华²

(1. 北京探矿工程研究所, 北京 100083; 2. 河北省煤田地质局第四地质队, 河北 张家口 075100)

摘要: 针对深部地热钻井中高温硬岩钻进效率低的问题, 本文以 $\Phi 178\text{mm}$ 高速涡轮钻具为研究对象, 开展涡轮叶片的结构优化与水力性能研究。基于动量矩定理与能量守恒定律建立涡轮输出特性的数学模型, 采用五次多项式曲线进行叶片型线设计, 提出退化扭曲成型方法替代传统拉伸成型工艺, 通过有限元流体分析对比优化前后叶片的速度场与压力场分布, 搭建室内台架测试系统验证优化效果。结果表明: 退化扭曲成型叶片实现了流道等宽度分布, 改善了压力场均匀性, 减小了涡流损失; 实测结果与模拟趋势一致, 验证了优化方法的有效性; 额定转速下优化后单级涡轮输出扭矩提升65.58%, 水力效率从67.92%提升至76.89%, 压降降低4.27%。研究为提高深部地热钻井效率、降低能耗及延长钻具寿命提供了理论依据与技术支持。

关键词: 涡轮钻具; 叶片优化; 水力特性; 扭曲成型; 数值模拟; 深部地热; 高温硬岩钻探

中图分类号: P634.4; TE921+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)04-0145-09

Optimization design and performance research of turbodrill blades

GUO Qiang¹, WENG Wei^{1*}, LU Tong¹, YANG Peng¹, ZHAO Zhitao¹,

XU Junjun¹, ZHANG Jiefeng², CHEN Xiaohua²

(1. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China; 2. No.4 Geological Team of Hebei Coalfield Geological Bureau, Zhangjiakou Hebei 075100, China)

Abstract: To address the issue of low drilling efficiency in high-temperature hard rock formations during deep geothermal drilling, this paper investigates the structural optimization and hydraulic performance of turbine blades using a $\Phi 178\text{ mm}$ high-speed turbodrill as the research object. A mathematical model for the output characteristics of the turbodrill was established based on the moment of momentum theorem and the law of conservation of energy. The blade profile was designed using a quintic polynomial curve, and a degenerated twisted forming method was proposed to replace the traditional stretch forming process. Finite element fluid analysis was employed to compare the velocity and pressure field distributions of the blades before and after optimization, and an indoor bench test system was built to verify the optimization effect. The results indicate that the blades formed by the degenerated twisted method achieve an equal-width flow channel distribution, improve pressure field uniformity, and reduce vortex losses. The experimental results were consistent with the simulation trends, validating the effectiveness of the optimization method. At the rated speed, the output torque of the optimized single-stage turbine increased by 65.58%, the hydraulic efficiency improved from 67.92% to 76.89%, and the pressure drop decreased by 4.27%. This study provides a theoretical basis and technical support for improving deep geothermal drilling efficiency, reducing energy consumption, and extending the service life of drilling tools.

Key words: turbodrill; blade optimization; hydraulic characteristics; twisted forming; numerical simulation; deep geothermal; high-temperature hard rock drilling

收稿日期: 2025-11-06; 修回日期: 2026-02-01 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.04.015

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20221681, DD202605202307)

第一作者: 郭强, 男, 汉族, 1990年生, 工程师, 机械工程专业, 硕士, 主要从事钻探装备及相关机具研发、随钻定向工艺研究等工作, 北京市海淀区学院路29号, 1171136936@qq.com。

通信作者: 翁炜, 男, 汉族, 1977年生, 正高级工程师, 地质工程专业, 博士, 长期从事深部地热钻探工艺、井下动力钻具研发及随钻测控技术等研究工作, 北京市海淀区学院路29号, wengw77@163.com。

引用格式: 郭强, 翁炜, 卢彤, 等. 涡轮钻具叶片优化设计与性能研究[J]. 钻探工程, 2026, 53(4): 145-153.

GUO Qiang, WENG Wei, LU Tong, et al. Optimization design and performance research of turbodrill blades [J]. Drilling Engineering, 2026, 53(4): 145-153.

0 引言

地热能开发一直是国家非常规清洁能源利用的重要路径。随着国家积极推进地热规模化开发,近年来地热资源勘探已由中深层水热型地热逐步向深层干热岩型地热过渡。深部地热储层多由致密变质岩或花岗岩组成,温度普遍高于 180°C ,地层具有高硬度、强研磨性、高温高压等特点,该类地层可钻性极差,采用常规螺杆钻具搭配牙轮钻头的方式钻进时,机械钻速极低,导致频繁起钻,有效钻进时间短,无法满足钻井需求^[1-4]。为满足深部地热高温硬岩钻探要求,提高高温硬岩地层的钻进效率,全金属高速涡轮钻具搭配孕镶金刚石钻头的钻进工艺在深部地热开发中逐步得到推广应用。

涡轮钻具是将多级涡轮串联,依靠地面泵送的钻井液驱动的井底动力钻具。该钻具的本质是将钻井液的能量转变为机械能,带动主轴转动并驱动钻头进行高速破岩^[5]。涡轮钻具为全金属结构,可完全适应深部地热井下高温高压复杂工况。

涡轮钻具的输出扭矩、转速及压降(水头)是其主要输出特性,其中扭矩和转速决定了钻头的钻进效率。涡轮钻具通过内部定转子叶片进行水力能量转化,涡轮叶栅水力性能直接决定涡轮钻具的输出特性,因此可通过改进涡轮叶片结构来提高涡轮钻具的输出性能。

1 叶片型线设计及水力特性分析

1.1 叶片型线设计

钻井液从涡轮钻具上端泵入,通过与涡轮节内的定转子叶片相互作用,从单级涡轮叶片流出后,钻井液的动量矩发生变化,进而使转子获得工作扭矩,驱动钻具主轴。单级涡轮输出功率远远无法达到实际钻井需求,通常将多级涡轮副串联成涡轮节,涡轮级数由输出功率及钻具长度等要求综合决定。假设每级涡轮产生的作用力相同,分析涡轮钻具整体输出性能时,可以单级涡轮叶片为研究对象。涡轮叶片结构及关键几何参数见图1^[6-7]。

叶片截面型线直接影响涡轮钻具的水力输出特性,其设计关键在于确定涡轮叶片的关键几何参数。本文 $\phi 178\text{ mm}$ 高速涡轮钻具为研究对象,根据前期室内测试结果和井下实钻试验效果,结合深部地热钻井中的地面泵组能力要求、钻井液密度及固

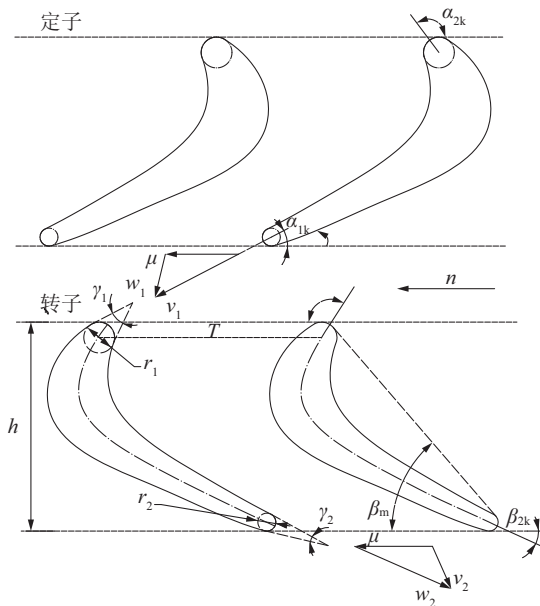


图1 涡轮叶片结构参数

Fig.1 Structural parameters of turbodrill blade

相含量等因素,确定涡轮钻具的初始性能参数,见表1。

表1 涡轮钻具初始性能参数

Table 1 Initial performance parameters of turbodrill

性能参数	参数值
钻井液流量/($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$)	30
钻井液密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1000
单级扭矩/($\text{N}\cdot\text{m}$)	45
单级压降/MPa	0.05
流道中径/mm	116
流道宽度/mm	15

根据该钻具的初始性能参数,可以获取涡轮钻具内流体的轴向速度分量、圆周速度等参数,结合涡轮钻具无因次数关系,可得叶片的进出口结构角,进而求得叶片的安装角。叶片的轴向高度一般不超过叶片宽度^[8],叶片采用铸造工艺,其上下端要预留 $0.3\sim 0.5\text{ mm}$ 倒角。根据叶片安装角和叶片轴向高度,可得到叶片弦长。前后缘半径越小对钻井液的阻力越小,综合考虑叶片加工工艺和耐冲蚀能

力,通常前缘半径取0.6~1 mm,后缘半径取0.4~0.6 mm。前后锥角决定叶片两端的尖锐程度,影响叶片形状和水力性能,一般根据经验公式计算并进行圆整处理。叶栅密度体现涡轮叶片的密集程度,研究表明叶栅密度取0.74时,能量转化效率最优^[9]。考虑到实际钻井液中固相含量较高,为防止大颗粒固相堵塞叶片,叶栅密度可适当调大。根据确定后的叶栅密度,可计算得到涡轮叶片的数量。综上,涡轮叶片关键结构参数见表2。

表2 涡轮叶片关键结构参数

Table 2 Key structural parameters of turbodrill blade

结 构 参 数	参 数 值
叶片进口结构角/(°)	135
叶片出口结构角/(°)	23
叶片安装角/(°)	55
叶片前锥角/(°)	30
叶片后锥角/(°)	4
叶片间距/mm	10.7
叶片高度/mm	11
叶片前缘半径/mm	0.8
叶片后缘半径/mm	0.4
叶片数量	35

叶片结构参数确定后,对其截面进行型线设计。叶片型线设计须保证叶片表面光滑且曲率连续,本文选择五次多项式曲线法对叶片截面进行型线设计,并将设计的曲线导入三维软件,形成叶片实体模型,如图2所示。

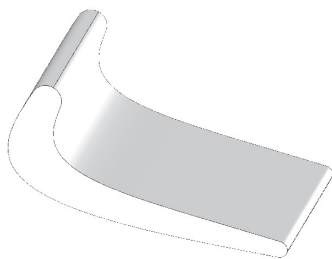


图2 涡轮叶片三维实体建模

Fig.2 Three-dimensional solid modeling of turbodrill blade

根据涡轮输出轴及壳体设计尺寸,确定涡轮定转子最终结构参数,完成叶片结构设计。叶片定子间距依据涡轮节长度及钻井液性能综合确定。

1.2 叶片水力特性

涡轮转子获得的机械能来自于钻井液通过涡轮时的能量转换,结合涡轮定转子叶片进出口钻井液的运动情况,根据能量守恒定律和动量矩定理,涡轮钻具工作扭矩 M 、功率 N 及水头 H 可表示为^[10-11]:

$$M = \rho QR(v_{1u} - v_{2u}) \quad (1)$$

$$N = \rho Qu(v_{1u} - v_{2u}) \quad (2)$$

$$H = \frac{u}{g}(v_{1u} - v_{2u}) \quad (3)$$

式中: ρ ——钻井液密度; Q ——钻井液流量; R ——叶片流道的平均半径; v_{1u} 、 v_{2u} ——钻井液绝对速度 v_1 、 v_2 的周向分量; g ——重力加速度。

根据钻井液进出口处速度矢量关系可知:

$$v_{1u} = v_{1z} \cot \alpha_{1k} \quad (4)$$

$$v_{2u} = u - v_{2z} \cot \beta_{2k} \quad (5)$$

式中: v_{1z} 、 v_{2z} ——钻井液绝对速度 v_1 、 v_2 的轴向分量。

根据流体中流量与流速关系,钻井液进出口轴向速度分量可表示为:

$$v_{1z} = v_{2z} = \frac{Q}{2\pi R l \varphi_0} \quad (6)$$

式中: l ——叶片宽度; φ_0 ——叶片的断面缩小系数,一般取0.9。

对于单级涡轮叶片而言,其水头中包含的位置水头和速度水头可忽略不计。假定涡轮钻具的定转子叶片总级数为 K ,本文涡轮钻具的定转子叶片结构相同,即涡轮定子和转子对应进出口结构角一致。由式(1)~式(6)整理后,得出涡轮钻具的扭矩、功率、水头与其结构参数关系可表示为:

$$M = K \left(\frac{\rho Q^2 \cot \beta_{2k}}{\pi l \varphi_0} - \frac{\pi \rho Q R^2}{30} n \right) \quad (7)$$

$$N = K \left[\frac{\rho Q^2 \cot \beta_{2k}}{30 l \varphi_0} n - \rho Q \left(\frac{\pi R}{30} \right)^2 n^2 \right] \quad (8)$$

$$H = K \left[\frac{Q \cot \beta_{2k}}{30 g l \varphi_0} n - \frac{1}{g} \left(\frac{\pi R}{30} \right)^2 n^2 \right] \quad (9)$$

由式(7)~式(9)可得出,当钻井液流量恒定时,扭矩 M 与转速 n 呈线性负相关,转速越大扭矩越小。钻井过程中,当钻压接近0时,涡轮处于空转状态,此时涡轮输出的扭矩最小、转速最高;当钻压过大时,涡轮转速几乎为0,处于制动状态,此时钻具输出扭矩最大。涡轮输出功率 N 与转速 n 是二次函数关系,先增大后减小,在最大功率处对应的转速即

为最优转速 n_{opt} , 该点为额定工况点。实际钻井中, 涡轮钻具转速选择在最优区间转速, 该区间对应的涡轮水头 H 变动幅度较小, 可近似按照恒定值处理^[12]。涡轮钻具水力输出特性如图3所示。

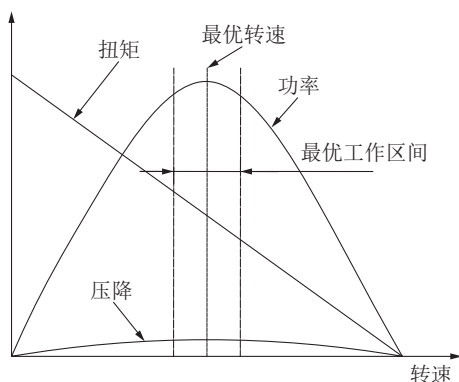


图3 涡轮钻具水力输出特性曲线

Fig.3 Hydraulic output characteristic curve of turbodrill

现场施工中, 还要考虑钻井液的密度、黏度、固相含量等因素对流体水力效率的影响。此外, 还需根据钻进地层、地面设备承载能力等实际工况进行综合评估。

2 涡轮输出性能优化

2.1 叶片成型方式优化

现有叶片采用的成型方法是在既定叶片截面的基础上直接拉伸生成。这种方式成型的叶片轴向投影为矩形, 导致叶片间隙形成的流道在涡轮外缘处宽度偏大, 叶片排布更为稀疏, 影响流体能量转化效率。为改善叶片成型方式, 优化钻具输出性能, 本文采用退化扭曲成型的方式进行叶片三维建模。该方式成型的叶片随半径减小而逐渐变窄, 在钻具轴线处退化为一根直线, 该直线长度与叶片轴向高度相同, 叶片轴向投影为扇形, 如图4所示。扭曲成型的叶片间距在涡轮内缘与外缘基本相等, 可近似为等宽度流道, 保证了流体沿叶高的等功条件, 可避免流层间摩擦和旋涡造成的混合损失, 达到提高涡轮水力特性的目的^[13]。

扭曲成型叶片的截面沿径向呈扭曲分布, 叶片厚度从叶根到外缘逐渐增加。设计时需根据涡轮定转子流道的宽度, 确定合适的截面数。截面数量过少会导致放样后各截面间叶片连接处不连续, 叶片成型精度不足; 反之, 截面数量过多, 会造成叶片

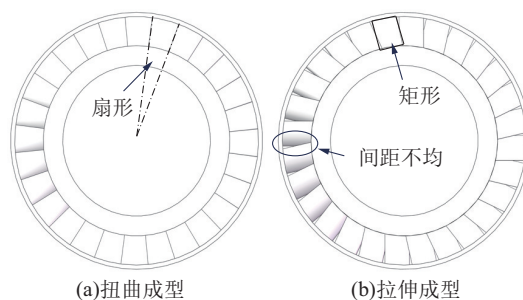


图4 不同成型方式叶片对比

Fig.4 Comparison of blades formed using different methods

参数化成型的计算量过大。截面数一般为奇数, 本文叶片成型分别选取叶片流道小径、大径及在二者间等距选取的3个截面, 共选择5个截面, 确保叶片扭曲成型更加光滑。

设计中常以叶根截面作为基准, 为方便计算其他截面叶片参数, 引入无量纲截面相对半径 $\bar{r}_i$, 各截面相对叶根截面的位置可用 $\bar{r}_i$ 表示:

$$\bar{r}_i = \frac{r_i}{r_0} \quad (10)$$

式中: r_i ——选取截面半径; r_0 ——叶根截面半径。

由于定转子叶片结构对称, 以转子叶片为例, 选取截面的入口结构角 β_{1i} 和出口结构角 β_{2i} 可表示为^[14]:

$$\beta_{1i} = \arctan(\bar{r}_i \tan \beta_{10}) \quad (11)$$

$$\beta_{2i} = \arctan(\bar{r}_i \tan \beta_{20}) \quad (12)$$

式中: β_{10} 、 β_{20} ——叶根处截面的入口和出口结构角。

对应不同截面的叶片安装角 β_{mi} 可表示为:

$$\beta_{mi} = \arctan\left(\frac{2}{\cot \beta_{1i} + \cot \beta_{2i}}\right) \quad (13)$$

采用退化扭曲方式生成叶片时, 可将叶片型线置于叶片流道内缘与外缘任意位置。实际设计中, 为使叶片整体厚度增加, 可将叶片设计截面置于叶片内缘处进行放样建模^[15]。叶片成型时沿钻具轴线经选取截面约束向叶片外缘进行放样建模。建模完成后, 分别取流道内侧、平均半径处、流道外侧处截面进行对比(图5), 可以看出随着半径增大, 叶片厚度及弯曲程度逐步增大, 由于叶片外缘处具有较大的圆周速度, 所受钻井液水力作用较强, 而外缘处厚度增大, 可承受更大的输出扭矩。叶片采用高强度耐腐蚀合金粉末进行铸造, 并对其进行精磨, 以保证零件加工精度, 加工实物如图6所示。

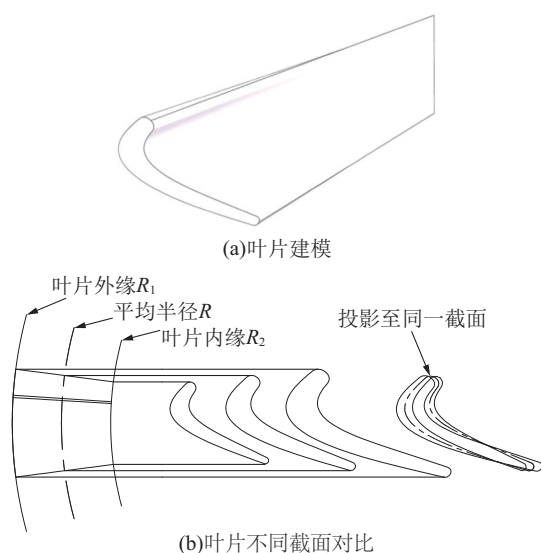


图5 扭曲成型叶片建模

Fig.5 Blade with twisted forming modeling



图6 扭曲成型叶片实物

Fig.6 Physical specimen of a twist-formed blade

2.2 叶片输出性能对比

采用扭曲成型方式生成的叶片结构参数会发生相应变化,为进一步分析改进后涡轮叶片的输出性能,对其进行有限元流体分析。以单级涡轮为研究对象,根据钻具设计参数,定转子叶片间隙为2 mm,单级涡轮轴向高度为27 mm,叶片高度为11 mm,在三维模型基础上采用布尔运算获取流体计算域。在流道的进出口部分采用结构化网格进行划分,对叶片定转子采用非结构化网格进行划分,并对局部网格进行加密处理,如图7所示。

网格划分后设置边界条件,介质为清水,选用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型,输入排量30 L/s,设置额定转速2000 r/min,定转子的前后缘及其壁面设置为无滑移壁面条件,同时为研究叶片水力效率,约束条件中忽略间隙泄露导致的容积损失,得到优化前后涡轮叶片单流道速度场及压力场云图^[16-17]。

优化前后涡轮叶片流道速度云图见图8,可以

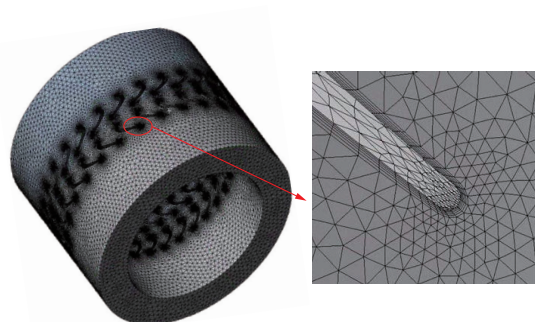


图7 单级涡轮叶片流体计算域网格划分

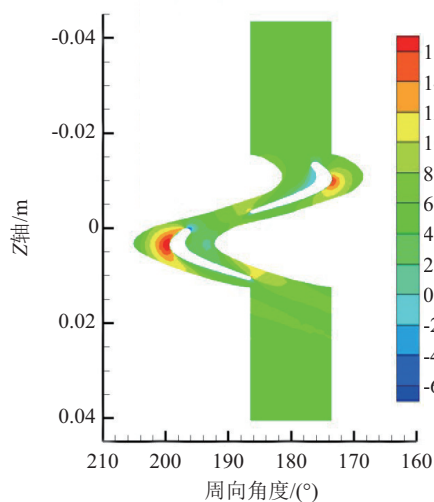
Fig.7 Mesh generation for the fluid computational domain of a single-stage turbine blade

得出,流体在定子前缘处发生分离,一部分以较小速度进入叶片压力面,另一部分以较大速度沿吸力面流入。流体进入转子前缘处时,在吸力面上从前缘入口处至叶片曲率最大处流速逐渐增大,从叶片曲率最大处至叶片后缘处吸力面流速逐渐减小。优化前后,叶片吸力面的流速均在叶片曲率最大处达到峰值。同时,优化后叶片压力面的曲率最大处湍流强度较大,局部区域易产生涡流并造成动能损失,进而影响转子叶片的运动速度。优化前后叶片曲率最大处流速变化较明显,因此以该处为横截面沿径向获取转子叶片两侧流速分布,如图9所示。

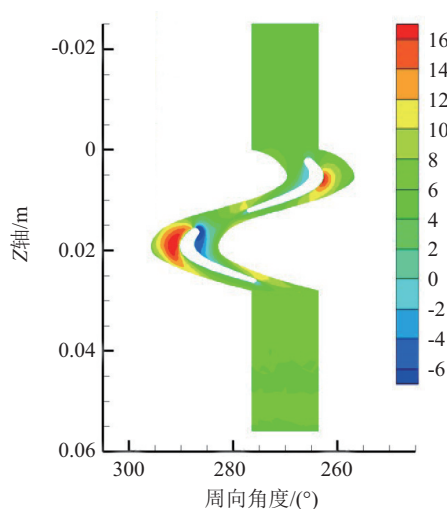
转子叶片从叶根至叶尖流体通道变大,由图9可知,恒流量下转子叶片从叶根至叶尖钻井液流速相应减小。但由于拉伸成型叶片间距呈非线性分布,因此优化前转子叶片根部流速分布不均,导致水力效率降低。优化后转子叶片等环量扭曲成型,叶片间距沿径向均匀增大,因此叶片两侧流速分布沿径向逐步降低,有效改善了水力效率。同时,为分析水力效率对叶片通道流体压力场分布影响,对优化前后涡轮叶片的单流道压力场进行了对比,如图10所示。

由于叶片在转子吸力面最大曲率处存在较大流速,因此在相应区域出现低压区域(图10)。同时优化前叶片转子压力面和吸力面的压力均小于优化后叶片,说明优化前叶片转子压力面和吸力面钻井液流速均大于优化后。叶片转子压力面钻井液流速小、压力大,而吸力面流速大、压力小,转子叶片两侧形成压力差产生推力。以叶片曲率最大处为横截面,获取叶片转子单流道横截面两侧压力分布,如图11所示。

由图11可知,优化前叶片转子吸力面低压分布

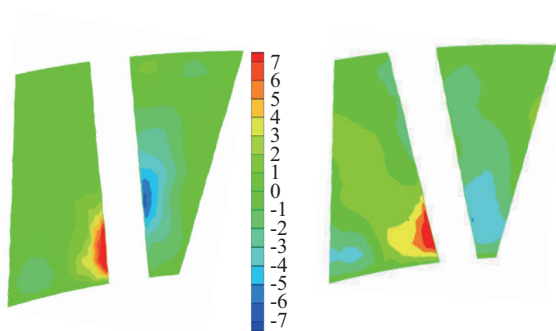


(a)优化前

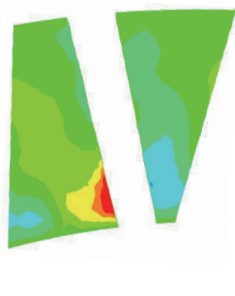


(b)优化后

图8 优化前后涡轮叶片流道速度云图
Fig.8 Velocity contour map of turbine blade flow path before and after optimization

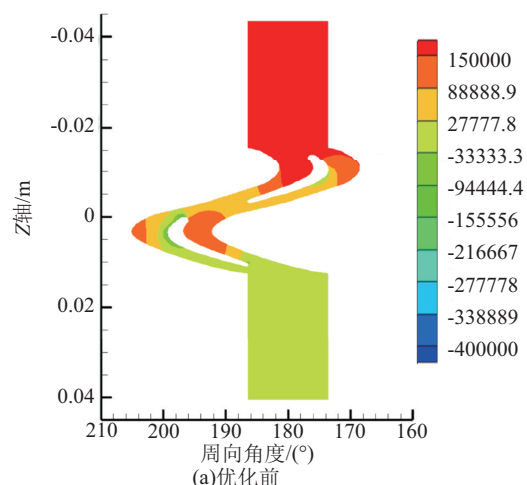


(a)优化前

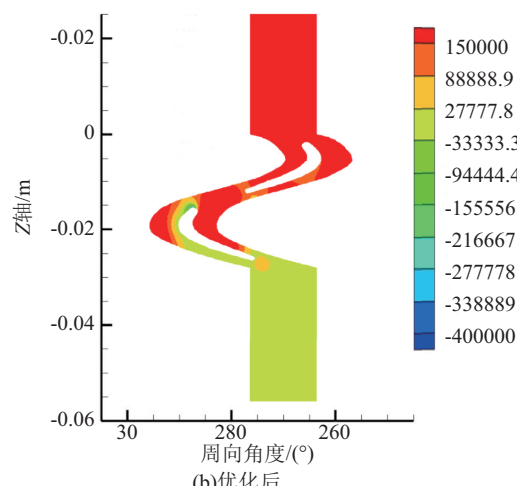


(b)优化后

图9 不同转子叶片单流道横截面速度云图
Fig.9 Radial cross-section contour map of single-channel velocity for different rotor blades

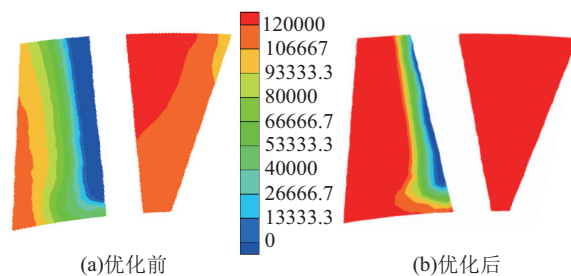


(a)优化前



(b)优化后

图10 优化前后涡轮叶片流道压力云图
Fig.10 Pressure contour map of turbine blade flow path before and after optimization



(a)优化前

(b)优化后

图11 不同转子叶片单流道横截面压力云图
Fig.11 Radial cross-section contour map of single-channel pressure for different rotor blades

区域较优化后叶片大,这是由优化前叶片沿径向间距不均导致,容易造成流体边界层分离,降低水力效率。同时,优化后叶片扭曲成型,压力面上流体

压力分布较优化前更均匀,有效改善了转子叶片两侧压差分布,优化了叶片输出扭矩,提高了钻具整体输出水力性能。

涡轮钻具井下作业的钻进效率及经济性等指标,受输出扭矩、压降、水力效率等因素影响。输出扭矩决定了井底钻头的破岩能力,并为施加钻压提供依据。钻具压降可间接反映出涡轮钻具的能量输入,压降过大会对地面设备运行产生不利影响。水力效率反映了钻井液的能量转化效率,是涡轮钻具钻井经济性评价的重要指标^[18]。对恒排量下优化前后涡轮叶片的输出特性进行数值模拟分析,得出涡轮叶片的水力输出特性曲线如图12所示。

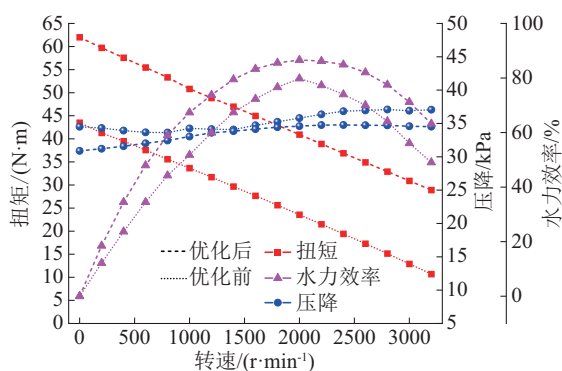


图12 优化前后单级涡轮输出特性曲线

Fig.12 Comparison of single-stage turbine output characteristics before and after optimization

水力模拟结果显示涡轮钻具的额定转速约为2000 r/min,属高速涡轮钻具。相较于优化前,优化后单级涡轮叶片的输出扭矩、压降、水力效率等均有不同程度的提升。额定工况下,优化前后单级涡轮的输出性能如表3所示。

表3 优化前后单级涡轮叶片输出性能对比

Table 3 Comparison of output performance of single-stage turbine blades before and after optimization

叶片类型	扭矩/(N·m)	压降/kPa	水力效率/%
优化前	23.55	36.79	79.76
优化后	40.93	35.81	85.32
结果对比/%	+73.8	-2.66	+6.97

综上,单级涡轮的输出扭矩和水力效率增大,压降小幅下降,有效提高了涡轮钻具的水力输出性能,为钻具井口测试和钻进中钻压、泵压等相关工艺参数设置提供了理论依据。

3 性能测试

为进一步验证单级涡轮流体仿真分析的准确性,同时获取改进后涡轮钻具的实际输出性能,本文对优化前后涡轮钻具进行了室内台架测试。试验台架(图13)可用于检测涡轮钻具试验过程中的流量、扭矩、转速、压降等性能参数。试验以清水为介质,将涡轮钻具水平放置在试验台架上,钻具输入端连接F1300型变频泥浆泵,输出端连接测功机来施加外部载荷,获取涡轮钻具在不同转速下的输出特性。



图13 涡轮钻具输出性能室内台架测试

Fig.13 Indoor bench testing of turbine drill string output performance

以内置100级优化前后叶片的涡轮钻具为研究对象,分别进行室内台架测试。为便于对比分析,测试流量设置为30 L/s,由钻具总输出扭矩换算得到单级叶片的输出扭矩,并将涡轮钻具叶片优化后的模拟值、实测值及叶片优化前的实测值进行综合对比,获取不同输出特性参数的对比结果,如图14所示。

由图14可以看出,优化后涡轮叶片输出扭矩实测值变化趋势与模拟值一致,但实测值整体低于模拟值,这是由于模拟中所采用的钻井液密度、流速

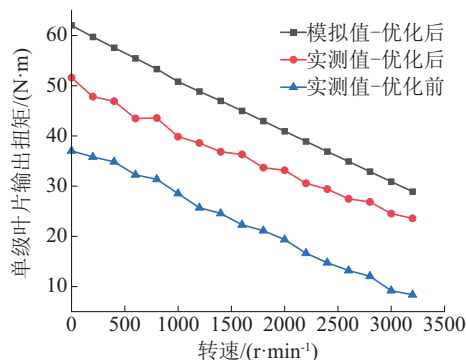


图14 不同类型单级涡轮叶片输出扭矩

Fig.14 Output torque of different types of single-stage turbine blades

等边界条件均为理想状态,且实际加工的叶片与模型存在一定误差。流体分析中是以单级叶片为研究对象,而实际测试中是对整个钻具进行测试再间接获取单级叶片的输出性能,同时地面试验设备的稳定性及装配工艺也会对测试结果产生不同程度的影响。在理论额定转速(2000 r/min)条件下,优化后单级涡轮叶片的输出扭矩为 33.15 N·m,比优化前的单级涡轮叶片输出扭矩 20.02 N·m 提高了 65.58%。

将涡轮钻具整体压降平均分配到单级叶片,如图 15 所示,可以看出,优化前后涡轮叶片的压降实测值均大于模拟值,叶片压降的变化趋势与模拟值基本相同。同样取额定转速下室内台架测试结果,优化前后的单级叶片压降分别为 41.67、39.89 kPa,相较于优化前,叶片优化后压降实测值降低了 4.27%。恒流量条件下,叶片压降幅值随转速增加波动很小,因此,在实际钻进中,当工作流量不变时,钻具压降可视为固定值。

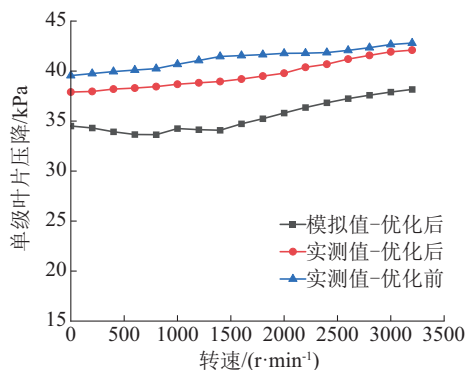


图 15 不同类型单级涡轮叶片压降
Fig.15 Pressure drop of different types of single-stage turbine blades

不同情形下涡轮叶片水力效率对比见图 16,根据涡轮叶片的流体分析结果,涡轮叶片的室内实测值要小于模拟值。理论额定转速下,涡轮叶片优化后的水力效率为 76.89%,优化前为 67.92%,提高了 8.97 个百分点,有效提升了涡轮钻具的输出性能。

根据室内测试和流体分析结果,通过对不同类型的涡轮叶片输出性能进行对比分析,优化后涡轮叶片输出扭矩与水力效率实测值均低于模拟值,但其压降实测值高于模拟值。该结果可能受室内台架测试过程中涡轮钻具水平放置、介质性能指标、试验流量波动,以及忽略钻具自身容积率及流体分

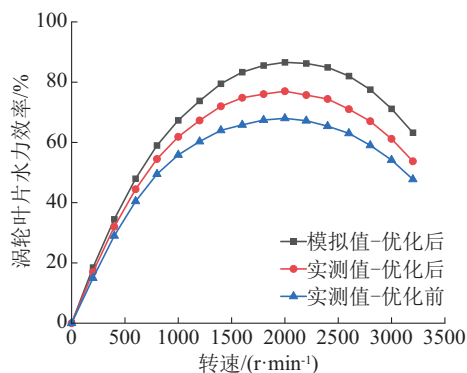


图 16 不同类型涡轮叶片水力效率
Fig.16 Hydraulic efficiency of different types of single-stage turbine blades

析中边界条件设置等多种因素综合影响^[19]。同时,优化后涡轮叶片的输出性能变化规律与模拟值一致,且各叶片性能参数指标相比优化前均得到了不同程度的提升,验证了涡轮叶片流体分析有限元模型的准确性,并在提高涡轮钻具输出性能的同时,降低了涡轮钻具的能耗和作业成本,提高了涡轮钻具井下作业的稳定性和工作寿命。

4 结论及建议

(1)通过对涡轮叶片进行型线设计和理论分析得出,恒流量条件下涡轮叶片的输出扭矩与转速呈线性负相关;涡轮叶片的输出功率随着转速升高,先增大后减小,在额定工况点功率达到最大;涡轮叶片压降随转速变化幅度很小,工程应用中可近似视为恒定值。

(2)采用放样扭曲方式对涡轮叶片成型进行优化设计,并分别对优化前后涡轮叶片进行了速度场和压力场有限元分析,结果表明转子叶片吸力面曲率最大处钻井液流速最大,优化后转子叶片较优化前叶片两侧具有更大压差。额定转速下,优化后单级涡轮叶片理论输出扭矩较优化前提高了 73.8%,压降降低了 2.66%,水力效率提高了 6.97%,涡轮叶片输出性能得到有效改善。

(3)涡轮叶片室内台架测试与有限元分析结果比较,叶片输出特性变化趋势基本一致。根据室内测试结果,相较于优化前,额定转速条件下优化后涡轮叶片的输出扭矩提高了 65.58%,压降下降了 4.27%,水力效率由 67.92% 提高至 76.89%,提升了涡轮钻具井下作业稳定性和工作寿命。

(4)实际钻井中,泥浆密度、黏度、含砂量等性能指标对涡轮钻具的输出性能均会产生影响,可将涡轮钻具室内测试结果作为判断其是否正常运行及设置钻进工艺参数的技术依据。

参考文献(References):

- [1] 汤凤林,赵荣欣,Смашов Н Ж,等.小尺寸涡轮钻具的研发及其在地质勘探定向孔钻进中的应用[J].钻探工程,2025,52(1):16-23.
TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, Смашов Н Ж, et al. Development of small-sized turbo drill and its use in drilling of directional geological exploration holes [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 16-23.
- [2] 冯定,邵雪,王鹏,等.涡轮钻具定转子三维叶型的设计方法研究[J].石油机械,2024,52(6):45-50.
FENG Ding, SHAO Xue, WANG Peng, et al. Research on the design method of 3D blade profiles for stator and rotor of turbodrill[J]. China Petroleum Machinery, 2024, 52(6): 45-50.
- [3] 张宇航.小尺寸涡轮钻具三维叶栅设计与仿真研究[D].荆州:长江大学,2023.
ZHANG Yuhang. Three-dimensional cascade design and simulation of small size turbodrill[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2023.
- [4] 闫家,梁健,王文,等.深井高速涡轮钻配套同径取心技术研究[J].钻探工程,2024,51(4):23-30.
YAN Jia, LIANG Jian, WANG Wen, et al. Research on the same diameter coring drilling technology used by high-speed turbodrill for deep well [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4): 23-30.
- [5] 沙俊杰,王瑜,路家兴,等.基于钻井液流变性的涡轮钻具性能预测研究[J].地质与勘探,2019,55(4):1051-1058.
SHA Junjie, WANG Yu, LU Jiaxing, et al. Performance prediction of turbodrill based on rheology of drilling fluid[J]. Geology and Exploration, 2019, 55(4): 1051-1058.
- [6] 何宇光.涡轮钻具叶片的扭曲成型理论与仿真分析[D].北京:中国地质大学(北京),2022.
HE Yuguang. The twisting modelling theory and simulation analysis of turbodrill blades[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2022.
- [7] 胡子龙,陈婷,马卫国,等.基于机器学习的小尺寸涡轮钻具输出性能优化[J].机床与液压,2024,52(17):185-192.
HU Zilong, CHEN Ting, MA Weiguo, et al. Research on performance optimization of small-sized turbine drilling tools based on machine learning[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 52(17): 185-192.
- [8] 张先勇,冯进.扭曲叶片涡轮水力性能研究[J].煤矿机械,2015(8):121-123.
ZHANG Xianyong, FENG Jin. Research on hydraulic property of twisted blade turbo [J]. Coal Mine Machinery, 2015(8): 121-123.
- [9] 孙文斌.涡轮钻具弯扭叶型设计及其水力性能研究[D].荆州:长江大学,2018.
SUN Wenbin. Study on turbodrill bowed-twisted blade design and hydraulic performance [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2018.
- [10] 李越.涡轮钻具能量传输系统及叶型优化[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
LI Yue. Energy transmission system and blade profile optimization of turbodrill [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [11] 欧松.涡轮钻具三维叶片设计与研究[D].成都:西南石油大学,2018.
OU Song. Design and research on three-dimensional blades of turbodrill [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [12] 黄华宝.小尺寸涡轮钻具输出性能优化研究[D].荆州:长江大学,2024.
HUANG Huabao. Optimization study of output performance of small-size turbodrills [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2024.
- [13] 郭宝杉.Ø73mm小尺寸涡轮钻具叶型设计及优化[J].石油矿场机械,2021,50(4):31-40.
GUO Baoshan. Design & optimization of Ø73mm diameter slimhole turbodrill stator & rotor's blade profile [J]. Oil Field Equipment, 2021, 50(4): 31-40.
- [14] 谭严洁.小尺寸涡轮钻具水力涡轮节结构设计及仿真研究[D].大庆:东北石油大学,2025.
TAN Yanjie. Structural design and simulation research of hydraulic turbine knuckle for small size turbine drilling tools [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2025.
- [15] 袁新梅,金欢欢,段清龙,等.Ø175mm涡轮钻具叶片型线结构参数优化研究[J].石油机械,2024,52(8):24-32.
YUAN Xinmei, JIN Huanhuan, DUAN Qinglong, et al. Optimization on structural parameters of blade profile of Ø175mm turbodrill [J]. China Petroleum Machinery, 2024, 52(8): 24-32.
- [16] 杨钧杰,张强,张宇航,等.小尺寸涡轮钻具三维叶片的设计研究[J].煤矿机械,2021,42(12):19-22.
YANG Junjie, ZHANG Qiang, ZHANG Yuhang, et al. Design and study on three-dimensional blade of small-size turbine drill [J]. Coal Mine Machinery, 2021, 42(12): 19-22.
- [17] 王龙.井下涡轮钻具涡轮叶片造型及优化研究[D].西安:西安石油大学,2016.
Wang Long. Modeling and optimization of downhole turbine drill blade [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2016.
- [18] 王金龙,边培明,陶兴华,等.超短高能涡轮钻具研制及应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(12):16-22.
WANG Jinlong, BIAN Peiming, TAO Xinghua, et al. Development and application of an ultra short high energy turbodrill [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(12): 16-22.
- [19] 沙俊杰.钻井液特性对涡轮钻具输出性能影响研究[D].北京:中国地质大学(北京),2020.
SHA Junjie. Research on the influence of drilling fluid characteristics on the output performance of turbodrills [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.

(编辑 王跃伟)