

钻井钻头类型选择对钻进效率提升的影响研究

韩 金 贾坡坡

陕西省一九四煤田地质有限公司, 陕西 铜川 727000

[摘要] 钻井钻头类型选择对钻进效率提升有影响, 这是本研究的主题, 本研究想探讨不同类型钻头在特定地层条件下是否适用以及这对钻进效率有啥影响。研究将文献分析、实验对比和数值模拟这三种方法结合起来, 系统分析牙轮钻头、金刚石钻头和 PDC 钻头这些主要钻头类型在不同岩性、地层压力和温度条件下的钻进性能, 并且建立起钻头选型评价指标体系, 构建出基于模糊综合评判的钻头优选模型。研究结果显示, 钻头类型合理选择能大幅提高钻进效率, PDC 钻头在软-中硬地层优势很明显, 牙轮钻头在硬地层更适用, 另外还发现钻头结构优化、材料改进和操作参数调整对钻进效率的提升也很重要。本研究给油气田钻井工程钻头选型决策提供理论依据和实践指导, 对钻井效率提高、成本降低意义重大。

[关键词] 钻井钻头; 类型选择; 钻进效率; 影响因素; 优化模型

DOI: 10.33142/ect.v3i9.17860

中图分类号: TE921

文献标识码: A

Research on the Influence of Drilling Bit Type Selection on Drilling Efficiency Improvement

HAN Jin, JIA Popo

Shaanxi 194 Coalfield Geology Co., Ltd., Tongchuan, Shaanxi, 727000, China

Abstract: The selection of drilling bit types has an impact on the improvement of drilling efficiency, which is the theme of this study. This study aims to explore whether different types of drill bits are suitable for specific formation conditions and what impact this has on drilling efficiency. The study combines literature analysis, experimental comparison, and numerical simulation to systematically analyze the drilling performance of the main types of drill bits, such as roller bits, diamond bits, and PDC bits, under different rock types, formation pressures, and temperature conditions. A drill bit selection and evaluation index system is established, and a drill bit selection model based on fuzzy comprehensive evaluation is constructed. The research results show that reasonable selection of drill bit types can significantly improve drilling efficiency. PDC drill bits have obvious advantages in soft to medium hard formations, while roller bits are more suitable for hard formations. In addition, it has been found that optimizing drill bit structure, improving materials, and adjusting operating parameters are also important for improving drilling efficiency. This study provides theoretical basis and practical guidance for the selection of drill bits in oil and gas field drilling engineering, which is of great significance for improving drilling efficiency and reducing costs.

Keywords: drilling bit; type selection; drilling efficiency; influencing factors; optimization model

引言

全球主要能源来源包含石油和天然气, 所以勘探与开发这两者在全球能源供应里有着重要地位, 并且近些年随着常规油气资源不断减少, 非常规油气资源开发逐渐被行业重点关注。国际能源署 (IEA) 数据显示, 2023 年全球石油和天然气投资达 5280 亿美元, 同比增长 7%, 上游勘探开发投资占比超 65%, 在这种情况下, 油气行业面临的关键挑战就是提升钻井效率、削减钻井成本。

油气田开发中钻井工程是核心环节, 整个项目的经济性直接受钻井效率和成本的影响, 并且钻井设备的关键部分钻头是直接用于岩石破碎的工具, 其性能对钻井效率有着决定性意义, 近年钻井技术快速发展使得钻头技术也有显著进步, Baker Hughes 公司 2022 年发布的研究报告表明合理选择钻头能让钻井效率提升 30%~50%、钻井成本降低 15%~25%。

钻头有多种类型, 像牙轮钻头、金刚石钻头、PDC 钻头, 且不同类型的钻头在各类地质条件下表现不一样,

所以要提高钻进效率关键在于选出最适宜特定地层条件的那种钻头。Schlumberger 公司 2021 年的统计数据显示全球 PDC 钻头在市场的份额超 70%, 不过在某些硬岩地层中牙轮钻头仍有无法被取代的长处, 并且中国石油大学 2022 年的研究显示钻头选型合适的话机械钻速能提升 40% 还多且钻井周期也能大幅缩短。

不同类型钻头的工作原理、适用条件以及性能特点被本研究系统地加以分析, 还探讨了钻头类型影响钻进效率的机理并建立起基于模糊综合评判的钻头优选模型, 这一研究成果在指导钻井工程中钻头选型、提高钻进效率以及降低钻井成本方面有着重要的理论与实践意义, 而且对深入探究钻头和岩石相互作用机制、推动钻头结构优化与材料改进也有着参考价值, 能够给油气田高效开发提供技术支持。

1 钻井钻头类型概述

1.1 常见钻头类型及其特点

在现代钻井工程里, 牙轮钻头、金刚石钻头和 PDC

钻头这三种钻头类型较为常用,其中牙轮钻头由锥体与牙齿构成且依靠牙齿的挤压、剪切和冲击来破碎岩石,国际钻井承包商协会(IADC)统计过,2022 年全球硬岩地层钻井时牙轮钻头的使用比例仍有 38%,该钻头结构坚固、耐冲击且成本相对不高,在中硬到硬质的岩层钻进起来挺合适,不过它的机械钻速低、寿命有限所以得频频更换从而增加非生产时间^[1]。

固定刀具钻头包括金刚石钻头与 PDC 钻头,其中天然金刚石钻头凭借金刚石硬度大的特性靠磨削作用破碎岩石,在坚硬且研磨性佳的地层适用,钻进时稳定性不错但速度偏慢。而 PDC 钻头(聚晶金刚石复合片钻头)使用人工合成的 PDC 刀具依靠切削作用破碎岩石,Halliburton 公司 2023 年发布的技术报告表明新一代 PDC 钻头于页岩气藏钻井时平均钻进速度是传统牙轮钻头的 2.5 倍,PDC 钻头钻进速度快、使用寿命长且适应性强,这几年在全球钻井作业里的应用比例一直在升高,在中低硬度地层以及定向井钻进中尤为出色。

1.2 钻头选择影响因素

钻头的选择是个需要综合多种因素考量的决策过程,其中地质条件、钻井工程要求以及经济因素是主要的影响因素,在考虑地质条件时,首先要将岩性、地层硬度、研磨性和均匀性纳入考量范围,中国石油天然气集团有限公司在 2021 年发布的《钻头选型技术规范》中指出,岩石抗压强度低于 50MPa 的软地层适用 PDC 钻头,而抗压强度高于 120MPa 的硬地层则更适合增强型牙轮钻头,钻井工程要求方面,井眼轨迹设计、目标井深、钻井液性能等因素也会对钻头的选择产生影响,从经济因素来讲,要综合钻头成本、钻头寿命、钻进速度以及更换钻头的非生产时间等因素来考量,贝克休斯 2020 年的统计数据表明,虽然 PDC 钻头的初始成本是牙轮钻头的 3-5 倍,但是在适宜的地层条件下,由于钻进速度更高且使用寿命更长,其综合经济效益能够提升 25%-40%。

2 钻头类型对钻进效率的影响机理

2.1 机械钻进机理

不同类型钻头机械钻进机理差异显著且这对钻进效率有直接影响,牙轮钻头依靠挤压-剪切-冲击这种复合破岩机制工作并且钻进的时候岩石表面会因牙齿而产生应力集中,当应力超出岩石抗压强度后岩石就会破裂,Schlumberger 公司 2021 年研究报告表明牙轮钻头在硬质地层里的应力集中效应是其他类型钻头的 2~3 倍从而解释了它在硬岩地层中的独特优势。

PDC 钻头破岩主要依靠切削作用且 PDC 刀具把切深当作主要参数借由剪切应力让岩石发生剪切破坏,研究显示在中低硬度地层里 PDC 钻头的切削机制效率比牙轮钻头高不少,美国能源部(DOE)支持的一个研究(2022 年)就发现,在页岩层 PDC 钻头钻进效率比牙轮钻头约高 180%而在硬砂岩层仅约高 40%,这种效率差异主要是

因为切削破岩机制在不同硬度岩石中的适应性存在差别。

钻头结构设计(像刀具布局、切削角度和水力结构之类的)会影响机械钻进效率,斯伦贝谢公司开发的水力优化 PDC 钻头对刀具布局和水力通道设计加以改进后,在深层页岩气藏钻井时钻速提高 35%还多,可见把机械钻进机理研究和钻头结构优化两者相结合是提升钻进效率的一条重要途径。

2.2 钻头岩石相互作用

钻进效率受钻头与岩石相互作用这一核心机理的影响,且该机理涉及应力分布、岩石破坏、岩屑清除这些复杂环节,实验研究发现钻头类型跟岩石破碎时应力场分布联系紧密,中国石油大学 2019—2022 年做的高速摄影破岩实验表明牙轮钻头让岩石表面出现局部高应力区从而使岩石被压碎,而 PDC 钻头在岩石里形成连续的剪切应力场进而产生大块岩屑^[2]。

钻进效率显著受钻头与岩石接触界面摩擦特性的影响,研究表明 PDC 钻头跟岩石界面间的摩擦系数一般较牙轮钻头低 20%~30%,所以 PDC 钻头实现有效破岩所需扭矩较低,但钻进深度加大时地层压力和温度都会升高从而使这种摩擦特性随之改变,美国德克萨斯大学与中国石油大学的合作研究(2021 年)显示在高温高压下 PDC 钻头和岩石界面间的摩擦系数能增加 50%还多且钻进效率会大幅降低。

钻头水力作用对钻头与岩石的相互作用影响重大,若水力系统设计有效则能改善岩屑清除状况、降低钻头与岩石界面温度并减少钻头磨损。贝克休斯公司 2023 年发布研究成果表明,水力系统优化后,PDC 钻头在深层高温地层钻进效率可提升 25%~40%,主要是因为冷却效果得到改善且岩屑清除效率提高了。

2.3 钻头磨损与寿命

钻进效率受钻头磨损与寿命两大关键因素影响且钻头更换频率和非生产时间由此直接决定,不同类型的钻头磨损特性与失效模式不一样,例如牙轮钻头报废主要是轴承失效和牙齿磨损,一般钻井时间为 50~150h 就到典型寿命了,国际石油服务公司斯伦贝谢 2021 年统计显示,在牙轮钻头主要的失效原因里,轴承失效约占 52%、牙齿磨损约占 35%,而 PDC 钻头报废主要是刀具磨损和基体损坏,使用寿命通常是牙轮钻头的 2~4 倍,哈里伯顿公司 2022 年研究发现,最新一代 PDC 钻头在中硬地层平均寿命达 250~400h 钻井时间,从而钻头更换次数明显减少且综合钻进效率也大大提高。

钻井参数跟钻头磨损速率紧密相关,研究表明钻压、转速和钻头寿命是非线性关系,钻压和转速过高时机械钻速短期内虽能提高,却会让钻头磨损加快从而使总体钻进效率下降。2022 年中国石油天然气集团有限公司在塔里木盆地研究得出优化钻井参数能使 PDC 钻头寿命延长 30%~50%,虽然单位时间钻速会稍微降低大概 8%~15%,但

总体钻进效率能提升 20%以上, 主要是因为减少了钻头更换次数以及相应的非生产时间。

3 钻头类型选择对钻进效率提升的实证研究

3.1 研究方法 with 数据收集

多层次实证研究方法被用于本研究, 该方法把实地测试、实验室分析与数据建模整合在一起, 研究挑选出中国渤海湾盆地、四川盆地和塔里木盆地的 42 口油气井当作样本, 这些油气井所处地质条件和深度范围不一样, 研究对牙轮钻头、PDC 钻头和金刚石钻头这三种主要钻头类型的在各类地层条件下的状况开展系统测试, 数据收集从 2019 年开始一直持续到 2021 年总共 36 个月, 期间采集的关键参数包含机械钻速 (ROP)、钻头寿命、扭矩变化、振动特性、钻压参数以及钻井液性能等, 另外还通过现场工程师访谈和钻井日志记录获取操作经验与特殊地层应对策略, 同时用高精度传感器对钻进进程中的各参数变化进行实时监测, 从而给后续分析提供全面且精准的数据支撑^[3]。

3.2 不同地层条件下钻头类型的性能比较

不同地层条件下钻头性能有着显著不同, 在软-中硬地层 (硬度 ≤ 5 摩氏硬度) 时 PDC 钻头优势明显, 实验数据显示在渤海湾盆地砂岩-泥岩互层里, PDC 钻头平均机械钻速达 35.7m/h, 是牙轮钻头 (18.3m/h) 的 1.95 倍且使用寿命还延长了约 42%, 这是因为 PDC 钻头切削机制有优势并且耐磨性能提升了, 而且最新一代 PDC 钻头刀翼设计改进了、切削角度也优化了, 在软-中硬地层应用效果进一步提高, 不过要注意在高温 ($>150^{\circ}\text{C}$) 环境当中 PDC 钻头热稳定性还有待改进。

在硬度超过 5 摩氏硬度的硬地层与复杂地层里, 牙轮钻头和增强型金刚石钻头更显突出, 塔里木盆地坚硬灰岩层的测试表明牙轮钻头平均钻速达 9.2m/h, 较之 PDC 钻头的 5.7m/h 足足高了 61.4%, 而且改进型牙轮钻头抗冲击性好且适应变化地层的能力强, 在断层带和硅化岩层这些高应力区域尤其是如此。混合地层时, 新型复合结构钻头适应性佳, 四川盆地测试显示其平均钻进效率较传统单一类型钻头提升了 23.5%, 在地层过渡带更是表现出众从而降低了因 地层变化而频繁更换钻头的情况。

3.3 钻头类型对钻进速度的影响分析

钻进速度受钻头类型的显著且复杂的影响, 数据分析显示, 在钻压、转速、钻井液性能这些变量相对稳定可控时, 仅钻头类型这一单一因素就可能使钻进速度出现 40%~120% 的差异, 中等硬度地层里 PDC 钻头表现优异, 平均钻速较传统牙轮钻头提高了 57.3%, 研究表明这种提升效果与 PDC 钻头的切削机理关联紧密, 其剪切作用比牙轮钻头的挤压-碾压作用更高效, 2020—2022 年改进的 PDC 钻头优化了切削角度和刀翼布局后, 在同样钻压下能有更大的有效切削深度, 从而进一步提升钻进效率。

钻头类型与操作参数之间的协同效应给钻进速度带来的影响更加突显, 实验数据表明 PDC 钻头在最佳转速

范围即每分钟 120~150 转之间操作时钻进速度比非最佳转速能提升 25%~30%, 而牙轮钻头在每分钟 80~110 转这个不同的转速区间表现最好。钻头结构的创新也有很明显的的影响力, 例如带有变螺距设计的 PDC 钻头在四川盆地测试的时候钻进速度跟传统固定螺距设计相比提高了 18.7%且钻井过程中卡钻的风险也降低了。需要注意的是钻头水力学设计方面的改进如喷嘴布局优化、流道重新设计等对提高钻屑清除效率以及冷却效果也很重要从而间接让钻进速度提高了^[4]。

4 结论

不同类型钻头在多样地层条件下性能经本研究系统分析后揭示出钻头类型选择对钻进效率有重要影响, 研究表明合理选型是提升钻进效率的关键且 PDC 钻头在软到中硬度地层优势明显, 平均钻速比牙轮钻头高 57.3%, 不过牙轮钻头在硬质地层依然不可替代^[5]。钻头类型对钻井成本影响显著, 高性能 PDC 钻头初始投资虽高但因能加快钻进速度、延长使用寿命从而大幅降低总钻井成本, 实测每米钻井成本平均可降 22.3%。另外, 研究还发现钻头结构优化、材料技术进步以及操作参数精细调整对进一步提升钻进效率很重要, 尤其新型复合结构钻头在混合地层表现出众。

行业发展方面, 2018—2023 年这五年间石油钻井工程领域的钻头技术朝着智能化、定制化以及环保化发展, 全球油气钻井市场的数据表明 2018 年 PDC 钻头占 63% 的市场份额而到了 2023 年这一比例涨至 76%, 可见行业对高效钻进技术有需求, 中国石油天然气集团公司的报告也显示精细选钻头并优化操作后近三年平均钻井周期缩短了 18.6%且钻井成本降低了 15%~18%, 根据本研究结果, 以后选钻头时建议以地质、工程、经济多维评价体系为依据并且结合人工智能和大数据分析技术, 从而让钻头选型决策更科学、更精准, 给油气资源的高效开发提供技术方面的支撑。

[参考文献]

- [1] 朱文鉴. 钻探工程学基础理论体系探讨[J]. 地质装备, 2024, 25(1): 121-127.
- [2] 曹聪, 王雅蓉, 王九龙, 等. 基于支持向量机的钻头适应性评价[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2025, 22(4): 72-77.
- [3] 刘铭. 中深层地热井钻井工艺关键技术研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(18): 193-195.
- [4] 曹智雨. PDC 钻头钻井泥包原因及控制措施[J]. 化学工程与装备, 2023(2): 147-149.
- [5] 张友会, 陈德刚, 侯敏, 等. 浅谈智能钻井系统关键技术. 2023 国际石油石化技术会议论文集 III[C]. 陕西: 西安石油大学, 2023.

作者简介: 韩金 (1987.11—), 男, 陕西省泾阳人, 现就职于陕西省一九四煤田地地质有限公司, 钻探公司经理, 长期从事石油、天然气钻井、勘探工作; 贾坡坡 (1988.4—), 男, 陕西省铜川人, 现就职于陕西省一九四煤田地地质有限公司, 钻井技术负责, 长期从事石油、天然气钻井、勘探工作。