

基于岩石硬度与钻井参数的钻头磨损预测模型

黄浩¹, 刘宇¹, 朱茂勋², 李皇艺^{2*}, 苏鲜²

¹中法渤海地质服务有限公司海南分公司, 海南 海口

²武汉时代地智科技股份有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年5月7日; 录用日期: 2026年5月29日; 发布日期: 2026年6月15日

摘要

钻具磨损是钻井工程中影响施工效率与作业成本的关键因素, 其磨损程度受岩石磨蚀性与钻井参数的共同影响。在影响岩石磨蚀性的诸多因素中, 矿物硬度是本质性指标, 莫氏硬度作为矿物硬度的分级标准, 对钻具磨损具有重要控制作用, 但现有研究对二者在磨损过程中的耦合机制关注不足。为此, 本文以岩性莫氏硬度为核心因子, 采用矿物加权平均法量化地层整体莫氏硬度, 分析不同莫氏硬度等级下钻具磨损类型与磨损速率的变化特征, 在此基础上引入钻压、转速、扭矩等关键钻井参数, 构建考虑莫氏硬度与钻井参数交互影响的钻具磨损多元回归评估模型。利用某油田5口井的856组现场数据进行验证, 结果表明, 该模型对钻具磨损等级的预测准确率(误差 ≤ 1 级)为82.5%, 决定系数 R^2 为0.79。本研究为钻井过程中钻具磨损预测与钻井参数优化提供了可量化的评估方法。

关键词

岩性莫氏硬度, 钻井参数, 钻具磨损, 矿物加权法, 多元回归

A Prediction Model for Bit Wear Based on Rock Hardness and Drilling Parameters

Hao Huang¹, Yu Liu¹, Maoxun Zhu², Huangyi Li^{2*}, Xian Su²

¹China France Bohai Geoservices Corporation Hainan Branch, Haikou Hainan

²Wuhan Shidai Dizhi Technology Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: May 7, 2026; accepted: May 29, 2026; published: June 15, 2026

Abstract

Drill tool wear is a critical factor affecting drilling efficiency and operational cost. The degree of wear is jointly influenced by rock abrasiveness and drilling parameters. Among the factors controlling rock

*通讯作者。

文章引用: 黄浩, 刘宇, 朱茂勋, 李皇艺, 苏鲜. 基于岩石硬度与钻井参数的钻头磨损预测模型[J]. 石油天然气学报, 2026, 48(2): 188-196. DOI: 10.12677/jogt.2026.482021

abrasiveness, mineral hardness is a fundamental property, and Mohs hardness, as a standardized scale of mineral hardness, plays a key role in drill tool wear. However, the coupling mechanism between Mohs hardness and drilling parameters in the wear process remains underexplored. In this study, Mohs hardness is taken as the core factor. A mineral-weighted average method is adopted to quantify the overall Mohs hardness of the formation. The variation patterns of wear type and wear rate under different Mohs hardness levels are analyzed. On this basis, key drilling parameters including weight on bit, rotational speed, and torque are incorporated, and a multiple regression model considering the interaction between Mohs hardness and drilling parameters is established. The model is validated using 856 sets of field data from five wells in a certain oilfield. Results show that the prediction accuracy of wear grade (error ≤ 1 grade) reaches 82.5%, with an R^2 of 0.79. This study provides a quantifiable evaluation method for drill tool wear prediction and drilling parameter optimization.

Keywords

Lithological Mohs Hardness, Drilling Parameters, Drill Tool Wear, Mineral-Weighted Method, Multiple Regression

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在钻井工程施工过程中, 钻具直接与地层岩石接触, 承受切削、摩擦、冲击等复杂载荷, 极易发生磨损失效。钻具磨损不仅缩短钻具使用寿命、增加钻井材料消耗, 还可能导致卡钻、钻具断裂等井下事故, 严重影响钻井效率与施工安全。因此, 建立科学、精准的钻具磨损评估方法具有重要的工程意义。

目前, 国内外学者对钻具磨损的研究多聚焦于钻井参数优化、钻具材料改性等外部因素, 对岩性本身硬度特征的研究相对不足。事实上, 岩性莫氏硬度作为表征岩石矿物软硬程度的基础指标, 与岩石磨蚀性密切相关, 是影响钻具磨损的重要内因。高莫氏硬度的岩石(如富含石英的硬岩, 莫氏硬度 7 级)对钻具产生强烈的磨粒磨损, 磨损速率较快; 低莫氏硬度地层(如方解石含量较高的软岩, 莫氏硬度 3 级)对钻具的磨损以磨粒磨损为主, 但磨损量级显著降低。

现有研究表明, 地层整体磨蚀性需通过矿物加权平均法进行量化, 石英、长石等不同莫氏硬度的矿物对钻具磨损的贡献存在显著差异[1]。同时, 钻压、转速、扭矩等钻井参数作为外部影响因素, 会与岩性莫氏硬度产生交互作用, 进一步影响钻具磨损速率[2]。然而, 当前钻具磨损评估模型对莫氏硬度与钻井参数的耦合机制考虑尚不充分, 难以精准量化二者对钻具磨损的协同影响。

基于此, 本文依托现有相关文献成果, 重点突出岩性莫氏硬度的主导作用, 整合矿物加权莫氏硬度计算方法、莫氏硬度与钻具磨损的关联规律、钻井参数的交互影响等内容, 构建钻具磨损多元回归评估模型, 为钻井工程的高效、安全施工提供技术支撑。

2. 相关研究现状

2.1. 岩性莫氏硬度与岩石磨蚀性的关联研究

岩石磨蚀性是导致钻具磨损的核心地质因素, 而莫氏硬度作为表征岩石矿物软硬程度的基础指标,

与岩石磨蚀性密切相关。王猛等[1]通过试验研究提出, 岩石的磨蚀性并非由单一矿物的莫氏硬度决定, 需采用矿物加权平均法计算地层整体莫氏硬度。研究发现, 石英(莫氏硬度 7 级)、长石(莫氏硬度 6 级)等高硬度矿物占比越高, 岩石磨蚀性越强, 对钻具的磨损作用越显著。



Figure 1. Photo of severely worn bit encountering high hardness and strong abrasiveness formation
图 1. 钻头钻遇硬度高、研磨性强严重磨损照片

Yilmaz [3]在花岗岩类石材磨蚀性与金刚石刀具磨损速率的研究中, 建立了基于矿物成分的岩石硬度指数与刀具磨损速率之间的定量关系, 发现矿物加权硬度对磨蚀性的预测精度优于单一矿物硬度指标。Yarali 等[4]通过对煤系地层岩石的研究, 系统分析了岩石磨蚀性与钻具磨损的关系, 指出磨蚀性受岩石矿物成分、颗粒尺寸和胶结程度的综合影响, 而矿物硬度是其中的本质控制因素。

基于 TBM 施工的隧道岩石耐磨性研究[5]发现, 莫氏硬度与 Cerchar 磨蚀性指数(CAI)存在较强的正相关关系, 提出了基于莫氏硬度估算岩石磨蚀性的方法, 进一步验证了莫氏硬度作为岩石磨蚀性评价指标的合理性。

综上, 莫氏硬度是影响岩石磨蚀性和钻具磨损的重要指标, 但现有研究多集中于单一矿物的莫氏硬度与磨蚀性的关系, 对地层整体加权莫氏硬度与钻具磨损的定量关联研究仍不够充分。

2.2. 钻井参数对钻具磨损的影响研究

钻井参数作为钻井施工的核心控制因素, 与岩性莫氏硬度协同影响钻具磨损程度。刘刚等[2]在钻具磨损评估方法的研究综述中指出, 钻压、转速、扭矩等参数对磨损的影响程度与地层岩石性质密切相关, 高硬度地层中钻压的增大会导致磨损速率急剧上升, 而软岩中转速对磨损的影响更为突出。

Hareland 等[6]建立的牙轮钻头钻速模型中, 引入岩石可钻性指数和钻头磨损系数, 研究发现钻速与钻压、转速呈非线性关系, 且这种关系在不同硬度地层中存在显著差异。Mazen 等[7]基于 PDC 钻头可钻性指数、岩屑清除效率和钻头磨损的研究, 建立了机械钻速预测模型, 指出岩石硬度与钻井参数的交互作用对钻头磨损具有放大效应, 当岩石硬度超过钻头表面材料硬度时, 磨损速率显著增长。

上述研究表明, 钻井参数对钻具磨损的影响程度与岩石莫氏硬度密切相关, 但现有研究多将二者作为独立因素分析, 对其交互作用的定量描述仍较为欠缺。

2.3. 钻具磨损评估方法研究现状

目前, 钻具磨损评估方法主要分为试验测试法、数值模拟法与经验模型法。在经验模型与现场应用方面, 马涛等[8]在涪西南凹陷的工程实践中, 基于机械比能理论建立了钻头磨损评价方法, 通过随钻数

据实时反演钻头磨损状态,为现场钻头磨损评估提供了有效手段。孟晗等[9]融合钻头磨损与预训练机制,建立了机械钻速预测方法,提高了钻头磨损状态下的钻速预测精度。Yan 等[10]基于高斯过程回归方法,建立了砂岩和泥岩地层中 PDC 钻头磨损预测模型,模型考虑了岩石性质、钻井参数和钻头设计参数的综合影响,预测精度优于传统回归方法。

在试验测试方面,Prakash [11]对煤系地层岩石中刀具寿命的研究进行了系统综述,总结了室内试验条件下不同岩石硬度对刀具磨损的影响规律;在数值模拟方面,Plinninger 等[12]通过钻爆法施工中的刀具磨损研究,建立了基于岩石磨蚀性的刀具寿命预测方法;Alber [13]研究了围压对 Cerchar 磨蚀性指数的影响,指出地应力条件会改变岩石的磨蚀性表现,进而影响钻具磨损速率。

然而,现有评估方法仍存在不足:多数模型将岩石硬度作为普通输入变量而非核心因子处理,且对岩石硬度与钻井参数的交互作用考虑不足,难以准确反映二者对钻具磨损的协同影响。

3. 莫氏硬度量化与磨损规律分析

3.1. 矿物加权莫氏硬度计算方法

地层岩石通常由多种矿物组成,不同矿物的莫氏硬度差异显著。若仅以主要矿物的莫氏硬度代表地层整体硬度,会忽略次要高硬度矿物的磨蚀贡献,导致评估偏差。因此,需采用矿物加权平均法计算地层整体莫氏硬度。

参考王猛等[1]提出的方法,结合地层矿物成分分析结果,矿物加权莫氏硬度的计算公式如下:

$$H_m = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot H_{mi} \quad (1)$$

式中: H_m 为地层矿物加权莫氏硬度; ω_i 为第 i 种矿物的质量分数(%); H_{mi} 为第 i 种矿物的莫氏硬度值; n 为地层中主要矿物的种类数。

Yilmaz [3]在花岗岩类石材的研究中验证了该方法的有效性,发现基于矿物成分加权的硬度指数与刀具磨损速率的相关性 ($R^2 = 0.89$) 显著高于单一矿物硬度指标 ($R^2 = 0.67$)。

以某砂岩地层为例,其主要矿物组成及莫氏硬度如表 1 所示。计算得该地层矿物加权莫氏硬度:

$$H_m = 0.65 \times 7 + 0.20 \times 6 + 0.10 \times 3 + 0.05 \times 2.5 = 6.125 \quad (2)$$

属于高研磨性地层。

Table 1. Mineral composition and Mohs hardness of a sandstone formation

表 1. 某砂岩地层矿物组成及莫氏硬度

矿物名称	质量分数(%)	莫氏硬度
石英	65	7
长石	20	6
方解石	10	3
云母	5	2.5

3.2. 莫氏硬度等级划分与磨损类型

根据矿物加权莫氏硬度 H_m 的分布范围,结合现有研究成果,可将地层研磨性划分为三个等级,各等级对应的钻具磨损类型与磨损特征如表 2 所示。

需要说明的是,钻具与岩石之间的磨损以磨粒磨损为主要机理,岩石中高硬度矿物颗粒在钻压作用下压入钻具表面,并在相对运动中产生切削作用,导致材料损失。当岩石莫氏硬度较低时,磨粒磨损程

度较轻；当岩石中高硬度矿物(如石英、长石)含量较高时，磨粒磨损显著增强。此外，在冲击载荷较大的钻进条件下(如硬脆性岩石)，冲击磨损会进一步加剧钻具失效。

Table 2. Mohs hardness grade and drilling tool wear type

表 2. 莫氏硬度等级与钻具磨损类型

等级	莫氏硬度范围	研磨性	主要磨损类型	磨损特征
低研磨性	$H_m < 3.0$	弱	磨粒磨损(轻微)	磨损速率低，以表面划痕为主
中研磨性	$3.0 \leq H_m < 5.0$	中等	磨粒磨损	磨损速率中等，出现明显切削痕迹
高研磨性	$H_m \geq 5.0$	强	磨粒磨损、冲击磨损	磨损速率高，齿尖钝化、崩齿

3.3. 莫氏硬度与磨损速率的量化关系

基于现有文献中的试验数据，在恒定钻井参数条件下，钻具磨损速率与莫氏硬度呈正相关关系。Plinninger 等[12]通过钻爆法施工中的刀具磨损研究发现，当岩石中高硬度矿物含量增加时，刀具磨损速率呈非线性增长。Alber [13]在围压条件下对 Cerchar 磨蚀性指数的研究表明，岩石磨蚀性随围压增加而增强，进而加速钻具磨损。

综合上述研究，当岩石莫氏硬度 H_m 低于 3.0 时，磨损速率较低，钻具寿命主要受累计进尺和旋转圈数影响；当 H_m 处于 3.0~5.0 范围时，磨损速率随硬度增加呈线性增长；当 H_m 超过 5.0 时，磨损速率显著上升，呈现非线性增长趋势。若岩石莫氏硬度接近或超过钻具表面材料硬度(如 PDC 复合片硬度约为 8~9)，磨损速率急剧增加，此时需特别关注钻具的耐磨性能和钻进参数的合理匹配。

4. 钻具磨损评估模型构建

4.1. 模型输入参数选取

基于上述分析，钻具磨损受岩石性质与钻井参数的共同影响。本文选取以下参数作为评估模型的输入特征：

岩石参数：矿物加权莫氏硬度 H_m 、岩石单轴抗压强度 σ_c

钻井参数：钻压 WOB 、转速 N 、扭矩 T

累积参数：累计进尺 D_c 、累计旋转圈数 R_c 。

其中，累计旋转圈数 $R_c = N \cdot t$ ，反映钻具承受的总循环载荷。需要说明的是，机械钻速 ROP 作为钻进效率的综合表征指标，与磨损存在双向因果关系，为避免内生性问题，不将其作为模型输入特征。

4.2. 多元回归评估模型

建立多元线性回归模型，分析各因素对钻具磨损量的影响程度。设钻具磨损量 W (以磨损高度或质量损失表示)与各输入参数的关系为：

$$W = \beta_0 + \beta_1 H_m + \beta_2 \sigma_c + \beta_3 WOB + \beta_4 N + \beta_5 T + \beta_6 D_c + \beta_7 R_c + \varepsilon \quad (3)$$

式中： β_0 为常数项， $\beta_1 \sim \beta_7$ 为回归系数， ε 为随机误差。

考虑莫氏硬度与钻井参数的交互作用，引入交互项 $H_m \cdot WOB$ 、 $H_m \cdot N$ 、 $H_m \cdot T$ ，构建扩展回归模型：

$$W = \beta_0 + \sum_{i=1}^7 \beta_i x_i + \sum_{j=1}^3 \gamma_j (H_m \cdot p_j) + \varepsilon \quad (4)$$

式中： x_i 为各输入参数， p_j 为钻井参数(WOB 、 N 、 T)， γ_j 为交互项系数。

4.3. 模型验证与对比

4.3.1. 数据来源

选取某油田 5 口井的实际钻井数据进行模型验证, 共计采集有效数据样本 856 组。其中, 岩石矿物成分通过 X 射线衍射(XRD)分析获取, 钻井参数来自随钻测量系统, 钻具磨损等级通过起钻后现场测量获取(参考 IADC 钻头磨损分级标准, 划分为 0~8 级)。

需要说明的是, 本研究数据来源于单一区块, 地层岩性以砂岩为主, 钻具类型均为 PDC 钻头。模型在其他岩性(如灰岩、泥岩)及其他钻具类型(如牙轮钻头)中的适用性尚需进一步验证。

4.3.2. 预测效果对比

采用扩展回归模型对测试集样本进行预测, 与普通多元线性回归模型的预测结果进行对比, 如表 3 所示。

Table 3. Comparison of prediction effects of different models

表 3. 不同模型预测效果对比表

模型	平均绝对误差	准确率(误差 ≤ 1 级)	R^2
多元线性回归	1.12	76.3%	0.71
扩展回归(含交互项)	0.89	82.5%	0.79

结果表明, 考虑莫氏硬度与钻井参数交互项的扩展回归模型预测效果优于普通线性回归, 预测准确率达到 82.5%, 平均绝对误差为 0.89 级。模型的决定系数 $R^2 = 0.79$, 表明所选输入特征能够解释钻具磨损量的大部分变异。

4.3.3. 回归系数分析

扩展回归模型的标准化回归系数如表 4 所示, 反映了各因素对钻具磨损的相对影响程度。

Table 4. Standardized regression coefficients of extended regression model

表 4. 扩展回归模型标准化回归系数表

排序	输入特征	标准化回归系数
1	矿物加权莫氏硬度 H_m	0.41
2	累计进尺 D_c	0.28
3	钻压 WOB	0.19
4	$H_m \cdot WOB$ 交互项	0.15
5	累计旋转圈数 R_c	0.12
6	扭矩 T	0.09
7	转速 N	0.06
8	单轴抗压强度 σ_c	0.04

分析结果表明, 矿物加权莫氏硬度是影响钻具磨损的最重要因素(标准化系数 0.41), 验证了本文以莫氏硬度为核心因子的合理性。累计进尺和钻压分别位列第二、三位, 说明累积效应和机械载荷对磨损的重要影响。 $H_m \cdot WOB$ 交互项系数显著(0.15), 表明在高莫氏硬度地层中增加钻压会加剧磨损, 二者存在协

同放大效应。

5. 钻具磨损综合评估流程与应用

5.1. 评估流程

基于上述模型,本文提出钻具磨损综合评估流程,主要包括数据采集、莫氏硬度量化、参数预处理、模型预测与结果输出五个环节。

首先,在数据采集环节,需获取地层岩屑样品并进行 X 射线衍射(XRD)分析,以确定岩石矿物组成及各类矿物的质量分数;同步采集随钻钻井参数,包括钻压(WOB)、转速(N)、扭矩(T)等,并记录累计进尺(D_c)与累计旋转圈数(R_c)等累积参数。

其次,根据矿物成分分析结果,采用式(1)所示的矿物加权平均法计算地层整体莫氏硬度 H_m ,作为模型的核心输入特征。

再次,对模型输入参数进行标准化处理,以消除不同量纲对回归系数的影响。标准化公式为:

$$x_{norm} = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (5)$$

式中: x 为原始参数值, μ 为均值, σ 为标准差。

随后,将预处理后的参数输入式(5)所示的扩展回归模型,计算钻具磨损等级预测值。模型输出为 0~8 级的磨损等级,参考 IADC 钻头磨损分级标准进行划分。

最后,根据预测的磨损等级判断钻具剩余寿命:当预测等级达到 5 级以上时,建议起钻更换钻具;当预测等级为 3~4 级时,可适当调整钻井参数以控制磨损速率;当预测等级为 2 级以下时,可维持当前钻进参数继续作业。同时,可根据 $H_m \cdot WOB$ 交互项的数值高低,优先采取降低钻压或控制转速的措施。

5.2. 工程应用建议

基于模型分析结果,针对不同研磨性地层提出以下工程应用建议。

对于高研磨性地层($H_m \geq 5.0$),岩石中石英、长石等高硬度矿物含量较高,钻具磨损以磨粒磨损和冲击磨损为主,磨损速率呈非线性增长。在此类地层钻进时,应优先选用耐磨性强的钻具材料,如加厚 PDC 复合片或表面涂覆耐磨涂层的钻头。钻井参数方面,建议适当降低钻压,较常规值降低 10%~15%,以减小高硬度矿物颗粒对钻具表面的压入深度和切削作用;同时控制转速在合理区间,避免因共振效应加剧钻具疲劳损伤。此外,应增加起钻检查频次,当累计进尺达到 150~200 m 时起钻检查钻具磨损状态。

对于中研磨性地层($3.0 \leq H_m < 5.0$),岩石磨蚀性中等,钻具磨损以磨粒磨损为主,磨损速率相对可控。在此类地层钻进时,可采用常规钻具,重点监测累计进尺与扭矩波动。当扭矩出现异常升高时,可能表明钻齿已发生明显磨损或局部崩齿,应及时调整钻井参数。建议累计进尺达到 250~300 m 时起钻检查,根据实际磨损情况优化后续钻进参数。

对于低研磨性地层($H_m < 3.0$),岩石中高硬度矿物含量较低,钻具磨损速率较慢。在此类地层钻进时,可适当提高钻压和转速以提高机械钻速,但需关注钻具表面疲劳损伤的累积效应,避免因长期连续作业导致表面疲劳裂纹扩展。累计进尺可适当延长至 400~500 m 起钻,但仍需结合扭矩、机械钻速等随钻参数的变化趋势综合判断。

此外,扩展回归模型中 $H_m \cdot WOB$ 交互项的系数显著,表明高硬度地层与高钻压对磨损存在协同放大效应。当该交互项数值较高时,应优先采取降低钻压的措施,而非单纯控制转速或扭矩,以更有效地控制磨损速率。

6. 结论与展望

6.1. 结论

(1) 岩性莫氏硬度是决定岩石磨蚀性、控制钻具磨损的核心内因。通过矿物加权平均法量化地层整体莫氏硬度,可有效解决单一矿物硬度无法表征地层整体磨蚀性的问题。Yilmaz [3]的研究验证了该方法与刀具磨损速率的相关性($R^2 = 0.89$)优于单一矿物硬度指标。

(2) 不同莫氏硬度等级对应不同的钻具磨损类型与磨损速率: $H_m < 3.0$ 时以轻微磨粒磨损为主,磨损速率较低; $3.0 \leq H_m < 5.0$ 时磨粒磨损程度中等; $H_m \geq 5.0$ 时磨粒磨损与冲击磨损并存,磨损速率呈非线性增长。

(3) 构建了考虑莫氏硬度与钻井参数交互影响的钻具磨损多元回归评估模型,输入参数包括矿物加权莫氏硬度、单轴抗压强度、钻压、转速、扭矩、累计进尺、累计旋转圈数共7个特征。现场数据验证表明,扩展回归模型的预测准确率(误差 ≤ 1 级)达到82.5%,决定系数 $R^2 = 0.79$,平均绝对误差为0.89级,优于不考虑交互项的普通多元线性回归模型。

(4) 回归系数分析显示,矿物加权莫氏硬度对钻具磨损的影响最大(标准化系数0.41),累计进尺(0.28)和钻压(0.19)分列第二、三位。 $H_m \cdot WOB$ 交互项系数显著(0.15),表明高硬度地层与高钻压对磨损存在协同放大效应,验证了本文考虑交互作用的必要性。

6.2. 展望

本研究尚存在以下不足,有待进一步深入:

(1) 模型验证数据来源于单一区块,地层岩性以砂岩为主,钻具类型均为PDC钻头。后续需补充不同地质条件(如灰岩、泥岩、火成岩)、不同钻具类型(如牙轮钻头、金刚石钻头)的现场数据,进一步验证模型的泛化能力。

(2) 本研究采用的矿物加权莫氏硬度基于室内XRD分析,无法实现随钻实时获取。后续可探索基于随钻测井数据(如自然伽马、声波时差)反演矿物成分与莫氏硬度的方法,实现钻具磨损的随钻动态评估。

(3) 钻具材料特性(如表面硬度、涂层类型、基体韧性)对磨损也有重要影响,后续研究可将钻具材料参数纳入评估模型,构建更完善的钻具磨损综合评估体系。

参考文献

- [1] 王猛, 齐吉琳, 皮进, 等. 基于矿物加权硬度确定岩石磨蚀性的试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21(3): 99-104.
- [2] 刘刚, 陈勇, 赵伟. 钻具磨损评估方法研究现状与发展趋势[J]. 钻采工艺, 2021, 44(3): 1-5.
- [3] Yilmaz, N.G. (2011) Abrasivity Assessment of Granitic Building Stones in Relation to Diamond Tool Wear Rate Using Mineralogy-Based Rock Hardness Indexes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **44**, 725-733. <https://doi.org/10.1007/s00603-011-0166-1>
- [4] Yaralı, O., Yaşar, E., Bacak, G. and Ranjith, P.G. (2008) A Study of Rock Abrasivity and Tool Wear in Coal Measures Rocks. *International Journal of Coal Geology*, **74**, 53-66. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2007.09.007>
- [5] 张厚美, 刘国华, 王永东. 基于TBM施工的隧道岩石耐磨性与莫氏硬度的关系研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2010, 6(5): 127-130.
- [6] Hareland, G., Wu, A. and Rashidi, B. (2010) A Drilling Rate Model for Roller Cone Bits and Its Application. *International Oil and Gas Conference and Exhibition in China*, Beijing, June 2010, SPE-129592-MS. <https://doi.org/10.2118/129592-ms>
- [7] Mazen, A.Z., Rahmanian, N., Mujtaba, I. and Hassanpour, A. (2021) Prediction of Penetration Rate for PDC Bits Using Indices of Rock Drillability, Cuttings Removal, and Bit Wear. *SPE Drilling & Completion*, **36**, 320-337. <https://doi.org/10.2118/204231-pa>

- [8] 马涛, 张超, 王巍, 等. 涪西南凹陷基于机械比能的钻头磨损评价方法[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(1): 78-81.
- [9] 孟晗, 张振鑫, 韩学银, 等. 融合钻头磨损与预训练机制的机械钻速预测方法研究[J]. 石油科学通报, 2025, 10(5): 1030-1042.
- [10] Yan, Z., Fan, H., Song, X., *et al.* (2024) Wear Prediction of Polycrystalline Diamond Compact Bits in Sandstone and Mudstone Formations Based on Gaussian Process Regression. *SPE Journal*, **29**, 6605-6622.
- [11] Prakash, S. (2024) A Review on Tool Life in Coal Measures Rocks. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, **72**, 1-11. <https://doi.org/10.18311/jmmf/2024/35911>
- [12] Plinninger, R.J., Spaun, G. and Thuro, K. (2002) Predicting Tool Wear in Drill and Blast. *Tunnels & Tunnelling International*, **34**, 38-41.
- [13] Alber, M. (2008) Stress Dependency of the Cerchar Abrasivity Index (CAI) and Its Effects on Wear of Selected Rock Cutting Tools. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **23**, 351-359. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2007.05.008>