

基于岩渣形貌及岩石磨蚀性的钻井法凿井滚刀 磨损评估方法

程桦^{1,2,3}, 谢鲍¹, 姚直书¹, 荣传新¹, 林键³

(1. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230601; 3. 安徽建筑大学 安徽省岩土工程智能建造与灾变防控重点实验室, 安徽 合肥 230601)

摘要: 针对西部地区侏罗系地层钻井法施工深大立井滚刀磨损严重问题, 以西部某煤矿北一回风井钻井法凿井工程为研究对象, 提出一种钻井法凿井滚刀磨损评估方法。首先, 基于现场调研分析不同地层滚刀磨损程度及磨损分布特征, 并提出相关量化指标; 其次, 对竖井钻机岩渣开展现场预处理, 采用图像识别方法进行后处理, 统计分析了岩渣几何形貌, 并使用类指数分布函数描述其累积分布规律; 此后, 以皮尔逊系数为相关性评价指标探究了岩渣颗粒分布及矿物成分对滚刀磨损指标的影响, 阐明了西部地区钻井法凿井滚刀易磨损致因; 最后, 基于相关性分析方法, 选取若干主要影响参数, 使用非线性拟合工具给出了针对不同岩层的滚刀磨损指标预测公式, 并提出现场更换滚刀的评估方法。结果表明: 钻井法凿井滚刀磨损与岩层地质条件密切相关, 不同地层单位进尺消耗滚刀数量依次为: 泥质胶结泥性地层 > 钙质胶结泥、砂互层地层 ≈ 钙质、铁质胶结砂性地层 > 极弱胶结砂性地层, 西部钻井法凿井刀盘深磨区易集中于 b、c、d 刀圈, 而中心刀及其附近区域多为浅磨区; 岩渣几何形貌统计特征可间接反映不同地层单位进尺滚刀磨损程度, 西部地区砂系、泥系地层岩渣粒径分布符合类指数函数, 相关系数 R^2 为 0.976~0.997, 根据拟合函数得到的岩渣均匀系数与磨损均匀性指标相关性最高, 泥性地层及泥、砂互层地层滚刀磨损加剧的原因可归结为岩渣泥化、砂化; 以岩渣圆度分布的箱宽、大颗粒占比、均匀系数、岩石磨蚀性指数为滚刀磨损主要表征参数, 得到适用于不同地层的滚刀磨损预测模型, 与现场实测对比, 模型预测成功率达 90.9%; 提出的滚刀磨损评估方法可为现场提钻换刀决策提供有益参考。

关键词: 钻井法凿井; 岩渣颗粒分布; 矿物成分; 滚刀磨损; 评估方法

中图分类号: TD822 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)01-0115-17

Wear evaluation method of drilling shaft sinking hob based on rock slag morphology and rock abrasiveness

CHENG Hua^{1,2,3}, XIE Bao¹, YAO Zhishu¹, RONG Chuanxin¹, LIN Jian³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. School of Resource and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China; 3. Anhui Province Key Laboratory of Intelligent Geotechnics and Disaster Prevention, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: Aiming at the serious wear problem of hob in deep and large vertical shaft constructed by drilling method in

收稿日期: 2024-07-21 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 李雅楠 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0864

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52174104); 国家自然科学基金青年基金资助项目 (52304073)

作者简介: 程桦 (1956—), 男, 安徽巢湖人, 教授, 博士生导师。E-mail: hcheng@aust.edu.cn

通讯作者: 谢鲍 (1998—), 男, 安徽淮南人, 博士研究生。E-mail: xiebao980518@163.com

引用格式: 程桦, 谢鲍, 姚直书, 等. 基于岩渣形貌及岩石磨蚀性的钻井法凿井滚刀磨损评估方法[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 115-131.

CHENG Hua, XIE Bao, YAO Zhishu, et al. Wear evaluation method of drilling shaft sinking hob based on rock slag morphology and rock abrasiveness[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 115-131.



移动阅读

Jurassic strata in western China, a method for evaluating the wear of hob in drilling method is put forward, taking the drilling method of sinking shaft in a coal mine in the west as the research object. Firstly, based on field investigation, the wear degree and wear distribution characteristics of hob in different strata are analyzed, and relevant quantitative indexes are put forward. Secondly, the rock slag of shaft drilling rig is pretreated on site, and the image recognition method is used for post-processing, and the geometric morphology of rock slag is statistically analyzed, and its cumulative distribution law is described by exponential distribution function. Then, taking Pearson coefficient as the correlation evaluation index, the influence of rock slag particle distribution and mineral composition on hob wear index is explored, and the causes of easy wear of drilling shaft sinking hob in western China are expounded. Finally, based on the correlation analysis method, several main influencing parameters are selected, and the prediction formula of hob wear index for different rock strata is developed by using nonlinear fitting tools, and the evaluation method of replacing hob on site is put forward. The results show that: the wear of drilling hob is closely related to the geological conditions of rock strata, and the number of hob consumed per unit footage in different strata is in the order of argillaceous cemented muddy stratum > calcareous cemented mud, sand interbedded stratum \approx calcareous and iron cemented sandy stratum > extremely weak cemented sandy stratum; The deep grinding area of shaft sinking cutterhead in western drilling method is easy to concentrate on B, C and D cutter rings, while the center cutter and its vicinity are mostly shallow grinding areas; The statistical characteristics of geometric morphology of rock slag can indirectly reflect the wear degree of hob in different strata; The particle size distribution of sand and mudstone strata in western China conforms to exponential function, and the correlation coefficient R^2 is 0.976–0.997. The uniformity coefficient of slag obtained according to the fitting function has the highest correlation with the wear uniformity index. The reasons for the increase of hob wear in muddy strata and mud-sand interbedded strata can be attributed to mud and sand of rock slag; Taking the box width, the proportion of large particles, the uniformity coefficient and the rock abrasiveness index of the roundness distribution of rock slag as the main characterization parameters, a hob wear prediction model suitable for different strata is obtained. Compared with the field measurement, the prediction success rate of the model is 90.9%; The proposed evaluation method of hob wear can provide a useful reference for the decision-making of lifting and changing tools on the spot.

Key words: shaft sinking by drilling method; particle distribution of rock slag; mineral composition; hob wear; appraisal procedure

0 引 言

近年来,随着我国中东部煤炭资源逐渐枯竭,煤炭工业中心向西部转移,内蒙古、陕西、新疆等地的矿井建设稳步推进^[1-2]。与中东部厚松散层薄基岩的煤炭赋存特点相比,西部矿区煤炭多位于白垩-侏罗系弱胶结地层,深大竖井井筒常采用人工冻结法施工^[3]。与冻结法施工相比,钻井法凿井具有机械化程度高、施工环境好、成井质量优等优点^[4-5]。但在钻进西部侏罗系地层时,出现了滚刀磨损严重、钻进效率低下等工程问题^[6-7]。因此,从岩渣颗粒分布特征及矿物成分视角,开展钻井法凿井滚刀磨损致因研究,是破解钻井法凿井高效破岩难题的重要技术途径之一,亦为矿山智能化建设的关键组成部分^[8]。

近年来,国内外有关研究人员围绕破岩器械刀具磨损开展了大量研究,取得系列成果^[9-11]。刀具磨损分布规律方面,ZHANG 等^[12]通过着重分析岩石破碎过程滚刀运动轨迹,提出了正刀、过渡刀磨损的理论

模型;ZHANG 等^[13]使用离散元方法研究岩-机相互作用中岩石表面的接触压力分布,为探究刀具磨损分布规律提供一定依据;张晋勋等^[14]基于 EDEM 研究了砂卵石地层盾构刀具磨损分布特征。刀具磨损影响因素方面,夏明燊^[15]通过现场实时监测研究了 TBM 滚刀单周磨耗量与围岩强度、岩石磨蚀性、刀盘扭矩和刀盘转速关系;龚秋明等^[16-17]基于 Cerchar 试验对岩石磨蚀性指数进行了分级讨论,并以锦屏二级水电站引水隧洞工程为例,分析了 TBM 滚刀磨损原因;杜立杰等^[18]通过现场调研发现,刀具磨损与围岩类别及磨蚀性存在很大相关性,随着围岩节理裂隙增多和岩石磨蚀指数降低,刀具磨损和消耗明显下降;孙振川等^[19]以引汉济渭岭南 TBM 工程为例,分析了矿物成分对花岗岩地层滚刀磨损的影响。众多影响因素中,岩渣作为破岩机械易获取的信息受到重点关注,孙金山等^[20]基于 TBM 掘进参数及岩渣特征识别岩体质量指标。闫长斌等^[21-22]通过现场筛分试验研究了 TBM 破岩效率及掘进过程中滚刀消耗规律;周小熊等^[23]通

通过分析岩渣图像判断 TBM 掘进效率; 付孟雄等^[24]通过多种研究方法探究了底板锚固孔钻进过程中两翼式钻头破岩时钻渣生成机理及尺寸特征。刀具磨损预测模型方面, SU 等^[25]以深圳某地铁隧道掘进为例, 基于磨料去除理论建立了 TBM 滚刀磨损预测模型; 张晓平等^[26]基于现场调研及理论分析, 探究了泥水盾构穿越致密复合砂层的磨损量及寿命预测; WANG 等^[27-28]基于能量方法提出评估硬岩 TBM 刀盘磨损的预测方法, 并确定了盘形滚刀滑移比与贯入度、切削系数之间的关系。

综上, 上述研究针对不同破岩机械、不同地层条件研究了刀具磨损规律、影响因素, 并提出相关刀具预测模型, 但目前针对滚刀破岩的磨损预测仍存在以下 3 点不足: ① 研究范围层面, 多针对 TBM、泥水盾构等掘进机械的磨损行为, 且掘进地层集中于硬岩、浅部砂土, 鲜有针对西部弱胶结富水软岩地层开展钻井法凿井工法的滚刀磨损研究。② 研究方法层面, 使用数字图像相关法研究岩渣颗粒分布特征较为少见, 目前多使用筛分方法开展相关研究, 极少有将岩渣颗粒分布特性与滚刀磨损建立相关联系, 而多采用理论分析建立滚刀磨损预测模型。③ 磨损致因层面, 地层

物理力学特性、岩渣颗粒分布特性对滚刀磨损的影响机制尚不明确, 相关报道较少。

故此, 以我国西部地区某矿北一回风井钻井法凿井施工为工程背景, 针对白垩系地层钻井法凿井滚刀磨损严重问题, 基于现场调研结果获得滚刀磨损、失效特征, 以及不同岩层岩渣几何形貌统计特征和矿物成分, 提出滚刀磨损评估指标, 分析岩渣颗粒分布和岩石磨蚀性与滚刀磨损指标的相关性, 探究滚刀易磨损致因, 构建岩渣特征和磨蚀指标为参数的滚刀磨损预测模型, 提出滚刀磨损评估方法。研究结果可为西部地区钻井法凿井滚刀磨损预测与现场提钻换刀的时机决策, 提供有益参考。

1 工程背景

1.1 工程概况

西部某煤矿设计生产能力为 10.0 Mt/a, 设有主、副、中央进、回风及北一回风立井 5 个立井井筒。其中, 主、副井采用冻结法施工, 其余 3 个风井均采用钻井法凿井。其北一回风立井, 钻井深度 542.5 m, 净直径 6.0 m, 钻井直径 8.5 m, 井筒依次穿越第四系、白垩系、侏罗系地层, 相关地质信息见表 1。

表 1 钻井法施工穿越地层地质信息表

Table 1 Geological information table of drilling method construction through strata

序	组	深度/m	系	主要岩性	胶结类型	单轴抗压强度/MPa
1	萨拉乌苏组	0~61.7	第四系	砂层	—	—
2	离石组	61.7~91.6		硬黏土	—	—
3	洛河组	91.6~201.4	白垩系	砂性岩层	极弱胶结	2.63
4	安定组	201.4~304.4	侏罗系	泥性岩层、砂性岩层	泥质胶结	45.87
5	直罗组	304.4~470.7			钙质胶结	45.17
6	延安组	470.7~542.5		砂性岩层	钙质、铁质胶结	52.3

1.2 竖井钻机与设计参数

钻井法施工选用 AD130/1000 型全液压力头竖井钻机, 采用“一扩成井”施工工艺, 即采用 $\phi 4.2$ m 超前钻和 $\phi 8.5$ m 扩孔钻施工。该竖井钻机设备总重 561 t, 其设计钻井深度可达 1 000 m, 提升能力为 700 t, 钻机动力头扭矩 600 kN·m, 设备总功率 1 000 kW。

破岩方面, 白垩、侏罗系地层多采用铣齿滚刀, 部分地层边刀配合安装 4 把球齿滚刀, 刀盘使用 6 把边刀+19 把正刀+1 把中心刀的组合方式, 配有大配重钻具, 实现拉、压、剪、冲复合破岩作用, 采用偏心扫掠式的单吸渣口气举反循环泥浆悬浮排渣工艺。竖井钻机、钻头结构、现场滚刀布刀方式及现场使用滚刀形制如图 1 所示。

2 超前钻头滚刀磨损及消耗

2.1 滚刀更换记录

根据现场井筒钻进记录, 得到不同时间段、掘进段竖井钻机滚刀消耗统计见表 2。经统计, 钻井法凿井下穿第四系、白垩系、侏罗系, 总进尺 491.31 m, 更换滚刀 272 把。不同地层及岩体类别的滚刀消耗如图 2 所示。

分析表 2、图 2 可知, 极弱胶结砂性地层中进尺 103.73 m, 更换滚刀 1 次, 单位进尺滚刀消耗仅为 0.251 把/m; 进入泥质胶结泥性地层后, 在 70.55 m 的总进尺中更换 3 次滚刀, 单位进尺消耗刀数显著增至 1.095~1.206 把/m; 钻进段 3、4、5 消耗刀数降至 22 把; 进入钙质胶结泥、砂互层地层后, 从 278.63 m

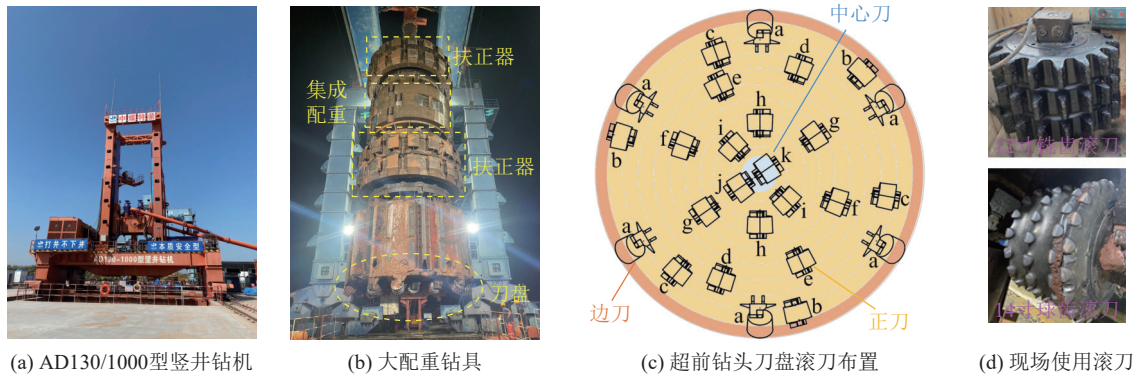


图 1 钻井法施工现场

Fig.1 Drilling method construction site

表 2 不同钻进段竖井掘进机滚刀消耗统计

Table 2 Statistics of tool consumption of shaft boring machine in different drilling sections

钻进段	日期	起止深度/m	钻进段主要地层	钻进段主要岩性	消耗刀数	单位进尺消耗刀数/(把·m ⁻¹)
1	7-24—8-3	104.35~208.08	白垩系洛河组	极弱胶结砂性地层	26	0.251
2	8-20—8-28	208.08~239.43	侏罗系安定组	泥质胶结泥性地层(钙质胶结为辅)	26	1.206
3	9-3—9-11	239.43~259.53			22	1.095
4	9-13—9-26	259.53~278.63			22	1.152
5	9-27—10-7	278.63~306.78			22	0.785
6	10-11—10-19	306.78~340.73			26	0.766
7	次年2-9—2-19	340.73~371.01	侏罗系直罗组	钙质胶结泥、砂互层地层	25	0.826
8	次年2-20—3-9	371.01~403.46			26	0.806
9	次年3-9—3-25	403.46~435.36			26	0.815
10	次年3-26—4-4	435.36~460.46			25	0.996
11	次年4-8—4-18	460.46~491.31			侏罗系延安组	钙质、铁质胶结砂性地层

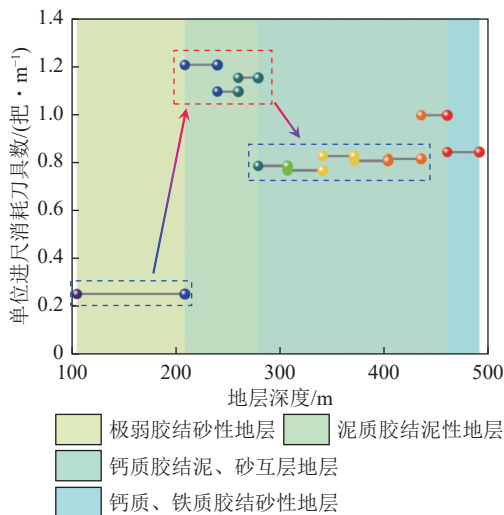


图 2 单位进尺消耗刀数与岩性的关系

Fig.2 Relationship between unit footage tool consumption and lithology

钻至 460.46 m 更换了 6 次滚刀, 单位进尺消耗滚刀为 0.766~0.996 把/m; 超前钻头最终钻至延安组上部, 揭露泥质、铁质胶结砂性地层, 单位进尺消耗滚刀

0.843 把/m。综上所述, 不同地层单位进尺消耗滚刀从大大小依次为: 泥质胶结泥性地层 > 钙质胶结泥、砂互层地层 ≈ 钙质、铁质胶结砂性地层 > 极弱胶结砂性地层。

2.2 滚刀磨损、失效特征

根据钻进现场统计分析滚刀磨损、失效特征, 将其分为滚刀常规磨损与断裂失效 2 种失效模式, 如图 3 所示。其中, 滚刀常规磨损又分为滚压磨损、倾斜摩擦磨损、不规则磨损、平面摩擦磨损、边刀磨损及刀座磨损。而断齿、脱壳归为断裂失效模式。结合滚刀磨损失效模式, 将滚刀磨损程度划分为轻微磨损、一般磨损、中度磨损、严重磨损、完全失效, 得到滚刀磨损程度评价矩阵见表 3。① 由于滚压磨损类型的滚刀表面耐磨焊层未磨损殆尽, 通过现场检查刀轴状态, 可继续使用, 因此定义为轻微磨损。② 倾斜摩擦磨损表面耐磨焊层磨损殆尽, 但其刀齿尖端依然具有一定破岩能力, 将其定义为一般磨损、中度磨损、严重磨损。③ 不规则磨损、平面摩擦磨损刀齿顶端形成磨损台阶, 根据设置临界刀齿高度分别定义为一般磨损、中

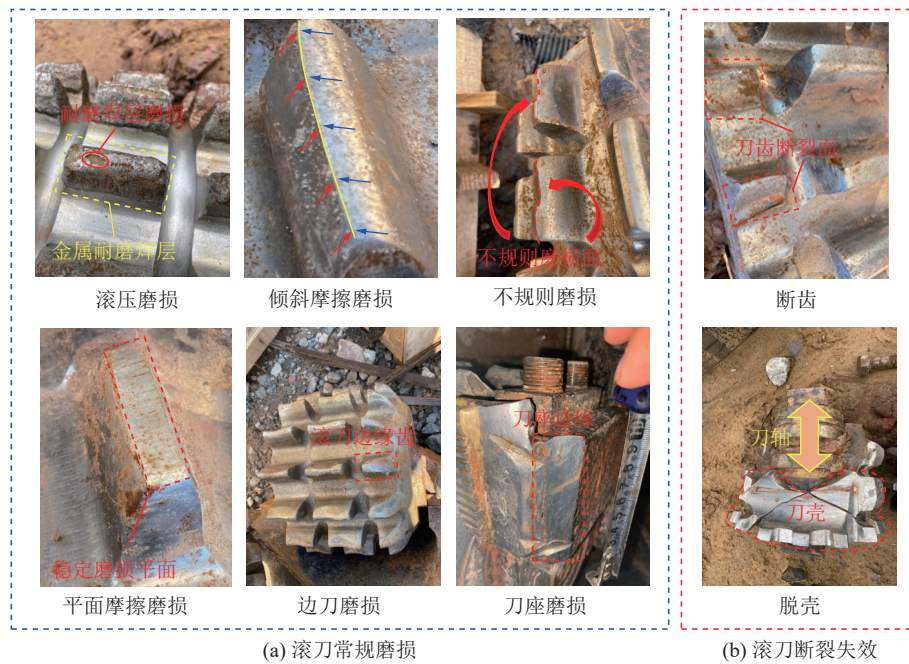


图 3 滚刀磨损、失效特征

Fig.3 Tool wear and failure characteristics of hob cutter

表 3 现场滚刀磨损程度评价矩阵

Table 3 Evaluation matrix of on-site disc cutter wear degree

磨损程度(w_i)	滚压磨损	倾斜摩擦磨损	不规则磨损	平面摩擦磨损	边刀磨损	刀座磨损	断齿	脱壳
轻微磨损(1)	√					√		
一般磨损(2)		√	√	√	√	√		
中度磨损(3)		√	√	√	√	√		
严重磨损(4)		√	√	√	√	√		
完全失效(5)							√	√
备注	结合现场观测精细评价							

度磨损、严重磨损。④ 根据边刀与刀座磨损程度分为轻微磨损、一般磨损、中度磨损、严重磨损。⑤ 断齿与脱壳等滚刀结构性破坏被定义为完全失效。根据现场测量刀齿斜长为 40 mm, 对于倾斜摩擦磨损、不规则磨损、平面摩擦磨损、边刀磨损、刀座磨损, 其磨损斜长每 5 mm 为一个磨损程度等级。0~5 mm 为轻微磨损, 5~10 mm 为一般磨损, 10~15 mm 为中度磨损, 15~20 mm 为严重磨损。根据滚刀磨损程度的不同定义滚刀磨损指标 w_i 为 1~5 (w_i 为刀盘中第 i 个滚刀的磨损指标)。

2.3 滚刀磨损分布及磨损指标量化

为可视化滚刀磨损与其安装位置的关系, 根据表 3, 结合现场调研绘制滚刀磨损热图 (图 4)。则每次换刀的刀盘整体磨损指标 W 、单位进尺刀盘磨损指标 W_f 与单刀平均磨损指标 \bar{w} 分别为如式 (1)~式 (3) 所示。

$$W = \sum_{i=1}^n w_i \quad (1)$$

$$W_f = \sum_{i=1}^n w_i / h_j \quad (2)$$

$$\bar{w} = \sum_{i=1}^n w_i / n \quad (3)$$

式中: h_j 为第 j 个钻进段段深, m ; n 为刀盘安装滚刀数量, 把。

如图 4 所示, 滚刀消耗与其安装位置密切相关。因刀盘边刀呈六边形布置, 滚刀磨损热图亦呈六边形分布。随着安装半径增大, 滚刀磨损程度有增大趋势, 由极弱胶结砂性地层钻至泥质胶结泥性地层, 该趋势尤为突出。由于极弱胶结砂性地层出现边刀内边齿及刀座深磨, 因此钻至泥质胶结泥性地层, 在边刀位置设置 4 把 14 寸球齿盘型滚刀, 该类型滚刀有较优耐磨性, 根据图 4b, 边刀磨损得到显著改善。钻至钙质胶结泥、砂互层地层, 相同安装半径、不同安装角度的滚刀磨损出现较大差异。钻至钙质、铁质胶结砂性

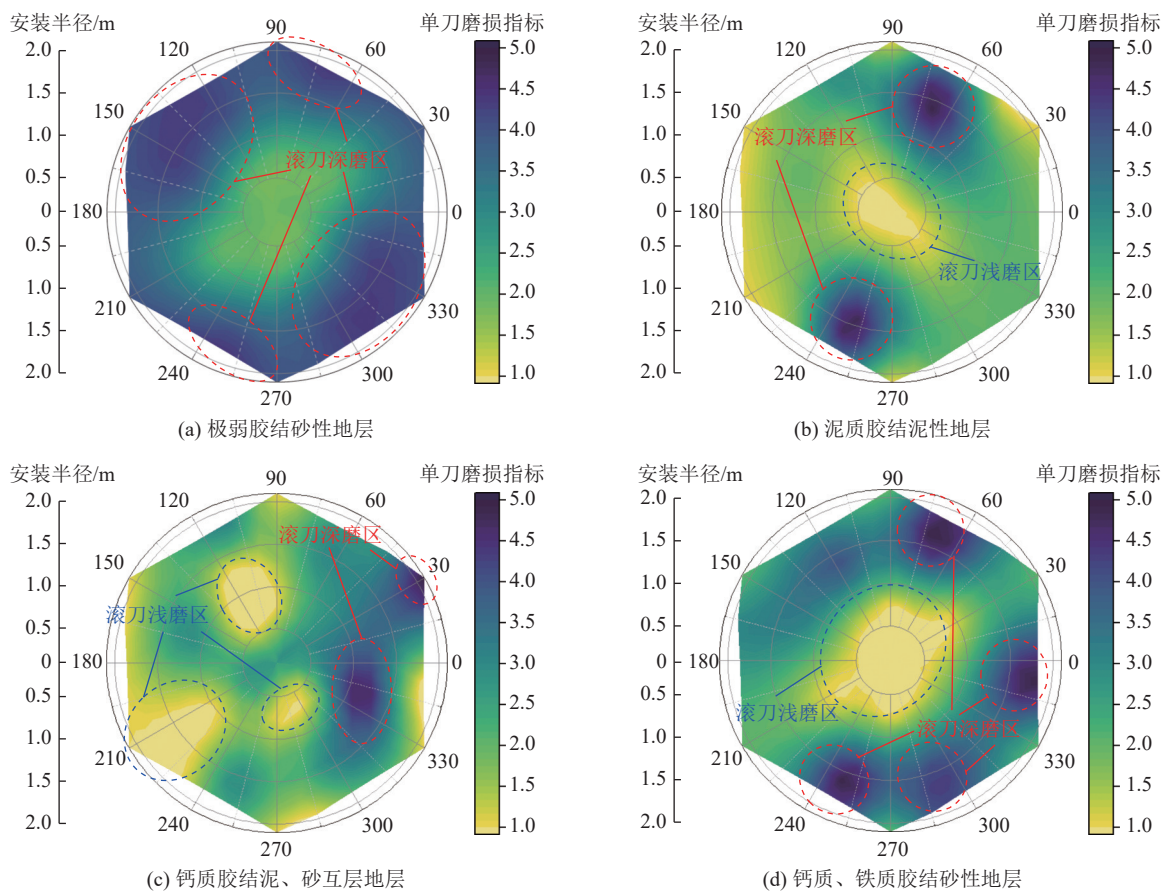


图 4 不同地层换刀记录的滚刀磨损热图

Fig.4 The heat map of tool wear recorded by tool change in different strata

地层,在刀盘外围环向出现较多滚刀深磨区域。结合图 1c,西部钻井法凿井刀盘深磨区易集中于 b、c、d 刀圈,而中心刀及其附近区域多为浅磨区,极弱胶结砂性地层及泥质胶结泥性地层刀盘磨损基本呈中心对称分布,而钙质胶结泥、砂互层地层与钙质、铁质胶结砂性地层刀盘呈非中心对称偏磨。

钻井法凿井更换滚刀需历经提钻—评估磨损—拆装滚刀—下钻等多个工艺流程,由于提钻时间成本较高,现场倾向于在每次提钻时将滚刀全部更换。为减少非钻进消耗工时,提高钻进效率,降低成本,在提钻换刀前,可通过滚刀磨损均匀化评价,辅助确定提钻时机,减少提钻次数。故此,以单刀平均磨损指标的标准差作为磨损均匀性指标 σ_w ,表达式如式(4)所示。

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})^2}{n}} \quad (4)$$

根据式(1)—式(4)可得刀盘整体磨损指标 W 、单位进尺刀盘磨损指标 W_f 、单刀平均磨损指标 \bar{w} 、磨损均匀性指标 σ_w 计算值见表 4。其中,指标 W_f 为钻进段持续钻进结果量; W 、 \bar{w} 、 σ_w 体现提钻时刀盘滚刀磨损

状态的过程量,可作为滚刀磨损预测依据。刀盘滚刀整体磨损指标 W 与单刀平均磨损指标 \bar{w} 为倍数关系,且单刀平均磨损指标 \bar{w} 更能直观表示刀盘中每把滚刀的平均磨损程度(表 3)。由表 4 可得,不同换刀次号的单刀平均磨损指标 \bar{w} 及磨损均匀性指标 σ_w 较为离散,且与地层相关性较小,反映现场换刀存在一定盲目性。而单位进尺刀盘磨损指标 W_f 作为结果量能反映地层特性,其结果与图 2 中单位进尺滚刀消耗类似。

3 基于图像分析的岩渣颗粒分布

3.1 岩渣颗粒获取及识别

岩渣与岩层性质、刀具类型、钻进参数等有密切联系,亦是研究刀具磨损、破岩效率的重要间接因素^[21]。故此,岩渣颗粒统计特征往往能揭示破岩机械的钻进状态^[22]。

通过现场捞渣分析是研究岩渣颗粒分布最直接的方法。提钻换刀前 1~2 h,在出渣口同一位置打捞岩渣 10 min,后经晾晒、清洗、复晒得到岩石颗粒,拍照保存图形源文件。以极弱胶结砂性地层、泥质胶结泥性地层、钙质胶结泥、砂互层地层及钙质、铁质胶结砂性地层为研究对象进行现场岩渣打捞及处理流

表 4 磨损指标计算值
Table 4 The calculated value of wear index

换刀次号	钻进段主要岩性	刀盘滚刀整体磨损指标 W	单位进尺刀盘滚刀磨损指标 W_f	单刀平均磨损指标 \bar{w}	磨损均匀性指标 σ_w
1	极弱胶结砂性地层	88	0.85	3.38	0.92
2		79	2.52	3.04	1.05
3	泥质胶结泥性地层	49	2.44	1.88	1.08
4		62	3.25	2.38	1.11
5		68	2.42	2.62	0.96
6		77	2.27	2.96	1.13
7	钙质胶结泥、砂互层地层	55	1.82	2.12	0.89
8		46	1.42	1.77	0.97
9		52	1.63	2	1.27
10		67	2.67	2.58	0.57
11	钙质、铁质胶结砂性地层	65	2.11	2.5	1.34

程如图 5 所示。

对于岩渣几何形貌, 通过椭圆度表征形状和表面特征; 对于分布特性, 通过级配表征岩渣大小以及粒径分布特点。现有研究常用筛分法处理岩渣, 但获得

的岩渣形状信息有限。为此, 通过基于 Java 算法的图像处理平台 ImageJ 识别颗粒的面积、长短轴、圆度等形状参数, 并统计岩渣几何形貌及颗粒分布规律。图像分析流程及颗粒几何参数如图 6 所示。

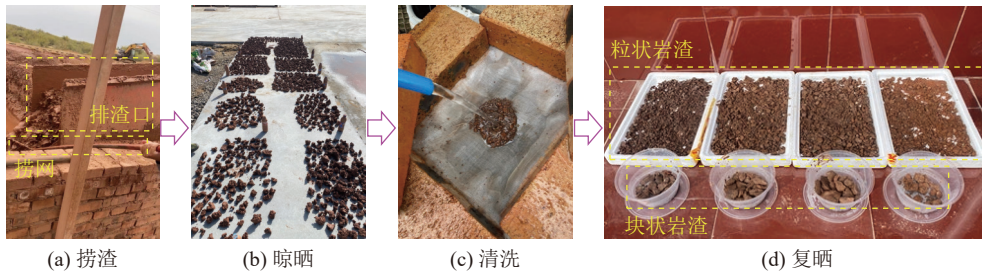


图 5 现场捞渣及预处理

Fig.5 On-site slag fishing and pretreatment

由于岩渣颗粒粒径分布于 0.01~10 cm, 故选用普通摄影机可满足识别需求。

1) 通过逐渐缩小的椭圆包裹岩渣颗粒, 直至该椭圆与岩渣颗粒外接, 得到图 6b 所示拟合椭圆, 测量其长轴、短轴分别为 L_1 、 L_2 , 据此得到岩渣椭圆度参数 E_p 如式 (5) 所示。

$$E_p = \frac{L_1}{L_2} \quad (5)$$

2) 使用拟合方法构建与识别颗粒面积 S 相同的圆, 得到颗粒等效圆, 通过式 (6) 计算到等效圆直径 R , 因此颗粒面积 S 与等效圆直径 R 可用于评估颗粒尺寸。

$$R = 2 \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (6)$$

3) 圆度 C_d 定义式如式 (7) 所示, 其值越接近于 1, 证明颗粒越接近圆形, 相反其值越接近 0, 颗粒越细长,

式 (7) 中 C 为颗粒周长。

$$C_d = \frac{4\pi S}{C^2} \quad (7)$$

3.2 岩渣几何形貌统计特征

依据上述方法, 从岩渣颗粒形状、大小分布入手分析其统计特征。其中, 圆度与椭圆度用于描述岩渣颗粒形状, 通过面积筛选颗粒并进行累积统计用于描述颗粒大小分布。

以圆度为横坐标、椭圆度为纵坐标得到 11 组岩渣颗粒形状的统计特性如图 7 所示。箱线图中箱宽为上下四分位间的差异, 箱内蓝点为均值, 蓝线为中位数, 上下限外红点为异常偏离值。

由图 7 可得, 圆度与椭圆度的箱体呈现相反的偏态, 即圆度呈右偏态, 而椭圆度呈显著左偏态。相比于圆度, 岩渣椭圆度更易出现异常偏离值。因此对于图像方法识别岩渣, 颗粒圆度更适合用于描述岩渣形状统计特性。其中, 岩渣圆度箱宽反映了圆度中位数

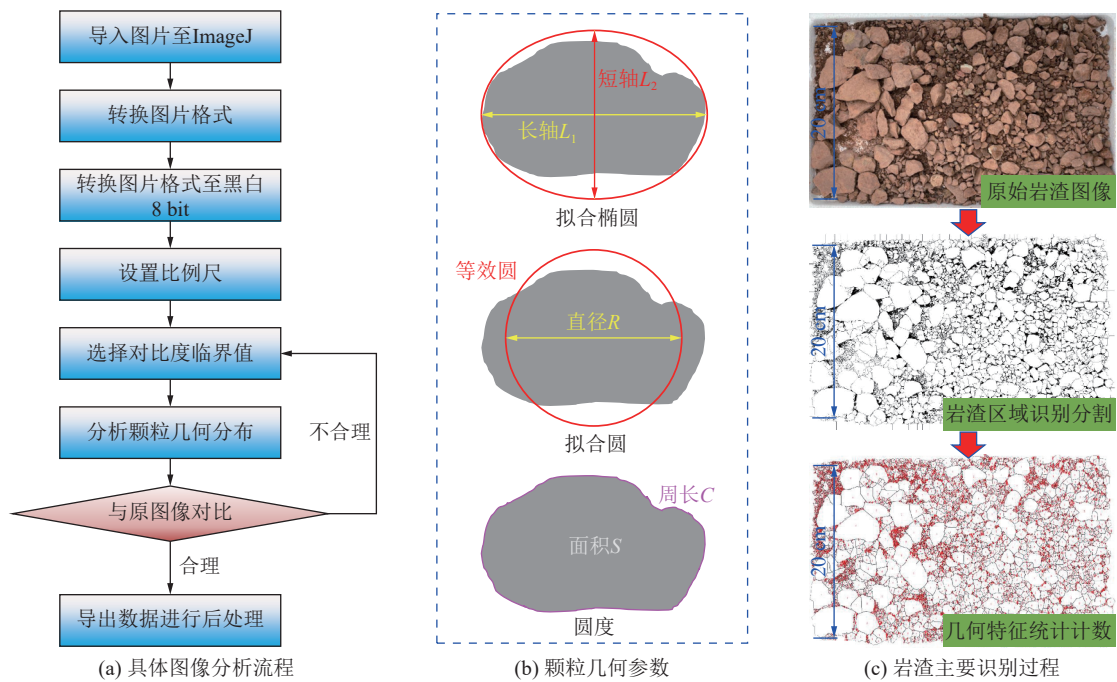


图 6 图像分析流程及颗粒几何参数

Fig.6 Image analysis process and particle geometric parameters

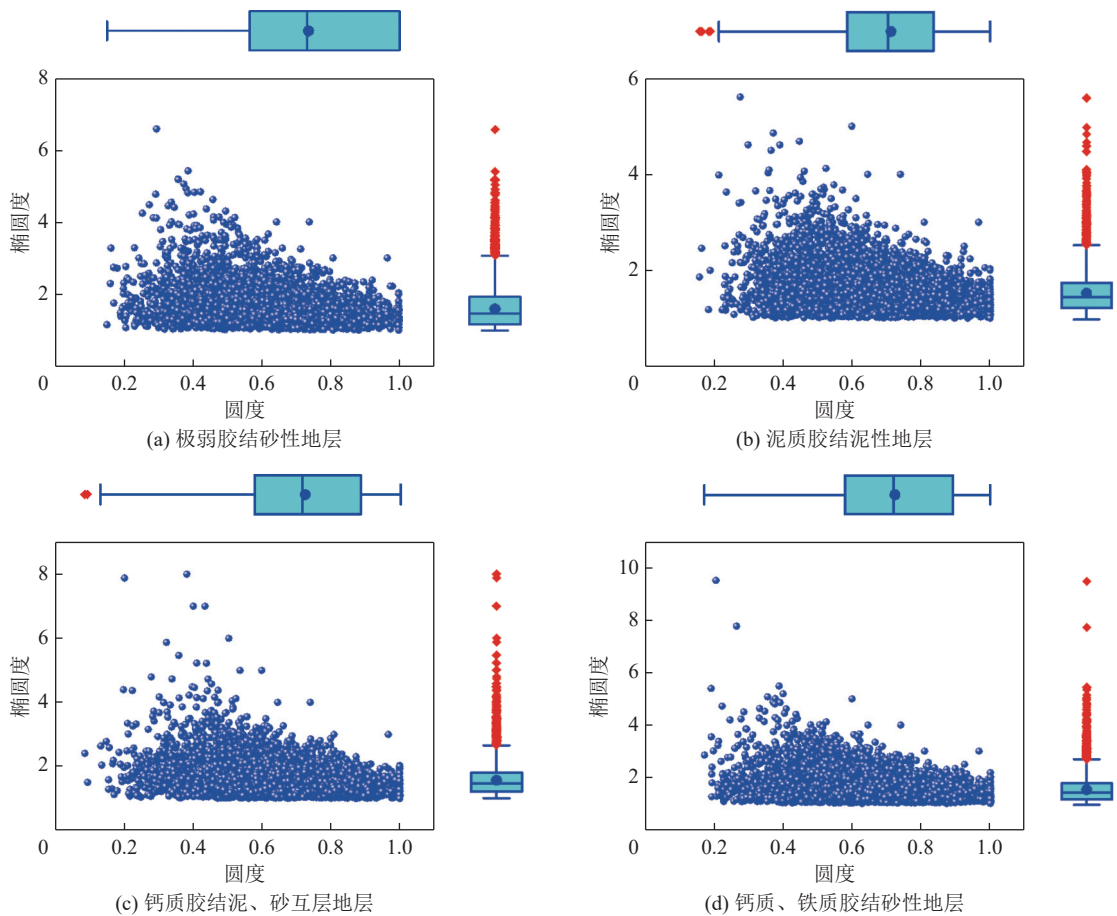


图 7 不同地层岩渣几何形貌统计

Fig.7 Statistical map of the geometric morphology of rock slag in different strata

上下 50% 数量的颗粒圆度分布范围,一定程度上反映了岩渣颗粒形状的复杂程度。因极弱胶结砂性地层

质地疏松、完整性差,因此产生岩渣形状复杂程度更高,其岩渣圆度箱宽大于其余地层;泥质胶结泥性地

层易岩渣颗粒重复破碎, 岩渣圆度箱宽最小; 钙质胶结泥、砂互层地层及钙质、铁质胶结砂性地层介于两者之间。结合图 2 分析, 岩渣颗粒越趋于一致, 单位进尺滚刀磨损越大, 反之, 单位进尺滚刀磨损越小。

根据图 6 颗粒识别方法, 以面积为筛选目标, 0~0.01 cm² 为小颗粒, 0.01~1 cm² 为中颗粒, 1~10 cm² 为大颗粒, 统计岩渣颗粒大小累积分布规律如表 5、图 8 所示。

由表 5 得, 极弱胶结砂性地层中大颗粒分布较多, 为 56.17%, 钻进至泥质胶结泥性地层, 大颗粒岩渣占比显著降低, 中、小颗粒占比显著增大。后经现场调整钻进、排渣参数, 大颗粒岩渣含量略有增大。但部分钻进段, 如 4、6、7 钻进段, 大颗粒岩渣含量依然较少, 仅为 12.66%~18.99%。因此, 相较于砂性地层, 钻

进泥性地层及泥、砂互层地层时, 大颗粒含量较低, 中、小颗粒含量较高。

图 8 为不同地层岩渣长轴、短轴统计图, 图中圆球颜色表示岩渣颗粒数量的相对密度, 绿、蓝、黄色分区表示颗粒的大、中、小分区。相邻颜色分区根据椭圆面积公式绘制的面积分区曲线隔开, 临界面积为分别为 0.01、1 cm², 由于图 8 中横纵坐标以对数形式示出, 因此分区曲线呈现直线。

如图 8 所示, 极弱胶结砂性地层的岩渣颗粒分布较为分散, 且仅在极小颗粒有集中分布; 而泥质胶结泥性地层与钙质胶结泥、砂互层地层在小颗粒区间出现蓝、绿色集中分布带, 进入钙质、铁质胶结砂性地层的中、小颗粒集中分布带增大, 且有向大颗粒发展的趋势。因此小颗粒集中分布带反馈出钻机钻至泥性

表 5 岩渣颗粒大小累积分布规律

Table 5 Accumulative distribution law of rock slag particle size

面积区间/cm ²	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
(0,0.01]	1.04	3.79	2.47	2.67	1.25	1.08	2.25	1.66	2.15	2.28	0.78
(0.01,1]	42.78	91.01	71.15	84.66	74.87	79.93	84.86	69.31	78.25	72.18	60.72
(1,10)	56.17	5.19	26.38	12.66	23.87	18.99	12.89	29.03	19.59	25.54	38.5

注: 钻进段 1 主要岩性为极弱胶结砂性地层; 钻进段 2~4 主要岩性为泥质胶结泥性地层; 钻进段 5~10 为钙质胶结泥、砂互层地层; 钻进段 11 为钙质、铁质胶结砂性地层。

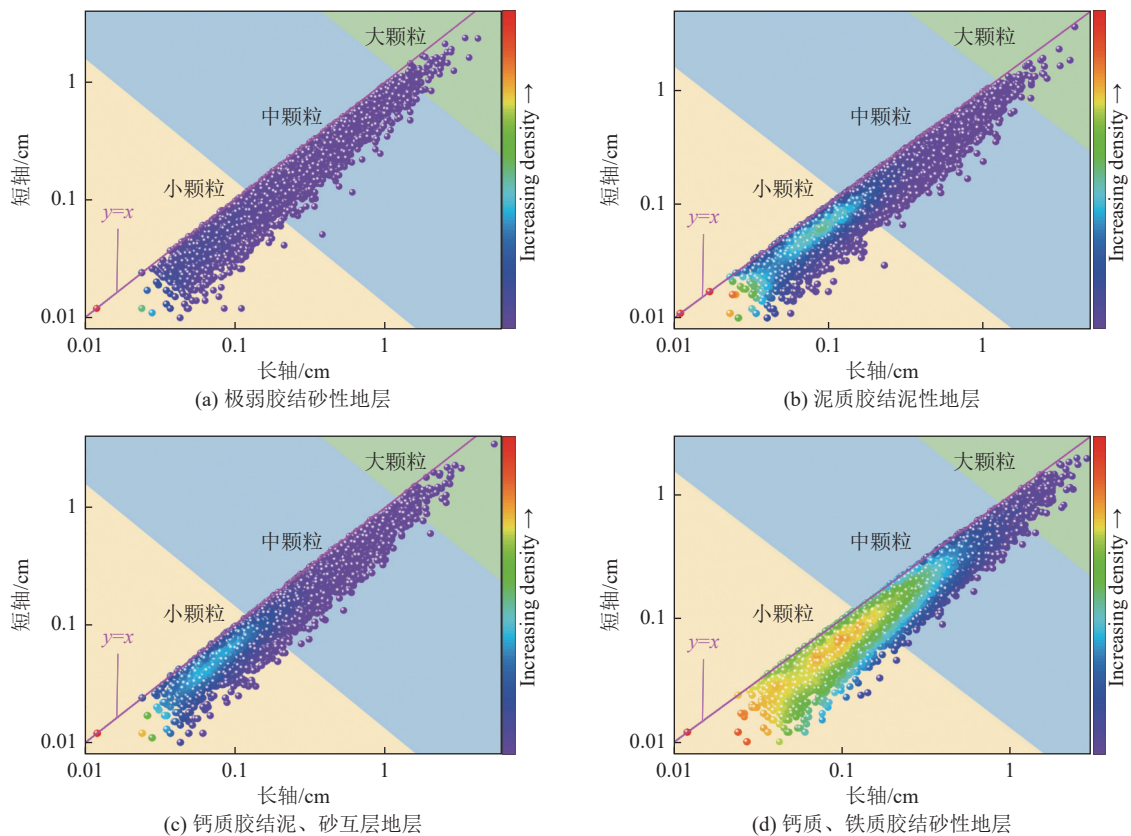


图 8 不同地层岩渣长轴、短轴统计

Fig.8 Statistical figures of long axis and short axis of rock slag in different strata

岩层或泥、砂互层岩层,且与滚刀重复破岩、磨损现象紧密关联。

综合分析岩渣几何形貌统计特征与不同地层单位进尺刀盘滚刀磨损指标(表4)表明:对于白垩系地层,岩渣形状复杂程度较高,大颗粒占比较大,岩渣颗粒几何形貌较为分散,单位进尺刀盘滚刀磨损指标最小;进入侏罗系地层后,岩渣形状复杂程度较低,大颗粒占比减少,岩渣颗粒几何尺寸集中于小颗粒或中、小颗粒,此时单位进尺刀盘滚刀磨损指标显著增大。由此可见,岩渣几何形貌统计特征可间接反映不同地层单位进尺滚刀磨损程度,若要精确量化两者关系需进行进一步数据拟合分析。

3.3 岩渣粒径分布函数拟合分析

为表征岩渣颗粒大小分布规律,以颗粒等效圆直径为筛选对象,将累积特性识别曲线与分布函数拟合,通过 R^2 检测是否满足某种分布模型。为此,构造以自然常数 e 为底数的类指数函数作为分布函数描述岩渣粒径分布。

函数表达式为

$$y_{P_i} = P_1 - k \exp\left(-\frac{x_{D_{e_i}} - D_t}{B_t}\right) \quad (8)$$

式中: y_{P_i} 为累积通过率,%; $x_{D_{e_i}}$ 为颗粒等效圆直径,cm; P_1 为累计通过率最大值, D_t 为颗粒最小粒径,同一组

岩渣识别数据中,二者为定值,为得到更优拟合效果,将二者设置为拟合参数之一。

将式(8)对 $x_{D_{e_i}}$ 求导,易得参数 k/B_t 是累积曲线的斜率的组成项,决定了岩渣累积曲线的趋势,因此定义 k/B_t 为岩渣颗粒的均匀系数(UC),其值越小表明岩渣尺寸分布越均匀。

图9为不同地层产出岩渣粒径分布的类指数拟合函数。经拟合,不同地层条件下,基于图像识别的累积通过率曲线使用数量百分比的相关系数 R^2 为0.978~0.997,与现有粒径分布函数相比拟合精度相当^[21],可较好表征岩渣大小的分布状态。岩渣累积主要拟合参数见表6。根据表6可得,极弱胶结砂性地层岩渣颗粒最不均匀,钙质、铁质胶结砂性地层岩渣颗粒最为均匀,泥质胶结泥性地层及钙质胶结泥、砂互层地层的岩渣颗粒均匀性介于上述两地层间。

4 滚刀磨损指标相关性及其致因分析

4.1 岩石磨蚀性与滚刀磨损相关性

岩石磨蚀性深刻影响岩-机相互作用时滚刀磨损程度,该性质由岩石矿物成分综合硬度与单轴抗压强度共同确定^[29],是岩石矿物成分和强度的综合反映。基于此,SUN等^[30]针对岩石磨蚀性指数提出以下计算方法:

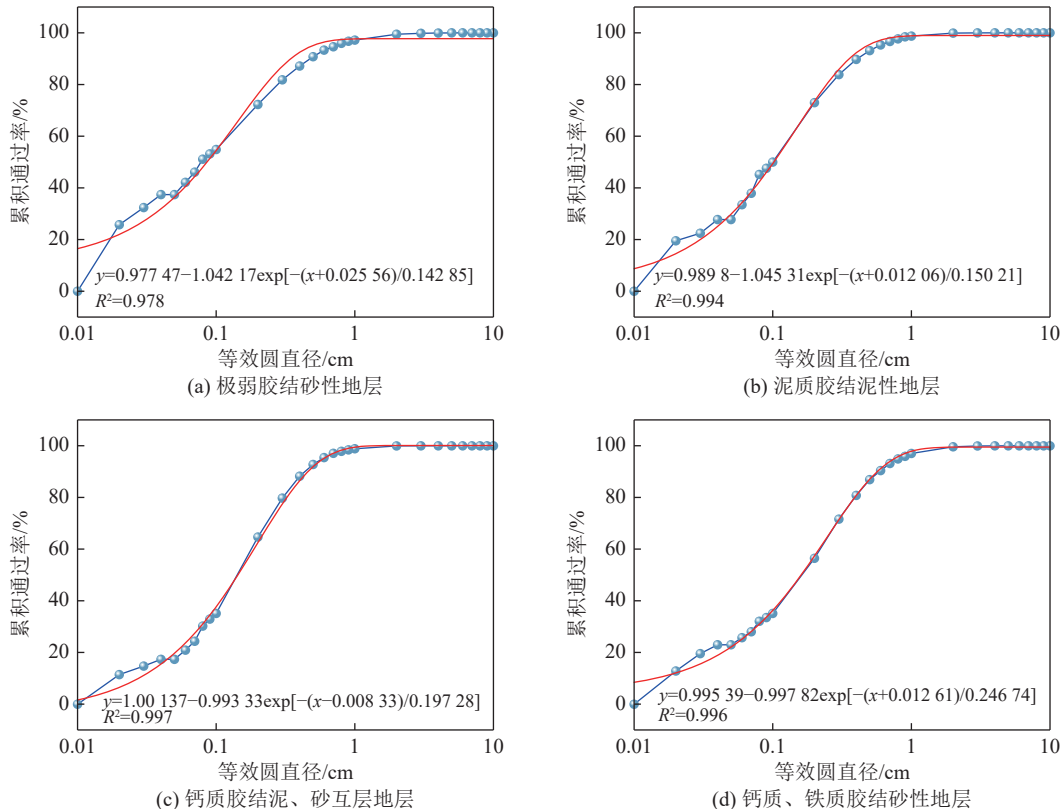


图9 不同地层岩渣累积通过拟合结果

Fig.9 Accumulation of rock slag in different strata passes the fitting results

表 6 岩渣累积主要拟合参数
Table 6 Main fitting parameters of rock slag accumulation

拟合参数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
k	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	0.96	1	1.01	0.99	1.05	1
B_t	0.14	0.18	0.15	0.2	0.21	0.24	0.2	0.18	0.2	0.19	0.25
k/B_t	7.43	5.74	6.93	5.2	4.81	4	5	5.61	4.95	5.53	4

注: 钻进段1主要岩性为极弱胶结砂性地层; 钻进段2~4主要岩性为泥质胶结泥性地层; 钻进段5~10为钙质胶结泥、砂互层地层; 钻进段11为钙质、铁质胶结砂性地层。

1) 通过薄片分析计算等效石英质量分数 EQC 为

$$EQC = \sum_{l=1}^m V_l R_l \quad (9)$$

式中: V_l 为第 l 种矿物在该岩石中的质量分数, %; R_l 为第 l 种矿物的 Rosival 硬度与石英的比值; m 为矿物种类。

2) 结合岩石单轴抗压强度得到岩石磨蚀性指数 RAI 为

$$RAI = EQC \cdot UCS \quad (10)$$

式中: UCS 为岩石单轴抗压强度, MPa。

针对所述钻井法凿井工程, 对前述 11 个钻进段开展钻孔、取心、薄片鉴定、单轴抗压强度等现场、室内试验, 得到不同地层岩石磨蚀性指数见表 7。

根据表 7 得, 采样段 1、5、7、8、10、11 主要赋存砂性岩层, 而 2、3、4、6、9 主要赋存泥性岩层。极弱胶结砂性地层以砂岩为主, 石英质量分数较高。而泥质胶结泥性地层相对复杂, 呈现粉砂质泥岩与泥岩互层, 因此该地层石英质量分数分布较为离散, 为 26.2%~54.6%, 相比而言, 该地层长石质量分数较高, 为 32%~

57.3%。钙质胶结泥、砂互层地层石英质量分数相对集中, 为 26.9%~39.2%, 而长石质量分数相对离散, 为 41.2%~58.6%。对于钙质、铁质胶结砂性地层, 石英质量分数略高于长石质量分数。

石英与长石为产生磨损的主要矿物致因。通过主要矿物及对应洛氏硬度计算得到属钙质胶结泥性地层的采样段 7, 其等效石英质量分数最高, 为 87.52%; 同位于钙质胶结泥、砂互层地层的采样段 8 的等效石英质量分数最低, 仅为 65.54%。结合岩石单轴抗压强度, 极弱胶结砂性地层的岩石磨蚀性指数最低, 仅为 2.06; 泥质胶结泥性地层越深, 岩石磨蚀性指数越大, 最高达 38.37; 钙质胶结泥、砂互层地层上部的岩石磨蚀性指数为 52.38, 中部为 37.22~39.85, 下部为 26.3~26.83, 呈现出一定分层递减现象; 而钙质、铁质胶结砂性地层的岩石磨蚀性指数明显高于其上覆接触地层。

结合表 7 与图 2 分析, 尽管大部分砂性岩层的岩石磨蚀性指数大于泥性岩层, 但多数泥性岩层的单位进尺消耗滚刀数量多于砂性岩层。因此, 对于西部弱胶结含水地层, 滚刀磨损相关指标与岩石磨蚀性指数

表 7 岩石磨蚀性相关指标
Table 7 Related indicators of rock abrasiveness

采样段	钻进段主要岩性	岩层赋存主要岩石命名	主要矿物成分平均质量分数/%		$EQC/\%$	UCS/MPa	RAI
			石英	长石			
1	极弱胶结砂性地层	中、粗砂岩	43.1	39.9	78.22	2.64	2.06
2		粉砂质泥岩	54.6	32	82.76	31.4	25.99
3	泥质胶结泥性地层	泥岩	26.2	46.5	67.13	40.2	26.98
4		粉砂质泥岩	31.3	57.3	81.73	46.95	38.37
5	钙质胶结泥、砂互层地层	细、中粒砂岩	31.2	56.2	80.66	64.93	52.38
6		粉砂质泥岩	26.9	58.6	78.47	47.73	37.22
7		泥岩互层于砂岩	39.2	54.9	87.52	44.7	39.12
8		细、粗粒砂岩	27.7	43	65.54	60.8	39.85
9		粉砂质泥岩	31.5	49.6	75.15	35	26.3
10		粗砂岩	35.1	41.2	71.36	37.6	26.83
11	铁质胶结砂性地层	细、中、粗粒砂岩	41	39.6	75.85	52.3	39.67

并非简单的正相关关系,需结合岩渣形貌统计参数综合考虑。

为量化岩石磨蚀性相关指标与滚刀磨损的关系,采用皮尔逊系数计算各参数与滚刀磨损指标间的相关性。皮尔逊系数计算式如下

$$r = \frac{\sum_{p=1}^q (X_p - \bar{X})(Y_p - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{p=1}^q (X_p - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{p=1}^q (Y_p - \bar{Y})^2}} \quad (11)$$

式中: r 为所研究 2 个变量(岩渣磨蚀性相关参数、滚刀磨损相关指标、岩渣几何特征相关参数中任取 2 个)间皮尔逊系数; X_p 与 Y_p 分别为上述选取 2 个参数的具体数值; \bar{X} 、 \bar{Y} 分别为上述选取 2 个参数的均值。

岩石磨蚀性相关参数见表 7。根据上述绘制岩石磨蚀性相关指标与滚刀磨损相关指标相关性热图如图 10 所示。图中区域 I、III 代表岩石磨蚀性相关参数、滚刀磨损相关指标的自相关性,而区域 II 代表岩石磨蚀性相关参数与滚刀磨损相关指标间相关性。

由图 10 可知,相比于其他岩石磨蚀性相关参数,岩石单轴抗压强度 (UCS)、岩石磨蚀性指数 (RAI) 更适合用于描述滚刀磨损相关指标,尤其针对单位进尺消耗刀数、单位进尺刀盘滚刀磨损指标 (W_f),岩石磨蚀性指数 (RAI) 与之具有更优相关性。综合分析,岩石磨蚀性相关指标与滚刀磨损相关指标的相关性依次为: $RAI > UCS > 石英质量分数 > EQC > 长石质量$

分数。

4.2 岩渣颗粒几何特征与滚刀磨损相关性

以 11 组钻进数据为基础绘制岩渣几何特征与滚刀磨损相关指标相关性热图如图 11 所示,其中区域 I 代表岩渣几何特征相关参数的自相关性,而区域 II 代表岩渣几何特征相关参数与滚刀磨损相关指标间的相关性。

由图 11 可知,岩渣颗粒与单位进尺消耗滚刀数呈一定负相关,岩渣圆度的箱宽与单位进尺消耗滚刀数、 W_f 呈较显著负相关;岩渣颗粒的中、小颗粒与单位进尺消耗刀数、 W_f 呈较为显著正相关,而大颗粒占比与单位进尺消耗刀数、 W_f 呈较为显著负相关,相关性分别为 -0.78、-0.64。综上,岩渣几何特征与滚刀磨损相关指标的相关性依次为:岩渣颗粒大小分布 > 圆度参数 > 均匀系数 > 椭圆度参数,其中岩渣大颗粒含量、圆度箱宽与滚刀磨损相关指标的相关性较高,而对于磨损均匀性指标,均匀系数与其相关性最高。

4.3 滚刀易磨损致因分析

极弱胶结砂性地层主要为沉积、胶结成岩,致使该地层岩石结构疏松多孔且不易造浆,钻进过程井壁易失稳,现场常通过添加纤维素提高钻井液黏度以封堵渗漏^[31]。该地层钻进速度较快,且埋深较浅,破岩后岩渣即被泥浆带出,岩石重复破碎几率较小,因此岩渣圆度分布箱宽较大,大颗粒占比较大,岩渣颗粒较为不均,钻进该类地层钻机破岩效率高,单位进尺滚刀磨损较小。

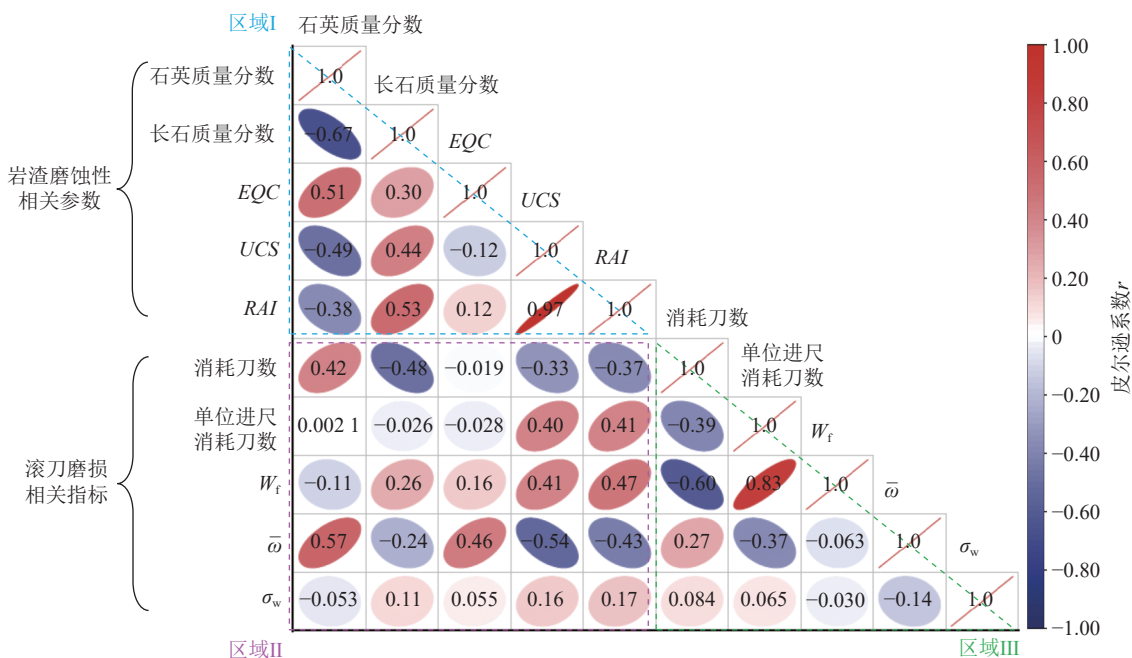


图 10 岩石磨蚀性相关指标与滚刀磨损相关指标相关性 r 热图

Fig. 10 Correlation r heat map of rock abrasiveness related indexes and disc cutter wear related indexes

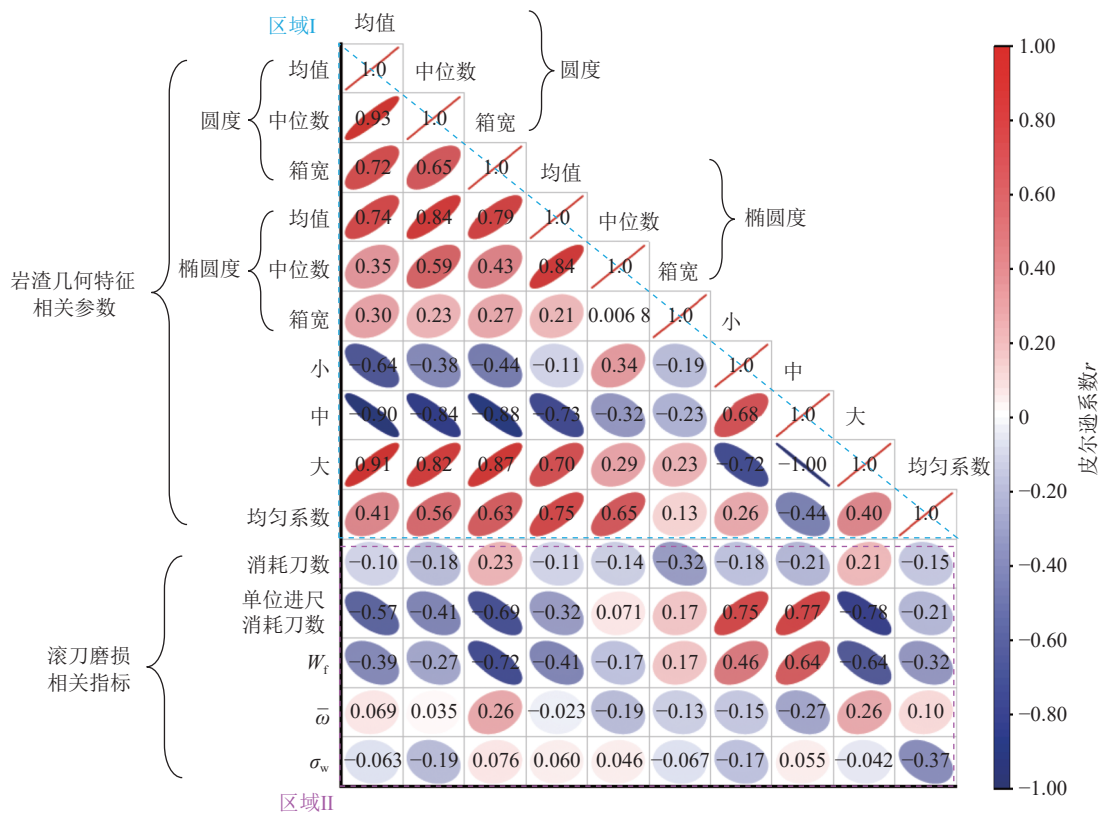


图 11 岩渣几何特征与滚刀磨损相关指标相关性 r 热图

Fig.11 Correlation between the geometric characteristics of rock slag and the related indexes of hob wear r heat map

结合现场调研, 泥性地层及泥、砂互层地层滚刀磨损加剧的原因可归结为岩渣泥化、砂化。

1) 岩渣泥化。侏罗系泥系地层及泥、砂互层地层在成岩过程中经历蚀变作用^[32], 蒙脱石矿物逐渐蚀变为伊利石、高岭石和绿泥石, 均为黏土矿物。钻进过程中黏土矿物易溶于水基膨润土基钻井液, Mg^{2+} 替换 Na^+ 勾连膨润土层状结构形成空间网状结构导致泥浆黏度突变^[33]。如图 12a 所示, 为钻至泥、砂互层地层的泥浆黏度变化规律, 在 120 d 的监测周期中, 泥浆黏度出现 6 次小范围及 2 次大范围突变, 泥浆黏度最高达 91.37 s(漏斗黏度)。黏度突变现象首先影响排渣效率, 高黏泥浆具有更优的携岩能力, 但中心吸渣口和扫掠吸渣口处泥浆的轴向速度显著降低^[6], 导致岩渣排出困难, 并于井底反复研磨, 大颗粒含量减少, 中、小颗粒占比增大, 以至出现图 8b—图 8c 所示中、小颗粒集中分布带, 因此钻进泥系及泥、砂互层地层, 圆度分布箱宽减小、大颗粒占比降低、颗粒变均匀可作为单位进尺滚刀磨损增大的现场依据。其次, 黏度突变易导致井底沉降大量黏泥。由图 12b 可见, 由于钻压反复冲击、压实, 大量泥块附着于滚刀刀齿间沟槽, 泥块由岩渣颗粒、未溶解黏土矿物、黏泥组成, 在齿间结泥与重复破岩颗粒层共同作用下, 滚刀刀齿有效贯入度显著低于目标贯入度, 导致泥系地层钻进效率极低

(0.2 m/h), 单位进尺消耗刀数显著增大(图 2)。

2) 岩渣砂化。岩渣重复破碎易导致泥浆含砂量增大, 如图 12c 所示, 钻至侏罗系泥、砂互层地层, 含砂量屡次超过 10%。根据塑性去除机制的磨粒磨损^[34], 滚刀磨损可视为圆锥体的硬质颗粒(如岩石中的硬质矿物成分、泥浆中砂颗粒)在滚刀上滑动摩擦的结果, 因此泥浆含砂量增大加剧了滚刀与岩石间的相互磨损。其次, 由含砂量增大导致的钻井液密度增大使得钻井液上返速度降低, 滚刀受重复研磨, 磨损加剧(图 12d)。最后, 钻进现场钻压高达 100 t, 每只滚刀轴承平均分摊 3.85 t 钻压, 轴承密封圈在长时间高压转动磨损下, 密封性能逐渐降低, 钻井液裹挟细小砂颗粒易侵入轴承导致滚刀卡钻甚至脱壳。

5 滚刀磨损评估方法

5.1 基于主控参数的滚刀磨损预测模型

基于滚刀磨损指标相关性分析, 选取岩渣圆度分布的箱宽(BW)、大颗粒占比(POP)、均匀系数(UC)、岩石磨蚀性指数(RAI)为自变量, 以单刀平均磨损指标($\bar{\omega}$)、磨损均匀性指标(σ_w)为因变量, 对其进行多元非线性方程回归。根据表 7 所示岩层主要赋存岩石命名, 将 11 个钻进段分为砂性及泥性 2 种岩层。

不同岩层回归结果如下所示:

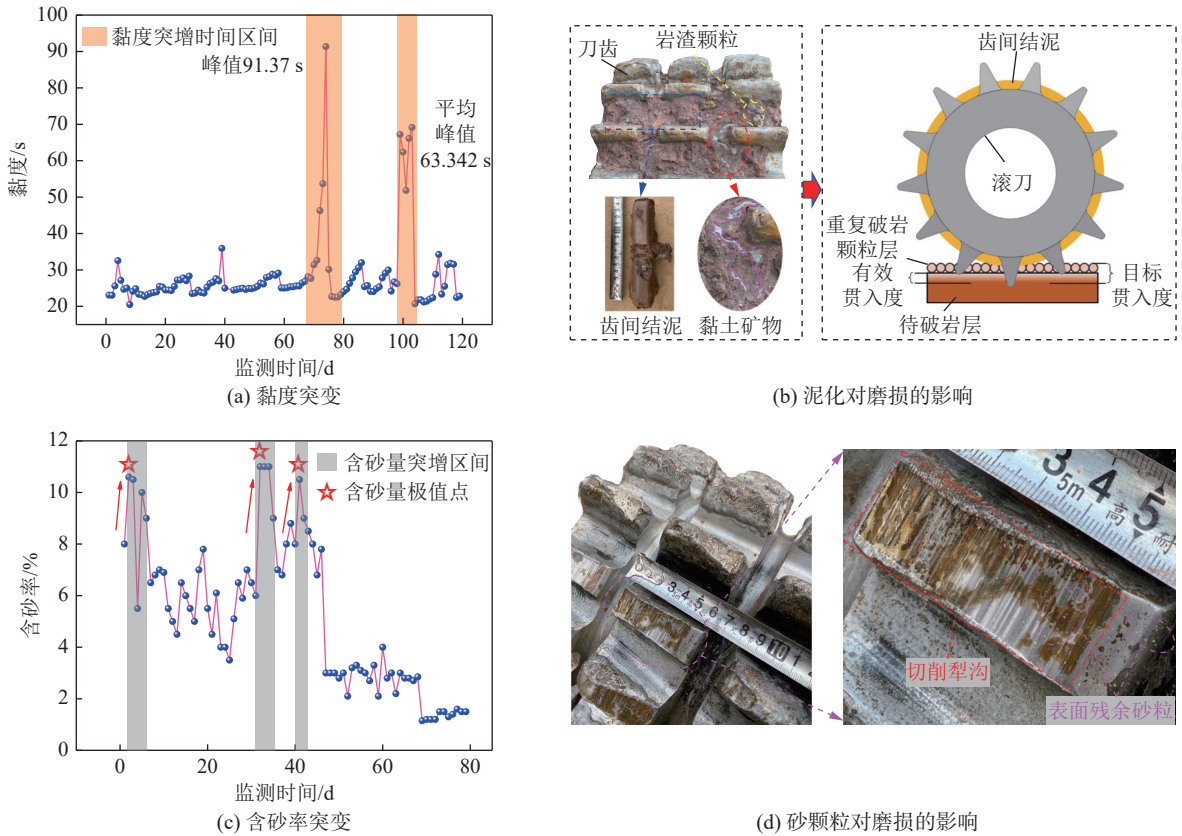


图 12 矿物成分潜在影响

Fig.12 Potential effects of mineral composition

砂性岩层:

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{\omega} &= 3.822 \times RAI^\alpha \\ \alpha &= -0.771 \times BW + 0.004 \times POP - 0.006 \times UC \end{aligned} \right\} (R^2 = 0.861) \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_w &= 0.975 \times RAI^\beta \\ \beta &= 1.884 \times BW - 0.004 \times POP - 0.083 \times UC \end{aligned} \right\} (R^2 = 0.936) \quad (13)$$

泥性岩层:

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{\omega} &= 1.044 \times RAI^\alpha \\ \alpha &= 3.388 \times BW - 0.012 \times POP - 0.080 \times UC \end{aligned} \right\} (R^2 = 0.965) \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_w &= 2.639 \times RAI^\beta \\ \beta &= -1.359 \times BW + 0.004 \times POP + 0.006 \times UC \end{aligned} \right\} (R^2 = 0.918) \quad (15)$$

式中: α 为单刀平均磨损指标 ($\bar{\omega}$) 的拟合指数; β 为磨损均匀性指标 (σ_w) 的拟合指数。

单刀平均磨损指标过大时, 滚刀破岩效率降低, 进而削减钻进速度, 当刀盘上滚刀磨损均匀性较差时, 易引发刀盘偏心力矩过大, 引起钻压、扭矩跳动加剧, 从而加剧滚刀磨损、失效。结合现场换刀统计, 当“单刀平均磨损指标 ($\bar{\omega}$) ≥ 2 或磨损均匀性指标 (σ_w) ≥ 1 ”时, 刀盘滚刀不再适合继续钻进施工。

图 13 为预测模型与现场换刀统计对比。数据点

落至图中灰色区域表明不需要换刀, 黄色区域代表需要更换滚刀。对单刀平均磨损指标, 有 9 个点落至黄色区域, 1 个点落至灰色区域, 仅 1 点落至绿色区域; 而对于磨损均匀性指标, 6 个点位于黄色区域, 有 4 个点位于灰色区域, 1 个点落至绿色区域。结合双指标判断是否换刀表明 11 个钻进段仅有 1 次判断失误, 成功率达 90.9%。

综上, 针对西部钻井法凿井滚刀磨损情况预测提出如下评价方法: 首先, 岩芯测定不同埋深的岩石岩

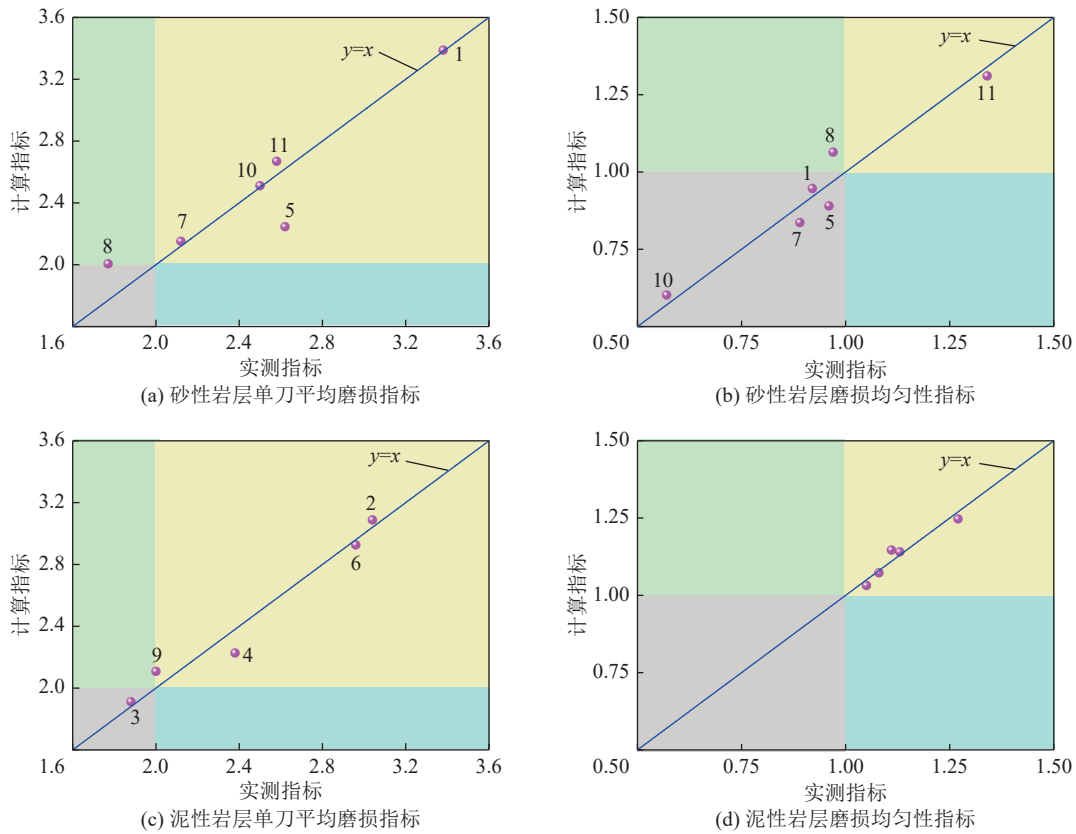


图 13 预测模型计算值与现场调研对比

Fig.13 Calculated value of the prediction model is compared with the field investigation.

性、矿物成分及单轴抗压强度; 钻进期间, 通过打捞并处理岩渣, 结合图像识别方法得到岩渣形状参数; 将参数带入式 (12)—式 (15) 中得到单刀平均磨损指标、磨损均匀性指标, 根据前述评定标准判断是否更换滚刀。

5.2 基于滚刀磨损预测模型的评估方法

基于上述滚刀磨损预测模型, 提出以下滚刀磨损评估方法:

1) 通过地质勘探得到不同埋深岩石矿物质量百分比、单轴抗压强度, 通过式 (10), 计算不同地层岩石的磨蚀性指数。

2) 现场捞取岩渣, 经过清洗、晾干、拍照、图像处理等步骤得到岩渣圆度箱宽、大颗粒占比、均匀系数。

3) 结合前期地质勘探与现场捞渣结果综合判断岩层岩性。若为砂性岩层, 将步骤 1、2 求得参数带入式 (12)、式 (13); 若为泥性岩层, 将步骤 1、2 求得参数带入式 (14)、式 (15)。

4) 判断上述计算结果是否满足刀具更换条件: 单刀平均磨损指标 ($\bar{\omega}$) ≥ 2 或磨损均匀性指标 (σ_w) ≥ 1 。若满足, 则提钻换刀; 不满足, 则继续钻进。

根据滚刀磨损评估方法得到如下所示滚刀磨损评价流程, 如图 14 所示。据此, 现场通过该流程可判

断当前滚刀磨损状态进而判断是否需要提钻换刀。

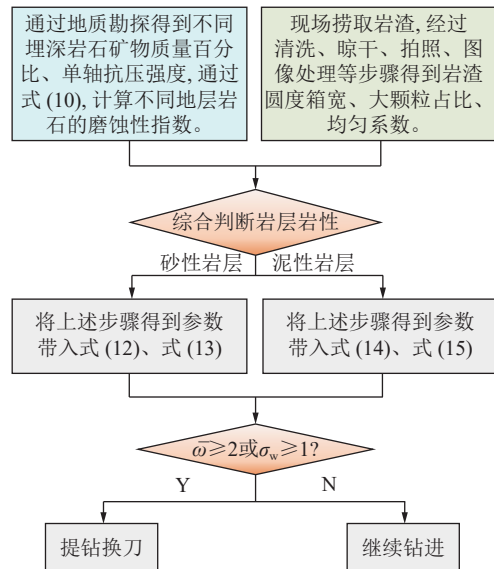


图 14 滚刀磨损评价流程

Fig.14 Flow chart of hob wear evaluation

6 结 论

1) 基于现场滚刀更换记录, 得到不同地层单位进尺消耗滚刀数量依次为: 泥质胶结泥性地层 > 钙质胶结泥、砂互层地层 \approx 钙质、铁质胶结砂性地层 > 极弱

胶结砂性地层,西部钻井法凿井刀盘深磨区易集中于 b、c、d 刀圈,而中心刀及其附近区域多为浅磨区。

2) 基于图像分析得到岩渣几何形貌统计特征可间接反映不同地层单位进尺滚刀磨损程度,泥性岩层或泥、砂互层岩层的岩渣泥化、砂化,是引发滚刀重复破岩、刀具易磨损失效、钻进效率低的主因。

3) 以岩渣圆度分布的箱宽、大颗粒占比、均匀系数、岩石磨蚀性指数为滚刀磨损主要表征参数,得到了适用于泥性、砂性两类岩层的滚刀磨损预测模型。

4) 给出了更换刀具条件:单刀平均磨损指标($\bar{\omega}$) ≥ 2 或磨损均匀性指标(σ_w) ≥ 1 ,提出的滚刀磨损评估方法可为现场提钻换刀提供决策依据。

参考文献(References):

- 程桦,唐彬,唐永志,等.深井巷道全断面硬岩掘进机及其快速施工关键技术[J].煤炭学报,2020,45(9):3314-3324.
CHENG Hua, TANG Bin, TANG Yongzhi, et al. Full face tunnel boring machine for deep-buried roadways and its key rapid excavation technologies[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(9): 3314-3324.
- 范京道,封华,宋朝阳,等.可可盖煤矿全矿井机械破岩智能化建井关键技术与装备[J].煤炭学报,2022,47(1):499-514.
FAN Jingdao, FENG Hua, SONG Zhaoyang, et al. Key technology and equipment of intelligent mine construction of whole mine mechanical rock breaking in Kekegai Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 499-514.
- 程桦,蔡海兵.我国深立井冻结法凿井安全现状与思考[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2013,33(2):1-6.
CHENG Hua, CAI Haibing. Safety situation and thinking about deep shaft construction with freezing method in China[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2013, 33(2): 1-6.
- 姚直书,许永杰,程桦,等.西部钻井法“一钻成井”新型高强复合井壁力学特性[J].煤炭学报,2023,48(12):4365-4379.
YAO Zhishu, XU Yongjie, CHENG Hua, et al. Mechanical properties of a new high-strength composite shaft lining for the “one drilling and forming process” drilling method in Western China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(12): 4365-4379.
- 刘志强,宋朝阳,纪洪广,等.深部矿产资源开采矿井建设模式及其关键技术[J].煤炭学报,2021,46(3):826-845.
LIU Zhiqiang, SONG Zhaoyang, JI Hongguang, et al. Construction mode and key technology of mining shaft engineering for deep mineral resources[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 826-845.
- 程桦,郭龙辉,姚直书,等.钻井法凿井气举反循环多相排渣运移规律及其洗井参数优化试验研究[J].中国矿业大学学报,2024,53(2):224-237.
CHENG Hua, GUO Longhui, YAO Zhishu, et al. Experimental study on transport law of multiphase slag discharge and optimization of well washing parameters in gas lift reverse circulation of drilling shaft sinking[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(2): 224-237.
- 程桦,郭龙辉,姚直书,等.钻井法凿井气-液-固耦合排渣流场及刀盘吸渣口优化[J].煤炭学报,2024,49(1):426-441.
CHENG Hua, GUO Longhui, YAO Zhishu, et al. Research on the gas-liquid-solid coupled slag discharge flow field and optimization of cutterhead slag suction port in shaft drilling[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 426-441.
- 鲍久圣,张可琨,王茂森,等.矿山数字孪生 MiDT:模型架构、关键技术与研究展望[J].绿色矿山,2023,1(1):166-177.
BAO Jiusheng, ZHANG Kekun, WANG Maosen, et al. Mine Digital Twin: Model architecture, key technologies and research prospects [J]. Journal of Green Mine, 2023, 1(1): 166-177.
- FARROKH E, KIM D Y. A discussion on hard rock TBM cutter wear and cutterhead intervention interval length evaluation[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 81: 336-357.
- SHEN S L, ZHANG N, ZHOU A N. Investigation of disc cutter wear during shield tunnelling in weathered granite: a case study[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 140: 105323.
- SUN J D, SHANG Y, WANG K, et al. A new prediction model for disc cutter wear based on Cerchar Abrasivity Index[J]. *Wear*, 2023, 526: 204927.
- ZHANG Z H, AQEEL M, LI C, et al. Theoretical prediction of wear of disc cutters in tunnel boring machine and its application[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2019, 11(1): 111-120.
- ZHANG X P, JI P Q, ZHANG Q, et al. Study of contact pressure distribution between cutter and rock surface using the discrete element method[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 146: 104875.
- 张晋勋,李博,江玉生,等.基于 EDEM 的砂卵石地层盾构刀具磨损特征研究[J].岩土工程学报,2024,46(10):2212-2220.
ZHANG Jinxun, LI Bo, JIANG Yusheng, et al. Wear characteristics of shield cutters in sand-pebble strata based on EDEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(10): 2212-2220.
- 夏明铤.长大煤矿斜井 TBM 刀具磨损影响因素与规律研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(S1):96-99.
XIA (Ming)(Tan) Xian. Study on the influence factor and rule of tbm tool wear in large coal mine slope tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(S1): 96-99.
- 龚秋明,余祺锐,丁宇.大理岩磨擦试验及隧道掘进机刀具磨损分析:锦屏二级水电站引水隧洞工程[J].北京工业大学学报,2012,38(8):1196-1201.
GONG Qiuming, SHE Qirui, DING Yu. Abrasivity tests of marbles and cutter wear analysis of TBM: headrace tunnels of Jinping II hydropower station[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(8): 1196-1201.
- 龚秋明,许弘毅,李立民.岩石磨蚀性指数分级讨论[J].地下空间与工程学报,2021,17(3):748-758.
GONG Qiuming, XU Hongyi, LI Limin. Discussions on the rock abrasivity index classification[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(3): 748-758.
- 杜立杰,纪珊珊,左立富,等.巨斑状花岗岩条件下 TBM 大直径

- 盘形滚刀磨损规律[J]. 煤炭学报, 2015, 40(12): 2974–2978.
- DU Lijie, JI Shanshan, ZUO Lifu, et al. Wear and consumption of large diameter disc cutters for hard rock TBM under giant porphyritic granite[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(12): 2974–2978.
- [19] 孙振川, 杨延栋, 陈馈, 等. 引汉济渭岭南 TBM 工程二长花岗岩地层滚刀磨损研究[J]. 隧道建设(中英文), 2017, 37(9): 1167–1172.
- SUN Zhenchuan, YANG Yandong, CHEN Kui, et al. Study of wear of disc cutter boring in monzonitic granite strata of Lingnan TBM section of Hanjiang River-Weihe River water conveyance project[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(9): 1167–1172.
- [20] 孙金山, 卢文波, 苏利军, 等. 基于 TBM 掘进参数和渣料特征的岩体质量指标辨识[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1847–1854.
- SUN Jinshan, LU Wenbo, SU Lijun, et al. Rock mass rating identification based on TBM performance parameters and muck characteristics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(12): 1847–1854.
- [21] 闫长斌, 樊明辉, 陈馈, 等. 基于岩渣粒径分布规律的 TBM 刀具消耗分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(12): 4216–4227.
- YAN Changbin, FAN Minghui, CHEN Kui, et al. Analysis on TBM cutter consumption based on the particle size distribution of rock debris[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(12): 4216–4227.
- [22] 闫长斌, 姜晓迪, 刘章恒, 等. 基于岩渣粒径分布规律的 TBM 破岩效率分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(3): 466–474.
- YAN Changbin, JIANG Xiaodi, LIU Zhangheng, et al. Rock-breaking efficiency of TBM based on particle-size distribution of rock detritus[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(3): 466–474.
- [23] 周小雄, 肖禹航, 龚秋明, 等. 基于图像分析的 TBM 掘进参数与岩渣特征关系研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(4): 1142–1153.
- ZHOU Xiaoxiong, XIAO Yuhang, GONG Qiuming, et al. Relationships between tunneling parameters of TBM and rock chip characteristics based on image analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(4): 1142–1153.
- [24] 付孟雄, 刘少伟, 贾后省, 等. 煤矿巷道底板锚固孔钻渣生成机理及尺寸特征分析[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(2): 228–238.
- FU Mengxiong, LIU Shaowei, JIA Housheng, et al. Generation mechanism and size characteristics of the rock fragments during borehole drilling in coal mine roadway floor[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(2): 228–238.
- [25] SU W L, LI X G, JIN D L, et al. Analysis and prediction of TBM disc cutter wear when tunneling in hard rock strata: a case study of a metro tunnel excavation in Shenzhen, China[J]. Wear, 2020, 446: 203190.
- [26] 张晓平, 唐少辉, 吴坚, 等. 苏通 GIL 综合管廊工程泥水盾构穿越致密复合砂层磨蚀性预测分析[J]. 工程地质学报, 2017, 25(5): 1364–1373.
- ZHANG Xiaoping, TANG Shaohui, WU Jian, et al. Prediction and analysis of abrasiveness of dense sandy stratum by slurry shield at sutong gil utility tunnel engineering[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(5): 1364–1373.
- [27] WANG L H, KANG Y L, ZHAO X J, et al. Disc cutter wear prediction for a hard rock TBM cutterhead based on energy analysis[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50: 324–333.
- [28] WANG L H, LI H P, ZHAO X J, et al. Development of a prediction model for the wear evolution of disc cutters on rock TBM cutterhead[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 67: 147–157.
- [29] 任自强, 许琦, 贾建红, 等. 引江补汉工程部分岩石磨蚀性与等效石英含量关系[J]. 水利水电快报, 2024, 45(10): 95–99.
- REN Ziqiang, XU Qi, JIA Jianhong, et al. Relationship between abrasiveness and equivalent quartz percentage of some rocks from Water Diversions Project from Three Gorges Reservoir to Hanjiang River[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2024, 45(10): 95–99.
- [30] SUN Z C, ZHAO H L, HONG K R, et al. A practical TBM cutter wear prediction model for disc cutter life and rock wear ability[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 85: 92–99.
- [31] 王媛, 宋朝阳. 西部厚基岩地层竖井钻机机械破岩影响因素分析[J]. 建井技术, 2023, 44(4): 74–80.
- WANG Yuan, SONG Zhaoyang. Analysis of mechanical rock-breaking factors of blind shaft sinking machine in the thick bedrock formations in western regions[J]. Mine Construction Technology, 2023, 44(4): 74–80.
- [32] 纪洪广, 蒋华, 宋朝阳, 等. 弱胶结砂岩遇水软化过程微观结构演化及断口形貌分析[J]. 煤炭学报, 2018, 43(4): 993–999.
- JI Hongguang, JIANG Hua, SONG Zhaoyang, et al. Analysis on the microstructure evolution and fracture morphology during the softening process of weakly cemented sandstone[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4): 993–999.
- [33] 周文龙, 荣传新, 程桦, 等. 白垩侏罗系地层钻井法凿井钻井液黏度突变致因分析[J]. 建井技术, 2024, 45(1): 56–64.
- ZHOU Wenlong, RONG Chuanxin, CHENG Hua, et al. Analysis of sudden change of viscosity of drilling fluid by drilling method in Cretaceous Jurassic strata[J]. Mine Construction Technology, 2024, 45(1): 56–64.
- [34] 柳培蕾, 杨世强, 白乐乐, 等. 基于磨料磨损的盘形滚刀刀圈磨损模型[J]. 中国机械工程, 2019, 30(15): 1782–1789.
- LIU Peilei, YANG Shiqiang, BAI Lele, et al. Wear model of disc hob cutter rings based on abrasive wear[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(15): 1782–1789.