

泥质软岩锚固孔钻渣泥化黏附特征及影响因素

付孟雄^{1,2,3}, 黄帅帅², 刘少伟^{2,3}, 贺德印^{2,3}, 贾后省^{2,3}, 姚丙傲⁴, 席晓龙⁴

(1. 新疆工程学院 新疆煤炭资源绿色开采教育部重点实验, 新疆 乌鲁木齐 830023; 2. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 3. 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454000; 4. 河南省新郑煤电有限责任公司, 河南 新郑 451100)

摘 要: 锚固孔钻进是煤矿巷道围岩锚固控制的必经环节, 成孔质量直接影响锚固施工效率以及锚固剂与围岩界面的锚固黏结作用。泥质软岩锚固孔钻进时存在抱钻、卡钻现象, 钻渣遇水泥化难以排出是制约其快速高质量成孔的瓶颈。因此, 利用理论分析及实验室试验方法, 对含高岭石泥质软岩锚固孔钻渣泥化黏附机理及影响因素展开了研究。结果表明: 高岭石晶层表面电负性较强的氧原子会吸附水分子中的氢原子形成氢键, 并不断吸水扩层, 最终形成多层水分子的“水膜”。钻渣表面高岭石黏粒对水的吸附作用, 使钻渣同样被“水膜”包覆, 同时随着非泥质矿物的不断溶解以及钻渣颗粒的吸水膨胀, 钻渣颗粒间距缩小, 极易被彼此“水膜”间范德华力捕获, 使彼此聚集成黏聚体。钻渣自身“水膜”与钻头表面产生的静电力以及钻头表面“水膜”形成整体结构的界面张力作用是造成钻渣黏附的主要原因, 其中静电力在钻渣泥化黏附过程中发挥了重要作用。钻渣泥化程度随钻渣粒径、液渣比、钻具搅拌转速及时长、 K^+ 离子浓度的增加而降低, 酸性溶液也会对钻渣泥化产生抑制作用。试验范围内各因素对钻渣泥化抑制的显著程度按照由大到小的顺序依次为: 液渣比、钻渣粒径、搅拌时长、搅拌转速、pH 及 K^+ 离子浓度。提出了钻渣泥化抑制对策, 调整钻头结构, 提高进液压力, 增加钻具成孔转速, 调整钻进液组分, 可削弱泥质钻渣与水的泥化反应程度, 降低其对钻具的黏附作用。研究成果可为提高泥质软岩锚固孔成孔质量、成孔效率及锚固支护效果提供一定理论参考。

关键词: 泥质软岩; 锚固孔钻进; 泥化钻渣; 钻渣黏附; 钻渣泥化影响因素

中图分类号: TD353 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)02-0862-15

Characteristics of argillization and adhesion and influencing factors of drilling cuttings in borehole of roadway in soft argillaceous surrounding rock

FU Mengxiong^{1,2,3}, HUANG Shuaishuai², LIU Shaowei^{2,3}, HE Deyin^{2,3}, JIA Houxing^{2,3},
YAO Bingao⁴, XI Xiaolong⁴

(1. Key Laboratory of Xinjiang Coal Resources Green Mining, Ministry of Education, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, China; 2. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 3. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean High Efficiency Utilization, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 4. Xinzheng Coal Electricity, Zhengzhou Coal Industry Group, Xinzheng 451100, China)

Abstract: Borehole drilling is an essential step for the anchoring control of roadway surrounding rock of coal mines. The

收稿日期: 2024-06-18 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 李雅楠 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0688

基金项目: 新疆工程学院新疆煤炭资源绿色开采教育部重点实验室开放基金资助项目 (KLXGY-KB2410); 国家自然科学基金资助项目 (52104083); 河南省科技攻关资助项目 (242102321105)

作者简介: 付孟雄 (1989—), 男, 河北保定人, 副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: fusuport@126.com

通讯作者: 刘少伟 (1977—), 男, 辽宁锦州人, 教授, 博士生导师。Email: lswxl@126.com

引用格式: 付孟雄, 黄帅帅, 刘少伟, 等. 泥质软岩锚固孔钻渣泥化黏附特征及影响因素[J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 862-876.

FU Mengxiong, HUANG Shuaishuai, LIU Shaowei, et al. Characteristics of argillization and adhesion and influencing factors of drilling cuttings in borehole of roadway in soft argillaceous surrounding rock[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2): 862-876.



移动阅读

efficiency of bolt installation and bonding effect between resin-rock interface are closely related to the quality of borehole formation. When borehole drilling in argillaceous surrounding rock, the phenomenon of drill sticking and drill jamming exists, and it is difficult to discharge the drilling cuttings when occurring argillization, which is the bottleneck restricting rapid and high-quality formation of borehole. Therefore, by using theoretical analysis and laboratory test methods, this paper studied the mechanism of argillization and adhesion and influencing factors of the drilling cuttings in the borehole of soft argillaceous surrounding rock containing kaolinite. The results show that the oxygen atoms with strong electronegativity on the surface of kaolinite crystal layer adsorb hydrogen atoms in water molecules to form hydrogen bonds, and constantly absorb water molecules to expand the water layer, and finally form a “water film” of multi-layer water molecules. The adsorption of water by kaolinite clay on the surface of drilling cuttings makes the drilling cuttings also coated by “water film”. At the same time, with the continuous dissolution of non-argillaceous minerals and the swelling of drilling cuttings particles, the spacing between drilling cuttings particles is reduced, which is easily captured by van der Waals forces between each other’s water films, so that they aggregate to form aggregates. The main reason for the adhesion of drilling cuttings is that the drilling cuttings is subjected to the electrostatic force generated by its own “water film” and the surface of the drill bit and the interfacial tension of the overall structure formed by the “water film” on the surface of the drill bit. The electrostatic force plays an important role in the process of argillization and adhesion of drilling cuttings. The degree of argillization of drilling cuttings decreases with the increase of particle size of drilling cuttings, solid-liquid ratio, stirring speed and time of drilling tool, and K ion concentration. Acidic solution will also inhibit the mudding of drilling cuttings. The significant degree of each factor on the inhibition of drilling cuttings argillization in the test range is in the order: solid-liquid ratio, particle size of drilling cuttings, stirring time, stirring speed, pH value and K ion concentration. The countermeasures to suppress the argillization of drilling cuttings are put forward. such as adjusting the structure of the drill bit, increasing the liquid inlet pressure, increasing the rotation speed of the drilling tool, and adjusting the composition of drilling fluid can weaken the degree of argillization of argillaceous drilling cuttings and water, and reduce the adhesion to the drilling tool. The research results can provide a theoretical reference for improving the quality, efficiency and anchoring support effect of the boreholes in soft argillaceous surrounding rock.

Key words: soft argillaceous surrounding rock; borehole drilling; argillization of drilling cuttings; adhesion of drilling cuttings; influencing factors of argillization of drilling cuttings

0 引言

我国每年新掘巷道长度约 12 000 km, 其中近 80% 属于回采巷道, 其稳定性对于保证煤炭资源顺利开采至关重要^[1-3]。自 20 世纪 90 年代起, 锚杆支护技术以其显著的技术及经济优越性在我国巷道围岩控制中得到广泛应用^[4-7], 经过近 30 a 的发展, 取得了众多卓越的成果^[8-15]。

泥质软岩广泛存在于我国西部矿区侏罗纪、北部矿区白垩纪及中东部矿区石炭二叠纪地层中, 泥质软岩作为一种典型的工程围岩, 其主要成分为伊利石、高岭石及蒙脱石等黏土矿物, 具有强度低、易风化、稳定性差、水-岩相互作用明显及巷道围岩控制难度大等特点^[16-21]。近年来, 有关学者在泥质软岩巷道(围岩多为泥岩、黏土岩、泥页岩等)稳定控制方面取得了重要进展, 形成了以锚杆(索)支护技术为主, 裂隙区域注浆、被动型钢支架及分次支护技术为辅的泥质软岩控制技术^[22-26]。在巷道锚固施工过程中, 钻打锚

固孔是进行锚杆(索)支护的必要步骤, 锚固孔孔径一般为 28~32 mm。部分泥质围岩在成孔时, 通过调整钻进速度、水压等可以实现“湿钻”成孔, 但对于泥质软岩而言, 在“湿钻”时由于钻渣泥化现象显著, 孔深较大时, 泥化后的钻渣难以排出易黏附于钻头切削部位。这不仅大大降低成孔效率, 也会降低成孔质量(如偏离轨迹或孔径不合格)影响锚杆安装和锚固效果, 甚至会出现抱钻、卡钻现象, 严重时还可能导致钻具弯折或断裂, 威胁作业人员生命安全。

目前国内外针对泥质软岩锚固孔钻渣泥化黏附机理研究较少, 主要侧重于钻渣颗粒与钻具的作用, 对钻渣吸水泥化后液渣混合物的产生及其对钻具的吸附过程讨论较少。文献[27]通过实验室观察发现钻头泥包的主要类型有: 钻头中心泥包、排屑槽最窄点处泥包、排屑槽泥包以及整体泥包。泥包发生的顺序为: 排屑槽最窄点处泥包、排屑槽泥包、钻头整体泥包。文献[28]建立了钻头-岩石作用理论模型, 考虑了围压产生的附加摩擦力和围压条件下的岩屑强度, 分析了

泥页岩切屑生成、运移、聚集,最终造成钻头泥包的过程。文献[29]通过室内试验研究发现,泥质岩屑的黏附性能与岩屑颗粒尺寸、黏附界面压力、钻井液类型有关。文献[30]认为石油钻井过程中,泥质岩屑黏附于钻头上是泥质钻渣与钻具表面间的范德华力、静电引力、毛细力、粘滞阻力和楔开压力共同作用的结果。文献[31]认为岩屑遇水泥化后的黏附作用与钻头的机械“镶嵌”作用是 PDC 取心钻头被泥化岩屑黏附的主要原因,黏附情况与钻头结构尺寸、井底水力条件、钻头材料等因素密切关系。文献[32]通过优化 PDC 取芯钻头结构,增加钻井液在切削刀刃前和水槽内的流速,达到削弱岩屑泥化对钻头黏附的目的。文献[33-36]研制了各类有机、无机钻井液添加剂,对岩屑的水化膨胀、分散及黏附过程起到了较高的抑制作用。

上述关于泥化钻渣黏附过程、钻头结构优化及钻井液改性等方面的研究,主要集中于油气钻井领域,在成孔尺寸、钻具结构、钻进液组分等方面与锚固孔成孔具有显著差别。因此,笔者采用理论分析及实验室试验方法,对泥质软岩锚固孔的钻进过程、钻渣泥化黏附机理及影响因素进行了研究,研究成果可为削弱锚固孔泥化钻渣黏附程度、提高泥质软岩锚固孔成孔效率提供一定的理论参考。

1 泥质软岩锚固孔钻进试验

1.1 泥质钻渣尺寸分布特征

于内蒙古海拉尔矿区敏东一矿 16-3 号煤层顶板提取泥岩样本,在实验室利用矿用 PDC 两翼式钻头($\phi 28$ mm)进行锚固孔“干钻”试验。为保证钻进过程中泥岩的完整性,将岩块用混凝土包裹。利用全自动伺服钻孔机连接钻杆、钻头进行成孔,钻进深度 20 mm。收集钻进过程中产生的钻渣并将其筛分为 > 2.5 mm、 $1.5 \sim 2.5$ mm、 $0.5 \sim 1.5$ mm、 < 0.5 mm 4 个粒径组,随后对各组钻渣进行称重。本试验共进行 5 组平行试验,钻孔编号为 1~5,不同粒径分组钻渣质量占比见表 1,试验过程如图 1 所示。

由表 1 可知,钻进试验所产生的钻渣在不同粒径分组下的质量占比存在明显差异。粒径 > 2.5 mm 的泥质钻渣平均质量分数为 2.95%;粒径在 $1.5 \sim 2.5$ mm 和 $0.5 \sim 1.5$ mm 范围内的泥质钻渣平均质量分数分别为 2.36%、9.44%;粒径 < 0.5 mm 的泥质钻渣平均质量分数为 85.25%,由此可见,泥质岩体在钻进过程中产生的钻渣在各粒径分组下质量占比与非泥质硬岩有显著区别[37-39],产出小粒径钻渣占比显著增多,大粒径钻渣占比降低。

表 1 不同粒径钻渣质量分数

Table 1 Mass proportion of the cuttings with different particle sizes

钻孔编号	粒径分组/mm			
	> 2.5	$1.5 \sim 2.5$	$0.5 \sim 1.5$	< 0.5
1	2.54	1.65	8.33	87.48
2	1.95	2.28	10.49	85.28
3	2.65	1.34	6.35	89.66
4	3.42	3.03	11.39	82.17
5	4.21	3.51	10.64	81.64
平均值	2.95	2.36	9.44	85.25

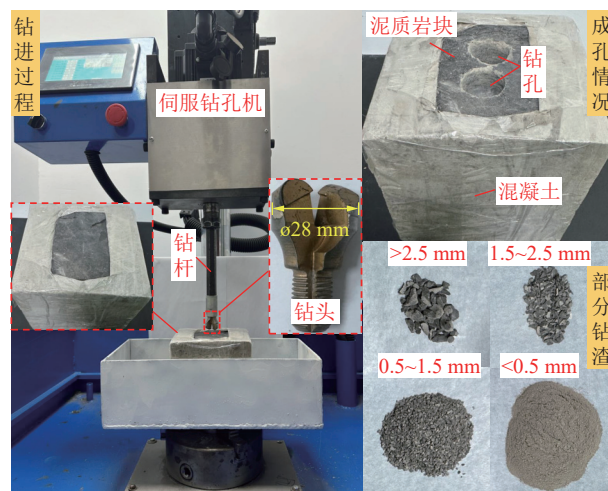


图 1 钻进试验过程

Fig.1 Process of the drilling test

1.2 钻渣泥化黏附特征分析

将非泥质岩块与泥质岩块分别进行“干钻”试验,收集钻进过程中产生的非泥质钻渣与泥质钻渣。称取两种钻渣各 30 g 分别装入亚克力管内,各加入 10 g 去离子水,使液渣比为 1 : 3,称量装有液渣混合物的亚克力管质量 m 。利用伺服钻孔机连接钻杆、钻头对管内的液渣混合物进行搅拌,钻头转速为 300 r/min,搅拌时长为 1 min,试验过程如图 2 所示。

待搅拌结束后,发现 2 种条件下均有一部分液渣混合物黏附于钻头上。取下亚克力管称量装有液渣混合物的亚克力管质量 m_1 , m 与 m_1 的差值即为黏附于钻头上液渣混合物的质量,据此得到液渣混合物在钻具上的黏附率(黏附于钻具上的质量与液渣混合物初始质量的比值),如图 3 所示。

如图 3 所示,非泥质钻渣的液渣混合物,黏附于钻具上的质量为 3.22 g,黏附率为 8.05%,钻具上黏附有少量不同粒径的钻渣,钻头轮廓清晰可见,钻头中心通水孔附近无堵塞。泥质钻渣的液渣混合物,黏附于钻具上的质量为 9.17 g,为前者的 2.85 倍,黏附率

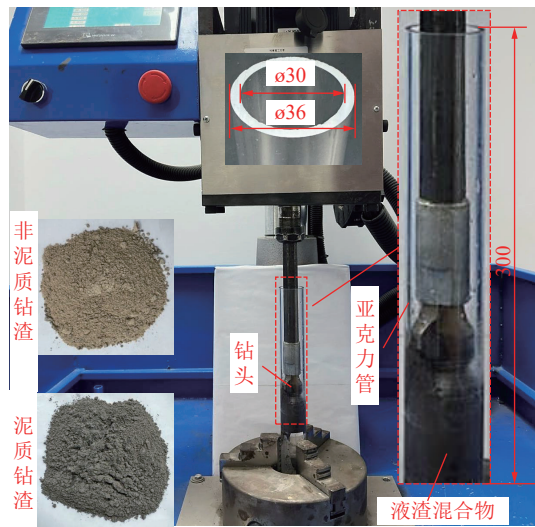


图2 泥质钻渣泥化黏附试验

Fig.2 Test of argillization and adhesion argillaceous drilling cuttings

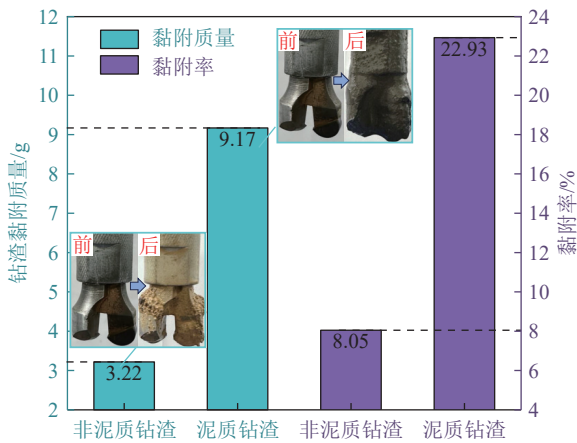


图3 非泥质钻渣与泥质钻渣黏附情况对比

Fig.3 Comparison of adhesion between non-argillaceous and argillaceous drilling cuttings

为22.93%, 钻具上黏附大量钻渣, 钻头几乎被钻渣完全包裹, 中心通水孔处完全堵塞。试验结果表明, 泥质钻渣随钻头旋转可在极短时间内完成泥化反应, 钻渣形态会显著变化, 并大量附着于钻具之上, 水-岩相互作用过程是影响钻渣泥化的关键, 且与其内部矿物组分有着密切关联。因此, 采用X射线衍射仪对所取岩样进行X射线衍射试验, 分析所含泥质矿物成分。共测试4组样本, 衍射角度范围为 $5^{\circ}\sim 70^{\circ}$, 衍射速度为 $5^{\circ}/\text{min}$, 试验过程如图4所示。

对泥岩样品的衍射图谱采用Jade6.5进行矿物组分分析, 所得X射线衍射图谱如图5所示, 主要矿物组分见表2。

由图5及表2可知, 所取泥岩样本主要由石英(48.1%)、白云母(12.7%)、高岭石(34.6%)及绿泥石(4.7%)构成, 绿泥石与水作用后可转化为高岭石, 因

此样本中以高岭石为主的黏土矿物占比达39.3%。



图4 泥质钻渣X射线衍射试验

Fig.4 X-ray diffraction test of argillaceous drilling cuttings

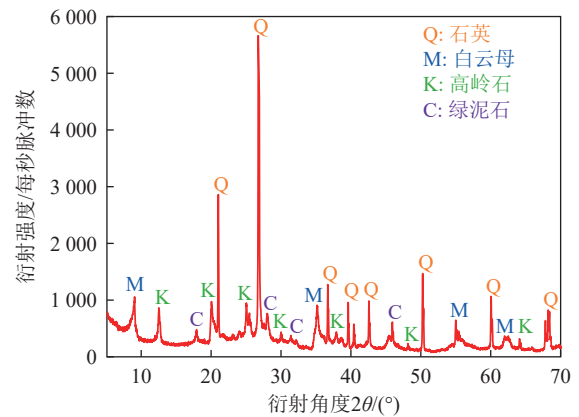


图5 泥岩样本X射线衍射图谱

Fig.5 X-ray diffraction patterns of mudstone

表2 泥岩样本矿物平均组分

Table 2 Mineral composition of mudstone

矿物成分	石英	白云母	高岭石	绿泥石
占比/%	48.1	12.7	34.6	4.7

2 泥质钻渣泥化黏附机理分析

2.1 泥质钻渣吸水泥化过程

高岭石黏粒与其他矿物胶结形成了黏土胶结体, 黏土胶结体是泥质岩体主要组成部分^[18]。高岭石黏粒由若干层硅氧四面体和铝氧八面体构成的晶层结构组成, 晶层表面氢原子易被与其紧邻晶层表面电负性较强的氧原子吸引形成氢键, 连接力较强, 分子或离子难以进入晶层之间, 高岭石黏粒微观结构如图6所示。由于晶层间氢键的存在, 使高岭石泥质钻渣与水的反应主要在高岭石晶层表面进行。

利用FEI Quanta 250 FEG型场发射扫描电子显微镜观测微观状态下泥岩钻渣与水作用前后形貌变化, 于粒径 $< 0.5\text{ mm}$ 的钻渣中随机选取2组相同质量钻渣样品, 其中一组作为对照组, 未进行任何处理; 另一组则作为试验组, 进行了加水处理。待试验组中的

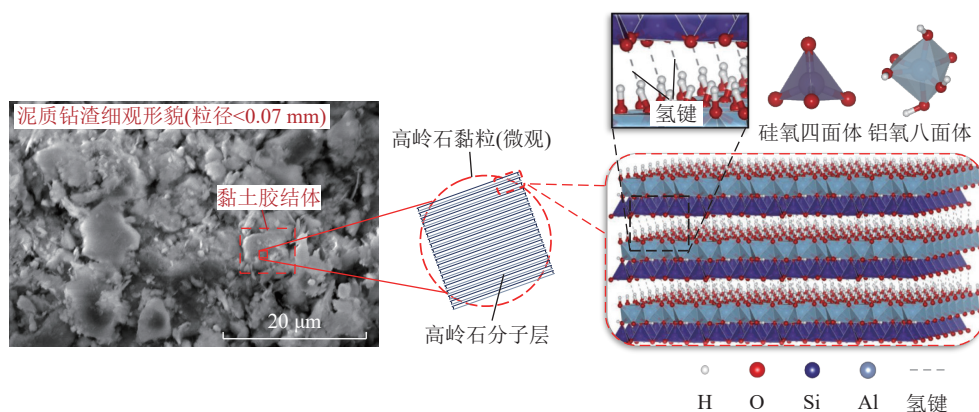


图 6 高岭石黏粒的微观结构

Fig.6 Microstructure of kaolinite clays

钻渣与水充分作用后,将其充分干燥。然后对 2 组样品分别进行了喷金处理。钻渣对水的吸附过程及微观形貌观测结果如图 7 所示。

图 7 中,在微观尺度层面,由于高岭石形成过程中发生同晶置换,使晶层表面带永久负电荷^[21]。当高岭石黏粒遇水时,水分子的偶极性使氢原子易与高岭石晶层表面电负性较强的氧原子结合形成氢键,同时,吸附在晶层表面的水分子之间也会通过氢键连接,该过程即为水分子的吸附过程。当第 1 层水分子被高岭石黏粒吸附后,其外侧氧原子呈负电性,继续与第 2 层水分子的氢原子以氢键形式结合,最终形成多层水分子“水膜”。高岭石黏粒不断吸水扩层,使钻渣颗粒体积不断膨胀,同时伴随钻渣内部非泥质矿物的溶解,高岭石黏粒间距变小,并通过外侧“水膜”相互吸附,构成“水桥”,使得多个高岭石黏粒能够在遇水后

聚集,形成更大的团聚体。

在细观尺度层面,由于钻渣表面高岭石黏粒对水的吸附作用,使钻渣同样被“水膜”包覆,同时随着非泥质矿物的不断溶解以及钻渣颗粒的吸水膨胀,钻渣颗粒间距缩小,极易被彼此“水膜”间范德华力捕获,使彼此聚集,最终形成宏观尺寸下可目视的黏聚体。如图 7 中泥质钻渣扫描电镜图像所示,钻渣未吸水前,在放大 2 000 倍条件下,可见单个钻渣颗粒,颗粒平均间距约为 28 μm,在钻渣吸水后,整个镜头下未见钻渣颗粒间存在的明显间隙,颗粒发生显著聚集,间距变小甚至消失。

2.2 泥化钻渣黏附机理分析

由于被“水膜”包覆的钻渣颗粒(高岭石及其他矿物)受钻头旋转及钻进液冲刷影响,不断与钻头表面接触,钻头在成孔过程中,会与岩石、钻进液产生强烈

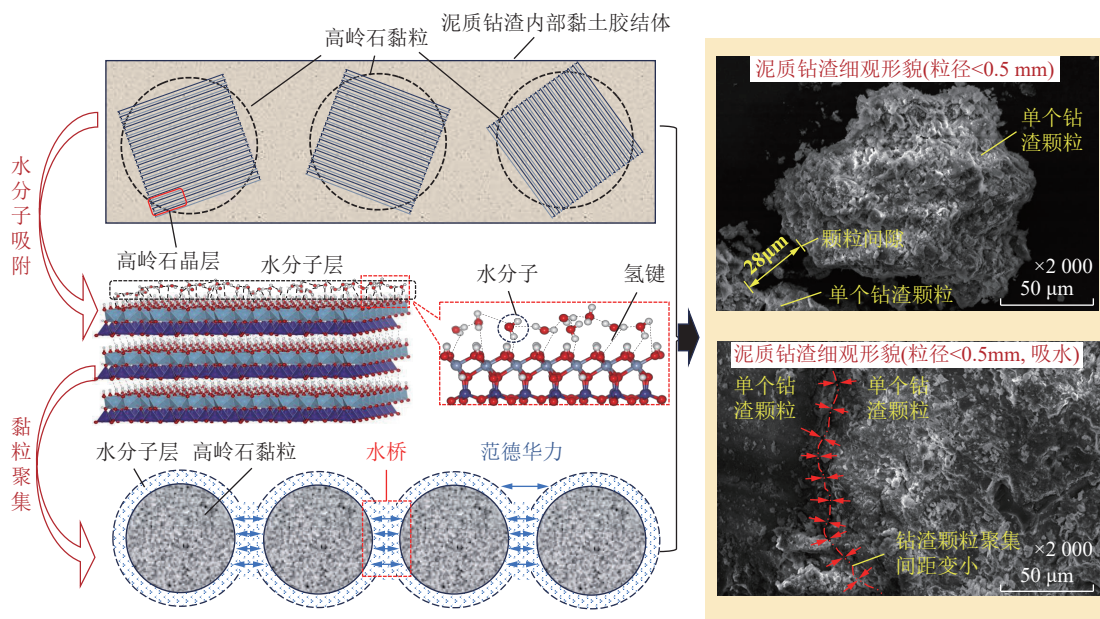


图 7 含高岭石泥质钻渣吸水泥化过程

Fig.7 Process of argillization of drilling cuttings containing kaolinite

摩擦作用,使钻头表面电子发生转移,导致钻头表面带正电荷,经 Zeta 电位测试可知钻渣颗粒“水膜”即液渣混合物呈负电性(详见 3.4 节),两者会发生静电力作用(图 8)。 $F_e^{[30]}$ 可表示为

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q_c Q_d}{d^2} \quad (1)$$

式中: Q_c 为钻渣颗粒“水膜”所带电量, C; Q_d 为钻头“水膜”所带电量, C; ϵ 为空间介电常数, $\epsilon = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C/(V} \cdot \text{m)}$; d 为钻渣颗粒“水膜”与钻头表面各自带电中心的距离, m。

钻头受钻进液润湿影响,其表面同样被“水膜”包裹,被“水膜”包裹的钻渣颗粒与钻头表面的“水膜”接触后,两者会形成一整体,在钻头-水接触界面处的“水膜”会搭接成弯月面,则在钻头表面、水分子层、空气三相界面交界点 O 处,可列出界面张力极限平衡方程

$$\sigma_{S-G} - \sigma_{S-L} = \sigma_{L-G} \cos(\theta) \quad (2)$$

式中: σ_{S-G} 为钻头-空气界面张力, N/m; σ_{S-L} 为钻头-水界面张力, N/m; σ_{L-G} 为水-空气界面张力, N/m; θ 为钻头-水界面的浸润角。

由于钻头表面被水持续浸润,因此有

$$\sigma_{S-G} - \sigma_{S-L} > 0 \quad (3)$$

式(1)表明,包裹钻渣颗粒的“水膜”与钻头表面“水膜”形成的整体受弯月面处界面张力作用,被不断沿钻头表面方向“拉扯”,使钻渣颗粒被界面张力“束缚”于钻头表面(图 8)。但仅依靠界面张力显然无法抵抗钻具高速旋转产生的离心力,静电力与界面张力的共同作用导致了泥化钻渣黏附于钻具表面,且静电力对液渣混合物的黏附发挥了重要作用。

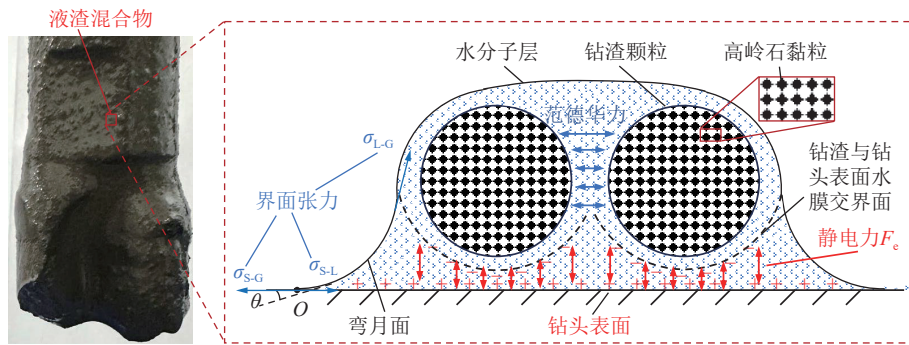


图 8 静电力及界面张力作用下泥化钻渣黏附钻具

Fig.8 Argillization and adhesion of drilling cuttings under the action of electrostatic force and interfacial tension

综上所述,钻头在破岩过程中,含高岭石类泥质钻渣吸水泥化后受自身“水膜”与钻头表面产生的静电力以及与钻头表面“水膜”形成整体结构的界面张力的共同作用造成了钻渣黏附,静电力在黏附过程中发挥了重要作用。因此,削弱含高岭石钻渣对水的吸附作用,抑制钻渣泥化进程,可降低钻渣对钻具的黏附程度。

3 钻渣泥化影响因素分析

为探究含高岭石泥质钻渣泥化抑制因素,通过实验室试验方法分析了钻渣粒径、液渣比、搅拌时长及转速、无机盐阳离子及 pH 对钻渣泥化的影响。

3.1 钻渣粒径

分别取等质量 $>2.5 \text{ mm}$ 、 $1.5 \sim 2.5 \text{ mm}$ 、 $0.5 \sim 1.5 \text{ mm}$ 与 $<0.5 \text{ mm}$ 粒径分组下的泥质钻渣 8 g 装入量筒内,加入等质量的去离子水并搅拌 2 min,静置 24 h,所得不同粒径组下液渣混合物的体积变化及吸水量如图 9 所示。不同粒径钻渣对水的吸附程度存在明显差异,

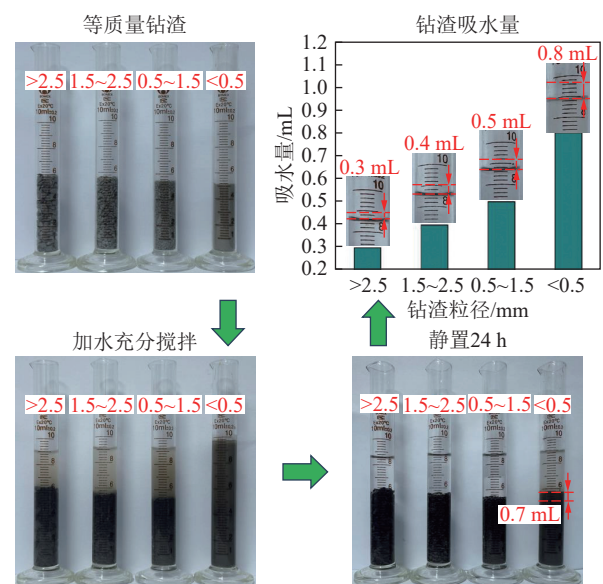


图 9 不同粒径泥质钻渣吸水量试验

Fig.9 Water absorption test of different particle sizes of argillaceous drilling cuttings

吸水量随着钻渣粒径的增加逐渐降低。粒径 < 0.5 mm 的钻渣吸水量最大, 达到了 0.8 mL, 同时由于钻渣颗粒吸水膨胀, 使钻渣体积膨胀 0.7 mL, 膨胀率达到了 14%, 其余粒径钻渣体积膨胀并不明显。

同上述取等质量各粒径分组泥质钻渣放入样品盒内, 加入等量的去离子水, 待其充分作用及干燥后分别观察其形貌变化如图 10 所示。图 10 中, 粒径 > 2.5 mm、 $1.5 \sim 2.5$ mm、 $0.5 \sim 1.5$ mm 的钻渣与水作用后, 钻渣与水界限明显, 未见明显结合, 水基本沉于钻渣底部, 粒径 < 0.5 mm 钻渣与水作用后, 两者发生显著结合, “锁水”效果明显。待充分干燥后, 粒径 > 2.5 mm、 $1.5 \sim 2.5$ mm、 $0.5 \sim 1.5$ mm 的钻渣基本无明显变化, 粒径 < 0.5 mm 钻渣凝结为整体块状结构, 结构较水化前致密, 通过扫描电镜发现粒径 < 0.5 mm 钻渣水化前后, 微观形貌具有显著差别, 钻渣水化前基本是以单个钻渣颗粒为主, 颗粒间隙较大, 与水作用后, 电镜未发现明显单个钻渣颗粒, 只可见一整体结构。

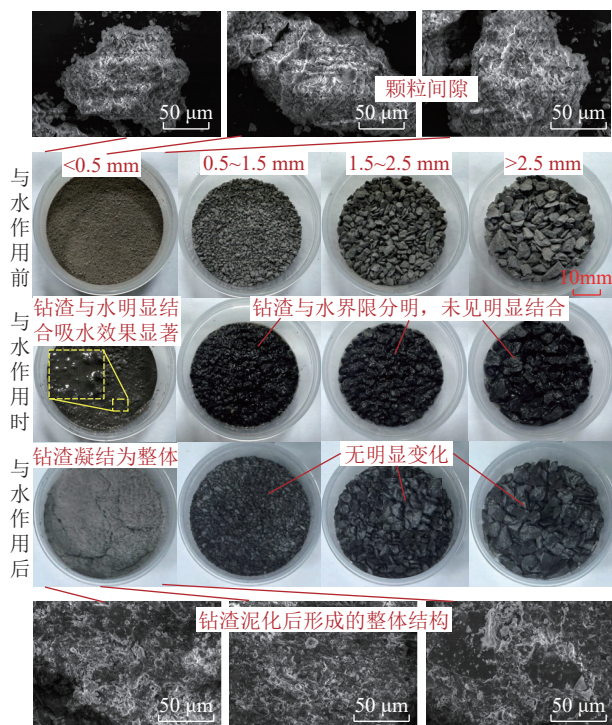


图 10 不同粒径钻渣与水作用形貌观测

Fig.10 Observation of interaction morphology of drilling cuttings with different particle sizes and water

根据试验结论, 可推测钻渣泥化程度与粒径紧密相关, 粒径越小, 钻渣颗粒比表面积越大, 钻渣表面吸附水分子中的氢原子越多, 形成的“水膜”的负电性越强, 同时增加了包裹钻渣的水膜与钻具接触面积, 使泥化钻渣黏附钻具的静电力作用和界面张力的束缚作用更显著, 泥化反应越充分。钻渣粒径小于 0.5 mm 时, 此现象更加明显, 粒径大于 0.5 mm 时, 泥化现象

并不明显, 由此可知, 0.5 mm 为本次试验中钻渣泥化反应的粒径临界值。

3.2 液渣比

黏度是衡量泥化钻渣黏附性及流动性的重要指标, 称取等量粒径 < 0.5 mm 泥质钻渣, 制备液渣比为 1:1、1:1.5、1:2、1:2.5、1:3、1:3.5、1:4 的液渣混合物, 利用搅拌机搅拌 2 min, 转速 300 r/min, 将液渣混合物进行黏度测试, 测试过程如图 11 所示。

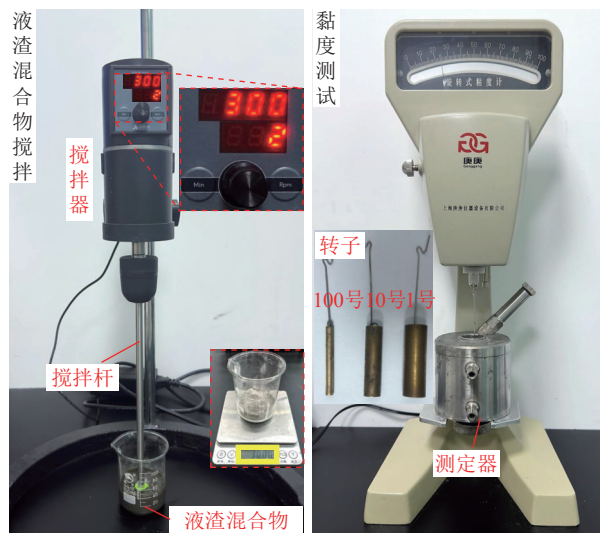


图 11 不同液渣比条件下液渣混合物黏度测定

Fig.11 Viscosity determination of mixture under different solid-liquid ratio

不同液渣比条件下液渣混合物黏度随反应时间变化曲线如图 12 所示。

如图 12 所示, 粒径 < 0.5 mm 泥质钻渣与水反应过程可大致分为 2 个阶段, 即黏度增加阶段与黏度稳定阶段。在黏度增加阶段, 液渣混合物黏度增加较快, 在测试的液渣比范围内, 黏度值随液渣比的降低而增加, 即适当增加钻渣数量可增加液渣混合物黏度。进入黏度稳定阶段后, 各液渣比液渣混合物黏度基本趋于稳定, 液渣混合物黏度稳定所需时间基本随液渣比降低而减少。因此, 可通过增加钻进过程中钻进液出水量, 提高液渣比, 降低液渣混合物黏度, 削弱泥化钻渣对钻具的黏附。

3.3 搅拌时长及转速

称取 30 g 粒径 < 0.5 mm 的泥质钻渣, 制备液渣比为 1:1、1:2、1:2.5、1:3 的液渣混合物, 搅拌转速为 300 r/min, 测定搅拌时长为 1、2、3、5、7、10 min 时的黏度值, 得到不同液渣比下黏度随搅拌时长变化曲线, 如图 13 所示。

如图 13 所示, 不同液渣比下液渣混合物黏度随搅拌时长均呈现先上升后下降的趋势, 由此说明在初

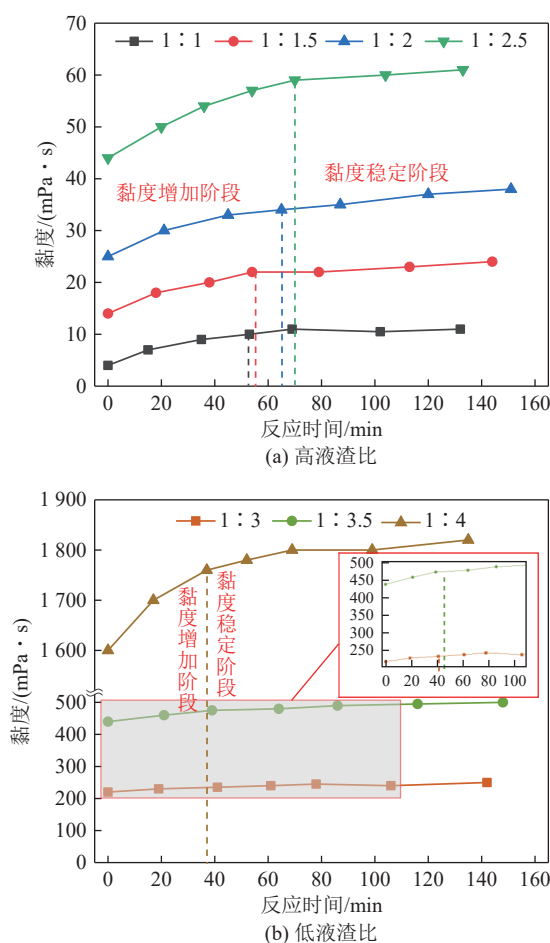


图 12 不同液渣比液渣混合物黏度随时间变化曲线

Fig.12 Curves of viscosity varies with time under different solid-liquid ratio

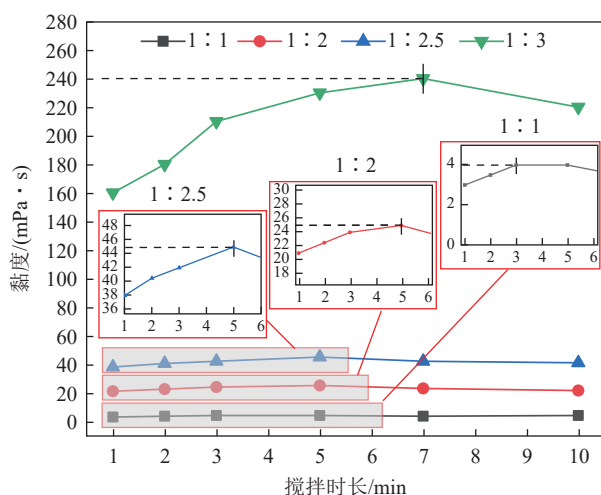


图 13 不同液渣比条件下黏度随搅拌时长变化曲线

Fig.13 Curve of viscosity varies with mixing time under different solid-liquid ratio

始搅拌过程中, 泥质钻渣颗粒在“水膜”引力及搅拌剪切力作用下不断接触、聚集使黏度逐渐增加。待泥化反应趋于饱和后, 随搅拌持续进行, 已聚集钻渣颗粒受搅拌影响, 部分颗粒间聚集结构被破坏, 导致颗粒

间相互作用力逐渐减弱, 使黏度降低。此外, 不同液渣比的液渣混合物黏度最大值产生时机有所不同, 基本上随液渣比的增加而增加。

搅拌时间为 3 min, 搅拌转速为 100、200、300、400、500、600 r/min 的黏度如图 14 所示。

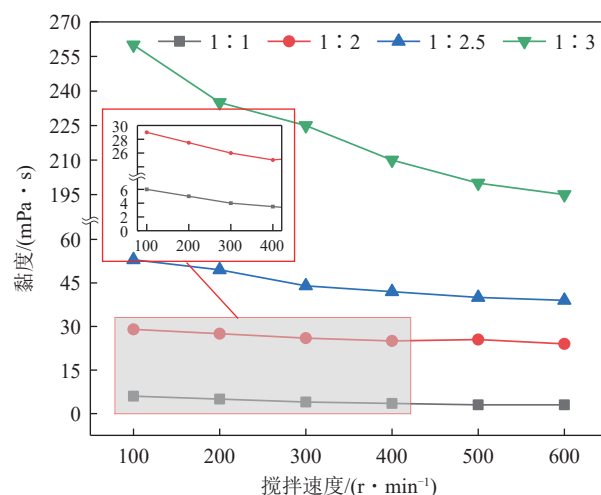


图 14 液渣混合物黏度随搅拌转速变化

Fig.14 Curve of viscosity varies with mixing speed under different solid-liquid ratio

由图 14 可知, 液渣混合物黏度随搅拌转速的增加均呈逐渐降低趋势。这是由于搅拌转速增加会产生较强的剪切力, 使钻渣颗粒间的撞击力增强, 导致原本聚集的颗粒分散, 在剪切力和撞击力作用下, 颗粒间相互作用力减小, 黏度降低。由此可知增加搅拌转速对提高钻渣颗粒聚集程度的“正作用”小于其破坏颗粒聚集的“负作用”, 使颗粒更加均匀地分散在液体中。

3.4 无机盐阳离子

含高岭石类泥质钻渣对水的吸附主要通过晶层表面负电荷对水中氢原子的吸引实现的, 因此, 可考虑通过无机盐阳离子将泥质钻渣表面负电荷中和, 从而降低其对水的吸附作用。制备 KCl、NaCl、CaCl₂、FeCl₂、ZnCl₂ 溶液, 每种溶液阳离子浓度分别为 0.1、0.3、0.5、0.7 mol/L, 液渣比为 10:1, 在 300 r/min 转速下搅拌 2 min。采用 Zeta 电位检测仪检测各类盐阳离子与泥质钻渣混合溶液的 Zeta 电位变化。Zeta 电位绝对值越高, 溶液中颗粒越分散, 体系越稳定, Zeta 电位绝对值越低, 溶液中颗粒越倾向于凝结或聚集。溶液配制所需药品及 Zeta 电位测试过程如图 15 所示。

不同无机盐溶液、不同浓度下液渣混合物 Zeta 电位随时间变化曲线如图 16 所示。各无机盐阳离子溶液的液渣混合物 Zeta 电位值均随浓度增大而增加。

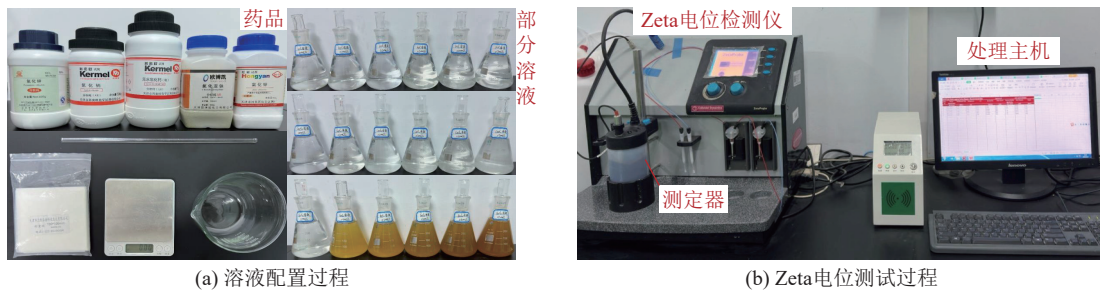


图 15 溶液配制所需药品及 Zeta 电位测试过程

Fig.15 Drugs required for solution preparation and Zeta potential test

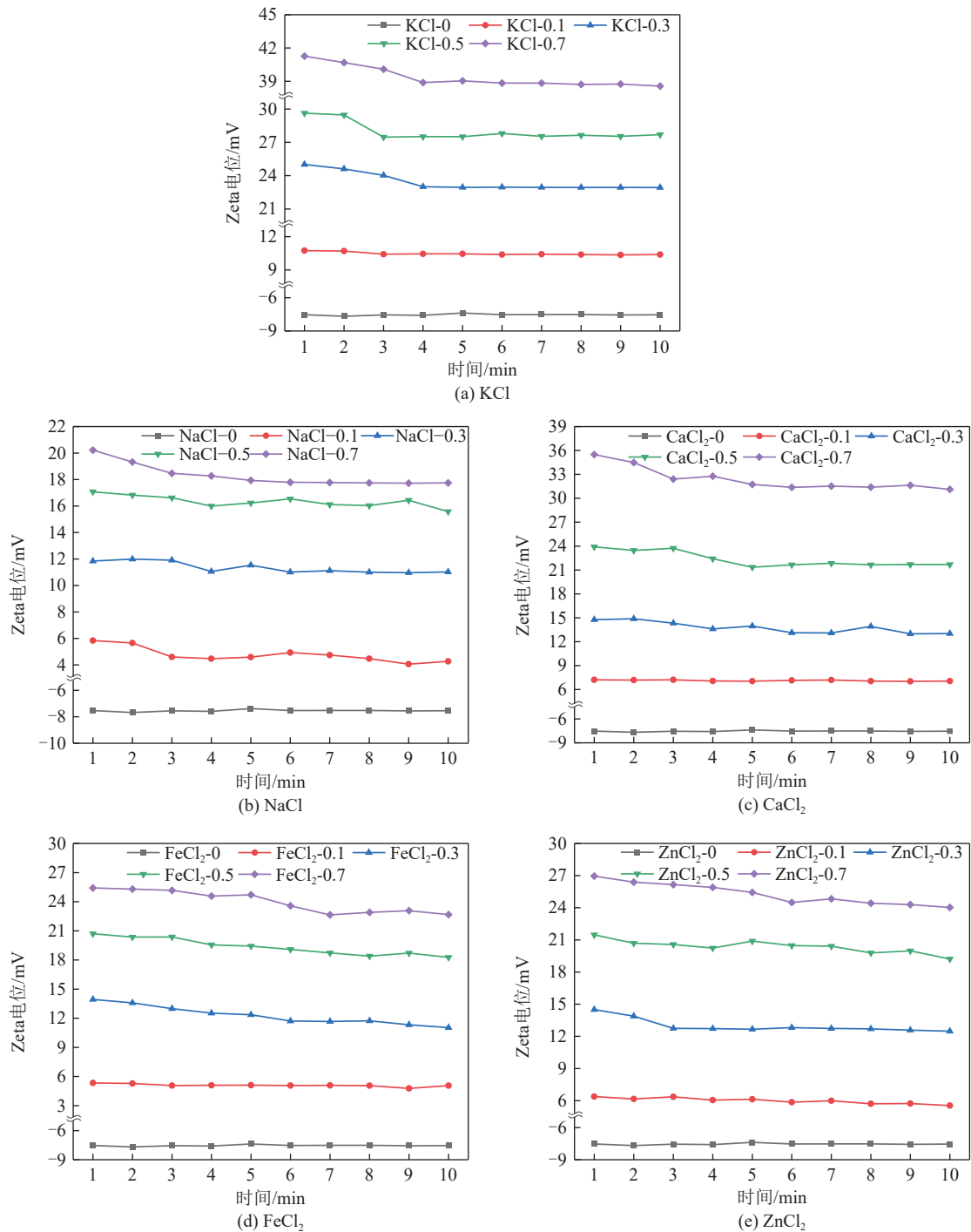


图 16 不同无机盐溶液、不同浓度下的液渣混合物 Zeta 电位随时间变化曲线

Fig.16 Zeta potential curves of varies with time under different inorganic salt solutions and different concentrations

如 KCl 溶液浓度为 0(纯去离子水) 时, 液渣混合物的 Zeta 电位值在 -7.5 mV 左右, 溶液浓度由 0.1 mol/L 升至 0.7 mol/L 时, Zeta 电位值也由 $10 \sim 11$ mV 升至 $38 \sim 42$ mV, 颗粒稳定性逐渐增加。由此可知, 无机盐阳离子可通过电荷中和作用降低黏土颗粒的表面负电荷, 减少了黏土颗粒对水分子的吸附, 使黏土颗粒表面水化程度下降。不同浓度下各类无机盐阳离子溶液 Zeta 电位的平均值如图 17 所示。

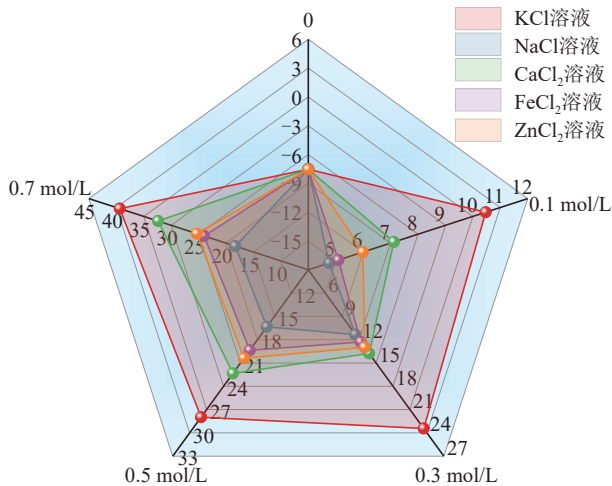


图 17 不同浓度各类无机盐阳离子液渣混合物 Zeta 电位平均值

Fig.17 Mean Zeta potential of mixture with different concentrations of various inorganic salt cation solution

如图 17 所示, 各无机盐阳离子与混合物溶液 Zeta 电位平均值按照由大到小顺序依次为: K^+ 、 Ca^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Na^+ , 由此可知, K^+ 相比其他无机盐阳离子 (Ca^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Na^+) 在抑制钻渣泥化方面展示出更为显著的效果。虽然 Ca^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Fe^{2+} 具有较高的电荷量, 但对钻渣泥化的抑制作用并非只取决于电荷的大小, 水化能力的强弱和离子半径的大小同样对离子与泥质钻渣的相互作用产生重要影响^[18,40]。较小的离子半径和较强的水合能力会使 K^+ 在水中的移动性更高, 更容易接触并作用于钻渣表面的负电荷, 从而可更有效地抑制钻渣泥化。

3.5 pH

为研究弱酸性及弱碱性溶液对泥质钻渣泥化程度的影响, 通过在盐酸 (质量分数 $36\% \sim 38\%$) 及氢氧化钠固体中加入不同量的去离子水 ($pH=7$), 配制成 $pH=5$ 、 6 、 8 、 9 的弱酸性及弱碱性溶液, 分别与泥质钻渣按 $10:1$ 进行混合, 搅拌转速及时长同上, 测得泥质钻渣在不同 pH 溶液中 Zeta 电位随时间变化如图 18 所示。

如图 18 所示, $pH=7$ 的液渣混合物的 Zeta 电位值

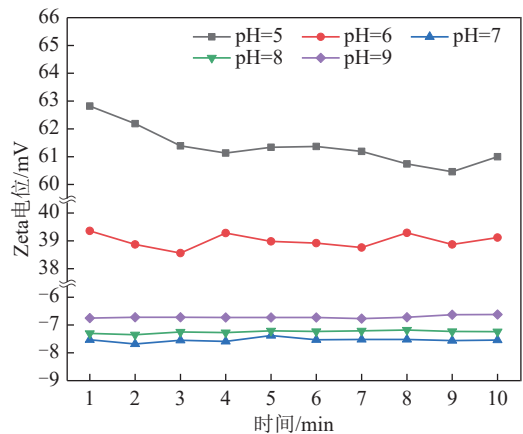


图 18 Zeta 电位随时间变化曲线

Fig.18 Zeta potential change curve with time

在 -7.5 mV 左右, $pH=5$ 、 6 的 Zeta 电位值变化范围分别在 $38 \sim 40$ mV 及 $60 \sim 63$ mV 之间, 可见液渣混合物的 pH 越小, Zeta 电位值越大, 颗粒在溶液中越稳定, 越不易泥化聚集。其原因是酸性溶液中正电荷氢离子对黏土颗粒表面负电荷形成电荷屏蔽, 使黏土颗粒表面负电荷减弱, 降低了黏土颗粒对水分子的吸附。而 $pH=8$ 和 $pH=9$ 的液渣混合物的 Zeta 电位值均在 -7 mV 左右, 碱性溶液对 Zeta 电位值影响较小。

4 钻渣泥化影响因素验证试验

4.1 试验方案

针对上述钻渣泥化影响因素, 在实验室开展泥质钻渣泥化试验, 通过计算钻渣的黏附率, 验证钻渣粒径、液渣比、转速、搅拌时长、 K^+ 离子浓度以及 pH 对泥质钻渣泥化程度的影响, 试验过程同 1.2 节, 试验方案见表 3。

4.2 试验结果分析

不同粒径条件下, 泥质钻渣黏附情况如图 19 所示。由图 19 可知, 不同粒径下泥质钻渣遇水泥化后对钻具的黏附效果存在明显不同。粒径 > 2.5 mm、 $1.5 \sim 2.5$ mm、 $0.5 \sim 1.5$ mm、 < 0.5 mm 的泥质钻渣泥化后黏附于钻具上的质量分别为 3.35、6.94、8.25、10.74 g, 黏附率分别为 8.38%、17.35%、20.63%、26.85%, 钻头被液渣混合物的包覆面积随钻渣粒径减小逐渐增大。不同液渣比条件下, 泥质钻渣黏附情况如图 20 所示。

由图 20 可知, 液渣比分别为 $1:1$ 、 $1:2$ 、 $1:3$ 、 $1:4$ 的液渣混合物黏附于钻具上的质量分别为 2.39、5.36、10.74、21.50 g, 黏附率分别为 3.98%、11.91%、26.85%、57.33%, 随着液渣比减小, 液渣混合物黏附于钻具上的质量逐渐增大, 黏附率也逐渐增大。不同搅拌转速条件下, 泥质钻渣黏附情况如图 21 所示。

表 3 试验方案
Table 3 Test scheme

序号	钻渣质量/g	钻渣粒径/mm	液渣比	转速/r · min ⁻¹	搅拌时长/min	pH	溶液类型	溶液浓度/mol · L ⁻¹
1	30	> 2.5	1 : 3	300	2	7	去离子水	—
2		1.5~2.5						
3		0.5~1.5						
4		< 0.5						
5	30	< 0.5	1 : 1	300	2	7	去离子水	—
6			1 : 2					
7			1 : 3					
8			1 : 4					
9	30	< 0.5	1 : 3	100	2	7	去离子水	—
10				300				
11				500				
12				600				
13	30	< 0.5	1 : 3	300	1	7	去离子水	—
14					2			
15					5			
16					10			
17	30	< 0.5	1 : 3	300	2	5	HCl溶液	—
18						7	去离子水	
19						9	NaOH溶液	
20	30	< 0.5	1 : 3	300	2	7	KCl溶液	0
21								0.1
22								0.3
23								0.5
24								0.7

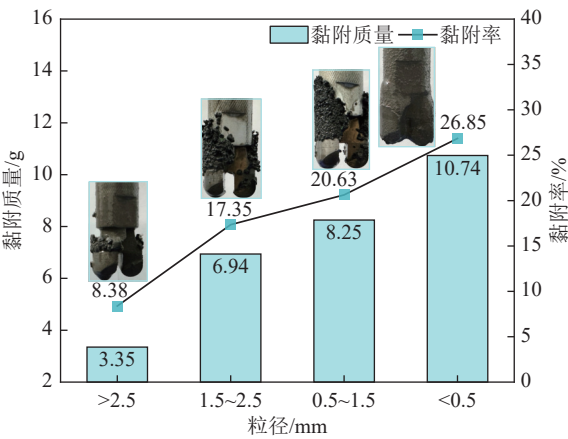


图 19 不同粒径下泥质钻渣泥化黏附情况
Fig.19 Argillization and adhesion of drilling cuttings with different particle sizes

由图 21 可知,转速分别为 100、300、500、600 r/min 下的液渣混合物黏附于钻具上的质量分别为 14.65、10.74、9.67、7.94 g,黏附率分别为 36.63%、26.85%、24.18%、19.85%。随着转速的增加,液渣混合物黏附

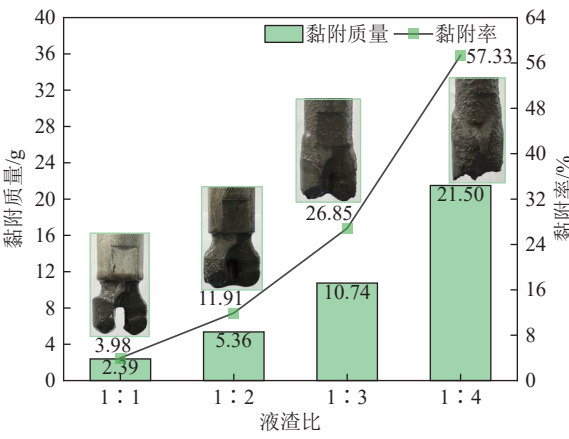


图 20 不同液渣比下泥质钻渣泥化黏附情况
Fig.20 Argillization and adhesion of drilling cuttings with different solid-liquid ratio

于钻具上的质量逐渐减小,黏附率也逐渐降低。不同搅拌时长条件下,泥质钻渣黏附情况如图 21 所示。

由图 22 可知,搅拌时长分别为 1、2、5、10 min 的液渣混合物黏附于钻具上的质量分别为 4.86、10.74、

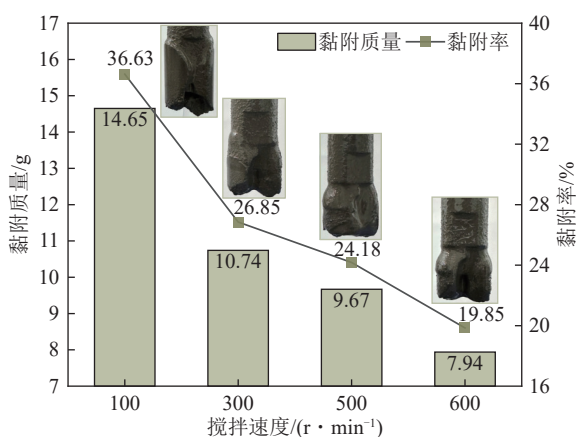


图 21 不同搅拌转速下泥质钻渣泥化黏附情况

Fig.21 Argillization and adhesion of drilling cuttings with different mixing speed

15.83、14.40 g, 黏附率分别为 12.83%、26.85%、39.18%、35.10%, 随着搅拌时长增加, 液渣混合物黏附于钻具上的质量以及黏附率均先增加后减小。不同 K^+ 离子浓度下, 泥质钻渣泥化黏附情况如图 23 所示。

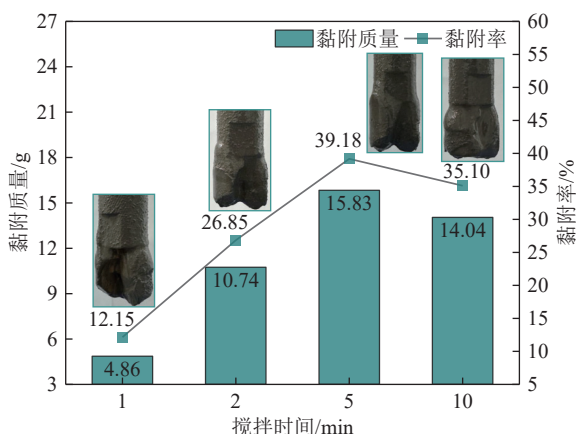


图 22 不同搅拌时长下泥质钻渣泥化黏附情况

Fig.22 Argillization and adhesion of drilling cuttings with different stirring time

由图 23 可知, K^+ 离子浓度分别为 0(纯去离子水)、0.1、0.3、0.5、0.7 mol/L 时, 黏附于钻具上液渣混合物的质量分别为 10.74、9.65、9.06、8.90、8.73 g, 黏附率分别为 26.85%、24.13%、22.65%、21.83%。随着 K^+ 离子浓度的增加, 液渣混合物黏附于钻具上的质量逐渐减小, 黏附率也逐渐降低。不同 pH 值溶液下, 泥质钻渣泥化黏附情况如图 24 所示。

由图 24 可知, pH=5 时黏附于钻具上液渣混合物的质量为 8.43 g, 黏附率为 21.08%; pH=7 时黏附于钻具上液渣混合物的质量为 10.74 g, 黏附率为 26.85%; pH=9 时黏附于钻具上液渣混合物的质量为 10.06 g, 黏附率为 25.15%, 因此, 酸性溶液对泥质钻渣遇水泥化后的液渣混合物对钻具的黏附具有抑制作用, 而碱

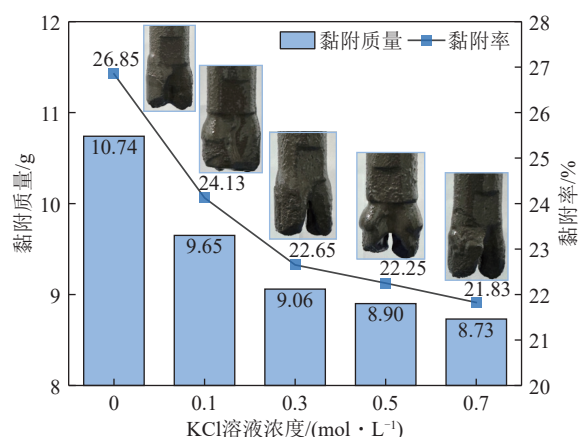
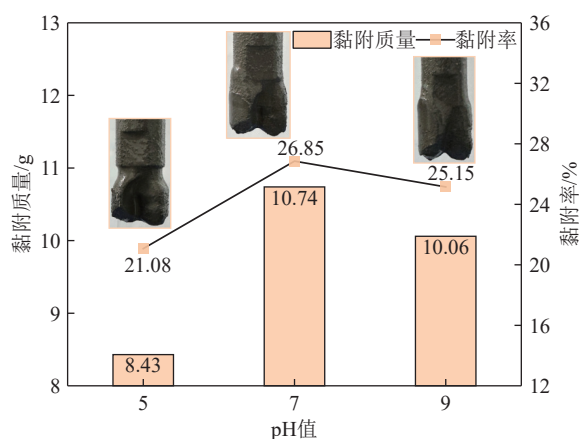
图 23 不同 K^+ 离子浓度下泥质钻渣泥化黏附情况Fig.23 Argillization and adhesion of drilling cuttings with different K^+ concentrations

图 24 不同 pH 溶液下泥质钻渣泥化黏附情况

Fig.24 Argillization and adhesion of drilling cuttings with different pH values

性溶液泥化抑制效果不明显。

上述试验结果表明, 钻渣粒径、液渣比、搅拌转速、搅拌时长、 K^+ 离子及 pH 均会对含高岭石泥质钻渣的泥化作用产生影响, 进一步证明了第 3 节的研究结论。以表 3 中方案 4 的测试结果为准 (粒径 < 0.5 mm, 转速 300 r/min, 液渣比 1 : 3, K^+ 浓度 0, pH=7, 黏附率为 26.85%), 可得到试验范围内各影响因素下的最低黏附率与基准的差值, 从而分析各因素对钻渣泥化抑制的显著程度, 如图 25 所示。

如图 25 所示, 在试验范围内各因素对钻渣泥化抑制的显著程度按照由大到小的顺序依次为: 液渣比、粒径、搅拌时长、搅拌转速、pH 及 K^+ 离子浓度。可利用上述因素对钻渣泥化程度的抑制作用, 采取对应措施, 抑制钻渣泥化。

4.3 讨论与建议

与已有研究相比, 笔者将钻渣的黏附分为钻渣吸水泥化形成液渣混合物以及液渣混合物对钻具的黏

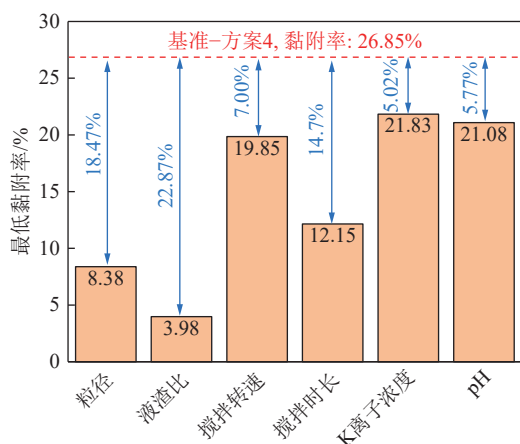


图 25 各影响因素对钻渣泥化抑制的显著程度

Fig.25 Degree of argillization inhibition by various influencing factor

附两个过程,利用现有理论及实验室试验详细解释了钻渣生成→吸水泥化→液渣混合物生成(被水膜包裹的黏聚体)→液渣混合物吸附钻具的完整过程,结合前述结论以及有关学者研究成果,可考虑采用以下措施降低泥质钻渣泥化程度,减小钻渣泥化后对钻具的黏附作用:

1) 调整钻头结构。目前锚固孔钻头多为 PDC 两翼式钻头,钻头刀片结构对钻渣生成尺寸有显著影响^[37-39]。通过调整钻头结构参数(如改变 PDC 刀片数量、增加刀片间距等)提高锚固孔钻进过程中较大粒径的钻渣的比例(>1.5 mm),由于较大粒径的钻渣遇水泥化作用不明显,因此可减轻对钻具的黏附作用。此外,改变常规钻头出水口位置,使钻进液直接冲刷钻头刀片,也可降低泥化钻渣的黏附程度。

2) 提高进液压力。进液压力对锚固孔排渣效果有显著影响^[41],增加进液压力,可提高钻进液速度,从而增加产渣区域的相对液渣比,钻渣在水中的分散程度更大,泥化程度更低,从而降低液渣混合物对钻具的黏附作用。同时,根据 3.3 节结论,提高进液压力可使尚未泥化的钻渣尽快排出孔外,避免增加搅拌时长,使液渣混合物黏度增加。

3) 增加钻具成孔转速。相关研究表明,推力一定时,增加锚固孔成孔转速可提高施工效率^[42]。对于泥质软岩锚固孔,增加成孔转速可有效削弱钻渣颗粒的聚集程度,转速的增加同时也会产生较大的离心力,使黏附在钻具上的泥化钻渣与钻具分离,减少泥化后的液渣混合物对钻具黏附作用。

4) 调整钻进液组分。油气钻井领域已研制出多种含有机、无机添加剂的钻井液,有效保证了泥质地层油气资源顺利开采^[33-36,43-44]。但由于锚固孔成孔数量、尺寸及时间与前者差异显著,采用上述研究成果

显然不符合生产实际。可考虑向钻进液加入含 K⁺离子的无机盐溶液以及酸性溶液(需考虑钻具防腐蚀及个人防护),由于电荷中和作用可减少黏土颗粒对水分子的吸附,降低泥化程度。

5 结 论

1) 钻头在破岩过程中,含高岭石类泥质钻渣吸水泥化后受自身“水膜”与钻头表面产生的静电力以及与钻头表面“水膜”形成整体结构的界面张力共同作用是造成钻渣黏附的主要原因,静电力在黏附过程中发挥了重要作用。

2) 钻渣泥化程度随钻渣粒径、液渣比、钻具搅拌转速及时长、K⁺离子浓度的增加而降低,酸性溶液也会对钻渣泥化产生抑制作用。试验范围内各因素对钻渣泥化抑制的显著程度按照由大到小的顺序依次为:液渣比、钻渣粒径、搅拌时长、搅拌转速、pH 值及 K⁺离子浓度。

3) 提出了钻渣泥化抑制对策,通过调整钻头结构适当增加产渣尺寸,提高进液压力,增加钻具成孔转速,向钻进液中添加 K⁺或弱酸性溶液,可削弱泥质钻渣与水的泥化反应程度,降低对钻具的黏附作用。研究成果可为提高泥质软岩锚固孔成孔效率提供一定理论参考。

参考文献(References):

- [1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [2] 黄炳香,张农,靖洪文,等.深井采动巷道围岩流变和结构失稳大变形理论[J].煤炭学报,2020,45(3):911-926.
HUANG Bingxiang, ZHANG Nong, JING Hongwen, et al. Large deformation theory of rheology and structural instability of the surrounding rock in deep mining roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 911-926.
- [3] 康红普,李全生,张玉军,等.我国煤矿绿色开采与生态修复技术发展现状及展望[J].绿色矿山,2023,1(1):1-24.
KANG Hongpu, LI Quansheng, ZHANG Yujun, et al. Development status and prospect of greenmining and ecological restoration technology of coal mines in China[J]. Journal of Green Mine, 2023, 1(1): 1-24.
- [4] 康红普,王金华.煤巷锚杆支护理论与成套技术[M].北京:煤炭工业出版社,2007.
- [5] 侯朝炯团队.巷道围岩控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2013.
- [6] 刘少伟.锚杆支护煤巷冒顶危险的应力影响及工程应用[J].采矿与安全工程学报,2007,24(2):239-242.
LIU Shaowei. Effect of stress on roof falling in coal drift supported

- by bolts and its engineering application[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2007, 24(2): 239–242.
- [7] 康红普. 我国煤矿巷道围岩控制技术发展 70 年及展望[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(1): 1–30.
- KANG Hongpu. Seventy years development and prospects of strata control technologies for coal mine roadways in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(1): 1–30.
- [8] 刘少伟, 王伟, 付孟雄, 等. 螺纹钢锚杆搅拌锚固剂力学特征分析与端部形态优化实验[J]. *中国矿业大学学报*, 2020, 49(3): 419–427.
- LIU Shaowei, WANG Wei, FU Mengxiong, et al. Mechanical characteristics analysis and end type optimization experiment of rebar bolts during resin mixing process[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(3): 419–427.
- [9] 康红普, 姜鹏飞, 黄炳香, 等. 煤矿千米深井巷道围岩支护—改性—卸压协同控制技术[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(3): 845–864.
- KANG Hongpu, JIANG Pengfei, HUANG Bingxiang, et al. Roadway strata control technology by means of bolting-modification-destressing in synergy in 1 000 m deep coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(3): 845–864.
- [10] BASARIR H, SUN Y T, LI G C. Gateway stability analysis by global-local modeling approach[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 113: 31–40.
- [11] 刘少伟, 贺德印, 付孟雄, 等. 树脂锚固剂搅拌过程仿真及高效搅拌构件优化实验[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(9): 3073–3086.
- LIU Shaowei, HE Deyin, FU Mengxiong, et al. Numerical simulation of mixing process of resin grout and optimization experiment of high-efficiency mixing component[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(9): 3073–3086.
- [12] 赵一鸣. 煤矿巷道树脂锚固体力学行为及锚杆杆体承载特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- ZHAO Yiming. Study on solid mechanical behavior and bearing characteristics of resin anchor in coal mine roadway[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012.
- [13] LIU S W, HE D Y, FU M X. Experimental investigation of surrounding-rock anchoring synergistic component for bolt support in tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 104: 103531.
- [14] 靖洪文, 苏海健, 孟波, 等. 巷道锚杆锚固力学特性现场试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(1): 16–23.
- JING Hongwen, SU Haijian, MENG Bo, et al. Field test research on anchorage mechanical characteristics of roadway bolt[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(1): 16–23.
- [15] NEMCIK J, MA S Q, AZIZ N, et al. Numerical modelling of failure propagation in fully grouted rock bolts subjected to tensile load[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 71: 293–300.
- [16] 刘长武, 陆士良. 泥岩遇水崩解软化机理的研究[J]. *岩土力学*, 2000, 21(1): 28–31.
- LIU Changwu, LU Shiliang. Research on mechanism of mudstone degradation and softening in water[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2000, 21(1): 28–31.
- [17] 李桂臣, 孙长伦, 何锦涛, 等. 软弱泥岩遇水强度弱化特性宏观模拟研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2019, 48(5): 935–942.
- LI Guichen, SUN Changlun, HE Jintao, et al. Macro and meso scalesimulation study of the strength-weakening property of soft mudstone affected by water[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2019, 48(5): 935–942.
- [18] 李桂臣, 李菁华, 孙元田, 等. 泥岩多尺度模型与水岩作用特性研究进展[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(3): 1138–1154.
- LI Guichen, LI Jinghua, SUN Yuantian, et al. Advance of multi-scale study on both analytic models and water-rock interaction characteristics of mudstone[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1138–1154.
- [19] GÖB S, LOGES A, NOLDE N, et al. Major and trace element compositions (including REE) of mineral, thermal, mine and surface waters in SW Germany and implications for water-rock interaction[J]. *Applied Geochemistry*, 2013, 33: 127–152.
- [20] 周翠英, 谭祥韶, 邓毅梅, 等. 特殊软岩软化的微观机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(3): 394–400.
- ZHOU Cuiying, TAN Xiangshao, DENG Yimei, et al. Research on softening micro-mechanism of special soft rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(3): 394–400.
- [21] 高凯. 泥质岩体微观分子位态变化引发巷道失稳机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- GAO Kai. Study on mechanism of roadway instability caused by microscopic molecular state change of argillaceous rock mass[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [22] 张俊文, 袁瑞甫, 李玉琳. 厚泥岩复合顶板煤巷围岩控制技术研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(1): 152–158.
- ZHANG Junwen, YUAN Ruifu, LI Yulin. Research on surrounding rock control of coal roadway with thick mudstone compound roof[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(1): 152–158.
- [23] 姚强岭, 李学华, 瞿群迪, 等. 泥岩顶板巷道遇水冒顶机理与支护对策分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2011, 28(1): 28–33.
- YAO Qiangling, LI Xuehua, QU Qundi, et al. Supporting counter-measures and roof falling mechanism reacting with water in mudstone roof roadway[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2011, 28(1): 28–33.
- [24] 马振乾, 刘勇, 刘勤志, 等. 巷道特厚泥质顶板失稳因素分析及控制技术[J]. *中国安全科学学报*, 2018, 28(5): 147–152.
- MA Zhenqian, LIU Yong, LIU Qinzi, et al. Instability factors and control technology for roadway with extra-thick mudstone roof[J]. *China Safety Science Journal*, 2018, 28(5): 147–152.
- [25] 李亚辉. 化乐煤矿泥化软岩巷道支护及快速掘进技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- LI Yahui. Study on support and rapid excavation technology of muddy soft rock roadway in huale coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [26] 李英明, 张瀚, 孟祥瑞. 软岩巷道二次支护时机研究[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(S1): 47–52.
- LI Yingming, ZHANG Han, MENG Xiangrui. Study on the opportunity of secondary support in soft rock roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(S1): 47–52.
- [27] WELLS M, MARVEL T, BEUERSHAUSEN C. Bit balling mitigation in PDC bit design[C]//IADC/SPE Asia Pacific Drilling Techno-

- logy Conference and Exhibition. SPE, 2008: 114673.
- [28] RAHMANI, R., SMITH John rogers, TALEGHANI A. d. Analytical modeling of PDC single cutter-rock interaction under confining pressure[C]. The 46th U. S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, Chicago, Illinois 341, 2012.
- [29] STEFANO G., YOUNG S. The prevention and cure of bit balling in water based drilling fluids[C]. Offshore Mediterranean Conference and Exhibition, Ravenna, Italy, 110, 2009.
- [30] 陈修平. 泥质岩屑粘附机理与 PDC 钻头水力优化设计研究[D]. 东营: 中国石油大学 (华东), 2016.
- CHEN Xiuping. Study on adhesion mechanism of argillaceous cuttings and hydraulic optimization design of PDC bit[D]. Dongying: China University of Petroleum (Huadong), 2016.
- [31] 胡郁乐, 胡晨, 张恒春, 等. 钻头泥包原因分析及松科二井防泥包钻井液的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(5): 254–261, 268.
- HU Yule, HU Chen, ZHANG Hengchun, et al. Analysis of bit balling and application of the balling-preventing drilling fluid in well Songke-2[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(5): 254–261, 268.
- [32] 孟庆鸿, 张恒春, 胡郁乐, 等. 防泥包钻头的优化设计与应用[J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(1): 71–73.
- MENG Qinghong, ZHANG Hengchun, HU Yule, et al. Optimum design and application of balling-preventing bit[J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(1): 71–73.
- [33] 韩敦, 彭芳芳, 徐同台, 等. 削减 PDC 钻头泥包提高机械钻速的技术途径[J]. 天然气工业, 2012, 32(8): 88–91, 134.
- HAN Xiao, PENG Fangfang, XU Tongtai, et al. Technical methods for mitigating PDC bit bailing and improving the rate of penetration(ROP)[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(8): 88–91, 134.
- [34] 陈在君, 刘顶运, 韦孝忠, 等. 长庆气田水平井 PDC 钻头防泥包技术[J]. 天然气工业, 2009, 29(11): 62–63.
- CHEN Zaijun, LIU Dingyun, WEI Xiaozhong, et al. Anti-bit bailing for PDC bits of horizontal wells in Changqing gas field[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(11): 62–63.
- [35] 金潮苏. KRH1 快钻剂的研究与应用[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(2): 57–59.
- JIN Chaosu. Research and application of KRH-1 fast drilling agent[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(2): 57–59.
- [36] 张伟, 杨洪, 蒋学光, 等. 快速钻井液技术的研究与应用: 以准噶尔盆地车排子—中拐地区为例[J]. 天然气工业, 2012, 32(2): 60–62, 117–118.
- ZHANG Wei, YANG Hong, JIANG Xueguang, et al. Research and application of fast drilling fluids: A case study of Chepaizi-Zhongguai area in the Junggar Basin[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(2): 60–62, 117–118.
- [37] 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.
- [38] 刘少伟, 付孟雄, 贾后省, 等. 煤矿巷道底板锚固孔钻渣尺寸特征实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(7): 1343–1355.
- LIU Shaowei, FU Mengxiong, JIA Housheng, et al. Experimental study on the size characteristics of rock fragments during borehole drilling in coal mine roadway floors[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(7): 1343–1355.
- [39] 付孟雄, 刘少伟, 贾后省, 等. 巷道下向小孔径锚固孔钻进产渣特征及高效钻头设计[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2311–2325.
- FU Mengxiong, LIU Shaowei, JIA Housheng, et al. Fragments generation characteristics and design of a kind of efficient rock breaking bit during borehole drilling with small diameter at a downward angle of coal mine roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2311–2325.
- [40] 徐志强, 刘杰, 王辉锋, 等. 钾离子抑制蒙脱石水化膨胀的试验研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(2): 464–468.
- XU Zhiqiang, LIU Jie, WANG Huifeng, et al. Inhibition of potassium ions on hydration swelling of montmorillonite[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 464–468.
- [41] 付孟雄, 刘少伟, 贾后省, 等. 煤矿巷道底板锚固孔钻渣导升运移规律及影响因素研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(3): 584–597.
- FU Mengxiong, LIU Shaowei, JIA HouSheng, et al. Study on migration rules and influencing factors of the fragments ascending during boreholes drilling rock in coal mine roadway floors[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(3): 584–597.
- [42] 付孟雄, 刘少伟, 贾后省. 锚杆机动力参数对煤巷顶板锚固孔钻进特征影响研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(3): 517–524.
- FU Mengxiong, LIU Shaowei, JIA Housheng. Study on effects of dynamic parameters of bolter on roof bolt hole drilling characteristics[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(3): 517–524.
- [43] QUAN X H, JIANG G C, CUI K X, et al. Application of high-performance water-based drilling fluid system in Mahu oilfield[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 612(1): 012019.
- [44] JIANG G C, NI X X, YANG L L, et al. Synthesis of super-amphiphobic nanofluid as a multi-functional additive in oil-based drilling fluid, especially the stabilization performance on the water/oil interface[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 588: 124385.