

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.282

引用格式:路凯旋,罗庆,罗洁,等.煤岩体对矿井水常规阳离子演化规律的影响[J].重庆大学学报,2026,49(6):  
14-23.



## 煤岩体对矿井水常规阳离子演化规律的影响

路凯旋<sup>1,2</sup>,罗庆<sup>1</sup>,罗洁<sup>3</sup>,徐连满<sup>3</sup>

(1. 沈阳大学 区域污染环境生态修复教育部重点实验室,沈阳 110044; 2. 中国刑事警察学院 公安信息技术与情报学院,沈阳 110854; 3. 辽宁大学 环境学院,沈阳 110036)

**摘要:**以平顶山矿区的煤与矸石为研究对象,探究了不同粒径、溶液环境等条件下常规阳离子的释放规律,并阐明了释放行为对矿井水矿化特征的影响机制。结果表明:煤与矸石的粒径对离子释放量和浸泡液 pH 值具有显著影响。粒径减小,煤岩体中铝硅酸盐、碳酸盐类矿物质的水解反应增强, $\text{Si}^{4+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 等主要离子的释放量增加;矸石主要贡献 $\text{Si}^{4+}$ 和 $\text{Al}^{3+}$ ,煤主要贡献 $\text{Ca}^{2+}$ ,且矸石的存在会抑制 $\text{Ca}^{2+}$ 的释放;在矿井水作用下,煤和矸石的离子释放规律与去离子水环境存在差异,矿井水中的 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 质量浓度主要受煤的影响。研究表明,煤与矸石的协同作用显著影响矿井水的化学性质,初始溶液环境主要调控离子释放和 pH 值的动态变化过程。

**关键词:**矿井水;煤与矸石;常规离子;水质演化

中图分类号:X752

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2026)06-014-10

## Impact of coal-rock interactions on the geochemical evolution of major cations in mine water

LU Kaixuan<sup>1,2</sup>, LUO Qing<sup>1</sup>, LUO Jie<sup>3</sup>, XU Lianman<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Regional Pollution Environment Ecological Remediation of the Ministry of Education, Shenyang University, Shengyang 110044, P. R. China; 2. School of Public Security Information Technology and Intelligence, Criminal Investigation Police University of China, Shengyang 110854, P. R. China; 3. School of Environment, Liaoning University, Shengyang 110036, P. R. China)

**Abstract:** This study investigates the release patterns of major cations from coal and gangue collected from the Pingdingshan mining area under various conditions, including particle size and solution chemistry, with the aim of elucidating the underlying mechanisms controlling mine water mineralization. Laboratory experiments were conducted to analyze ion release characteristics and pH evolution. The results show that particle size plays a critical role in controlling ion release and solution pH. Finer particles enhance the dissolution of aluminosilicates

收稿日期:2025-06-23 网络出版日期:2025-12-25

基金项目:国家重点研发计划资助(2024YFC3013904);深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室开放基金课题(SDGZ2527);兴辽英才计划(XLYC2203141)。

Supported by National Key R&D Program of China (2024YFC3013904), State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering (SDGZ2527), and Liaoning Revitalization Talents Program (XLYC2203141).

作者简介:路凯旋(1995—),男,博士研究生,主要从事矿井水处理方向的研究,(E-mail)lukaixuan0808@foxmail.com。

通信作者:罗庆,男,教授,(E-mail)luoqingyt@126.com。

and carbonate materials in coal-bearing strata, leading to enhanced release of key ions such as  $\text{Si}^{4+}$  and  $\text{Al}^{3+}$ . Gangue is identified as the primary source of  $\text{Si}^{4+}$  and  $\text{Al}^{3+}$ , whereas coal predominantly contributes  $\text{Ca}^{2+}$ ; moreover, the presence of gangue suppresses the release of  $\text{Ca}^{2+}$ . Ion release patterns in actual mine water differ from those observed in deionized water, with  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  concentrations in mine water mainly governed by coal. Overall, the findings demonstrate that the interactions between coal and gangue significantly impacts the geochemical evolution of mine water, while the initial solution environment primarily regulates the dynamics of ion release and pH changes.

**Keywords:** mine water; coal and gangue; major cations; water quality evolution

随着工业化的持续推进,国家对能源的需求持续增长,当前能源结构正处于由化石能源为主向清洁能源转型的关键时期,但是,在未来一段时间内煤炭仍将是能源的重要组成部分。煤炭在开采过程中必然会产生大量的矿井水<sup>[1]</sup>,并且随着煤炭开采深度的不断增加及能源的持续消耗,矿井水的化学成分也变得更加复杂。孙亚军等<sup>[2]</sup>统计了中国314座煤矿发现矿井水以高TDS、高悬浮物、高硫酸盐、高Na为主要特征。相关预测表明2035年前中国煤矿矿井水每年可以稳定在 $6.0 \times 10^9 \text{ m}^3$ 以上<sup>[3]</sup>,但是对矿井水的资源化利用不足25%<sup>[4]</sup>,造成资源浪费的同时也会引起矿山周围一系列环境问题。

矿井水按照污染因子可以分成高矿化度、酸性、特殊污染物、悬浮物等几种<sup>[5]</sup>,其中高矿化度矿井水较为常见。高矿化度矿井水其盐类主要来自煤层中的硫酸盐和碳酸盐等物质<sup>[6]</sup>,水中含有高浓度的 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 等离子导致水质普遍表现为中性或弱碱性<sup>[7]</sup>。高矿化度矿井水排放会造成河流含盐量增加、土壤盐渍化等环境问题<sup>[8]</sup>。高矿化度矿井水的处理过程主要就是脱盐,目前常用的脱盐技术有渗透、膜等,但在实际应用过程中由于矿井水量大而使得处理成本高<sup>[9-11]</sup>,急需研发一种高效低成本矿井水处理技术。

矿井水水质演化是研发高效低成本矿井水处理技术的关键,众多学者对矿井水水质的演化进行了深入的研究,赵先鸣<sup>[12]</sup>发现采空区积水中的 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 主要来源是钠长石、钾长石等硅酸盐矿物的溶解和反向离子交换作用,而 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 主要来自钙长石、方解石、绿泥石的水解;唐春雷<sup>[13]</sup>发现煤矿酸性矿井水中阳离子特征整体上表现为 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{Na}^+$ 浓度高, $\text{K}^+$ 浓度低,阴离子特征表现为 $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度高, $\text{Cl}^-$ 浓度低;王昱同<sup>[14]</sup>研究发现矿井水水化学类型变化主要受溶解与反向阳离子交换作用影响;魏中林<sup>[15]</sup>表示矿井水中主要离子来源于硅酸盐和硫酸盐,少部分来源于碳酸盐岩风化溶解。但是,已有研究在常规离子释放规律方面还存在一定的不足,如煤层中的矿物质如何释放矿化离子、矿化离子随时间的演化规律等。

平顶山矿区是华北石炭-二叠纪煤田,煤系地层中普遍赋存的铝硅酸盐与碳酸盐矿物是导致矿井水矿化度升高的关键因素。因此,研究选取平顶山矿区的主要固体物质煤与矸石,探究在水浸条件下不同粒径、不同比例、不同浸泡时间、不同溶液化学环境等条件下的常规阳离子浸出规律与机理。首先,利用XRD与EDS对煤与矸石的矿物质种类进行表征;再利用ICP测试不同条件下常规阳离子浸出浓度,并使用pH计对浸泡液pH变化进行检测;最后,给出煤岩体影响矿井水中常规阳离子演化的可能机理。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

实验所用的煤、矸石、矿井水均来自平顶山矿区。将煤样与矸石研磨成粉末,再利用X射线衍射(Bruker advance D8,德国)检测煤样与矸石的矿物质组成,并采用元素面扫描分析(Oxford 30Xplore)测试煤与矸石表面的元素组成。利用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP)测定了静态浸泡条件下常规离子浓度,利用雷磁pH计测试浸泡液的pH演化规律。

图1(a)展示了煤与矸石的XRD测试结果。根据相关文献<sup>[16]</sup>,煤与矸石中的主要矿物质为黄铁矿、石英、高岭石、白云石、方解石等。图1(b)展示了煤与矸石表面的元素含量情况,2种样品中含量较高的主要元素

为Al、Si、Mg、Ca,与XRD测试结果对照显示,矽石中含量较高的矿物质为石英与高岭石,矽石表面元素含量中Si含量占比约40%,Al约30%;煤表面元素含量中Si占比约为15%,Al含量也接近10%。值得注意的是煤中Ca元素含量也较高,煤中主要矿物质类型为石英、高岭石、方解石3种。

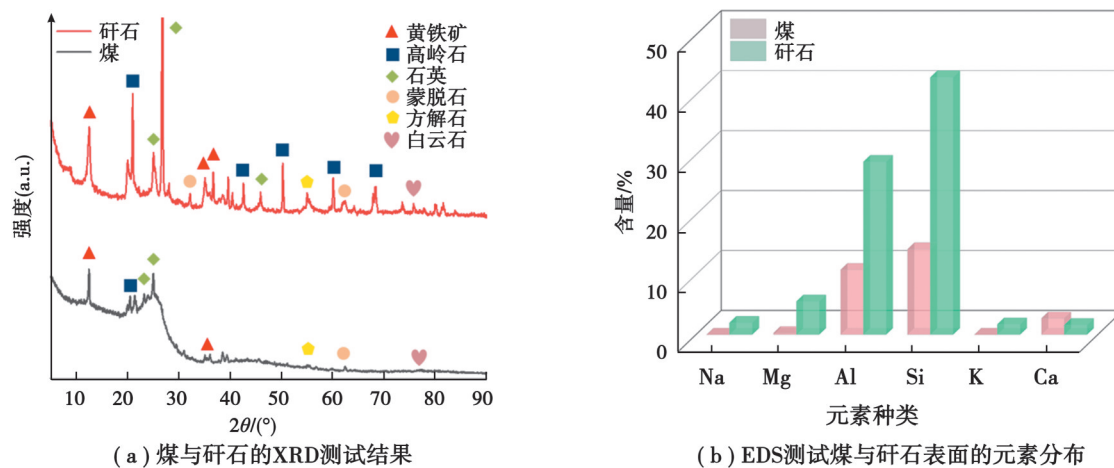


图1 煤与矽石的XRD与EDS测试结果

Fig. 1 XRD and EDS analysis results of coal and gangue

## 1.2 实验方法

首先,过滤矿井水,去除悬浮物。然后,破碎煤与矽石(为了在短期内观察到煤岩体对水质的影响),利用筛子进行粒径筛选,获取10~100目、小于100目以及大于10目3个颗粒尺寸区间样品。分别称取不同粒径的样品20g放进容器中加入50mL水浸泡,设置浸泡时间梯度为10d,共浸泡60d。浸泡结束后过滤浸泡液。实验照片如图2所示。矽石浸泡液中存在许多硅的胶体以及细小颗粒,单纯过滤无法去除,需要离心处理。利用pH计测试浸泡液的pH值变化情况,利用ICP测试浸泡液中常规离子( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Si}^{4+}$ 、 $\text{K}^{+}$ 、 $\text{Na}^{+}$ )浓度变化规律。

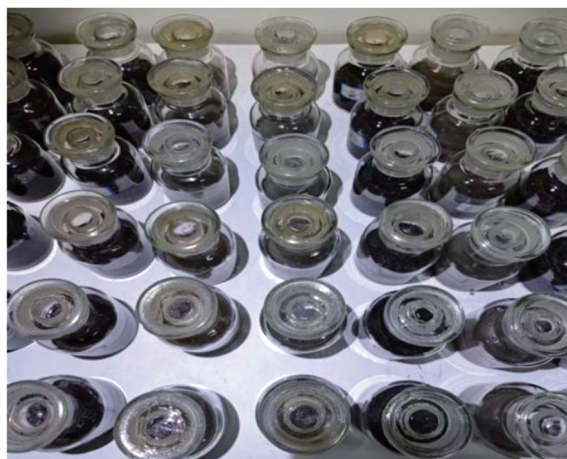


图2 实验照片

Fig. 2 Experimental photos

## 2 实验结果与分析

### 2.1 矽石粒径对常规离子浸出的影响

矽石是煤炭开采过程中产生的固体物质,不同地质环境煤层中存在的矽石含量不等,在地质运动、矿井

水渗流等矿井活动过程中会产生大小不等的颗粒。矽石对水质的影响较为显著,模拟了不同矽石粒径下常规离子浸出情况实验,探究矽石对矿井水中常规离子演化规律的影响,结果如图3所示。

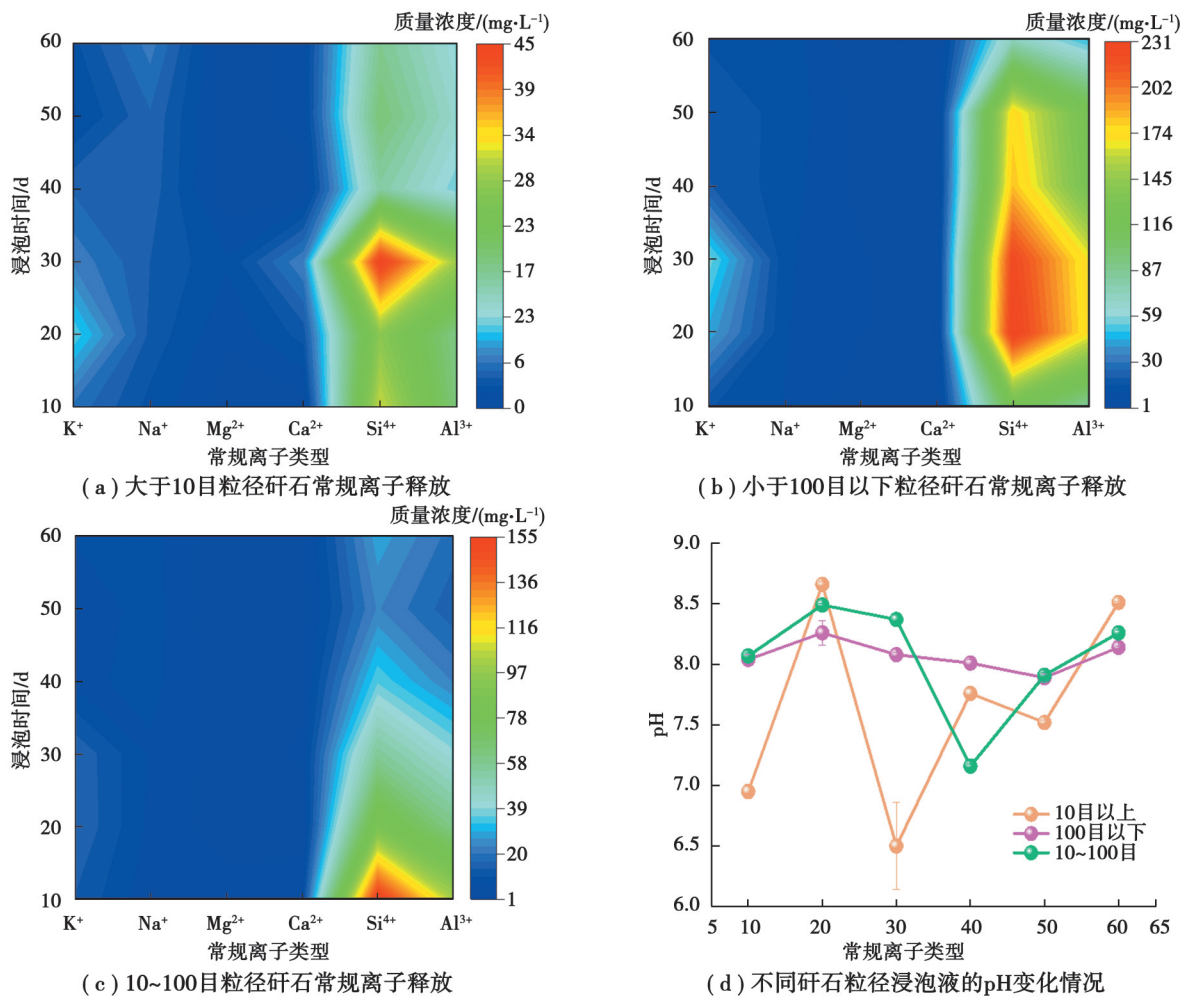
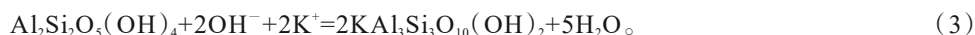
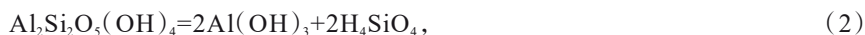


图3 不同矽石尺寸常规离子释放规律

Fig. 3 Release pattern of conventional ions for different gangue sizes

不同粒径的矽石在常规离子的释放上存在差异,通过不同粒径矽石的静态浸泡结果可以看出:矽石浸泡液的pH变化波动幅度呈现出10目以上>10~100目>100目以下的规律趋势,表明随着矽石粒径的减小浸泡液化学环境越稳定;在不同时间段,不同粒径矽石浸泡液的pH值变化无明显规律。在离子浓度方面,热力图显示不同粒径的矽石浸泡液中 $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Si^{4+}$ 、 $Al^{3+}$ 浓度变化各异, $Si^{4+}$ 和 $Al^{3+}$ 为主要浸出离子,与矽石的矿物质组成成分相符合(高岭石、石英等铝硅酸盐类矿物质)。从浸泡液中常规离子总量上来看呈现出100目以下>10~100目>10目以上的趋势,表明矽石的尺寸直接影响常规离子的释放量,10~100目矽石释放的 $Si^{4+}$ 、 $Al^{3+}$ 质量浓度在10 d的时候达到最高(155 mg/L、102 mg/L),随着浸泡时间的增加呈现出明显的递减趋势;100目以下尺寸矽石释放的 $Si^{4+}$ 、 $Al^{3+}$ 离子在浸泡20 d时达到最高(231 mg/L、170 mg/L),然后,随着浸泡时间的增加呈现出下降的趋势;10目以上矽石释放的 $Si^{4+}$ 、 $Al^{3+}$ 离子在30 d时达到最高(44.9 mg/L、29.1 mg/L)。而 $Mg^{2+}$ 和 $Ca^{2+}$ 在矽石浸泡液中检出量较少,2种离子质量浓度几乎没有超过10 mg/L。上述结果表明:小尺寸的矽石溶液的pH相对稳定,释放的离子量较大。矽石中的矿物质类型主要为石英与高岭石(见XRD与EDS测试结果),当矽石浸泡在去离子水中,赋存的矿物质与去离子水发生强烈的电离和水解作用,导致部分矿物质溶解,使溶液中的 $Si^{4+}$ 、 $Al^{3+}$ 等浓度迅速升高(见式(1)~(2)),溶液的pH值也呈现出增加的趋势,粒径小的矽石比表面积较大,含有铝硅酸盐类矿物质的水解反应得到增强,释放的离子量更多。随着浸泡时间的增

加  $\text{OH}^-$  与  $\text{K}^+$  相互作用, 导致  $\text{K}^+$  浓度发生变化(见式(3))<sup>[17]</sup>; 浸泡液中的  $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Si}^{4+}$  在达到一定浓度后可能会通过浸泡液中的  $\text{Na}^+$  等发生缩聚、重排, 生成无定型的铝硅酸盐<sup>[18]</sup>, 从而导致溶液中的  $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Si}^{4+}$  降低, 最终呈现出动态平衡过程。



## 2.2 煤粒径对常规离子浸出的影响

图4展示了不同粒径煤的常规离子释放情况。对于不同尺寸煤浸泡液的pH值波动较大, 且其变化幅度与粒径有直接关系。小于10目的煤呈现出每10d上升下降的趋势, 大于10目煤浸泡液上升趋势为20d, 在浸泡时间为60d时, 变化频率呈现出100目以下>10~100目>10目以上的规律。在常规离子浓度方面, 煤释放的常规离子主要为  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Si}^{4+}$ , 其浓度相差不大,  $\text{Al}^{3+}$  几乎未检出。整体上来看煤的尺寸越小释放的  $\text{Si}^{4+}$  含量越大, 尺寸不同释放  $\text{Si}^{4+}$  的规律不同; 对于  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ , 粒径大于10目时,  $\text{K}^+$  在30d达到最高值3.57 mg/L,  $\text{Na}^+$  在50d达到最高值1.46 mg/L,  $\text{Mg}^{2+}$  在30d达到最高值4.11 mg/L; 粒径为10~100目时,  $\text{K}^+$  在10d达到最高值3.27 mg/L,  $\text{Na}^+$  在50d达到最高值3.03 mg/L,  $\text{Mg}^{2+}$  在30d达到最高值3.6 mg/L; 粒径小于100目时,  $\text{K}^+$  在50d达到最高值9.04 mg/L,  $\text{Na}^+$  在50d达到最高值6.19 mg/L,  $\text{Mg}^{2+}$  在30d达到最高值6.48 mg/L。  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  的浸出量也是粒径小的煤释放的量更大, 但是离子浓度相差不明显,  $\text{Mg}^{2+}$  均在30d达到最高值。

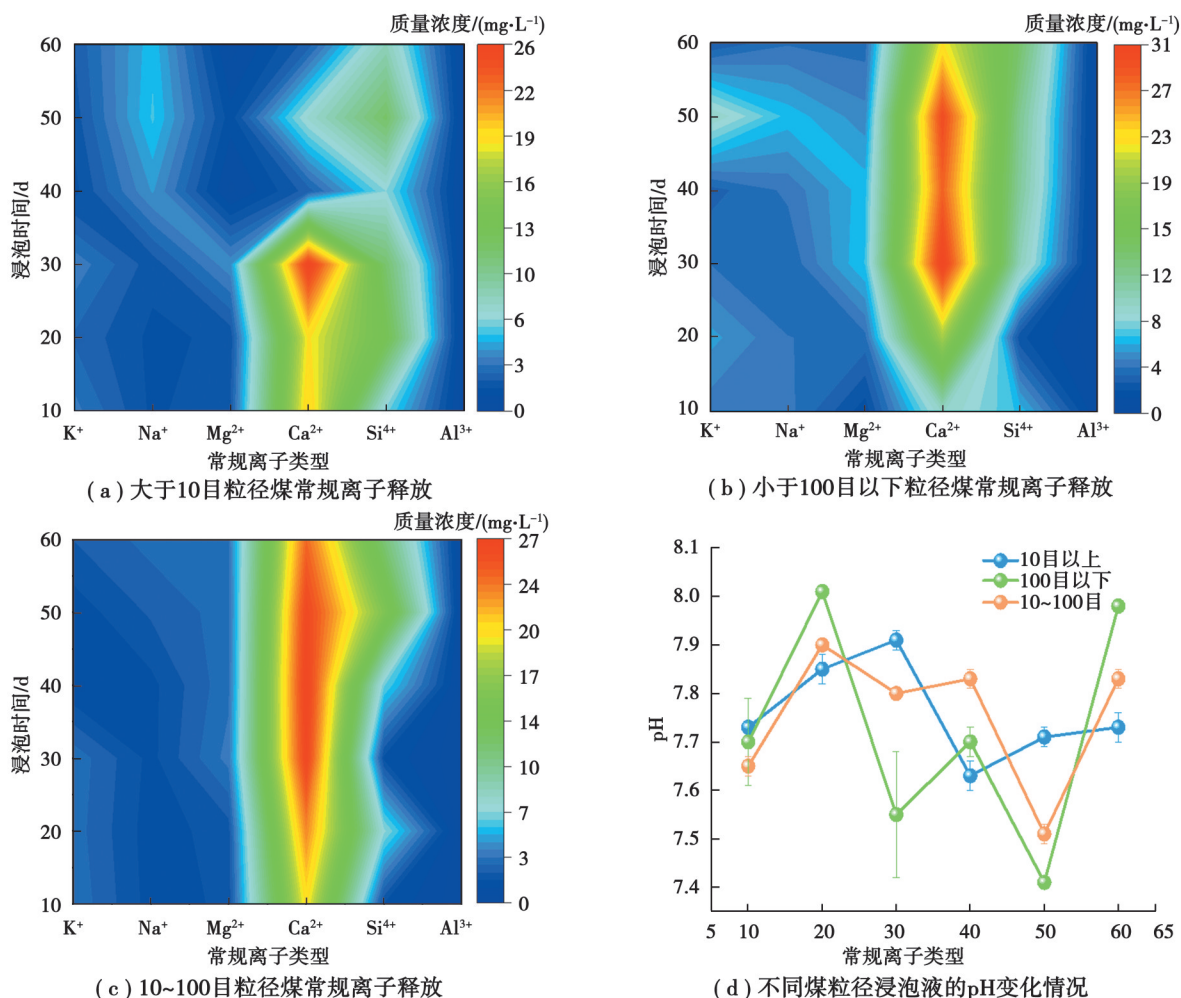
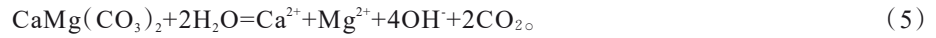


图4 不同煤尺寸常规离子释放规律

Fig. 4 Release pattern of conventional ions for different coal sizes

煤中的矿物质主要为铝硅酸盐类与碳酸盐类矿物质,主要为石英、高岭石、方解石、白云石等,通过实验结果可知,煤主要贡献  $\text{Ca}^{2+}$ ,方解石与白云石的水解解离的  $\text{OH}^-$  导致溶液的 pH 值升高,在碱性条件下释放的  $\text{CO}_2$  溶于水与  $\text{OH}^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  反应导致了溶液 pH、 $\text{Ca}^{2+}$  浓度的降低(见式(4)~(5))。



### 2.3 不同矽石含量对常规离子浸出的影响

不同煤矿的矽石含量不一,并且矽石与煤之间可能存在相互作用,模拟不同矽石含量条件下浸泡液中的常规离子浓度变化情况(矽石含量分别为 0%、33.33%、50%、100%),结果如表 1 所示。

表 1 不同矽石含量浸泡液的常规离子质量浓度变化

| 时间/d | $\text{K}^+ / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ |        |      |       | $\text{Na}^+ / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ |        |      |      | $\text{Mg}^{2+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ |        |       |       |
|------|--|--------|------|-------|---|--------|------|------|--|--------|-------|-------|
|      | 0%   | 33.33% | 50%  | 100%  | 0%  | 33.33% | 50%  | 100% | 0%   | 33.33% | 50%   | 100%  |
| 10   | 3.27   | 6.80   | 8.35 | 13.10 | 1.44  | 4.14   | 5.81 | 4.71 | 1.79   | 1.510  | 1.620 | 5.220 |
| 20   | 3.11   | 6.18   | 9.74 | 16.70 | 1.38  | 5.96   | 6.12 | 5.97 | 1.97   | 0.702  | 0.887 | 2.050 |
| 30   | 3.21   | 7.68   | 3.83 | 16.10 | 1.5   | 7.20   | 6.16 | 6.42 | 3.60   | 0.818  | 1.570 | 2.080 |
| 40   | 1.14   | 4.02   | 8.35 | 5.96  | 1.51  | 8.25   | 8.74 | 8.14 | 3.22   | 0.778  | 1.310 | 1.060 |
| 50   | 1.34   | 5.02   | 2.51 | 4.58  | 2.34  | 9.17   | 9.29 | 8.34 | 3.09   | 0.793  | 0.882 | 0.646 |
| 60   | 2.26   | 3.03   | 4.09 | 7.27  | 3.03  | 10.30  | 9.07 | 8.13 | 3.28   | 0.792  | 0.810 | 0.733 |

| 时间/d | $\text{Ca}^{2+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ |        |      |      | $\text{Si}^{4+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ |        |      |       | $\text{Al}^{3+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ |        |       |       |
|------|--|--------|------|------|--|--------|------|-------|--|--------|-------|-------|
|      | 0%   | 33.33% | 50%  | 100% | 0%   | 33.33% | 50%  | 100%  | 0%   | 33.33% | 50%   | 100%  |
| 10   | 20.1   | 3.72   | 2.90 | 6.72 | 1.67   | 45.40  | 44.0 | 155.0 | 0.187  | 29.90  | 29.50 | 102.0 |
| 20   | 23.0   | 4.28   | 2.20 | 1.45 | 6.94   | 12.40  | 21.1 | 85.2  | 0.059  | 5.24   | 13.70 | 60.8  |
| 30   | 26.5   | 4.69   | 5.25 | 4.20 | 1.57   | 8.36   | 20.1 | 56.9  | 0.153  | 3.43   | 13.70 | 40.3  |
| 40   | 27.0   | 4.54   | 3.50 | 2.90 | 6.29   | 13.70  | 40.7 | 35.3  | 0.227  | 6.42   | 28.50 | 22.8  |
| 50   | 26.3   | 5.39   | 3.85 | 1.69 | 15.60  | 8.52   | 15.1 | 23.4  | 0.220  | 3.38   | 9.76  | 14.4  |
| 60   | 24.2   | 4.54   | 3.17 | 1.95 | 11.40  | 7.88   | 15.4 | 28.2  | 0.184  | 3.70   | 10.20 | 18.3  |

不同矽石含量的样品在不同浸泡时间下,浸泡液中  $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Si}^{4+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$  浓度总体上随矽石含量和浸泡时间的增加而上升。当矽石含量为 0 时,  $\text{Ca}^{2+}$  的浸出量显著高于有矽石存在的情况,而对于  $\text{Na}^+$  释放情况几种样品相差不大;上述实验表明,矽石主要向矿井水中释放

$\text{Si}^{4+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ ,且其释放量随矽石含量的增加而上升;煤则主要向矿井水中释放  $\text{Ca}^{2+}$ 。矽石的存在会抑制  $\text{Ca}^{2+}$  释放,且矽石含量越高,抑制作用越强;对于  $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ ,煤与矽石的浸出量均较小,矽石含量增加,  $\text{K}^+$  浸出量有明显增加趋势,但整体浸出量较少;  $\text{Na}^+$  浸出行为与  $\text{K}^+$  类似;矽石对于  $\text{Mg}^{2+}$  浸出量影响较小。从浸泡液 pH 值随浸泡时间的变化情况来看,矽石含量对 pH 值的影响较大。矽石的存在使浸泡液呈碱性,且浸泡液的 pH 变化趋势(见图 5)均为先上升后下降的动态变化。当煤矽比为 1:1 时,对浸泡液 pH 值的影响最为显著,表明煤与矽石之间存在较强的协同作用。

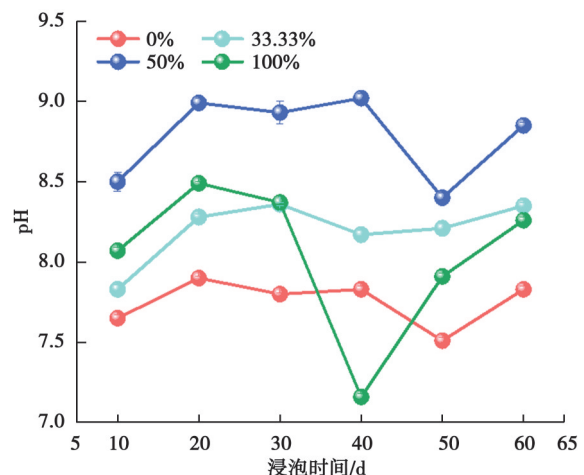


图 5 不同矽石含量浸泡液的 pH 变化

Fig. 5 Variation in pH of leachate with different gangue contents

## 2.4 矿井水作用下常规离子浸出规律

矿井水具有较为复杂的溶液环境,对煤岩体的作用也变得更加复杂。探究矿井水作用下煤与矸石的常规离子释放情况,结果如图6所示。由图6可知,矿井水中主要的常规离子是 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ ,其次是 $\text{Si}^{4+}$ 、 $\text{K}^{+}$ 和 $\text{Na}^{+}$ , $\text{Al}^{3+}$ 含量较少,在矿井水与样品接触时, $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 呈现出急剧下降的趋势,在10~20 d时达到稳定,随后开始升高,在浸泡时间达到40 d时达到稳定;矿井水作用下煤释放的 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 同样远超过矸石;通过图6(b)可以看出,矿井水作用下, $\text{K}^{+}$ 随浸泡时间变化的趋势不大,受样品组成成分影响较小;矸石存在条件下, $\text{Na}^{+}$ 浸出量增加,受煤的影响较小; $\text{Si}^{4+}$ 质量浓度变化曲线显示矿井水与煤作用下 $\text{Si}^{4+}$ 质量浓度呈现出随着浸泡时间持续增加的趋势,且浸出质量浓度总体上超过矿井水与矸石作用结果,煤+矸石样品与矿井水作用曲线变化趋势较为稳定,矿井水作用下矸石的存在抑制了煤 $\text{Si}^{4+}$ 释放。对于 $\text{Al}^{3+}$ ,煤浸泡液趋势较为稳定,矸石存在条件下 $\text{Al}^{3+}$ 浸出质量浓度明显增加,且随着矸石含量的增加而增加。总体来看,在浸泡前20 d,浸泡液的pH值升高, $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 质量浓度下降, $\text{K}^{+}$ 、 $\text{Na}^{+}$ 、 $\text{Si}^{4+}$ 和 $\text{Al}^{3+}$ 上升,并且变化趋势直接受到矸石含量的影响。

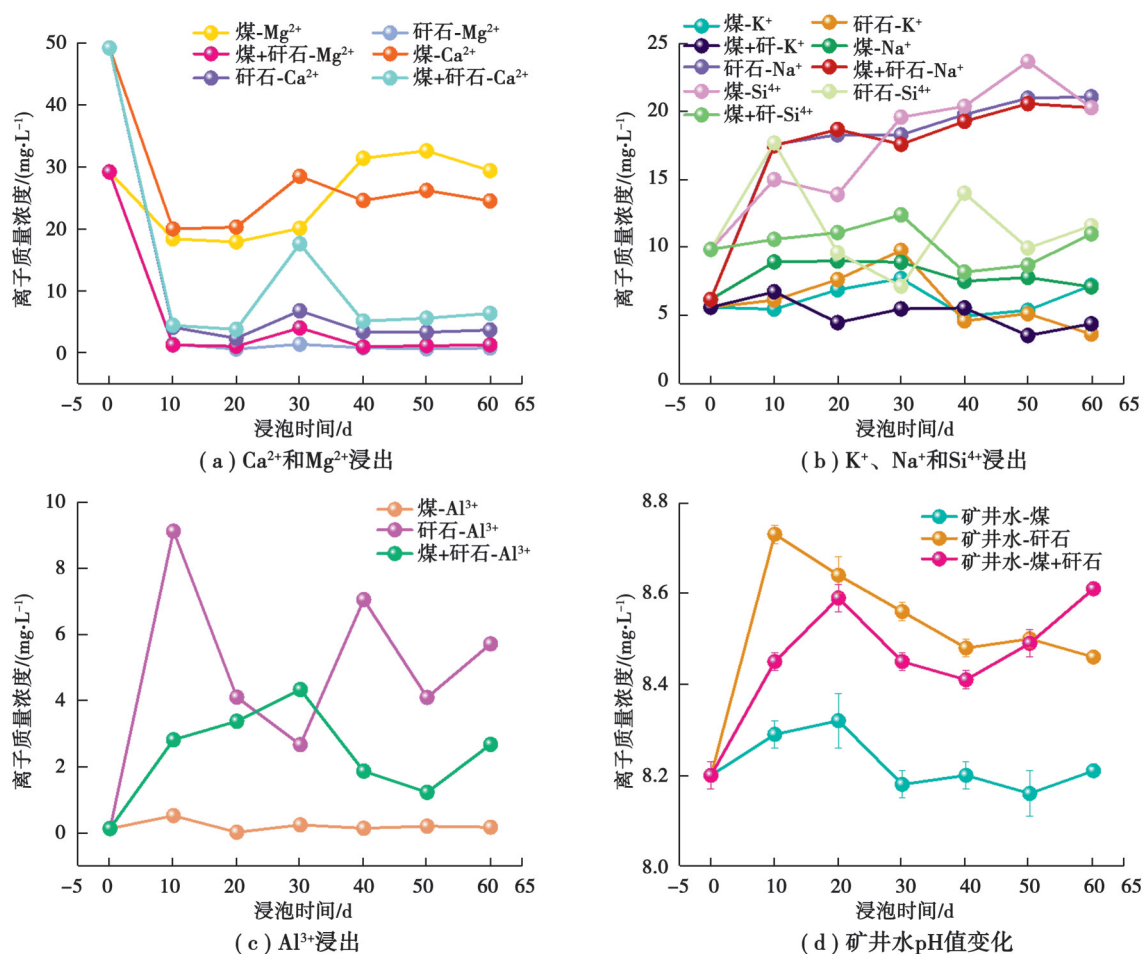


图6 矿井水浸泡煤与矸石常规离子释放情况

Fig. 6 Release of conventional ions from coal and gangue leached with mine water

## 2.5 不同溶液环境与煤岩体作用下常规离子浸出规律

将矿井水浸泡与去离子水浸泡情况进行对比(见图7),可以发现两者在pH变化和离子释放规律方面既有相同之处,也有因初始溶液环境差异而产生的不同特点。从图7(a)可见,2种溶液环境大部分在浸泡前20 d时pH呈现出上升的趋势,随后开始下降,在浸泡30~60 d时,矿井水浸泡液的pH呈现稳定趋势,去离子水浸泡还存在较明显的变化趋势,表明初始溶液环境直接影响浸泡液稳定的时间;从图7(b)可见,变化趋势特别明显的有3条曲线分别是去离子水浸泡矸石浸泡液的 $\text{K}^{+}$ 变化、矿井水浸泡 $\text{Na}^{+}$ 与矿井水浸泡煤+矸石 $\text{Na}^{+}$ 质量

浓度,其他曲线虽然也存在波动但相对较小;从图 7(c)可见,无论是矿井水还是去离子水浸泡,Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>离子较高的溶液均含有煤,可以得出矿井水中的 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>主要是由煤贡献,受浸泡液的初始环境影响较小;根据图 7(d),去离子水浸泡初期矽石释放 Al<sup>3+</sup>、Si<sup>4+</sup>远远高于矿井水作用,随着浸泡时间的增加至 60 d 时,Al<sup>3+</sup>、Si<sup>4+</sup>与矿井水作用矽石释放结果相差不大。主要原因为,矿物质浸没溶液中后表面通常会带上电荷如高岭石表面带负电荷,溶液中的反电荷离子会吸附在相反电荷的物质表面<sup>[19]</sup>,形成双电层。出现在带电界面的对离子被发现对界面水分子间的氢键强度有影响或者与基底表面有一个强烈的直接作用<sup>[20]</sup>。在一段时间内,溶液中的离子浓度极低的时候矿物质主要以电离/水解为主,溶液中的离子质量浓度较高时,强化影响界面水分子间的氢键强度或与基底表面作用,电离/水解作用强于其他作用。

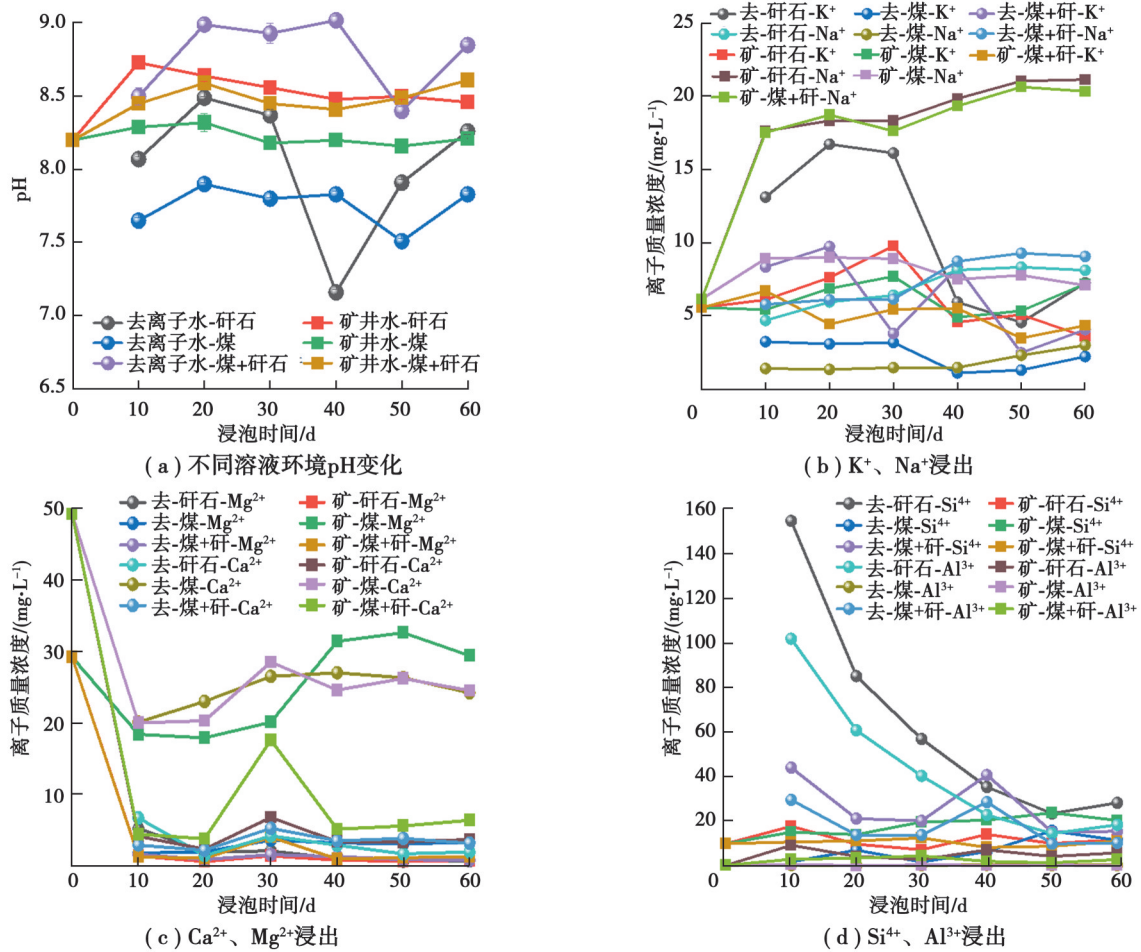


图 7 不同溶液环境与煤岩体作用下常规离子浸出规律

Fig. 7 Variations in conventional ion leaching in the presence of coal under different aqueous conditions

### 3 结论

研究了平顶山矿区煤与矽石在不同粒径和溶液环境等条件下的常规阳离子释放规律及其对矿井水化学性质的影响,对矿井水处理技术的研发具有重要意义,得到结论如下:

1)不同粒径的矽石和煤对离子释放和 pH 值的影响显著,随着矽石粒径的减小,其比表面积增大,铝硅酸盐类矿物的水解反应增强,使得溶液中常规离子释放量增多,煤的尺寸越小,其浸泡液的 pH 变化越大,稳定性越差。

2)矽石主要提供 Si<sup>4+</sup>、Al<sup>3+</sup>,2 种离子质量浓度随着矽石含量的增加而增加;而煤主要贡献 Ca<sup>2+</sup>,且矽石的存在会抑制 Ca<sup>2+</sup>的释放。对于 K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>,煤和矽石的浸出量均较小,但随着矽石含量的增加,K<sup>+</sup>的浸出量

有明显增加的趋势。

3) 矿井水中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  质量浓度主要受煤的影响, 而  $\text{K}^{+}$ 、 $\text{Na}^{+}$  质量浓度受矸石含量和样品组成的影响较大; 矿井水与煤、矸石分别作用后, 矿井水中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  质量浓度下降,  $\text{K}^{+}$ 、 $\text{Na}^{+}$  质量浓度升高, 矿井水长期与煤岩体相互作用一定程度上导致了矿井水 TDS 的升高。此外, 去离子水浸泡初期矸石释放  $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Si}^{4+}$  的速率高于矿井水作用, 但在长期浸泡后两者的结果趋于接近。

## 参考文献

- [ 1 ] 孙亚军, 张莉, 徐智敏, 等. 煤矿区矿井水水质形成与演化的多场作用机制及研究进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 423-437.  
Sun Y J, Zhang L, Xu Z M, et al. Multi-field action mechanism and research progress of coal mine water quality formation and evolution[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 423-437. (in Chinese)
- [ 2 ] 孙亚军, 郭娟, 徐智敏, 等. 我国煤矿区矿井水水质空间分布特征及矿井水处理技术思路[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 584-599.  
Sun Y J, Guo J, Xu Z M, et al. Spatial distribution characteristics of mine water quality in coal mining areas of China and technological approaches for mine water treatment[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 584-599. (in Chinese)
- [ 3 ] 顾大钊, 李井峰, 曹志国, 等. 我国煤矿矿井水保护利用发展战略与工程科技[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3079-3089.  
Gu D Z, Li J F, Cao Z G, et al. Technology and engineering development strategy of water protection and utilization of coal mine in China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3079-3089. (in Chinese)
- [ 4 ] 孙文洁, 任顺利, 武强, 等. 新常态下我国煤矿废弃矿井水污染防治与资源化综合利用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2161-2169.  
Sun W J, Ren S L, Wu Q, et al. Waterpollution's prevention and comprehensive utilization of abandoned coal mines in China under the new normal life[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2161-2169. (in Chinese)
- [ 5 ] 何绪文, 张晓航, 李福勤, 等. 煤矿矿井水资源化综合利用体系与技术创新[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(9): 4-11.  
He X W, Zhang X H, Li F Q, et al. Comprehensive utilization system and technical innovation of coal mine water resources[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(9): 4-11. (in Chinese)
- [ 6 ] 郭强, 宋喜东, 虎晓龙, 等. 高矿化度矿井水井下深度处理与浓盐水封存技术研究[J]. 煤炭工程, 2020, 52(12): 16-19.  
Guo Q, Song X D, Hu X L, et al. Treatment of high salinity mine water and storage of concentrated brine[J]. Coal Engineering, 2020, 52(12): 16-19. (in Chinese)
- [ 7 ] 王晓芃. 宁东地区煤矿矿井水处理分析[J]. 工程技术研究, 2022, 7(21): 7-9.  
Wang X P. Analysis of coal mine water treatment in ningdong area[J]. Engineering and Technological Research, 2022, 7(21): 7-9. (in Chinese)
- [ 8 ] Shabalala A N, Ekolu S O. Assessment of the suitability of mine water treated with pervious concrete for irrigation use[J]. Mine Water and the Environment, 2019, 38(4): 798-807.
- [ 9 ] 龙涛, 王珍, 杨玮, 等. 高矿化度矿井水脱盐技术应用现状及研究进展[J]. 水处理技术, 2023, 49(5): 11-16, 25.  
Long T, Wang Z, Yang W, et al. Research progress of high salinity mine water desalination technology[J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(5): 11-16, 25. (in Chinese)
- [ 10 ] Gutiérrez Ruiz S, López-Ramírez J A, Hassani Zerrouk M, et al. Study of reverse osmosis membranes fouling by inorganic salts and colloidal particles during seawater desalination[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2020, 28(3): 733-742.
- [ 11 ] 慕好凯. 灵新煤矿高矿化度矿井水矸石吸附净化机制[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2024.  
Mu H K. The adsorption and purification mechanism of high mineralized mine water gangue in Lingxin coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2024. (in Chinese)
- [ 12 ] 赵先鸣. 煤矿采空区积水水质演化的多场作用机制[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.  
Zhao X M. Multi-field mechanism of water quality evolution in coal mine goaf[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023. (in Chinese)
- [ 13 ] 唐春雷. 煤矿酸性矿井水水文地球化学演化特征及其岩溶环境效应[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.  
Tang C L. Hydrogeochemical evolution characteristics of acid mine drainage in coal mine and its effect on karst environment[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2023. (in Chinese)

- [14] 王昱同. 神东矿区矿井水水化学特征及演化规律研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2023.  
Wang Y T. Hydrochemical characteristics and evolution rules of mine water in Shendong mining area China[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2023. (in Chinese)
- [15] 魏中林. 典型煤矿闭坑前后矿井水化学演化规律与污染风险评价[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2023.  
Wei Z L. Chemical evolution law of mine water and pollution risk assessment before and after typical coal mine closure[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2023. (in Chinese)
- [16] 安文博, 王来贵, 杨建林, 等. 有机/酸复合溶液化学作用下低煤阶煤体破坏微观机制研究[J]. 实验力学, 2018, 33(6): 969-978.  
An W B, Wang L G, Yang J L, et al. Study on destruction micro-mechanism of low rank coal mass subjected to chemical action of organic/acid compound solution[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(6): 969-978. (in Chinese)
- [17] Han P H, Zhao Y X, Zhang C, et al. Progressive damage characteristic and microscopic weakening mechanism of coal under long-term soaking[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(11): 7861-7881.
- [18] 慕鑫, 李广明, 张呈呈, 等. 利用工业固废制备轻质耐火材料及其冶金应用现状[J]. 钢铁研究学报, 2024, 36(10): 1267-1274.  
Mu X, Li G M, Zhang C C, et al. Current status of lightweight refractories prepared from industrial solid wastes and their metallurgical applications[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2024, 36(10): 1267-1274. (in Chinese)
- [19] 秦利鸿. 磷酸钙矿物-有机酸溶液界面的纳米级溶解反应动力学及机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.  
Qin L H. The kinetics and mechanisms for nanoscale dissolution at the calcium phosphate-organic acid solution interface[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [20] Nihonyanagi S, Yamaguchi S, Tahara T. Counterion effect on interfacial water at charged interfaces and its relevance to the Hofmeister series[J]. Journal of the American Chemical Society, 2014, 136(17): 6155-6158.

(编辑 郑洁)