

金属离子对蒙脱石颗粒水化作用影响及机理

杨咏莉, 程伟, 黄雯昊

(贵州大学矿业学院, 喀斯特地区优势矿产资源高效利用国家地方联合工程实验室, 贵州省非金属矿产资源综合利用重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 这是一篇矿业工程领域的论文。蒙脱石是对煤泥水沉降影响显著的黏土矿物, 其表面带电和易发生水化作用等特性阻碍颗粒间的聚团, 使悬浮液保持分散性, 恶化煤泥水沉降。基于沉降实验, 考查了煤泥水中常见金属离子 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 及 Al^{3+} 对蒙脱石沉降特性的影响, 并采用微量热仪、Zeta 电位分析仪及红外光谱仪等表征手段揭示金属离子对蒙脱石水化作用及沉降行为的影响机理。结果表明, 与 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 相比, 蒙脱石悬浮液或含蒙脱石煤泥水在加入 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 后, 可获得较小的沉降压缩层体积和上清液浊度, 沉降效果较好。机理分析表明, 加入金属离子可压缩蒙脱石表面双电层厚度, 抑制蒙脱石水化作用, 有利于蒙脱石聚团沉降。研究结果对处理含蒙脱石煤泥水具有一定指导意义。

关键词: 矿业工程; 蒙脱石; 煤泥水; 水化作用; Zeta 电位分析; 微量热仪

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.03.006

中图分类号: TD951 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 03-0037-06

引用格式: 杨咏莉, 程伟, 黄雯昊. 金属离子对蒙脱石颗粒水化作用影响及机理[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(3): 37-42.

YANG Yongli, CHENG Wei, HUANG Wenhao. Effect of metal cations on hydration of montmorillonite and its mechanism[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(3): 37-42.

煤泥水是湿法选煤的工业废水, 煤泥水高效沉降对其闭路循环与回用十分关键^[1]。2020年末, 我国原煤入洗率已达到 74.1%^[2], 煤泥水处理系统能力不足、处理成本高等问题日益凸显。此外, 煤炭开采地质条件趋于复杂以及采煤过程机械化水平提高, 原煤中矿物含量增大, 尤其是黏土矿物(表面具有强亲水性和负电性), 在选煤过程中极易泥化, 形成稳定的胶体体系, 导致煤泥水难以沉降^[3]。蒙脱石是对煤泥水沉降影响显著的黏土矿物之一, 其水化膨胀后颗粒表面形成水化膜, 使颗粒间产生较强的水化排斥作用力, 阻碍颗粒接触, 恶化煤泥水沉降^[4]。

针对煤泥水中蒙脱石难沉降问题, 前人研究了不同金属离子对蒙脱石水化作用的影响^[5-6], 主

要针对单一金属离子对蒙脱石水化作用的影响研究, 有关煤泥水体系中多种金属离子对蒙脱石水化作用的影响以及蒙脱石水化作用对煤泥水沉降特性的影响机理研究还不够深入。

本文采用微量热仪、Zeta 电位分析及红外光谱等表征手段, 研究煤泥水中常见金属离子 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 及 Al^{3+} 对蒙脱石水化作用及沉降特性的影响, 探索蒙脱石颗粒表面水化作用机理。

1 试样性质与实验方法

1.1 试样性质

实验煤样采自贵州六盘水煤田土城煤矿 17#煤层, 原煤灰分为 29.87%, 破碎过筛得到粒度小于 0.5 mm 的煤样, 然后在密度为 1.5 g/cm 的氯化锌

收稿日期: 2022-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41802190); 贵州省科学技术基金(黔科合J字[2015]2048号)

作者简介: 杨咏莉(1996-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为洁净煤技术。

通信作者: 程伟(1983-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为洁净煤技术与煤地球化学。

重液中进行浮沉分级。浮煤经清洗、烘干再经研磨和筛分得到灰分为 4.09%、粒度为-0.045 mm 的试样。经激光粒度仪 (LS13 320) 分析, 得到该试样的粒度范围为 0.87~176.93 μm , 中值半径 d_{50} 为 9.04 μm , 累计产率达到 90% 所对应的粒度为 40.24 μm (图 1)。

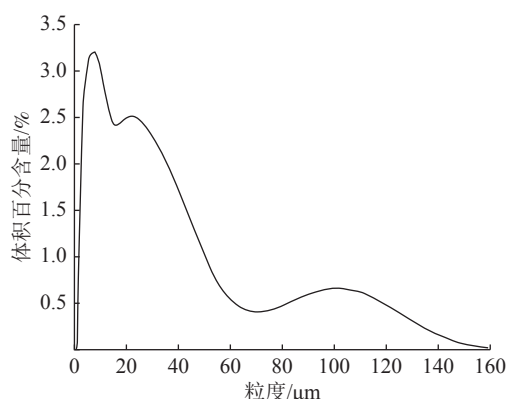


图 1 煤样的粒度组成

Fig.1 Particle size distribution of the coal sample

蒙脱石试样为钠基蒙脱石, X 射线衍射 (XRD) 分析表明试样中含蒙脱石和少量石英 (图 2), 通过半定量分析可知其中蒙脱石矿物含量为 97%。经激光粒度仪测得蒙脱石试样粒度在 1.38~63.41 μm 之间, 其 d_{50} 为 8.89 μm , 且粒度小于 29.30 μm 的含量为 90% (图 3)。对蒙脱石试样进行 X 射线荧光光谱 (XRF) 分析, 得到主

要化学成分结果见表 1。

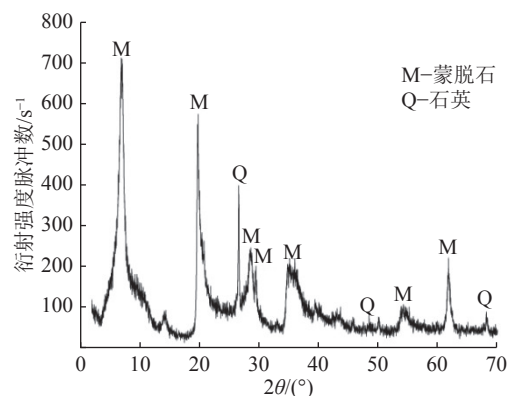


图 2 蒙脱石试样的 XRD

Fig.2 XRD pattern of the montmorillonite sample

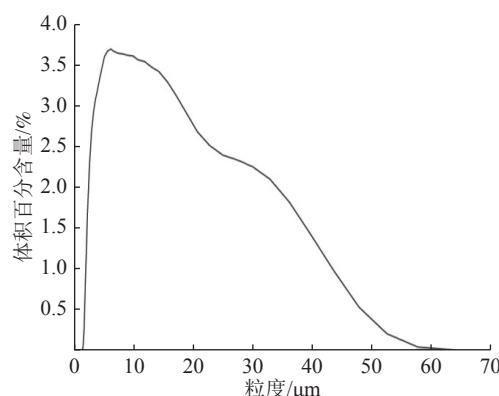


图 3 蒙脱石试样的粒度分布

Fig.3 Particle size distribution of the montmorillonite sample

表 1 蒙脱石试样的主要化学成分/%

Table 1 Chemical composition of the montmorillonite sample

Al ₂ O ₃	BaO	CaO	Cr ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	SO ₃	SrO	TiO ₂	LOI
16.01	0.01	2.94	<0.01	4.89	0.21	5.00	0.03	3.24	0.03	59.41	0.01	0.02	0.32	7.73

1.2 实验方法

1.2.1 沉降实验

分别用去离子水与蒙脱石或煤样-蒙脱石混合试样 (蒙脱石 20%) 配制成一定浓度的蒙脱石悬浮液和模拟煤泥水。用 NaCl、KCl、MgCl₂、CaCl₂、AlCl₃ 和去离子水配制不同浓度的金属离子溶液。用稀释的 NaOH、HCl 溶液调整蒙脱石悬浮液和煤泥水的 pH 值。沉降实验方法如下: 将 240 mL 配制好的蒙脱石悬浮液或煤泥水分别倒入烧杯中, 加入 10 mL 含有不同金属离子的溶液, 用磁力搅拌器搅拌均匀后迅速转移至 250 mL 量筒, 自然沉降 2 h 后记录压缩层体积并用浊度仪 (HACH-2100Q) 测量澄清液浊度。澄清液浊度可

以表征悬浮液中固体颗粒的分散性, 浊度越大, 颗粒的分散性越好, 越容易形成稳定的悬浮液^[7]。

1.2.2 分析与表征

取沉降实验后得到的蒙脱石压缩层进行过滤, 在 80 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干后, 再将样品放入超声波清洗机中清洗 10 min, 得到分散均匀的蒙脱石悬浮液。取 3 mL 悬浮液, 采用 Zeta 电位及纳米粒径分析仪 (DelsaNano C) 测定其 Zeta 电位。在微量热仪 (C80, SETARAM) 样品池下部舱室加入 40 mg 蒙脱石并封闭, 上部舱室加入 2.5 mL 含有不同金属离子的溶液。在热流和体系温度 30 $^{\circ}\text{C}$ 条件下平衡 2 h 后使溶液与蒙脱石混合。对扣除基线的热流曲线积分, 得到不同离子下蒙脱石水化反应热

结果^[8]。将蒙脱石样品与 KBr 按照 100:1 的比例进行压片,采用傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR) 研究不同溶液离子种类、浓度下蒙脱石表面官能团组成以及化学成分^[9]。

2 结果与分析

2.1 pH 值对蒙脱石沉降的影响

将 6 份蒙脱石悬浮液的 pH 值分别调整为 4、5、6、7、8、9,沉降实验结果表明,不同 pH 值下的溶液均较为浑浊,蒙脱石分散在溶液中,少量沉降,压缩层体积变化不明显。随着 pH 值的增大,上清液浊度呈现上升趋势 (图 4)。pH 值为 9 时,上清液浊度大于 1000 NTU,说明随 pH 值的增大,蒙脱石悬浮液逐渐呈现良好的稳定性。为了减少 pH 值可能会影响金属离子的沉淀或水解,选择在初始 pH 值为 5 的条件下进行沉降实验。

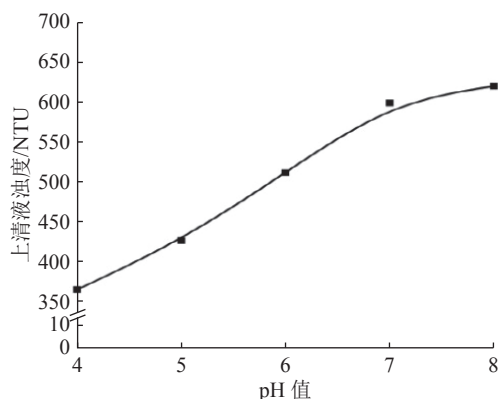


图 4 不同 pH 值对蒙脱石沉降后上清液浊度的影响

Fig.4 Effect of different pH values on the turbidity of the supernatant after montmorillonite sedimentation

2.2 金属离子对蒙脱石沉降的影响

2.2.1 金属离子种类

配制离子浓度为 10 mmol/L 的 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 溶液各 10 mL,分别加入到 5 份 240 mL 蒙脱石悬浮液中,调节初始 pH 值为 5,进行沉降实验。由图 5 可知,蒙脱石在不同金属离子溶液中的压缩层体积大小顺序为: $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Al}^{3+}$,其中加入 Al^{3+} 和 Ca^{2+} 的压缩层体积较小,分别为 52、56 mL。从上清液浊度看,蒙脱石悬浮液的澄清效果优劣顺序为: $\text{Al}^{3+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$,加入 Al^{3+} 的澄清效果较好,在 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 条件下的上清液浊度分别为 1.42、1.56 NTU。因此,在加入 Al^{3+} 和 Ca^{2+} 溶液的条件下蒙脱石沉降效果较佳。

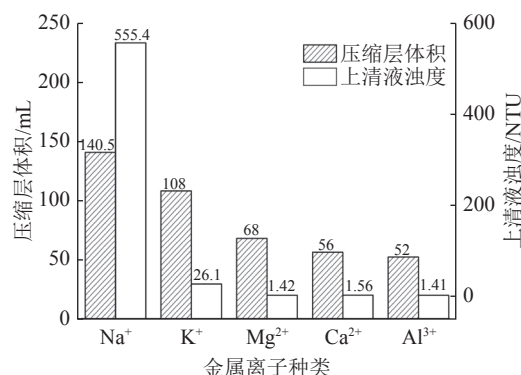


图 5 不同金属离子对蒙脱石沉降的影响

Fig.5 Effect of different metal cations on the sedimentation of montmorillonite

2.2.2 金属离子浓度

分别向 240 mL 蒙脱石悬浮液中加入 10 mL 浓度为 0、5、10、15、20、25、30 mmol/L 的 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 溶液,调节初始 pH 值为 5。结果发现,不加入金属离子的蒙脱石悬浮液较为浑浊,蒙脱石分散在溶液中,浊度大于 1000 NTU。由图 6 可知,随着 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 浓度增加,压缩层体积先增大后减小,在浓度为 20 mmol/L 后压缩层体积变化趋于平稳。相同金属离子浓度下,加入 Al^{3+} 蒙脱石沉降效果比 Ca^{2+} 溶液好,上清液浊度也较低。但是,离子浓度 10 mmol/L 以上时二者的浊度相差较小。随离子浓度增加,蒙脱石悬浮液的上清液浊度呈下降趋势,蒙脱石沉降效果较好。

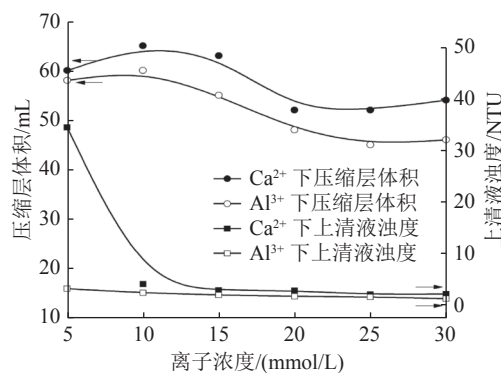


图 6 不同 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 浓度对蒙脱石沉降的影响

Fig.6 Effect of different Ca^{2+} and Al^{3+} concentrations on the sedimentation of montmorillonite

2.3 金属离子对含蒙脱石煤泥水沉降的影响

用去离子水与煤样-蒙脱石混合试样 (蒙脱石质量占比为 20%) 浓度为 10 g/L 的模拟煤泥水 6 份,分别加入 10 mL 离子浓度为 10 mmol/L 的 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 以及去离子水 (对照组),调节初始 pH 值为 5。结果表明,未添加金

属离子的煤泥水中蒙脱石与煤颗粒分散稳定, 未见明显的压缩层, 其上清液浊度大于 1000 NTU。由图 7 可知, 含蒙脱石煤泥水在添加不同金属离子后压缩层体积大小顺序为: $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Al}^{3+}$, 加入 Al^{3+} 压缩层体积较小, 加入 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 压缩层体积分别是 30、29 mL。从上清液浊度看, 含蒙脱石煤泥水的澄清效果优劣顺序为: $\text{Al}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ 。因此, 在含蒙脱石煤泥水中加入 Al^{3+} 对促进其沉降效果较好。以上结果与蒙脱石悬浮液沉降实验结果基本一致, 说明金属离子对蒙脱石沉降的影响规律同样适用于含蒙脱石煤泥水沉降。同时也表明在含蒙脱石煤泥水的沉降过程中, 对沉降特性具有主要影响的是蒙脱石颗粒。

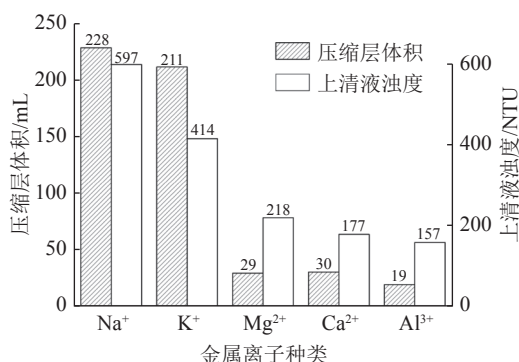


图 7 不同金属离子对含蒙脱石煤泥水沉降的影响
Fig.7 Effect of different metal cations on the sedimentation of coal-montmorillonite slurry

2.4 机理分析

2.4.1 Zeta 电位分析

由 Zeta 电位及纳米粒径分析仪测得不同金属离子对蒙脱石 Zeta 电位的影响见图 8。加入金属离子后蒙脱石的 Zeta 电位大小顺序为: $\text{Al}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ 。不同金属离子相比, Na^+ 溶液蒙脱石 Zeta 电位较低, 为 -23.83 mV, Al^{3+} 溶液 Zeta 电位较高, 为 -12.03 mV。不同 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 浓度下蒙脱石产生的 Zeta 电位见图 9, 在未加入金属离子时, 蒙脱石的 Zeta 电位较低, 为 -31.04 mV。相同金属离子浓度下, Ca^{2+} 溶液中蒙脱石的 Zeta 电位均低于 Al^{3+} 溶液。随着 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 浓度的增加, 其 Zeta 电位呈上升趋势, 在离子浓度 10 mmol/L 后趋于平稳。

综合分析上述蒙脱石沉降实验结果, 随着金属离子浓度的增加, Zeta 电位的绝对值减小, 颗粒之间距离减小, 促进蒙脱石颗粒的聚团沉降。

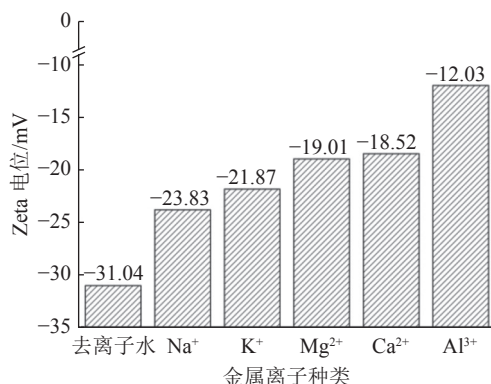


图 8 不同金属离子对蒙脱石 Zeta 电位的影响
Fig.8 Effect of addition of different metal cations on the Zeta potential of montmorillonite

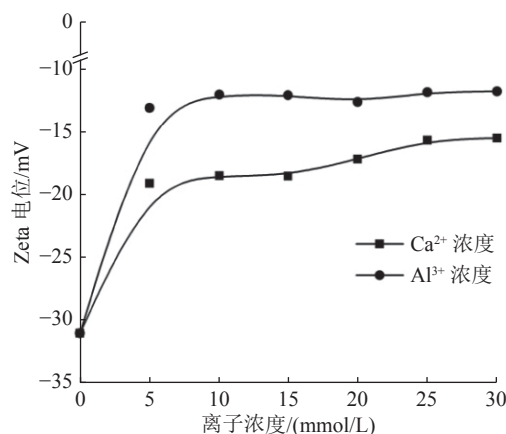


图 9 不同 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 浓度对蒙脱石 Zeta 电位的影响
Fig.9 Effect of the concentration of Ca^{2+} and Al^{3+} on Zeta potential of montmorillonite

蒙脱石表面负电性强, 静电斥力大, 使蒙脱石颗粒之间保持分散状态。根据 DLVO 理论以及凝聚理论, 蒙脱石加入带有正电荷的离子后, 打破颗粒之间原有平衡, 中和一部分负电荷, 减小蒙脱石表面的负电性, 进而压缩双电层, 使颗粒之间距离减小, 蒙脱石凝聚成团沉降。有研究表明, Na^+ 和 K^+ 主要通过压缩蒙脱石颗粒表面的双电层厚度和去质子化作用改变其表面的 Zeta 电位, Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 则通过压缩双电层和在蒙脱石颗粒表面形成特性吸附来降低颗粒表面的 Zeta 电位^[10]。 Al^{3+} 作为蒙脱石双电层的定位离子, 与蒙脱石表面的羟基反应生成羟基化合物, 导致颗粒表面 Zeta 电位降低^[11]。当蒙脱石颗粒表面的总电荷量一定时, 可能由于 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 带的正电荷多, 蒙脱石表面被金属离子中和的电荷量较多, 使 Zeta 电位的绝对值减小, 导致双电层厚度减小, 而 Na^+ 、 K^+ 带的正电荷较少, 蒙脱石表面被金

属离子中和的电量少，蒙脱石表面的 Zeta 电位高，对双电层的压缩影响较小。

2.4.2 水化反应热分析

反应热的大小，反映蒙脱石表面吸附金属离子和离子交换的趋势及蒙脱石水化作用的程度。由表 2 可知，蒙脱石与金属离子反应是放热过程。加入金属离子后，蒙脱石的放热量大于未加入金属离子时的放热量。蒙脱石在不同金属离子溶液中吸附热的大小顺序为： $\text{Ca}^{2+} > \text{Al}^{3+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ ，金属离子在溶液中不仅以离子的形式存在，还会与水分子形成络合物，水化离子有水解的趋势^[12]，随离子价态的升高，离子半径变大，水化半径变小^[13]，高价态金属离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 更容易吸附在蒙脱石表面，破坏水化膜的结构和稳定性，大幅度降低蒙脱石的水化作用，从而影响蒙脱石颗粒的沉降行为。

表 2 蒙脱石与不同金属离子溶液的反应热/(J/g)						
Table 2 Reaction heat of montmorillonite with different metal cations						
离子种类	去离子水	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Al^{3+}
反应热/(J/g)	-7.396	-10.915	-15.475	-16.404	-17.237	-16.546

2.4.3 红外光谱分析

蒙脱石的红外光谱测定结果见图 10-12 在波长为 1638、3435、3620 cm^{-1} 处存在羟基 ($-\text{OH}$) 产生的吸收峰，说明蒙脱石表面存在羟基官能团，导致蒙脱石具有亲水性，产生水化作用^[14]。

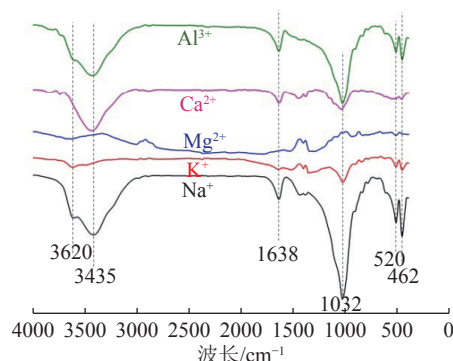


图 10 加入不同金属离子后蒙脱石的 FTIR
Fig.10 FTIR spectra of montmorillonite after adding different metal cations

由图 10 可知，加入 Na^+ 离子蒙脱石在波长 3435、3620 cm^{-1} 处是羟基伸缩振动峰，呈现较宽的吸收带；1638 cm^{-1} 处为羟基弯曲振动峰，吸收强度稍弱；1032 cm^{-1} 为 Si-O 伸缩振动峰，呈现尖锐的峰形，有较强的吸收强度。加入 K^+ 、 Mg^{2+} 离

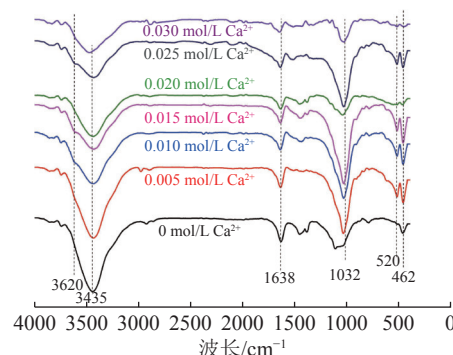


图 11 加入不同浓度 Ca^{2+} 后蒙脱石的 FTIR
Fig.11 FTIR spectra of montmorillonite with addition of different concentrations of Ca^{2+}

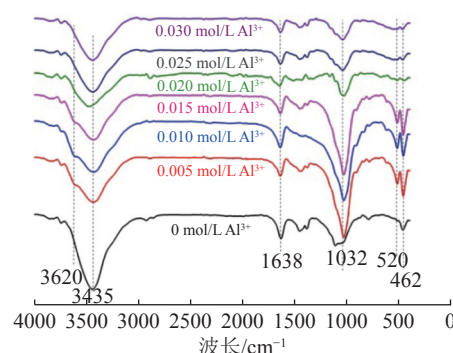


图 12 加入不同浓度 Al^{3+} 后蒙脱石的 FTIR
Fig.12 FTIR spectra of montmorillonite with addition of different concentrations of Al^{3+}

子的蒙脱石几处峰不明显。加入 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 离子的 FTIR 图谱可以看出，在波长 3620 cm^{-1} 处的羟基伸缩振动峰较 Na^+ 溶液下的强度减弱或者消失；3435 cm^{-1} 处的羟基伸缩振动峰，吸收带变窄，吸收强度减弱；在 1032 cm^{-1} 处的 Si-O 伸缩振动峰，吸收强度也呈减弱的趋势，说明 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 离子对蒙脱石的水化作用有较好的抑制效果。

加入不同浓度 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 后蒙脱石的红外光谱见图 11、12，不同离子浓度下 FTIR 图谱的峰形相似，特征略有不同。随着 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 浓度的增加，462、520 cm^{-1} 范围处的 Si-O 振动峰呈弱化或者消失的趋势，3435、3620 cm^{-1} 处的羟基伸缩振动峰和 1638 cm^{-1} 处的羟基弯曲振动峰的强度均呈逐渐减弱的趋势。说明随着 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 浓度的增加，蒙脱石的亲水性减弱，水化作用减弱，促进蒙脱石凝聚成团，从而有利于蒙脱石颗粒的聚团沉降。

3 结 论

(1) 蒙脱石悬浮液加入不同金属离子后压缩层体积大小顺序为： $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Al}^{3+}$ 。从

上清液浊度看, 蒙脱石悬浮液的澄清效果优劣顺序为: $\text{Al}^{3+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^{+} > \text{Na}^{+}$ 。因此, 蒙脱石在加入 Al^{3+} 和 Ca^{2+} 条件下沉降效果较佳, 该规律同样适用于含蒙脱石煤泥水。

(2) 蒙脱石颗粒表面具有负电性, 在蒙脱石悬浮液中加入金属离子, 减小蒙脱石表面的负电性, 压缩双电层, 使颗粒之间距离减小。

(3) 金属离子吸附在蒙脱石表面, 抑制蒙脱石的水化作用, 导致颗粒表面的亲水性减弱, 促进蒙脱石凝聚成团。

(4) 当蒙脱石颗粒表面的总电荷量一定时, 由于 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 带的正电荷较多, 蒙脱石表面被金属离子中和的电荷量较多, 且 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 的水化半径较小更容易吸附在蒙脱石表面, 减弱其亲水性, 更有利于蒙脱石颗粒沉降。

参考文献:

- [1] 王云飞, 李宏亮, 董宪姝, 等. 伊利石对煤泥水过滤机制的影响研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(4):202-208.
WANG Y F, LI H L, DONG X S, et al. Study on effect of illite on the filtration mechanism of coal slime water[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(4):202-208.
- [2] 张绍强. 统筹推进煤炭行业节能减碳, 积极应对碳达峰、碳中和挑战[J]. *煤炭加工与综合利用*, 2021(5):1-6.
ZHANG S Q. Coordinate and push industry energy-saving and carbon reduction, actively deal with carbon peak, and carbon neutrality challenge[J]. *Coal Processing & Comprehensive Utilization*, 2021(5):1-6.
- [3] 刘峰, 曹文君, 张建明, 等. 我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(1):1-15.
LIU F, CAO W J, ZHANG J M, et al. Current technological innovation, and development direction of the 14th Five-Year Plan period in China coal industry[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(1):1-15.
- [4] 陈嘉明. 四种粘土矿物在碱与硫酸盐复合激发下的矿物学变化研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
CHEN J M. Mineralogical changes of four clay minerals under the excitation of alkali and sulfate [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) 2020.
- [5] 刘国强, 刘文礼, 王东辉, 等. 蒙脱石水化膨胀抑制对煤泥水过滤的影响[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(S2):553-559.
LIU G Q, LIU W L, WANG D H, et al. Effect of hydration expansion inhibition of montmorillonite on sludgy water filtration[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(S2):553-559.
- [6] 陶源清, 颜克凤, 李小森, 等. 盐离子对蒙脱石水化膨胀特性的影响[J]. *过程工程学报*, 2020, 20(10):1182-1189.
TAO Y Q, YAN K F, LI X S, et al. Effects of salt ions on the hydration and expansion characteristics of montmorillonite[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2020, 20(10):1182-1189.
- [7] 徐东方, 武昊, 朱志波, 等. 蒙脱石与煤的异相凝聚机理[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(5):1284-1289.
XU D F, WU H, ZHU Z B, et al. Mechanism of hetero-aggregation of montmorillonite and coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(5):1284-1289.
- [8] 白英生. 典型物相转变过程的微量热研究初探[D]. 南京: 南京大学, 2020.
BAI Y S. Primary microcalorimetry study of typical phase transition process [D]. Nanjing: Nanjing University, 2020.
- [9] 吴伦. 基于原子力显微镜的煤粒表面水化膜和颗粒间相互作用力研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
WU L. Study on hydration film on coal surface and interaction force between particles based on AFM [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [10] 孙迎林, 闵凡飞, 陈晨, 等. 金属阳离子在煤泥颗粒表面上吸附机理研究现状[J]. *矿产综合利用*, 2015(1):14-17.
SUN Y L, MIN F F, CHEN C, et al. Research status about the adsorption characteristics of the metal cations of the coagulant in the coal slurry[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2015(1):14-17.
- [11] Eric Ferrage, Bruno Lanson, Boris A Sakharov, et al. Investigation of dioctahedral smectite hydration properties by modeling of X-ray diffraction profiles: Influence of layer charge and charge location[J]. *American Mineralogist*, 2015, 92(10).
- [12] 刘敏, 曹亦俊, 罗佳倩, 等. 金属阳离子对亲水颗粒间静电作用的影响[J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(3):442-448.
LIU M, CAO Y J, LUO J Q, et al. Effect of metal cations on the electrostatic interaction between hydrophilic particles[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(3):442-448.
- [13] 彭陈亮. 煤泥水中微细蒙脱石颗粒表面水化作用机理研究[D]. 合肥: 安徽理工大学, 2013.
PENG C L. Mechanism study on hydration of fine montmorillonite particles in coal slime water [D]. Hefei: Anhui University of Science & Technology(aust), 2013.
- [14] 郭旭颖, 邢经纬, 付赛欧, 等. Cr-Al、Fe-Al、La-Al 柱撑蒙脱石的制备及其吸附特性[J]. *中国粉体技术*, 2020, 26(5):22-27.
GUO X Y, XING J W, FU S O, et al. Preparation and adsorption properties of Cr-Al, Fe-Al and La-Al pillared montmorillonite[J]. *China Powder Science and Technology*, 2020, 26(5):22-27.

互联科技, 2016(7):3-4.

LUO F. Research on motion image detection algorithm based

on video surveillance[J]. *Wireless Interconnection Technology*,

2016(7):3-4.

Study on Separation of High Purity Mica Ore Based on Image Recognition

WANG Ziyue¹, ZHANG Yi¹, LI Xinghui², LI Jun², MOU Shaofan¹, LI Jianan¹

(1.School of Resource & Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;

2.Pamica Technology Co., Ltd., Xianning 437000, Hubei, China)

Abstract: This is an article in the field of process mineralogy. In order to solve the problem of color spot impurity sorting in high-purity mica, a sorting method of mica containing impurities based on image processing is proposed in this article. According to the state of color spot impurities of mica under different light sources, the influence of image illumination environment is studied. On this basis, the processing methods such as Gaussian filtering and Canny edge detection are studied. Finally, the image recognition and discrimination of mica ores are realized accurately, and good results are obtained in the recognition of three different types of mica ores.

Keywords: Process mineralogy; Mica; Defect detection; Image processing

////////////////////////////////////
(上接第 42 页)

Effect of Metal Cations on Hydration of Montmorillonite and its Mechanism

YANG Yongli, CHENG Wei, HUANG Wenhao

(College of Mining, Guizhou University, National & Local Joint Laboratory of Engineering for Effective Utilization of Regional Mineral Resources from Karst Areas, Guizhou Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Non-metallic Mineral Resources, Guiyang 550025, Guizhou, China)

Abstract: This is an article in the field of mining engineering. Montmorillonite is a kind of clay mineral which has significant impact on the sedimentation of coal slime water. Its charged surface and easy hydration hinder the mutual contact between particles, keeping the suspension stable dispersion and worsen the sedimentation of slime water. Based on sedimentation experiments, we studied the effects of common metal cations Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} and Al^{3+} on the sedimental characteristics of montmorillonite. Meanwhile, the mechanism of various metal cations in the hydration and sedimentation behavior of montmorillonite was investigated by using microcalorimeter, Zeta potential analyzer and infrared spectrometer. The experiment results show that, adding Al^{3+} and Ca^{2+} to montmorillonite suspension or montmorillonite-containing slime water can result into smaller sedimentation compressed layer and lower turbidity of the supernatant. So, Al^{3+} and Ca^{2+} show better performance in the sedimentation when compared with Na^+ , K^+ , Mg^{2+} . The mechanism analysis shows that metal cations compress the electric double layer on the surface of montmorillonite, thus inhibit the hydration of montmorillonite, and are conducive to the agglomeration and sedimentation of montmorillonite. The research results have scientific significance for the treatment of montmorillonite-containing coal slime water.

Keywords: Mining engineering; Montmorillonite; Coal slime water; Hydrated swelling; Zeta potential analyzer; Micro calorimeter