



甲基纤维素的应激反应及其对滑石浮选的影响

冯 博^{1,2}, 朱贤文¹, 彭金秀¹

(1. 江西理工大学 资源与环境工程学院, 赣州 341000;

2. 西部矿业股份有限公司 博士后科研工作站, 西宁 810000)

摘 要: 通过浮选试验、吸附试验及动电位测试, 研究不同温度下甲基纤维素在滑石表面的吸附行为, 考察温度对滑石表面已吸附的甲基纤维素抑制效果的影响。结果表明: 当温度较低时, 甲基纤维素溶解在水中, 通过疏水作用吸附在滑石表面, 吸附量较低, 对滑石的抑制效果较弱; 随着温度升高, 甲基纤维素从溶液中析出, 沉积在滑石表面, 吸附量较大, 抑制效果较强。已经吸附在滑石表面的甲基纤维素的抑制效果也受温度影响, 温度升高会导致吸附的甲基纤维素层的抑制效果减弱, 且这种变化是可逆的, 温度再降低会使甲基纤维素吸附层的抑制效果再次增强, 这是由于温度较低时滑石表面吸附的甲基纤维素通过羟基与水分子形成氢键而结合, 导致矿物表面亲水性较强, 从而对滑石产生较强的抑制作用; 当温度升高时, 甲基纤维素分子失去结合水, 含水量降低, 对滑石抑制效果减弱。

关键词: 滑石; 浮选; 温度; 甲基纤维素; 应激反应

文章编号: 1004-0609(2017)-05-1031-06

中图分类号: TD952

文献标志码: A

滑石是一种具有层状构造的含镁硅酸盐矿物, 化学式为 $\text{Mg}_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$, 理论组成为 MgO 31.72%、 SiO_2 63.12%、 H_2O 4.76%, 但晶格中的 Mg 常被 Fe 、 Mn 、 Ni 、 Al 等所取代, 从而形成不同成分的滑石^[1]。滑石是硫化铜镍矿、辉钼矿等矿石中常见的脉石矿物^[2-4], 硫化铜镍矿和辉钼矿矿石一般采用浮选方法进行富集, 在浮选过程中滑石容易上浮进入精矿, 导致精矿中 MgO 含量升高, 给后续冶炼过程造成影响^[5-7]。因此, 实现滑石的高效抑制是实现硫化铜镍矿物与滑石分离的关键。常用的滑石抑制剂主要是高分子化合物, 如古尔胶、淀粉和羧甲基纤维素等^[8-11]。

高分子化合物中有一类被称为应激高分子化合物十分特殊, 化合物能够对外界环境的变化产生反应。如壳聚糖、羧甲基纤维素, 它们能够随溶液 pH 的变化而改变自身形态及亲水疏水性能^[12-13]; 而聚 N 乙烯丙烯酰胺能够随温度的变化改变自身形态及疏水亲水性能^[14]。当这类高分子化合物吸附在物质表面后, 就会使物质表面的亲水疏水性能随外界环境变化而变化。矿物浮选是利用矿物表面亲水疏水性质的变化实现的, 因此, 近年来选矿工作者开始使用应激高分子

化合物来实现对矿物的浮选或抑制^[15-17]。

甲基纤维素是一种白色纤维状或颗粒状粉末, 无臭、无味, 其在 80~90 °C 的热水中能够迅速分散、溶胀, 降温后迅速溶解。甲基纤维素也是一种具有应激性的高分子化合物, 其在溶液中的形态会随温度的变化而改变^[18]。甲基纤维素在许多工业领域得到应用^[19-21], 但对其在矿物浮选领域的应用却研究较少。本文作者通过浮选实验、溶解试验、吸附量测试及动电位测量, 研究甲基纤维素的应激反应及对滑石浮选的影响, 并考察其作用机理, 为促进滑石的抑制提供理论支撑。

1 实验

1.1 矿物样品与试剂

试验所用滑石取自辽宁海城, 挑选纯度较高的块矿用瓷球磨磨细, 经过筛分后得到各个粒级的单矿物样品, X 衍射和化学分析结果表明其纯度为 99%(见图 1 和表 1)。本试验中所用甲基纤维素购买自上海思域

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51404109); 中国博士后科学基金资助项目(2015M582759XB); 江西理工大学清江青年英才支持计划资助项目

收稿日期: 2016-03-11; **修订日期:** 2016-09-30

通信作者: 冯 博, 副教授, 博士; 电话: 18270767369; E-mail: fengbo319@163.com

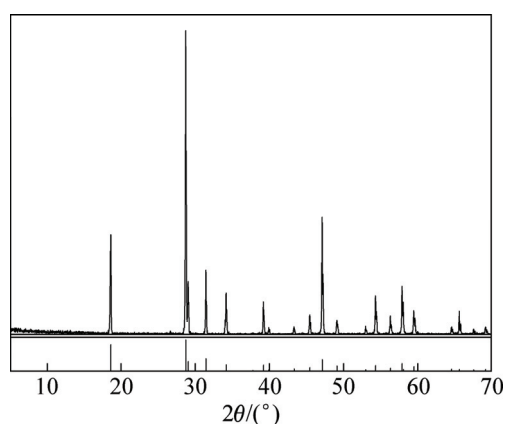


图1 滑石的XRD谱

Fig. 1 XRD pattern of talc

表1 滑石化学组成

Table 1 Chemical composition of talc (mass fraction, %)

Fe _t	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO
0.56	30.39	63.05	—	—

Fe_t is total Fe content.

化工有限公司, 为分析纯; 实验用水为蒸馏水。

1.2 浮选实验

称取 2 g 滑石样品放入浮选槽中, 加入 40 mL 蒸馏水搅拌均匀, 利用水浴锅将浮选槽中的矿浆加热到实验要求的温度, 加入浮选药剂搅拌调浆后插入挡板充气浮选, 浮选时间 3 min, 将精矿、尾矿分别过滤、称量, 计算产率, 即为浮选回收率。

1.3 吸附量实验

利用残余浓度法测量不同温度条件下甲基纤维素在滑石表面的吸附量, 测试仪器为总有机碳分析仪 (TOC)。首先测量不同浓度甲基纤维素对应的有机碳含量, 绘制甲基纤维素浓度和有机碳含量的关系曲线。称取 1.0 g 滑石样品放入烧杯中, 按实验要求加入一定浓度的甲基纤维素溶液, 在不同温度条件下搅拌调浆后取上层液体在高速离心机中离心处理 10 min, 将离心所得的上层清液进行总有机碳含量分析。

1.4 动电位测试

将滑石磨细到粒度小于 2 μm, 称取 100 mg 滑石放入容积为 250 mL 的烧杯中, 加入蒸馏水 100 mL 及实验药剂, 调节矿浆 pH 值为 9, 用水浴锅将矿浆加热到不同温度后搅拌 5 min, 使用 Zeta 电位仪测量滑石的 Zeta 电位。

2 结果与分析

2.1 温度对滑石表面甲基纤维素吸附行为的影响

图 2 所示为有无甲基纤维素时不同温度条件下滑石颗粒的浮选行为。由图 2 可知, 温度对滑石的浮选影响较小, 随温度升高, 滑石浮选回收率变化不大。甲基纤维素的抑制效果受温度影响较大, 随温度升高, 滑石浮选回收率逐渐降低; 当温度达到 55 °C 时, 滑石浮选回收率达到最低; 温度继续升高, 实验过程中可见甲基纤维素的存在使矿浆产生大量泡沫, 由于泡沫夹带导致滑石浮选回收率升高。

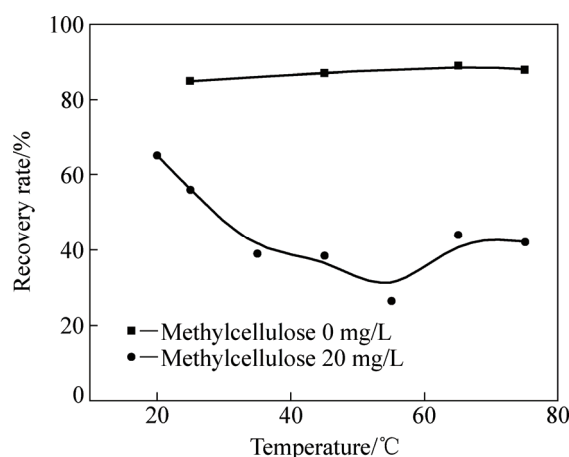


图2 不同温度条件下甲基纤维素对滑石浮选的影响

Fig. 2 Effect of methylcellulose on talc flotation at different temperatures (MIBC concentration of 1×10^{-4} mol/L, pH=9)

图 3 所示为不同温度条件下甲基纤维素的溶解行为。由图 3 可知, 温度较低时, 甲基纤维素完全溶解在水中, 随温度升高, 甲基纤维素从溶液中析出, 导致溶液出现浑浊, 温度越高溶液越浑浊。

图 4 所示为不同温度下甲基纤维素在滑石表面的吸附行为。由图 4 可知, 甲基纤维素在滑石表面发生了吸附, 其吸附量随加入量增加而增加。温度对甲基纤维素的吸附影响较大, 65 °C 时甲基纤维素的吸附量显著高于 25 °C 时的吸附量。

图 5 所示为不同温度条件下甲基纤维素对滑石表面电位的影响。由图 5 可知, 不同温度下滑石表面电位差别不大。甲基纤维素的加入影响了滑石表面电位, 随甲基纤维素用量增加, 两种温度条件下滑石表面电位均趋向于零, 这是由于甲基纤维素吸附在滑石表面, 使双电层中的滑移面外移的结果。65 °C 时, 滑石表面

电位变化更大, 说明在该温度条件下甲基纤维素吸附量更高。

甲基纤维素是一种对温度敏感的高分子抑制剂, 随温度变化, 其在溶液中的存在形式不同。温度较低时, 甲基纤维素能够完全溶解在水中, 形成澄清透明的溶液, 此时主要通过疏水作用吸附在滑石表面, 吸附量较低, 对滑石的抑制效果也较弱; 当温度升高时, 甲基纤维素从溶液中析出, 形成凝胶, 沉积在滑石表面, 吸附量较大, 对滑石的抑制效果也较强。

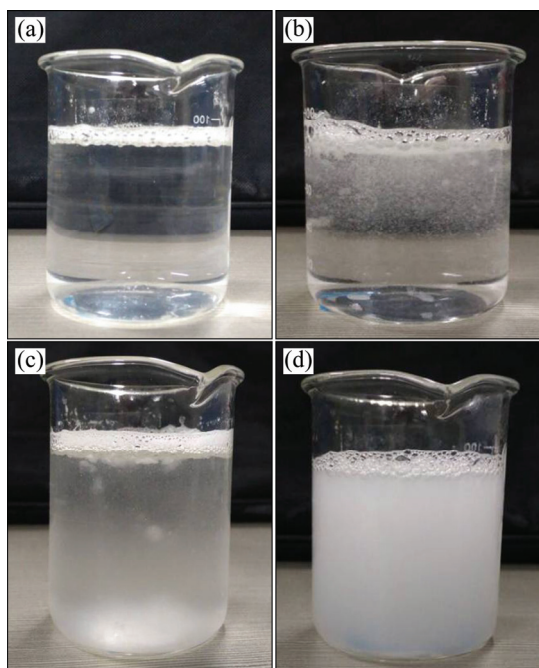


图 3 不同温度条件下甲基纤维素的溶解行为

Fig. 3 Effect of temperature on dissolution behavior of methylcellulose at different solution temperatures: (a) 25 °C; (b) 45 °C; (c) 65 °C; (d) 75 °C

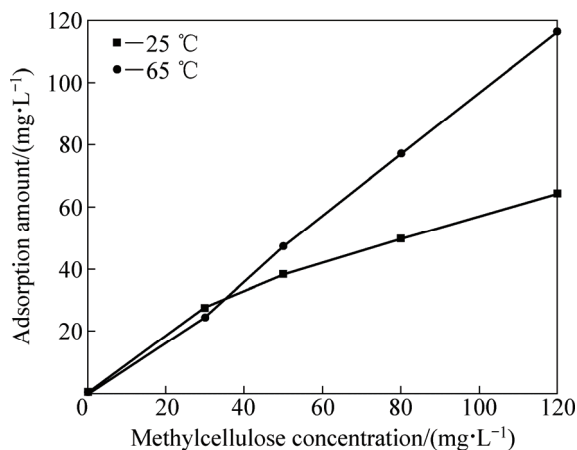


图 4 不同温度条件下甲基纤维素的吸附行为

Fig. 4 Adsorption behavior of methylcellulose at different temperatures

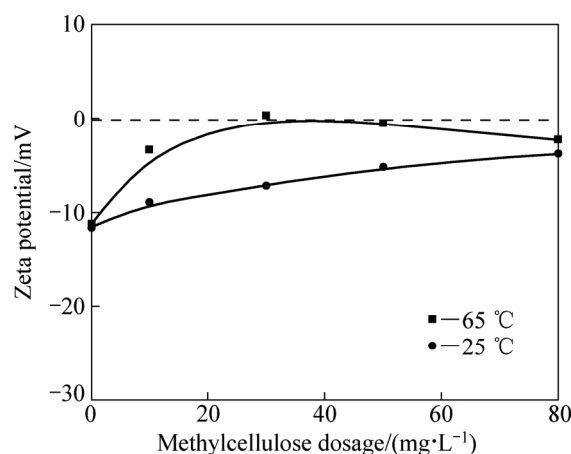


图 5 不同温度条件下甲基纤维素对滑石电位的影响(pH=9)

Fig. 5 Effect of methylcellulose dosage on zeta potential of talc at different temperatures (pH=9)

2.2 滑石表面已吸附甲基纤维素的应激反应及对滑石浮选的影响

溶解及吸附试验表明不同温度条件下甲基纤维素在溶液中的存在状态不同, 导致其在滑石表面的吸附行为及对滑石的抑制行为也不同。那么, 温度变化对滑石表面已经吸附的甲基纤维素的存在状态有什么影响, 已经吸附的甲基纤维素对滑石的抑制效果会发生什么变化?

为确定这一影响, 设计了如下实验: 将 2 g 滑石放入烧杯中, 加入 40 mL 蒸馏水和 20 mg/L 的甲基纤维素, 在特定温度下进行搅拌调浆使甲基纤维素在滑石表面发生吸附。将烧杯中的上清液倒掉, 吸附有甲基纤维素的滑石转移到浮选槽中, 加入 40 mL 蒸馏水, 在不同温度下进行浮选。

图 6 所示为初始吸附温度为 25 °C 时, 温度变化对滑石表面甲基纤维素吸附层抑制效果的影响。由图 6 可知, 当吸附有甲基纤维素的滑石在 25 °C 时进行调浆并浮选时, 其浮选回收率为 41%, 说明滑石表面的甲基纤维素吸附层对其产生了抑制作用, 但抑制效果略低于直接加入 20 mg/L 甲基纤维素进行抑制(回收率为 38.5%)。当吸附有甲基纤维素的滑石先在 25 °C 条件下进行调浆, 然后将矿浆温度升高到 65 °C 继续调浆并浮选时, 其浮选回收率为 66%, 表明温度的升高降低了吸附在滑石表面的甲基纤维素的抑制效果。当吸附有甲基纤维素的滑石经过 25、65 和 25 °C 三段调浆再进行浮选时, 其浮选回收率为 37%, 与只在 25 °C 条件下进行一段调浆时的回收率相同, 表明温度变化对滑石表面甲基纤维素吸附层抑制效果的影响是一个可逆的过程。

图7所示为初始吸附温度为65℃时,温度变化对滑石表面甲基纤维素吸附层抑制效果的影响。由图7

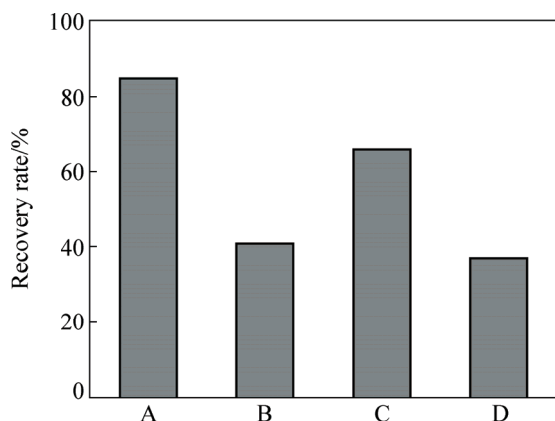


图6 不同条件下甲基纤维素吸附层对滑石浮选的影响

Fig. 6 Effect of adsorbed methylcellulose layer on talc flotation under different conditions: MIBC concentration of 1×10^{-4} mol/L, methylcellulose concentration of 20 mg/L, pH=9 (A: Talc without adsorbed methylcellulose layer conditioned and floated at 25 °C; B: Talc with adsorbed methylcellulose layer conditioned and floated at 25 °C; C: Talc with adsorbed methylcellulose layer first conditioned at 25 °C, and then conditioned and floated at 65 °C; D: Talc with adsorbed methylcellulose layer first conditioned at 25 °C, then conditioned at 65 °C, and at last conditioned and floated at 25 °C)

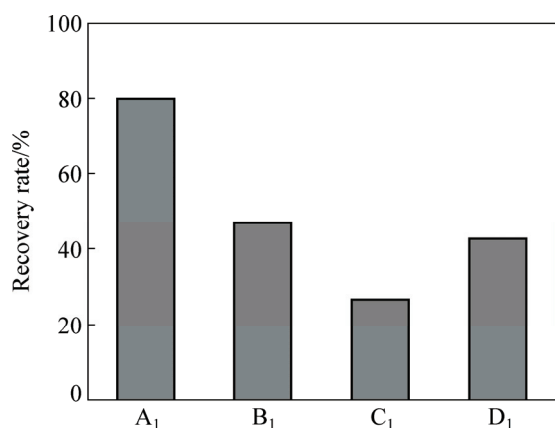


图7 不同条件下甲基纤维素吸附层对滑石浮选的影响

Fig. 7 Effect of adsorbed methylcellulose layer on talc flotation under different conditions: MIBC concentration of 1×10^{-4} mol/L, methylcellulose concentration of 20 mg/L (A₁: Talc without adsorbed methylcellulose layer conditioned and floated at 65 °C; B₁: Talc with adsorbed methylcellulose layer conditioned and floated at 65 °C; C₁: Talc with adsorbed methylcellulose layer first conditioned at 65 °C, and then conditioned and floated at 25 °C; D₁: Talc with adsorbed methylcellulose layer first conditioned at 65 °C, then conditioned at 25 °C, and at last conditioned and floated at 65 °C)

可知,与初始吸附温度为25℃时候相同,调浆温度降低会增强甲基纤维素吸附层的抑制效果,导致滑石浮选回收率降低,且这种变化是可逆的,调浆温度升高会再次减弱甲基纤维素吸附层的抑制效果。

为了进一步证实滑石表面甲基纤维素吸附层抑制效果会随温度变化而发生变化,将25和65℃条件下浮选得到的尾矿在不同温度下重新进行浮选,结果如图8所示。由图8可知,25℃条件下浮选得到的尾矿在25℃条件下重新浮选时,其回收率为17%,但在65℃条件下重新浮选时回收率为27%。65℃条件下浮选得到的尾矿在65℃条件下重新浮选时,其回收率为38%,而在25℃条件下重新浮选时回收率为19%。图8种结果表明被抑制的滑石尾矿重新浮选时,吸附在滑石表面的甲基纤维素抑制效果减弱,且在65℃条件下浮选时抑制效果减弱更多。

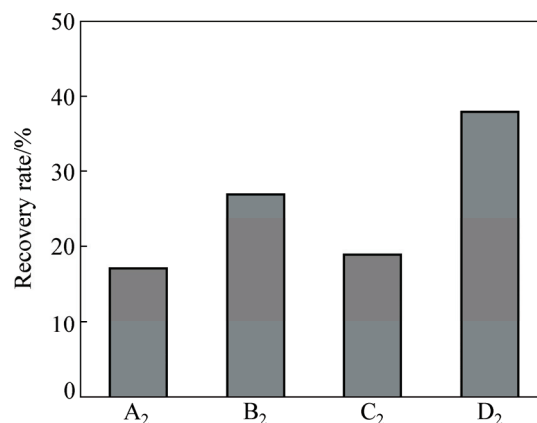


图8 不同条件下被抑制滑石浮选行为

Fig. 8 Flotation of depressed talc at different conditions: MIBC concentration of 1×10^{-4} mol/L, methylcellulose concentration of 20 mg/L (A₂: Talc first depressed at 25 °C, and then floated at 25 °C; B₂: Talc first depressed at 25 °C, and then floated at 65 °C; C₂: Talc first depressed at 65 °C, and then floated at 25 °C; D₂: Talc first depressed at 65 °C, and then floated at 65 °C)

甲基纤维素是一种温敏型调整剂,不同温度条件下其与水分子的结合状态不同,导致其在溶液中的存在状态会随温度变化而发生变化。吸附在滑石表面后,吸附的甲基纤维素与水分子的结合状态也受温度变化的影响^[22]。当吸附有甲基纤维素的滑石位于25℃的溶液中,甲基纤维素通过羟基与水分子形成氢键而结合在一起,导致矿物表面亲水性较强,从而对其产生较强的抑制作用。当矿浆温度升高为65℃时,吸附在滑石表面的甲基纤维素中的水分子动能增加,与甲基纤维素分离,吸附层含水量降低,亲水性减弱^[23]。

3 结论

1) 甲基纤维素在滑石表面的吸附行为受温度影响, 温度较低时, 甲基纤维素溶解在水中, 通过疏水作用吸附在滑石表面, 吸附量较低, 对滑石的抑制效果较弱; 随温度升高, 甲基纤维素从溶液中析出, 沉积在滑石表面, 吸附量较大, 对滑石的抑制效果增强。

2) 甲基纤维素吸附在滑石表面后, 滑石表面的甲基纤维素吸附层的抑制效果也受温度影响, 温度较低时, 甲基纤维素吸附层的抑制效果较强, 温度升高会导致吸附的甲基纤维素层的抑制效果减弱, 且这种变化是可逆的, 温度再降低, 吸附的甲基纤维素层的抑制效果再次增强。

3) 温度较低时, 滑石表面吸附的甲基纤维素通过羟基与水分子形成氢键而结合在一起, 导致矿物表面亲水性较强, 从而对滑石产生较强的抑制作用; 温度升高时, 甲基纤维素分子失去结合水, 含水量降低, 对滑石抑制效果减弱。

REFERENCES

- [1] 秦善, 王长秋. 矿物学基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006: 120–121.
QIN Shan, WANG Chang-qiu. Mineralogical basis[M]. Beijing: Peking University Press, 2006: 120–121.
- [2] 刘谷山, 冯其明, 张国范. 某铜镍硫化矿浮选脱除滑石的研究[J]. 金属矿山, 2005(9): 35–37.
LIU Gu-shan, FENG Qi-ming, ZHANG Guo-fan. Research on talc removal from a copper-nickel sulfide ore by flotation[J]. Metal Mine, 2005(9): 35–37.
- [3] 冯其明, 刘谷山, 喻正军, 卢毅屏, 欧乐明, 张国范. 铁离子和亚铁离子对滑石浮选的影响及作用机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006, 37(3): 476–480.
FENG Qi-ming, LIU Gu-shan, YU Zheng-jun, LU Yi-ping, OU Le-ming, ZHANG Guo-fan. Influence and mechanism of ferric and ferrous ions on flotation of talc[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2006, 37(3): 476–480.
- [4] 张其东, 袁致涛, 刘炯天, 李小黎, 卢冀伟, 陆帅帅. 葡聚糖对辉钼矿与滑石浮选分离的影响[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(4): 884–890.
ZHANG Qi-dong, YUAN Zhi-tao, LIU Jiong-tian, LI Xiao-li, LU Ji-wei, LU Shuai-shuai. Effect of glucan on flotation separation of molybdenite and talc[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(4): 884–890.
- [5] BEATTIE D A, HUYNH L, KAGGWA G B, RALSTON J. Influence of adsorbed polysaccharides and polyacrylamides on talc flotation[J]. International Journal of Mineral Processing, 2006, 78(4): 238–249.
- [6] SHORTRIDGE P G, HARRIS P J, BRADSHAW D J, KOOPAL L K. The effect of chemical composition and molecular weight of polysaccharide depressants on the flotation of talc[J]. International Journal of Mineral Processing, 2000, 59(3): 215–224.
- [7] JENKINS P, RALSTON J. The adsorption of a polysaccharide at the talc-aqueous solution interface[J]. Colloids Surface A, 1998, 139(1): 27–40.
- [8] 卢毅屏, 张明洋, 冯其明, 欧乐明, 张国范. 蛇纹石与滑石的同步抑制原理[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(2): 560–565.
LU Yi-Ping, ZHANG Ming-yang, FENG Qi-ming, OU Le-ming, ZHANG Guo-fan. Sync-suppression principle of serpentine and talc[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(2): 560–565.
- [9] 龙涛, 冯其明, 卢毅屏, 张国范, 欧乐明, 潘高产. 羧甲基纤维素对层状镁硅酸盐矿物浮选的抑制与分散作用[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(5): 1145–1150.
LONG Tao, FENG Qi-ming, LU Yi-Ping, ZHANG Guo-fan, OU Le-ming, PAN Gao-chan. Depression and dispersion effect of carboxy methyl cellulose on flotation of layered magnesium-silicates[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(5): 1145–1150.
- [10] WANG J, SOMASUNDARAN P, NAGARAJ D R. Adsorption mechanism of guar gum at solid-liquid interfaces[J]. Minerals Engineering, 2005, 18(1): 77–81.
- [11] BACCHIN P, BNION J P, MARTIN F, COMBACAU M, BARTHES P, PETIT S, FERRET J. Surface pre-coating of talc particles by carboxymethyl cellulose adsorption: Study of adsorption and consequences on surface properties and settling rate[J]. Colloids and Surfaces A, 2006, 272(3): 211–219.
- [12] FRANKS G V. Stimulant sensitive flocculation and consolidation for improved solid/liquid separation[J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2005, 292(2): 598–603.
- [13] FENG Bo, FENG Qi-ming, LU Yi-Ping, LI Hao. Effect of solution conditions on depression of chlorite using CMC as depressant[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(4): 1034–1038.
- [14] O'SHRA J P, QIAO G G, FRANKS G V. Temperature responsive flocculation and solid-liquid separations with charged random copolymers of poly(N-isopropyl acrylamide)[J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2011, 360(1): 61–70.
- [15] BURDUKOVA E, LI H, BRADSHAW D J, FRANKS G V. Poly(N-isopropylacrylamide) (PNIPAM) as a flotation collector: Effect of temperature and molecular weight[J]. Minerals Engineering, 2010, 23(11/13): 921–927.
- [16] WEI S N, SONSIE R, FORBES E, FRANKS G V. Flocculation/flotation of hematite fines with anionic

- temperature-responsive polymer acting as a selective flocculant and collector[J]. *Minerals Engineering*, 2015, 77(11): 64–71.
- [17] BURDUKOVA E, ISHIDA N, SHADDICK T, FRANKS G V. The size of particle aggregates produced by flocculation with PNIPAM, as a function of temperature[J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2011, 354(1): 82–88.
- [18] NASATTO P L, PIGNON F, SILVEIRA J L M, DUARTE M E R, NOSEDA M D, RINAUDO M. Methylcellulose, a cellulose derivative with original physical properties and extended applications[J]. *Polymers*, 2015, 7(5): 777–803.
- [19] XIAO S, WANG F, YANG Y, CHANG Z, WU Y. An environmentally friendly and economic membrane based on cellulose as a gel polymer electrolyte for lithium ion batteries[J]. *Rsc Advances*, 2014, 4(1): 76–81.
- [20] 甘卫平, 陈迎龙, 郭桂全, 朱妮娜, 陈志波, 罗 贱. 以甲基纤维素作分散剂制备高分散超细银粉[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2012, 17(4): 522–528.
- GAN Wei-ping, CHEN Ying-long, GUO Gui-quan, ZHU Ni-na, CHEN Zhi-bo, LUO Jian. Preparation of highly dispersed ultrafine silver powders using methylcellulose as dispersant[J]. *Materials Science & Engineering of Powder Metallurgy*, 2012, 17(4): 522–528.
- [21] 林 莹, 蒋国强, 咎 佳, 丁富新. 甲基纤维素温敏水凝胶的凝固及体外释药特性[J]. *清华大学学报*, 2006, 46(6): 836–838.
- LIN Ying, JIANG Guo-qiang, ZAN Jia, DING Fu-xin. Physical and in vitro release properties of methylcellulose-based thermo-sensitive hydrogels[J]. *Journal of Tsinghua University*, 2006, 46(6): 836–838.
- [22] SU Y L, LI C. The reorientation of poly (2-dimethylamino ethyl methacrylate) after environment stimuli improves hydrophilicity and resistance of protein adsorption[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2007, 316(2): 344–349.
- [23] SEDEVA I G, FORNASIERO D, RALSTON J, BEATTIE D A. Reduction of surface hydrophobicity using a stimulus-responsive polysaccharide[J]. *Langmuir*, 2010, 26(20): 15865–15874.

Stimulus response of methylcellulose and its depression effect on talc flotation

FENG Bo^{1,2}, ZHU Xian-wen¹, PENG Jin-xiu¹

(1. School of Resource and Environmental Engineering,

Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

2. Post-doctoral Scientific Research Workstation, Western Mining Co., Ltd., Xining 810000, China)

Abstract: The adsorption behaviour of methylcellulose on talc surface and the stimulus response of methylcellulose on talc flotation were studied through flotation tests, adsorption experiments and zeta potential measurements. The results show that methylcellulose dissolved in water and hydrophobic interaction is the main driving force for adsorption at the low temperature. When the temperature increases, methylcellulose precipitation from solution and deposited on talc surface, the adsorption amount is large and the depression effect is strong. The depression effect of adsorbed methylcellulose layer on talc flotation is also affected by temperature. The switch of temperature from low to high results in decreased depression effect of methylcellulose and the change is reversible. The reason is that the hydroxyl of methylcellulose form hydrogen bonds with water molecules at low temperature, leading to a hydrophilic mineral surface and strong depression effect on talc. When the temperature rises, methylcellulose molecules lose water and the water content decreases, the depression effect to talc also decreases.

Key words: talc; flotation; temperature; methylcellulose; stimulus response

Foundation item: Project(51404109) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2015M582759XB) supported by the China Postdoctoral Science Foundation; Project supported by the Qingjiang Excellent Young Talents, Jiangxi University of Science and Technology, China

Received date: 2016-03-11; **Accepted date:** 2016-09-30

Corresponding author: FENG Bo; Tel: +86-18270767369; E-mail: fengbo319@163.com

(编辑 龙怀中)