

阴离子对铁盐氧化脱除煤中硫的影响

范乐珍,唐佩瑶,李钰涵,魏凤玉*

(合肥工业大学化学与化工学院,安徽合肥230009)

摘要:采用 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 和 FeCl_3 溶液氧化脱除山西某焦煤中的硫,研究铁盐种类及添加无机酸对脱硫效果的影响,并利用红外光谱仪对处理前后的煤样进行表征。结果表明, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 的脱硫效果远高于 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 和 FeCl_3 ;溶液中添加 H_2SO_4 和 HCl 会抑制 Fe^{3+} 的氧化脱硫效果;较低浓度的 HNO_3 促进 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 氧化脱除煤中的 FeS_2 和硫醇、硫醚等有机硫,而高浓度的 HNO_3 又会抑制 Fe^{3+} 与 FeS_2 反应,致使脱硫率下降。

关键词:铁盐氧化;煤脱硫;阴离子;无机酸

中图分类号:TQ536

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2022)06-0153-03

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.06.031

Effect of anion on removal of sulfur from coal by ferric salt oxidation

FAN Le-zhen, TANG Pei-yao, LI Yu-han, WEI Feng-yu*

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ and FeCl_3 solutions are respectively used to remove sulfur from a kind of coking coal produced in a certain coal mine in Shanxi province, China. Effects of the type of ferric salt and the addition of inorganic acids on the desulfurization are investigated. In addition, FT-IR is employed to characterize and compare the coal samples before and after the desulfurization. Results show that the desulfurization effectiveness by $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ is significantly higher than that by $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ and FeCl_3 ; the addition of H_2SO_4 or HCl will restrain the desulfurization ability of Fe^{3+} ; HNO_3 with a lower concentration can improve the removal efficiency of pyrite, thioalcohol and thioether from coal by $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$, while HNO_3 with a higher concentration will inhibit the reaction between Fe^{3+} and FeS_2 , resulting in a lower desulfurization efficiency.

Key words: ferric salt oxidation; coal desulfurization; anion; inorganic acid

浮选法作为工业常用的煤脱硫降灰方法对有机硫的脱除效果较差^[1]。采用强酸、强碱或强氧化剂的化学法脱硫率较高,但往往需要高温、高压,对设备及煤性质破坏较大。1972年, Meyer等^[2]首次提出含 Fe^{3+} 的溶液可将煤中黄铁矿(FeS_2)转换成 Fe^{2+} 和游离态S,从而有效脱除煤中黄铁矿。该法反应条件温和,对煤基体基本不影响,引起了人们的广泛兴趣^[3-4]。Hamamci等^[5]选用 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 氧化总硫质量分数为5.63%的Sinak和总硫质量分数为7.74%的Hazro高硫沥青煤,结果表明 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 对于富含黄铁矿的Hazro沥青煤的总硫和无机硫脱除率均高于对黄铁矿质量分数较少的Sinak煤。Ehsani等^[6]研究发现 FeCl_3 对印度Tabas煤的脱硫效果要高于 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 。Meyer等^[7]研究对比了 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 和 FeCl_3 不同浓度下的脱硫效果,结果表明,铁盐浓度为0.4 mol/L时, FeCl_3 脱硫效果好于

$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$,铁盐浓度为0.9 mol/L时,两者差别不大。研究表明,铁盐氧化脱硫效果不仅与煤的种类、总硫质量分数及形态硫分布等密切相关,还与铁盐中的阴离子有关。目前有关铁盐中阴离子种类及无机酸介质等对铁盐氧化脱除煤中硫的影响研究还较少。为此,笔者采用 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 、 FeCl_3 、 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 处理某高硫煤,并考察无机酸与铁盐协同脱硫情况,采用FT-IR对氧化前后煤样进行表征分析,探讨了阴离子对铁盐氧化煤脱硫过程机理。

1 试验部分

1.1 材料

选用山西某中高硫中高灰焦煤GS作为实验煤样,煤样的工业分析及形态硫分布结果如表1所示,其中硫酸盐硫近似为0。原煤经球磨、干燥、筛分至0.55 mm后备用。

收稿日期:2021-06-17;修回日期:2022-03-28

基金项目:安徽省科技重大专项计划项目(17030901082)

作者简介:范乐珍(1998-),女,硕士研究生,研究方向为煤脱硫,1774604400@qq.com;魏凤玉(1963-),女,博士,教授,研究方向为化工环保及新材料开发,通讯联系人,weiflyliuj@163.com。

表 1 煤样的工业分析及形态硫分布

煤样	工业分析				硫分布		
	$V_{ad}/\%$	$M_{ad}/\%$	$FC_{ad}/\%$	$A_d/\%$	$S_t/\%$	$S_p/\%$	$S_o/\%$
GS	19.23	1.95	45.37	33.45	2.97	1.06	1.91

注： V_{ad} 为干基挥发分质量分数， M_{ad} 为干基水分质量分数， FC_{ad} 为干基固定碳质量分数， A_d 为干基灰分质量分数， S_t 为总硫质量分数， S_p 为无机硫质量分数， S_o 为有机硫质量分数。

1.2 试剂及仪器

硫酸铁、氯化铁、九水硝酸铁、溴化钾、碘化钾、冰醋酸、浓盐酸、浓硫酸、浓硝酸、三氧化钨。

恒温水浴锅，上海科恒实业发展有限公司生产；BSA124S 电子天平，德国 Sartorius 公司生产；XHCL-7008 型快速智能测硫仪，北京星皓仪器公司生产；XL-1 箱式电阻炉，上海科恒实业公司生产；Nicolet 67 型红外光谱仪，美国 Thermo Nicolet 公司生产。

1.3 实验方法

1.3.1 铁盐氧化实验

称取 5 g 煤样与 1 mol/L 铁盐溶液，按液固比 10:1 mL/g 混合均匀，于 50℃ 下搅拌反应 2 h，抽滤，滤饼用热水洗涤、烘干至恒重后进行表征分析。

1.3.2 硫分测定

全硫采用库仑滴定法 (GB/T 214—2007) 进行测定；无机硫采用氧化还原法 (GB/T 215—2003) 进行测定：

硫分脱除率 η_s 计算式为：

$$\eta_s = [(S_0 - S_1)/S_0] \times 100\% \quad (1)$$

式中： S 分别为煤中总硫质量分数、无机硫质量分数 S_p 、有机硫质量分数 S_o ，下标 0 表示原煤，1 表示氧化煤。

2 结果与讨论

2.1 铁盐种类对 GS 煤中硫的影响

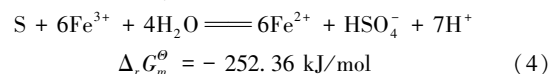
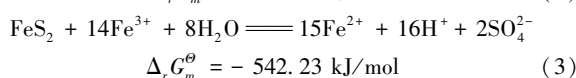
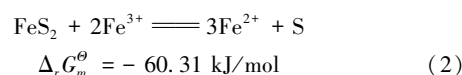
分别用 $Fe_2(SO_4)_3$ 、 $FeCl_3$ 、 $Fe(NO_3)_3$ 氧化高硫煤 GS，探究铁盐种类对脱除煤中硫的影响，结果如表 2 所示。

表 2 铁盐种类对 GS 煤中硫的脱除效果

铁盐种类	$\eta_{S_t}/\%$	$\eta_{S_p}/\%$
$Fe_2(SO_4)_3$	0.99	4.69
$FeCl_3$	4.88	7.03
$Fe(NO_3)_3$	38.72	75.00

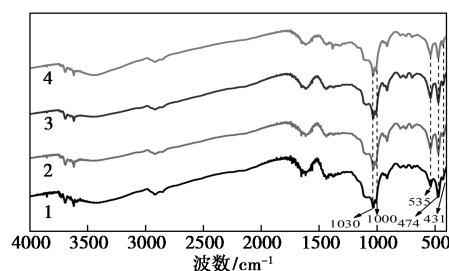
由表 2 中可以看出， $Fe(NO_3)_3$ 对 GS 煤的总硫脱除率为 38.72%，无机硫脱除率达 75%，远高于

$FeCl_3$ 和 $Fe_2(SO_4)_3$ ； $FeCl_3$ 的脱硫效果好于 $Fe_2(SO_4)_3$ ，与 Ehsani 等^[6]的研究结果一致；但无论是总硫还是无机硫，其脱除率均较差，小于 10%，比吴复忠^[3]和 Onganer^[8]使用 $Fe_2(SO_4)_3$ 和 $FeCl_3$ 时的脱硫率低很多。这是由于煤样的无机硫质量分数分别占总硫的 77.8% 和 81.66%，而 GS 煤中有机硫质量分数较高、无机硫仅占总硫的 35.7%，故 $FeCl_3$ 或 $Fe_2(SO_4)_3$ 不易将其脱除。 Fe^{3+} 与 FeS_2 反应方程式分别为：



由式 (3) 可见，溶液中的 SO_4^{2-} 会抑制 Fe^{3+} 与 FeS_2 反应，降低黄铁矿氧化速率。溶液中的 Cl^- 与 $FeCl_3$ 反应生成 $FeCl_4^-$ 减少了 Fe^{3+} 的有效浓度^[8]。另外，Dimitrijević M 等^[9-10]用 H_2O_2 氧化黄铁矿时，发现 Cl^- 、 SO_4^{2-} 会吸附在黄铁矿表面，阻碍氧化剂与黄铁矿反应，降低黄铁矿氧化速率。这也是 $FeCl_3$ 和 $Fe_2(SO_4)_3$ 脱硫效果不好的原因。

GS 煤处理前后的 FT-IR 谱图如图 1 所示。由图 1 中可以看出，在波数为 4 000~400 cm^{-1} 范围内，除了煤中通常的 $-CH_3$ 、 $-CH_2-$ 、 $-C=O$ 、 $-OH$ 及芳烃等官能团外，相比于原煤， $Fe(NO_3)_3$ 氧化后煤在 431 cm^{-1} 和 474 cm^{-1} 处的黄铁矿 (FeS_2) 的 S—S 振动峰和硫醇 ($-SH$) 峰减弱，在 1 000、1 030 cm^{-1} 处的亚砷 ($S=O$) 峰未发生明显变化^[11]，说明 $Fe(NO_3)_3$ 能够脱除煤中的黄铁矿及部分硫醇，但不能将煤中的砷氧化脱除。而 $Fe_2(SO_4)_3$ 和 $FeCl_3$ 氧化后煤的硫醇和硫醚峰强度基本不变，与马岩等^[12]用 $Fe_2(SO_4)_3$ 氧化新裕煤的结果一致。另外，3 种铁盐氧化后煤在 535 cm^{-1} 处的硫醚 ($C-S-C$) 峰增强，这是由于部分硫醇氧化成硫醚键^[13]。

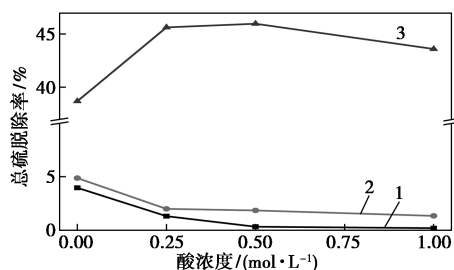


1—GS 煤；2— $Fe_2(SO_4)_3$ 氧化煤；3— $FeCl_3$ 氧化煤；4— $Fe(NO_3)_3$ 氧化煤

图 1 GS 煤处理前后的 FT-IR 谱图

2.2 铁盐与无机酸共同氧化对 GS 煤中硫的影响

研究表明, HNO_3 在较温和条件下可以促进黄铁矿分解生成 Fe^{3+} 和 SO_4^{2-} , 而黄铁矿与热的浓 H_2SO_4 和 HCl 几乎都不反应^[14-15]。由式(2)可见, 铁盐氧化反应产生的 H^+ 会与阴离子作用生成较低浓度的 H_2SO_4 、 HCl 或 HNO_3 。这些无机酸会促进或抑制 Fe^{3+} 氧化煤中黄铁矿, 为此, 将铁盐与不同浓度无机酸共同氧化 GS 煤, 探究无机酸对铁盐氧化脱除煤中硫的影响, 结果如图 2 所示。

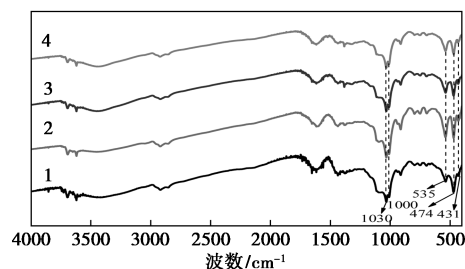


1— $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{SO}_4$; 2— $\text{FeCl}_3 + \text{HCl}$; 3— $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 + \text{HNO}_3$

图 2 铁盐与无机酸共同氧化 GS 煤脱硫的影响

由图 2 可见, 随着 H_2SO_4 或 HCl 浓度的增加, GS 煤的脱硫率逐渐下降。这是由于酸度增加会抑制反应(3)和(4)向右进行, 使脱硫率下降; Ersahan 等^[16]用 FeCl_3 氧化 N-D 褐煤时发现, 随着 HCl 浓度的升高, 过程中产生的元素硫不断增加, S 在煤与黄铁矿界面处形成薄膜阻止了反应进一步进行, 使硫铁矿的脱除率反而降低, 与本实验结果一致。 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 与 0.25 mol/L HNO_3 共同氧化 GS 煤比只有 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 氧化煤的总硫脱除率由 38.72% 增加到 45.62%, 提高了约 17.8%, 无机硫脱除率由 75% 增加到 90%, 提高了约 20%, 有机硫脱除率由 10.65% 增加到 13%, 提高了约 22%, 说明硝酸的加入增强了 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 脱硫的能力; 但当 HNO_3 浓度进一步提高时, 高浓度的 H^+ 抑制了反应(3)和(4)向右进行。另外 NO_3^- 吸附在黄铁矿表面, 导致脱硫率反而下降, 其详细机理有待进一步探讨。

为进一步探究 HNO_3 对 GS 煤中硫的作用, 在 50℃ 下, 只用 0.25 mol/L HNO_3 与 GS 煤反应 2 h, 发现脱硫率仅为 0.99%; 当 HNO_3 浓度提高到 1 mol/L 时, 脱硫率上升为 7.45%。说明 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 与 HNO_3 联合脱硫时, 脱硫率并非为两者脱硫率之和, 其作用机理非常复杂。为此, 将 0.25 mol/L 与 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 联合氧化脱硫后的煤进行红外分析, 结果如图 3 所示。



1—GS 煤; 2—0.25 mol/L HNO_3 氧化; 3— $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 氧化;
4— $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 + 0.25 \text{ mol/L } \text{HNO}_3$ 氧化

图 3 HNO_3 与 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 共同氧化 GS 煤的 FT-IR 谱图

由图 3 可见, 0.25 mol/L HNO_3 氧化煤的含硫峰强度相比原煤没有变化, 说明低浓度的 HNO_3 对煤中硫几乎没有脱除作用, 而 0.25 mol/L HNO_3 与 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 共同氧化的煤样在 431 cm^{-1} 处的 FeS_2 峰、 474 cm^{-1} 处的硫醇 ($-\text{SH}$) 峰及 535 cm^{-1} 处的硫醚 ($\text{C}-\text{S}-\text{C}$) 峰都相比 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 氧化煤减弱, 表明加入 0.25 mol/L HNO_3 促进了 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 对有机硫和无机硫的脱除, 使总硫脱除率提高。

3 结论

(1) 铁盐中的阴离子对 GS 煤脱硫效果有很大影响, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 对 GS 煤的脱硫效果远好于 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 和 FeCl_3 。FT-IR 分析表明, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 不仅脱除 GS 煤中的 FeS_2 , 还可以部分除去煤中的有机硫, 而 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 和 FeCl_3 只能脱除煤中的 FeS_2 。

(2) 当 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 与 H_2SO_4 、 FeCl_3 与 HCl 共同氧化 GS 煤时, 一方面 H^+ 抑制了 Fe^{3+} 与 FeS_2 的反应, 同时 Cl^- 、 SO_4^{2-} 会吸附在黄铁矿表面, 阻碍 Fe^{3+} 与 FeS_2 反应, 降低了脱硫率。

(3) 当 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 中添加较低浓度的 HNO_3 时, 可以促进其氧化脱除煤中 FeS_2 和硫醇、硫醚等有机硫, 使脱硫效果明显提高; 而 HNO_3 浓度较高时, 脱硫率下降, 与 H_2SO_4 和 HCl 抑制机理相同。

参考文献

- [1] Jaiswal S, Tripathy S K, Banerjee P. An overview of reverse flotation process for coal [J]. International Journal of Mineral Processing, 2015, 134: 97-110.
- [2] Meyers R, Hamersma J W, Kraft M L. Desulfurization of coal [J]. Science, 1972, 177: 1187-1188.
- [3] 吴复忠, 金会心, 焦东伟. 硫酸铁氧化浸出脱除煤中硫研究 [J]. 过程工程学报, 2010, 10(6): 1104-1109.

(下转第 161 页)

MPa, 撕裂伸长率为 306%, 且乳液颗粒形状比较规则, 呈 O/W 型的核壳结构, 改善了以往水性醋丁纤维涂膜耐水性差的问题。

(3) 改性后的纤维素分子链在 KH560 的作用下发生了交联缠绕, 结晶度大幅度下降, 涂膜吸水率最低为 7.69%, 同时具有更好的热稳定性。但是表面形貌观察到有微海岛结构, 一定程度上限制了其应用范围, 因此还需对乳液做进一步的改性研究, 获得平整度好、耐水性更高的涂膜。

参考文献

- [1] 杨武, 鲁文杰, 赵磊. 增塑性光固化醋酸丁酸纤维素酯的合成与应用[J]. 广东化工, 2010, 37(4): 97-99.
 - [2] Wei Y Y, Luo Y W, Li B F, *et al.* Water-soluble UV curable urethane methyl acrylate coating: Preparation and properties[J]. Journal of Zhejiang University Science, 2004, 5(8): 906-911.
 - [3] Huang B W, Huang B F, Du G P, *et al.* Synthesis of a novel UV-curable prepolymer polypropyleneglycol diglycidyl ether diacrylate[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 23(4): 495-498.
 - [4] Son W K, Ji H Y, Park W H. Antimicrobial cellulose acetate nanofibers containing silver nanoparticles[J]. Carbohydrate Polymers, 2006, 65(4): 430-434.
 - [5] Ma S, Song G, Fe N N. Preparation and characterization of self-emulsified waterborne nitrocellulose[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 89(1): 36-40.
 - [6] 柴多里, 张小翠, 崔庆飞. 微波辅助合成醋酸丁酸纤维素的研究[J]. 广州化工, 2011, 39(15): 92-94.
 - [7] Funke W. Problems and progress in organic coatings science and technology[J]. Progress in Organic Coatings, 1997, 31(1-2): 5-9.
 - [8] Cai C, Xu Z, Niu X, *et al.* Preparation of water-tolerant UV-curable $\text{Si}_x\text{O}_y(\text{OH})_z/\text{PA}$ aqueous dispersion films[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(43): 15124-15130.
 - [9] Ming Z, Zhang L, Wang N, *et al.* Miscibility and properties of blend membrane of waterborne polyurethane and carboxymethylchitin[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 90(5): 1233-1241.
 - [10] Park H, Yang I, Wu J, *et al.* Synthesis of silicone-acrylic resins and their applications to superweatherable coatings[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 81(7): 1614-1623.
 - [11] Mese A, Guzel K G. Effect of storage duration on the hardness and tensile bond strength of silicone- and acrylic resin-based resilient denture liners to a processed denture base acrylic resin[J]. Journal of Prosthetic Dentistry, 2008, 99(2): 153-159.
 - [12] 徐文总, 张丙亮, 聂祝婷, 等. 含氟、硅丙烯酸酯改性水性聚氨酯乳液的制备与性能研究[J]. 化工新型材料, 2016, 44(5): 70-73.
 - [13] 苏秀霞, 张蓉, 张婧, 等. 聚丙烯酸接枝共聚水性硝化纤维的合成与性能[J]. 精细化工, 2019, 36(3): 38-44.
 - [14] 苏秀霞, 陈卓, 张鑫. 含氟丙烯酸酯改性水性硝化纤维乳液的制备及其性能[J]. 精细化工, 2017, 34(8): 942-948.
 - [15] 晏春苗. 氨基磺酸盐型水性醋酸纤维乳液的制备与性能[J]. 精细化工, 2019, 36(12): 2400-2405, 2430.
 - [16] 王艳皎. 室温自交联丙烯酸树脂乳液制备及涂膜性能[D]. 西安: 陕西科技大学, 2012.
 - [17] Liu X J, Lin W W, Tao X L, *et al.* Preparation and properties of transparent coating for polyacrylates copolymer modified with organosilicon[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2006, 22: 211-213, 218.
 - [18] Yuan G, Zhou Y, Zhang X, *et al.* Synthesis and characteristics of graft copolymers of poly (butyl acrylate) and cellulose with ultrasonic processing as a material for oil absorption[J]. Bioresources, 2011, 7(1): 135-147.
 - [19] Bulacu M I. Molecular dynamics studies of entangled polymer chains[D]. City of Groningen: University of Groningen, 2008.
 - [20] Wu J, Chen D. Synthesis and characterization of waterborne polyurethane based on aliphatic diamine sulphonate and liquefiable dimethylol propionic acid[J]. Progress in Organic Coatings, 2018, 118: 116-121.
 - [21] Bhat D K, Kumar M S. Biodegradability of PMMA blends with some cellulose derivatives[J]. Journal of Polymers & the Environment, 2006, 14(4): 385-392.
 - [22] Elizalde-Pena E A, Flores-Ramirez N, Luna-Barcenas G, *et al.* Synthesis and characterization of chitosan-g-glycidyl methacrylate with methyl methacrylate[J]. European Polymer Journal, 2007, 43(9): 3963-3969. ■
-
- (上接第 155 页)
- [4] Wu Z H, Steel K M. Demineralization of a UK bituminous coal using HF and ferric ions[J]. Fuel, 2007, 86: 2194-2200.
 - [5] Hamamci C, Kahraman F, Dv Z M Z. Desulfurization of southeastern anatolian asphaltites by the meyers method[J]. Fuel Processing Technology, 1997, 50: 171-177.
 - [6] Ehsani, Mohammad R. Desulfurization of tabas coals using chemical reagents[J]. Chemical Engineering Department, 2006, 25(2): 652-659.
 - [7] Hamersma J W, Kraft M L, Koutsoukos E P, *et al.* Chemical removal of pyritic sulfur from coal[J]. Pollution Control and Energy Needs, 1974, 6: 69-79.
 - [8] Onganer Y, Kocakerim M M, Alkan M. A kinetic study of Meyers' desulphurization of asphaltite[J]. Fuel, 1989, 68(8): 1043-1047.
 - [9] Antonijević M M, Dimitrijević M, Janković Z. Leaching of pyrite with hydrogen peroxide in sulphuric acid[J]. Hydrometallurgy, 1997, 46(1): 71-83.
 - [10] Dimitrijević M, Antonijević M M, Dimitrijević V L. Investigation of the kinetics of pyrite oxidation by hydrogen peroxide in hydrochloric acid solutions[J]. Minerals Engineering, 1999, 12(2): 165-174.
 - [11] 刘松, 张明旭, 黄少飞. 微波氢氧化钠联合脱硫及机理分析[J]. 煤炭转化, 2016, 39(1): 92-96.
 - [12] 马岩. $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 氧化脱除煤中无机硫的研究[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2014, 40(5): 24-28.
 - [13] 徐永亮, 荆国松, 王兰云, 等. 1-丁基-3-甲基咪唑硫酸氢盐与双氧水用于煤脱硫试验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2018, 37(6): 22-29.
 - [14] 刘志宏, 严晓晖, 蒋荣英, 等. 硝酸“催化”分解黄铁矿的动力学研究[J]. 中南矿冶学院学报, 1993, (6): 760-765.
 - [15] Yang R T, Das S K, Tsai B M C. Coal demineralization using sodium hydroxide and acid solutions[J]. Fuel, 1985, 64: 735-742.
 - [16] Erşahan H, Boncukçuoğlu R, Kocakerim M M. Elemental sulfur formation in the Meyers coal desulfurization process[J]. Fuel, 1995, 74: 1682-1686. ■