

不同粒级煤超声电化学浮选脱硫脱灰的研究

万声蒲^{1,3}, 石耀峰^{1,3}, 马小燕^{1,3}, 张红喜^{1,2,3*}

(1.塔里木大学化学化工学院,新疆阿拉尔843300; 2.矿物加工科学与技术国家重点实验室,北京102628;
3.塔里木大学,新疆兵团南疆化工资源利用工程实验室,新疆阿拉尔843300)

摘要:采用超声电化学增强浮选的方法研究了酸性条件下不同粒级煤样中的形态硫及灰分的脱除。结果表明,煤样粒级越小浮选精煤收率越高,脱硫、脱灰效果越显著。小于0.075 mm的煤样脱硫、脱灰效果最好,其浮选收率可达93.05%,总脱硫率为72.97%,黄铁矿硫减少89.12%,硫酸盐硫减少64.23%,有机硫减少59.11%,脱灰率为41.17%。FT-IR、XRD分析结果表明,超声电化学能改善煤样表面性质,增大接触角,从而提高浮选精煤收率及脱除煤中各形态硫和易成灰的亲水性矿物质。

关键词:粒级;超声电化学;浮选;脱硫;脱灰

中图分类号:TD94

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2023)S1-0187-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.S1.037

Desulfurization and deashing for various grain sizes of coal by ultrasonic electrochemical flotation

WAN Sheng-pu^{1,3}, SHI Yao-feng^{1,3}, MA Xiao-yan^{1,3}, ZHANG Hong-xi^{1,2,3*}

(1.College of Chemistry and Chemical Engineering, Tarim University, Alar 843300, China; 2.State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing 102628, China; 3.South Xinjiang Engineering Laboratory of Chemical Resources Utilization of Xinjiang Production and Construction Corps, Tarim University, Alar 843300, China)

Abstract:The removal of sulfur and ash in coal samples with different grain sizes is studied by using ultrasonic electrochemical enhanced flotation method under acidic conditions.Results indicate that the smaller the coal sample size, the higher the flotation coal yield,as well as the more significant the desulfurization and deashing effect.As for the coal samples with a grain size less than 0.075 mm,this method delivers the best desulfurization and deashing effect,over which the flotation yield reaches 93.05%,total desulfurization rate is 72.97%,the content of sulfur in the form of pyrite decreases by 89.12%,the content of sulfur in the form of sulfates drops by 64.23%,the content of organic sulfur is reduced by 59.11%,and the removal rate of ash achieves 41.17%.FT-IR and XRD analysis shows that ultrasonic electrochemistry can improve the surface properties of coal samples and increase their contact angle,so as to increase the yield of flotation refined coal and remove various forms of sulfur and hydrophilic minerals that are easy to become ash.

Key words:grain size; ultrasonic electrochemistry; flotation; desulfurization; deashing

根据中国工程院的预测,到2050年,中国的煤炭消费仍将占一次能源消费的约50%^[1]。虽然目前正在对新能源进行广泛研究,以克服不可再生能源枯竭的问题,但预计煤炭仍将是主要能源之一^[2]。煤炭是由碳、氢、氧元素主导,芳核、脂肪侧链、桥键构成的有机结构单元体系,同时含有硫、氮、重金属(汞、铅、砷)、碱金属(钾、钠)及卤素(氯、氟)等有害元素^[3]。煤中的有害元素伴随煤的加工与利用对环境产生极大的危害,造成酸雨、雾霾等问题^[4]。因此,煤炭的清洁加工与转化利用尤为重要。

目前煤炭的清洁加工与转化技术主要有物理洗

选法^[5]、化学法^[6-7]、生物法^[8]。普通的物理洗选方法主要脱除煤中的矿物颗粒和无机硫,化学法与生物法能脱除煤中有机硫和无机硫,但化学法需要重型设备、高温高压的反应条件,生物法脱硫则需要较长的周期,经济效益较差。为寻求一种脱硫脱灰效果好且方便快捷的手段,金权等^[9]利用超声波辅助H₂O₂-CH₃COOH脱除宁东煤中硫分和灰分,结果表明,超声波可以改善固液接触效果,提高脱硫、脱灰效率。张鸿波等^[10]以盐酸为电解质,通过电化学的手段脱硫,此方法能有效降低煤中硫分、灰分。超声波与电化学均可脱除煤中硫分、灰分,但将2种方法相结合还鲜有报道。因此,笔者选取了不同粒级的

收稿日期:2023-03-02;修回日期:2023-06-21

基金项目:国家自然科学基金地区基金项目(21868035);矿物加工科学与技术国家重点实验室开放基金(BGRIMM-KJSKL-2020-19);塔里木大学研究生科研创新项目(TDGRI202108)

作者简介:万声蒲(1996-),男,硕士研究生,研究方向为煤脱硫,1264285439@qq.com;张红喜(1979-),男,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为煤脱硫、洁净煤技术,通讯联系人,1459303544@qq.com。

煤样,在酸性条件下利用超声波与电化学相结合的方法来增强浮选脱除煤中硫分、灰分。通过 XRD、FT-IR 及各形态硫的测定对脱硫前后煤样进行表征分析,探究了不同粒级煤样的脱硫脱灰效果。

1 实验部分

1.1 材料

实验所用煤样为新疆库尔勒泰安煤矿的烟煤,将煤样真空干燥后粉碎、研磨并筛分至 0.150~0.180、0.106~0.150、0.083~0.106、0.075~0.083、<0.075 mm 5 个粒级,装袋备用,煤中全硫及灰分测试结果如表 1 所示。煤的全硫按照 GB/T 214—2007《煤中全硫的测定方法》中的艾仕卡法进行测试;煤中灰分按照 GB/T 212—2008《煤的工业分析方法》进行测试;煤中各形态硫按照 GB/T 215—2003《煤中各种形态硫的测定方法》进行测定。

表 1 不同粒级煤样全硫和灰分质量分数

粒级/mm	w(全硫)/%	w(灰分)/%
0.15~0.18	0.45	10.56
0.106~0.15	0.43	10.22
0.083~0.106	0.42	10.17
0.075~0.083	0.40	10.11
<0.075	0.37	10.08

实验试剂:硫酸、正丙醇、煤油、仲辛醇、氯化钡、硝酸银、甲基橙、盐酸、氧化镁、无水碳酸钠等均为分析纯试剂。

仪器:D8 ADVANCE 型 XRD,德国 Bruker AXS 生产;傅里叶变换红外光谱仪,美国 PerkinElmer 生产;CHI660E 电化学工作站,上海辰华仪器有限公司生产;DF1782SL2A 直流稳压稳流电源,北京百思佳特科技有限责任公司生产;XFD-0.5 型系列单槽浮选机,南昌市恒顺化验设备制造有限公司生产;213 型铂电极、KQ2200E 超声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司生产;SXL-1016 型程控箱式电炉,上海精宏实验设备有限公司生产;ML-1.5-4 可调式电热板,北京市永光明医疗仪器厂生产。

1.2 超声电化学浮选脱硫脱灰实验

称取不同粒级的煤样各 25 g,加入一定浓度的稀硫酸溶液和 5 mL 正丙醇混合后置于电解槽中,再加蒸馏水至 250 mL。在一定温度、搅拌速率和电流强度下,超声电解至设定时间(超声波频率 40 kHz,功率 100 W),随后对煤浆进行浮选实验(2 590 r/min,

充气量 0.15 m³/h),将浮选后的精煤和尾煤抽滤、洗涤、烘干并进行分析测试。实验用脱硫率(S_t)与脱灰率(A_t)来评价脱硫脱灰效果:

$$S_t = [(S_y - S_j)/S_y] \times 100\% \quad (1)$$

式中: S_t 为脱硫率,%; S_y 为原煤硫分,%; S_j 为精煤硫分,%。

$$A_t = [(A_y - A_j)/A_y] \times 100\% \quad (2)$$

式中: A_t 为脱灰率,%; A_y 为原煤灰分,%; A_j 为精煤灰分,%。

1.3 煤样电解性能测试

取 5 g 煤样和一定量的溶剂配成 80 mL 溶液,用 CHI660E 电化学工作站对溶液进行电解性能测试。设置起始电压为 1 V、扫速为 0.05 V/s、采样间隔 0.001 V、终止电压为 5 V。

1.4 煤样分析测试

利用 X 射线衍射仪进行煤样中的矿物种类及黄铁矿(FeS₂)的存在形式分析,设置样品的扫描步长为 0.01°,扫描速度为 8(°)/min,扫描范围为 4°~80°。用傅里叶变换红外光谱仪对煤样官能团进行表征分析,将煤样和 KBr(质量比为 1:100)混合研磨均匀,压制成半透明状的薄片,放入 FT-IR 样品室,以 4 cm⁻¹的光谱分辨率在 400~4 000 cm⁻¹范围内扫描 32 次。

2 结果与分析

2.1 电解时间对脱硫效果的影响

前期实验已对硫酸浓度、电解温度、电流强度、浮选时间进行了系统研究,硫酸浓度为 5.5 × 10⁻³ mol/L、电解温度为 30℃、电流强度为 83 × 10⁻³ A/cm²、浮选时间为 15 min 为最佳的脱硫脱灰条件。现对电解时间进行深入探讨,将煤样以时间间隔为 5 min 进行超声电化学浮选脱硫实验,结果如图 1 所示。从图 1 中可以看出,随着超声电解时间的增加,煤中硫质量分数逐渐减少,在 40 min 之前硫质量分数的减少趋势大致相同;40 min 之后硫质量分数减少量逐渐降低;50 min 之后硫质量分数几乎不再变化,考虑到硫质量分数的减少量与经济效益,选择超声电解时间为 40 min。煤样超声电解过程中 pH 的变化情况如图 2 所示。从图 2 中可以看出,煤浆呈现酸性且在超声电解过程中 pH 随着电解过程的进行逐渐增大,在 40 min 后 pH 趋于稳定。这是由于发生氧化还原反应 H⁺ 逐渐被消耗,pH 增大。当超声电解进行到 40 min 时,超声电化学反应达到极限。因此,超声电解时间选用 40 min。

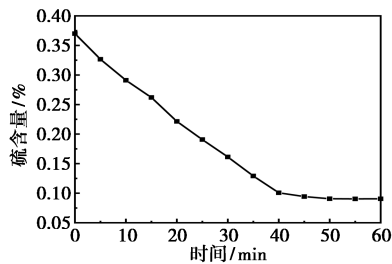


图1 0.075 mm 以下煤样中硫质量分数随电解时间的变化情况

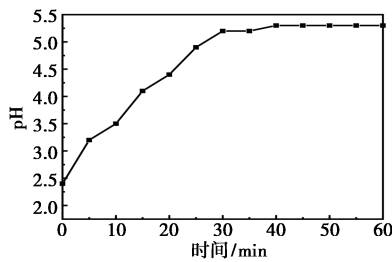


图2 0.075 mm 以下煤样超声电解过程中pH 的变化情况

2.2 不同粒级煤样浮选精煤收率分析

在最佳的脱硫脱灰条件下对不同粒级煤样进行浮选实验,结果如表2所示。由表2可知,不同粒级煤样直接浮选精煤收率随着粒级的减小而增加,表明煤样大小对浮选收率有一定影响,且煤颗粒越小收率越高。经过超声电解处理之后,不同粒级的煤样浮选精煤收率都有很大提升,其中收率最高的为<0.075 mm 的煤样,其浮选收率可达93.05%。

表2 不同粒级煤样处理前后接触角与精煤产率

粒级/mm	原煤接触角/°	超声电解后煤样接触角/°	直接浮选精煤产率/%	超声电化学浮选精煤产率/%
0.15~0.18	125.5	127.5	47.15	88.62
0.106~0.15	127.0	129.5	49.42	89.51
0.083~0.106	133.0	136.0	51.95	90.62
0.075~0.083	137.5	141.5	60.98	91.29
<0.075	142.0	146.5	67.92	93.05

浮选是一种物理脱硫降灰的洗煤方法,主要是利用煤的疏水性伴生有害元素杂质的亲水性实现煤与有害元素的分离。从表2中还可以看出,各粒级煤样接触角都大于90°,呈现疏水性。不同粒级的煤样经过超声电解处理后接触角增大,这是由于酸性条件下电化学能有效促进煤中形态硫的电化学氧化剥离,增大接触角,增强煤颗粒表面疏水性,提高

浮选精煤收率。超声空化效应和剪切作用能剥离煤颗粒表面亲水性的矿物如黄铁矿,减小煤颗粒的粒径,增大煤颗粒的接触面积和接触角,从而提高精煤产率。而当超声与电化学结合强化浮选时,精煤产率又进一步提升。

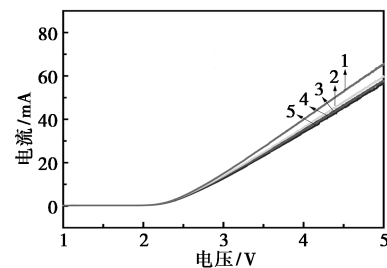
2.3 不同粒级煤样脱硫脱灰效果分析

不同粒级煤样直接浮选、超声电化学浮选脱硫脱灰效果如表3所示。由表3可知,不同粒级煤样之间直接浮选脱硫效果与脱灰效果相差不大,而超声电化学浮选脱硫脱灰有着显著差异,且煤颗粒越小脱硫脱灰效果越好。脱硫率与脱灰率随着粒级的增加呈减小趋势,其中<0.075 mm 的煤样脱硫率与脱灰率最大,分别为72.97%、41.17%。

表3 不同粒级煤样脱硫脱灰效果

粒级/mm	直接浮选脱灰率/%	超声电解浮选脱灰率/%	直接浮选脱硫率/%	超声电解浮选脱硫率/%
0.15~0.18	19.32	30.97	6.67	51.11
0.106~0.15	21.04	36.72	6.98	55.81
0.083~0.106	22.62	37.36	7.15	57.14
0.075~0.083	24.23	40.26	7.50	62.50
<0.075	26.39	41.17	8.11	72.97

小颗粒的煤样有更大的比表面积,在硫酸电解质下能更快、更全面地被电化学氧化,从而剥离其中的各形态硫及其他有害元素。不同粒级煤样电化学性能如图3所示。从图3中可以看出,各粒级煤样的电化学性能有着一定的差距,<0.075 mm 煤样的电化学性能最好,这也是其脱硫效果较好的原因之一。超声波能促进电解时的电子传递速率,从而提升脱硫脱灰效果。由于煤中的黄铁矿硬度较大难以研磨,所以在大颗粒煤样中黄铁矿的质量分数较高,且大颗粒煤样的电化学性能较差,导致脱硫率、脱灰率相对较低。

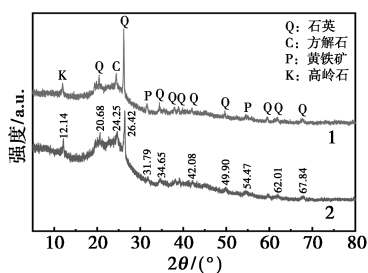


1—<0.075 mm;2—0.075~0.083 mm;3—0.083~0.106 mm;4—0.106~0.15 mm;5—0.15~0.18 mm

图3 不同粒级煤样电化学性能

2.4 <0.075 mm 煤样处理前后 XRD 分析

对处理前后的<0.075 mm 煤样进行 XRD 分析,结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,煤样处理前后的衍射谱线基线、峰位没有发生改变,表明超声电化学浮选不会破坏煤样的基本结构。煤中含有大量矿物质如石英、方解石、高岭石、黄铁矿等^[11]。与原煤相比经过超声电解处理后煤样石英的特征峰明显减弱或消失,方解石与高岭石的特征峰也有所减弱。在 2θ 为 31.79° 、 54.47° 出现的黄铁矿特征峰基本消失,表明超声电化学浮选能脱除煤中石英、高岭石等矿物质及黄铁矿。物理浮选能将煤与混在其中的亲水性矿物(石英、高岭石等)分离,但与煤结合的有机硫、黄铁矿等很难通过物理浮选除去。因此,需通过超声波的空化、剪切作用以及电化学的氧化作用将其从煤中剥离。



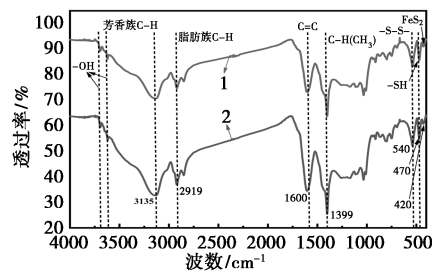
1—原煤;2—超声电化学浮选煤样

图 4 <0.075 mm 煤样处理前后 XRD 谱图

2.5 <0.075 mm 煤样处理前后红外光谱分析

对处理前后的<0.075 mm 煤样进行红外分析,结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出,在 $3750 \sim 3600 \text{ cm}^{-1}$ 处煤中结晶水(—OH)的特征峰基本没有变化^[12],表明超声电化学浮选处理对煤中结晶水没有显著作用;脱硫后的煤样在 3135 cm^{-1} 处的芳香族 C—H 的伸缩振动峰增强^[13],说明脱硫后的煤芳香性更好;在 2919 cm^{-1} 处的脂肪族 C—H 的伸缩振动峰几乎没有变化^[14],表明超声电化学浮选不会改变煤样的基本碳链结构;在 1600 cm^{-1} 处的芳香环 C=C 伸缩振动峰增强,表明该煤样很难在空气下发生反应,表面活性基团变化很小^[15];在 1399 cm^{-1} 处的 —CH_3 中 C—H 的弯曲振动峰显著增强,这是由于在酸性条件处理后煤样中 H 的含量增加所致;在 540 cm^{-1} 处芳香双硫醚基团(—S—S—)、 470 cm^{-1} 处硫醇(—SH)振动峰减弱,归因于有机硫的剥离。 420 cm^{-1} 处黄铁矿的振动峰减弱,归因于黄铁矿的剥离,与 XRD 分析结果一致。综上,超声电化学浮选能够在不改变煤样基本结构的条件下

剥离煤中有机硫与黄铁矿硫,增加煤样的芳香性。



1—原煤;2—超声电化学浮选煤样

图 5 <0.075 mm 煤样处理前后 FT-IR 谱图

2.6 <0.075 mm 煤样处理前后形态硫分析

<0.075 mm 煤样处理前后各形态硫质量分数如表 4 所示。由表 4 可知,该煤样中的硫以有机硫为主,占全硫的 54.14%,硫酸盐硫占比较少,为 3.7%。经过超声电化学浮选处理后煤样中各形态硫的质量分数都有不同程度的减小,其中黄铁矿硫的质量分数减少 89.12%,硫酸盐硫的质量分数减少 64.23%,有机硫质量分数减少 59.11%。这与煤样有机硫、黄铁矿硫的红外吸收峰减弱相一致。

表 4 <0.075 mm 煤样处理前后形态硫含量表

煤样	w(全硫)/%	w(硫酸盐硫)/%	w(有机硫)/%	w(黄铁矿硫)/%
<0.075 mm 原煤	0.37	0.0137	0.2003	0.1571
<0.075 mm 处理后煤样	0.10	0.0049	0.0819	0.0171

各形态硫的减少归因于超声波能促进电化学氧化时的电子转移速率,将黄铁矿硫、有机硫转化为硫酸盐硫,转移至水相中脱除。

3 结论

不同粒级煤样脱硫脱灰效果不同,粒级越小电化性能越好,浮选收率越高,脱硫脱灰效果越显著,<0.075 mm 煤样超声电化学浮选精煤收率可达 93.05%,脱硫率可达 72.97%,黄铁矿硫质量分数减少 89.12%,硫酸盐硫质量分数减少 64.23%,有机硫质量分数减少 59.11%,脱灰率最大为 41.17%。

超声波的空化效应和剪切作用能改善煤颗粒的表面性质增大其接触角,同时超声波能增加电解过程的电子传递效率,显著增加浮选精煤的收率。酸性条件下,超声电化学强化煤浮选在不改变煤样基本结构的前提下能有效脱除煤中有机硫基团(硫醇、硫醚等)、黄铁矿硫、硫酸盐硫等含硫物质以及石英、高岭石等成灰矿物。

(下转第 194 页)

(1) 当初始 NaCl 与 Na₂SO₄ 的质量比 $\geq 3:1$ 时, 电渗析在浓缩过程中表现出明显的分盐效果。而当初始 NaCl 与 Na₂SO₄ 的质量比 $\leq 3:5$ 时, 电渗析在浓缩过程中脱盐液侧可以实现 Na₂SO₄ 的纯化。

(2) 当初始 NaCl 与 Na₂SO₄ 的质量比 $\geq 2:5$ 时, Cl⁻ 具有优先迁移性, 且初始 NaCl 所占的比例越高, Cl⁻ 的优先迁移性越明显。当初始 NaCl/Na₂SO₄ 质量比为 1:5 时, SO₄²⁻ 开始具有优先迁移性。

综上, 在电渗析系统工艺设计时, 可以根据待处理浓盐水中 NaCl 与 Na₂SO₄ 的比例来进行不同的工艺设计, 从而实现浓盐水的分盐与浓缩或 Na₂SO₄ 结晶产物的回收与 NaCl 的浓缩, 也可以通过调整待处理浓盐水中初始离子比例, 在电渗析操作中获得更好的选择透过性。

参考文献

- [1] 孙剑宇, 杨雪. 浓盐水极限浓缩时的电渗析过程水迁移现象研究[J]. 水处理技术, 2021, 47(11): 122-125.
- [2] 吴雅琴, 杨波, 张高旗, 等. 膜集成技术在高盐废水资源化工程中的应用[J]. 水处理技术, 2019, 45(4): 131-134.
- [3] 王亚敏, 刘杰, 袁俊生. 海水淡化副产浓海水资源化利用制备 NaCl[J]. 水处理技术, 2020, 46(5): 60-64.
- [4] 张海珍, 丁浩, 许振良. 面向盐湖卤水和海水的锂资源膜法提锂

现状与进展[J]. 水处理技术, 2017, 43(12): 1-7.

- [5] Mohammadi R, Tang W, Sillanpää M. A systematic review and statistical analysis of nutrient recovery from municipal wastewater by electro dialysis[J]. Desalination, 2021, 498: 114626.
- [6] 田秉晖, 刘芷源, 李昱含. 基于“趋零排放”的高盐废水电渗析浓缩技术研究进展[J]. 环境工程学报, 2020, 14(9): 2394-2405.
- [7] 章晨林, 张新妙, 郭智, 等. 电渗析法处理含盐废水的进展[J]. 现代化工, 2016, 36(7): 13-16.
- [8] 董婷. 电流密度与离子浓度影响下电渗析中选择性分离单价/二价阳离子的过程解析与优化[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [9] 徐铜文, 黄川徽. 离子交换膜的制备与应用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008, 45-46.
- [10] Sata T. Studies on anion exchange membranes having permselectivity for specific anions in electro dialysis-effect of hydrophilicity of anion exchange membranes on permselectivity of anions[J]. Journal of Membrane Science, 2000, 167: 1-31.
- [11] Sata T, Sata T, Yang W. Studies on cation-exchange membranes having permselectivity between cations in electro dialysis [J]. Journal of Membrane Science, 2002, 206: 31-60.
- [12] Tao Q, Huang S, Li X, et al. Counterion-dictated self-cleaning behavior of polycation coating upon water action: Macroscopic dissection of hydration of anions[J]. Chem Int Ed, 2020, 59: 14466.
- [13] Dong T, Yao J, Wang Y, et al. On the permselectivity of di- and mono-valent cations: Influence of applied current density and ionic species concentration[J]. Desalination, 2020, 488: 114521. ■

(上接第 190 页)

参考文献

- [1] 刘炯天. 关于我国煤炭能源低碳发展的思考[J]. 中国矿业大学学报(社会科学版), 2011, 13(1): 5-12.
- [2] Coughlin R W, Farooque M. Hydrogen production from coal water and electrons[J]. Nature, 1979, 279: 301-303.
- [3] Li D, Bao Y, Wang Y, et al. Multiple-experimental investigation on the physicochemical structures alternation during coal biogasification[J]. Fuel, 2023, 339: 127433.
- [4] Tong Y, Yue T, Gao J, et al. Partitioning and emission characteristics of Hg, Cr, Pb, and As among air pollution control devices in Chinese coal-fired industrial boilers[J]. Energy Fuels, 2020, 34: 7067-7075.
- [5] 熊明金, 黄叶钿, 符剑刚, 等. 高硫煤深度浮选联合化学氧化脱灰脱硫提质研究[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(4): 64-71.
- [6] 范乐珍, 唐佩瑶, 李钰涵, 等. 阴离子对铁盐氧化脱除煤中硫的影响[J]. 现代化工, 2022, 42(6): 153-155+161.

- [7] 武伟, 刘晋芳, 宋璇, 等. NO₂-N₂O₄ 体系脱除煤中硫的研究[J]. 现代化工, 2020, 40(S1): 195-199.
- [8] 王瑞, 刘自勇, 王琪, 等. CO₂ 辅助好氧菌煤炭脱硫工艺的实验[J]. 化工进展, 2021, 40(1): 526-533.
- [9] 金权, 李梅, 孙功成, 等. 超声辅助 H₂O₂-CH₃COOH 脱除宁东煤中硫分和灰分研究[J]. 煤炭转化, 2020, 43(1): 72-80.
- [10] 张鸿波, 李永盛, 宁婷婷, 等. 酸性条件下煤电化学脱硫实验研究[J]. 黑龙江科技大学学报, 2014, 24(1): 58-62.
- [11] 桂夏辉, 刘炯天, 陶秀祥, 等. 难浮煤泥浮选速率试验研究[J]. 煤炭学报, 2011, (11): 1895-1900.
- [12] 李艳红, 訾昌毓, 常丽萍, 等. 低阶煤中含氧官能团的测定[J]. 煤炭技术, 2018, 37(9): 366-369.
- [13] 朱学栋, 朱子彬, 韩崇家, 等. 煤中含氧官能团的红外光谱定量分析[J]. 燃料化学学报, 1999, 27(4): 335-339.
- [14] 缪宇龙, 姚楠, 李小年. 煤官能团的表征方法概述[J]. 浙江化工, 2015, 46(1): 43-48.
- [15] 王海燕. 不同处置方式煤表面化学结构的傅里叶红外光谱分析[J]. 煤矿安全, 2017, 48(8): 177-181. ■