

# 微波协同化学助剂强化脱除煤中硫

周丙义,周涛,李洋,葛涛

(安徽理工大学材料科学与工程学院,安徽淮南 232001)

**摘要:**硫是煤中主要有害元素,煤炭利用过程中硫的排放是酸雨的重要成因,脱硫是煤炭洁净利用的研究热点之一。微波具有促进反应发生、加快反应速率的作用,微波协同化学助剂脱硫是煤炭脱硫的重要手段。本文通过微波辐照结合3种化学助剂研究煤中硫的脱除效果,利用正交试验考察微波辐照时间、化学助剂种类和煤种对脱硫效果的影响。结果表明,煤种对微波协同不同助剂的脱硫效率影响较大,所选3种煤样的最佳辐照时间各不相同;硝酸与微波联合的脱硫效果最好,其中贵州(GZ)煤在微波协同硝酸作用下,全硫脱除率可达71.2%。形态硫测试分析表明煤样经脱硫后无机硫脱除效率较高,最高可达90.5%,有机硫脱除效率在20%~40%。XRD谱图分析显示微波协同化学助剂脱硫后,煤中主要矿物和煤质结构没有明显变化,微波在脱除煤中硫分的同时可保持煤炭基质稳定。XPS谱图分析表明,煤样硫醚(醇)类有机硫脱除效果较好,脱除率可达49.4%,亚砷类略低,脱除率为23%~28%,噻吩类有机硫脱除效果最差,脱除率在10%~20%。

**关键词:**煤炭;脱硫;微波;助剂;XRD;XPS

中图分类号:TQ53

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2019)03-0049-07

## Enhanced removal of sulphur from coal by microwave combined with chemical auxiliaries

ZHOU Bingyi, ZHOU Tao, LI Yang, GE Tao

(School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** Sulfur is the main harmful element in coal. The emission of sulfur during coal utilization is an important cause of acid rain. Desulfurization is one of the research hotspots for clean utilization of coal. Microwave has the function of promoting the reaction and accelerating the reaction rate. Microwave combined with chemical auxiliaries is an important means of coal desulfurization. In this paper, the effects of sulfur removal in coal were studied by microwave irradiation combined with three chemical additives. The effects of microwave irradiation time, chemical additives types and coal types on desulfurization were investigated by orthogonal test. The results show that the coal types have a great influence on the desulfurization efficiency of microwave assisted additives, and the optimum irradiation time of the selected three coal samples is different. Among the three chemical additives selected, the desulfurization effect of nitric acid combined with microwave is the best. The removal rate of total sulfur in Guizhou (GZ) coal can reach 71.2% under the action of microwave combining with nitric acid. The morphological sulfur test analysis shows that the removal efficiency of inorganic sulfur after coal desulfurization is higher, up to 90.5%, and the removal efficiency of organic sulfur is between 20% and 40%. XRD spectrum analysis shows that after the desulfurization of microwave assisting chemical additives, there is no significant change in the main minerals and coal structure in the coal. The microwaves can maintain the stability of coal matrix while removing sulfur from coal. Through the analysis of XPS spectrum, it is known that the removal of sulphur thioethers and organic sulphur from coal samples is better, the removal rate can reach 49.4%, the sulfoxides are slightly lower, the removal rate is 23%~28%, the removal of the thiophene organic sulfur is the worst, and the removal rate is between 10% and 20%.

**Key words:** coal; desulfurization; microwave; additive; XRD; XPS

收稿日期:2019-04-02;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.19040202

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2018M632519);安徽省博士后基金资助项目(2017B169)

作者简介:周丙义(1998—),男,安徽阜阳人,研究方向为洁净煤技术。E-mail:2963925776@qq.com。通讯作者:葛涛,副教授,博士,研究方向为环境化学和洁净煤技术。E-mail:getao2007@163.com

引用格式:周丙义,周涛,李洋,等.微波协同化学助剂强化脱除煤中硫[J].洁净煤技术,2019,25(3):49-55.

ZHOU Bingyi, ZHOU Tao, LI Yang, et al. Enhanced removal of sulphur from coal by microwave combined with chemical auxiliaries[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(3): 49-55.



移动阅读

## 0 引言

中国是世界上最大的煤炭生产国和消费国,在一次能源结构中,煤炭约占60%,在今后很长时期都是我国的主体能源<sup>[1-2]</sup>。目前,我国85%的煤炭利用通过直接燃烧消耗。硫是煤中主要有害元素,煤燃烧向大气中排放SO<sub>2</sub>,造成严重大气污染,也是造成酸雨的主要原因。煤中硫会影响焦炭、合成气等工业产品的质量和产量,腐蚀生产设备,因此煤炭脱硫是煤加工利用过程中的重要环节,对降低污染、环境保护具有重要意义<sup>[3]</sup>。煤炭燃前脱硫包括物理、化学、温和净化和微生物脱硫技术,其中,微波脱硫是温和净化脱硫的主要技术<sup>[4]</sup>。微波具有促进化学反应发生、加快反应速率等优点,微波协同化学助剂不仅能脱除煤中无机硫,还能脱除煤中有机硫,已成为煤炭脱硫的研究热点之一<sup>[5-6]</sup>。赵景联等<sup>[7]</sup>、程刚等<sup>[8]</sup>、白景启<sup>[9]</sup>通过微波辐照添加助剂,以及结合超声波、微生物等手段,可使煤中无机硫和有机硫的脱除率分别达到90%和50%左右<sup>[7-9]</sup>。Chehreh等<sup>[10]</sup>利用微波辐射结合过氧乙酸洗涤脱除伊朗塔巴斯煤中硫,可在不破坏煤有机基质的前提下,显著提高煤中有机硫和无机硫的脱除率。张秀文等<sup>[11]</sup>采用微波联合过氧乙酸体系进行脱硫试验研究,结果表明,微波联合过氧乙酸体系对于阳泉高

硫无烟煤中有机硫脱硫率最高为10.01%,对无机硫的脱硫率最大为68.35%。许宁等<sup>[12]</sup>采用微波联合碱液(NaOH)方法进行煤炭脱硫试验,结果表明脱硫率随煤炭粒度的减小而增大,随碱液浓度、辐照时间、微波功率的增大而增大。前人研究大多仅考虑单因素对煤炭脱硫效率的影响,研究脱硫效率指标较为单一,鲜见借助XPS分析方法研究煤炭有机硫各赋存形态的脱除效果,以及微波与化学助剂联合对煤炭基质综合影响的研究。根据前期试验积累,本文应用微波辐照和化学助剂结合的方法研究煤炭脱硫效果,设计正交试验考察辐照时间、化学助剂种类和煤样种类等因素对脱硫效果的影响;根据GB/T 215—2003《煤中各种形态硫的测定方法》分析煤中不同形态的硫的脱除效果,并通过XRD研究煤样试验前后的煤质变化;利用XPS研究煤样脱硫前后有机硫形态分布及含量变化,以期为微波脱硫的机理研究和方法改进提供参考。

## 1 试验

### 1.1 煤样制备与煤质分析

选取山西(SX)、贵州(GZ)和山东(SD)3种煤样,根据GB 474—2008《煤样的制备方法》制样,密封保存。3种煤样的工业分析和元素分析见表1。3种煤中全硫含量均高于3%,属于高硫煤。

表1 煤样的工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of coal samples

煤样	工业分析/%				元素分析/%				
	$M_{ad}$	$A_d$	$V_d$	$FC_d$	$C_d$	$H_d$	$O_d$	$N_d$	$S_d$
SX	1.00	9.01	15.46	74.53	87.43	4.42	3.34	1.4	3.15
SD	1.97	6.40	35.87	55.76	81.29	5.49	8.52	1.52	3.12
GZ	2.84	41.13	7.62	48.41	82.36	3.39	6.66	1.48	4.20

### 1.2 试验设备与试剂

主要设备:5E-MAG6600工业分析仪, multi EA 4000元素分析仪, XRD-6000分析仪, Thermo ESCALAB 250型X射线光电子能谱仪, SDS601定硫仪, G70F20N3P-ZS(WO)微波炉, HJ-4多头磁力加热搅拌器, DZF型真空干燥箱。

试验所用化学试剂:稀HNO<sub>3</sub>(质量分数10%), NaOH(质量分数10%), H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+HAc(质量分数均为10%,体积比1:1)。

### 1.3 XRD及XPS测试条件

XRD测试条件:测试在安徽理工大学材料科学与工程学院完成,选用仪器为XRD-6000分析仪:

Cu靶辐射,管电压40 kV,管电流100 mA, D<sub>s</sub> = 1°, S<sub>s</sub> = 1°, R<sub>s</sub> = 0.3 mm, ω = 3(°)/min,扫描范围10°~80°。

XPS测试条件:测试在中国科学技术大学理化分析测试中心完成,选用仪器为Thermo ESCALAB 250型X射线光电子能谱仪, X射线激发源:单色AlKα(E=1486.6 eV),功率150 W, X射线束斑500 μm,能量分析器固定透过能30 eV,以C1s(284.6 eV)为定标标准进行校正。

### 1.4 试验步骤与装置

取0.6 g原煤样放入烧杯中,加入30 mL化学助剂,滴加1 mL乙醇(分析纯),搅拌使煤样与试剂

充分混合;将烧杯放入微波反应装置中,在 350 W 的微波条件下作用一段时间,辐照结束后取出烧杯冷却到室温;用真空抽滤装置将样品抽滤,并用去离子水冲洗 2~3 遍;将滤饼放入真空干燥箱中,在 100 ℃ 的条件下干燥 10 min;将干燥的滤饼取出存放备用。

试验反应装置为格兰仕微波炉电器有限公司生产的 G70F20N3P-ZS(W0) 型微波反应装置,为民用微波炉,频率为 2 450 Hz,最大功率为 700 W。微波试验反应装置简图如图 1 所示。

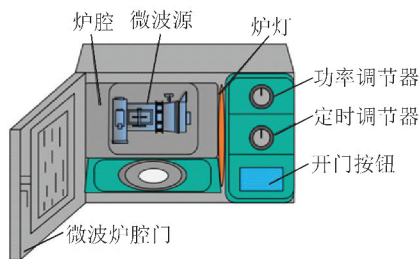


图 1 微波反应装置简图

Fig. 1 Schematic diagram of microwave reactor

## 2 结果与讨论

### 2.1 正交试验设计及脱硫效果

为了考察微波辐照时间(A)、加入化学助剂种类(B)和煤样种类(C)对样品脱硫效果的影响,设计三因素三水平的正交试验(不考虑交互作用)。试验因素水平表见表 2。根据因素水平表进行试验,并测试全硫含量,计算脱硫率,结果见表 3。

表 2 因素水平

Table 2 Factors and levels

水平	A 辐照时间/s	B 助剂种类	C 煤样
1	120	HNO <sub>3</sub>	SX
2	240	NaOH	GZ
3	360	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + HAc	SD

煤样的脱硫率  $w$  按式(1)计算。

$$w = \frac{S_1 - S_2}{S_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $S_1$  为脱硫前煤样的硫含量,% ; $S_2$  为微波脱硫后煤样的硫含量,%。

采用方差分析法分析试验结果,计算 A、B、C 的  $F$  值,得  $F_A = 0.77$ ,  $F_B = 5.11$ ,  $F_C = 9.84$ 。查看  $F$  分布表可知: $F_{0.10}(2, 2) = 9$ ,  $F_{0.05}(2, 2) = 19$ ,  $F_{0.01}(2, 2) = 99$ 。由于  $F_C = 9.84 > F_{0.10}(2, 2) = 9$ , 所以因素 C 水平的改变对试验指标有显著影响。3 种煤样不同

条件下的脱硫效果如图 2 所示。

表 3 正交试验方案与结果

Table 3 Orthogonal experiment scheme and results

试验号	A	e	B	C	脱硫率/%
	1	2	3	4	
1	1	1	1	1	28.6
2	1	2	2	2	53.1
3	1	3	3	3	15.7
4	2	1	2	3	29.8
5	2	2	3	1	23.8
6	2	3	1	2	71.2
7	3	1	3	2	40.7
8	3	2	1	3	50.6
9	3	3	2	1	12.4
$K_1$	97.4	99.1	150.4	64.8	
$K_2$	124.8	127.5	95.3	165.0	
$K_3$	103.7	99.3	80.2	96.1	
$K_1^2$	9 486.76	9 820.81	22 620.16	4 199.04	
$K_2^2$	15 575.04	16 256.25	9 082.09	27 225.00	
$K_3^2$	10 753.69	9 860.49	6 432.04	9 235.21	
$R$	27.4	28.4	70.2	100.2	
$S$	137.30	177.98	910.23	1 751.88	

注: $K$  为各水平数据之和; $R$  为极差; $S$  为各列偏差平方和。

煤样种类和化学助剂对脱硫效率影响显著,辐照时间对脱硫效率的影响较小。3 种煤样中,GZ 煤的脱硫率均为最高,这与煤样中硫的赋存形态有关。微波协同 HNO<sub>3</sub> 对 GZ 煤中硫的脱除效果最好,脱硫率最高可达 71.2%。H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + HAc 混合助剂能有效脱除煤中硫分,脱硫率可达 40%。NaOH 在熔融状态下对煤中有机硫有较好的脱除效果,但在常温状态下,碱 NaOH 溶液的脱硫效果不佳,除了 GZ 煤的脱硫率达到 50% 左右,SX、SD 煤的脱硫率均低于 30%,其中,SX 煤的脱硫率只有 12.4%。SX、GZ 和 SD 煤样最佳脱硫辐照时间各不相同,分别为 120、240 和 360 s。

微波加热技术是一种新型的材料合成技术,与传统加热方式相比,微波辐照所产生的高效率热效应加剧了分子运动,加快了分子的碰撞频率,对大多数化学反应有促进作用,通常表现为加快反应速率以及提高产率<sup>[13-14]</sup>。不同煤样具有不同的物理化学属性和形态硫赋存形式,在微波作用下,煤中含硫组分对微波能量的吸收转化特征不同,与不同助剂的化学反应路径也不同,含硫组分中的 Fe—S、C—S、S—S 等含硫化学键对微波响应及断键机理具有差异,因此产生不同的协同强化脱硫效果。

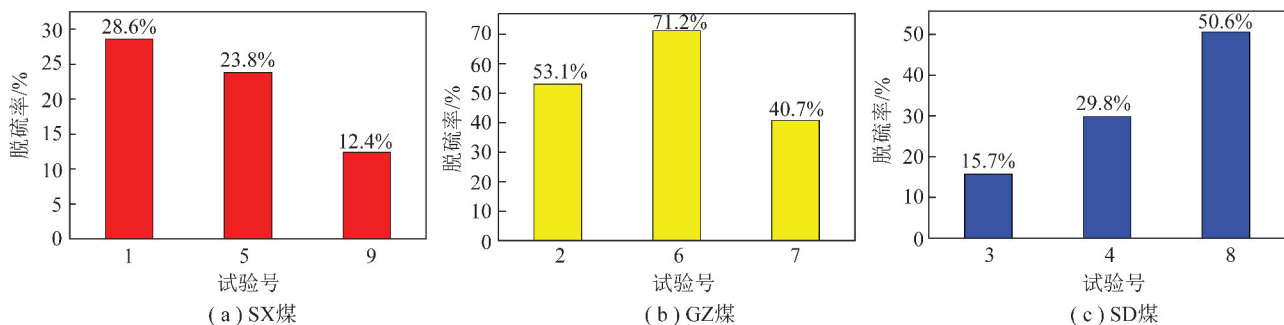


图2 煤样脱硫率

Fig. 2 Desulfurization rate of coal sample

## 2.2 煤脱硫前后 XRD 分析

根据正交试验结果,3种煤样最佳脱硫条件的试验号分别为1、6和8。对3种脱硫前后的煤样进行XRD分析,如图3所示。可知,3种煤样的矿物质主要以石英、高岭石和方解石为主,试验前后煤样中的硫铁矿特征峰(如衍射角为 $14.819^\circ$ 和 $45.449^\circ$ 处)高度有所下降,说明经过微波协同化学助剂试

验后,煤样中无机硫含量降低。脱硫后煤样中高岭石特征峰明显降低,主要是因为高岭石主要成分为铝硅酸盐,能与酸性试剂( $\text{HNO}_3$ )发生反应。石英、方解石、球霏石( $\text{CaCO}_3$ )和其他物质特征峰变化不明显。说明脱硫前后煤样主要矿物种类没有变化,但相对含量有所减少。微波协同化学助剂试验对煤岩组分影响较小,对煤质基本无破坏。

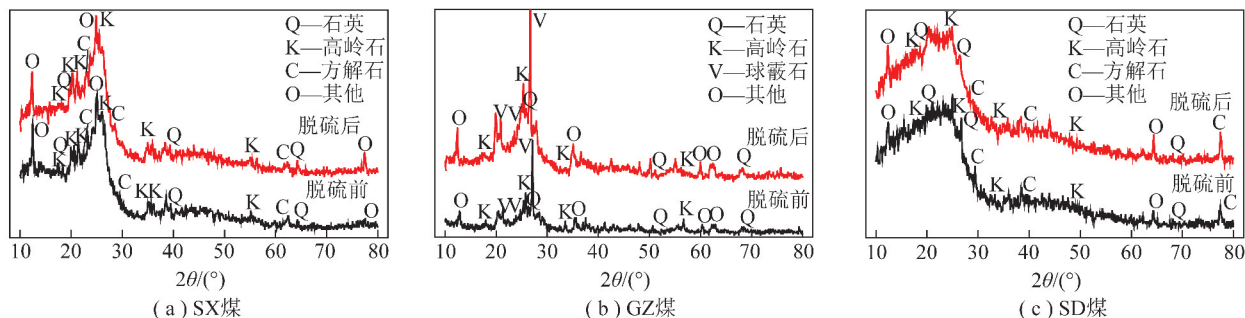


图3 脱硫前后煤样 XRD 谱图

Fig. 3 XRD spectra of coal before and after desulfurization

## 2.3 协同脱硫前后硫形态

硫在煤中以无机硫、单质硫、有机硫形式存在。无机硫主要来自矿物质中的含硫化合物,以硫化物、硫酸盐和少量的元素硫为主。无机硫多以孤粒附着或夹杂、包裹和嵌布形式与煤结合在一起,主要为物理作用。因此,煤中无机硫的脱除相对容易和简单,可通过物理方法脱除<sup>[15]</sup>。有机硫是指与煤的有机结构相结合的硫,国内外研究者认为煤中有机硫存在于煤大分子中,结构特殊,赋存状态主要可分为硫醇或羟基化物、硫醚或硫化物、噻吩类杂环硫化物<sup>[16]</sup>。由于煤中有机硫的组成结构复杂,对热稳定性的差异也很大,所以有机硫的脱除相对困难。

根据 GB/T 215—2003《煤中各种形态硫的测定方法》对试验方案1、6和8的煤样脱硫前后进行硫酸盐硫( $S_s$ )和硫化铁硫( $S_p$ )测定,利用全硫( $S_t$ )减去无机硫得到有机硫( $S_o$ )含量,并计算脱硫率,结果见表4。由表4可知,煤样在微波协同化学助剂

脱硫后,煤中硫含量显著降低。其中,无机硫含量下降幅度较大,脱除率最高可达90.5%。有机硫的脱除率在20%~40%。试验结果与文献表述相符合。煤样脱硫前后硫形态含量的对比如图4所示。

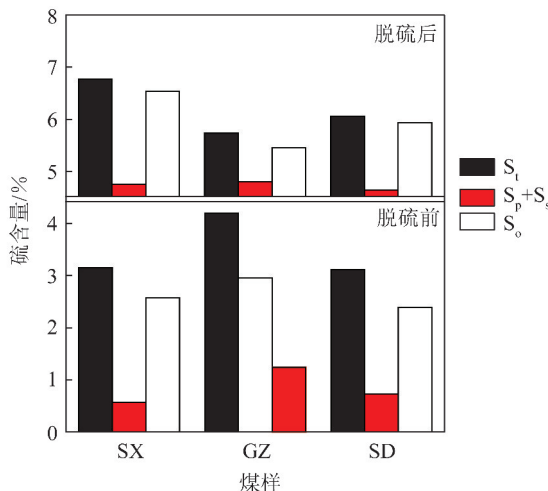


图4 硫形态对比

Fig. 4 Comparison of sulfur morphology

表4 微波协同化学助剂脱除煤中形态硫表征

Table 4 Characterization of morphological sulfur in coal by microwave combined with chemical additives %

煤样	脱硫前			脱硫后			脱硫率		
	$S_t$	$S_p+S_s$	$S_o$	$S_t$	$S_p+S_s$	$S_o$	$S_t$	$S_p+S_s$	$S_o$
SX	3.15	0.57	2.58	2.25	0.23	2.02	28.60	59.60	21.70
GZ	4.20	2.96	1.24	1.21	0.28	0.93	71.20	90.50	25.00
SD	3.12	0.73	2.39	1.54	0.12	1.41	50.60	83.60	41.00

## 2.4 煤脱硫前后 XPS 分析

脱硫前后煤样形态硫的分析表明:3种煤样中,GZ煤的全硫含量和无机硫含量最高,脱硫效果最好。而SX煤和SD煤的硫形态分布较相近,但有机硫的脱硫率差别较大,说明这2种煤样有机硫中硫的赋存状态以及脱除、转化过程不同。将SX和SD脱硫前后的煤样进行XPS测试,通过XPS PEAK

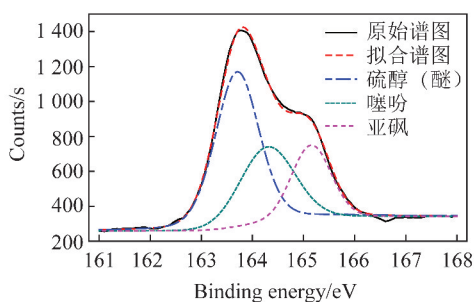
4.1软件拟合图谱,各有机硫赋存状态和含量见表5,XPS拟合谱图如图5所示。

由表5和图5可知,脱硫前后煤样有机硫的特征峰电子结合能位置基本没有变化,但峰强度有所下降,说明试验前后煤样中有机硫的形态种类基本没有变化,含量下降。由表5可知,SX煤脱硫前后的硫醇(醚)类硫含量分别为1.41%和1.05%,减少

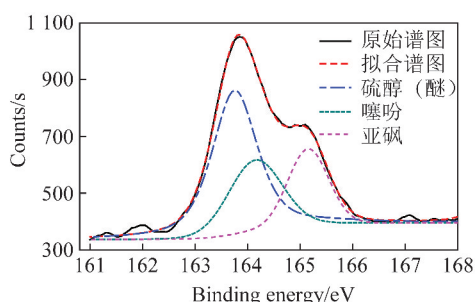
表5 煤样的有机硫形态及分布

Table 5 Form and distribution of organic sulfur in coal samples

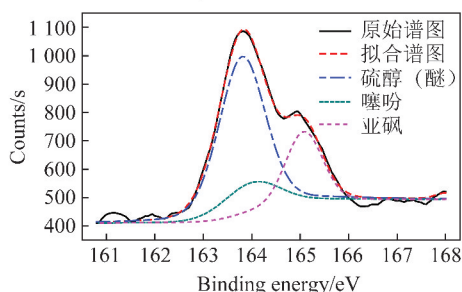
煤样	硫结构	特征峰电子结合能/eV		含量/%		硫含量变化率/%
		脱硫前	脱硫后	脱硫前	脱硫后	
SX	硫醇(醚)	163.75	163.70	1.41	1.05	25.50
	噻吩	164.15	164.30	0.65	0.57	12.30
	亚砷	165.15	165.15	0.52	0.40	23.10
SD	硫醇(醚)	163.80	163.769	1.58	0.80	49.40
	噻吩	164.00	164.25	0.31	0.25	19.40
	亚砷	165.075	165.08	0.50	0.36	28.00



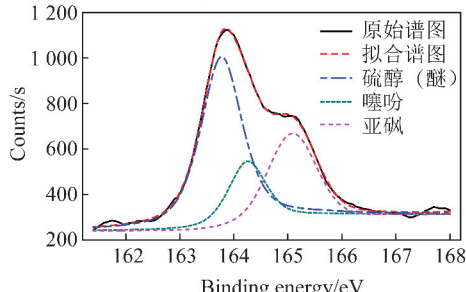
(a) SX煤脱硫前



(b) SX煤脱硫后



(c) SD煤脱硫前



(d) SD煤脱硫后

图5 煤样脱硫前后 XPS 拟合谱图

Fig. 5 XPS fitting spectrum before and after coal sample desulfurization

25.5%,而噻吩类硫含量分别为0.65%和0.57%,只减少12.3%,低于硫醇(醚)类。SD煤脱硫前后的硫醇(醚)类的硫含量分别为1.58%和0.80%,减少49.4%,噻吩类硫含量分别为0.31%和0.25%,减少19.4%。2种煤样有机硫中亚砷类硫含量分别减少了23.1%和28%。

脱硫前后煤样中有机硫的硫形态结构含量对比如图6所示。由图6可知,对煤样进行微波协同助剂试验,煤样有机硫中硫醇(醚)类脱除效果较好,噻吩类脱除效果较差。噻吩环具有芳香共轭结构的特殊性,结构稳定,不易脱除,而硫醇(醚)属于脂肪族硫化物,相比噻吩容易脱除。煤中有机硫的赋存状态较为复杂,其相互关系以及对微波能量的吸收转化机理目前尚在研究阶段,但较高的脱硫率体现了微波应用于煤炭脱硫具有很大的发展前景。

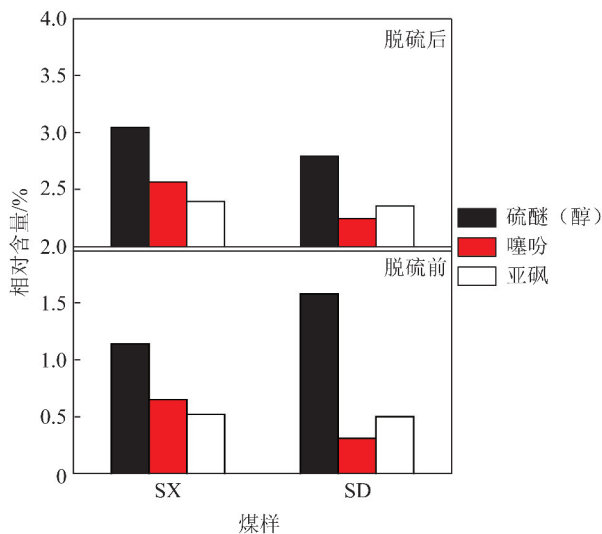


图6 有机硫形态含量对比

Fig.6 Comparison of organic sulfur form content

### 3 结 论

1)应用微波协同化学助剂的方法能有效脱除高硫煤中硫分,全硫脱除率为12.4%~71.2%。通过正交试验分析不同煤样对微波协同助剂的脱硫效率影响较大,不同煤样的最佳辐照时间不同。硝酸对煤炭硫分的微波脱除效果最佳。脱硫后煤样中有机硫和无机硫显著降低,其中GZ煤脱硫效果最好,硫含量从4.2%降低到1.21%,脱硫率达到71.2%。根据脱硫形态分析,煤样中无机硫脱除效果理想,最高可达90.5%,有机硫脱除率可达40%。

2)XRD谱图分析发现,微波协同化学助剂脱硫后,煤炭主要矿物和煤质结构无明显变化,但含量有所降低。煤样中无机硫基本全部脱除,表明煤样中黄铁矿硫发生分解,与周围活泼化学物质发生反应

(如氧气、水发生反应生成 $\text{SO}_2$ 与 $\text{H}_2\text{S}$ 脱离煤炭)。有机硫结构复杂,脱除机理尚未明确(如硫结构对微波能量的响应方式),还需进一步研究。助剂辅助微波辐照既能达到高效脱硫的目的,还可保持煤炭基质稳定。

3)XPS结果表明,煤样有机硫中硫醚(醇)类脱除效果较好,脱除率高达49.4%;亚砷类次之,SX煤和SD煤脱除率分别为23.1%与28%;噻吩类脱除效果最差,SX煤和SD煤脱除率分别只有12.3%、19.4%。不同煤样有机硫中各硫结构的含量不同,因此煤炭中噻吩类有机硫的脱除研究较为重要。

### 参考文献(References):

- [1] 中国煤炭产业经济景气研究课题组,岳福斌,林火灿,等. 2017—2018年中国煤炭产业经济形势研究报告[J]. 中国煤炭,2018,44(2):5-11.  
China Coal Industry Economic Climate Research Group, YUE Fubin, LIN Huocan, et al. Research report on the economic situation of China's coal industry from 2017 to 2018[J]. China Coal, 2018, 44(2):5-11.
- [2] 樊东方. 对目前我国煤炭能源低碳发展的思考分析[J]. 煤矿现代化,2018(1):123-124,127.  
FAN Dongfang. Analysis on the low carbon development of coal resources in China[J]. Coal Mine Modernization, 2018(1):123-124,127.
- [3] 严东,周敏. 煤炭微波脱硫技术研究现状与发展[J]. 煤炭科学技术,2012,40(7):125-128.  
YAN Dong, ZHOU Min. Study status and development on coal microwave desulfurization technology[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(7):125-128.
- [4] 袁鉴. 煤炭脱硫技术研究进展[J]. 洁净煤技术,2015,21(4):99-103.  
YUAN Jian. Research progress of coal desulfurization[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(4):99-103.
- [5] 丁乃东,傅家伟,李兆鑫,等. 微波驱动的煤炭脱硫研究[J]. 洁净煤技术,2010,16(4):49-52.  
DING Naidong, FU Jiawei, LI Zhaoxin, et al. Study on microwave-promoted desulfurization of coal[J]. Clean Coal Technology, 2010, 16(4):49-52.
- [6] 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.  
LIU Song, ZHANG Mingxu, HUANG Shaofei. Desulfurization by microwave irradiation combined with sodium hydroxide and mechanism for reaction[J]. Coal Conversion, 2016, 39(1):92-96.
- [7] 赵景联,张银元,陈庆云,等. 微波辐射氧化法联合脱除煤中有机硫的研究[J]. 微波学报,2002,18(2):80-84.  
ZHAO Jinglian, ZHANG Yinyuan, CHEN Qingyun, et al. The desulfurization of high organic sulfur coal by oxidation under microwave radiation[J]. Journal of Microwaves, 2002, 18(2):80-84.

- [8] 程刚,王向东,蒋文举,等.微波预处理和微生物联合煤炭脱硫技术初探[J].环境工程学报,2008,2(3):408-412.  
CHENG Gang, WANG Xiangdong, JIANG Wenju, et al. Preliminary study on biodesulfurization technology of coal in combination with microwave pretreatment[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2008, 2(3): 408-412.
- [9] 白景启.利用超声波-微波技术脱除煤中有机硫的研究[J].选煤技术,2017(1):17-19.  
BAI Jingqi. Study on removal of organic sulfur in coal using ultrasonic wave-microwave combined technique[J]. Coal Preparation Technology, 2017(1): 17-19.
- [10] CHEHREH S C, JORJANI E. Microwave irradiation pretreatment and peroxyacetic acid desulfurization of coal and application of GRNN simultaneous predictor[J]. Fuel, 2011, 90(14): 3156-3163.
- [11] 张秀文,董宪姝,樊玉萍,等.微波联合酸性助剂对高硫无烟煤脱硫效果及机理的研究[J].中国煤炭,2018,44(2):95-99.  
ZHANG Xiuwen, DONG Xianshu, FAN Yuping, et al. Study on desulfurization efficiency of high-sulfur anthracite by microwave combined with acid additive and its mechanism[J]. China Coal, 2018, 44(2): 95-99.
- [12] 许宁,陶秀祥,杨彦成.微波联合碱液煤炭脱硫研究[J].中国矿业,2015,24(4):117-120.  
XU Ning, TAO Xiuxiang, YANG Yancheng. Coal desulfurization under microwave irradiation combined with NaOH solution[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(4): 117-120.
- [13] USLU T, ATALAY U. Microwave heating of coal for enhanced magnetic removal of pyrite[J]. Fuel Processing Technology, 2004, 85(1): 21-29.
- [14] YAMADA K, NAGASHIMA I, HACHISU M, et al. Efficient solid-phase synthesis of cyclic RGD peptides under controlled microwave heating[J]. Tetrahedron Letters, 2012, 53(9): 1066-1070.
- [15] 谢广元.选矿学[M].徐州:中国矿业大学出版社,2001.
- [16] CHOU C L. Sulfur in coals: A review of geochemistry and origins[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 100: 1-13.