

# 流化床富氧气氛对 SO<sub>2</sub> 排放特性的影响

苗苗, 邓博宇, 孔皓, 张缦, 杨海瑞

(清华大学 能源与动力工程系 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 为了研究富氧燃烧气氛下煤在流化床中燃烧 SO<sub>2</sub> 排放特性, 利用小型流化床反应器, 以褐煤和无烟煤为试验原料, 分别在 21%、29%、42% 和 56% O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下进行了燃烧试验, 探究了燃烧气氛对流化床煤燃烧中 SO<sub>2</sub> 排放的影响。结果表明, 在 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下, 随着氧气浓度的提高, 2 种不同类型的煤在 770 °C 燃烧后, SO<sub>2</sub> 排放量逐渐升高, 褐煤 SO<sub>2</sub> 排放量从 925×10<sup>-6</sup> 增加到 6 526×10<sup>-6</sup>, 无烟煤的 SO<sub>2</sub> 排放量从 1 310×10<sup>-6</sup> 增加到 5 357×10<sup>-6</sup>。与无烟煤相比, 褐煤升高趋势更为明显。氧气浓度对 SO<sub>2</sub> 析出速率的影响显著, 在 15 s 甚至更短时间使得 SO<sub>2</sub> 析出达到更高的峰值。氧气浓度从 21% 增至 29% 时, 转化 S 显著增加, 之后随着氧浓度增加, 转化 S 增长趋缓。从机理上解释, 高氧浓度为硫化物析出提供了更充足的氧气, 促进了 SO<sub>2</sub> 的生成, 同时高氧浓度加速了挥发分和焦炭的燃烧速度, 改善了煤的燃烧和燃尽特性。通过增强煤本身的自热效应, 煤燃烧过程加快, 促进煤中硫元素的释放, SO<sub>2</sub> 排放量也相应增加。随着氧浓度的增加, 褐煤的 CO 保持在相对稳定的水平, 说明氧浓度的变化对此影响较小。褐煤挥发分高, 容易出现停留时间不足, 导致不充分燃烧, 烟气中含有一定量 CO 等气体。SO<sub>2</sub> 的排放除了与氧气浓度有关外, 主要还与煤中含硫量有关, 通常含硫量越高, 煤燃烧产生的 SO<sub>2</sub> 越多。由于试验煤种含硫量均较高, 因此 SO<sub>2</sub> 排放量处于较高水平, 在富氧燃烧过程中, 针对含硫量较高的煤种, 应充分考虑 SO<sub>2</sub> 排放控制问题。灰分也会影响 SO<sub>2</sub> 排放量, SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对 SO<sub>2</sub> 转化为 SO<sub>3</sub> 的影响较小, 而 CaO 和 MgO 作用明显, 煤灰中 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O 等含量对此转化过程也有一定影响。

**关键词:** 富氧燃烧; 流化床; 煤; SO<sub>2</sub>

中图分类号: TK16

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2020)03-0146-07

## Effect of oxygen-enriched atmosphere on SO<sub>2</sub> emission characteristics in fluidized bed

MIAO Miao, DENG Boyu, KONG Hao, ZHANG Man, YANG Hairui

(State key Laboratory of power systems, Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to study the SO<sub>2</sub> emission characteristics of coal combustion in a fluidized bed under oxygen-enriched combustion atmosphere, combustion experiments were carried out in a small fluidized bed reactor with lignite and anthracite as raw materials under 21%, 29%, 42% and 56% O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmosphere, respectively. The influence of combustion atmosphere on SO<sub>2</sub> emission from fluidized bed coal combustion was investigated. The results show that with the increase of oxygen concentration, the SO<sub>2</sub> emission of two different types of coal tends to increase gradually after combustion at 770 °C under the atmosphere of O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>. The SO<sub>2</sub> emission of lignite can increase from 925×10<sup>-6</sup> to 6 526×10<sup>-6</sup> by volume and that of anthracite can increase from 1 310 ×10<sup>-6</sup> to 5 357×10<sup>-6</sup> by volume. Compared with anthracite, the increasing trend of lignite is more obvious. The effect of oxygen concentration on SO<sub>2</sub> precipitation rate is also obvious. SO<sub>2</sub> precipitation reaches a higher peak value in 15 s or even shorter time. When the oxygen concentration increases from 21% to 29%, the transformation S increases significantly, and then with the increase of oxygen concentration, the transformstion S increases slowly. It is explained from the mechanism that the high oxygen concentration provides more oxygen for sulfide precipitation and promotes the formation of SO<sub>2</sub>. At the same time, the high oxygen concentration accelerates the combustion speed of volatile matter and char and improves the combustion and burnout characteristics of coal. By enhancing the self-heating effect of coal itself, the combustion process of coal is ac-

收稿日期: 2020-05-06; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CFB20050601

基金项目: 华能集团总部科技项目基础能源科技研究专项资助项目 (HNKJ20-H50, KTHT-U20GJJS06)

作者简介: 苗苗 (1995—), 女, 山东德州人, 博士研究生, 研究方向为 CFB 污染物排放与控制。E-mail: miaom18@mails.tsinghua.edu.cn。通讯作者: 杨海瑞, 教授, 研究方向为循环流化床燃烧。E-mail: yhr@tsinghua.edu.cn

引用格式: 苗苗, 邓博宇, 孔皓, 等. 流化床富氧气氛对 SO<sub>2</sub> 排放特性的影响[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(3): 146-152.

MIAO Miao, DENG Boyu, KONG Hao, et al. Effect of oxygen-enriched atmosphere on SO<sub>2</sub> emission characteristics in fluidized bed[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(3): 146-152.



移动阅读

celerated. Therefore, the release of sulfur element in coal is promoted and the emission of SO<sub>2</sub> is correspondingly increased. With the increase of oxygen concentration, the CO of lignite remains at a relatively stable level, indicating that the change of oxygen concentration has little effect on it. Lignite has a high volatile content, so it is easy to be short of residence time, which leads to inadequate combustion and a certain amount of CO in the flue gas. The emission of SO<sub>2</sub> is not only related to the concentration of oxygen, but also related to the sulfur content in coal. Generally, the higher the sulfur content is, the more SO<sub>2</sub> produced by coal combustion is. The sulfur content of the coal involved in this paper is high, so the SO<sub>2</sub> emission is at a high level. In the process of oxygen-enriched combustion, the SO<sub>2</sub> emission control should be fully considered for the coal with high sulfur content. The ash also affects SO<sub>2</sub> emission, SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> have little effect on SO<sub>2</sub> to SO<sub>3</sub>, while CaO and MgO have obvious effect. The content of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and K<sub>2</sub>O in coal ash also has influence on the transformation process.

**Key words:** oxygen-enriched combustion; fluidized bed; coal; SO<sub>2</sub>

## 0 引 言

CO<sub>2</sub>作为主要的温室气体之一,由于寿命长、排放量大,对温室效应贡献很大。在能源状况 and 环境保护的双重压力下,减少 CO<sub>2</sub>排放变得越来越重要。在众多 CO<sub>2</sub>来源中,化石燃料燃烧发电占比较大,因此洁净煤发电技术是煤电技术发展的新方向。

与传统燃煤方式相比,循环流化床具有燃烧效率高、燃料适应性强、负荷调节范围大、负荷调节方便快捷、污染物排放少、灰渣便于综合利用等优点<sup>[1-2]</sup>,目前循环流化床技术正朝着大型化的方向发展<sup>[3]</sup>。富氧燃烧技术也称为 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>燃烧技术,是一种综合治理燃煤污染物排放的新型洁净煤燃烧技术<sup>[4]</sup>。循环流化床富氧燃烧技术结合了富氧燃烧和循环流化床的优点,具有很大的发展潜力和研究价值。近年来,国内外学者对流化床富氧燃烧的 SO<sub>2</sub>排放规律开展诸多研究<sup>[5-11]</sup>。刘豪等<sup>[12]</sup>研究表明 O<sub>2</sub>浓度改变对 NO 和 SO<sub>2</sub>的释放影响不同, O<sub>2</sub>浓度升高促进 SO<sub>2</sub>析出,与段伦博等<sup>[13]</sup>结果相似。李庆钊等<sup>[14]</sup>发现随着 CO<sub>2</sub>浓度升高, SO<sub>2</sub>排放逐渐降低。毛玉如等<sup>[15]</sup>在 O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>和 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛下进行了氧气浓度 21%~35%的试验,发现 O<sub>2</sub>浓度增加时, SO<sub>2</sub>排放增加,脱硫效率略有提高,孙俊威等<sup>[16]</sup>也发现了这一现象。Czakiert 等<sup>[17]</sup>在循环流化床上对 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛中硫的转化率进行研究,结果表明,煤中硫在富氧气氛中的转化率增加是由于富氧气氛中燃料颗粒的温度升高导致。郑智敏等<sup>[18]</sup>重点考察了燃烧气氛、O<sub>2</sub>浓度、床温和石灰石添加量对 SO<sub>2</sub>释放的影响,随着 O<sub>2</sub>浓度从 21%增加到 40%时 SO<sub>2</sub>排放量明显增加,但随着 O<sub>2</sub>浓度增加到 50%时, SO<sub>2</sub>排放量反而下降。总体来看, O<sub>2</sub>浓度升高有利于促进 SO<sub>2</sub>的析出,但是否单调增加尚存在一定争议,同时煤种的影响也有待进一步研究。

本文利用小型流化床试验台,分析富氧气氛下

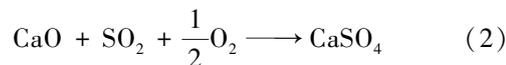
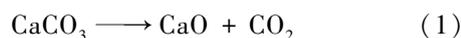
对煤燃烧产生的 SO<sub>2</sub>排放规律,探究了氧气浓度 (21%~56%) 和不同煤种特性对 SO<sub>2</sub>排放的影响,同时测量烟气中的 CO、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>,分析 SO<sub>2</sub>生成机理和影响因素,为煤富氧燃烧 SO<sub>2</sub>减排技术的发展提供参考。

## 1 机理分析

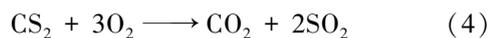
### 1.1 流化床中 SO<sub>2</sub>生成机理

流化床可通过向炉内添加石灰石,实现炉内脱硫。在一般燃烧条件下,流化床燃烧含硫燃料时,硫元素最终会转化为硫氧化物,其中大部分以 SO<sub>2</sub>的形式存在。

脱硫时,石灰石在炉膛内高温煅烧后通过反应(1)产生多孔 CaO, O<sub>2</sub>和 SO<sub>2</sub>扩散至 CaO 表面和孔隙中时会发生硫化反应,进而通过反应(2)生成 CaSO<sub>4</sub>,但在还原气氛下 CaSO<sub>4</sub>会发生分解,生成 CaO 或 CaS。



富氧燃烧中高比热性 CO<sub>2</sub>可能会造成颗粒表面及局部气相的还原气氛,促使煤中硫通过反应(3)~(7)更多地转化为 SO<sub>3</sub>、COS 和 CS<sub>2</sub>,显著降低煤中硫向 SO<sub>2</sub>的转化。



煤燃烧过程中,影响 SO<sub>2</sub>生成的因素主要包括燃烧气氛、温度、燃料停留时间等。通常,氧化性气氛更有利于 SO<sub>2</sub>的生成;温度升高时, SO<sub>2</sub>生成量增加;燃料停留时间在一定范围内延长会增加烟气中 SO<sub>2</sub>的生成。

## 1.2 富氧气氛对石灰石脱硫的影响

采用富氧燃烧时,由于气体成分的变化会影响石灰石固硫,石灰石发生煅烧反应的温度与 $\text{CO}_2$ 分压相关, $\text{CO}_2$ 分压高,导致石灰石不易分解,使得CO难以完全燃烧。

在空气气氛和典型床温(800~900℃)下,低 $\text{CO}_2$ 分压时,通过反应(1)和(2)煅烧 $\text{CaCO}_3$ 和 $\text{CaO}$ 硫酸化对 $\text{SO}_2$ 进行捕集。富氧燃烧气氛下, $\text{CO}_2$ 浓度高时会使得反应(1)的化学平衡向逆反应方向移动,因此不利于 $\text{CaCO}_3$ 分解,反应物 $\text{CaO}$ 含量不足,同时由于反应(2)生成的 $\text{CaSO}_4$ 堵塞孔道,比表面积和有效孔径均比石灰石纯分解时要小,进一步导致 $\text{CaCO}_3$ 分解受阻,故炉内固硫更倾向于按照反应(8)进行,即无需煅烧直接进行硫酸化反应。但反应(8)捕集 $\text{SO}_2$ 的效率比反应(1)、(2)慢,因此 $\text{CO}_2$ 分压高时可能会导致 $\text{SO}_2$ 排放量上升<sup>[19]</sup>,也有研究表明,与空气燃烧相比,富氧燃烧导致硫捕获效率更高<sup>[20]</sup>,这可能是由于具体试验条件不同。

表1 煤样工业分析和元素分析

Table.1 Proximate and ultimate analysis of the coal samples

煤样	工业分析/%				元素分析/%					$Q_{ar,net}/$ ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
	$M_{ad}$	$A_{ad}$	$V_{ad}$	$FC_{ad}$	$C_{ad}$	$H_{ad}$	$O_{ad}$	$N_{ad}$	$S_{ad}$	
褐煤	9.88	4.95	49.07	36.10	36.72	1.87	12.59	1.01	1.66	12.43
无烟煤	4.72	32.96	4.30	58.02	52.30	1.04	0.83	0.71	1.12	19.07

## 2.2 试验系统

为研究不同工况下流化床富氧燃烧中 $\text{SO}_2$ 排放规律,本文搭建小型流化床试验台,尺寸和容量与实际工程应用锅炉相比更小,但众多运行参数采用实际锅炉的常用数值,且变量更容易操作和控制。流化反应器由高70 cm、内径65 mm的石英玻璃制成。床料为粒度0.275~0.300 mm的石英砂,床料净高为40 mm,流化床系统如图1所示。

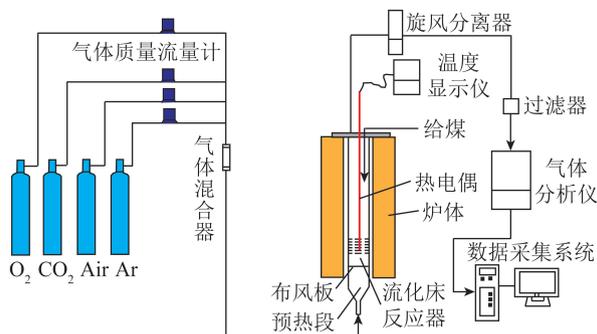
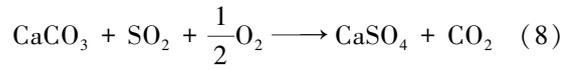


图1 流化床试验系统

Fig.1 Fluidized bed experimental system

不同气体从气源流经质量流量计,进入气体混合器混合,气体混合器中塞入不锈钢丝网以加强气



## 2 试验

### 2.1 试验煤样

在本文富氧燃烧试验中,所用2个煤样均来自电厂实际煤样,分别为硫含量较高且燃烧特性差异较大的褐煤和无烟煤,煤种的工业分析和元素分析见表1。

褐煤固定碳含量较低,挥发分接近50%,燃烧过程中将有大量挥发分进入流化床上部,燃烧初期挥发分的燃烧占比大。褐煤含硫量为1.66%,略高于无烟煤。

无烟煤固定碳含量高达58.02%,挥发分低仅为4.3%,属于极难点燃煤种之一,空气条件下的燃点在650℃以上<sup>[21]</sup>,为了降低投煤温度节省燃油,电厂在实际投煤过程中往往采用易燃烟煤引燃的方法。

体的混合。流化气体采用 $\text{O}_2/\text{CO}_2$ 混合气体,将 $\text{O}_2$ 和 $\text{CO}_2$ 在3种不同比例的混合器中预混合,并使用不同 $\text{O}_2$ 浓度的混合气作为入口气体。预混合气体在流化床下的预热系统中加热后输送到流化床反应器。

在进入流化床密相区前,流化气通过底部加热段的时间很短。只通过硅碳管的辐射加热和气体与壁面的热传导并不能将气体加热到足够温度。因此,在加热段填充多孔材料,增加流化气和加热元件的接触面积,可以有效提高流化气的加热速率,避免流化气加热不均匀的问题。

煤样粒度在1~2 mm,每批试验所用煤样质量约为2 g,煤颗粒通过反应器上方的进料管注入。使用热电偶在线测量流化密相区的温度。流化床反应器内的表观气速约为最小流化速度的3倍,即流化数为3。烟气经旋风分离器净化后进入气体分析仪。利用PMA10顺磁氧量仪测量 $\text{O}_2$ 浓度,可选用4种量程,测量精度为量程 $\pm 1\%$ ,分辨率可达0.01%;采用GAM200小型质谱仪测量烟气中气体成分(包括 $\text{SO}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ 和 $\text{CH}_4$ )的浓度变化,测量精度为 $\pm 0.5\%$ 。

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 褐煤 SO<sub>2</sub>排放特性

在 770 ℃、以 CO<sub>2</sub>为平衡气、氧浓度从 21%增至

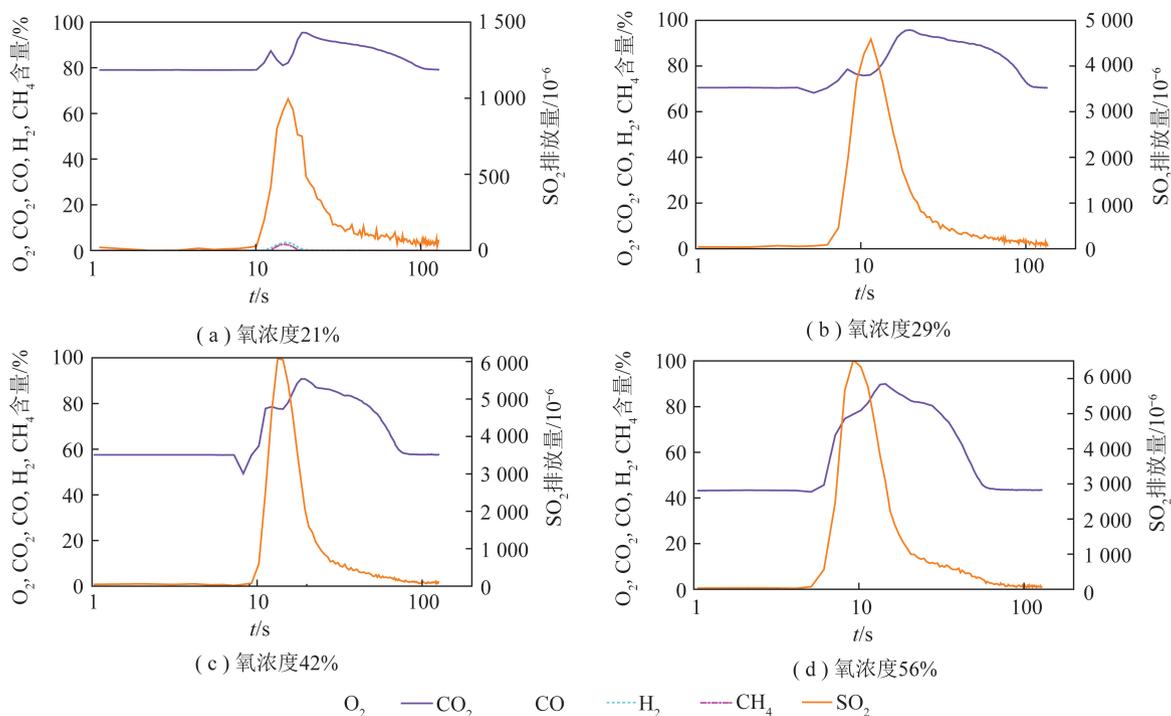


图 2 褐煤在不同氧浓度下的 SO<sub>2</sub>排放量

Fig.2 SO<sub>2</sub> emission from lignite at different oxygen concentration

由图 2(b)可知,29%氧浓度时,SO<sub>2</sub>排放量剧增,可达  $4\ 583 \times 10^{-6}$ ,约 20%的 CO 生成。由图 2(c)可知,42%氧浓度时,SO<sub>2</sub>排放量继续增加,达  $6\ 076 \times 10^{-6}$ ,CO 生成量几乎没有变化,出现小幅波动。由图 2(d)可知,56%氧浓度时,SO<sub>2</sub>排放量继续增加至  $6\ 526 \times 10^{-6}$ ,CO 生成量变化不大,仍保持在 20%左右。此时,几乎检测不到 H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>等可燃气。

褐煤的 SO<sub>2</sub>排放量峰值折算浓度(按燃煤电站锅炉,6%基准含氧量进行折算)随氧浓度的变化如图 3 所示。可知随着初始氧浓度增加,SO<sub>2</sub>折算浓度逐渐增加,但增长趋势愈发平缓。

褐煤燃烧后转化 S 随初始氧浓度的变化如图 4 所示,转化 S 表示煤中硫的质量,定义为

$$S = \int_0^{\infty} M_s f(\text{SO}_2) dt \quad (9)$$

式中,  $M_s$  为 S 的单位质量,mg; $f(\text{SO}_2)$  为 SO<sub>2</sub> 生成质量随时间的变化函数。

由图 4 可知,氧浓度为 21%时,转化 S 保持在 110 mg/MJ 左右,氧浓度增加到 29%时,转化 S 显著增加,之后随着氧浓度增加,转化 S 增长趋缓。

综上所述随着氧浓度的增加,SO<sub>2</sub>排放量不断

56%时,褐煤的 SO<sub>2</sub>排放规律如图 2 所示。由图 2(a)可知 21%氧浓度时,SO<sub>2</sub>排放量在  $925 \times 10^{-6}$  左右,燃烧并不完全,有 CO、CH<sub>4</sub>和 H<sub>2</sub>生成,但生成量较少。

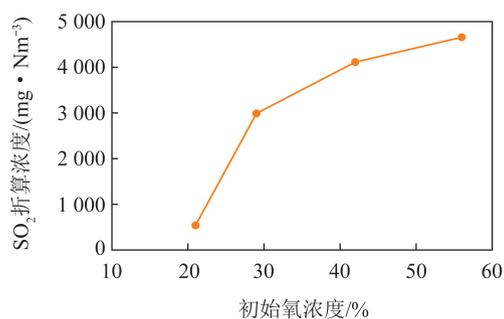


图 3 褐煤 SO<sub>2</sub>折算浓度随氧浓度的变化

Fig.3 Change of SO<sub>2</sub> conversion concentration of lignite with oxygen concentration

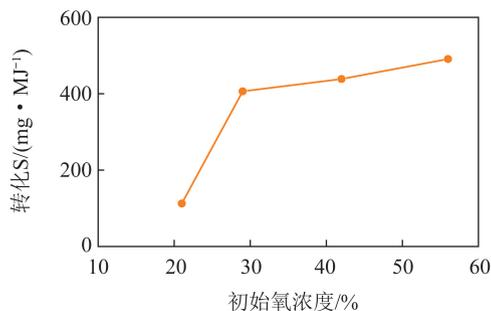


图 4 褐煤转化 S 随氧浓度的变化

Fig.4 Change of converted S of lignite with oxygen concentration

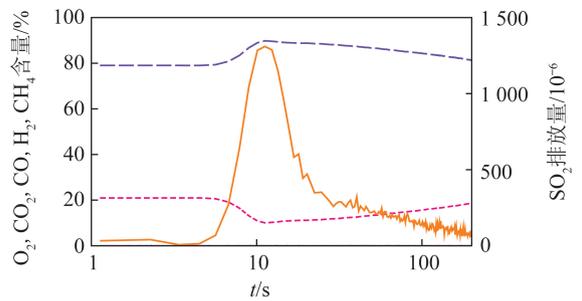
增加。褐煤煤化程度低,挥发分易析出且含量高, $O_2$ 浓度较低时,挥发分的释放使局部 $O_2$ 浓度更低,因此挥发分中大部分硫在离开反应器前没有足够的时间转化为 $SO_2$ ,与烟气中含有较高的未燃尽气体相对应; $O_2$ 浓度越高,挥发分中的硫与 $O_2$ 反应的可能性越大,大量挥发分析出后燃烧放热,使煤粒升温较快,因此 $SO_2$ 排放量随着 $O_2$ 浓度的增加而增大。

随着氧浓度增加,CO保持在相对稳定水平,说明氧浓度变化对此影响较小。褐煤挥发分高,易出现停留时间不足,导致不充分燃烧,烟气中含有一定量CO等气体,因此针对挥发分较高的煤种,需对挥发分的充分燃烧采取相应措施加以控制。

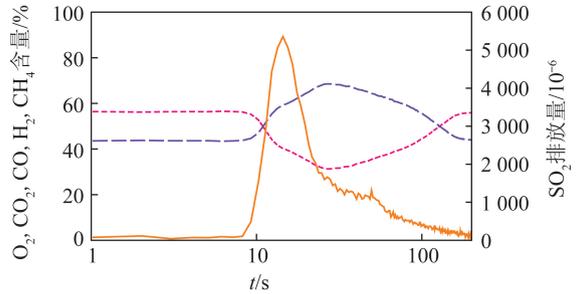
### 3.2 无烟煤 $SO_2$ 排放特性

针对无烟煤,选取21%和56%氧含量差别最大的2组试验进行比较,如图5所示。可知21%氧浓度时,无烟煤 $SO_2$ 排放量为 $1\ 310\times 10^{-6}$ ,56%氧浓度时 $SO_2$ 排放量达到 $5\ 357\times 10^{-6}$ ,说明无烟煤也出现了类似的影响,富氧气氛下,随着氧浓度增加 $SO_2$ 排放量剧增。高氧浓度为硫化物析出提供了更充足的氧气,促进了 $SO_2$ 的生成,同时高氧浓度加速了挥发分和焦炭的燃烧速度,改善了煤的燃烧和燃尽特性。通过增强煤本身的自热效应,煤燃烧过程加快,促进煤中硫元素的释放<sup>[22]</sup>, $SO_2$ 的排放量也相应增加。无烟煤挥发分低,同时焦炭燃烧充分,几乎没有CO、 $H_2$ 、 $CH_4$ 等气体生成。

Croiset等<sup>[23]</sup>发现在 $O_2/CO_2$ 气氛下煤燃烧后排放的 $SO_2$ 与 $O_2/N_2$ 气氛下基本相同;陈传敏等<sup>[24]</sup>发现沉降炉中空气和 $O_2/CO_2$ 两种气氛下烟气中 $SO_2$ 质量浓度以及单位煤生成 $SO_2$ 的量几乎不变,与煤中含硫量以及煤种有关,两者研究结果均表明2种气氛下 $SO_2$ 差别较小;但毛玉如等<sup>[15]</sup>发现试验温度范围内, $O_2/CO_2$ 气氛下的脱硫效率均比 $O_2/N_2$ 气氛下低,随着氧含量的增大,差距减小,同时 $NO_x$ 排放降低。 $SO_2$ 的排放除了与氧气浓度有关外,主要还与煤中含硫量有关,通常含硫量越高煤燃烧产生的 $SO_2$ 越多。本文试验煤种含硫量均较高,因此 $SO_2$



(a) 氧浓度21%



(b) 氧浓度56%

--- $O_2$  --- $CO_2$  ---CO --- $H_2$  --- $CH_4$  --- $SO_2$

图5 无烟煤在不同氧浓度下的 $SO_2$ 排放量Fig.5  $SO_2$  emission from anthracite at different oxygen concentration

排放量处于较高水平,在富氧燃烧过程中,针对含硫量较高的煤种,应充分考虑 $SO_2$ 排放控制问题。

由图2和图5可知,对于2种煤样,氧浓度对 $SO_2$ 析出速率的影响非常明显,15 s内 $SO_2$ 析出可达到更高的峰值,21%增至29%时尤为明显,这主要是因为高氧浓度促进煤燃烧反应的发生,提高了 $O_2$ 与硫反应的可能性,进而加速了 $SO_2$ 的析出。

### 3.3 灰分对 $SO_2$ 排放的影响

褐煤与无烟煤煤灰的XRF分析见表2。可知褐煤灰分中 $SO_3$ 可达31.364 7%,此时CaO含量为33.254 8%,MgO含量相对无烟煤也较高;无烟煤 $SO_3$ 仅为1.107 2%,灰分中CaO和MgO含量也很低,但 $SiO_2$ 和 $Al_2O_3$ 总占比达81%,说明 $SiO_2$ 和 $Al_2O_3$ 对 $SO_2$ 转化为 $SO_3$ 的影响较小,而CaO和MgO作用明显,同时煤灰中 $Fe_2O_3$ 、 $K_2O$ 等含量对此转化过程也有一定影响<sup>[25]</sup>。

表2 煤灰XRF分析

Table 2 XRF analysis of coal ash

煤样	质量分数/%						
	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	CaO	MgO	$SO_3$	其他
褐煤	8.201 8	7.736 9	8.863 8	33.254 8	9.044 2	31.364 7	1.533 8
无烟煤	55.437 0	25.853 5	8.408 0	1.785 7	1.872 4	1.107 2	5.536 2

## 4 结 论

1)在流化床富氧燃烧气氛下,随着氧浓度升

高,烟气中 $SO_2$ 排放量均增大。氧浓度从21%增加到56%时,褐煤的 $SO_2$ 排放量可从 $925\times 10^{-6}$ 增加到 $6\ 526\times 10^{-6}$ ,无烟煤的 $SO_2$ 排放量可从 $1\ 310\times 10^{-6}$ 增

加到  $5.357 \times 10^{-6}$ , 变化范围大。

2) 氧浓度对 SO<sub>2</sub> 析出速率的影响显著, 在 15 s 甚至更短时间使得 SO<sub>2</sub> 析出达到更高的峰值。

3) 从转化 S 随初始氧浓度的变化趋势可以看出, 氧浓度为 21% 增至 29% 时, 转化 S 显著增加, 之后随着氧浓度增加, 转化 S 增长趋缓。

4) 富氧燃烧气氛下, SO<sub>2</sub> 排放量主要与煤中含硫量有关, 含硫量高的煤燃烧产生的 SO<sub>2</sub> 排放量也更高; 通过分析灰分对 SO<sub>2</sub> 排放的影响, 发现 CaO 和 MgO 对 SO<sub>2</sub> 转化过程的影响显著。

## 参考文献 (References):

[1] 蔡润夏, 吕俊复, 凌文, 等. 超(超)临界循环流化床锅炉技术的发展[J]. 中国电力, 2016, 49(12): 1-7.  
CAI Runxia, LYU Junfu, LING Wen, et al. Progress of supercritical and ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler technology [J]. Electric Power, 2016, 49(12): 1-7.

[2] 杨海瑞, 吕俊复, 邢兴, 等. 循环流化床锅炉污染物排放规律的热态研究[J]. 电站系统工程, 2000, 16(3): 131-134.  
YANG Hairui, LYU Junfu, XING Xing, et al. Hot test of emission in a industrial scale circulating fluidized bed boiler [J]. Power System Engineering, 2000, 16(3): 131-134.

[3] 蔡润夏, 柯希玮, 葛荣存, 等. 循环流化床超细石灰石炉内脱硫研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 3042-3048.  
CAI Runxia, KE Xiwei, GE Rongcun, et al. The in-situ desulfurization with ultra-fine limestone for circulating fluidized bed boilers [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 3042-3048.

[4] 吴优福. 循环流化床锅炉 SO<sub>2</sub> 超低排放技术研究[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(2): 108-113.  
WU Youfu. Study on SO<sub>2</sub> ultra low emission technology on circulating fluidized bed boiler [J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(2): 108-113.

[5] 谌伊竺, 邵应娟, 钟文琪. 煤颗粒固定床加压富氧燃烧特性及污染物生成试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(1): 164-170.  
SHEN Yidun, SHAO Yingjuan, ZHONG Wenqi. Combustion characteristics and formations of pollutants of coal particles in pressurized oxy-fuel fixed bed combustion [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(1): 164-170.

[6] 冯涛, 王龙飞, 王利伟, 等. 富氧气氛下生物质/煤恒温混燃 SO<sub>2</sub> 释放实验[J]. 热力发电, 2016, 45(3): 20-25.  
FENG Tao, WANG Longfei, WANG Liwei, et al. Experimental study on SO<sub>2</sub> release during co-combustion of biomass and coal in oxygen-enriched atmosphere [J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(3): 20-25.

[7] 黄卫剑, 王浩, 罗嘉, 等. O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 气氛下煤粉燃烧 SO<sub>2</sub> 生成特性[J]. 热能动力工程, 2019, 34(6): 128-134.  
HUANG Weijian, WANG Hao, LUO Jia, et al. Study on the Characteristics of SO<sub>2</sub> Emission of Pulverized Coal under O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O Combustion [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(6): 128-134.

[8] 董静兰. 富氧燃烧氛围下纯煤掺烧生物质的污染物排放模拟研究[J]. 热能动力工程, 2016, 31(7): 68-73.  
DONG Jinglan. Simulation study of the pollutant emissions during the combustion of pure coal diluted and mixed with biomass in the oxygen-enriched combustion atmosphere [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016, 31(7): 68-73.

[9] LIU H, ZAILANI R, GIBBS B M. Pulverized coal combustion in air and in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> mixtures with NO<sub>x</sub> recycle [J]. Fuel, 2005, 84: 833-840.

[10] JIA L, TAN Y, ANTHONY E J. Emissions of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> during oxy fuel CFB combustion tests in a mini-circulating fluidized bed combustion reactor [J]. Energy & Fuels, 2010, 24(2): 910-915.

[11] CHAO J, YANG H, WU Y, et al. The investigation of the coal ignition temperature and ignition characteristics in an oxygen-enriched FBR [J]. Fuel, 2016, 183: 351-358.

[12] 刘豪, 邱建荣, 徐志英, 等. 高浓度 CO<sub>2</sub> 气氛下燃煤氮、硫污染物的释放特性[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(2): 354-356.  
LIU Hao, QIU Jianrong, XU Zhiying, et al. Release of NO and SO<sub>2</sub> in high-concentration CO<sub>2</sub> atmosphere during coal combustion [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(2): 354-356.

[13] 段俊博, 赵长遂, 卢骏营, 等. O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下煤燃烧 SO<sub>2</sub>/NO 析出特性[J]. 化工学报, 2009, 60(5): 1268-1274.  
DUAN Lunbo, ZHAO Changsui, LU Junying, et al. SO<sub>2</sub>/NO emission characteristics during O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> coal combustion process [J]. CIESC Journal, 2009, 60(5): 1268-1274.

[14] 李庆钊, 赵长遂, 武卫芳, 等. O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下燃煤 SO<sub>2</sub> 排放特性的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(20): 41-46.  
LI Qingzhao, ZHAO Changsui, WU Weifang, et al. Experimental investigation on SO<sub>2</sub> emission characteristic during pulverized coal combustion in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> environment [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(20): 41-46.

[15] 毛玉如, 方梦祥, 王勤辉, 等. O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下循环流化床煤燃烧污染物排放的试验研究[J]. 动力工程, 2004, 26(3): 411-415.  
MAO Yuru, FANG Mengxiang, WANG Qinjun, et al. Experimental research on pollutant emission of coal combustion in a circulating fluidized bed test-facility under O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmosphere [J]. Power Engineering, 2004, 26(3): 411-415.

[16] 孙俊威, 董建聪, 麻东东, 等. 生物质与煤掺烧时 SO<sub>2</sub> 排放特性的实验研究[J]. 中国高新技术企业, 2010, 17(24): 24-27.  
SUN Junwei, DONG Jiancong, MA Dongdong, et al. Experimental study on SO<sub>2</sub> emission characteristics of biomass and coal blended combustion [J]. China High-tech Enterprises, 2010, 27(24): 24-27.

[17] CZAKIERT T, BIS Z, MUSKALA W. Fuel conversion from oxy-fuel combustion in a circulating fluidized bed [J]. Fuel Processing Technology, 2006, 87(6): 531-538.

[18] ZHENG Zhimin, WANG Hui, YANG Li, et al. Comparative study on SO<sub>2</sub> release and removal under air and oxy-fuel combustion in a fluidized bed combustor [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2015, 31(2): 232-237.

- [19] LUPIÁÑEZ C, GUEDEA I, BOLEA I, et al. Experimental study of  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_x$  emissions in fluidized bed oxy-fuel combustion [J]. Fuel Processing Technology, 2013, 106: 587-594.
- [20] CZAKIERT T, SZTEKLER K, KARSKI S, et al. Oxy-fuel circulating fluidized bed combustion in a small pilot-scale test rig [J]. Fuel Processing Technology, 2010, 91: 1617-1623.
- [21] 杨海瑞, 薛雷, 郭远熊, 等. 循环流化床锅炉燃煤着火特性 [J]. 燃烧科学与技术, 2005, 11(3): 236-240.  
YANG Hairui, XUE Lei, GUO Yuanxiong, et al. Ignition characteristic of coal in CFB boiler [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2005, 11(3): 236-240.
- [22] ZHENG Z, WANG H, LI Y. Comparative study on  $\text{SO}_2$  release and removal under air and oxy-fuel combustion in a fluidized combustor [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2015, 31(2): 232-237.
- [23] CROISSET E, THAMBIMUTHU K, PALMER A. Coal combustion in  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  mixtures compared with air [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2009, 78(2): 402-407.
- [24] 陈传敏, 赵长遂, 赵毅, 等.  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  气氛下燃煤过程中  $\text{SO}_2$  排放特性实验 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006, 52(4): 546-550.  
CHEN Chuanmin, ZHAO Changsui, ZHAO Yi, et al. Experiments of  $\text{SO}_2$  emission characteristics during coal combustion under  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  atmosphere [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2006, 52(4): 546-550.
- [25] 熊友辉, 孙学信. 煤中钙质矿物的自固硫作用 [J]. 电站系统工程, 1998, 14(2): 40-42, 45.  
XIONG Youhui, SUN Xuexin. Research on desulfurization of calcium-based minerals in coal [J]. Power System Engineering, 1998, 14(2): 40-42, 45.