

气化细渣和煤掺烧氮氧化物和二氧化硫排放特性研究

孙晓慧¹, 方梦祥^{1,3}, 匡建平², 王勤辉¹, 陈毅烈²,
曾伟强^{1,3}, 郭伟², 岑建孟^{1,3}, 罗春桃²

(1. 浙江大学 能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027; 2. 宁夏神耀科技有限责任公司, 宁夏 银川 750011; 3. 浙江大学 青山湖能源研究基地, 浙江 杭州 311305)

摘要: 气化细渣热值低、水分高, 难以独立稳定燃烧, 因此通常将其和热值较高的燃料进行掺混实现燃烧利用。为研究气化细渣和煤掺烧过程中 NO_x 和 SO_2 的排放特性, 利用管式炉燃烧污染物测试系统, 在空气气氛下, 使用不同比例的气化细渣和烟煤进行掺烧实验, 对燃烧污染物的释放量进行实时监测, 并计算燃烧污染物的释放总量。通过实验发现: 温度是影响 NO_x 、 SO_2 排放量的重要因素, 在高温工况下, NO 、 SO_2 的释放量显著提高, NO_2 、 N_2O 的释放量显著降低。燃料中挥发分的含量与 NO_2 、 N_2O 的释放量有着密切关系, 煤中挥发分含量较高, NO_2 、 N_2O 的释放量也相对较高。整体 NO_2 、 N_2O 的释放量远小于 NO 的释放量, NO_x 排放以 NO 为主。随气化细渣掺烧比例增大, NO 、 SO_2 释放量降低。因此, 通过与煤掺烧可以实现气化细渣的稳定低污染燃烧。

关键词: 气化细渣; 烟煤; 掺烧; NO_x ; SO_2

中图分类号: TK16

文献标识码: A

DOI: 10.16189/j.nygc.2023.03.013

Study on emission characteristics of NO_x and SO_2 from co-firing of fine gasification slag and coal

SUN Xiao-hui¹, FANG Meng-xiang^{1,3}, KUANG Jian-ping², WANG Qin-hui¹, CHEN Yi-lie²,
ZENG Wei-qiang^{1,3}, GUO Wei², CEN Jian-meng^{1,3}, LUO Chun-tao²

(1. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Ningxia Shenyao Technology Co. Ltd, Yinchuan 750011, China; 3. Qingshan Lake Energy

Research Base, Zhejiang University, Qingshan Lake Science and Technology City, Hangzhou 311305, China)

Abstract: Fine gasification slag has low calorific value and high moisture content, which makes it difficult to burn independently and stably. Therefore, it is usually blended with fuels of higher calorific value to achieve combustion utilization. In order to study the emission characteristics of NO_x and SO_2 from co-firing of fine gasification slag and coal, in this paper, a tube furnace combustion pollutant test system was used to conduct co-combustion experiments firing fine gasification slag and coal of different ratios under air atmosphere, while the release of combustion pollutants were monitored in real-time and the total release was calculated. The experiment demonstrates that temperature is an important factor affecting NO_x and SO_2 emissions. At high temperature, the release of NO and SO_2 is significantly increased and the release of NO_2 and N_2O is significantly reduced. The content of volatile matter in fuel has a close relationship with NO_2 and N_2O release. Coal has higher volatile matter, so the release of NO_2 and N_2O is relatively high. The overall release of NO_2 and N_2O is much smaller than that of NO . The main NO_x emission is NO . With the increase of the proportion of fine gasification slag, the release amount of NO and SO_2 decreases. Therefore, fine gasification slag co-firing with coal can achieve stable and low-pollution combustion.

Key words: fine gasification slag; anthracite coal; co-firing; NO_x ; SO_2

收稿日期: 2023-01-04

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2022ZFJH004)

作者简介: 孙晓慧(1998-), 女, 山东济南人, 硕士研究生, 从事煤基固废处理研究。

0 引言

近几年,煤转气、煤转油等技术不断发展,但在煤气化工艺过程中,产生的气化渣排放量不断增加,对气化细渣进行处理是目前众多煤化工企业关注的问题^[1]。气化细渣粒径细,其中含有一定量未燃碳,不符合道路、建筑原料的标准,缺乏大规模利用方式,目前主要以堆放填埋为主^[2];同时气化细渣具有热值低、水分高的特点,单独燃烧性能较差,因此主要通过掺烧的方法对气化细渣进行利用。

目前有许多文献对低热值燃料的掺烧进行了实验研究,如周科等^[3]对含水及脱水市政污泥与煤混烧的 NO 和 SO₂ 的排放特性进行了研究,通过实验发现,污泥的含水率会对燃烧污染物的排放产生影响,不同种类的污泥,含水率对于 NO 排放量影响不同,随着污泥掺烧比的增加,NO 的排放会对应的增加;添加 10% 的污泥,SO₂ 排放量最大。陈丰等^[4]研究了煤与污泥混合物在 700 °C 和 1000 °C 下燃烧时 SO₂ 的排放特性,通过实验发现,SO₂ 排放量受到温度影响较大,1000 °C 下,SO₂ 排放量升高。吕清刚^[5]等进行了污泥和大同煤掺烧的试验,通过实验发现,适量的混烧比例下,污泥不同含水率掺烧均可以稳定燃烧。同时还发现炉膛温度对 NO 浓度没有影响,但可以有效降低 N₂O 的含量。目前研究燃烧污染物的文献中,对于 NO 排放的研究较多,对 NO₂、N₂O 排放特性研究较少,本文在固定床燃烧系统上研究气化细渣与柳林煤掺烧燃烧污染物的排放特性,研究不同掺烧比例、不同温度对燃烧污染物 NO、NO₂、N₂O、SO₂ 排放量的影响,为气化细渣燃烧清洁利用,提供实验数据支撑。

1 实验部分

1.1 实验原料及处理

本实验中使用的原料为宁煤集团气化细渣和

柳林烟煤,实验前,需要对原料进行预处理:将煤、气化细渣分别放入 105 °C 的烘箱中干燥 6 h,气化细渣水分含量较高,烘干后会有结块现象。烘干后,将所有样品用破碎机打碎,筛分样品,选择 40~80 目的样品作为燃烧实验样品。表 1 为实验原料的工业元素和热值分析。从表中可以看出,柳林烟煤固定碳、挥发分含量均较高,气化细渣固定碳含量较低,灰分含量较高。将气化细渣分别按照 30%、50%、70% 的质量比和煤掺混,每次取少量样品,进行多次混合,确保混合均匀。

按照 GB/T1574-2007 要求对样品进行灰成分分析,分析结果如表 2 所示,由表可知,煤灰中 SiO₂、Al₂O₃ 含量最多,分别占到 50%、35% 左右;气化细渣燃烧后的灰成分中,主要成分为 SiO₂,占灰成分的 50% 以上,同时,气化细渣灰成分中含有一些碱金属物质,如 CaO、Fe₂O₃ 含量较多,分别占 10.97% 和 9.4% 左右。

1.2 实验方法

实验所用的管式炉燃烧污染物测试系统如图 1 所示。

系统由三部分组成,供气系统包括空气气瓶;燃烧系统包括管式炉和石英管组;烟气分析系统包括红外烟气分析仪、计算机、氮气吹扫气。

固定床燃烧实验具体操作流程如下:称取 0.10 g 燃烧样品平铺在石英舟底部,保证燃烧完全;将平铺样品的石英舟放在石英管入口处,然后将嵌入推送杆的法兰封紧进气口;设置好管式炉的升温程序,从室温开始加热,将管式炉加热到燃烧温度,使用推送杆将石英舟推入管式炉内的恒温段反应处进行燃烧,直到反应结束,燃烧产生的烟气进入红外烟气分析仪进行在线成分检测,分析烟气中污染物 NO、NO₂、N₂O、SO₂ 的释放情况,实验工况如表 3 所示。

表 1 原料的工业分析和元素分析

样品	工业分析 W _{ad} /%				元素分析 W _{ad} /%					热值 /(J·g ⁻¹)
	M	A	V	FC	C	H	N	S	O	
柳林烟煤 L	1.20	39.08	25.31	34.41	42.49	2.16	0.94	2.47	11.66	32486
气化细渣 Q	1.01	84.45	2.95	11.95	11.61	0.63	0.04	0.13	2.13	3750

表 2 原料的灰成分分析

样品名称	SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	Fe ₂ O ₃ /%	CaO/%	MgO/%	K ₂ O/%	Na ₂ O/%
柳林烟煤 L	49.31	34.89	6.34	3.40	0.42	0.37	0.22
气化细渣 Q	50.16	15.57	9.4	10.97	3.15	2.08	4.14

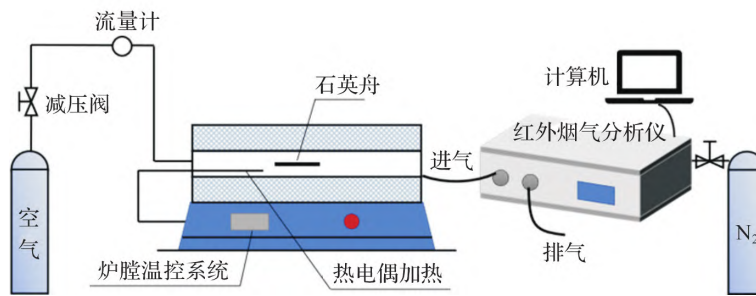


图1 管式炉燃烧污染物测试系统示意

表3 实验工况

燃烧温度/℃	气化细渣掺混比例/%
800	0
	30
	50
	70
	100
1000	0
	30
	50
	70
	100

1.3 燃烧污染物计算方法

烟气分析仪测量的数据曲线可以直观反应燃烧污染物的瞬时排放特性,如表现出污染物释放的峰值、峰宽、释放时间等,本论文引入单位质量燃料燃烧污染物的释放量这一参数,评估不同条件对燃烧污染物释放总量的影响,计算公式如下:

$$w = 10^{-6} \frac{V_{\text{gas}} M}{m_0 V_0} \int_0^t C dt \quad (1)$$

式中: w 为单位质量燃料燃烧污染物释放量,mg/g; V_{gas} 为烟气的体积流量, m^3/s ; M 为污染物的摩尔质量,g/mol; m_0 为试样的初始质量,g; V_0 为污染物的气体摩尔体积,22.4L/mol; C 为烟气中污染物的体积浓度, mL/m^3 ; t 为燃烧经历时间,s。

2 结果与讨论

2.1 掺烧 NO 排放特性

图2为气化细渣和煤掺烧,在800℃、1000℃温度燃烧下,NO的瞬时释放量曲线图。由图2(a)可知,800℃下,纯煤燃烧释放的NO峰值最高,最高时达到65 mL/m³,NO释放析出时间约为400s,煤中N元素比例较高,因此NO释放曲线的峰宽较宽,峰值较高。煤燃烧曲线呈现双峰状态,分别

为挥发分燃烧和固定碳燃烧。气化渣燃烧,释放的NO含量较低,气化细渣燃烧曲线呈现单峰形态,析出时间最短,为250s左右。随着煤中气化细渣掺混比例的增大,NO释放峰高不断降低,双峰形态逐渐向单峰过渡。由图2(b)可知,1000℃下,NO释放的峰高有明显提高,纯煤燃烧释放的NO峰值最高,最高时达到100 mL/m³,NO释放析出时间约为300s。煤燃烧NO释放曲线的双峰形态不够明显。随气化细渣掺烧比例增大,峰高不断降低,纯气化渣燃烧的NO峰值也升高,最高达到25 mL/m³左右。

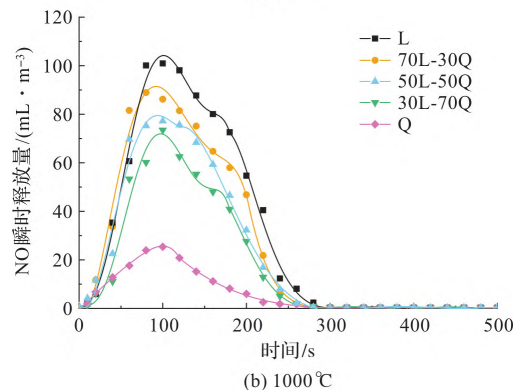
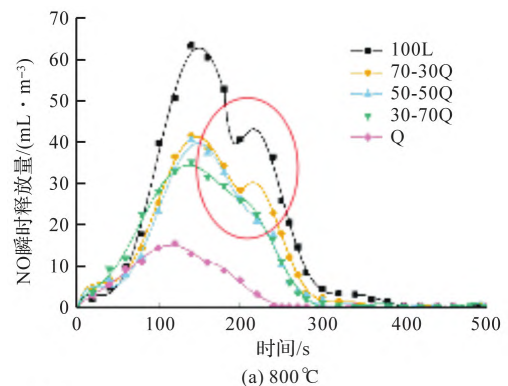


图2 NO释放曲线图

煤燃烧时,氮氧化物来自于空气中的氮或燃料中的氮,主要以NO的形式存在^[6]。燃烧过程

中,生成的 NO 可分为三种类型:燃料型、热力型和快速型,基本以燃料型 NO 为主^[7]。煤中挥发分含量较高,燃烧后,挥发分迅速释放达到峰值,形成第一个峰值曲线,之后,发生焦炭氮的燃烧,NO 的释放出现第二个峰^[8],焦炭燃烧反应速率较慢,反应较为平稳,形成的峰高略低。温度升高后,煤燃烧 NO 的释放峰更加陡峭,且峰值的位置提前,高温加速了燃烧反应,加速了 N 元素析出的速度,挥发分和焦炭燃烧释放的 NO 产生了重叠,这也是高温下 NO 释放曲线双峰形态不够明显的原因之一。

气化渣中 N 元素含量较低,为 0.04%,因此 NO 释放量较低;同时,气化细渣中挥发分较少,NO 的释放主要来源于焦炭 N,因此,NO 释放曲线且呈现单峰,整体呈现较为平稳的状态。气化细渣和煤掺烧后,随气化细渣掺烧比例的增大,NO 释放量降低,其原因可能有如下几点:一是掺烧后燃料中 N 元素含量降低,导致 NO 释放量减少;二是气化细渣中有一定量的金属元素,有文献表明,Fe 的含量会影响前驱物的释放,并可以和 N 生成化合物^[9,10],从而降低了 NO 的释放;还有一个原因,与燃料中的水分含量有关,气化细渣吸水性较强,有文献实验表明,燃料燃烧过程中,水分在高温下蒸发形成水蒸气,水蒸气易发生还原反应,从而会抑制 NO 的产生^[3]。

2.2 掺烧 NO₂ 排放特性

图 3 为 800 °C、1000 °C 下,不同气化细渣掺烧比例下,NO₂ 的瞬时释放量曲线图。由图 3(a)可知,800 °C 下 NO₂ 瞬时呈现单峰的趋势,随气化细渣掺烧比例增大,释放量的峰值,呈现先升高后降低的趋势,当煤和气化细渣的掺烧比例为 7:3 时,NO₂ 瞬时释放量的峰值最高;气化细渣单独燃烧 NO₂ 的释放峰最低。文献表明,NO₂ 主要来源于燃烧前期挥发分氮的析出转化,样品中挥发分含量越高,在燃烧前期析出的含氮前驱物越多,相应的转化生成的 NO₂ 也越多^[11]。煤中的挥发分含量较多,因此 NO₂ 的释放量较多,气化细渣中,挥发分含量较少,NO₂ 的释放量较少。气化细渣掺烧比例为 10%、30% 时,此时燃料挥发分含量有一定的下降,NO₂ 的释放量增加的原因可能是因为氧气和 NO 发生反应(1),造成 NO₂ 的生成量有小幅增加。

如图 3(b)所示,1000 °C 下,NO₂ 的释放量显著

降低,煤燃烧 NO₂ 峰值最高,达到 5.5 mL/m³,气化细渣燃烧 NO₂ 峰值最低,最高仅为 1.5 mL/m³,出现该现象可能有如下原因:一是在 800 °C 下,燃烧反应速率较小,部分挥发分氮以含氮前驱物形式析出后,异相还原反应速率小于 NO₂ 的生成速率,因此燃烧温度较低时,NO₂ 的释放量较多。在温度为 1000 °C 时,燃烧反应更为剧烈,异相还原反应速率增大,抵消了 NO₂ 生成反应的程度,使得高温下 NO₂ 的释放量降低。还有一个原因为,温度的升高,易引起碳活性位点增多,造成活性增强,NO₂ 可与碳活性位及 C(O)络合物发生反应(2)-(4),结合生成含氮复合物,消耗了一部分释放出的 NO₂,因此,燃烧温度升高,NO₂ 释放量降低。

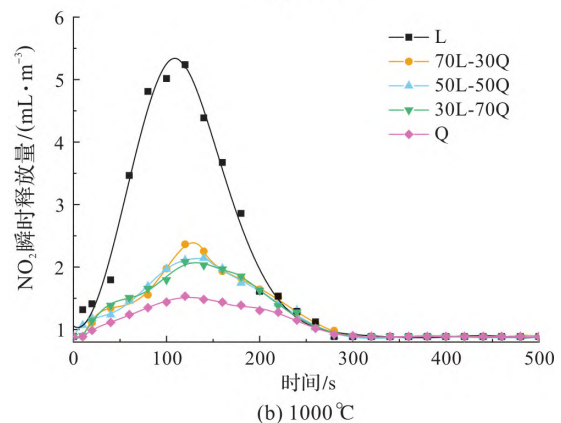
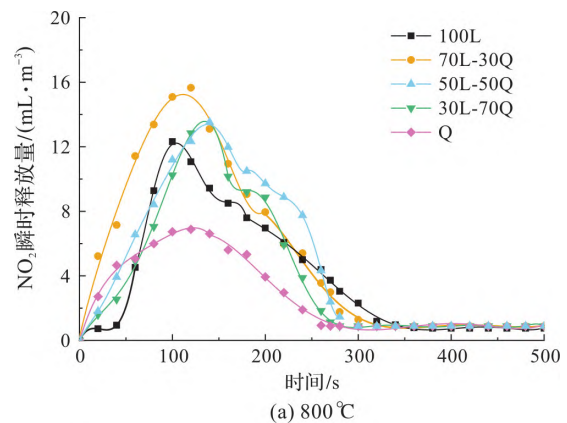
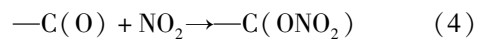
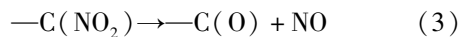
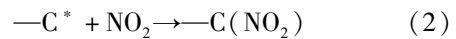
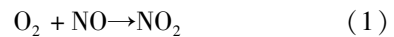


图 3 NO₂ 释放曲线图

2.3 掺烧 N₂O 排放特性

图 4 为不同温度下,N₂O 瞬时释放量。从图 4(a)中可以看出,N₂O 释放量较低,800 °C 下,煤

燃烧 N_2O 释放量最多,曲线呈现单峰,峰值达到 8 mL/m^3 ,出现在燃烧反应开始后的 120 s 左右;气化细渣燃烧 N_2O 的释放量最低,曲线峰值最高达到 5 mL/m^3 ,气化细渣比例增加, N_2O 的释放量降低。文献表明, N_2O 的释放会受到挥发分的影响。煤中挥发分含量较高,挥发分析出后,和环境中的氧气快速反应,容易形成还原性气氛,和 NO 发生反应(5) - (7) 转化成 N_2O ,因此煤燃烧 N_2O 释放量较多。

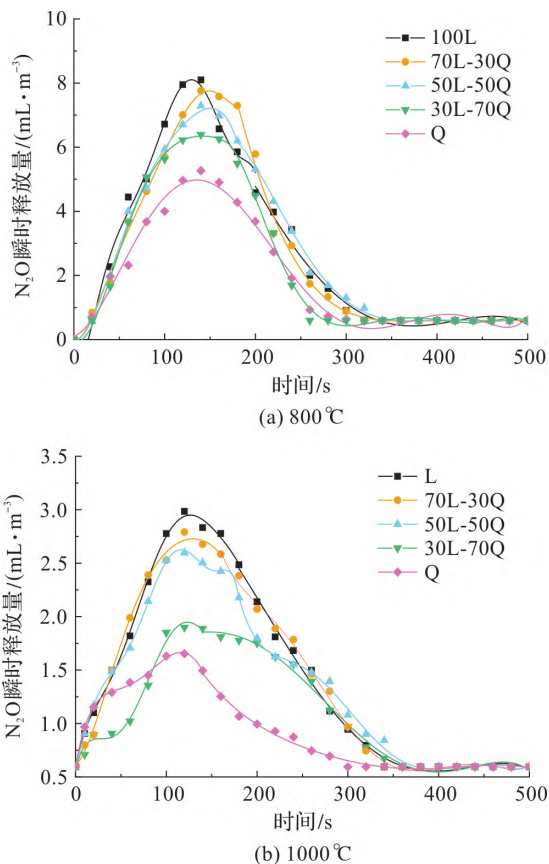
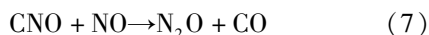
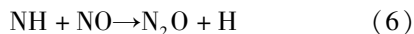
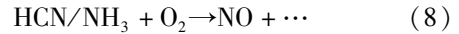


图4 N_2O 释放曲线图



1000 °C 下, N_2O 的释放量显著降低,煤燃烧 N_2O 的释放峰最高,峰值约为 3 mL/m^3 ;气化细渣燃烧 N_2O 的释放峰最低,峰值仅为 1.7 mL/m^3 左右。出现该现象的原因可能为,煤的挥发分 N 主要以 HCN 形式存在,在燃烧温度为 1000 ~ 1200 K 时,部分 HCN 会向 N_2O 转化,温度大于 1200 K 时,发生反应(8), HCN 和氧气反应,主要向 NO

转化,生成 N_2O 的部分减小; N_2O 也容易和氧气发生反应(9)生成 NO ,从而导致排放量降低;还有一个原因是,煤中大量的挥发分析出后,在焦炭中孔隙增多,利于气体的吸附扩散,使得 N_2O 与焦炭接触,发生反应(10),加速分解。综上所述,提高燃烧温度可有效抑制 N_2O 的生成^[12]。



为进一步分析掺混比例及燃烧温度对混燃过程中 NO 、 NO_2 、 N_2O 释放特性的影响,分别计算各混合样品单位质量燃料 NO 、 NO_2 及 N_2O 释放量,计算结果见表 4。

表4 煤-气化细渣掺烧单位质量样品 NO_x 释放量

单位: mg/g

温度/ $^{\circ}\text{C}$	气化细渣比例/%	NO 释放量	NO_2 释放量	N_2O 释放量	NO_x 释放总量
800	0	1.04	0.34	0.25	1.63
	30	0.72	0.42	0.24	1.38
	50	0.62	0.40	0.22	1.24
	70	0.52	0.32	0.20	1.04
	100	0.24	0.18	0.16	0.58
1000	0	1.72	0.16	0.12	2.00
	30	1.49	0.12	0.11	1.72
	50	1.28	0.11	0.11	1.50
	70	1.03	0.11	0.09	1.23
	100	0.38	0.11	0.10	0.59

由表 4 中数据可知,800 °C 下,随气化细渣掺烧比例增大, NO 释放总量逐渐减小, NO_2 释放总量先增大后减小, N_2O 释放量变化较小,随气化细渣掺烧比例增加而降低;1000 °C 下, NO 释放量明显增加, NO_2 、 N_2O 释放量则明显降低, NO_x 释放总量升高。从掺烧比例上看,纯煤燃烧释放的 NO_x 量最多,随气化细渣掺烧比例的增大, NO_x 释放量不断降低,主要是由于 NO 的释放大幅度下降。 NO_2 、 N_2O 释放量较小,因此主要需要控制 NO 的排放量,从而有效降低燃烧污染物的 NO_x 的释放量, NO 释放受温度影响较为明显,因此在高温燃烧下,需要特别注意 NO 的排放控制,整体来看,煤和 气化细渣掺烧,可以降低 NO_x 的释放量。

2.4 SO_2 排放特性

煤和 气化细渣掺烧 SO_2 瞬时释放的曲线见

图5。从图中可以看出,在800℃和1000℃下,SO₂瞬时释放的曲线趋势基本保持一致,表现为纯煤燃烧时,峰值最高,峰宽最宽,随气化细渣添加比例的增大,SO₂的释放峰值逐渐降低,峰宽逐渐变小,SO₂的释放时间逐渐减少,且达到峰值的时间略有后移。

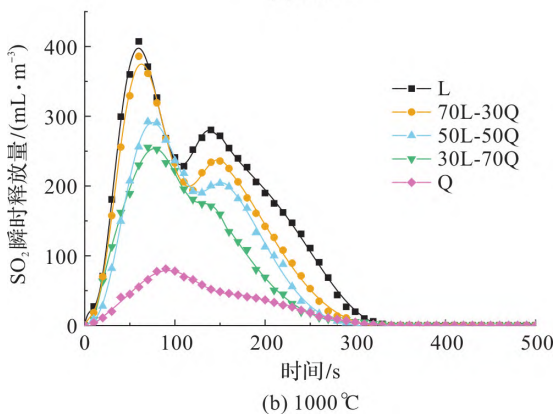
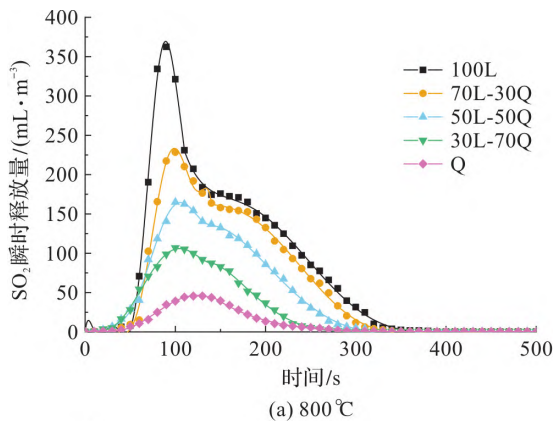


图5 SO₂释放曲线图

800℃下,纯煤燃烧释放SO₂曲线呈现双峰,峰值最高,峰宽最宽,燃烧可分为两个阶段,第一阶段发生在煤燃烧初期,燃烧开始后,SO₂迅速释放,达到第一个峰值,形成一个较为陡峭的SO₂释放峰,第二阶段发生在燃烧后150~300s,此时SO₂的释放出现第二个峰,该峰较为平缓,呈现缓慢下降的趋势,形成一个较宽的SO₂释放区域。随气化细渣比例增大,峰值降低,峰宽减小,SO₂释放曲线从双峰过渡到单峰,当气化细渣燃烧时,SO₂的释放峰值最低,释放时间最短,峰值出现的时间推后。1000℃下,煤燃烧SO₂释放曲线的峰高明显变高,且更加陡峭,双峰形态更加明显。

煤燃烧SO₂释放曲线呈现双峰的原因是,煤中的S赋存方式不同,分解析出所需的温度不同,

因此会分阶段析出,形成两个峰。第一个释放峰主要是挥发分燃烧后产生,挥发分燃烧较为迅速,持续时间较短,因此形成较为陡峭的释放峰;随后进入焦炭燃烧阶段,焦炭燃烧速率较慢,持续时间较长,形成一个较为平缓的释放峰^[13]。气化细渣中挥发分含量低,且S元素的含量低,仅为0.13%,挥发分燃烧析出的SO₂较少,主要以焦炭燃烧析出的SO₂为主,因此呈现单峰,且反应较为平稳。高温下,煤燃烧的双峰形态更加明显,是因为高温加速了焦炭燃烧的速率,使得一些分解温度较高的S元素发生分解,与氧反应生成SO₂,有些在低温下分解为H₂S、COS和CS₂的S元素,在高温下氧化反应更为完全,氧化形成SO₂,使得高温工况下SO₂释放量显著增加^[4]。

为更加直观表现SO₂释放量,按照式(1)计算各工况下单位质量燃料SO₂释放量如表5所示。可以看出,随气化细渣添加比例增大,SO₂释放量逐渐降低,800℃下,纯煤燃烧SO₂释放量为9.42 mg/g,远高于气化渣燃烧产生的SO₂量(1.26 mg/g),1000℃下,SO₂释放量增加,气化细渣SO₂释放量增加近一倍(从1.26 mg/g到2.77 mg/g)。通过煤和气化细渣掺烧,可以提高气化细渣单独燃烧的性能,并降低煤燃烧过程中SO₂的释放量;提高温度是增加SO₂释放量的主要因素,高温下燃烧,需要注意对燃烧污染物的控制。

表5 掺烧单位质量样品SO₂释放量

温度/℃	气化细渣比例/%	SO ₂ 释放量/(mg·g ⁻¹)
800	0	9.42
	30	7.26
	50	5.26
	70	3.08
	100	1.26
1000	0	14.23
	30	11.78
	50	9.45
	70	7.95
	100	2.77

3 结论

本文使用管式炉燃烧污染物测试系统,对煤和气化细渣燃烧污染物的瞬时排放浓度进行测量,研究了气化细渣掺混比例、燃烧温度对气化细渣与煤混燃过程中NO_x和SO₂排放特性的影响,

得出主要结论如下:

1) 温度是影响 NO 排放的重要因素, 温度升高, NO 排放量增加; 煤燃烧 NO 排放量最高, 气化细渣掺混比例越大, NO 排放量越低。

2) NO_x 排放以 NO 为主, NO_2 、 N_2O 排放量较少; 燃烧温度对 NO_2 、 N_2O 排放量有明显影响, 燃烧温度升高, NO_2 、 N_2O 排放量显著降低; NO_2 、 N_2O 排放量与燃料中挥发分的含量也有密切关系, NO_2 主要来源于燃烧前期挥发分氮的均相反应, 煤中挥发分含量高, NO_2 、 N_2O 排放量也较高; 气化细渣比例增加, NO_2 、 N_2O 排放量降低。

3) 温度对 SO_2 的排放量影响较为明显, 相对 800 °C 燃烧温度, 1000 °C 下, 各工况的 SO_2 排放曲线的峰值增高, 单位时间内排放量增加; 燃料中气化细渣比例增加, SO_2 排放量降低。

参考文献:

- [1] 白振波, 李彦坤, 王 翠. 气化炉细灰综合利用改造 [J]. 化肥设计, 2017, 55(1): 59 - 62.
- [2] 刘嘉鹏. 气流床气化细灰燃烧特性及再利用探讨 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2017(6): 17 - 20.
- [3] 周 科, 刘好文, 彰金宝, 等. 含水/脱水市政污泥与煤混烧的 NO 和 SO_2 排放特性研究 [J]. 锅炉技术, 2022, 53(1): 8 - 15.
- [4] 陈 丰, 殷 红. 煤与污泥混合物在不同温度下燃烧时 SO_2 排放特性研究 [J]. 能源与环境, 2014 (3): 46 - 50, 54.
- [5] 李 波. 城市生活污水干化处理及与煤掺烧实验研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [6] 徐向乾. 生物质掺煤混烧氮析出规律及再燃脱硝特性试验研究 [D]. 济南: 山东大学, 2008.
- [7] 李永华. 燃烧理论与技术 [J]. 热能动力工程, 2008 (4): 437.
- [8] 雷浩洋. 污泥与秸秆掺混水热碳化的氮迁移机理及固相产物燃烧 NO_x 生成特性研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [9] 徐秀峰, 顾永达. 铁催化剂对煤热解过程中氮元素迁移的影响 [J]. 燃料化学学报, 1998, 26(1): 18 - 23.
- [10] 侯封校, 金 晶, 林郁郁, 等. Fe_2O_3 对污泥热解特性及部分 NO_x 前驱物转化规律的影响 [J]. 燃烧科学与技术, 2017, 23(1): 90 - 95.
- [11] 岳 爽. O_2/CO_2 气氛下煤粉恒温燃烧及 NO_x 释放特性研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- [12] 张啸天. 生物质与煤混合富氧燃烧过程中 NO 和 N_2O 的排放特性研究 [J]. 可再生能源, 2017, 35: 159 - 165.
- [13] 孟凡珂. 动力煤及其混煤燃烧 SO_2 析出特性试验研究 [D]. 济南: 山东大学, 2008.

(责任编辑 杨启岳)