

钙基催化木屑煤混燃及其对排放、灰分特性的影响^{*}

王海蓉 杨文兵 王雅丽

(中山大学工学院, 广州 510275)

【摘要】 以木屑和褐煤为研究对象,利用循环流化床反应装置,研究了不同燃烧工况下钙基对 SO₂、NO_x 排放特性的影响;并通过 X 射线荧光光谱仪(XRF)、X 射线衍射仪(XRD)和等离子体原子发射光谱仪(ICP)测定了底灰的元素、基团和矿物组成,对附加碱金属 Ca 的灰样进行了熔融特性分析。研究表明,钙基对 SO₂、NO_x 的释放有一定的抑制作用。当过量空气系数 α 为 1.0 时,石灰石的添加对 NO_x 减排最为明显。且随着木屑含量的减少,NO_x 产率有所降低;钙基对 SO₂ 的脱除受反应温度的影响。在温度为 700 ~ 900℃、Ca 和 S 质量比为 2.0 时的固硫脱硫效果最好;在 CaCO₃ 的作用下,底灰的熔融现象基本消失。

关键词: 木屑 煤 钙基催化 混燃 排放 灰分特性

中图分类号: S216.2; X506 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)08-0121-07

Effect of Calcium Salt Catalysis on Ash and NO_x/SO₂ Emission Characteristic during Co-combustion

Wang Hairong Yang Wenbing Wang Yali

(School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract

Choosing lignite mixing with sawdust as object, the effect of calcium salt catalysis on SO₂ and NO_x emission was analyzed by using circulating fluidized bed reactor. The ash elements groups and mineral composition of ash samples were measured through X-ray fluorescence spectrometer (XRF), X-ray diffraction (XRD) and inductively coupled plasma atomic emission spectrometer (ICP). The result showed CaCO₃ had a certain effect on SO₂ and NO_x emission reduction. The addition of limestone had obvious effect on NO_x emission reduction with $\alpha = 1.0$. NO_x production reduced with the decreasing of sawdust content. The removal of SO₂ was controlled by reaction temperature. Under the condition of temperature of 700 ~ 900℃ and Ca/S of 2.0, desulfurization was the best. The ash melting phenomenon disappeared with the effect of CaCO₃.

Key words Sawdust, Lignite, Calcium salt catalysis, Co-combustion, Emission, Ash characteristic

引言

生物质是一种绿色能源,它与煤混燃可实现生物质的大规模、高效利用,是减少 CO₂ 排放的主要方法之一^[1-2]。但该种燃料的固有无机元素钾、钠、

硫、钙、硅的含量较高,在燃烧过程中易发生聚团、结焦等问题^[3]。同时,煤和生物质燃烧还会产生 SO₂、NO_x 等有害气体。这些都会影响整个生物质利用系统的效率和可靠性。因此,混燃及其排放、灰熔融特性一直是各国学者研究的焦点。

Grammelis 等在流化床反应器、半工业用循环流化床燃烧器和工业锅炉内对废木材和褐煤进行混燃实验。研究证明废木材与褐煤共燃是可行的^[4]。杨天华等研究了煤燃烧过程中碱金属对 SO₂ 析出特性的影响^[5]。Diana 等研究了树脂焦炭和煤焦附加碱金属 K 还原 NO_x 的机理,认为 K 对树脂焦炭的影响是增加活位点的数量,并在相应的活位点上提高了焦炭还原 NO_x 的速率^[6]。其他关于生物质与煤混燃的研究则主要集中在热解机理和污染物的排放等方面。本文主要研究煤木屑混燃过程中钙基对 SO₂、NO_x 排放的影响,并测定底灰的元素、基团和矿物组成。

1 实验方法与装置

1.1 原料

实验用煤和木屑取自东莞新鼎生物质燃料有限公司。原料的常规元素和工业分析如表 1 所示。实验前,将煤和木屑研磨至 200 目,在 105℃ 下干燥 2 h 备用。

表 1 原料元素分析与工业分析

Tab. 1 Elemental analysis and industry analysis

of raw materials %

样品	元素分析(质量分数)				工业分析(质量分数)			
	碳	氢	氮	硫	水分	灰分	挥发分	固定碳
煤	40.54	3.12	0.59	0.57	0.51	21.49	17.35	60.64
木屑	45.81	5.19	0.66	0.34	12.35	0.82	69.43	17.40

1.2 排放性能实验

实验装置由空气预热、燃烧、气固分离和测量系统 4 部分组成,如图 1 所示。空气预热系统由空气预加热室、风速控制阀、鼓风机和布风帽等构成。主燃烧室为圆柱体,规格 $\Phi 150 \text{ mm} \times 3000 \text{ mm}$,采用耐高温的 310 不锈钢制成。蓄热体为石英沙,颗粒直径 2 mm。电加热段在炉体的下部,向上为燃烧段。电加热段最高温度 1000℃,常用温度 850℃。炉内温度由热电偶测试,并连接到控制柜上在线显示。尾部烟气依次通过烟道、冷凝管以降低排烟温度,其浓度由 TY-2000 型烟气分析仪直接测定。

选用石灰石作为催化剂,在不同的空气过量系

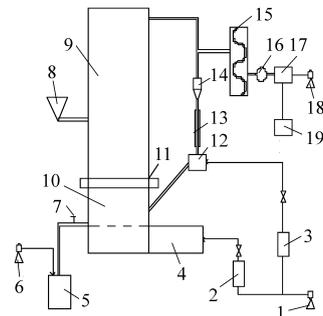


图 1 燃烧反应实验系统简图

Fig. 1 Diagram of combustion experimental system

1. 风机
- 2, 3. 流量计
4. 空气预加热室
5. 收灰装置
6. 引风机
7. 排渣阀
8. 给料斗
9. 主燃烧室
10. 电加热段
11. 布风帽
12. 回料装置
13. 冷却水套
14. 旋风分离器
15. 冷凝管
16. 干燥管
17. 烟气分析仪
18. 采样泵
19. 数据采集仪

数、反应温度和配比条件下研究木屑、煤混燃的排放特性。石灰石添加量按 Ca、S 质量比进行计算,其添加量及实验工况如表 2 所示, m_1 、 m_2 分别为煤、木屑的质量。 R 为添加量, α 为空气过量系数, T 为反应温度。

表 2 添加剂及实验工况

Tab. 2 Additives and test conditions

工况序号	m_1/m_2	Ca、S 质量比	$R/g \cdot kg^{-1}$	α	$T/^\circ C$
1		0	0		
2	5	1.5	24.9	1.0/1.2/1.5	700~950
3		2.0	33.2		
4		2.5	41.5		
5		0	0		
6	4	1.5	24.6	1.0/1.2/1.5	700~950
7		2.0	32.8		
8		2.5	40.9		

1.3 灰样组成分析

采用 S4-Pioneer 型 X 射线荧光光谱仪 (XRF) 测定底灰的基团组成;采用日本理学 D/max 2400 型 X 射线衍射仪 (XRD) 测定其矿物组成。

煤和木屑的成灰元素采用 IRIS Advantage 5000 型等离子体原子发射光谱仪 (ICP) 测定,采用的消解方案为 HNO₃/HF/HClO₄-微波消解。测试结果如表 3 所示。

表 3 煤、木屑的成灰元素质量比

Tab. 3 Mass ratio of lignite and sawdust

样品	Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	P	Si
煤	3.44×10^4	2.48×10^3	1.42×10^4	2.56×10^3	1.02×10^3	6.65×10^2	1.50×10^2	3.12×10^3
木屑	3.67×10^3	9.34×10^3	2.03×10^3	1.34×10^3	6.53×10^2	2.74×10^2	1.18×10^2	1.77×10^2

$\mu g/g$

2 实验结果与讨论

2.1 添加剂对 SO₂、NO_x 排放性能的影响

2.1.1 不同燃烧工况下钙基对排放性能的影响

在不同的燃烧工况下,加入石灰石,考察钙基对排放性能的影响。

图2~3是不同过量空气系数下 SO₂、NO_x 的排放特性。对比最大 SO₂ 质量浓度可以看出,加入石灰石之后,最大 SO₂ 质量浓度($\alpha = 1.5$)从 389 mg/L 降低到 191 mg/L。因此,石灰石的添加能使 SO₂ 排放量大幅度地减少。从图3可以发现,钙基对 NO_x 的释放也具有一定的抑制效果。用相对脱除率 Y 表示钙基对排放的影响,即

$$Y = \frac{C - C'}{C} \times 100\% \quad (1)$$

式中 C ——无添加剂时 SO₂、NO_x 的排放量

C' ——有添加剂时 SO₂、NO_x 的排放量

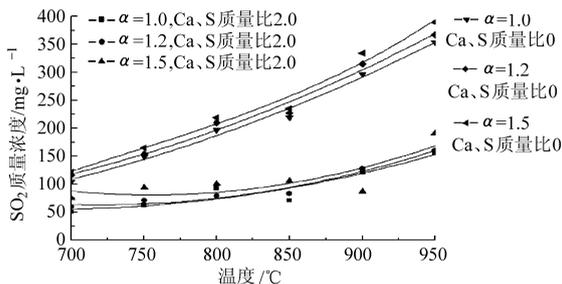


图2 $m_1/m_2 = 4$ 时不同 α 及 Ca、S 质量比下 SO₂ 的质量浓度

Fig. 2 SO₂ concentration with different α and mass ratio between Ca and S when $m_1/m_2 = 4$

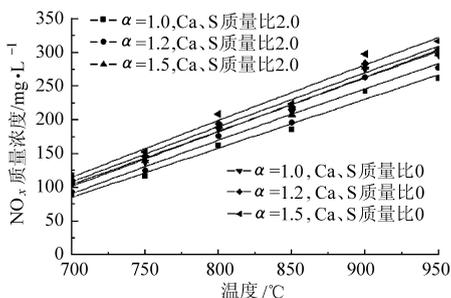


图3 $m_1/m_2 = 4$ 时不同 α 及 Ca、S 质量比下 NO_x 的质量浓度

Fig. 3 NO_x concentration with different α and mass ratio between Ca and S when $m_1/m_2 = 4$

图4中的 SO₂ 相对脱除率曲线呈单峰分布,说明在不同的过量空气系数下,存在一个最佳的脱硫温度。随过量空气系数的不同,最佳脱硫温度基本在 850~950℃ 之间变动。这是因为 CaO 会由于高温烧结逐渐失去活性,导致固硫反应速率的降低。从图5可知,当 $\alpha = 1.0$ 时,石灰石的添加对 NO_x 释放强度的影响较明显,且趋势最稳定。魏砾宏等的实验结论认为,Ca 对 NO_x 的还原反应起催化作用,其催化能力强于 Fe^[7],与本文的结论一致。随着反

应温度的升高,NO_x 还原率显著减少。研究认为,燃烧过程中半焦还原 NO_x 的反应是削减 NO_x 排放的重要因素^[8-9]。温度过高、空气过量系数较大时,CaO 能与充足的 CO₂ 反应生成 CaCO₃, 阻抑氧气与半焦反应形成活泼的碳氧表面络合物,不利于半焦还原 NO_x, 所以 NO_x 还原率较低。

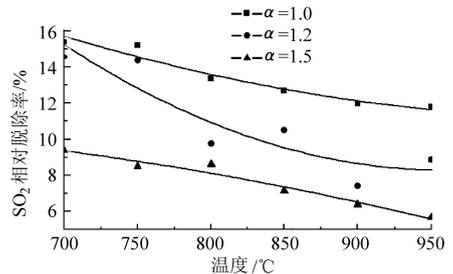


图4 $m_1/m_2 = 4$ 、Ca、S 质量比为 2.0 时不同 α 下 SO₂ 的相对脱除率

Fig. 4 SO₂ removal rate with different α when $m_1/m_2 = 4$, mass ratio between Ca and S of 2.0

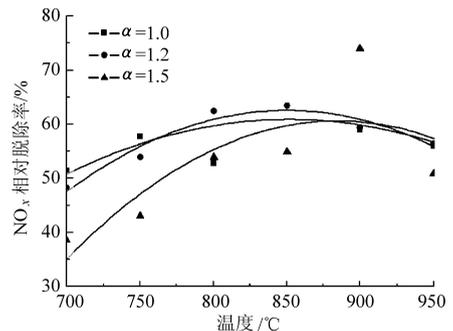


图5 $m_1/m_2 = 4$ 、Ca、S 质量比 2.0 时不同 α 下 NO_x 的相对脱除率

Fig. 5 NO_x removal rate with different α when $m_1/m_2 = 4$, mass ratio between Ca and S of 2.0

图6~9是不同配比条件下的排放特性。从图6、7可以推断,在加入石灰石之后,SO₂ 的析出量不再受配比条件的影响。而图8~9表明,有添加剂时,配比减少能有效降低 NO_x 的释放。这可能是由于:碱金属 Ca 对焦炭异相还原 NO_x 的反应是一种表面反应,反应能力的强弱与木屑、煤的表面结构以及 Ca 与气相的接触面积有关^[10]。一般说来,木屑的挥发分含量较大,在燃烧的初期或燃烧温度较低时,挥发分大量析出并燃烧,能大大减少 Ca 与气相的接触面积。因此,木屑含量越少,CaO 越易从热解阶段进入挥发相,进入气相的 CaO 会促使某些 NO₂ 转化成 NO。

2.1.2 添加量对排放性能的影响

图10~13为不同添加量条件下 SO₂、NO_x 的排放特性。由图可见,反应温度在 700~900℃ 之间、Ca、S 质量比为 2.0 时,固硫脱硫效果最好。超过 900℃ 以后,Ca、S 质量比为 1.5 时对应的 SO₂ 相对脱

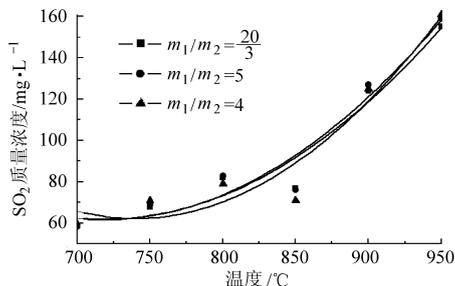


图6 $\alpha = 1.2$ 、Ca、S 质量比为 2.0 时不同配比条件下 SO_2 的质量浓度

Fig. 6 SO_2 concentration with different mixing ratio when $\alpha = 1.2$, mass ratio between Ca and S of 2.0

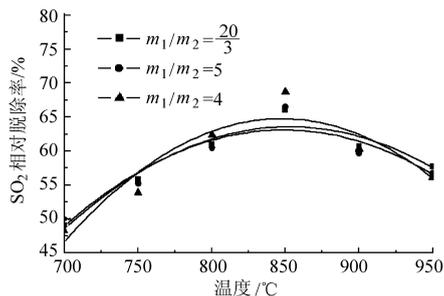


图7 $\alpha = 1.2$ 、Ca、S 质量比为 2.0 时不同配比条件下 SO_2 的相对脱除率

Fig. 7 SO_2 removal rate with different mixing ratio when $\alpha = 1.2$, mass ratio between Ca and S of 2.0

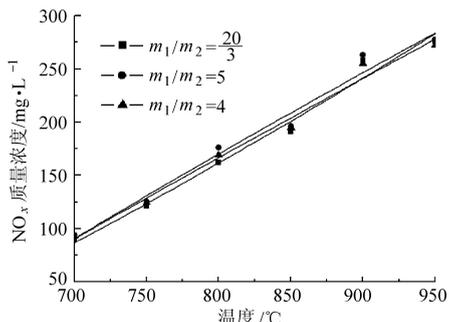


图8 $\alpha = 1.2$ 、Ca、S 质量比为 2.0 时不同配比条件下 NO_x 的质量浓度

Fig. 8 NO_x concentration with different mixing ratio when $\alpha = 1.2$, mass ratio between Ca and S of 2.0

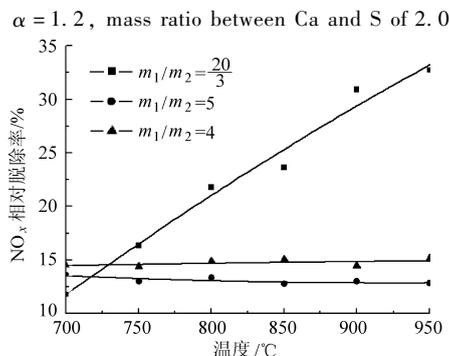


图9 $\alpha = 1.2$ 、Ca、S 质量比为 2.0 时不同配比条件下 NO_x 的相对脱除率

Fig. 9 NO_x removal rate with different mixing ratio when $\alpha = 1.2$, mass ratio between Ca and S of 2.0

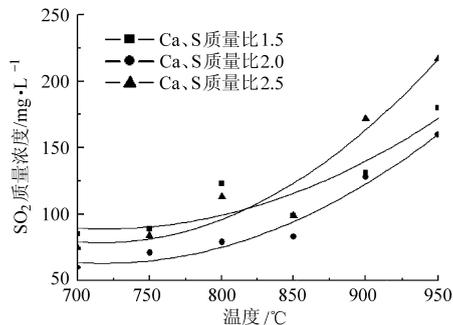


图10 $\alpha = 1.2$ 、 $m_1/m_2 = 4$ 时不同添加量下 SO_2 的质量浓度

Fig. 10 SO_2 concentration with different mass ratio between Ca and S when $m_1/m_2 = 4$, $\alpha = 1.2$

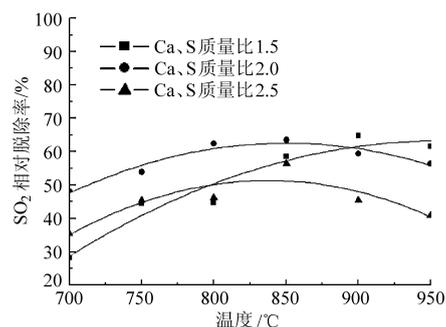


图11 $\alpha = 1.2$ 、 $m_1/m_2 = 4$ 时不同添加量下 SO_2 的相对脱除率

Fig. 11 SO_2 removal rate with different mass ratio between Ca and S when $m_1/m_2 = 4$, $\alpha = 1.2$

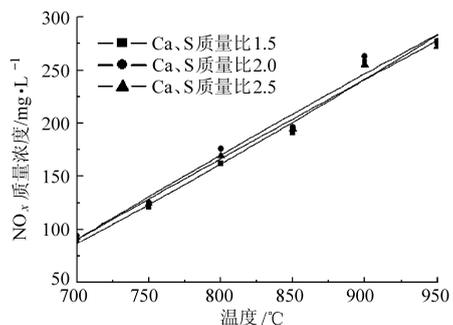


图12 $\alpha = 1.2$ 、 $m_1/m_2 = 4$ 时不同添加量下 NO_x 的质量浓度

Fig. 12 NO_x concentration with different mass ratio between Ca and S when $m_1/m_2 = 4$, $\alpha = 1.2$

除率最高。氮元素在燃烧过程中先转化为 HCN、 NH_3 等中间产物,中间产物和氧气发生反应就会生成燃料型 NO_x 。钙基对 NO_x 排放的影响比较复杂。一方面,添加石灰石后,CO 浓度会升高,而这一还原性气体会抑制 NO_x 的生成;另一方面,CaO 能够促进 HCN、 NH_3 氧化为 NO,增加 NO_x 生成量。因此,存在一个最佳的添加量。如图 13 所示,这个最佳值大约为 Ca、S 质量比 1.5。

2.2 添加剂对灰熔融特性的影响

(1) 灰熔点测定

对反应温度 800°C 、 $\alpha = 1.2$ 、Ca、S 质量比分别

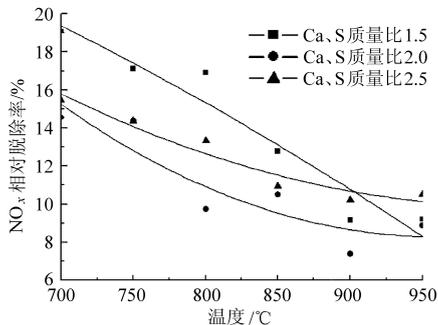


图 13 $\alpha = 1.2$ 、 $m_1/m_2 = 4$ 时不同添加量下 NO_x 的相对脱除率

Fig. 13 NO_x removal with different mass ratio between Ca and S when $m_1/m_2 = 4$, $\alpha = 1.2$

为 1.5、2.0、2.5, 煤与木屑的配比分别为 5、4 的 6 个灰样进行软化温度测定, 研究钙基对底灰熔融特性的影响。实验采用 ZRC2000 型智能灰熔点测定仪, 观察、记录灰样的特征温度。图 14 为软化温度对应

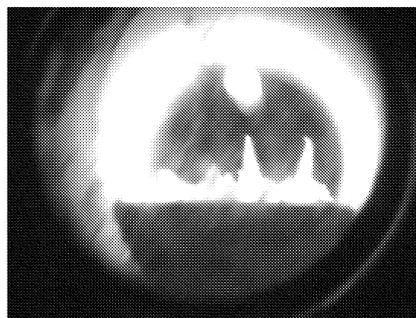


图 14 FT 温度对应的灰样形状

Fig. 14 Corresponding ash shape of softening temperature

的灰样形状。岑可法等认为, 底灰的熔融特性应取决于所生成的高温共融体, 而非成灰灰分的元素比例。为了验证这一推论, 对灰样进行 XRF 和 XRD 测试。

(2) XRF 分析

底灰中主要有 Ca、Si、Al、Fe、Cl、S、Mg、K、Na、少量的 Ti 以及其他未检出的元素(表 4)。

表 4 灰样的 XRF 分析元素质量分数

Tab. 4 Ash analysis by XRF

m_1/m_2	Ca,S 质量比	O	K	Na	Mg	Ca	Fe	Al	Si	Ti	Cl	S
5	1.5	43.11	0.74	0.67	1.33	8.42	3.49	4.78	21.00	0.32	5.62	2.61
	2.0	41.75	0.56	0.34	0.99	9.40	4.58	3.66	21.16	0.23	3.02	0.43
	2.5	41.75	0.42	0.33	1.41	18.40	1.72	3.04	18.49	0.31	4.30	1.41
4	1.5	41.35	0.28	0.47	0.52	15.88	3.45	3.83	18.32	0.29	5.76	2.54
	2.0	41.50	0.30	0.46	0.77	16.37	3.98	3.70	17.13	0.33	6.04	0.92
	2.5	41.52	0.12	0.33	1.38	26.60	5.81	1.93	10.73	0.29	6.04	2.08

其中, Ca、Fe、Mg、Na 元素是网络改良离子, 能够破坏石英、三氧化二铝以及硅酸盐中的 Si—O 键、Al—O 键, 组合成新的硅酸盐和铝硅酸盐结构, Si、Al 元素则能在高温下形成硅酸盐和铝硅酸盐的骨架。从表 4 可知, 随 Ca、S 质量比升高, Na、Al 含量减少, Si 含量总体趋势是减少的, S 先下降后升高, K 元素大量流失。通过化学平衡计算得, 反应温度为 800℃ 时, K 约减少 12%。

对 XRF 测试结果进行当量转换和归一化处理, 得到了灰样氧化物含量, 如表 5 所示, 底灰中 CaO、 Al_2O_3 、 SiO_2 的总质量分数超过了 70%。因此, 煤和木屑混燃产生的底灰属于 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ - 金属氧化物体系。且随 Ca、S 质量比升高, Na_2O 、 Al_2O_3 所占比例减少, SiO_2 所占比例总体趋势是减少的, CaO 所占比例上升, Fe_2O_3 所占比例先上升后下降, Cl 基本为零。

表 5 灰样氧化物的归一化处理结果

Tab. 5 Normalization results of gray oxides

m_1/m_2	Ca,S 质量比	质量分数/%									软化温度 /°C
		K_2O	Na_2O	MgO	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	TiO_2	Cl	
5	1.5	1.78	1.80	2.21	11.79	9.98	18.07	44.99	0.79	0.039	1190
	2.0	1.35	0.92	1.65	13.17	13.08	13.82	45.35	0.57	0.021	1265
	2.5	1.02	0.90	2.35	25.77	4.90	11.49	39.62	0.75	0.030	1180
4	1.5	0.68	1.27	0.86	22.23	9.86	14.48	39.25	0.67	0.040	1206
	2.0	0.73	1.23	1.28	22.92	11.36	13.99	36.71	0.82	0.042	1210
	2.5	0.30	0.88	2.30	37.24	16.60	7.28	23.00	0.73	0.042	1190

(3) XRD 分析

实验中 X 射线衍射仪工作条件为电压 35 kV, 电流 25 mA, 入射线波长 $\lambda = 1.54056 \text{ nm}$ 。为了分析灰样的矿物组成, 对底灰在入射角 $2\theta = 10^\circ \sim 80^\circ$ 的范

围内快速扫描, 每步 0.02° , 扫描速度 $1^\circ/\text{min}$ 。

图 15~20 为灰样 X 衍射图谱。图 15 中序号 1~5 依次为 SiO_2 、 $\text{Ca}_3\text{Si}_3\text{O}_9$ 、 K_2SO_4 、 CaSiO_3 、 KAlSi_3O_8 ; 图 16 中序号 1~4 依次为 SiO_2 、 K_2SO_4 、 $\text{Ca}_3\text{Si}_3\text{O}_9$ 、

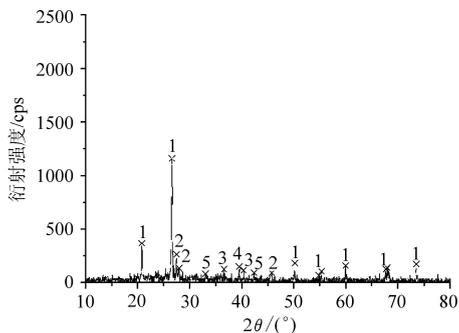


图 15 Ca,S 质量比 1.5、 $m_1/m_2 = 4$ 时燃烧后灰样 XRD 图谱
Fig. 15 XRD analysis of ash when mass ratio between Ca and S of 1.5, $m_1/m_2 = 4$

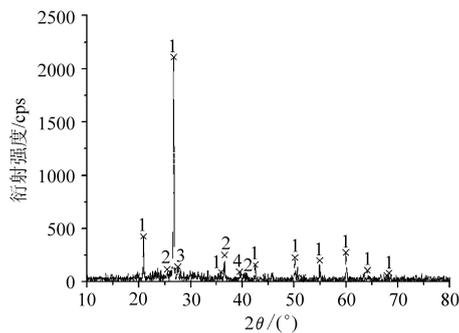


图 16 Ca,S 质量比 2.0、 $m_1/m_2 = 4$ 时燃烧后灰样 XRD 图谱
Fig. 16 XRD analysis of ash when mass ratio between Ca and S of 2.0, $m_1/m_2 = 4$

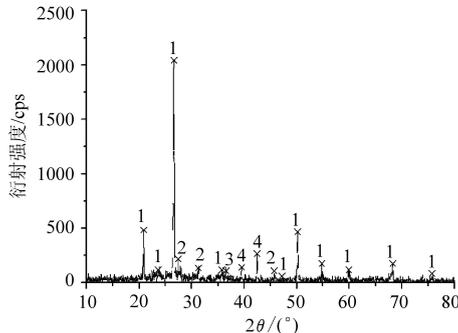


图 17 Ca,S 质量比 2.5、 $m_1/m_2 = 4$ 时燃烧后灰样 XRD 图谱
Fig. 17 XRD analysis of ash when mass ratio between Ca and S of 2.5, $m_1/m_2 = 4$

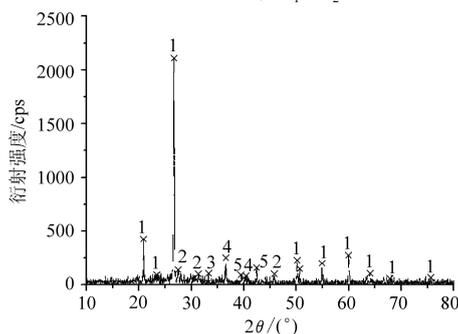


图 18 Ca,S 质量比 1.5、 $m_1/m_2 = 5$ 时燃烧后灰样 XRD 图谱
Fig. 18 XRD analysis of ash when mass ratio between Ca and S of 1.5, $m_1/m_2 = 5$

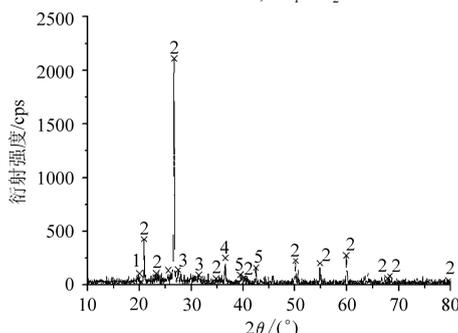


图 19 Ca,S 质量比 2.0、 $m_1/m_2 = 5$ 时燃烧后灰样 XRD 图谱
Fig. 19 XRD analysis of ash when mass ratio between Ca and S of 2.0, $m_1/m_2 = 5$

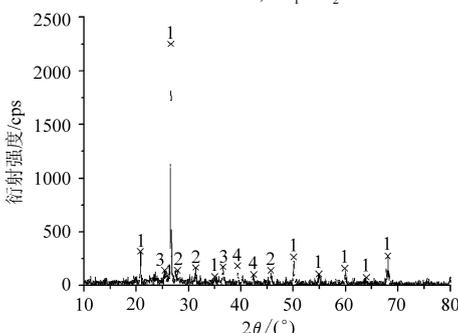
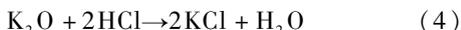
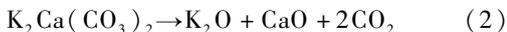


图 20 Ca,S 质量比 2.5、 $m_1/m_2 = 5$ 时燃烧后灰样 XRD 图谱
Fig. 20 XRD analysis of ash when mass ratio between Ca and S of 2.5, $m_1/m_2 = 5$

CaSiO_3 ; 图 17、20 中序号 1~4 依次为 SiO_2 、 $\text{Ca}_3\text{Si}_3\text{O}_9$ 、 K_2SO_4 、 CaSiO_3 ; 图 18 中序号 1~5 依次为 SiO_2 、 $\text{Ca}_3\text{Si}_3\text{O}_9$ 、 KAlSi_3O_8 、 K_2SO_4 、 CaSiO_3 ; 图 19 中序号 1~5 依次为 $\text{Mg}(\text{K}_2\text{Na})_2\text{P}_2\text{O}_3$ 、 SiO_2 、 $\text{Ca}_3\text{Si}_3\text{O}_9$ 、 K_2SO_4 、 CaSiO_3 。图谱显示:底灰的主要矿物成分是石英(SiO_2)、单钾芒硝(K_2SO_4)、硅酸钙(CaSiO_3)、硅灰石($\text{Ca}_3\text{Si}_3\text{O}_9$)和钾微斜长石(KAlSi_3O_8)。此外,各衍射谱中的 CaCO_3 、 CaO 特征峰不明显,说明石灰石参与催化反应比较完全。 Ca^{2+} 作为电子受体,夺取了 O21、O80、O84 上的成键电子,使得 Si60—O21、Si64—O80、Si68—O84 键的强度降低,并与硅结合形成了 CaSiO_3 和 $\text{Ca}_3\text{Si}_3\text{O}_9$ 。钙基作为离子势较低的碱性组分,不仅有效终止了多聚物集聚,而且抑制了 $\text{K}_2\text{Si}_4\text{O}_9$ 的生成,使灰样的熔点降低^[3,11]。同时,灰样中结晶相强度普遍减弱,KCl 相在高温下完全消失。可以认为:KCl 发生了蒸发或其他反应^[12]。因此,钙基催化煤、木屑混燃的主要化学反应过程为



通过求积仪对衍射峰与背景峰的积分、K 值法,得到了灰样 1~3 的物相百分比(表 6)。从表 6 中

看出,钙基催化煤、木屑混燃以式(2)~(4)的反应为主,式(3)使底灰中的 SiO_2 减少,式(4)使熔融态的 K_2O 减少,底灰比较松软。实验中,有一定量单钾芒硝产生,主要是因为煤在 Ca 的作用下发生了固硫反应和式(5)所示的反应。Ca、S 质量比 2.0 时,固硫反应效果最佳,生成的单钾芒硝也最多。

表 6 X 衍射的定量分析

Tab. 6 Quantitative analysis of XRD %

灰样	物相质量分数				
	SiO_2	CaSiO_3	K_2SO_4	$\text{Ca}_3\text{Si}_3\text{O}_9$	KAlSi_3O_8
1	49.787 8	16.944 6	17.501 2	5.740 4	5.237 5
2	65.558 2	9.852 4	18.335 9	7.082 3	0
3	62.824 8	12.501 6	12.783 7	5.903 4	0

3 结论

(1) 钙基对 SO_2 、 NO_x 的释放有一定的抑制作用。当 $\alpha = 1.0$ 时,石灰石的添加对 NO_x 释放强度的

影响最为明显。此外,钙基对 NO_x 排放特性的影响过程比较复杂。木屑与煤混燃过程中, NO_x 的排放不仅受石灰石添加量的影响,而且还受配比条件的影响。一般来说,随着木屑含量的减少, NO_x 产率有所降低。

(2) 当反应温度在 $700 \sim 900^\circ\text{C}$ 、Ca、S 质量比 2.0 时的固硫脱硫效果最好。同时,在不同的过量空气系数下, SO_2 相对脱除率曲线呈单峰分布,即存在一个最佳的脱硫温度。从以上可以看出,反应温度对 SO_2 排放的影响最明显。

(3) 底灰的熔融特性取决于所生成的高温共融体。Ca 能够破坏石英、三氧化二铝以及硅酸盐中的 Si—O 键、Al—O 键,使 Si、Al 元素在高温下形成硅酸钙、硅灰石和钾微斜长石;并能通过参与固硫及其他系统反应,促进熔融态 K_2O 的转化析出,使底灰中钾的含量相对减少。因此,在 CaCO_3 的作用下,底灰的熔融现象基本消失。

参 考 文 献

- Peter Molcan, Gang Lu, Thomas Le Bris, et al. Characterisation of biomass and coal co-firing on a 3 MWth combustion test facility using flame imaging and gas/ash sampling techniques[J]. Fuel, 2009, 88(12): 2 328 ~ 2 334.
- 董信光,李荣玉,刘志超,等. 生物质与煤混燃的灰分特性分析[J]. 中国电机工程学报,2009,29(26):118 ~ 124. Dong Xinguang, Li Rongyu, Liu Zhichao, et al. Investigation on the ash characteristic during co-firing of coal and biomass[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(26): 118 ~ 124. (in Chinese)
- 马孝琴,秦建光,骆仲泱,等. 添加剂对稻草灰熔融特性影响的实验研究[J]. 浙江大学学报:工学版,2010,44(8): 1 573 ~ 1 578. Ma Xiaoqin, Qin Jianguang, Luo Zhongyang, et al. Effect of additives on fusion characteristic of ash during rice straw combustion[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2010, 44(8): 1 573 ~ 1 578. (in Chinese)
- Grammelis P. Thermal exploitation of wastes with lignites for energy production [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2003, 53(11): 1 301 ~ 1 311.
- 杨天华,李润东,李延吉,等. 高温环境下灰中矿物质对长广煤燃烧固硫行为的影响[J]. 燃料化学学报, 2007, 35(1): 23 ~ 26. Yang Tianhua, Li Rundong, Li Yanji, et al. The desulfurization behavior of mineral matter in ash during coal combustion at high temperature[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2007, 35(1): 23 ~ 26. (in Chinese)
- Diana L, Joseph C. The NO-carbon reaction: the influence of potassium and CO on reactivity and populations of oxygen surface complexes[J]. Energy Fuels, 2007, 21(4): 1 872 ~ 1 877.
- 魏砾宏,姜秀民,杨天华. 矿物成分对超细煤粉燃烧过程中氮转化的影响[J]. 环境科学学报,2006,26(11): 1 780 ~ 1 784. Wei Lihong, Jiang Xiumin, Yang Tianhua, et al. Influence of mineral matter on nitrogen conversion in coal during combustion [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(11): 1 780 ~ 1 784. (in Chinese)
- Shen B X, Mi T, Liu D C, et al. N_2O emission under fluidized bed combustion condition[J]. Fuel Processing Technology, 2003, 84(1 ~ 3): 13 ~ 21.
- Hayhurst A N, Lawrence A D. The effect of solid CaO on the production of NO_x and N_2O in fluidized bed combustors [J]. Combustion and Flame, 1996, 105(4): 511 ~ 527.
- 唐浩,钟北京. 不同催化剂对脱矿煤焦还原 NO 的催化能力比较[J]. 热能动力工程, 2005, 20(1): 27 ~ 29. Tang Hao, Zhong Beijing. A comparison of the catalytic ability of various catalysts for the NO reduction of demineralized coal char [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2005, 20(1): 27 ~ 29. (in Chinese)
- Ardersen K H. Deposits formation during coal straw co-combustion in a utility PF-boiler[D]. Lyngby: Technical University of Denmark, 1998.
- Thy P, Jenkins B M, Grundvig S, et al. High temperature elemental losses and mineralogical changes in common biomass ashes [J]. Fuel, 2006, 85(5 ~ 6): 783 ~ 795.