

文章编号 : 0253-240X(2010)01-0017-06

反应气氛对不同煤灰烧结温度影响的研究

王勤辉, 揭涛, 李小敏, 骆仲泱, 景妮洁, 岑可法

(浙江大学热能工程研究所, 能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 煤灰的烧结温度对流化床燃烧及气化炉的设计和运行有着很重要的作用。利用所建的压差法煤灰烧结温度测量装置, 在分析了灰样放置方式对煤灰烧结温度测量影响的基础上, 测量了不同反应气氛下不同煤灰的烧结温度, 并获得了煤灰成分以及反应气氛对煤灰烧结特性的影响。结果表明, 煤灰的酸碱比越大, 其烧结温度越高, 同时煤灰的含铁量增加将明显降低其烧结温度; 还原性气氛下煤灰的烧结温度低于氧化性气氛下煤灰的烧结温度, 而在 H_2 气氛下, 具有适当的 Fe_2O_3 、 Na_2O 、 SO_3 配比的煤灰容易产生低温共熔体 Na_2S-FeS , 使得 H_2 气氛下的烧结温度低于 CO 气氛下的煤灰烧结温度; 典型流化床气化下煤灰的烧结温度介于 CO 气氛和 H_2 气氛下煤灰烧结温度之间, 并且更接近于 CO 气氛。

关键词: 煤灰; 烧结温度; 还原性气氛

中图分类号: TQ038.1 **文献标识码:** A

Experiments of the effects of reaction atmosphere on the coal ash sintering temperature

WANG Qin-hui, JIE Tao, LI Xiao-min, LUO Zhong-yang, JING Ni-jie, CEN Ke-fa

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The understanding of sintering temperature of coal ash is of significance for the design and operation of fluidized bed combustion and gasification systems. So the ash sintering for different coal ash samples under different reaction atmospheres was studied by means of a coal ash sintering temperature measuring system based on the variation of the pressure-drop, and the effects of reaction atmosphere and ash composition on coal ash sintering behavior were discussed. The results show that the sintering temperature increases with the ratio of the acidic oxide to the basic oxide in coal ash, and an increment of iron in coal ash will decrease the sintering temperature obviously. The sintering temperature of coal ash under reducing reaction atmosphere is lower than that under oxidizing reaction atmosphere, and the sintering temperature under CO atmosphere is higher than that under H_2 atmosphere because an eutectic substance of Na_2S-FeS can be formed easily under H_2 atmosphere for the coal ash including Fe_2O_3 , Na_2O and SO_3 . The coal ash sintering temperature under typical fluidized bed gasification atmosphere is between that under CO atmosphere and H_2 atmosphere, which is closer to the sintering temperature under CO atmosphere.

Key words: sintering temperature; reducing atmosphere; coal ash

流化床煤燃烧或气化以其处理量大、强度高、炉内传热传质好、适用煤种广和环境污染小等优点受到了普遍的关注, 实际的工业生产中, 流化床燃烧或气化系统已得到较广泛的应用。然而, 在流化床燃烧系统的运行中, 经常出现床料团聚、气体回路和热交换器回路管路积灰、热气过滤系统灰柱形成等问题, 降低系统的热经济性, 严重时会影响系统的稳定运行。而煤灰的烧结特性是床料团聚、管路积灰、结渣等现象产生的重要因素之一^[1~3]。所以, 研究煤灰烧结特性对于流化床燃烧和气化系统的设计和运行具有重要意义。

煤灰的烧结是指相邻的粉状颗粒在过量表面自由能的作用下黏结。烧结^[1~3]是一个自发且不可逆

的过程, 系统表面能降低是推动烧结进行的基本动力。由于粉体颗粒比表面积越大, 其具有的表面能也就越高。根据最小能量原理, 它将自发地向最低能量状态变化, 并伴随着系统的表面能减少。这种现象与压实粉体的强度变化有关。烧结过程见图1^[1]。烧结时, 封闭孔减小, 开放孔变大, 逐渐形成气体新的通道。

在压力流化床气化或燃烧过程中, 气流通过床层形成压差直到稳定状态, 随着运行温度不断增高, 这时所产生的煤灰容易发生烧结现象而使流化床流态化作用停止, 而气流也会从煤灰烧结形成的通道通过, 导致床层压差下降^[4,5]。

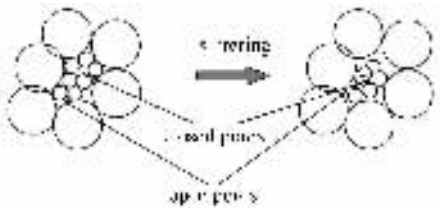


图 1 烧结过程示意图

Figure 1 Mechanism of sintering of particles with wide size distribution showing the decrease of the size of the closed pores and increasing the size of the open pores

基于模拟流化床烧结时的运行状态 ,Raask^[4]等和 Al-Otoom 等^[6]提出了压差法煤灰烧结温度测量方法 ,其主要通过测量灰柱两端的压差变化进而得到煤灰的烧结温度 ,见图 2。压差法是一种比较敏感的测量方法 ,灰柱内发生任何变化 ,都可以很快地以压差变化的形式表现出来 ,而且可以模拟任何浓度的气体对流化床运行的影响 ,该方法的理论基础是达西定律 ,即 :

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{u\eta}{B_0} \tag{1}$$

式中 Δp 为实验灰柱两端的压差 ; B_0 为可渗透系数 ; η 是气体黏度 ; u 则为气体流量 ; L 代表灰柱的长度。

从式 (1)得到 ,在气体流量、可渗透系数、灰柱长度保持不变的情况下 ,压差随气体黏度增大而增大 ,而气体黏度随温度升高而升高 ,所以压差随温度升高而升高。当煤灰烧结发生时 ,灰柱会收缩 ,在灰柱和管道之间以及灰柱内部会形成新的气体通道 ,从而导致压差减小。所以烧结发生时 ,压差随温度的变化曲线上有个转折点 ,此点所对应的温度即为煤灰烧结温度。

本研究利用所建的压差法煤灰烧结温度测量装置 ,研究不同气氛对煤灰烧结温度的影响 ,分析气氛条件对煤灰烧结特性的影响规律 ,从而更好地了解煤灰的烧结特性。

1 实验部分

1.1 煤灰的制取 根据常规的煤灰制取方法 ,将所取煤颗粒样品均匀地撒在方舟里 ,放入已经预热到 540 ℃ 的马弗炉中 ,慢慢灰化直到完全不冒烟为止 ,然后关上炉门让温度一直升至 820 ℃ ,并持续加热 1 h ,即为所需煤灰。为了使实验室制得的煤灰尽量与流化床燃烧或气化系统所产生的煤灰接近 ,煤灰制取时采用相近的温度 (820 ℃)。选用课题目标煤种 D 经马尔文粒度仪实验检测 ,具体见图 2 ,实验煤

灰与实际生产所得的煤灰具有相似的粒径分布 ,所以实验煤灰可以较好的替代实际煤灰。

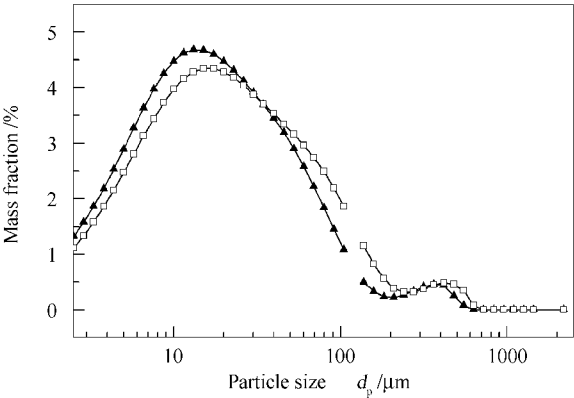


图 2 煤种 D 实验煤灰与实际煤灰粒径对比

Figure 2 Particle size distribution for the ash samples of coal D collected from the laboratory and CFB reactor

▲ : ash sample from the laboratory ;
□ : ash sample from a CFB reactor

本实验所使用的四种煤灰的灰成分见表 1。

表 1 煤灰的成分分析

Table 1 Chemical analysis of the samples

	Content $w / \%$			
	sample A	sample B	sample C	sample D
SiO ₂	29.33	59.49	34.20	48.10
Al ₂ O ₃	23.52	18.39	33.74	31.84
Fe ₂ O ₃	10.40	4.94	10.73	5.90
CaO	15.32	5.19	13.43	4.96
MgO	7.60	2.38	1.25	0.98
K ₂ O	0.17	2.92	0.84	1.09
Na ₂ O	0.70	1.42	0.98	1.14
SO ₃	7.36	2.31	5.79	3.07

1.2 实验系统及过程 所建的压差法煤灰烧结温度测量系统见图 3。

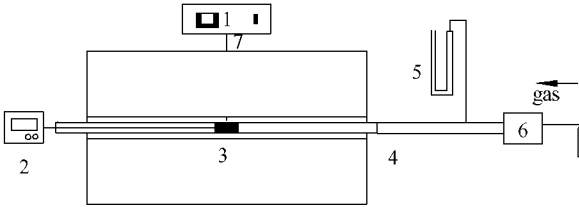


图 3 压差法测煤灰烧结温度实验台系统示意图

Figure 3 Experimental setup of pressure-drop sintering technique (PDS)

1-temperature controller ; 2-measured temperature thermocouple ;
3-tube furnace ; 4-quartz tube ; 5-u-tube manometer ;
6-mass flow controller ; 7-temperature controller thermocouple

测量系统由四部分组成,配气系统、测量装置、加热部分以及反应管。实验气体由配气系统出来,经质量流量计控制流量,进入反应管,流经置于反应管内的灰柱样品后排出。由于气体在通过灰柱时会产生一定的压差,实验时,通过测量装置即时观察压差变化,并记录变化对应温度,经过数据分析后可得出煤灰烧结温度。

其中,差压测量装置采用 8 000 mm ~ 0 mm ~ 8 000 mm 水柱的 U 型管压力计,其测量精度为 0.5 mm 水柱。温度控制装置采用 HR-4 型灰熔点炉,其升温速率为 10 °C/min ~ 15 °C/min,测量误差控制在 ± 3 °C。

1.3 实验工况 所进行的实验工况条件为,灰样:煤灰 A、煤灰 B、煤灰 C、煤灰 D;煤灰用量 0.5 g ~ 1.0 g;气氛:惰性气氛(N_2)、氧化性气氛(O_2 、 CO_2)、还原性气氛(H_2 、 CO)、模拟燃烧气氛、模拟气化气氛,升温为 450 °C ~ 1000 °C、升温速率为 10 °C/min、气体流量为 5 mL/min。

2 结果与讨论

2.1 灰柱的放置方式及其对测量烧结温度的影响 灰柱的制备与测量煤灰熔融温度的灰锥法相似,采用少量阿拉伯树胶定型,灰柱制备过程中所用的压应力控制在 0.8 MPa 左右。

灰柱放置方式之一见图 4,放置在有环石英管(内孔径为 4 mm)内,有环石英管相当于在普通石英管内加一个圆锥形突起,当气体流量比较高时,有环石英管可以很好地防止管内的灰柱移动。一般灰柱放置在有环石英管的右侧,这主要是因为放在左侧时,当气体流经灰柱时,石英管中间的开孔处煤灰承受较大压力,气体流量稍大就会使得孔被穿通,而放在右侧时承受压力的是整个灰柱。

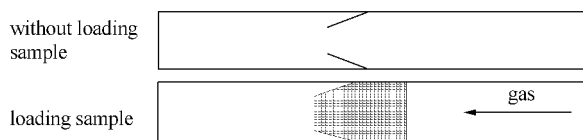


图 4 有环石英管放置示意图之一

Figure 4 Quartz tube with sheath

另一种放置方式见图 5。图 5 是将灰柱直接放置在普通无环石英管内。可以根据不同的实验条件或不同的研究目的选择不同的放置方式。

不同灰柱放置方式的实验结果见图 6。曲线 a、b、c 是无环石英管的重复性实验,烧结温度相差不超过 20 °C,表明本实验的重复性较好。曲线 d 是有

环石英管实验曲线,四条曲线的明显区别是曲线 d 在达到烧结温度后压差慢慢减小,而曲线 a、b、c 在达到烧结温度后压差很快就减小到接近于零,其主要原因灰柱发生烧结后,灰颗粒之间发生黏结而导致灰柱收缩,使得灰颗粒之间、灰颗粒和石英管壁之间出现了微小的空隙,形成了新的气体通道,使得压差突然降低到零。而有环石英管内部的凸起可以阻止空隙的快速产生,所以随着烧结程度的加深,灰柱两端的压差慢慢下降。在烧结温度的判断上有环石英管和无环石英管的判断上基本一致,从图 6 可以看出,利用有环石英管得到的烧结温度是利用无环石英管得到的烧结温度的平均值。从曲线 d 可以看出煤灰烧结是一个持续过程,而不是瞬间完成的过程,在烧结发生后,在 780 °C ~ 820 °C,随温度的升高,压差减少量很小,说明烧结仍然在进行。而曲线 a、b、c 却不能说明这一点。因此,如果仅测定煤灰发生烧结时的温度,使用无环石英管来代替有孔石英管是完全可行的,但要获得烧结过程特性如烧结速率,则有环石英管是更好的选择。

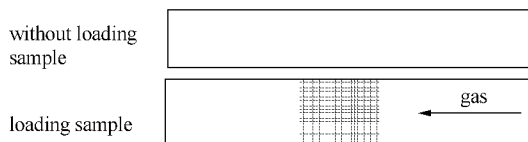


图 5 无环石英管放置示意图之一

Figure 5 Quartz tube without sheath

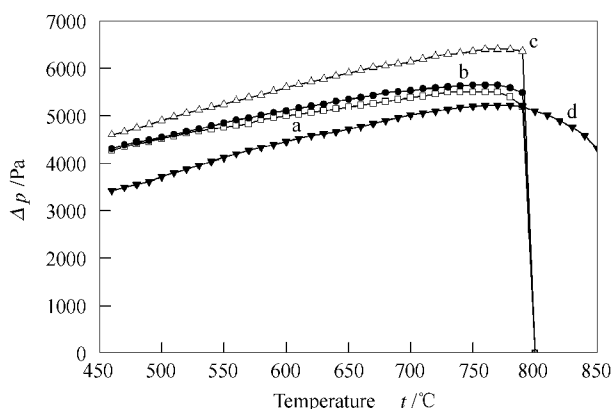


图 6 不同放样装置煤灰烧结过程曲线

Figure 6 Comparison of sintering process among different quartz tube

□: without sheath $t_s = 770$ °C; ●: without sheath $t_s = 780$ °C;
△: without sheath $t_s = 780$ °C; ▼: with sheath $t_s = 780$ °C

由于利用无环石英管在做实验时简单方便,石英管重复利用率高,而有环石英管内灰样的压实强度难以控制,且实验结束后烧结的灰柱难以取出。

同时鉴于本文主要研究工作是获得不同气氛对煤灰烧结温度的影响,因此,选用了无环石英管放置方式进行相关实验。

2.2 煤灰特性对烧结温度的影响 实验灰样在氧气气氛下其全部烧结过程中压差随温度变化曲线见图 7。从图 7 可以看出,实验灰样达到烧结温度之前,压差随着温度近似于线性变化,并且四种灰样的压差随温度变化曲线近似于平行。对于一般的气体流动而言,在温度低于 1500 K 下,随着温度的升高,气体黏性系数 η 增大,且随温度近似于线性变化,由式(1)进一步可得到,压差随温度近似线性变化。实验和理论吻合较好。在灰样达到烧结温度以前,且低于烧结温度的几十度温差范围内,压力不随温度变化,即有一段时间压力处于不变状态。这是因气体黏性随温度变化引起的压差增量和开放孔增大引起的压差减少量暂时达到一个平衡,使得压差保持不变。

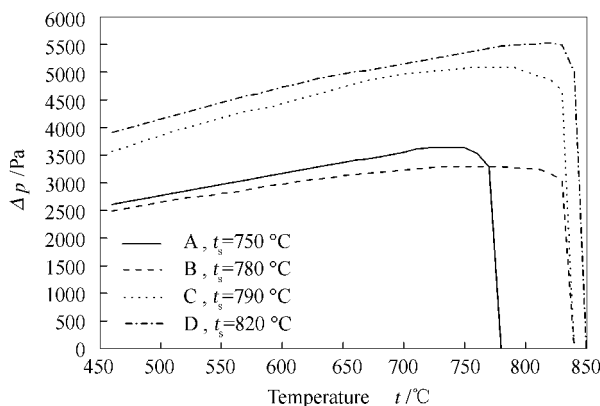


图 7 氧气气氛下压差随温度的变化

Figure 7 Effect of temperature on pressure-drop under O_2 atmosphere

Al-Otoom 和 Raask 等^[4,6]认为,黏性流机理是煤灰烧结的主要机理,颗粒是在表面自由能的影响下发生变形。Frenkel^[7]提出黏性流机理模型,该模型是在气体流经物质后表面自由能和散热损失变化相等的前提下得到的。在表面张力的作用下,结晶态物质会像不定型物质一样,表现出流动的性质,而发生烧结。

而煤灰的烧结特性和煤灰成分的酸碱比有着密切的关系。引入“酸碱比”的概念可以综合考虑各种氧化物成分对灰渣黏度特性的影响。酸碱比为煤灰中酸性氧化物(SiO_2 和 Al_2O_3)的含量和碱性氧化物(Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 和 TiO_2)的含量之比,即:

酸碱比 $J =$

$$\frac{SiO_2 + Al_2O_3}{Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O + TiO_2} \quad (2)$$

岑可法等^[8]指出,在指定温度下,煤灰的黏度随酸碱比的增大而增大,也就是说煤灰的酸碱比越大,煤灰的烧结温度越高,本实验的结果很好地验证了这一点。图 8 为煤灰酸碱比和烧结温度对比图。

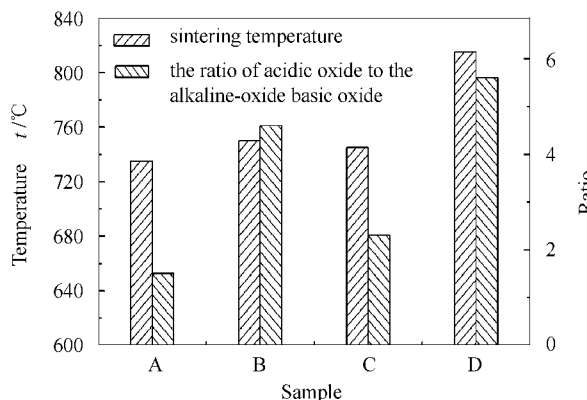


图 8 煤灰酸碱比、烧结温度的对比

Figure 8 Comparison between sintering temperatures and the ratio of acidic oxide to the alkaline-oxide basic

另外,从煤灰成分来说,由于铁常以黄铁矿(FeS)、碳酸铁($FeCO_3$)的形式存在于煤中,在高温下产生中间产物 FeO ,它会与 SiO_2 反应而形成 $FeSiO_3$,而 $FeSiO_3$ 熔点很低($1146^\circ C$),会降低煤灰的黏度,从而降低煤灰的烧结温度。所以,相比于其他煤灰,含铁率高的煤灰(如本实验的煤灰 A、煤灰 C),其烧结温度更低。

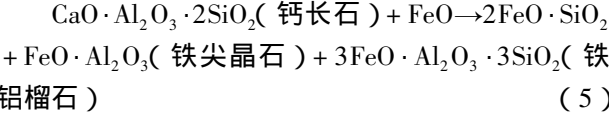
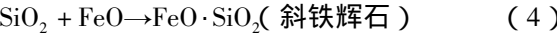
对于煤灰 A、煤灰 C 来说,虽然煤灰 A 的 FeO 含量略小于煤灰 C,但煤灰 C 的烧结温度还是大于煤灰 A 的烧结温度。这是由于煤灰中的 SiO_2 和 Al_2O_3 有促进煤灰黏度的作用^[8]。本实验中煤灰 C 的 SiO_2 和 Al_2O_3 的含量明显大于煤灰 A 中的 SiO_2 和 Al_2O_3 的含量,在相同温度下,煤灰 C 的黏度大于煤灰 A 的黏度,进而使得煤灰 C 的烧结温度大于煤灰 A 的烧结温度。

2.3 单种反应气体条件下煤灰烧结特性 四种煤灰在 N_2 、 O_2 、 CO_2 、 CO 和 H_2 气氛下的烧结温度见图 9。从图 9 可以看出,还原性气氛(H_2 、 CO)下的烧结温度明显低于氧化性气氛(O_2 、 CO_2)下的烧结温度,而 O_2 气氛下的烧结温度与 CO_2 气氛下的烧结温度相比则变化不大,在允许的实验误差范围内,可以认为 O_2 气氛和 CO_2 气氛对煤灰烧结温度的影响是等

同的。

这种现象是由煤灰中不同价态的铁离子在不同气氛下产生的不同作用所致。煤灰中的三价阳离子 Fe^{3+} 极性很高,是聚合物的构成者,能提高煤灰的烧结温度,而二价阳离子 Fe^{2+} 则易于和煤灰熔体中未达到键饱和的二价阴离子 O^{2-} 相连接破坏其网络结构,降低煤灰黏度^[9],在高温还原性气氛(如 H_2 、 CO 气氛)下,部分 Fe^{3+} 被还原成 Fe^{2+} ,降低了煤灰黏度,致使煤灰烧结温度降低。

同时,二价铁氧化物极易和煤灰中的矿物质生成铁橄榄石、铁尖晶石、铁铝榴石、斜铁辉石等矿物质,这些铁系矿物质间会产生低温共熔现象,从而降低灰样的烧结温度,其主要反应如下^[10]：



与 CO 气氛相比,在 H_2 气氛下煤灰很容易出现低温共熔体 $\text{Na}_2\text{S}\text{-FeS}$,该体系的熔点只有 $640\text{ }^\circ\text{C}$ 。由图 9 可知, H_2 气氛下,煤灰 A、B、C 的烧结温度均为 $660\text{ }^\circ\text{C}$,与 $\text{Na}_2\text{S}\text{-FeS}$ 体系的熔点($640\text{ }^\circ\text{C}$)较吻合,而煤灰 D 在增加 Fe_2O_3 含量后,也出现了 $640\text{ }^\circ\text{C}$ 的烧结温度。一般而言,具有适当的 Fe_2O_3 、 Na_2O 、 SO_3 配比的煤灰在 H_2 气氛下, Fe_2O_3 和 SO_3 一起很有可能会被 H_2 还原成 FeS ,与 Na_2S 一起形成低熔点共熔体系 $\text{Na}_2\text{S}\text{-FeS}$ ^[11]。因此, H_2 气氛下煤灰烧结温度

低于 CO 气氛下煤灰的烧结温度。

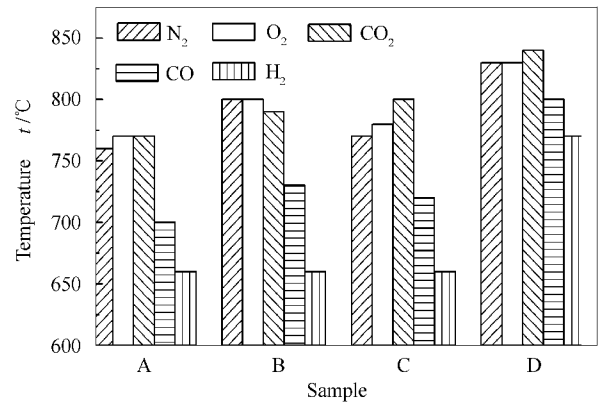


图 9 不同气氛煤灰烧结温度对比

Figure 9 Comparison among the sintering temperatures obtained from pressure-drop technique under different atmospheres

2.4 典型流化床燃烧气氛和气化气氛下的煤灰烧结温度 流化床燃烧或气化在实际运行中气氛一般是处在由 CO_2 、 N_2 、 O_2 和水蒸气等气体组成的燃烧气氛或者是由 H_2 、 CO 、 CO_2 、 CH_4 和水蒸气等组成的混合气氛,单种反应气体对煤灰烧结温度的影响不足以说明反应气氛对煤灰烧结温度的影响,所以本实验还进行了模拟燃烧气氛和典型气化气氛下煤灰烧结特性的实验。

实验所用的模拟燃烧气氛(SCG)的组成为 : O_2 -10%、 CO_2 -13%、 N_2 -77%(体积分数)典型的流化床煤气组成^[12]见表 2。

表 2 典型流化床气化的煤气组成

Table 2 Chemical composition of coal gas under typical fluidized bed gasification

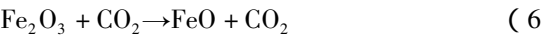
Gasification medium	Producing gas	Gas composition $\varphi/\%$				
		H_2	CO	CH_4	CO_2	N_2
Air + steam	fuel gas	12.0	22.0	0.7	10.0	55.3
Rich oxygen air + steam	synthesis gas	26.0	38.0	0.2	14.0	21.8
Oxygen + steam	water gas	40.0	38.0	2.0	19.0	1.0

实验所配的模拟气化气氛与表 2 中第三种煤气组成相近,其主要成分 : H_2 -40.8%、 CO -36.5%、 CO_2 -20.8%、 CH_4 -1.92%。

燃烧气氛、典型气化气氛下煤灰的烧结温度及其与 CO 、 H_2 气氛下的煤灰烧结温度的对比结果见图 10。

从图 10 可以看出,具有还原性的气氛如 CO 、 H_2 、典型气化气氛下煤灰的烧结温度明显低于具有氧化性的气氛(燃烧气氛),并且典型气化气氛下煤灰的烧结温度介于 CO 气氛和 H_2 气氛下的煤灰烧

结温度之间。这是由于典型气化气氛主要是通过其含有的 CO 和 H_2 气氛对煤灰的烧结特性产生影响的。虽然气化气氛中的 H_2 成分含量大于 CO 成分,但气化气氛下煤灰的烧结温度还是更接近 CO 气氛下煤灰的烧结温度。这是因为还原性气氛下,煤灰在烧结过程中主要发生了如下反应而改变了煤灰的烧结特性：



而气化气氛中的 CO_2 成分可以抑制此反应的进行,进而减少 FeO 的生成量,增加了煤灰的烧

温度,并且由于在 H_2 气氛下,煤灰易产生 Na_2S-FeS 共熔体,此共熔体系可明显降低煤灰的烧结温度。

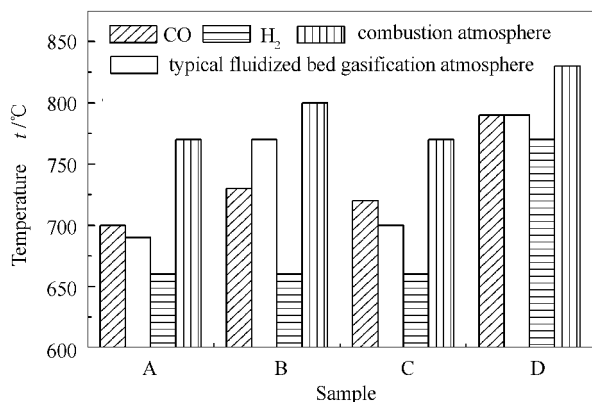


图10 典型燃烧气氛、气化气氛、 H_2 、 CO 气氛下煤灰烧结温度的对比

Figure 10 Comparison among the sintering temperatures under SCG, typical fluidized bed gasification atmosphere, H_2 , CO

3 结 论

灰样放置装置对煤灰烧结过程的影响,在判断

参考文献:

- [1] AL-OTOOM A Y, ELLIOTT L K, WALL T F, MOGHADDERI B. Measurement of the sintering kinetics of coal ash[J]. Energy Fuel, 2000, **14** (5): 994-996.
- [2] AL-OTOOM A Y, BRYANT G W, ELLIOTT L K, SKRIFVARS B J, HUPA M, WALL T F. Experimental options for determining the temperature for the onset of sintering of coal ash[J]. Energy Fuel, 2000, **14** (1): 227-233.
- [3] ISHOM F, HARADA T, AOYAGI T, SAKANISHI K, KORAI Y, MOCHIDA I. Problem in PFBC boiler (1): Characterization of agglomerate recovered in commercial PFBC boiler[J]. Fuel, 2002, **81** (11/12): 1445-1451.
- [4] RAASK E. Mineral impurities in coal combustion: Behavior, problems, and remedial measures[M]. Washington (USA): Hemisphere Publishing Corporation, 1985.
- [5] 景慧敏,程中虎,王鸿瑜,黄戒介,王洋. 灰熔聚流化床气化炉的 CFD 模拟研究[J]. 燃料化学学报, 2008, **36** (1): 104-107. (JING Hui-min, CHENG Zhong-hu, WANG Hong-yu, HUANG Jie-jie, WANG Yang. Experimental study on flow characteristics of fluidized bed at elevated pressure[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2008, **36** (1): 104-107.)
- [6] AL-OTOOM A Y, ELLIOTT L K, MOGHADDERI B, WALL T F. The sintering temperature of ash, agglomeration and defluidisation in a bench scale PFBC[J]. Fuel, 2005, **84** (1): 109-114.
- [7] FRENKEL J. Viscous flow of crystalline bodies under the action of surface tension[J]. J Phys, 1945, **5** (9): 385-391.
- [8] 岑可法,樊建人,池作和. 锅炉和热交换器的积灰、结渣、磨损和腐蚀的防止原理与计算[M]. 北京: 科学出版社, 1994. (CEN Ke-fa, FAN Jian-ren, CHI Zuo-he. Mechanisms and calculations for preventing boilers and heat exchangers from depositing, slagging, wearing and eroding[M]. Beijing: Science Press, 1994.)
- [9] 龚德生. 煤灰的高温粘度模型[J]. 热力发电, 1989, (1): 32-37. (GONG De-sheng. The high temperature viscosity model of coal ash[J]. Thermal Power Generation, 1989, (1): 32-37.)
- [10] 李帆,邱建荣,郑楚光. 煤中矿物质对灰熔融温度影响的三元相图分析[J]. 华中理工大学学报, 1996, **24** (10): 96-99. (LI Fan, QIU Jian-rong, ZHENG Chu-guang. The effect of mineral matter in coal on the ash melting point with ternary phase diagram[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology, 1996, **24** (10): 96-99.)
- [11] STECK L V, SLAVIN M, RALSTON O C. The system sodium sulfide-ferrous sulfide[J]. J Am Chem Soc, 1929, **51** (11): 3241-3246.
- [12] 李仲来. 煤气化技术综述[J]. 小氮肥设计技术, 2002, **23** (2): 7-17. (LI Zhong-lai. Review of coal gasification technology[J]. L-sized Nitrogenous Fertilizer Progress, 2002, **23** (3): 7-17.)

煤灰烧结温度上使用无孔石英管和有孔石英管没有什么差别,但是利用有孔石英管可以用来研究烧结速率,无孔石英管利用率高,且无孔石英管可以方便地控制灰柱的压实强度。

煤灰的烧结温度和煤灰的酸碱比、煤灰中的含铁量有着密切的关系,一般而言,煤灰的酸碱比越大,煤灰的烧结温度越高,而煤灰含铁量越高,煤灰的烧结温度越低。

还原性气氛(H_2 、 CO 、典型气化气氛)下的烧结温度低于氧化性气氛(O_2 、 CO_2 、燃烧气氛)下的烧结温度。这是由于在高温还原性气氛下,生成的二价铁氧化物容易和煤灰矿物质生成低温共熔体而降低灰样的烧结温度。而由于 H_2 气氛下,具有适当的 Fe_2O_3 、 Na_2O 、 SO_3 配比的煤灰容易产生低温共熔体 Na_2S-FeS ,使得 H_2 气氛下的烧结温度低于 CO 气氛下的煤灰烧结温度;典型流化床气化气氛下煤灰的烧结温度介于 CO 气氛和 H_2 气氛下煤灰烧结温度之间,并且更接近于 CO 气氛。