

丙酸钙再燃的脱硝特性

牛胜利 韩奎华 路春美 吴水木

(山东大学 燃煤污染物减排国家工程实验室 山东 济南 250061)

摘 要:在沉降炉实验台上系统地研究了丙酸钙的再燃脱硝特性。丙酸钙基本再燃可以取得与液化石油气相当的脱硝效率。实验结果表明:在 973 ~ 1 323 K,丙酸钙基本再燃的脱硝效率与温度同步升高,最高为 79.65%,此后进一步升高温度,效率提高不明显;为保证基本再燃较高的脱硝效率,烟气中初始氧浓度不宜超过 5%,再燃比应在 25% 附近,同时停留时间应保证在 0.7 s 左右。单独喷氨气的选择性非催化还原能取得的最高脱硝效率为 1 273 K 时的 85.34%,但“温度窗口”较窄,为 1 215 ~ 1 341 K,适宜氨氮摩尔比为 1.75 ~ 2.00。在先进再燃过程中,由于丙酸钙和氨气存在协同的脱硝作用,这两种试剂的所需加入量大大减少,当再燃比为 19.83%,氨氮摩尔比为 0.8 时,其最高效率可达到 93.37%,同时“温度窗口”拓宽为 1 195 ~ 1 355 K,而且在 2% ~ 6% 的氧浓度范围内,先进再燃均能保持较高的脱硝效率。

关键词:丙酸钙;选择性非催化还原;先进再燃;温度窗口

中图分类号:X511 文献标志码:A

Nitric oxide reduction through calcium propionate reburning

NIU Sheng-li, HAN Kui-hua, LU Chun-mei, WU Shui-mu

(National Engineering Laboratory for Coal-Burning Pollutants Emission Reduction, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The characteristics of nitric oxide (NO) reduction using calcium propionate (CP) were investigated in a drop tube experimental system. It is demonstrated that the calcium propionate basic reburning (BR) can get the NO reduction efficiency in comparable with liquefied petroleum gas. From 973 K to 1 323 K, the NO reduction efficiency of CP-BR increase with temperature and the highest value is 79.65%. When temperature is further increased, the efficiency is improved little. For a satisfying outcome of the CP-BR, oxygen concentration in flue gas should not be above 5%, re-burning fuel fraction (α) and residence time should be kept about 25% and 0.7 s, respectively. When ammonia is injected alone, namely selective non-catalytic reduction (SNCR), the maximum NO reduction efficiency of 85.34% is achieved at 1 273 K and the “temperature window” of 1 215 K to 1 341 K is narrow. Also, the quantity of ammonia injection is large whose corresponding mole ratio of ammonia to NO (ε) is required between 1.75 and 2.00. During the advanced reburning (AR) process, the calcium propionate and ammonia work synergistically and the injection of these two reagents is reduced for high NO reduction efficiency. When α and ε are fixed at 19.83% and 0.8, the maximum of AR efficiency is 93.37%. At the same time, the “temperature window” is broadened to 1 195 ~ 1 355 K and the efficiency is not obviously impacted between 2% and 6% of the oxygen concentration.

Key words: calcium propionate; selective non-catalytic reduction; advanced reburning; temperature window

燃煤电厂排放一氧化氮(NO)引起了酸雨、光化学烟雾等严重的环境问题,开发有效的低NO排放技

术是当前研究的热点。基本再燃(Basic Reburning, BR)^[1-2]和选择性非催化还原(Selective Non-catalytic

Reduction, SNCR)^[3-5]是两种研究较早的低 NO 排放技术。BR 燃料适应性广,效率通常为 60%~80%; SNCR 虽然可以取得 90% 左右的脱硝效率,但是存在较窄“温度窗口”(通常为 1 223~1 323 K)以及“氨泄漏”问题。将 BR 和 SNCR 有机结合组成的“先进再燃”(Advanced Reburning, AR)^[6-7],可以优化脱硝进程。在满足高脱硝效率(90%~95%)的前提下,降低再燃燃料和氨剂的喷入量,减少“氨泄漏”,同时拓宽“温度窗口”。

研究^[8-11]发现,醋酸钙镁、醋酸钙以及丙酸钙等有机钙盐在热解过程中产生还原性的活性成分,能够还原 NO。以丙酸钙为例,其受热分解 $(\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO})_2\text{Ca} \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}$,析出戊酮($\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}$)。然后戊酮再进一步分解产生 H_2 、 CH_4 、 CO 、 C_2H_2 以及 C_2H_4 等成分,这些成分与 NO 反应,生成 HCN、NCO 等中间产物,在还原性气氛下,能够进一步转化生成 N_2 ,从而达到脱硝的目的。Patsias 等^[8-9]将醋酸钙镁或丙酸钙以溶液的方式喷入炉膛,取得 70%~80% 的脱硝效率。而有机钙盐热解后的剩余固体产物可以进行钙基固硫,从而达到 NO 和 SO_2 协同脱除的目的。但是以溶液方式加有机钙盐,会带入大量的水分。同时,醋酸钙镁昂贵的造价限制了它的工业化应用。

本文以廉价的固体丙酸钙(Calcium Propionate, CP)作为研究对象,首先线性回归了螺旋给料机的转速(β)与 CP 落料量的关系,进而得出不同 β 所对应的再燃比(α)。然后从温度(T)、转速/再燃比、停留时间(τ)、氧气浓度($\varphi(\text{O}_2)$)、氨氮摩尔比(ε)等方面系统的考察了 CP-BR 以及基于氨气法的 SNCR-Thermal De- NO_x 的脱硝特性,并在此基础上,从 T 、 ε 和 $\varphi(\text{O}_2)$ 等方面对 CP-AR 的反应特性做了进一步的研究。国内在此方面还鲜有相关报道,希望从中得出的结论,能够为燃煤电厂 NO 的脱除提供理论指导,并为下一步的丙酸钙应用于 NO 和 SO_2 的协同脱除做铺垫工作。

1 实验系统与实验方法

实验系统如图 1 所示,主要由主炉、送引风机、点火器、温控仪、给料机、烟气分析仪、循环冷却水等组成。主炉由内到外依次是内刚玉管、硅碳管、外刚玉管、保温层和炉外壁。内刚玉管是反应的核心区域,由硅碳管加热。主燃料为液化石油气(Liquefied Petroleum Gas, LPG)与空气混合后在 TK-701 型高压点火器中点火。NO 初始浓度为 $(800 \pm 10) \times 10^{-6}$ 。烟气在炉膛内与 CP、 NH_3 反应后,沿刚玉管向下流动

至炉膛底端进行取样,通过 Trust TY-2000 型烟气分析仪进行成分分析,其中 O_2 、 CO_2 和 NO 的分辨率分别为 0.1%、0.1% 和 1×10^{-6} 。

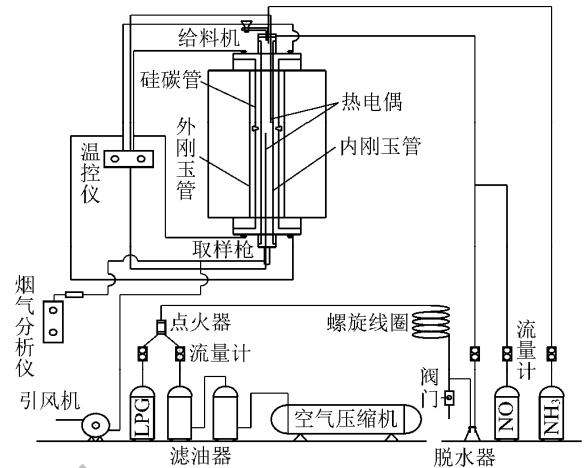


图 1 沉降炉实验系统

Fig. 1 Drop tube-bed system

实验所用的 CP 粒径为 325~400 目,采用螺杆式给料机实现丙酸钙的供给。实验开始前先对给料机进行转速 β 与给料量关系的标定,结果见表 1,其中 γ ^[8] 为 CP 可燃质给料速度; α 为对应的再燃比。为方便计算不同工况再燃比所需要的给料速度,对以上 4 个转速所对应的给料速度和再燃比进行线性回归,其结果为

$$\gamma = 0.023 1\beta + 0.133 5 \quad (R^2 = 0.996 56) \quad (1)$$

$$\alpha = 0.579 1\beta + 7.535 0 \quad (R^2 = 0.990 31) \quad (2)$$

表 1 螺旋给料机的 CP 供给速度

Table 1 CP supplied speed by the screw-driven feeder

参数	$\beta/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$			
	10	20	30	40
CP 供给速度/ $(\text{g} \cdot \text{min}^{-1})$	1.012	1.752	2.488	2.999
$\gamma/(\text{g} \cdot \text{min}^{-1})$	0.348	0.603	0.856	1.032
$\alpha/\%$	12.49	19.83	25.99	29.74

注:折算 α 的实验工况为 $T=1 273 \text{ K}$, $\tau=0.72 \text{ s}$ 。

实验过程中采用改变烟气流量(Flue Gas)的方法满足不同停留时间 τ 工况的要求,在保证同一再燃比 α 的前提下,CP 需对应不同的添加量,根据式(1)得出所需的给料机转速,见表 2。同理,在考察不同温度下 CP 再燃脱硝特性时,要保证相同的停留时间和再燃比,需要计算不同烟气流量条件下 CP 的添加量,进而设定其相应的转速。

2 结果与讨论

2.1 丙酸钙基本再燃(CP-BR)脱硝特性

2.1.1 温度对 CP-BR 效率的影响

表 2 不同停留时间下螺旋给料机的转速

Table 2 The rotational speed of the screw-driven feeder at different residence times

参 数	烟气流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)				
	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4
τ/s	0.81	0.72	0.65	0.59	0.54
$\gamma/(\text{g} \cdot \text{min}^{-1})$	0.839	0.942	1.047	1.153	1.264
$\beta/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	30	35	40	44	49

注:表中数据对应工况为 $T=1\ 273\ \text{K}$ $\alpha=27.90\%$ 。

从图 2 中可以看出,在低温段,NO 的脱除处于动力控制区,在 973 K 时有 18.31%,在 1 173 K 时,有 47.23%。继续升高温度,温度的限制作用逐步减弱,脱硝效率不断提高,在 1 273 K 时达到 75.07%,反应逐步进入到扩散控制区。在 1 323 ~ 1 423 K 的高温段,反应物之间的扩散混合成为限制脱硝进程的主要因素,而在初始反应物质成分保持较为一致的情况下,脱硝效率无明显变化,为 79.65% ~ 81.40%。同时,从图 2 中可以看出,在低于 1 273 K 的低温段,CP 比 LPG 显示出更好的脱硝特性;在高温段,LPG 的脱硝效率升高较快,在 1 373 和 1 423 K 时,分别比 CP 高 4.20% 和 4.86%,这可能是由于气体再燃脱硝的混合特性好,在扩散反应控制的高温段能表现出较好的反应特性。而 CP-BR 能取得的 80% 左右的脱硝效率,与其它研究者采用超细煤粉、生物质、天然气^[12-14]等作为再燃燃料时的 60% ~ 80% 的脱硝效率基本一致。

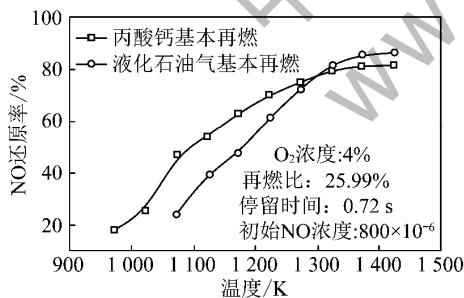


图 2 温度对 CP-BR 效率的影响

Fig. 2 Effect of temperature on CP-BR efficiency

2.1.2 O_2 浓度对 CP-BR 效率的影响

如图 3 所示,当 O_2 浓度从 2% 变化到 3% 时,CP-BR 脱硝效率基本没有变化,仅从 57.38% 降到 56.62%,而当 O_2 浓度提高到 4% 和 5% 时,反应区会产生过多的氧化性基团,NO 的还原进程遭到一定的破坏,部分中间产物 CH_i 、 NCO 向着被氧化而非还原 NO 的方向发展,脱硝效率受到影响,分别降低到 51.37% 和 49.36%,考虑到此时温度以及再燃比较低(根据图 2 结论),再燃在 O_2 浓度为 4% 和 5% 时所

取得的脱硝效率还在允许接受范围内。但若进一步将 O_2 浓度提高到 6%,再燃区的还原气氛则会遭受强烈的破坏,中间产物的还原进程受阻,特别是 CP 的热解产物 CH_i 等的氧化进程占据比例逐渐增大,脱硝效率相应的下降到 43.05%。因此,为保证 CP 再燃脱硝的顺利进行,烟气中的初始 O_2 浓度一般不应超过 5%。这与大多数研究者采用其它燃料再燃时的结论相符^[12-14]。

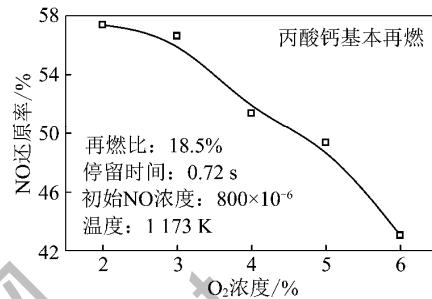
图 3 O_2 浓度对 CP-BR 效率的影响

Fig. 3 Effect of oxygen concentration on CP-BR efficiency

2.1.3 给料速度对 CP-BR 效率的影响

图 4 为给料速度对脱硝效率的影响,在保证温度为 1 273 K 和停留时间为 0.72 s 条件下,不同转速所对应的再燃比见表 1。当转速由 10 r/min ($\alpha = 12.49\%$) 提高到 20 r/min ($\alpha = 19.83\%$) 时,脱硝效率涨幅很大,由 36.34% 提高到 63.95%,说明再燃过程中 NO 的脱除需要有充足的 CH_i 、 H_2 以及 CO 等还原性基团的存在,而低转速时给料机不足以提供足够量的 CP,使其分解产生大量的活性根进行 NO 的脱除。当转速继续提高到 25 r/min ($\alpha = 22.01\%$) 和 30 r/min ($\alpha = 25.99\%$) 时,CP-BR 可以分别达到 68.43% 和 75.07% 的脱硝效率,而此后进一步的提高转速,增加 CP 的供给量,脱硝效率提高不明显,在 40 r/min ($\alpha = 30.70\%$) 和 50 r/min ($\alpha = 36.49\%$) 时,脱硝效率仅比 35 r/min ($\alpha = 27.80\%$) 时提高 0.35% 和 1.12%。过多再燃燃料的加入,不仅没有明显起到进一步提高脱硝效率的作用,在实际现场中,反而可能会影响燃烧的稳定性。在保证脱硝效率和再燃燃料添加量适中的前提下,根据本实验的研究结果,CP 的添加量应为 $\alpha = 25\%$ 左右。

2.1.4 停留时间对 CP-BR 效率的影响

反应物必须在再燃区有足够的停留时间,才能保证反应彻底的发生。如图 5 所示,0.54 s 的停留时间不能满足脱硝进程的充分反应,CP 再燃的效率只有 54.2%,当停留时间增加到 0.59 和 0.65 s 时,脱硝效率有明显的提升,分别达到 71.58% 和 78.27%。此后,进一步的增加停留时间,对于深化脱硝进程已无

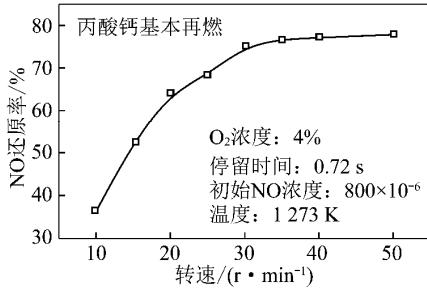


图 4 转速对 CP - BR 效率的影响

Fig. 4 Effect of β on CP - BR efficiency

明显作用,脱硝效率在停留时间为 0.72 和 0.81 s 的时候分别为 79.00% 和 80.02%,比 0.65 s 时提高 0.73% 和 1.75%。在实际炉膛中,当锅炉负荷一定时,为延长停留时间而增加再燃区的长度,势必缩短主燃区或燃烬区的长度,进而影响换热面的结构布置以及炉膛的燃烧效率。因此,在达到一定脱硝效率的前提下,再燃区的长度以满足 0.7 s 左右的停留时间进行布置^[14]。

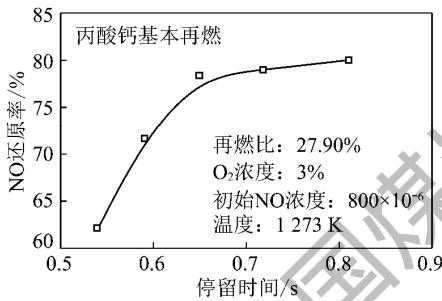


图 5 停留时间对 CP - BR 效率的影响

Fig. 5 Effect of residence time on CP - BR efficiency

2.2 烟气喷氨脱硝 (Thermal De - NO_x) 特性

2.2.1 温度对 Thermal De - NO_x 效率的影响

在氨氮摩尔比 $\varepsilon = 1.75$ 时,炉内喷氨脱硝效率随温度的变化呈倒“V”型,如图 6 所示,即存在“温度窗口”^[3, 5, 15]。在实验所设定的 0.72 s 的停留时间内,低温段受限于较低的反应速率,脱硝效率低,在 973 K 时仅为 15.88%。随着温度的升高,氨的氧化以及氨对 NO 还原的化学反应同时得到强化,但后者作用更强,因而脱硝进程得到明显的加强。当温度升高到 1 273 K 时,喷氨脱硝能取得在这一工况下的最高脱硝效率,为 85.34%,此后进一步提高温度,氨氧化的强度逐步超过氨对 NO 的还原,脱硝进程开始受到阻碍,脱硝效率有所降低,在 1 423 K 时降低到 65.21%。若以最高脱硝效率 90% 所对应的温度区间定义为“温度窗口”,则本实验条件下为 1 215 ~ 1 341 K。

2.2.2 ε 对 Thermal De - NO_x 效率的影响

理论上讲氨氮摩尔比 ε 在 1.00 ~ 1.50 之间就能

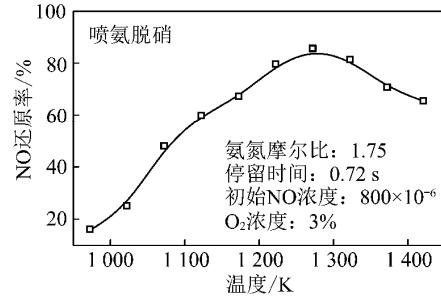


图 6 温度对 thermal De - NO_x 效率的影响

Fig. 6 Effect of temperature on thermal De - NO_x efficiency

满足 NO 的完全脱除^[3],但是在实际工况中,受到反应速率、氨的氧化以及反应物混合等因素的限制,氨剂的喷入量必须高于理论值才能取得较为满意的脱硝效果。如图 7 所示,在 $\varepsilon = 0.80$ 时,氨剂明显不能满足 NO 的脱除,脱硝效率只有 49.45%,当 ε 提高到 1.00 和 1.50 时,脱硝效率有了明显的升高,分别达到 55.17% 和 64.32%。为了强化脱硝进程,将 ε 设置为 1.75 和 2.00,脱硝效率可以分别达到 66.98% 和 69.48%。此后进一步提高 ε 值,脱硝效率的提高变得不明显,反而会增加氨剂的喷入量,降低 SNCR 的经济性。通常,结合脱硝效率和经济性方面的考虑, ε 值应设置为 1.75 ~ 2.00。

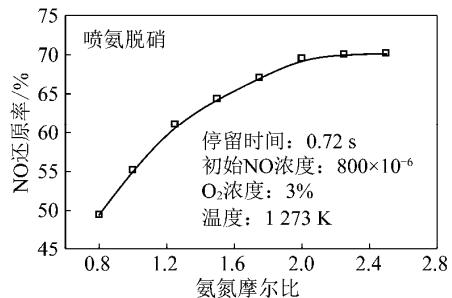


图 7 ε 对 thermal De - NO_x 效率的影响

Fig. 7 Effect of ε on thermal De - NO_x efficiency

2.3 丙酸钙先进再燃 (CP - AR) 脱硝特性

2.3.1 温度对 CP - AR 效率的影响

图 8 为 CP - AR 脱硝效率随温度的变化规律,由于同时有 CP 和 NH₃ 作用于 NO,因而其脱硝效率表现出了两者的协同特性。在 1 273 K 时,尽管再燃比只有 $\alpha = 19.83%$,CP - AR 的最高脱硝效率却能达到 93.37%,比 CP - BR 在 1 273 K、 $\alpha = 24.77%$ 时高出 18.3%,也比 CP - BR 在 1 423 K 时的最高脱硝效率高 11.97%。同时,CP - AR 的氨气喷入量为 $\varepsilon = 0.80$,但是其同样比 Thermal De - NO_x 在 1 273 K、 $\varepsilon = 1.75$ 时所能取得的最高效率值高 8.03%,另一方面,其能够在更宽的温度区间内保持高的脱硝效率,在 1 173 K 和 1 373 K 时,效率值分别为 81.60% 和

85.19% ,温度窗口得到拓宽,为 1 195 ~ 1 355 K,是单独喷氨时的 1.27 倍。在先进再燃过程中,在喷入较少 CP 和 NH_3 的情况下,就能取得相对于单独喷入大量的 CP 或 NH_3 时更高的脱硝效率,污染物的脱除更彻底,同时大大提高了反应物的有效利用率,而且反应进程得到优化,高效的反应温度窗口向低温和高温两个方向得到拓宽,在变工况条件下,其适应性得到加强。

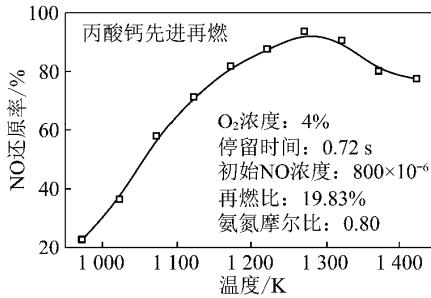


图 8 温度对 CP-AR 效率的影响

Fig. 8 Effect of temperature on CP-AR efficiency

2.3.2 ε 对 CP-AR 效率的影响

在再燃比 $\alpha = 18.93\%$ 的前提下,氨氮摩尔比 ε 对 CP-AR 脱硝效率的影响如图 9 所示。对比图 9 可以明显看出,由于存在 CP-BR 的影响作用,在较低的 ε 值时,CP-AR 就能取得高的脱硝效率。当 $\varepsilon = 0.40$ 时,效率值为 72.91%,从图 4 可以得出,此时单独的 CP-BR 效率值为 63.95%,即由于氨量小,其作用仅是对 CP-BR 在较小程度上的强化。当 ε 值提高到 0.60 和 0.80 时,CP-AR 的脱硝效率达到 80.45% 和 93.37%,分别比对应的 CP-BR 效率值提高 16.50% 和 29.42%,氨气对 CP-BR 的作用得到强化。此后继续提高 ε 值,CP-AR 脱硝效率增加不明显,从 $\varepsilon = 1.00$ 提高到 $\varepsilon = 1.75$,效率值仅从 94.39% 增长到 95.57%。相对于只有喷氨的 Thermal De- NO_x 在 $\varepsilon = 1.75$ 时才能取得较高的脱硝效率,CP-AR 在 $\varepsilon = 0.80$ 附近时就表现出了高的、较为稳定的脱硝效率, NH_3 的喷入量大大减少。

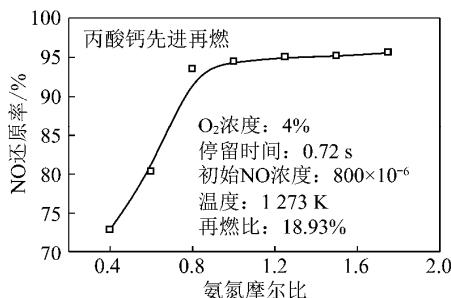


图 9 ε 对 CP-AR 效率的影响

Fig. 9 Effect of ε on CP-AR efficiency

2.3.3 O_2 浓度对 CP-AR 效率的影响

O_2 浓度变化对脱硝效率的影响如图 10 所示。在 2% ~ 6% 的变化范围内,CP-AR 都取得了较高的脱硝效率,特别是 O_2 浓度在 2% ~ 4% 区间时,其效率值为 93.37% ~ 94.42%,而当 O_2 浓度增加到 5% 和 6% 时,脱硝效率略有降低,分别为 91.15% 和 88.07%。与图 3 的 CP-BR 相比,CP-AR 不仅取得了更高的脱硝效率,而且在 O_2 浓度变化较大的范围内,脱硝效率没有较大幅度的降低。使得先进再燃技术应用到现场时,能够在锅炉负荷发生变化或者炉膛较大的区间内,保持好的 NO 脱除效果。

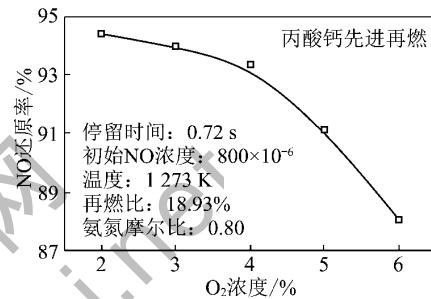


图 10 O_2 浓度对 CP-AR 效率的影响

Fig. 10 Effect of oxygen concentration on CP-AR efficiency

3 结 论

(1) CP 可以取得与 LPG 相当的 BR 脱硝效率。CP-BR 的脱硝效率在 973 ~ 1 323 K 内与温度同步升高,在再燃比为 24.77% 和 O_2 浓度为 4% 时,其最大值可达到 79.65%,此后进一步升高温度,在 1 423 K 的温度范围内,效率提高不明显,最多仅提高 1.75%。为保持 CP-BR 较高的脱硝效率,烟气中初始氧浓度不宜超过 5%,再燃比和再燃区的停留时间应维持在 25% 以及 0.7 s 左右。

(2) 烟气中单独喷氨时的 Thermal De- NO_x 在 1 273 K 可以取得最高的脱硝效率为 85.34%,但是喷氨量大, ε 需要达到 1.75 左右,同时脱硝进程受温度限制明显,温度窗口窄,为 1 215 ~ 1 341 K。

(3) 相对于单独的 CP-BR 和 Thermal De- NO_x ,CP-AR 的脱硝进程得到优化,可以在减少 CP 和 NH_3 喷入量的前提下取得更高的脱硝效率,在再燃比为 19.83% 以及氨氮摩尔比为 0.80 时,最高脱硝效率可达到 93.37%,同时“温度窗口”向高温和低温方向拓宽为 1 195 ~ 1 355 K,并且在 2% ~ 6% 的 O_2 浓度范围内,CP-AR 均能取得高的脱硝效率。

参考文献:

- [1] 韩奎华,刘志超,高攀,等. 生物质再燃脱硝特性的试验研究

- [J]. 煤炭学报 2008, 33(5): 570-574.
Han Kuihua, Liu Zhichao, Gao Pan, et al. Experimental study on characteristics of nitrogen oxide reduction by biomass reburning[J]. Journal of China Coal Society 2008, 33(5): 570-574.
- [2] 熊志波, 牛胜利, 高攀, 等. 煤粉混合杨木屑再燃脱硝特性的实验研究[J]. 煤炭学报 2010, 35(1): 131-134.
Xiong Zhibo, Niu Shengli, Gao Pan, et al. Experimental studies on NO reduction by coal co-with poplar reburning[J]. Journal of China Coal Society 2010, 35(1): 131-134.
- [3] Javed M T, Irfan N, Gibbs B M. Control of combustion-generated nitrogen oxides by selective non-catalytic reduction[J]. Journal of Environmental Management 2007, 83(3): 251-289.
- [4] 吕洪坤, 杨卫娟, 周俊虎, 等. 燃煤轻质挥发分对选择性非催化还原反应的影响[J]. 煤炭学报 2010, 35(4): 661-665.
Lü Hongkun, Yang Weijuan, Zhou Junhu, et al. Effects of light coal volatiles on selective non-catalytic reduction reactions[J]. Journal of China Coal Society 2010, 35(4): 661-665.
- [5] Niu Shengli, Han Kuihua, Lu Chunmei. Experimental study on the effect of urea and additive injection for controlling nitrogen oxide emissions[J]. Environmental Engineering Science 2010, 27(1): 47-53.
- [6] Maly P M, Zamansky V M, Ho L, et al. Alternative fuel reburning[J]. Fuel 78(3): 327-334.
- [7] 高攀, 路春美, 韩奎华, 等. 天然气/液化气先进再燃脱硝特性研究[J]. 煤炭学报 2007, 32(11): 1191-1195.
Gao Pan, Lu Chunmei, Han Kuihua, et al. NO reduction performance of natural gas and petroleum gas advanced reburning[J]. Journal of China Coal Society 2007, 32(11): 1191-1195.
- [8] Patsias A A, Nimmo W, Gibbs B M, et al. Calcium-based sorbents for simultaneous NO_x/SO_x reduction in a down-fired furnace[J]. Fuel, 2005, 84(14-15): 1864-1873.
- [9] Nimmo W, Patsias A A, Hampartsoumian E, et al. Calcium magnesium acetate and urea advanced reburning for NO control with simultaneous SO₂ reduction[J]. Fuel 2004, 83(9): 1143-1150.
- [10] 肖海平. 有机钙同时脱硫脱硝的机理研究[D]. 杭州: 浙江大学 2006.
Xiao Haiping. Mechanism study of simultaneously control of SO₂ and NO_x emissions with organic calcium[D]. Hangzhou: Zhejiang University 2006.
- [11] Niu Shengli, Han Kuihua, Lu Chunmei, et al. Thermogravimetric analysis of the relationship among calcium magnesium acetate, calcium acetate and magnesium acetate[J]. Applied Energy 2010, 87(7): 2237-2242.
- [12] Dagaut P, Lecomte F. Experiments and kinetic modeling study of NO-reburning by gases from biomass pyrolysis in a JSR[J]. Energy and Fuels 2003, 17(3): 608-613.
- [13] Muzio L J, Quartucy G C. Implementing NO_x control: research to application[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1997, 23(3): 233-266.
- [14] Luan Jiyi, Sun Rui, Wu Shaohua, et al. Experimental studies on reburning of biomasses for reducing NO_x in a drop tube furnace[J]. Energy and Fuels 2009, 23(3): 1412-1421.
- [15] Bae S W, Roh S R, Kim S D. NO removal by reducing agents and additives in the selective non-catalytic reduction (SNCR) process[J]. Chemosphere 2006, 65(1): 170-175.