

煤焦再燃过程中催化剂对 NO 还原的影响

钟北京, 施卫伟, 傅维标

(清华大学 工程力学系, 北京 100084)

摘 要:以小龙潭褐煤、富拉尔基褐煤和大同烟煤等制成的三种煤焦为再燃燃料,研究了它们在再燃区内对 NO 的还原过程,分析了煤灰中金属氧化物对 NO 还原的影响。为了研究碱金属氧化物对 NO 还原的催化作用,本文特别研究了烟煤焦经过浸泡催化剂处理后对 NO 的再燃过程及对 NO 还原率的影响。实验是在 NO 初始浓度为 $1\ 000 \times 10^{-6}$,反应温度分别为 $900\ ^\circ\text{C}$ 和 $1\ 100\ ^\circ\text{C}$ 条件下完成的。实验结果表明,煤灰中金属氧化物在再燃区中对 NO 还原有很强的催化作用,原来对 NO 还原效果很差的烟煤焦,添加廉价催化剂后对 NO 的异相还原有很大的影响,在合适的反应温度和化学当量比(SR)条件下,煤焦中的催化剂能降低 NO 还原反应的活化能,加快 NO 还原反应进行的速度,从而提高 NO 的还原率。

关 键 词:再燃; 煤焦; NO 催化还原

中图分类号: TK223. 21; O643. 21 文献标识码: A

1 前言

降低 NO_x 排放的方法有许多,其中选择性催化还原(SCR)烟气中的 NO_x 是一种高效的烟气脱氮技术。许多研究者对这种方法进行了大量的研究,并在大量的锅炉机组上得到成功的应用。然而,这种方法以贵重金属作为催化剂,且寿命短,因而成本高,难以在经济不发达的国家推广应用。Burch 等人和 Chen 等人在小型流动反应器中以煤粉作为再燃燃料研究了 NO 再燃过程^[1~3]。他们的研究表明, Mississippi 褐煤和 North Dakota 褐煤及其煤焦是有效的再燃燃料。当使用 Mississippi 褐煤和 North Dakota 褐煤作为再燃燃料时异相机理对 NO 还原的贡献在很宽的化学当量比范围内大于均相机理。当 SR 大于 0.75 时用 Pittsburgh 8 号烟煤再燃过程中 NO 与焦碳的异相反应完全可以忽略,说明烟煤是一种非常弱的再燃燃料。但经过 CaO 浸泡后 Pittsburgh 8 号烟煤焦对 NO 的还原能力显著增强。因而,他们推断,煤灰中的 CaO 对 NO 还原具有催化作

用,也可能是褐煤再燃 NO 的重要贡献者。Hansen 等人在流化床燃烧工况下研究表明, CaO 和 CaS 是 NO 和 N_2O 还原的有效催化剂,而 CaSO_4 和 CaCO_3 是弱的催化剂^[4]。Jensen 等人在实验室的固定床石英反应器中研究了 HCN 在 7 种不同的石灰石表面上的异相反应,结果表明,在添加石灰石的煅烧炉和流化床燃烧器或燃烧含高活性的煤时 HCN 的异相氧化是重要的。有 O_2 时,煅烧后的石灰石可促进 HCN 向 NO 的氧化,无 O_2 时有利于 NO 向 N_2 的还原^[5]。我们也曾经报导了在不同燃烧工况和不同 NO 初始浓度下用我国小龙潭褐煤、富拉尔基褐煤和大同烟煤及其煤焦做再燃燃料的 NO 再燃实验结果^[6]。实验结果再一次表明,褐煤及其焦在燃烧过程中对 NO 具有很强的还原能力,而烟煤对 NO 的还原能力却很弱。在我们使用的 NO 还原能力强的两种褐煤中,小龙潭褐煤灰的 CaO 含量高达 29.21%,而富拉尔基褐煤灰的 CaO 含量仅为 1.39%。这说明不仅 CaO 对 NO 有催化作用,其它金属氧化物可能对 NO 还原也有催化作用。Garcia-Garcia 等人对含钾活性炭和由烟煤做成的煤球还原 NO 的研究结果表明, KOH 对 NO 还原同样具有催化作用^[7]。Ohtsuka 等人研究了煤在固定床的温控热解过程中碱金属和碱土金属对 N 释放的影响^[8]。他们的结果表明,温度超过 1 000 时煤中 N 向 HCN, NH_3 和 N_2 的总转变强烈地取决于氢氧化物的种类,其增大的次序形式为 $\text{NaOH} < \text{无} < \text{KOH} < \text{Ca}(\text{OH})_2$ 。Yamashita 等人指出^[9], C-NO 反应无论是有氧还是无氧的情况下都会被煤焦的金属所催化,碳燃烧时 NO_x 分解的活性比取决于金属催化剂的种类,对于 C+NO 反应催化活性的次序形式为 $\text{Cu} > \text{Ca} > \text{Ni} > \text{无}$ 。由此可见,煤中的碱金属或碱土金属氧化物可以对 C-NO 起催化作用,尤其在贫氧条件下 NO 还原率会明显增大, C- NO_x 反应活性会明显增强。

收稿日期: 2000-05-26; 修订日期: 2000-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59606011)

作者简介: 钟北京(1963-)男,江西瑞金人,清华大学副教授。

本文采用小龙潭、富拉尔基和大同三种煤焦作为再燃燃料,通过实验研究了金属氧化物对煤焦异相还原 NO 的催化作用,并比较了不同催化剂对烟煤焦还原 NO_x 的影响。这种催化还原 NO_x 的新方法与尾部烟道实现 NO_x 的催化还原(SCR)方法不同。

2 实验研究

2.1 再燃燃料

本文使用的再燃燃料为小龙潭褐煤焦、富拉尔基褐煤焦和大同烟煤焦,其对应的三种煤的元素分析数据如表 1 所示,相应的煤灰成分分析数据如表 2 所示。实验用煤焦按国家标准制备。为了研究催化剂对 NO 还原的催化作用,对大同烟煤焦进行了用不同催化剂的处理,即:取适量的已制备好的大同烟煤焦,分成 6 份,每份煤焦分别用不同浓度的 KOH(催化剂 1)和 NaOH(催化剂 2)的水溶液浸泡 24 小时后,在 140 °C 的烘箱中烘干,然后用 190 目标筛进行再次筛分,获得符合实验要求的添加催化剂后的大同烟煤焦。表 3 给出了经上述方法处理后加到大同烟煤焦中的催化剂的重量。

表 1 实验用煤焦对应煤的元素分析数据 (空干基, %)

| 煤 种 | 分析水 | 灰份 | 全硫 | 碳 | 氢 | 氮 | 氧 |
|--------|-------|-------|------|-------|------|------|-------|
| 小龙潭褐煤 | 18.50 | 10.02 | 1.84 | 48.88 | 2.55 | 1.41 | 16.80 |
| 富拉尔基褐煤 | 3.68 | 51.98 | 0.33 | 34.52 | 2.11 | 0.49 | 6.89 |
| 大同烟煤 | 3.07 | 14.94 | 0.56 | 67.51 | 3.69 | 0.81 | 9.42 |

表 2 三种煤灰成分分析数据 %

| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | TiO ₂ | SO ₃ | P ₂ O ₅ | K ₂ O | Na ₂ O |
|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------------------|-----------------|-------------------------------|------------------|-------------------|
| 小龙潭 | 18.94 | 10.7 | 9.24 | 29.21 | 2.47 | 0.63 | 23.3 | 0.16 | 0.52 | 0.05 |
| 富拉尔基 | 63.9 | 21.75 | 4.12 | 1.39 | 0.8 | 0.86 | 0.64 | 0.08 | 3.25 | 0.54 |
| 大同 | 61.50 | 18.52 | 7.31 | 2.60 | 0.66 | 0.78 | 1.63 | 0.22 | 2.05 | 0.42 |

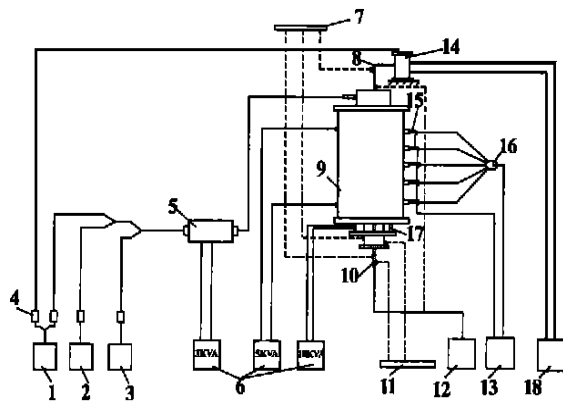
表 3 大同烟煤焦添加催化剂的重量

| 原煤焦重/g | 催化剂 | 加催化剂后的焦重/g | 催化剂的重量/g | 催化剂占总重的百分比/% |
|--------|-----|------------|----------|--------------|
| 1 | 1A | 53.404 | 1.667 | 3.1 |
| 2 | 1B | 55.397 | 3.286 | 5.9 |
| 3 | 1C | 59.856 | 10.663 | 17.8 |
| 4 | 2A | 34.228 | 1.378 | 4.0 |
| 5 | 2B | 44.288 | 3.262 | 7.4 |
| 6 | 2C | 59.929 | 9.964 | 16.6 |

2.2 实验装置和实验方法

实验系统装置见图 1,该系统包括:流动反应器及电加热系统、供粉系统、气路系统、冷却水循环系

统、温度测试及显示系统、烟气取样及分析系统等几部分。流动反应器是一根内径为 30 mm,长约 800 mm 的氧化铝管。反应器管固定在电加热炉膛内。炉膛外有一层保温棉,以防止热量的大量散失。炉膛可以把反应器加热到 1 100 °C 以上。供粉系统的主要部件是螺旋升降式供粉器,实验中的供粉率为 9.5 mg/s。炉膛温度由热电偶测量。在正式实验前,炉膛通过电加热系统进行加热,获得所要求的温度水平及温度分布,然后在炉体的顶部通入由 CO₂、NO_x 和空气(N₂+O₂)按一定比例构成的模拟烟气,近似形成再燃区的初始气体成分。工况稳定后送入一定量、符合实验要求的煤焦及经过催化剂溶液浸泡的煤焦作为再燃燃料用来还原再燃区中的 NO,最后用 KM900 烟气分析仪测定反应区出口排气中 NO 浓度的变化。实验中的反应温度保持为 900 °C 和 1 100 °C,气体在反应区段的停留时间约为 0.4 s,初始 NO 气体浓度为 1 000×10⁻⁶。更详细的实验方法见文献[10]。



1—氮气瓶;2—压缩空气;3—NO 气瓶;4—转子流量计;5—空气预热器;6—调压器;7—上冷却水管连箱;8—送粉管;9—沉降炉;10—取样管;11—下冷却水管连箱;12—燃烧分析仪;13—电位计;14—给粉器;15—热电偶;16—琴键开关;17—硅碳棒;18—直流电源

图 1 实验系统图

再燃区内的化学当量比依据再燃区内总氧量和作为再燃燃料的煤焦完全燃烧所需的理论氧量来计算。

3 实验结果

图 2 给出了反应温度为 1 100 °C,NO 初始浓度为 1 000 °C×10⁻⁶ 条件下,反应区出口测量到的 NO 浓度随再燃区化学当量比的变化曲线。由图可见,三种煤焦对 NO 的还原能力有明显的差别,小龙潭

煤焦最好, 富拉尔基煤焦次之, 大同烟煤焦最差。造成这种差异的一个重要原因是煤灰成分的不同。煤灰中的金属氧化物(尤其是碱金属和碱土金属)对 NO 的还原是重要的^[4~5]。由表 1 中我们可以看到, 小龙潭褐煤煤灰中有效催化剂的碱金属和碱土金属氧化物含量高达 32.25%, 而富拉尔基褐煤和大同烟煤煤灰中碱金属和碱土金属氧化物含量分别只有 5.98% 和 5.73%。

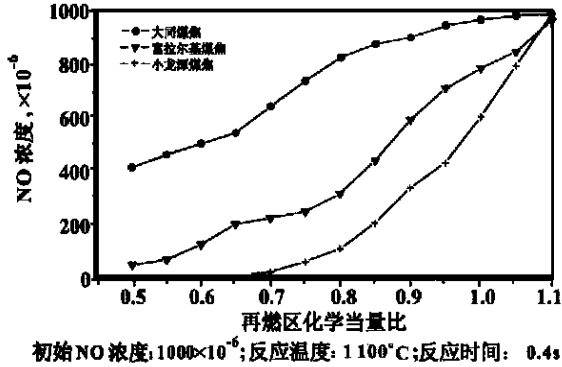


图 2 三种煤焦对 NO 还原的实验结果

另一个原因是煤焦的比表面积。表 2 表明, 尽管富拉尔基褐煤和大同烟煤煤灰中金属氧化物含量相差无几, 但它们对 NO 的还原能力却存在显著的差异, 这主要是由它们的煤焦比表面积的不同引起的。煤焦比表面积越大, 其反应速度越大。本实验中对所使用的三种煤焦采用 BET 动态吸附法测量了比表面积, 其测量结果如表 4 所示。

表 4 实验用煤焦的比表面积

| 煤焦种类 | 小龙潭 褐煤焦 | 富拉尔基 褐煤焦 | 大同烟煤焦 |
|--|------------|-------------|-------|
| 比表面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ | 69.68 | 52.45 | 22.68 |

由表 4 可知, 富拉尔基煤焦的比表面积是大同烟煤焦比表面积的 2.3 倍, 因而它对 NO 的还原能力要比烟煤焦强得多。

经过催化剂处理的大同烟煤焦的实验更能说明金属氧化物对 NO 还原的催化作用。图 3 为用两种催化剂处理后的大同烟煤焦在 NO 初始浓度为 1000×10^{-6} 和反应温度为 1000°C 条件下的实验结果。由图 3 可以看出, 在所有的实验工况下, 大同烟煤焦添加催化剂后, 对 NO 的还原能力有了显著的提高。表 3 表明, 实验所用的 6 组大同烟煤焦加入的催化剂含量有很大的差别, 但它们对 NO 还原规律相同, 而且对于我们实验所使用的两种催化剂, 虽

然用不同的浓度浸泡烟煤焦, 但对 NO 的还原能力没有实质性的不同。这可能是在我们的所有试样中, 催化剂的含量都偏大所造成的。以后需要进一步实验, 以确定最佳的催化剂添加量。

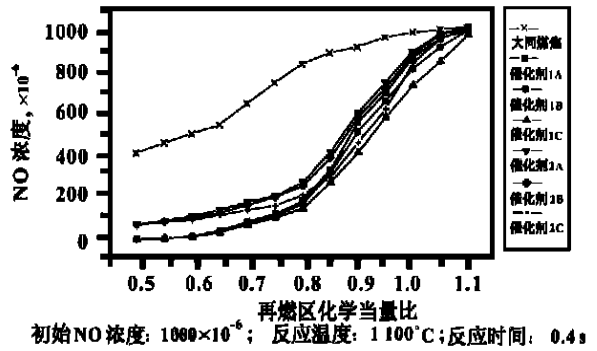


图 3 催化剂对大同烟煤焦还原 NO 的影响

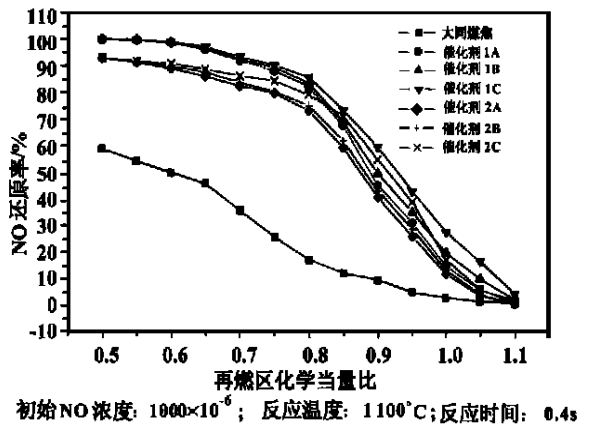


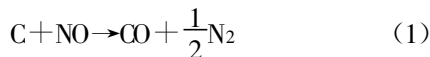
图 4 催化剂对 NO 还原率的影响

图 4 给出了 NO 初始浓度为 1000×10^{-6} 、反应温度为 1000°C 的条件下作为再燃燃料的添加催化剂的大同烟煤焦和化学当量比对 NO 还原率的影响。由图 4 可见, 虽然添加催化剂的大同烟煤焦使 NO 还原率大大增加, 但两种催化剂的效果却几乎是一样的。如当反应区化学当量比 SR 为 0.9 时, 原始大同烟煤焦还原 NO 的效率为 9.5%, 而添加催化剂 1A、1B 和 1C 后, NO 还原率分别提高到 45.1%、49.5% 和 59.5%, 添加催化剂 2A、2B 和 2C 后, NO 还原率也分别提高到 40.6%、42.95% 和 54.7%。由此可见, 烟煤焦添加不同浓度状态的催化剂 1 和 2 后, 确实大大提高了煤焦对 NO 的还原能力。此外, 当化学当量比 SR 小于 1 时, 随着 SR 的减小, NO 的催化还原率明显提高。当 SR 小于或等于 0.8 时, 各种催化剂对 NO 还原的催化作用变得更明显。在其它初始 NO 浓度和反应温度为 900°C 工况下得到了

相同的实验规律, 这里不再重复。

4 分析与讨论

在煤焦再燃中, NO 的还原主要发生在焦碳表面和内孔, 主要反应为:



方程(1)的反应速度可表示为^[11~13]:

$$V = k \cdot S \cdot p_{NO} \quad (2)$$

式中: S —焦炭的比表面积; p_{NO} —反应表面上NO的分压; k —还原反应速率常数。 k 可按 Arrhenius 公式表示如下:

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (3)$$

式中: k_0 —指前因子; E —活化能; R —气体常数。

催化剂对 NO 还原的作用主要表现为降低 C + NO 反应的活化能。由于实验上的困难, 我们只估算了活化能的相对变化, 而没有直接测量反应(1)在使用催化剂前后活化能的绝对值大小。幸好在我们的实验中, NO 还原反应的时间很短, 因此在我们以下的讨论中取平均反应速度 V 来估算加入催化剂后 NO 还原反应活化能的变化, 从而说明添加催化剂后的烟煤焦可以大大提高 NO 的还原率。根据方程(2), 把化学反应速度转化为如下对数形式:

$$\ln V = \ln k_0 + Q - \frac{E}{RT} \quad (4)$$

其中:

$$Q = \ln(p_{NO}) + \ln S \quad (5)$$

式(5)中 p_{NO} 取对应于初始 NO 浓度的分压。根据方程(4)可以计算出 E , 但由于我们的实验数据不足, 我们只能用近似方法估算 E 的变化。当反应区内化学当量比分别为 $SR = 0.6, 0.7, 0.8$ 和 0.9 时, 整理实验数据后, 得到大同烟煤焦加不同催化剂后的活化能 E 与不加催化剂前原来的活化能 E_0 的比值(表5)。从表5的数据可以得出, 大同烟煤焦添加催化剂1和催化剂2后, 与 NO 反应的活化能大大降低。从而加快 NO 还原反应的速度, 提高 NO 的还原率。

表5 大同烟煤焦加催化剂后反应活化能的变化

| 催化剂 | 1 A | 1 B | 1 C | 2 A | 2 B | 2 C |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $SR = 0.6$ | 0.191 | 0.125 | 0.087 | 0.218 | 0.186 | 0.125 |
| $SR = 0.7$ | 0.229 | 0.217 | 0.123 | 0.326 | 0.284 | 0.187 |
| $SR = 0.8$ | 0.252 | 0.191 | 0.109 | 0.326 | 0.251 | 0.168 |
| $SR = 0.9$ | 0.288 | 0.252 | 0.195 | 0.329 | 0.320 | 0.265 |
| 平均 | 0.240 | 0.196 | 0.129 | 0.299 | 0.260 | 0.186 |

5 结论

使用三种中国煤焦和加催化剂的大同烟煤焦还原 NO 的研究可以得到如下结论:

(1) 由于煤灰中可以催化 NO 还原的金属氧化物含量不同, 小龙潭煤焦、富拉尔基煤焦和大同煤焦还原 NO 的能力有明显的差异, 金属氧化物含量高的小龙潭煤焦还原 NO 的能力最强。

(2) 添加催化剂后的大同烟煤焦对 NO 的还原能力显著增大, 主要是由于催化剂能够大大降低焦碳和 NO 还原反应的活化能, 加快其还原反应的速度, 从而提高 NO_x 的还原率。

(3) 化学当量比 SR 也是影响再燃燃料 NO_x 还原率的重要因素。NO 的还原率随 SR 的减小而明显增大, 尤其在 SR 从 $0.7 \sim 1.0$ 的范围内 SR 对 NO 还原率的影响更敏感。

(4) 反应温度对 NO 还原有影响, 但在本实验的反应温度范围($900 \text{ }^\circ\text{C} \sim 1100 \text{ }^\circ\text{C}$)内, 实验结果表明温度对 NO 还原规律和还原率的影响不大明显, 原因可能是温度范围太窄。

参考文献:

- [1] BURCH T E, TILLMAN F R, CHEN W Y, *et al.* Partitioning of nitrogenous species in the fuel-rich stage of reburning[J]. **Energy & Fuel** 1991, 5(2): 231-237.
- [2] BURCH T E, CHEN W Y, LESTER T W, *et al.* Interaction of fuel nitrogen with nitric oxide during reburning with coal[J]. **Combustion and Flame** 1994, 98(3): 391-401.
- [3] CHEN W Y, MA LONG. Effect of heterogeneous mechanisms during reburning of nitrogen oxide[J]. **AIChE Journal** 1996, 42(7): 1968-1975.
- [4] HANSEN P F B, DAM-JOHANSEN K, JOHANSSON J E, *et al.* Catalytic reduction of NO and N_2O on limestone during sulfur capture under fluidized bed combustion conditions[J]. **Chemical Engineering** 1992, 47(9-11): 2419-2424.
- [5] JENSEN A, JOHANSSON J E, DAM-JOHANSEN K. Catalytic and gas-solid reactions involving HCN over limestone[J]. **AIChE Journal** 1997, 43(11): 3070-3084.
- [6] 钟北京, 施卫伟, 傅维标. 煤和煤焦还原 NO_x 的实验研究[J]. **工程热物理学报**, 2000, 21(3): 383-387.
- [7] GARCIA-GARCIA A, IIIAN-GOMEZ M J. Potassium-containing briquetted coal for the reduction of NO[J]. **Fuel** 1997, 76(6): 499-505.
- [8] OHISUKA YASUO, WU ZHIHENG, FURIMSKY EDWARD. Effect of alkali and alkaline earth metals on nitrogen release during temperature programmed pyrolysis of coal[J]. **Fuel** 1997, 76(14/15): 1361-1367.

(下转第 274 页)

器吸热量比燃用烟煤减少约 40%，比燃用无烟煤减少约 60%。这样，空预器完全可以单级布置在较低的烟温区域。

高炉煤气容积流量大，是送入锅炉空气量的 1.5 倍，热容量也较高。若煤气预热器布置在锅炉尾部可以有效降低排烟温度，明显提高炉膛理论燃烧温度。计算表明，高炉煤气温度每提高 10℃，理论燃烧温度可提高 5℃~6℃左右。高炉煤气预热器的布置要考虑高炉煤气的毒性和易燃性，要求其在与热烟气的热交换中不发生任何泄漏，这对于管式预热器很难做到。大型分离式热管换热器可以实现换热过程所要求的完全严密而不泄漏。该换热装置适合回收低品位能源，通常布置在烟气流程的尾部。高炉煤气的预热温度以 200℃左右为宜。

4 运行

首台 50 MW 全燃高炉煤气高压锅炉在首钢成功运行的经验显示，该锅炉采用双旋流平面火焰燃烧器、缩腰式炉膛、合理的经济器布置以及应用高炉煤气预热器等措施后，具有保证锅炉参数条件下处理高炉煤气的能力。由于高炉生产工艺的变化，高炉煤气的热值及流量也不断变化。在运行期间，高炉煤气热值的变化范围从 3 300 kJ/m³ 到 2 424 kJ/m³，流量最高时达 21.4 万 m³/h，最低时约为 5 万 m³/h，是设计处理量的 110%~25%，均能保证锅炉的正常运行，说明该锅炉具有燃烧超低热值煤气和较强的变负荷运行能力，这一特点对于采用不同冶炼工艺的高炉解决高炉煤气放散尤其重要。近两年的运行实践表明所研制的高压锅炉彻底解决了首钢的高炉煤气放散污染问题，同时达到了污染物资源化处理的目的，在冶金工业中有着广阔的应用前景。

5 结论

(1) 高炉煤气是一种超低热值燃料，辐射换热能力很弱。用于 50 MW 高压锅炉，炉膛辐射吸热量比燃煤锅炉减少 39.3%，受热面积增加 15.9%。炉膛采用缩腰布置和双旋流平面火焰燃烧器能够起到稳定着火燃烧的良好作用。

(2) 对于 50 MW 燃用高炉煤气的高压锅炉，其过热器的主要传热方式为对流换热，汽温特性趋近于纯对流式过热器。过热器中烟气的容积流量比燃煤时增大 51.1%，受热面积相应减少 36%。

(3) 高炉煤气高压锅炉经济器的吸热量比燃煤锅炉增加 2.6 倍，受热面积增加 1 倍。因此，高沸腾度经济器是高炉煤气高压锅炉的重要特点。高炉煤气和空气同时预热可以降低排烟温度，提高炉膛温度水平，促进稳定燃烧和强化辐射换热。

(4) 研制的首台 50 MW 全燃高炉煤气高压锅炉运行实践表明，该锅炉具有燃烧超低热值煤气和很宽的负荷调节能力，能够解决冶金企业高炉煤气排放污染问题，有着广阔的应用前景。

注：文中 m³ 为标准立方米

参考文献：

- [1] 沈月芬, 曹子栋, 庄正宁, 等. 英国 B&W 公司燃煤锅炉掺烧高炉煤气对热工参数的影响[J]. 中国电力, 1997, 30(4): 59-61.
- [2] 北京锅炉厂译. 锅炉热力计算标准方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 1975.
- [3] 尹世安. 动力燃料分析[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [4] 陈立勋, 曹子栋. 锅炉本体布置及计算[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990.

(渠源 编辑)

(上接第 262 页)

- [9] YAMASHITA HIROMI, HAMADA HAJIME, TOMITA AKIRA. Reaction of nitric oxide with metal loaded carbon in the presence of oxygen [J]. *Applied Catalysis* 1991, 78(1): L1-L6.
- [10] 施卫伟. 煤和煤焦还原 NO_x 的实验研究[D]. 北京: 清华大学工程力学系, 1999.
- [11] SONG Y H, BEER J M, SAROFIM A F. Reduction of nitric oxide by

coal char at temperatures of 1 250~1 750 K[J]. *Combustion Science and Technology*, 1981, 25(2): 237-240.

- [12] CHAN L K, SAROFIM A F, BEER J M. Kinetics of the NO-Carbon reaction at fluidized bed combustor conditions[J]. *Combustion and Flame* 1983 52(1): 37-45.

(渠源 编辑)

avoidance of abrupt rise in wall temperature, thus contributing to a relatively high operation safety. **Key words:** segregation type heat pipe, small-diameter spiral tube, average heat exchange factor, critical heat flux density

石灰浆液雾化喷嘴及其特性研究= **The Study of a Lime Slurry Atomization Nozzle and Its Characteristics** [刊, 汉] / WANG Nai-hua, GAO Xiang, LUO Zhong-yang, et al (Thermal Energy Engineering Research Institute under the Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang Province, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 247 ~ 249, 254

An experimental study was conducted of the atomization characteristics of a Y-shaped twin-fluid nozzle used for lime slurry atomization. An analysis was performed of the various factors liable to influence the atomization angle and the distribution of Sauter mean diameter (SMD) of the atomized spray drop. An empiric formula for predicting spray-drop average diameter has also been obtained. The results of the study indicate that the nozzle under investigation features low power consumption and high atomization effectiveness, making it especially suitable for flue gas desulfurization based on a semi-dry method. **Key words:** nozzle, atomization characteristics

可调式煤粉分配器冷态模化试验及理论分析= **Cold Modeling Test and Theoretical Analysis of an Adjustable Pulverized-coal Distribution Device** [刊, 汉] / ZHOU Yun-long, GAO Shui-qiang (Power Engineering Department, Northeast Electric Power Institute, Jilin, Jilin Province, China, Post Code: 132012), SHI Hong-qi (Jilin Research Institute of Electric Power Science, Changchun, Jilin Province, China, Post Code: 130024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 250 ~ 254

Proposed in this paper is a new type of adjustable pulverized-coal distribution device. Based on a theoretical analysis of the pulverized-coal distribution device the authors have conducted an in-depth experimental investigation. The investigation results have confirmed the feasibility of this new type of pulverized-coal distribution device, which regulates the combustion process of a boiler through a blade angle change of the distribution device. **Key words:** pulverized coal distribution device, experimental study

电站锅炉燃气脉冲除灰过程研究= **A Study of Gas Pulsation-based Ash Removal Process in Utility Boilers** [刊, 汉] / FAN Wei-jun, SUN Wen-chao, WU Cheng-kang (Beijing Astronautics and Aeronautics University, Beijing, China, Post Code: 100083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 255 ~ 258, 277

The burning of huge amount of inferior-quality unwashed coals in Chinese utility boilers has led to serious boiler ash-deposit and related fouling problems. The latter can result in a reduction of boiler thermal efficiency and cause the clogging of the boiler rear flue pass, thus affecting the normal operation of the boiler. The gas pulsation-based ash removal technology was developed by the combustion lab of a Mechanics Research Institute under the Chinese Academy of Sciences. Its use on 30-plus large-sized utility boilers has proved to be very effective. In the present paper the study results of the above-cited technology are reported. They cover a variety of aspects. These include the influence of furnace configuration and fuel on the flame propagation and pressure pulses, the measurement by the use of pressure sensors of the gas pulse pressure distribution at the outlet flow field, and the observation of gas pulse intensity and its action range. In addition, also touched upon were the vibration measurement of ash deposit plate with the help of a vibration sensor and the variation of vibration accelerations at various spatial locations. From the above one can readily gain a better understanding of the mechanism of the gas pulsation-based ash removal action. **Key words:** gas pulsation, explosive burning, soot blower

煤焦再燃过程中催化剂对 NO 还原的影响= **The Effect of Catalysts on NO Reduction during the Reburning of Coal Chars** [刊, 汉] / ZHONG Bei-jing, SHI Wei-wei, FU Wei-biao (Engineering Mechanics Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 259 ~ 262, 274

With three kinds of coal char made from Xianglongtan lignite, Fulaerki lignite and Datong bituminous coal serving as re-burning coals a study was conducted of the effect of these coal chars on the process of NO reduction in the reburning zone. Also analyzed was the effect of metallic oxides in the coal ash on the NO reduction. To study the catalytic action of

alkali metallic oxides on the NO reduction, the authors have specially investigated the effect of bituminous coal char after its being subjected to an impregnated catalyst treatment on the NO reburning process and NO reduction rate. The test was completed at an initial concentration of NO at $1\ 000 \times 10^{-6}$ and under reaction temperatures of $900\ ^\circ\text{C}$ and $1\ 100\ ^\circ\text{C}$ respectively. The test results indicate that the metallic oxides in the coal ash have a very strong catalytic action on NO in the reburning zone. The bituminous coal char originally believed to have a very poor effect on NO reduction can exercise a great influence on heterogeneous reduction of NO after a cheap catalyst being added to the above-mentioned coal char. Under the condition of an appropriate reaction temperature and stoichiometric ratio (SR) the catalyst in the coal char can reduce the activation energy of NO reduction reaction and expedite the speed of that reaction, thus quickening the NO reduction speed. **Key words:** reburning, coal char, NO catalytic reduction

中储式热风送粉 W 型火焰锅炉炉内空气动力场实验研究 = **Experimental Study of Aerodynamic Characteristics in a W-shaped Flame Boiler Equipped with a Bin and Feeder System and Fed Tertiary Hot Air in the Boiler Furnace** [刊, 汉] / YAN Xiao, XU Wei-jiang, SUN Xin-guo, HUI Shi-en, XU Tong-mo (Energy & Power Engineering Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 263 ~ 266, 281

With regard to a W-shaped flame boiler imported from US Foster Wheeler Co. and fitted with dual-swirl separation type pulverized coal burners a cold model was set up based on an analog simulation. With the help of an hot-wire anemometer and by the use of a trace method measurements of in-furnace aerodynamic field were taken under different operating conditions. As a result, obtained under various operating conditions were the vector diagrams of in-furnace flow field, length of flame, curves of in-furnace main gas-flow distribution along the furnace depth direction and curves of variation of main gas-flow filling-fullness degree. On the basis of the experimental results an analysis was conducted of the in-furnace aerodynamic characteristics. The results of an experimental study indicate that the tertiary air fed into the furnace at high velocity along a horizontal direction has a significant effect on the in-furnace aerodynamic characteristics. **Key words:** W-shaped flame boiler, cold model experiment, aerodynamic field, dynamic flow rate

近临界及超临界压力区垂直光管和内螺纹管传热特性的试验研究 = **Experimental Investigation of Heat Transfer Characteristics of Vertical Smooth Tubes and Internally Ribbed Ones in Near-critical and Supercritical Pressure Zones** [刊, 汉] / HU Zhi-hong, CHEN Ting-kuan, SUN Dan (National Key Lab of Multi-phase Flows under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 267 ~ 270

Presented in this paper are the test results of the heat transfer characteristics of vertical smooth tubes and internally ribbed ones in near-critical and supercritical pressure zones. In the near-critical pressure zone the heat transfer characteristics of the smooth tubes will deteriorate when the pressure increases to approach the critical pressure. The critical dryness of heat transfer deterioration will experience a drastic reduction. In extreme cases there emerges a dramatic rise in wall temperature even in a sub-cooled zone. As for an internally ribbed tube, its heat transfer deterioration in the near-critical pressure zone can be eliminated. However, with the pressure approaching a critical one the capacity of the internally ribbed tube to suppress heat transfer deterioration will decrease. The minimum heat transfer factor of the smooth tube and internally ribbed tube after a heat transfer deterioration will occur respectively at a pressure of 21.0 MPa and 22.0 MPa. After surpassing the critical pressure the smooth tube and the internally ribbed one will have their respective heat transfer characteristics improved. In a high enthalpy zone the internally ribbed tube can experience a reduction in wall temperature. **Key words:** internally ribbed tube, heat transfer deterioration, near-critical pressure, supercritical pressure, supercritical pressure boiler

50 MW 高压锅炉全燃高炉煤气的研究 = **A Study of Blast Furnace Gas-fired 50 MW High-pressure Boiler** [刊, 汉] / ZHUANG Zheng-ning, CAO Zi-dong, TANG Gui-hua, SHEN Yue-fen (Thermal Energy Engineering Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power.