

# 气态氨作还原剂的 SNCR 脱硝工艺的试验研究与模拟

梁秀进, 仲兆平, 金保升, 王双群

(东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

**摘 要:** 在自行研制的试验台上对氨气作还原剂的 SNCR 脱硝工艺进行了实验研究, 并利用化学反应动力学软件 Chemkin 4.1 进行了模拟。通过试验发现, 采用自制改进型槽缝式 TB 系列喷嘴内部喷入的方式明显优于侧喷, 提高了  $\text{NO}_x$  的去除率。以  $\text{NO}_x$  去除率高于 50% 为标准, 试验所得温度窗口为 863~937 °C。随着氨氮比的增大,  $\text{NO}_x$  的去除率和氨的泄漏量增大, 当氨氮比大于 1.0 后,  $\text{NO}_x$  去除率的随氨氮比增大的幅度减小, 而氨的泄漏量增大幅度增大。利用 Chemkin 4.1 的模拟所得的温度窗口和  $\text{NO}_x$  去除率与实验基本相符, 通过对详细机理中重要基元的分析, 得出了各温度下的主要反应途径。

**关 键 词:** 选择性非催化还原 (SNCR) 脱硝; 混合; 气态  $\text{NH}_3$ ; Chemkin 模拟

中图分类号: X511 文献标识码: A

## 引 言

$\text{NO}_x$  是一种主要的大气污染物质,  $\text{NO}_x$  与碳氢化合物可以在强光作用下造成光化学污染, 排放到大气中的  $\text{NO}_x$  是形成酸雨的主要原因, 严重危害生态环境。目前国内 70% 左右的  $\text{NO}_x$  是由煤燃烧所产生的, 因此作为主要燃煤设备的电站锅炉和工业锅炉成为今后控制  $\text{NO}_x$  排放所必须关注的焦点<sup>[1]</sup>。

选择性非催化还原 (SNCR) 脱硝是一种有效的脱硝方法, 与其它  $\text{NO}_x$  脱除工艺相比, 选择性非催化还原 (SNCR) 脱硝工艺除了有成本低、易于与其它工艺联用的优点之外, 还有占地面积小, 设施简单的优点, 尤其适合老电厂的改造。国外研究表明, 中、大型设备上使用 SNCR 脱硝技术, 氨氮当量比为 1.0~2.0 时, 脱硝效率达到 50%~70%, 而实验室的研究中则可以达到 80% 以上的脱硝效果<sup>[2]</sup>。影响工艺最重要的因素是被称为“3T”的 3 个因素: 还原剂与烟气的混合 (turbulent mixing)、反应温度 (tempera-

ture) 和停留时间 (residence time), 对工艺的效果的改善应针对这 3 个主要因素。常规还原剂有氨、尿素以及碳酸氢铵<sup>[3~9]</sup>, 氨作还原剂除可以以气态形式喷入外, 还可以避免反应过程中  $\text{N}_2\text{O}$  的大量排放<sup>[10]</sup>, 造成二次污染。与以溶液形式喷入相比, 还原剂以气态形式喷入可以避免由于溶液汽化潜热造成的喷嘴附近的局部温度降低, 本文主要对氨气作还原剂的 SNCR 工艺脱硝进行实验研究和模拟。

## 1 试验装置与模拟方法

### 1.1 试验装置

试验在自制的 SNCR 反应试验台上进行, 试验台如图 1 所示。反应器为一直径为 250 mm 的烟道, 内衬为  $\phi 300 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  的刚玉管, 外包 150 mm 厚的硅酸铝纤维保温层, 最外层为 5 mm 的钢质保护层。反应器总长 6 m, 垂直向上 3 m 后转 90° 弯后呈水平走向。模拟高温烟气由反应器前的燃油燃烧器产生, 燃料为 0 号柴油。烟气温度通过调节油量和燃烧风的量进行控制, 由 7 个沿程分布的 S 型热电偶测量, 如图 1 所示  $T_1 \sim T_7$ 。由掺混在燃烧器燃烧风中的  $\text{NH}_3$  (即图 1 中的氨气 1) 产生的  $\text{NO}_x$  来提高烟气中  $\text{NO}_x$  浓度,  $\text{NO}_x$  的产生量通过调节  $\text{NH}_3$  添加量控制。还原剂  $\text{NH}_3$  (即图 1 中的氨气 2) 由压缩空气携带从喷嘴喷到烟气中,  $\text{NH}_3$  和压缩空气的流量由玻璃转子流量计控制。烟气气样通过从沿程预留的采样口抽取采集, 取样枪可以通过改变深入长度进行同一轴线上不同位置的采样, 即如图 1 中所示的平行于  $x$  方向上的不同位置。采用德国 MRU 公司 SAE19 型烟气分析仪进行在线测量, 采样点 1 距喷嘴 450 mm, 采样点 2 距喷嘴 2 000 mm, 采样点 3 距喷嘴 5 000 mm。泄露氨采用洗瓶水洗溶解收集, 通过化学滴定测量。

收稿日期: 2008-11-04; 修订日期: 2009-01-14

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 基金资助项目 (2007CB210208); 国家自然科学基金资助项目 (50776019); 教育部新世纪优秀人才支持计划基金资助项目 (NCET-05-0469)

作者简介: 梁秀进 (1979-) 男, 山东临沂人, 东南大学博士研究生。

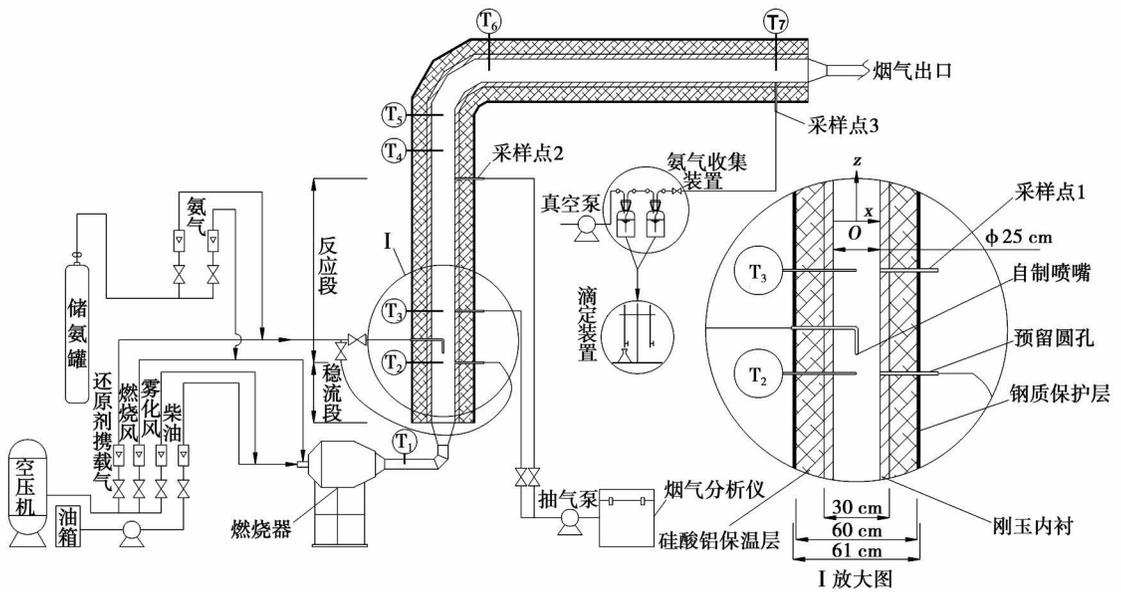


图 1 试验台结构示意图

目前, SNCR 在工业上的应用中还原剂的喷入方式多采用炉壁开孔侧喷, 由于工业锅炉横截面积较大, 还原气体很难深入到炉膛内部, 路涛等人对该喷入方式作了专门的研究<sup>[11]</sup>。B. Ljungdahl 等人的研究表明, 将喷入位置从侧壁移到炉内至少可以将  $\text{NO}_x$  的还原率提高 30%<sup>[12]</sup>。为此, 本研究提出了深入内部逆流喷入的喷入方式, 而普通钢质喷嘴除耐温外, 还存在被加热后催化分解从内部通过的还原剂的问题。试验中所用喷嘴为参照 TB 系列喷嘴自制改进型 TB 系列喷嘴, 结构如图 2 所示, 为一带半圆堵头  $\phi 16 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  的刚玉管, 其半圆头上开两条呈十字交叉的 1.1 mm 的狭槽。双槽结构改善了 TB 系列喷嘴引起的在与狭槽平行和垂直方向的浓度不一致, 其刚玉材质既保证了材料的耐温问题, 也避免了  $\text{NH}_3$  在高温下由钢质材料引起的催化分解。

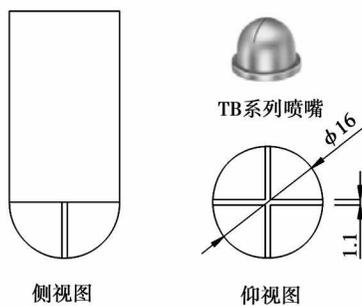


图 2 喷嘴结构示意图

## 1.2 模拟方法

软件 Chemkin 4.1 是一种非常强大的求解复杂化学反应问题的软件包, 常用于对燃烧过程、催化过程、化学气相沉积、等离子体及其它化学反应的模拟。Chemkin 4.1 以气相动力学、表面动力学和传递过程这 3 个核心软件包为基础, 提供了对 21 种常见化学反应模型及后处理程序。数值模拟采用 Miller 和 Rota 提出的化学反应动力学模型及其相关的参数<sup>[6, 13]</sup>, 利用 Chemkin 4.1 软件包进行模拟计算。Miller 提出的化学反应动力学模型包含 20 种基元和 73 个基元反应, Rota 提出的化学反应动力学模型包含 31 种基元和 170 个基元反应。在模拟过程中采用 PSR (perfectly stirred reactor) 反应模型, 假设一个绝热封闭系统, 忽略反应气体的混合过程, 气体瞬态达到炉膛温度。模拟研究在均相反应情况下的总体效果和化学反应历程, 模拟的烟气成分和温度等条件按照实验条件设置, 并通过反应中的重要基元的生成速率随时间的变化分析不同反应条件下的主要反应渠道, 从而给出原因并进一步提出改进方法。

## 2 结果与分析

### 2.1 混合的影响及反应时间的分析

Martin  $\phi$ stberg 等人进行混合对工艺效果影响试验研究表明<sup>[14]</sup>, 携载气量越大,  $\text{NO}_x$  去除率越高, 但由于反应器太小, 只对热态效果进行了考察, 没有进行冷态混合试验。为考察还原气体与烟气的混合效

果,进行了冷态混合试验。烟道主气流为空气,示踪气体携带气为空气。喷入方法以工业上常用的侧喷作对比试验,喷入位置为图 1 中的测温点 T<sub>2</sub> 的预留测孔,喷嘴为一与改进型 TB 系列喷嘴出口面积相同的圆孔,紧贴并垂直内壁喷入。冷态试验以 CO 为示踪气体,与主气流体积比为 600 ml/m<sup>3</sup>,采用德国 MRU 公司 SAE19 型烟气分析仪进行测量。测量位置为图 1 中的采样点 1,沿图 1 所示 x 轴方向有 7 个测点,在其下方侧喷喷嘴位于 x=12.5 cm 处,自制喷嘴位于 x=0 处。

图 3 给出了冷态混合试验结果,设计工况 Q<sub>t</sub> = 300 m<sup>3</sup>/h, Q<sub>x</sub> = 1.5、3 和 4.5 m<sup>3</sup>/h 时 CO 在径向上的分布情况,图(a)为侧流喷入,喷入气体从图 1 中的预留圆口(x=1.5 cm)喷入,喷口面积与自制喷嘴喷口面积相同;图(b)为自制喷嘴逆流喷入。从图(a)上可以看出,在随着距喷口的增大,即随着 x 的值逐渐减小,CO 浓度不断降低,在主气流流速不变的情况下增大携带气的流量可提高混合效果。这是由于喷入气流与主气流相比其动量要小得多,衰减得很快,难以喷到距喷口较远的位置,增大携带气的流量即是增大喷入气流的动量。工业锅炉横截面积更大,在混合效果上比试验中的混合效果还要差。而且锅炉内在 SNCR 工艺的温度窗口内的空间并不大,难以控制两股气流混合后在其反应区间内,即难以保证混合面与等温面的一致。该喷入方式尽管降低了安装成本,但使得混合成为制约工艺效果的主要因素,随着环保标准的不断提高,将不能满足工艺要求。

从图 3(b)还可以看出,携带气流量较小时 x 为负值的位置 CO 浓度较高,这是由于反应器前面的弯头引起的流场不稳定,喷嘴处气流有从 x>0 的区域向 x<0 的区域偏转趋势造成的。这说明携带气流量较小时,其穿透能力小,容易受流场流动的影响。随着携带气流量的增大,喷出气流的穿透能力增大,抵御外部流场影响的能力增强,使得 CO 浓度在 x>0 处升高, x<0 处降低,整体均匀程度不断提高。当 Q<sub>x</sub> = 4.5 m<sup>3</sup>/h,即携带气流量为主气流的 0.015 倍时,弯头的影响已很小,基本达到了较好混合的效果。携带气与主气流的流量比为 0.015,即携带气的体积仅为主烟气的 1.5%,如此小的携带气量无论对锅炉效率还是对炉内气流流动都不会产生很大的影响。从混合效果上看,模拟中采用 PSR 反应模型基本合理,不会因混合效果引起较大偏差。由于深入炉膛内部的喷入方式在喷嘴布置上不受锅炉横截面积大小的限制,根据喷嘴所能负责的面积和炉膛内适合喷入还

原剂的等温面的大小,选择合适的喷嘴密度和布置方向可保证混合效果不随锅炉大小而改变。

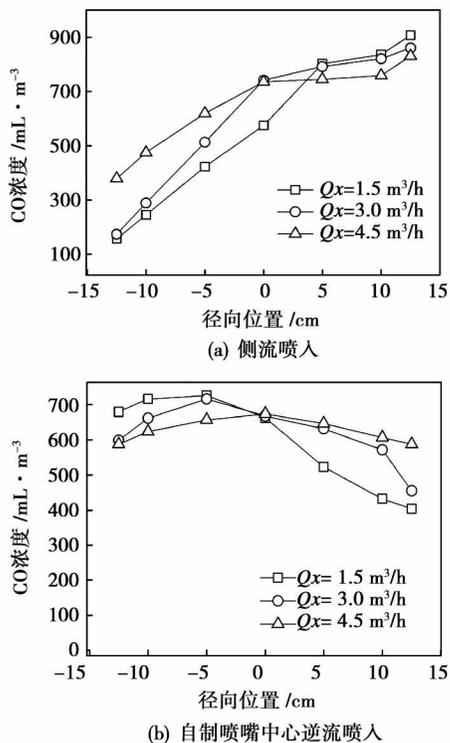


图 3 混合实验结果, Q<sub>t</sub> = 300 m<sup>3</sup>/h, Q<sub>x</sub> = 1.5、3 和 4.5 m<sup>3</sup>/h 时各处 CO 浓度分布

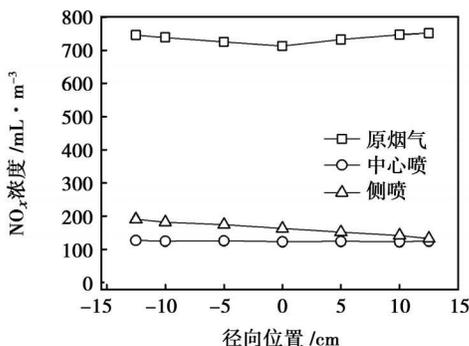


图 4 925 °C 条件下中心喷入与侧喷条件下各测点 NO<sub>x</sub> 含量

根据冷态试验结果,进行了烟气量为 300 m<sup>3</sup>/h,还原剂携带气为 4.5 m<sup>3</sup>/h 的热态试验。因为 NO<sub>x</sub> 的还原是慢反应,采样点 1 距还原剂喷入点只有 0.45 m,即使混合较好也不能使反应进行完全。Muzio 等人的研究结果表明,还原反应在 200 ms 内可以完成<sup>[15]</sup>,而采样点 2 距还原剂喷入点为 2 m,烟气在该段反应器内的反应时间约为 0.27 s,所以可以保证还原反应的完成。通过对反应温度窗口内采样点 3 进行的 NO<sub>x</sub> 浓度测量结果与采样点 2 的

测量结果基本无差别,即在采样点 2 处  $\text{NO}_x$  的还原反应已完成。除停留时间外,采样点 2 后面的反应器的温度也降至  $\text{NO}_x$  还原反应的温度窗口之外,所以后面提到  $\text{NO}_x$  浓度都是在采样点 2 测量所得。

图 4 给出了  $925\text{ }^\circ\text{C}$  条件下采样点 2 处  $\text{NO}_x$  的浓度分布,从图上可以看出侧喷时  $\text{NO}_x$  在径向上各处的浓度随着距喷嘴距离的增大而增大,而中心逆流喷入的混合方式所得的  $\text{NO}_x$  浓度分布基本均匀。侧喷中  $\text{NO}_x$  分布的不均匀程度要比冷态试验中  $\text{CO}$  的不均匀程度小得多,这是因为首先气体在高温条件下体积膨胀,流速增大,湍流剧烈;其次热态测点要比冷态测点高出  $1\ 500\ \text{mm}$  左右,与冷态混合试验结果相比图中所示的是经历了一段较长时间的反应和混合后的  $\text{NO}_x$  浓度分布。中心逆流喷入的混合方式所得的  $\text{NO}_x$  分布在测点平面上基本是均匀的,各测点之间没有明显差距,这意味着该喷嘴的单喷嘴的负责面积可以比现有试验台中烟道横截面积 ( $\phi=250\ \text{mm}$ ) 更大一些。尽管在现有反应器内两种喷入方式的工艺效果差别不是很大,但已反映了趋势,两者的工艺效果的差别将会随着反应器空间的增大而增大。

## 2.2 温度的影响

表 1 各温度条件下的烟气成分

温度段起止 温度/ $^\circ\text{C}$	烟气成分/%				
	$\text{O}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{CO}_2$	$\text{NO}_x$	$\text{N}_2$
950~850	9.06	16.86	12.81	0.0701	61.20
925~800	10.82	15.26	11.60	0.0704	62.25
900~775	11.60	13.80	10.49	0.0587	64.05
875~750	12.59	12.64	9.61	0.0540	65.11
850~725	13.14	12.08	9.23	0.0544	65.50
825~710	14.68	11.57	8.64	0.0651	65.04
800~694	15.24	9.43	7.17	0.0568	68.10
775~653	16.57	8.02	6.09	0.0652	69.25

在保持烟气量不变的条件下,通过调节油量改变烟气温度进行了不同温度条件下的脱硝试验。由于反应器存在散热,所以反应器内的烟气不能保持恒温,只能给出一个从喷嘴到测点沿程递减的反应温度范围。表 1 给出了不同工况下的温度和烟气成分,表中的温度段的起止温度为喷嘴处的温度和采样点 2 处的温度。从表中可以看出,  $\text{O}_2$  含量要高于普通锅炉烟气的  $\text{O}_2$  含量 ( $3\% \sim 5\%$ ), 而 Robin 等人的研究结果表明<sup>[16]</sup>, 这不会对工艺效果造成很大的影响。实验结果表明,由  $\text{NH}_3$  氧化产生的烟气中的  $\text{NO}_x$  其主要成分为  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  的含量在反应器是温度

低于  $750\text{ }^\circ\text{C}$  的条件下一般在  $16\ \text{mL}/\text{m}^3$  左右,而高于  $750\text{ }^\circ\text{C}$  的条件下就不再含有  $\text{N}_2\text{O}$ , 表中  $\text{NO}_x$  的浓度是各测点浓度的平均值。

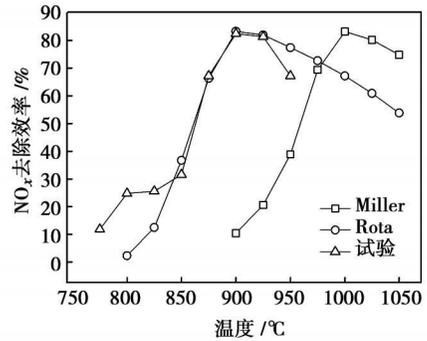


图 5 试验和模拟中不同温度下  $\text{NH}_3/\text{NO}_x=1.25$  时  $\text{NO}_x$  的去除效率

图 5 给出了不同温度下  $\text{NH}_3/\text{NO}_x=1.25$  时  $\text{NO}_x$  的去除率。图中所示的温度为喷嘴处的温度,并根据试验条件给出了利用 Miller 和 Rota 提出的反应动力学模型的模拟结果。以  $\text{NO}_x$  去除率高于  $50\%$  为标准,试验所得温度窗口为  $863 \sim 937\text{ }^\circ\text{C}$ , 最优反应温度为  $925\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\text{NO}_x$  去除率为  $82.53\%$ 。与王智化等人的试验结果相比<sup>3~4</sup>, 温度窗口要低近  $100\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\text{NO}_x$  去除率也要高,这是因为王智化等人的试验中的还原氨是以溶液的形式喷入的。由于溶液的汽化潜热,还原剂以溶液形式喷入会引起喷嘴出口附近的局部温度降低,使得温度窗口向高温方向移动。与 Sang Wook Bae 等人的试验结果相比<sup>[17]</sup>,  $\text{NO}_x$  去除效率也较高,反应温度窗口低  $25\text{ }^\circ\text{C}$  左右。由于 Sang Wook Bae 的试验中还原剂是以侧喷形式与主气流混合的,其混合效果较差。而且本试验中还原剂在喷出之前要流经一段  $400\ \text{mm}$  长的处于高温烟气中的管道,即喷出之前已经得到了预热,这有助于  $\text{NO}_x$  的还原和反应温度窗口的降低。

从图 5 可以看出,采用 Rota 提出的反应机理模拟所得的反应温度窗口基本相同,  $\text{NO}_x$  去除率比试验所得结果略高,但是采用 Miller 的机理所得的温度窗口要明显高于试验所得结果。实验所得  $\text{NO}_x$  去除率比模拟结果略低,这是由于试验中还原剂与烟气的混合效果尽管已经很好,但还没有达到与模拟中所假设的完全混合。在高于温度窗口后,试验所得的  $\text{NO}_x$  去除率随温度的升高下降很明显,而模拟所显示的结果要缓慢得多。

## 2.3 氨氮比

图 6 给出了 4 个典型温度下不同氨氮比的条件

下所得的  $\text{NO}_x$  去除率。从图上可以看出在最优反应温度(925 °C)条件下,  $\text{NO}_x$  的去除率随着氨氮比的增大而增大, 当氨氮比大于 1.0 后, 其增大幅度减小, 这说明  $\text{NO}_x$  与  $\text{NH}_3$  的反应当量比为 1.0 或略高。在低于最优温度条件下, 随着反应温度的降低, 相同氨氮比条件下所得的  $\text{NO}_x$  去除率降低。当反应温度低至 825 °C, 特别是 775 °C 时,  $\text{NO}_x$  的去除率随氨氮比增大的幅度要小得多, 这是由于在该温度条件下, 影响  $\text{NO}_x$  去除率的主要因素是反应温度。与李可夫等人的各种不同还原剂以溶液形式喷入的实验结果相比<sup>[18]</sup>, 相同的氨氮比条件下  $\text{NO}_x$  去除率要高, 这说明以气态氨的形式喷入与以溶液形式喷入除无汽化潜热外, 其利于混合的优势也是很明显的。这表明只要有较好的混合效果和适宜的温度, 氨氮比在 1.0 或比 1.0 略高就可以取得较高的  $\text{NO}_x$  去除率, 在反应温度窗口外时, 即使有较好的混合效果, 也难以得到较高的  $\text{NO}_x$  的去除率。

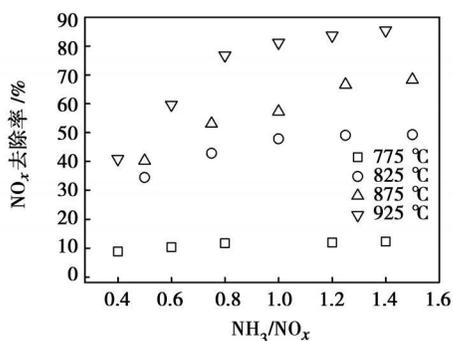


图 6 4 个典型温度下不同氨氮比条件下的  $\text{NO}_x$  去除率

### 2.4 氨的泄漏量

氨的泄漏量是处理后的烟气中所含的未反应的  $\text{NH}_3$  的量, 大量泄漏氨的存在不仅会造成还原剂的浪费, 由于在实际的锅炉烟气中存在着大量的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{HCl}$  等酸性气体成分, 部分  $\text{NH}_3$  会与它们反应生成氨盐, 造成后续管路设备的堵塞。

对泄漏氨的测量是通过从采样点 3 抽取一定体积的烟气, 将其通过洗瓶水溶解烟气中残留的  $\text{NH}_3$ , 再通过利用  $\text{HCl}$  作试剂对所得溶液进行中和滴定实验求出烟气中残留  $\text{NH}_3$  的浓度。

图 7 给出了 4 个典型温度下不同氨氮比时的氨的泄漏量。从图上可以看出, 在最优温度(925 °C)条件下, 氨的泄漏量即使在  $\text{NH}_3/\text{NO}_x = 1.25$  时, 氨的泄漏量也是低于  $15 \text{ mL}/\text{m}^3$  的, 而低于温度窗口的条件下, 在  $\text{NH}_3/\text{NO}_x = 0.4$  时, 氨的泄漏量就接近

$160 \text{ mL}/\text{m}^3$ 。这说明在较好的混合效果和适宜的温度条件下, 氨的泄漏量很少, 而过低的反应温度和较差的混合效果才是引起氨泄漏的主要原因。

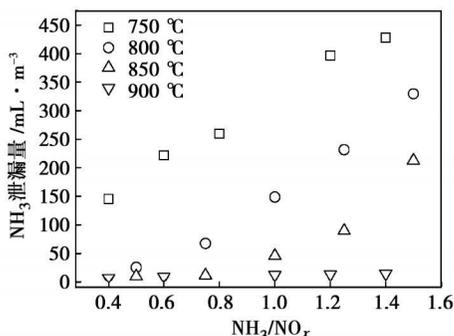


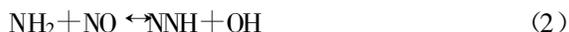
图 7 4 个典型温度下不同氨氮比时氨的泄漏量

### 3 主要反应途径的分析

由于在对温度窗口的模拟中利用 Rota 提出的反应机理所得的结果与实验结果基本相符, 所以对反应途径的分析采用的是 Rota 提出的详细反应机理。  $\text{NH}_3$  对  $\text{NO}_x$  的还原首先要由如下反应引发:



$\text{NH}_2$  有两条还原  $\text{NO}_x$  的主要反应途径:



$\text{NNH}$  的后续反应途径为:



$\text{NH}_2$  还有可能如下被氧化的反应:



现对反应温度为 900 °C 时反应过程中的  $\text{NO}$  作 ROP(rate of production)分析, 结果如图 8(a)所示。从图上可以看出, 反应式(2)及其后续反应式(4)和反应式(3)对  $\text{NO}_x$  的还原都起着较大的作用。反应式(2)在去除  $\text{NO}_x$  的同时又产生了新的  $\text{OH}$  基元, 这就形成了式(1)、式(2)和式(4)组成了的自行维持  $\text{OH}$  基元的反应途径, 保证了充足的活性基元, 维持了较快的反应速度。尽管  $\text{NO}_x$  的氧化途径也是存在的, 但与还原途径相比, 其作用相对要小得多。

由于  $\text{OH}$  基元对各途径的优势选择起着较大的

作用, 所以也对 OH 基元作了 ROP 分析, 结果如图 8 (b) 所示。从图上可以看出式 (2)、式 (11) 和式 (12) 对 OH 的生成起着重要的作用, 其中式 (11) 和式 (12) 是由高温引发的, 这就是 SNCR 工艺的温度窗口较高的原因。其结构式为:

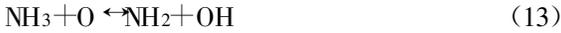
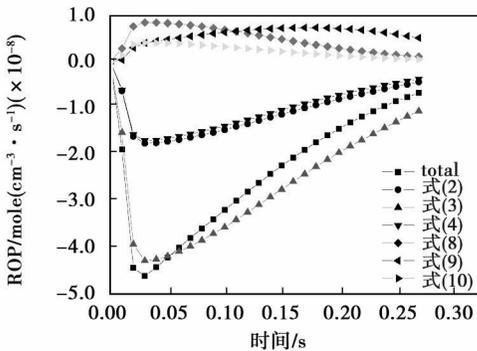
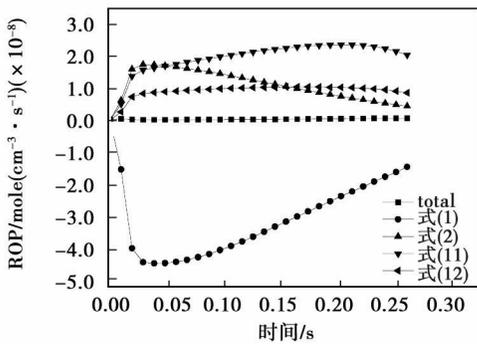


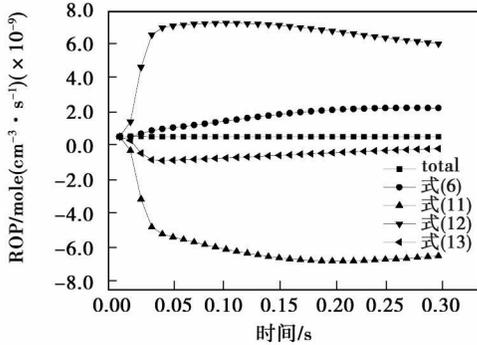
图 8(c) 给出了 O 基元的 ROP 分析图, 从图上可以看出, O 基元主要由式 (12) 产生, 通过式 (11) 消耗从而产生 OH 基元, 式 (6) 和式 (13) 对 O 基元也有一定的作用, 但相对较小。O 和 H 基元主要由高温烟气自身产生的。



(a) NO基元



(b) OH基元



(c) O基元

图 8 925 °C 条件下 NO、OH 和 O 的 ROP 分析

通过相同的分析方法可知, 在低于反应温度窗口时, NO<sub>x</sub> 的还原途径主要是式 (3)。由于式 (3) 本身在消耗 OH 基元又不生成新的活性基元, 在较低温度下由高温生成的活性基元本来就很少, 这就造成了活性基元的不足。活性基元的不足导致了还原反应的速率过低, 所以在低于反应温度窗口的条件下, 在较短停留时间内很难达到较高的 NO<sub>x</sub> 去除率, 而工业锅炉又不能提供较长的停留时间。在高于反应温度窗口的条件下, 由于高温产生了过多的活性基元, NH<sub>2</sub> 被氧化的反应途径逐渐超越了氧化 NO<sub>x</sub> 的反应途径占据了主要地位。而且反应式 (5) ~ 式 (7) 还会产生新的活性基元, 这更加剧了活性基元过多的问题, 由于氧化途径的作用, 随着温度高于最优反应温度的程度 NO<sub>x</sub> 的去除效率逐渐降低。

### 4 结 论

(1) 采用自制改进型槽缝式 TB 系列喷嘴内部喷入的方式明显优于侧喷, 当还原剂气体与烟气的体积比为 0.015 时就得到良好的混合效果, 提高了还原效率。

(2) 以 NO<sub>x</sub> 去除率高于 50% 为标准, 试验所得温度窗口为 863 ~ 937 °C, 采用 Rota 提出的反应机理模拟所得的反应温度窗口也基本相同。

(3) 随着氨氮比的增大, NO<sub>x</sub> 的去除率和氨的泄漏量增大, 当氨氮比大于 1.0 后, NO<sub>x</sub> 去除率的随氨氮比增大的幅度减小, 而氨的泄漏量增大幅度增大。

(4) 通过对重要基元的 ROP 分析得出了各温度下 SNCR 工艺的主要反应途径。

### 参考文献:

[ 1 ] 毕玉森. 电站锅炉 NO<sub>x</sub> 排放现状、预测及技术改造 [ J ]. 中国电力, 1998, 31(12): 59-62.

[ 2 ] OLIVA M, ALZUETA M U, MILLERA A, et al. Theoretical study of the influence of mixing in the SNCR process; comparison with pilot scale data [ J ]. Chemical Engineering Science, 2000, 55: 5321-5332.

[ 3 ] 王智化, 周 昊, 周俊虎, 等. 不同温度下炉内喷射氨水脱除 NO<sub>x</sub> 的模拟与试验研究 [ J ]. 燃料化学学报, 2004, 32(1): 48-52.

[ 4 ] 王智化, 周俊虎, 周 昊, 等. 炉内高温喷射氨水脱除 NO<sub>x</sub> 机理及其影响因素的研究 [ J ]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(4): 495-500.

[ 5 ] 周俊虎, 卢志民, 王智化, 等. 2.11 兆瓦燃煤四角炉喷氨水脱硝试验 [ J ]. 浙江大学学报, 2006, 40(6): 961-965.

[ 6 ] RENATO ROTA, DOROTA ANTOSL, ZANOELE EVERTON, et al.

- Experimental and modeling analysis of the  $\text{NO}_x$ OUT process [ J ]. Chemical Engineering Science, 2002, 57: 27—38.
- [ 7 ] 高 亮, 王智化, 凌忠钱 等. 炉内高温喷射尿素溶液脱硝机理及其影响因素[ J ]. 锅炉技术, 2005, 36(2): 72—75.
- [ 8 ] 卢志民, 周俊虎, 王智化 等. 碳酸氢铵选择性非催化还原烟气中的氮氧化物[ J ]. 燃烧科学与技术, 2005, 11(6): 511—514.
- [ 9 ] 钟 秦. 选择性非催化还原法脱除  $\text{NO}_x$  的实验研究[ J ]. 南京理工大学学报, 2000, 24(1): 68—71.
- [ 10 ] 周俊虎, 杨卫娟, 周志军 等. 选择非催化还原过程中的  $\text{N}_2\text{O}$  生成与排放[ J ]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 91—95.
- [ 11 ] 路 涛, 贾双燕, 李晓云. 四角切圆燃烧锅炉中 SNCR 过程的数值模拟[ D ]. 北京: 华北电力大学, 2004.
- [ 12 ] LJUNGDAHL B, LARFELD J. Optimized  $\text{NH}_3$  injection in CFB boilers [ J ]. Powder Technology, 2001, 120: 55—62.
- [ 13 ] MILLER J A, BOWMAN C T. Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion[ J ]. Prog Energy Combust Sci, 1989, 15: 287—338.
- [ 14 ] MARTIN ØSTBERG, KIM DAM JOHANSEN, JAN E. Johnsson influence of mixing on the SNCR process[ J ]. Chemical Engineering Science, 1997, 52(15): 2511—2525.
- [ 15 ] MUZIO L J, ARAND J K, TEIXEIRA D P. Gas phase decomposition of nitric oxide in combustion products // 16th Symposium (International) on Combustion[ C ]. The Combustion Institute, 1976, 199—208.
- [ 16 ] ROBIN M A I, PRICE H J, SQUIRES R T. Tailoring  $\text{NH}_3$  based SNCR for installation on power plants boilers // Joint EPA/ EPRI Symposium on Stationary Combustion  $\text{NO}_x$  Control[ C ]. Springfield, V A, 1991, 99—118.
- [ 17 ] SANG WOOK BAE, SEON AH ROH, SANG DONE KIM. NO removal by reducing agents and additives in the selective non-catalytic reduction (SNCR) process[ J ]. Chemosphere, 2006, 65: 170—175.
- [ 18 ] 李可夫, 吴少华, 高冠帅, 等. 选择性非催化脱硝不同还原剂的比较试验研究[ J ]. 热能动力工程, 2008, 23(4): 417—420.

(编辑 何静芳)

## 新技术、新工艺

## 应用单晶技术升级改进 MS5002 燃气轮机

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2009 年 4 月号报道, GE 公司为了改进在油/气生产中应用的 MS5002 燃气轮机的性能并延长其使用寿命, 应用单晶技术对其进行了升级改进。这标志着第一次把 GE's Power Crystal (GE 动力晶体公司) 的单晶技术应用在油/气工业中的动力燃气轮机上。

Power Crystal 的全套器材基于单晶技术, 最初是为 GE 的航空发动机开发该技术的并将其用在先进的重型燃气轮机上。自 1990 年起, 该技术几乎应用于 GE 所有的航空发动机。此外, GE 已经具有在它的 LM2500+、LM2500+G4、LM6000PD 航改型燃气轮机、它的 LMS100 和所有的 FB 和 H 级工业燃气轮机中使用单晶材料的经验。

高性能的涡轮叶片使用先进的单晶材料能够使涡轮的燃气初温至少提高  $22\text{ }^\circ\text{C}$  (甚至  $33\text{ }^\circ\text{C}$ )。这导致对于 MS5002D 在不增加  $\text{NO}_x$  排放的情况下, 燃气轮机的输出功率增加 4%, 而对于 MS5002C 可能使输出功率增加 6%。

GE MS5002C 和 MS5002D 燃气轮机的升级改进包括 3 个方面。改进的部件是第一级静叶、第一级动叶和通流部分其它部件。第一级静叶采用新的改进的冷却方式; 第一级动叶的材料从定向结晶的 GTD111 改变为性能更好的单晶材料, 以便增加抗蠕变性; 燃烧室的过渡段和火焰筒、燃料喷嘴和联焰管, 以及联焰管承座也进行了改进。这些改进包括最新的硬涂层材料和零件的重新设计, 以便优化间隙并减少磨损。第一级围带的材料从 AIS1410 改为 AIS1310; 并重新设计了喷嘴内环, 以便包括追加的冷却孔。

利用单晶材料, 所有晶粒边界均从结构中消除并在叶型中产生了具有可控取向的单晶。所有晶粒边界以及连带的晶粒边界强化添加剂的消除, 允许明显提高合金的熔点, 相应增加了它的高温强度。

与上一代燃气轮机的等轴晶粒或定向结晶结构比较, 单晶结构也增加了合金的蠕变强度和疲劳强度。

(吉桂明 摘译)

temperature difference field uniformity, multi-stream plate-fin type heat exchanger, dynamic characteristics, mathematical model

无焰燃烧  $\text{NO}_x$  生成的数值分析和实验研究 = **Numerical Analysis and Experimental Study of  $\text{NO}_x$  Generation in Flameless Combustion**[刊, 汉]/WANG Bao-yuan, YU Yu, LIN Qi-zhao (Department of Thermal Sciences and Energy Source Engineering, China National University of Science and Technology, Hefei, China, Post Code: 230027), XING Xi-an-jun (Anhui Provincial Product Quality Supervision and Testing Research Institute, Hefei, China, Post Code: 230051)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(6). — 787 ~ 791

Flameless combustion enjoys the merit of reducing  $\text{NO}_x$  emissions. By adopting an eddy dissipation concept (EDC) model based on a coupled skeleton chemical reaction mechanism, a three-dimensional numerical simulation and an experimental verification have been performed of the  $\text{NO}_x$  generation process of a flameless combustion boiler featuring a normal-temperature air admission. It has been found from an analysis that the simulation results obtained by using the model in question are in relatively good agreement with the test actual measuring ones. The flameless combustion can result in excessively low  $\text{NO}_x$  emissions with the emission concentration being below  $20 \times 10^{-6}$ .  $\text{NO}_x$  is generated mainly around a relatively wide space downstream of the jet flow. As the reaction zone is widened, the highest temperature in the combustion chamber is lower than 1 700 K and NO of the thermal type is sharply reduced relative to that of the flame combustion. The fast speed type NO amount is extremely low and the  $\text{N}_2\text{O}$ -transformed type NO becomes the main route for the generation of  $\text{NO}_x$ . **Key words:** flameless combustion, eddy dissipation concept,  $\text{NO}_x$ , reduction of emissions

紫外/过氧化氢法同时脱硫脱硝的研究 = **Research of Ultraviolet/hydrogen-peroxide Method for Simultaneous Desulfuration and Denitrification**[刊, 汉]/MA Shuang-chen, MA Jing-xiang, ZHAO Yi, et al (College of Environment Science and Engineering, North China University of Electric Power, Baoding China, Post Code: 071003)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(6). — 792 ~ 795

Described were advances in the study of pollutant removal from waste gases by use of ultraviolet/hydrogen peroxide and analyzed was the effect of the strong oxidation property of the UV/ $\text{H}_2\text{O}_2$  system on the removal of  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_x$  in simulated flue gases. Under optimum test conditions, the removal efficiency of  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_x$  by use of UV/ $\text{H}_2\text{O}_2$  can be higher than 95%. The authors have analyzed the reaction mechanism for  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_x$  removal by the UV/ $\text{H}_2\text{O}_2$  system and proposed a theory that the free radical reaction is the basis for oxidation and removal of pollutants. The authors also noted that the method under discussion can be used to reconstruct the existing wet type flue gas desulfuration towers and transform them into atmospheric pollution control devices capable of controlling various pollutants in flue gases. **Key words:** coal-fired power plant, desulfuration and denitrification, ultraviolet (UV), hydrogen peroxide, hydroxyl free radical

气态氨作还原剂的 SNCR 脱硝工艺的试验研究与模拟 = **Experimental Study and Simulation of SNCR (Selective Non-catalytic Reduction) Denitrification Process with Gas-state Ammonia Serving as a Reducing Agent**[刊, 汉]/LIANG Xiu-jin, ZHONG Zhao-ping, JIN Bao-sheng, et al (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(6). — 796 ~ 802

Experimentally studied was the SNCR (selective non-catalytic reduction) denitrification process on a self-developed test rig with ammonia serving as a reducing agent. Its simulation was performed by using chemical reaction dynamics software Chemkin 4.1. It has been found through tests that the inner spray-in mode by use of self-developed and improved type slot TB series nozzles is conspicuously superior to the lateral spray-in mode with  $\text{NO}_x$  removal rate being enhanced. With the  $\text{NO}_x$  removal rate of above 50% serving as a standard, the temperature window obtained by the test ranges from 863 to 937 °C. With an increase of the ammonia/nitrogen ratio, the  $\text{NO}_x$  removal and ammonia leakage rate will increase. When

the ammonia/nitrogen ratio is bigger than 1.0, the growth margin of the  $\text{NO}_x$  removal rate will decrease with an increase of the above ratio, but the growth margin of the ammonia leakage rate will increase. The temperature window and the  $\text{NO}_x$  removal rate obtained from the simulation by using software Chemkin 4.1 are basically in agreement with the test results. Through a detailed analysis of the important elements of the mechanism, the main reaction routes at various temperatures were identified. **Key words:** selective non-catalytic reduction (SNCR) denitrification, mixing, gas-state ammonia, simulation conducted by using Chemkin

小型风力发电机组优化控制策略与实验研究= **Optimized Control Tactics and Experimental Study of Small-sized Wind Power Generator Units**[刊, 汉]/BAO Dao-ri-na, LIU Zhi-zhang, TIAN Rui (College of Energy Source and Power Engineering, Inner Mongolia Polytechnic University, Huhhot, China, Post Code: 010051), ZHANG Wan-xiang (Baoding Tianwei Wind Power Science and Technology Co. Ltd., Baoding, China, Post Code: 071051)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(6). — 803 ~ 806, 811

Presented were tactics for optimizing and controlling the power of a small-sized wind turbine generator unit. In the light of a 300 W/24 V permanent magnetic power generator being chosen and by using Wilson blades, a calculation model was devised, and blades for 300 W wind turbines were designed by using MATLAB language. From the phenomenon that the design of a controller is isolated and separated from the matching characteristics of blades and generators in the existing control systems for wind turbines, designed was a controller to mutually match the generator and blades of the wind turbine generator. During the wind tunnel tests, the variation law of the prototype power output with the system voltage was tested under the condition of a constant wind speed of 8, 10, 12 and 15 m/s etc., respectively. When the system voltage decreases, the wind turbine power output will all along decrease. In this process, no phenomenon of power output increase emerges. This is fully verified by the wind turbine generator operating in the pre-peak zone. When the wind speed is greater than the rated one, the control system can control the power output of the wind turbine generator by reducing the resistance value of the load of the connect-in system. The foregoing may offer definite guidance and is of practical value for studying the controllability, reliability and durability of a small-sized wind power generation system. **Key words:** wind turbine generator, blade design, unit power, PWM (pulse width modulation) power controller

氦气透平压气机组合弹性环密封试验研究= **Experimental Study of a Combined Elastic Ring Seal in a Helium Turbine Compressor**[刊, 汉]/WANG Xu, XU Li-hua, ZHONG A-xia (CSIC Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), SHAN Shi-kui (Production Department, Harbin Electric Machinery Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150040)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(6). — 807 ~ 811

As an intercooling recuperator (ICR) closed cycle is adopted for a helium turbine compressor, a variety of chambers with different pressures are formed between the seals at the HP/LP compressor and at the turbine inlet/outlet on one side and the outer-layer pressure shell on the other. A kind of combination elastic ring seal is adopted in various chambers at different temperatures and pressures. To verify the sealing effectiveness of the combination elastic rings, a seal test rig and test pieces fully identical to the combination elastic rings used in the turbine unit were designed. Moreover, on the seal test stand, a contrast experiment was performed by using helium and air working medium respectively. The test results show that the combination elastic rings have a good sealing effectiveness. The leakage rates from the seals at three locations, namely, LP compressor outlet/inlet, HP compressor outlet/inlet and HP compressor outlet/turbine outlet, account for 0.0322%, 0.1035% and 0.1282% of the design flow rate respectively. When the pressure before the seal ranges from 0.6 to 1.0 MPa, the leakage rate of helium is about 2 times that of air as compared with the air medium. When the pressure before the seal is relatively low (0.1 to 0.2 MPa), the leakage rate of helium is comparatively close to that of air. **Key words:** helium turbine compressor, elastic ring seal, high temperature gas-cooled reactor, helium/air working medium, leakage rate