

SCR 烟气脱硝过程 硫酸氢铵的生成机理与控制

马双忱,金鑫,孙云雪,崔基伟

华北电力大学环境科学与工程学院,河北保定 071003

[摘要] 简述选择性催化还原(SCR)烟气脱硝原理。指出 SCR 脱硝过程出现硫酸氢铵的危害,详细分析了硫酸氢铵形成的影响因素,如 NH_3/NO_x 摩尔比、 SO_3 浓度、硫酸氢铵的露点温度等。根据硫酸氢铵的特性提出了控制硫酸氢铵生成的方法与减少其负面影响的措施:通过控制 SCR 脱硝过程氨逃逸量和烟气中 SO_2 氧化率的方法减少硫酸氢铵的生成量;为防止催化剂因硫酸氢铵的滞留而失去活性,合理控制 SCR 脱硝装置在低负荷下的运行时间;为有效降低硫酸氢铵在空气预热器(空预器)换热元件上的形成速率,选用搪瓷镀层换热元件。

[关键词] 烟气脱硝;选择性催化还原(SCR);硫酸氢铵(ABS); NH_3/NO_x 摩尔比

[中图分类号] X701

[文献标识码] A

[文章编号] 1002-3364(2010)08-0012-06

[DOI 编号] 10.3969/j.issn.1002-3364.2010.08.012

THE FORMATION MECHANISM OF AMMONIUM BISULFATE IN SCR FLUE GAS DENITRIFICATION PROCESS AND CONTROL THEREOF

MA Shuangchen, JIN Xin, SUN Yunxue, CUI Jiwei

College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, PRC

Abstract: The principle of selective catalytic reduction (SCR) denitrification process has been briefly expounded, pointing out the harmfulness of ammonium bisulfate (ABS) occurred in SCR denitrification process. The main affecting factors for ABS formation, such as the mole ratio of NH_3/NO_x , the SO_3 concentration, and the dew point of ABS etc., have been analysed in detail. According to the properties of ABS, the measures for controlling formation of ABS and reducing negative impacts of ABS have been put forward: through controlling the amount of ammonia escape in the SCR process and the oxidation rate of SO_2 in the flue gas, the formation amount of ABS is to be reduced; in order to prevent the catalyst to lose its activity due to hold-up of ABS, the operating time of SCR under low load has to be reasonably controlled; for effectively decreasing the formation rate of ABS on heat-exchanging elements in the preheater, the ceramic coating has to be selected for said elements.

Key words: flue gas denitrification; SCR; ABS; mole ratio of NH_3/NO_x

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50976035)

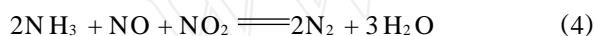
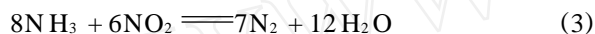
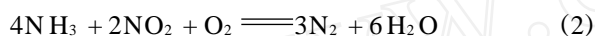
作者简介: 马双忱(1968-),男,博士,华北电力大学环境学院副教授,从事电力系统环境保护的教学与研究,主要研究领域为烟气脱硝脱硝。

E-mail: msc1225@163.com

选择性催化还原(SCR)烟气脱硝技术(简称 SCR 技术)在国外应用较为普遍。SCR 脱硝装置具有结构简单、脱硝效率高、运行可靠、便于维护等优点^[1]。随着催化剂性能的改进和反应操作条件的优化,SCR 技术日趋成熟,在我国也得到日益广泛的应用。但是,在烟气脱硝的同时,催化剂还可以使部分烟气中 SO₂ 氧化生成 SO₃,SO₃ 与 SCR 脱硝过程(简称 SCR 过程)中未反应的氨(逃逸的氨)反应生成硫酸氢铵。硫酸氢铵具有粘性,会对催化床层和空预器造成危害^[2]。因此,研究硫酸氢铵的形成机理以及控制方法对消除或减轻 SCR 脱硝过程硫酸氢铵的不良影响具有重要意义。

1 SCR 脱硝机理

SCR 法是指在催化剂的作用下,还原剂(NH₃ 或尿素等)有选择性地与烟气中的 NO_x 反应并生成环境友好的 N₂ 和 H₂O^[3-4]。在以氨为还原剂的典型 SCR 反应条件下,其主要反应为:



在 SCR 脱硝工艺(简称 SCR 工艺)中,催化剂安放在反应器的箱体内。催化剂单元通常垂直布置,烟气由上向下流动。SCR 工艺的反应原理如图 1 所示^[5]。

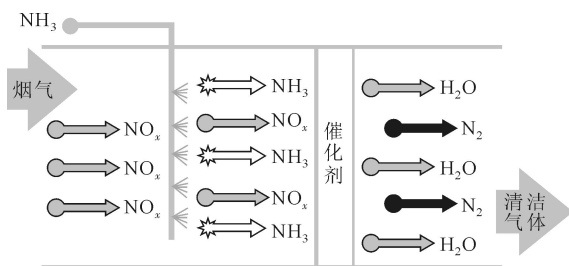


图 1 SCR 烟气脱硝原理

2 硫酸氢铵生成机理分析

2.1 硫酸氢铵的形成过程

由于在锅炉烟气中还存在 SO₂ 等气体,催化剂中的活性组分钒在催化降解 NO_x 的过程中,也会对 SO₂ 的氧化起到一定的催化作用^[6-8],SO₂ 的氧化率与 V₂O₅ 含量的关系见图 2(图 2 中的相对氧化率是指不同 V₂O₅ 含量的催化剂硫氧化速率与某基准 V₂O₅ 含

量的催化剂硫氧化速率之比)。由图 2 可见,SO₂ 的氧化率随活性组分 V₂O₅ 含量的增加而上升,其反应式如下:

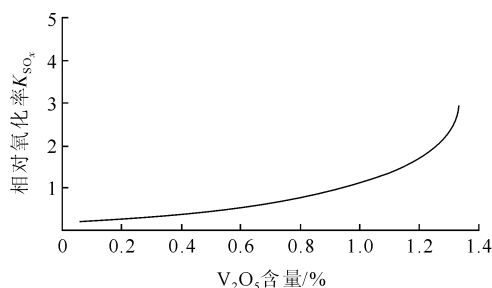
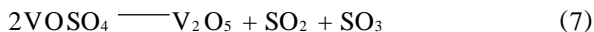
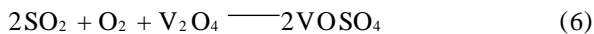
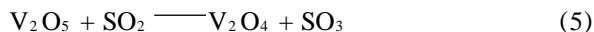


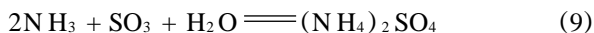
图 2 SO₂ 的氧化率与 V₂O₅ 含量的关系

据统计,约 1% 的来自锅炉及旁路系统的 SO₂ 将转化为 SO₃,二者之间的转化是温度的函数,随着温度的升高 SO₂ 的氧化率增加。对于给定的 SO₂ 浓度和温度,就实际生成的 SO₃ 量而言,SO₃ 的生成率几乎不变^[9]。

在脱硝过程中由于氨的不完全反应,SCR 烟气脱硝过程氨逃逸是难免的,并且氨逃逸随时间会发生变化,氨逃逸率主要取决于以下因素:

- (1) 注入氨流量分布不均;
- (2) 设定的 NH₃/NO_x 摩尔比;
- (3) 温度;
- (4) 催化剂堵塞;
- (5) 催化剂老化。

反应生成的 SO₃ 进一步同烟气中逃逸的氨反应,生成硫酸氢铵和硫酸铵^[10],其反应如下:



2.2 硫酸氢铵形成的影响因素

1982 年 RadianCorp 运用热力学和动力学模型来估算硫酸氢铵的形成^[11]:

$$\text{Radian 数} = [\text{SO}_3] \times [\text{NH}_3] \times [T_{\text{IFT}}] \times [T_{\text{rep}}] \quad (10)$$

式中: T_{IFT} 是硫酸氢铵形成的初始温度; T_{rep} 为综合了排烟烟气温度和空预器冷段金属壁表面温度的数值; SO₃、NH₃ 分别为烟气中 SO₃、NH₃ 的浓度。Radian 数值越大表示硫酸氢铵形成的可能性越高。

运行经验和热力学分析都表明,硫酸氢铵的形成取决于反应物的浓度和它们的比例。硫酸氢铵的形成量随 NH_3 浓度的增加而增加,高 SO_3/NH_3 摩尔比将促进硫酸氢铵的形成及其在空预器上的沉积。硫酸氢铵的形成同时依赖于温度,当烟气温度略低于硫酸氢铵的初始形成温度 (T_{IFT}) 时,硫酸氢铵即开始形成。当烟气温度下降到低于硫酸氢铵形成的初始温度 25 时,硫酸氢铵形成反应可完成 95%。硫酸氢铵的确切形成区域取决于初始形成温度和空预器温度,并在空预器轴向上下波动。硫酸氢铵的沉积受空预器冷段限制,因为吹灰器可以将硫酸氢铵清除,使其不会在中间层沉积。

时,硫酸氢铵形成反应可完成 95%。硫酸氢铵的确切形成区域取决于初始形成温度和空预器温度,并在空预器轴向上下波动。硫酸氢铵的沉积受空预器冷段限制,因为吹灰器可以将硫酸氢铵清除,使其不会在中间层沉积。

2.2.1 NH_3/SO_3 摩尔比

NH_3/SO_3 摩尔比^[12]对硫酸氢铵及硫酸铵形成的影响见图 3。由图 3 可见,硫酸氢铵对硫酸铵的形成起到促进的作用,同时硫酸铵也能对硫酸氢铵的形成起到一定的促进作用。当 NH_3/SO_3 摩尔比大于 2 时,主要形成硫酸铵,在空预器的运行温度范围硫酸铵为干燥固体粉末,对空预器影响很小,而硫酸氢铵是一种粘性很强的物质,很容易在空预器沉积,并促使大量飞灰附着于空预器,从而影响其传热性能,增大其阻力^[13]。

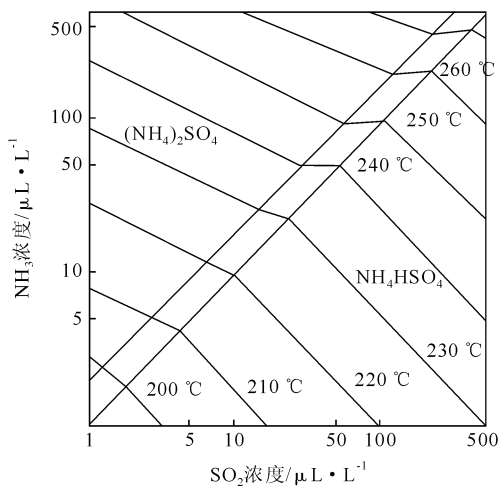


图 3 NH_3/SO_3 摩尔比对硫酸氢铵和硫酸铵形成的影响

2.2.2 NH_3 和 SO_3 浓度乘积

影响硫酸氢铵形成的另一重要因素是 NH_3 和 SO_3 浓度的乘积^[14]。以往认为如果氨逃逸量在 $2 \mu\text{L}/\text{L}$ 以下将不会形成硫酸氢铵,然而事实上在足够高的 SO_3 烟气浓度下即使 $1 \mu\text{L}/\text{L}$ 的氨逃逸量仍可形成硫酸氢铵。硫酸氢铵的生成是 NH_3 和 SO_3 浓度乘积的

函数,它们之间的关系如图 4 所示。由图 4 可见,随着 NH_3 和 SO_3 浓度乘积的升高,硫酸氢铵的露点温度升高。

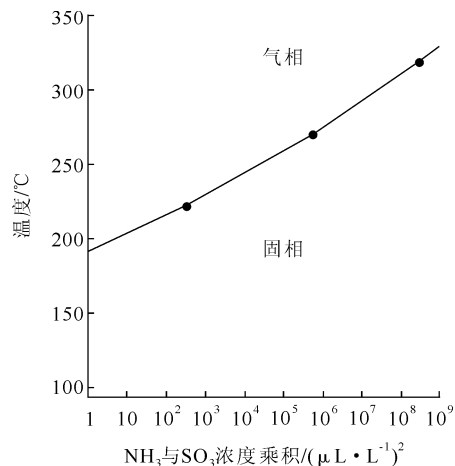


图 4 NH_3 和 SO_3 浓度乘积对硫酸氢铵形成的影响

2.2.3 机组运行负荷

硫酸氢铵对 SCR 反应器的影响可以通过引入 SCR 反应器“潜值”这一参量来表征。在这里,它是表征反应器脱硝能力的参量,其定义为催化剂活性与单位体积烟气中催化剂表面积之乘积。锅炉运行负荷变化,会导致通过催化床的烟气流速、温度、烟气流速等发生变化,从而对硫酸氢铵的形成产生影响^[15](图 5),其具体过程如下:

(1) 在锅炉最大连续运行负荷 (MCR) 运行时,反应器潜值高于要求达到目标脱硝率和最小氨逃逸量的最低潜值;

(2) 随着锅炉运行负荷的降低,烟气流速降低,反应器的潜值增大;

(3) 由于机组持续在低负荷条件下运行,反应器运行温度低于最低运行温度,硫酸氢铵形成并沉积在催化剂上,这将降低反应器的潜值;

(4) 当机组重新以满负荷运行时,随着烟气流速的增加反应器的潜值降低;

(5) 伴随着满负荷条件下的更高的烟气温度,硫酸氢铵升华并且反应器潜值恢复为满负荷时的初始值。

2.3 硫酸氢铵的性质及危害

在通常运行温度下,硫酸氢铵的露点为 147°C ,其以液体形式在物体表面聚集或以液滴形式分散于烟气中。液态的硫酸氢铵是一种粘性很强的物质,在烟气中会粘附飞灰^[16]。

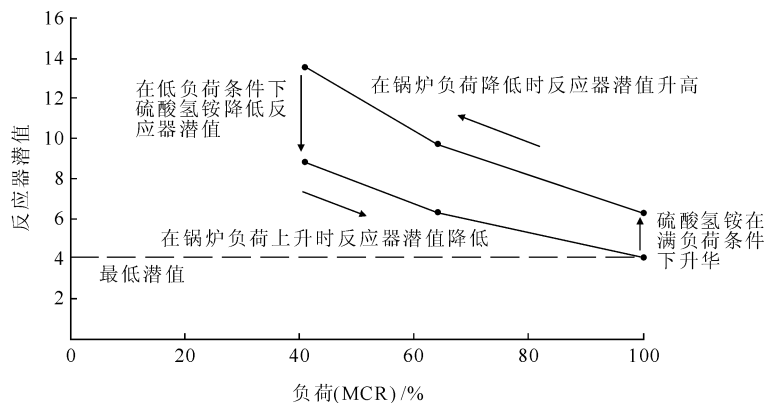


图5 机组运行负荷对硫酸氢铵形成的影响

硫酸氢铵在低温下具有吸湿性,当从烟气中吸水后会造设备的腐蚀。如果它在低温催化剂上形成,会造成催化剂部分堵塞,增大催化剂压降或造成催化剂失效。

硫酸氢铵的沉积将首先发生在催化剂的空隙里。沉积的过程是可逆的,当运行温度提升到露点以上时硫酸氢铵将蒸发,催化剂活性将恢复,但运行温度长期低于其露点,催化剂活性会永久改变。当出现由于硫酸氢铵的沉积导致的积灰时,建议增加吹灰频率。

氨逃逸量的增加将促进硫酸氢铵的形成。硫酸氢铵在空预器内积累会带来一定的压力损失及热效率损失。烟气经过 SCR 反应器和空预器热段后,排烟温度降低,当温度降至 185 以下时,烟气中已生成的气态硫酸氢铵会在空预器冷段的传热元件上凝固下来,造成空预器冷段积盐与结垢,进而影响空预器的正常运行^[17]。当氨的逃逸量为 1 $\mu\text{L}/\text{L}$ 以下时,硫酸氢铵生成量很少,空预器堵塞现象不明显。测试结果表明,若氨逃逸量增加到 2 $\mu\text{L}/\text{L}$,空预器运行半年后其阻力增加约 30%;若氨逃逸量增加到 3 $\mu\text{L}/\text{L}$,空预器运行半年后阻力增加约 50%,对引风机也会造成较大影响。因此,运行机组装设了 SCR 装置,其空预器在设计和选材上都要采取相应的措施。

3 硫酸氢铵控制

由于催化剂内有大小不同的孔隙以及烟气中 SO_3 和 NH_3 摩尔比的差异,硫酸氢铵的凝聚实际发生在一定的温度范围内。当运行温度在孔隙凝聚温度(在孔隙中凝聚时的温度)和分散凝聚温度(在气相主体中发生冷凝时的温度)之间时,只有小部分催化剂孔隙被硫

酸氢铵堵塞,催化剂稳定状态的活性(催化剂在稳定条件下测得的活性值)取决于温度。当运行温度在分散凝聚温度以下时,催化剂稳定状态的活性为零。运行温度长期低于硫酸氢铵凝聚温度时将导致催化剂活性明显降低,在这种情况下,即使将运行温度升至露点以上也不能完全恢复催化剂的活性。在低于硫酸氢铵露点温度的条件下,连续运行的时间必须控制在 300 h 以内,同时每层催化剂各点的温度必须在 270 以上。

3.1 氨逃逸量控制

140 ~ 230 之间的温区位于空预器常规设计的冷段层上方和中间层下方,由于硫酸氢铵在此温区为液态向固态转变阶段,具有极强的吸附性,会造成大量灰分在空预器沉降,引起空预器堵塞及阻力上升,严重时将使被迫停炉以清理空预器。同时,硫酸氢铵或硫酸铵本身对金属有较强的腐蚀性,会造成催化剂金属支撑架和空预器冷段腐蚀。此外,氨过剩使运行成本提高并导致飞灰化学性质发生改变,飞灰质量变差,再利用价值降低;氨泄漏到大气中又会对大气造成新的污染,因此必须严格控制氨泄漏量,一般要求小于 3 $\mu\text{L}/\text{L}$ 。当反应器入口管道设计不合理时,会引起反应器截面上的 NH_3/NO_x 摩尔比、流量或温度出现偏差,从而造成 NH_3 泄漏以及 NO_x 脱除不完全,影响脱硝效率。

由于燃煤的含硫量决定着烟气中 SO_3 的含量,而 SO_3 的含量对硫酸氢铵的形成有显著影响,所以对于不同的煤种,SCR 中氨逃逸量的控制也不同^[18]:低硫煤(含 S 量为 1%),氨逃逸量 < 6 $\mu\text{L}/\text{L}$;中硫煤(含 S 量为 1.5%),氨逃逸量 < 4 $\mu\text{L}/\text{L}$;高硫煤(含 S 量为 3%),氨逃逸量 < 2 $\mu\text{L}/\text{L}$ 。

在氨逃逸量的控制方面可利用计算流体力学(CFD)软件优化设计,对 SCR 脱硝装置入口烟气流量和流速分布进行模拟,确定导流叶片的类型、数量和位置,使入口烟气流速、温度和浓度均匀;同时模拟氨气的混合,调整喷氨格栅(AIG)各个喷口,使 NH_3 混合均匀,最终减少氨逃逸量。

3.2 SO_2 氧化率控制

SCR 脱硝过程使用的钒基催化剂会对烟气中 SO_2 的氧化产生催化作用,使其易被氧化为 SO_3 。 SO_3 在省煤器段形成硫酸蒸汽,在空预器冷段(温度 177 ~

232) 浓缩成酸雾,腐蚀受热面。在 SCR 反应器出口 SO_3 与逃逸的氨反应生成硫酸氢铵。

在 SO_2 氧化率的控制方面,对于 V_2O_5 类商用催化剂,钒的担载量不能太高,通常控制在 1% 左右可减少 SO_2 氧化^[19]。另外,催化剂的形状会对 SO_2 氧化产生影响,丹麦 Topsøe 公司开发了系列波纹状脱硝催化剂,由于其 V_2O_5 组分含量低,可有效减少 SO_2 氧化率。同时,减少催化剂孔道的壁厚也可降低 SO_2 氧化率。此外,采用提高催化剂活性组分(如 WO_3) 含量,亦可抑制 SO_2 氧化。

3.3 运行温度控制

SCR 脱硝过程需要的温度在 190 ~ 510 之间,但是为了抑制硫酸氢铵的产生通常将温度控制在 260 ~ 316 范围内。硫酸氢铵的露点由 NH_3 、 SO_3 和 H_2O 的分压决定。不同 NO_x 入口浓度条件下, SO_3 浓度对硫酸氢铵露点温度的影响见图 6^[20]。

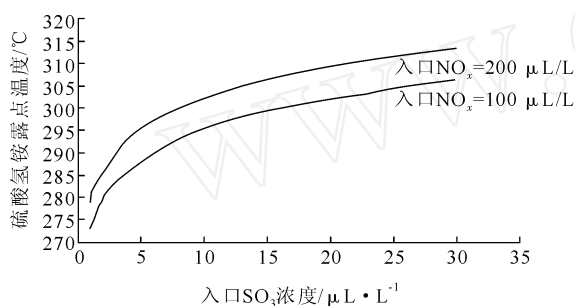


图 6 SO_3 对硫酸氢铵露点温度的影响

硫酸氢铵的形成是可逆的,将温度升高到 316 即可使硫酸氢铵升华。德国和日本最早提出的关于硫酸氢铵结垢的形成与空预器运行时蓄热元件金属壁温的相互关系得到了实际运行经验的验证。在高粉尘的条件下,发生结垢的最大金属壁温比硫酸氢铵的酸露点温度低 4.4^[20]。然而,在低粉尘浓度的条件下发生结垢的温度范围延伸到硫酸氢铵的酸露点温度之上,这种特点使得很大比例的硫酸氢铵沉积在灰粒上,并且随灰粒被带出空预器。若不出现该现象,硫酸氢铵的沉积将扩展到更高的温度区域。此外,飞灰还具有一定的冲刷清洁作用。小于或等于 150 时,硫酸氢铵紧密固化,但可以用吹灰设备清除。正因为如此,在空预器冷段很少见到硫酸氢铵结垢。一般空预器冷段的结垢伴有水蒸气、黏附性飞灰混合物和浓缩的酸性物质。

3.4 空预器改造

硫酸氢铵在空预器的中温段至低温冷段的温度区间具有很强的粘性,容易吸附灰尘堵塞空预器,危及其正常运行,因此必须对空预器进行改造,并且考虑合理的吹灰器的运行方式^[21-23]。

(1) 由于空预器的绝大部分中温段和部分低温冷段处于产生硫酸氢铵堵塞的温度区间,为了避免两段连接间隙内的硫酸氢铵堵塞搭桥可将传统的低温冷段和中温段合并为一段。由于搪瓷传热元件在传热、防腐性能上优于合金钢,价格便宜,因此冷段更换为搪瓷表面传热元件,原高温段传热元件保留使用。

(2) 空预器转子等结构需做一些局部修改:转子内部取消栅架,将横向隔板延伸到冷段,并直接安放加高后的冷段传热元件。

(3) 传热元件表面的光洁度会影响硫酸氢铵的结垢程度,为提高传热元件表面的光洁度,将所用吹灰器由原单介质吹灰器改为双介质(蒸汽、高压水)吹灰器。

4 结 论

为提高 SCR 脱硝工艺脱硝效率, NH_3/NO_x 摩尔比通常控制为大于 1,因此脱硝过程氨逃逸不可避免。SCR 脱硝过程使用的钒基催化剂会对烟气中的 SO_2 产生催化作用,使其易被氧化为 SO_3 。当 NH_3/SO_3 摩尔比大于 2 时,就会产生硫酸氢铵。硫酸氢铵附着于催化剂的表面会阻塞催化剂并影响其活性,且硫酸氢铵的粘性使之易于牢固黏附在空预器蓄热元件的表面,使蓄热元件积灰,空预器流通截面减小、阻力增加以及换热元件的换热效率下降。

可通过控制 SCR 脱硝过程氨逃逸量和烟气中 SO_2 氧化率的方法减少硫酸氢铵的生成量。为防止催化剂因硫酸氢铵的滞留而失去活性,应合理控制 SCR 脱硝装置在低负荷下的运行时间。为有效降低硫酸氢铵在空预器换热元件上的形成速率,可选用搪瓷镀层换热元件。

[参 考 文 献]

- [1] 杨卫娟,周俊虎,等. 选择催化还原 SCR 脱硝技术在电站锅炉的应用[J]. 热力发电, 2005(9): 10-11.
- [2] 杨颢. 氮氧化物减排技术与烟气脱硝工程[M]. 北京:冶金工业出版社, 2007.
- [3] 吴碧君,王述刚,等. 烟气脱硝工艺及其化学反应原理分析[J]. 热力发电, 2006(11): 59-60.

- [4] 范红梅,等. $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ 催化剂氨法 SCR 脱硝反应动力学研究[J]. 燃料化学学报, 2006,34(3):377-380.
- [5] 刘淑娟. 选择性催化还原 SCR 控制 NO_x 排放的机理研究[J]. 杨凌职业技术学院学报,2007,6(3):8-10.
- [6] N Y Topsøe. Catalysis for NO_x abatement[J]. Cattech, 1997(12):125-134.
- [7] ANSTROM M, Topsøe ,DUMESIC J A. Density functional theory studies of mechanistic aspects of the SCR reaction on vanadium oxide catalysts[J]. Journal of Catalysis, 2003,213(2):115-125.
- [8] 王杭州. SCR 对脱硝效率及 SO_2 转化影响分析[J]. 电力科学与工程,2008,24(5):17-19.
- [9] 朱崇兵,金保升,李峰,等. SO_2 氧化对 SCR 法烟气脱硝的影响[J]. 锅炉技术,2008,39(3):68-70.
- [10] Huang Z G,Zhu Z P,Liu Z Y,et al. Formation and reaction of ammonium sulfate salts on V_2O_5/AC catalyst during selective catalytic reduction of nitric oxide by ammonia at low temperatures[J]. J. Catal.,2003,214:213-219.
- [11] J M Bruke, KL Johnson. Ammonium sulfate and bisulfate formation in air preheaters[R]. US EPA 600/7-82-025a, 1982.
- [12] Chetan Chothani, Robert Morey. ABS measurement for SCR NO_x control and air heater protection [C]. 2008 DOE-EPRF-EPA-A & WMA Power Plant Air Pollutant Control "Mega" Symposium. August 25-28, 2008, Baltimore, MD.
- [13] 张强. SCR 控制 NO_x 排放技术在我国应用前景[A]. 全国 NO_x 治理研讨会论文集[C]. 中国环境科学学会,2004.
- [14] Fossil Energy Research Corporation. In Situ Device for Real-Time Catalyst Deactivation Measurements [R]. Final Technical Report :DOE Project 422FC2G05NT4229898 ,Laguna Hills ,California ,May 2007.
- [15] 赵宗让. 电厂锅炉 SCR 烟气脱硝系统设计优化[J]. 中国电力,2005,38(11):69-74.
- [16] 陈海林,宋新南,等. SCR 脱硝性能影响因素及维护[J]. 山东建筑大学学报,2008,23(2):145-147.
- [17] 沈迪新,胡成南. 我国火电厂排放氮氧化物控制技术[J]. 中国环保产业,2005(8):25-27.
- [18] 朱珍平,刘振宇,朱宏贤,等. V_2O_5/AC 催化剂低温催化的 $NO-NH_3-O_2$ 反应—— SO_2 , V_2O_5 负载量和反应温度的影响[J]. 中国科学(B 辑),2000,30(2):154-159.
- [19] Shafiq Ahmad ,et al. Experience with Design ,Installation and Operation of A SCR Unit after A FCCU[C]. Catalyst Technology at Annual NPRA Meeting , March 13-15 , 2005 ,San Francisco ,CA ,USA.
- [20] Louis P Bondurant ,et al. Minimizing the impact of SCR/SNCR retrofits on the Ljungstrom air preheater[R]. ALSTOM Power Air Preheater, Inc. ,Wellsville ,NY,1999.
- [21] Southern Company Service Inc. . Innovative Clean Coal Technology ,Demonstration of Selective Catalytic Reduction (SCR) Technology for the Control of Nitrogen Oxide (NO_x) Emissions from High-Sulfur , Coal-Fired Boilers [R]. DE-FC22-90PC89652 ,March 1996.
- [22] 孙克勤,钟琴,黄丽娜,等. OF^2 -SCR 烟气脱硝技术在改造工程中的应用[A]. 全国电力行业脱硫脱硝技术协作网年会暨技术研讨会论文集[C]. 2007,10.
- [23] 匡国强,徐党旗. 选择性催化还原 (SCR) 脱硝装置对锅炉结构的影响[J]. 热力发电,2006(10):36-39.
- [24] 郝吉明,马广大. 大气污染控制工程[M]. 北京:高等教育出版社,2002.

热力发电投稿须知

1. 论文规格按照科技论文写作格式(GB 7713 - 87);
2. 一般文章字数为 6000 字左右;
3. 论文标题一般不超过 20 个字,并译成英文;
4. 写出 ~ 200 字的内容摘要,并译成英文;
5. 根据核心内容,选择 3 ~ 8 个关键词,并译成英文;
6. 标示各种基金项目或计划项目;
7. 给出作者简介,包括:姓名,出生年,毕业院校、专业,工作单位、职称、职务,在读研究生应注明研读方向、是否在职读研;联系信息:住址、邮编、电话、手机、电子邮箱。
8. 论文发送到《热力发电》网站:www.rlfed.com.cn