

# SCR 催化剂中毒及相关预防措施研究

姚 微\*, 刘小峰, 赵益飞, 王 斌, 刘雪松

(浙江海亮环境材料有限公司, 浙江 诸暨 311814)

**摘要:**从催化剂的碱金属、碱土金属、重金属、卤素、P、H<sub>2</sub>O 及 SO<sub>3</sub> 中毒等方面探讨了 SCR 催化剂的中毒机理。通过分析催化剂的各种中毒机理,提出了有效防止催化剂中毒的措施,从而延长催化剂的使用寿命。

**关键词:**SCR; 催化剂; 中毒; 机理

**中图分类号:**X701.7

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2015)06-0022-04

## Study on SCR catalyst poisoning and its relevant preventive measures

YAO Wei\*, LIU Xiao-feng, ZHAO Yi-fei, WANG Bin, LIU Xue-song

(Zhejiang Hailiang Ecol. Mater. Co., Ltd., Zhuji 311814, China)

**Abstract:** The poisoning mechanisms of SCR catalyst in terms of alkali metal, alkaline earth metal, heavy metal, halogen, P, H<sub>2</sub>O and SO<sub>3</sub> are discussed. Based on the analysis of various poisoning mechanism, some effective measures to prevent poisoning are proposed, which can prolong the service life of the catalyst.

**Key words:** SCR; catalyst; poisoning; mechanism

根据中国电力企业联合会数据,到2015年我国火电总装机容量将达到9.33亿kW。国家政策要求在“十二五”期间,30万kW及以上存量机组将完全实现脱硝改造,而新建机组全部需要安装脱硝装置,可以预计,“十二五”期间燃煤电厂脱硝将率先实现爆发式增长。

催化剂是电厂脱硝SCR系统的重要组成部分,它的性能将直接影响脱硝效果。由于受国内煤质及锅炉的影响,催化剂的化学使用寿命往往达不到国外的标准,通常1~2年就要更换一次,置换费用约占系统总价的60%~70%。因此,催化剂的使用寿命决定着SCR系统的运行成本。影响SCR催化剂使用寿命的因素有很多,如催化剂的生产配方及选型、硬化液的成分及硬化长度、锅炉的运行工况以及烟气中各种有害有毒化学成分等,其中烟气中有害有毒物质对催化剂的化学寿命影响最大。中毒导致催化剂失活,这会使SCR系统过早地更换催化剂,在增加投资成本的同时,也增加了废弃催化剂处置的环境问题。

本文中描述了SCR催化剂的各种中毒现象及相关机理,并在此基础上探讨了防止催化剂中毒的措施。

## 1 碱金属中毒

碱金属是对催化剂毒性最大的一类元素,毒性强度与其碱性大小呈正比<sup>[1]</sup>。煤中碱金属的存在形式有2类:一类是活性碱,如氯化物、硫酸盐及碳

酸盐等;另一类是非活性碱,主要存在于硅酸盐矿物中。生物质燃料由于含有较高的碱金属,因此燃烧或者掺烧生物质燃料锅炉中的催化剂受碱金属中毒的影响更大<sup>[2]</sup>。

碱金属引起催化剂中毒包括物理中毒和化学中毒。物理中毒:因为燃煤锅炉SCR脱硝系统中,碱金属通常不是以液态形式存在,它的盐颗粒只是沉积在催化剂表面或堵塞催化剂的部分孔洞,阻碍NO和NH<sub>3</sub>向催化剂内部扩散,从而使催化剂中毒失活<sup>[3]</sup>。若有水蒸汽在催化剂上凝结,碱金属将引起化学中毒,中毒机理如图1所示。

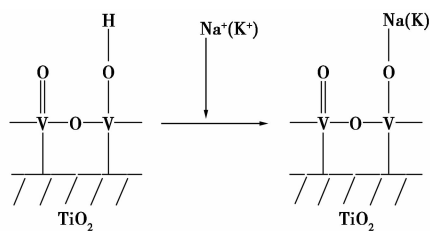


图1 催化剂碱金属中毒

SCR催化剂的活性物质为V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,它既有B酸位(V-OH),又有L酸位(V=O)。研究发现,催化剂活性与B酸位的数量呈正比。碱金属离子的存在会减少催化剂B酸位的数量,生成无活性的KVO<sub>3</sub>;还会降低B酸位的稳定性,使钒和钨的催化还原能力下降<sup>[4]</sup>。B酸位数量的减少和稳定性的降低将直接导致NH<sub>3</sub>及表面氧吸附量的下降,从而使催化剂的活性降低。碱金属对催化剂中毒的影响程度一方

面与碱金属的碱性大小有关,另一方面还与碱金属离子结合的阴离子种类有关<sup>[5]</sup>。

催化剂的碱金属中毒在所难免,但可以采取一些措施来延长催化剂的使用寿命。

具体的措施有:①对催化剂表面引起的碱金属堵塞,可通过及时清灰,保持催化剂表面的清洁来减轻中毒<sup>[6]</sup>;②制备硫酸化 SCR 催化剂,硫酸盐可强化催化剂表面的酸位,还可优先于碱金属反应从而保护活性组分<sup>[7-8]</sup>;③通过改变烟气成分来防止中毒,主要是通过加入 P-K-Ca 混合物,但此种方法若 P 和 Ca 的浓度控制不当,就会引起 P 中毒和 Ca 中毒<sup>[3]</sup>;④相比于传统的  $V_2O_5-WO_3/TiO_2$  催化剂, $V_2O_5-WO_3/ZrO_2$  由于具有较强酸性,表现出较高的抗碱金属中毒能力<sup>[9]</sup>;⑤提高钒负载量,但高钒负载量会使催化剂的选择性下降, $SO_2$  转化率升高,因此需综合考虑<sup>[10]</sup>;⑥相同钒负载量下,提高钨负载量,在增强抗碱金属中毒性能的同时,不会对催化剂选择性产生影响<sup>[10]</sup>;⑦使用整体式蜂窝陶瓷催化剂,因为碱金属离子的流动性可被蜂窝陶瓷催化剂所稀释,从而降低中毒速率。

## 2 碱土金属中毒

生物质燃料以及燃煤烟气飞灰中含有少量的碱

土金属,也能导致催化剂中毒。 $Na_2O$  是中和 B 酸的酸性位,而  $CaO$  只是轻微影响 B 酸的酸性位,且  $Ca^{2+}$  对钒物种的结合程度远远低于  $Na^+$ ,相比碱金属中毒的催化剂,碱土金属中毒的催化剂上的钒物种具有较高的还原性<sup>[11]</sup>。在实际应用中,碱土金属引起的主要问题是生成  $CaSO_4$ ,堵塞催化剂的微孔。该中毒机理为<sup>[12]</sup>: $CaO$  主要富集在粒径小于  $5\ \mu m$  的颗粒上(因为细小的飞灰粒径具有较强的黏附特性),这些细小颗粒易迁移进入催化剂的微孔上,并与烟气中的  $SO_3$  反应形成硫酸钙。由于产生的硫酸钙会使颗粒体积增大 14%,从而把催化剂微孔堵死,使得  $NH_3$  和  $NO$  无法在催化剂微孔内进行 SCR 反应。

碱土金属主要富集在细小飞灰上,因此,只要能够保证催化剂表面的清洁度,就能防止碱土金属中毒。目前防止这种黏性飞灰的措施有<sup>[13-14]</sup>:①通过数值模拟与物理模型试验优化烟气流场,提高催化剂内的烟气流速;②改进反应器,反应器采用垂直放置,使烟气由上而下流动;③保证吹灰器正常运行和吹灰效果,并适当增加吹灰频率;④设置灰斗,降低进入催化剂区域烟气的飞灰量;⑤选用节距相对较大的催化剂,并增加催化剂表面的光滑度,从而减缓飞灰在催化剂表面的沉积;⑥选择合适的催化剂量,

(上接第 21 页)

- [16] Chen L, Li J H, Ge M F, *et al.* Enhanced activity of tungsten modified  $CeO_2/TiO_2$  for selective catalytic reduction of  $NO_x$  with ammonia[J]. *Catalysis Today*, 2010, 153(3/4): 77-83.
- [17] Liu Z M, Zhang S X, Li J H, *et al.* Promoting effect of  $MoO_3$  on the  $NO_x$  reduction by  $NH_3$  over  $CeO_2/TiO_2$  catalyst studied with in situ DRIFTS[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2014, 144: 90-95.
- [18] 任晓光, 任超, 李富霞, 等.  $Fe_2O_3-Cr_2O_3/TiO_2$  系列催化剂的结构和脱硝性能[J]. *环境工程学报*, 2012, 6(9): 3219-3222.
- [19] 郭静, 李彩亭, 路培, 等.  $CeO_2$  改性  $MnO_x/Al_2O_3$  的低温 SCR 法脱硝性能及机制研究[J]. *环境科学*, 2011, 32(8): 2240-2246.
- [20] 王学涛, 焦叶凡, 庄沙丽, 等. 蜂窝状  $CuO/\gamma-Al_2O_3$  催化剂表征及其烟气脱硝性能研究[J]. *热力发电*, 2014, 43(2): 30-35.
- [21] Shen Y S, Zhu S M, Qiu T, *et al.* A novel catalyst of  $CeO_2/Al_2O_3$  for selective catalytic reduction of  $NO$  by  $NH_3$ [J]. *Catalysis Communications*, 2009, 11: 20-23.
- [22] 周愉千, 刘超, 宋鹏, 等.  $CeO_x/AC$  催化剂  $NH_3$  选择性催化还原  $NO$ [J]. *环境工程学报*, 2012, 6(8): 2720-2724.
- [23] 楚英豪, 王泽天, 姚远, 等.  $Mn-Ce/AC$  催化剂低温  $NH_3$  选择性催化还原  $NO$  的性能[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2013, 45(3): 127-132.
- [24] Gao X, Liu S J, Zhang Y, *et al.* Low temperature selective catalytic reduction of  $NO$  and  $NO_2$  with  $NH_3$  over activated carbon-supported vanadium oxide catalyst[J]. *Catalysis Today*, 2011, 175(1): 164-170.
- [25] Lu P, Li C T, Zeng G M, *et al.* Low temperature selective catalytic reduction of  $NO$  by activated carbon fiber loading lanthanum oxide and ceria[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2010, 96(1/2): 157-161.
- [26] 厉励, 黄华存, 书藤幼, 等.  $CeO_2$  的添加对  $MnO_x/ACFN$  催化剂脱除  $NO_x$  性能影响[J]. *化工进展*, 2013, 32(11): 2655-2660.
- [27] 郑玉婴, 徐哲, 张延兵, 等.  $Mn-Fe/ACF$  催化剂低温选择性催化还原  $NO$ [J]. *功能材料*, 2014, 45(20): 20142-20145.
- [28] 白书立, 赵江红, 王丽, 等.  $V_2O_5/CNTs$  催化剂低温  $NH_3$  选择性催化还原  $NO$  的研究[J]. *燃料化学学报*, 2009, 37(5): 583-587.
- [29] Wang L S, Huang B C, Su Y X, *et al.* Manganese oxides supported on multi-walled carbon nanotubes for selective catalytic reduction of  $NO$  with  $NH_3$ : Catalytic activity and characterization[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 192: 232-241.
- [30] Wang X, Zheng Y Y, Lin J X. Highly dispersed  $Mn-Ce$  mixed oxides supported on carbon nanotubes for low-temperature  $NO$  reduction with  $NH_3$ [J]. *Catalysis Communications*, 2013, 37: 96-99. ■

增加催化剂的体积和表面积;⑦混煤掺烧,当煤中 CaO 和  $\text{As}_2\text{O}_3$  同时存在时,这 2 种物质会生成热稳定性非常高的  $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ ,且不会导致催化剂中毒。

### 3 重金属中毒

催化剂重金属中毒的元素主要有砷、铅、汞、锌等。煤中的砷多数以硫化砷或硫砷铁矿( $\text{FeS}_2 \cdot \text{FeAs}_2$ )等形式存在,且含量变化比较大,我国煤中砷的含量为  $0.5 \times 10^{-6} \sim 80 \times 10^{-6}$  不等,而铅、汞、锌等主要是由垃圾焚烧产生。重金属元素主要分布在电除尘器飞灰和烟气中,且含量与灰飞的粒度呈反比。

砷中毒是由气态砷的化合物(主要形态为  $\text{As}_2\text{O}_3$ )不断聚积,堵塞进入催化剂活性位的通道造成的。经研究,气态  $\text{As}_2\text{O}_3$  分子远小于催化剂的微孔尺寸,可以进入催化剂微孔发生凝结形成一个砷的饱和层,该饱和层几乎没有活性,从而阻挡了反应物扩散到催化剂内部进行催化反应<sup>[15]</sup>。As 对催化剂表面的酸性位有一定影响,而对酸的强度和催化反应途径的影响不显著,其中毒机理如图 2 所示。砷中毒会使钒物种出现多样化,但 W 和 Ti 的化学形态不受影响,说明催化剂表面钒形态的改变是导致催化剂活性降低的一个主要原因<sup>[16]</sup>。

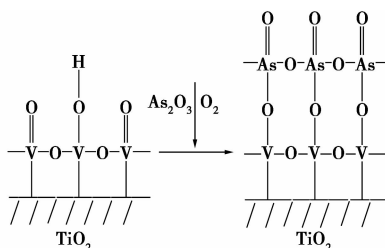


图 2 催化剂砷中毒

铅中毒可能是由于毒物在催化剂酸性位上与  $\text{NH}_3$  的竞争性化学吸附导致,而不是由催化剂微孔堵塞引起<sup>[5]</sup>。研究发现,  $\text{PbO}$  对催化剂脱硝活性的影响介于  $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  之间,且不同形态的铅的沉积对催化剂的毒性影响不同,  $\text{PbCl}_2$  比  $\text{PbO}$  的毒性更强<sup>[5,17]</sup>。

目前防止重金属中毒的措施有:①采用物理化学方法减少原煤中的重金属含量;②燃烧过程中,向炉内喷钙(石灰石、白云石及高岭土等添加剂)抑制气态砷的形成<sup>[18]</sup>;③改变催化剂表面的酸位点,使催化剂对重金属不具有活性;④采用钒和钼的混合氧化物制得的  $\text{TiO}_2\text{-V}_2\text{O}_5\text{-MoO}_3$  催化剂具有较强的

抗砷中毒能力<sup>[19]</sup>;⑤优化催化剂的孔结构,减少毒物的沉积;⑥使用蜂窝式催化剂可有效降低表面重金属的浓度;⑦降低反应炉温度,用除尘器捕集自然凝聚成核的气态 As。

### 4 卤素中毒

一般焚烧垃圾的电厂,产生的灰除含有大量的重金属、碱金属外,还有卤化氢。当烟气温度低于  $340^\circ\text{C}$  时,  $\text{HCl}$  会与  $\text{NH}_3$  反应生成  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,黏附在催化剂表面,导致活性位的表面积降低;另外,氯离子还会与钒结合生成挥发性的  $\text{VCl}_2$  和  $\text{VC}_{14}$ ,从而使活性物质钒流失<sup>[17]</sup>。不仅如此,  $\text{HCl}$  还能够与一些金属氧化物(碱金属或重金属)反应生成盐,如  $\text{KCl}$  和  $\text{PdCl}_2$ ,生成的盐的毒性比单独的碱金属或重金属氧化物的毒性要大<sup>[1,5]</sup>。

要防止卤素中毒,就要防止  $\text{NH}_4\text{Cl}$  在催化剂表面的黏附和挥发性氯化钒的生成,前者可以通过控制烟气温度避免发生,后者则可通过增加催化剂的活性物质钒含量来延缓中毒的速率。

### 5 P 中毒

有时电厂为了降低成本,会掺烧一些污泥和肉骨粉,这样就会释放出大量的挥发性磷化合物。研究发现,磷化合物(如  $\text{H}_3\text{PO}_4$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  及磷酸盐)对催化剂有钝化作用,但相比碱金属的影响要小很多。磷中毒机理被认为是 P 取代了  $\text{V-OH}$  和  $\text{W-OH}$  中的 V 和 W,生成了  $\text{P-OH}$  基团,由于  $\text{P-OH}$  的酸性不如  $\text{V-OH}$  和  $\text{W-OH}$ ,从而对  $\text{NH}_3$  的吸附能力下降,进而降低了脱硝活性;另外, P 也可以和催化剂表面的  $\text{V=O}$  活性位发生反应,生成  $\text{VOPO}_4$  等物质,从而减少了活性位的数量<sup>[20]</sup>。也有研究者认为磷化合物的形成以及孔凝聚是造成 SCR 催化剂中毒的原因<sup>[21]</sup>。

少量磷中毒对催化剂的活性影响不大,但为了避免大量磷中毒,可以从降低燃料中 P 含量、保持催化剂清洁度以及使用抗磷中毒的催化剂配方等方面考虑。

### 6 $\text{H}_2\text{O}$ 中毒

在实际应用中,烟气中含有 2% ~ 18% 的水蒸汽。当反应温度低于  $350^\circ\text{C}$  时,由于水在活性位上与  $\text{NH}_3$  发生竞争吸附,对催化剂 NO 的还原活性具有一定的抑制作用;而当反应温度较高时, NO 转化率几乎不受水含量的影响<sup>[5]</sup>。水蒸汽若在催化剂

表面凝结,一方面会加剧碱金属可溶性盐对催化剂的毒化,另一方面凝结在催化剂毛细孔中的水蒸气会气化膨胀,损害催化剂细微结构。

一般催化剂水中毒主要发生在停炉过程中,因此在停炉阶段做好催化剂的防水中毒至关重要。

## 7 SO<sub>3</sub> 中毒

研究发现,当催化剂上 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的负载量少于单层覆盖所需量的一半时,SO<sub>2</sub> 的出现对催化剂的活性具有促进作用,这是因为 SO<sub>2</sub> 促进了催化剂表面 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的形成,从而加强了表面 B 酸性位的酸性<sup>[22]</sup>;而当催化剂上 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的负载量大于单层覆盖所需量的一半时,SO<sub>2</sub> 对催化剂的活性没有影响。

烟气中的 SO<sub>2</sub> 一旦被催化氧化为 SO<sub>3</sub>,就会和烟气中的水蒸汽、NH<sub>3</sub> 及金属氧化物反应,生成一系列的硫酸铵盐[(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和 NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub>]和硫酸盐。这些硫酸铵盐和硫酸盐颗粒会造成催化剂大孔道堵塞、微孔消失及总孔容下降<sup>[23]</sup>。

由于 SO<sub>3</sub> 中毒生成的盐受温度影响明显,因此可以通过升高 SCR 反应温度(至少要高于 300℃)来降低催化剂表面的硫酸铵盐和硫酸盐堵塞,从而使中毒作用减弱。另外对于 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 类催化剂,钒的担载量不能太高,通常在 1% 左右以防止 SO<sub>2</sub> 的氧化。

## 8 结语

SCR 催化剂中毒是烟气脱硝过程中的关键问题。引起催化剂中毒的原因有很多,但中毒往往不是受某一因素影响,而是受各种因素互相影响的结果。烟气中的有害组分对催化剂作用的机理复杂且有些尚不明确,因此,研究催化剂的各种中毒机理及预防措施对延长催化剂寿命具有重要意义。

### 参考文献

[1] Lisi L, Lasorella G, Malloggi S, *et al.* Single and combined deactivating effect of alkali metals and HCl on commercial SCR catalysts [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2004, 50(4): 251 - 258.

[2] 云端, 邓斯理, 宋蕾, 等. V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 系 SCR 催化剂的钾中毒及再生方法[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(6): 730 - 735.

[3] Castellino F, Jensen A D, Johnsson J E, *et al.* Influence of reaction products of k-getter flue additives on commercial vanadia-based SCR catalysts part II: Simultaneous addition of KCl, Ca(OH)<sub>2</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> in a hot flue gases at a SCR pilot-scale setup[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2008, 86(3/4): 206 - 215.

[4] Liang Chen, Junhua Li, Maofa Ge. The poisoning effect of alkali

metals doping over nano V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> catalysts on selective catalytic reduction of NO<sub>x</sub> by NH<sub>3</sub>[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 170: 531 - 537.

[5] 姜焯. 钨基 SCR 催化剂及其钾、铅中毒机理研究[D]. 杭州: 浙江大学能源工程学系, 2010.

[6] 王静, 沈伯雄, 刘亭, 等. 钒钛基 SCR 催化剂中毒及再生研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(9): 97 - 101.

[7] Kustov A L, Rasmussen S B, Fehrmann R, *et al.* Activity and deactivation of sulphated TiO<sub>2</sub>- and ZrO<sub>2</sub>-based V, Cu, and Fe oxide catalysts for NO abatement in alkali containing flue gases[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2007, 76(1/2): 9 - 14.

[8] 云端, 邓斯理, 宋蕾, 等. V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 系 SCR 催化剂的钾中毒及再生方法[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(6): 730 - 735.

[9] Due-Hansen J, Kustov A L, Rasmussen S B, *et al.* Tungstated zirconia as promising carrier for DeNO<sub>x</sub> catalysts with improved resistance towards alkali poisoning[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2006, 66(3/4): 161 - 167.

[10] 石晓燕, 丁世鹏, 贺泓, 等. 改进钒基 SCR 脱硝催化剂的抗碱金属中毒性能[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(5): 2031 - 2034.

[11] Fushun Tang, Bolian Xu, Haihua Shi, *et al.* The poisoning effect of Na<sup>+</sup> and Ca<sup>2+</sup> ions doped on the V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub> catalysts for selective catalytic reduction of NO by NH<sub>3</sub>[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2010, 94: 71 - 76.

[12] Benson S A, Laumb J D, Crocker C R, *et al.* SCR catalyst performance in flue gases derived from subbituminous and lignite coals [J]. *Fuel Processing Technology*, 2005, 86(5): 577 - 613.

[13] 孙海峰, 杨广春, 高景玉. 延长 SCR 脱硝催化剂使用寿命的措施探讨[J]. *华电技术*, 2009, 31(12): 19 - 25.

[14] 强华松, 刘清才. 燃煤电厂 SCR 脱硝催化剂的失活与再生[J]. *材料导报*, 2008, 22(s3): 285 - 287.

[15] 孙克勤, 钟秦, 于爱华. SCR 催化剂的砷中毒研究[J]. *中国环保产业*, 2008, (1): 40 - 42.

[16] 阮东亮, 盘思伟, 韦正乐, 等. 砷对商业 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 催化剂脱硝性能的影响[J]. *化工进展*, 2014, 33(4): 925 - 929.

[17] 云端, 宋蕾, 姚强. V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> SCR 催化剂的失活机理及分析[J]. *煤炭转化*, 2009, 32(1): 91 - 96.

[18] 沈伯雄, 施建伟, 杨婷婷, 等. 选择性催化还原脱氮催化剂的再生及其应用评述[J]. *化工进展*, 2008, 27(1): 64 - 67.

[19] 张焯, 徐晓亮, 廖明烽. SCR 脱硝催化剂失活机理研究进展[J]. *能源环境保护*, 2011, 25(4): 14 - 18.

[20] 商雪松, 陈进生, 赵金平, 等. SCR 脱硝催化剂失活及其原因研究[J]. *燃料化学学报*, 2011, 39(6): 465 - 470.

[21] Beck J, Muller R, Brandenstein J, *et al.* The behaviour of Phosphorus in flue gases from coal and Secondary fuel combustion[J]. *Fuel*, 2005, 84(14/15): 1911 - 1919.

[22] 杜振, 付银成, 朱跃. V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub> 催化剂中毒机理的试验研究[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(1): 216 - 223.

[23] 盘思伟, 韦正乐, 赵宁. 火电厂 SCR 脱硝催化剂中毒原因分析[J]. *工业催化*, 2013, 21(1): 70 - 73. ■