

Effects of Promoters and Active Components on Performance of Honeycomb SCR De-NO_x Catalysts

Chu Yuan¹, Shao-guang Liu^{1,2}, Jin-peng Sang¹, Ru-hong Song³, Cheng-wu Chen²,
Jin-ming Wu⁴

¹ College of Material Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, China, 212003

² Zhejiang Cadre New Material CO. LTD., Wenzhou, China, 325029

³ Hefei University of Technology, Hefei, Anhui, China, 230009

⁴ Materials and Science Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, China, 310027

Email: yuanchu0910@163.com, lsg1526@126.com

Abstract: Selective Catalytic Reduction (SCR) technique is a main method to deal with the nitrogen oxides generated by Coal-fired power plants at present. The catalyst is the key of the whole SCR system which could be produced in many forms for different requirements, while the form of honeycomb has been widely used due to its unique structural performance and higher De-NO_x efficiency. In this paper the chemical reaction principle of SCR method and types of the SCR catalyst are summarized. The industrial production process of honeycomb SCR catalyst as well as all kinds of the promoters and active components with the influences to forming and catalytic properties are emphatically demonstrated. Finally the poisoning reasons of the catalyst and the regeneration methods are described.

Key words: SCR; Denitration catalyst; Nitrogen oxides; Poisoning; Regeneration

助剂与活性组份对 SCR 脱硝催化剂性能的影响

袁 处¹, 刘少光^{1,2}, 桑劲鹏¹, 宋汝鸿³, 陈成武², 吴进明⁴

¹ 江苏科技大学, 材料科学与工程学院, 江苏镇江, 中国, 212003

² 浙江科得力新材料有限公司, 浙江温州, 中国, 325029

³ 合肥工业大学, 安徽合肥, 中国, 230009

⁴ 浙江大学, 材料系, 浙江杭州, 中国, 310027

Email: yuanchu0910@163.com, lsg1526@126.com

摘 要: SCR (Selective Catalytic Reduction, 选择催化还原) 脱硝技术是目前处理火电厂产生的氮氧化物的一种主要方法。催化剂是整个 SCR 体系的核心, 可根据需要将其制成各种形状, 而蜂窝状 SCR 催化剂以其独特的结构性能和较高的脱硝率被广泛应用。本文综述了 SCR 反应原理和 SCR 催化剂类型, 着重论述工业蜂窝状 SCR 催化剂的生产工艺特点以及各种助剂和活性组分对催化剂成型性能和催化性能的影响, 并阐述了 SCR 催化剂的中毒原因及再生方法。

关键词: SCR; 脱硝催化剂; 氮氧化物; 中毒; 再生

0 引言

氮氧化物(主要指 NO 和 NO₂)是造成大气污染的主要物质之一, 它不仅可引起酸雨、光化学烟雾等生态问题, 而且还严重危害人们的生命健康, 所以治理氮氧化物就显得至关重要。SCR (Selective Catalytic Reduction, 选择催化还原) 烟气脱硝技术是目前应用最为广泛的烟气处理方法, 具

有脱硝效率高(90%以上)、适应温度区间广(300~450℃)、二氧化硫转化率(≤1%)等特点。在整个 SCR 体系中, 催化剂是核心, 占整个成本的 20%~40%^[1~5]。SCR 催化剂可根据需求将其制作成各种形状, 其中蜂窝状催化剂以其独特的结构特点和较高的脱硝效率, 在整个脱硝行业中被广泛应用^[6~8], 但其配方、生产工艺等关键技术都掌握在一些发达国家手中。所以本文对蜂窝状 SCR 催化剂的生产工艺、各种活性物质的作用以及成型过程中所添加的各种助剂的用途进行分析, 并对催化剂在使用过程中

基金项目: 国家科技创新基金资助项目 (09C2621330119);
浙江省温州市鹿城科技局资助项目 (G070224)

所遇到的一些问题进行阐述, 希望为脱硝催化剂的国产化提供帮助。

1 SCR 的概况

1.1 SCR 反应原理

SCR (Selective Catalytic Reduction, 选择催化还原) 脱硝技术是催化剂在含氧气氛中, 以氨、尿素或碳氢化合物等作为还原剂, 将烟气中 NO_x 还原为 N_2 和 H_2O 的一种烟气处理方法; 反应温度为 $300\sim 450^\circ\text{C}$ 时, 脱硝效率可达 $70\sim 90\%$ 。图 1.1 是以氨为还原剂的 SCR 化学反应原理图。其原理首先由 Engelhard 公司发现并于 1957 年申请专利, 而在日本率先得到发展应用。SCR 法具有反应温度较低, 净化率高, 技术成熟, 运行可靠, 二次污染小等优点。[6, 9~12]

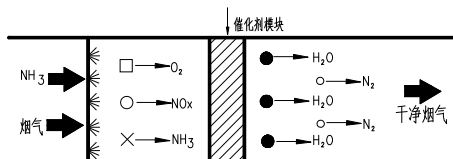


Fig.1.1 Chemical reaction principle of SCR
图 1.1 SCR 化学反应原理

1.2 SCR 脱硝催化剂的类型

SCR 脱硝催化剂经历了从贵金属到金属氧化物的过程。贵金属催化剂是研究相对较早的一类 SCR 催化剂, 它是以 Pt, Pd, Rh 等贵金属作为活性组分, 将其负载到氧化铝、氧化硅、沸石分子筛等载体上得到; 最初被用来处理汽车尾气, 但由于其代价过高, 所以慢慢推出历史的舞台。金属氧化物催化剂主要包括: TiO_2 , V_2O_5 , WO_3 , CuO , MoO_3 , Al_2O_3 等金属氧化物或其混合物, 通常是以 TiO_2 , Al_2O_3 , SiO_2 等作为载体, 将其它活性组分负载其上得到[6,14]。现在商用催化剂主要是金属氧化型。

商用 SCR 催化剂可以根据实际需要, 制成平板式、波纹板式和蜂窝状等不同形状。图 1.2 为 SCR 催化剂形状图。这三种类型催化剂的平行通道有利于飞灰的通过, 具有开口面积大, 压降小, 不易堵塞等优点。蜂窝状 SCR 脱硝催化剂和其它两种形式催化剂相比, 具有选择性好, 催化效率高, 工艺成

熟等优点, 所以在国内外得到广泛应用[8,12,14]。

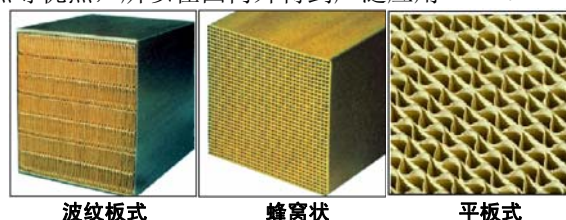


Fig.1.2 Shapes of SCR catalyst
图 1.2 SCR 催化剂的形状

2 催化剂生产工艺及各种助剂的作用

2.1 蜂窝状 SCR 催化剂的生产工艺

目前商业中广泛应用的蜂窝状 V_2O_5 - WO_3 - MoO_3 / TiO_2 基 SCR 催化剂的生产工艺: 按照一定比例, 将纳米二氧化钛、粘结剂、润滑剂、钼酸铵、造孔剂、增强剂等混合机中进行干粉混合; 混合均匀后, 加入钨酸铵和偏钒酸铵的草酸溶液和一定量的去离子水再进行湿混; 充分混合均匀后, 将混合后的坯料密封陈腐一段时间; 陈腐后的物料在真空捏合机中进行真空捏合; 将捏合后的膏状物料在真空挤出机中挤出, 生成具有一定机械强度的蜂窝状生坯; 生坯再经过低温干燥和高温焙烧, 最后生成具有催化性能的蜂窝状催化剂。[14~17]

2.2 各种活性组份的作用

蜂窝状 SCR 催化剂中各种活性组份对催化脱硝性能和成型性能都有重要影响。在对 V_2O_5 - WO_3 - MoO_3 / TiO_2 基 SCR 催化剂的讨论分析基础上, 着重论述各种活性组份在催化剂生产和应用过程中所起的作用和控制的要点。

(1) V_2O_5 : V_2O_5 是 SCR 催化剂中主催化剂, 通常含量在 1%以内 (质量分数), 这是因为 V_2O_5 能将烟气中的 SO_2 氧化成 SO_3 , 生成的 SO_3 可以和烟气中的氨和水反应生成硫酸氢铵, 沉积在催化剂表面和后续的设备上, 从而造成催化剂活性位遮蔽和设备腐蚀。因此, 钒的担载量不能过大[14,18]。

(2) TiO_2 : 以锐钛矿型纳米 TiO_2 作为载体, 首先是因为 V_2O_5 在 TiO_2 的表面有很好的分散度, 所以在其上担载 V_2O_5 所获得的催化活性最高; 其次, 催化剂可以将烟气中的 SO_2 氧化生成 SO_3 , 而 SO_3 和烟气中的 H_2O 反应生成硫酸盐, 这对整个脱硝系统是不利的, 但在 TiO_2 作为载体的条件下其反应很弱且可逆

[15,19]。

(3) WO_3 : 三氧化钨的含量较大, 大约占催化剂总量的 10%(质量分数), 其主要作用是增加催化剂的活性和热稳定性。朱崇兵等^[20]研究 WO_3 对 $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ 脱硝催化剂抗毒性的影响, 发现添加 WO_3 后, K_2O 对催化剂的中毒作用明显减弱, 这归结为 WO_3 较强的 Brønsted 酸性对催化剂性能的促进作用。综合分析认为在 $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ 催化剂上添加 10% 左右的 WO_3 , 抗中毒性能较好。

(4) MoO_3 : 在 SCR 反应中, 加入 MoO_3 能提高催化剂的活性并能防止烟气中的 As 中毒, 但是 MoO_3 防治 As 中毒的机理目前还不清楚。Luis. J. Aleman 等人研究 MoO_3 对 $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ 的影响, 结果发现 MoO_3 可提高催化剂的热稳定性, 改善 V_2O_5 和 TiO_2 之间的电子作用, 提高催化剂的活性、选择性和稳定性^[21, 22]。

(5) 草酸溶液: 钨酸铵和偏钒酸铵作为活性组分 WO_3 和 V_2O_5 的前驱体加入 TiO_2 粉体中, 为了能让它们在催化剂中均匀分散, 所以通常将它们加热溶解于草酸溶液中。

(6) 其他物质: 为了提高 SCR 催化剂的热稳定性, 现在许多研究人员在 V-W-Ti 系 SCR 催化剂中加入稀土元素来提高其热稳定性能。Marzia Casanova 等研究 $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2\text{-WO}_3\text{-SiO}_2$ 催化剂中加入一定量稀土元素(La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd 等), 结果表明, 稀土元素的加入可以提高 SCR 催化剂的热稳定性, 即使加热到 1024K, 催化剂仍有很高的脱硝效率, 而没有加稀土元素的催化剂在该温度下已失去催化能力^[18]。

2.3 各种助剂的作用

TiO_2 是一种瘠性物质, 成型性能差, 所以为了制备具有一定形状、机械强度、比表面积和活性的蜂窝状催化剂, 常需添加各类助剂, 如粘结剂、润滑剂、造孔剂和增强剂等。助剂的种类、规格、加入量和工艺性不仅直接影响催化剂的制备工艺性能而且对催化剂的使用性能也产生重要影响。

(1) 水: 水是 SCR 蜂窝状催化剂成型过程中加入量最大的助剂, 它会在催化剂粉体表面形成液膜, 提高粉体间的润滑程度, 并在粘结剂和润滑剂的作用下改善粉体间的结合能力, 得到塑性物料。水的加入量一般控制在 20~30ml/100g 催化剂粉体^[14], 若加入量过大, 则干燥热耗大, 且易出现变形、开裂等缺陷; 加入量过少, 粉体不能被充分润湿, 成型性

能较差。它在成型过程中分步加入: 一部分水用于配制草酸溶液, 溶解偏钒酸铵和钨酸铵; 另一部分在成型过程中根据物料的实际情况加入。

(2) 粘结剂: 粘结剂以固体形式加入, 不仅在混合过程中与水作用会形成胶状物, 而且又在捏合过程中会在 TiO_2 粉体表面形成粘性薄膜, 将润湿的催化剂粉体粘结在一起, 提高颗粒间的粘结强度; 锻烧后有机粘结剂分解, 但催化剂此时已经具有较好的机械强度。常用的粘结剂有羧甲基纤维素钠(CMC)、聚乙烯醇(PVA)、羟甲基纤维素、甲基纤维素(MC)和磷酸等。粘结剂的用量一般控制在 5%(质量分数)以内。张润铎等^[23]用磷酸作粘结剂, 采用蜂窝状筛网担载 $\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3\text{-TiO}_2$ 研究 NH_3 选择催化还原氧化氮, 结果表明, 在催化剂中加入 2%(wt) 的磷酸时具有良好的粘结性能; 2%-4% 磷酸的加入有助于提高催化剂的催化活性; 但磷酸的添加量大于 4% 时将导致 NO 转化率降低。

(3) 润滑剂: 润滑剂的作用是通过润湿粉料颗粒表面, 降低粉料颗粒之间以及粉料颗粒与模具内壁间的磨擦作用, 从而提高粉料颗粒的流动性和压制坯体的密度及密度分布, 有利于坯料的成型加工。通常所用的润滑剂有丙三醇、乙醇胺、皂化液等。

(4) 造孔剂: 为了改善催化剂的孔结构, 提高催化剂的比表面积, 所以在成型过程中, 需给催化剂中添加适当的造孔剂。造孔剂在锻烧过程中会在催化剂中产生孔洞, 从而改善催化剂的孔结构及比表面积。如果造孔剂加入量太少, 则孔结构改善不明显; 若造孔剂用量过高, 则会使成型催化剂的机械性能下降, 所以通常加入 1% 左右。常用的造孔剂为活性炭粉体, 而且粉体的粒度越小越好, 这样才不至于影响催化剂的机械性能。

(5) 增强剂: TiO_2 基蜂窝状 SCR 催化剂的机械强度较差, 所以常添加增强剂来提高催化剂的机械性能。常用的增强剂有玻璃纤维、硅胶、氧化铝、二氧化硅等。东南大学李锋^[14]在蜂窝状 SCR 催化剂中分别添加粒径为 300 目的粉状玻璃纤维和长度为 0.2~0.3mm 的杆状玻璃纤维, 通过实验对比得出, 杆状玻璃纤维增强效果较好, 而且玻纤加入量为 10g/100g 催化剂粉体时, 催化剂有很好的机械性能。

(6) 固化剂: 虽然经过焙烧的催化剂有一定的机械强度, 但电厂烟气中含有大量的粉尘颗粒, 它们对催化剂磨损很严重, 所以在工业生产中常给催化剂进

口端头涂刷耐磨层,耐磨层固化干燥后,就在催化剂顶端形成一层坚硬的耐磨保护层保护催化剂^[24]。常用的耐磨层主要成分为磷酸二氢铝基涂料。

3 SCR 催化剂的失活与再生

蜂窝状 SCR 催化剂虽然得到广泛应用,但在实际应用过程中,还存在许多问题,有待于改进提高,其最主要的问题就是催化剂的失活和催化剂的再生。

3.1 SCR 催化剂失活

催化剂失活主要是由于催化剂的高温烧结、磨蚀、催化剂中毒以及飞灰堵塞等引起的。它们使催化剂的比表面积降低,机械强度下降,活性位减少,从而使催化剂失活^[25~28]。

催化剂长期工作在高温环境下,容易产生催化剂烧结。催化剂中的 TiO_2 在高温中经过一系列的物理化学性质变化发生聚并,结果使催化剂的比表面积降低,孔隙率下降,从而使催化剂的脱硝效率下降。催化剂的磨蚀主要是由高温烟气造成的,在连续的烟气冲刷下,催化剂被一层一层地剥落,从而使催化剂强度下降,活性组分流失,最终使催化剂寿命缩短。催化剂中毒主要包括碱金属(K, Na)中毒和砷中毒。碱金属中毒是因为碱金属和催化剂活性位发生反应,使催化剂活性丧失,从而使催化剂中毒;砷中毒则主要是由于烟气中的气态 As_2O_5 吸附在催化剂的活性位上,阻碍催化剂与烟气中的反应相接触,从而阻碍催化反应的进行。飞灰堵塞主要是由于烟气中的小颗粒灰尘和二次污染产物碳酸氢铵造成的,它们通过扩散沉积到催化剂的小孔里,阻碍催化剂与烟气成份的接触,使催化反应难以进行;而且飞灰堵塞还增大系统的压降,这对 SCR 系统是极为不利的。^[29~32]

3.2 SCR 催化剂的再生

SCR 系统中,催化剂是核心,约占脱硝系统总成本的 20~30%,为了降低成本,最大限度地利用资源、减少污染,对失效的催化剂进行再生处理,使它们可以得到重复利用,具有重要的意义。

目前国际上采用的催化剂再生工艺:首先,将失效的催化剂用去离子水清洗去除一部分可溶物和大颗粒物,然后用超声波震荡清洗进一步去除可溶性物质,再用水溶液浸泡使催化剂活性位复活,最

后再经过干燥和焙烧处理得到再生后的催化剂^[33]。工艺过程中,根据催化剂的中毒情况不同,水溶液浸泡时可以选择用酸溶液或活性组分溶液。当催化剂碱金属(K, Na)中毒时,可以先用去离子水清洗后,然后再用一定浓度的硫酸溶液浸泡即可,或直接用硫酸溶液浸泡。而对于活性组分减少的催化剂,则需用活性组分溶液浸泡得到再生^[34~36]。Raziyeh Khodayari^[37,38]等通过对钾中毒的催化剂进行再生研究,结果表明用 0.5mol/L 的硫酸溶液对催化剂再生处理,可以得到原来催化剂 92%的效率,而用水洗效果不太明显。

4 结束语

本文对蜂窝状 SCR 催化剂的生产工艺、各种助剂和活性组分对催化剂的成型性能和脱硝性能的影响以及催化剂失效原因和再生技术分别进行了阐述。虽然 SCR 催化剂生产工艺技术成熟,但这些都掌握在发达国家,而且催化剂使用过程中所面临的失效和再生等问题,目前在国内外还没有较好的解决方法,所以这就要求我们催化剂工作者加快科研速度尽快解决这些难题,为蜂窝状 SCR 国产化和科学的进步做出贡献。

References (参考文献)

- [1] R.Willi, M. Maciejewski, et al. Selective Reduction of NO by NH_3 over Chromic on Titanium catalyst Investigation and Modeling of the Kinetic Behavior [J]. Journal of catalyst, 1997, 166:356-367
- [2] Pio Forzatti. Present status and perspectives in de- NO_x SCR catalysis [J]. Applied Catalyst A, 2001, 222:221-236
- [3] Dong Yang, Junhua Li, Mingfen Wen, Chongli Song. Selective catalytic reduction of NO_x with methane over indium supported on tungstated zirconia[J]. Catalysis Communication, 2007, 8:2243-2247
- [4] Ha Heon Phil, Maddigapu Pratap Reddy, Pullur Anil Kumar. SO_2 resistant antimony promoted $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ catalyst for NH_3 -SCR of NO_x at low temperatures [J]. Applied Catalysis B, Environmental 2008, 78:301-308
- [5] Yali Deng. Application Status and Development Prospect of SCR Technology for Coal-fired Power Plant in China [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2008, 34:14-15
邓雅莉.中国燃煤电厂 SCR 技术的应用现状和发展[J]. 工业安全和环保,2008, 34:14-15
- [6] Tao Zhou, Shaoguang Liu, Mingzao Tang, et al. Research progress on selective catalytic reduction de- NO_x catalysts [J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2009, 2:317-323
周涛,刘少光,唐明早,等.选择性催化还原脱硝催化剂研究进展[J].硅酸盐学报.2009, 2:317-323
- [7] Motonobu Kobayashi, Ryoji Kuma, et al. TiO_2 - SiO_2 and $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ - SiO_2 catalyst: Physico-chemical characteristics and catalytic behavior in selective catalytic reduction of NO by NH_3 . [J]. Applied Catalysis B, Environmental, 2005, 60:173-179
- [8] Min Kang, Dae Jung Kim, Eun Duck Park, et al. Two-stage catalyst system for selective catalytic reduction of NO_x by NH_3 at low temperatures[J]. Applied Catalysis B, Environmental, 2006, 68:21-27

- [9] Zhaoqiong Liu, Paul J. Millington, Jillian E. Bailie. A comparative study of the role of the support on the behaviour of iron based ammonia SCR catalysts [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2007, 104:159-170
- [10] Peter Balle, Bastian Geiger, et al. Study of the selective catalytic reduction of NO_x on an efficient Fe/HBEA zeolite catalyst for heavy duty diesel engines [J]. Applied Catalysis, 2009, 91:587-595
- [11] Tao Zhou, Shaoguang Liu, Jinming Wu, et al. Technologies of NO_x Emission For Coal-fired Power Plants [J]. Environmental Engineering, 2008, 6:82-85
周涛,刘少光,吴进明,等.火电厂氮氧化物排放控制技术[J].环境工程, 2008, 6:82-85
- [12] Yi Zhao, et al. Study on SCR technique for flue gas denitrification in coal-fired power plants [J]. Electric power environmental protection, 2009, 25, 1
赵毅,朱洪涛,等.燃煤电厂SCR烟气脱硝技术的研究[J].电力环境保护, 2009, 25, 1
- [13] Guido Busca, Luca Lietti, et al. Chemical and mechanical aspects of the selective catalytic reduction of NO_x by ammonia over oxide catalysts: A review [J]. Applied Catalysis B, Environmental, 1998, 18:1-36
- [14] Feng Li, Baosheng Jin. Study of SCR Catalyst for Coal-fired Flue Gas Denitrification Grafted on Nanometer Titania [D]. Doctor's thesis of Southeast University, 2006, 8
李峰,金保升.以纳米TiO₂为载体的燃煤烟气脱硝SCR催化剂的研究[D].东南大学博士论文. 2006, 8
- [15] Kun Xiao, Tao Luan. Performance test and molding study of SCR catalyst[J]. Mater's thesis of Shandong University, 2008
肖琨,栾涛.SCR脱硝技术用催化性能试验与成型研究[D].山东大学硕士论文. 2008
- [16] Pio Forzatti, Daniele Ballardini, Lorenzo Sghicelli. Preparation and characterization of extruded monolithic ceramic catalysts [J]. Catalysis Today, 1998, 41:87-94
- [17] G. Cristallo, E. Roncari, et al. Study of anatase-rutile transition phase in monolithic catalyst V₂O₅/TiO₂ and V₂O₅-WO₃/TiO₂ [J]. Applied Catalysis A, General, 2001, 209:249-256
- [18] Marzia Casanova, Elinan Rocchini, et al. High-temperature stability of V₂O₅/TiO₂-WO₃-SiO₂ SCR catalyst modified with rare earths [J]. Journal of Alloys and Compounds. 2006:1108-1112
- [19] Lin Zhu, Biquan Wu, et al. Situation of production and application on selective catalytic reduction flue gas de-NO_x catalysts [J]. Electric power, 2009, 42(8):61-64
朱林,吴碧群,等.SCR烟气脱硝催化剂生产与应用现状[J].中国电力. 2009, 42(8):61-64
- [20] Chongbing Zhu, Baosheng Jin, et al. Research on Co-combustion of Petrochemical Sludge with Coal in Circulating Fluidized Bed [J]. Boiler technology, 2009, 40(1):63-67
朱崇兵,金保升,等.WO₃对于V₂O₅/TiO₂脱硝催化剂的抗中毒作用[J].锅炉技术. 2009, 40(1):63-67
- [21] Luis. J. Alemany. Francesco Berti. Guido Busca. et al. characterization and composition V₂O₅-WO₃-TiO₂ SCR catalysts [J]. Applied catalysis B: Environmental. 1996, 10:299-311.
- [22] Luis. J. Alemany. Luca Lietti. Natale Ferlazzo, et al. Reactivity and physico-chemical characterization of V₂O₅-WO₃/TiO₂ De-NO_x catalysts [J]. Journal of Catalysis, 1995, 155(1):17-130.
- [23] Runduo Zhang, Xie quan, Fenglin yang, Zhi Zhong. Study of a Novel Wire-Mesh-Honeycomb Catalyst Preparation and Catalytic Performance [J]. China environment science. 2002, 23(1):20-23
张润铎,全燮,杨凤林,钟植.蜂窝状筛网催化剂上NH₃催化还原NO[J].中国环境科学. 2002, 23(1):20-23
- [24] JiaYi Lu, XiaoFeng Lu, et al. The Recent Application of De-NO_x SCR Catalysts [J]. Power System Engineering, 2008, 24(1):5-8
鲁佳易,卢啸风,等.SCR法烟气脱硝催化剂及其应用特性的探讨[J].电站系统工程. 2008, 24(1):5-8
- [25] Siguo Jiang, Jianyong Shen. Deactivation and replacement of SCR catalyst [J]. Fang boiler, 2005, 1:26-32
蒋思国,沈坚勇.选择性催化还原法催化剂的钝化及其更换[J].东方锅炉. 2005, 1:26-32
- [26] Experimental study of contribution of metal oxide MoO₃(WO₃) and V₂O₅ on the catalysts for the selective catalytic reduction of nitric oxide by ammonia[J]. Environmental Chemistry, 2007, 26(4):439-444
范红梅,仲兆平,等.金属氧化物MoO₃(WO₃)和V₂O₅对烟气脱硝催化性能试验[J].环境化学. 2007, 26(4):439-444
- [27] Deactivation and Regeneration of SCR De-NO_x Catalyst [J]. Materials review, 2008(3):285-287
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(3):285-287
- [28] Duan Yun, Qiang Song, Qiang Yao. Mechanism and analysis of SCR catalyst deactivation [J]. Coal conversion, 2009, 32(1):91-95
云端,宋蔷,姚强.V₂O₅-WO₃/TiO₂ SCR催化剂的失活机理及分析[J].煤炭转化. 2009, 32(1):91-95
- [29] Yi Zhao, Zhenfeng Zhu, et al. Research Progress in Selective Catalytic Reduction of V₂O₅-WO₃/TiO₂ Based SCR Activator[J]. Materials review, 2009, 23(1):28-30
赵毅,朱振峰,等.V₂O₅-WO₃/TiO₂基SCR催化剂的研究进展[J].材料导报. 2009, 23(1):28-30
- [30] Xianlong Zhang, Zhanggen Huang, Zhenyu Liu. Effect of KCl on selective catalytic reduction of NO with NH₃ over a V₂O₅-AC catalyst [J]. Catalysis Communication, 2008, 9:842-846
- [31] Hiroyuki Kamata, Katsumi Takahashi, et al. The role of K₂O in the selective reduction of NO with NH₃ over a V₂O₅(WO₃)/TiO₂ commercial selective catalytic reduction catalyst[J]. Journal of Molecular Catalysis A, Chemical, 1999, 139:189-198
- [32] Hailin Chen, Xinnan Song, et al. Maintenance and affecting factors for the performance of SCR system[J]. Journal of Shangdong Jianzhu University, 2008, 23(2):145-148
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):145-148
- [33] Meshari AL-Harbi, David Radtke, William S. Epling. Regeneration of a model NO_x storage/reduction catalyst using hydrocarbons as the reductant [J]. Applied Catalysis B, Environmental, 2010:524-532
- [34] Boxiong Shen, Jianwei Shi, et al. Regeneration technologies of SCR catalysts and their applications [J]. Chemical industry and engineering progress, 2008, 27(1):64-67
沈伯雄,施建伟,等.选择催化还原脱氮催化剂的再生能其应用评述[J].化工进展. 2008, 27(1):64-67
- [35] M. Klimczak, P. Kern, T. Heinzelmann, M. Lucas, P. Claus. High-throughput study of the effects of inorganic additives and poisons on NH₃-SCR catalysts-Part I: V₂O₅-WO₃/TiO₂ catalysts [J]. Applied Catalyst B, Environmental, 2010, 95:39-47
- [36] Duan Yun, Sili Deng, et al. Potassium Deactivation and Regeneration Method of V₂O₅-WO₃/TiO₂ SCR Catalyst [J]. Research of Environmental Science, 2009, 22, 6:730-734
云端,邓斯理,等.V₂O₅-WO₃/TiO₂系SCR催化剂的钾中毒及再生方法[J].环境科学研究, 2009, 22, 6:730-734
- [37] Raziye Khodayari, C.U. Ingemar Odenbrand. Regeneration of commercial TiO₂-V₂O₅-WO₃ SCR catalysts used in bio fuel plants [J]. Applied Catalysis B, Environmental, 2001, 30:87-99
- [38] Raziye Khodayari, C.U. Ingemar Odenbrand. Regeneration of commercial SCR catalysts by washing and sulphation: effect of sulphate groups on the activity [J]. Applied Catalysis B, Environmental, 2001, 33:277-291