

关于商用 SCR ($V_2O_5-WO_3/TiO_2$) 催化剂的再生和回收研究概述

李如冰*, 吴玉锋, 章启军, 陈希, 刘彬
(北京工业大学循环经济研究院, 北京 100124)

摘要:对失活脱硝催化剂进行再生和回收利用方法的研究现状进行总结,主要有酸洗再生、干法再生、改性再生、电泳再生、催化剂的钛白粉回收利用、V和W的回收利用、综合回收等方法,并对以上方法进行总结评价。

关键词:废弃 $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ 脱硝催化剂;再生;回收;研究现状

中图分类号:TQ426

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2017)03-0029-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2017.03.007

A comprehensive review of the regeneration and recovery of commercial SCR catalyst ($V_2O_5-WO_3/TiO_2$)

LI Ru-bing*, WU Yu-feng, ZHANG Qi-jun, CHEN Xi, LIU Bin

(Institute of Circular Economy, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The disposing of deactivated $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ SCR catalysts has got great concern at home and abroad. The regeneration and recovery of these deactivated catalysts are the main strategy to solve this problem. The commonly used regeneration methods mainly include wet regeneration, dry regeneration, modified regeneration and electrophoresis regeneration. The recovery of these deactivated catalysts involves the recovery of V, W and titanium dioxide. The comparison of these methods is performed as well.

Key words: deactivated $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ catalyst; regeneration; recovery; research status

氮氧化物排放至大气中会产生酸雨、光化学烟雾等污染问题,从而危害植物和人类健康安全。目前大都采用商用 $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ 脱硝催化剂来控制氮氧化物的大气排放。而 $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ 脱硝催化剂在使用 3~5 年之后,会由于催化剂积灰堵塞、烧结致使活性组分挥发、机械磨损以及催化剂中毒等原因导致催化剂的脱硝活性降低,需要重新更换 $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ 催化剂。但是钒钛基催化剂的成本昂贵,约占整个系统成本的 50%^[1]。同时,废弃的脱硝催化剂的填埋处理也会引起土壤污染,造成大量土地资源的浪费并对环境以及人体产生危害。随着脱硝催化剂的使用量和废弃量增加,导致成本问题和环境影响日益突出。

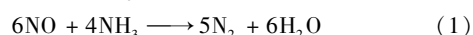
目前,国内外研究者基于不同的失活原因纷纷展开关于 $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ 废弃脱硝催化剂的再生以及回收研究工作。通过利用合适的再生方法,可以使废弃脱硝催化剂的脱硝活性恢复至新鲜催化剂的 90% 以上,而再生费用只是更换新鲜催化剂

的 20%^[2]。针对损坏情况严重不具再生价值的废弃催化剂,可将其中的 V、W、Ti 等元素进行高效地回收提纯利用,能够防止二次污染并且创造经济价值。

对失活脱硝催化剂的再生和回收技术的研究总结,可以有效地提高商业钒钛基催化剂的使用价值,具有经济和环境双重意义。本文中通过讲述目前废弃 $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ 催化剂的再生和回收工作,展示了目前国内外再生与回收工作的进展,分析不同技术的适用情况与优缺点,并提出失活商用钒钛基催化剂的未来发展方向。

1 脱硝催化剂的再生

一般来说,商业钒钛基 SCR 催化剂是以 TiO_2 为基,利用浸渍法掺入 V_2O_5 和 WO_3 活性组分^[3]。其作用机理是利用 Brønsted 酸位的 $V^{5+}-OH$ ^[4-6] 来吸引 NO_x ,同时与通入的 NH_3 反应,反应方程式如下^[7-8]:



收稿日期:2016-07-04;修回日期:2017-01-07

基金项目:首都资源循环材料技术协同创新中心建设项目(009000546616016);资源环境及循环经济内涵发展定额项目(033000514116005);北京工业大学第十四届研究生科技基金(yjk-2015-11771)

作者简介:李如冰(1992-),女,硕士生,研究方向为基于“以废治废”理念研究废弃材料的循环经济利用,通讯联系人,010-67396234, lirubing@emails.bjut.edu.cn。

所以,催化剂的活性与活性位点的活性以及数量呈正相关。当催化剂使用 3 年后,因为催化剂的机械磨损、碱金属中毒、通道堵塞等原因使活性位点数量减少导致活性位点数量减少,从而导致脱硝效率明显降低,而无法正常工作。针对此种情况,目前已经有相应的再生处理方法。

1.1 湿法再生

1.1.1 去离子水洗再生

Khodayari 等^[9]通过水洗再生的方法来处理碱金属中毒的 $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ 催化剂。将失活脱硝催化剂用去离子水冲洗,然后用压缩空气干燥即可再利用。在利用去离子水冲洗的过程中,可以将可溶解性的盐类和表面的部分颗粒物去除。对于较难清洗的附着物(如硫酸钙)可以利用超声波水洗,加强水洗效果。

程华^[10]经过研究检测证明,水洗再生能有效去除 S、Ca 等中毒物质,微观形貌也有较大改善,但只对 K 中毒的脱硝催化剂有很大提升作用。在 350 ~ 450℃ 的工作温度,脱硝活性能达中毒前的 83% 以上。而且经过测试分析,得知对于 K 中毒的催化剂活性恢复情况为:超声水洗 > 搅拌水洗 ≥ 浸渍水洗。

水洗虽然对催化剂脱硝活性恢复有一定作用,但主要作用于碱金属导致的催化剂失活。

1.1.2 酸洗再生

Khodayari 等^[3]研究了酸洗再生的催化剂的活性程度。失活 $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ 催化剂样品分别采用 100 mL 的水溶液,不同浓度的硫酸溶液,硫酸和硫酸氧钨的混合溶液,硫酸、硫酸氧钨和仲钨酸铵(APT)的混合溶液在 25℃ 下进行连续搅拌冲洗,之

后在 110℃ 下进行干燥 1 h。干燥结束后,放入 430℃ 的空气气氛炉中焙烧 2 h。将所得的样品进行活性测试时,发现用 0.5 mol/L 的硫酸溶液冲刷 30 min 后能恢复至新鲜催化剂的 92% 的活性。

云端等^[11]对模拟钾中毒的 $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ 催化剂进行酸洗再生测试。通过模拟失活实验使催化剂的最大脱硝效率由 100% 下降到 30% 左右。然后使用 1% 的 H_2SO_4 溶液酸洗浸泡 2 h,干燥之后在 450℃ 下煅烧 3 h。经过检测,再生之后的催化剂的脱硝活性几乎完全恢复,甚至高于中毒前。

可以看出,比起水洗再生,酸洗有良好的恢复活性的效果。通过研究发现,酸洗再生既能够洗掉催化剂表面的碱金属等杂质,也能够恢复 $V^{5+}-OH$ 等活性位点^[12-14],增加 Lewis 和 Brønsted 的酸性位点^[15]。

1.1.3 复合再生

催化剂实际使用过程中的工作环境复杂,失活的原因也很复杂。因此,一般采取复合再生的方法。吴凡等^[16]将电厂失活 $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ 脱硝催化剂进行超声化学清洗、活性负载以及煅烧等一系列再生处理。检测发现,催化剂的脱硝效率恢复至新鲜催化剂的 94.1%。

Shang 等^[17]就厦门嵩屿电厂的燃煤脱硝催化剂组进行再生研究。通过去离子水冲洗,利用 pH = 2 的硫酸去离子水溶液冲洗催化剂,之后在 60℃ 的温度下干燥 10 h。检测发现,再生之后的催化剂显示了极好的脱硝活性,甚至比新鲜催化剂活性更高。

复合再生相比单独水洗再生、酸洗再生显示出更良好的脱硝效果,而且适用于电厂等脱硝催化剂使用量大的单位,操作简便,且减少经济成本。

(上接第 28 页)

[22] Li Y, Wu J, Wang H, *et al.* Fluid flow and heat transfer characteristics in helical tubes cooperating with spiral corrugation [J]. *Energy Procedia*, 2012, 17: 791 - 800.

[23] Zachár A. Analysis of coiled-tube heat exchangers to improve heat transfer rate with spirally corrugated wall [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(19/20): 3928 - 3939.

[24] 刘佳驹,刘伟. 采用深槽螺旋波纹管的折流杆换热器传热与流动数值模拟 [J]. *工程热物理论*, 2015, (1): 151 - 153.

[25] Kareem Z S, Abdullah S, Lazim T M, *et al.* Heat transfer enhancement in three-start spirally corrugated tube: Experimental and numerical study [J]. *Chemical Engineering Science*, 2015, 134: 746 - 757.

[26] Liu J J, Liu Z C, Liu W. 3D numerical study on shell side heat transfer and flow characteristics of rod-baffle heat exchangers with spirally corrugated tubes [J]. *International Journal of Thermal Sci-*

ences, 2015, 89: 34 - 42.

[27] Ahn S W. Experimental studies on heat transfer in the annuli with corrugated inner tubes [J]. *KSME International Journal*, 2003, 17(8): 1226 - 1233.

[28] Promthaisong P, Jedsadaratanachai W, Eiamsa-Ard S. 3D numerical study on the flow topology and heat transfer characteristics of turbulent forced convection in spirally corrugated tube [J]. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2016, 69(6): 607 - 629.

[29] Eiamsa-Ard S, Promthaisong P, Thianpong C, *et al.* Influence of three-start spirally twisted tube combined with triple-channel twisted tape insert on heat transfer enhancement [J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2016, 102: 117 - 129.

[30] Zimparov V. Enhancement of heat transfer by a combination of three-start spirally corrugated tubes with a twisted tape [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, 44(3): 551 - 574. ■

1.1.4 碱洗再生

Yu等^[18]尝试一种碱洗法再生V₂O₅-WO₃/TiO₂催化剂的方法。通过将失活的样品用1 L碱溶液(0.2 mol/L的NaOH溶液)以10 mL/min的洗涤速度洗涤,在30℃下处理40 min,之后将再生样品干燥焙烧处理。再生后样品的脱硝性能有明显提升,其相对脱硝活性在300~380℃时为74%~80%。

虽然目前的碱洗法对比酸洗^[5]的脱硝活性稍低,但碱洗再生可以溶解表面的酸性盐,恢复堵塞的毛孔,同时延迟催化剂腐坏。这也说明碱洗再生具有很大的研究和应用空间。

综合讨论湿法再生的各方法的优缺点,如表1所示。

表1 湿法再生方法的优缺点

再生方法	优点	缺点
水洗再生	操作简单,经济成本低	再生性能较低
酸洗再生	脱硝性能恢复优良	造成二次污染、产生废酸污染
复合再生	脱硝性能良好,适用工 厂等实际应用	耗能较大,工艺较为繁琐
碱洗再生	延迟催化剂腐坏	再生性能较低

1.2 干法再生

1.2.1 Ar热再生和5% NH₃-95% Ar还原再生

马建蓉等^[19]分别利用Ar热再生和5% NH₃-95% Ar还原再生法再生失活V₂O₅/AC催化剂。利用Ar(5% NH₃-95% Ar)气流以5℃/min的速率匀速升温吹扫催化剂,之后保持气氛降温至200℃。再生之后,模拟烟气脱硝测试的结果显示,Ar热再生催化剂的脱硝活性接近新鲜样品,5% NH₃-95% Ar还原再生的催化剂的脱硝活性在300℃之前与还原再生温度呈正相关态势,反之,呈负相关。

综合来说,此类再生方法较之湿法再生可有效保留催化剂的活性组分,同时也表现出良好的脱硝性能。

1.2.2 臭氧再生

根据相关研究^[20]显示,在低温下利用臭氧可以除去失活催化剂表面积碳来恢复催化剂的活性。段竞芳^[21]利用浓度为180 mg/L的臭氧在室温下通入固定床反应器中再生失活催化剂。反应1 h之后,检测发现,失活的催化剂在工作温度范围内达到良好的脱硝活性,约90%。

臭氧再生的方法操作方便,无二次污染,并且节约能耗,有较好的应用前途。

1.3 改性再生

1.3.1 Ni掺杂与Zr掺杂改性再生

程华^[10]在研究中发现,掺入Zr和Ni的V₂O₅(WO₃)/TiO₂催化剂具有显著的抗碱金属中毒的能力。

将掺杂不同浓度Ni的催化剂进行脱硝活性测试和抗碱金属中毒模拟测试,结果显示,掺杂0.5 mol Ni的催化剂抗K中毒能力最强;对掺Zr再生的催化剂进行脱硝活性测试和抗碱金属中毒模拟测试,结果显示,掺Zr对催化剂的脱硝活性影响很小,而且当Zr掺杂量为1 mol时,具有最佳的抗中毒能力。

虽然Ni掺杂和Zr掺杂会使催化剂表面有所损失,但是能够有效提高催化剂的抗中毒能力,而且易操作,有效地延长了催化剂的使用寿命,适合广泛应用。

1.3.2 Ce掺杂再生

Peng等^[22]基于Cha等^[23]的研究提出将CeO₂掺入V₂O₅-WO₃/TiO₂催化剂来提高催化剂的抗碱金属中毒能力。利用浸渍法制备出V_{0.4}-Ce₅W₅/Ti催化剂,检测发现,其脱硝能力达到97%。同时,检测发现其抗Na、K碱金属的中毒能力也优于商用催化剂。

这表明Ce掺杂V₂O₅-WO₃/TiO₂催化剂有比商用催化剂更好的脱硝性能表现,具备研究和使用的价值。

1.4 电泳再生

Peng等^[22]研发一种新的钒钛基催化剂再生技术—电泳再生。电泳再生的操作如图1,利用通入1.6 eV直流电的2块钛电极电解中毒催化剂粉末,之后将催化剂干燥煅烧成型。测试显示,再生的催化剂在工作温度范围内的脱硝性能恢复至新鲜催化剂。尤其是针对于K、Na中毒的失活催化剂,再生后脱硝活性达到90.0%、98.6%。

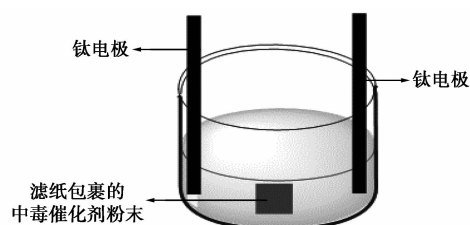


图1 中毒催化剂电泳再生示意图

相比目前常用的酸洗处理,该操作不产生任何有毒有害气体或溶液,属于环境友好型的再生方法。

2 脱硝催化剂的回收

部分废弃失活的脱硝催化剂因破碎情况严重而不具备再生条件。若直接填埋处理,会造成土地资源的污染和浪费。所以,对废弃脱硝催化剂进行回收利用可以节约资源同时防止二次污染。

2.1 $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ 脱硝催化剂的 V、W 回收

李守信等^[24]研究提出从废弃的脱硝催化剂中回收三氧化钨和偏钒酸铵的方法。废弃脱硝催化剂钠化焙烧,之后加入氨水,同时以氯化铵作为沉淀剂析出偏钒酸铵沉淀;滤液蒸发得到仲钨酸铵晶体;仲钨酸铵晶体加热煅烧可制得三氧化钨。此方法较为简便地实现了钒和钨的资源化回收利用。

肖雨亭等^[25]利用电解法对 V 进行回收。将失活钒钨钛基催化剂粉碎放于电解槽中电解,取负极混合液过滤分离得含钒混合溶液。将含钒混合溶液二次电解取正极混合液,加入铵盐沉钒,灼烧沉淀得含钒的淡黄色固体。此方法所制得 V 纯度较高,但耗能较多。

韩国 Kim 等^[26]利用碱式浸出法回收 W、V (图 2)。将废 SCR 催化剂和氢氧化钠在高压釜里加压浸出。然后利用 $Ca(OH)_2$ 提钒得偏钒酸钙,滤液用氨水沉淀干燥制 APT(仲钨酸铵)。实验验证,钒回收率达到 90%,W 达到 99%。碱式浸出操作简单,成本低,回收率高。

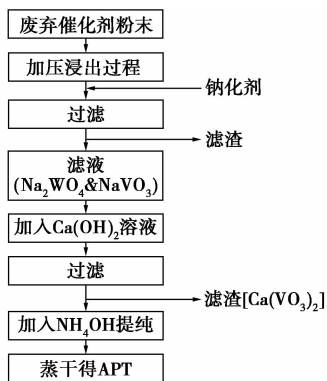


图 2 从失活的脱硝催化剂中回收 W、V 的操作过程

2.2 钛白粉的回收

华攀龙等^[27]提出从废弃脱硝催化剂回收钛白粉的研究(图 3)。通过将废弃失活脱硝催化剂进行除尘、粉碎磨粉后,酸解得到硫酸氧钛浓溶液,再将滤液浓缩加热水解,冷却过滤得到偏钛酸沉淀。偏钛酸沉淀在 $110 \sim 120^\circ\text{C}$ 下烘干之后煅烧,接着将其粉碎、磨细得到原材料二氧化钛成品。这种制造钛

白粉的方法因为成本低、操作简便、设备要求不高,目前已经得到工业化应用,并且带来巨大的经济价值。

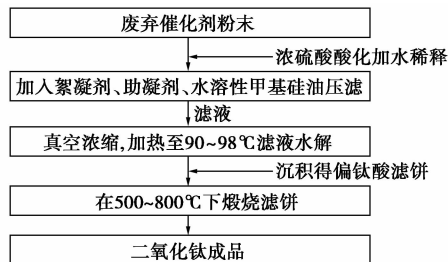


图 3 废弃脱硝催化剂回收钛白粉的工艺流程图

2.3 综合回收

曾瑞等^[28]提出了综合回收失活蜂窝脱硝催化剂的工艺(图 4)。利用高温高压碱熔废弃 SCR 催化剂粉磨,反应制备金红石型钛白粉,再利用镁盐除杂后,进行钨和钒的回收。此种方法不仅可以制得高纯度钛白粉,并且能够直接将钨合成为 APT。同时实现了对 V 的绿色转化利用。可以看出,废弃催化剂的综合利用可以实现无害化生产,以及废弃产品完全资源化。

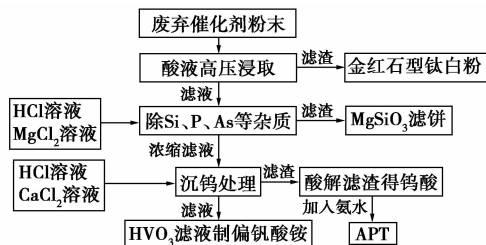


图 4 废弃催化剂综合利用流程图

较上述对某 1 种或某几种元素的回收利用,废弃催化剂的综合回收利用能够达到更优良的环境和经济效益。

3 结语与展望

讨论了废弃脱硝催化剂的再生和回收的研究进展。通过研究发现,催化剂的再生利用工艺目前已经较为成熟,但仍存在一些问题:①复合再生可以经济快捷有效地实现催化剂的再生利用,在燃煤电厂等工业单位得到广泛的应用,但存在二次污染问题;②干法再生展示出较好的脱硝性能恢复能力,同时能够避免二次污染,但是耗能较大;③催化剂改性再生方法可以有效提升催化剂的抗金属中毒能力,延长催化剂寿命,并且也已经投入生产,但是需要改善催化剂的表面损失问题;④电泳再生这类环境友好

型再生方法目前因为高能耗和低效率而需要进一步地研究,以期达到实际发展应用。

国内外研究者对废弃催化剂回收的研究工作也取得很多进展,以期解决废弃催化剂的二次污染,同时带来经济效益。目前广泛采用的湿法冶金回收方法在回收过程中容易产生二次空气污染,仍需要对这些方法不断研究改进,突破技术局限。

目前,国家把环境的治理问题视为重中之重,同时脱硝催化剂的使用量和废弃量也日益增加。关于废弃脱硝催化剂的再生以及回收利用的研究日益受到重视。目前的再生回收方法存在一定的环境和经济问题,期待之后的研究者能够提出环境友好和经济友好的新技术方法。

参考文献

- [1] 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):64-68.
- [2] 徐晓亮,黄丽娜,缪明烽. SCR脱硝催化剂循环再利用的研究进展[J]. 绿色科技,2011,(6):6-9.
- [3] Khodayari R, Odenbrand CUI. Regeneration of commercial $TiO_2-V_2O_5-WO_3$ SCR catalysts used in bio fuel plants[J]. Applied Catalysis B,2001,30(1/2):87-99.
- [4] Topsøe N Y, Dumesic J A, Topsøe H. Vanadia-Titania catalysts for selective catalytic reduction of Nitric-Oxide by ammonia: II. studies of active sites and formulation of catalytic cycles[J]. Journal of Catalysis,1995,151(1):241-252.
- [5] Topsøe N Y, Topsøe H, Dumesic J A. Vanadia/Titania catalysts for selective catalytic reduction (SCR) of Nitric-Oxide by ammonia: I. combined temperature-programmed in-Situ, FTIR and On-line Mass-Spectroscopy studies[J]. Journal of Catalysis,1995,151(1):226-240.
- [6] Dumesic J A, Topsøe N Y, Topsøe H. Kinetics of selective catalytic reduction of Nitric Oxide by ammonia over Vanadia/Titania[J]. Journal of Catalysis,1996,163(2):409-417.
- [7] Carlo Orsenigo, Luca Lietti, Enrico Tronconi, et al. Dynamic Investigation of the role of the surface Sulfates in NO_x reduction and SO_2 Oxidation over $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ Catalysts[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,2009,165(37):2350-2359.
- [8] Luca Lietti, Pio Forzatti, Bregani. Steady-state and transient reactivity study of TiO_2 -supported $V_2O_5-WO_3$ De- NO_x catalysts; Relevance of the Vanadium-Tungsten interaction on the catalytic activity[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,1996,35(11):3884-3892.
- [9] Khodayari R, Odenbrand CUI. Regeneration of commercial SCR catalysts by washing and sulphation; Effect of sulphate groups on the activity[J]. Applied Catalysis B,2001,(33):277-291.
- [10] 程华. SCR烟气脱硝催化剂失活原因与再生技术的研究[D]. 广州:华南理工大学,2013.
- [11] 云端,邓斯理,宋蕾,等. $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ 系SCR催化剂的钾中毒及再生方法[J]. 环境科学研究,2009,(6):730-735.
- [12] Yoloyama N, Mitsouka S, Nagano T, et al. Method for recovering denitration catalyst for ammonia catalytic reduction; EU, 0159959 [P]. 1985-10-30.
- [13] Chen J P, Yang R T. Selective catalytic reduction of NO with NH_3 on SO_4^{2-}/TiO_2 super acid catalyst[J]. Journal of Catalysis,1993,139:277-288.
- [14] Ciambelli P, Fo Rtna M E, Sannino D, et al. The influence of sulfate on the catalytic properties of $V_2O_5-TiO_2$ and WO_3/TiO_2 in the reduction of nitric oxide with ammonia[J]. Catalysis Today,1996,29:161-164.
- [15] Boudali L K, Ghorbel A, G Range P, et al. Selective catalytic reduction of NO with ammonia over V_2O_5 supported sulfated titanium-pillared clay catalysts; Influence of V_2O_5 content [J]. Applied Catalysis B,2005,59:105-111.
- [16] 吴凡,段竞芳,夏启斌,等. SCR脱硝失活催化剂的清洗再生技术[J]. 热力发电,2012,41(5):95-98.
- [17] Shang X, Hu G, He C, et al. Regeneration of full-scale commercial honeycomb monolith catalyst ($V_2O_5-WO_3/TiO_2$) used in coal-fired power plant[J]. Ind Eng Chem,2012;18(1):513-519.
- [18] Yu Y, He C, Chen J, et al. Regeneration of deactivated commercial SCR catalyst by alkali washing[J]. Catal Commun,2013,39:78-81.
- [19] 马建蓉,黄张根,刘振宇,等. 再生方法对 V_2O_5/AC 催化剂同时脱硫脱硝活性的影响[J]. 催化学报,2005,(6):463-469.
- [20] D' Ippolito S A, Especel C, Epron F, et al. O_2 , and O_3 , regeneration of $PtReSn/Al_2O_3$, and $PtReGe/Al_2O_3$, naphtha reforming catalysts prepared by catalytic reduction[J]. Applied Catalysis A General, 2010,388(1/2):272-277.
- [21] 段竞芳. 商业钒钛系SCR脱硝催化剂的失活分析与再生研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.
- [22] Peng Y, Li J, Shi W, et al. Design Strategies for Development of SCR Catalyst; Improvement of Alkali Poisoning Resistance and Novel Regeneration Method[J]. Environ Sci Technol,2012,46(22):12623-12629.
- [23] Cha W, Ehrman S H, Jurmg J. CeO_2 added V_2O_5/TiO_2 catalyst prepared by chemical vapor condensation (CVC) and impregnation method for enhanced NH_3 -SCR of NO_x at low temperature [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2016, 4(1):556-563.
- [24] 李守信,索平. 从SCR脱硝催化剂中回收三氧化钨和偏钒酸铵的方法:CN,102557142A[P]. 2012-07-11.
- [25] 肖雨亭,赵建新. 选择性催化还原脱硝催化剂钒组分回收的方法:CN,102732730A[P]. 2012-10-17.
- [26] Kim J W, Lee W G, Hwang I S, et al. Recovery of tungsten from spent selective catalytic reduction catalysts by pressure leaching [J]. Ind Eng Chem,2015,28:73-77.
- [27] 华攀龙,李守信. 一种从失活旧SCR脱硝催化剂中回收钛白粉的方法:CN,103130265A[P]. 2013-06-05.
- [28] 曾瑞. 含钨、钒、钛的蜂窝式SCR失活催化剂的回收工艺:CN,102936039A[P]. 2013-02-20. ■