

doi: 10.20237/j.issn.1007-7545.2025.02.015

# 废SCR脱硝催化剂碱式焙烧—水浸提取钒和钨

俞子铨<sup>1</sup>, 李奇勇<sup>1,2,3</sup>, 李强<sup>2,3</sup>, 刘云龙<sup>2</sup>, 罗微<sup>2</sup>, 陈茜<sup>2</sup>

(1. 福州大学 化工学院, 福州 350108;

2. 三明学院 资源与化工学院, 福建 三明 365004;

3. 清洁生产技术福建省高校工程研究中心, 福建 三明 365004)

**摘要:** 利用碱式焙烧—水浸工艺提取废SCR脱硝催化剂中的钒和钨, 以便后续钒和钨的资源化利用。探究了焙烧温度、焙烧时间、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 与废催化剂的质量比、水浸温度、水浸时间等对钒和钨浸出效果的影响, 结合焙烧产物XRD分析探究其焙烧机理。结果表明, 废SCR脱硝催化剂合适的碱式焙烧—水浸条件为: 焙烧温度875℃、焙烧时间1.5 h、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 与废催化剂的质量比1:1、水浸温度80℃、水浸时间2 h, 在此条件下钒和钨的浸出率分别达到91.33%和96.34%。根据XRD分析结果, 在碱式焙烧过程中钒和钨分别转化为易溶性的 $\text{NaV}_6\text{O}_{15}$ 和 $\text{Na}_2\text{WO}_4$ ; 经过碱式焙烧—水浸处理后, 90%以上的钒和钨进入水浸液, 而进入水浸液中的钛不足2%。

**关键词:** 废SCR脱硝催化剂; 碱式焙烧; 水浸; 钒; 钨; 浸出率

中图分类号: TF111.31; TF841 文献标志码: A 文章编号: 1007-7545(2025)02-0140-07

## Extraction of Vanadium and Tungsten from Waste SCR Denitrification Catalyst by Alkaline Roasting and Water Leaching Process

YU Zixuan<sup>1</sup>, LI Qiyong<sup>1,2,3</sup>, LI Qiang<sup>2,3</sup>, LIU Yunlong<sup>2</sup>, LUO Wei<sup>2</sup>, CHEN Qian<sup>2</sup>

(1. College of Chemical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. College of Resources and Chemical Engineering, Sanming University, Sanming 365004, Fujian, China;

3. Cleaner Production Technology Engineering Research Center of Fujian Universities, Sanming 365004, Fujian, China)

**Abstract:** The alkaline roasting and water leaching process was used to extract vanadium and tungsten from the waste SCR denitrification catalyst for the subsequent resource utilization of vanadium and tungsten. The effects of roasting temperature, roasting time, mass ratio of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  to waste catalyst, water leaching temperature, and water leaching time on the leaching effect of vanadium and tungsten were investigated. The roasting mechanism was explored by XRD analysis of roasting products. The experimental results show that the suitable alkaline roasting and water leaching conditions for the waste SCR denitrification catalyst include roasting temperature 875℃, roasting time 1.5 hours, mass ratio of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  to waste catalyst 1:1, water leaching temperature 80℃, and water leaching time 2 h. Under these conditions, the leaching rate of vanadium and tungsten is 91.33% and 96.34% respectively. According to the results of XRD analysis, vanadium and tungsten are converted into easily soluble  $\text{NaV}_6\text{O}_{15}$  and

收稿日期: 2024-05-22

基金项目: 福建省科技厅引导性项目(2022Y0075); 三明市引导性科技项目(2023-S-1); 闽江源生态保护研究院培育项目(MJ2021001)

作者简介: 俞子铨(2000-), 女, 硕士研究生; 通信作者: 李强(1988-), 男, 硕士, 副教授

$\text{Na}_2\text{WO}_4$  respectively during the alkaline roasting process. After alkaline roasting and water leaching treatment, more than 90% of vanadium and tungsten enters the water leaching solution, while less than 2% of titanium enters the water leaching solution.

**Key words:** waste SCR denitrification catalyst; alkaline roasting; water leaching; vanadium; tungsten; leaching rate

氮氧化物( $\text{NO}_x$ )作为一种主要的大气污染物,其来源与工业活动密切相关,大部分来源于化石燃料在火力发电和钢铁冶炼过程中的燃烧<sup>[1-2]</sup>。这些污染物在大气中积累,引发了诸如酸雨、光化学烟雾以及臭氧层破坏等一系列环境挑战<sup>[3-4]</sup>。随着我国环保标准的不断提升,工业废气中 $\text{NO}_x$ 排放控制标准变得愈发严格。SCR脱硝技术作为目前主要的 $\text{NO}_x$ 减排技术在燃煤电厂、石油化工、燃气锅炉等工业领域普遍采用,其中催化剂是该脱硝技术的关键。

目前,应用较多的SCR脱硝催化剂主要是钒钨钛系催化剂,该催化剂的关键成分为 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{V}_2\text{O}_5$ 和 $\text{WO}_3$ ,其中锐钛矿型 $\text{TiO}_2$ 作为催化剂的载体, $\text{V}_2\text{O}_5$ 和 $\text{WO}_3$ 分别作为活性成分和辅助成分。SCR脱硝催化剂在实际应用过程中,受孔道堵塞、化学中毒、热烧结、表面磨损等因素的影响<sup>[5-7]</sup>,催化剂会逐渐失活而废弃。近年来,我国每年产生约 $25 \times 10^4 \sim 30 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的废SCR脱硝催化剂<sup>[8]</sup>。由于废SCR脱硝催化剂含有毒物质 $\text{V}_2\text{O}_5$ ,且在脱硝过程中会吸附As、Pb、Hg等有毒物质<sup>[9-10]</sup>,已被列入《国家危险废物名录》(HW50废催化剂)<sup>[11-12]</sup>。废SCR脱硝催化剂通常含有80%左右的 $\text{TiO}_2$ 、1%左右的 $\text{V}_2\text{O}_5$ 和5%左右的 $\text{WO}_3$ 。因此,探索废SCR脱硝催化剂的合理资源化途径,不仅能缓解其对环境的危害,还能促进Ti、V、W等资源回收利用<sup>[13-14]</sup>。

目前,废SCR脱硝催化剂的回收方法主要包括:氯化法、湿法和干湿结合法<sup>[15]</sup>。氯化法常用作提钒,提取出的钒纯度高,但该方法会产生大量 $\text{Cl}_2$ 、 $\text{HCl}$ 等有害气体<sup>[16-17]</sup>;湿法用来提取废催化剂中的钒和钨时,钒和钨的浸出率较低,且需消耗大量酸碱,过程产生的强酸强碱性废水处理难度大<sup>[18-19]</sup>;干湿结合法将火法焙烧和湿法浸出结合起来,通常包括碱式焙烧—酸浸、碱式焙烧—碱浸和碱式焙烧—水浸<sup>[20]</sup>。干湿结合法中前两种方法的浸出效果较好,但同湿法一样需消耗大量酸碱,且过程中产生大量强酸强碱性废水<sup>[21-22]</sup>。碱式焙烧—水浸工艺的原理为:在焙烧过程中废催化剂中的钒、钨和钛转化为钠盐,其中钒酸盐和钨酸盐易溶解,而钛酸盐难溶解,然后利用水浸法

将钒和钨高效浸出至液相中,钛酸盐则会保留在水浸渣中,以此达到提取钒和钨的目的<sup>[23]</sup>。碱式焙烧—水浸具有浸出率高的特点,且无需消耗大量酸碱,过程中产生的废水易于处理。因此,本文利用碱式焙烧—水浸工艺提取废SCR脱硝催化剂中的钒和钨,探究合适的工艺条件,并结合焙烧产物XRD分析探究其焙烧机理。

## 1 试验原料与仪器

废SCR脱硝催化剂来自国内某电厂,试验前原料经研磨和烘干处理,主要化学成分(%): $\text{TiO}_2$  84.92、 $\text{WO}_3$  4.48、 $\text{V}_2\text{O}_5$  1.51、 $\text{SiO}_2$  5.58、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  3.12、 $\text{CaO}$  0.08、 $\text{MgO}$  0.06。原料XRD分析结果如图1所示。

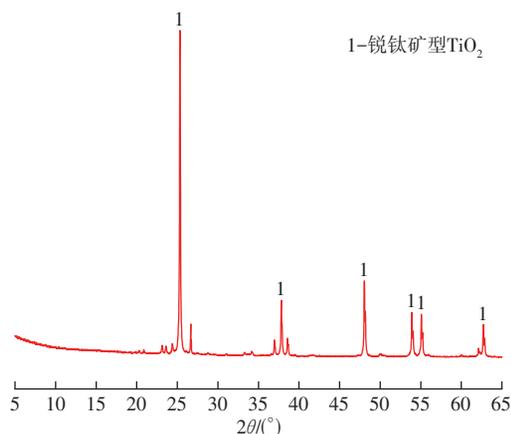


图1 试验原料的XRD谱

Fig. 1 XRD pattern of raw materials

废SCR脱硝催化剂的主要化学成分为 $\text{TiO}_2$ ,其含量达到84.92%; $\text{WO}_3$ 的含量为4.48%, $\text{V}_2\text{O}_5$ 的含量为1.51%。由图1的XRD分析结果可知:废SCR脱硝催化剂的主要物相是锐钛矿型 $\text{TiO}_2$ 。

试验所用仪器包括:三头研磨机(HLXPM- $\Phi 120 \times 3$ )、超纯水设备(WP-UP-WF-40)、电热恒温鼓风干燥箱(DHG-9146A)、电子天平(JT3003D)、马弗炉(LYL-17XB)、数显恒温搅拌水浴锅(HH-6J)、可见分光光度计(MAPADA PV4型)等。

## 2 结果与讨论

### 2.1 焙烧温度对钒和钨浸出率的影响

在焙烧时间为3 h、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 与废催化剂的质量比为1.5、水浸温度为80℃、水浸时间为4 h等条件下,探究在700~875℃温度范围内焙烧温度对钒和钨浸出率的影响,试验结果如图2所示。不同温度下焙烧温度产物XRD谱如图3所示。

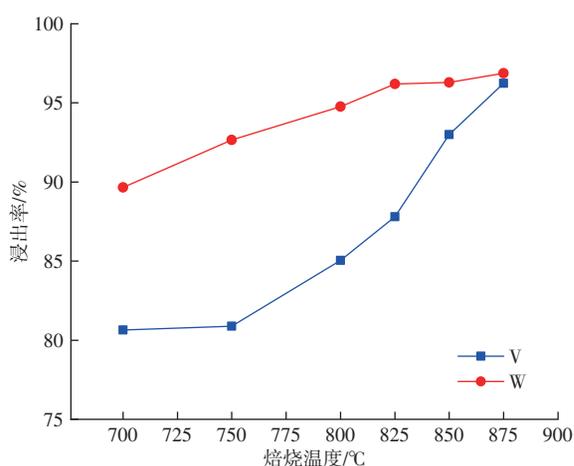


图2 焙烧温度对钒、钨浸出率的影响

Fig. 2 Effects of roasting temperature on leaching rate of vanadium and tungsten

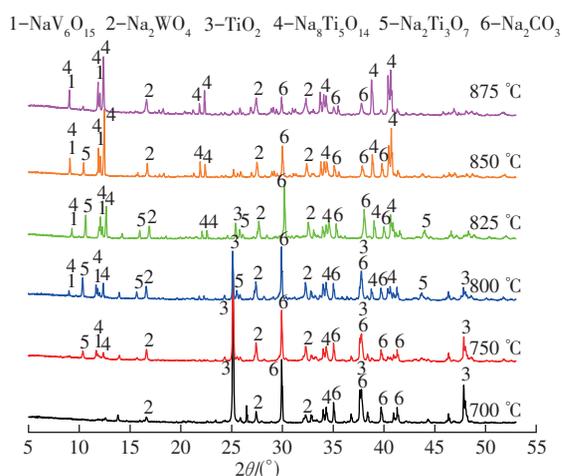


图3 不同焙烧温度下废催化剂焙烧产物的XRD谱

Fig. 3 XRD patterns of waste catalyst calcined products at different roasting temperatures

由图2可知:随着焙烧温度的升高,钒和钨的浸出率均为上升趋势,其中钒在焙烧温度低于750℃的浸出率较低,当焙烧温度超过800℃后钒浸出率大幅提高;而钨的浸出率随着焙烧温度的升高逐渐提高。当焙烧温度为700℃时,钒和钨的浸出率分别为80.65%、89.66%;当焙烧温度为750℃时,钒和

钨的浸出率分别为80.88%、92.65%;当焙烧温度为875℃时,钒和钨的浸出率分别提升至96.24%和96.87%。由于继续提高焙烧温度至900℃时,焙烧样品会熔融固结在坩埚内,导致无法进行后续的浸出试验,因此选择875℃作为合适的焙烧温度。

结合图3焙烧产物的XRD分析结果可知:当焙烧温度为700℃时,焙烧产物并未出现明显的易溶性钒酸盐类物质的衍射峰;焙烧温度为750℃时,易溶性 $\text{NaV}_6\text{O}_{15}$ 的衍射峰开始出现,但衍射峰很弱;当焙烧温度达到800℃以后, $\text{NaV}_6\text{O}_{15}$ 的衍射峰逐步加强,表明废催化剂中的钒开始逐渐转化为易溶性 $\text{NaV}_6\text{O}_{15}$ 。因此,焙烧温度在750℃以下时,钒的浸出率较低,而焙烧温度超过800℃后,钒的浸出率开始大幅提高。在焙烧温度为700℃时,焙烧产物中已出现较弱的易溶性 $\text{Na}_2\text{WO}_4$ 衍射峰,焙烧温度达到750℃后 $\text{Na}_2\text{WO}_4$ 的衍射峰已比较明显,表明钨比钒更容易转化为易溶性钠盐。因此,在相同焙烧温度下钨的浸出率比钒更高,当焙烧温度达到875℃时,废催化剂中的钒和钨均大部分转化为易溶性钠盐,浸出率均达到96%以上。

### 2.2 焙烧时间对钒和钨浸出率的影响

在焙烧温度为875℃、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 与废催化剂的质量比为1.5、水浸温度为80℃、水浸时间为4 h等条件下,探究在0.5~3 h时间范围内焙烧时间对钒和钨浸出率的影响,试验结果如图4所示。不同焙烧时间产物XRD谱如图5所示。

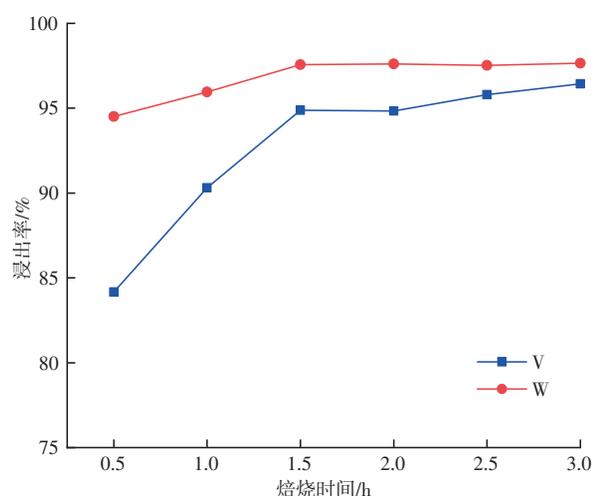


图4 焙烧时间对钒、钨浸出率的影响

Fig. 4 Effects of roasting time on leaching rate of vanadium and tungsten

由图4可知:随着焙烧时间的延长,钒和钨的浸出率均为先上升后趋于平衡;钒的浸出率在

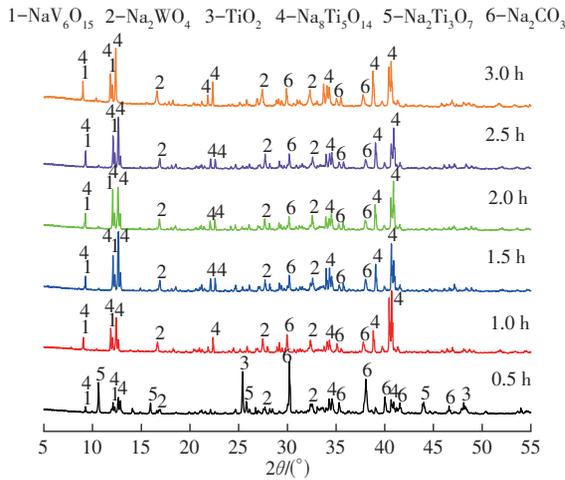


图5 不同焙烧时间下废催化剂焙烧产物的XRD谱

Fig. 5 XRD patterns of waste catalyst calcined products under different roasting time

0.5~1.5 h内大幅提升,钨的浸出率在此范围内缓慢提升;焙烧时间超过1.5 h后,钒和钨的浸出率均趋于平衡。当焙烧时间为0.5 h时,钒和钨的浸出率分别为84.17%、94.51%;当焙烧时间为1.5 h时,钒和钨的浸出率分别提升至94.88%和97.57%。因此,综合考虑焙烧能耗和水浸效果,选择1.5 h为合适的焙烧时间。

结合图5焙烧产物的XRD分析结果可知:当焙烧时间为0.5 h时,焙烧产物中的 $\text{NaV}_6\text{O}_{15}$ 和 $\text{Na}_2\text{WO}_4$ 的衍射峰强度均较弱, $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 的衍射峰较强,说明此时的废催化剂中还有很多钒和钨的氧化物未转化为易溶性钠盐;当焙烧时间为1.5 h时, $\text{NaV}_6\text{O}_{15}$ 和 $\text{Na}_2\text{WO}_4$ 的衍射峰已经比较明显,且 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 的衍射峰明显减弱,表明钒和钨的氧化物已与 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 充分反应,此时废催化剂中的钒和钨已基本转化为易溶性钠盐,钒的浸出率达到94%以上,钨的浸出率达到97%以上。

### 2.3 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 与废催化剂的质量比对钒和钨浸出率的影响

在焙烧温度为875 °C、焙烧时间为1.5 h、水浸温度为80 °C、水浸时间为4 h等条件下,探究 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 与废催化剂的质量比为0.5~1.5时对钒和钨浸出率的影响,试验结果如图6所示。不同 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 与废催化剂的质量比焙烧产物XRD谱如图7所示。

由图6可知:随着 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 与废催化剂的质量比的增加,钒和钨的浸出率均呈现先上升后逐渐趋于平衡的状态;钒的浸出率在 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 与废催化剂的质量比为0.5~1时大幅提升,当 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 与废催化

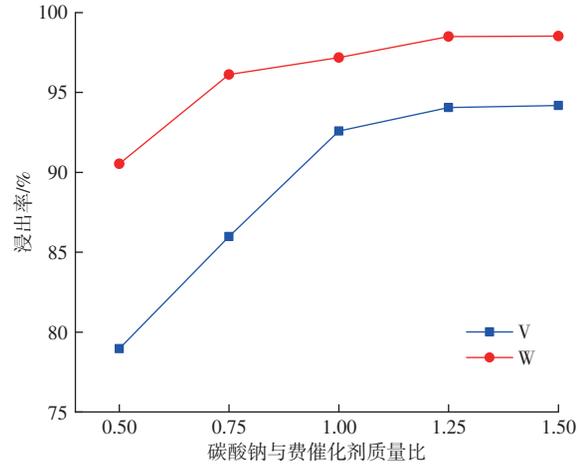


图6 不同焙烧温度下 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 与废催化剂的质量比对钒、钨浸出率的影响

Fig. 6 Effects of mass ratio of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  to waste catalyst on leaching rate of vanadium and tungsten

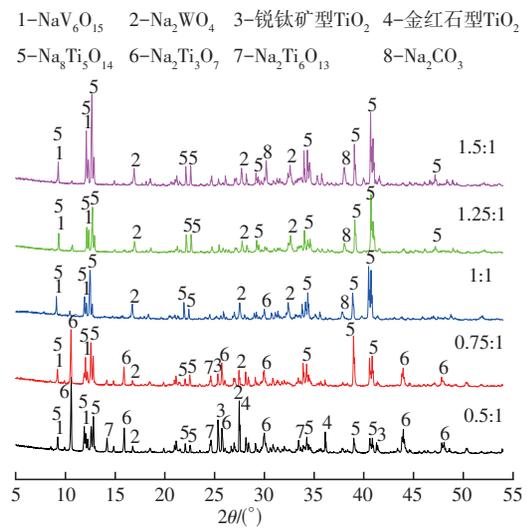


图7 不同 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 与废催化剂的质量比下废催化剂焙烧产物的XRD谱

Fig. 7 XRD patterns of waste catalyst calcined products at different mass ratio of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  to waste catalyst

剂的质量比超过1后上升速度变缓;钨的浸出率在 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 与废催化剂的质量比为0.5~0.75时大幅提升,当 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 与废催化剂的质量比超过0.75后上升速度变缓。当 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 与废催化剂的质量比为0.5时,钒和钨的浸出率分别为78.96%、90.54%;当 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 与废催化剂的质量比为1时,钒和钨的浸出率分别提升至92.58%和97.18%。虽然在 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 与废催化剂的质量比为1.25时,钒和钨的浸出率更高,但是相较于 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 与废催化剂的质量比为1时增加幅度较小,钒的浸出率提升了1.48个百分点,钨的浸出率提升了1.32个百分点,而 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 用量增加了

25%。综合考虑废催化剂回收成本和水浸效果,选择Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>与废催化剂的质量比为1较为合适。

结合图7焙烧产物的XRD分析结果可知:当Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>与废催化剂的质量比为0.5时,在焙烧产物中能检测到NaV<sub>6</sub>O<sub>15</sub>和Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>的衍射峰,但衍射峰的强度很弱;当Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>与废催化剂的质量比提高至1时,NaV<sub>6</sub>O<sub>15</sub>和Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>的衍射峰强度明显增强,同时开始出现Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>的衍射峰,代表此时Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>添加量已足够。

### 2.4 水浸温度对钒和钨浸出率的影响

在焙烧温度为875℃、焙烧时间为1.5h、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>与废催化剂的质量比为1、水浸时间为1h等条件下,探究在60~85℃温度范围内水浸温度对钒和钨浸出率的影响,试验结果如图8所示。

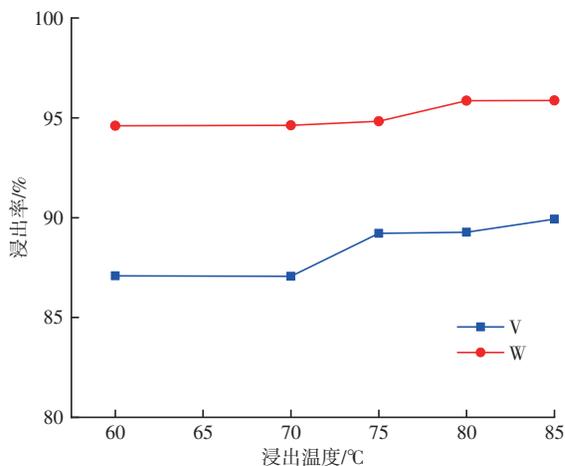


图8 水浸温度对钒、钨浸出率的影响

Fig. 8 Effects of water leaching temperature on leaching rate of vanadium and tungsten

由图8可知:随着水浸温度的升高,钒和钨的浸出率均呈缓慢上升趋势。钒的浸出率在水浸温度为70℃以下时为87%左右,当水浸温度提升至75℃以后,钒浸出率达到89%以上,并趋于平衡。钨的浸出率在水浸温度为75℃以下时约为94%,当水浸温度提升至80℃以后,钨浸出率达到95%以上,并趋于平衡。综合考虑钒和钨的水浸效果以及水浸过程的能耗,选择80℃作为合适的水浸温度。

### 2.5 水浸时间对钒和钨浸出率的影响

在焙烧温度为875℃、焙烧时间为1.5h、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>与废催化剂的质量比为1、水浸温度为80℃等条件下,探究在1~3h时间范围内水浸时间对钒和钨浸出率的影响,试验结果如图9所示。

由图9可知:钒的浸出率随着水浸时间的延长而

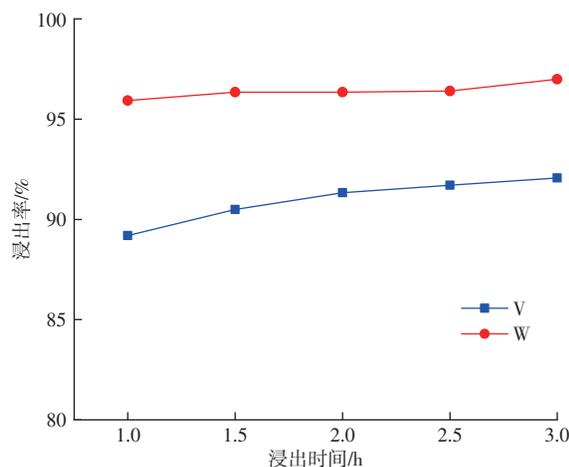


图9 水浸时间对钒、钨浸出率的影响

Fig. 9 Effects of water leaching time on leaching rate of vanadium and tungsten

逐渐提高,水浸时间在2h以下时,钒浸出率上升速度较快;当水浸时间达到2h以后,钒浸出率上升速度逐渐减慢。钨的浸出率随着水浸时间的延长缓慢增加。综合考虑钒和钨的水浸效果以及水浸效率,选择合适的水浸时间为2h,在此条件下,钒和钨的浸出率分别达到91.33%和96.34%。

### 2.6 水浸液和水浸渣分析

上述单因素试验结果表明合适的碱式焙烧—水浸条件为:焙烧温度875℃、焙烧时间1.5h、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>与废催化剂的质量比1、水浸温度80℃、水浸时间2h。在此条件下,水浸液成分分析结果(mg/L):TiO<sub>2</sub> 758.67、WO<sub>3</sub> 2 570.6、V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 821.37、SiO<sub>2</sub> 3 148.26、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1 762.18、CaO 17.41、MgO 17.47。水浸渣成分分析结果(%):TiO<sub>2</sub> 72.74、WO<sub>3</sub> 0.07、V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.09、SiO<sub>2</sub> 0.26、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.09、CaO 0.05、MgO 0.03。水浸渣XRD谱如图10所示。

结合试验原料的主要化学成分以及水浸液和

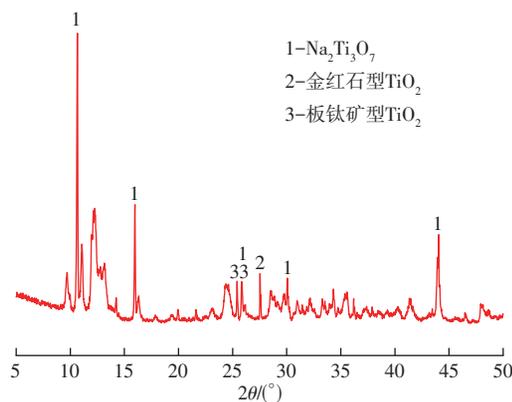


图10 水浸渣的XRD谱

Fig. 10 XRD pattern of water leaching residue

水浸渣成分分析结果可知:经过碱式焙烧—水浸处理后,90%以上的钒、钨、硅和铝均进入水浸液,35%~50%的钙和镁也进入水浸液,而进入水浸液中的钛不足2%。根据图10水浸渣的XRD谱可知:水浸渣中主要物质为 $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ 形式的钛酸盐,除此之外,还有少量金红石型和板钛矿型的 $\text{TiO}_2$ 。因此,经过碱式焙烧—水浸处理后,钒和钨均能被高效提取出来,并与钛分离。

### 3 结论

1) 试验所用废SCR脱硝催化剂的主要化学成分为 $\text{TiO}_2$ ,含量达到84.92%; $\text{WO}_3$ 的含量为4.48%, $\text{V}_2\text{O}_5$ 的含量为1.51%;废SCR脱硝催化剂的主要物相是锐钛矿型 $\text{TiO}_2$ 。

2) 废SCR脱硝催化剂合适的碱式焙烧—水浸工艺条件为:焙烧温度875℃、焙烧时间1.5h、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 与废催化剂的质量1、水浸温度80℃、水浸时间2h,在此条件下钒和钨的浸出率分别为91.33%和96.34%。

3) 碱式焙烧过程中废SCR脱硝催化剂中的钒和钨分别转化为易溶性的 $\text{NaV}_6\text{O}_{15}$ 和 $\text{Na}_2\text{WO}_4$ 。

4) 经过碱式焙烧—水浸处理后,90%以上的钒、钨、硅和铝均进入水浸液,而进入水浸液中的钛不足2%。

#### 参考文献

- [1] 李佳硕,孙千惠,王文鑫,等. “上大压小”降低中国煤电的大气污染排放:基于供应链视角[J]. 中国环境科学, 2023, 43(4): 2047-2056.  
LI J S, SUN Q H, WANG W X, et al. The promoting the big and quashing the small policy reduced the air pollutant emissions from China's coal power supply chain perspective[J]. China Environmental Science, 2023, 43(4): 2047-2056.
- [2] 陆玮. 空气中氮氧化物、二氧化硫的含量测定及大气污染成因解析[J]. 绿色环保建材, 2019(5): 29-30.  
LU W. Determination of nitrogen oxides and sulfur dioxide in air and analysis of causes of air pollution[J]. Green Environmental Protection Building Materials, 2019(5): 29-30.
- [3] MANNINEN S, SASSI M K, LOVEN K. Effects of nitrogen oxides on ground vegetation, *Pleurozium schreberi* and the soil beneath it in urban forests[J]. Ecological Indicators, 2013, 24: 485-493.
- [4] XUE L K, GU R R, WANG T, et al. Oxidative capacity and radical chemistry in the polluted atmosphere of Hong Kong and Pearl River Delta region: analysis of severe photochemical smog episode[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(15): 9891-9903.
- [5] 庄柯,姚杰,刘海秋,等. 火电厂废气脱硝催化剂资源回用存在问题及分析[J]. 热力发电, 2021, 50(7): 170-175.  
ZHUANG K, YAO J, LIU H Q, et al. Problems and analysis of waste SCR catalyst recycling in thermal power plant[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(7): 170-175.
- [6] 李启超. 钒钛基SCR催化剂的中毒、再生与回收[D]. 北京:北京化工大学, 2015.  
LI Q C. Study of deactivation, regeneration and recovery of vanadium-titanium based SCR catalysts[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015.
- [7] LEE J B, EOM Y S, KIM J H, et al. Regeneration of waste SCR catalyst by air lift loop reactor[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(5): 1314-1318.
- [8] 曹礼梅,王青,张巍,等. 典型燃煤电厂废SCR催化剂解析及环境管理思考[J]. 装备环境工程, 2018, 15(2): 45-51.  
CAO L M, WANG Q, ZHANG W, et al. Spent SCR catalysts and environmental management in typical coal-fired power plant[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(2): 45-51.
- [9] 周安慧,邱兆富,杨骥,等. 废SCR催化剂中的污染物及环境风险分析[J]. 无机盐工业, 2021, 53(2): 11-16.  
ZHOU A H, QIU Z F, YANG J, et al. Analysis of pollutants and environmental risk in spent SCR catalyst[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2021, 53(2): 11-16.
- [10] 曹俊,傅敏,周林,等. SCR脱硝催化剂中毒的研究进展[J]. 应用化工, 2018, 47(2): 380-385.  
CHAO J, FU M, ZHOU L, et al. Research progress of SCR denitrification catalyst poisoning[J]. Applied Chemical Industry, 2018, 47(2): 380-385.
- [11] 李倩. 废旧脱硝催化剂的管理与再生技术[J]. 化工管理, 2017(25): 64-65.  
LI Q. Management and regeneration technology of waste denitrification catalyst[J]. Chemical Enterprise Management, 2017(25): 64-65.
- [12] 李强,陈铁军,李奇勇,等. 废弃SCR脱硝催化剂资源化利用研究进展[J]. 中国冶金, 2020, 30(5): 1-10.  
LI Q, CHEN T J, LI Q Y, et al. Research progress on resource utilization of waste SCR denitration catalyst[J]. China Metallurgy, 2020, 30(5): 1-10.
- [13] 马致远,刘勇,周吉奎,等. 碱式焙烧—水浸法回收废催化剂中钒钼的试验研究[J]. 矿冶, 2019, 28(2): 82-86.  
MA Z Y, LIU Y, ZHOU J K, et al. Recovery of vanadium and molybdenum from spent catalyst by alkaline roasting and water leaching[J]. Mining and Metallurgy, 2019,

- 28(2): 82-86.
- [14] 瞿金为,董文霞,翁小影,等. 熔融钒渣钙化及酸浸过程动力学研究[J]. 有色金属工程,2024,14(3): 70-81.  
QU J W, DONG W X, WENG X Y, et al. Study on calcification of molten vanadium slag and kinetics of acid leaching process[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2024, 14(3): 70-81.
- [15] 王博,陈昱嘉,田可欣,等. 废弃SCR脱硝催化剂回收工艺的研究进展[J]. 化工技术与开发,2022,51(7): 65-72.  
WANG B, CHEN Y J, TIAN K X, et al. Research progress on recovery process of waste SCR denitrification catalyst[J]. *Technology Development of Chemical Industry*, 2022, 51(7): 65-72.
- [16] 刘艳梅. 一种氯化生产高纯五氧化二钒的方法: ZL201110388047.6 [P]. 2011-11-29.  
LIU Y M. The invention relates to a method for producing high purity vanadium pentoxide by chlorination; ZL201110388047.6 [P]. 2011-11-29.
- [17] DU G C, FAN C L, YANG H T, et al. Selective extraction of vanadium from pre-oxidized vanadium slag by carbochlorination in fluidized bed reactor [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 237: 117765. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117765.
- [18] 米巧民,姚俊轩,王兵,等. 草酸分级浸取废SCR催化剂中的钒和钨[J]. 化学反应工程与工艺,2023,39(6): 525-534.  
MI Q M, YAO J X, WANG B, et al. Fractional leaching of vanadium and tungsten from spent SCR catalyst with oxalic acid[J]. 2023, 39(6): 525-534.
- [19] 唐丁玲,宋浩,刘丁丁,等. 废弃脱硝催化剂碱浸提取钒和钨的浸出动力学研究[J]. 环境工程学报,2017,11(2): 1093-1100.  
TANG D L, SONG H, LIU D D, et al. Study on leaching kinetics of extracting vanadium and tungsten by sodium hydroxide from spent SCR catalyst[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(2): 1093-1100.
- [20] 卜浩,吕昊子,曹苗,等. 废SCR脱硝催化剂钒钨提取研究进展[J]. 有色金属(冶炼部分),2020(5): 79-85.  
BU H, LÜ H Z, CAO M, et al. Research progress on extraction of vanadium and tungsten from spent SCR denitrification catalysts[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2020(5): 79-85.
- [21] CHOI I H, MOON G, LEE J Y, et al. Hydrometallurgical processing of spent selective catalytic reduction (SCR) catalyst for recovery of tungsten [J]. *Hydrometallurgy*, 2018, 178: 137-145.
- [22] 贾勇,丁万丽,丁希楼,等. 废SCR脱硝催化剂中钨和钒的浸出实验研究[J]. 环境科学学报,2016,36(10): 3759-3764.  
JIA Y, DING W L, DING X L, et al. The leaching of tungsten and vanadium from spent selective catalytic reduction catalyst [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 36(10): 3759-3764.
- [23] 曾小义,梅其政,孙正圆. 废SCR催化剂碳酸钠焙烧浸出回收二氧化钛[J]. 有色金属(冶炼部分),2019(12): 23-28.  
ZENG X Y, MEI Q Z, SUN Z Y. High efficient recycling of TiO<sub>2</sub> from waste SCR Catalyst by Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> roasting and water leaching [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2019(12): 23-28.