

## 630 MW 机组新型无毒催化剂烟气脱硝性能试验研究

肖国振

(国华太仓发电有限公司,江苏 太仓 215400)

**摘要:**在 SCR 脱硝系统中,脱硝催化剂性能的优劣极大地影响了脱硝效率。目前广泛使用的  $V_2O_5-WO_3/TiO_3$  催化剂不仅价格高昂,且失活后催化剂中的钒氧化物会对环境造成严重污染,因此需对传统催化剂进行改进。新型无毒脱硝催化剂以稀土金属氧化物为活性组分,该组分可降低对环境的污染程度。为了研究新型无毒脱硝催化剂在实际工程中的应用效果,以电厂 8 号机组为例,对机组 SCR 脱硝系统的脱硝效率、氨逃逸率和  $SO_2/SO_3$  转化率等进行研究,选择了 360、500 和 600 MW 三个运行负荷,每个工况下分别对 A、B 两侧进行采样检测。测试结果表明,SCR 脱硝系统在 3 个运行负荷下的平均脱硝效率分别为 82.31%、76.81% 和 81.58%;单层新型无毒脱硝催化剂的脱硝效率分别为 52.34%、55.34% 和 57.14%,均大于保证值 45%;在 600 MW 负荷下首层催化剂,即新型无毒催化剂的  $SO_2/SO_3$  平均转化率为 0.38%,小于保证值 1%;3 个负荷下首层催化剂的阻力分别为 96、117.5 和 153 Pa,均小于保证值 200 Pa;平均氨逃逸浓度分别为  $1.26 \times 10^{-6}$ 、 $1.46 \times 10^{-6}$  以及  $0.52 \times 10^{-6}$ ,均小于保证值  $2.5 \times 10^{-6}$ 。360 MW 下脱硝系统 A、B 两侧出口  $NO_x$  浓度分别为 38、46  $mg/m^3$ ;500 MW 下脱硝系统 A、B 两侧出口  $NO_x$  浓度分别为 21、28  $mg/m^3$ ;600 MW 下脱硝系统 A、B 两侧出口  $NO_x$  浓度分别为 27、31  $mg/m^3$ 。所有工况下脱硝系统出口 A、B 两侧烟气中  $NO_x$  浓度均低于超低排放标准要求,新型无毒脱硝催化剂可满足工业应用的要求。

**关键词:**SCR;无毒催化剂;脱硝;稀土催化剂

中图分类号:X701

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2019)06-0146-06

## Experimental study on flue gas denitration performance of a new non-toxic catalyst for 630 MW unit

XIAO Guozhen

(Guohua Taicang Power Generation Co., Ltd., Taicang 215400, China)

**Abstract:** In the SCR system, the denitration efficiency is greatly affected by the performance of the catalyst. The  $V_2O_5-WO_3/TiO_3$  catalyst which is widely used is not only expensive, but also the vanadium oxide in the catalyst after deactivation will cause serious pollution to the environment. Therefore, traditional catalysts need to be improved. The new non-toxic catalyst uses rare earth metal oxide as the active component, which can greatly reduce the degree of environmental pollution. In order to study the application effect of the new non-toxic catalyst in practical engineering, and taking unit 8 of the power plant as an example, the denitration efficiency, ammonia escape rate, and  $SO_2/SO_3$  conversion rate of the SCR denitration system of the unit were tested. Three operating loads of 360, 500, and 600 MW were tested, and sampling inspection was carried out on both sides of A and B under each operating condition. The test results show that the average denitration efficiency of the SCR denitration system under 3 operating loads is 82.31%, 76.81%, and 81.58% respectively, and the denitration efficiency of the single-layer non-toxic denitration catalyst is 52.34%, 55.34%, and 57.14% respectively, which are all greater than guaranteed value of 45%. Under the test load of 600 MW, the average  $SO_2/SO_3$  conversion rate of the new non-toxic catalyst is 0.38%, which is less than the guaranteed value of 1%, and the resistance of the first-layer catalyst under the three loads is 96, 117.5 and 153 Pa respectively, which are both less than the guaranteed value of 200 Pa. The average ammonia escape concentrations are  $1.26 \times 10^{-6}$ ,  $1.46 \times 10^{-6}$ , and  $0.52 \times 10^{-6}$  respectively, which are less than the guaranteed value of  $2.5 \times 10^{-6}$ . The  $NO_x$  concentrations at the sides of the denitra-

收稿日期:2018-11-05;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.18110501

作者简介:肖国振(1975—),男,天津人,高级工程师,研究方向为火电厂节能环保技术。E-mail:16122014@chnenergy.com.cn

引用格式:肖国振.630 MW 机组新型无毒催化剂烟气脱硝性能试验研究[J].洁净煤技术,2019,25(6):146-151.

XIAO Guozhen. Experimental study on flue gas denitration performance of a new non-toxic catalyst for 630 MW unit[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(6): 146-151.



移动阅读

tion system A and B at 360 MW are 38 and 46 mg/m<sup>3</sup>. The NO<sub>x</sub> concentrations at the sides of the denitration system A and B at 500 MW are 21 and 28 mg/m<sup>3</sup>. At 600 MW, the denitration system A, B The NO<sub>x</sub> concentrations at the outlets on both sides of B were 27 and 31 mg/m<sup>3</sup>, respectively. Under all operating conditions, the NO<sub>x</sub> concentration in the flue gas on both sides of outlet A and B of the denitration system is lower than the requirements of ultra-low emission standards, and the new non-toxic denitration catalyst can meet the requirements of industrial applications.

**Key words:** SCR; non-toxic catalyst; denitration; rare earth catalyst

## 0 引言

大气中 NO<sub>x</sub> 浓度无法得到有效控制,将会直接制约我国大气环境质量与经济的可持续发展<sup>[1]</sup>。燃煤机组超低排放要求 NO<sub>x</sub> 排放浓度小于 50 mg/Nm<sup>3</sup><sup>[2]</sup>。目前,在众多的脱硝技术中,选择性催化还原法(SCR)是脱硝效率最高、最为成熟的脱硝技术<sup>[3-4]</sup>。商业烟气脱硝催化剂大多采用钒基催化剂,其活性组分为 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,是一种高毒物质,易对环境及人体造成危害<sup>[5]</sup>。稀土氧化物的顺磁性、晶格氧的可移动性、阳离子的可变价以及表面酸碱性与许多催化作用相关<sup>[6]</sup>。以稀土元素氧化物来替代传统 SCR 脱硝催化剂中的钒氧化物,可降低催化剂对环境的污染,同时可在一定程度上减轻催化剂的中毒。研究表明<sup>[7-8]</sup>,CeO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 催化剂在 275~400 °C 时的脱硝效率超过 90%,同时铈元素加入钛锆氧化物中后,表现出一定的抗水抗硫性能<sup>[9-10]</sup>。当 Ti/Si 质量比为 3:1 时,CeO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 催化剂在 250~450 °C 具有最佳的催化活性和 N<sub>2</sub> 选择性<sup>[11]</sup>。CeO<sub>2</sub> 引入 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub> 催化剂中既可降低 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量,又可提高其脱硝活性与抗碱金属中毒能力<sup>[12]</sup>。稀土元素还可作为助剂加入催化剂中,如钇元素掺杂于锰钛催化剂中,可提高催化剂的低温脱硝性能<sup>[13]</sup>;镧元素作为改性元素添加入锰铈催化剂中,可使催化剂具有更好的脱硝活性<sup>[14-15]</sup>。本文以稀土元素氧化物为主的新型无毒脱硝催化剂,研究其在国华太仓电厂的性能。

## 1 试验

电厂 8 号机组烟气脱硝 SCR 系统的催化剂采用日本日立造船厂公司生产的三角蜂窝 S3 型产品(NO<sub>x</sub>NON-3)。8 号锅炉于 2015 年 3 月进行临修,在此期间将脱硝反应器上层催化剂更换为国内某公司生产的新型无毒催化剂(150 个模块),中、下层为再生后的原有催化剂(各 150 个模块)。

### 1.1 试验参数

电厂锅炉为超临界参数、变压运行、蜗旋管圈直流锅炉,最大连续蒸发量为 1 913 t/h,过热蒸汽压

力为 25.4 MPa,过热蒸汽温度为 571 °C,锅炉设计煤种为神混 1 号+20% 石炭煤。在最大连续蒸发量和设计煤种条件下,SCR 脱硝装置入口烟气流量为 4 487 885 m<sup>3</sup>/h,烟气温度为 378 °C,过剩空气系数为 1.2,NO<sub>x</sub> 浓度为 350 mg/m<sup>3</sup>。入口烟气成分为 N<sub>2</sub> 73.31%、O<sub>2</sub> 3.894%、CO<sub>2</sub> 13.826%、SO<sub>2</sub> 0.037%、H<sub>2</sub>O 8.93%。新型无毒脱硝催化剂元件尺寸为 150 mm×150 mm×830 mm,比表面积为 478 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>,以 72 件元件组成 1 个催化剂模块,模块内催化剂体积为 1.344 6 m<sup>3</sup>。新型催化剂实物如图 1 所示。SCR 脱硝系统由 2 个反应器构成,单个反应器在首层各装填一层新型无毒脱硝催化剂,每层催化剂模块以 5×15 的方式布置,催化剂流通截面积为 128.34 m<sup>2</sup>。新型无毒脱硝催化剂以稀土氧化物为活性组分,含量在 1%~5%,设计使用温度范围为 310~420 °C,轴向抗压强度≥2.5 MPa,径向抗压强度≥0.8 MPa,磨损率≤0.15%/kg,催化剂寿命 24 000 h。性能保证要求:脱硝效率≥45%(单层),SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub> 转化率≤1%,氨逃逸量≤2.5×10<sup>-6</sup>,压降≤200 Pa(单层)。

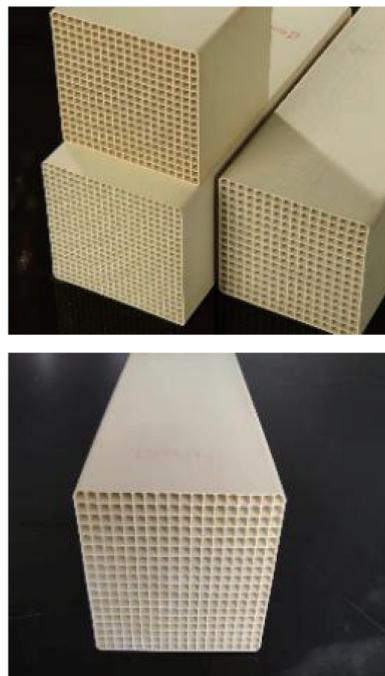


图 1 新型催化剂

Fig.1 New catalyst

## 1.2 试验步骤

脱硝系统催化剂性能试验在 360、500 和 600 MW 负荷下进行。测试的主要项目包括:SCR 系统脱硝反应器中首层催化剂的脱硝效率、单个反应器的脱硝效率、系统出口的  $\text{NO}_x$  浓度、 $\text{NH}_3$  逃逸浓度、反应器首层催化剂出口  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$  转化率等。具体工况见表 1。

表 1 试验工况

Table 1 Test conditions arrangement

工况	机组负荷/MW	测试内容
T-01	600	测量首层催化剂出口 $\text{NO}_x$ 浓度,烟气阻力,氨逃逸浓度, $\text{SO}_2/\text{SO}_3$ 转化率,计算脱硝效率
T-02	600	测量 2、3 层催化剂出口 $\text{NO}_x$ 浓度,烟气阻力, $\text{SO}_2/\text{SO}_3$ 转化率,计算脱硝效率
T-03	360	测量反应器出口 $\text{NO}_x$ 浓度,烟气阻力,氨逃逸浓度,计算脱硝效率
T-04	500	测量反应器出口 $\text{NO}_x$ 浓度,烟气阻力,氨逃逸浓度,计算脱硝效率

## 1.3 测点布置

测试时分别在首层催化剂入口烟道、首层催化剂出口、二层催化剂出口和 SCR 装置出口烟道布置测点。SCR 脱硝系统的 2 个反应器分别记为 A 侧、B 侧反应器,测点布置位置相似(表 2)。测试前,需进行预备性试验。试验工况开始前 4 h,锅炉进行一次全面吹灰,负荷升到试验负荷。工况调整结束后稳定运行至少 30 min 后再进行测试。

表 2 试验测点及测量项目

Table 2 Test points and measurement items

测点	位置	测量项目
1	首层催化剂入口烟道	$\text{NO}_x$ 、静压、 $\text{SO}_2/\text{SO}_3$
2	首层催化剂出口	$\text{NO}_x$ 、静压、 $\text{SO}_3$
3	二层催化剂出口	$\text{NO}_x$
4	SCR 装置出口烟道	$\text{NO}_x$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{SO}_3$

## 1.4 测试方法

### 1.4.1 $\text{NO}_x$ 浓度

在 SCR 装置的相关进、出口烟道截面上,逐点采集烟气样品,分析各取样点的  $\text{NO}_x$  浓度。本试验在 SCR 装置第 1 层催化剂进出口、第 2 层催化剂出口及装置出口采用已有测点,烟气经不锈钢管引出至烟道外,再经除尘、除湿、冷却等处理后,检测烟气中  $\text{NO}_x$  含量,可获得烟道截面的  $\text{NO}_x$  浓度分布,取  $\text{NO}_x$  浓度的算术平均值计算系统脱硝效率及每层催

化剂的效率。

### 1.4.2 氨逃逸浓度

采用美国 EPA CTM-027 标准,以化学溶液方法逐点测量,并记录所采集的干烟气流量和  $\text{O}_2$  浓度。采样管头部装有烟尘过滤器,采样后冲洗并收集到样品瓶中。利用离子电极法测试样品溶液中的氨浓度,根据所采集的烟气流量和  $\text{O}_2$  浓度,计算烟气中  $\text{NH}_3$  浓度,获得烟道断面氨浓度平均值。采样及分析流程示意如图 2 所示。

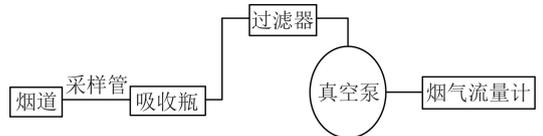


图 2 烟气样品采集及分析流程

Fig.2 Flue gas sample collection and analysis process

### 1.4.3 $\text{SO}_2$ 与 $\text{SO}_3$ 浓度

参照 EPA-method6 和 ASTM D-3226-73T 标准,在脱硝反应器的进口烟道上测量  $\text{SO}_2$ ,并记录所采集的干烟气流量和  $\text{O}_2$  浓度,同时在脱硝反应器进出口烟道测量截面,采用烟尘取样仪和取样管、过滤器对烟道气体进行取样,烟气经过滤后,用带水浴的蛇形玻璃管对  $\text{SO}_3$  进行控制冷凝,水浴温度为  $60 \sim 65 \text{ }^\circ\text{C}$ 。取样后,用去离子水冲洗蛇形玻璃管得到  $\text{SO}_4^{2-}$  溶液,分析溶液中  $\text{SO}_4^{2-}$  含量并换算得到烟气中  $\text{SO}_3$  浓度。采样系统如图 3 所示。

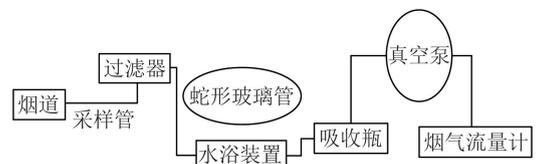


图 3  $\text{SO}_3$  冷凝采集流程

Fig.3  $\text{SO}_3$  condensation collection process

### 1.4.4 系统阻力

系统阻力按静压计算。试验工况下,在锅炉烟道与 SCR 系统进、出接口处分别布置压力测点,采用数显微压计测量 SCR 装置的进出口静压差(进出口烟道截面积接近,可忽略烟气动压差影响)。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 脱硝效率

不同运行负荷下,测得的系统脱硝效率如图 4 所示。每侧脱硝反应器的脱硝效率均在 80% 左右, A 侧反应器在不同负荷下测得的脱硝效率均高于 B 侧,其中脱硝效率最高值是 360 MW 负荷下 A 侧反应器,为 84.36%,最低效率 72.54%,是 500 MW 负

荷下 B 侧反应器。随着运行负荷的变化, A 侧脱硝反应器的脱硝效率没有发生明显改变, 而 B 侧反应器的脱硝效率波动较大。整个脱硝系统在 360、500 和 600 MW 负荷下的平均脱硝效率分别为 82.31%、76.81% 和 81.58%。

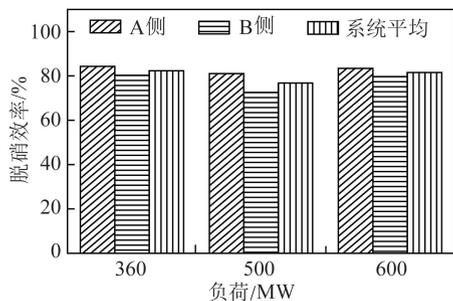


图 4 3 种负荷下脱硝系统的脱硝效率

Fig.4 Denitration efficiency of denitration system under three loads

由图 4 可知, 360 MW 负荷下, 脱硝效果最优; 500 MW 负荷下, 脱硝效率最低。

## 2.2 首层催化剂脱硝效率

图 5 为试验负荷下, 脱硝系统首层催化剂 (即新型无毒脱硝催化剂) 的脱硝效率。对于 2 个反应器的平均脱硝效率, 首层新型无毒脱硝催化剂的平均脱硝效率在 52%~58%。600 MW 时, A 侧反应器测得的最高脱硝效率, 为 61.34%。A 侧脱硝反应器的首层催化剂脱硝效率在 360 MW 负荷下低于 B 侧反应器, 而在其余 2 个负荷下均高于 B 侧反应器。随着运行负荷的增大, A 侧脱硝反应器首层催化剂的效率不断增加, 而 B 侧反应器的实测值趋于稳定。在 360 和 500 MW 负荷下, A、B 两侧反应器首层催化剂的脱硝效率差别较小, 而 600 MW 下, 机组两侧反应器的脱硝效率差异较大。结合各工况的平均脱硝效率, 首层脱硝催化剂的脱硝效率维持在 55% 左右, 随运行负荷的增加, 其脱硝效率增大, 由 52.34% 升到 57.14%, 推测可能是随着负荷的增大, 烟气温度接近催化剂的设计温度, 使其脱硝效率有所提高。

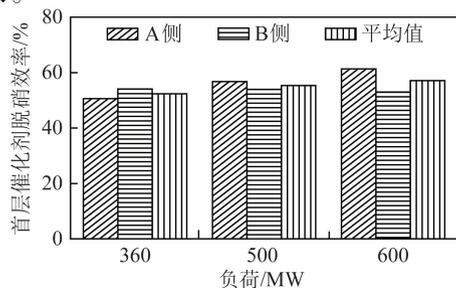


图 5 3 种负荷下首层催化剂的脱硝效率

Fig.5 Denitration efficiency of the first catalyst under three loads

## 2.3 每层催化剂脱硝效率

图 6 为 600 MW 负荷下每层催化剂的脱硝效率。第 1 层催化剂的脱硝效率最高, 主要是因为烟气中的  $\text{NO}_x$  经过首层催化剂后, 浓度降低, 到达第 2、3 层时,  $\text{NO}_x$  浓度很低, 催化剂去除  $\text{NO}_x$  的难度加大, 脱硝效率相应减小。此外, 随着烟气流动, 烟气温度降低, 从而降低了第 2、3 层催化剂的脱硝效率。而 A 侧反应器第 3 层催化剂的脱硝效率高于第 2 层, 推测可能是由于试验过程中的测量误差造成。

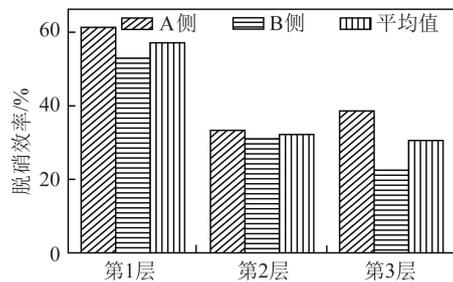


图 6 600 MW 负荷下脱硝系统每层催化剂的脱硝效率

Fig.6 Denitration efficiency of each layer of catalyst in denitration system under 600 MW load

## 2.4 氨逃逸量

图 7 为脱硝系统的氨逃逸量, 可知, A 侧反应器中, 氨逃逸量随运行负荷的增加而减少, 500 MW 负荷下, B 侧反应器检测出超过  $2 \times 10^{-6}$  的氨逃逸量, 使在 500 MW 负荷下脱硝系统的平均氨逃逸量接近  $1.5 \times 10^{-6}$ , 为 3 组测试工况的峰值; 600 MW 下, 整个脱硝系统的氨逃逸量只有  $0.52 \times 10^{-6}$ 。影响氨逃逸量的因素较多, 在较低负荷下 (360 MW), 烟气流速较小, 烟气温度较低, 可能会导致流场不均匀而引起局部喷氨量增加, 使氨逃逸量上升。结合脱硝系统的脱硝效率分析, 500 MW 下系统脱硝效率最低, 易造成氨逃逸量上升。

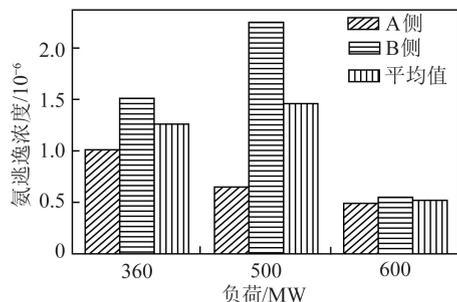


图 7 不同负荷下脱硝系统的氨逃逸浓度

Fig.7 Ammonia escape concentration of denitration system under different loads

## 2.5 $\text{SO}_2/\text{SO}_3$ 转化率

600 MW 负荷下脱硝系统  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$  转化率见表

3。可以看出,600 MW 负荷下,A、B 两侧脱硝反应器首层催化剂的  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$  转化率均较低,整个脱硝系统的首层催化剂  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$  转化率控制在0.4%以内;3 层催化剂的  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$  转化率控制在0.61%左右。对比 A、B 两个脱硝反应器的测试值,B 侧反应器的  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$  转化率始终大于 A 侧。

表3 600 MW 负荷下脱硝系统  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$  转化率

催化剂	A 侧	B 侧	平均值
首层催化剂	0.32	0.43	0.38
3 层催化剂	0.58	0.63	0.61

## 2.6 首层催化剂阻力

图8为不同负荷下首层催化剂阻力。随着运行负荷增大,首层催化剂的平均阻力增大,由360 MW 负荷下的96 Pa 上升到600 MW 负荷下的153 Pa。在360 MW 和600 MW 工况下,A 侧脱硝反应器首层催化剂阻力的实测值低于B 侧反应器,而在500 MW 下的测试值相等。随着锅炉运行负荷增长,脱硝系统入口的烟气量增加,在相同面积的截面上,烟气流速随运行负荷的增长而增长,造成催化剂阻力随着负荷的增加而变大。

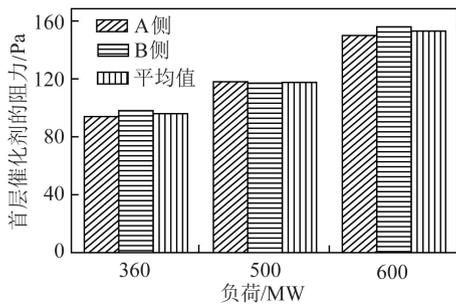


图8 不同负荷下首层催化剂阻力

Fig.8 First layer catalyst resistance under different loads

## 2.7 SCR 系统出口 $\text{NO}_x$ 浓度

图9为不同负荷下SCR 系统出口  $\text{NO}_x$  浓度。可知,在3 个不同负荷下,两侧SCR 脱硝装置出口  $\text{NO}_x$  浓度均满足超低排放标准。在3 种不同运行负荷下,A 侧脱硝反应器出口的  $\text{NO}_x$  浓度始终低于B 侧。500 MW 和600 MW 负荷下,出口检测到的  $\text{NO}_x$  浓度比360 MW 负荷下的平均浓度低,这是因为360 MW 低负荷下,烟气温度较低,导致脱硝效率降低。500 MW 负荷时,入口  $\text{NO}_x$  浓度最低,使系统出口  $\text{NO}_x$  浓度较低。

## 2.8 传统催化剂与新型催化剂比较

表4为传统商用脱硝催化剂与新型催化剂对比,

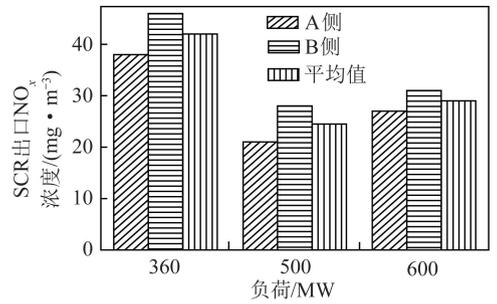


图9 不同负荷下SCR 系统出口  $\text{NO}_x$  浓度

Fig.9 Concentration of  $\text{NO}_x$  at the outlet of the SCR system under different loads

可见新型脱硝催化剂性能更优异。

表4 传统催化剂与新型催化剂性能对比

Table 4 Comparison of performance between traditional catalyst and new catalyst

项目	传统商用催化剂	新型催化剂
知识产权	引进国外技术	自主知识产权
组分体系	V-W-Ti- $\text{O}_x$	稀土掺杂过渡金属复合氧化物
脱硝效率/%	>90	>90
毒性	$\text{V}_2\text{O}_5$ 剧毒	无毒
支撑体材料	需要进口	国产
使用温度/ $^{\circ}\text{C}$	310~410	250~450
抗压强度/MP	<2	3~15
抗中毒能力	中毒后较难再生	中毒后可再生
防水性能	遇湿散塌	防水
失效后处理	二次污染,回收费 8 000 元/ $\text{m}^3$	可再生作保温墙地砖等

## 3 结 论

1) 新型无毒脱硝催化剂与再生的商业催化剂联用,在360、500 和600 MW 运行负荷下,整个SCR 机组的脱硝效率均可满足运行要求。各工况下反应器出口  $\text{NO}_x$  浓度均小于  $50 \text{ mg}/\text{m}^3$ ,达到排放标准。

2) 各工况下脱硝系统首层催化剂(新型无毒脱硝催化剂)的脱硝效率均大于52%,满足性能保证值(>45%)的要求。

3) 3 种运行负荷下,首层催化剂的阻力分别为96、117.5、153 Pa,均小于保证值200 Pa;脱硝系统氨逃逸浓度分别为  $1.26 \times 10^{-6}$ 、 $1.45 \times 10^{-6}$ 、 $0.52 \times 10^{-6}$ ,均小于保证值  $2.5 \times 10^{-6}$ 。600 MW 负荷下首层新型无毒脱硝催化剂的  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$  转化率为0.38%,小于保证值1%。因此,相对于常规脱硝催化剂,新型无毒脱硝催化剂在实际应用过程中具有阻力

小、SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub>转化率低和环保等优点。

## 参考文献 (References):

- [1] 冯波. 控制大气污染物排放促进电力工业可持续发展[J]. 电力设备, 2005(5): 104-106.  
FENG Bo. Controlling air pollutant emissions and promoting sustainable development of power industry[J]. Electrical Equipment, 2005(5): 104-106.
- [2] 朱法华. 燃煤电厂烟气污染物超低排放技术路线的选择[J]. 中国电力, 2017, 50(3): 11-16.  
ZHU Fahua. Methodologies on choosing appropriate technical route for ultra low emission of flue gas pollutants from coal-fired power plants[J]. Electric Power, 2017, 50(3): 11-16.
- [3] YANG Y, LI J, HE H. Research and proposal on SCR reactor optimization for industrial boiler[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2018, 68(7): 737-754.
- [4] 韦正乐, 黄碧纯, 叶代启, 等. 烟气 NO<sub>x</sub> 低温选择性催化剂、还原催化剂研究进展[J]. 化工进展, 2007, 26(3): 320-325.  
WEI Zhengle, HUANG Bichun, YE Daiqi, et al. Review of catalysts for low-temperature SCR of NO<sub>x</sub>[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2007, 26(3): 320-325.
- [5] 唐昊, 陆强, 杨江毅, 等. 废弃 SCR 催化剂的循环再利用及表征分析研究[J]. 燃料化学学报, 2018, 46(2): 232-241.  
TANG Hao, LU Qiang, YANG Jiangyi, et al. Research on recycling and characterization analysis of the waste SCR catalyst[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2018, 46(2): 232-241.
- [6] 余岳溪, 廖永进, 束航, 等. SO<sub>2</sub> 与 H<sub>2</sub>O 对商用钒钨钛脱硝催化剂毒化作用综述[J]. 中国电力, 2016, 49(12): 168-173.  
YU Yuexi, LIAO Yongjin, SHU Hang, et al. Review of SO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O poisoning over commercial vanadium-titanium catalysts in the selective catalytic reduction denitration[J]. Electric Power, 2016, 49(12): 168-173.
- [7] 王艳, 李兆强. 含稀土 NH<sub>3</sub>-SCR 脱硝催化剂研究进展[J]. 稀土, 2016, 37(4): 120-128.  
WANG Yan, LI Zhaoqiang. Advances in rare earth-containing catalysts for the selective catalytic reduction of NO<sub>x</sub> with NH<sub>3</sub>[J]. Chinese Rare Earths, 2016, 37(4): 120-128.
- [8] GAO Xiang, Du Xuesen, CUI Liwen, et al. A Ce-Cu-Ti oxide catalyst for the selective catalytic reduction of NO with NH<sub>3</sub>[J]. Catalysis Communications, 2010, 12(4): 255-258.
- [9] 李海英, 周勇, 王学海, 等. 氧化铈基 NH<sub>3</sub>-SCR 脱硝催化剂研究进展[J]. 工业催化, 2013, 21(1): 6-10.  
LI Haiying, ZHOU Yong, WANG Xuehai, et al. Progress in selective catalytic reduction of NO<sub>x</sub> with NH<sub>3</sub> over cerium oxide-based catalysts[J]. Industrial Catalysis, 2013, 21(1): 6-10.
- [10] DU X, GAO X. Experimental and theoretical studies on the influence of water vapor on the performance of a Ce-Cu-Ti oxide SCR catalyst[J]. Applied Surface Science, 2013, 270(14): 370-376.
- [11] 姚小江, 贡营涛, 李红丽, 等. 铈基催化剂用于 NH<sub>3</sub> 选择性催化还原 NO<sub>x</sub> 的研究进展[J]. 物理化学学报, 2015, 31(5): 817-828.  
YAO Xiaojiang, GONG Yingtao, LI Hongli, et al. Research progress of ceria-based catalysts in the selective catalytic reduction of NO<sub>x</sub> by NH<sub>3</sub>[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2015, 31(5): 817-828.
- [12] LIU Z M, ZHANG S X, LI J H, et al. Novel V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-CeO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> catalyst with low vanadium loading for the selective catalytic reduction of NO<sub>x</sub> by NH<sub>3</sub>[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2014, 158/159: 11-19.
- [13] ZHANG S, LIU X. Effect of doping on oxygen vacancies of TiO<sub>2</sub> supported MnO<sub>x</sub> for selective catalytic reduction of NO with NH<sub>3</sub> at low temperature[J]. Catalysis Communications, 2012, 25(15): 7-11.
- [14] 闫志勇, 胡建, 徐鸿. 具有高抗水、抗硫性的 CeO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 催化剂脱硝性能研究[J]. 动力工程学报, 2011, 31(1): 58-63.  
YAN Zhiyong, HU Jian, XU Hong. Denitrification property of catalyst CeO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> with strong hydrothermal stability and sulfur tolerance[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2011, 31(1): 58-63.
- [15] 沈伯雄, 马娟, 胡国丽, 等. 掺杂型 Mn-La/Ti-PILC 催化剂的低温 SCR 脱硝研究[J]. 燃料化学学报, 2012, 40(11): 1372-1376.  
SHEN Boxiong, MA Juan, HU Guoli, et al. Study on the doping catalyst of Mn-La/Ti-PILC for low temperature SCR[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2012, 40(11): 1372-1376.