

液体节煤催化剂对混煤燃烧性能的研究与应用

吴毅¹, 廖建开¹, 张耀宁¹, 陈宝霞¹, 刘福忠¹, 杨涛¹, 蒋榕²

(1. 华电(漳平)能源有限公司, 福建 漳平 364400; 2. 龙祥雨(深圳)科技有限公司, 广东 深圳 518109)

摘要:通过无烟煤、烟煤与褐煤的混合使用,实现各类煤种的优势互补。本研究对300 MW循环流化床锅炉中的混合煤进行节煤催化剂添加试验,在锅炉工况稳定的条件下,机组运行负荷为240 MW,当混合燃煤中加入的节煤催化剂含量为千分之一时,发电标准煤耗降低了9.37 g/kWh,节煤率为2.90%,具有显著的节煤效果。同时,灰渣中,添加期的残碳含量比空白期的平均值降低了26.04%,飞灰中,添加期的残碳含量比空白期的平均值降低了18.20%,展现了显著的减排效果。表明节煤催化剂对各类煤种均具有节煤效果。

关键词:节煤催化剂;节煤率;混煤;减排

中图分类号:TK16 文献标志码:B 文章编号:1006-6772(2024)S1-0275-06

Research and application of liquid coal saving catalyst on combustion performance of mixed coal

WU Yi¹, LIAO Jiankai¹, ZHANG Yaoning¹, CHEN Baoxia¹, LIU Fuzhong¹, YANG Tao¹, JIANG Rong²

(1. Huadian (Zhangping) Energy Co., Ltd., Zhangping 364400, China; 2. Long Xiang Yu (Shenzhen) Technology Co., Ltd., Shenzhen 518100, China)

Abstract: In this study, we tested the coal saving effect of a catalyst on a mixture of anthracite, bituminous coal and lignite, which have complementary advantages. We used a 300 MW circulating fluidized bed boiler with a stable operating load of 240 MW. We found that adding the catalyst to the mixed coal reduced the standard coal consumption of power generation by 9.37 g/kWh or 2.90%. This was a significant improvement in coal efficiency. Moreover, the catalyst also reduced the residual carbon content in ash slag and fly ash by 26.04% and 18.20%, respectively, compared to the control period. This showed a significant reduction in emissions. The catalyst was effective for all kinds of coal.

Key words: coal saving catalyst; coal saving rate; mixed coal; emission reduction

0 引言

不同煤种具有不同的性质。无烟煤的挥发性有机物含量较低,不容易燃烧,燃烧速度较慢,燃尽时间较长,储量丰富且价格较低。烟煤大多数松散、型不好且易结焦,虽然发热量较高,但燃烧时火焰长且多烟。褐煤含水量较高,挥发性有机组分高,在空气中易风化碎裂,燃点低。为了实现不同种类、不同性质煤的优势互补,发挥各煤种的优点,做到物尽其用,降低生产成本,生产企业采用了各种煤混合燃烧或掺烧的方法。华电(漳平)能源有限公司选择以无烟煤、烟煤、褐煤按不同比例混合使用^[1]。

从煤炭清洁利用的角度出发,探索节约型能源利用方式已成为发展之必然^[2]。在煤炭燃烧过程中,通过添加适宜的催化剂,优化煤炭燃烧特性,提升煤炭燃烧效率,从而达到节煤的效果^[3]。此举不仅有助于缓解能源紧张,降低二氧化碳、二氧化硫及氮氧化物的排放,还能推动经济可持续发展,减轻环境污染,实现经济效益与社会效益的双重提升。因此,实现煤炭燃烧的“高效率、低污染”十分重要。

循环流化床锅炉一般是以粒径在8.5~10 mm,煤块大小在25~30 mm的煤颗粒为燃烧煤样。循环流化床锅炉具有迅速燃烧、燃烧效率较好、适应各种煤种、容易控制调节等优点,被广泛应用于火力发

收稿日期:2024-02-02;责任编辑:常明然 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.CN24020201

基金项目:300 MW循环流化床LXY节煤催化剂应用研究(CHDKJ23-02-243)

作者简介:吴毅(1982—),男,福建龙岩人,工程师。E-mail: ffmeiliu@qq.com

通讯作者:蒋榕(1996—),女,深圳南山人,工程师。E-mail: 961925868@qq.com

引用格式:吴毅,廖建开,张耀宁,等.液体节煤催化剂对混煤燃烧性能的研究与应用[J].洁净煤技术,2024,30(S1):275-280.

WU Yi, LIAO Jiankai, ZHANG Yaoning, et al. Research and application of liquid coal saving catalyst on combustion performance of mixed coal[J].

Clean Coal Technology, 2024, 30(S1): 275-280.

电、化工厂等供热工业。如何降低煤耗,提高锅炉效率,降低成本是企业关注的重点。除进行设备结构改造提升外,使用节煤催化剂也是实现节能减排的重要途径^[4-5]。

华电(漳平)能源有限公司#6 锅炉为东方锅炉厂生产的 DG1025-17.4-II 18 型循环流化床锅炉。本试验采用了深圳龙祥雨科技有限公司研发并应用于火电行业的 LXY 催化剂进行试验。探究了在循环流化床锅炉中应用节煤催化剂的节煤情况。这对提高循环流化床锅炉中煤的燃烧效率,降低煤耗,减少二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物、颗粒物排放具有重要意义。

1 节煤催化剂性质及添加方法

1.1 节煤催化剂的性质

LXY 节煤催化剂是深圳龙祥雨科技有限公司研发的高效节煤催化剂,是多元组分的复合型燃煤催化剂,其成分包括分散剂、膨化剂、渗透剂、助熔剂、金属催化剂;是一种透明液体,具有不燃烧、不含有有机物、本身没有热量、没有毒性、对设备不产生腐蚀等特点;燃烧过程中无有毒的气体产生,不含有重金属,使用安全。

节煤催化剂基本物理化学性质如下:pH 值为 5.51;节煤催化剂密度为 1.22 t/m^3 ;固体含量为 32.5%。

1.2 节煤催化剂作用原理

因为煤炭燃烧过程包括吸热反应和放热反应,所以煤炭燃烧的实际做功热量等于燃烧放出的热量减去燃烧反应中需要吸收的热量,那么降低煤炭燃烧过程需要吸收的热量,就相当于提高了煤炭燃烧中发热量的有效利用,进而减少了燃煤内耗。节煤催化剂是通过多重作用来降低煤炭燃烧反应的活化能和煤炭的着火点,以提高煤炭的综合燃烧性能并降低煤耗。

煤炭燃烧反应中,节煤催化剂的作用机理是氧传递理论和电子转移理论^[6],催化剂的加入使煤炭燃烧的化学反应历程发生了改变,减少吸热反应、降低了着火点,使燃烧更容易。此外,节煤催化剂降低了煤炭中易挥发芳香烃类化合物燃烧过程中裂解的裂解能,减少了芳香烃类化合物燃烧过程的吸热反应。在燃烧过程中,节煤催化剂通过内部供氧,膨化剂、渗透剂的作用使煤炭“内外同时燃烧”,降低煤炭未燃尽率。

1.3 节煤催化剂添加方法

节煤催化剂的添加量为混煤量的千分之一,稀

释比例为催化剂:水=1:1,在传输皮带上通过喷淋器加入,并采用自动控制添加系统实现准确添加,使催化剂在传输过程中渗透入煤中,达到混合均匀的目的。图 1 为液体节煤催化剂自动添加示意图。

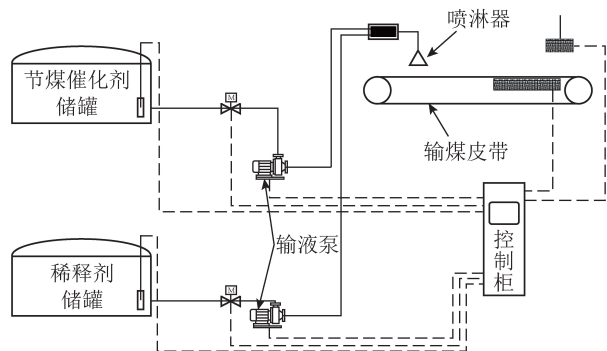


图 1 液体节煤催化剂自动添加示意图

2 试验方法

本次试验使用的节煤催化剂及添加设备由龙祥雨(深圳)科技有限公司提供,华电(漳平)能源有限公司提供了试验煤样的工业分析数据和锅炉的运行控制。试验中,由电厂中控室提供各种数据,西安热工院、华电电科所、龙祥雨科技有限公司共同记录、核对试验数据,并按照国标、行业标准进行计算、分析与修正。

2.1 混合煤样热分析试验

混合煤样的热分析试验条件如下:升温速率为 $10 \text{ }^{\circ}\text{C/min}$;实验温度从室温加热到 $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$;实验气氛是空气;铂金坩埚为 $5 \times 5 \text{ mm}$;样品质量约为 10 mg 。

通过热重实验,得到了添加和不添加 LXY 节煤催化剂混煤样的热重曲线(TG)和差热分析(DTA)曲线,分别如图 2 和图 3 所示。

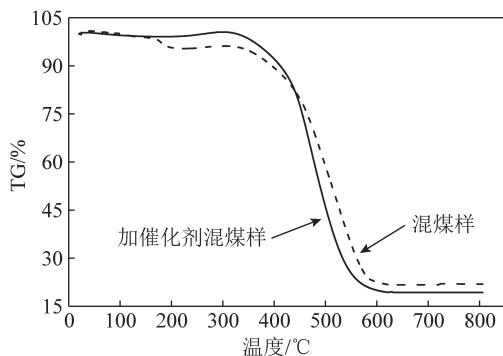


图 2 热重曲线

从图 2 可以看出,混煤样与添加了节煤催化剂混煤样的热重曲线形状基本相似;添加了节煤催化剂的混煤样在 $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 之前热重曲线比较平稳,这可

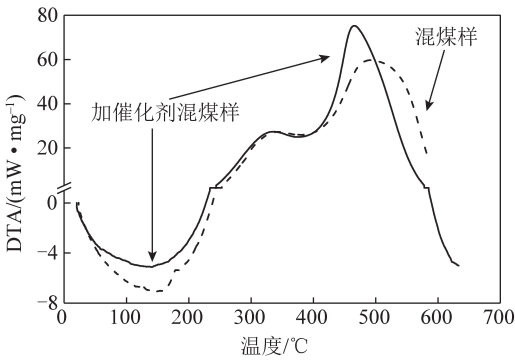


图 3 差热分析曲线

能是节煤催化剂加入后,煤中那些低温易挥发的组分被固定了。而未添加节煤催化剂的混煤样在 200~350℃的失重比添加了节煤催化剂的更为明显,这是因为煤中低于 350℃的有机大分子损失了。混煤样在 200~350℃的失重约为 5%~12%,此时煤中的低温物质挥发了,没有产生做功热量,但添加节煤催化剂后,这部分易挥发物质可以燃烧产生热量。添加了节煤催化剂的混煤样在 400~550℃迅速燃烧,600℃基本燃烧完全;而未添加节煤催化剂的混煤样在 400~550℃的燃烧速度要比添加了节煤催化剂的更缓慢,但 600℃也基本燃烧完全;二者在 600℃之后的失重比较平稳,不过仍有 2%左右的差别,说明添加节煤催化剂具有节煤效果。

从图 3 可以看出,未添加节能催化剂的混煤样与添加了节煤催化剂的混煤样,差热分析曲线具有明显差别。添加了节煤催化剂的混煤样吸热峰明显低于未添加的,而且添加催化剂后煤样的着火点降低了。纵坐标小于 0 的是吸热反应,大于 0 的是放热反应。添加了节煤催化剂的混煤样放热峰明显比未添加的提前了,且峰的高度更高、上升速度更快。因此,添加节能催化剂的主要作用包括:使吸热峰变小,这说明煤炭燃烧过程内耗降低,这是由于催化剂的氧传递、电子转移作用,降低了煤炭中易挥发有机化合物在燃烧过程中的裂解能;使吸热峰在 400~460℃迅速上升并达到最高,这说明加入催化剂后煤燃烧迅速、放热集中;使燃烧完成温度低于未添加节能催化剂的混煤样,这说明加入节能催化剂可以提高燃烧速度。

2.2 试验安排

本次试验在华电(漳平)能源有限公司的#6 锅炉进行,该锅炉属亚临界参数国产化汽包炉,自然循环,单炉膛,一次再热,汽冷式旋风分离器,平衡通风,压力平衡点位于炉膛出口处。露天布置燃煤,固态排渣,受热面采用全悬吊方式,钢架为双排柱钢结构。

试验时间共计 16 d,其中空白期 7 d,过渡期 2 d,添加期 7 d。具体试验时间为 2023 年 12 月 9 日 8:00 至 2023 年 12 月 16 日 8:00 为空白期,2023 年 12 月 16 日 8:00 至 2023 年 12 月 18 日 8:00 为过渡期,2023 年 12 月 18 日 8:00 至 2023 年 12 月 25 日 8:00 为添加期。试验期间的机组性能数据作为评价催化剂效果的依据。

2.3 试验期间锅炉运行工况

试验期间 6#循环流化床锅炉负荷为每日 8:00~18:00,机组运行负荷为 240 MW、纯凝工况运行。

2.4 试验用煤

由于公司储煤仓容量有限,出煤量达不到 16 d 试验用煤量的要求。实际煤的种类包括无烟煤、烟煤、褐煤,每个班次混合的比例也不同。为了克服煤炭热量变化对试验结果的影响,在每班次对所用煤的煤质进行一次工业分析。煤的用量以入炉煤皮带秤计量结果为依据。

2.5 试验用节煤催化剂配比

试验用节煤催化剂与原煤实际质量配比为千分之一。为了使节煤催化剂更好的渗透到原煤中,试验时将节煤催化剂用水稀释一倍。

3 结果与讨论

3.1 数据取值说明

每日的发电量、混煤的混合比例、煤消耗量,煤的工业分析数据包括水分、灰分、挥发分、热值。标煤的热值为 7 000 kcal/kg。

3.2 计算公式

根据电力行业标准 DL/T 2262—2021 中第 8.6 条,本次试验统计期内,供热比为 0,平均发电标准煤耗率按下式计算。

平均发电标准煤耗率(g/kWh)=统计期内标准煤量(g)/统计期内电厂发电量(kWh), (1)

节煤率按下式计算。

节煤率(%)= $\frac{G_0-G_1}{G_0} \times 100\%$, (2)

式中, G_0 为空白期平均发电标准煤耗率,g/kWh; G_1 为添加期平均发电标准煤耗率,g/kWh。

3.3 试验结果

3.3.1 节煤率及锅炉效率

6#循环流化床锅炉在节煤催化剂添加的空白期与添加期的试验数据见表 1。表 1 中的数据已经根据煤仓仓位,催化剂用量,稀释水用量,煤的热值、水分,以及锅炉负荷提高导致煤耗降低等因素进行了

修正。添加千分之一节煤催化剂后炉膛床温、床压正常,锅炉蒸汽各种参数正常,锅炉运行正常。

表 1 LXY 节煤催化剂添加前、后数据采集汇总及计算

时间段 项目	空白期						
	12 月 9 日	12 月 10 日	12 月 11 日	12 月 12 日	12 月 13 日	12 月 14 日	12 月 15 日
实发功率/MW	241.2	241.5	241.7	241.4	241.1	242.2	241.9
发电量/MWh	6 084.90	6 098.28	5 799.96	4 718.70	5 676.90	5 551.20	5 044.80
烟煤：无烟煤：褐煤	1：0：1	3：0：7	8：7：0	7：3：0	2：1：0	7：0：8	10：5：4
耗煤量/t	3 029.426	2 955.467	2 802.078	2 371.591	2 963.474	3 029.078	2 696.533
空干基挥发分/%	19.23	18.79	20.06	23.39	14.82	13.02	26.26
煤热值/(kcal·kg ⁻¹)	4 435.05	4 634.48	4 606.41	4 578.38	4 330.47	4 166.04	4 378.26
折算标煤/tce	1 919.38	1 956.72	1 843.93	1 551.15	1 833.32	1 802.75	1 686.59
发电标煤耗/(g·kWh ⁻¹)	315.43	320.86	317.92	328.72	322.94	324.75	334.32
空白期发电标煤耗/(g·kWh ⁻¹)	323.80						
修正后空白期发电标煤耗/(g·kWh ⁻¹)	323.51						

时间段 项目	添加期						
	12 月 18 日	12 月 19 日	12 月 20 日	12 月 21 日	12 月 22 日	12 月 23 日	12 月 24 日
实发功率/MW	242.1	241.7	241.6	241.5	241.0	241.5	241.5
发电量/MWh	6 307.38	5 044.62	5 664.12	5 116.56	5 248.14	5 586.54	5 618.46
烟煤：无烟煤：褐煤	6：9：11	0：13：17	0：3：2	0：1：1	0：10：11	0：1：1	0：9：11
耗煤量/t	3 261.321	2 689.507	3 073.369	2 836.320	2 893.371	2 978.913	3 050.757
空干基挥发分/%	24.01	28.62	28.31	28.82	23.99	27.62	25.16
煤热值/(kcal·kg ⁻¹)	4 284.95	3 736.32	3 929.80	3 931.13	4 070.44	4 018.43	4 248.22
折算标煤/tce	1 996.37	1 435.55	1 725.39	1 592.85	1 682.47	1 710.08	1 851.47
发电标煤耗/(g·kWh ⁻¹)	316.51	284.57	304.62	311.31	320.58	306.11	329.53
添加期发电标煤耗/(g·kWh ⁻¹)	310.41						
修正后添加期发电标煤耗/(g·kWh ⁻¹)	314.14						
平均节煤率/%	2.90						

测试循环流化床锅炉正平衡效率(执行标准为 GB/T 10184—2015)作为参考,正平衡计算煤耗结果见表 1。可知,空白期发电标准煤耗为 323.51 g/kWh,添加期发电标准煤耗为 314.14 g/kWh,差值为 9.37 g/kWh,节煤率为 2.9%。

由表 1 的数据可知,本次试验期间空白期和添加期煤的种类和混合比波动非常大,但煤的种类和混合比对节煤率的影响不大,说明该催化剂对不同煤种的燃烧均具有明显的促进作用,可以通过改变燃烧过程的化学反应达到节煤的效果。

3.3.2 添加期煤炭的挥发分对煤耗的影响

从图 4 可知,在催化剂的添加期,随着煤的空干基挥发分的增加,煤耗呈现下降趋势。这一现象与催化剂反应原理相吻合,即通过降低煤炭中易挥发有机化合物在燃烧过程中共价键裂解的裂解能,减少裂解反应吸热,另一方面催化剂的添加也使煤炭中大分子有机化合物形成固定的形式而燃烧释放热

量,从而降低了每度电的煤耗。

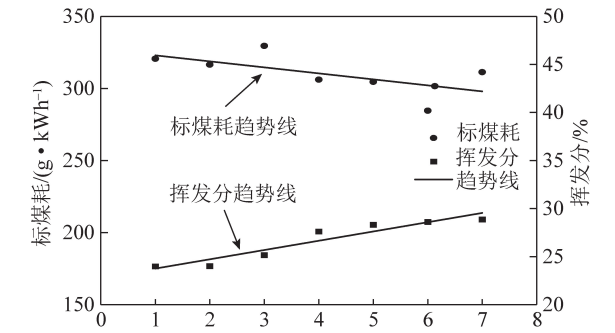


图 4 煤的空干基挥发分与煤耗的关系

3.3.3 烟气中含氧量的变化

表 2 列出了空白期和添加期烟气中含氧量的变化。可知,在试验期间,没有添加催化剂时烟气中的含氧量平均值为 2.42%,添加了催化剂时烟气中的含氧量平均值为 2.28%,添加了催化剂的烟气含氧量比未添加催化剂下降了 5.78%。这说明添加节煤催化剂后促进了煤炭的燃烧,增加了氧气的用量,

从而使排放的烟气中含氧量降低。

3.3.4 飞灰和炉渣中残碳量的变化

飞灰和炉渣中残碳量的变化是衡量煤炭燃烧效果的一个重要依据,飞灰和炉渣中的残碳量越低,说明煤燃烧得越完全。表 3 列出了空白期和添加期炉渣中残碳量的变化。可知,空白期炉渣可燃物含量的平均值为 1.69%,添加期炉渣可燃

物含量的平均值为 1.25%,下降率为 26.04%;表 4 列出了空白期和添加期飞灰中残碳量的变化,空白期飞灰残碳量由 4.56%下降到 3.73%,下降率为 18.20%。表明节煤催化剂对煤炭燃烧反应的催化作用,使得煤能够充分燃烧,从而降低了飞灰与炉渣的含碳量,因此节煤催化剂有助于实现煤炭的完全燃烧。

表 2 空白期与添加期烟气含氧量比较

空白期日期	12 月 9 日	12 月 10 日	12 月 11 日	12 月 12 日	12 月 13 日	12 月 14 日	12 月 15 日	平均值
烟气含氧量/%	2.43	2.54	2.42	2.50	2.51	2.05	2.46	2.42
添加期日期	12 月 18 日	12 月 19 日	12 月 20 日	12 月 21 日	12 月 22 日	12 月 23 日	12 月 24 日	平均值
烟气含氧量/%	2.37	2.25	2.22	2.16	2.13	2.45	2.41	2.28

表 3 空白期与添加期炉渣中可燃物含量比较

空白期日期	12 月 9 日	12 月 10 日	12 月 11 日	12 月 12 日	12 月 13 日	12 月 14 日	12 月 15 日	平均值
可燃物量/%	2.07	1.67	1.26	1.09	2.37	1.58	1.77	1.69
添加期日期	12 月 18 日	12 月 19 日	12 月 20 日	12 月 21 日	12 月 22 日	12 月 23 日	12 月 24 日	平均值
可燃物量/%	0.70	1.27	1.34	1.63	1.25	1.21	1.35	1.25

表 4 空白期与添加期飞灰中残碳量比较

空白期日期	12 月 9 日	12 月 10 日	12 月 11 日	12 月 12 日	12 月 13 日	12 月 14 日	12 月 15 日	平均值
可燃物量/%	5.21	4.60	2.78	3.77	6.59	3.91	5.07	4.56
添加期日期	12 月 18 日	12 月 19 日	12 月 20 日	12 月 21 日	12 月 22 日	12 月 23 日	12 月 24 日	平均值
可燃物量/%	2.97	3.62	3.08	4.40	3.66	3.19	5.19	3.73

3.3.5 二氧化硫减排影响

表 5 列出了空白期和添加期脱硫塔入口的二氧化硫浓度变化。可知,空白期脱硫塔入口的二氧化

硫含量平均值为 655.28 mg/m³,添加期平均值为 589.85 mg/m³,二氧化硫含量下降了 9.99%,表明添加节煤催化剂对 SO₂具有一定的减排效果。

表 5 空白期与添加期脱硫塔入口处 SO₂含量比较

空白期日期	12 月 9 日	12 月 10 日	12 月 11 日	12 月 12 日	12 月 13 日	12 月 14 日	12 月 15 日	平均值
SO ₂ /(mg · m ⁻³)	663.28	867.09	809.36	643.33	665.50	502.70	435.70	655.28
添加期日期	12 月 18 日	12 月 19 日	12 月 20 日	12 月 21 日	12 月 22 日	12 月 23 日	12 月 24 日	平均值
SO ₂ / (mg · m ⁻³)	533.67	561.91	450.00	658.51	606.68	791.23	526.94	589.85

3.3.6 氮氧化物减排影响

表 6 列出了空白期和添加期脱硫塔入口的氮氧化物浓度变化,空白期脱硫塔入口的氮氧化物含量

平均值为 48.12 mg/m³,添加期平均值为 42.11 mg/m³,NO_x含量下降了 12.49%,表明添加节煤催化剂对 NO_x具有一定的减排效果。

表 6 空白期与添加期脱硫塔入口处 NO_x含量比较

空白期日期	12 月 9 日	12 月 10 日	12 月 11 日	12 月 12 日	12 月 13 日	12 月 14 日	12 月 15 日	平均值
NO _x /(mg · m ⁻³)	52.65	54.01	50.00	49.37	50.78	41.89	38.12	48.12
添加期日期	12 月 18 日	12 月 19 日	12 月 20 日	12 月 21 日	12 月 22 日	12 月 23 日	12 月 24 日	平均值
NO _x /(mg · m ⁻³)	41.21	42.27	38.00	42.71	41.53	45.32	43.72	42.11

4 结 论

通过对不同煤种、不同配比的煤样添加节煤催化剂后在 6#循环流化床锅炉中运行状况的考察发现,添加节煤催化剂后,锅炉的各项设备运转正常,

指标稳定,7 d 空白期和 7 d 添加期相比,炉渣中可燃物下降了 26.04%,飞灰中可燃物下降了 18.20%,脱硫塔入口的二氧化硫含量下降了 9.99%,脱硫塔入口的 NO_x含量下降了 12.49%;添加期和空白期的标准煤差值为 9.37 g/kWh,节煤率达到 2.9%,由此

可见,节煤催化剂对不同煤种、不同配比煤样的燃烧均具有明显的促进作用,可通过改变燃烧过程的化学反应,达到明显的节煤减排效果。

参考文献:

[1] 刘瑞芝,陈新智,李霞. 燃煤催化剂对混煤催化燃烧的研究与应用[J]. 水泥技术,2013(4): 27-30,44.

[2] 李永春,王亚丽,王剑锋,等. 燃煤催化剂的发展及研究现状[J]. 硅酸盐通报,2023,42(2): 531-540,553.

[3] 沈怡青. 固体燃煤催化剂在循环流化床锅炉中的应用研究

[J]. 中国煤炭,2019(8): 73-76.

[4] REN D D,GUI K T,GU S C,et al. Study of the nitric oxide reduction of SCR-NH₃ on γFe₂O₃ catalyst surface with quantum chemistry[J]. Applied Surface Science,2020,509: 144659.

[5] BAI X H,YUAN D C,XU Y Q,et al. Realizing efficient natural sunlight - driven photothermal selective catalytic reduction of nitrogen oxides by AlN_x assisted W doped Fe₂O₃ nanosheets [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells,2020,208: 110395.

[6] 蒋正宇,石永,王秀荣,等. 液体节煤催化剂在煤粉锅炉中的应用研究[J]. 广州化工,2022,50(24): 167-169,172.