

# 燃气锅炉外部烟气再循环系统对锅炉热效率和烟气排放物中NO<sub>x</sub>含量的影响

刘正江<sup>1</sup> 贡晓龙<sup>2</sup> 李江<sup>3</sup> 王玉涛<sup>4</sup>

1. 青海省特种设备检验检测院 青海 西宁 810005
2. 青海中特检特种设备检测有限公司 青海 西宁 810005
3. 青海省特种设备检验检测院 青海 西宁 810005
4. 青海省特种设备检验检测院 青海 西宁 810005

**摘要:** 针对青海西宁燃气锅炉的低氮改造工作,对同一型号卧式内燃式燃气锅炉更换低氮燃烧器加外部烟气再循环系统进行低氮改造,对改造前后的锅炉热效率和烟气排放物中NO<sub>x</sub>含量进行测试,并对测试数据进行统计分析,根据分析结果研究燃气锅炉更换低氮燃烧器加外部烟气再循环系统进行低氮改造技术对锅炉热效率与烟气中氮氧化物的影响。

**关键词:** 锅炉热效率; 低氮改造; 烟气再循环; NO<sub>x</sub>含量

引言 随着我国NO<sub>x</sub>排放标准的不断收紧,燃烧后NO<sub>x</sub>排放质量浓度普遍被限制在50mg/m<sup>3</sup>左右,这对工业锅炉NO<sub>x</sub>排放提出了很大的挑战<sup>[1]</sup>。青海地处高原,燃气锅炉进行低氮改造前NO<sub>x</sub>排放浓度平均值为99.06mg/m<sup>3</sup>,该省示范项目测试结果显示:测试的燃气锅炉低氮改造后NO<sub>x</sub>平均值31.76mg/m<sup>3</sup>,低于30mg/m<sup>3</sup>以下的占比61%,50mg/m<sup>3</sup>以下的占比91%,减排率达到67.9%,NO<sub>x</sub>排放浓度大幅度降低,低氮燃烧技术在高原地区具备技术可行性。<sup>[2]</sup>

NO<sub>x</sub>的生成机理复杂,与其燃料、氧气含量分布情况密切相关,根据锅炉中燃烧情况的不同,NO<sub>x</sub>可分为热力型、快速型、燃料型,其中天然气锅炉燃烧主要生成燃料型NO<sub>x</sub>。针对不同燃烧生成机理,研究者们开发了不同的技术降低NO<sub>x</sub>,如燃料分级、空气分级、浓淡燃烧、燃气循环、MILD燃烧技术等。其中燃料分级、空气分级、浓淡燃烧技术更适用于新建的锅炉,在设计初期就将该技术的燃料、空气分布情况考虑其中;在天然气锅炉的应用中,NO<sub>x</sub>的减排效果较好,该技术对燃烧稳定性以及效率有一定影响<sup>[3]</sup>。

燃气锅炉燃烧器加外部烟气再循环系统进行低氮改造前后的锅炉热效率和烟气排放物中NO<sub>x</sub>含量变化,选

**1 基金项目:**国家市场监管总局科技计划项目“基于高原环境下的典型燃气工业锅炉NO<sub>x</sub>排放特性研究”(2022MK128)。

**作者:**刘正江(1986-),男,青海,本科,工程师,主要研究方向为锅炉能效测试、定期检验,E-mail:279201267@qq.com

取青海省西宁市某供热站6台由瑞士皓欧有限公司制造的THW-II40/120NTE-C型卧式内燃式燃气锅炉,对该型号锅炉低氮改造前后的热效率和烟气排放物中NO<sub>x</sub>含量进行测试。

在锅炉连续稳定运行时,对锅炉的最后一节受热面后1m内的烟气排放温度、组分,锅炉进水压力、温度,锅炉出水压力、温度,锅炉循环水流量等数据进行连续性测试。

## 1 烟气再循环降低NO<sub>x</sub>的原理

烟气再循环是一种有效的技术,用于降低燃烧过程中NO<sub>x</sub>的排放。其基本原理是通过将部分燃烧产生的烟气重新引入燃烧过程,以降低燃烧温度和减少氧气浓度,从而抑制NO<sub>x</sub>的生成。以下是烟气再循环降低NO<sub>x</sub>的原理:

### 1.1 降低燃烧温度

烟气再循环通过将部分高温烟气引入燃烧区域,这些烟气本身具有一定的热量,加入后会吸收部分燃烧产生的热量,从而降低火焰温度。较低的燃烧温度减少了氮气和氧气生成NO<sub>x</sub>的热力学条件,进而减少了NO<sub>x</sub>的生成。

### 1.2 减少氧气浓度

引入的烟气中含有大量的二氧化碳和少量氧气,这些氧气含量较低的烟气与新鲜空气混合后,会降低混合气体中的氧气浓度。较低的氧气浓度减少了氮气和氧气反应生成NO<sub>x</sub>的可能性,从而抑制了NO<sub>x</sub>的生成。

### 1.3 外部和内部循环方式

烟气再循环有两种主要应用方式:外部循环和内部循环。外部循环是通过外部管道将烟气从锅炉出口引入

炉膛，内部循环则是通过燃烧器的气体动力学效应，如高速喷射火焰的卷吸作用或旋流燃烧器使烟气回流到燃烧区域。

控制NO<sub>x</sub>排放：通过合理设置外部循环比例，可以显著降低NO<sub>x</sub>的排放。随着外部循环比例的增加，NO<sub>x</sub>的降低幅度更加明显，但同时也会增加循环风机的电耗和热量损失，因此需要综合考虑各种因素来合理设置循环比例。

## 2 锅炉基本参数及测试方法

### 2.1 锅炉的基本参数

该供热站6台THW-II40/120NTE-C型卧式内燃式燃气锅炉均为2011年10月投用，设计燃料为天然气，燃烧方式为火室燃烧，带一级节能器，无空气预热器，改造前配置燃烧器为elco RPD 70型燃烧器，燃烧设备输出功率为20000KW;改造后配置燃烧器为elco RPD 70型燃烧器，燃烧设备输出功率为15200KW。锅炉设计参数见表1。

表1 锅炉设计数据

名称	符号	单位	设计数据
锅炉设计额定负荷	Q	MW	14
锅炉设计额定压力	P	MPa	1.0
锅炉设计额定温度	t	℃	120

表2 测试仪器仪表汇总表

测试项目	测试仪器	仪器型号	精度	量程
排烟处烟气成分/温度	烟气分析仪	testo 350	O <sub>2</sub> :1级	O <sub>2</sub> :0~25% CO:0~10000ppm CO <sub>2</sub>
			CO:5级	:0~20%
			CO <sub>2</sub> :1.0级SO <sub>2</sub> :1.0级	SO <sub>2</sub> :0~1000ppm
			NO <sub>x</sub> :1.0级	NO <sub>x</sub> :0~1000ppm
介质流量	超声波流量计	F601	温度:0.5级	烟气温度:0~650℃,分辨率不低于1℃
锅炉进水温度	铂电阻温度计	testo720	1.0级	0.5~3000m <sup>3</sup> /h
锅炉进口压力	压力表	ZHT-2000	0.5级	0~200℃
锅炉出口压力	压力表	ZHT-2000	0.5级	0~2.5MPa
入炉冷空气温度	数字式温度湿度大气压力表	testo622	1.0级	0~2.5MPa
锅炉出水温度	铂电阻温度计	testo720	0.5级	-20~80℃
再循环烟道烟气流速	风速仪	FLUKE C0rporation	1.0级	0~200℃

## 3 烟气再循环量的计算和锅炉热效率和 NO<sub>x</sub> 含量测试数据分析

### 3.1 低氮改造前测试数据

锅炉反平衡热效率计算按公式(1)计算:

$$\eta_2 = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7) \quad (1)$$

式中:

η<sub>2</sub>——反平衡热效率, %;

q<sub>2</sub>——排烟热损失, %;

q<sub>3</sub>——气体不完全燃烧热损失, %;

q<sub>4</sub>——固体不完全燃烧热损失, %;

续表:

名称	符号	单位	设计数据
出口工质温度	t <sub>rst</sub>	℃	120
进口工质温度	t <sub>js</sub>	℃	80
出口工质压力	P <sub>cs</sub>	MPa	1.0
进口工质压力	P <sub>js</sub>	MPa	1.1
设计工质循环量	G	Nm <sup>3</sup> /h	428600.00
稳定运行的工况范围	/	%	10~100

### 2.2 测试方法

改造前后锅炉均在设计工况范围内处于安全、热工况稳定的运行状态，辅机运行正常，系统不存在跑、冒、滴、漏现象的正常供暖工况下，工况稳定1h后按《工业锅炉热工性能试验规程》(GB/T 10180-2017)中的反平衡测量法进行锅炉热效率测试和烟气排放物中NO<sub>x</sub>含量测量，其中烟气再循环的改造在节能器后0.3m烟道处接烟气再循环烟道至燃烧机，烟气再循环抽取总排烟流量的8%，改造后的烟气排放温度、组分在烟气再循环后主烟道0.2m处、最后一节受热面1m内。改造前后测试所用仪器仪表为同一套设备，测试期间仪器仪表均在检定、校准有效期内的合格仪器仪表。测试仪器仪表见表2。

q<sub>5</sub>——散热损失, %;

q<sub>6</sub>——灰渣物理热损失, %;

q<sub>7</sub>——石灰石脱硫热损失, %。

其中燃气锅炉q<sub>4</sub>、q<sub>6</sub>、q<sub>7</sub>三项值均为0。

NO<sub>x</sub>含量按《锅炉大气污染物排放标准》(GB 13271-2014)中大气污染物基准含氧量排放浓度折算方法，将NO<sub>x</sub>按公式(2)折算为基准含氧量排放浓度。

$$\rho = \rho' \times \frac{21 - \varphi(O_2)}{21 - \varphi'(O_2)} \quad (2)$$

式中:

$\rho$ ——大气污染物基准氧含量排放浓度,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;

$\rho'$ ——实测的大气污染物排放浓度,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;

$\varphi'(O_2)$ ——实测的氧含量;

$\varphi(O_2)$ ——基准氧含量。

低氮改造前锅炉热效率及排烟处 $\text{NO}_x$ 含量计算结果汇总见表3。

表3 低氮改造前锅炉热效率及排烟处 $\text{NO}_x$ 含量计算结果汇总表

锅炉产品编号	测试负荷(%)	排烟温度(°C)	锅炉热效率(%)	排烟处 $\text{NO}_x$ 含量( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) 基准氧含量3.5%
112253	84.82	111.05	92.96	136.53
112252	85.43	114.26	93.37	128.60
112077	86.04	117.91	94.23	122.96
112078	53.50	109.58	93.73	100.18
112081	97.5	116.63	94.18	121.75
112079	92.14	114.35	94.03	118.92

### 3.2 低氮改造后测试数据

锅炉燃烧器加外部烟气再循环系统进行低氮改造后, 用与低氮改造前相同的测试方法进行锅炉热效率测试和排烟处 $\text{NO}_x$ 含量测试。低氮改造后锅炉热效率及排烟处 $\text{NO}_x$ 含量计算结果汇总见表4。

表4 低氮改造后锅炉热效率及排烟处 $\text{NO}_x$ 含量计算结果汇总表

锅炉产品编号	测试负荷(%)	排烟温度(°C)	锅炉热效率(%)	排烟处 $\text{NO}_x$ 含量( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) 基准氧含量3.5%
112253	81.43	143.55	93.04	27.35
112252	84.29	142.20	93.11	16.15
112077	82.07	131.68	93.98	27.56
112078	51.79	118.48	93.87	39.11
112081	92.29	138.81	93.72	31.08
112079	88.57	139.04	93.64	20.68

### 3.3 烟气再循环量的计算

烟气再循环量 $V_{zx}$ :

$$V_{zx} = d_{zx} \times v_{zx} \quad (3)$$

$d_{zx}$ ——再循环烟道内径, m;

$v_{zx}$ ——再循环烟气流速,  $\text{m}/\text{s}$ 。

烟气再循环率n:

$$n = \frac{V_{ds}}{V_{zx}} \times 100\% \quad (4)$$

n——再循环率, %;

$V_{ds}$ ——排烟处烟气体积,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;

$V_{zx}$ ——再循环烟气体积,  $\text{m}^3/\text{kg}$ 。

其中 $V_{ds}$ 按《工业锅炉热工性能试验规程》GB/T 10180-2017附录H进行计算。

## 4 测试结果对比

分析对比6台锅炉数据, 改造前后锅炉热效率略有变化, 但 $\text{NO}_x$ 排放质量浓度值降低明显。

改造前后锅炉 $\text{NO}_x$ 排放质量浓度值及降低率如图1所示。



更换低氮燃烧器,且在锅炉烟气再循环的改造在节能器后0.3m烟道处接烟气再循环烟道至燃烧机, 当锅炉运行负荷在80%以上, 烟气再循环抽取总排烟流量的8%时, 锅炉 $\text{NO}_x$ 排放质量浓度降低74%以上,  $\text{NO}_x$ 排放质量浓度值均低于青海省地方标准 $\text{NO}_x$ 排放质量浓度限值 $50\text{mg}/\text{m}^3$ ; 改造后锅炉热效率略有降低, 但均高于《锅炉节能环保技术规程》(TSG 91-2021)中燃天然气(非冷凝锅炉)锅炉所要求的限定值92%。

## 结论

经过对5台THW-I140/120NTE-C型卧式内燃式燃气锅炉在运行负荷在80%以上时, 低氮改造前后的热效率和 $\text{NO}_x$ 排放质量浓度的测试结果分析, 锅炉更换低氮燃烧器加烟气再循环, 烟气再循环抽取总排烟流量的8%,  $\text{NO}_x$ 排放质量浓度平均值从改造前的 $125.75\text{mg}/\text{m}^3$ 降低为 $24.56\text{mg}/\text{m}^3$ , 减排率达到80.47%,  $\text{NO}_x$ 排放质量浓度大幅度降低。在西宁地区,

更换低氮燃烧器加烟气再循环技术在保证锅炉热效率符合国家标准要求的情况下, 能有效降低 $\text{NO}_x$ 排放质量浓度。

## 参考文献

[1]潘越. 燃煤锅炉 $\text{NO}_x$ 排放控制研究[D]. 华北电力大学, 2017.  
 [2]郭一楷; 焦伟红等. 高原地区低氮燃烧技术应用研究[J]. 环境工程, 2023, (S2): 482-486.  
 [3]王杰. 天然气低氮燃烧技术研究现状与进展[J]. 现代化工, 2022, (S2): 47-50.