

# Study on NO<sub>x</sub> Emission from Pulse Flame-Adjusting Burner at Different Power

Quan Shen, Meiling Deng, Guojie Li

Baosteel Engineering Technology Group Co., Ltd., Shanghai  
Email: shenquan135@126.com

Received: Nov. 5<sup>th</sup>, 2019; accepted: Nov. 18<sup>th</sup>, 2019; published: Nov. 25<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

In this paper, the NO<sub>x</sub> emission of pulse flame-regulated burner under different power is studied, and the variation rule of NO<sub>x</sub> emission under different power is found. It provides a theoretical basis for reducing the emission of NO<sub>x</sub>.

## Keywords

Pulse Flame-Regulated Burner, NO<sub>x</sub> Emissions, Long Flame, Short Flame

---

# 脉冲调焰烧嘴不同功率下NO<sub>x</sub>排放研究

沈 权, 邓美玲, 李国杰

宝钢工程技术集团有限公司, 上海  
Email: shenquan135@126.com

收稿日期: 2019年11月5日; 录用日期: 2019年11月18日; 发布日期: 2019年11月25日

---

## 摘 要

本文针对脉冲调焰烧嘴在不同功率下的NO<sub>x</sub>排放进行了研究, 发现了NO<sub>x</sub>排放在不同运行功率下的变化规律, 为降低NO<sub>x</sub>排放提供了一定的理论依据。

## 关键词

脉冲调焰烧嘴, NO<sub>x</sub>排放, 长火焰, 短火焰

---

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 概述

脉冲烧嘴是冶金行业加热炉普遍采用的一种加热工具， $\text{NO}_x$  是燃气燃烧后产生的一系列危害环境的气体( $\text{NO}_x$  是  $\text{NO}$ ， $\text{NO}_2$  等几种氮氧化合物的总称)。随着人类环保意识的加强和国家相关法律法规的就进一步要求，对  $\text{NO}_x$  排放的关注已经提高到了前所未有的高度。脉冲烧嘴具备不同燃烧模式(长、短火焰)及不同功率燃烧的功能，本文研究了脉冲烧嘴在实验室模拟现场不同工艺需求，在不同功率燃烧模式和不同功率下的  $\text{NO}_x$  排放规律，为降低  $\text{NO}_x$  排放提供了参考。

## 2. 产品概述

该烧嘴主要是由烧嘴砖、壳体、长短火焰切换阀等附属部分组成。应用在大型板坯加热炉上。烧嘴结构图见图 1:

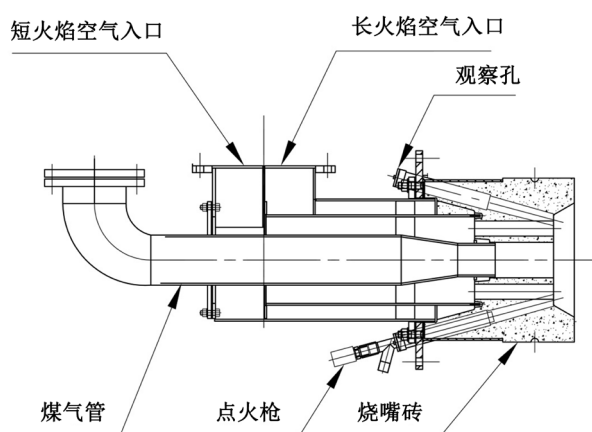


Figure 1. Burner assembly profile (Schematic)

图 1. 烧嘴装配剖面图(示意)

烧嘴基本参数见表 1:

Table 1. Basic parameters of burners

表 1. 烧嘴基本参数

项目	参数	单位	项目	参数	单位
烧嘴名称	脉冲调焰烧嘴		烧嘴型号	WFMB-G7 (样品)	
烧嘴能介	混合煤气		点火能介	焦炉煤气	
能介低位热值	8100	$\text{KJ}/\text{Nm}^3$	火焰检测方式	电离	
额定功率	1840	$\text{kW}$	工艺炉温	1200	$^{\circ}\text{C}$
设计额定空燃比	1.05				

### 3. 实验条件概述

#### 3.1. 介质条件

实验用混合煤气采用高炉煤气、焦炉煤气和转炉煤气三种煤气进行混合[1], 与现场的混合煤气配比方式一致, 热值 8000~8100 KJ/Nm<sup>3</sup>, 成分见表 2:

**Table 2.** Composition and calorific value of mixed gas

**表 2.** 混合煤气成分及热值

H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	热值
%	%	%	%	%	%	%	%	%	KJ/Nm <sup>3</sup>
17.3	0.175	29.23	6.28	29.08	17.21	0.45	0.125	0	8100

不同烧嘴功率下的混合煤气配比及空气量[2], 按照空燃比 1:1.05 计算空气量, 详见表 3:

**Table 3.** Mixed gas volume corresponding to different power

**表 3.** 不同功率对应的混合气体量

烧嘴型号	烧嘴功率 KW.h	实验用气	热值 KJ/m <sup>3</sup>	混合比例	不同烧嘴功率对应的气体量(Nm <sup>3</sup> )			
					30%	50%	80%	100%
WFMB-G7	1840	高炉煤气	3277	45%	112	187	300	375
		焦炉煤气	17,098	25%	62	104	167	208
		转炉煤气	7894	30%	75	125	200	250
		总流量		100%	250	416	666	833
		空气量	1:1.05	1.88	470	783	1252	1566

#### 3.2. 实验炉条件与生产符合性

实验炉按照生产现场模拟生产现场加热炉的模式设计, 试验炉设有燃气供配气系统、助燃风系统、排烟系统、冷却水系统等配套设施。试验炉能模拟烧嘴不同功率条件下燃烧的工况。

#### 3.3. 实验系统

明火炉实验系统由供气系统(空气 + 煤气)、烧嘴及控制系统(含 BCU)、辐射管试验炉及温度检测系统和烟气排放及检测系统组成。煤气系统取自××钢铁厂煤气主管道(含高炉、焦炉、转炉煤气)、经减压阀减压后到实验室混合管混合。进入实验室的煤气管道布设压力、流量检测装置。空气系统由离心式助燃风机(含变频器)、压力、流量检测装置及相关管道阀门组成。煤气、空气管道将实验所需气体送到烧嘴附件, 按照实验要求采用软管连接到烧嘴接口。烧嘴燃烧(点火 + 信号)由一台 BCU 控制及采集。辐射管炉内按照等距离布置热电偶检测烧嘴工作时的温度场分布。烟气排放及检测系统由排烟风机、温度、压力、流量检测及相关管道(阀门)组成。烟气排放系统根据辐射管炉压力需求、排烟压力、排烟温度实时控制。详见图 2:

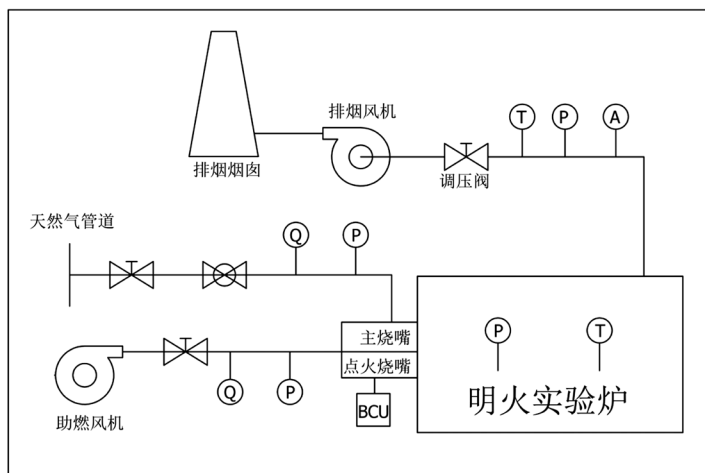


Figure 2. Shows the schematic diagram of the furnace burner test system  
图 2. 明火炉烧嘴测试系统原理图

## 4. 实验过程简述

### 4.1. 实验过程

在封闭炉膛的状态下测试烧嘴在不同功率下的烟气成分[3]。从 10% 功率开始至 100% 功率，依次调节供风量、煤气量，能介流量稳定在要求的范围内及火焰稳定后，记录烟气成分。

### 4.2. 实验注意事项

- 当 CO 含量小于 50 ppm，O<sub>2</sub> 含量在 0.3% 范围内波动时，记录烟气成分。

## 5. 测定数据

### 5.1. 嘴前空煤气参数

在短火焰模式时测得烧嘴的各燃烧功率下的空气和煤气流量、嘴前压力，数据见表 4：

Table 4. Measurements of mixing flow rate and burner pressure under different working conditions in short flame mode  
表 4. 实测短火焰模式时不同工况下混合流量和烧嘴前压力

序号	工况说明 烧嘴功率、火焰模式	介质流量				烧嘴部位压力			
		高炉	焦炉	转炉	混合煤气	空气	一次风	二次风	煤气
		Nm <sup>3</sup> /h	Nm <sup>3</sup> /h	Nm <sup>3</sup> /h	Nm <sup>3</sup> /h	Nm <sup>3</sup> /h	Pa	Pa	Pa
1	10% 功率，短火焰	77	45	52	174	333	30		18
2	30% 功率，短火焰	237	130	162	529	1087	194		91
3	50% 功率，短火焰	377	218	252	847	1663	1621		195
4	80% 功率，短火焰	597	346	403	1346	2966	1590		440
5	100% 功率，短火焰	731	427	508	1666	3187	2390		680

在长火焰模式时烧嘴不同功率的空气和煤气流量、嘴前压力数据见表 5：

**Table 5.** Measurements of mixed gas flow and pre-burner pressure under different working conditions in long flame mode  
**表 5.** 实测长火焰模式时不同工况下混合煤气流量和烧嘴前压力

序号	工况说明 烧嘴功率、火焰模式	介质流量					烧嘴部位压力		
		高炉	焦炉	转炉	混合煤气	空气	一次风	二次风	煤气
		Nm <sup>3</sup> /h	Nm <sup>3</sup> /h	Nm <sup>3</sup> /h	Nm <sup>3</sup> /h	Nm <sup>3</sup> /h	Pa	Pa	Pa
1	10% 功率, 长火焰	76	45	51	172	333		26	18
2	30% 功率, 长火焰	238	130	160	528	1007		178	93
3	50% 功率, 长火焰	390	220	252	862	1700		1560	205
4	80% 功率, 长火焰	620	345	404	1369	2913		1290	490
5	100% 功率, 长火焰	731	427	509	1667	3200		2003	713

## 5.2. 烟气排放指标

烟气排放指标主要是指烟气成分的测量, 包括 O<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、NO、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub> 等成分[4]。在烧嘴标定中, 记录额定功率下的排烟成分和不同烧嘴功率时的排烟成分。不同工况下烟气成分见表 6 (烟气成分测量时, 需保证实验炉为微正压, 在 0~20 Pa 之间, 以防止空气吸入对烟气成分测量的影响):

**Table 6.** Flue gas composition under different operating conditions  
**表 6.** 不同工况下烟气成分

工况说明	介质流量				烟气成分				
	燃气	空气	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	NO	NO <sub>x</sub>	NO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
	Nm <sup>3</sup> /h	Nm <sup>3</sup> /h	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%
30% 功率, 短火焰	253	400	2.79	18.8	1	32	32	0	0
50% 功率, 短火焰	415	808	7	15	3	35	35	0	0
80% 功率, 短火焰	686	1281	1.14	20.8	3	31	31	0	0
100% 功率, 短火焰	784	1530	0.04	21.3	29	24	30	0	0
30% 功率, 长火焰	247	400	0.76	21.7	1	17	17	0	0
50% 功率, 长火焰	410	783	6.81	14.9	4	33	33	0	0
80% 功率, 长火焰	677	1236	3.33	17.7	1	36	36	0	0
100% 功率, 长火焰	774	1618	0.7	20.4	15	40	40	0	0

## 5.3. 烟气成分分析

### 5.3.1. 短火焰模式

试验对烧嘴功率在 30%, 50%, 80% 和 100% 的工况下, 短火焰模式下的烟气成分进行检测[5], 见表 7。

**Table 7.** Flue gas composition under different working conditions in short flame mode  
**表 7.** 短火焰模式时不同工况下烟气成分

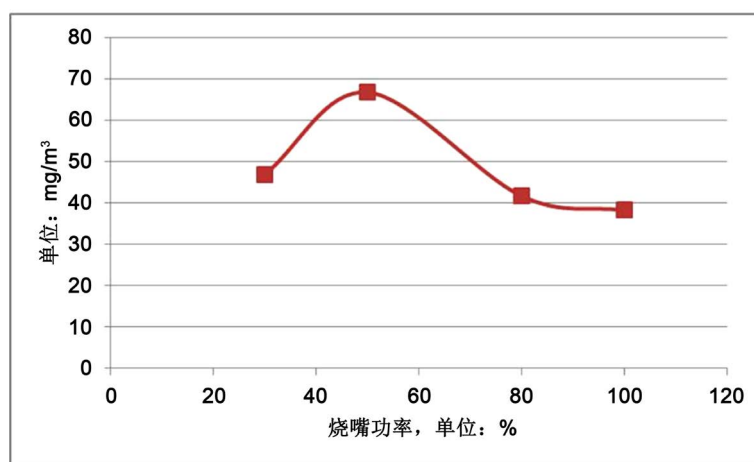
工况说明	介质流量		烟气成分						
	燃气	空气	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	NO	NO <sub>x</sub>	NO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
	Nm <sup>3</sup> /h	Nm <sup>3</sup> /h	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%
30% 功率, 短火焰	253	400	2.79	18.8	1	32	32	0	0
50% 功率, 短火焰	415	808	7	15	3	35	35	0	0
80% 功率, 短火焰	686	1281	1.14	20.8	3	31	31	0	0
100% 功率, 短火焰	784	1530	0.04	21.3	29	24	30	0	0

按照加热炉排放标准转化各成分排放量, 以 8% 的氧含量为基准, 同时单位转换为 mg/m<sup>3</sup>, 见表 8。

**Table 8.** Flue gas compositions converted in accordance with environmental emission standards  
**表 8.** 按照环保排放标准转换后的烟气成分

工况说明	介质流量		烟气成分						
	燃气	空气	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	NO	NO <sub>x</sub>	NO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
	Nm <sup>3</sup> /h	Nm <sup>3</sup> /h	%	%	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	%
30% 功率, 短火焰	253	400	8	13.42	0.89	30.60	46.91	0	0
50% 功率, 短火焰	415	808	8	13.93	3.48	43.53	66.74	0	0
80% 功率, 短火焰	686	1281	8	13.62	2.45	27.18	41.67	0	0
100% 功率, 短火焰	784	1530	8	13.21	22.48	19.94	38.21	0	0

按照标准氧含量 8% 折算后的烟气成分中 NO<sub>x</sub> 的趋势见图 3。



**Figure 3.** Trends of NO<sub>x</sub> in flue gas components after conversion  
**图 3.** 折算后的烟气成分中 NO<sub>x</sub> 的趋势

### 5.3.2. 长火焰模式

试验对烧嘴功率在 10%, 30%, 50%, 80% 和 100% 的工况下, 长火焰模式下的烟气成分进行检测, 见表 9。

**Table 9.** Flue gas composition under different operating conditions in long flame mode  
**表 9.** 长火焰模式时不同工况下烟气成分

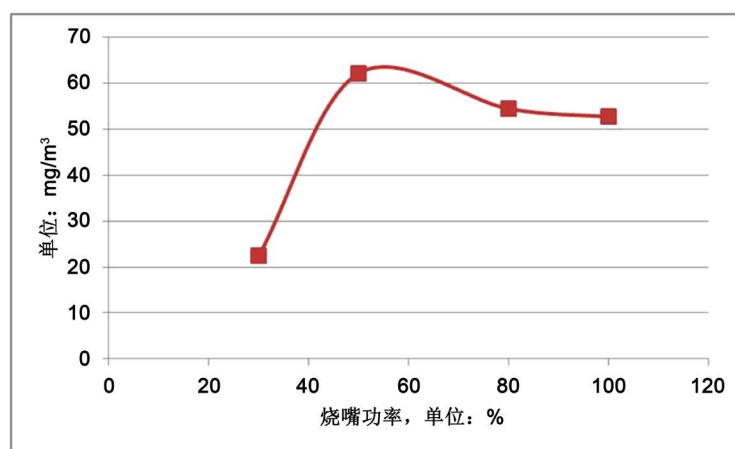
工况说明	介质流量		烟气成分						
	燃气	空气	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	NO	NO <sub>x</sub>	NO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
	Nm <sup>3</sup> /h	Nm <sup>3</sup> /h	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%
30% 功率, 长火焰	247	400	0.76	21.7	1	17	17	0	0
50% 功率, 长火焰	410	783	6.81	14.9	4	33	33	0	0
80% 功率, 长火焰	677	1236	3.33	17.7	1	36	36	0	0
100% 功率, 长火焰	774	1618	0.7	20.4	15	40	40	0	0

按照加热炉排放标准转化各成分排放量, 以 8% 的氧含量为基准, 单位转换为 mg/m<sup>3</sup>, 见表 10:

**Table 10.** Flue gas compositions converted in accordance with environmental emission standards  
**表 10.** 按照环保排放标准转换后的烟气成分

工况说明	介质流量		烟气成分						
	燃气	空气	O <sup>2</sup>	CO <sup>2</sup>	CO	NO	NO <sub>x</sub>	NO <sup>2</sup>	H <sup>2</sup>
	Nm <sup>3</sup> /h	Nm <sup>3</sup> /h	%	%	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	%
30% 功率, 长火焰	247	400	8	13.94	0.80	14.62	22.42	0	0
50% 功率, 长火焰	410	783	8	13.65	4.58	40.49	62.08	0	0
80% 功率, 长火焰	677	1236	8	13.02	0.92	35.47	54.39	0	0
100% 功率, 长火焰	774	1618	8	13.06	12.01	34.31	52.60	0	0

按照标准氧含量 8% 折算后的烟气成分中 NO<sub>x</sub> 的趋势见图 4:



**Figure 4.** Trend of NO<sub>x</sub> in converted flue gas composition  
**图 4.** 折算后的烟气成分中 NO<sub>x</sub> 的趋势

## 5.4. 结论

1) 短火焰和长火焰的情况下, 均出现随着功率增大, NO<sub>x</sub> 浓度在功率较小时随着功率的增加先出现较快升高, 在 50% 功率之后 NO<sub>x</sub> 浓度随着功率的增加而减少的情况;

2) 短火焰和长火焰比较, 长火焰在烧嘴功率较低时产生的  $\text{NO}_x$  浓度要比短火焰浓度低很多, 但当烧嘴功率达到 100% 时, 长火焰在烧嘴功率较低时产生的  $\text{NO}_x$  浓度要比短火焰浓度要高。

### 参考文献

- [1] 何选明, 陈康, 等. 焦炉煤气低  $\text{NO}_x$  燃烧技术研究进展[J]. 燃料与化工, 2013(1): 6-10.
- [2] 王志强, 孙绍增, 等. 煤气再燃还原氮氧化物的特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2007(20): 42-45.
- [3] 肖静. 轧钢加热炉烟气成分的分析验证及不完全燃烧对热效率的影响[J]. 昆钢科技, 1998(2): 34-36.
- [4] 李震宇, 程军, 等. 工业锅炉洁净燃烧烟气成分的动态监测分析[J]. 电站系统工程, 2002(4): 1-4.
- [5] 张静媛, 刘明福, 等. W 火焰炉  $\text{NO}_x$  排放试验研究[J]. 电站系统工程, 2006(6): 13-15.