

文章编号:1000-582X(2008)03-0271-05

## 降低天然气蓄热式辐射管烟气中 $\text{NO}_x$ 的实验

程淑明<sup>1</sup>, 雍海泉<sup>1</sup>, 伍成波<sup>2</sup>

(1. 重庆赛迪工业炉有限公司, 重庆 400013; 2. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400030)

**摘要:**天然气蓄热式辐射管可将助燃空气预热到接近 1 000 °C, 如果不采取一些特殊的措施, 烟气中  $\text{NO}_x$  含量会很高。文中通过实验手段, 研究了降低天然气蓄热式辐射管的  $\text{NO}_x$  含量的措施, 指出分级燃烧、烟气再循环、强化辐射管内传热等技术可有效的控制辐射管中  $\text{NO}_x$  的生成。研究认为, 进一步降低  $\text{NO}_x$  含量, 有两种方式可选择: 一是在辐射管设置内衬管, 同时通过加插入件, 强化辐射管内燃烧的高温气体与管壁的传热来降低燃烧温度, 从而降低  $\text{NO}_x$  含量, 并且该方法还有降低排烟温度的好处; 二是在设置内衬管的基础上, 通过烟气再循环, 降低辐射管燃烧区的  $\text{O}_2$  含量, 减少  $\text{NO}_x$  含量, 且烟气再循环还有改善辐射管表面温度均匀性的效果。

**关键词:**辐射管; 分级燃烧; 蓄热烧嘴; 强化传热; 烟气再循环

**中图分类号:**TK124

**文献标志码:**A

## Decreasing of $\text{NO}_x$ Emission in Fired-natural Gas Radiant-tube with Regenerative Combustor

CHENG Shu-ming<sup>1</sup>, YONG Hai-quan<sup>1</sup>, WU Cheng-bo<sup>2</sup>

(1. Industry Furnace Company of Central Iron & Steel Designing Institute, Chongqing 400013, P. R. China;  
2. College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** Air can be preheated nearly 1 000 °C in the fired-natural gas radiant-tube. Normally, there is high  $\text{NO}_x$  emission in the exhaust gas. We propose that staged combustion, recirculation of exhaust gas, and heat transfer could reduce  $\text{NO}_x$  emission. There are two efficient approaches, which can be used to reduce  $\text{NO}_x$  emission. The first one is combination of staged combustion and heat transfer. This can not only reduce  $\text{NO}_x$  emission, but also decrease the temperature of exhaust gas. The other is combination of the staged combustion and recirculation of exhaust gas, which can decrease the concentration of  $\text{O}_2$  in the tube, and thus decrease  $\text{NO}_x$  emission. This can distribute surface temperature of the radiant-tube as well.

**Key words:** radiant-tube; staged combustion; regenerative burner; enforcing of heat transfer; exhaust gas recirculation

将蓄热式高温空气燃烧技术应用于传统辐射管中, 借助于高效蓄热体将助燃空气预热到接近 1 000 °C 的高温, 并使排烟温度降低到 200 °C 左右, 从而实现烟气显热的极限回收<sup>[1-2]</sup>, 开发出的蓄热式辐射管被认为是新一代高效、节能的加热装置。然

而, 对天然气蓄热式辐射管, 如果不采取一些特殊的措施, 烟气中  $\text{NO}_x$  含量在 0.062% ~ 0.080% 之间, 虽然降低空气预热温度可降低  $\text{NO}_x$  含量, 但蓄热式辐射管的优势不能发挥。因此, 不能采取降低空气预热温度的方式来降低烟气中  $\text{NO}_x$  含量, 必须采用

收稿日期: 2007-12-25

基金项目: 重庆市科委攻关项目 (CSTC2005 AC6087)

作者简介: 陈淑明 (1969-), 女, 重庆赛迪工业炉有限公司高级工程师, 主要从事冶金热能工程研究, (E-mail) 0899@cisdi.com.cn。

其他方法来降低烟气中  $\text{NO}_x$  含量。

研究指出<sup>[3-4]</sup>, 燃烧过程中,  $\text{NO}_x$  的生成主要与火焰温度、氧浓度以及气体在高温下停留时间等因素有关。火焰温度越高、火焰中氧的浓度越高以及气体在高温下停留时间越长,  $\text{NO}_x$  含量就越高。因此, 要降低  $\text{NO}_x$  必须从 3 个方面入手, 降低局部高温区的温度和实现辐射管内低氧燃烧, 才可望降低烟气中  $\text{NO}_x$  含量。

## 1 实验装置

实验装置主要由 U 型蓄热式辐射管、保温罩、空气及燃气供给系统和检测仪表等组成。系统如图 1 所示。U 型蓄热式辐射管由燃烧器、四通换向阀、蓄热体、辐射管管体等组成; 保温罩四周开有测温孔, 用来测量辐射管表面温度; 检测仪表有: 美国 FLIR 公司的 P30 红外热像仪, 德国 MRU95/3CD 烟气综合分析仪, 流量计和温度巡检仪等。

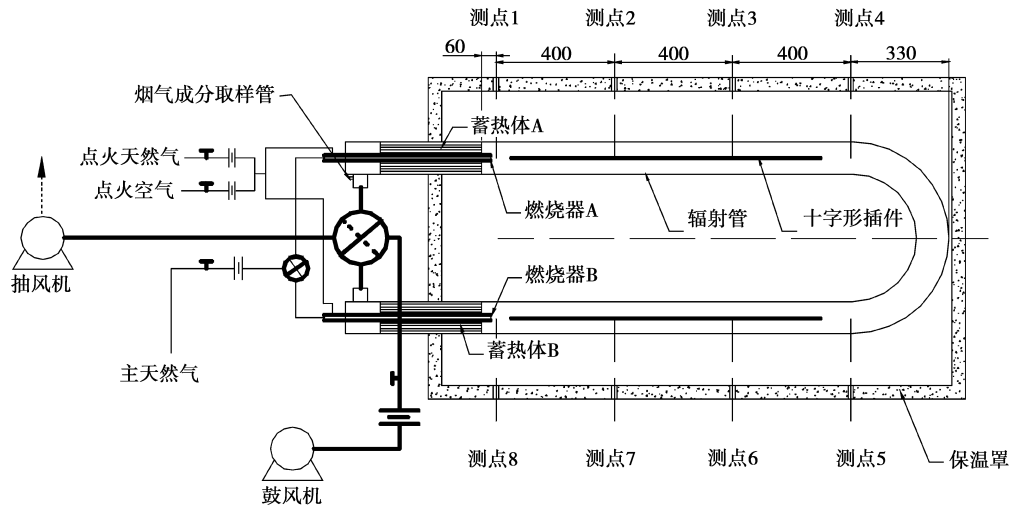


图 1 实验装置系统示意图

## 2 实验方法及内容

辐射管为鼓风机式 U 型辐射, 燃料为天然气, 能力为 270 MJ/h, 空气流量为 80  $\text{m}^3/\text{h}$ 。辐射管直径为  $\phi 152$  mm, 辐射管中装有蜂窝式蓄热体, 材质为堇青石。当辐射管表面温度达到 850  $^{\circ}\text{C}$  以上, 对排放烟气的成分进行分析。

采用分级燃烧<sup>[5]</sup>是实现辐射管内的低氧燃烧, 提高辐射管热效率及降低  $\text{NO}_x$  的技术之一。通过内衬管将燃烧用的空气分为一次空气和二次空气, 从而实现分级燃烧, 讨论分级燃烧技术对降低  $\text{NO}_x$  生成的影响。烟气的再循环可降低火焰温度和火焰中氧的浓度, 增加烟气再循环是实现蓄热式 (HTAC) 辐射管低  $\text{NO}_x$  的又一项技术<sup>[6]</sup>。实验中通过抽风机将烟气加入助燃空气中来实现烟气的再循环, 讨论烟气的再循环造成贫氧燃烧技术对降低烟气中  $\text{NO}_x$  的作用。为降低辐射管中燃烧气体的温度, 提出通过十字形插入件强化辐射管内的传热, 降低辐射管内燃烧气体的温度, 从而达到降低辐射管烟气成份中  $\text{NO}_x$  的目的。对几种技术进行了组合,

研究了同时采用两种或两种以上的低  $\text{NO}_x$  技术的效果。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 分级燃烧技术对烟气中 $\text{NO}_x$ 的影响

在实验中设计了一个内衬管插件放入辐射管中, 内衬管的结构共有 4 种, 在辐射管中的位置与蓄热体出口紧挨。内衬管把燃烧空气分为 2 个阶段供给, 在内衬管里面的蓄热体孔喷出的空气为一次空气, 先和喷嘴喷出的天然气进行一次燃烧, 没有被内衬管遮住的蓄热体孔喷出的为二次空气, 与内衬管流出的未燃烧天然气进行二次燃烧。在内衬管内部的一次燃烧为贫氧燃烧, 二次燃烧降低了局部高温区, 从而抑制  $\text{NO}_x$  的生成。

为考察内衬管的作用, 对未加内衬管和加了内衬管的辐射管的烟气成份进行对比, 结果如表 1 所示。

表1 有无内衬管时辐射管的烟气成分

有无内衬管	辐射管平均温度/℃	烟气成分/%							空气过剩系数
		O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	
无	856	1.2	11.0	0.19	0.030 8	0.067 6		0.062 1	1.04
无	881	4.7	9.1	0.22	0.000 7	0.032 1		0.075 8	1.25
有	894	2.6	10.2	0.10	0.003 9	0.021 7		0.039 5	1.12
有	922	1.5	10.9	0.14	0.035 0	0.031 0		0.036 1	1.06

由表1可知,有内衬管后,尽管测量时的辐射管温度高于没有内衬管时,但烟气中 NO<sub>x</sub> 含量反而大幅度降低了。说明燃料的分级燃烧,可大幅度的降低燃

烧烟气成分中的 NO<sub>x</sub> 含量。为了考察内衬管结构和尺寸对辐射管性能的影响,还进行了4种结构内衬管对 NO<sub>x</sub> 含量的影响实验,结果如表2所示。

表2 内衬管结构与辐射管烟气成分的关系

空气过剩系数	辐射管平均温度/℃	烟气成分/%							说明
		O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	
1.05	862	1.2	11.0	0.00	0.061 4	0.051 0	0.000 8	0.024 2	结构1
1.12	894	2.6	10.2	0.10	0.003 9	0.021 7		0.039 5	结构2
1.13	887	2.9	10.1	0.16	0.004 5	0.020 3		0.048 6	结构3
1.07	887	1.6	10.8	0.07	0.012 1	0.018 1		0.027 8	结构4

实验发现,结构1的内衬管使辐射管的表面温度均匀性变差,表面最大温差在75~85℃,因此结构1的内衬管不合适。结构2、结构3和结构4的内衬管,使辐射管的表面温差较小,最大温差在50℃以下。从表2可知,使用结构3的内衬管,烟气中 NO<sub>x</sub> 含量仍很高,达到0.0486%,因此结构3的内衬管也不合适。对于结构2的内衬管和结构4的内衬管,在实验中发现结构2的内衬管使辐射管在图1所示的测温

点1和测温点2之间有一个低温环,使用结构4的内衬管时,该低温环在温度超过850℃以后基本消失。因此,结构4的内衬管较合适。

### 3.2 烟气循环对烟气中 NO<sub>x</sub> 含量的影响

为考察烟气循环对烟气中 NO<sub>x</sub> 含量的影响,首先在没有内衬管的情况下,考察了有无烟气循环对烟气中 NO<sub>x</sub> 含量的影响,实验结果如表3所示。

表3 无内衬管时烟气循环与烟气成分的关系

空气过剩系数	辐射管平均温度/℃	烟气成分/%							说明
		O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	
1.04	881	1.2	11.0	0.19	0.030 8	0.067 6		0.062 1	无烟气循环
1.10	895	2.2	10.5	0.04	0.002 1	0.013 9		0.026 3	7.5%的烟气循环量

由表3可见,烟气循环可大幅度降低烟气中 NO<sub>x</sub> 的含量,在没有内衬管的情况下,烟气循环量为助燃空气量的7.5%(助燃空气量不变,下同),NO<sub>x</sub> 的含量由0.0621%降到0.0263%,说明通过强制烟气循环,降低辐射管燃烧区的 O<sub>2</sub> 含量,可大幅度控制烟气中 NO<sub>x</sub> 的生成。

### 3.3 强化辐射管的传热对烟气中 NO<sub>x</sub> 含量的影响

辐射管烟气成份中 NO<sub>x</sub> 偏高的原因是:蓄热式辐射管的空气预热温度很高,高达1000℃左右,尽管有内衬管的分级燃烧和烟气的再循环造成贫氧燃烧,但燃烧后的气体温度仍然很高,这是造成烟气 NO<sub>x</sub> 的含量居高不下的主要原因。为降低辐射管中

燃烧气体的温度,强化辐射管内燃烧气体与辐射管管壁的传热是一个可行的方案。因此提出了通过强化辐射管内的传热,降低辐射管内燃烧气体的温度,来达到降低辐射管烟气成份中  $\text{NO}_x$  的目的,为了验证该思路的可行性,进行了下面的实验。

在实验中设计了一种“十”字型插件,它起到的作用有如下两个方面:增大辐射管内部的传热面积,

起到肋化作用,从而增强管内的对流换热;改变辐射管的热量传递方式,即处于流体中的插件与燃烧生成的烟气进行对流换热而被加热,同时又以辐射方式向内壁辐射热量。从而使壁面除原有的对流换热量外,又另外增加了与插件之间的辐射换热量,壁面的热流量增加,起到强化换热作用。实验结果如表 4 所示。

表 4 有无插件时辐射管的烟气成分

“十”字型插件	空气过剩系数	辐射管平均温度/ $^{\circ}\text{C}$	烟气成分/%						
			$\text{O}_2$	$\text{CO}_2$	$\text{CH}_4$	$\text{CO}$	$\text{H}_2$	$\text{SO}_2$	$\text{NO}_x$
无	1.17	840	3.7	9.6	0.20	0.000 1	0.044 0		0.070 4
有	1.12	827	2.9	10.1	0.19	0.012 6	0.033 4		0.052 7

由表 4 可知,“十”字型插件的加入,确实降低了辐射管烟气中的  $\text{NO}_x$  含量,但同时也应当看到,单纯的采用强化辐射管内的传热来降低  $\text{NO}_x$  含量是有限的。烟气中  $\text{NO}_x$  含量还高达 0.052 7%。

### 3.4 降低辐射管烟气中 $\text{NO}_x$ 的进一步研究

前面研究了降低辐射管烟气中  $\text{NO}_x$  的措施,通过在辐射管中设置内衬管可使烟气  $\text{NO}_x$  的含量降到 0.027 8% 左右;通过强制烟气再循环可使  $\text{NO}_x$  的

含量降到 0.026 3% 左右;采用“十”字型插件可使  $\text{NO}_x$  的含量降到 0.052 7% 左右。尽管如此,单一的低  $\text{NO}_x$  技术很难再进一步降低蓄热式辐射管的  $\text{NO}_x$  含量。为此,必须采取 2 种或 2 种以上的低  $\text{NO}_x$  技术。

分级燃烧与烟气再循环技术同时使用,即在有内衬管时,烟气循环对烟气中  $\text{NO}_x$  含量的影响实验结果如表 5 所示。

表 5 有内衬管时烟气循环量与烟气成分的关系

空气过剩系数	辐射管平均温度/ $^{\circ}\text{C}$	烟气成分/%							说 明
		$\text{O}_2$	$\text{CO}_2$	$\text{CH}_4$	$\text{CO}$	$\text{H}_2$	$\text{SO}_2$	$\text{NO}_x$	
1.07	878	1.7	10.7	0.13	0.047 9	0.032 2	0.000 5	0.033 4	无烟气循环
1.10	926	2.2	10.5	0.05	0.007 8	0.014 5		0.026 5	6.3% 烟气循环量
1.08	922	1.7	10.7	0.04	0.022 1	0.016		0.017 7	13.6% 烟气循环量

由表 5 可见,在辐射管中采取分级燃烧与烟气再循环技术双管齐下, $\text{NO}_x$  含量得到了有效控制,辐射管管壁温度达 922  $^{\circ}\text{C}$  时, $\text{NO}_x$  含量为 0.017 7%。在实验中还发现,烟气循环不但没有使辐射管表面温度的均匀性变差,相反还使表面温度更均匀,表面

温差更小。但实验中也发现加大烟气循环量后,排烟温度有增加的可能。

分级燃烧与强化传热技术同时使用,即在有内衬管时,使用“十字”形插件,实验结果如表 6 所示。

表 6 烟气成分

空气过剩系数	辐射管平均温度/ $^{\circ}\text{C}$	烟气成分/%						
		$\text{O}_2$	$\text{CO}_2$	$\text{CH}_4$	$\text{CO}$	$\text{H}_2$	$\text{SO}_2$	$\text{NO}_x$
1.17	860	3.5	9.7	0.10	0.089 3	0.051 0	0.000 9	0.014 7
1.18	874	3.5	9.7	0.04	0.002 4	0.006 4		0.017 5
1.14	916	3.0	10.0	0.05	0.009 7	0.013 3		0.018 9

由表6可见,在辐射管中采取分级燃烧与强化传热技术双管齐下, $\text{NO}_x$ 含量也得到了有效控制。从表6还可看到,温度对 $\text{NO}_x$ 含量的影响也很大,辐射管平均温度提高, $\text{NO}_x$ 含量迅速增大。

#### 4 结 论

为了降低蓄热式辐射管烟气中的 $\text{NO}_x$ 含量采取在辐射管内设置内衬管,实现燃料的分级燃烧,大幅度降低烟气中的 $\text{NO}_x$ 含量,通过优化内衬管的结构和尺寸, $\text{NO}_x$ 的含量由0.0621%降到了0.0278%。进一步降低 $\text{NO}_x$ 含量,有两种方式:一是在设置内衬管的基础上,通过在辐射管内加入插入件,强化辐射管内燃烧烟气与管壁的传热降低燃烧温度,从而降低 $\text{NO}_x$ 含量,采用该方法, $\text{NO}_x$ 含量得到了有效控制,辐射管管壁温度达到916℃时, $\text{NO}_x$ 含量为0.0189%,该方式还有降低排烟温度的趋势。第二种方式仍然是在设置内衬管的基础上,通过烟气循环,降低辐射管燃烧区的 $\text{O}_2$ 含量,采用该方法, $\text{NO}_x$ 含量也得到了有效控制,辐射管管壁温度达到922℃时, $\text{NO}_x$ 含量为0.0177%,并且该方式还有改善表面温度均匀性的效果。

#### 参考文献:

- [1] 吴光亮,李士琦,郭汉杰.高漫低氧空气燃烧(HTAC)技术在我国冶金工业中应用的现状分析[J].钢铁,2004(9):69-73.  
WU GUANG-LIANG, LI SHI-QI, GUO HAN-JIE. Application of the High Temperature Air Combustion in Metallurgical Industry of China[J]. Iron and Steel, 2004(9):69-73.
- [2] 欧俭平,马爱纯,占树华.U型蓄热式辐射管表面温度分布数值模拟研究[J].金属热处理,2005(1):77-80.  
OU JIAN-PING, MA AI-CHUN, ZHAN SHU-HUA. Numerical Simulation on Surface Temperature Distribution of a U-Type Regenerative Radiant-Tube [J]. Heat Treatment of Metals, 2005(1):77-80.
- [3] 苍大强,关运泽,毛一心.高温空气燃烧技术的超低 $\text{NO}_x$ 研究[J].燃烧科学与技术,2003(2):96-99.  
CANG DA-QIANG, GUAN YUN-ZE, MAO YI-XIN. Experimental Study on the Technology of Extra Low  $\text{NO}_x$  Emission in Industrial Furnace with HTAC [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2003(2):96-99.
- [4] 王关晴,程乐鸣,骆仲泱.高温空气燃烧技术中燃烧特性的研究进展[J].动力工程,2007(1):84-94.  
WANG GUAN-QING, CHENG LE-MING, LUO ZHONG-YANG. Advances in Research on Combustion Characteristics Involved in High Temperature Air Combustion Technique [J]. Journal of Power Engineering, 2007(1):84-94.
- [5] 曾汉才.大型锅炉高效低 $\text{NO}_x$ 燃烧技术研究[J].锅炉制造,2001(1):1-11.  
ZENG HAN-CAI. Study on Large-capacity Boiler High Efficiency Low  $\text{NO}_x$  Combustion Technology [J]. Boiler Manufacturing, 2001(1):1-11.
- [6] 吴碧君,刘晓勤.燃烧过程 $\text{NO}_x$ 的控制技术与原理[J].电力环境保护,2004,20(2):29-33.  
WU BI-JUN, LIU XIAO-QIN. The control technologies and principles of  $\text{NO}_x$  in combustion [J]. Electric Power Environmental Protection, 2004, 20(2):29-33.

(编辑 陈移峰)