

抑制氮氧化物排放的无烟燃煤技术 及其在窑炉改造中的应用

徐有宁, 宋文立, 白蕴如, 张建国, 林伟刚, 李静海

(中国科学院化工冶金研究所多相反应开放实验室, 北京 100080)

摘要: 抑制 NO 排放的无烟燃煤技术能够同时降低 NO 和烟黑的排放, 提高燃烧效率. 本文介绍了该技术用于窑炉改造的实例, 并对改造前后的污染物排放结果进行了讨论.

关键词: 窑炉; 氮氧化物; 一氧化碳; 烟黑

中图分类号: TK16 文献标识码: A 文章编号: 1009-606X(2001)01-0095-04

1 抑制氮氧化物排放的无烟燃煤技术

我国在研究开发固定床燃煤炉消烟技术上做了很多工作, 但在降低氮氧化物排放方面的研究很少, 在固定床燃煤炉上同时降低烟黑和氮氧化物排放尚无研究. 通常在煤燃烧过程中降低氮氧化物(NO_x)排放需要低温缺氧条件, 而降低烟黑的排放需要高温富氧条件, 因此同时减少这两种产物排放有一定难度. 中科院化冶所的专利技术——抑制氮氧化物排放无烟燃煤技术和燃煤炉^[1]可以在煤燃烧过程中实现同时降低固定床燃煤炉烟黑和氮氧化物排放.

抑制氮氧化物排放的原理是将煤的燃烧过程分为缺氧气化和富氧燃烧两个阶段. 燃煤设备产生的氮氧化物的主要成份是 NO, 主要来源于燃料中氮的氧化, 而燃料中氮产生的 NO 60%源于挥发份^[2]. 根据这一特性, 使煤在缺氧的情况下气化, 挥发份氮被氧化成 NO 的可能性显著减少, 气化煤气中的还原气体成份(CO , H_2 , C_mH_n , NH_3 , HCN 等)可用于进一步还原挥发份和焦炭燃烧生成的 NO ^[3], 这将减少 NO 的排放.

煤气化过程中会产生煤气、焦油和焦炭, 焦油可以继续热解析出重质 C_mH_n 和焦炭, C_mH_n 是烟黑的重要成份. 燃煤时生成烟黑与环境温度、 C_mH_n 浓度、氧气浓度、停留时间和混合情况等因素有关^[4]. 在抑制氮氧化物排放的无烟燃煤炉中, 燃煤产生的干馏煤气和焦油中的 C_mH_n 气体先经过高温燃烧的半焦层, 然后再进入空气供应充分的主燃烧区, 增加了 C_mH_n 气体的燃烧温度、停留时间及其与空气的混合程度, 使可能生成烟黑的气体在主燃烧区完全燃尽, 达到消除烟黑的目的.

典型的抑制氮氧化物排放的无烟燃煤炉主要由热解室、燃烧室、斜炉排组成, 煤首先在热解室内缺氧条件下热解产生煤气和半焦, 半焦在燃烧室的固体燃烧区燃尽, 煤气由热解区经过半焦层再进入燃烧室燃尽. 此炉可同时降低烟黑和氮氧化物排放.

2 不同燃煤方式的排放实验

实验在如图 1 所示的功率为 58 kW、具有抑制氮氧化物排放的无烟燃煤实验炉中进行, 它可以在抑制氮氧化物燃烧、常规燃烧、反向燃烧 3 种燃烧方式之间进行切换. 抑制氮氧化物燃烧状态为风门 1, 2 通风, 4 门封闭, 燃烧产物由 5 门排出; 常规燃烧状态为 2, 4 门封闭, 挡板 6 移到图中虚线位置, 即把主燃烧室与烟筒分开, 烟气由气化室上部进入烟筒; 反

收稿日期: 1999-11-05, 修回日期: 1999-12-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (编号: 29876044)

作者简介: 徐有宁(1962-), 男, 辽宁省沈阳市人, 博士研究生, 副教授, 研究方向为动力工程.

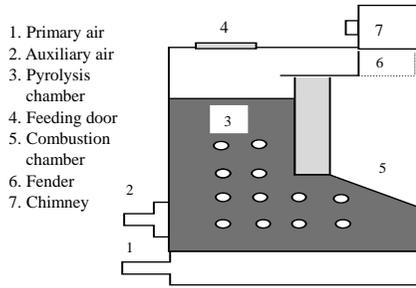


图 1 实验设备示意图

Fig.1 Sketch of the testing stove

向燃烧状态为 2, 3 门封闭, 4 门打开, 燃烧产物由主燃烧室 5 排放至烟筒. 抑制氮氧化物燃烧与常规燃烧间的切换通过将挡板 6 由实线位置改变到虚线位置实现, 抑制氮氧化物燃烧与反向燃烧之间的切换通过打开加煤口 4 实现. 烟气中的 NO , NO_2 , CO , O_2 浓度由 MSI 烟道气分析仪测量, 烟气黑度由烟气黑度仪测量. 实验采用大同烟煤, 煤的工业和元素分析见表 1.

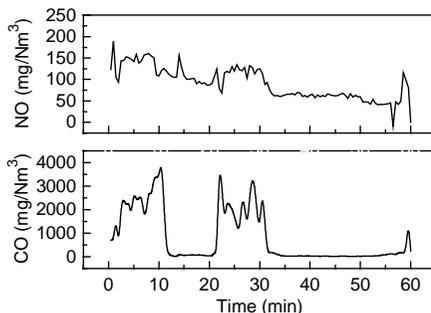
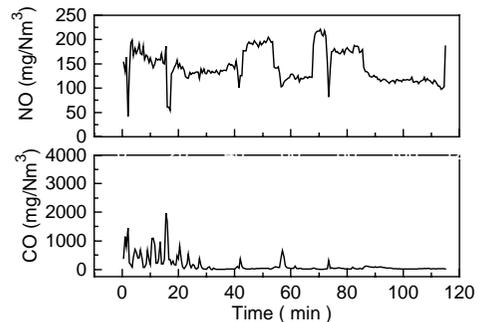
表 1 实验用煤工业及元素分析

Table 1 Ultimate and proximate analyses of coal

C_{ad} (%)	H_{ad} (%)	O_{ad} (%)	N_{ad} (%)	S_{ad} (%)	M_{ad} (%)	A_{ad} (%)	$Q_{net,ad}$ (kJ/kg)
71.48	3.95	7.59	0.82	0.48	2.15	13.54	28517.2

2.1 抑制氮氧化物燃烧与常规燃烧方式排放结果比较

实验首先在常规燃烧状态稳定热负荷条件下运行, 然后改变切换挡板 6 的位置, 使其变为抑制氮氧化物燃烧状态, 排放结果见图 2. 其中 0~10, 20~30 min 为常规燃烧, 10~20, 30~60 min 为抑制氮氧化物燃烧. 根据图 2 计算出抑制氮氧化物燃烧比常规燃烧排放的 NO 平均降低 25 mg/Nm^3 , 约 30% 左右, CO 排放降低 2500 mg/Nm^3 以上. 按抑制氮氧化物燃烧方式运行时烟气的林格曼黑度 <1 , 按常规燃烧方式运行时其值在 2~4 之间; 常规燃烧温度比抑制氮氧化物燃烧温度平均低 200°C 以上, 由于此温度效应, 导致后者比前者氮氧化物排放降低不显著, 如果采用相同燃烧温度比较, 效果会更显著.

图 2 常规燃烧与抑制 NO 燃烧排放比较曲线Fig.2 Comparison of emission levels in conventional and NO depressed combustion ($\text{O}_2=7\%$)图 3 反向燃烧与抑制 NO 燃烧排放比较曲线Fig.3 Comparison of emission levels in downdraft mode and NO depressed mode of combustion ($\text{O}_2=7\%$)

2.2 抑制氮氧化物燃烧与反向燃烧排放结果比较

实验首先在抑制氮氧化物燃烧状态下稳定运行, 然后开启加煤口 4, 关闭其它风门变为反向燃烧状态, 结果见图 3. 实验在 20~40, 58~78, 88~118 min 为抑制氮氧化物燃烧状态, 0~20, 40~58, 78~88 min 为反向燃烧状态. 从图中可得出抑制氮氧化物燃烧比反向燃烧 NO 的排放值低 50 mg/Nm^3 以上, 约降低 40%; 两种燃烧方式的 CO 排放平均值都在 2000 mg/Nm^3 以下, 运行稳定后排放值变化幅度很小. 实验结果表明抑制氮氧化物燃烧比反向燃烧在消除 NO 方面有明显的优势, 这两种燃烧方式在降低 CO 及烟黑排放方面效果都很好.

3 窑炉改造

3.1 原窑炉概况及特点

某厂两台燃煤窑炉功率约为 464 kW，燃煤为阜新烟煤，见表 2。原炉燃烧方式为常规固定炉排燃烧，通风方式为机械强制通风。原炉结构为拱型窑炉，高 1 m，宽 1 m，长 1.4 m。原炉运行有明显的周期性，时常冒黑烟，排烟的林格曼黑度在 2~4 之间，每次加煤、除渣时都会造成窑炉降温，导致严重冒烟，使热效率降低。

表 2 煤的工业及元素分析

Table 2 Ultimate and proximate analyses of coal

C_{ad} (%)	H_{ad} (%)	O_{ad} (%)	N_{ad} (%)	S_{ad} (%)	M_{ad} (%)	A_{ad} (%)	$Q_{net,ad}$ (kJ/kg)
50.02	3.80	9.81	0.74	1.00	8.00	26.63	19717

3.2 窑炉改造

应用抑制氮氧化物排放无烟燃煤技术改造窑炉，改造目的是消除原窑炉由于加煤导致的周期性烟黑排放，使窑炉在加煤、除渣时温度不变，始终处于稳定的燃烧状态。为实现以上目的，采用了单侧燃烧的改造方案，改造前后的窑炉结构见图 4。改造后窑炉的右半部作为气化室，左半部作为燃烧室，水平炉排作为大灰渣燃烧区。这种方案存在中间悬吊墙热负荷高的问题。对此采取悬吊墙加通风管的措施，由风机把冷风送入通风管冷却悬吊墙。

表 3 烟尘排放数据

Table 3 Emission from modified and unmodified kiln

	Modified kiln	Original kiln
Excessive air	1.7	1.7
Dust con. (mg/Nm ³)	10.28	33.87
Dust emission (kg/h)	0.01	0.07
Ringelmann index	<1	2

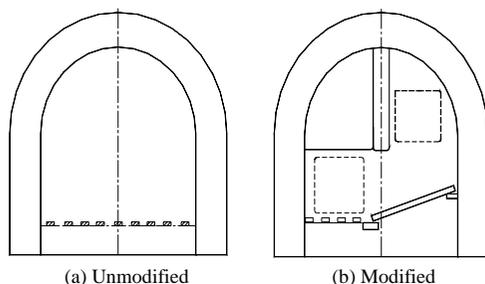


图 4 窑炉结构图

Fig.4 Configuration of kiln

3.3 改造结果及分析

运行考核在改造前、后的两台功率相近的窑炉中进行，环保监测站提供的烟尘排放测试数据见表 3，热效率测试数据见表 4，改造前后窑炉排放曲线见图 5 和 6。

从测量的排放数据和热工数据分析得出，改造前窑炉有明显的运行周期性，其周期约为 45 min，改造后若始终保持煤仓设计的煤位，可达到无周期运行。改造前窑炉各种参数随运行周期波动较大，而改造后窑炉各种运行参数较平稳，改造前、后排放烟气中 NO 最大值分别为 254 和 171 mg/Nm³，平均值分别为 110 和 116 mg/Nm³；CO 最大值分别为 3 4300 和 7 186 mg/Nm³，平均值分别为 2 021 和 1153 mg/Nm³。

表 4 燃烧效率测试数据

Table 4 Thermal efficiency

	Coal (kg/d)	CO (mg/N ³)	Ash (kg/d)	C in ash (%)	C in slag (%)	Thermal efficiency (%)
Original kiln	2100	2021	558.6	19.34	11.68	90
Modified kiln	1850	1153	478	11.18	5.46	96

改造后窑炉 NO 统计平均值略高的原因是改造前窑炉一次加煤量少，当煤燃烧后期，由于没有挥发份，NO 的排放值很低，燃烧变弱，即 NO 的排放值降低是以降低窑炉功率为代价的；当改造后窑炉连续运行 3 h 后，如不继续加煤以保持煤仓煤位，挥发份也会耗尽，

NO 的排放值急剧降低；图 6 运行时间在 150 min 即出现此现象。因此用改造前加煤运行 25 min 的 NO 的排放值与改造后负荷稳定阶段的值比较，可说明其抑制氮氧化物排放的优势。改造后窑炉运行 100 min 平均 NO 排放值为 131 mg/Nm^3 ，改造前加煤运行 25 min 后 NO 排放值为 151 mg/Nm^3 。另外，改造后窑炉燃烧室平均温度为 1200°C 左右，比改造前高 200°C ，按常规方式温度高氮氧化物生成量应增加，但改造后窑炉比改造前 NO 排放的最大值仍降低 32%，说明改造后有利于降低 NO 排放。

改造前窑炉的 CO 最大值和平均值高于改造后，改造前窑炉在添煤时 CO 排放值高，烟黑排放量增大，改造后窑炉添煤不影响 CO 排放值，当只剩半焦燃烧时，即煤斗中的煤位低于燃烧口高度时，CO 排放值才增大。改造后窑炉在整个运行过程中无烟黑排放。测量及计算结果表明炉窑改造后燃烧效率提高 6%。

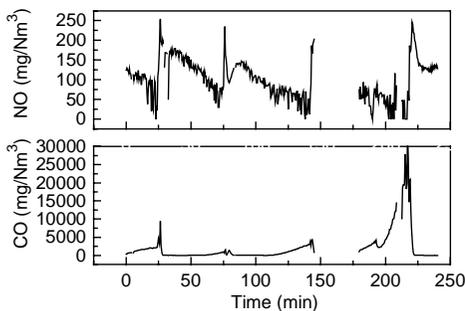


图 5 改造前窑炉排放曲线

Fig.5 Emissions from unmodified kiln

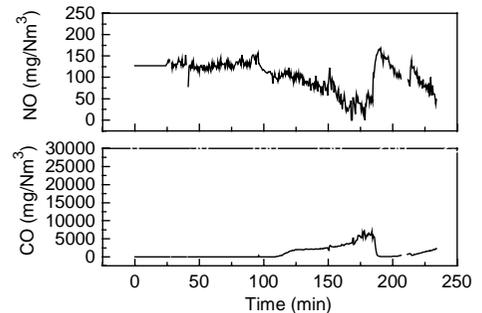


图 6 改造后窑炉排放曲线

Fig.6 Emissions from the modified kiln

4 结论

- (1) 抑制氮氧化物排放的无烟燃煤炉可以同时降低烟黑和 NO 排放。
- (2) 实验结果表明抑制氮氧化物排放的无烟燃煤炉在降低污染排放上优于常规固定床燃煤炉和反向燃烧炉。
- (3) 抑制氮氧化物排放的无烟燃煤技术应用在窑炉改造上可以降低烟黑排放，提高燃烧效率 6%。

参考文献:

- [1] 李静海, 许光文, 杨励丹, 等. 一种抑制 NO_x 排放的无烟燃煤方法及燃煤炉 [P]. 中国专利, CH110776A, 1998-04-23.
- [2] 曾汉才. 燃烧与污染 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1992. 46.
- [3] Kramlich J C, Cole J A. Mechanisms of Nitrous Oxide Formation in Coal Flames [J]. Combustion and Flame, 1989, 77(4): 375-384.
- [4] Santoro R J, Semerjian H G. Twentieth Symposium on Combustion [A]. The Combustion Institute. Pittsburgh. 1990. 997

NO_x-suppressed Smokeless Combustion Technique and Application in Coal-fired Kilns

XU You-ning, SONG Wen-li, BAI Yun-ru, ZHANG Jian-guo, LIN Wei-gang, LI Jing-hai

(Institute of Chemical Metallurgy, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Mechanism analysis and emission measurement indicate that the NO_x-suppressed smokeless coal combustion technique can reduce NO and smoke emission simultaneously and improve combustion efficiency. Its application to coal-fired kilns is presented by comparing the emission from the modified and unmodified kilns.

Key words: kiln; nitrogen oxide; carbon mono-oxide; soot