

# 水泥熟料烧成系统 $\text{NO}_x$ 生成特性研究

嵇 鹰<sup>1,2</sup>, 田耀鹏<sup>1</sup>, 周 蕊<sup>1</sup>, 谢奋国<sup>3</sup>

(1 西安建筑科技大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061; 2 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055; 3 陕西省建筑材料工业学校, 陕西 西安 710061)

**摘 要:** 利用德国 Testo350 烟气分析仪, 采集了两种新型干法水泥生产线中窑尾烟室、分解炉底部、分解炉上部和每级旋风筒入口的烟气数据, 分析表明: 空气过剩系数、煤粉特性、燃烧气氛和  $\text{SO}_2$  的浓度等对  $\text{NO}_x$  的生成有一定的影响. 合理组织分解炉底部煤粉燃烧, 适当提高窑尾烟室 CO 浓度, 使得窑头产生大量的  $\text{NO}_x$  得到还原, 降低  $\text{NO}_x$  最终排放量.

**关键词:** 分解炉;  $\text{NO}_x$ ; CO; 过剩空气系数

中图分类号: TQ172.6+22.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)05-0735-06

## 1 前 言

进入 21 世纪以来, 随着我国经济建设突飞猛进的发展, 我国水泥工业蓬勃发展, 生产规模飞速扩大. 据不完全统计, 目前全国干法水泥生产能力已达 18 亿吨. 用于生产水泥所需煤耗也相应增加. 煤炭的燃烧过程放出大量的  $\text{CO}_x$ 、 $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$  及粉尘等, 造成大气污染. 水泥企业已成为继火电厂和汽车污染源之后的又一主要污染源. 其中  $\text{NO}_x$  对环境的恶劣影响也已引起人们的关注. 因此, 搞清楚水泥工业煤燃烧过程中  $\text{NO}_x$  的排放已迫在眉睫.

国内外对火电厂  $\text{NO}_x$  生成机理和控制技术已做了大量的研究<sup>[1-5]</sup>. 对火电厂  $\text{NO}_x$  排放控制技术已基本趋于成熟. 而水泥工业由于煤粉燃烧时还伴随着生料的分解和熟料形成, 因此水泥工业窑炉内  $\text{NO}_x$  生成和排放规律和火电厂单纯煤粉锅炉  $\text{NO}_x$  生成和排放规律有一定的区别. 国内外对水泥工业燃煤过程中影响氮氧化物转化机理还处于研究之中<sup>[6]</sup>.

水泥生产时  $\text{NO}_x$  的主要生成位置是回转窑和分解炉. 回转窑内温度较高, 煤粉燃烧后产生的气体温度可达 1 750 °C, 燃烧过程中除了由煤粉带入产生的燃料型  $\text{NO}_x$ <sup>[7]</sup>, 还会产生热力型  $\text{NO}_x$ <sup>[8]</sup>, 以及少量的快速型  $\text{NO}_x$ . 受水泥熟料烧成工艺要求的限制, 以组织窑内燃烧方式来达到有效降低回转窑  $\text{NO}_x$  产生量的努力不明显, 而分解炉操作温度较低, 已经有一些研究工作证明合理的分解炉设计确实减少了  $\text{NO}_x$  的排放.

了解和分析熟料烧成过程中煤粉燃烧产生  $\text{NO}_x$  的机制和特性, 是有效降低水泥工业  $\text{NO}_x$  排放, 开发控制技术的必要条件. 我们对云南、四川、陕西等十余家水泥生产线的  $\text{NO}_x$  产生和排放做了实测和分析.

## 2 现场数据采集

### 2.1 烟气分析及取样系统

采用了德国 MRU 公司生产的 Testo 350 MXL 型多组分烟气分析仪做了烟气成分的在线检测. 该分析仪可以同时测量烟气中的  $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 、CO、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  等气体组分. 烟气由取样管采样经滤膜滤除固态颗粒后, 进入烟气分析仪, 烟气中各气体的含量由仪表直接读取.

### 2.2 数据采集

目前用得最多的回转窑与分解炉连接方式分在线型和离线型. 在线型是分解炉直接坐落在窑尾烟

室之上,窑气经烟室进入分解炉后流入预热器;离线型分解炉气出口布置在在窑尾上升烟道旁.分解炉气与窑气在上升烟道上部汇合后一起进入最下级旋风筒.通过对这两种新型干法水泥生产线的不同测点进行现场烟气采集后检测,每隔 1 小时采集一次试样,每天六次,在每条生产线上采集三天.图 1 和图 2 分别为两种现场检测示意图.样气采集点是考虑煤粉起燃点、燃烧过程及燃烧基本完成等几个方面,以此来推断 NO<sub>x</sub> 在煤粉燃烧过程中变化情况.

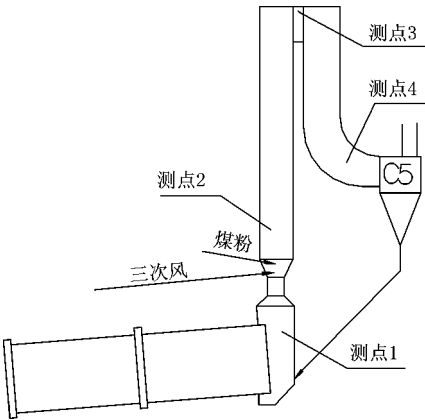


图 1 在线型现场检测示意图

Fig. 1 In linear scene examination schematic drawing

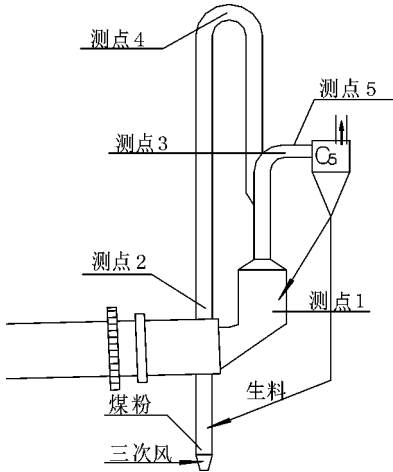


图 2 离线型现场检测示意图

Fig. 2 To linear scene examination schematic drawing

在线测量过程氧的浓度随位置和时间改变,而污染物浓度与烟气中氧含量有关,因此须将所测结果归整同一氧浓度基准(6%)下,计算公式如下:

$$\phi_{true} = \phi_{measured} \times \frac{0.21 - 0.06\phi_{O_2}}{0.21 - \phi_{O_2,measured}}$$

式中:  $\phi_i$  为污染物  $i$  的摩尔分数;  $\phi_{O_2}$  为氧的摩尔分数.

分解炉和窑尾烟室实际工况的过剩空气系数使用以下经验公式:

$$\alpha = \frac{0.21 - 0.36(\phi_{O_2} - C_{CO}/10\,000)}{0.21 - (\phi_{O_2} - C_{CO}/10\,000)}$$

式中:  $\alpha$  为过剩空气系数;  $\phi_{O_2}$  为氧的摩尔系数(%);  $C_{CO}$  为烟气中一氧化碳浓度(ppm);

两种类型窑炉实际用煤工业分析结果见表 1.

表 1 煤的工业分析  
Tab. 1 Coal technical analysis

	工业分析/%				
	$M_{ad}$	$A_{ad}$	$V_{ad}$	$FC_{ad}$	$Q_{net,ad}/MJ \cdot kg^{-1}$
在线型实际用煤	2.0	32.53	24.59	40.88	20.99
离线型实际用煤	1.2	36.05	22.39	40.36	19.69

对工业现场采集的数据进行分析得知,水泥工业窑炉 NO<sub>x</sub> 总生成量中,NO 占总 NO<sub>x</sub> 生成量的 90%以上,这个结论和火电厂锅炉 NO<sub>x</sub> 生成规律基本吻合.

3 结果与分析

3.1 窑炉内过剩空气系数对 NO<sub>x</sub> 生成特性的影响

在一般燃烧条件下,燃料中含氮有机化合物首先被热分解成 HCN 和 NH<sub>3</sub>.这两种化合物在氧化性和还原性气氛下有不同的反应机理.而燃烧烟气中影响气的主要成分是 O<sub>2</sub> 和 CO,因此有必要对分解炉底部和窑尾烟室过剩空气系数对 NO<sub>x</sub> 的生成的影响进行研究分析.无论是在线型还是离线型的分解炉,回转窑窑头煤粉燃烧产生的烟气都进入窑尾烟室,因此烟室的过剩空气系数在一定程度上代表了窑

头过剩空气系数. 图 3~6 为两种窑炉连接方式过剩空气系数与 CO 浓度及 NO<sub>x</sub> 浓度的关系.

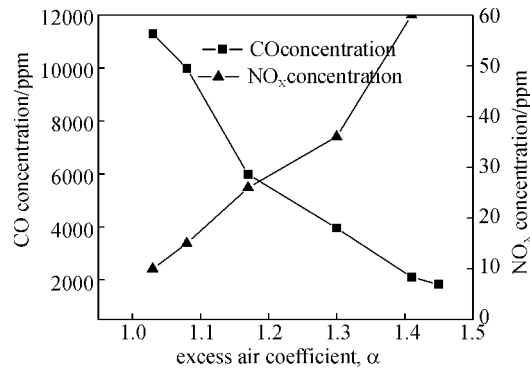


图 3 在线型窑尾烟室过剩空气系数对 CO 和 NO<sub>x</sub> 生成的影响

Fig. 3 In linear kiln tail box excess air coefficient to CO and NO<sub>x</sub> production influence

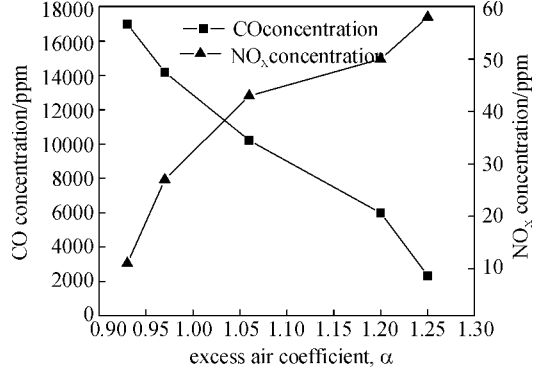


图 4 离线型窑尾烟室过剩空气系数对 CO 和 NO<sub>x</sub> 生成的影响

Fig. 4 To linear kiln tail box excess air coefficient to CO and NO<sub>x</sub> production influence

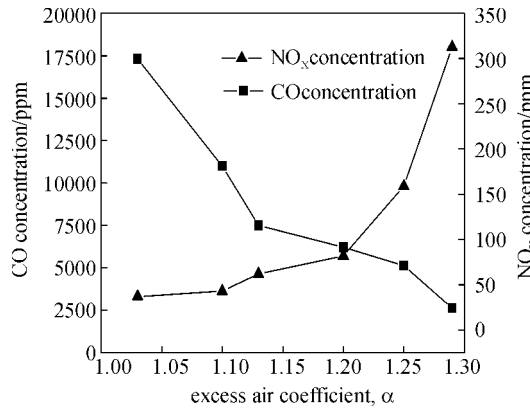


图 5 在线型分解炉底部过剩空气系数对 CO 和 NO<sub>x</sub> 生成的影响

Fig. 5 In linear kiln calciner excess air coefficient to CO and NO<sub>x</sub> production influence

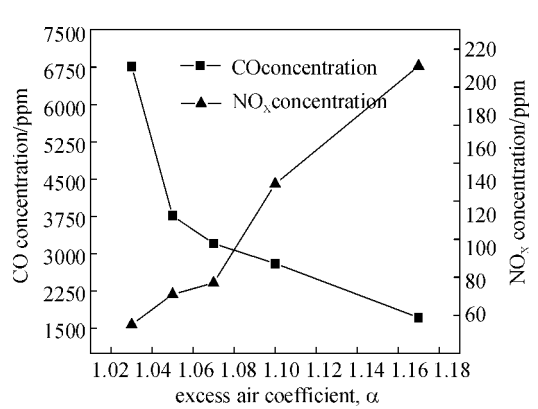
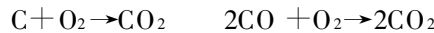


图 6 离线型分解炉底部过剩空气系数对 CO 和 NO<sub>x</sub> 生成的影响

Fig. 6 To linear kiln calciner excess air coefficient to CO and NO<sub>x</sub> production influence

从图 3~图 6 我们可以看出随着  $\alpha$  的变化, CO 和 NO<sub>x</sub> 生成浓度呈现出不同的规律. CO 浓度随着  $\alpha$  的增大而降低, NO<sub>x</sub> 生成浓度随着  $\alpha$  的增大而升高. 原因在于随着  $\alpha$  的增大, 燃料/氧化学当量比降低, O<sub>2</sub> 浓度增大, 提高了煤粉的燃尽率, 使 C 和 O<sub>2</sub> 的反应速率和几率增加, 反应式如下:



从而使 CO 的生成浓度降低. 而 NO<sub>x</sub> 生成浓度随  $\alpha$  增大而增大主要是由于以下几方面的原因: (1) 由于  $\alpha$  增大提高了煤粉的燃尽率, 降低了 CO 的浓度, 使气氛逐渐向氧化性气氛转变, 减少了 CO 和 NO<sub>x</sub> 的接触概率, 从而影响了 CO 对 NO<sub>x</sub> 的催化还原作用, 使 NO<sub>x</sub> 生成浓度增加. (2) 煤粉燃烧过程中生成的 NO<sub>x</sub> 主要由煤热解产生的前驱物 HCN 和 NH<sub>3</sub><sup>[9]</sup> 氧化而来, 而 HCN 和 NH<sub>3</sub> 在不同的气氛中反应路径不同. 在氧化气氛中, 两种含氮化合物主要转化为 NO<sub>x</sub>; 在还原气氛中, 两种含氮化合物大部分被还原为 N<sub>2</sub>. 因此随着  $\alpha$  的增大, O<sub>2</sub> 含量增大, 加速了 HCN 和 NH<sub>3</sub> 向 NO<sub>x</sub> 转化的速率, 最终使 NO<sub>x</sub> 生成浓度增加.

生料分解放出大量的 CO<sub>2</sub> 和窑头、分解炉底部未燃尽的煤焦反应:  $\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}$ , 生成 CO, 因此未燃尽的煤及煤焦<sup>[10-11]</sup> 和高浓度 CO 环境中, 在窑尾烟室生料中金属氧化物的催化作用下, 发生异相还原反应:  $2\text{C} + 2\text{NO} \rightarrow 2\text{CO} + \text{N}_2$ , 发生均相还原反应:  $2\text{CO} + 2\text{NO} \rightarrow 2\text{CO}_2 + \text{N}_2$ , 使窑头产生大量的 NO<sub>x</sub> 被还原, 因此这种情况下 NO<sub>x</sub> 生成浓度也较低.

但是对于两种类型窑炉来说,窑尾烟室和分解炉底部 NO<sub>x</sub> 浓度测得值都比较低(< 320 ppm),原因是使用煤粉灰分含量较高,煤粉燃尽率不高,使这两个部位的 CO 体积分数都大于 0.1%,因此局部仍存在还原气氛,因此 NO<sub>x</sub> 生成浓度不高。

3.2 煤粉特性对 NO<sub>x</sub> 生成特性的影响

获得了在线型和离线型窑炉各燃烧部位 NO<sub>x</sub> 实测浓度,可以用来比较现场燃料特性对 NO<sub>x</sub> 生成特性的影响. 数据处理结果见表 2.

表 2 两种不同类型窑炉不同部位 NO<sub>x</sub> 浓度

类型	不同的现场检测部位 NO <sub>x</sub> 浓度/ppm				
	窑尾烟室	分解炉底部	分解炉中部	分解炉顶部	C5 入口
在线型	20~33	45~64	162~219	286~365	371~402
离线型	15~30	4~20	187~279	321~410	422~483

从表 2 中可以看出,两种不同类型回转窑型窑尾烟室和分解炉底部 NO<sub>x</sub> 浓度在五个检测位置中都是比较低的. 窑尾烟室烟气和分解炉煤粉燃烧产生的烟气经分解炉顶部进入 C5 入口,随着烟气停留时间的增加,由于系统不可避免地存在漏风现象,一方面漏风使废气中的 CO 浓度稀释;另一方面,CO 和 O<sub>2</sub> 发生氧化反应,也会使烟气中 CO 浓度降低. 因此后三个检测位置 CO 对 NO<sub>x</sub> 的催化还原作用变弱,而煤中原含有的氮进一步释放,使得 NO<sub>x</sub> 生量较大.

上面已经提到,对于窑尾烟室和分解炉底部来说,离线型较在线型窑炉 NO<sub>x</sub> 实测浓度小. 主要是由于,离线型窑头和分解炉底部用煤灰分含量较高,降低了煤粉燃尽率,CO 生成浓度较高. 而这两个部位 NO<sub>x</sub> 的还原作用主要受 CO 浓度控制,反应式如下:



而分解炉顶部和 C5 入口处 CO 浓度不高. 这两处 CO 催化还原作用虽不强,受煤中水分和挥发份可能影响 NO<sub>x</sub>. (1)挥发份中氮的化合物(HCN 和 NH<sub>3</sub>)在还原气氛下不但转化为无污染的 N<sub>2</sub>,而且还可以还原已经生成的 NO<sub>x</sub>,从而降低了 NO<sub>x</sub> 生成浓度. (2)水蒸气在生料中金属氧化物的催化作用下,容易发生离解反应: H<sub>2</sub>O→H+OH,形成的 H 和 OH 自由基促使煤分子键的断裂,加大挥发份中氮的化合物(HCN 和 NH<sub>3</sub>)的析出量<sup>[3]</sup>,已经生成的 NO<sub>x</sub> 得到还原. 鉴于以上两方面的原因,由于在线型使用的煤挥发份和水分含量高于离线型所用煤挥发份和水分含量,对于分解炉顶部和 C5 入口来说,在线型较离线型窑炉 NO<sub>x</sub> 浓度小.

3.3 不同部位 SO<sub>2</sub> 对 NO<sub>x</sub> 生成特性的影响

两种类型窑炉连续现场检测结果表明,窑尾烟室、分解炉底部、分解炉顶部都存在局部还原气氛. 图 7~图 9 为燃烧污染物之间的关系.

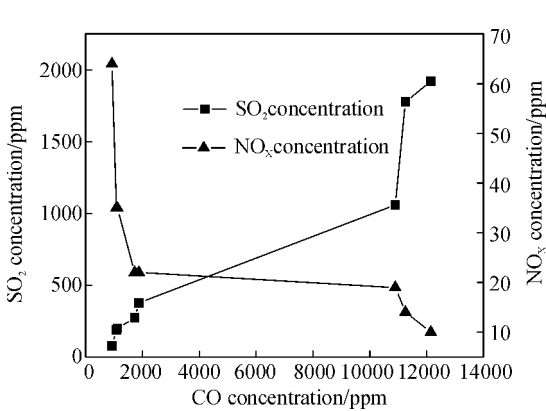


图 7 窑尾烟室 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 与 CO 浓度关系  
Fig. 7 Kiln tail box pollutant production density relations

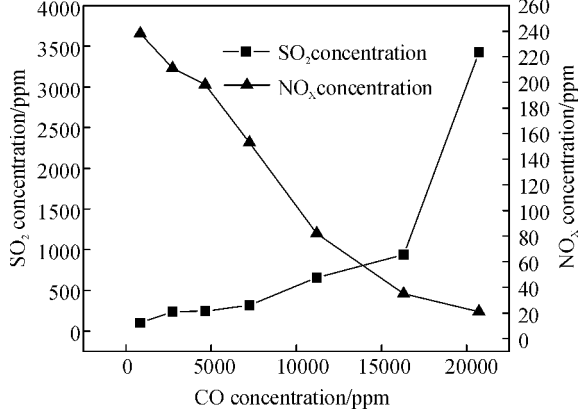


图 8 分解炉底部 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 与 CO 浓度关系  
Fig. 8 Bottom of calciner pollutant production density relations

图7~图9显示,SO<sub>2</sub>浓度随CO浓度的增大而增大.在温度高于800℃时,在一氧化碳的作用下,烟气中已经形成的固态硫酸钙释放出二氧化硫,其反应式为:CaSO<sub>4</sub>+CO→CaO+SO<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>.由回转窑尾到分解炉顶部CO浓度逐渐增加,CaSO<sub>4</sub>分解反应反应趋向于低温区域,反应速度加剧.而分解炉与窑尾烟室系统温度大约在850~1050℃之间,满足上述反应发生条件.因此在窑尾烟室、分解炉底部和分解炉顶部这三个部位,被生料所吸收的SO<sub>2</sub>在还原气氛中又被释放出来,使SO<sub>2</sub>浓度增大.图7和图8表明,NO<sub>x</sub>生成浓度随CO和SO<sub>2</sub>浓度的增加而降低.一方面由于,随着还原气氛的增强,大量的NO<sub>x</sub>被还原,使NO<sub>x</sub>的浓度降低;另一方面由于SO<sub>2</sub>的存在

消耗了燃烧过程中形成的OH、H等自由基,阻止了燃料中氮化合物向NO<sub>x</sub>的转化,从而减少了NO<sub>x</sub>的生成<sup>[13-14]</sup>.从图9中我们可以看出,SO<sub>2</sub>浓度随CO浓度单调上升,而NO<sub>x</sub>浓度与CO浓度并无明显的相关性.主要原因是,随着煤粉在分解炉内停留时间的增加,煤粉中的含氮化合物不断释放出来,此时虽然也存在局部还原气氛,可能由于燃烧工况的波动,NO<sub>x</sub>浓度与还原气氛的强弱之间并无明显的相关性.

从以上分析可知,局部还原气氛的出现会使二氧化硫的排放浓度增大.此外较强的还原气氛会影响水泥熟料的质量,容易出现黄心料,因此在实际生产中必须解决好煤粉燃烧气氛和NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>生成浓度以及熟料质量之间的关系,选择合适的过剩空气系数.

## 4 结 论

水泥工业窑炉中,过剩空气系数对NO<sub>x</sub>的生成浓度有很大的影响,主要是由于不同的过剩空气系数,窑炉内燃烧气氛不同,而局部还原性气氛不但有助于NO<sub>x</sub>的生成,还会使大部分生成的NO<sub>x</sub>得到还原.高挥发份煤粉在还原气氛中燃烧时,大部分含氮化合物会转化为无害的N<sub>2</sub>,从而降低NO<sub>x</sub>的生成浓度.除此之外,SO<sub>2</sub>的存在也会影响NO<sub>x</sub>的生成浓度,主要是SO<sub>2</sub>消耗燃烧过程中产生的自由基,降低NO<sub>x</sub>的生成量.

随着水泥行业结构调整,新型干法线窑尾均采用在线型分解炉.有人提出将燃料和三次风均分两部分喂入分解炉,一部分燃料喂入上升烟道.这部分煤粉在窑气中不完全燃烧,生成CO、H<sub>2</sub>等还原气体,在锥体下部圆柱段形成强的还原气氛.在生料的催化作用下,将窑气内的NO<sub>x</sub>还原为N<sub>2</sub>,其余燃料和物料在锥体上部附近加入,同时控制分解炉锥体三次风的进入量,使燃料依然处于不完全燃烧状态.这样分解炉本体内形成弱还原区,补充强还原区的脱氮作用;其余三次风在分解炉出口处进入,使燃料充分燃烧.因此在不影响熟料质量和SO<sub>2</sub>浓度超标的情况下,合理组织分解炉底部煤粉燃烧,适当提高窑尾烟室CO浓度,可以使窑头产生大量的NO<sub>x</sub>在此得到还原,从而降低NO<sub>x</sub>最终排放量.

## 参考文献 References

- [1] JOUNI P. Hamalainen, Martti J. Aho. Conversion of fuel nitrogen through HCN and NH<sub>3</sub> to nitrogen oxides at elevated pressure[J]. Fuel 1996, 75(12): 1377-1386.
- [2] LI Chun-zhu, TAN Li-lian. Formation of NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> precursors during the pyrolysis of coal and biomass. Part III. Further discussion on the formation of HCN and NH<sub>3</sub> during pyrolysis[J]. Fuel 2000, 79(15): 1899-1906.
- [3] JAN E Johnsson. Formation and Reduction of Nitrogen Oxide in Fluidized Bed Coal Combustion[J]. Fuel 1994, 73(9): 1398-1415.
- [4] 王恩禄 张海燕 罗永浩. 等. 低 NO<sub>x</sub> 燃烧技术及其在我国燃煤电站锅炉中的应用[J]. 动力工程, 2004, 24(1): 23-28.  
WANG En-lu ZHANG Hai-yan, LUO Yong-hao, et al. Analysis of Low NO<sub>x</sub> Combustion Techniques and Its Application for the Coal Fired Power Plants in China[J]. Power Engineering, 2004, 24(1): 23-28.

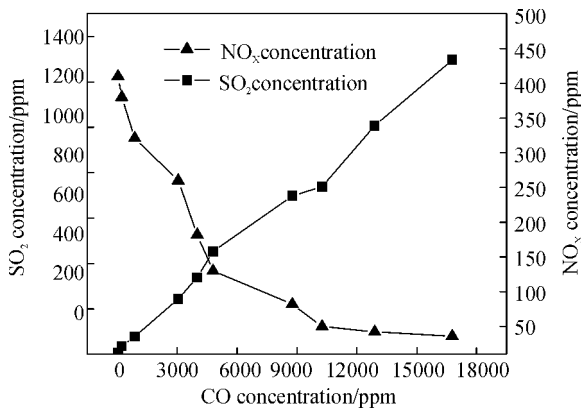


图9 分解炉顶部SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>与CO浓度关系

Fig.9 Top of calciner pollutant production density relations

- [ 5 ] MAO Jian-xiong, MAO Jian-quan, ZHAO Shu-min. Clean Burning of Coal[ M ]. Beijing: Science Press, 1998.
- [ 6 ] LIU Y H, Che D F. Release of NO and its precursors from coal combustion in a fixed bed[ J ]. Fuel Processing Technology, 2006, 87(4): 355-362.
- [ 7 ] 嵇 鹰, 田耀鹏, 徐德龙. 水泥工业 NO<sub>x</sub> 排放控制探讨[ J ]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 41(3): 397-401.
- JI Ying, TIAN Yao-peng, XU De-long. Comments on NO<sub>x</sub> emission abatement in cement industry[ J ]. J. Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2009, 41(3): 397-401.
- [ 8 ] HARDING A W, BROWN S D, THOMAS K M. Release of NO<sub>x</sub> from the combustion of coal chars[ J ]. Combustion and Flame, 1996, 107(4): 336-350.
- [ 9 ] ZELDOVICH Y B. The oxidation of nitrogen in combustion and explosions[ J ]. Acta Physicochem USSR, 1946, 21: 577-628.
- [ 10 ] 钟北京, 张怀山, 傅维标. 煤焦燃烧 NO 释放规律研究[ J ]. 燃烧科学与技术, 2000, 6(1): 28-31.
- ZHONG Bei-jing, ZHANG Huai-shan, FU Wei-biao. Study on NO Release from a Char Combustion[ J ]. JOURNAL of COMBUSTION SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2000, 6(1): 28-31.
- [ 11 ] 王世杰, 陆继东, 胡芝娟, 等. 煤焦还原 NO 的实验研究[ J ]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(1): 21-23.
- WANG Shi-jie, LU Ji-dong, HU Zhi-juan, et al. Study on reduction of NO by coal chars[ J ]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science), 2006, 34(1): 21-23.
- [ 12 ] FENG Jie, LI Wen-ying. Studies of the release rule of NO<sub>x</sub> precursors during gasification of coal and its char[ J ]. Fuel Processing Technology, 2003, 84(1-3): 243-254.
- [ 13 ] 苟 湘, 周俊虎, 周志军, 等. 水蒸气对煤粉再燃还原 NO 的影响[ J ]. 化工学报, 2007, 58(10): 2629-2635.
- GOU Xiang, ZHOU Jun-hu, ZHOU Zhi-jun, et al. Effect of water vapor on NO reduction by pulverized coal re-burning[ J ]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2007, 58(10): 2629-2635.
- [ 14 ] Francesco Miccio, Gerhard Löffler, Verina J Wargadalam, et al. The influence of SO<sub>2</sub> lever and operating condition on NO<sub>x</sub> and N<sub>2</sub>O emissions during fluidized bed combustion of coals[ J ]. Fuel, 2001, 80(11): 1555-1566.
- [ 15 ] HAMPARTSOUMIAN E, NIMMO W, GIBBS B M. Nitrogen sulphur interactions in coal flames[ J ]. Fuel, 2001, 80(7): 887-897.

## An investigation into NO<sub>x</sub> formation in preheater and precalciner cement kilns system

JI Ying<sup>1,2</sup>, TIAN Yao-peng<sup>1</sup>, ZHOU Rui<sup>1</sup>, XIE Fen-guo<sup>3</sup>

- (1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology;  
2. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in west China(XAUAT), Xi'an 710055, China;  
3. Shaanxi building materials industrial school, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** Samples of exit gases at the bottom of the kiln, inlet and outlet of pre-calciner and inlet of each cyclone pre-heater were taken in-line along with more than a dozen of pre-heater and pre-calciner cement clinker production lines, which were measured / analysed by Testo 350 flue gas analyzer for the components in the exiting gases. Data measured showed that levels of excessive air, properties of coal used, conditions of combustions and concentration of SO<sub>2</sub> etc. exerted an effect on the formation of NO<sub>x</sub> in pre-heater and pre-calciner cement kilns system. Proposal to raise the CO concentration level at the bottom of pre-calciner by improving its design for coal burning was made. The increase of CO concentration in the pre-calciner would help to convert the NO<sub>x</sub> from the kiln exit gases into harmless N<sub>2</sub>, and therefore, reduction in NO<sub>x</sub> emissions could be anticipated in exhaust off-gases.

**Key words:** precalciner; NO<sub>x</sub>; CO; excess air coefficient