

# 煤粉燃烧炉膛沿程 $\text{NO}_x$ 释放规律的研究

金晶, 张忠孝, 李瑞阳

(上海理工大学动力工程学院, 上海市杨浦区 200093)

## Study on the $\text{NO}_x$ Release Rule Along Boiler During Pulverized Coal Combustion

JIN Jing, ZHANG Zhong-xiao, LI Rui-yang

(College of Power Engineering, University of Shanghai for Science & Technology, Yangpu District, Shanghai 200093, China)

**ABSTRACT:** Numerical simulation and experimental study on the  $\text{NO}_x$  release rule along boiler during pulverized coal combustion have been done. As the temperature increasing, the peak value of  $\text{NO}_x$  release moves forward,  $\text{NO}_x$  emissions increase. But when the temperature increased to some extent,  $\text{NO}_x$  emissions reduce with the temperature increases. The  $\text{NO}_x$  emissions increase with the nitrogen content of coal increases. The peak value of  $\text{NO}_x$  release moves backwards with the increase of coal rank.  $\text{NO}_x$  emissions increase obviously with the increase of stoichiometric ratio. There exists a critical average diameter ( $d_c$ ). If  $d \leq d_c$ , the  $\text{NO}_x$  emissions reduce with the decrease of pulverized coal size. If  $d > d_c$ , the  $\text{NO}_x$  emissions reduce with the increase of the pulverized coal size. The results show that overall reasonable agreement between the simulation results and experiment results for concentration distribution of  $\text{NO}_x$  along the axis of furnace is obtained.

**KEY WORDS:** Thermal power engineering;  $\text{NO}_x$ ; Pulverized coal; Combustion; Release rule

**摘要:** 对一维炉内煤粉燃烧, 炉膛沿程  $\text{NO}_x$  的释放规律进行了数值模拟和试验研究。研究表明: 炉内温度升高,  $\text{NO}_x$  的析出峰值升高, 位置前移, 温度达到一定值后, 随温度的升高,  $\text{NO}_x$  的释放量又呈下降趋势; 煤中含氮量越多,  $\text{NO}_x$  释放量越大,  $\text{NO}_x$  的析出峰值位置, 随煤种碳化程度的增加而逐渐后移; 随过量空气系数的增加,  $\text{NO}_x$  释放量呈明显增加的趋势;  $\text{NO}_x$  的释放量与煤粉粒度的关系, 存在一个煤粉平均粒度临界值  $d_c$ , 当煤粉粒度  $d \leq d_c$  时, 随煤粉粒度的减小,  $\text{NO}_x$  的释放量减小, 当煤粉粒度  $d > d_c$  时, 随煤粉粒度的减小,  $\text{NO}_x$  的释放量增大; 模拟计算同试验结果吻合较好。

**基金项目:** 国家“863”高技术基金项目(2002AA527054)。

The National High Technology Research and Development of China(863 Programme)(2002AA527054).

**关键词:** 热动力工程;  $\text{NO}_x$ ; 煤粉; 燃烧; 释放规律

## 1 引言

由于  $\text{NO}_x$  是造成大气污染的主要物质之一, 所以当今燃煤电站锅炉的  $\text{NO}_x$  排放控制问题已引起世界各国的关注。锅炉运行过程中, 影响  $\text{NO}_x$  生成的因素非常多, 其形成机理也极为复杂, 单纯的试验研究需耗费大量人力、物力, 而且试验结果的可靠性受试验条件、试验工况, 测试设备精度的影响很大。数值模拟是一种新的研究手段, 与试验研究相比, 具有时效性、经济性, 得到的数据也非常全面, 因此对试验研究能起到很好的指导与补充作用。

国内外不少学者进行了煤粉燃烧  $\text{NO}_x$  释放特性的研究, 前人的研究大多采用试验方法<sup>[1-6]</sup>。文献[7]采用“后处理”的方法对炉内煤粉燃烧氮氧化物的生成进行了数学模拟, 其主要研究了炉内温度场及污染物浓度的分布。文献[8]采用了单颗粒煤中挥发分氮析出转换过程的模型进行了不同煤种挥发分氮析出过程的数值模拟及试验研究, 主要对通用热解模型及双方程热解模型进行了比较。 $\text{NO}_x$  的释放特性不仅与煤粉本身的物理化学特性有关, 而且主要取决于燃烧过程中的环境因素, 因此, 不同的燃烧条件下  $\text{NO}_x$  释放量差别很大。本文首先通过数值模拟, 对试验研究给予定性指导, 然后通过试验方法探讨了炉膛温度、煤种、过量空气系数和煤粉粒度对炉膛沿程  $\text{NO}_x$  释放特性的影响, 这方面的研究报告国内外尚不多见。

## 2 模拟计算与试验研究方法

模拟计算与试验研究是针对试验室中的一维煤粉炉进行的，试验系统如图 1 所示。燃料由电磁振动给料机供给，炉膛内径 200mm，高 2520mm。煤粉炉在炉膛一侧开有 5 个孔，可供测量、取样、观测等多种用途。第一个孔距燃料入口 0.54m。炉膛的另一侧装有测温用热电偶，炉膛由硅碳棒进行电加热。超细煤粉由超声速超微气流粉碎机进行加工，煤粉粒度由激光粒度分析仪测量。研究工况为：炉膛温度 800℃~1200℃，过量空气系数 0.8~1.1，煤粉粒度 15μm~80μm，给粉量 2 kg/h。试验煤样的工业分析及元素分析见表 1。

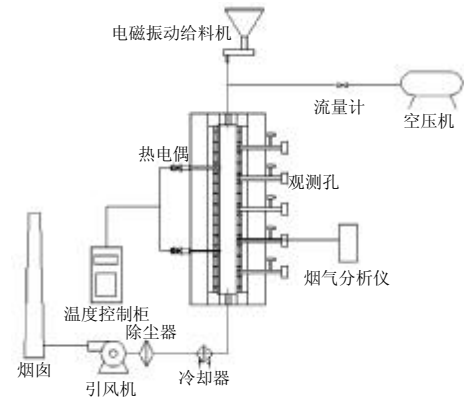


图 1 试验系统示意图

Fig. 1 Scheme of experimental system

模拟计算中，对气相湍流计算，采用  $k-e$  双方程湍流模型；对湍流燃烧的计算，采用部分平衡的概率密度函数模型；对煤粉颗粒群的运动模拟采用

表 1 试验煤样的工业分析及元素分析

Tab.1 The proximate and ultimate analysis of coals

煤种	工业分析/ %				元素分析/ %				
	$M_{ad}$	$A_{ad}$	$V_{ad}$	$FC_{ad}$	$C_{ad}$	$H_{ad}$	$O_{ad}$	$S_{ad}$	$N_{ad}$
龙口褐煤	8.40	22.10	39.70	29.80	49.90	3.40	14.22	0.60	1.38
神府烟煤	1.76	30.11	23.06	45.07	53.68	3.31	9.66	0.51	0.97
新泰贫煤	0.50	23.90	12.80	62.80	65.60	3.18	3.02	1.85	1.95
晋城无烟煤	2.81	19.44	7.00	70.75	71.53	1.94	2.49	0.93	0.85

颗粒随机轨道模型；煤的热解计算采用双方程平行竞争反应模型；焦炭燃烧计算，采用动力/扩散控制反应速率模型；辐射传热计算采用 P1 模型。

本试验研究温度范围不高于 1200℃，所以生成的  $NO_x$  以燃料型为主。当燃料被加热时，燃料中含氮化合物，在反应区域中热分解，生成中间产物 HCN、 $NH_3$  等，这些中间产物一部分氧化为  $NO_x$ ，一部分还原为  $N_2$ 。近来的研究表明<sup>[9]</sup>：煤粉燃烧时，HCN 是生成  $NO_x$  的主要中间产物。因此，对燃料中的氮向  $NO_x$  的转化作如下处理<sup>[10]</sup>：认为燃料 N 的中间产物为 HCN，然后部分 HCN 转化为  $NO_x$ 。

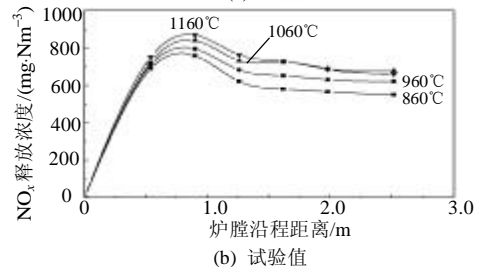
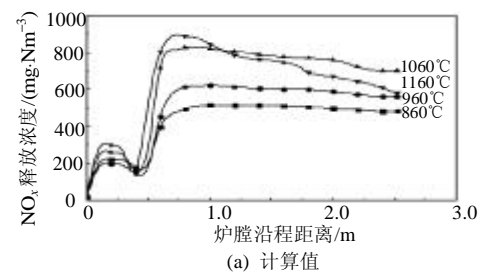
## 3 研究结果及分析

### 3.1 炉膛温度对 $NO_x$ 释放特性的影响

图 2 为神府烟煤在不同温度下燃烧，炉膛沿程  $NO_x$  浓度的分布。

普遍认为煤中氮元素主要以吡咯氮和吡啶氮的型式存在。研究表明<sup>[11]</sup>：温度 800℃ 时只有 10% 的吡咯氮和吡啶氮发生热解，900℃ 以上吡咯氮几乎全部热解，90% 的吡啶氮发生热解，1050℃ 时吡啶氮

几乎全部发生热解。因此当温度低于 800℃ 时由于煤中的氮相对热稳定，煤中氮释放不完全，因此  $NO_x$  释放量较少。随着温度的升高， $NO_x$  释放量增加，析出的峰值前移。



工况：过量空气系数 1.1，煤粉平均粒径 50μm

图 2 炉膛温度对  $NO_x$  释放特性的影响

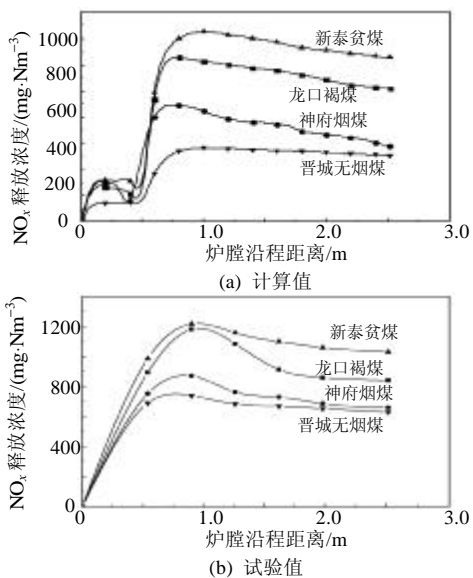
Fig. 2 Effects of temperature on  $NO_x$  release

图中表明温度升为 1160℃ 时， $NO_x$  的析出峰

值高于温度 1060℃ 的峰值, 但炉膛出口排放量小于 1060℃ 时的值。这主要是因为温度继续升高, NO<sub>x</sub> 释放量不再明显增加 (燃料型基本不变, 热力型略有增加), 但是, 较高的炉内温度更有利于 NO<sub>x</sub> 还原分解, 使 NO<sub>x</sub> 分解速率高于生成速率。

### 3.2 煤种对 NO<sub>x</sub> 释放特性的影响

图 3 给出了不同煤种燃烧时炉膛沿程 NO<sub>x</sub> 释放浓度的分布。从图中可以看出, 在炉膛温度和过量空气系数相同的情况下, 各煤种的 NO<sub>x</sub> 释放量差别还是比较大的。煤种不同, 煤中挥发分含量、氮含量等均有不同程度的差异, 从而导致了 NO<sub>x</sub> 生成量的不同。通常, 挥发分含量、氮含量高的煤种生成的 NO<sub>x</sub> 也相对较多。这是因为: 煤中的 N 大都以芳香环结构存在<sup>[12]</sup>, 其释放与挥发分有很大关系。煤粉中挥发分含量少时, 芳香环结构中杂环键断裂所需的温度较高, 所以在较高的温度下才能释放出大量 NO<sub>x</sub>; 煤粉中挥发分含量多时, 煤粉着火提前, 温度峰值会有所提高, 局部高温产生的热力型 NO<sub>x</sub> 增加、燃料型 NO<sub>x</sub> 亦略有提高, NO<sub>x</sub> 的析出峰值前移, 释放量增加。



工况: 炉膛温度 1160℃, 过量空气系数 1.1, 煤粉平均粒径 50μm

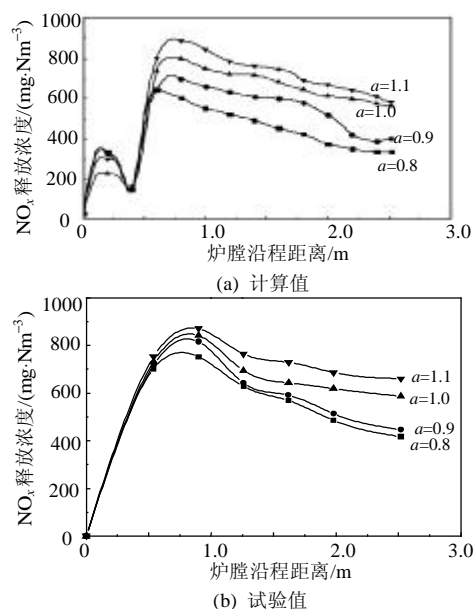
图 3 煤种对 NO<sub>x</sub> 释放特性的影响  
Fig. 3 Effects of different coal types on NO<sub>x</sub> release

燃料含氮量对 NO<sub>x</sub> 的影响是非常明显的, 随着煤中含氮量的增加, 总的 NO<sub>x</sub> 释放量大致呈线性增加。图 3 中新泰贫煤的 NO<sub>x</sub> 释放量最大, 就是因为新泰贫煤在所有试验煤样中含氮量最高。

### 3.3 过量空气系数对 NO<sub>x</sub> 释放特性的影响

图 4 示出了过量空气系数  $a$  对煤粉燃烧 NO<sub>x</sub> 释放特性的影响。

不难发现, 在本研究范围内, 随着过量空气系数的增大, NO<sub>x</sub> 的生成量明显增加。这是因为当过量空气系数较小时, 氧浓度较小, 挥发分氮不易转化为 NO<sub>x</sub>, 而且此时挥发分浓度较高, 挥发分氮的相互复合反应, 使还原 NO<sub>x</sub> 的反应增强, 造成 NO<sub>x</sub> 释放量较小。

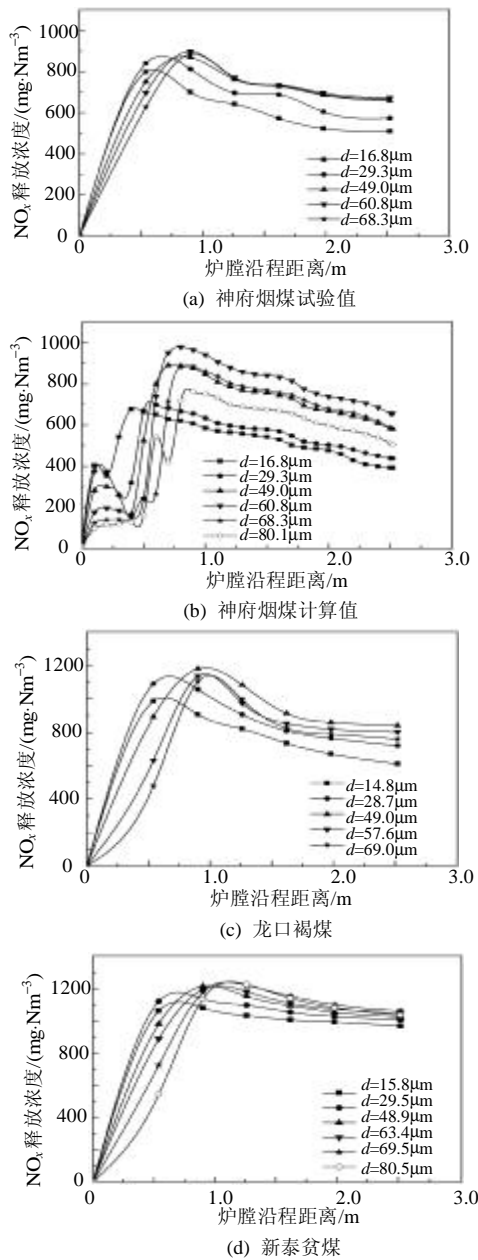


工况: 神府烟煤, 炉膛温度 1160℃, 煤粉平均粒径 50μm

图 4 过量空气系数对 NO<sub>x</sub> 释放特性的影响  
Fig. 4 Effects of stoichiometric ratio on NO<sub>x</sub> release

### 3.4 煤粉粒径对 NO<sub>x</sub> 释放特性的影响

图 5 为同一温度与过量空气系数下, 神府烟煤、龙口褐煤、新泰贫煤燃烧时, 炉膛沿程 NO<sub>x</sub> 释放浓度与煤粉粒径的关系曲线。由图中可以看出, 随着煤粉粒度的减小, 其 NO<sub>x</sub> 的析出峰值位置依次提前。煤粉细化后, 颗粒比表面积大大增加, 煤粉本身的热阻减小, 因而煤粉气流的温升速度加快, 着火提前。图 5(a) 表明: 当神府烟煤平均粒径为 60.8μm 时, NO<sub>x</sub> 的析出峰值及出口排放浓度达到最高值, 分别为 899mg/m<sup>3</sup> 和 673 mg/m<sup>3</sup>; 当平均粒径为 49.0μm 和 68.3μm 时, NO<sub>x</sub> 的析出峰值及出口排放浓度分别为 870 mg/m<sup>3</sup>、660 mg/m<sup>3</sup> 和 886mg/m<sup>3</sup>、667 mg/m<sup>3</sup>。图 5(b) 的模拟计算结果也明显表明: 煤粉平均粒径在 15μm~60μm 范围内变化时, 随煤粉粒度的减小, NO<sub>x</sub> 的释放量减小, 当煤粉平均粒径大于 60μm 后, 随煤粉粒度的增大, NO<sub>x</sub> 的释放量减小。图 5(c)、



(d)中表明,龙口褐煤、新泰贫煤的试验结果也出现了这种煤粉粒径的临界现象,但是不同的煤种,对应的煤粉临界粒径  $d_c$  不同,对于龙口褐煤  $d_c \approx 50\mu\text{m}$ ;对于新泰贫煤  $d_c \approx 70\mu\text{m}$ 。这一研究结果与 Abbas 在文献<sup>[13]</sup>中的结论较为吻合。煤粉超细化后,随着煤粉粒度的减小,煤粉燃烧速率提高,挥发分析出速度加快,挥发分以更加强烈的“喷射方式”由颗粒内部向外释放,导致煤焦表面的凹凸、孔隙及尺寸得到强化,为异相还原反应提供了良好的反应条件。

另一方面,单位质量的焦炭参与化学反应的比表面积也相应增大,加强了与 NO<sub>x</sub> 的接触面积,反应的活化能减小,对 NO<sub>x</sub> 的还原效果增强。

然而当煤粉过粗时,燃烧速度减慢,温度峰值显著下降,挥发分析出量减少,而且挥发分射流与空气混合效果差,此时 NO<sub>x</sub> 释放量又呈下降趋势。

比较上述模拟计算和试验研究结果可以看出,模拟计算与试验结果在数量上还存在一定的差距。分析造成此结果的主要原因如下:首先对于煤粉燃烧 NO<sub>x</sub> 释放规律的数值模拟采用后处理方法<sup>[14]</sup>,因此计算精度不够高;其次,模拟计算中对于同一煤种,反应速率公式中的指前因子和活化能均假设为常数,当其计算结果外推到其它条件下的反应时,会产生一定的误差;再者,燃烧的不稳定性也会导致试验数据测量存在一定的误差,所以数值模拟与试验结果在数量上吻合得不是很好。但是,模拟计算与试验研究结果在变化趋势上是完全吻合的,因此研究结果对低 NO<sub>x</sub> 燃烧技术的开发与应用仍具有很好的指导意义。

#### 4 结论

(1) 随温度的升高, NO<sub>x</sub> 的析出峰值前移, NO<sub>x</sub> 的释放量增加;温度达到一定值后,随温度的继续升高, NO<sub>x</sub> 的释放量又呈下降趋势;

(2) 煤种不同, NO<sub>x</sub> 释放规律不同,一般煤中含氮量越高、挥发分含量越高, NO<sub>x</sub> 释放量越大, NO<sub>x</sub> 析出峰值位置随煤种的碳化程度的增加而逐渐后移;

(3) 随着过量空气系数的增加, NO<sub>x</sub> 释放量呈明显增加的趋势;

(4) 在 NO<sub>x</sub> 的释放量与煤粉粒度的关系中,存在一个煤粉平均粒度临界值  $d_c$ 。当煤粉粒度  $d \leq d_c$  时,随煤粉粒度的减小, NO<sub>x</sub> 的释放量减小;当煤粉粒度  $d > d_c$  时,随煤粉粒度的减小, NO<sub>x</sub> 的释放量增大,这一临界值随煤的碳化程度的增加而逐渐加大。

#### 致谢

本文承上海理工大学博士启动基金(X619)资助,特此致谢。

#### 参考文献

- [1] Baxter Larry L, Mitchell Reginald E, Fletcher Thomas H. Nitrogen release during coal combustion [J]. Energy and Fuels, 1996, 10(1): 188-196.

- [2] Van der Lans R P, Dam-Hohansen K. Influence of process parameters on nitrogen oxide formation in pulverized coal burners[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1997, 23(4): 349-357.
- [3] 翁安心, 周昊, 张力, 等. 不同煤种混煤燃烧时 NO<sub>x</sub> 生成和燃尽特性的试验[J]. *热能动力工程*, 2004, 19(3): 242-245.  
Weng Anxin, Zhou Hao, Zhang Li, et al. Experimental research of the no<sub>x</sub> generation and burnout characteristics during the combustion of blended coals[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2004, 19(3): 242-245.
- [4] 李永华, 李松庚, 冯兆兴, 等. 褐煤及其混煤燃烧 NO<sub>x</sub> 生成的试验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2001, 21(8): 34-41.  
Li Yonghua, Li Songgeng, Feng Zhaoxing, et al. Experimental study on the NO<sub>x</sub> formation of of brown and brown—blending coal combustion[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2001, 21(8): 34-41.
- [5] Wendt J O L. Mechanisms governing the formation and destruction of NO and other nitrogenous species in low NO coal combustion system [J]. *Combustio Science and Technology*, 1995, 108(4): 323-344.
- [6] 郭兴明, 惠世恩, 车得福, 等. 挥发分燃烧生成 NO 的试验研究[J]. *动力工程*, 2003, 23(1): 2164-2167.  
Guo Xingming, Hui Shien, Che Defu, et al. Experimental research on nitric oxide produced in the process of volatile combustion[J]. *Power Engineering*, 2003, 23(1): 2164-2167.
- [7] 向军, 熊友辉, 郑楚光, 等. PDF—ARRHENIUS 方法模拟煤粉燃烧氮氧化物生成[J]. *中国电机工程学报*, 2002, 22(6): 156-160.  
Xiang Jun, Xiong Youhui, Zheng Chuguang, et al. PDF-Arrhenius to simulate 3-dimesionally NO<sub>x</sub> formation during coal combustion [J]. *Proceedings of the CESS*, 2002, 22(6): 156-160.
- [8] 周昊, 翁安心, 岑可法, 等. 不同煤种挥发分析出过程的数学模拟与试验研究[J]. *热能动力工程*, 2004, 19(2): 127-130.  
Zhou Hao, Weng Anxin, Cen Kefa, et al. Numerical simulation and experimental study of the separation release process of volatile nitrogen from various sorts of coal[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2004, 19(2): 127-130.
- [9] 赵科, 谭厚章, 周屈兰, 等. 煤的模型化合物热解过程中 HCN、NH<sub>3</sub> 的逸出规律[J]. *热能动力工程*, 2004, 24(3): 246-248.  
Zhao Ke, Tan Houzhang, Zhou Qulan, et al. The law of HCN and NH<sub>3</sub> escape during the pyrolysis of model compounds of coal[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2004, 24(3): 246-248.
- [10] Smoot L D, Smith P J. NO<sub>x</sub> pollutant formation in a turbulent coal system[C]. In *Coal Combustion and Gasification*. Plenum, Plenum, NY, 1985, 373-378.
- [11] 谭厚章, 廖晓伟, 赵科, 等. 傅立叶红外光谱法对煤中吡咯型氮的热解规律研究[J]. *动力工程*, 2004, 24(1): 121-124.  
Tan Houzhang, Liao Xiaowei, Zhao Ke, et al. Experimental research on the transformation of Pyrrolic-nitrogen in coal during combustion by means of model compounds[J]. *Power Engineering*, 2004, 24(1): 121-124.
- [12] 岑可法, 姚强, 骆仲泱, 等. 高等燃烧学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002: 587-590.
- [13] Abbas T, Costen P, Lockwood F C, et al. The effect of particle size on NO formation in a large-scale pulverized coal-fired laboratory furnace: measurements and modeling[J]. *Combustion and Flame*, 1993, 93(2): 316-326.
- [14] 金晶, 张忠孝, 李瑞阳. 超细煤粉再燃的模拟计算与试验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(10): 215-218.  
Jin jing, Zhang Zhongxiao, Li Ruiyang. Numerical simulation and experimental study on micronized coal returning[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(10): 215-218.

收稿日期: 2005-08-12。

作者简介:

金晶(1963-), 女, 博士, 教授, 主要从事煤的清洁燃烧的科研与教学工作。

(编辑 贾瑞君)