

# 新型工业煤粉锅炉运行及排放特性试验研究

李明浩, 李国俊, 刘传鹏, 董凌云, 郁鸿凌

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 为了改善工业煤粉锅炉的  $\text{NO}_x$  排放特性并保证其燃烧效率, 对某新型空气分级燃烧器进行了现场试验. 通过改变煤种、过量空气系数及三次风开度, 分析了锅炉  $\text{NO}_x$  及 CO 排放质量浓度的变化规律, 同时采用反平衡法对锅炉的热效率进行了测算. 试验结果表明, 工业煤粉锅炉能达到较高的热效率; 煤中氮含量及挥发分含量与  $\text{NO}_x$  的生成具有一定的相关性, 氮含量越高,  $\text{NO}_x$  排放质量浓度越高, 挥发分含量越低,  $\text{NO}_x$  排放质量浓度越高; 过量空气系数和三次风开度不仅影响锅炉燃烧效率, 而且对  $\text{NO}_x$  排放的影响也较为显著. 研究发现, 试验锅炉的排烟氧含量(质量分数)应控制在 2.5%~2.6% 之间较为合理, 三次风开度为 39% 时  $\text{NO}_x$  排放质量浓度最低.

**关键词:** 工业锅炉; 煤粉; 分级燃烧; 过量空气系数; 三次风; 氮氧化物

中图分类号: TK 227

文献标志码: A

## Performance and Emission Characteristics of a New Industrial Pulverized Coal Boiler

LI Minghao, LI Guojun, LIU Chuanpeng, DONG Lingyun, YU Hongling

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for  
Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** To improve the nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ) emission characteristics of industrial pulverized coal boiler and guarantee its combustion efficiency, field test was carried out on a model of air staged burner newly developed by a company in Shanghai. The emission characteristics of  $\text{NO}_x$  and carbon monoxide (CO) were analyzed by changing the coal type, excess air coefficient and opening of the tertiary air. At the same time, Thermal efficiency of the boiler was calculated by anti-balance method. Experimental results showed that high thermal efficiency of this industrial boiler could be achieved. The nitrogen content and volatile content in the coal samples had some correlations with  $\text{NO}_x$  generation. The higher the nitrogen content, the higher the  $\text{NO}_x$  emission was. The lower the volatile content, the higher the  $\text{NO}_x$  emission was. The excess air coefficient and opening of the tertiary air not only had influences on the combustion efficiency of the boiler, but also had significant influence on the  $\text{NO}_x$  emission. It was reasonable to control oxygen content in the flue gas between 2.5% and 2.6%. The lowest  $\text{NO}_x$  emission was

收稿日期: 2015-07-06

第一作者: 李明浩(1990—), 男, 硕士研究生. 研究方向: 煤粉燃烧器燃烧效率及污染物排放研究. E-mail: lmhtang@163.com

achieved when the opening of the tertiary air was 39%.

**Keywords:** industrial boiler; pulverized coal; staged combustion; excess air coefficient; tertiary air; nitrogen oxides

中国燃煤工业锅炉总量约为 57 万台, 年耗燃料约 4 亿 t 标准煤, 污染物排放总量接近电站锅炉, 在许多城市甚至超过电站锅炉的排放<sup>[1]</sup>, 在燃烧过程中产生的 NO<sub>x</sub> 更直接危害了人类赖以生存的环境. 上海等重点地区燃煤锅炉的 NO<sub>x</sub> 排放极限值为 200 mg · m<sup>-3</sup><sup>[2]</sup>, 而目前的工业锅炉大多没有达到这一标准, 因此对燃烧器进行研发及改造就变得十分紧迫. 本文通过对某新型空气分级燃烧器进行现场试验, 测算锅炉运行效率并研究不同煤种、过量空气系数及三次风开度对氮氧化物的生成和燃烧效率的影响, 为燃烧器的平稳运行和进一步改造提供依据.

## 1 NO<sub>x</sub> 生成机理及空气分级燃烧技术

### 1.1 NO<sub>x</sub> 生成机理

燃煤烟气中的 NO<sub>x</sub> 大部分是在燃料的燃烧过程中生成. 在燃烧过程中, NO<sub>x</sub> 的生成途径主要有三种, 温度型 NO<sub>x</sub>、快速型 NO<sub>x</sub> 及燃料型 NO<sub>x</sub><sup>[3]</sup>. 温度型 NO<sub>x</sub> 的生成速率与反应温度直接相关, 与温度  $T$  大致呈指数关系. 当温度低于 1 500 °C 时, 温度型 NO<sub>x</sub> 的生成量极少, 只有当温度高于 1 500 °C 时才开始生成<sup>[4]</sup>. 快速型 NO<sub>x</sub> 是燃料中的碳氢化合物分解后的中间产物 C<sub>m</sub>H<sub>n</sub> (CH<sub>2</sub>、CH<sub>3</sub>、C<sub>2</sub>) 撞击燃烧空气中的 N<sub>2</sub> 生成 HCN、CN, 再与火焰中产生的大量 O、OH 反应生成 NCO, NCO 又被进一步氧化成 NO, 快速型 NO<sub>x</sub> 在不含氮的碳氢燃料和在较低温度下燃烧时才重点考虑<sup>[5]</sup>. 燃料型 NO<sub>x</sub> 在生成的 NO<sub>x</sub> 中占主要部分, 约占整个 NO<sub>x</sub> 排放的 75%~95% (体积分数), 控制燃料型 NO<sub>x</sub> 的生成是控制 NO<sub>x</sub> 的关键所在. 燃料型 NO<sub>x</sub> 的生成机理非常复杂, 其反应机理现在还不能被完全掌握, 其中包括了一系列化学反应. 燃料中的氮元素完全氧化的化学过程是由两个相互竞争的过程决定的, 即燃料中的氮元素高温分解生成含有氮原子的中间

产物, 包括 N、CN、HCN、NH<sub>3</sub> 等, 然后中间产物和含有氧原子的反应物 (包括 O、OH、O<sub>2</sub>) 反应生成 NO; 另一方面如果在缺氧环境下则与 NO 反应, 使 NO 还原为 N<sub>2</sub>, 最终的 NO 生成量也就由竞争的结果决定<sup>[6-7]</sup>.

### 1.2 空气分级燃烧技术

空气分级燃烧是通过调整燃烧器及附近区域或整个炉膛区域内空气和燃料的混合状态, 使燃料经过富燃料燃烧和富氧燃烧两个阶段, 实现 NO<sub>x</sub> 生成量下降的燃烧控制技术. 在富燃料燃烧阶段, 由于氧气浓度较低, 抑制了热力型 NO<sub>x</sub> 生成, 同时, 不完全燃烧使部分已生成的 NO<sub>x</sub> 还原成 N<sub>2</sub>, 减少了燃料型 NO<sub>x</sub> 生成. 在富氧燃烧阶段, 燃料燃尽, 但由于此区域温度已降低, 新生成的 NO<sub>x</sub> 数量有限, 因此, 总体上 NO<sub>x</sub> 的排放量减少<sup>[8]</sup>. 工业煤粉锅炉内部炉膛空间有限, 煤粉停留时间短, 因此在工业煤粉锅炉上选择空气分级燃烧技术较为合理.

## 2 锅炉运行效率测算及试验燃烧器简介

### 2.1 锅炉运行效率测算

我国燃煤工业锅炉以链条炉居多, 其实际运行效率只有 65% 左右<sup>[9]</sup>, 能源利用率低, 而工业煤粉锅炉则有较高的燃烧效率. 本文首先采用反平衡法对本次试验煤粉锅炉的热效率进行测算, 以便与链条炉进行直观的比较.

锅炉型号为 TQ-DHMF20-1.25-AIII 高温低 NO<sub>x</sub> 液体排渣煤粉锅炉, 试验工况锅炉出力为 21.19 t · h<sup>-1</sup>; 试验工况排烟温度为 170.1 °C.

$$q_2 = \frac{K_{q_4}}{Q_r} (H_{py} - H_{lk}) \cdot 100 \quad (1)$$

$$q_3 = \frac{V_{gy} K_{q_4}}{Q_r} \cdot 126.36 C_{CO} \cdot 100 \quad (2)$$

$$q_4 = \left[ \alpha_{lz} \frac{C_{lz}}{100 - C_{lz}} + \alpha_{fn} \frac{C_{fn}}{100 - C_{fn}} \right] \cdot \frac{328.664 A_{ar}}{Q_r} \quad (3)$$

$$q_6 = \frac{A_{ar}}{Q_r} \left[ \frac{\alpha_{lz} (ct)_{lz}}{100 - C_{lz}} + \frac{\alpha_{fh} (ct)_{fh}}{100 - C_{fh}} \right] \quad (4)$$

$$q = q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 \quad (5)$$

$$\eta_2 = 100 - q \quad (6)$$

式中:  $q_2$  为排烟热损失;  $q_3$ 、 $q_4$  分别为气体未完全燃烧热损失、固体未完全燃烧热损失;  $q_5$  为散热损失,可查表获得;  $q_6$  为灰渣物理热损失;  $H_{py}$  为排烟处烟气焓;  $H_{lk}$  为入炉冷空气焓;  $K_{q_4}$  为修正系数;  $Q_r$  为输入热量;  $V_{gy}$  为排烟处干烟气体积;  $C_{CO}$  为排烟处 CO 体积分数;  $A_{ar}$  为收到基灰分;  $C_{lz}$  为炉渣可燃物含量;  $C_{fh}$  为飞灰可燃物含量;  $(ct)_{fh}$  为飞灰焓;  $(ct)_{lz}$  为炉渣焓;  $\alpha_{lz}$ 、 $\alpha_{fh}$  分别为炉渣含灰量、飞灰含灰量占入炉煤总灰量的质量分数;  $q$  为总损失;  $\eta_2$  为总效率。

由计算可知,本次试验的煤粉锅炉的热效率达到 90.64%,而工业链条炉的效率只有 65% 左右。因此,若使工业煤粉锅炉的污染物排放能较好地达到国家标准并全面推广,将会为企业节约大量的资金,使资源得到更有效的利用。

### 2.2 试验燃烧器简介

在工业锅炉上使用煤粉,燃烧器的设计是关键。由于工业锅炉的炉膛空间较小,这就要求燃烧器应能较好地组织炉内的流场,使煤粉高效稳定地燃烧,避免结渣,同时产生较少的污染物。本次试验用的新型燃烧器采用空气分级燃烧技术,在燃烧过程中形成 3 个相对独立的部分:初始燃烧区、 $NO_x$  还原区和燃料燃尽区。这种改进的空气分级方法通过优化每个区域的过量空气系数,在有效降低  $NO_x$  排放的同时可最大限度地提高燃烧效率。燃烧器共有四次风,一次风用来将煤粉输送到燃烧器内,二次风、三次风和四次风则先经空气预热器加热后再送入燃烧器。二、三次风在进入燃烧器前均先通过固定叶栅,从而产生旋流,增强与煤粉的混合。由于三次风风量对  $NO_x$  生成的影响较为显著,在设计时,三次风共留有六个均分风道,可以通过改变阀门开度来控制三次风在总风量中所占的比例。四次风在三次风的后部送入,通过送入充足的氧气使煤粉完全燃烧。燃烧器的尾部留有凹槽,以此来排出液态渣。为延长燃烧器的使用寿命,在燃烧器外部安装有水冷套,通过循环水对其进行冷却降温。

## 3 试验及结果分析

### 3.1 试验前准备

本试验使用德国 ECOM-J2KN 便携式多功能烟气分析仪对锅炉尾部的  $NO_x$  及 CO 质量浓度进行检测,每个试验工况取 4~5 组数据进行平均,并根据 GB 13271—2014<sup>[2]</sup> 将含氧量(体积分数)修正到 9%。煤粉在煤仓上方的取样口取得,所取样品立即进行工业分析和元素分析,以保证分析结果的准确性和及时性。

### 3.2 测点布置及试验方法

测点布置在炉膛尾部与空气预热器之间。系统概况及测点布置如图 1 所示。试验方法为:① 保持相同的给煤量及配风量,且煤粉均由同一磨煤机在相同条件下磨得,改变煤种测量  $NO_x$  排放质量浓度;② 使用伊泰 3 烟煤且保持送煤量恒定,改变配风量(即过量空气系数),测得  $NO_x$  及 CO 排放质量浓度;③ 使用伊泰 3 烟煤且保持送煤量、配风量恒定,改变三次风开度(即三次风率),测得  $NO_x$  及 CO 排放质量浓度。

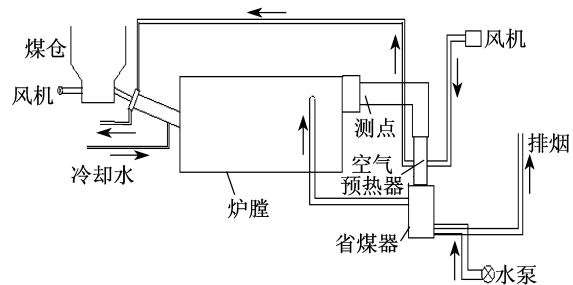


图 1 系统概况及测点布置

Fig. 1 Overview of the system and arrangement of the measuring points

### 3.3 试验结果及分析

表 1 为煤样工业分析与元素分析数据;其中:  $M_{ad}$ 、 $A_{ad}$ 、 $V_{ad}$  分别为煤样的水分、灰分和挥发分;  $FC_{ad}$  为固定碳;  $Q_{ar,net}$  为发热量;  $C_{ado}$ 、 $H_{ad}$ 、 $N_{ad}$ 、 $S_{ad}$  分别为碳含量、氢含量、氮含量、硫含量。

图 2(a)为  $NO_x$  排放质量浓度与挥发分含量(质量分数)的关系。从图中可以看出,随着挥发分含量的增加, $NO_x$  生成量呈下降趋势。挥发分对  $NO_x$  转化率的影响与过量空气系数  $\alpha$  有关。在  $\alpha > 1$  的氧化性气氛中,煤的挥发分越多, $NO_x$  转

表1 煤样工业分析与元素分析数据

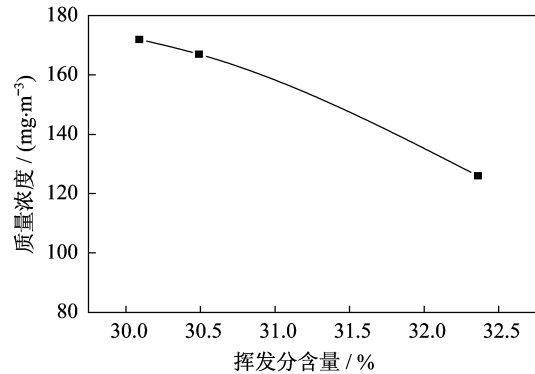
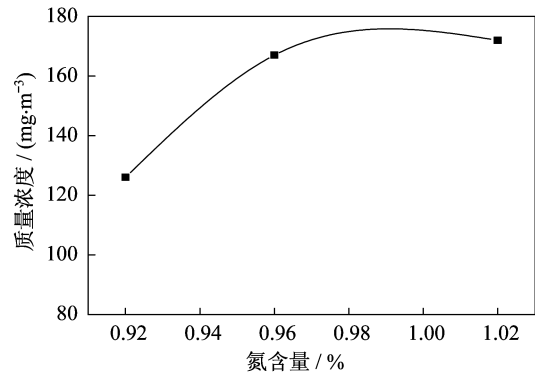
Tab. 1 Proximate and ultimate analysis of coal samples

煤种	工业分析/%				$Q_{ar.net}$ (MJ · kg <sup>-1</sup> )	元素分析/%			
	$M_{ad}$	$A_{ad}$	$V_{ad}$	$FC_{ad}$		$C_{ado}$	$H_{ad}$	$N_{ad}$	$S_{ad}$
蒙煤	7.20	5.92	32.26	54.62	24.590	65.14	3.84	0.92	0.21
神混烟煤	5.75	9.00	30.49	54.76	27.098	72.45	4.31	0.96	0.28
伊泰3烟煤	6.78	7.97	30.09	55.16	26.706	74.60	4.25	1.02	0.15

化率越高;但在  $\alpha < 1$  的还原性气氛中,高挥发分煤种的燃料型  $NO_x$  转化率反而降低,因为高挥发分的煤在迅速着火后,局部氧含量进一步降低,增强了煤粉气流低温燃烧阶段的还原性气氛,不仅抑制了燃料氮向  $NO_x$  的转化,而且还会使生成的  $NO_x$  部分被还原,因此煤中的挥发分含量越高,其生成的  $NO_x$  质量浓度越低.本试验中燃烧器在挥发分燃烧阶段正处于还原性气氛,因此随着煤中挥发分含量的增加, $NO_x$  最终生成量会减少.

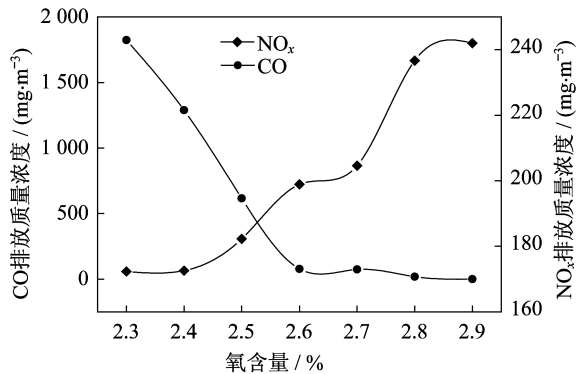
图2(b)为  $NO_x$  排放质量浓度和煤中氮含量(质量分数)的关系.从图中可以看出,随着煤中氮含量的增加, $NO_x$  生成量逐渐增加,但并不是简单的线性关系.在燃烧时,煤中的氮一部分随挥发分析出,一部分留在焦炭中.挥发分氮随着其燃烧而形成中间产物 HCN、 $NH_3$  和焦油等,这些中间产物的燃烧产物是 NO 或  $N_2$ ;焦炭中的氮元素在燃烧过程中以-CN 的基团形式与 O、NO 等反应,同时在焦炭的催化作用下形成 NO、 $N_2$  等<sup>[10]</sup>.所以挥发分燃烧阶段生成的 NO 可以在后一阶段的焦炭的燃烧过程中得到还原,但焦炭的燃烧依然有 NO 的生成.总的 NO 的转换率是由挥发分、焦炭两个阶段的 NO 生成量和焦炭表面上 NO 的还原量决定的<sup>[11]</sup>,因此煤中氮含量对  $NO_x$  生成的影响并不是简单的线性关系.

图3(a)为  $NO_x$  和 CO 排放质量浓度与氧含量的关系.随着配风量的增加,锅炉出口处的氧含量开始增加,与此同时, $NO_x$  的生成量也开始增加,但出口处的 CO 质量浓度迅速减少,直至为零.产生这种现象的原因是随着入炉氧含量的增加,燃烧加强,使炉内局部火焰温度上升,为燃料氮转化为燃料型  $NO_x$  提供了条件.同时,入炉氧含量的增加及局部高温也导致热型  $NO_x$  的

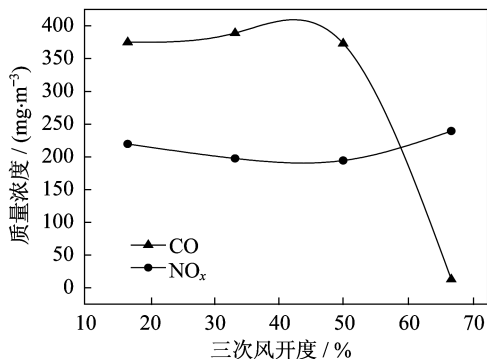
(a)  $NO_x$  排放质量浓度与挥发分含量的关系(b)  $NO_x$  排放质量浓度与氮含量的关系图2  $NO_x$  排放质量浓度与挥发分含量、氮含量的关系Fig. 2 Relationships between the  $NO_x$  emission and the volatile content, the nitrogen content in the coal

生成量迅速增加,因此,总的  $NO_x$  生成量随着入炉氧含量的增加而增加.但还应注意的是,若配风量过少,CO 的生成质量浓度会急剧增加.CO 的增加会使灰熔点大大降低,导致炉膛结焦,且过高的 CO 质量浓度会在相应的区域产生强烈的还原性气氛,引起高温腐蚀;同时,随着 CO 质量浓度的增大,不完全燃烧损失增加,使锅炉效率降低.因此应选取合适的过量空气系数.从所测数据可以看出,本试验中燃烧器的锅炉出口氧含量应控

制在 2.5%~2.6% 之间,此时不仅  $\text{NO}_x$  的排放可达到国家标准,CO 的生成量也较少。



(a)  $\text{NO}_x$ 、CO 排放质量浓度与氧含量的关系



(b)  $\text{NO}_x$ 、CO 排放质量浓度与三次风开度的关系

图 3  $\text{NO}_x$ 、CO 排放质量浓度与氧含量、三次风开度的关系

Fig. 3 Relationships between the  $\text{NO}_x$ , CO emissions and the oxygen content, opening of the tertiary air

图 3(b) 为  $\text{NO}_x$  及 CO 排放质量浓度与三次风开度的关系。当三次风的开度在 33.3% 和 50.0% 时,  $\text{NO}_x$  生成量较低, 而在 16.7% 和 66.7% 开度时,  $\text{NO}_x$  生成量则明显增加。由图可以看出, 三次风存在一个最佳开度, 使  $\text{NO}_x$  的生成量最小。但由于燃烧器在设计时共有六个均分开度, 所以无法通过试验找出。拟合试验数据得到  $\text{NO}_x$  生成量  $y$  与三次风开度  $x$  的关系为

$$y = 0.060 1x^2 - 4.678 3x + 282.32 \quad (7)$$

由此可知, 当三次风开度在 39% 左右时  $\text{NO}_x$  生成量将达到最小, 此时 CO 排放质量浓度也在合理范围内, 燃烧器运行状况良好。在燃烧器下一步改造时可考虑增加三次风 39% 开度, 然后再次进行试验测量, 并与拟合数据进行对比。

## 4 结 论

(1) 本试验中工业煤粉炉热效率达到 90.64%, 而链条炉实际运行效率只有 65% 左右。再次证明了煤粉炉在资源有效利用上的优势。

(2) 不同煤种对煤粉炉的  $\text{NO}_x$  排放有很大影响, 尤其是煤的挥发分和氮含量。在污染物排放要求较高的重点地区, 煤粉锅炉应燃烧挥发分含量相对较高的烟煤, 从而降低  $\text{NO}_x$  排放。

(3) 过量空气系数对煤粉锅炉的燃烧效率和污染物排放影响很大。在保证  $\text{NO}_x$  排放达到国家标准的前提下, 尽量使煤粉充分燃烧。本试验中燃烧器应将锅炉出口氧含量控制在 2.5%~2.6% 之间较为合理。

(4) 三次风开度对  $\text{NO}_x$  排放的影响较为明显。应合理选择三次风在总配风量中所占的比例。由测得数据可知, 本试验中燃烧器的三次风开度为 39% 时较为合理。

### 参考文献:

- [1] 何心良. 我国工业锅炉使用现状与节能减排对策探讨[J]. 工业锅炉, 2010(3): 1-8.
- [2] GB 13271—2014. 锅炉大气污染物排放标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [3] 向军, 邱纪华, 熊友辉, 等. 锅炉氮氧化物排放特性试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2000(9): 80-89.
- [4] HABIB M A, ELSHAFEI M, DAJANI M. Influence of combustion parameters on  $\text{NO}_x$  production in an industrial boiler[J]. Computers & Fluids, 2008, 37(1): 12-23.
- [5] 吴碧君. 燃烧过程中氮氧化物的生成机理[J]. 电力环境保护, 2003, 19(4): 9-12.
- [6] 章勤. 燃煤锅炉低  $\text{NO}_x$  燃烧实验及模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [7] 王明. 混煤燃烧氮氧化物排放特性试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
- [8] 陈梦洁, 郁鸿凌, 林友斌, 等. 燃煤锅炉低  $\text{NO}_x$  排放技术研究[J]. 能源研究与信息, 2013, 29(3): 131-135.
- [9] 丁守宝, 刘富君. 我国特种设备检测技术的现状与展望[J]. 中国计量学院学报, 2008, 19(4): 304-308, 324.
- [10] PHONG-ANANT D, WIBBERLEY L J, WALL T F. Nitrogen oxide formation from Australian coals[J]. Combustion and Flame, 1985, 62(1): 21-30.
- [11] 曾汉才. 大型锅炉高效低  $\text{NO}_x$  燃烧技术的研究[J]. 锅炉制造, 2001(1): 1-11.