

富燃料区喷氨降低 NO_x 排放浓度的热态试验研究

荣燕燕 毕德贵 李明强 张忠孝

(1 上海理工大学 环境与建筑学院 上海 200090)

摘要: 对某热电厂 75 t/h 煤粉锅炉进行了富燃料区喷氨技术改造,以降低 NO_x 排放浓度。在改造后的实际运行的煤粉锅炉上进行了热态试验,研究了氨氮比、 O_2 浓度和温度对脱硝效率的影响。试验结果表明:当氨氮比为 1.5 时,采用富燃区喷氨技术可在空气分级技术改造的基础上,将 NO_x 排放浓度降低至 50% 左右;当氨剂喷入位置处的温度超过 1 200 $^{\circ}\text{C}$ 时,会引起 NO_x 排放浓度的增加;当氨氮比为 1.5、4 角位置处喷射尿素时,空气分级联合富燃料区喷氨可以达到约 70% 的脱硝率。

关键词: 富燃料区喷氨; 脱硝效率; 氨氮比

中图分类号: TK 229 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.03.020

引言

富燃料区喷氨技术是一种先进的炉内脱硝技术,该技术是在空气分级技术基础上^[1],在主燃区喷入氨水或尿素等氨基活化剂(N-Agent),氨剂在燃烧器下游喷入炉膛,在还原性气氛中对 NO_x 进行还原。炉内富燃区喷氨技术主要是通过改变送风方式,控制炉内氧量的分布即在燃烧器出口和燃烧中心区域形成还原性气氛,以降低 NO_x 的生成量;同时,在此区域喷入氨基活化剂,主燃区的主要烟气成分如 CH_4 、轻质烃类、CO 及 H_2 等,可以促进 NO_x 的还原;主燃区内未完全反应掉的焦炭也会与 NO_x 发生异相还原反应^[2]。

文献[1]首次提出富燃区喷氨概念,利用电加热的管流反应器,对其空气分级富燃区喷氨还原 NO_x 进行了试验研究;文献[3]通过 130 MW 及 500 MW 的旋风炉进行的高级空气分级富燃区喷氨试验表明:该技术在传统空气分级脱硝技术的基础上脱硝效率提高了 25%~30%。文献[4~7]也针对该

技术进行了脱硝效率的试验研究并发现主燃区过量空气系数 SR 、温度 T 以及化学计量比 NSR 是影响氨剂还原 NO_x 的重要参数。

本研究以某燃煤锅炉为研究对象,采用富燃料喷氨技术并配合空气分级技术对锅炉进行低氮改造,对改造后的锅炉运行状况进行了试验研究,以期该技术应用于实际锅炉提供参考。

1 试验系统与方法

1.1 试验系统

对某热电厂 75 t/h 煤粉锅炉采用混合还原剂降低 NO_x 技术进行改造。该锅炉为单汽包自然循环中压锅炉,正炉膛,Π形布置,钢架结构,轻型炉膛,风扇磨直吹式制粉系统,四角布置直流式煤粉燃烧器,其燃料为元宝山褐煤,轻柴油点火。

基于燃料分级、炉内空气分级及混合还原剂还原 NO_x 原理对锅炉燃烧器进行更换和布置。改造前锅炉燃烧器布置从下到上依次是:2-1-2-1-2-1-2+OFA 燃烧器布置如图 1(a)所示。改造方法:将原有上一次风和上侧中二次风移至原来上二次风位置,将上一次风改造为水平浓淡燃烧器;将原有中一次风改造为垂直浓淡燃烧器;原有下侧中二次风、下一次风和下二次风位置不变,将下一次风改造为水平浓淡燃烧器;分别在距上一次风燃烧器 20 mm 处的四角、1 200 mm 处的侧墙中心进行开孔以安装氨基还原剂喷枪。改造后燃烧器及喷枪布置如图 1(b)和图 1(c)所示。

锅炉低氮改造后,主燃区在没有喷入氨还原剂时的烟气排放实测结果如表 1 所示。

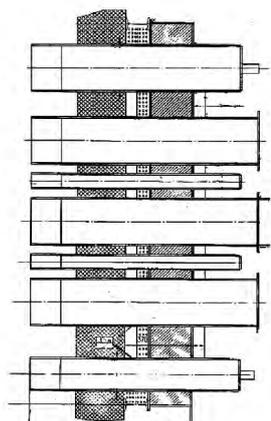
由于改造前后的燃料、主燃区的位置及锅炉运

收稿日期: 2015-06-25; 修订日期: 2015-08-04

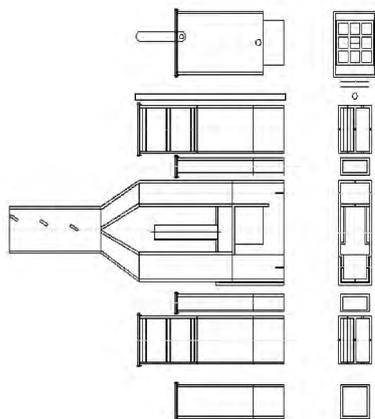
作者简介: 荣燕燕(1991-), 山东济宁人, 上海理工大学硕士研究生。

通讯作者: 张忠孝(1959-), 男, 上海理工大学教授, 博士生导师。

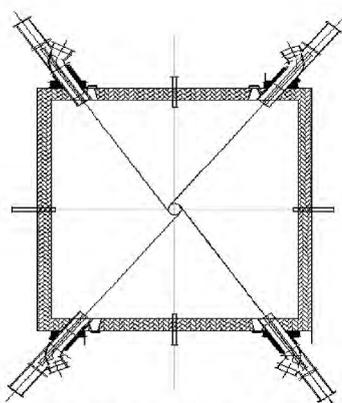
行负荷均不变,且在运行时可对燃尽风进行上下约15°的调整,因此改造前后排烟温度基本不变,约为128℃。



(a) 改造前燃烧器布置



(b) 改造后燃烧器及喷枪布置



(c) 改造后燃烧器及喷枪水平布置

图1 改造前后锅炉燃烧器及喷枪布置图

Fig.1 Layout of the burners and guns in a boiler before and after the reconstruction

1.2 试验方法

由于运行条件限制,仅做了额定工况下富燃区喷氨试验。试验中NO_x的测点分别布置在四角、侧墙喷枪处及上下层SNCR(选择性非催化还原技术)喷枪之间;在四角及侧墙喷枪处沿炉膛方向按200mm的间隔均匀布置11个温度及9个烟气成分测点;温度及烟气成分的测量方法为在工况稳定的情况下,分别将四角、侧墙处的喷枪拔出进行测量,每个测点测3次,每5min测试一组数据;保持工况不变,插入喷枪,进行喷氨操作。烟气成份测试采用Testo340烟气分析仪,各主要成份测试精度为:O₂,0.2%;CO,5%;NO,5%。对试验数据采用加权平均法取平均值。文中氧量均为实测值(体积分数),基本工况为满负荷。

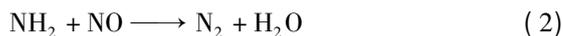
表1 锅炉改造后实测排放试验结果

Tab.1 Test results of the emissions actually measured after the reconstruction of the boiler

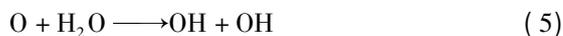
名称	O ₂ 浓度 /%	NO _x 浓度 /mg·Nm ⁻³	CO浓度 /mg·Nm ⁻³	炉渣含碳量 /%
改造前	5.2	600	3.5	13.5
改造后	4.5	350	4.2	13

2 结果讨论

目前关于氨剂在富燃料区时对NO_x的还原机理研究主要针对高级再燃^[8-10],对于其中主要的化学反应已经达成共识,氨剂还原NO_x的主要反应为^[9]:



在富燃料区内部喷入氨剂能促进NH₃对NO_x的还原,主要原因是在富燃料区发生了以下反应^[11]:



富燃料区大量CO促进反应(3)、反应(4)和反应(5)的进行,并生成OH基团,且由于NH₃的喷入,在还原性气氛中,进一步促进了反应(1)和反应

(2) 从而促进 NH_3 对 NO_x 的还原。同时,主燃区的含氮物质如 HCN 、 NH_3 等存在两种转化途径:在 O_2 充足环境下,被氧化生成 NO_x ;当 O_2 不足时,被还原生成 N_2 ;对于本试验,其主燃区 $SR < 1$,在主燃区喷入尿素时,会促进含氮物质还原生成 N_2 ,从而抑制 NO_x 的生成。

2.1 NSR(氨氮比)对富燃区喷氨脱硝效果的影响

试验过程中锅炉中、下层磨煤机运行,锅炉负荷为 74 t/h,主燃区温度约为 1300 °C,主燃区过量空气系数为 0.95。氨基还原剂采用尿素溶液,用主燃区四角处的喷枪喷射,通过对尿素用量的调节及 NO_x 排放的测量,得出不同 NSR 下的脱硝效率,如图 2 所示。

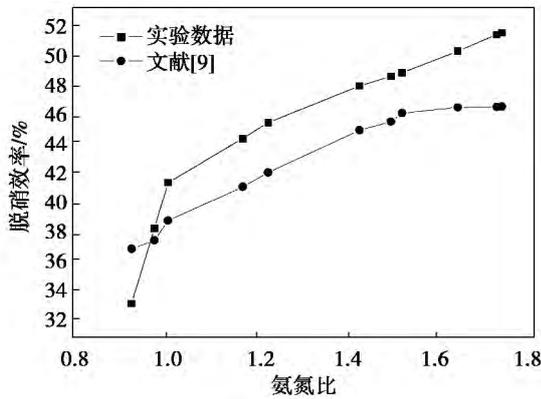


图 2 脱硝效率随氨氮比的变化

Fig. 2 Changes of the denitrification efficiency with the NSR(normalized stoichiometric ratio)

如图所示,在富燃区喷氨时,随着 NSR 的升高,脱硝效率逐渐升高,在 NSR 为 1.0 时脱硝率约为 41%,与文献 [6] 在 205 MW 旋风炉进行的试验所得的脱硝效率接近;当 NSR 为 1.5 时,脱硝率约为 48%。改造后的主燃区过量空气系数 SR 为 0.95,在此情况下,主燃区的 NO_x 浓度较高^[7],这在一定程度上可以促进尿素对 NO_x 的还原;除此之外,较大的 SR 下,主燃区会产生较多的 OH 、 O 、 H 等活性基团,可以促进反应(1)和反应(2)的进行;这与文献 [7] 和 [11] 的试验结论一致。

从图 2 还可以看出,本试验的脱硝效率稍高于文献 [7],分析原因:文献 [7] 在试验过程中忽略了炉内流动等扰动因素,且没有考虑煤粉热解气对脱

硝效果的影响,而以上两个因素在实际工业锅炉中均可促进脱硝反应的进行,炉内扰动可以促进反应物混合,且热解气中的如 CO 、 H_2O 等成分可以促进反应(3)、反应(4)和反应(5)的进行^[12-13];另外,两试验所使用的氨基还原剂不同,本次试验的氨基活化剂为尿素,而文献 [7] 采用氨水作为还原剂,文献 [14] 通过试验发现,尿素的脱硝效率略微高于氨水,因此本试验的脱硝效率整体上高于文献 [7]。

2.2 喷氨位置对脱硝效率的影响

锅炉中、下层磨煤机运行,锅炉其它参数不变时,喷氨位置对富燃区喷氨脱硝效率的影响如图 3 所示。试验时,分别按 1.2 中提到的 NO_x 的测点(1.2 中 NO_x 测点做了交代)测量了 4 角及侧墙处喷氨后烟气中 NO_x 的排放浓度,为了分析影响脱硝效率的原因,同时测量了喷射位置的氧量分布和温度场,如图 4 ~ 图 5 所示。

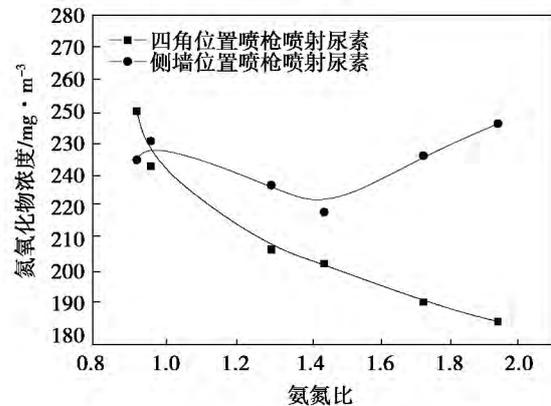


图 3 不同喷氨位置的脱硝效率比较

Fig. 3 Comparison of the denitrification efficiencies at various ammonia-sprayed locations

从图 3 可以看出,侧墙喷枪位置喷射尿素时, NO_x 的排放浓度整体上高于 4 角喷枪位置;随着 NSR 的增加,后者 NO_x 的排放浓度呈现明显降低的趋势,且当氨氮比为 1.9 时, NO_x 排放最低,约 190 mg/m^3 ;侧墙喷枪位置喷射尿素时,当 NSR 小于 1.5 时,随着 NSR 增大, NO_x 的浓度略微减少,而当 NSR 大于 1.5 时, NO_x 的浓度则逐渐增加,这与文献 [7] 试验结论一致。

图 4 为两喷枪位置处的 O_2 分布的对比。由于各个燃烧器喷入的煤粉量及二次风量基本相同,本

研究中给出的 O₂ 及温度分布分别取锅炉 4 个角中的 4 号角及四侧墙中的前墙, 以下分别简称 4 号角, 前墙。从图中可以看出, 四角喷枪位置处 O₂ 的含量整体上略高于前墙喷枪处的 O₂ 含量; 分析原因为: 在相同的 SR 下, 由于煤粉喷入后到 4 号角测点的停留时间比到前墙短, 因此其消耗的 O₂ 较少, 最终导致此区域的 O₂ 含量略高; 两喷枪测点处 O₂ 含量差异不大, 因此分析认为, 当在两位置喷射尿素时, 氧气不是影响脱硝效果的主要因素。

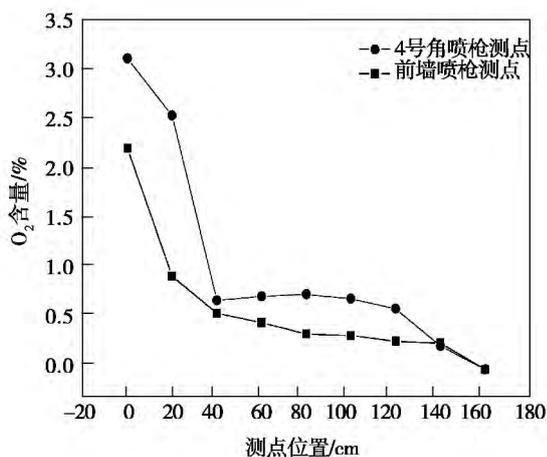


图 4 不同喷氨位置的 O₂ 浓度的比较
Fig. 4 Comparison of the O₂ concentration at various ammonia-sprayed locations

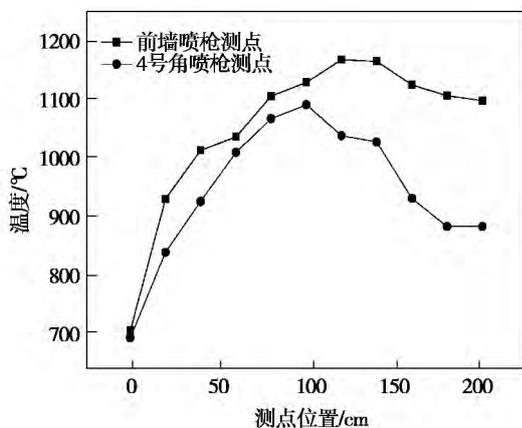


图 5 不同喷氨位置的温度分布比较
Fig. 5 Comparison of the temperature distribution at various ammonia-sprayed locations

图 5 为前墙及 4 角喷枪位置处的温度分布对比。从图中可以看出, 前墙喷枪测点处的温度高于

4 角喷枪测点处的温度, 且其高温区度均集中在喷枪射程 0 ~ 150 cm 范围内, 最高温度分别约为 1 200 和 1 000 °C。分析原因: 由于 4 角喷枪测点处距上一次风仅为 0.02 m, 煤粉由中、下磨喷入后, 到此测点的停留时间较短, 不能完全燃烧, 因此其温度较低; 而当煤粉到达距离上一次风约 1.5 m 处的前墙喷枪测点处时, 燃烧进行得较为完全, 导致此测点的温度较高, 达到 1 200 °C。

文献 [15] 关于高级再燃的研究中指出, 富燃料区较大过量空气系数下能产生较多的 OH、O、H 等活性基团, 而距上一次风 1.5 m 处的侧墙喷枪处, SR 约为 0.95, 在此位置处, 有大量活性基团产生, 在高温下此类活性基团将 NH₃ 氧化; 根据 Arrhenius 定律可知, 化学反应速率与化学反应速率常数 k 成正比, 而 k 随温度 T 呈指数关系增加 [16], 此测点尿素喷射范围的温度约为 1 200 °C, 高温进一步促进了活性基团对 NH₃ 的氧化。

2.3 富燃区喷氨脱硝效率比较

锅炉中、下磨煤机运行, 采用煤作为燃料, 锅炉负荷为 74 t/h, 主燃区空气过量系数为 0.95 时, 应用不同技术后 NO_x 排放及脱硝效率如表 2 所示。其中, 富燃料区喷氨技术是在空气分级的基础上, 在 4 角喷射尿素, NSR 为 1.5。

表 2 采用不同技术时 NO_x 排放浓度及脱硝效率
Tab. 2 NO_x emissions concentration and denitrification efficiency when various technologies are being adopted

脱硝效果	改造前	空气分级改造	富燃料区喷氨
NO _x 排放/mg · m ⁻³	700	390	202.3
脱硝效率/%	—	44	48.2

由表 2 可知, 当氨氮比为 1.5 时, 富燃料区喷氨技术可以在空气分级技术的基础上, 使 NO_x 排放浓度降低约 50%; 空气分级联合富燃料区喷氨技术改造可将 NO_x 排放浓度由初始的 700 mg/m³ 降低至 200 mg/m³, 达到约 70% 的脱硝率, 这对于实际锅炉改造有积极的参考意义。

3 结 论

(1) 锅炉采用空气分级改造后, 中、下磨煤机运

行时 在四角燃烧器处喷射尿素时 ,脱硝效果较好 ;此时 随着 NSR 的增加 ,富燃料区喷氨的脱硝效率不断增加 ,当 NSR 为 1.5 时 ,脱硝率可达 50% 左右。

(2) 温度对富燃料区喷氨脱硝的影响较大 ,当主燃区 SR 为 0.95、NSR 为 1.5 时 ,若温度高于 1 200 ℃ 喷入的尿素将会在高温下被氧化 ,最终导致 NO_x 排放浓度的增加。

(3) 由于改造时可参考的国内外关于富燃区喷氨技术的工程实践较少 ,且在实际运行锅炉上进行试验 锅炉的负荷、负压、漏风等因素对本次试验均可能造成影响 ,因此 需要在实验台及理论分析的基础上继续对该技术进行研究。

参考文献:

[1] Ulrich Greul ,Helmut Rudiger ,Hartmut Spliethoff ,et al. NO_x controlled combustion in a bench scale test facility [J]. Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems ,1996 ,21: 711 - 722.

[2] 刘 彦 ,齐学义 ,等. 煤粉再燃过程中 NO 均相与异相还原反应相对贡献的研究[J]. 动力工程 2009 29(10) : 946 - 949.
LIU Yan ,QI Xue-yi ,et al. Study of the relative contributions of the homogeneous and heterogeneous phase of NO to the reduction reaction during the reburning process of pulverized coal [J]. Power engineering 2009 29(10) : 946 - 949.

[3] Mike Bockelie ,Marc Cremer ,Kevin Davis ,et al. NO_x control options and integration for US coal fired boilers Final Report [R]. America ,Reaction Engineering International 2003.

[4] Galen H. Richards ,Charles Q. Maney ,et al. Ultra low NO_x integrated system for NO_x emission control from coal-fired boilers [R]. America: Alstom Power INC 2002.

[5] Marc Cremer ,Andrew Chiodo ,et al. Sub 0.15 LB/MBTU NO_x emissions achieved with ALTA on a 500 MW cyclone-fired boiler [R]. America: U. S. Department of Energy 2001.

[6] Marc A. Cremer ,Huaifeng D. Wang ,et al. Improved rich reagent injection(RRI) performance for NO_x control coal fired utility boilers [R]. America : U. S. Department of Energy 2003.

[7] 李 超 ,吕学敏 ,等. 高级空气分级脱硝特性的试验研究[J]. 锅炉技术 2009 40(2) : 63 - 67.
LI Chao ,LU Xue-min ,et al. Experimental study of the advanced air classification and de-nitration characteristics [J]. Boiler Tech-

nology 2009 40(2) : 63 - 67.

[8] S. L. Chen ,J. A. Cole ,M. P. Heap ,et al. Advanced NO_x reduction processes using-NH and-CN compounds in conjunction with staged air addition [J]. Symposium (International) on Combustion , 1989 22(1) : 1135 - 1145.

[9] Vladimir M Zamansky ,Loc Ho ,et al. Re-burning promoted by nitrogen and sodium-containing compounds [J]. Symposium(International) on Combustion 1996 21: 711 - 722.

[10] Maly P M ,Zamansky V M ,Ho L ,et al. Alternative fuel re-burning [J]. Fuel ,1999 78: 327 - 334.

[11] 李 超 ,富燃料区喷氨还原 NO_x 的试验研究及化学动力学模拟[D]. 上海: 上海交通大学 2009.
LI Chao. Experimental study and chemical dynamic simulation of ammonia spraying in the rich fuel zone for reducing NO_x [D]. ShangHai: Shanghai Jiaotong University 2009.

[12] 贾靖华 ,董 利 ,等. 热解燃烧链条炉低 NO_x 排放特性的数值模拟[J] 过程工程学报 2010 10(5) : 842 - 848.
JIA Jing-hua ,DONG Li ,et al. Numerical simulation of the low NO_x emissions characteristics of a pyrolytic combustion chain grate boiler [J]. Journal of Process Engineering 2010 10(5) : 842 - 848.

[13] 张忠孝 ,董健聪 ,于 娟 ,等. 复合还原剂脱硝机理与试验研究[J]. 洁净煤技术 2015 21(2) : 1 - 5.
ZHANG Zhong-xiao ,DONG Jian-cong ,YU Juan ,et al. Mechanism governing the denitrification of a composite reduction agent and its experimental study [J]. Clean Coal Technology 2015 21(2) : 1 - 5.

[14] 杨 梅. 循环流化床烟气 SNCR 脱硝机理和试验研究[D]. 上海: 上海交通大学 2014.
YANG Mei. SNCR de-nitration mechanism of flue gases from a circulating fluidized bed and its experimental study [D]. Shang-Hai: Shanghai Jiaotong University 2014.

[15] D. R. Tree ,A. W. Clark. Advanced re-burning measurements of temperature and species in a pulverized coal flame [J]. Fuel , 2000 79: 1687 - 1695.

[16] 高 攀 ,路春美 ,韩奎华 ,等. 天然气/液化气先进再燃脱硝特性研究[J]. 煤炭学报 2007 32(11) : 1191 - 1195.
GAO Pan ,LU Chun-mei ,HAN Kui-hua ,et al. Study of the advanced reburning and denitrification characteristics of natural gas and liquefied gas [J]. Coal Studies ,2007 ,32(11) : 1191 - 1195.

(陈 滨 编辑)

AGC 模式下协调控制系统 PID 型并矢控制器的设计与优化 = **Design and Optimization for PID Type Dyadic Controller of Coordinated-Control System under AGC Mode** [刊, 汉] FU Hui-lin, ZHOU Jie, SHEN Zhong-li, LIU Kang (Key Laboratory of Hunan Province on Power Technology of Renewable Energy Sources, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan Province, China, Post Code: 410114) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(3). -114-119

This paper presented a kind of optimized design method based on PID Type Dyadic Controller (PID-DC). The proposed PID-DC was composed of a conventional PID controller diagonal matrix as well as each constant matrix separately on the front and back of the diagonal matrix. The constant matrices were determined by the approximate dyadic expansion equation for the object model, and the parameters were computed and optimized by ways of the genetic algorithm with its objective function being of ITSWE index. In addition, by utilizing the proposed method to design CCS system for a certain unit under the operating condition of 70% load and conducting the robustness test under the operating condition of 100% load, the excellent AGC and robustness performances can be obtained, which proves that the proposed method is better than existing control method. **Key words:** multivariable system, frequency domain analysis, genetic algorithm, integral performance index

富燃料区喷氨降低 NO_x 排放浓度的热态试验研究 = **Study on Hot-state Test of Reduction of NO_x Emission Concentration by Injecting NH_3 in Fuel-rich Zone** [刊, 汉] RONG Yan-yan, BI De-gui, LI Ming-qiang (School of Environment and Building Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093), ZHANG Zhong-xiao (School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(3). -120-124

The technical renovation and modernization were made for a 75 t/h pulverized coal fired boiler of a certain thermal power plant with the purpose of reducing the NO_x emission concentration. By a hot-state test for the modified pulverized coal fired boiler, the influences of NH_3/NO_x ratio (NSR), O_2 concentration and temperature on the denitration efficiency were studied in this paper. The test results indicate when NSR is 1.5, the technology of injecting NH_3 in fuel-rich zone can lower the NO_x emission concentration to about 50% on the basis of the air classification technology reform; When the temperature in the area of injecting NH_3 is higher than 1200 °C, NO_x emission concentration will increase; When NSR is 1.5 and NH_3 is injected from the four corners, about 70% denitration efficiency can be achieved by the means of combination of the air classification technology and the technology of injecting NH_3 .

in fuel-rich zone. **Key words:** injecting NH_3 in fuel-rich zone ,denitration efficiency ,NSR

新型温差发电装置的结构设计 = **Structure Design of New-model Thermoelectric Generator** [刊 ,汉] CHEN Wei ,LIANG Yan ,HU Chang-jun ,ZHAI Jian-guang (School of Material Engineering ,Shanghai University of Engineering Science ,Shanghai ,China ,Post Code: 201620) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(3) . -125 -128

The paper analyzed the influences of internal structure of thermoelectric generator on the thermoelectric generation efficiency and on this basis designed and developed a kind of new-model thermoelectric generator. For the new-model thermoelectric generator ,the cross section of its internal heat transfer channel was designed as hexagon and the staggered spoiler was arranged inside the channel. The stagger arrangement can increase the temperature difference and improve the heat transfer efficiency. The results from the relevant experimental study on the new structure show that as the engine speed being of 3 000 r/min and the exhaust gas temperature at the inlet of heat transfer channel being of 130 °C ,the voltage will fluctuate within the scope of 1.112 V ~ 1.151 V and the generation power will be 1.325 W. In addition ,by ways of the temperature-voltage function simulation ,it is concluded that the temperature and voltage will be proportional to each other in the corresponding temperature. **Key words:** thermoelectric generator ,vehicle exhaust gas ,structure design

燃气轮机进气降温幅度的研究 = **Research on Gas Turbine Inlet Air Cooling Amplitude** [刊 ,汉] CHEN Ren-gui ,NIU Bing ,LI Yu-zhu (Wuxi Sanyuan Gas Turbine Science and Technology Co. ,Ltd. Wuxi ,Jiangsu Province , Post code: 212114) ,WANG Hai-bo (China Petroleum Engineering Co. Ltd. Southwest Company ,Chengdu ,Sichuan Province ,Post Code: 610017) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(3) . -129 -133

How to control the inlet air cooling amplitude of gas turbine not only concerns the gas turbine output and energy consumption ,but also threatens directly the lifespan of the gas turbine. With regard to the problem on how to determine the inlet air cooling amplitude of gas turbine ,the paper carried out the relevant studies and investigations by ways of the theoretical calculation combined with the analysis on typical cases and reached the conclusion that the indirect air cooling method should be adopted in dry area and the air cooling point should be controlled in 1 ~ 2 °C below dew point temperature. The air cooling amplitude should not be too great ,to which more attention should be paid. **Key words:** Gas turbine ,inlet air cooling ,dry-bulb temperature ,air cooling amplitude