

文章编号:1000-582X(2003)05-0040-06

天然气再燃低 NO_x 技术的冷模试验分析*

卢啸风,郑先国,刘汉周,詹跃航

(重庆大学 动力工程学院,重庆 400044)

摘要:在一个几何比例为1:12.5的220 t/h切向燃烧煤粉锅炉冷模试验台上,通过喷入不同温度的气流并测量炉内温度场,模拟了不同喷射方式和喷射流量时的再燃气体、燃烬气流与主气流之间的混合特性。试验结果表明,前后墙方向喷出的再燃气流与主气流之间形成了快速且均匀的混合,但主燃烧区空气动力场变化较大;切向喷出的再燃气流更适合于切圆燃烧煤粉锅炉;四角切向喷入燃烬风对燃烬有利。本文还对再燃气流的喷射量、喷射位置对混合效果的影响,进行了讨论。

关键词:锅炉;燃气再燃;燃烬风;冷模

中图分类号:TK 224.1

文献标识码:A

煤炭是我国的主要能源。燃煤发电量占我国总发电量的74%。煤炭燃烧发电的同时,在缺少相应的环保措施时,也带来较为严重的大气污染。据统计,我国大气污染物中,90%的 SO_2 和80%的 NO_x 来自于各种燃煤锅炉^[1]。其中,燃煤产生的 NO_x 污染,在以煤粉锅炉为主的电站锅炉中相当严重。煤粉锅炉生成的 NO_x 主要有3种类型:第1类是热力型 NO_x ,主要由空气中的 N_2 在高温下氧化产生,它约占总量的20%。 NO 的生成速率强烈地依赖于炉内烟气温度,并在一定程度上随氧量而变。当燃烧温度在1300℃以下时,热力型 NO 的生成量极少,第2类是快速型 NO_x ,它是空气中的氮与燃料中的碳氢离子团如 CH 等反应生成的,它在煤燃烧过程中的生成量很少;第3类是燃料型 NO_x ,它是燃料中的氮化合物在燃烧过程中热分解又继续氧化而生成的,约占总量60%~80%。

为控制 NO_x 排放,目前主要采用以下2类技术:1)低 NO_x 燃烧技术,主要包括:低 NO_x 燃烧器(LNB)、火上风(OFA)、再燃技术(燃气再燃(GR)和煤粉再燃(CR))、烟气再循环(FGR)以及燃烧调整等;2)尾部烟气脱硝技术,主要包括选择性催化还原(SCR)和选择性非催化还原(SNCR)技术。

上述第2类技术投资及运行费用太高,目前还不适合我国国情。在上述第1类技术中,再燃技术具有

投资少,脱氮效率高(可达70%)、炉内不结焦、国外已有成熟工业示范(单炉最大容量已达600 MW)等优点^[2],加之我国正在实施“西气东送”战略,因此该技术在我国具有较好的应用前景。

此外,近年来,由于电力市场调整、技术进步,以及水电比例逐年增大等原因,原有火电主力机组将会逐步变为调峰运行,采用天然气再燃技术后,对锅炉低负荷稳燃也是十分有益的。

图1所示是天然气再燃技术的基本原理^[3]:将占锅炉入炉总热量5%~20%的天然气,喷入炉内主燃烧区上部,由于天然气快速燃烧而形成还原区($\alpha \leq 1$),将主燃烧区产生的 NO_x 重新还原成 N_2 。在这个还原区(也叫再燃区)的上部,再补入部分空气,形成一个燃烬区($\alpha > 1$),将再燃区中产生的CO烧掉。由于燃烬区的温度较低,因此不会再次产生大量的 NO_x 。

国外再燃技术问世于20世纪60年代末,并在1973年首次进行工业示范^[4],现已在工业发达国家进行大面积的工业推广应用,但技术关键处,如再燃气体喷口位置、几何尺寸、气流参数等,均保密。采用该技术的煤粉锅炉,所燃煤种基本上属于优质烟煤,还未见到在燃用劣质煤锅炉上成功应用的报道。

由于国内火力发电机组大多燃用劣质煤,一旦采

* 收稿日期:2003-02-27

基金项目:国家教委1999年“春晖计划”项目资金的支助(99-95-58)。

作者简介:卢啸风(1962-),男,四川泸县人,教授,博士,主要从事洁净煤燃烧技术方向研究。

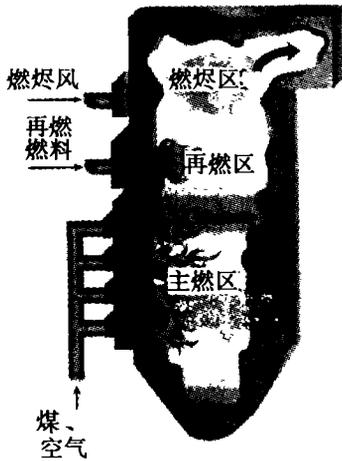


图 1 再燃原理示意图

用天然气再燃技术后,在锅炉炉内燃烧工况以及锅炉运行方面都会发生一些独特的变化,因此很有必要先在试验台上进行模拟后,再应用于实际锅炉上。为此,建立了一个几何比例为 1:12.5 的 220 t/h 四角喷燃煤粉锅炉冷态试验台,采用等温模化原理,对采用天然气再燃技术后,炉内主气流与再燃气流的混合特性,以及主气流和再燃气流形成的混合气流再与燃烬气流之间的混合情况进行了试验研究。

1 试验研究概况

1.1 试验装置简介

试验在图 2 所示的一个 1:12.5 的 220 t/h 四角切圆燃烧煤粉锅炉冷模试验台上进行。图 3 是冷模试验系统示意图。



图 2 等温模化冷态试验台

冷态试验系统主要由试验台本体、送/引风系统、加热系统以及测量系统组成。冷模炉膛下部两侧墙、炉膛上部四周、水平烟道顶部和两侧墙、尾部烟道上部两侧墙采用有机玻璃制成,其余采用钢板制造。试验根据等温模化原理进行^[5-6],并据此确定冷态试验台的主要几何尺寸以及试验时各喷口的气流参数。

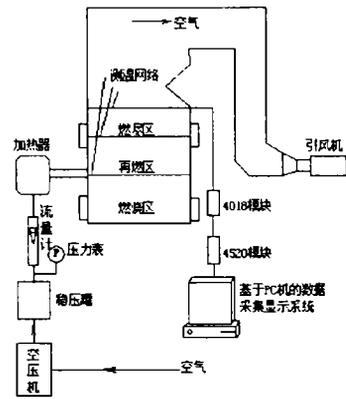


图 3 等温模化冷态试验系统图

从燃烧器喷口喷入的空气和从燃烬风喷口喷入的空气气流由引风机提供(从大气中抽入)。由空压机送出的空气被加热至 160 °C 后,作为模拟再燃天然气喷入炉膛。

1.2 试验方法及试验过程

1.2.1 加入再燃气流的试验方法及试验过程

模拟再燃天然气(热空气)分别采用 2 种方式喷入炉膛:从前后墙喷入和从炉膛四角切向喷入。在前后墙喷入方案中,分别在试验台的炉膛前后墙各安装了 2 排热空气喷管。下排喷管距燃烧器上沿 100 mm。从炉膛四角喷入模拟再燃天然气时,也采用两种喷射方案,一是从三次风喷管中喷入,另一种是从安装在距燃烧器上沿 100 mm 处、位于四角的热风喷管喷入。

在引风机的强力抽吸作用下,大量室温空气从模拟燃烧器各喷口被吸入炉膛。采用抽吸方式产生燃烧器喷口气流,可避免采用鼓风方式所带来的较为复杂的管道连接问题。调节引风机出口挡板,使总引风量超过炉内达到自模化区所需最小风量。通过调节燃烧器各喷口上的挡板,使四角进风量相等,并且使一、二、三次风动量比与实际锅炉热态运行时一、二、三次风动量比相等。调节从空压机送来的风量,使其分别相当于实际锅炉入炉总热量 5%、6% 及 7% 的天然气流量。这股空气被加热到 160 °C 后,喷入炉内,与从燃烧器喷入的室温空气相混合。通过实时测量炉内各点的混合温度(温升),即得到了炉内各点的冷热空气混合比例,也就得到了模拟再燃天然气与炉内主气流(从模拟燃烧器吸入的冷空气形成)在主燃区的混合特性。

为了测量模拟再燃天然气与从燃烧器喷口进入炉内的主气流之间的混合状态,从热空气喷入水平面开始,往上依次布置 2 层测温网络。2 层测温网络之间的垂直距离为 100 mm。每层测温网络布置方式如图 4 所示。炉内左右墙方向由中心线开始,均匀布置 5 根 $\phi 0.5$ mm 钢丝。在炉膛的右半部分,每根钢丝上从

炉膛中心线开始均匀绑上4支自行焊接的T分度号热电偶。热电偶丝的直径为0.1 mm且外带绝缘漆。

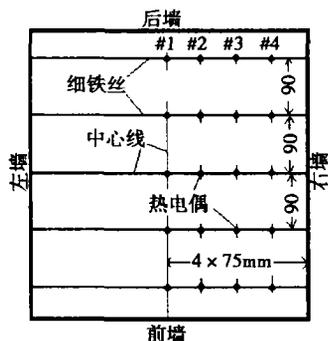


图4 再燃区测温网络

采用台湾研华公司生产的ADAM-4000系列数据采集装置,将热电偶产生的温度信号传入计算机,并采用采集装置自带的Genie软件编制实时数据采集、显示和记录程序。

每次试验开始前,先测量炉内各温度测点的基础温度值,以消除自制热电偶的基准误差。然后再往炉内送入模拟再燃天然气(热空气),以便准确测出炉内各温度测点处的绝对温升值。

由于炉膛结构及气流喷射方式的对称性,只需将所测右半部分炉膛的温升值,绕炉膛中心点旋转180°,即得到炉膛左半部分的温升值,从而得到整个炉膛的温升分布。将各试验工况下所测得的温升值用数据处理软件处理后,就得到整个炉膛断面上,所喷入的模拟再燃天然气的浓度(温升)分布图。

1.2.2 加入燃烬风气流的试验方法及试验过程

在再燃试验结束后,根据对再燃试验结果的初步分析,又设计了燃烬风试验,以研究加入再燃风后的混合主气流与燃烬风的混合情况。燃烬风试验是在再燃气流四角切向喷入炉内的基础上进行的,包括了前后墙进燃烬风和四角进燃烬风两种工况。考虑到燃烬区域靠近炉后,再燃区进入的热风到达燃烬区时有一定的热量损失,故再燃风喷入量取7%模拟再燃天然气量。前后墙和四角燃烬风喷口均距离上三次风喷口45 cm,两种进风方式其喷口总截面积相等,以保证不同方式下的燃烬风量都相同。燃烬风量占理论入炉总风量的20%,同时减少二次风门开度,使总风量达到原总风量的105%左右。为了使炉内截面温度分布的测量更加符合实际,将再燃试验时使用的测温网格加以改进,测温热电偶增加到63个,使网格能够覆盖整个炉膛截面,网格排列如图5所示。测温网格水平放置在位于燃烬风喷口的截面处,测量方法及数据采集

和处理方法与再燃风试验基本相同。

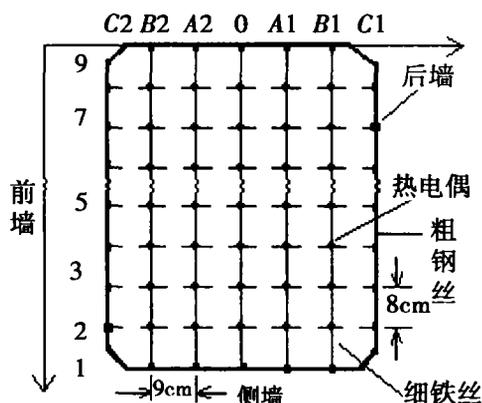


图5 燃烬区测温网格

2 试验结果及分析

2.1 再燃试验结果及分析

2.1.1 前后墙喷入再燃气流时炉内气流的混合特性

图6是模拟再燃天然气以不同的比例从前后墙喷入炉内并与炉内主流混合后的温升情况。图6中的3幅小图,分别是在模拟再燃天然气的喷射量相当于实际锅炉总输入热量的5%、6%和7%时,所测得的炉内温升情况。由图可见,随着模拟再燃天然气喷射量的增大,模拟再燃天然气射流的刚度也相应增大。在5%的喷射量时,大部分模拟再燃天然气在到达炉膛中部之前已出现明显的水平偏转。但在7%的喷射量时,某些模拟再燃天然气甚至可能冲到对面炉墙上。这说明在试验条件下,当模拟再燃天然气流量相当于实际锅炉入炉热量的6%左右时,其射流刚度恰到好处。模拟再燃天然气射流的刚度,不仅与其喷射量有关,而且还与喷口的尺寸、数量以及布置位置有关。在实际应用中,由于天然气喷口尺寸、喷口数量及喷射位置的变化,加之炉内化学还原反应的需要,其最佳的天然气流量可能会有所变化。

在燃烧器切向射流的作用下,模拟再燃天然气流喷入炉膛后,都产生了一定程度的偏转。这使得模拟再燃天然气主要分布在前墙靠右侧墙区域和后墙靠左侧墙区域。在两侧墙附近,模拟再燃天然气很少。模拟再燃天然气在水平面上分布的不均匀性,使炉内主燃烧区的空气动力结构、燃烧份额、以及温度分布都发生了不利于锅炉稳定和安全运行的变化,再燃天然气的有效利用以及NO_x还原效率都会受到不同程度的影响。因此,在四角喷燃煤粉锅炉上,再燃天然气不宜采用前后墙布置方式。

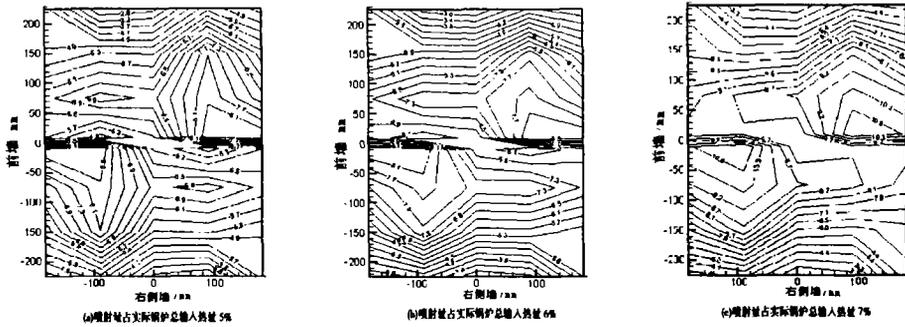


图6 模拟再燃天然气以不同比例从前后墙喷入炉内时,喷射横截面上的温升分布

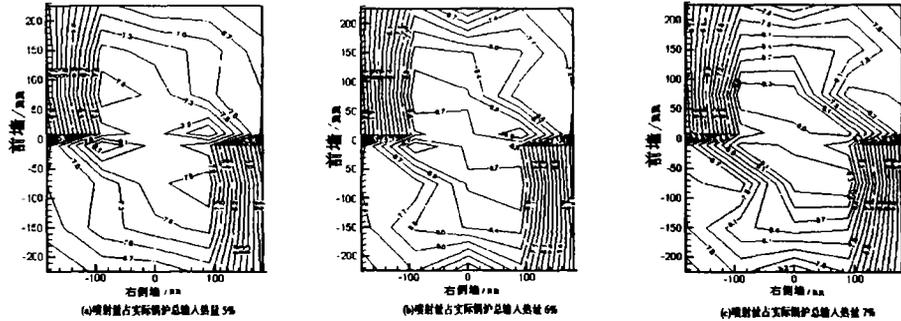


图7 模拟再燃天然气以不同比例从四角切向喷入炉内时,喷射横截面上的温升分布

2.1.2 四角喷入模拟再燃天然气时炉内气流的混合特性

当模拟再燃天然气从炉膛四角喷入时,炉内气流的温升状态如图7所示。图中3幅小图,分别是在模拟再燃天然气的喷射量相当于实际锅炉总输入热量的5%、6%和7%时,所测得的炉内温升分布情况。由图可见:当模拟再燃天然气从四角喷入炉内时,炉内原有的空气动力结构并无多大改变,炉内切圆仍然存在。从炉内的温度分布情况来看,所喷入的模拟再燃天然气主要分布在炉膛中心切圆区域,这与实际锅炉中该区域燃烧份额较大、NO_x生成量较多是相匹配的。因为采用天然气再燃技术时,对所喷入的再燃气体的基本要求就是:在保证100%覆盖整个炉膛断面的条件下,对NO_x生成量较多的区域,应保证有较大浓度的再燃天然气。因此,采用四角切向喷入再燃天然气,对切向喷燃煤粉锅炉而言,是比较合适的布置方案。从图7中还可以看出,当喷入的模拟再燃天然气量相当于实际锅炉入炉热量的5%时,炉内没有明显的模拟再燃天然气富集区域,表现为炉内温升比较均匀。但当模拟再燃天然气量相当于实际锅炉入炉热量的7%时,则出现了较为明显的炉内模拟再燃天然气富集区域,而这一区域,刚好位于燃烧切圆之内。在实际锅炉上,切圆内是否会出现再燃天然气富集区,也与再燃气体喷口的具体尺寸、数量以及布置位置有关。

从图中还可看出,切向喷入的模拟再燃天然气所

形成的切圆并不是标准的圆形,而是一椭圆形。此外,模拟再燃天然气在炉内的富集区域也集中在这一椭圆形的中心区域内。

2.1.3 模拟再燃天然气浓度在炉内垂直方向的衰减状态

以不同方式喷入的模拟再燃天然气浓度在炉内垂直方向的衰减情况如图8和图9所示。图中分别给出了在垂直方向相距10cm的两层水平测量断面上的温度分布。从图7和图8可以看出,模拟再燃天然气喷入炉内后,沿高度方向的浓度衰减较快。尤其是从前后墙喷入模拟天然气时,其浓度衰减速度比四角切向喷入模拟天然气时来得快。

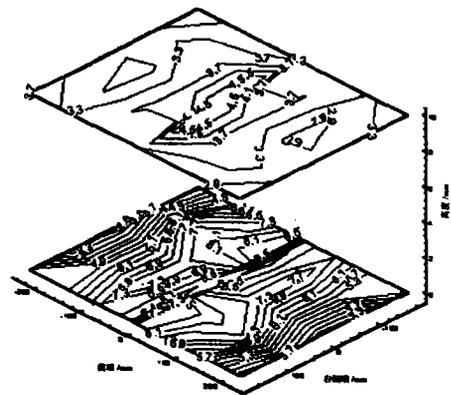


图8 从前后墙喷入6%模拟再燃天然气时,炉内温度分布沿炉膛高度的变化

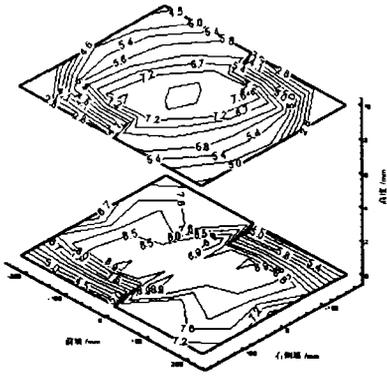


图9 从四角切向喷入6%模拟再燃天然气时,炉内温度分布沿炉膛高度的变化

在实际锅炉中,当安装了天然气再燃系统后,在喷入再燃天然气的同时,必须在炉膛上部喷入燃烬风以便将再燃区产生的CO等可燃气烧掉。由于炉膛高度的限制,燃烬区的高度也十分有限,因此要求喷入的燃烬风应当尽可能快地与炉内主流气体相混合。对照

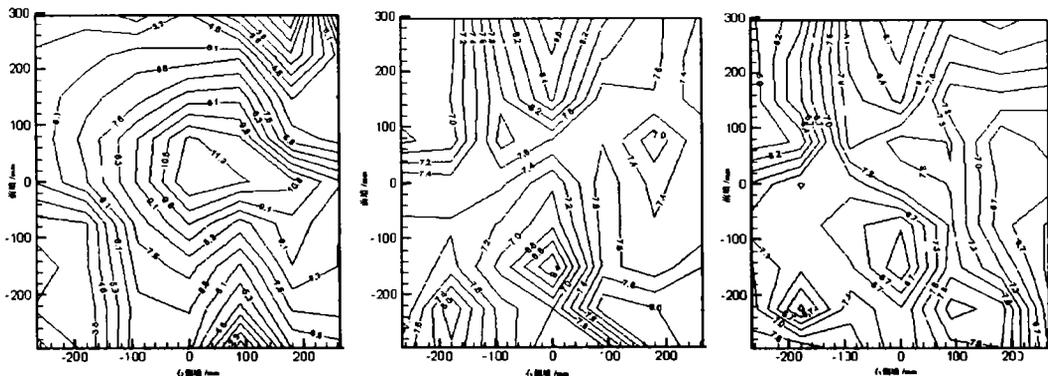


图10 燃烬风在不同工况下,喷口横截面温升图

从图10所示的第1幅小图可见,再燃风喷入量取7%模拟再燃天然气量从四角进入炉内,炉膛中心仍然存在高温切圆区域。表明了加入燃烬风前的炉内空气动力工况整体良好。由于实际炉膛在燃烬区域含有一定浓度的未燃尽成分,因此要求加入的燃烬风能够与上游主气流有充分和相对均匀的混合,这样既有利于燃尽又能削弱炉膛出口烟气的“扭转残余”,降低烟温偏差。

2.2.1 四角进燃烬风的炉内混合特性

第2幅小图的温升分布表明,加入了燃烬风后炉膛温升分布趋于均匀,整体温升分布在 $7.2 \sim 8.0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 附近,炉膛中心区域的高温升状况基本消失,个别点偏差较大是由于四角燃烬风的卷吸和冲击的不均匀性引起的。说明了四角进燃烬风方式能够较好的满足燃烬区的进风要求。

2.2.2 前后墙进燃烬风的炉内混合特性

从第3幅小图中可以看出,炉内的温升分布比较

图7和图8的试验结果,将燃烬风从前后墙或两侧墙喷入炉内,也是一个可以考虑的方案。此外,为减少炉膛上部气流的扭转残余,在采用切向喷入燃烬风的设计方案时,也应慎重。因此模拟天然气在炉内垂直方向的衰减特性,不仅对确定实际锅炉所需再燃区的高度尺寸,而且对设计实际锅炉再燃系统的燃烬风喷口布置方案,是很有益的。

从图8和图9还可看出,由于切向气流的作用,炉膛中心切圆区域的模拟天然气浓度衰减比周边慢。当模拟再燃天然气从前后墙喷入炉内时,被破坏的炉内切圆流动结构,在炉膛上部仍不能恢复。这再一次说明,在四角喷燃煤粉锅炉上安装天然气再燃系统时,将再燃天然气布置成切向喷入方式为宜。

2.2 燃烬风试验结果及分析

在燃烬风试验中,分别测量了燃烬风未投入时的温升图、四角进燃烬风时的温升图和前后墙进燃烬风温升图,它们顺次排列在图10中。

杂乱。左右墙的温升分布普遍较高,前后墙温升分布较低。比较第2和第3幅小图容易看出,前后墙进燃烬风的炉膛整体温升分布的均匀性不及四角进燃烬风的温升分布情况理想。

3 结论

1)采用不等温射流方案,通过测量冷模试验台炉内温度场,成功地模拟了炉内气流的混合状态。

2)试验结果表明:由于受四角切向射流的冲击,从前、后墙方向喷入的天然气模拟气流在炉内的偏转较大,与主气流难于形成较均匀的混合,同时对炉内原有空气动力结构的破坏也较大。因此对四角切圆燃煤粉锅炉,再燃天然气不宜从前后墙或两侧墙以对冲方式喷入。

3)切向喷入模拟再燃天然气的试验结果表明:切向喷入的模拟再燃天然气与炉内主流气流的混合状态较

好,模拟再燃天然气流主要集中于炉内主气流所形成的切圆区域内。这恰好与四角切圆燃烧煤粉锅炉炉内燃烧与NO_x生成的断面分布特性相吻合。

4) 试验中也发现,前后墙方向喷入的模拟再燃天然气在炉内垂直方向的衰减速度比四角切向喷入时快,在喷射断面上方的炉内横截面上的浓度分布也更为均匀。

5) 燃烬风试验表明,四角切向加入的燃烬风,与炉内加入再燃气流后混合主气流的混合情况较好,将对实际锅炉的燃烬有利。

参考文献:

- [1] 毛健雄,毛健全,赵树民. 煤的清洁燃烧[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] JONH MACPHAIL, ERIC COLLAND. Longannet Gas Re-
- burning Project[A]. Proceedings of 1999 Conference on Re-
- burning for NO_x Control[C]. Pittsburgh; NETL, 1999.
- [3] 徐华东, 罗永浩, 王恩禄, 等. 再燃烧技术及其在我国的应用前景[J]. 动力工程, 2001, 21(4): 1 320 - 1 323.
- [4] WENDT J O. L., C. V. STERNLIC, M. A. MATOVICH. Reduction of Sulfre Trioxide and Nitrogen Oxides by Secondary Fuel Injection [A]. 14th Symposium (International) on Combustion[C]. Pittsburgh P. A: The Combustio Isti-
- tute, 1973.
- [5] H. FARZAN, H. J. MARINGO, C. T. BEARD, et al. NO_x Control Using natural Gas Reburn on an Industrial Cyclone Boiler. Presented at the EPRI-DOE-EPA Combined Utility Air Pollutant Control Symposium [C]. Washington, DC, 1997.
- [6] 岑可法. 锅炉燃烧实验研究方法及测量技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.

Cold Model Experimental Study Using Reburning Tecnology to Reduce the emissions of NO_x

LU Xiao-feng, ZHENG Xian-Guo, LIU Han-zhou, ZHAN Yue-hang

(College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstrad: A cold model (its ratio is 1:12.5) of a 50 MW tangentially pulverized coal - fired boiler was built and the mixture characteristic between a simulating gas (hot air) and a main airflow (cold air) were gotten at different ejecting methods and quantities of the simulating gas through measuring the temperature pattern distributing in the furnace of the model. The simulating gas spouted from front and rear walls resulted a more even mixture characteristic, and the tangentially ejected simulating gas is more suitable for the tangentially pulverized coal - fired boiler, and the tangentially ejected OFA is also of advantage to it. The effect of quantities and locations of the simulating gas on the mixture characteristic was also discussed.

Key words: boiler; gas reburning; oFA; cold model

(责任编辑 陈移峰)