

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.04.010

大比例掺烧高炉煤气锅炉关键技术研究

胡琨, 韩卫冬

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 目前国内各大钢铁公司均在改扩建钢铁基地, 为达到钢铁基地煤气零排放, 自备电厂需最大限度的掺烧高炉煤气。以宝钢广东湛江钢铁基地项目自备电厂 2×350 MW 机组工程为依托项目, 经过分析、计算和方案比较, 开发出适应大比例掺烧高炉煤气的 300 MW 等级亚临界锅炉及配套的烟风、制粉和脱硫系统。工程自投运以来机组各项性能指标均达到或优于设计值。宝钢钢铁基地达到 1 000 万 t 生产能力时每台锅炉最大掺烧高炉煤气比为 30%, 为目前国内掺烧比例最大的项目。它的建成有利于解决环境污染问题, 并且减少了能源消耗, 降低钢铁公司自备电厂的成本。研究成果具有巨大的推广价值, 对日后项目具有重大的借鉴意义。

关键词: 大比例; 掺烧; 高炉煤气; “零”排放; 亚临界锅炉

中图分类号: TK175

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)04-0049-06

Research on Key Technology of Large-ratio Blending Blast Furnace Gas Boiler

HU Kun, HAN Weidong

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: The situation of rebuilding and expanding iron and steel bases has been existed in domestic steel corps at present. The captive power plants need to maximize the blending of blast furnace gas in order to achieve near-zero-emission of BFG. The research is based on the Baosteel Guangdong Zhanjiang Iron and Steel Base Captive Power Plant 2×350 MW Units Project. Through analysis, calculation and comparison, the large-ratio blending BFG subcritical boiler of 300 MW grade has been developed, as well as corresponding system, such as flue gas system, pulverizing system and flue gas desulfurization system. The results show that the performance indexes of the unit have been equal to or better than the design values since the operation. The maximum blending BFG ratio of each boiler is 30% when Baosteel base reaches the production capacity of 10 million tons, which is the maximum ratio of blending BFG in China. It is built to solve the problem of environmental pollution, to reduce energy consumption and the cost of captive power plant of steel corps. Thus, the research has high application promotion value and provides significant guidance for future projects.

Key words: large-ratio; blending; blast furnace gas (BFG); near-zero-emission; subcritical boiler

目前国内各大钢铁公司均在改扩建钢铁基地。为响应目前国家节能环保及绿色低碳排放的政策要求, 钢铁公司需要对生产过程中产生的大量工业废气(高炉煤气、焦炉煤气等)进行综合回收及循环利用

用; 再加上钢铁公司自身设备对电力的大量需求, 掺烧大量的高炉煤气及焦炉煤气的发电机组锅炉很好的解决了环境污染问题, 并且节省了能源消耗, 满足了钢铁公司自建发电锅炉降低成本的急切需求。

宝钢广东湛江钢铁基地项目自备电厂 2×350 MW 机组工程为上海宝钢集团广东湛江钢铁基地的一个生产设施单元。该工程锅炉为 2 台 350 MW 亚临界参数、中间一次再热、自然循环、单炉膛 π 型布置、四角切圆燃烧、平衡通风、固态排渣、露天

收稿日期: 2017-11-01

基金项目: 中国能建广东院科技项目: 锅炉燃烧系统在生物质电厂中的应用研究(EX01221W)

作者简介: 胡琨(1979), 女, 广东汕头人, 高级工程师, 学士, 主要从事火力发电厂热机专业设计工作(e-mail) hukun@gedi.com.cn.

布置、全钢架悬吊结构、掺烧高炉煤气及焦炉煤气的燃煤锅炉。为达到钢铁基地煤气“零”排放，自备电厂需最大限度的掺烧高炉煤气。经核算，宝钢铁基地达到1 000万t生产能力时单台锅炉最大掺烧高炉煤气量为 $3.27 \times 10^5 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ，占到了全烧煤时锅炉总输入热量的30%份额，是目前国内掺烧高炉煤气量最大的项目。

由于掺烧高炉煤气对锅炉设备提出了特殊的技术要求，相关技术人员通过实际调研、收资及相关资料分析，吸收和掌握了国内外掺烧高炉煤气锅炉的特殊技术布置，结合东锅多年300 MW亚临界煤粉锅炉设计经验和运行调整经验，经过大量的分析、计算和方案比较，为350 MW亚临界掺烧高炉煤气锅炉的开发奠定了扎实的理论及技术基础。

1 关键技术研究

1.1 锅炉本体

1.1.1 技术难点

由于锅炉需要同时满足全烧煤和掺烧高炉煤气的工况，这对锅炉设备提出了特殊的技术要求。该项目是东锅第一台大比例掺烧高炉煤气的大容量亚临界锅炉机组，最大掺烧高炉煤气比例为30% BMCR，属于全新设计，在技术上存在一定难度，设计中主要存在以下困难：

1) 锅炉全烧煤工况和掺烧高炉煤气工况时燃料特性差异极大。

锅炉设计时需要综合考虑在全烧煤工况和掺烧高炉煤气工况。由于锅炉炉膛理论燃烧温度差异极大，导致炉膛出口烟温变化很大，需要保证两种极限工况下炉内稳定燃烧和炉膛水冷壁吸热在合理范围以内^[1]。

2) 锅炉掺烧高炉煤气量为目前国内最大比例掺烧量。

由于高炉煤气热值较低且成分中含有相当大比例的惰性气体(N_2)，锅炉大量掺烧高炉煤气进入炉膛后，会导致炉膛理论燃烧温度降低，对于煤粉的稳定燃烧不利；同时燃烧后产生的烟气量增大，燃烧所需的空气量减少，导致风、烟比失调，如采用常规布置方案，排烟温度将急剧升高，造成锅炉效率大幅降低^[2-3]。

3) 常规受热面匹配难以兼顾。

该项目需要满足全烧煤工况和掺烧高炉煤气工

况下的排烟温度均控制在合理范围内，当大量掺烧高炉煤气时，烟气量差别较大，锅炉受热面换热温差发生变化，故常规布置受热面无法同时兼顾两种工况下的传热需要^[4]。

4) 锅炉排烟温度要求苛刻。

该项目不仅需要掺烧高炉煤气工况下尽量降低排烟温度，以提高锅炉效率，同时还要兼顾锅炉全烧煤工况下，排烟温度在酸露点温度以上，以避免低温腐蚀。

经过调研，宝钢集团已投运的引进日本三菱公司同类型掺烧高炉煤气锅炉，在掺烧20%比例的高炉煤气时，锅炉排烟温度均在180℃以上。本工程要求最大掺烧30%比例的高炉煤气时，锅炉排烟温度不大于160℃。并且锅炉在全烧煤40% BMCR负荷时，锅炉排烟温度不小于100℃。

因此对于全烧煤工况以及掺烧高炉煤气工况，锅炉需要布置不同面积的受热面积，才能满足两种不同燃烧工况下的性能要求，即锅炉受热面能够在不同工况下进行调节，以适应掺烧高炉煤气的特殊要求，成为了该项目设计上的最大技术难点。

1.1.2 技术方案

通过对以上技术难点的研究，本项目锅炉设计较以往常规300 MW等级煤粉炉做了以下创新：

1) 采用了东锅目前350 MW等级下的最大炉膛截面(截面尺寸为14.706 6 m×13.743 4 m)。同时考虑到炉膛蒸发吸热量以及燃烧器布置的需要，通过分析和计算，确定炉膛高度约60 m，以适应本项目全烧煤以及掺烧高炉煤气的特殊要求^[5]。

2) 为了适应三种不同燃料燃烧，采用了煤粉燃烧器、高炉煤气燃烧器和焦炉煤气燃烧器三种燃烧器混合布置的新型燃烧器布置形式，共布置了5层煤粉燃烧器、3层高炉煤气燃烧器和2层焦炉煤气燃烧器。

3) 为保证燃烧稳定，将焦炉煤气燃烧器分别布置在煤粉燃烧器上下两端，高炉煤气燃烧器布置在燃烧器下部。

4) 在保证炉内着火和稳燃的前提下，为尽可能降低油耗量，采用了3层常规油枪和1层微油枪的布置形式。

5) 设置有多种汽温、烟温调节手段。除了常规的过热器、再热器喷水减温装置以外，还设有摆动燃烧器、尾部双烟道调温挡板、省煤器旁通烟道，

并且考虑了煤气加热器的预留空间和位置, 保证锅炉在燃用各种燃料、各种工况下均安全可靠。

6) 本项目最独特的设计在于使用了省煤器后的旁路烟道来调整全锅炉燃煤工况和掺烧高炉煤气工况下不同的省煤器受热面积, 如图1所示。

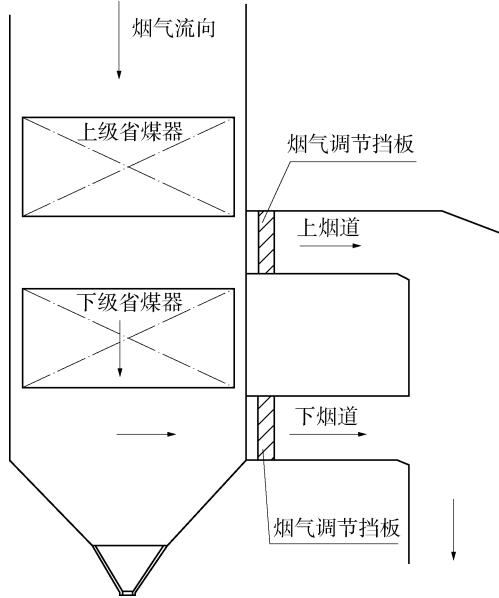


图1 省煤器旁路烟道结构示意图

Fig. 1 Sketch of the bypass flue duct structure of economizer

1.2 烟风系统

相比于全烧煤工况, 掺烧高炉煤气时一次风量大量减少, 烟气量大幅增加, 两种燃烧工况对烟风系统设备的选型存在较大差异。因此, 辅机选型是否合理将会影响机组实际运行的稳定性、经济性。

1.2.1 送风机选型

全烧煤工况, 送风机根据平衡通风原则, 计算出锅炉二次风量、风压, 按规程规定留有一定裕量进行风机选型。

根据高炉煤气化学元素成分分析, 经过计算掺烧高炉煤气时锅炉的送风机风量稍低于全烧煤工况, 因此送风机按全烧煤工况选型, 由于风量相差较小在掺烧高炉煤气时送风机的运行效率也不会受到明显的影响。根据风量及风压参数送风机采用动叶可调轴流风机。

1.2.2 引风机选型

全烧煤工况, 引风机根据平衡通风原则, 计算出锅炉烟气量、风压, 按规程规定留有一定裕量进行风机选型。通常 300 MW 及以上机组在取消脱硫增压风机的情况下, 引风机基本都选取了动叶可调

轴流风机。掺烧高炉煤气后, 锅炉排烟温度升高, 烟气量大幅增加, 烟气阻力也随之增大, 因此引风机选型应以掺烧高炉煤气工况为基准。

在最大掺烧高炉煤气工况下, 烟气量是全烧煤工况烟气量的 1.25 倍, 引风机以掺烧高炉煤气工况来进行选型, 为避免在全烧煤工况下风机效率过低, 风机的裕量选取不应过大。由于烟气量和压头均较高, 引风机选用双级动叶可调轴流风机, 在全烧煤工况时虽然烟气量大幅减少, 但压头也随之减少, 风机在全烧煤工况时也不会出现失速喘振现象。

1.2.3 除尘器选型

1.2.3.1 除尘器形式

电除尘器的选择需要考虑飞灰的浓度、烟气温度、烟气量和飞灰特性等诸多因素, 以确定收尘面积、除尘器断面大小, 电场强度、极线型式和各电场的长度。电除尘器最适宜的飞灰比电阻在 $10^5 \Omega \sim 50 \text{ G}\Omega$ 区间范围内。按目前广东地区环保要求及本工程煤质资料, 选用电除尘器需要较多的电场及较大的比集尘面积, 相应设备投资和运行成本均很高。

电袋除尘器虽然可以解决除尘器收灰问题, 但是电袋除尘器有以下问题:

1) 目前国内对电除尘器电场是否会电离臭氧及电离的臭氧是否会对后面的布袋寿命有影响仍无定论, 选用存在一定的风险。

2) 电袋除尘器的布袋入口气流分布对布袋寿命有影响。如采用电袋一体式, 此问题较难解决, 如采用分体式, 则会增加占地, 设备初投资也会增加。

3) 电袋除尘器既有电除尘系统也有布袋除尘系统, 运行维护、设备管理均较复杂。

布袋除尘器除尘属于过滤式除尘, 除尘效率和排放浓度可以得到保证。以往布袋材料不过关频繁更换布袋的情况近年来也得到了有效解决。因此布袋除尘器近年来在国内 300 MW 机组和 600 MW 机组均有应用, 并积累了一定的成功经验。

综上所述, 本工程选用布袋除尘器。

1.2.3.2 除尘器选型参数的确定

全烧煤工况, 除尘器选型主要根据煤种及灰分特性, 排烟温度, 粉尘排放要求来最终确定除尘器形式、主要设备参数等。掺烧高炉煤气后排烟温度

升高、烟气量增大,如还按全烧煤工况选型,粉尘排放浓度将会超标,因此除尘器需按掺烧煤气工况进行选型。

掺烧高炉煤气工况烟气量大,排烟温度高,但烟气含尘浓度较全烧煤工况低,因此除尘器选型既要考虑掺烧煤气工况下的大烟气量、高排烟温度又要考虑全烧煤工况的高含尘量。通过计算除尘器按掺烧高炉煤气工况选型,在满足掺烧煤气工况下的大烟气量、高排烟温度下的除尘效率的同时,在全烧煤工况下由于烟气量大幅减少,烟气温度也大幅降低,除尘器除尘效率将会有所提高,能够满足两种燃料工况下的运行要求,并有较高的除尘效率。

1.3 制粉系统

相比于全烧煤工况,掺烧高炉煤气时锅炉排烟温度上升较多,而一次风量也大量减少,相应二次风量变化不大,热一次风温度降低。因此磨煤机及一次风机的选型一定要适应两种燃料工况。

全烧煤工况,磨煤机及一次风机仅需考虑燃煤特性,气象条件,根据机组容量,按照规程规范要求选取。根据煤种特性确定制粉系统方式、磨煤机形式、确定煤粉细度、干燥剂温度等。掺烧高炉煤气后燃料特性,燃煤量,一次风量均发生了较大变化,因此设备选型也需考虑掺烧高炉煤气后的影响。

在磨煤机及一次风机选型时,首先要满足全烧煤工况出力要求。由于掺烧高炉煤气后燃煤量减少,一次风量减少,因此在出力上都能满足要求。但由于掺烧高炉煤气后热一次风温低于全烧煤工况,同时一次风量大大幅度减少,一次风阻力变化不大,因此可能造成磨煤机干燥出力受到影响,一次风机运行容易失速喘振。

在磨煤机设计选型时需合理的选取煤粉水分,干燥剂出口温度,合理的选择磨煤机入口冷、热风道管径,来兼顾磨煤机在全烧煤和掺烧高炉煤气的情况下均能满足锅炉出力要求。

在一次风机选型时,由于风量小,压头高,首先选择更合适的离心式风机。同时配备了调速型液力耦合器来进行调节,使风机在全烧煤工况及掺烧煤气工况均能处在较高的效率区间运行,同时实现一次风机软启动功能。

1.4 脱硫系统

全烧煤工况与掺烧煤气工况脱硫入口烟气参数

差别较大,掺烧煤气工况烟气量是全烧煤工况的1.25倍;经过布袋除尘器后脱硫入口的烟气粉尘浓度基本一致,在 20 mg/Nm^3 左右; SO_2 浓度全烧煤工况比掺烧煤气工况高,因此在脱硫系统设计时既要考虑掺烧工况下的高烟气量,又要考虑全烧煤工况下的高 SO_2 浓度,同时还要考虑掺烧高炉煤气工况的高排烟温度。

1.5 与当前国内外同类技术综合比较

据了解,国内外掺烧高炉煤气的同类机组容量均在300 MW以下,且一般多为高压锅炉和超高压锅炉,同时,掺烧高炉煤气的最大量也小于 $2 \times 10^5\text{ Nm}^3/\text{h}$ 。宝钢集团之前引进日本三菱公司的同类型掺烧高炉煤气锅炉在掺烧20%比例的高炉煤气时,锅炉排烟温度均在 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,锅炉的经济性较差。因此相比于国内外同类技术,本项目机组容量最大、参数最高、掺烧比例最大,且排烟温度最佳。

本项目于2015年投入运行以来,锅炉运行情况良好;烟风、制粉系统设备性能均优于设计值。在2016年3月进行的锅炉性能考核试验报告中,机组#1锅炉的各项性能指标均达到甚至超过设计保证值,具体考核主要数据如表1所示:

表1 #1锅炉性能考核数据

Tab. 1 Performance assessment data of #1 boiler

考核项目	试验值	设计值
锅炉最大连续出力/(t/h)	1 208.53	$\geq 1\ 180.00$
锅炉效率(全烧煤)/%	95.12	≥ 93.80
锅炉效率(掺烧高炉煤气)/%	93.01	≥ 91.50
NO_x 排放量/(mg/Nm^3) (全烧煤,标态,6% O_2)	258.8	≤ 320.0
NO_x 排放量/(mg/Nm^3) (掺烧高炉煤气,标态,6% O_2)	317.9	≤ 350.0
排烟温度/ $^\circ\text{C}$ (全烧煤,40%BMCR)	102.2	≥ 100
排烟温度/ $^\circ\text{C}$ (掺烧高炉煤气,BMCR)	135.5	≤ 160

从表1可以看出,锅炉运行情况良好,各项性能指标均优于设计值,为今后本项目高效经济运行打下了良好的基础,得到了用户的满意和认可。

1.6 市场预测和经济效益分析

1.6.1 初投资

1) 锅炉本体

本项目锅炉最大掺烧高炉煤气量为 $3.27 \times 10^5\text{ Nm}^3/\text{h}$,占全烧煤时锅炉总输入热量的30%份额,

是目前国内掺烧高炉煤气量最大的项目,也是东方锅炉厂的第一台亚临界掺烧高炉煤气的大容量锅炉机组。东方锅炉厂为本项目全新开发了新炉型,采用了东锅 350 MW 等级下的最大炉膛截面(截面尺寸为 14.706 6 m × 13.743 4 m)。同时考虑到炉膛蒸发吸热量以及燃烧器布置的需要,通过分析和计算,确定炉膛高度约 60 m,以适应本项目全烧煤以及掺烧高炉煤气的特殊要求。

为了适应三种不同燃料燃烧,采用了煤粉燃烧器、高炉煤气燃烧器和焦炉煤气燃烧器三种燃烧器混合布置的新型燃烧器布置形式,共布置了 5 层煤粉燃烧器、3 层高炉煤气燃烧器和 2 层焦炉煤气燃烧器。为保证燃烧稳定,将焦炉煤气燃烧器分别布置在煤粉燃烧器上下两端,高炉煤气燃烧器布置在燃烧器下部。在保证炉内着火和稳燃的前提下,为尽可能降低油耗量,采用了 3 层常规油枪和 1 层微油油枪的布置形式。

本项目还设置有多种汽温、烟温调节手段。除了常规的过热器、再热器喷水减温装置以外,还设有摆动燃烧器、尾部双烟道调温挡板、省煤器旁通烟道,并且考虑了煤气加热器的预留空间和位置,保证锅炉在燃用各种燃料、各种工况下均安全可靠。

本项目最独特的设计在于使用了省煤器后的旁路烟道来调整全锅炉燃煤工况和掺烧高炉煤气工况下不同的省煤器受热面积。既满足锅炉在全烧煤工况下的热风温度和排烟温度,又在锅炉掺烧高炉煤气工况下,降排烟温度控制在 160 ℃ 以下,达到了同类掺烧高炉煤气锅炉的最低排烟温度。

由于锅炉掺烧高炉煤气后,相比锅炉全烧煤工况时烟气量增大了约 25%,为尽可能降低排烟温度,全新开发出了东锅 350 MW 等级下最大的 30 # 空预器。

综上所述,在掺烧高炉煤气后,锅炉在炉膛、燃烧器、受热面、省煤器、空预器等核心部件均进行了重新设计,较常规 300 MW 亚临界煤粉锅炉在造价上增加 30%,单台炉增加投资约 6 700 万元。

2) 烟风、制粉系统

在烟风、制粉系统方面投资的增加主要体现在锅炉主要附属设备上。

原煤仓、给煤机、磨煤机、一次风机等设备主要按全烧煤工况来选型,因此设备投资较常规煤粉

炉工程并没有增加。

送风机、引风机、除尘器、脱硫设备按掺烧煤气工况选型,选型参数比常规煤粉炉大,因此设备投资有所增加。

经比较,单台炉设备增加投资约 850 万元。

3) 总投资

掺烧高炉煤气锅炉与常规煤粉锅炉投资对比如表 2 所示(单台炉)。

1.6.2 运行费用

掺烧高炉煤气工况相比于全烧煤工况,主要的经济效益在于节约了大量的燃煤。

表 2 常规煤粉锅炉与掺烧高炉煤气锅炉设备投资比较
Tab. 2 Comparison of the equipment investment of pulverized coal boiler and blending BFG boiler

设备	常规煤粉炉	掺烧高炉煤气后
锅炉本体	基准	+6 700 万元
原煤仓	基准	0
给煤机	基准	0
磨煤机	基准	0
一次风机	基准	0
送风机	基准	+50 万元
引风机	基准	+100 万元
除尘器	基准	+200 万元
脱硫系统	基准	+500 万元
总计	基准	+7 550 万元

根据工程投运以来的实际运行情况,本工程在全烧煤工况时单台炉每小时耗煤量约为 141.8 t,掺烧高炉煤气工况每小时耗煤量为 114.4 t,掺烧煤气工况每小时耗煤量比全烧煤工况少 27.4 t,按机组年利用小时 6 500 h 计算,每台炉每年可节约燃煤量 17.81 万 t,燃煤按每吨 500 元计算,单台炉每年可节约燃料费用 8 905 万元。

由于掺烧高炉煤气产生的设备投资增加,一年内就可在燃料方面得到回收。具有极其巨大的经济效益。

2 结论

宝钢项目 350 MW 亚临界掺烧高炉煤气锅炉的开发,很好的解决了钢铁厂生产过程中产生的工业废气排放造成的环境污染问题,并且节省了钢铁公司的能源消耗,满足了钢铁公司自建发电锅炉降低成本的需求。尽管由于掺烧高炉煤气导致单台炉及

配套辅机造价增加 7 550 万元,但由于可以节约大量的燃煤,单台炉每年可节约燃料费用 8 905 万元,1 年即可回收,因此具有巨大的经济效益。

随着社会的发展,国内外钢铁企业产能也将逐步增加,这就使得很多钢铁企业存在着改、扩建的情况,随之将产生大量的剩余煤气,为实现废气零排放,钢铁企业自备电厂也将进行大规模的改、扩建。随着本项目的顺利投产标志着我们在掺烧高炉煤气上又取得了巨大的成果,大比例掺烧高炉煤气工程也将随着钢铁企业的发展而增多。因此本项目研究成果具有良好的市场前景。

本项目的研究、投产不论是经济效益还是社会效益都非常巨大。同时本项目是目前国内外掺烧比例最大的 300 MW 等级亚临界炉发电机组,对以后更大容量机组掺烧高炉煤气的研究具有借鉴和指导意义。

参考文献:

[1] 王春波,魏建国,黄江城. 300 MW 高炉煤气与煤粉混燃锅炉热力特性及经济性分析 [J]. 动力工程学报, 2012, 32(7): 517-522.

(下接第 58 页 Continued from Page 58)

[8] ROTHMAN L S, GORDON I E, BABIKOV Y, et al. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2013 (130): 4-50.

[9] 王东风,刘千. 面向燃烧优化的电站锅炉炉膛参数光谱测量与场重建 [J]. 动力工程学报, 2014, 34(8): 599-605.
WANG D F, LIU Q. Combustion optimization-oriented spectral measurement and field reconstruction of furnace parameters for power station boilers [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2014, 34(8): 599-605.

[10] 刘慧军,陶少华,杨兵初,等. 基于光谱吸收率积分的气体浓度测量方法 [J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(12): 3490-3494.
LIU H J, TAO S H, YANG B C, et al. Gas concentration measurement based on the integral value of absorptance spectrum [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(12): 3490-3494.

[11] 高强. TDLAS 气体检测灵敏度增强方法及其在漫反射率测量中的应用 [D]. 哈尔滨工业大学, 2014: 20-35.
GAO Q. TDLAS gas detection sensitivity enhancement and ap-

lication in diffuse reflectance measurement [D]. Harbin Institute of Technology, 2014: 20-35.

- [2] 方立军,武生,胡月龙,等. 掺烧高炉煤气对锅炉传热特性影响的研究 [J]. 华北电力大学学报, 2013, 40(1): 66-70.
FANG L J, WU S, HU Y L, et al. Study on blended BFG boiler's combustion characteristics [J]. Journal of North China Electric Power University, 2013, 40(1): 66-70.
- [3] 方立军,武生. 掺烧高炉煤气锅炉的热力计算研究 [J]. 电力科学与工程, 2012, 28(9): 53-56 +62.
FANG L J, WU S. Research of thermodynamic calculation for boiler bended with blast furnace gas [J]. Electric Power Science and Engineering, 2012, 28(9): 53-56 +62.
- [4] 王春波,魏建国,盛金贵,等. 300 MW 煤粉/高炉煤气混燃锅炉燃烧特性数值模拟 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(14): 14-19.
WANG C B, WEI J G, SHENG J G, et al. Numerical simulation of combustion characteristics of a 300 MW blast furnace gas/pulverized coal combined combustion boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(14): 14-19.

(责任编辑 高春萌)

- [12] 齐汝宾,赫树开,李新田,等. 基于 HITRAN 光谱数据库的 TDLAS 直接吸收信号仿真研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(1): 172-177.
QI R B, HE S K, LI X T, et al. Simulation of TDLAS direct absorption based on HITRAN database [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(1): 172-177.
- [13] 何祥林,潘勇刚. TDLAS 技术的发展现状及其应用研究 [J]. 鄂州大学学报, 2017, 24(1): 102-104.
HE X L, PAN Y G. Research on the Development of TDLAS Technology and Its Application [J]. Journal of Ezhou University, 2017, 24(1): 102-104.
- [14] 刘千,王东风,韩璞. 基于炉膛参数场测量和支持向量机的电站锅炉燃烧状况评价 [J]. 中国测试, 2015, 41(9): 6-10.
LIU Q, WANG D F, HAN P. Evaluation on combustion condition of power plant boiler based on furnace parameters measurement and support vector machine [J]. China Measurement & Test, 2015, 41(9): 6-10.

(责任编辑 黄肇和)