

煤粉燃烧热态试验研究方法综述

王学文^{1,2,3}, 王乃继^{1,2,3}, 陈福仲⁴, 罗伟^{1,2,3}, 崔豫泓^{1,2,3}, 赵振益⁵

(1. 煤科院节能技术有限公司, 北京 100013; 2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点试验室, 北京 100013; 3. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点试验室, 北京 100013; 4. 济南热力集团, 山东 济南 250000; 5. 甘肃庆阳市西峰城区热力集团有限公司, 甘肃 庆阳 745000)

摘要: 燃烧器是煤粉锅炉的核心部件, 燃烧器的性能关系到煤粉燃烧程度和污染物排放水平。采用热态试验方法研究燃烧器的性能, 获得的数据对于开发高效低氮煤粉燃烧器更具有指导意义。笔者从基本原理出发论述了煤粉燃烧各热态试验方法的优缺点以及适用场所, 对于火焰温度测量, 热电偶测温操作简易、便捷, 但精确度不高, 且只能同时单点测温, 对火焰扰动较大; 抽气式高温测温准确度较热电偶高, 但操作复杂, 对气流易造成干扰; 光谱法有足够的精确度, 对火焰扰动较小, 可同时多点测量, 能进行三维温度场重建, 但相较于热电偶测温法和抽气式高温测温法, 光谱法操作复杂、造价高。对于气固相采集, 冷却取样法是准确采集燃烧器内煤粉燃烧烟气实时成分的常用手段, 由于水的比热容较大, 因而水冷式取样法是应用最广的取样方法; XPS 和灰示踪法均为煤粉燃烧过程中测量煤焦样品化学组成的常用方法, 均可定量分析固体煤焦样品, 但两者检测重点不同, XPS 主要分析化学官能团组成, 灰示踪法着重分析其元素组成、计算煤转化率等; XPS 操作较繁琐, 灰示踪法操作简单。对于气体样品的检测和分析, 电化学检测法和红外检测法均可测量多种气体, 具有较强的适用性, 但红外检测法检测范围更广; 溶液吸收法适用于检测 NH_3 和 HCN 浓度, 但由于测量中不易捕捉、较为繁琐, 且易受其他因素干扰, 工程应用较少。在现场测量时, 尽可能采用多种测量方法或多次测量, 以规避可能导致误差的因素。通过多种测量方法可建立煤粉燃烧器热态下三维温度场、三维气氛场等, 多维度研究煤粉的燃烧过程及污染物生成过程, 从而采取有效手段治理污染, 对于新型高效低氮燃烧器的开发以及煤粉工业锅炉污染物的综合治理具有重要意义。

关键词: 煤粉燃烧器; 抽气式高温测温法; 水冷取样法; 光谱法; 灰示踪法

中图分类号: TK229 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2020)02-0016-08

A review of experimental research methods for pulverized coal combustion hot-state

WANG Xuewen^{1,2,3}, WANG Naiji^{1,2,3}, CHEN Fuzhong⁴, LUO Wei^{1,2,3}, CUI Yuhong^{1,2,3}, ZHAO Zhenyi⁵

(1. China Coal Research Institute Company of Energy Conservation, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of High-efficiency Mining and Clean Utilization of Coal Resources, Beijing 100013, China; 3. National Key Laboratory of Efficient Utilization of Energy and Energy and Emission Reduction Technology, Beijing 100013, China; 4. Jinan Thermal Group, Jinan 250000, China; 5. Gansu Qingyang Xifeng Heating Power Group Co., Ltd., Qingyang 745000, China)

Abstract: The burner is the core component of the pulverized coal boiler. The performance of the burner is related to the degree of pulverized coal combustion and the level of pollutant discharge. The thermal test method is used to study the performance of the burner, and the obtained data are more instructive for the development of high-efficiency and low-nitrogen pulverized coal burners. From the basic principles, the advantages and disadvantages of various thermal test methods for pulverized coal combustion and the applicable places were discussed. In the flame temperature measurement, the thermocouple thermometry is simple and convenient, but its accuracy is not high and can only measure temperature at a single point at the same time, which has a large disturbance to the flame. The accuracy of air-pumped high

收稿日期: 2019-07-15; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.19071502

基金项目: 煤炭科学研究总院面上资助项目(2018TDMS007)

作者简介: 王学文(1989—), 男, 山西吕梁人, 硕士研究生, 从事煤粉燃烧高效清洁利用研究工作。E-mail: 1173620894@qq.com。通讯作者: 王乃继, 研究员, 从事煤粉洁净燃烧方面的研究。E-mail: wnj_brice@163.com

引用格式: 王学文, 王乃继, 陈福仲, 等. 煤粉燃烧热态试验研究方法综述[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(2): 16-23.

WANG Xuewen, WANG Naiji, CHEN Fuzhong, et al. A review of experimental research methods for pulverized coal combustion hot-state[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(2): 16-23.



移动阅读

temperature thermometry is higher than that of thermocouples, but its operation is complicated and it is easy to cause interference to the air flow. The spectrometry has sufficient accuracy and less disturbance to the flame, multi-point measurement at the same time, and the measurement can be used to reconstruct the three-dimensional temperature field, but compared with thermocouple thermometry and the air-pumped high temperature thermometry, the spectral method has complex operation and high cost. In the collection of gas-solid phase samples, the cooling sampling method is a common method for accurately collecting real-time components of the flue gas in the burner. Because the specific heat capacity of water is large, the water-cooled sampling method is the most widely used sampling method. XPS and ash tracer are common methods for measuring the chemical composition of coal char samples during pulverized coal combustion. Both can be used for quantitative analysis of solid coal char samples, but the detection focuses of the two methods are different. XPS is mainly used to analyze the composition of chemical functional groups. Trace method focuses on analyzing its elemental composition, calculating coal conversion rate, etc. XPS operation is more tedious, while the gray tracer method is simple to operate. In the detection and analysis of gas samples, a variety of gases can be measured by both electrochemical detection and infrared detection, which has strong applicability, but the infrared detection has a wider detection range. The solution absorption method is suitable for detecting the concentration of NH_3 and HCN , which is tedious and difficult to capture in the measurement, and easy to be interfered by other factors, so it has fewer engineering applications. Therefore, when measuring in the field, a variety of measurement methods or multiple measurements are used as far as possible to avoid factors that may cause errors. Three-dimensional temperature field and three-dimensional atmosphere field of the pulverized coal burner in the hot state can be established through a variety of measurement methods. The pulverized coal combustion process and pollutant generation process can be studied in multiple dimensions, so as to take effective measures to control pollution. It is of great significance to the development of burners and the comprehensive treatment of pollutants from pulverized coal industrial boilers.

Key words: pulverized coal combustor; gas extracting thermometry of high temperature condition; water cooling sampling method; spectroscopy method; grey tracer method

0 引言

燃烧器是使燃料和空气以一定方式喷出混合燃烧装置的统称^[1],是实现燃料稳燃和低氮的关键部件。根据燃料种类可分为燃煤、燃气、燃油等3种燃烧器,设计良好的燃烧器应具有噪声小、燃烧效率高、火焰稳定等性能。煤粉燃烧器在使用过程中,会产生 SO_2 、 NO_x 等气态污染物质以及飞灰、固体残渣等固态污染物质。国家环保部于2014年出台了新建燃煤工业锅炉的大气排放标准^[2],重点地区颗粒物的排放不超过 30 mg/m^3 , SO_2 、 NO_x 不超过 200 mg/m^3 ,因此,融合空气分级燃烧和煤粉浓缩理念,研发新型高效低氮煤粉燃烧器迫在眉睫。目前主要采用冷态试验研究、数值模拟以及热态试验研究等3种方法评价煤粉燃烧器的性能,包括燃烧效率、火焰稳定以及低氮排放特性。

煤粉燃烧器的热态试验研究一般在高温下进行,模拟真实煤粉颗粒的燃烧环境,获得的数据对于开发设计高效、低污染的新型燃烧器,降低煤粉锅炉污染物排放,研究煤粉工业锅炉燃烧的稳定性、经济性和清洁性等具有重要意义。文献[3]对冷态试验研究方法进行了研究梳理,但对热态试验研究方法的研究较少,本文重点阐述煤粉燃烧器热态试验相关研究方法。

目前煤粉燃烧器的热态研究方法主要包括热电偶测温法、抽气高温测温法、光谱法、水冷取样法、灰

示踪法、光谱法以及化学溶液吸收法等,这些方法基于不同的原理获得燃烧器的火焰温度分布、烟气组成以及煤粉锅炉的燃烧进程。本文介绍了目前煤粉燃烧器热态的主要检测手段,论述了各测试方法的基本原理及其存在的不足以及适用场所。

1 火焰温度的测量

火焰温度是煤粉燃烧过程的重要热力学参数之一^[4],研究火焰温度的测试技术,对煤粉燃烧器燃烧过程的理论基础研究具有重要意义。煤粉燃烧器内温度及其分布的定量测定,对于了解其燃烧过程、燃烧流场和燃烧产物的内在特性,建立合理的燃烧模型、进行精确的计算机模拟分析具有重要的指导意义,以计算模拟分析替代具体的实物试验,可降低实物试验的成本及其可能带来的危险,加速新产品、新型号的开发和使用。

火焰温度的测量,按测温方式可分为接触式和非接触式,热电偶为典型的接触式温度计;非接触式包括双色高温计、光谱法等。

1.1 热电偶测温法

热电偶是测量火焰温度较常用的测温元件^[5],S型热电偶(铂铑10-铂热电偶)和K型热电偶(镍铬-镍硅热电偶)^[11-12]多应用于煤粉燃烧器,其测量极限温度分别为 $1\ 600 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $1\ 200 \text{ }^\circ\text{C}$ 。热电偶的测量原理是利用塞贝克效应,将不同导体的温度信号转换成热电动势信号,再通过电气仪表转换

成被测物质的温度。温度差越大,产生的电信号越强,较强的电信号会转变为较大的温度差。其优点是测量燃烧器内高温烟气准确度高、灵敏度高、测量响应时间短,测量燃烧器内高温烟气较便捷、直观,但随着使用时间的延长,其精确度下降,需要定期维护和误差修正^[5-6]。另外,对于测量燃烧器有限空间的温度,热电偶定点测量会对本身的气流造成干扰,且只能获得单点的温度,若要同时获得某个截面的温度分布,必须移动测量或同时布置多个热电偶,但移动测量时热电偶极易损坏,多点布置热电偶使增加设备成本。

热电偶的分度表在冷端温度 0 ℃ 下测得,在测量燃烧器热态环境温度时,需要根据测量环境温度的变化进行误差修正或补偿。随着对热电偶测量气流、火焰温度研究的深入,许多学者分析了热电偶测温的误差来源^[7-9],包括使用环境温度梯度较大、火焰温度波动大以及辐射散热等误差。针对环境温度变化大特点,可采用冷端温度修正法或电势补偿法降低测量误差。高温下,辐射散热带来的误差最显著,最常用的降低辐射误差的方法是 Kaskan 基于冷却定律和热辐射定律提出的辐射误差修正方法^[10]。

1.2 抽气高温测温法

抽气高温测温法是测量火焰温度仅次于热电偶的检测方法之一,其工作原理示意如图 1 所示。采用单层或多层遮热罩将热电偶屏蔽,并进行高速抽气,以减小普通热电偶测量所带来的辐射热损失,使对流传热成为热电偶传热的主导形式,从而最大程度地减少测量误差。抽气高温测温法是在高速下将烟气从固定有热电偶的遮蔽套中抽出,以获得烟气真实温度^[4]。由热电偶元件、遮热套以及水冷抽气套管组成,水冷套多采用 3 层同心不锈钢制成,其长

度根据实际测量环境确定,抽气热电偶的外径大小根据抽气流量和水冷截面确定。

与普通热电偶相比,抽气高温测温法测量误差较小、准确度高,但存在以下误差:① 传导引起的误差,在实际生产中,为了达到高效率,会选用小直径的热电偶,导热可忽略不计;② 速度引起的误差,提高抽气速度,有利于增加对流传热系数,以强化对流传热,减少误差。但抽气速度也有限制,根据文献^[13],工业炉内气速 80 m/s 时,当抽气速度为 200 m/s 时,热电偶测量值与实际值的误差小于 3 ℃;抽气速度为 250 m/s 时,其误差小于 5 ℃。一般情况下,测量 600~1 500 ℃ 的烟气时,抽气速度为 30~120 m/s^[4]。抽气速度过高(大于 200 m/s),由于气流绝热膨胀的影响,抽气高温测温法的热能转变为速度能,使测量值偏低。另外,过高的抽气速度时,由于蒸汽冷凝而堵塞管路,当气体含有较多颗粒时,在压力引出管中易沉积较多的颗粒。同时,研究表明,由于受感元件的限制,只限于高温短时间的测量,否则会降低材料寿命,影响测量准确性^[14];另外,抽气高温测温法操作复杂,配套设备较多,设备成本较高。方庆艳等^[15]采用抽气高温测温法对 300 MW 火焰锅炉进行测温试验,得到燃烧器出口不同标高(炉膛内)的温度分布,研究煤粉气流进入炉膛后的燃烧特性。

1.3 光谱法

光谱法是测量火焰温度的最常见方法之一。光谱法原理示意如图 2 所示,与热电偶和抽气式测温法相比,光谱法是光电技术和计算机图像处理技术发展的产物,是基于 CCD(电荷耦合器件)测温技术和普朗克辐射定律,核心器件为彩色 CCD,通常采用风冷和水冷方式减少高温火焰的热辐射作用,具有寿命长、耐灼伤、高清晰度等特点。其原理是通过彩色 CCD 将火焰光信号转换为电信号,再通过三基

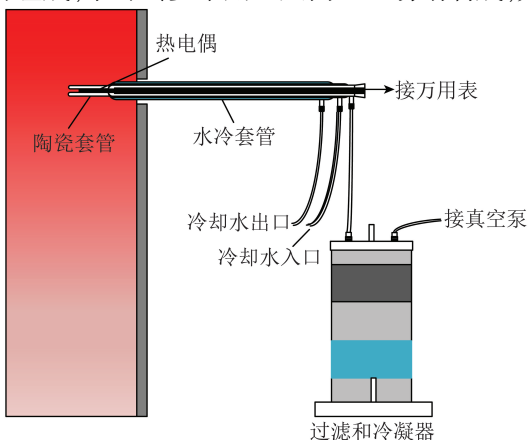


图1 抽气式测温法示意

Fig.1 Schematic diagram of gas extracting thermometry of high temperature condition

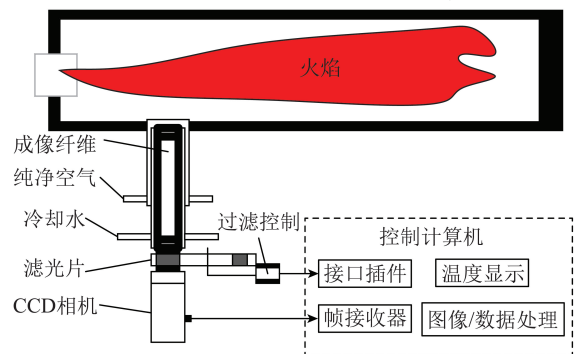


图2 光谱法测温示意

Fig.2 Schematic diagram of temperature measurement by spectroscopy

色原理以及计算机图像处理软件获得燃烧器火焰的温度场^[16]。但光谱法的设备成本较高、操作复杂。

国内外学者针对 CCD 与计算机图像处理相结合在温度场测量方面做了大量研究,基于 CCD 的测温技术主要包括单色法、双色法、三色法。单色法利用高温热电偶实际测量燃烧器内某一点的温度,其他位置的灰度值通过与该参考点灰度值做比较获得,单色法存在接触法测温的限制,而双色法和三色法采用同一时刻、同一地点的信息,无需经过对比即可得到测量结果^[17]。但双色法和三色法对火焰特性和 CCD 光谱特性作了一定的简化和假设,这些假设与实际工况相差较大,从而造成较大的测量误差。张玉杰等^[18]根据煤粉燃烧的实际特性,对火焰特性和 CCD 光谱特性进行了简化,并在简化基础上进行了校正,使测量结果与双色高温计的测量结果较相符,误差在±5%左右。

表 1 分析对比了 3 种火焰温度测量方法的优劣,热电偶测温采用便捷、简单的仪器,但精确度不高,且只能同时单点测温,对火焰扰动较大;抽气式高温测温准确度较热电偶高,但操作复杂,对气流易造成干扰。光谱法有足够的精确度,对火焰扰动较小,可同时多点测量,能进行三维温度场重建,但相较于前 2 种方法,其操作复杂、造价高。

表 1 3 种常见火焰温度测量法的优点和缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of three common flame temperature measurements

火焰温度测量法	优点	缺点
热电偶	灵敏度高,操作简单,易携带	精确度不高,材料有寿命,易损坏,只能获得单点温度
抽气高温测温法	准确度高,误差较小	材料使用寿命短,操作较复杂,对气流存在干扰
光谱法	准确度高,灵敏度高,响应时间短,三维温度场重建	操作复杂,造价高

2 气体和固体的取样与检测

2.1 气体和固体的取样

取样是从测量点提取具有代表性的混合物试样,以便对其进行分析。为了使样品更具代表性,必须对煤粉燃烧火焰中浓度不可避免的波动进行跟踪,除了各组成气体分压外,所取样品必须保持原来的颗粒浓度和颗粒分布情况。

通常从煤粉火焰中提取的混合物均处于迅速演变的状态下,包括煤粉热解、各燃烧反应等。为了保

持原混合物的浓度,需要等速取样,取样时间至少在 1 min 以上,经验表明,当取样时间大于 1 min 时,所取混合物的平均浓度再现性较好,当超过 3 min 时,所取混合物的平均分压和平均浓度的结果更为理想^[13];另外需要“骤冷”,当取样枪在燃烧器或炉膛内取样时,气流中包含尚在进行化学反应的物质,取样管内正在进行化学反应,应采取合适的冷却方法,中止其进行化学反应。研究表明,将试样冷却至 300 ℃时,气体和煤粉颗粒即使在有氧条件下也停止反应,一般冷却 3 ms 即可达到 300 ℃^[4]。冷却取样法按照冷却介质可分为水冷取样法、油冷取样法、风冷取样法。由于水的比热容相对较大,水冷取样法是应用最广泛的取样方法。

水冷取样法是分析燃烧器内烟气实时成分的通用工具。水冷取样管如图 3 所示,锅炉运行时,燃烧器内温度为 800~1 500 ℃,使一般低温烟气分析仪无法测量其烟气组分。而水冷式取样法的优点包括:① 将烟气样品降温至烟气分析仪适用的温度;② 可将烟气样品极速骤冷,冻结其高温下进行的化学反应,使样品更能代表取样点的成分;③ 可将烟气分析仪测量不到的样品转移到他处收集起来以供测量,拓展了烟气分析仪的使用范围。在燃烧器运行中,燃料燃烧产生的烟气组成和颗粒可反映运行工况及其变化。通过测定的 CO、H₂ 等可燃气体含量,可研究燃烧器以及炉膛的气氛场;通过测定氮硫化物、飞灰残炭等含量,配合烟气的脱硫脱硝、除尘以及燃烧技术的升级。

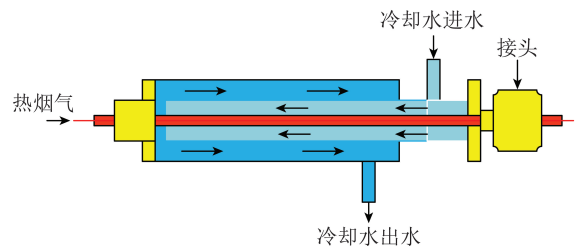


图 3 水冷取样法示意

Fig.3 Schematic diagram of water-cooled sampling

杨玉^[19]采用水冷式取样法对 600 MW 电站锅炉的低 NO_x 旋流燃烧器火焰进行研究,测量了燃烧器沿程烟气组分,分析了该低 NO_x 旋流燃烧器的低氮燃烧特性等。Ti 等^[20-21]采用水冷取样法对不同工况下燃烧器和炉膛中的烟气组成进行了测定,分析了 O₂、CO₂、CO、NO_x 浓度随燃烧器结构参数和运行参数的变化,揭示了 NO_x 的生成和还原机理,表明水冷取样法可实现高温下气固两相的准确取样,为烟气各组分浓度场的测量和燃烧器燃烧特性的研究奠定基础。

2.2 固体样品检测

煤粉燃烧过程中,会产生大量煤焦颗粒,其物理和化学性质决定煤粉的燃烧特性,如几何形状、颗粒密度、孔隙结构等均是煤粉颗粒燃烧过程中传质、传热的重要因素,影响燃烧器中煤的着火和燃烧等特性。另外,煤焦中含氮官能团、含碳官能团等含量和各化学元素的组成比例,均对煤粉的燃烧以及污染物的生成关系密切,固体样品的检测分析可为燃烧器的开发定型提供依据。

2.2.1 X射线光电子能谱分析(XPS)

XPS是测量煤焦固体颗粒含量的常用方法之一,其测量原理是用X射线辐射煤焦样品,原子的核电子或价电子激发出,由于核电子结合能是元素的特征,通过测量被激发出的光电子结合能确定元素的氧化状态或结合能,以结合能 E_k 为横坐标、相对强度(脉冲1s)为纵坐标,含氮官能团含量由其面积分数来确定。XPS可测定除氢和氦以外所有元素的特征^[22]。XPS可定量分析,无需在线分析,但其仅检测煤焦表面元素含量,其准确性需通过其他方法定量测量煤焦中体积元素含量作比较,在分析煤粉或煤焦中煤氮官能团时,其表面氮含量和体积氮含量线性相关性较好^[23]。另外XPS易受环境及人为操作因素干扰,操作难度大。

2.2.2 灰示踪法

灰示踪法(也称灰平衡法)是根据燃烧前后灰分质量不变的性质来表示其他物质的方法。假设煤样中灰分在燃烧前后保持不变,将煤样和燃烧后的煤焦样进行工业分析,通过灰分折算所求值,计算公式^[24]为

挥发分析出量:

$$V = \frac{1 - A_0/A_1}{1 - A_0} \quad (1)$$

式中, V 为挥发分析出量; A_0 为原煤样中灰分质量分数; A_1 为燃烧后煤焦中灰质量分数。

煤焦燃尽度:

$$B = \left(1 - \frac{A_0}{A_1} \frac{100 - A_1}{100 - A_0}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中, B 为采集的煤焦燃尽度。

C、H、N等元素释放率:

$$R_i = \left(1 - \frac{i_1}{i_0} \frac{A_0}{A_1}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式中, R_i 为*i*元素的释放率; i_0 为煤粉中初始*i*元素含量; i_1 、 A_1 为煤焦中*i*元素含量。

灰示踪法优点为只取部分灰样即可分析计算,无需收集全部灰样,降低了操作难度,且不需在线气

体分析设备,降低了试验装置的复杂性。但灰示踪法的基本假设是煤灰质量在燃烧过程中不变,煤中灰分不受颗粒停留时间、温度变化影响,要求灰分不挥发,或至少在试验中的挥发程度与工业分析中标准灰分试验条件下发生的程度相同,但有学者指出,对于低灰分(小于10%)的固体燃料,灰示踪法不适用,因为在高温条件下,灰中低沸点的Na/K盐和碳酸盐类易分解,造成测量误差^[25-26]。Ballantyne等^[27]也认为,低灰分煤在较低煤转化率下的不确定性加大,且某些煤种(如褐煤)在实际反应气氛条件与标准灰分试验条件不同。灰示踪法虽存在一定误差,但总体误差不大,是计算煤转化率相对可靠的方法。

表2为XPS和灰示踪法的比较,两者均为煤粉燃烧过程中测量煤焦样品化学组成的常用方法,均可定量分析固体煤焦样品,但两者检测侧重点不同:XPS主要分析化学官能团组成,灰示踪法着重分析其元素组成,计算煤转化率、元素释放率等;XPS操作较繁琐,灰示踪法操作简单。

表2 2种固体样品检测法优缺点比较

Table 2 Comparison on advantages and disadvantages of two solid sample detection methods

固体检测方法	优点	缺点
XPS	定量分析,测量固体表面化学官能团组成	操作难度大,易受干扰
灰示踪法	定量分析,分析煤转化率	操作简单,易获得结果

2.3 气体样品检测

煤粉燃烧过程中产生的气体多数为污染气体,通过对燃烧过程中烟气成分的检测,可针对性采取污染物脱除技术或调整燃烧组织、工况,以最大程度减少污染气体的排放。烟气成分可评定煤粉燃烧过程的完全程度、燃料燃烧的工况、炉内各阶段燃烧的特点、炉内工况与污染物排放的关系。

2.3.1 电化学检测法

电化学检测法是根据被测气体的电化学性质测定物质组成及含量的分析方法,是检测煤粉燃烧产生的有害气体的主要方法之一。在工程实际测量中,电化学检测法依托于电化学气体传感器来测量气体组成,电化学传感器相当于一个电化学电池,由电解液和电极组成,当检测气体时,某种气体在电极处发生氧化还原反应,检测此时的电流,即可得出气体浓度。与传统传感器相比,电化学传感器作为气体检测的核心环节,其质量直接关系到气体检测的精度^[28]。通常电化学传感器具有体积小、操作简

单、性能可靠、携带方便等优点,且设备成本低,在工程实践中多用于烟气的在线监测。但电化学传感器选择性差,当部分非目标气体与目标气体的电解位相近时,会产生交叉干扰^[29],一般通过内置化学过滤器吸附非目标气体,或选择适宜的催化剂以抑制非目标气体在电解液中的反应。

2.3.2 红外检测法

红外检测法是经典的气体分析方法^[30],广泛应用于煤粉燃烧过程中烟气的测量。根据朗伯-比尔定律,特征吸收强度与气体浓度成正比,利用不同气体对红外波长的电磁波能量具有特殊的吸收特性原理,进行气体成分和含量分析。红外检测法通过红外传感器进行测量,与电化学传感器相比,具有寿命长、响应时间快、抗中毒性好、反应灵敏性能可靠等优点,但功耗大、结构复杂,价格较贵。

2.3.3 化学溶液吸收法

化学溶液吸收法是定量分析 NH_3 和 HCN 的常用方法之一, NH_3 与 HCN 是煤粉燃烧过程中形成 NO_x 的重要前驱物,研究煤粉燃烧过程中 NH_3 与 HCN 的转化,对于揭示燃烧器的低氮特性具有重要意义。利用酸碱吸收的原理,对 NO_x 的前驱体进行定量标定,但目前该法仅适用于实验室研究,主要由于在工程应用中,煤粉燃烧过程中含氮中间体难以捕捉。其测量原理是 HCN 与 NH_3 分别通过一定体积、浓度的 NaOH 溶液和 H_2SO_4 溶液用并联吸收的方法进行吸收,吸收装置如图 4 所示。吸收后的样品通过硝酸银滴定法(GB 7487—87)与水杨酸-次氯酸盐分光光度法(GB/T14679—93)分别对 HCN 与 NH_3 进行测定。含氮化合物(HCN 、 NH_3)的析出浓度 δ 计算公式为

$$\delta = \frac{m_1}{m_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中, m_1 为产生含氮化合物中的含氮量; m_0 为原始煤中的含氮量。

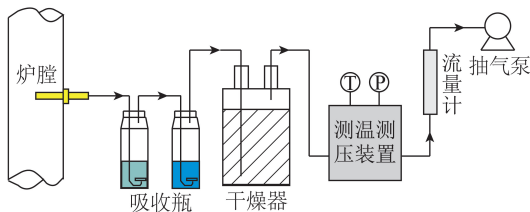


图4 化学溶液吸收法的原理示意

Fig.4 Schematic diagram of the chemical solution absorption method

化学溶液吸收法在实验室研究煤粉燃烧过程中生成的 NO_x 前驱物有较强的适用性。欧阳子区

等^[31]采用化学溶液吸收法、傅里叶变换红外光谱法和电化学法对煤气化过程和燃烧过程产生的含 N 化合物(NH_3 和 HCN)进行测量,发现 NH_3 与 HCN 的化学溶液吸收法测量结果精确度更高,其他 2 种方法测量结果误差较大,不宜采用。宋国良等^[32]采用化学溶液吸收法研究了不同煤种、粒径和炉温下,煤粉浓度对 NH_3 与 HCN 析出特性的影响。化学溶液吸收法为研究煤粉燃烧含氮中间体的演化提供了方法。

表 3 对电化学和红外 2 种气体检测传感器以及化学溶液吸收法进行比较,前 2 者可测量多种气体,具有较强的适用性,但红外检测法检测范围更广。溶液吸收法检测 NH_3 和 HCN 浓度,不易捕捉,且易受其他因素干扰,测量较繁琐,工程应用较少。

表 3 3 种气体样品检测法优缺点比较

Table 3 Comparison on advantages and disadvantages of three gas sample detection methods

气体分析法	优点	缺点
电化学传感器	结构简单,测量多种气体,适用性强	寿命短,响应时间短,抗中毒性差
红外传感器	性能稳定,测量多种气体,适用性强	功耗大,结构复杂,价格高
化学溶液吸收法	选择性好,可检测 NH_3 、 HCN 等含氮中间体	操作难度大,工程应用少

4 结 语

本文介绍了煤粉燃烧器热态研究中常用的测量火焰温度 3 种方法和火焰中气固相的取样及检测分析方法。在现场测量时,尽可能采用多种测量方法或多次测量,以规避可能导致误差的因素。采用多种测量方法进行比较,正确、规范操作,多次测量取平均值,以便得到更准确的结果。通过多种测量方法可建立煤粉燃烧器热态下三维温度场、三维气氛场等,多维度研究煤粉的燃烧过程及污染物生成过程,从而采取有效手段治理污染,这对于新型高效低氮燃烧器的开发以及煤粉工业锅炉污染物的综合治理具有重要意义。

参考文献 (References):

- [1] 李壮.浅谈燃气锅炉及其发展前景[C]//山东土木建筑学会燃气专业委员会年会.济南:[s.n.],2001:268-271.
LI Zhuang. Discussion on gas-fired boiler and its development prospect [C]//Annual Meeting of Gas Professional Committee of Shandong Civil Architecture Society. Jinan: [s. n.], 2001: 268-271.

- [2] 肖春英. 解读 2014 版锅炉大气污染物排放标准[J]. 科技与企业, 2014(17): 155.
XIAO Chunying. Interpretation of 2014 boiler air pollutant emission standards[J]. Science Technology and Enterprise, 2014(17): 155.
- [3] 郑浦水. 锅炉冷态试验技术[J]. 华北电力技术, 1991(5): 29-33.
ZHENG Pushui. Cold test technology of boiler[J]. North China Electric Power, 1991(5): 29-33.
- [4] 岑可法. 锅炉燃烧试验研究方法及测量技[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987: 1-32.
CEN Kefa. Research method and measurement technology of boiler combustion test[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1987: 1-32.
- [5] 武雪宝. 浅析热电偶温度计量常见问题的处理对策[J]. 中国科技投资, 2017(17): 373.
WU Xuebao. Analysis on the countermeasures for common problems of thermocouple temperature measurement[J]. China Science and Technology Investment, 2017(17): 373.
- [6] 张晓东. 热电偶温度计量常见问题的处理措施探讨[J]. 中国标准化, 2018(8): 230-231.
ZHANG Xiaodong. Discussion on the treatment of common problems in thermocouple temperature measurement[J]. China Standardization, 2018(8): 230-231.
- [7] 陆建东. 热电偶的测温原理及误差分析[J]. 宁夏电力, 2007(S2): 76-81.
LU Jiandong. Temperature measurement principle and error analysis of thermocouples[J]. Ningxia Electric Power, 2007(S2): 76-81.
- [8] 张红. 热电偶测温系统误差剖析及处理对策[J]. 安徽工程大学学报, 2010, 25(2): 63-66.
ZHANG Hong. Error analysis and treatment countermeasures of thermocouple temperature measurement system[J]. Journal of Anhui University of Engineering, 2010, 25(2): 63-66.
- [9] 王魁汉, 吴玉锋, 王楠, 等. 谈谈热电偶的测温误差[J]. 计量技术, 2004(3): 60-62.
WANG Kuihan, WU Yufeng, WANG Nan, et al. Talk about the temperature measurement error of thermocouples[J]. Metrology Technology, 2004(3): 60-62.
- [10] KASKAN W E. The dependence of flame temperature on mass burning velocity[J]. Symposium on Combustion, 1957, 6(1): 134-143.
- [11] 李松. 燃用低挥发分煤中心给粉旋流燃烧技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
LI Song. Study on swirl combustion technology of central pulverized coal feeding for low volatile coal[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [12] 刘光奎. 双旋流煤粉燃烧器流动及燃烧特性试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
LIU Guangkui. Experimental study on flow and combustion characteristics of dual swirl pulverized coal burner[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [13] Chedaille J, brud Y. 火焰测量[M]. 宁宝林, 杨泽宽译. 北京: 冶金工业出版社, 1984.
CHEDAILLE J, BRUD Y. Flame Measurement[M]. NING Baolin, Yang Zekuan trans. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1984.
- [14] 岳亮亮. 热处理炉自动测试方案设计[J]. 中国计量, 2013(3): 72-73.
YUE Liangliang. Design of automatic test plan for heat treatment furnace[J]. China Metrology, 2013(3): 72-73.
- [15] 方庆艳, 姚斌, 江瑞宝, 等. W 型火焰锅炉炉内燃烧过程检测实验研究[J]. 热能动力工程, 2005, 20(4): 361-364.
FANG Qingyan, YAO Bin, JIANG Ruibao, et al. Experimental study on combustion process detection in W-type flame boiler[J]. Thermal Energy Engineering, 2005, 20(4): 361-364.
- [16] 周宏. 基于数字图像处理的火焰温度测量技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008: 1-61.
ZHOU Hong. Research on flame temperature measurement technology based on digital image processing[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2008: 1-61.
- [17] 杨春沪, 王淮生. 高温火焰温度场测量技术的发展现状[J]. 上海电力学院学报, 2008, 24(2): 149-153.
YANG Chunhu, WANG Huaisheng. Development status of temperature field measurement technology for high temperature flame[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2008, 24(2): 149-153.
- [18] 张玉杰, 吕岑. 基于彩色 CCD 炉膛火焰温度场测量方法研究[J]. 量子电子学报, 2004, 21(5): 674-678.
ZHANG Yujie, LYU Wei. Research on measurement method of flame temperature field based on color CCD furnace[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2004, 21(5): 674-678.
- [19] 杨玉. 大型电站锅炉低 NO_x 煤粉旋流燃烧器流动和燃烧的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015: 1-16.
YANG Yu. Study on flow and combustion of low NO_x pulverized coal swirl burner for large power plant boiler[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015: 1-16.
- [20] TI S, CHEN Z, LI Z, et al. Influence of primary air cone length on combustion characteristics and NO_x emissions of a swirl burner from a 0.5 MW pulverized coal-fired furnace with air staging[J]. Applied Energy, 2018, 211(3): 1179-1189.
- [21] WANG Q, CHEN Z, LIANG W, et al. Application of eccentric-swirl-secondary-air combustion technology for high-efficiency and low-NO_x performance on a large-scale down-fired boiler with swirl burners[J]. Applied Energy, 2018, 223: 358-368.
- [22] 杜一平. 现代仪器分析方法[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2015: 1-44.
DU Yiping. Modern instrumental analysis methods[M]. Shanghai: East China University of Technology Press, 2015: 1-44.
- [23] KAMBARA S, TAKARADA T, YAMAMOTO Y, et al. Relation between functional forms of coal nitrogen and formation of nitrogen oxide (NO_x) precursors during rapid pyrolysis[J]. Energy & Fuels, 1993, 7(6): 1013-1020.
- [24] 傅维镛. 煤燃烧理论及其宏观通用规律[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 1-27.
FU Weibiao. Coal combustion theory and its macro general law[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 1-27.
- [25] CHEN H, CHEN X, QIAO Z, et al. Release and transforma-

- tion characteristics of K and Cl during straw torrefaction and mild pyrolysis[J].*Fuel*,2016,167:31-39.
- [26] BADZIOCH S,HAWKSLEY P G W.Kinetics of thermal decomposition of pulverized coal particles[J].*Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*,1970,9(4):521-530.
- [27] BALLANTYNE T R,ASHMAN P J,MULLINGER P J.A new method for determining the conversion of low-ash coals using synthetic ash as a tracer[J].*Fuel*,2005,84(14):1980-1985.
- [28] 李颖,付金宇,侯永超.有害气体检测的电化学技术的应用发展[J].*科学技术与工程*,2018,18(3):132-141.
LI Ying, FU Jinyu, HOU Yongchao. Application development of electrochemical technology for detection of harmful gases[J].*Science Technology and Engineering*,2018,18(3):132-141.
- [29] 邓春华,黄锋.电化学气体分析仪特性分析与正确使用[J].*自动化与信息工程*,2012(5):7-9.
DENG Chunhua, HUANG Feng. Characteristic analysis and correct use of electrochemical gas analyzer[J].*Automation and Information Engineering*,2012(5):7-9.
- [30] 姜培刚.在线红外气体分析器的发展及工程应用研究[J].*分析仪器*,2009(6):77-86.
JIANG Peigang. Development and engineering application research of online infrared gas analyzer[J].*Analytical Instruments*,2009(6):77-86.
- [31] 欧阳子区,朱建国,矫维红,等.煤气化与燃烧生成烟气中含氮化合物的测试方法[J].*计测技术*,2013,33(3):37-40.
OUYANG Ziqu, ZHU Jianguo, JIAO Weihong, et al. Test method for nitrogenous compounds in flue gas generated by coal gasification and combustion[J].*Journal of Measurement Technology*,2013,33(3):37-40.
- [32] 宋国良,吕清刚,周俊虎,等.煤粉浓度对 HCN 与 NH₃ 析出特性的影响[J].*中国电机工程学报*,2008,28(17):49-54.
SONG Guoliang, LYU Qinggang, ZHOU Junhu, et al. Effect of pulverized coal concentration on precipitation characteristics of HCN and NH₃[J].*Proceedings of the CSEE*,2008,28(17):49-54.