

基于炉膛温度场声学在线监测系统的应用研究

袁江涛 胡良宽

郑州正兴环保能源有限公司, 河南 新郑 451100

[摘要]随着城镇化进程加速, 垃圾焚烧发电氮氧化物排放问题日益突出。传统选择性非催化还原 (SNCR) 技术受温度窗口限制, 脱硝效率受温度偏离影响。垃圾焚烧炉温度场呈现剧烈时空异质性, 传统测温技术无法适应。声学测温技术通过解析声波传播速度与介质温度关系, 实现焚烧炉温度场监测。文中建立非接触炉膛温度场声学在线监测系统, 实现炉排燃烧温度数字化, 为 SNCR 控制提供关键信息。系统由中央处理、声波发生与接收、DCS 通信及图像输出等单元组成, 具备全断面连续监测、非接触测量及动态温度场数据反馈等优势。实验表明, 声学测温数据与实际状况吻合, 满足使用需求。声学测温技术成为解决垃圾焚烧炉温度测量难题的重要方法。

[关键词]垃圾焚烧发电; 声学测温; 温度场

DOI: 10.33142/sca.v8i5.16441

中图分类号: TM62

文献标识码: A

Application Research on Acoustic Online Monitoring System Based on Furnace Temperature Field

YUAN Jiangtao, HU Liangkuan

Zhengzhou Zhengxing Environmental Protection Energy Co., Ltd., Xinzheng, He'nan, 451100, China

Abstract: With the acceleration of urbanization, the problem of nitrogen oxide emissions from waste incineration power generation is becoming increasingly prominent. The traditional selective non catalytic reduction (SNCR) technology is limited by the temperature window, and the denitrification efficiency is affected by temperature deviation. The temperature field of garbage incinerators exhibits severe spatiotemporal heterogeneity, which traditional temperature measurement techniques cannot adapt to. Acoustic temperature measurement technology achieves temperature field monitoring of incinerators by analyzing the relationship between sound wave propagation speed and medium temperature. A non-contact furnace temperature field acoustic online monitoring system is established in the article to achieve digitalization of grate combustion temperature and provide key information for SNCR control. The system consists of central processing, sound wave generation and reception, DCS communication, and image output units, and has advantages such as continuous monitoring of the entire cross-section, non-contact measurement, and dynamic temperature field data feedback. The experiment shows that the acoustic temperature measurement data is consistent with the actual situation and meets the usage requirements. Acoustic temperature measurement technology has become an important method to solve the problem of temperature measurement in garbage incinerators.

Keywords: garbage incineration power generation; acoustic thermometry; temperature field

引言

随着城镇化进程加速, 我国生活垃圾焚烧量不断攀升, 2022 年处理量已达 2.4 亿吨。然而, 焚烧过程产生的氮氧化物 (NO_x) 排放问题日益突出。人们环境保护意识不断增强, 对于 NO_x 排放要求也不断升高, 这对现有选择性非催化还原 (SNCR) 技术提出严峻挑战。SNCR 过程最大的影响因素是还原区温度, 俗称“温度窗口”, 约为 800~1100℃。实测数据显示, 当温度偏离最佳窗口时, 脱硝效率将会下降, 而氨逃逸量将不断增长, 不仅会造成还原剂浪费, 更会引发结晶导致除尘设备堵塞。垃圾焚烧炉因燃料组分复杂, 导致炉膛温度场呈现剧烈时空异质性。传统 SNCR 系统依赖热电偶进行温度监测, 但单点测量无法捕捉三维温度场动态变化, 导致喷氨控制严重滞后^[1]。现有的改进方案无法适应垃圾焚烧炉的温度测量, 如红外测温受粉尘干扰严重, 光学探针法则因高成本难以规模化应用^[2]。

声学测温技术通过解析声波传播速度与介质温度的关系, 为焚烧炉温度场监测提供了新思路。该技术已在航天、冶金领域实现较高精度的温度场重建^[3]。本文通过建立一种非接触的炉膛温度场声学在线监测系统, 将炉排燃烧温度数字化, 为垃圾焚烧发电厂 SNCR 控制提供重要的燃烧信息。

1 声学测温原理

垃圾焚烧发电厂炉排温度场声学检测技术, 作为一种前沿的非侵入式监测工具, 巧妙地运用了声学原理来实现燃烧区域温度场的可视化重构。这一技术深度融合了多维度声波传感网络与先进的断层扫描算法, 能够实时、精准地捕捉到炉排燃烧面的二维热场分布图谱。这一能力为垃圾焚烧发电厂的燃烧工况优化提供了不可或缺的数据支撑, 有助于提升燃烧效率, 减少污染物排放。

该检测系统通过在炉膛壁巧妙布置阵列式声波传感

器组,利用声波传播速度与介质温度之间的物理联系,实现了对炉内温度场的间接测量。声波发射单元会按照预设的时序激发声脉冲信号,而接收单元则负责精确测定每一路径的声波渡越时间。通过构建声波路径网络与温度场的复杂数学映射模型,并结合高效的计算机断层成像算法,最终能够绘制出炉膛横截面的温度梯度分布云图,为运维人员提供了直观、详尽的炉内温度信息^[4]。实验数据表明,声波传播时间与介质温度满足以下近似线性关系:

$$v = 331.45 + 0.61T$$

其中: v 表示声波传播速度, T 表示摄氏度。

相较于传统热电偶测温方式,该技术具备三大核心优势:其一,实现全断面连续温度监测,突破单点测量的局限性;其二,非接触式测量避免高温腐蚀风险,延长设备使用寿命;其三,动态温度场数据为燃烧控制系统提供实时反馈,有效预防水冷壁管结焦、爆管等安全隐患。通过建立温度场与燃烧参数的关联模型,不仅可以正确选择喷氨区域,提高 SNCR 脱硝效率,还可精准调控二次风量、垃圾给料速率等关键参数,使炉膛热负荷分布更趋合理,显著提升垃圾焚烧的稳定性和热效率^[5]。

2 炉膛温度场声学在线监测系统组成

炉膛温度场声学在线监测系统是一个高度自治、独立运作的系统,它在执行监测任务时,能够自主运行,完全不会干扰或影响垃圾焚烧发电厂机组中其他设备的正常运作。这一独立性确保了发电厂的稳定运行和高效产出。在声波测点单元的布局设计上,该系统充分展现了高度的灵活性与适应性。它优先选用锅炉上已经存在的热电偶孔以及为吹灰操作预留的孔位作为声波测量的孔位,以最大化地利用现有资源。若锅炉上未预留足够的孔位以供使用,该系统则会采取在水冷壁上钻孔的方式,以确保声波测量的精准性与有效性。这种设计既满足了测量的需求,又尽可能地减少了对锅炉结构的改动。

关于系统的集成架构,其设计清晰明了,如下图所示:

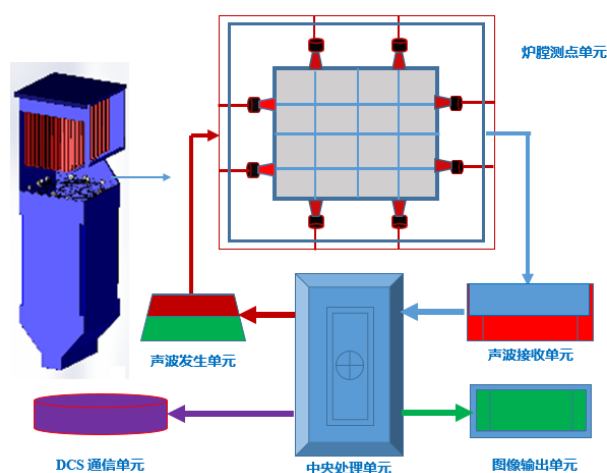


图1 声学在线监测系统集成图

该监测系统主要由以下几个核心单元构成:中央处理单元、声波发生单元、声波接收单元、DCS(分布式控制系统)通信接口以及图像输出模块。这些单元各司其职,协同工作,共同确保了整个系统的高效运行与稳定输出,为发电厂提供了实时、准确的炉膛温度场信息。

2.1 中央处理单元

该系统的中枢是中央处理单元,它承担着处理所有信号数据、执行核心计算任务及发出控制指令的重任。为了生成足够的声源声压级,声波发生系统特别选用了电动或气动声波发生器,这些发生器经过专门设计,能够确保声波信号的高质量输出。

中央处理单元作为整个系统的神经中枢,不仅承载着繁重的数据处理与控制任务,还提供了一个直观、用户友好的人机界面,确保了系统的高效操作、灵活调整与便捷维护。其软件设计基于“模块化”编程理念,这一创新思路将整个系统划分为多个独立而又相互关联的功能模块,包括参数设置模块、数据采集模块、示波模块、声波发射控制模块、滤波模块、声波飞渡时间计算模块、温度场可视化模块以及历史温度趋势显示模块等。

这些模块各司其职,共同协作,使得中央处理单元能够高效处理所有信号数据,执行核心运算与控制任务。所有复杂的功能均在后台自动运行,无需人工干预,大大提升了系统的自动化水平。通过采用先进的信号处理算法,中央处理单元能够精确计算声波飞行时间与路径温度,进而对炉膛内的温度场进行精细分区与等温线描绘,实现了温度场的直观可视化。同时,系统还能自动存储历史数据,便于用户进行回溯分析与趋势预测。

为了满足不同应用场景的需求,中央处理单元还具备与DCS(分布式控制系统)的多种通讯模式,能够无缝集成至现有系统中。更重要的是,该单元能够根据炉膛的实际尺寸,自动输出喷氨区域温度窗口对应的坐标区间及精确坐标值,为SNCR(选择性非催化还原)控制系统提供了精准的控制依据,从而实现了氨气的精确喷射,优化了脱硝效率,降低了运行成本。

综上所述,中央处理单元以其强大的数据处理能力、灵活的模块化设计以及与DCS系统的无缝集成,为锅炉系统的安全、高效运行提供了坚实的技术支撑。

在系统的工作流程中,中央处理单元首先发出具有特定特性的声波数字信号。这些信号经过声波发生单元的相关设备转换为模拟信号,并进行放大处理,以驱动炉膛测点单元的声波发生器发出特定的声波信号。当这些声波信号在炉膛内传播并被位于炉膛测点单元的声波接收传感器接收后,它们会被再次转换为数字信号,并传回中央处理单元进行进一步处理。

中央处理单元利用特定的算法对这些声波信号进行深度分析,以重建炉膛内的温度场。重建后的温度场数据

通过 DCS 通信接口被实时提供给 DCS 系统,用于监控与分析。同时,这些数据还通过图像输出模块以直观、清晰的方式显示出来,方便操作人员随时掌握炉膛内的温度分布情况,为生产决策提供有力支持。

2.2 控制声波发声及接收单元

控制声波发生单元的相关设备首先将信号转换为模拟形式,并对其进行放大处理,随后驱动炉膛测点单元的声波发生器精准发出特定声波信号。声波接收传感器捕获这些信号后,通过声波接收单元将其转换回数字信号。系统支持自动吹扫功能,可根据实际工况灵活设置反吹时间。

在声波接收方面,系统配备了特制的耐高温声波传感器,这些传感器能够在高温环境下稳定工作,准确捕捉炉膛内的声波信息。为了适应不同型号的锅炉,炉膛测点单元安装了定制的声波导管,这些导管不仅具有出色的隔热性能,还能有效隔离燃烧产生的各种副产物,为声波传感器提供可靠的保护。

声学测温系统中的声波发生单元,其核心在于采用先进的电动声波发生系统,该系统具备频率调节功能,频率范围广泛,从 100~20000Hz 可调,这一特性使其能够有效排除炉膛内复杂背景噪声的干扰,确保测量数据的准确性。同时,声波发生单元能够提供强大的声源声压级,声压级范围在 110~140dB 之间可调,确保了声波信号在炉膛内部的有效传播与接收。

声波接收单元则选用了专为高温环境设计的抗高温声波传感器,其耐高温性能卓越,能够在炉膛的高温条件下稳定工作,准确接收反射回来的声波信号。

声波收发单元通过精密的声学原件实现声波在锅炉炉膛内的发射与接收,这些单元根据锅炉炉膛的具体布局进行合理布置,以确保声波信号的全面覆盖与精确测量。此外,声波收发单元还配备了自动吹扫功能,通过连接厂用压缩空气至声波收发器单元上的电磁阀,实现定期的自动吹扫,有效防止了烟气中的灰尘堵塞及结焦问题,确保了声学测温系统的长期稳定运行。

2.3 图像处理单元

在系统的运作过程中,所有复杂的功能计算与数据处理任务均在中央处理单元的后台悄然自动完成,用户无需进行任何手动干预。当系统运行起来时,用户只需简单地直接观看图像输出单元所呈现的输出画面,即可直观获取所需信息。系统的主界面设计为一个综合的管理界面,便于用户对整体运行状况进行监控。除此之外,系统还配备了多个辅助界面,如测点分布图、燃烧温度分布图、等温线图以及燃烧平面显示图等,这些界面均可以根据用户的实际需求进行灵活定制,以展现不同功能画面。

3 实验模拟

以某垃圾焚烧厂为例,结合垃圾焚烧实际工况,采用先进的声学技术在炉膛及炉排上方燃烧区域分别开发温

度声学在线监测系统,将温度以形象化和数字化的方式呈现出来。采用技术路线如下所示:

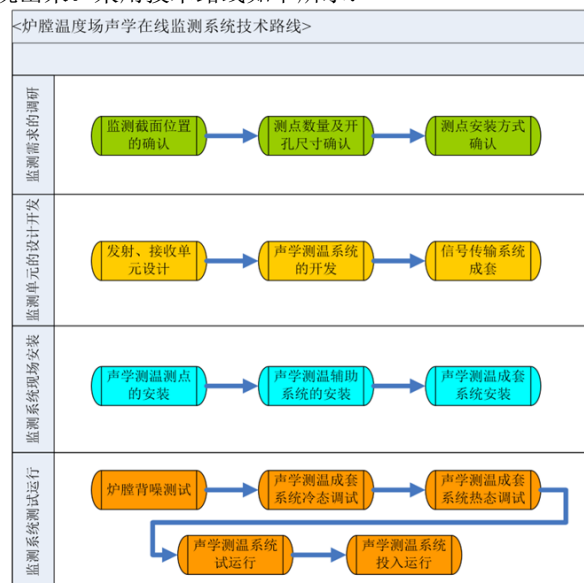


图 2 技术路线图

(1) 炉膛燃烧背景噪声研究

采用声学测温技术对炉膛温度场进行测量,需先对炉膛热态燃烧背景噪声进行分析,进而开发针对于本炉膛的电动声源系统。

(2) 测点布置方式对测量影响性

在声学测温系统应用中,其测点的布置方式受到不同类型锅炉的限制,首选的方案是利用现有的观火孔和短吹孔。针对现场炉膛截面特性及 CFD 数值模拟结果合理选型,布置发生器和接收器。

(3) 不同测点下声场模拟研究

锅炉炉膛温度场声学在线监测系统中声音信号通过声波导管进入炉膛,具有很强的指向性,这就使得不同测点接收到的声信号有很大的不同,拟采用声学设计软件构建锅炉平台声学测点,进行热态的声场仿真。

(4) 不同测点下温度场模拟研究

针对锅炉的现场情况,开发的温度场模拟软件对测温层进行温度场的模拟,对燃烧情况进行分析研究。

(5) 强背景噪声等复杂炉内条件下的声信号提取方法研究

实现炉膛截面的二维温度场重建,属于“由效果反求原因”的反问题研究。强背景噪声等复杂炉内条件下的声信号提取方法是整个项目的技术关键之一。

(6) 温度场重建算法研究

在实验室环境下搭建声学测温实验台,对重建算法进行试验研究,确保其可靠性。

根据上述内容逐步建立声学测温测点安装位置如下图所示。

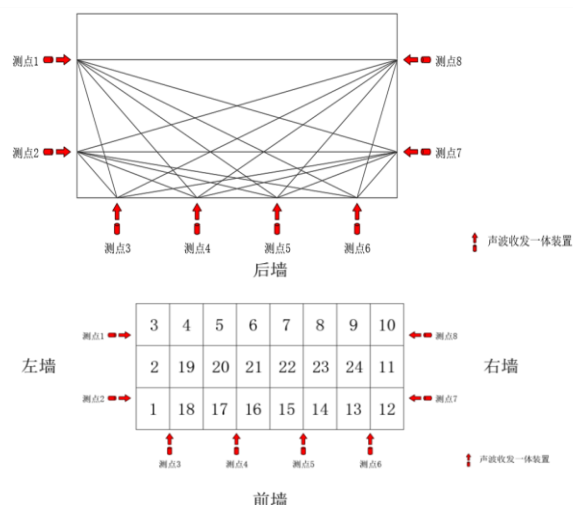


图3 第一烟道声学测温测点安装位置示意图

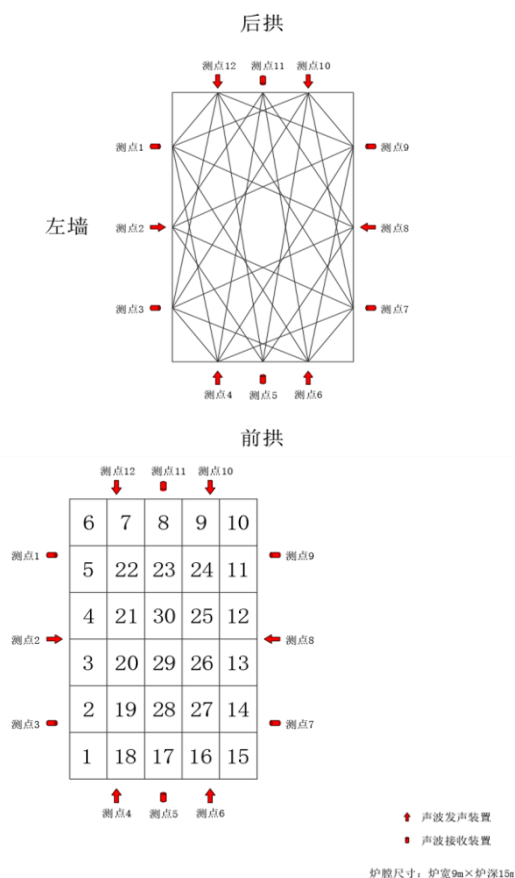


图4 炉排上部声学测温测点安装位置示意图

实验结果如下图所示:

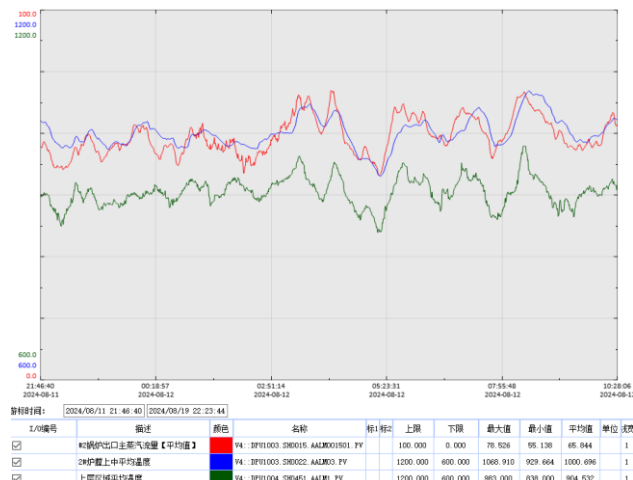


图5 实验结果对比图

通过与热电偶测温实时对比,声学测温数据与实际生产状况相吻合,满足使用需求。

4 结论

基于声学法的炉膛温度场可视化技术是一项重要的工业测量技术,用于实时监测高温烟气温度分布。该技术凭借高精度、宽测温范围、大测量空间、非接触式操作、实时连续监测及维护简便等优势,受到广泛关注和应用,成为国内外研究热点。它使运行人员能直观了解锅炉燃烧状态,打破了炉膛的“黑匣子”状态。相较于热电偶的点测量,声学技术实现了二维温度场测量,准确反映烟气真实温度,同时避免了热电偶受对流和辐射换热的影响。作为非接触式测量,该技术无需设备深入炉内,运行稳定可靠,减少了设备损坏和维护需求。

【参考文献】

- [1] 林焕新,张宝松.垃圾焚烧炉炉膛先进测温装置应用[J].南方能源建设,2022,9(2):46-52.
- [2] 孙成永,尚江伟.垃圾焚烧厂炉膛温度监测技术探讨[J].环境与发展,2019,31(9):138-140.
- [3] 左臣蒙.航空发动机燃烧室温度场的声学测温方法研究[D].沈阳:沈阳航空航天大学,2018.
- [4] 唐林峰.基于声学法的炉膛温度场测量系统设计与实现[D].南京:东南大学,2023.
- [5] 朱皓凯.BWCPS 声波在线温度场监测系统研究与应用[J].科学技术创新,2024(23):45-48.

作者简介:袁江涛(1987-),男,山东省菏泽市巨野县人,热控工程师,从事垃圾焚烧发电厂热控及自动化工作。