

电除尘器集成烟气余热回收系统的设计与性能研究

蔡柯明

浙江天洁环境科技股份有限公司 311800

【摘要】随着环保要求的日益严格和能源高效利用的需求不断增长,电除尘器在工业废气处理中的地位愈发重要。将烟气余热回收系统与电除尘器集成,不仅能有效提升能源利用效率,还能改善电除尘器的运行性能。本文深入探讨了电除尘器集成烟气余热回收系统的设计方案,包括系统架构、关键设备选型等,并对其性能进行了全面研究,涵盖热回收效率、除尘效率变化以及系统稳定性等方面。通过理论分析、数值模拟和实验验证,揭示了该集成系统的优势与潜在问题,为其在工业领域的广泛应用提供了坚实的理论与实践依据。

【关键词】电除尘器;烟气余热回收;系统设计;性能研究

Study on the design and performance of the integrated flue gas waste heat recovery system

Cai Keming

Zhejiang Tianjie Environmental Technology Co., LTD. 311800

【Abstract】 With the increasingly strict requirements of environmental protection and the increasing demand for the efficient use of energy, the role of electrostatic precipitator in the industrial waste gas treatment is becoming more and more important. The integration of the flue gas waste heat recovery system and the electrostatic precipitator can not only effectively improve the energy utilization efficiency, but also improve the operation performance of the electrostatic precipitator. In this paper, the design scheme of electric precipitator integrated flue gas waste heat recovery system, including system architecture, key equipment selection, etc., and conducted a comprehensive study on its performance, covering the heat recovery efficiency, dust removal efficiency change and system stability. Through theoretical analysis, numerical simulation and experimental verification, the advantages and potential problems of the integrated system are revealed, which provides a solid theoretical and practical basis for its wide application in the industrial field.

【Key words】 electrostatic precipitator; smoke waste heat recovery; system design; performance study

一、引言

在工业生产过程中,众多行业如电力、钢铁、化工等会产生大量含有粉尘及余热的烟气。传统的电除尘器主要致力于粉尘的高效去除,以满足环保排放标准,但对烟气中蕴含的大量余热往往未加以有效利用,造成了能源的极大浪费。据统计,工业烟气排放带走的热量占总能耗的10%~30%,这一可观的能量若能回收利用,将对节能减排和企业经济效益提升产生积极影响。同时,将烟气余热回收系统与电除尘器集成,在一定程度上可优化电除尘器的运行工况,进一步提高除尘效率。因此,开展电除尘器集成烟气余热回收系统的设计与性能研究,具有重要的现实意义和广阔的应用前景。

二、电除尘器与烟气余热回收系统概述

(一) 电除尘器工作原理与特点

电除尘器利用高压电场使气体电离,粉尘颗粒荷电后在

电场力作用下向集尘极运动并被捕集。其具有除尘效率高,可达99%以上;处理风量大,能适应大规模工业生产;运行阻力小,能耗相对较低等优点。但电除尘器对粉尘性质较为敏感,如粉尘比电阻过高或过低都会影响除尘效果。当粉尘比电阻大于 $10^{11}\Omega\cdot\text{cm}$ 时,易出现反电晕现象,导致除尘效率下降;当粉尘比电阻小于 $10^4\Omega\cdot\text{cm}$ 时,粉尘在集尘极上难以沉积,同样影响除尘性能。

(二) 烟气余热回收技术现状

常见的烟气余热回收技术包括热管式换热器、板式换热器、回转式换热器等。热管式换热器具有传热效率高、结构紧凑、等温性好等优点,在烟气余热回收领域应用较为广泛。它通过管内工质的相变传热,将烟气中的热量高效传递给被加热介质。板式换热器则具有传热系数高、占地面积小、易于清洗维护等特点,适用于对空间要求较高的场合。回转式换热器利用转子的旋转实现烟气与空气或水等介质的热量交换,其优点是蓄热能力强、热回收率高,但结构相对复杂,存在一定的漏风问题。然而,这些传统的余热回收技术在

电除尘器集成时,面临着如何合理布局、协同工作以及适应电除尘器运行工况等诸多挑战。

三、电除尘器集成烟气余热回收系统设计

(一) 系统总体架构设计

电除尘器集成烟气余热回收系统主要由烟气预处理模块、余热回收模块、电除尘模块和控制系统组成。在系统架构设计中,充分考虑各模块之间的协同工作关系。烟气首先进入预处理模块,在该模块中对烟气进行降温、调质等处理,以改善粉尘的比电阻特性,提高电除尘器的除尘效率。同时,初步回收部分烟气余热。经过预处理的烟气进入余热回收模块,通过高效换热器将烟气中的余热传递给循环水或其他热媒介质,实现热量的进一步回收利用。回收余热后的低温烟气再进入电除尘模块进行粉尘净化。控制系统实时监测系统各部分的运行参数,如烟气温度的、流量、压力、粉尘浓度以及余热回收量等,并根据设定的控制策略自动调整各模块的运行状态,确保系统稳定、高效运行。

(二) 关键设备选型与设计

1. 余热回收换热器选型

根据电除尘器的烟气流量、温度以及热回收需求,选择合适的余热回收换热器。对于烟气流量大、温度较高且空间有限的场合,热管式换热器是较为理想的选择。其传热效率高,能够在较小的空间内实现大量热量的传递。在设计热管式换热器时,需合理确定热管的管径、长度、数量以及排列方式等参数。通过热工计算,确保换热器的传热面积满足余热回收要求。同时,考虑到烟气中含有粉尘等杂质,为防止热管堵塞,需对热管表面进行特殊处理,如采用防粘涂层或增加自清灰装置。

2. 电除尘器优化设计

为了更好地与烟气余热回收系统集成,对电除尘器进行优化设计。一方面,调整电除尘器的电场参数,如电场强度、电极间距等。在回收余热后,烟气温度降低,粉尘比电阻可能发生变化,通过优化电场参数可适应这种变化,保证除尘效率。另一方面,改进电除尘器的清灰系统。由于回收余热后烟气湿度可能增加,粉尘粘性变大,传统的清灰方式可能无法满足需求。采用高频振打清灰或声波清灰等新型清灰技术,能够有效清除集尘极上的粉尘,防止粉尘堆积影响除尘效果。

3. 控制系统设计

控制系统采用分布式控制系统(DCS),通过传感器实时采集系统各部分的运行数据,并将数据传输至中央控制器。中央控制器根据预设的控制策略和算法,对各执行机构进行控制。例如,当烟气温度过高时,控制系统自动调节余

热回收换热器的循环水流量,增加热交换效率,降低烟气温度;当电除尘器的除尘效率下降时,控制系统调整电场参数或清灰系统的工作频率,以提高除尘效果。同时,控制系统具备故障诊断和报警功能,当系统出现异常情况时,及时发出警报并采取相应的保护措施,确保系统安全运行。

四、电除尘器集成烟气余热回收系统性能研究

(一) 热回收效率分析

1. 理论计算模型建立

基于传热学原理,建立电除尘器集成烟气余热回收系统的热回收效率理论计算模型。以热管式换热器为例,热回收效率可表示为:

$$\eta = \frac{Q_{\text{回收}}}{Q_{\text{烟气}}} \times 100\%$$

其中, $Q_{\text{回收}}$ 为回收的热量,可通过热平衡方程计算得出,即 $Q_{\text{回收}} = m_{\text{烟气}} c_{p1} (T_{\text{进}} - T_{\text{出}})$, $m_{\text{烟气}}$ 为烟气质量流量, c_{p1} 为烟气定压比热容, $T_{\text{进}}$ 和 $T_{\text{出}}$ 分别为烟气进入和离开余热回收换热器的温度; $Q_{\text{烟气}}$ 为烟气带入系统的总热量, $Q_{\text{烟气}} = m_{\text{烟气}} c_{p1} T_{\text{进}}$ 。通过该模型,可以分析不同运行参数如烟气流量、温度、换热器传热系数等对热回收效率的影响。

2. 影响因素研究

通过理论计算和数值模拟发现,热回收效率受多种因素影响。首先,烟气流量和温度对热回收效率影响显著。烟气流量越大、温度越高,可回收的热量越多,热回收效率相应提高。其次,换热器的传热系数是决定热回收效率的关键因素之一。提高换热器的传热系数,如通过优化换热器结构、选择合适的换热材料等方式,能够有效提高热回收效率。此外,换热器的结构设计、烟气与热媒介质的流动方式等也会对热回收效率产生一定影响。例如,采用逆流式换热方式比顺流式换热方式具有更高的热回收效率。

(二) 除尘效率变化研究

1. 实验研究方法

搭建实验平台,模拟电除尘器集成烟气余热回收系统的实际运行工况,研究余热回收过程对除尘效率的影响。实验中,采用不同性质的粉尘和模拟烟气,通过调节余热回收系统的运行参数,改变烟气的温度、湿度等条件,同时监测电除尘器的除尘效率变化。除尘效率采用粉尘浓度检测法进行测量,通过对比电除尘器进出口的粉尘浓度,计算除尘效率。

2. 结果与分析

实验结果表明,在一定范围内,回收烟气余热降低烟气温度后,电除尘器的除尘效率有所提高。这是因为烟气温度

降低,粉尘比电阻向有利于除尘的范围变化,减少了反电晕现象的发生。然而,当烟气温度过低或湿度增加过大时,除尘效率会出现下降趋势。这是由于低温高湿环境可能导致粉尘在电极表面结块,影响电场分布和清灰效果。此外,余热回收过程中若对烟气调质不当,也会对除尘效率产生负面影响。因此,在设计和运行电除尘器集成烟气余热回收系统时,需要综合考虑烟气温度、湿度等因素,优化余热回收策略,以确保在高效回收余热的同时,维持较高的除尘效率。

(三) 系统稳定性分析

1. 稳定性影响因素探讨

系统稳定性是电除尘器集成烟气余热回收系统可靠运行的关键。影响系统稳定性的因素主要包括设备故障、运行参数波动以及系统各部分之间的协同工作能力等。设备故障如换热器泄漏、电除尘器电极损坏等会直接影响系统的正常运行。运行参数波动,如烟气流量、温度、压力的突然变化,可能导致系统各部分工作状态失衡,影响热回收效率和除尘效率。系统各部分之间的协同工作能力不足,如余热回收模块与电除尘模块之间的衔接不畅,也会降低系统的稳定性。

2. 稳定性评估方法与措施

采用可靠性理论和故障树分析方法对系统稳定性进行评估。通过建立系统故障树,分析各种可能导致系统故障的因素及其相互关系,计算系统的可靠性指标。为提高系统稳定性,采取以下措施:一是选用质量可靠的设备,并加强设备的日常维护和保养,定期对设备进行检查和维修,及时更换老化或损坏的部件;二是优化控制系统的控制策略,提高系统对运行参数波动的自适应能力。例如,采用先进的预测控制算法,提前预测运行参数的变化趋势,并及时调整系统各部分的运行状态;三是加强系统各部分之间的协同控制,通过建立完善的通信机制和协调控制策略,确保余热回收模块、电除尘模块等各部分能够协调一致地工作。

五、实际案例分析

(一) 案例背景介绍

某燃煤电厂配备了多台大型电除尘器用于处理锅炉烟

气。为提高能源利用效率,降低生产成本,该厂对其中一台电除尘器进行了集成烟气余热回收系统的改造。该电厂锅炉烟气流量为 $5 \times 10^5 \text{ m}^3 / \text{h}$, 温度为 150°C , 粉尘浓度为 $500 \text{ mg} / \text{m}^3$ 。

(二) 系统设计与实施

根据电厂的实际工况,设计了以热管式换热器为核心的烟气余热回收系统。热管式换热器的传热面积为 2000 m^2 , 采用逆流式换热方式。对电除尘器的电场参数进行了优化调整,同时将清灰系统升级为高频振打清灰系统。控制系统采用 DCS 系统,实现对整个系统的实时监测和自动控制。在系统实施过程中,严格按照设计要求进行设备安装和调试,确保系统各部分连接可靠、运行正常。

(三) 性能评估结果

经过一段时间的运行,对该电除尘器集成烟气余热回收系统的性能进行了评估。热回收效率达到了 60% 以上,回收的余热用于加热锅炉补水,每年可节约大量的燃料消耗。电除尘器的除尘效率从原来的 99% 提高到了 99.3%, 出口粉尘浓度稳定在 $30 \text{ mg} / \text{m}^3$ 以下,满足了更严格的环保排放标准。系统运行稳定性良好,设备故障率明显降低,有效提高了电厂的经济效益和环保效益。

六、结论

本文对电除尘器集成烟气余热回收系统的设计与性能进行了深入研究。通过合理的系统架构设计、关键设备选型与优化以及控制系统的精心构建,实现了烟气余热的高效回收和电除尘器性能的提升。性能研究表明,该集成系统在热回收效率、除尘效率以及系统稳定性等方面具有显著优势。实际案例分析进一步验证了系统设计的可行性和有效性。未来,随着能源高效利用和环保要求的不断提高,电除尘器集成烟气余热回收系统将具有更广阔的应用前景。在后续研究中,可以进一步探索新型余热回收技术与电除尘器的深度集成,优化系统控制策略,提高系统的智能化水平,以更好地满足工业生产的需求。同时,开展对系统长期运行性能的监测与分析,为系统的持续改进提供数据支持。

参考文献

- [1]季海龙.300MW 循环流化床锅炉烟气余热回收节能改造技术探究[J].中国设备工程.2021,(14).
- [2]张苗,董欣,伍晚池,等.电袋复合除尘器在某钢厂烧结工序机尾除尘超低排放改造中的应用[J].工程技术研究.2024,9(1).
- [3]朱召平.电袋复合除尘器脱除细颗粒物的效率影响因素研究[J].环境污染与防治.2022,44(12).
- [4]李海阳,辛胜伟,马驰,等.国神公司循环流化床发电技术发展及展望[J].能源与节能.2022,(10).
- [5]赖志华.基于现场调研的电袋复合除尘器运行能耗系统研究[J].电力科技与环保.2023,39(5).