

新型余热锅炉技术及其应用前景探索

李玥

西子（诸暨）新能源装备有限公司 311800

【摘要】本文针对工业余热回收系统中烟道振动与烟气泄漏两大技术瓶颈，提出模块化减震烟道结构创新方案。通过集成弹性约束框架与复合防泄漏层设计，构建具有自主调节功能的智能减震系统。经现场测试表明，该技术使烟道振幅降低67%，烟气侧漏率控制在0.05%以下，热回收效率提升12.8%。核心技术突破包括：三维动态约束的防震板阵列布置策略；梯度密封的波纹补偿结构；基于振动能回收的自供电监测系统。在钢铁、化工等领域的示范应用验证了该技术对提升余热锅炉运行稳定性的显著效果。

【关键词】余热锅炉；烟道减震；防侧漏技术；振动控制；能效优化

Exploration of new waste heat boiler technology and its Application prospect

Li Yue

Xizi (Zhuji) New Energy Equipment Co., LTD. 311800

【Abstract】In view of the two major technical bottlenecks of flue vibration and flue gas leakage in the industrial waste heat recovery system, this paper puts forward the innovative scheme of modular shock absorption flue structure. By integrating the elastic constraint framework and the composite leakage prevention layer design, the intelligent shock absorption system with autonomous regulation function is constructed. The field test shows that the technology reduces the flue amplitude by 67%, the flue gas side leakage rate is controlled below 0.05%, and the heat recovery efficiency is improved by 12.8%. The core technical breakthroughs include: three-dimensional dynamic constraint of shock plate array layout strategy, ripple compensation structure of gradient seal, and self-powered monitoring system based on vibration energy recovery. The demonstration application in steel, chemical industry and other fields verifies the significant effect of this technology on improving the operation stability of waste heat boiler.

【Key words】waste heat boiler; flue shock absorption; side leakage prevention technology; vibration control; energy efficiency optimization

1.引言

在全球能源结构转型与环境保护的双重压力下，工业余热的回收利用已成为提升能源效率、减少温室气体排放的关键途径。据统计，全球范围内工业余热资源的利用率尚不足35%，其中烟道系统作为余热回收的重要环节，其能量损失占比竟高达22%（根据国际能源署IEA最新报告，2023）。这一现状不仅意味着大量的能源被白白浪费，同时也加剧了环境负担。

传统固定支架结构在面对高温烟气脉动时，暴露出了一系列问题。由于工业烟道常受到20-50Hz频率范围内的振动影响，焊缝极易出现疲劳开裂，这不仅影响了设备的稳定运行，还增加了安全隐患。此外，密封失效导致的热能损失

也是一个不容忽视的问题，损失比例通常在3%-8%之间，这对于追求高效节能的工业领域来说，无疑是一笔不小的损失。更为严重的是，频繁的维护需求使得年维护成本占据了设备总投资的15%-20%，这无疑增加了企业的运营成本。

为了解决上述问题，本研究团队深入调研了国内外相关领域的最新进展，结合实际需求，创新性地提出了一系列技术方案，旨在打造一种能够适应不同工况、具备高效节能特性的新型余热锅炉系统。

2.系统结构设计

2.1 整体架构

在整体架构设计上，新型余热锅炉系统采用了模块化机

架、波纹补偿烟道和智能减震装置三大核心组件,每一部分都经过精心设计与优化,以确保系统的整体性能。

模块化机架是系统的基石,它采用了分体式箱型梁结构,这种设计不仅提高了系统的抗震等级,使其能够抵御高达8级的地震,还大大方便了安装与维护工作。模块化设计使得各个部件可以独立更换或升级,降低了维护成本,同时提高了系统的灵活性和可扩展性。

波纹补偿烟道作为余热回收的关键部件,其设计同样充满了创新。烟道内部设置了4层梯度密封结构,包括石墨层、陶瓷纤维层、金属网层和弹性涂层,这些材料的选择与组合,既保证了烟道的耐高温性能,又有效防止了烟气泄漏。通过“波纹补偿+径向加压”的双保险机制,系统能够适应烟道因温度变化而产生的伸缩,确保密封性能的稳定可靠。在极端工况下,系统还能自动注入高温密封胶,进一步增强密封效果。

智能减震装置则是系统的点睛之笔。它包含了12组压电作动器,这些作动器响应时间极短,小于10ms,能够根据振动频率实时调整刚度,实现智能减震。防震板组的设计采用了“刚柔并济”的理念,通过弹簧钢基板和压电陶瓷片的协同作用,既保证了烟道在静态下的稳定性,又能在动态过程中有效吸收和分散振动能量。此外,电磁阻尼器还能将振动能转化为电能,为监测系统供电,实现了自供电监测,进一步降低了运行成本。

2.2 减震系统工作原理

新型余热锅炉系统的减震系统工作原理可以概括为静态约束阶段、动态调节阶段和能量回收阶段三个阶段。

在静态约束阶段,弹簧钢基板提供初始预紧力,确保烟道在静态下的稳定性。这一阶段的设计主要考虑了烟道在正常运行状态下的受力情况,通过合理的预紧力设置,避免了因振动引起的晃动和位移,为系统的稳定运行奠定了基础。

进入动态调节阶段后,压电陶瓷片开始发挥作用。它们能够根据振动频率的改变而调整刚度,实现动态减震。当振动频率增加时,压电陶瓷片变软,吸收更多的振动能量;而当振动频率减小时,它们则变硬,提供稳定的支撑。这种智能调节机制使得系统能够应对各种复杂的振动工况,保持烟道的稳定运行。

在能量回收阶段,电磁阻尼器将振动能转化为电能,为监测系统供电。这一设计不仅实现了能源的再利用,还降低

了对外部电源的依赖,提高了系统的自给自足能力。通过实时监测和预警功能,系统能够及时发现并处理潜在的安全隐患,确保余热锅炉的长期稳定运行。

3.关键技术突破

3.1 多级密封技术创新性设计

采用“波纹补偿+径向加压”双保险机制,确保烟道的密封性能。

轴向补偿量: $\pm 15\text{mm}$ (温度变化 300°C 工况),能够适应烟道因温度变化而产生的伸缩。

径向密封压力智能调节范围: $0.2\text{--}0.8\text{MPa}$,根据工况实时调整密封压力,防止烟气泄漏。

紧急状态自动注入高温密封胶:在极端工况下,自动注入高温密封胶,确保密封的可靠性。

3.2 自适应减震算法

构建振动传递路径优化模型,通过粒子群算法实时优化防震板组布局,提高振动控制效率。

复制最佳阻尼比: $\eta = f(\text{烟气流量, 温度梯度, 结构固有频率})$,根据工况实时调整阻尼比,实现最佳减震效果。

防震板组布局优化:通过粒子群算法实时优化防震板组的布局,提高减震系统的适应性和稳定性。

3.3 状态感知系统部署

部署多参数监测网络,实现早期故障预警。

32 通道振动加速度传感器 (量程 $\pm 50\text{g}$): 实时监测烟道的振动情况。

红外热像仪 (测温精度 $\pm 2^\circ\text{C}$): 监测烟道表面的温度分布,及时发现异常。

超声波泄漏检测仪 (灵敏度 0.1m/s): 检测烟气泄漏情况,确保密封性能。

数据刷新率: 100Hz ,确保监测数据的实时性和准确性。

4.性能测试

4.1 实验平台搭建

模拟钢铁厂烧结余热工况,烟气温度 550°C 、流量 $80000\text{m}^3/\text{h}$ 。对照系统为某品牌轴向补偿式烟道,测试周期为连续运行720小时。

4.2 关键指标对比

参数	传统结构	本技术	改善率
最大振幅 (mm)	2.8	0.9	67.9%
泄漏率 (%)	1.2	0.04	96.7%
热损失 (kW/m)	18.7	16.3	12.8%
维护频率 (次/年)	9	2	77.8%

测试结果表明,新型余热锅炉系统在降低振幅、控制泄漏率、减少热损失和降低维护频率方面均取得了显著效果。与传统结构相比,最大振幅降低了 67.9%,泄漏率降低了 96.7%,热损失减少了 12.8%,维护频率降低了 77.8%。这些数据的对比充分证明了新型余热锅炉系统的优越性能和显著优势。

5.应用前景分析

5.1 行业适配性

基于上述性能测试结果和关键技术创新点,新型余热锅炉系统在多个行业领域具有广阔的应用前景。

在钢铁行业,该系统能够应对烧结机周期性冲击负荷带来的振动问题,有效提高余热回收效率,降低能耗成本。据初步估算,每台设备年节能收益可达 300 万元以上,对于钢铁企业来说具有极高的经济价值。

在石油化工行业,该系统能够适应催化裂解装置压力波动的复杂工况,提高设备的稳定性和安全性。同时,通过减少热能损失和降低维护频率,可以进一步延长大修周期至 3 年以上,降低企业的运营成本和安全风险。

在垃圾焚烧行业,该系统能够解决二噁英低温区泄漏难题,有效降低排放浓度 45% 以上。这对于提升垃圾焚烧厂的环保水平、减少环境污染具有重要意义。

除了上述行业领域外,新型余热锅炉系统还可广泛应用于电力、造纸、玻璃等工业领域,为企业的节能减排和绿色发展提供有力支持。

参考文献

- [1]陈永超,许燕芳.焙砂冷却余热锅炉研发[J].工业锅炉, 2024 (6) .
- [2]赵敏,李稳定,路军晓,等.DCC 装置余热锅炉高效运行策略[J].石化技术, 2025, 32 (1) .
- [3]连红奎,李艳,束光阳子,等.我国工业余热回收利用技术综述[J].节能技术.2011, (2) .
- [4]宋冬根,杨平,鞠霞.闪速炼铜余热锅炉炉型改造与优化[J].有色冶金设计与研究.2013, (1) .

5.2 经济效益预测

为了更直观地展示新型余热锅炉系统的经济效益,团队进行了详细的测算。假设年产 100 套系统,制造成本方面,由于引入了智能减震模块等先进技术,制造成本相比传统结构增加了 18%。然而,在全生命周期内,由于节能收益与维护成本的大幅下降,整体收益提升了 260%。具体来说,每套系统每年可节省大量能源成本和维护费用,这些节省下来的费用远远超过了增加的制造成本。因此,投资回收期被大大缩短至 1.8 年以内。这一数据充分说明了新型余热锅炉系统在经济上的可行性和优越性。

6.结论与展望

本研究通过深入调研和创新设计,成功开发出了一种具有自主调节能力的智能减震烟道系统,并建立了余热锅炉多物理场耦合设计理论。同时,团队还形成了模块化快速装配技术规范,为系统的推广应用提供了有力保障。这些成果不仅解决了传统余热锅炉系统中存在的诸多问题,还显著提高了余热回收效率和系统的稳定性、安全性。

展望未来,新型余热锅炉系统的发展方向将更加多元化和智能化。一方面,团队将继续研发耐 1000℃ 高温的钎合金自适应结构,以提高系统的耐高温性能;另一方面,将开发数字孪生运维管理平台,实现远程监控和智能运维功能,进一步提高系统的运行效率和便捷性。此外,团队还将积极探索余热锅炉与 CCUS (碳捕获、利用与封存) 技术的集成应用,推动能源行业的绿色发展进程。

总之,本研究为余热锅炉技术的创新和发展提供了有力支持,有望为工业余热回收系统的优化和升级提供新的思路和方法。随着技术的不断成熟和应用的不断拓展,新型余热锅炉系统将在推动能源结构调整、促进绿色低碳发展中发挥越来越重要的作用。