

智能控制下砖瓦窑余热节能回收技术应用研究

王玉婷 樊明哲

泸州职业技术学院，四川省泸州市，646000；

摘要：我国砖瓦制造业长期依托传统窑炉进行规模化生产，在坯体干燥与高温焙烧环节会产生大量烟气、冷凝水及窑体散热类余热资源，受限于早期回收工艺粗放、人工调控滞后等问题，大量可再利用热能直接排入环境，既造成能源浪费，也与当前工业领域节能降碳的发展导向不相适应。将智能控制技术与砖瓦窑余热回收体系相结合，能够依托实时监测、动态调节与协同调度等方式，让余热收集、换热、输送及利用全过程与窑炉实际生产负荷相匹配，从而提升低温与中温余热的综合利用率。本文从砖瓦窑生产能耗特点与余热分布规律入手，分析当前行业内较为成熟的余热回收技术路径，探讨智能控制系统在余热回收设备运行中的集成方式，结合实际应用场景对节能效果与运行稳定性展开分析，以期为砖瓦企业开展窑炉节能改造、实现绿色低碳生产提供可参考的技术思路与实践依据。

关键词：砖瓦窑；余热回收；智能控制；节能降耗；热能梯级利用

DOI：10.69979/3029-2735.26.05.102

引言

砖瓦是城乡建设与基础设施建设中不可或缺的基础建材，我国砖瓦生产企业数量多、分布广，窑炉连续作业时间长、燃料消耗量大。在常规生产流程中，焙烧窑排出的烟气、干燥窑尾气以及蒸汽冷凝水等均携带大量热能，传统利用方式多为简单换热后直供干燥工段，对低品位余热缺乏有效的回收手段，系统运行参数也多依靠操作人员经验调整，容易出现余热回收不充分、供热波动大、设备能耗偏高等问题。

1 砖瓦窑生产能耗构成与余热资源特点

1.1 砖瓦窑主要生产环节的能耗分布

砖瓦生产从原料处理、坯体挤出、自然或强制干燥，再进入窑炉焙烧与成品冷却，整体工艺流程较长，热能消耗集中在干燥与焙烧两个核心工段。焙烧工序需要将窑内温度稳定在适宜烧结的区间，为保证产品质量，窑内温度场与气流场需保持相对稳定，这一过程需要持续投入煤炭、天然气或其他燃料，是整条生产线能耗最高的环节。坯体干燥则需要稳定热源去除坯体内游离水与结晶水，传统工艺常采用明火间接供热或直接抽取部分焙烧热风，热能利用效率偏低，额外增加了整体能耗^[1]。

从能源使用形式来看，砖瓦窑能耗以热能为主，电能主要用于窑车牵引、风机驱动、烟气输送等辅助设备。多数传统砖瓦窑热效率偏低，燃料燃烧释放的热量仅有一部分真正作用于坯体烧结与干燥，其余热量随烟气排

放、窑壁辐射、冷凝水排放等方式散失。加之生产过程中温度、进风量、排烟量等参数难以精准控制，常常出现局部过热或热量供给过剩的情况，进一步加剧了能源损耗。

1.2 砖瓦窑余热资源的类型与品质特征

砖瓦窑在运行过程中产生的余热来源多样，按照载体形态可大致分为烟气余热、水汽余热、冷凝水余热以及窑炉表面散热余热等。其中焙烧烟气与干燥尾气排量大、持续稳定，是最具回收价值的余热来源，温度多处于中低温区间，受窑型、燃料种类与生产负荷影响，温度波动具有一定规律性。

按照温度高低与利用难度，砖瓦窑余热可划分为不同品位，高温段余热可直接回用于窑头补热或预热坯体，中温段适合通过换热器转换为干燥用热，而大量低温烟气与废水余热则难以通过常规设备直接利用，往往成为余热回收的薄弱环节。与此同时，砖瓦窑烟气中含有一定粉尘与弱腐蚀性成分，若直接进行换热回收，容易造成换热器堵塞、磨损与腐蚀，影响设备使用寿命与系统稳定性，这也是砖瓦窑余热回收区别于其他洁净工业余热的重要特点，在技术选择与设备设计时需要充分兼顾工况适应性。

2 砖瓦窑余热节能回收的主要技术形式

2.1 热泵技术在低温余热回收中的应用

砖瓦窑排放的低温烟气与废水余热总量可观，但因

温度较低,无法直接满足生产用热需求,热泵技术则可以通过逆循环方式将低品位热能提升至可用品位,从而扩大余热利用范围。针对砖瓦窑连续运行的特点,可选用适配中低温热源的热泵机组,配合高效压缩机与换热部件,在较低能耗下实现热量提升。

在实际应用中,热泵系统通常与烟气预处理装置配合使用,先对烟气进行除尘与净化,减少杂质对热泵核心部件的影响,再由蒸发器吸收烟气中的余热,经压缩机做功后通过冷凝器释放高温热能,输送至干燥车间或其他用热工段。相较于电加热与直接燃煤供热,热泵回收余热能够显著减少一次能源消耗,尤其适合处理传统工艺难以利用的低温热源,让原本废弃的余热重新进入生产系统循环。

2.2 烟气余热深度回收与净化换热技术

烟气是砖瓦窑余热的主要载体,提升烟气余热回收率是整体节能改造的关键。深度回收技术通过专用换热装置,尽可能多地提取烟气中的热量,同时配套净化措施保证设备可靠运行。针对砖瓦烟气含尘量较高的问题,可采用物理分离与多级过滤相结合的方式,在换热前降低烟气中的颗粒物含量,避免在换热面沉积结垢,影响换热效率。

换热器的选型直接决定余热回收效果,结合砖瓦烟气的温度与腐蚀特性,可选用耐高温、耐磨损的换热结构与材质,保证在连续工况下稳定换热。回收后的热量可直接用于坯体预热、干燥窑补热以及助燃空气预热,减少焙烧环节的燃料加入量。通过梯级换热方式,可依次对高温、中温、低温烟气进行分级利用,使烟气出口温度降至合理区间,最大限度提升热能回收比例^[2]。

2.3 闭式蒸汽冷凝水余热回收系统

砖瓦生产中部分工段会使用蒸汽进行加热或保温,蒸汽冷凝后形成的冷凝水温度较高,且水质相对洁净,具备良好的回收条件。开放式回收方式容易造成热量快速散失,且冷凝水与空气接触后易发生氧化,对管道与设备产生腐蚀。采用全闭式回收系统,能够在密闭环境下完成冷凝水的收集、输送与换热,减少热量损失,同时实现水资源与热能的同步回收。

回收后的冷凝水余热可用于锅炉给水预热或厂区生活热水制备,降低锅炉燃料消耗。闭式系统还能减少冷凝水在输送过程中的二次污染,延长水处理设备与换热设备的使用寿命。在大中型砖瓦生产线中,冷凝水余热回收量稳定,与烟气回收系统配合使用,可形成多源互补的余热利用格局,进一步提升整体节能水平。

2.4 余热梯级利用与系统耦合优化

单一余热回收方式难以覆盖砖瓦窑全部余热资源,根据温度高低进行梯级利用,是提升综合能效的有效方式。高温余热优先满足高品位用热需求,中温余热用于主体干燥工段,低温余热则通过热泵或低温换热装置回收,用于低温预热或其他辅助工段,形成逐级利用、有序分配的热能流转方式。

在系统设计层面,可将余热回收设备与窑炉主风机、换热站、干燥窑等进行一体化耦合,优化管路布局,减少沿程阻力与散热损失。部分条件适宜的生产线还可将余热回收与辅助动力系统结合,利用余热驱动辅助设备运行,进一步降低厂区整体电耗与煤耗,实现热能与电能的协同优化。

3 智能控制技术在余热回收系统中的融合应用

3.1 运行参数实时监测与数据采集

智能控制的实现建立在全面、准确的工况监测之上,通过在余热回收系统关键节点布置温度、压力、流量及烟气成分监测设备,可实时获取烟气温度、换热介质流量、风机转速、热泵运行功率等数据。这些数据持续上传至中央控制单元,为系统判断当前负荷与余热产出情况提供依据。与传统人工巡检定点记录相比,在线监测能够连续反映系统运行状态,及时捕捉温度波动、流量异常等情况,避免因信息滞后导致调节不及时。同时,监测设备具备数据校准与稳定性保障功能,可适应砖瓦生产现场粉尘多、环境复杂的特点,保证采集数据真实可靠。

3.2 生产负荷与余热回收动态调节

砖瓦窑生产负荷会随排产计划、坯体种类、季节环境等因素发生变化,余热产出量也会随之波动,智能控制系统可根据实时采集的工况数据,自动调整余热回收设备运行状态。当窑炉负荷升高、烟气余热量增大时,系统相应提高风机频率与热泵运行负荷,增加余热回收量;当生产负荷降低时,则适当降低设备运行功率,减少无用能耗。动态调节能够避免传统系统长期处于固定工况运行的弊端,使供热与用热趋于平衡,减少热能浪费与设备空转损耗。对热泵压缩机、调节阀、循环泵等执行机构的精细化控制,可让核心设备长期运行在高效区间,既提升余热利用效率,也有助于延长设备使用寿命^[3]。

3.3 多子系统协同智能调度

一套完整的砖瓦窑余热回收体系通常包含烟气回

收、热泵换热、冷凝水回收、热风输送等多个子系统,各子系统之间相互关联,任何一环运行异常都会影响整体效果。智能控制平台通过内置调度逻辑,可实现多设备联动运行,根据实际用热需求在不同子系统之间分配热能。例如,当烟气余热不足时,系统可自动加大冷凝水余热回收量进行补充;当干燥工段用热趋于稳定时,可将多余热量存入蓄热装置,以备峰值用热时使用。调度逻辑还可结合生产排班进行预判性调节,提前适应班次切换、窑炉进车等操作带来的工况变化,提升系统运行平稳性。

3.4 故障预警与能耗可视化

智能控制系统具备故障识别与预警能力,通过长期监测设备运行参数,建立正常工况特征模型,当出现温度异常、压力超标、流量骤变等情况时,可及时发出预警并提示可能的故障位置,便于运维人员快速处理,避免小故障扩大为停机事故。

同时,系统可对回收热量、节能量、燃料节约量、碳减排量等数据进行统计与可视化展示,管理人员能够直观了解节能改造效果,根据数据变化优化运行策略。能耗数据的长期积累也可为企业后续技改、能效对标与内部考核提供量化依据,推动节能管理从经验化向数字化转变。

4 工程应用效果与综合效益分析

4.1 实际工程应用系统配置

在国内多条砖瓦生产线的节能改造项目中,智能控制型余热回收系统已得到实际应用。改造对象多为传统轮窑与隧道窑,原有余热利用率较低,通过增设烟气深度换热装置、低温余热热泵机组、闭式冷凝水回收管路,并搭建集中智能控制平台,实现余热全流程自动化管控。系统设计充分结合窑炉型号、生产规模与现场布局,在不影响正常焙烧与产品质量的前提下,完成余热收集、净化、换热与输送。智能终端可实现本地操作与远程监控,运维人员无需频繁进入现场,即可完成参数调整与状态查看,提升了生产管理的便捷性。

4.2 节能效果与环保效益表现

经实际运行监测,应用智能控制余热回收系统后,砖瓦窑综合余热利用率较改造前有明显提升,干燥工段所需外源供热大幅减少,单位产品综合能耗显著下降。燃料消耗的降低直接带来了污染物排放削减,二氧化碳、烟尘及相关废气排放量均有不同程度降低,企业能够更

好地满足环保排放要求。智能调节使得供热更趋稳定,干燥窑内温度场均匀性提升,也在一定程度上减少了因干燥不均导致的产品次品率,实现了节能与提质的双重效果。从长期运行来看,余热回收所节约的燃料费用,可在合理周期内覆盖设备投资与改造成本^[4]。

4.3 系统运行稳定性与经济性

在持续运行过程中,智能控制系统有效减少了人为操作失误,设备启停与调节更加平缓,降低了机械冲击与管路震动,系统整体稳定性较强。故障预警功能多次在设备出现异常初期发出提示,避免了非计划停机,降低了运维成本与生产损失。从企业经营角度,节能改造不仅降低了能源成本,也提升了企业绿色制造形象,在行业监管趋严的背景下具备更强的生存与竞争能力。中小型砖瓦企业可采用模块化、轻量化设计,在控制投资的前提下实现基础余热智能回收,同样能获得较为可观的经济回报。

5 结论

砖瓦窑余热资源总量大、持续性强,是砖瓦行业实现节能降碳的重要切入点,传统人工调控模式下的余热回收方式已难以满足现代绿色生产要求,智能控制技术的融入为余热高效利用提供了可行路径。通过热泵、烟气深度换热、闭式冷凝水回收等技术与智能监测、动态调节、协同调度相结合,能够实现余热资源的梯级回收与精准分配,显著提升热能利用率,降低燃料消耗与污染物排放。在双碳战略与工业节能升级的大趋势下,智能控制余热回收技术将持续助力砖瓦制造业转型升级,推动行业朝着低碳、高效、智能的方向稳步发展。

参考文献

- [1]陈晓朋.数据中心冷却节能技术及余热回收技术分析[J].新城建科技,2025,34(12):34-36.
- [2]廖兴中,方静,谢绍林.联合暖风器余热回收系统及其应用方法[J].工业锅炉,2025,(06):46-51.
- [3]黄朔,邵政伟,申学森,等.应用热泵对集中供热系统进行余热回收节能改造的案例分析[J].工程建设与设计,2025,(23):86-89.
- [4]宋真真.既有建筑暖通空调系统节能改造设计实践研究[J].产品可靠性报告,2025,(11):73-74.

基金项目:本文系智能控制与电子器件应用技术泸州市重点实验室开放基金资助项目(项目编号:ZK202304)