

转轮除湿系统能效提升研究

矫依存

中冶焦耐上海工程技术有限公司 上海 201900

摘要: 转轮除湿系统基于固体吸附原理,适用于低露点等特殊工况,但能耗问题待优化。本文剖析其原理与能效,分析转轮材料特性、运行参数、热回收及控制策略等因素对能效的影响。提出新型高效吸附材料开发、系统结构优化、智能控制与数字化技术应用、可再生能源集成等关键技术与创新策略,并展望人工智能与物联网融合、超低能耗除湿系统开发等未来方向,为提升系统能效提供理论与技术支持。

关键词: 转轮除湿; 能效优化; 智能控制

引言: 在工业生产与建筑环境控制中,对空气湿度的精准调控至关重要。转轮除湿系统凭借其独特优势,在低湿度要求、高温高湿等特殊工况下得到广泛应用。然而,其能耗问题制约了进一步发展。深入探究转轮除湿系统能效提升策略,不仅有助于降低运行成本,还能推动节能减排。本文旨在全面分析影响能效的因素,提出创新技术与策略,为行业发展提供有益参考。

1 转轮除湿系统原理与能效分析

1.1 系统工作原理

转轮除湿系统是一种基于固体吸附原理的除湿设备,核心组件为布满吸附材料的旋转转轮,通常分为处理区和再生区两大功能区域。工作时,待处理湿空气流经转轮处理区,空气中的水汽被转轮内吸附材料吸附,实现空气除湿净化;同时,转轮缓慢旋转,吸附饱和的区域转入再生区,高温再生空气流经此处,使吸附材料解析出水汽并随再生空气排出,完成吸附材料的再生循环,转轮持续旋转即可实现连续除湿。该系统无需依赖低温冷凝,适用于低湿度要求、高温高湿等特殊工况,相较于传统冷凝除湿,在低露点除湿场景下更具优势^[1]。其工作过程涉及传热与传质耦合,转轮转速、空气流量、再生温度等参数直接影响除湿效果与运行稳定性,是实现高效除湿的核心调控环节。

1.2 能效评价指标

转轮除湿系统的能效评价需结合除湿性能与能耗水平,核心指标包括单位能耗除湿量(SMER)、除湿效率、再生热效率及COP(性能系数)等。单位能耗除湿量是核心指标,指消耗单位电能或热能所能去除的水汽质量,直接反映系统能源利用效率,单位通常为 $\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,数值越高能效越优。除湿效率体现转轮对空气中水汽的去除能力,受吸附材料性能与运行参数影响,通过进出口空气含湿量差值与进口含湿量的比值计算。再生热效率衡量再

生热量的利用程度,反映再生环节的能量损耗情况。COP则综合考量系统总能耗与有效除湿功,需结合电能、热能消耗综合计算。另外,系统稳定性、启停响应速度等间接指标,也作为能效评价的补充,为系统优化与性能对比提供全面依据。

1.3 主要能耗来源与损失分析

转轮除湿系统能耗主要集中在再生环节、风机运行及辅助设备能耗,其中再生热消耗占比最高,达总能耗的60%~80%。再生热能耗源于对吸附材料解析再生的需求,若采用电加热、燃气加热等传统方式,能源消耗显著,且高温再生过程中存在热量散失损失。风机能耗包括处理风风机与再生风风机,用于维持空气流动,风机选型不当、管路阻力过大易导致额外能耗增加。系统能量损失主要分为散热损失、不可逆损失及余热浪费,设备外壳保温不足会造成再生区热量向外界散失;传热传质过程中的温度差、浓度差引发不可逆能量损失,降低能源利用效率。此外,再生后高温湿空气直接排放,未回收余热,以及系统启停、负载波动时的能耗浪费,也是重要能量损失点,需针对性优化以降低能耗。

2 转轮除湿系统能效影响因素研究

2.1 转轮材料特性

转轮材料特性是决定除湿系统能效的核心因素,主要包括吸附容量、吸附速率、再生温度及稳定性等指标。传统吸附材料如硅胶、分子筛,硅胶吸附容量大但再生温度较低,适用于常规工况,分子筛耐温性强但吸附容量有限,适配高温场景。材料比表面积、孔径结构直接影响吸附性能,比表面积越大、孔径分布合理,吸附位点越多,水汽吸附效率越高。材料的热稳定性与化学稳定性决定使用寿命,频繁高温再生易导致材料老化、吸附性能衰减,增加更换成本与能耗^[2]。材料的导热系数影响再生热量传递效率,导热性佳可缩短再生时间、降低再

生能耗。新型复合吸附材料通过组分调控,兼顾高吸附容量与低再生温度,成为提升系统能效的关键突破方向。

2.2 系统运行参数优化

系统运行参数的合理调控是提升转轮除湿能效的重要手段,核心参数包括转轮转速、再生温度、处理风与再生风流量及进出口参数等。转轮转速需匹配吸附与再生速率,转速过高会导致吸附不充分、除湿效果下降,转速过低则使再生不彻底,材料吸附能力衰减,通常优化转速范围为10-20转/小时。再生温度需根据吸附材料特性设定,过高会增加能耗与材料老化速度,过低则再生不完全,一般控制在80-140°C。处理风与再生风流量比需合理匹配,流量过大易造成管路阻力增加、风机能耗上升,流量过小则无法充分发挥转轮处理能力。此外,处理空气的进口含湿量、温度,再生空气的进口参数等,也会影响系统除湿效率与能耗,通过正交试验、仿真模拟等方法优化参数组合,可实现能效最大化。

2.3 热回收与余热利用

热回收与余热利用是降低转轮除湿系统能耗的有效路径,核心在于回收再生环节余热及系统排出的高温湿空气热量,实现能源循环利用。常见热回收方式包括显热回收器、全热交换器,可回收再生后高温空气的热量,预热待加热的再生冷空气,降低再生加热负荷。针对工业场景,可利用生产过程中产生的余热、废汽等替代传统加热源,为再生环节提供热量,大幅减少化石能源或电能消耗。通过优化系统流程,将处理后干燥空气的部分热量回收至再生系统,或利用冷凝水余热辅助预热再生空气,进一步提升热量利用率。热回收效率受换热设备性能、系统流程设计影响,高效换热材料与合理的管路布局可减少热量损失,通常可降低再生能耗20%-30%,显著提升系统整体能效。

2.4 控制策略改进

控制策略改进通过精准调控系统运行状态,适配负载波动,避免无效能耗,提升转轮除湿系统能效。传统控制多采用手动控制或简单PID控制,基于出口空气含湿量、温度反馈调节参数,响应速度慢,易出现超调或滞后,导致能耗浪费。改进后的控制策略包括模糊控制、自适应控制、预测控制等,结合传感器实时采集的温湿度、流量、转轮状态等数据,动态调整转轮转速、再生温度、风机流量等参数,实现负载与运行参数的精准匹配。例如,低湿负载时降低再生温度、调整转轮转速,减少能源消耗;负载突变时快速响应,避免系统启停频繁。另外,集成多参数联动控制,协调再生系统、热回收系统与风机运行,实现系统整体优化,相较于传统控

制策略,可降低能耗15%-25%,提升运行稳定性。

3 转轮除湿系统能效提升关键技术与创新策略

3.1 新型高效吸附材料开发

新型高效吸附材料的开发是推动转轮除湿系统能效提升的核心技术突破方向,其研发聚焦于优化材料吸附性能、降低再生能耗以及延长使用寿命三大关键目标。当前研发重点涵盖复合吸附材料、改性吸附材料及多孔纳米吸附材料等领域,通过精准的组分复配与微观结构调控,实现吸附容量与再生性能的协同优化。例如,硅胶-分子筛复合材料通过整合硅胶的高吸附容量与分子筛的耐高温特性,将再生温度降低10-20°C,显著降低能耗;纳米多孔材料则通过调控孔径尺寸与表面官能团,增强水汽吸附选择性与吸附速率,提升除湿效率。新型无机-有机复合吸附材料及金属有机框架(MOFs)材料凭借其比表面积大、吸附容量高、再生条件温和等优势,成为提升转轮除湿效率的重要方向。通过材料表面改性处理,可增强其抗老化、抗污染能力,有效延长材料使用寿命,减少更换频率与成本,从而进一步提升系统的综合能效。这些创新材料的研发与应用,为转轮除湿系统的高效、节能、可持续发展提供了有力支撑^[1]。

3.2 系统结构优化设计

系统结构优化设计通过改进核心组件结构与系统整体布局,减少能量损失,提升转轮除湿系统能效。针对转轮结构,优化其分区比例、内部流道设计,合理分配处理区与再生区面积,通常处理区面积占比60%-80%,可平衡除湿效果与再生效率;优化流道形状与尺寸,降低空气流动阻力,减少风机能耗。另外,改进再生系统结构,采用分级再生方式,根据转轮吸附饱和程度精准分配再生热量,避免热量浪费;优化热回收设备集成方式,将热交换器与再生系统、处理系统紧密耦合,提升热量回收效率。同时,简化管路布局,减少管路长度与弯头数量,降低沿程阻力与局部阻力;采用高效密封结构,防止处理风与再生风交叉污染,避免能效衰减。结构优化设计可使系统整体能耗降低10%-20%,同时提升除湿稳定性。

3.3 智能控制与数字化技术

智能控制与数字化技术的融合应用,为转轮除湿系统能效提升提供精准调控支撑,实现系统全生命周期高效运行。通过部署物联网传感器网络,实时采集转轮状态、温湿度、流量、能耗等多维度数据,构建数字化监测平台,实现运行状态可视化与异常预警。基于大数据分析机器学习算法,建立系统能耗预测模型与负载匹配模型,精准预判负载变化,提前调整运行参数,避免

无效能耗。引入工业互联网技术,实现系统远程监控、智能调度与故障自诊断,减少人工干预,提升运行效率。结合数字孪生技术,构建系统虚拟仿真模型,模拟不同运行参数、结构设计下的系统性能,为优化方案制定提供数据支撑,缩短研发周期。智能控制与数字化技术的应用,可使系统能效提升20%-30%,推动系统向智能化、精准化方向发展。

3.4 可再生能源集成应用

可再生能源集成应用是转轮除湿系统实现低碳化、高效化运行的重要创新策略,核心在于替代传统化石能源,降低系统碳排放与能耗。常见集成方式包括太阳能、地热能、生物质能与系统的耦合运行,太阳能通过光伏板发电为风机、控制系统供电,或通过太阳能集热器提供再生所需热量,适配光照充足场景;地热能利用地源热泵系统,为再生环节提供稳定热源,能效比高且环境友好。生物质能通过燃烧转化为热能,为再生系统供能,适用于农业、工业废弃物资源丰富的区域。另外结合储能技术,解决可再生能源间歇性、不稳定性问题,确保系统连续稳定运行。可再生能源与转轮除湿系统的集成,可降低传统能源消耗占比60%以上,显著减少碳排放,同时结合余热回收技术,实现能源梯级利用,进一步提升系统综合能效与环保性能。

4 未来研究方向

4.1 人工智能与物联网技术的深度融合

人工智能与物联网技术的深度融合,将成为转轮除湿系统智能化升级的核心方向,推动系统从精准控制向自主决策、自适应优化演进。未来将进一步优化传感器网络布局,实现多维度数据的高精度、实时采集,结合边缘计算技术,降低数据传输延迟,提升现场调控响应速度。基于深度学习算法,构建更精准的系统能耗模型、吸附-再生动力学模型,实现负载变化的精准预测与运行参数的自适应调控,无需人工干预即可适配复杂工况变化。通过物联网技术实现多系统协同联动,将转轮除湿系统与建筑空调、储能系统、可再生能源系统深度融合,构建智能能源管理平台^[4]。利用AI技术开展故障预测与健康

管理,通过数据分析预判材料老化、设备故障,实现预防性维护,延长系统使用寿命,最大化系统全生命周期能效。

4.2 面向零碳建筑的超低能耗除湿系统开发

面向零碳建筑的超低能耗除湿系统开发,是响应“双碳”目标的重要研究方向,聚焦于实现除湿系统近零能耗、近零碳排放运行。未来将以零碳建筑能耗需求为导向,优化系统设计,整合新型高效吸附材料、可再生能源集成、高效热回收等核心技术,大幅降低系统能耗。重点研发基于被动式设计的除湿系统,结合建筑围护结构保温隔热性能,减少湿负荷输入,降低除湿设备运行压力。同时,开发小型化、模块化除湿单元,适配零碳建筑空间需求,实现按需除湿、精准供能。还需探索除湿系统与建筑储能、光伏建筑一体化的协同设计,实现能源自给自足与循环利用。通过多技术融合与系统集成优化,目标将除湿系统单位能耗降低至现有水平的50%以下,满足零碳建筑对超低能耗、环保高效除湿的需求,推动建筑领域碳减排目标实现。

结束语

转轮除湿系统能效提升研究意义重大,通过对其原理、能效指标及能耗损失的剖析,明确了材料特性、运行参数等因素对能效的影响。提出的新型材料开发、结构优化、智能控制及可再生能源集成等策略,为能效提升指明方向。未来,随着人工智能与物联网深度融合及超低能耗除湿系统开发,转轮除湿系统将更智能、高效、环保,在更多领域发挥关键作用,助力可持续发展。

参考文献

- [1]吴兴应,李鹏,张啸晨,等.桥梁转轮除湿系统的性能评价与优化分析[J].公路交通科技,2025,42(9):150-157.
- [2]陈卫.双转轮除湿系统设计及其性能影响因素分析[J].制冷与空调,2023,23(12):7-12.
- [3]张楠,姚晔,贾东新.基于数值模型的转轮除湿系统节能优化控制研究[J].制冷学报,2023,44(5):41-49.
- [4]周美琴.低露点转轮除湿系统在锂电厂房设计中的优化[J].电脑爱好者(普及版),2022(7):175-177.