



# 基于梯度除湿策略的双级串联干燥剂涂层 换热器深度除湿系统研究

胡鹏, 郑旭, 易志翔, 王玮宁

(浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

**摘要:** 针对精密光学制造等场景对深度除湿的迫切需求, 采用梯度除湿策略, 开发了一种基于双级串联干燥剂涂层换热器 (Desiccant coated heat exchanger, DCHE) 的节能高效深度除湿系统。系统集成两种特性互补的复合吸附剂, 通过构建实验平台, 分析进口空气温度与相对湿度对系统性能的影响, 并在标准工况下与单级系统进行对比分析。实验结果表明, 该系统在除湿深度与能效方面优势显著。在进口温度 30 °C、相对湿度 60% 的标准工况下, 其平均除湿量和热力系数分别达到 12.36 g/kg 和 0.62, 较单级系统提升 72.1% 和 14.8%。系统性能随进口温度升高而增强, 在相对湿度 80% 条件下, 平均除湿量最高可达 16.53 g/kg, 且能够有效利用 50 °C 左右的低温热源, 实现将空气处理至相对湿度 10% 以下的深度除湿能力。该研究为利用低温热源实现高效深度除湿提供了新的系统解决方案与技术参考。

**关键词:** 双级串联系统; 深度除湿; 复合吸附剂; 干燥剂涂层换热器; 低温再生

**中图分类号:** TU834.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851 (2026) 05-0290-08

**引文格式:** 胡鹏, 郑旭, 易志翔, 等. 基于梯度除湿策略的双级串联干燥剂涂层换热器深度除湿系统研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2026, 55(3): 290-297.

**Reference Format:** HU Peng, ZHENG Xu, YI Zhixiang, et al. Research on a deep dehumidification system based on a gradient dehumidification strategy and a two-stage series desiccant-coated heat exchanger[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2026, 55(3): 290-297.

## Research on a deep dehumidification system based on a gradient dehumidification strategy and a two-stage series desiccant-coated heat exchanger

HU Peng, ZHENG Xu, YI Zhixiang, WANG Weining

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** To address the urgent need for deep dehumidification in scenarios such as precision optical manufacturing, this study employs a gradient dehumidification strategy to develop an energy-efficient deep dehumidification system based on a two-stage series desiccant-coated heat exchanger. The system integrates two types of composite adsorbents with complementary properties. Through the construction of an experimental platform, the effects of inlet air temperature and relative humidity on system performance were systematically investigated, and a comparative analysis with a single-stage system was conducted under standard operating conditions. The experimental results demonstrate that the system exhibits significant advantages in terms of dehumidification depth and energy efficiency. Under the standard condition of 30 °C inlet temperature and 60% relative humidity, its average dehumidification amount and thermal coefficient of performance reached 12.36 g/kg and 0.62, respectively, representing improvements

收稿日期: 2025-12-30 网络出版日期: 2026-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(52576238); 浙江省自然科学基金项目(2025C03017)

作者简介: 胡鹏(2001—), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事除湿空调系统方面的研究。

通信作者: 郑旭, E-mail: cindy1989@zstu.edu.cn

of 72.1% and 14.8% compared to the single-stage system. System performance improved with increasing inlet temperature and humidity, achieving a maximum average dehumidification amount of 16.53 g/kg at 80% relative humidity. Furthermore, the system can effectively utilize low-temperature heat sources around 50 °C to achieve deep dehumidification capability, processing air to below 10% relative humidity. This study provides a novel system solution and technical reference for achieving high-efficiency deep dehumidification using low-temperature heat sources.

**Key words:** two-stage series system; deep dehumidification; composite adsorbent; desiccant-coated heat exchanger; low-temperature regeneration

## 0 引言

全球能源需求持续增长与环境保护、化石资源不可再生之间的矛盾日益突出,在此背景下,建筑节能已成为推动可持续发展与实现“双碳”目标的关键环节。在高温高湿气候区,传统空调系统处理潜热负荷(除湿)的能耗尤为巨大。对于精密光学制造等严苛工业场景,其空气环境工艺要求远高于舒适性空调,往往需要对空气进行“深度除湿”,即将空气处理至露点温度低于 0 °C 或相对湿度低于 10%<sup>[1-2]</sup>。蒸汽压缩系统采用冷凝除湿原理,须将空气冷却至露点温度以下,不仅导致蒸发温度过低、系统能效受限,还往往需再热处理,难以高效满足此类深度除湿需求<sup>[3]</sup>。

热驱动固体除湿技术以水为环保制冷剂,利用吸附剂捕集水分,还可利用太阳能与工业余热等低品位热源(40~80 °C)驱动再生,展现出应对上述挑战的潜力<sup>[4-5]</sup>。其中,干燥剂涂层换热器(Desiccant coated heat exchanger, DCHE)通过将吸附剂涂敷于换热器表面并引入内冷/热源,实现了近等温吸附/脱附过程,能有效提升传质性能并降低再生温度,已成为研究热点<sup>[6]</sup>。例如,Zu 等<sup>[7]</sup>将金属有机框架(MOFs)涂覆于 DCHE,在 50 °C 的较低再生温度下其除湿性能优于传统硅胶。Liu 等<sup>[8]</sup>深入研究了 DCHE 内复杂的吸附-冷凝耦合机制,从机理层面验证了 DCHE 在高效除湿方面的优势。

然而,尽管 DCHE 技术持续发展,其在利用中低温热源(如 40~50 °C)实现深度除湿(露点<0 °C 或相对湿度<10%)方面仍面临严峻挑战。在此工况下,现有系统的出口空气含湿量往往难以稳定控制在舒适性空调的通用标准(如 ASHRAE 推荐的 12 g/kg)以下<sup>[9-13]</sup>,更无法满足工业级深度除湿需求<sup>[14]</sup>。例如,精密光学薄膜的制造与测试需在相对湿度低于 10% 的环境中进行,以避免水分对薄膜微观结构和性能的干扰。这类严苛的工艺及实验需求,对系统的除湿能力提出了更高要求。因此,开发

能够高效利用低温热源驱动、实现深度除湿的 DCHE 系统,是推动该技术走向高端工业应用的关键。

为攻克这一难题,现有研究主要从材料创新与系统优化两个维度展开。在材料创新方面,针对单一吸附剂存在的吸湿容量低或再生温度较高等不足,研究者们先后开发出多种高性能复合干燥剂<sup>[15-16]</sup>。早期,将氯化锂等吸湿盐负载于多孔基质或聚合物网络形成的复合干燥剂成为主流,其性能较单一吸附剂有大幅提升<sup>[17]</sup>。例如,Pan 等<sup>[18]</sup>开发的 PVA-LiCl 材料,其平衡吸附容量可达硅胶的 6 倍以上。近年来,温敏复合材料(如引入 PNIPAM)因其突出的低温再生性能受到广泛关注,利用其亲疏水相变特性,可在 40~50 °C 的温和条件下实现高效脱附,显著降低再生能耗<sup>[19-21]</sup>。例如,Karmakar 等<sup>[19]</sup>制备的 PNIPAM-MOF 复合材料,可在 40 °C、相对湿度 40% 条件下释放约 98% 的吸附水;本课题组近期开发的 P-SG-L(G) 材料也体现了这一优势<sup>[20]</sup>。同时,为提升在中低湿度(相对湿度 20%~40%)下的吸附容量,新一代复合凝胶材料应运而生,展现出深度除湿潜力。例如王子航等<sup>[22]</sup>开发的 Cur-LiCl 吸附剂,在 25 °C、相对湿度 30% 条件下平衡吸附量仍高达 1.42 g/g。然而,高性能材料仍需匹配优化的系统架构才能发挥最大效能<sup>[23]</sup>。在系统优化方面,串联多级 DCHE 被认为是突破单级系统除湿深度与效率极限的有效途径,其“梯度除湿”的思想通过逐级处理不同湿度区间的负荷,有望协同提升整体性能<sup>[24]</sup>。

综上所述,当前研究虽在高性能低温再生材料与高效系统构型上取得了阶段性进展,但针对深度除湿目标,将二者进行协同设计与集成,并通过材料-系统的匹配性设计构建优化解决方案,仍有待深入探索。如何将适用于高湿区的快速吸附/低温再生材料,与适用于低湿区的深度吸湿材料,通过合理的串联系统架构结合,使系统在低品位热源驱动下稳定达到工业级深度除湿标准,是兼具学术价值和应用前景的问题。

基于此,本文开发了一种由低温热源( $\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ )驱动、可稳定产出符合深度除湿标准空气的高效双级串联 DCHE 系统。该系统的核心思路是采用梯度除湿策略与双级串联架构,并匹配两种特性互补的吸附剂:第一级采用高湿性能优异、低温再生快的 P-SG-L(G)温敏复合材料,快速移除大部分湿负荷;第二级采用在中低湿环境下仍具备超高吸附容量的 Cur-LiCl 复合凝胶,完成深度除湿任务。为验证该系统设计的可行性与优越性,制备相应涂层换热器并搭建实验系统,在标准工况下,通过对比单/双级系统的动态与整体性能,量化评估串联架构的性能增益,并系统研究进口空气温度与相对湿度对系统性能的影响规律。此外,通过连续循环实验对系统的短期运行稳定性进行验证,为利用低温热源实现工业级深度除湿提供了一条可行的技术路径。

## 1 实验部分

### 1.1 复合吸附剂的制备

根据梯度除湿需求,选用特性互补的两种吸附剂。第一级采用 P-SG-L(G)温敏复合吸附剂以快速去除大部分水分,第二级采用 Cur-LiCl 复合离子凝胶吸附剂以完成深度除湿。这两种材料在  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右的低温下均具有良好的脱附性能,能充分利用低品位热源。其制备方法如下:

P-SG-L(G):a)以硅溶胶为基底,与 N-异丙基

丙烯酰胺(NIPAM)通过自由基聚合反应合成温敏硅胶基质;b)将该基质浸渍于掺杂纳米石墨烯的质量分数为 30%的 LiCl 溶液中,置于  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  烘箱中烘干 12 h 后获得最终产物。

Cur-LiCl:a)以生物聚合物可得然胶为基底,先将可得然胶配制成质量分数为 5%的水溶液,加热溶解后凝胶化,再经干燥形成多孔载体;b)将其浸渍于质量分数为 15%的 LiCl 溶液中进行盐负载,制得复合离子凝胶吸附剂。

### 1.2 除湿换热器的制备

为制备系统所需的除湿换热器,采用广泛使用的管翅式换热器为基底。首先,将换热器(HE)浸入  $1\text{ mol/L}$  的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液中,清洗 20 min 以去除表面油脂,随后用大量清水冲洗并置于  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  烘箱中干燥 3 h。完成基底预处理后,采用两种不同的工艺分别涂覆一级与二级换热器:对于一级除湿单元,在换热器表面均匀涂覆环氧树脂胶,并喷涂 P-SG-L(G)干燥剂粉末;对于二级深度除湿单元,则将质量分数为 5%的可得然凝胶溶液与质量分数为 15%的 LiCl 溶液混合后,分 5 次均匀喷洒于换热器表面。涂敷量分别为 8.0、8.5 g。最终,将涂覆后的 2 个换热器置于  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  烘箱中固化 4 h,即得到 P-SG-L(G)涂敷的除湿换热器 DCHE-P 以及 Cur-LiCl 涂敷的除湿换热器 DCHE-C。除湿换热器的实物如图 1 所示,具体参数见表 1。

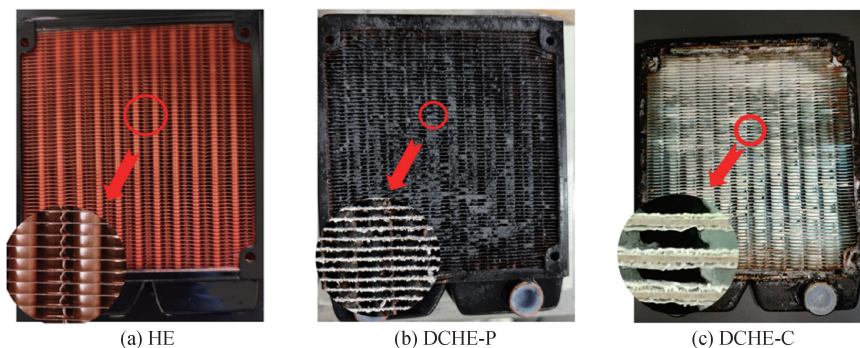


图 1 材料涂敷前后换热器实物图

表 1 除湿换热器性能参数

参数	数值
数量	2
长 $L/\text{mm}$	120
宽 $W/\text{mm}$	24
高 $H/\text{mm}$	150
铜管外径 $d_o/\text{mm}$	4
铜管内径 $d_i/\text{mm}$	3
导液铜管数量 $n/\text{根}$	21
翅片厚度 $\delta_f/\text{mm}$	0.15
翅片数 $N/\text{片}$	60

### 1.3 双级串联深度除湿实验台的搭建

双级串联深度除湿系统的实物如图 2 所示,该装置主要由风道单元、冷热水供应单元和空气/水参数检测单元等 3 部分组成。

风道单元采用透明亚克力板构建,依次分为预处理段、第一级 DCHE-P 处理段和第二级 DCHE-C 处理段。预处理段通过普通换热器(HE)调节进口空气的温度与湿度,空气随后依次流经串联布置的双级干燥剂涂层换热器,每级换热器两端均预留标准化测量孔洞,用于精确检测空气状态参数的级间变化。

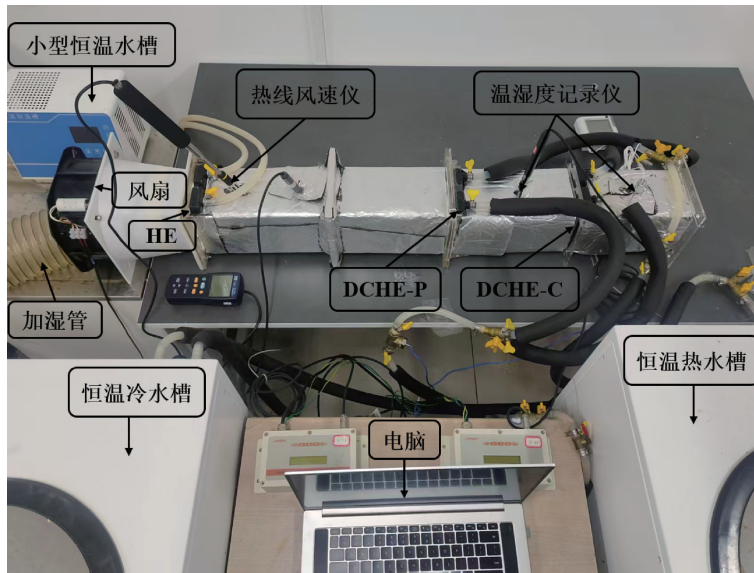


图 2 深度除湿系统实物图

冷热水供应单元包括多台高精度恒温水槽、水流量计及自动切换阀门系统。该系统可为双级干燥剂涂层除湿换热器同时提供所需的冷媒与热媒,通过调节水流量与切换冷热水路,精确模拟并控制复杂的耦合运行工况。

空气/水参数检测单元集成了热线风速仪、温湿度传感器、热电偶及高速数据采集系统,用于实时同步测量并记录风道内多点的风速、空气温湿度、各级换热器进出水温度等关键参数,所有数据均传输至计算机进行存储与后续分析。测量设备参数见表 2。

表 2 测量设备参数

设备	型号	量程	精度
玻璃转子流量计	LZB-10WB	0.1~1.0 L/min	±4.0%, (25 °C)
温湿度传感器	HCTR-HC2A-S	-50.0~100.0 °C 相对湿度 0.0~100.0%	±0.1 °C 相对湿度±0.5%
小型恒温槽	DC-0530	5.00~95.00 °C	±0.05 °C
冷/热水恒温槽	BILON-W-3002S	-10.0~95.0 °C	±0.1 °C
热线风速仪	TES-1341	0.1~30.0 m/s	±3.0%(示值)

在深度除湿阶段,预处理后的湿空气首先进入第一级 DCHE-P 进行初步除湿,其出口空气随即进入第二级 DCHE-C 进行深度处理,最终输出极干燥空气。当吸附剂趋于饱和时,系统切换至再生阶段。阀门系统将热水通入双级换热器以解吸干燥剂,解吸完成后,系统切换回除湿模式,形成循环。设定每个完整的除湿-再生循环为 1200 s(除湿与再生各 600 s)。通过双级串联的定时协同运行,系统在反复循环中不仅能实现更深的除湿效果,还能保持稳定的系统能效。

#### 1.4 性能指标

平均除湿量( $D_{\text{avg}}$ )通常用来评价除湿换热器在一定时间内的除湿能力,按式(1)计算:

$$D_{\text{avg}} = \left( \int_0^{t_a} (d_{a,\text{out}} - d_{a,\text{in}}) dt \right) / t_a \quad (1)$$

其中: $d_{a,\text{in}}$  和  $d_{a,\text{out}}$  分别为进口和出口空气含湿量,

$g/kg$ ;  $t_a$  为有效除湿时间,  $s$ 。

除湿换热器的热力性能系数(Coefficient of performance,  $T_{\text{COP}}$ )通常用来评价整个系统的能量利用率。它与除湿过程中空气侧的平均换热量( $Q_a$ )以及再生过程中水侧的平均换热量( $Q_w$ )相关,按式(2)~(4)计算:

$$Q_a = m_a (h_{a,\text{in}} - h_{a,\text{out}}) \quad (2)$$

$$Q_w = m_w c_{pw} (T_{w,\text{in}} - T_{w,\text{out}}) \quad (3)$$

$$T_{\text{COP}} = \frac{Q_a}{Q_w} \quad (4)$$

其中: $m_a$  为空气的质量流量,  $kg/s$ ;  $h_a$  为空气的焓,  $kJ/kg$ ;  $m_w$  为水流量,  $kg/s$ ;  $T_{\text{COP}}$  为除湿换热器的热力性能系数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 复合吸附剂的吸附和脱附性能

两种材料的典型吸脱附动力学曲线如图 3 所

示。从图 3(a)中可以看出:P-SG-L(G)在较高湿度条件下(如 20 °C,相对湿度 70%)展现出高吸附容量与快速的吸/脱附动力学;在 50 °C 的低温脱附条件下,也表现出快速的脱附动力学。这主要得益于其温敏聚合物网络与纳米石墨烯提升的传质传热效率,这使其能够高效捕集大量水分并利用低温热源快速再生,因此其非常适合作为第一级除湿单元。从图 3(b)中可以看出:Cur-LiCl 在较干条件下(如

25 °C,相对湿度 30%)仍保持优异的吸附能力,并在 50 °C 下具有良好的脱附性能。这是因为由生物凝胶形成的多孔结构有利于水蒸气扩散。该材料在中低湿环境下的高容量和可脱附性,确保了它能对经一级换热器初步干燥后的空气进行深度处理,因此非常适合作为第二级深度除湿单元。综上所述,两种材料表现出的高吸附容量和低温再生能力,是实现系统出口空气极低含湿量目标的材料基础。

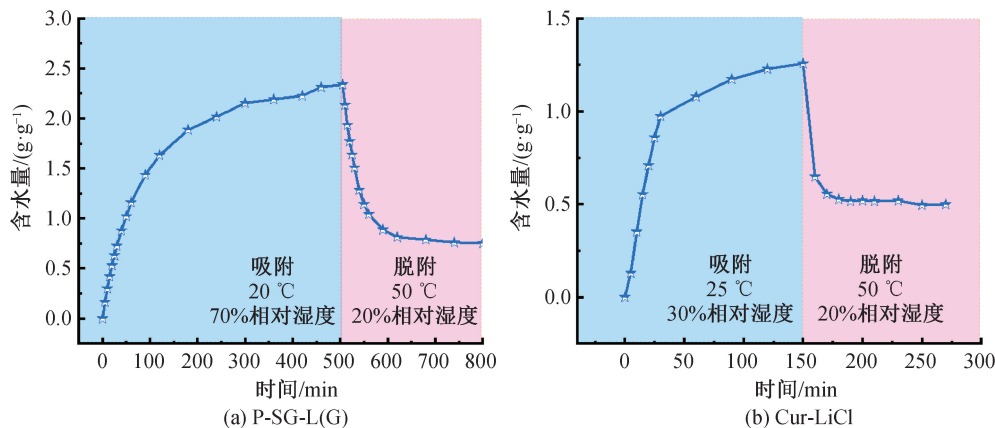


图 3 两种材料的典型吸脱附动力学曲线

## 2.2 动态性能分析

为明确评估双级串联除湿架构相较于传统单级系统的优势,在标准工况(进口空气温度 30 °C、相对湿度 60%、冷水温度 15 °C、热水温度 50 °C、风速 0.5 m/s)下,系统对比了仅使用 DCHE-P 的单级系统与双级串联系统的性能差异。性能对比主要基于进出口空气温差、瞬时除湿量、平均除湿量及热力系数等指标。需要说明的是,在本文的实验设置中,再生阶段通入系统的空气参数和除湿阶段一致,后续的参数影响研究也遵循此原则。在标准工况下,单级与双级串联系统在一个完整除湿-再生周期内随

时间变化的动态性能对比如图 4(a)所示。实验结果表明,双级系统在除湿阶段表现出更显著的温降速率。随着冷却过程的进行,其进出口温差下降较单级系统更快。在再生阶段,双级系统的温降幅度同样大于单级系统。在除湿能力方面,双级系统的瞬时除湿量峰值达到 13.46 g/kg,较单级系统的 8.46 g/kg 提升 59.10%。双级系统在再生阶段呈现出更大的含湿量差值,这与其在除湿阶段吸附了更多水分结果一致。实验结果从动态过程上印证了串联架构对性能的强化作用。其整体性能与能效数据如图 4(b)所示。从整体性能来看,双级系统的平

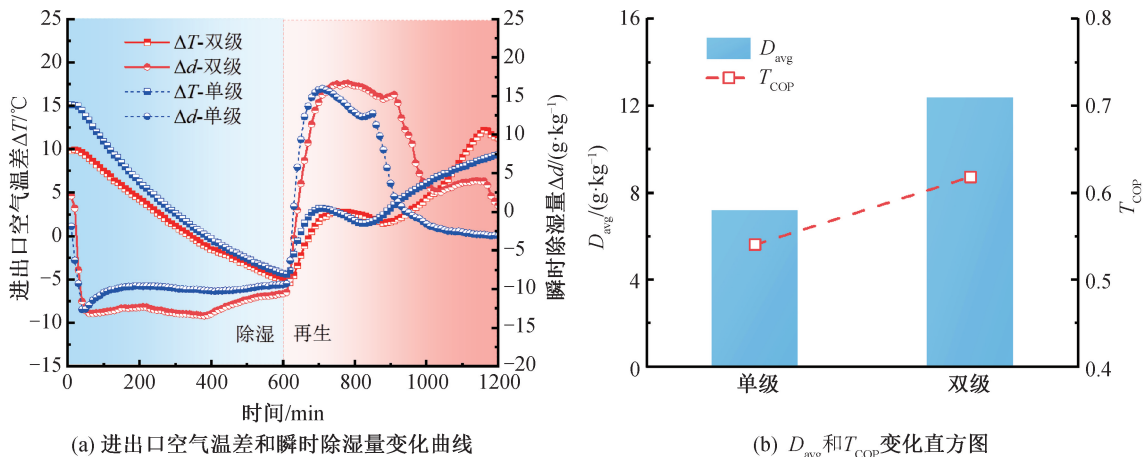


图 4 单级与双级系统的动态响应与性能指标

均除湿量为 12.36 g/kg, 热力系数为 0.62; 单级系统分别为 7.18 g/kg 和 0.54。双级系统在这两项指标上分别实现了 72.14% 和 14.81% 的提升, 验证了串联架构在提升除湿性能与系统能效方面的显著优势。

### 2.3 气候适用范围分析

室外新风的温湿度是影响深度除湿系统性能的关键边界条件。为评估所构建的双级串联深度除湿系统在实际应用中处理不同气候区室外新风的能力, 在标准工况的其他运行参数保持不变的条件下, 系统研究了进口空气温度与进口空气相对湿度两个关键气候参数对系统除湿能力和能效的影响。通过分析系统在不同温湿度工况下的动态响应与稳态性能指标, 为系统在实际多变环境中稳定、高效地应用提供全面的实验依据与设计参考。

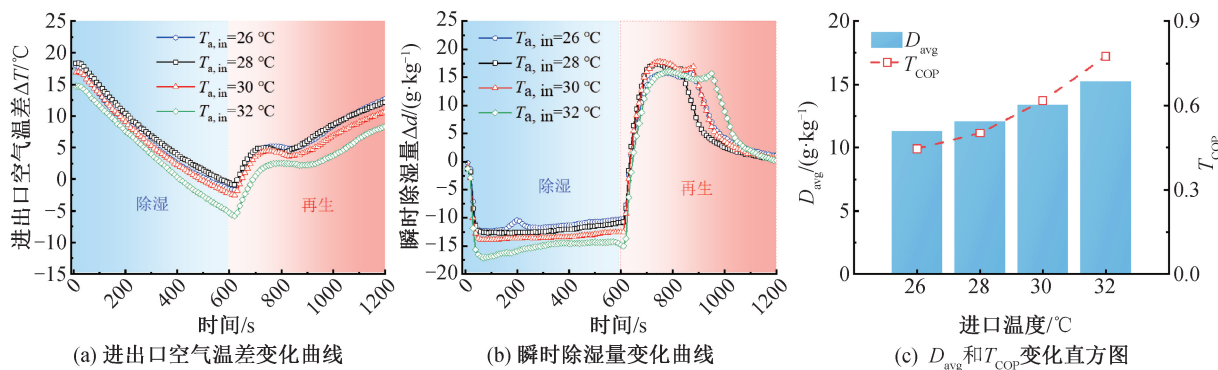


图5 系统性能参数随进口温度的变化情况

### 2.3.2 进口空气湿度

在进口空气温度恒定 30 °C 时, 进口空气相对湿度对系统除湿性能与取水量的影响如图 6 所示。随着相对湿度从 40% 升高至 80%, 空气中水蒸气含量增加, 传质驱动力增强。从图 6(a) 中可以看出: 在再生阶段, 进出口空气温差曲线出现缓升趋势, 且在相对湿度 80% 时趋势最为显著。这是由于更高的湿度使吸附剂在解吸过程中蒸发水量更大, 吸收的潜热更多, 从而延缓了空气温度的回升。

从图 6(b) 中可以看出: 在除湿阶段, 系统除湿能力随进口湿度升高而显著提升, 在相对湿度 80% 时达到峰值 17.38 g/kg, 相比相对湿度 40% 时的 10.60 g/kg 提升 63.96%; 在再生阶段, 瞬时除湿量曲线与代表入口空气含湿量的基线(即横坐标轴)所围成的面积, 在物理上等于该时段内脱附水分的总量(对时间的积分)。分析表明, 进口湿度越高, 此积分面积越大。这直接证实, 由于高湿工况下吸附剂

### 2.3.1 进口空气温度

进口空气温度对系统除湿性能的影响如图 5 所示。从图 5(a) 中可以看出: 在除湿阶段, 随着冷水通入, 进出口温差逐渐下降, 且进口温度越高, 温差下降速率越快; 在再生阶段, 由于水分解吸吸热, 空气温度降低, 且进口温度越高, 温降幅度越大。

高温增强了传热传质过程, 从图 5(b) 中可以看出: 在除湿阶段, 系统瞬时除湿量随进口空气温度升高而增加, 在 32 °C 时达到峰值 17.09 g/kg, 较 26 °C 时的 12.37 g/kg 提升 38.16%; 在再生阶段, 进口温度越高, 含湿量差值越大, 这是因为需要解吸除湿阶段吸附的更多水分。

从图 5(c) 中可以看出: 进口空气温度与系统  $D_{avg}$  和  $T_{COP}$  均呈正相关。当进口温度从 26 °C 升至 32 °C 时,  $D_{avg}$  从 11.30 g/kg 增至 15.20 g/kg,  $T_{COP}$  从 0.45 提升至 0.77。

在除湿阶段捕获了更多水分, 导致其在再生阶段需要脱附的总水量显著增加。再生完成后, 系统进出口含湿量差恢复至零。

从图 6(c) 中可以看出: 进口相对湿度与  $D_{avg}$  和  $T_{COP}$  均呈正相关。当相对湿度从 40% 升至 80% 时,  $D_{avg}$  从 7.35 g/kg 增至 16.53 g/kg,  $T_{COP}$  从 0.35 提升至 0.69。湿度增加虽然会在再生时消耗更多热量, 但显著增强了除湿阶段的传质效果, 且系统整体除湿收益更高, 因此  $T_{COP}$  仍呈现上升趋势。

### 2.3.3 循环稳定性

为了验证系统的运行稳定性与实用潜力, 进行了 5 次连续除湿-再生循环实验, 结果如图 7 所示。从图 7(a) — (b) 中可以看出: 系统在各关键性能指标上均表现出一致性, 系统进出口空气温差和瞬时除湿量在各循环间的变化趋势高度一致, 且数值波动较小, 表明了除湿与再生过程具有良好的可重复性。从图 7(c) 中可以看出: 系统的

$D_{\text{avg}}$  与  $T_{\text{COP}}$  在循环中保持稳定,其波动范围分别控制在 $\pm 9.60\%$ 与 $\pm 6.60\%$ 以内。这一结果进一

步表明该系统在连续运行中兼具稳定性与实用潜力。

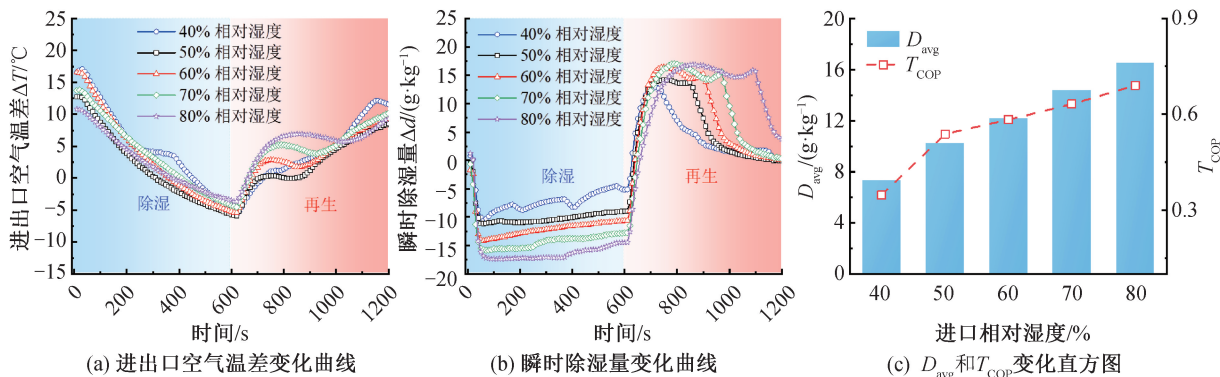


图6 系统性能参数随进口相对湿度的变化情况

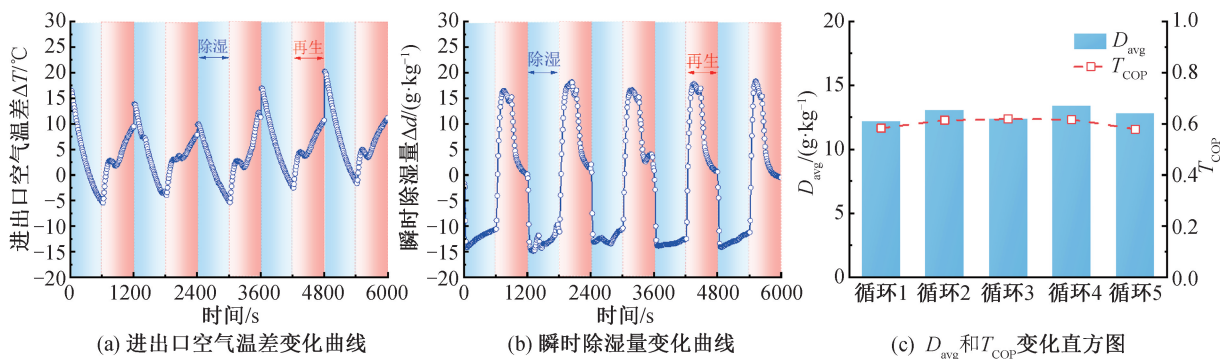


图7 系统性能参数稳定性测试结果

### 3 结论

为应对数据中心、精密制造等对深度除湿的迫切需求,本文基于梯度除湿策略,设计并构建了一种由低温热源驱动的双级串联干燥剂涂层换热器深度除湿系统,并通过实验研究了其性能,主要结论如下:

a)干燥剂的选择和性能:采用梯度除湿的材料选型策略,通过两种特性互补的吸附剂协同工作。第一级选用 P-SG-L(G)温敏复合吸附剂,其在高湿条件下吸附容量达  $2.23 \text{ g/g}$ ,确保了水分的高效初始捕集;第二级选用 Cur-LiCl 复合离子凝胶,其中低湿条件下仍保持  $1.42 \text{ g/g}$  的高吸附容量,实现了对空气的深度干燥。且两种材料均可在约  $50^\circ\text{C}$  的低湿下高效再生,能充分利用低品位热源,满足了对高湿与低湿区水分进行梯度捕获与再生的要求。

b)双级串联架构显著提升深度除湿性能:在标准工况( $30^\circ\text{C}$ ,相对湿度  $60\%$ )下,与单级系统相比,双级串联系统的平均除湿量( $D_{\text{avg}}$ )与热力系数( $T_{\text{COP}}$ )分别达到  $12.36 \text{ g/kg}$  与  $0.62$ ,较单级系统提升  $72.14\%$  和  $14.81\%$ 。瞬时除湿量峰值达  $13.46 \text{ g/kg}$ ,提升  $59.10\%$ 。实验数据表明,梯度除

湿是串联系统获得更高除湿深度与能效的主要原因。

c)气候适应性分析明确了性能边界:系统性能与进口空气的温、湿度呈强正相关。当进口温度从  $26^\circ\text{C}$  升至  $32^\circ\text{C}$  时, $D_{\text{avg}}$  从  $11.30 \text{ g/kg}$  增至  $15.20 \text{ g/kg}$ , $T_{\text{COP}}$  从  $0.45$  升至  $0.77$ 。当进口相对湿度从  $40\%$  升至  $80\%$  时, $D_{\text{avg}}$  从  $7.35 \text{ g/kg}$  大幅提升至  $16.53 \text{ g/kg}$ 。上述量化关系为预测系统在不同新风条件下的性能提供了实验数据参考。连续五次循环实验表明,系统关键性能参数( $D_{\text{avg}}$  与  $T_{\text{COP}}$ )的波动范围分别可控制在 $\pm 9.60\%$ 与 $\pm 6.60\%$ 以内,进出口空气状态的循环重复性好,证实了系统具备短期运行的稳定性。

本文通过梯度除湿的系统设计思路,将两种功能互补的吸附剂与双级串联架构协同优化,实现了利用  $50^\circ\text{C}$  低温热源驱动,将空气处理至相对湿度  $10\%$  以下的深度除湿能力。该研究为精密光学制造等有严苛低湿需求场景,提供了一种高效节能的新型系统解决方案。未来工作可围绕系统结构紧凑化设计、其他关键运行参数(如风速、冷热水温度)的优化,以及在真实气候条件下的长期耐久性测试等方面展开。

## 参考文献:

- [1] 李爱征, 黄宗华, 杨英英, 等. 深度除湿技术在低湿行业中的应用及研究进展[J]. 暖通空调, 2023, 53(9): 1-11.
- [2] 曹博文, 殷勇高, Giannetti Niccolo, 等. 基于离子液体的深度除湿技术及应用探索[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(10): 2958-2964.
- [3] 曾瑞璇, 颜承初, 李梅. 除湿等级划分及深度除湿技术研究进展[J]. 制冷学报, 2020, 41(6): 12-21.
- [4] 周苇杭, 殷勇高, 程小松, 等. 低位热驱动的工业建筑除湿降温空调系统应用研究[J]. 制冷学报, 2022, 43(5): 10-15.
- [5] Akhtar M U S, Fadlallah S O, Khan M I, et al. Sustainable humidity control in the built environment: recent research and technological advancements in thermal driven dehumidification systems[J]. Energy and Buildings, 2024, 304: 113846.
- [6] Rivera A S V. 基于新型复合材料的除湿换热器夏季及冬季工况实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019: 21-24.
- [7] Zu K, Cui S, Qin M. Performance comparison between metal-organic framework (MOFs) and conventional desiccants (silica gel, zeolite) for a novel high temperature cooling system[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 609(5): 052013.
- [8] Liu M Z, Chen W D, Shao Y L et al. Experimental analysis and investigation of desiccant coated heat exchanger applications involving condensation and sorption mechanisms[J]. Energy, 2024, 305: 132255.
- [9] Vivekh P, Bui D T, Wong Y, et al. Performance evaluation of PVA-LiCl coated heat exchangers for next-generation of energy-efficient dehumidification[J]. Applied Energy, 2019, 237: 733-750.
- [10] Vivekh P, Islam M R, Chua K J. Experimental performance evaluation of a composite superabsorbent polymer coated heat exchanger based air dehumidification system [J]. Applied Energy, 2020, 260: 114256.
- [11] Li W, Liu X Y, Li G H, et al. A fluorescent in (III) metal-organic framework for explosives detection [J]. Chemical Research in Chinese Universities, 2023, 39(6): 1005-1009.
- [12] Ge T S, Cao W, Pan X, et al. Experimental investigation on performance of desiccant coated heat exchanger and sensible heat exchanger operating in series[J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 83: 88-98.
- [13] Ge L R, Ge T S, Wang R Z. Facile synthesis of Al-based MOF and its applications in desiccant coated heat exchangers [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 157: 112015.
- [14] 杨晚生, 凌子鹏, 黎毅, 等. 南方湿热地区单级与双级固体除湿系统性能对比[J]. 制冷学报, 2022, 43(2): 107-114.
- [15] Zheng X, Ge T S, Wang R Z. Recent progress on desiccant materials for solid desiccant cooling systems [J]. Energy, 2014, 74: 280-294.
- [16] Zhang Y, Wang W N, Zheng X, et al. Recent progress on composite desiccants for adsorption-based dehumidification[J]. Energy, 2024, 302: 131824.
- [17] 周承喆, 刘林, 李军, 等. LiCl/PVA/硅胶复合干燥剂涂层制备及其循环除湿特性[J]. 新能源进展, 2023, 11(3): 213-220.
- [18] Pan Y, Wang J, Zhong G et al. An ultra-hygroscopic polymer for high-efficiency dehumidification[J]. Cell Reports Physical Science, 2023, 4(9): 101554.
- [19] Karmakar A, Mileo P G M, Bok I, et al. Thermo-responsive MOF/polymer composites for temperature-mediated water capture and release [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2020, 59(27): 11003-11009.
- [20] 王玮宁, 郑旭, 易志翔, 等. 温敏复合吸附剂的水蒸气动态吸附性能研究[J]. 制冷学报, 2025, 46(4): 29-35.
- [21] Wang W N, Zheng X, Li D et al. Synthesis and progress of thermosensitive adsorbents in heat and humidity treatment: a review[J]. Energy, 2024, 311: 133407.
- [22] 王子航, 梁瑞升, 邓超和, 等. 离子凝胶复合吸附剂的制备及空气取水性能[J]. 化工进展, 2022, 41(S1): 389-396.
- [23] Xiong Z Q, Wang R Z, Dai Y J. Experimental study on a two-stage liquid desiccant dehumidification system using dual desiccant solutions[J]. Heat Transfer Research, 2015, 46(4): 383-397.
- [24] Li K Y, Luo W J, Tsai B Y, et al. Performance analysis of two-stage solid desiccant densely coated heat exchangers[J]. Sustainability, 2020, 12(18): 7357.

(责任编辑:康 锋)