

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-09

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20260515001

转轮除湿强化冷凝空气取水复合系统性能分析及优化

郭子豪¹ 陈柳¹ 张媛媛¹ 陈思豪²

(1 西安科技大学能源与矿业工程学院 西安 710054; 2 广东海洋大学海洋工程与能源学院 湛江 524088)

摘要 干燥地区环境空气的低露点温度会显著降低冷凝空气取水系统的取水效率,为了提升冷凝空气取水技术在干燥地区的应用性能,本文提出了转轮除湿强化冷凝空气取水复合系统,通过发挥转轮除湿高吸附、强解吸能力实现环境空气露点温度大幅提升,强化冷凝取水效率;建立了复合系统传热传湿数学模型,通过数值仿真分析了环境含湿量、环境温度、再生温度及冷源温度对3种不同转轮分区结构的复合系统(WFS-1、WFS-2、WFS-3)空气取水性能的影响规律。研究表明:环境含湿量与产水量呈正相关,含湿量高于3 g/kg(干空气)时WFS-1系统性能最优,含湿量低于3 g/kg(干空气)时WFS-3更具优势;环境温度升高会显著抑制系统取水性能,其中WFS-3展现出更宽的温度适应范围;再生温度存在最优区间,超过80 °C后系统产水量提升有限,WFS-3在高温再生条件下单位热能产水量最高;降低冷源温度可扩展系统在低湿环境下的取水极限。本研究为干旱地区高效、低能耗空气取水系统的设计与优化提供了理论参考。

关键词 空气取水;转轮除湿;冷凝取水;干旱地区

中图分类号: TV213.9;TU991.114

文献标识码: A

Performance Analysis and Optimization Study of a Desiccant wheel Enhanced Condensation Atmospheric Water Harvesting Hybrid System

Guo Zihao¹ Chen Liu¹ Zhang Yuanyuan¹ Chen Sihao²

(1. College of Energy and Mining Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. College of Ocean Engineering and Energy, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract

Objective In arid regions, the low dew-point temperature of ambient air significantly limits the water-harvesting efficiency of conventional condensation-based atmospheric water-harvesting (AWH) systems. To address this limitation, this study proposes a desiccant-wheel-enhanced condensation AWH hybrid system that elevates the dew-point temperature of the incoming air prior to condensation, thereby enhancing the condensation potential. The primary objective of this study was to investigate the performance of three hybrid system configurations featuring different desiccant-wheel partition structures (WFS-1, WFS-2, and WFS-3) under various environmental and operational conditions as well as identify the optimal configuration and operating parameters for efficient water production in arid environments.

Methods A comprehensive mathematical model describing coupled heat and mass-transfer processes in a hybrid system was developed. The model integrates desiccant-wheel dehumidification and regeneration processes with the subsequent cooling condensation process. Numerical simulations were performed to evaluate the effects of key parameters on system performance, including the ambient humidity ratio, ambient temperature, regeneration temperature, and cooling-source temperature. Three system configurations—WFS-1, WFS-2, and WFS-3—were compared. Performance metrics included water harvesting rate (WHR, kg/h) and water harvesting efficiency (WHE, kg/(kW·h)). All simulations were conducted under steady-state assumptions, and model accuracy was validated against experimental data from the literature.

Results and Discussion The simulation results revealed several key findings. First, the ambient humidity ratio showed a strong positive correlation with the water yield. When the humidity ratio exceeded 3 g/kg(dry air), WFS-1 achieved the highest WHR owing to

收稿日期:2026-05-15;修回日期:2026-06-01;录用日期:2026-07-29

责任编辑:田甜



移动阅读

its lower pressure decrease and simpler heat-transfer characteristics. However, under extremely dry conditions (humidity ratio $<3 \text{ g/kg}$ (dry air)), WFS-3 outperformed the other two configurations owing to its enhanced moisture adsorption efficiency in low-humidity environments.

Conclusion This study demonstrated that integrating a desiccant wheel with condensation-based atmospheric water harvesting is a viable strategy for improving the water yield in arid regions. The hybrid system performance was highly sensitive to the ambient humidity ratio, and ambient, regeneration, and cold-source temperatures. Among the three configurations, WFS-1 is recommended for moderately humid arid conditions (humidity ratio $>3 \text{ g/kg}$ (dry air)), whereas WFS-3 performs better in extremely dry environments (humidity ratio $<3 \text{ g/kg}$ (dry air)), and offers superior energy efficiency under high-temperature regeneration conditions. These findings provide theoretical guidance for the design and optimization of energy-efficient atmospheric water-harvesting systems tailored to arid and semiarid regions.

Keywords atmospheric water harvesting; rotary dehumidification; condensation water harvesting; arid regions

虽然地球表面水资源丰富,但可直接供人类利用的淡水资源极为有限,仅占全球水储量的极小部分^[1]。由于过度开采、污染及生态破坏,许多地区的饮用水源正不断萎缩^[2]。饮用水短缺已成为全球性严峻挑战,并因人口增长、气候变化及社会经济发展不平衡而加剧。在中国,淡水总量约为 2.8 万亿 m^3 (占全球淡水资源的6%),人均水资源量约为 $2\,200 \text{ m}^3$,仅为世界平均水平的1/4。水资源短缺不仅威胁生存,也制约社会经济的发展。因此,开发可持续的替代水源势在必行。从大气中提取淡水(空气取水)作为一种新兴途径备受关注^[3-5],大气水汽广泛存在且通过全球水循环持续更新,具备广阔的可持续发展潜力^[6]。

现有空气取水技术可分为2类:冷凝空气取水和吸附空气取水。冷凝取水将空气冷却至露点以下,使水蒸气冷凝成液态水^[7]。V. P. Joshi等^[8]基于热电冷却原理,实验研究了利用环境潮湿空气冷凝空气取水的装置,并探究了散热结构对产水性能的影响。E. Ansari等^[9]对3款商用蒸汽压缩制冷式冷凝空气取水设备在夏季4个月的现场性能进行了实验研究,分析了入口温度和相对湿度对产水量的影响。研究表明,该技术可作为高湿高温海湾地区海水淡化的非浓盐水补充方案。吸附取水通过亲水材料的周期性吸附和解吸过程从空气中捕获水^[10-11]。G. E. William等^[12]实验研究了一种用于大气取水系统的梯形棱柱多层床太阳能集热器。该系统夜间利用氯化钙溶液吸附空气中水蒸气,白天通过太阳能进行解吸再生,并经冷凝收集。

为突破单一空气取水技术瓶颈,转轮除湿强化冷凝空气复合取水系统能够主动升高空气露点、拓展适用湿度区间,因而得到广泛关注。相关研究主要集中于多级转轮除湿构型与热源优化方面。Zhang Qiaoxin等^[13]实验研究了一种采用四级转轮除

湿进行空气预湿化、并以蒸汽压缩制冷机为冷源的系统。Liu Mengdan等^[14]针对潮湿地区建立了系统模型,采用多级串联转轮除湿对空气进行加湿后冷凝,分析了主要参数对多级串联转轮除湿性能的影响。Tu Rang等^[15]提出了一种多级转轮除湿系统,并与直接冷却法对比,发现在相对湿度低于60%时该系统效率更高,在高湿环境下结合太阳能热能时优势尤其显著。Tu Rang等^[16]提出了一种热泵驱动系统,可在直接冷却和转轮除湿辅助2种模式下运行,并根据环境参数界定了不同模式的适用边界。A. Agrawal等^[17]集成了太阳能空气加热器和热能存储装置,使太阳能耦合系统在夜间再生温度不足时仍能连续运行。

虽然转轮除湿强化冷凝空气取水复合系统表现出显著的性能优势,但难以在干旱地区有效运行,而这类地区对空气取水技术的需求相较湿润地区更为迫切。转轮分区结构是提升转轮除湿露点温度的核心影响因素,是复合系统适用于干旱地区的关键^[18]。本文提出3种不同转轮分区结构的转轮除湿强化冷凝空气取水复合系统,旨在评估不同系统在不同运行条件下的取水性能,深入分析其取水量、单位热量取水量与环境温湿度、再生温度、冷源温度等关键参数之间的关系,以研究不同转轮分区结构在干燥地区的适应性及取水效率,为转轮除湿强化冷凝空气取水复合系统在干燥地区的应用提供理论基础和优化路径。

1 系统原理与数学模型

1.1 系统原理

本文构建了转轮除湿强化冷凝空气取水复合系统,主要由转轮除湿机、空气加热器、取水换热器、集水箱及风机组成。根据转轮分区结构的不同,系统分为二分区与三分区2种构型^[19]。其中,WFS-1为二

分区系统,其处理区与再生区角度分别为 270° 和 90° ; WFS-2 与 WFS-3 为三分区系统, WFS-2 的处理区、吹扫区与再生区角度分别为 180° 、 90° 和 90° , WFS-3 则对应为 270° 、 45° 和 45° , 转轮除湿强化冷凝空气取水复合系统原理图如图 1 所示。

在二分区系统(WFS-1)中,处理区的空气处理过程为:室外空气 1 经风机送入转轮处理区,其中的水分被吸附剂捕获,干燥后的空气 2 被排出;再生区的空气处理过程为:室外空气 1 经空气加热器升温至再生空气 3 后,进入转轮再生区,将吸附剂中所含水分脱附,形成高露点温度的再生排气 4。该排气随后进入取水换热器,被冷却至露点以下从而冷凝析出液态水,空气 5 最终被排出。图 2 所示为转轮除湿强化冷凝空气取水复合系统空气处理焓湿图(WFS-3)

三分区系统(WFS-2 和 WFS-3)在二分区系统(WFS-1)基础上增加了独立的吹扫区,用于降低转轮吸附剂温度、清除吸附剂内部湿气,使其在进入处理区前有更高的吸附能力。三分区系统处理区与再生区空气处理过程与二分区系统相同,吹扫区的空气处理过程为:室外空气 1 直接送入转轮吹扫区,冷却转轮吸附剂,吹扫吸附剂水蒸气,吹扫后的空气 6 直接排出。

1.2 数学模型

转轮除湿机模型采用势函数模型,通过引入 2 个势函数 F_1 和 F_2 来确定处理空气理想出口温度。 F_1 和 F_2 的非线性表达式分别如式(1)和式(2)所示^[20]。

$$F_1 = \frac{-2865}{(t + 273.15)^{1.49}} + 4.344 \left(\frac{\omega}{1000} \right)^{0.8624} \quad (1)$$

$$F_2 = \frac{(t + 273.15)^{1.49}}{6360} - 1.127 \left(\frac{\omega}{1000} \right)^{0.07969} \quad (2)$$

式中: t 不同工况下的温度, $^\circ\text{C}$; ω 为不同工况下的含湿量, g/kg (干空气)。

考虑到转轮除湿机的非理想性,将 F_1 与 F_2 用 η_{F1} 和 η_{F2} 进行修正。 η_{F1} 和 η_{F2} 取值与转轮除湿机性能有关,高性能转轮除湿机的 η_{F1} 取 0.5, η_{F2} 取 0.95^[21]。 η_{F1} 和 η_{F2} 的计算式如下:

$$\eta_{F1} = (F_{1,p,out} - F_{1,p,in}) / (F_{1,r,in} - F_{1,p,in}) \quad (3)$$

$$\eta_{F2} = (F_{2,p,out} - F_{2,p,in}) / (F_{2,r,in} - F_{2,p,in}) \quad (4)$$

式中: $F_{1,p,out}$ 、 $F_{1,p,in}$ 分别为处理出口、入口 F_1 势函数; $F_{1,r,out}$ 、 $F_{1,r,in}$ 分别为再生出口、入口 F_1 势函数; $F_{2,p,out}$ 、 $F_{2,p,in}$ 分别为处理出口、入口 F_2 势函数; $F_{2,r,out}$ 、 $F_{2,r,in}$ 分别为再生出口、入口 F_2 势函数。通过式(1)~式(4)计算处理区出口状态点的温度和含湿量,再根据转轮除湿处理区和再生区的显热平衡和湿平衡确定再

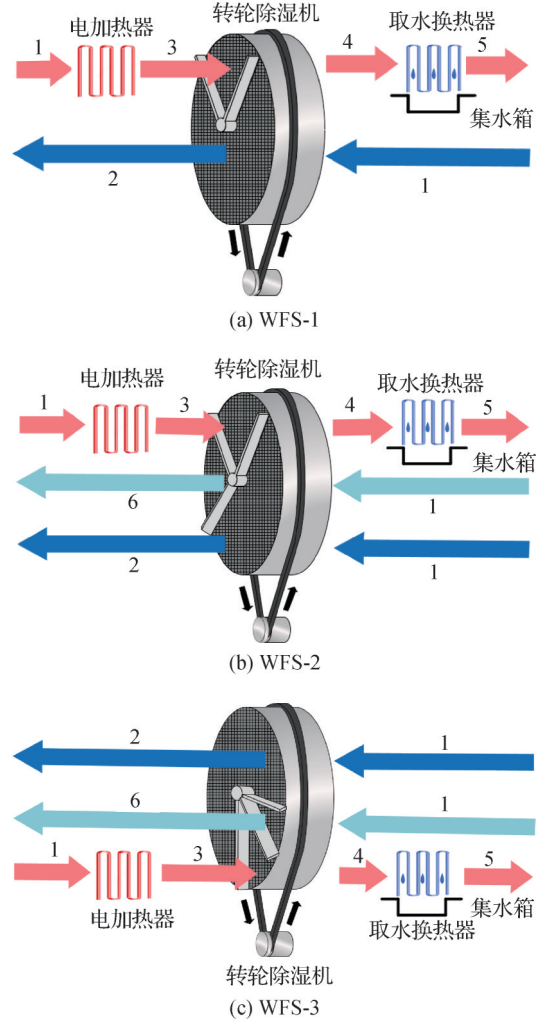


图 1 转轮除湿强化冷凝空气取水复合系统

Fig.1 Desiccant wheel enhanced condensation atmospheric water harvesting composite system

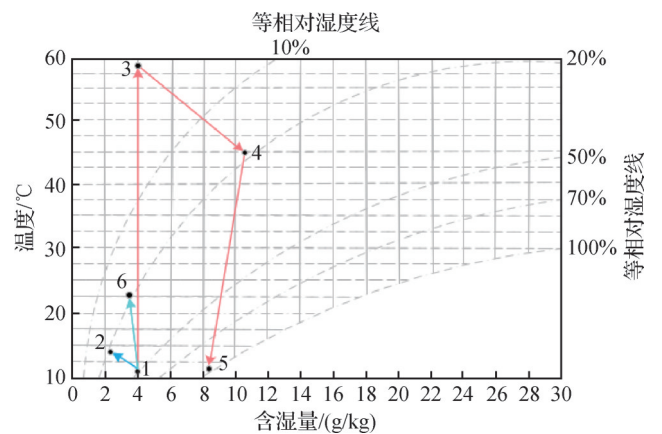


图 2 转轮除湿强化冷凝空气取水复合系统空气处理焓湿图 (WFS-3)

Fig.2 Psychrometric chart of air handling process for a desiccant wheel enhanced condensation atmospheric water harvesting composite system (WFS-3)

生区出口状态点。处理区和再生区的显热平衡和湿平衡的计算式如下:

$$G_{m,p}(t_{p,out} - t_{p,in}) = G_{m,r}(t_{r,out} - t_{r,in}) \quad (5)$$

$$G_{m,p}(\omega_{p,out} - \omega_{p,in}) = G_{m,r}(\omega_{r,out} - \omega_{r,in}) \quad (6)$$

式中: G_m 为空气质量流量, kg/s。

取水换热器应用干球温度效率法。再生出口空气进入取水换热器后, 被冷却至露点温度以下, 水蒸气冷凝析出。其计算方式如式(7)~式(14)所示^[22]:

$$\varepsilon_1 = \frac{(t_1 - t_2)}{t_1 - t_{w1}} = \frac{(1 - e^{-\beta(1-\gamma)})}{(1 - \gamma e^{-\beta(1-\gamma)})} \quad (7)$$

$$\varepsilon_2 = 1 - \frac{(t_2 - t_{s2})}{(t_1 - t_{s1})} = 1 - e^{-\frac{\gamma A}{G_m c_p}} \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{\zeta G_m c_p}{G_w c_w} \quad (9)$$

$$Q = G_m(i_1 - i_2) = G_w(t_{w2} - t_{w1})c_w \quad (10)$$

$$K = \left[\frac{1}{(aV_y^m \zeta^n)} + \frac{1}{bv_w^{0.8}} \right]^{-1} \quad (11)$$

$$\beta = \frac{AK}{\zeta G c_p} \quad (12)$$

$$\zeta = \frac{(i_1 - i_2)/c_p}{(t_1 - t_2)} \quad (13)$$

$$W = G_m(d_1 - d_2) \quad (14)$$

式中: A 为表面面积, m^2 ; c_p 为空气的比定压热容, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$; c_w 为水的比热容, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$; d 为空气含湿量, g/kg (干空气); G_w 为冷水质量流量, kg/s ; i_1 、 i_2 分别为空气初态、终态焓值, kJ/kg ; Q 为制冷量, kW ; t_1 、 t_2 分别为空气初始、终态干球温度, $^\circ C$; t_{s1} 、 t_{s2} 分别为空气初始、终态湿球温度, $^\circ C$; t_{w1} 、 t_{w2} 分别为冷水初始、终态温度, $^\circ C$; v_w 为取水换热器管内流速, m/s ; V_y 为迎面风速, m/s ; W 为取水量, kg/s ; a 、 b 、 m 、 n 为通过实验获得的系数与指数; ε_1 为换热效率系数; ε_2 为接触系数; a_w 为对流传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; β 为传热单元数; γ 为热容比; ζ 为析湿系数。

1.3 评价指标

再生加热量 P 的计算如式(15)所示:

$$P = G_m c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (15)$$

式中: P 为再生加热量, kW ; T_{in} 、 T_{out} 为分别空气加热器入口、出口温度, $^\circ C$ 。

系统的性能评价指标为取水量 V_m (kg/h) 与单位热能取水量 V_e ($kg/(kW \cdot h)$), 其计算式如式(16)与式(17)所示^[13]:

$$V_m = \frac{G_m(\omega_{out} - \omega_{in}) \times 3600}{1000} \quad (16)$$

$$V_e = \frac{V_m}{P} \quad (17)$$

式中: ω_{in} 、 ω_{out} 分别为取水换热器入口、出口含湿量,

g/kg (干空气)。

1.4 模型验证

为验证所建仿真模型的准确性, 本文基于西安科技大学转轮除湿系统实验平台, 针对三分区转轮各出口温湿度进行模型验证, 实验装置由1台三分区除湿转轮机、1台空气加热器、1台取水换热器构成, 实验装置如图3所示, 三分区转轮参数如表1所示。实验取水量、单位热量取水量与模拟取水量、单位热量取水量误差对比如图4所示, 结果表示取水量与单位热量取水量误差不超过10%。

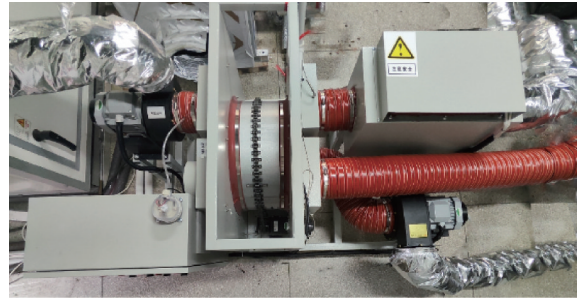


图3 转轮除湿强化冷凝空气取水复合系统实验装置

Fig.3 Experimental setup for a desiccant wheel enhanced condensation atmospheric water harvesting composite system

表1 三分区转轮参数

Tab.1 Three-zone desiccant wheel specifications

参数	数据/数值
材料	硅胶
波纹结构	正弦形
厚度/mm	400
空气流速/(m/s)	2
直径/mm	1 252
转速/(r/h)	12

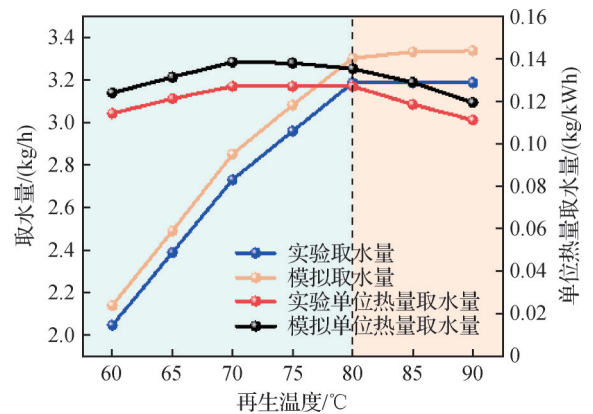


图4 数值模拟结果的实验验证

Fig.4 Experimental verification of numerical simulation results

2 结果与讨论

基于上述传热传湿数学模型,进行了数值模拟计算,两分区复合系统中处理区和再生区风量取 $0.476 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $0.158 \text{ m}^3/\text{s}$,三分区复合系统中处理区、吹扫区和再生区风量取 $0.476 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.158 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $0.158 \text{ m}^3/\text{s}$,对比分析3种不同转轮分区结构的转轮除湿强化冷凝空气取水复合系统在不同环境温湿度、再生温度和冷源温度工况条件下的取水性能。

2.1 环境空气含湿量对系统取水影响

为研究环境空气含湿量对不同转轮系统取水性能的影响,设定模拟工况如下:取水换热器供水温度为 7°C ,环境空气温度为 10°C ,环境空气含湿量从 2.0 g/kg (干空气)逐步提升至 5.5 g/kg (干空气),模拟计算并分析了各系统取水量及单位热量取水量的变化规律。

结果表明,环境空气含湿量对取水性能具有决定性影响,且不同系统构型在不同湿度区间表现出显著差异,如图5、图6所示。在低含湿量区间($<3 \text{ g/kg}$ (干空气)),WFS-3系统的取水量最大,WFS-1次之,而WFS-2系统在此条件下无法有效取水。在高含湿量区间($>3 \text{ g/kg}$ (干空气)),WFS-1系统的取水量显著领先。各系统取水的湿度下限亦不相同,WFS-1、WFS-2、WFS-3可开始取水的最低环境含湿量分别为 3.0 、 3.5 、 2.5 g/kg (干空气)。在能效方面,WFS-3系统的单位热量取水量始终最高,WFS-1次之,WFS-2最低。

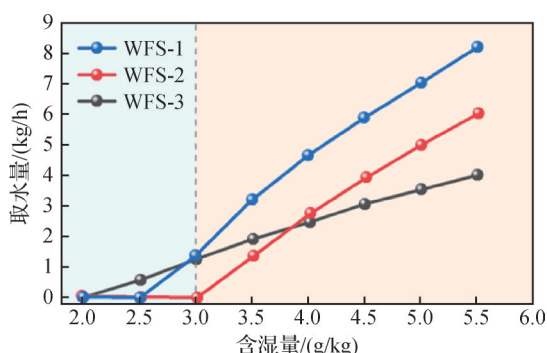


图5 环境空气含湿量对取水量的影响

Fig.5 Effect of ambient air humidity ratio on water collection rate

随着环境空气含湿量的升高,3个复合系统的取水量与单位热量取水量均呈现上升趋势。其根本机理在于,更高的空气含湿量意味着转轮在处理区能吸附更多的水分,经再生后产生的再生排气含湿量也相应提高,从而提升了冷凝取水的潜力。WFS-1

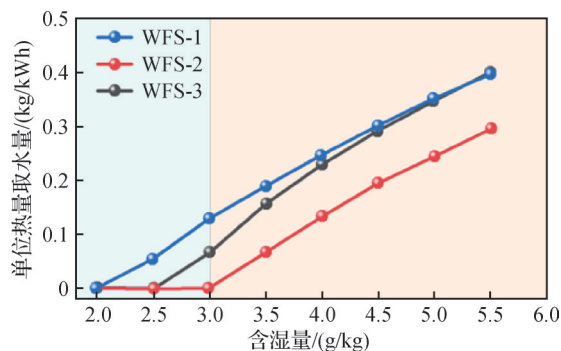


图6 环境空气含湿量对单位热量取水量的影响

Fig.6 Effect of ambient air humidity ratio on water yield per unit of heat consumption

系统在高湿条件下取水量领先,主要归因于其拥有最大的处理区风量(270°),从而实现了最高的水分吸附总量。

在低湿条件下,三分区系统的结构优势得以显现。WFS-3系统虽处理风量与WFS-1相同,但其独立的吹扫区有效降低了转轮进入再生区前的温度,提升了深度除湿能力,使得再生出口空气的相对湿度更高,从而在低湿环境下实现了更佳的取水效果。此外,WFS-3再生区角度仅为 45° ,所需再生风量是再生区为 90° 的WFS-1和WFS-2系统的 $1/2$ 。因此,在相同的再生温度下,WFS-3的再生加热能耗显著降低,这直接导致了其单位热量取水量(能效)始终处于最优水平。

若以最大产水量为首要目标,在含湿量大于 3 g/kg (干空气)时应优先选择WFS-1系统,在含湿量低于 3 g/kg (干空气)时则WFS-3系统更优;若以能源效率作为首要目标,则WFS-3系统在所有湿度条件下均为最佳选择。

2.2 环境空气温度对系统取水影响

为研究环境温度对不同转轮系统取水性能的影响,设定模拟工况如下:取水换热器供水温度为 7°C ,环境空气含湿量固定为 4 g/kg (干空气),将环境送风温度由 10°C 逐步升至 35°C ,模拟计算并分析了各系统取水量及单位热量取水量的变化规律。

结果表明,环境温度对系统取水能力具有显著的抑制作用,且温度升高对不同系统构型的影响存在明显差异,如图7和图8所示。在低温段($<27^\circ\text{C}$),WFS-1系统取水量最高;当温度超过 27°C 后,WFS-3系统则取水量最高。各系统的温度适应上限不同,WFS-1、WFS-2与WFS-3可正常运行的最高环境温度分别为 25°C 、 20°C 和 30°C ;当温度达到 35°C 时,所有系统在设定工况下均无法有效取水。在能效方面,WFS-3系统的单位热量取水量始终最高,WFS-1

次之,WFS-2则显著低于前两者。该现象遵循吸附剂的热力学特性:在相同含湿量下,温度升高会降低吸附剂的平衡吸附容量,导致处理区吸湿量减少,从而使转入再生区的含水量降低,最终使得再生排气含湿量下降,冷凝潜力减弱。

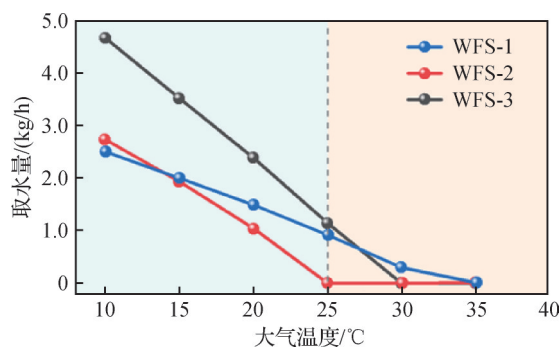


图7 环境空气温度对取水量的影响

Fig.7 Effect of ambient air temperature on water collection rate

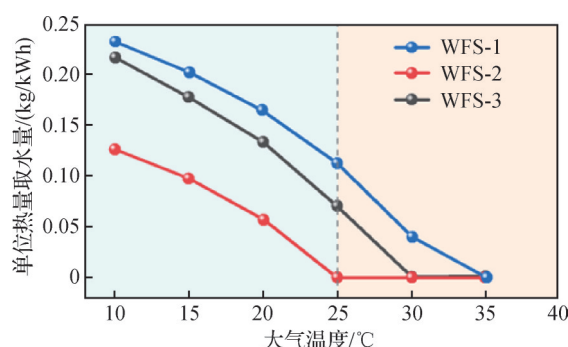


图8 环境空气温度对单位热量取水量的影响

Fig.8 Effect of ambient air temperature on water yield per unit of heat consumption

WFS-1在低温下取水效率领先,主要得益于其更大的处理区面积(270°),可实现更高的水分吸附总量。但随着温度上升,吸附剂性能衰退,其无冷却结构的劣势显现。相比之下,WFS-2与WFS-3系统设有吹扫区,能有效降低转轮温度,从而缓解高温对吸附性能的不利影响,因此在较高温度段保持更好的取水能力。

进一步对比WFS-2与WFS-3,在相同中等含湿量(4 g/kg (干空气))下,WFS-3凭借其更大的处理区面积(270° 对比 180°),吸附了更多水分,其再生排气呈现出“低温高湿”的特性;而WFS-2的排气则相对“高温低湿”。在取水换热器中,前者因更接近露点而具有更高的冷凝效率,因此WFS-3的取水量显著高于WFS-2。

WFS-3系统在较宽的温度范围内兼具良好的取水能力与最优的能源效率,尤其适用于昼夜或季节

性温差大、温度较高的应用场景。系统选型时需综合考虑环境温度范围与能效要求。

2.3 再生温度对系统取水影响

为研究再生温度对不同转轮系统取水性能的影响,设定模拟工况如下:取水换热器供水温度恒为 7°C ;环境空气含湿量保持 4 g/kg (干空气);环境温度稳定于 10°C ,将再生温度由 60°C 阶梯式提升至 90°C ,模拟计算并分析了各系统取水量及单位热量取水量的变化规律。

再生温度对3个复合系统再生出口温湿度、取水量与单位热量取水量的影响分别如图9、图10、图11所示。WFS-1系统在各温度段均表现突出,尤其是在 80°C 以下时取水量显著领先其他方案;WFS-2与WFS-3的取水量均随再生温度升高而增加,但在低温区($<80^\circ\text{C}$)WFS-2略占优势,而在高温区($>80^\circ\text{C}$)WFS-3反超WFS-2。值得注意的是,WFS-1系统的取水量随再生温度升高呈现先增后减的单峰特征,在 80°C 附近达到极值。系统在能源效率方面呈现明显分化,WFS-3的单位热量取水量随温度升高持续线性增长;WFS-1则呈线性下降趋势;WFS-2的单位热量取水量在整个实验温度范围内保持相对平稳,但始终显著低于前两者。

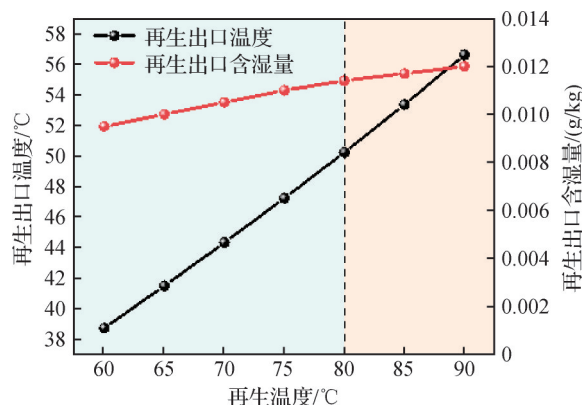


图9 再生温度对再生出口温湿度的影响

Fig.9 Effect of regeneration temperature on outlet temperature and humidity of regeneration air

再生温度的升高增强了脱附驱动力,在 $60 \sim 80^\circ\text{C}$ 区间内,各系统再生排气含湿量随之提升,取水量同步增长。然而,当温度超过 80°C 后,再生出口含湿量仅由 0.0114 g/kg (干空气)增至 0.012 g/kg (干空气);转轮内吸附水分的脱附趋于饱和,进一步升温主要引起再生空气温度上升,反而降低取水换热器冷凝效率。该效应对WFS-1尤为明显,致使其取水量在高温区下降。由于WFS-1再生区角度为WFS-3的2倍,在相同再生温度下需消耗约2倍的加热量,

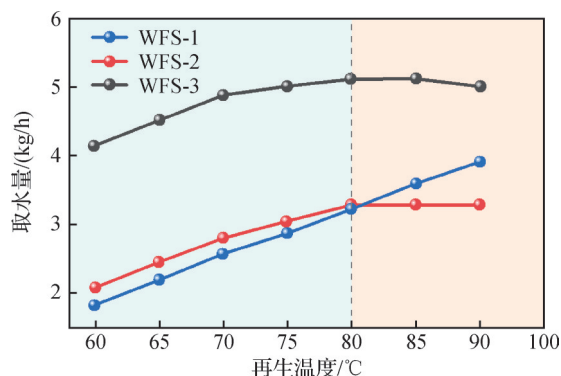


图10 再生温度对取水量的影响

Fig.10 Effect of regeneration temperature on water collection rate

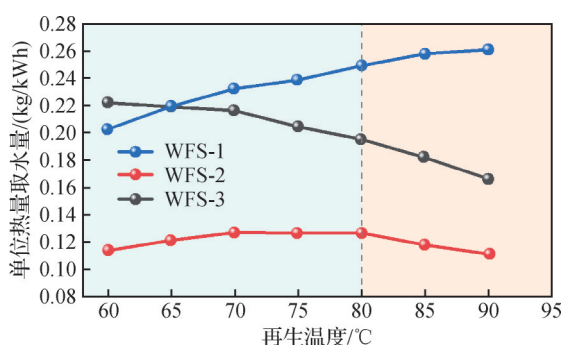


图11 再生温度对单位热量取水量的影响

Fig.11 Effect of regeneration temperature on water yield per unit of heat consumption

因此其单位热量取水率在高温段明显低于WFS-3。该差异表明若以最大化产水量为目标,WFS-1在80℃附近为最优选择;若以能源效率为首要评价指标,WFS-3在更高再生温度下表现出显著优势,特别适用于对系统能效有严格要求的应用场景。

2.4 冷源温度对系统取水影响

为系统研究冷凝温度对取水性能的影响,选取能效表现最佳的WFS-3系统作为研究对象,以取水换热器水温作为关键变量展开分析。在固定环境温度与再生温度条件下,逐步将冷凝水温从7℃提高至15℃,模拟计算并分析了不同环境含湿量下的系统响应状况。

冷凝水温对系统取水能力具有显著抑制作用,如图12、图13所示。随着水温升高,3个复合系统的取水率与单位热能取水率均呈下降趋势。更为关键的是,冷凝水温直接影响系统运行的湿度适应范围,当水温为7℃时,系统可有效取水的最低环境含湿量为2 g/kg(干空气);而当水温升至15℃时,最低取水湿度阈值显著提高至4 g/kg(干空气),意味着系统在干燥环境中的取水能力大幅受限。

在取水换热器中,再生排气须被冷却至其露点

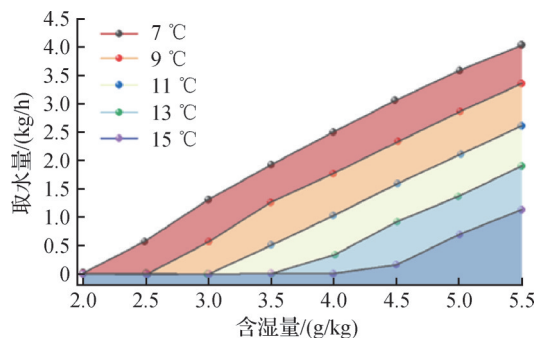


图12 冷源温度对取水量的影响

Fig.12 Effect of cold source temperature on water collection rate

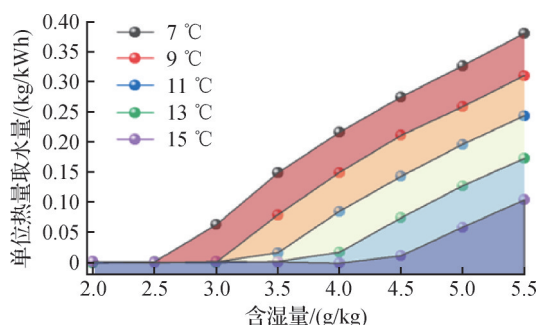


图13 冷源温度对单位热量取水量的影响

Fig.13 Effect of cold source temperature on water yield per unit of heat consumption

温度以下才能实现水分析出。更低的水温意味着更强的冷却驱动力与更低的露点温度阈值,使系统能够在更低的再生排气含湿量条件下实现冷凝,从而显著拓宽系统在低湿环境中的运行边界。在干旱或半干旱地区等低湿应用场景中,必须配备高效的冷却系统以维持较低的冷凝温度,这是保障系统稳定运行与高效取水的前提条件。该结论对指导实际系统中冷却单元的选型与设计具有重要工程意义。

3 结论

通过建模与仿真,系统研究了转轮除湿强化冷凝空气取水复合系统的性能,并对不同系统构型(WFS-1、WFS-2、WFS-3)进行了对比分析,得到如下结论:

1)环境空气含湿量是影响系统取水性能的关键因素。取水率随含湿量升高而线性增长,表明系统在高湿环境下具有更强的产水能力。在不同含湿量区间,系统构型存在最优选择:高湿(>3 g/kg(干空气))时WFS-1取水率最大,低湿(<3 g/kg(干空气))时WFS-3表现最佳。而在能效方面,WFS-3因其再生区结构设计(再生角度45°)始终具有最高的单位热量取水率。

2)环境温度的升高显著抑制系统取水能力。随着温度升高,各系统取水量与能效均呈下降趋势。WFS-3系统在较高温度下仍保持较好的取水性能,其最高可取水温度达30℃,展现出更宽的温度适应范围,尤其适用于温差较大或温度较高的环境。

3)再生温度存在明确的优化区间与系统差异。在60~80℃区间内提升再生温度可有效增加取水量,但超过80℃后WFS-1系统的取水量开始下降。WFS-1在80℃附近取水量最大,而WFS-3在更高再生温度下单位热量取水量持续升高,表现出显著的能效优势,尤其适用于对能耗敏感的应用场景。

4)冷源温度是制约系统在低湿环境下取水能力的关键参数。降低冷源温度可显著拓展系统取水的湿度下限(如从15℃时的4 g/kg(干空气)降至7℃时的2 g/kg(干空气)),这对在干旱地区实现稳定取水至关重要,也为冷却系统的设计与选型提供了明确指导。

本研究结果为不同气候条件下转轮除湿强化冷凝空气取水复合系统的高效运行与节能优化提供了理论依据,并为系统构型的选择与关键参数的设计提供了科学参考。

本文受陕西省重点研发计划项目(2025CY-YBXM-106),广东省基础与应用基础研究基金委员会(2025A1515010575)资助。(The project was supported by the Key Research and Development Program of Shaanxi Province (No. 2025CY-YBXM-106) and the Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (No. 2025A1515010575).)

参考文献

- [1] Tu Rang, Hwang Y. Reviews of atmospheric water harvesting technologies[J]. *Energy*, 2020, 201: 117630.
- [2] Nikkhah H, Wan Azmi W M, Nikkhah A, et al. A comprehensive review on atmospheric water harvesting technologies: from thermodynamic concepts to mechanism and process development [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 53: 103728.
- [3] 王源, 刘剑飞, 王考, 等. 空气取水多孔材料研究进展[J]. *科技通报*, 2024, 40(8): 1-12. (Wang Yuan, Liu Jianfei, Wang Kao, et al. Research progress on porous materials for atmospheric water harvesting[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2024, 40(8): 1-12.)
- [4] 隋增光, 林昊晟, 隋云任, 等. 数据中心吸收式节能节水技术研究与应用进展[J]. *制冷学报*, 2026, 47(1): 37-50. (Sui Zengguang, Lin Haosheng, Sui Yunren, et al. Research and application progress of sorption-based energy and water saving technologies in data centers[J]. *Journal of Refrigeration*, 2026, 47(1): 37-50.)
- [5] 王玮宁, 郑旭, 易志翔, 等. 温敏复合吸附剂的水蒸气动态吸脱附性能研究[J]. *制冷学报*, 2025, 46(4): 29-35. (Wang Weining, Zheng Xu, Yi Zhixiang, et al. Study of dynamic moisture adsorption and desorption performance of thermosensitive composite adsorbents [J]. *Journal of Refrigeration*, 2025, 46(4): 29-35.)
- [6] Wang Jiashuo, Yang Ziyi, Li Zekai, et al. Comprehensive review on atmospheric water harvesting technologies [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2025, 69: 106836.
- [7] Zolfagharkhani S, Zamen M, Shahmardan M M. Thermodynamic analysis and evaluation of a gas compression refrigeration cycle for fresh water production from atmospheric air [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 170: 97-107.
- [8] Joshi V P, Joshi V S, Kothari H A, et al. Experimental investigations on a portable fresh water generator using a thermoelectric cooler [J]. *Energy Procedia*, 2017, 109: 161-166.
- [9] Ansari E, Ferber N L, Hulleck A A, et al. Performance of vapour compression based atmospheric water generation systems in arid conditions-Experimentations and perspectives in the Gulf region[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 53: 103739.
- [10] Bai Zhaoyuan, Wang Pengfei, Xu Jiaxing, et al. Progress and perspectives of sorption-based atmospheric water harvesting for sustainable water generation: materials, devices, and systems. [J]. *Science bulletin*, 2023, 69(05): 671-687.
- [11] 冯耀辉, 陈彬, 葛天舒, 等. 内冷调控高效吸附式空气取水[J]. *工程热物理学报*, 2023, 44(6): 1446-1451. (Feng Yaohui, Chen Bin, Ge Tianshu, et al. High-efficiency atmospheric water harvesting with internal cooling source[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2023, 44(6): 1446-1451.)
- [12] William G E, Mohamed M H, Fatouh M. Desiccant system for water production from humid air using solar energy [J]. *Energy*, 2015, 90: 1707-1720.
- [13] Zhang Qiaoxin, Tu Rang, Liu Mengdan. Thermal and economical performances analyses of a desiccant wheels-assisted atmospheric water harvesting system used in humid climate regions [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 56: 104323.
- [14] Liu Mengdan, Tu Rang, Wu Zilei, et al. Performance analyses of desiccant wheel-assisted atmospheric water harvesting system using renewable heating and cooling sources [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 252: 115065.
- [15] Tu Rang, Liu Mengdan, Wang Siqi, et al. Performance

- analyses and optimizations of desiccant wheel-assisted atmospheric water harvesting systems based on ideal thermodynamic cycles [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 245: 114540.
- [16] Tu Rang, Li Jiaqi, Hwang Y. Performance analysis of desiccant wheels assisted fresh air humidifiers in winter using natural gas boilers: applied in cold and dry climate regions [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 119: 24–36.
- [17] Agrawal A, Kumar A. Harvesting freshwater from atmospheric air using thermal energy storage enabled solar air heater [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 73: 109008.
- [18] Motaghian S, Pasharshahi H. Regeneration energy analysis and optimization in desiccant wheels using purge mechanism [J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 27: 100980.
- [19] Guan Bowen, Liu Yanbin, Zhang Ji, et al. Enhancing exergy performance: Addressing air parameters nonuniformity at the outlet cross-section in desiccant wheel air-conditioning [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 258: 124672.
- [20] 李馨月,成家豪,张春路.单级转轮与热泵复合系统在不同除湿深度下的应用分析[J].*制冷技术*, 2023, 43(5): 53–59. (Li Xinyue, Cheng Jiahao, Zhang Chunlu. Application analysis of single-stage rotary wheel and heat pump composite system under different dehumidification depths [J]. *Chinese Journal of Refrigeration Technology*, 2023, 43(5): 53–59.)
- [21] Panaras G, Mathioulakis E, Belessiotis V, et al. Experimental validation of a simplified approach for a desiccant wheel model [J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42(10): 1719–1725.
- [22] 倪美琴,马荣生,谢治祥.风机盘管干湿工况等价法热力计算研究[J].*扬州大学学报(自然科学版)*, 2005, 8(4): 70–74. (Ni Meiqin, Ma Rongsheng, Xie Zhixiang. Study on wet-dry cooling conditions equivalent method of fan-coil unit [J]. *Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition)*, 2005, 8(4): 70–74.)

通信作者简介

陈柳,女,副教授,西安科技大学能源与矿业工程学院,13279397868,E-mail:chenliu@xust.edu.cn。研究方向:除湿空调系统技术及应用。

About the corresponding author

Chen Liu, female, associate professor, School of Energy and Mining Engineering, Xi'an University of Science and Technology, 86-13279397868, E-mail: chenliu@xust.edu.cn. Research fields: technology and application of desiccant air conditioning systems.