

文章编号:1006-2467(2021)11-1392-09

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2020.193

转轮辅助空气取水流程优化及性能分析

涂 壤, 刘孟丹, 王思琪

(北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘 要: 针对干燥地区淡水缺乏问题,设计一种用于干燥地区的转轮辅助空气取水机组.以小时取水量为指标,在典型工况下优化转轮加湿流程,包括被加湿和被除湿空气流量比、级数及再生温度.基于三级加湿流程计算理想条件和实际热力学循环条件下的系统能耗,并在相同小时取水量前提下,以取水能效为指标,与直接冷却法进行对比.结果表明:该方法取水能效远高于直接冷却法,所研究工况下,小时取水量为15.8~30.9 kg/h,取水能效为1.3~2.1 kg/(kW·h),利用太阳能替代热泵加热后,取水能效可提升至3.3~4.4 kg/(kW·h).所提方法可有效丰富干燥地区淡水资源.

关键词: 空气取水;多级转轮;流程优化;能耗分析;取水能效

中图分类号: TU 834.9

文献标志码: A

Optimization and Performance Analysis of Desiccant Wheel-Assisted Atmospheric Water Harvesting Processes

TU Rang, LIU Mengdan, WANG Siqi

(School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To solve the fresh water scarce problem in dry regions, a desiccant wheel-assisted atmospheric water harvesting system is designed. Using water production rate as the index, studies are conducted to find the optimized air handling process under typical ambient conditions, considering influencing factors such as air flow rate ratio, stage numbers, and regeneration temperature. Based on a three-stage-desiccant wheel air humidification system, power consumptions are calculated for ideal and actual thermodynamic processes. Besides, using water production efficiency as the index, at the same water production rate, this system is compared with the traditional air-cooling method. The results show that this system has higher performances than the traditional air-cooling method. Under the discussed working conditions, the water production rate of the proposed system is in the range of 15.8—30.9 kg/h and the water production efficiency is in the range of 1.3—2.1 kg/(kW·h). The water production efficiency can be enhanced to 3.3—4.4 kg/(kW·h) when solar heater is used to replace heat pump systems. The proposed method can effectively enrich fresh water sources in dry regions.

Key words: atmospheric water harvesting; multi-stage desiccant wheels; process optimization; energy consumption analysis; water production efficiency

收稿日期:2020-06-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51706015),北京市自然科学基金项目(4212040),中央高校基本科研业务费(FRF-IDRY-19-015)

作者简介:涂 壤(1988-),女,河南省固始县人,副教授,主要从事高效能源系统,新型空调技术,热湿传递过程优化的研究.

电话(Tel.):13488778653;E-mail:turang@ustb.edu.cn.

我国是一个水资源短缺的国家,国务院高度重视城镇、工业、农业节水及水资源高效利用问题.《国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见》^[1]及《中国节水技术政策大纲》^[2]明确指出,在完善节水措施基础上,推进非常规水源开发利用,鼓励在缺水以及气候条件适宜的地区推广空气冷却技术,鼓励研究开发运行高效、经济合理的空气冷却技术和设备.

我国西北内陆干燥地区的淡水资源极其短缺,严重影响居民日常生活和农业灌溉需求.虽然内陆干燥地区空气较潮湿地区更为干燥,但是其中仍含有一定量的水蒸气.通过廉价、高效的方法,将空气中水蒸气进行凝结获取淡水,则可有效解决当地淡水资源短缺问题.现有空气取水技术主要分为低温冷却法和太阳能驱动吸附法等.

低温冷却法采用低于空气露点温度的冷源将空气中水蒸气凝结为液态水.现有冷源制取方法主要分为压缩式制冷和半导体制冷.压缩式制冷法取水量在 $0.13 \sim 4.2 \text{ kg/h}$ ^[3-5], 能耗在 $0.22 \sim 1.43 \text{ (kW} \cdot \text{h)/kg}$ ^[4-6]. 受蒸发温度限制,该种装置适用于潮湿地区.半导体制冷由于风量相对较小,取水量在 $0.02 \sim 0.11 \text{ kg/h}$ ^[7-9], 能耗在 $0.39 \sim 5.21 \text{ (kW} \cdot \text{h)/kg}$ ^[10-11]. 在野外用于空气取水时,通常采用太阳能光伏板供电^[12].

吸附式空气取水方法具有夜间吸附、白天脱附取水的周期性特征,单位质量吸附材料日取水量为 $0.049 \sim 0.412 \text{ kg/d}$ ^[13-15]. 此外该方法还可采用太阳能对脱附过程进行驱动^[16-17]. 俞乔力等^[18]提出了一种改进的太阳能吸附式空气取水器,其系统取水效率大大提高.此外还有一些学者对吸附材料进行研

究,提出了新型的复合吸附剂并对其吸附-解吸性能进行了测定^[19-20]. 由于仅在有充足日照时才有可能发生脱附及水蒸气凝结过程,脱附速率同太阳辐射强度密切相关,文献中单位质量的吸附剂的取水量范围为 $0.049 \sim 0.412 \text{ kg/d}$. 可见,吸附法日取水量低,且受脱附温度和气候影响,更适用于太阳强度大、气候潮湿的季节和地区.

综上所述,已有取水方法均适用于潮湿地区,在干燥地区使用,存在取水量小、能耗高的问题^[21],需在已有方法基础上研究适用于干燥地区使用的新流程. 本文提出基于转轮加湿及压缩式制冷的空气取水装置,可采用热泵系统或太阳能驱动,通过加湿流程及冷热源系统优化分析,实现系统取水量大、单位取水量能耗低的目标.

1 转轮辅助空气取水机组工作原理

转轮辅助加湿的空气取水装置基本工作原理为:先采用热能驱动转轮,将被除湿空气(A_{deh})中水蒸气转移到被加湿空气(A_{hum})中,再采用冷源对加湿后的 A_{hum} 冷却除湿. 由于冷却取水前空气含湿量增加,其露点温度提高,取水潜力增加.

该机组可采用多级转轮加湿结构对空气进行持续加湿,如图 1 所示. 机组采用 N 级转轮,其中进口的被加湿空气($A_{\text{hum,in}}$)为环境状态下的空气(A_{ambi}). 被加湿空气从室外状态加湿为 $A_{\text{hum},2N}$ (经过第 N 级转轮后的加湿空气)后,经冷却器降温除湿,出口的被加湿空气为 $A_{\text{hum,out}}$. 每一级加湿流程包括 1 个转轮(DW)、1 个加热器(H)、一股 A_{deh} , 1 个 A_{deh} 侧过滤器和 A_{deh} 侧风机. 每一级 A_{deh} 相互独

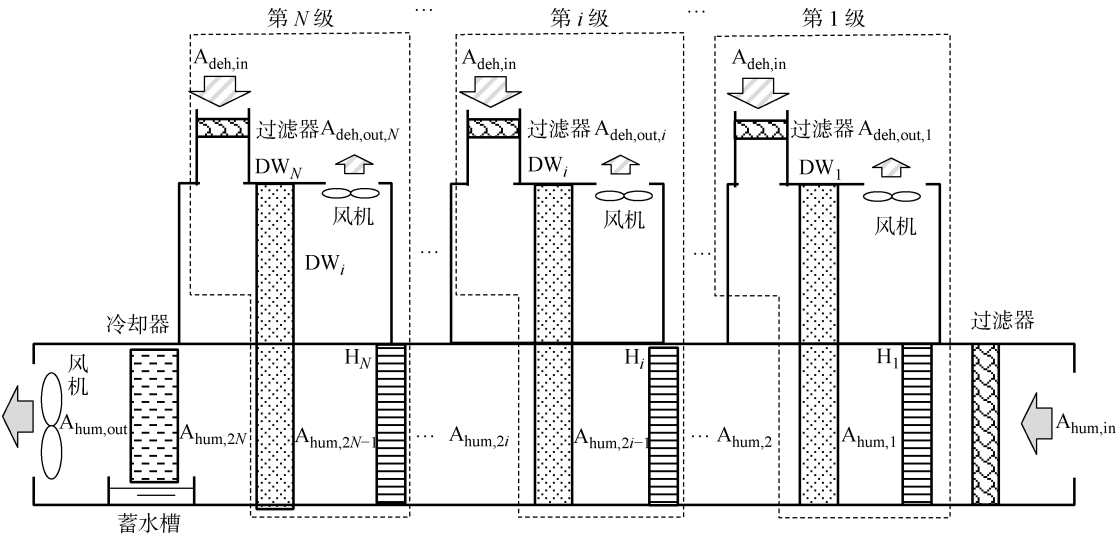


图 1 采用多级转轮加湿的空气冷凝取水系统

Fig. 1 Gas condensation atmospheric water harvesting system with multi-stage desiccant wheel configuration

立,进口的被除湿空气($A_{\text{deh.in}}$)为 A_{ambi} ,经转轮除湿后($A_{\text{deh.out}}$)排出机组。 A_{hum} 经每级转轮加湿前需被加热器加热到再生温度 t_{reg} 。

蒸汽压缩式冷热源系统结构如图 2 所示。当采用热泵系统为取水装置提供热量时,热泵系统的冷凝器可以用做加热器,对加湿空气进行加热,热泵的

蒸发器(Evap)从环境中取热。此外,H 热源也可采用太阳能加热器,在太阳能资源较为丰富的时期替代热泵系统为 A_{hum} 的加湿过程提供热量。冷却取水过程采用图 2 所示冷机系统驱动,冷却器(C)为冷机系统蒸发器,冷凝器(Cond)向环境放热。

本文基于图 1~2 系统,研究其用于干燥地区空

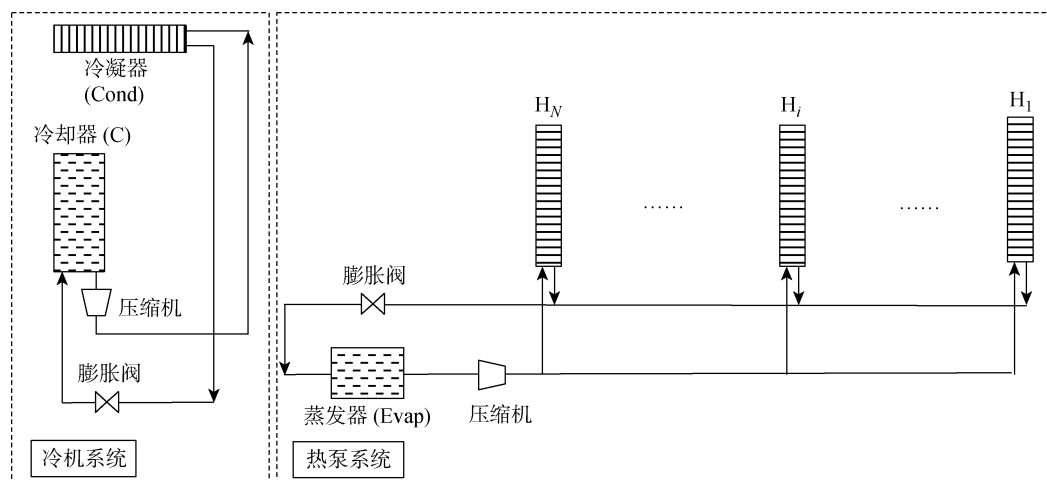


图 2 蒸汽压缩式冷热源系统结构

Fig. 2 System of heating and cooling sources powered by vapor compression cycles

气取水的性能。首先,在转轮总体积、总风量一定的前提下,以小时取水量(WPR)为指标,研究高效加湿流程,包括 t_{reg} 、级数及空气流量分配等因素。然后,基于具有较高 WPR 的转轮加湿流程,分析理想冷热源和实际冷热源能耗以及各系统取水能效(WPE),并与采用压缩式制冷的低温冷却取水性能进行比较。

本研究采用转轮热湿传递模型计算空气沿程温湿度,转轮模型具体描述及试验验证可参考文献[22-23]。本研究中选择硅胶吸附剂,基本参数为:密度为 $1\,129\text{ kg/m}^3$,比热容为 $920\text{ J/(kg}\cdot^{\circ}\text{C)}$,吸附热为 $2.65\times 10^6\text{ J/kg}$,材料形状因子为 0.3,最大含水率为 0.39 kg/kg [22-23]。

2 机组加湿流程及性能分析

2.1 研究工况设计

基于 DeST 模拟软件中乌鲁木齐、吐鲁番、和田以及喀什 4 个典型城市的全年日平均气象参数,环境空气含湿量(即空气中水的质量分数 w_{ambi})在 $3\sim 15\text{ g/kg}$ 的时间约占 63%,环境空气温度(t_{ambi})在 $15\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间约占 47%。根据之前的研究结果[23],建议该取水机组运行在空气含湿量大于 3 g/kg 的条件下。因此,本文选择讨论 5 g/kg 和 10 g/kg 的环境空气含湿量。此外, w_{ambi} 较高时, t_{ambi} 也会相应

升高,故而在本文选取干燥(工况 1: $t_{\text{ambi}}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $w_{\text{ambi}}=5\text{ g/kg}$)和潮湿(工况 2: $t_{\text{ambi}}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $w_{\text{ambi}}=10\text{ g/kg}$)两个工况。分析两类加湿流程,即单级加湿流程(SS)和多级加湿流程(MS)。SS 有 1 个转轮,而 MS 有多级转轮,且每级转轮采用独立的 A_{deh} 。

本文主要研究 $t_{\text{reg}}=60,70,80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 A_{deh} 和 A_{hum} 风量比($F_r=G_{\text{deh}}/G_{\text{hum}}$, G_{deh} 为被除湿空气流量, G_{hum} 为被加湿空气流量)对 WPR 的影响规律。研究前提为所有案例迎面风速一定,转轮总体积一定。MS 系统中,设定每级 A_{deh} 流量(G'_{deh})等于 G_{hum} ,因此 $G_{\text{deh}}=NG'_{\text{deh}}=NG_{\text{hum}}$,则 $F_r=N$ 。在以上限制条件下,可得各工况下每个转轮半径 $R=500\times\sqrt{2/(1+N)}\text{ mm}$, $L_{\text{DW}}=300(N+1)/(2N)\text{ mm}$ (L_{DW} 为厚度)以及除湿侧和加湿侧面积比(A_r),具体结构参数及风量如表 1 所示。

系统性能采用 WPR 和加湿效率 η_{hum} 评价,计算公式如下:

$$\text{WPR}=G_{\text{hum}}\rho(w_{\text{hum},2N}-w_{\text{hum,out}})/1\,000 \quad (1)$$

$$\eta_{\text{hum}}=1-\bar{w}_{\text{deh,out}}/w_{\text{deh,in}} \quad (2)$$

$$\text{WPR}=G_{\text{deh}}\rho(w_{\text{ambi}}-\bar{w}_{\text{deh,out}})/1\,000 \quad (3)$$

式中: ρ 为空气的密度,本文取 1.15 kg/m^3 ; $w_{\text{hum},2N}$ 为经过 N 级加湿后 A_{hum} 的含湿量; $w_{\text{hum,out}}$ 为被加湿空气经冷却取水后的含湿量,本研究取 $w_{\text{hum,out}}=w_{\text{ambi}}$; $\bar{w}_{\text{deh,out}}$ 为 N 级转轮 A_{deh} 出口含湿量平均值;

$w_{\text{deh},\text{in}}$ 为被除湿空气的进口含湿量,本研究取 $w_{\text{deh},\text{in}} = w_{\text{ambi}}$. 当 $w_{\text{deh},\text{out}} = 0$ 时, A_{deh} 中所有水蒸气均进入 A_{hum} , $\eta_{\text{hum}} = 1$. 此外,从被除湿空气的角度看,当 $w_{\text{hum},\text{out}} = w_{\text{ambi}}$ 时, WPR 也可采用式(3)计算.

表 1 各工况下转轮参数和空气流量
Tab. 1 Parameters of desiccant wheels and air flowrates under each working condition

加湿 流程	F_r 与 N	转轮参数和空气流量			
		A_r	R/mm	L_{DW}/mm	$G_{\text{hum}}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$
SS	$F_r = 1$	1	500	300	3 000
	$F_r = 2$	2	500	300	2 000
	$F_r = 3$	3	500	300	1 500
MS	$F_r = 1, N = 1$	1	500	300	3 000
	$F_r = 2, N = 2$	1	408	225	2 000
	$F_r = 3, N = 3$	1	354	200	1 500

注:空气总流量 $G_{\text{deh}} + G_{\text{hum}} = 6\,000\text{ m}^3/\text{h}$, 转轮转速 = 15 r/h, 转轮空气孔道为正弦型,高 2 mm,宽 2 mm.

2.2 加湿流程性能分析

本节对表 1 所列 6 个系统加湿性能进行分析. 首先比较不同工况下的空气处理流程,选取 3 个案例,即 SS 的 $F_r = 1$ 案例(同 MS 的 $N = 1$ 案例相同)、SS 的 $F_r = 3$ 案例及 MS 的 $N = 3$ 案例. 图 3 所示为以上 3 个案例在 $t_{\text{reg}} = 70\text{ }^\circ\text{C}$ 时的空气处理流程,图中: t 为温度; φ 为相对湿度; w 为含湿量; $A_{\text{deh},\text{out},1}$ 、 $A_{\text{deh},\text{out},2}$ 及 $A_{\text{deh},\text{out},3}$ 为经过每一级转轮除湿区后的被除湿空气; $A_{\text{hum},1}$ 、 $A_{\text{hum},2}$ 、 $A_{\text{hum},3}$ 、 $A_{\text{hum},4}$ 、 $A_{\text{hum},5}$ 及 $A_{\text{hum},6}$ 为依次经过每级加热器和转轮加湿侧后的被加湿空气.

对比图 3(a)~3(b),对于单级系统,增加 F_r 后, A_{deh} 流量增加, A_{hum} 流量降低, A_{hum} 出口含湿量从 $F_r = 1$ 的 9.0 g/kg 增加到 13.9 g/kg,但同时 A_{hum} 出口温度从 53.7 $^\circ\text{C}$ 降低到 35.7 $^\circ\text{C}$,加湿过程中温度的降低不利于转轮后段空气加湿. 对比图 3(b)~3(c),对于三级 MS 系统, A_{deh} 总流量与 SS 的 $F_r = 3$ 案例相同,由于级间对 A_{hum} 加热, A_{hum} 温度维持在较高范围,有利于加湿,其 $w_{\text{hum},2N}$ 为 15.7 g/kg,高于 SS 的 $F_r = 3$ 案例. 但是由式(1)所示, WPR 受 $w_{\text{hum},2N}$ 和 G_{hum} 同时影响. 由于 G_{hum} 和 $w_{\text{hum},2N}$ 均随 F_r 和 N 变化,因此需综合考虑 G_{hum} 和 $w_{\text{hum},2N}$,对加湿流程进行优化.

图 4 为工况 1、2 下,SS、MS 系统在不同 t_{reg} 时, WPR 及 η_{hum} 随 F_r 及 N 的变化趋势. 当 t_{reg} 一定时, WPR 随着 F_r 的增加先升高后降低,对于所有工况,当 $F_r = 2$ 时, WPR 最高. 这是因为 F_r 增加, $w_{\text{hum},2N}$

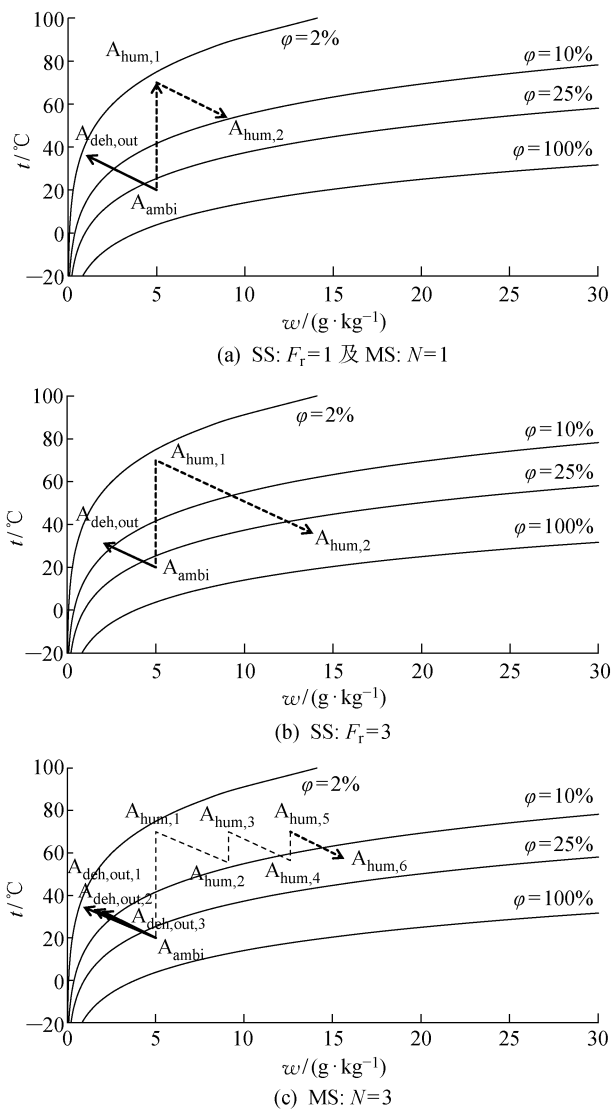


图 3 工况 1 下 3 个系统的空气状态变化
Fig. 3 Changes in air status of three systems under working condition 1

增加,但是 G_{hum} 降低,存在一个最优 F_r ,使得 WPR 最高. 从 η_{hum} 曲线可以看出,随着 F_r 增加, A_{deh} 流量增加,但 η_{hum} 降低,意味单位质量流量 A_{deh} 中水蒸气利用率降低. 此时,需考虑改变系统运行参数或改进流程来提高 η_{hum} .

通过对比不同 t_{reg} 下的 WPR 和 η_{hum} 可知,提高 t_{reg} 可提高 WPR 及 η_{hum} ,但会带来相应能耗的增加. 因此可通过改进加湿流程,即采用 MS 替代 SS,来提高 η_{hum} ,如图 4 中虚线所示,因为 MS 的 $F_r = N$,级数增加后, η_{hum} 降低,但是当 N 增加到一定值后, η_{hum} 高于 SS 系统在相同 F_r 时的值. 对于相对干燥的工况 1,当 $N = 3$ 时,MS 的 η_{hum} 及 WPR 高于 SS 的 $F_r = 3$ 案例,对于相对潮湿的工况 2,当 $N = 2$ 和 3 时,MS 的 η_{hum} 及 WPR 均高于相应 SS($F_r = N$) 的案例.

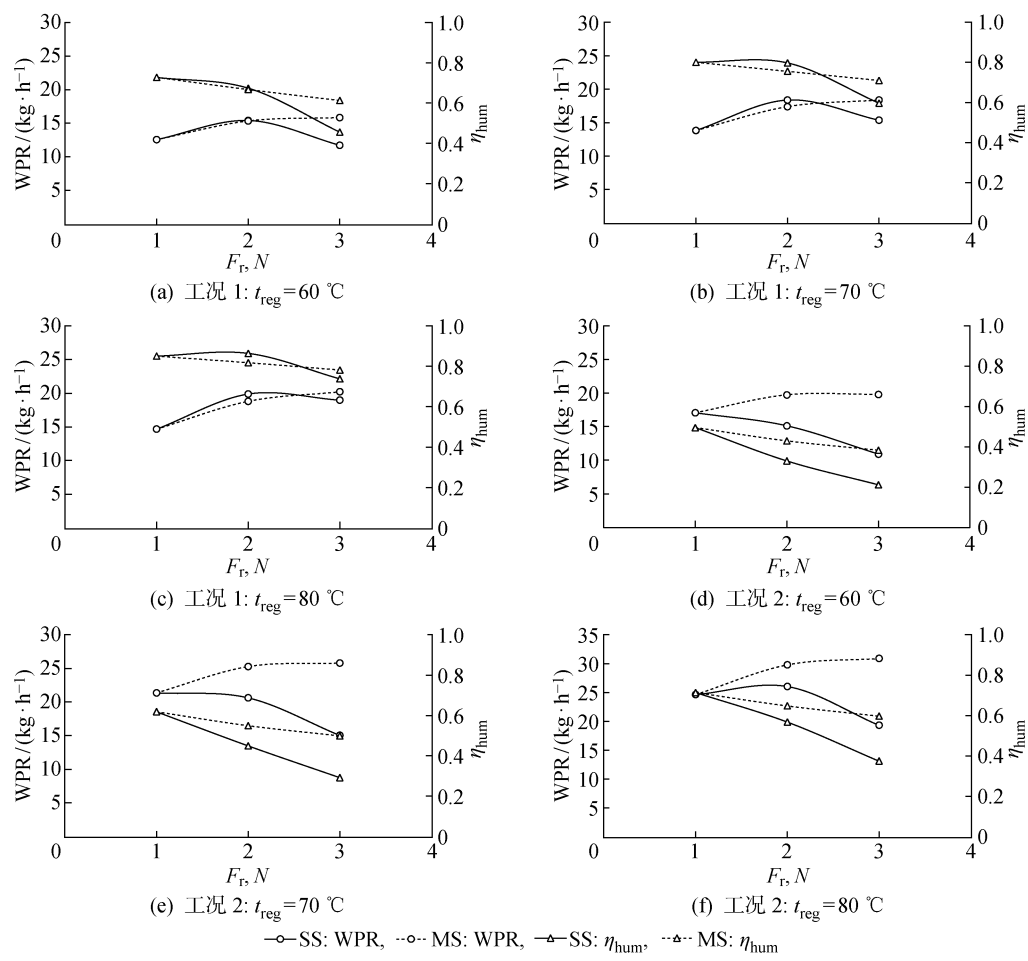


图 4 工况 1、2 下 F_r 和 N 对加湿系统 WPR 及 η_{hum} 的影响规律

Fig. 4 Influence of F_r and N on WPR and η_{hum} of humidification systems under working conditions 1 and 2

对于图 4 所有案例,MS 的 $N=3$ 案例具有最高的 WPR.从提高 WPR 及保证较高 η_{hum} 的角度,推荐采用 3 级 MS 系统.

3 机组冷热源能效分析

本节基于 $N=3$ 的 MS 系统,分析该空气取水装置的理想冷热源系统能效和实际冷热源系统能效,并同直接冷却取水系统的理想能效和实际能效进行对比.空气取水能效计算式为

WPE=WPR/E (4)

式中: E 为投入机组的能量.

3.1 加湿流程性能分析

理想冷热源系统为无数级理想卡诺循环和理想逆卡诺循环,如图 5 所示.图中: q_m 为空气的质量流量; c_p 为空气的比定压热容,本文取 $1.005\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; h 为空气的比焓; Q 为热量; T 为热力学温度; T_{ambi} 为环境温度.参考图 3(c) 所示的空气处理过程, $A_{\text{deh,out,1}}$ 、 $A_{\text{deh,out,2}}$ 及 $A_{\text{deh,out,3}}$ 的温度高于室

外温度,具有做功能力,如图 5(a) 所示,在空气流动方向上构建无数级卡诺热机,图中 T_1 为除湿后空气温度.

卡诺热机对外做功 $W_{\text{i,deh}}$ 为

$$W_{\text{i,deh}} = - \int_{T_1}^{T_{\text{ambi}}} \frac{T - T_{\text{ambi}}}{T} dQ \quad (5)$$

A_{hum} 经 H 加热至 t_{reg} ,需外界对其做功,如图 5(b), T_2 为 H 进口空气温度, T_4 为加热器的出口空气温度.在空气流动方向上构建无数级逆卡诺循环热泵,外界做功 $W_{\text{i,H}}$ 为

$$W_{\text{i,H}} = \int_{T_2}^{T_3} \frac{T - T_{\text{ambi}}}{T} dQ \quad (6)$$

$A_{\text{hum,2N}}$ 经冷却器降温除湿至 $A_{\text{hum,out}}$ 的过程包括两部分,第一部分为降温至 t_{ambi} (A'_{hum}) 的做功过程,可在空气流动方向上构建如图 5(a) 所示的无数级卡诺热机,对外做功为 $W_{\text{i,cl}}$,可采用式(5)计算.第二部分为从 A'_{hum} 继续降温除湿至 $A_{\text{hum,out}}$ 的耗功过程,可在空气流动方向上构建如图 5(c) 所示的无数

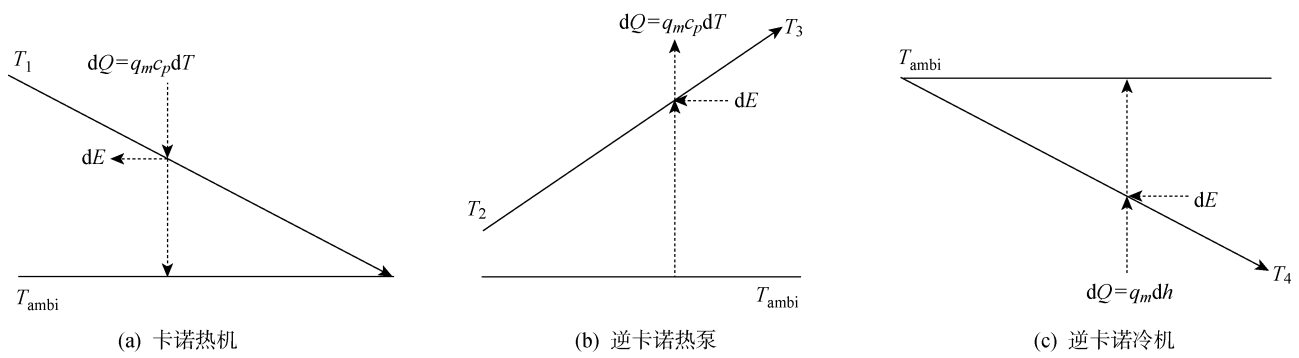


图 5 无数级卡诺循环及逆卡诺循环

Fig. 5 Infinite stage Carnot cycle and reverse Carnot cycle

级逆卡诺循环冷机,需外界做功 $W_{i,c2}$:

$$W_{i,c2} = - \int_{T_{ambi}}^{T_4} \frac{T_{ambi} - T}{T} dQ \tag{7}$$

式中: T_4 为 $A_{hum,out}$ 状态的温度. 对于 $A_{hum,2N}$ 到 $A_{hum,out}$ 的降温过程,如仅有温度变化,则 $dQ = q_{m,hum} c_p dt$ ($q_{m,hum}$ 为被加湿空气的质量流量),如果同时有湿度变化, $dQ = q_{m,hum} dh$, $dh = c_p dt + i_v d\omega$ (i_v 为水蒸气汽化潜热,由于 ω 单位为 g/kg ,因此本文中取 $i_v = 2.501 \text{ kJ/g}$). 除湿过程湿空气状态沿饱和线变化, ω 和 T 之间的关系为^[22]

$$1\,000/\omega = 10^{-6} \exp(5\,294/T) - 1.61 \tag{8}$$

空气取水系统理想总能耗 W_i 为

$$W_i = W_{i,H} + W_{i,c2} - W_{i,deh} - W_{i,c1} \tag{9}$$

对于直接低温冷凝取水系统,其理想冷源为无数级逆卡诺循环冷机,对 A_{ambi} 状态空气降温除湿. 两种系统的性能需在相同取水量的前提下比较. 参考式(3),直接冷却取水的空气流量为本系统 A_{deh} 总流量,出口含湿量为三股 A_{deh} 出口含湿量平均值 $\bar{\omega}_{deh,out}$,理想功耗采用式(7)计算,其中 T_1 等于 $\bar{\omega}_{deh,out}$ 下的露点温度. 不同 t_{reg} 条件下,两种系统运行在工况 1、2 的理想功耗 W_i 和理想空气取水能效 WPE_i 如图 6 所示.

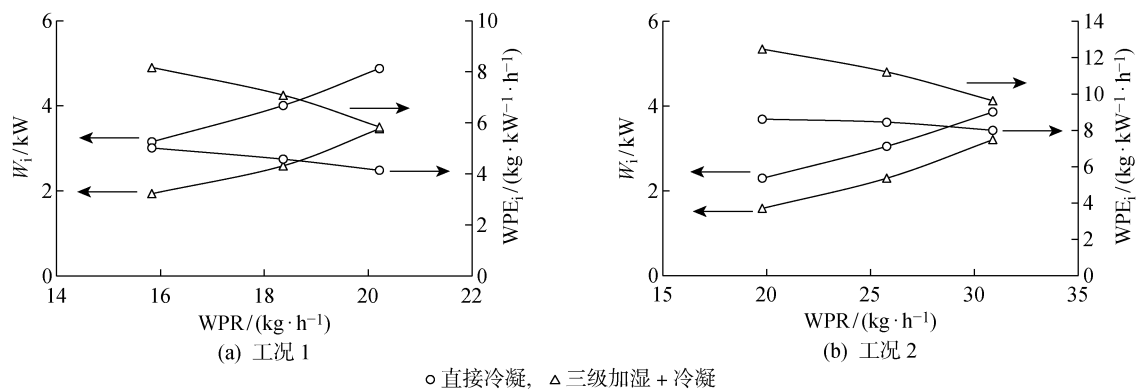


图 6 工况 1、2 下两种系统 W_i 和 WPE_i

Fig. 6 W_i and WPE_i of two systems under working conditions 1 and 2

对于两类系统, W_i 随 WPR(与 t_{reg} 正相关)的升高而增加, WPE_i 随着 WPR 的升高而降低. 潮湿条件下(工况 2)的 WPE_i 高于干燥工况(工况 1). 对比本系统和直接冷凝取水系统,虽然本系统在 A_{hum} 加湿过程中需对其加热,但由于相同取水量下, $A_{hum,out}$ 对应的露点温度高于直接冷凝系统的空气出口露点温度,使得本系统理想功耗远远小于直接冷凝系统, WPE_i 是直接冷凝系统的 1.2~1.6 倍. 因此,本系统较直接冷凝取水系统具有更优的性能,室外越干

燥,优势越明显.

3.2 采用实际冷热源系统时的节能潜力分析

相对于理想冷热源,实际冷热源系统无热机做功、热泵和冷机为有限级,换热器换热效率小于 1,且制冷循环的热力学完善度小于 1.

本文研究的主动式冷热源系统如图 2 所示,采用单级热泵(1 个冷凝温度)和单级冷机(1 个蒸发温度)提供热量和冷量. 此外,设置如图 7 所示的热回收器 1 和 2,依次回收 $A_{deh,out}$ 和 $A_{hum,2N}$ 的热量,对

4 结论

本文提出一种用于干燥地区的转轮辅助冷凝式空气取水装置,对包括级数、风量比在内的加湿流程进行优化,对理想和实际冷热源系统能耗进行分析并与传统冷凝式空气取水装置性能进行比较,主要结论如下:

(1) 在转轮总体积和总风量一定时,小时取水量随着再生温度 t_{reg} 的增加而增加,三级加湿流程较同 F_r 的单级流程具有更高的加湿效率,且取水量 WPR 最大,当环境空气含湿量为 5 及 10 g/kg 时, WPR 在 $t_{\text{reg}} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下分别可达到 20.2 及 30.9 kg/h;

(2) 对三级转轮加湿冷凝式空气取水系统的理想冷热源功耗进行分析可得,随着 t_{reg} 的增加,其理想功耗 W_i 增加,理想取水能效 WPE_i 降低,室外越干燥, WPE_i 越低,相同工况下,本系统 W_i 远远小于直接冷凝取水系统, WPE_i 是直接冷凝取水系统的 1.2~1.6 倍;

(3) 对于采用一级热泵和一级冷机的实际冷热源系统,采用热回收后,本系统实际 WPE 是直接冷凝取水系统的 1.1~1.6 倍,特别在干燥条件下,节能优势更为明显. 采用太阳能替代热泵系统后,本系统的 WPE 从 1.3~2.1 kg/(kW·h) 提升至 3.3~4.4 kg/(kW·h).

参考文献:

- [1] 国务院. 国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见[EB/OL]. (2012-02-15) [2020-05-07] http://www.gov.cn/zhuanti/2015-06/13/content_2878992.htm.
State Council. Opinions of the state council on implementing the strictest water resources management system [EB/OL]. (2012-02-15) [2020-05-07]. http://www.gov.cn/zhuanti/2015-06/13/content_2878992.htm.
- [2] 国家发改委. 中国节水技术政策大纲[EB/OL]. (2005-04-21) [2020-05-07]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/hjzy/sjyybh/200506/t20050602_1133933.html?code=&state=123.
National Development and Reform Commission. Outline of China's water saving technology policy [EB/OL]. (2005-04-21) [2020-05-07]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/hjzy/sjyybh/200506/t20050602_1133933.html?code=&state=123.
- [3] 罗继杰, 张蔚东, 白小步. 野外作业用空气取水设备研究与应用[J]. 暖通空调, 2004, 34(4): 42-45.

- LUO Jijie, ZHANG Weidong, BAI Xiaobu. Development and application of a field water maker[J]. **Heating Ventilating & Air Conditionin**, 2004, 34(4): 42-45.
- [4] 杨留田. 通过冷却空气制水的制冷系统研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2013.
YANG Liutian. Study of refrigeration system on water production through cooling air[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2013.
- [5] 张瑞贤, 臧润清, 刘建勋. 全工况下冷却空气取水装置性能的实验研究[J]. 制冷技术, 2016, 44(1): 51-55.
ZHANG Ruixian, ZANG Runqing, LIU Jianxun. Study on properties of water extraction from cooled air system under all operating conditions[J]. **Cryogenics & Superconductivity**, 2016, 44(1): 51-55.
- [6] 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 Convers Manage**, 2018, 170(15): 97-107.
- [7] 曹旦, 邹钺. 半导体制冷空气取水系统的优化研究[J]. 建筑热能通风空调, 2016, 35(9): 71-73.
CAO Dan, ZOU Yue. system optimization of water exaction from air by semiconductor cooling air[J]. **Building Energy & Environment**, 2016, 35(9): 71-73.
- [8] 许辉. 基于半导体制冷技术的空气取水装置的实验研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2014.
XU Hui. The experimental study of the water intake device based on the semiconductor refrigeration[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2014.
- [9] ESLAMI M, TAJEDDINI F, ETAATI N. Thermal analysis and optimization of a system for water harvesting from humid air using thermoelectric coolers[J]. **Energy Conversion and Management**, 2018, 174: 417-429.
- [10] LIU S S, HE W, HU D Y, *et al.* Experimental analysis of a portable atmospheric water generator by thermoelectric cooling method[J]. **Energy Procedia**, 2017, 142: 1609-1614.
- [11] 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.
- [12] JRADI M, GHADDAR N, GHALI K. Experimental and theoretical study of an integrated thermoelectric-photovoltaic system for air dehumidification and fresh water production[J]. **International Journal of Energy**

- Research**, 2012, 36(9): 963-974.
- [13] 刘金亚, 王佳韵, 王丽伟, 等. 一种吸附式空气取水装置的性能实验[J]. **化工学报**, 2016, 67(Sup. 2): 46-50.
LIU Jinya, WANG Jiayun, WANG Liwei, *et al.* Performance test of sorption air-to-water device[J]. **CIESC Journal**, 2016, 67(Sup. 2): 46-50.
- [14] 杨凡, 张海全. 空气取水用套管式吸附床的吸附特性[J]. **化工进展**, 2016, 35: 48-52.
YANG Fan, ZHANG Haiquan. Experimental investigation of adsorption properties of double-pipe adsorption bed for water sorption[J]. **Chemical Industry and Engineering Progress**, 2016, 35: 48-52.
- [15] SRIVASTAVA S, YADAV A. Water generation from atmospheric air by using composite desiccant material through fixed focus concentrating solar thermal power[J]. **Solar Energy**, 2018, 169: 302-315.
- [16] MOHAMED M H, WILLIAM G E, FATOUH M. Solar energy utilization in water production from humid air[J]. **Solar Energy**, 2017, 148: 98-109.
- [17] 王雯雯, 葛天舒, 代彦军, 等. 太阳能吸附式空气取水研究现状[J]. **太阳能**, 2020(1): 33-46.
WANG Wenwen, GE Tianshu, DAI Yanjun, *et al.* Status of solar-driven sorption-based atmosphere water harvesting[J]. **Solar Energy**, 2020(1): 33-46.
- [18] 俞乔力, 卢军, 马春青. 一种改进的太阳能吸附式空气取水器[J]. **太阳能学报**, 2005, 26(5): 128-131.
YE Qiaoli, LU Jun, MA Chunqing. An improved solar air absorption water collector[J]. **Acta Energiae Solaris Sinica**, 2005, 26(5): 128-131.
- [19] 刘业凤, 范宏武, 王如竹. 新型复合吸附剂 $\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O} \cdot y\text{CaCl}_2$ 与常用吸附剂空气取水性能的对比实验研究[J]. **太阳能学报**, 2003, 24(2): 141-144.
LIU Yefeng, FAN Hongwu, WANG Ruzhu. Contrast experimental study on the air intake performance of the new composite adsorbent $\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O} \cdot y\text{CaCl}_2$ and common adsorbents[J]. **Acta Energiae Solaris Sinica**, 2003, 24(2): 141-144.
- [20] 赵惠忠, 刘涛, 黄天厚, 等. 石墨烯-13X/LiCl 复合吸附剂开式吸附-解吸性能[J]. **化工进展**, 2021, 40(2): 969-976.
ZHAO Huizhong, LIU Tao, HUANG Tianhou, *et al.* Open adsorption-desorption performance of graphene-13X/LiCl composite adsorbents[J]. **Chemical Industry and Engineering Progress**, 2021, 40(2): 969-976.
- [21] TU R, HWANG Y. Reviews of atmospheric water harvesting technologies [J]. **Energy**, 2020, 201: 117630.
- [22] TU R, HWANG Y, CAO T, *et al.* Investigation of adsorption isotherms and rotational speeds for low temperature regeneration of desiccant wheel systems [J]. **International Journal of Refrigeration**, 2018, 86: 495-509.
- [23] TU R, HWANG Y. Performance analyses of a new system for water harvesting from moist air that combines multi-stage desiccant wheels and vapor compression cycles[J]. **Energy Conversion and Management**, 2019, 198: 111811.
- [24] 彭佳杰, 潘权稳, 葛天舒, 等. 太阳能热驱动的吸附式冷热联供系统性能测试[J]. **上海交通大学学报**, 2020, 54(7): 661-667.
PENG Jiajie, PAN Quanwen, GE Tianshu, *et al.* Performance test of an adsorption cooling and heating cogeneration system driven by solar thermal energy [J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2020, 54(7): 661-667.

(本文编辑:陈晓燕)