

文章编号:0253-4339(2019)05-0109-09

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.05.109

基于内冷式干燥剂换热器的固体除湿空调技术研究进展

郑旭¹ 邓帅² 王如竹³

(1 浙江理工大学建筑工程学院 杭州 310018; 2 天津大学 中低温热能高效利用教育部重点实验室 天津 300350;
3 上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240)

摘要 基于内冷式干燥剂换热器的新型固体除湿空调技术,可有效克服转轮除湿空调系统升温除湿的不足,并能充分利用大量略高于环境温度的工业废热(30~60℃),具有巨大的节能效益。本文基于内冷式干燥剂换热器的固体除湿空调技术,从干燥剂材料、热湿传递过程和系统性能 3 个方面,总结近年来的研究进展,对面临的相关科学问题和挑战进行了梳理。高吸附、40℃低温再生且无腐蚀干燥剂的研制是提升该技术的前提,针对不同干燥剂种类考虑其与空气间的热湿传递过程机理是该技术的关键。基于制冷空调或材料学科的发展趋势,给出可能的未来发展方向,以期推动该新型固体除湿空调技术在工业余热利用、环境湿度处理、新风机组和空调等领域的应用。

关键词 工业余热;空气调节系统;除湿;传热传质;吸附剂

中图分类号:TB61⁺1; TU831.3

文献标识码:A

Research Progress on Solid Desiccant Air-conditioning Technology based on Internal Cooled Desiccant Coated Heat Exchanger

Zheng Xu¹ Deng Shuai² Wang Ruzhu³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, 310018, China; 2. Key Laboratory of Efficient Utilization of Low and Medium Grade Energy, Tianjin University, Tianjin, 300350, China; 3. Institute of Refrigeration and Cryogenic, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract A new type of solid desiccant air-conditioning technology based on internal cooled desiccant coated heat exchanger overcomes the shortcoming of rotary desiccant air-conditioning systems, such as nonisothermal dehumidification. It can make full use of a large quantity of industrial waste heat that is slightly higher than environmental temperature (30~60℃), and has great energy-saving potential. Focusing on the research subject of this novel solid desiccant air-conditioning technology, some important advances in recent years from three aspects, i.e., desiccant materials, heat and mass transfer process, and the performance of solid desiccant air-conditioning system are summarized in this study. Related scientific problems and challenges are discussed. The development of desiccant that possesses high adsorption quantity, good regeneration ability at approximately 40℃, and noncorrosive property is the premise to improving the technology. Investigation on mechanism of heat and mass transfer between air and different types of desiccant is the key to the technology. Finally, potential future research directions are pointed out based on the development trend of refrigeration, air conditioning, and material science. In this way, the application of this novel solid desiccant air-conditioning technology in the fields of industrial waste heat utilization, environmental humidity treatment, fresh air handling unit, and air-conditioning can be anticipated and promoted.

Keywords industrial waste heat; air-conditioning system; dehumidification; heat and mass transfer; adsorbent

化石能源逐渐紧缺,能源危机是当今世界所面临的严峻问题。我国成为全球最大能源消费国,节能减排已成为我国经济和社会发展的一项战略方针^[1]。《“十三五”节能减排综合工作方案》提出,要加强工业、建筑、交通运输、农业农村等领域节能^[2]。目前,

我国工业领域能源消耗量约占全国能源消耗总量的 70%,由于工业生产工艺相对落后、余热利用率较低,至少 50%的能量最终以不同类型的余热被废弃。其中包括大量略高于环境温度的废热(30~60℃),如工业冲渣水、火电厂冷却水、油田废水和低温烟气

基金项目:国家自然科学基金(51806195)和国家重点研发计划(2016YFB0601204)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51806195) and National Key Research and Development Plan (No. 2016YFB0601204).)

收稿日期:2018-09-24;修回日期:2018-12-11

等^[3]。如果充分利用此类低品位余热资源,对解决我国能源问题具有重要战略意义。

可利用低品位热能驱动的固体除湿空调循环^[4-5]通常采用附着有干燥剂的转轮吸附水蒸气处理潜热负荷(湿负荷),采用水作为制冷剂,然后通过蒸发冷却等方式处理空气中的显热负荷(热负荷)。由于转轮除湿循环构造的局限性,系统无法完全克服干燥剂除湿过程中释放吸附热的影响,引起干燥剂和处理空气温度升高,增大了传热传质过程的不可逆损失,降低了系统的吸湿能力,也对再生热源温度提出了更高要求^[6]。目前,在标准 ARI (air-conditioning and refrigeration institute) 夏季和潮湿工况下,转轮除湿空调循环驱动热源温度通常在 70~140 °C,对应系统热力性能系数 COP_{th} (coefficient of performance) 在 0.8~1.0^[7-8]。

为解决这一技术瓶颈,有学者提出了一种基于新型内冷式固体除湿部件(干燥剂换热器)的固体除湿空调循环^[9-11]。这类部件将干燥剂附着在紧凑型换热器的表面,在待处理空气流经换热器表面进行除湿的过程中,换热器管内通入制冷剂,冷却干燥剂和处理空气,实现独立的冷却除湿过程。再生过程通过管内流动的热媒介质提供附着在换热器金属基表面干燥剂所需的解吸热,实现再生。通过换热器管内制冷剂实时带走干燥剂释放的吸附热,基于内冷式干燥剂换热器的固体除湿空调技术可以克服转轮除湿空调升温除湿的不足,实现近似等温除湿过程,既提升干燥剂除湿效果,又为实现 30~60 °C 工业废热的应用提供了可能性。近年来,该技术获得了越来越多国内外学者的关注,相关的研究报道较多,包括干燥剂材料、热湿传递过程和系统设计等各方面的优化。

本文基于内冷式干燥剂换热器的固体除湿空调技术,总结了该技术所取得的一些重要进展,重点讨论遇到的问题和挑战,并基于制冷空调或材料学科的发展趋势,提出可能的解决路径和未来发展方向。

1 干燥剂材料

基于内冷式干燥剂换热器的固体除湿空调,通过干燥剂换热器表面涂覆的固体干燥剂材料实现潜热处理,因而干燥剂的吸附和再生性能对整个系统的除湿性能有重要影响。常规干燥剂如硅胶、分子筛和活性炭等性能稳定,但吸附量不高,所需再生温度通常大于 80 °C^[12]。关于国内外各类新型固体除湿干燥剂材料的研究较多,主要集中于以下 3 个方面:1) 向各类多孔干燥剂(硅胶基^[13-19],活性炭基^[20-21],岩石基^[22-23])中添加吸湿性无机盐制备高吸附性能的复

合吸附剂;2) 通过改变沸石分子筛腔体、通道、阳离子位点等框架结构得到再生性能优异的沸石衍生物^[24-25];3) 通过在聚合物链节单元引入有机亲水性官能团、阳离子置换等方式获得高达自身质量 80% 的吸水能力的改性聚合物电解质^[26-28]。

现有干燥剂的平衡吸附量和再生性能如图 1 所示,吸附温度为 20~30 °C,相对压力为 0.4~0.7。根据平衡吸附量大小和所需再生热源温度的高低将干燥剂材料划分至 I~IV 区间。可以发现,硅胶、分子筛和活性炭等常规干燥剂吸附量较低,所需再生热源温度高于 60 °C,落于第 IV 区间。而随着材料科学的飞速发展,各类新型固体除湿干燥剂不断被研发合成,其吸附性能和再生性能均有着不同程度的提升,分布于 I~III 区域。虽然在干燥剂性能提升方面已经取得了很大的进步,现有干燥剂仍存在多种不足:1) 类沸石分子筛可实现 40~60 °C 低热源温度下的再生,但稳态吸附量<0.3 g/g,落于第 III 区域;2) 聚合物干燥剂吸湿性能优异,但仍需要 70 °C 以上热源驱动再生(第 II 区域);3) 吸湿性盐改性的多孔复合干燥剂吸附量高,但除了岩石基(第 I 区域),其它基质复合干燥剂所需再生温度仍较高(第 II 区域),此外存在盐溶液溢出腐蚀换热器的隐患。

因此,对 30~60 °C 工业余热资源的充分利用,实现高吸附、40 °C 低热源温度再生且无腐蚀的干燥剂(第 I 区域)是提升基于内冷式干燥剂换热器的固体除湿空调性能的前提。

在化工和能源材料领域,在外界温度刺激下,自身的某些物理或化学性质会发生可逆转变的智能温度响应材料,受到国内外研究者青睐。温度响应材料在吸附领域应用的研究越来越多,将具有温敏性质的高分子复合在磁性粒子、纳米二氧化硅和高分子聚合物等材料上制备成复合吸附剂是温敏材料研究热点之一,吸附对象主要包括染料、蛋白质、重金属离子等^[29-31]。H. Kanazawa 等^[32]采用表面接枝法将聚 N-异丙基丙烯酰胺(PNIPAM)温敏高分子接枝到纳米二氧化硅表面,并对蛋白质和核苷酸等生物分子的吸附性能进行研究。K. Murakami 等^[33]通过将 PNIPAM 负载到有序介孔硅酸盐 MCM-41 表面合成阴离子交换剂,研究表明合成物的吸附和脱附性能受制备过程温度和酸碱度因素的影响。有部分学者对温敏材料在织物透湿性和空气湿度调节领域进行了研究^[34-36]。这类温敏型湿度控制材料内具有一定比例的亲水和疏水基团,在低临界溶解温度(lower critical solution temperature, LCST)下会发生相变(如图 2 所示):当外界温度低于 LCST 时,分子链溶于水,温敏

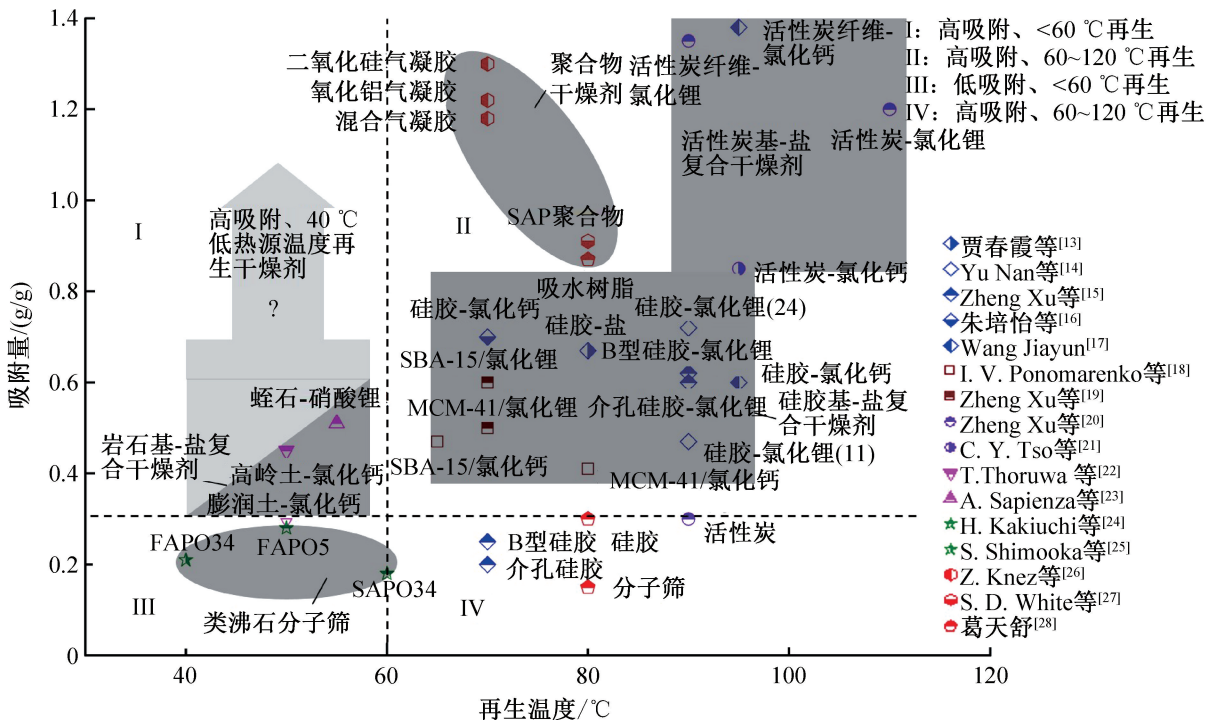


图 1 干燥剂吸附量和再生性能

Fig.1 The balanced adsorption capacity and regeneration ability of desiccant materials

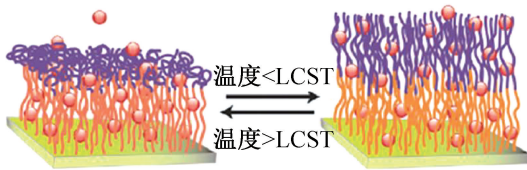


图 2 温度对温敏材料形态影响^[29]

Fig.2 The influence of temperature on thermosensitive materials

高分子表现为伸展的线团结构;当外界温度从低温经过 LCST 升至高温时,氢键被破坏,疏水基团的缔合作用增强,体系由疏松线团变为紧密的胶粒状结构,把预先吸附在活性位的水分子挤出体系,实现异位脱附,脱附时不需克服较大的吸附力场,从而大幅降低脱附能耗。李鑫等^[36]对具有不同 LCST (32、75、80 °C) 的温敏调湿材料进行间歇式吸附、脱附以及热重分析实验,研究表明 LCST 越低,调湿材料的脱附速率越快。马晓梅等^[37]通过将疏水单体甲基丙烯酸异丙酯 (iPMA) 与 N-异丙基丙烯酰胺 (NIPAM) 共聚,制得 LCST 可调的温敏性微凝胶,研究表明增大 iPMA 摩尔百分比可实现微凝胶 LCST 的线性递减。

如何实现 LCST < 40 °C 的温敏功能层和多孔纳米材料承载基质的优化匹配,得到吸附及再生性能优异的温敏复合干燥剂,既是基于内冷式干燥剂换热器的固体除湿空调技术面临的重要挑战,也是未来突破材

料对内冷式干燥剂系统制约的发展方向。

2 热湿传递过程

干燥剂和空气间的热量和质量传递特性是影响干燥剂换热器性能的核心因素。国内外学者通常基于传热传质理论和能量守恒定律,采用非线性偏微分控制方程描述干燥剂和空气间的热湿传递过程,并通过编制一维^[28,38]或二维^[9,39]动态数学模型来验证实验结果、辅助系统设计和优化。建立控制方程的关键是干燥剂和空气间传热传质过程阻力表达关系式的确定。对于固体除湿空调系统,干燥剂和空气间的热湿交换过程阻力分为气侧和固侧两部分。气侧阻力发生在空气与干燥剂之间的对流换热、传质过程以及空气内部的能量和质量扩散过程中,固侧阻力则发生在干燥剂内的热质扩散过程中^[28]。根据对阻力的考虑情况,现有内冷式干燥剂换热器模型主要划分为气侧模型^[9]、伪气侧模型^[28,40-42]和气固模型^[43]。气侧模型忽略了干燥剂侧温度和浓度的变化,形式简单但精度较低。伪气侧模型采用集总参数法推导出包含气侧和固侧阻力的复合热质传递系数,一定程度上提高了模型精度。气固模型直接将干燥剂侧热量传导项和质量扩散项加入控制方程,能真实描述空气侧及干燥剂侧的热量和质量传递过程。现有内冷式干燥剂换热器传热传质模型中采用的干燥剂材料和重要假设汇总于表 1。可以发现,现有模型往往只考虑浓

度梯度对质量扩散的影响,忽略了多孔干燥剂内热质交叉耦合扩散引起的热附加扩散效应(Soret 效应),

扩散附加热效应(Dufour 效应),以及干燥剂颗粒间的导热过程。

表 1 内冷式干燥剂换热器传热传质模型研究总结

Tab.1 Summary of heat and mass transfer models for internal cooled desiccant coated heat exchangers

文献	维数	模型类别	干燥剂	重要假设
[9]	二维	气侧	硅胶(一)	1)忽略硅胶内水分沿主边空气流动方向导热及质量扩散;2)传热和传质系数符合刘易斯类比关系
[28]	一维	伪气侧	硅胶(大孔,ZCX-II)	1)忽略水蒸气和干燥剂中的热量传导;2)假定空气与干燥剂间 $Nu = Sh$
[40]	二维	伪气侧	SAPO34(粒径 2.1 μm)	1)忽略干燥剂内温度和湿度梯度;2)采用有效刘易斯因子来估计实际对流传质系数
[41]	二维	伪气侧	硅胶(Grace 123B)	1)忽略干燥剂内温度和湿度梯度;2)采用有效刘易斯因子($Le_{\text{eff}}=3$)估计实际对流传质系数
[42]	一维	伪气侧	硅胶(介孔,粒径 0.15~0.29 mm); 硅胶-氯化锂	1)忽略水蒸气和干燥剂中的热量传导;2)假定空气与干燥剂间 $Nu = Sh$
[43]	二维	气固	介孔硅胶-氯化锂	1)忽略干燥剂内温度梯度;2)忽略热质交叉耦合扩散引起的 Soret 效应;3)假定空气与干燥剂间 $Nu = Sh$

模型阻力表达关系式中尤为重要是空气与干燥剂间对流换热表面传热系数与传质系数的确定。目前,内冷式干燥剂换热器系统中干燥剂与空气间显热对流换热表面传热系数的求解主要采用理论模型加实验的间接测量方法。对流传质系数则基于传热传质相似理论通过对传热过程的分析求解来预测传质过程中传质行为。S. Shimooka 等^[44-45]通过实验测量空气进出口的焓差和含湿量差得到显热换热量,然后根据对数平均温差法求得显热对流换热表面传热系数。这种方法简单,但不能反映吸附过程的热质耦合传递特征。Zhang L.等^[46]和 Zhao Yao 等^[47]分别提出了一种基于热阻网络的模型用来替换对数平均温差法,并从实验数据中回归出传热努塞尔数(Nu)和传质舍伍德数(Sh)经验关系式,修正了热质传递满足刘易斯数带来的计算偏差,有效提高了求解计算精度。Tu Yaodong 等^[48]提出基于化学势差驱动的干燥剂吸附动力模型,并在此基础上根据第一性原理构建了湿空气与干燥剂表面间的热质耦合传递模型以及储湿换热器在冷热交替过程中的动态响应模型。模型研究结果表明除湿换热器空气侧的热质传递呈现弱关联性,即湿空气与换热器之间的显热换热能力取决于干燥剂涂层温度,但潜热换热能力不仅和干燥剂涂层温度有关,还和吸附过程持续时间有关。但是这些方法也忽略了干燥剂涂层引起的传热热阻以及 Soret 效应和 Dufour 效应对 Nu 和 Sh 的影响。陈宝明等^[49]对多孔介质中交叉耦合扩散效应影响的研究指出,Soret 效应主要对传质产生影响,对传热的影响不

大;Dufour 效应也主要对传热产生一定的影响。A. M. Salem^[50]对多孔介质中交叉耦合扩散效应的研究发现,随着 Soret 效应的增强, Sh 增大,而 Nu 减小。经验关系式依赖所研究内冷式换热器的实验数据,一旦干燥剂涂层改变,结果可能不再成立。

因此,针对不同干燥剂种类考虑其与空气间的热湿传递过程机理,基于内冷式干燥剂换热器的固体除湿空调技术亟待解决的关键科学问题。

3 系统性能研究

3.1 系统性能评价指标

基于内冷式干燥剂换热器的固体除湿空调技术通常采用平均除湿量 D_{avg} 和热力性能系数 COP_{th} 评价某系统的除湿能力和能量利用效率。

为了求得平均除湿量 D_{avg} ,需要先定义有效除湿时间 t_{eff} 用于评判干燥剂涂层是否趋于吸附饱和。有效除湿时间与待处理空气的进、出口含湿量有关。当 $t_{\text{eff}}-t_s$ (t_s 为系统采样时间)时刻及 t_{eff} 时刻,进、出口含湿量变化 $((d_{a,\text{in}}-d_{a,\text{out}})/d_{a,\text{in}})$ 均不大于 5% 时,考虑实验误差,可认为干燥剂涂层吸附饱和。平均除湿量 D_{avg} 可以采用式(1)计算:

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

式中: $d_{a,\text{in}}$ 和 $d_{a,\text{out}}$ 分别为进口和出口空气的含湿量, $\text{g}/(\text{kg}$ 干空气); t_{eff} 为有效除湿时间, s 。

热力性能系数 COP_{th} 通过计算有效除湿过程中待处理空气侧的平均制冷量 Q_a 和再生过程中由热能

驱动的再生热 Q_r 的比值得到:

$$\text{COP}_{\text{th}} = \frac{Q_a}{Q_r} = \frac{m_a(h_{a,\text{in}} - \bar{h}_{a,\text{out}})}{m_r c_{p,r}(T_{r,\text{in}} - T_{r,\text{out}})} \quad (2)$$

式中: $h_{a,\text{in}}$ 和 $h_{a,\text{out}}$ 分别为进口和出口空气的焓值, J/g; $T_{r,\text{in}}$ 和 $T_{r,\text{out}}$ 分别为进口和出口再生热媒的温度, K; m_a 和 m_r 分别为空气和再生热媒的质量流量, g/s; $c_{p,r}$ 为再生热媒的比热容, J/(g·K)。

3.2 系统性能研究进展

国内外学者在内冷式干燥剂换热器系统实验方面开展了大量研究工作,并取得了一定的研究成果^[11,51-52]。Ge Tianshu 等^[11]分别用硅胶和吸水树脂制作了两台干燥剂换热器并搭建了恒温热水浴驱动的性能测试实验台。结果表明,当进口空气含湿量较低时,吸水树脂换热器的除湿性能比硅胶换热器差。赵耀等^[51]制备了两台硅胶换热器,并搭建了太阳能驱动再生的干燥剂换热器-水系统。测试结果表明,该系统能提供稳定、连续的除湿能力,但在潮湿气候条件下无法达到满意的除湿要求。Jiang Yu 等^[45]制备了复合硅胶-氯化锂和纯硅胶涂覆的干燥剂换热器,分析了冷却水温度、再生温度、空气进口温湿度和空气流速等运行参数对系统除湿性能和热力性能系数的影响。结果显示,复合硅胶换热器的平均除湿量在 2.1~3.8 g/(kg 干空气)之间,热力性能系数为 0.3~1.2,较纯硅胶换热器分别提升 18%~39% 和

20%~87%。但在相同工况下,复合硅胶换热器所需的解吸再生时间较长。Ge Tianshu 等^[52]采用有机弱酸盐-甲酸钾替代强氯化锂等强吸湿性无机盐,制备并搭建了硅胶-甲酸钾复合干燥剂涂敷的除湿换热器系统。结果表明,在相同实验工况下,硅胶-甲酸钾换热器的平均除湿量和制冷量较硅胶换热器分别提升 20% 和 50%。A. Kumar 等^[53-54]先后对硅胶和纤维-氯化钙干燥剂换热器除湿空调循环吸附和再生过程速率的影响因素进行实验研究,结果表明,再生温度、进口空气含湿量以及除湿过程前预冷对干燥剂吸附和再生速率有着正面影响,两个系统在夏季工况下平均 COP_{th} 可达 0.45,纤维-氯化钙换热器可用更低的再生热源驱动,但除湿效果弱于硅胶换热器。三菱化学科学技术研究中心^[24,27]通过对类沸石分子筛 FAPO5 和 FAPO34 涂覆的内冷式换热器的脱附性能和 100 °C 以下的低品位废热源进行匹配研究,结果表明 FAPO34 涂覆换热器的脱附性能更佳,可以实现 40 °C 的再生,但其吸附性能不高。L. Bonaccorsi 等^[55]采用硅烷基胶和二次浸渍涂覆法将 SAPO34 平整地涂覆到金属基材表面,并研究了硅烷基胶对涂层粘结性、机械性和吸湿稳定性的影响。A. Freni 等^[56]后续对涂覆有 SAPO34 的吸附式热泵展开 90 °C 再生温度下 600 次吸附循环的验证。

表 2 系统性能实验的相关参数

Tab.2 Related parameters of system performance experiment

文献	干燥剂参数	再生热源温度/°C	平均除湿量/(g/(kg 干空气))	COP_{th}
[11]	硅胶(大孔,ZCX-II)	60~80	3.1~5	0.38~0.48
[11]	吸水树脂(T50, 0.85 g/cm ³)	60~80	1.4~2.9	0.22~0.33
[45]	硅胶(介孔,0.15~0.29 mm)	40~60	2.2~2.5	0.5~1.6
[45]	硅胶-氯化锂(一)	40~60	2.6~3.2	0.7~1.7
[51]	硅胶(一)	80	4.9	0.34
[53]	硅胶(一)	64	3.2	0.45
[54]	纤维-氯化钙(一)	57	2.2	0.46
[56]	SAPO34	90	—	0.24
[57]	硅胶(介孔,0.15~0.29 mm)	40~60	1.6~3.1	0.8~1.0
[58]	硅胶(一)	55~80	2.46~4.5	0.35~0.48

现有内冷式干燥剂换热器系统采用的干燥剂、再生热源温度、平均除湿量以及 COP_{th} 等参数如表 2 所示。由表 2 可知,现有系统使用的干燥剂仍以常规的硅胶多孔干燥剂^[11, 45, 51, 53, 57-58]为主,复合多孔基质-

吸湿性盐^[45,54]也有使用。随着系统再生热源温度的降低,硅胶、复合干燥剂系统的 COP_{th} 有一定提升,但系统的平均除湿量明显减小。要想充分利用 30~60 °C 的工业废热,维持内冷式干燥剂换热器系统在低再

生温度下稳定的除湿性能,亟需对温敏复合干燥剂等新型智能复合材料,以及干燥剂与空气间的热湿传递强化机理进行研究。此外,同为硅胶类干燥剂,不同学者测试的实验结果不相同。一方面,由于硅胶干燥剂种类繁多,比表面积、孔体积、吸水性能均不相同;另一方面,实验结果受实验台尺寸、实验流程以及仪器测量精度等因素有关。因此,有必要编写内冷式换热器实验测试平台标准,进行统一、规范的量化研究,并且给出所用干燥剂材料的热物性参数,客观公正地比较各类干燥剂材料。

上述基于内冷式干燥剂换热器的固体除湿空调系统主要由热力驱动。基于除湿换热器的直膨式制冷/空调系统也有报道^[10,59-61]。N. Enteria 等^[59]将硅胶干燥剂涂覆到蒸发器和冷凝器的散热片上,同时采用 HCFC-22 作为制冷剂,构建了除湿热泵系统,该系统在不同工况下的 COP 维持在 2.9~5.7。Jiang Yu 等^[60-61]对除湿换热器新风处理系统与变制冷剂流量系统组合的复合制冷系统的全年运行工况进行了测试,结果发现复合系统 COP 较常规空调系统提升 20% 以上。Hua Lingji 等^[62]采用两个复合硅胶除湿换热器分别替代 R410A 热泵系统的蒸发器和冷凝器,搭建了一个除湿热泵系统测试台。在进口空气温度 36.3 °C,含湿量为 23 g/(kg 干空气)的夏季工况下,该系统 COP 高达 7.0,并能提供 26 °C, 8.9 g/(kg 干空气)的干冷空气。Tu Yaodong 等^[63]试制了一台紧凑型干燥剂增强型直膨式热泵空调器,采用两个相同规格的复合硅胶换热器分别用作蒸发器和冷凝器。结果表明,在典型夏季空调工况下,该新型空调器的系统能效比可达 6.20,如不计入风机功耗,其能效比高达 7.14,比普通热泵系统(2.8~3.8)高得多。袁野等^[64]基于表面涂覆吸附剂的除湿换热器,也建立一个类似的新型一体式除湿热泵空调循环实验装置。结果显示,新型除湿热泵空调循环除湿量约为 7.9 g/(kg 干空气),且系统 COP 能达到 5.2 以上。

综上所述,由热力或电力驱动的基于内冷式干燥剂的除湿空调系统能在保证送风舒适性的前提下,有不错的能量利用效率。现有研究成果有望对未来空调产业产生革命性的影响。但是,如何进一步减小该新型除湿空调系统体积,实现在实际生产和生活中的应用,是该技术面临的又一挑战。

4 结论

本文从干燥剂材料、热湿传递过程和系统性能研究 3 个方面,对降低驱动热源温度和提升系统性能的

技术需求以及相关科学问题进行了总结和展望,以期推动该新型固体除湿空调技术在工业余热利用、环境湿度处理、新风机组和空调等领域的应用,带来可观的社会效益、环境效益和经济效益。尽管国内外学者在干燥剂性能提高、热湿传递过程分析和系统动态性能模拟与实验研究等方面均取得了丰富的成果,但在以下方面仍存在诸多挑战:

1) 现有干燥剂存在或吸附不高或再生性差或具有腐蚀性的问题,实现高吸附、40 °C 低热源温度再生且无腐蚀的干燥剂是提升基于内冷式干燥剂换热器的固体除湿空调性能的前提。如何实现 LCST 低于 40 °C 的温敏功能层和多孔纳米材料承载基质的优化匹配,得到吸附及再生性能优异的温敏复合干燥剂,既是该新型固体除湿技术面临的重要挑战,也是未来突破材料对内冷式干燥剂系统制约的发展方向。

2) 现有干燥剂换热器模型忽略了多孔干燥剂内热质交叉耦合扩散引起的热附加扩散效应(Soret 效应),扩散附加热效应(Dufour 效应)以及干燥剂颗粒间的导热过程,如何针对不同干燥剂种类考虑 Soret 效应和干燥剂颗粒间的导热过程对相应干燥剂和空气间的热湿过程传递特性的影响,提升热质传递过程关键热力学和热化学特性参数精度,揭示干燥剂换热器内热质耦合传递机理,明确各部分传热传质阻力对内冷除湿和内热解吸热力学过程的影响,是该技术亟待解决的关键科学问题和关键挑战。

3) 结合高性能干燥剂及其与空气间的热湿传递过程,考虑基于内冷式干燥剂换热器的新型固体除湿空调系统具体的后续应用场景,有目的地改善该系统在具体应用场景中的除湿能力和热力性能系数,实现该技术在 30~60 °C 工业余热利用、环境湿度处理等领域的应用,是该技术在应用方面的巨大挑战。

参考文献

- [1] 李克强. 打好节能减排和环境治理攻坚战[J]. 核工业勘察设计, 2015(1): 11. (LI Keqiang. Uphill battles on energy conservation, emission reduction and environmental governance[J]. Nuclear Industry Exploration and Design, 2015(1): 11.)
- [2] 国家发展改革委环境保护部. 《“十三五”节能减排综合工作方案》解读[J]. 建设科技, 2017(1): 16-18. (National Development and Reform Commission, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Comprehensive work plan for energy conservation and emission reduction in the 13th Five-Year Plan[J]. Construction Science and Technology, 2017(1): 16-18.)
- [3] 连红奎, 李艳, 束光阳子, 等. 我国工业余热回收利用

- 技术综述[J]. 节能技术, 2011, 29(2): 123-128. (LIAN Hongkui, LI Yan, SHUGUANG Yangzi, et al. An overview of domestic technologies for waste heat utilization [J]. Energy Conservation Technology, 2011, 29(2): 123-128.)
- [4] 葛天舒. 转轮式两级除湿空调理论与实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008. (GE Tianshu. Theoretical and experimental investigation on a two-stage rotary desiccant cooling system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.)
- [5] ENTERIA N, MIZUTANI K. The role of the thermally activated desiccant cooling technologies in the issue of energy and environment [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(4): 2095-2122.
- [6] JEONG J, YAMAGUCHI S, SAITO K, et al. Performance analysis of four-partition desiccant wheel and hybrid dehumidification air-conditioning system [J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(3): 496-509.
- [7] ZHANG H, NIU J. A two-stage desiccant cooling system using low-temperature heat [J]. Building Services Engineering Research Technology, 1999, 20(2): 51-55.
- [8] GE Tianshu, LI Yong, WANG Ruzhu, et al. Experimental study on a two-stage rotary desiccant cooling system [J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(3): 498-508.
- [9] 刘晓茹, 袁卫星, 于志强. 内冷却紧凑式叉流除湿器性能数值模拟与分析 [J]. 太阳能学报, 2005, 26(1): 114-119. (LIU Xiaoru, YUAN Weixing, YU Zhiqiang. Numerical simulation and analysis of performance of an internally cooling compact dehumidifier [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2005, 26(1): 114-119.)
- [10] AYNUR T N, HWANG Y, RADERMACHER R. Integration of variable refrigerant flow and heat pump desiccant systems for the cooling season [J]. Energy and Buildings, 2010, 30(8/9): 917-927.
- [11] GE Tianshu, DAI Yanjun, WANG Ruzhu, et al. Experimental comparison and analysis on silica gel and polymer coated fin-tube heat exchangers [J]. Energy, 2010, 35(7): 2893-2900.
- [12] LA Dong, DAI Yanjun, LI Yong, et al. Technical development of rotary desiccant dehumidification and air conditioning: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(1): 130-147.
- [13] 贾春霞, 吴静怡, 代彦军, 等. 复合干燥剂转轮性能测试及其应用 [J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(8): 1283-1286. (JIA Chunxia, WU Jingyi, DAI Yanjun, et al. Experimental study on composite desiccant wheel and its application in a desiccant cooling system [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(8): 1283-1286.)
- [14] YU Nan, WANG Ruzhu, LU Zisheng, et al. Development and characterization of silica gel-LiCl composite sorbents for thermal energy storage [J]. Chemical Engineering Science, 2014, 111: 73-84.
- [15] ZHENG Xu, GE Tianshu, WANG Ruzhu, et al. Performance study of composite silica gels with different pore sizes and different impregnating hygroscopic salts [J]. Chemical Engineering Science, 2014, 120: 1-9.
- [16] 朱培怡, 王海增, 李溪. 氯化镁改性硅胶的吸水等温线及脱附性能 [J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(4): 735-740. (ZHU Peiyi, WANG Haizeng, LI Xi. Water vapor adsorption isotherm and desorption property of magnesium chloride modified silica [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38(4): 735-740.)
- [17] WANG Jiayun, LIU Jinya, WANG Ruzhu, et al. Experimental research of composite solid sorbents for fresh water production driven by solar energy [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 121: 941-950.
- [18] PONOMARENKO I V, GLAZNEV I S, GUBAR A V, et al. Synthesis and water sorption properties of a new composite "CaCl₂ confined into SBA-15 pores" [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2010, 129(1/2): 243-250.
- [19] ZHENG Xu, GE Tianshu, HU Leiming, et al. Development and characterization of mesoporous silicate-LiCl composite desiccants for solid desiccant cooling systems [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2015, 54(11): 2966-2973.
- [20] ZHENG Xu, GE Tianshu, WANG Ruzhu. Experimental study and performance predication of carbon based composite desiccants for desiccant coated heat exchangers [J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 72: 124-131.
- [21] TSO C Y, CHAO C Y H. Activated carbon, silica-gel and calcium chloride composite adsorbents for energy efficient solar adsorption cooling and dehumidification systems [J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(6): 1626-1638.
- [22] THORUWA T, JOHNSTONE C, GRANT A, et al. Novel, low cost CaCl₂ based desiccants for solar crop drying applications [J]. Renewable Energy, 2000, 19(4): 513-520.
- [23] SAPIENZA A, GLAZNEV I S, SANTAMARIA S, et al. Adsorption chilling driven by low temperature heat: new adsorbent and cycle optimization [J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 32: 141-146.
- [24] KAKIUCHI H, SHIMOOKA S, IWADA M, et al. Water vapor adsorbent FAM-Z02 and its applicability to adsorption heat pump [J]. Kagaku Kogaku Ronbunshu, 2005, 31(4): 273.
- [25] SHIMOOKA S, OSHIMA K, HIDAKA H, et al. The evaluation of direct cooling and heating desiccant device coated

- with FAM[J]. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2007, 40(13): 1330–1334.
- [26] KNEZ Z, NOVAK Z. Adsorption of water vapor on silica, alumina, and their mixed oxide aerogels [J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2001, 46(4): 858–860.
- [27] WHITE S D, GOLDSWORTHY M, REECE R, et al. Characterization of desiccant wheels with alternative materials at low regeneration temperatures [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2011, 34(8): 1786–1791.
- [28] 葛天舒. 再生式除湿换热器的理论和实验研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2011. (GE Tianshu. Theoretical and experimental investigation on regenerative desiccant coated heat exchanger [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.)
- [29] KUMAR S, DORY Y L, LEPAGE M, et al. Surface-grafted stimuli-responsive block copolymer brushes for the thermo-, photo- and ph-sensitive release of dye molecules [J]. *Macromolecules*, 2011, 44(18): 7385–7393.
- [30] CAO Z H, ZIENER U, LANDFESTER K. Synthesis of narrowly size-distributed thermosensitive poly (N-isopropylacrylamide) nanocapsules in inverse miniemulsion [J]. 2010, 43(15): 6353–6360.
- [31] 胡耀强, 权朝明, 刘海宁, 等. 温敏材料吸附研究进展 [J]. *材料导报*, 2016, 30(11): 126–130. (HU Yaoqiang, QUAN Chaoming, LIU Haining, et al. Review on thermo-responsive adsorbent material [J]. *Materials Review*, 2016, 30(11): 126–130.)
- [32] KANAZAWA H, OKANO T. Temperature-responsive chromatography for the separation of biomolecules [J]. *Journal of Chromatography A*, 2011, 1218(49): 8738–8747.
- [33] MURAKAMI K, YU X, WATANABE S, et al. Synthesis of thermosensitive polymer/mesoporous silica composite and its temperature dependence of anion exchange property [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011, 354(2): 771–776.
- [34] 纪凤龙, 胡金莲, 狄剑锋, 等. 温敏透湿聚氨酯织物涂层胶的制备与性能研究 [J]. *染整技术*, 2016, 38(5): 33–36. (JI Fenglong, HU Jinlian, DI Jianfeng, et al. Research on the preparation and property of temperature sensitive and permeable polyurethane fabric coating agent [J]. *Textile Dyeing and Finishing Journal*, 2016, 38(5): 33–36.)
- [35] ICHIHASHI T, NAKANO Y. Characteristics of water vapor adsorption and desorption in thermo sensitive mesoporous silica gel/polymer gel [J]. *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 2008, 34(4): 471–476.
- [36] 李鑫, 冯伟洪, 李慧玲, 等. 温敏型调湿材料的制备与表征 [J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2010, 42(4): 197–202. (LI Xin, FENG Weihong, LI Huiling, et al. Synthesis and characterization of thermo-sensitive humidity [J]. *Control Materials Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2010, 42(4): 197–202.)
- [37] 马晓梅, 唐小真. 体积相转变温度可调的温敏性 N-异丙基丙烯酰胺共聚物微凝胶的制备与性能研究 [J]. *高分子学报*, 2006(7): 897–902. (MA Xiaomei, TANG Xiaozhen. Synthesis and properties of temperature-sensitive n-isopropylacrylamide copolymer microgels with tunable phase transition temperature [J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2006(7): 897–902.)
- [38] GE Tianshu, DAI Yanjun, WANG Ruzhu. Performance study of silica gel coated fin-tube heat exchanger cooling system based on a developed mathematical model [J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52(6): 2329–2338.
- [39] YUAN Weixing, ZHENG Yi, LIU Xiaoru, et al. Study of a new modified cross-cooled compact solid desiccant dehumidifier [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(17): 2257–2266.
- [40] MUNZ G M, BONGS C, MORGENSTERN A, et al. First results of a coated heat exchanger for the use in dehumidification and cooling processes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 61(2): 878–883.
- [41] BONGS C, MORGENSTERN A, LUKITO Y, et al. Advanced performance of an open desiccant cycle with internal evaporative cooling [J]. *Solar Energy*, 2014, 104: 103–114.
- [42] HU Leiming, GE Tianshu, JIANG Yu, et al. Performance study on composite desiccant material coated fin-tube heat exchangers [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 90: 109–120.
- [43] JAGIRDAR M, LEE P S. Mathematical modeling and performance evaluation of a desiccant coated fin-tube heat exchanger [J]. *Applied Energy*, 2018, 212: 401–415.
- [44] SHIMOOKA S, OSHIMA K, HIDAKA H, et al. The evaluation of direct cooling and heating desiccant device coated with FAM [J]. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2007, 40(13): 1330–1334.
- [45] JIANG Yu, GE Tianshu, WANG Ruzhu, et al. Experimental investigation and analysis of composite silica-gel coated fin-tube heat exchangers [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2015, 51: 169–179.
- [46] ZHANG L, SAIKAWA M, FUJINAWA T. Experimental study on heat and mass transfer characteristics for a desiccant-coated fin-tube heat exchanger [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 89: 641–651.
- [47] ZHAO Yao, DAI Yanjun, GE Tianshu, et al. On heat and moisture transfer characteristics of a desiccant dehumidification unit using fin tube heat exchanger with silica gel coat-

- ing[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 91: 308–317.
- [48] TU Yaodong, WANG Ruzhu, HUA Lingji, et al. Desiccant-coated water-sorbing heat exchanger: weakly-coupled heat and mass transfer[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 113: 22–31.
- [49] 陈宝明, 王补宣, 张立强, 等. 多孔介质传热传质中耦合扩散效应的研究[J]. *工程热物理学报*, 2004, 25(增刊 1): 125–128. (CHEN Baoming, WANG Buxuan, ZHANG Liqiang, et al. Numerical study on solet-effect and dufour effect in porous enclosure[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2004, 25(Suppl. 1): 125–128.)
- [50] SALEM A M. Thermal-diffusion and diffusion-thermo effects on convective heat and mass transfer in a visco-elastic fluid flow through a porous medium over a stretching sheet[J]. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 2010, 22(9): 955–966.
- [51] 赵耀, 葛天舒, 代彦军. 基于太阳能驱动连续除湿换热器空调系统的实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2014, 35(2): 223–227. (ZHAO Yao, GE Tianshu, DAI Yanjun. Experimental investigation on silica gel coated heat exchanger cooling system driven by solar energy[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, 35(2): 223–227.)
- [52] GE Tianshu, ZHANG Jingyu, DAI Yanjun, et al. Experimental study on performance of silica gel and potassium formate composite desiccant coated heat exchanger[J]. *Energy*, 2017, 141: 149–158.
- [53] KUMAR A, YADAV A. Experimental investigation of solar-powered desiccant cooling system by using composite desiccant “CaCl₂/jute”[J]. *Environment Development and Sustainability*, 2017, 19(4): 1–14.
- [54] KUMAR A, YADAV A. Experimental investigation of solar driven desiccant air conditioning system based on silica gel coated heat exchanger[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2016, 69: 51–63.
- [55] BONACCORSI L, CALABRESE L, FRENI A, et al. Zeolites direct synthesis on heat exchangers for adsorption heat pumps[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 50(2): 1590–1595.
- [56] FRENI A, BONACCORSI L, CALABRESE L, et al. SAPO-34 coated adsorbent heat exchanger for adsorption chillers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 82: 1–7.
- [57] 曹伟, 葛天舒, 郑旭, 等. 除湿换热器串联换热器强化除湿降温性能实验研究[J]. *制冷学报*, 2017, 38(4): 59–66. (CAO Wei, GE Tianshu, ZHENG Xu, et al. Experimental investigation on thermal performance of desiccant coated heat exchanger in series with heat exchanger[J]. *Journal of Refrigeration*, 2017, 38(4): 59–66.)
- [58] LERTBOONKANKIT P, CHIRARATTANANON S. Experimental investigation on a desiccant air dehumidifier constructed from a water-to-air heat exchanger[J]. *Energy Procedia*, 2017, 138: 628–634.
- [59] ENTERIA N, MIZUTANI K, MONMA Y, et al. Experimental evaluation of the new solid desiccant heat pump system in Asia-Pacific climatic conditions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(2/3): 243–257.
- [60] JIANG Yu, GE Tianshu, WANG Ruzhu, et al. Experimental investigation on a novel temperature and humidity independent control air conditioning system—part I: cooling condition[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 73(1): 784–793.
- [61] JIANG Yu, GE Tianshu, WANG Ruzhu, et al. Experimental investigation on a novel temperature and humidity independent control air conditioning system—part II: heating condition[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 73(1): 775–783.
- [62] HUA Lingji, JIANG Yu, GE Tianshu, et al. Experimental investigation on a novel heat pump system based on desiccant coated heat exchangers[J]. *Energy*, 2018, 142: 96–107.
- [63] TU Yaodong, WANG Ruzhu, GE Tianshu, et al. Comfortable, high-efficiency heat pump with desiccant-coated, water-sorbing heat exchangers[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(2): 40437.
- [64] 袁野, 葛天舒. 新型一体式除湿热泵空调循环夏季工况实验研究[J]. *制冷学报*, 2018, 39(5): 59–66. (YUAN Ye, GE Tianshu. Experimental investigation under summer conditions on novel integrated dehumidification heat pump air-conditioning cycle[J]. *Journal of Refrigeration*, 2018, 39(5): 59–66.)

通信作者简介

郑旭, 女, 博士, 浙江理工大学建筑工程学院, (0571) 86843374, E-mail: cindy1989v@zstu.edu.cn。研究方向: 新型固体除湿空调技术, 制冷空调中的能源利用。

About the corresponding author

Zheng Xu, female, Ph. D., School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, +86 571-86843374, E-mail: cindy1989v@sjtu.edu.cn. Research fields: novel solid desiccant air-conditioning systems, energy utilization in refrigeration and air-conditioning.