

文章编号:0253 – 4339(2018) 02 – 0074 – 07
doi:10. 3969/j. issn. 0253 – 4339. 2018. 02. 074

储热型吸附式空气取水器吸附剂与储热材料的选择

刘金亚 王丽伟 王佳韵 王如竹

(上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240)

摘 要 本文针对太阳能储热型吸附式空气取水器吸附剂和储热材料的选择,分别研究了以膨胀硫化石墨(ENG-TSA)和以活性炭纤维(ACF)毡为基质的复合吸附剂的导热系数和吸附性能,硬脂酸/膨胀硫化石墨(ENG-TSA-SA)复合相变储热材料的导热系数与 DSC 测试。结果表明:ENG-TSA-LiCl 复合吸附剂的导热系数最大可达 5.67 W/(m·K),吸水量最大可达 1.54 g/g。真空浸渍法获得的 ACF-LiCl 复合吸附剂的吸水量比大气浸渍法高。ASLi40 固化吸附剂的吸水量为 1.59 g/g,适用于大批量生产。ENG-TSA-SA 的径向导热系数为 22.2 W/(m·K),相变温度区间为 65.9 ~ 77.1 ℃,适用于太阳能等低品位热能。储热器的添加明显延缓了解吸温度降低的趋势。

关键词 空气取水器;复合吸附剂;相变材料;导热系数;太阳能

中图分类号:TU999.11⁺4;TB34;O647.33

文献标识码:A

Alternative of Sorbents and Heat Storage Materials for Heat Storage Sorption Air Intake

Liu Jinya Wang Liwei Wang Jiayun Wang Ruzhu

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract Alternatives to the sorbents and heat storage materials used for a heat storage sorption air intake device driven by solar energy were examined in this study. These included thermal conductivity and the sorption kinetic performance of composite sorbents using expanded natural graphite treated with sulfuric acid (ENG-TSA) and activated carbon fiber (ACF) felt as porous host matrixes, and thermal conductivity, and differential scanning calorimetry (DSC) test for the composite phase-change thermal energy storage materials, i. e., stearic acid (SA)/ENG-TSA. The results revealed that the best thermal conductivity of the composite sorbent ENG-TSA-LiCl was 5.67 W/(m·K), and the largest water uptake was 1.54 g/g. The sorption performance of the composite sorbent ACF-LiCl using a vacuum impregnation method was better than that when using the atmospheric impregnation method. The water uptake of the consolidated sorbent of ASLi40 was 1.59 g/g, which can be applied to mass production. ENG-TSA-SA was suitable for solar energy and other low-grade heat energy recovery applications, with a high radial thermal conductivity (22.2 W/(m·K)) and appropriate internal phase transition temperature (65.9 – 77.1 ℃). The addition of a heat reservoir significantly slowed down the decrease to the desorption temperature.

Keywords air intake; composite sorbent; phase change material; thermal conductivity; solar energy

确保淡水供应是人类在沙漠和海岛地区所有活动的先决条件,但如何在这些地区有效地获取淡水则是难以解决的问题。吸附式空气取水具有系统装置简单、体积小、效率高、加热温度低的优点^[1],可应用太阳能为热源,是一种具有实用前景的设备^[2]。由于太阳能具有很大的不稳定性,在吸附床前放置储热器是非常必要的。

典型的水吸附剂包括沸石^[3]、硅胶^[4-5]、吸湿性盐(如 LiCl)溶液^[6]和盐水合物材料^[7]。Y. I. Aristov 等^[8]率先采用主体材料(硅胶,氧化铝, MCM-

41)^[9-10]浸泡吸湿性盐(CaCl₂, LiBr, LiNO₃ 等)^[11-12]制备复合吸附剂,其吸附能力和吸附速度都有较大提高。复合吸附剂 SiO₂·xH₂O·yCaCl₂^[13-14]在不同温度和湿度下的吸附性能已被广泛研究,吸附性能有待提高。胡雷鸣等^[15]制备了 LiCl-硅胶和 CaCl₂-硅胶复合吸附剂并对其吸附速率和吸附量进行了对比。Wang J. Y. 等^[16]以活性炭纤维(activated carbon fiber, ACF)毡为基质配制了复合吸附剂 ACF-CaCl₂30,其吸水性能在 20 ℃、70% 相对湿度(relative humidity, RH)下高达 1.7 g/g。

石蜡等有机相变储热材料被广泛应用于太阳能利用中, S. D. Sharma 等^[17]研究了硬脂酸 (stearic acid, SA)、石蜡等的储热性能。然而, 有机相变储热材料具有导热系数低、稳定性差和易于泄漏等缺点。复合相变储热材料如 SA/氧化石墨烯^[18]、石蜡/膨胀石墨^[19], 不仅克服了缺陷, 还改善了应用效果, 拓展了应用范围。

结合空气取水应用、太阳能储存与应用, 本文构建了新型储热型空气取水器, 对该装置的吸附材料及储热材料进行了测试, 研究了不同复合吸附剂的导热系数和吸附性能、硬脂酸/膨胀硫化石墨 (ENG-TSA-SA) 复合相变储热材料的导热系数与储热性能。

1 系统设计与材料制备

1.1 储热型太阳能吸附式空气取水器

储热型太阳能吸附式空气取水系统原理如图 1 所示, 由吸附床、冷凝器、风机、储热器和太阳能集热器等组成。吸附剂采用波纹板与平板相间的排列方式, 传质通道均匀分布在吸附床的各个角落, 具有结构紧凑、填充量大、通风性强的优点。

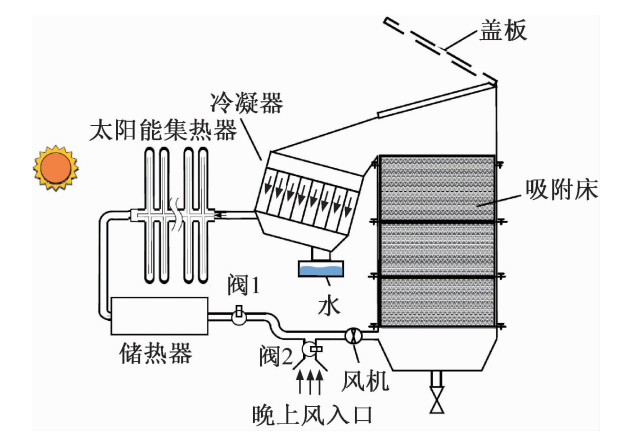


图 1 系统原理
Fig. 1 Principle of the system

实验时采用开式吸附与闭式解吸相结合的循环方式, 即两个过程:

1) 晚上吸附过程: 盖板和阀 2 打开, 阀 1 关闭, 湿空气从吸附床下面进入, 经吸附剂吸附后从盖板处流出, 空气中的水分被吸附剂吸附。

2) 白天储能与解吸过程: 阀 2 和盖板关闭, 阀 1 打开, 经太阳能集热器加热的空气依次流入储热器和吸附床, 吸附剂解吸出高湿水蒸气经冷凝器冷凝收集。当太阳能充足时, 储热器储存多余的热量, 当太阳能不足时, 储热器释放热量用于延长解吸时间。

储热型吸附式空气取水器的性能主要由吸附剂和储热材料决定, 吸附剂和储热材料的选择是系

统的关键。

1.2 材料制备

1) 以 ENG-TSA 为基质的复合吸附剂的制备
配制膨胀硫化石墨 (expanded natural graphite treated by the sulphuric acid, ENG-TSA)-LiCl 复合吸附剂的具体步骤:

(1) 取 ENG-TSA 于烧杯中在烘箱中烘干并称取质量, 按 LiCl 与 ENG-TSA 的质量比为 4:1 配制 LiCl 溶液, 冷却至室温后与 ENG-TSA 混合均匀, 然后放入烘箱中定期搅拌至质量不再变化。

(2) 按模具规格和厚度取一定量的混合材料用压力机压制成一定密度的样品块, 样品块尺寸为 30 mm × 30 mm × 20 mm。

实验中配置了 6 种复合吸附剂样品, 其命名和密度如表 1 所示。

表 1 ENG-TSA-LiCl 复合吸附剂的密度 Tab. 1 Bulk density of composite sorbents ENG-TSA-LiCl	
样品	密度/(kg/m ³)
ELi1	248
ELi2	297
ELi3	333
ELi4	391
ELi5	442
ELi6	494

2) 以 ACF 为基质的复合吸附剂的制备
采用 ACF 作为复合吸附剂的基质, 因其具有较大的比表面积, 且深浅不一的纹理沟槽和不规则的空隙成为传导容纳水分子的优良载体。主要原理是利用固化后的 ACF 沿轴向排列大量形状尺寸不等的纤维所形成的毛细孔产生的巨大毛细力来吸附盐溶液, 被干燥后 LiCl 就附着在纤维上, 用以吸附空气中的水分子。本文以 ACF 为基质配制了两种复合吸附剂, 第一种将烘干后的 ACF 分别采用大气浸渍法和真空浸制法浸泡质量浓度为 20%、30% 和 40% 的 LiCl 溶液 12 h, 然后在烘箱中烘至质量不再变化, 命名为 ALi20A、ALi30A、ALi40A (大气浸渍法)、ALi20V、ALi30V、ALi40V (真空浸制法)。第二种先将烘干后的 ACF 浸渍在硅溶胶中烘干使其固化, 然后再采用大气浸渍法浸渍质量浓度为 20%、30% 和 40% 的 LiCl 溶液 12 h, 然后烘干, 得到固化吸附剂 ASLi20、ASLi30、ASLi40。以 ACF 为基质的复合吸附剂的 LiCl 含量和密度分别如表 2 所示。随着 LiCl 溶液浓

度的增高,吸附剂的 LiCl 含量和密度都增大。采用真空浸渍法得到的吸附剂的 LiCl 含量和密度比大气浸渍法的高。由于硅溶胶的存在,导致采用硅溶胶固化的吸附剂 LiCl 含量较低,密度较大,但由于其形状固定,较适用于工程应用。

表 2 ACF-LiCl 复合吸附剂的 LiCl 含量和密度
Tab.2 LiCl content and bulk density of composite sorbents ACF-LiCl

样品	LiCl 含量	密度/(kg/m ³)
ALi20A	0.731	302
ALi30A	0.766	348
ALi40A	0.859	577
ALi20V	0.756	336
ALi30V	0.840	507
ALi40V	0.870	627
ASLi20	0.265	722
ASLi30	0.324	772
ASLi40	0.381	871

3) 复合相变储热材料的制备

为了研究用于储热型空气取水器的相变储热材料的性能,制备了 ENG-TSA-SA 复合相变储热材料,如图 2 所示。本实验先将 ENG-TSA 放入 120 ℃ 的烘箱中 4 h,待冷却至室温后与 SA 粉末按 1:4 混合,搅拌 0.5 h 后,再放入 100 ℃ 的烘箱中边融化边搅拌,直至其混合物完全融化并混合均匀。最后按模具规格和厚度取一定量的混合材料用压力机压制成一定密度的样品块,样品块尺寸为 30 mm × 30 mm × 20 mm,具有良好的封装效果。实验制得的样品密度为 880 kg/m³。

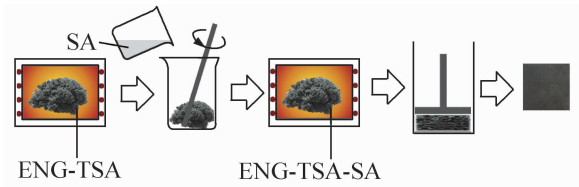


图 2 储热材料制备过程
Fig.2 Preparing process of PCMs

2 结果与分析

2.1 ENG-TSA-LiCl 复合吸附剂的导热系数与吸附性能

吸附剂的导热系数较低会降低系统性能^[20]。复合吸附剂的导热系数采用闪光导热仪(LFA447)测量。仪器精度为 ±3%,最大相对误差为 5%,每个样

品测量 3 次取平均值。由于样品由压力机压制而成,所以复合吸附剂存在各向异性,有两个方向导热系数,分别为径向导热系数(水平方向)和轴向导热系数(竖直方向)。图 3 为 25 ℃ 下不同体积密度下吸附剂的导热系数,最大标准偏差为 0.212 W/(m·K)。随着样品密度的增高,吸附剂的轴向导热系数和径向导热系数都增大。径向导热系数比轴向导热系数高,是轴向导热系数的 1.52 ~ 1.8 倍。其中样品 ELi6 的径向导热系数最大,达到 5.67 W/(m·K),是 ESA-Li5-5^[21] 的 2 倍。

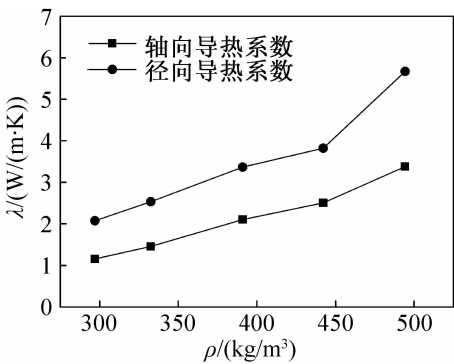


图 3 ENG-TSA-LiCl 复合吸附剂在 25 ℃ 下的导热系数
Fig.3 Thermal conductivity of composite sorbents ENG-TSA-LiCl

为了进一步检验 ENG-TSA-LiCl 复合固化吸附剂的吸附动力学性能,将样品置于恒温恒湿箱中测试了其非平衡吸附量。实验前先将样品在 120 ℃ 下彻底烘干后隔绝空气降温,实验中每隔一定时间记录下质量变化,当吸附量增量低于 0.1 g/g 时认为吸附达到平衡。吸附剂的吸水量和精度可按下式计算:

$$x = (m_{eq} - m_s) / m_s \tag{1}$$

$$\Delta x = \left| \frac{\partial x}{\partial m_{eq}} \right| \Delta m_{eq} + \left| \frac{\partial x}{\partial m_s} \right| \Delta m_s \tag{2}$$

式中: x 为最大吸水量, g/g; m_{eq} 和 m_s 分别为吸附平衡时吸附剂的质量和干燥吸附剂的质量, g。电子秤的精度为 0.001 g, 所以吸水量的误差低于 0.014 g/g。

ENG-TSA-LiCl 复合吸附剂在 20 ℃、80% RH 下的吸附动力学性能如图 4 所示。随着吸附时间的增加,吸附速率逐渐降低。结合表 1 可以看出,吸附剂的密度越小,吸水量越高。吸附剂 ELi1 的吸水性最好,可以达到 1.54 g/g,此时吸附剂已发生三相吸附过程,既包括吸附过程,又包括液解过程和吸收过程,可应用在三相吸附式空气取水系统中。但 ENG-TSA-LiCl 复合吸附剂存在一个重大缺陷:吸水后样品表面会出现非常明显的裂痕,并且裂痕随着吸水量的增大

和吸附时间的增加会不断延伸和变宽,机械性能明显降低,不利于重复使用。因此以 ENG-TSA 为基质的复合吸附剂虽然具有导热性能好、密度小、易压制、化学性能稳定等优点,但使用时必须解决吸附床内吸附剂机械性能降低的问题。

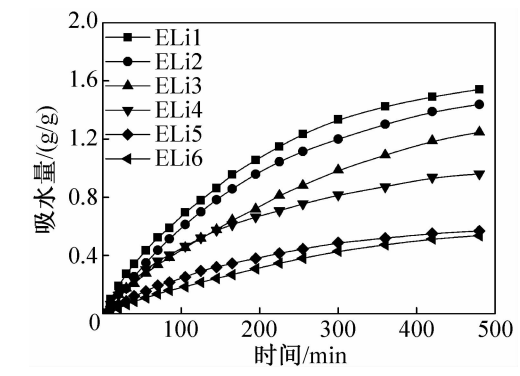


图 4 ENG-TSA-LiCl 复合吸附剂在 20 °C、80% RH 下的吸附动力学性能

Fig. 4 Water sorption kinetics of composite sorbents ENG-TSA-LiCl at 20 °C and 80% RH

2.2 ACF-LiCl 复合吸附剂的导热系数与吸附性能

由于 ACF 为各向异性材料,所以复合吸附剂有径向导热系数与轴向导热系数。图 5 所示为 25 °C 下不同 LiCl 浓度下吸附剂的导热系数。随着 LiCl 溶液浓度的增高,吸附剂的轴向导热系数和径向导热系数都增大。径向导热系数比轴向导热系数高,其中 ALi40V 的径向导热系数最大,为 0.44 W/(m·K)。

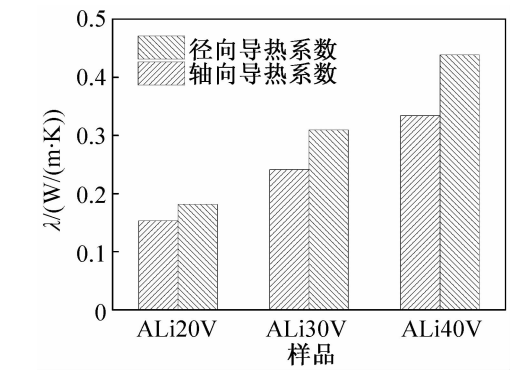


图 5 ACF-LiCl 复合吸附剂在 25 °C 下的导热系数

Fig. 5 Thermal conductivity of composite sorbents ACF-LiCl at 25 °C

ACF-LiCl 复合吸附剂在 20 °C、80% RH 下的吸附动力学性能如图 6 所示。随着吸附时间的增加,吸附速率逐渐降低。在配制方法相同时,LiCl 溶液浓度越高吸附性能越好。但 LiCl 含量增高,液解现象会越严重,LiCl 溶液浓度为 40% 时已发生三相吸附过

程,不适合两相吸附式空气取水系统。LiCl 溶液浓度相同时,真空浸渍法获得的吸附剂的吸水量比大气浸渍法高 6.9% ~ 23.5%,其中复合吸附剂 ALi40V 吸附性能最好,吸水量为 3.32 g/g。固化吸附剂由于硅胶所占比重较大,吸附性能约为非固化吸附剂的 1/2,吸水量最大为 1.59 g/g,为硅胶-CaCl₂^[16] 的 2.65 倍,但由于其机械性能较强,适用于工业化大批量生产。

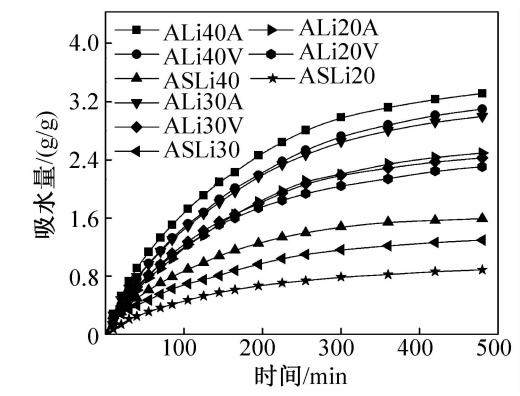


图 6 ACF-LiCl 复合吸附剂在 20 °C、80% RH 下的吸附动力学性能

Fig. 6 Water sorption kinetics of composite sorbents ACF-LiCl at 20 °C and 80% RH

综合对比以 ENG-TSA 为基质的复合吸附剂和以 ACF 为基质的吸附剂可以得出:两种吸附剂都为各向异性材料,径向导热系数都大于轴向导热系数,但 ENG-TSA-LiCl 复合吸附剂的导热系数远远大于 ACF-LiCl 复合吸附剂;浸渍 40% LiCl 溶液的吸附剂会发生三相吸附过程,浸渍 20% 和 30% LiCl 溶液的吸附剂适用于两相吸附式空气取水系统。

2.3 复合相变储热材料的导热系数与储热性能

采用激光导热法测量了 ENG-TSA-SA 的导热系数,轴向导热系数为 8.61 W/(m·K),径向导热系数为 22.2 W/(m·K),远远高于 SA 的导热系数 0.172 W/(m·K)^[22]。

对所配制的 ENG-TSA-SA 复合相变储热材料进行了融化过程的示差扫描量热法测试 (differential scanning calorimetry, DSC)。测量温度范围 35 ~ 95 °C,温升速率 2.5 K/min,样品质量测量精度为 0.1 mg,由传感器测量的热流精度为 1 mW。DSC 测量结果如图 7 所示,图中曲线为热流变化,DSC 曲线与直线形成的峰所示的范围为储热材料融化过程,DSC 曲线与直线所围成的面积为相变潜热。该复合相变储热材料的相变温度区间为 65.9 ~ 77.1 °C,峰值融化温度为 75.0 °C,略高于 SA 的峰值融化温度

74.6 °C^[22],相变潜热即质量储存密度为 153 J/g,体积储存密度为 134 J/cm³,适用于太阳能等低品位热能。

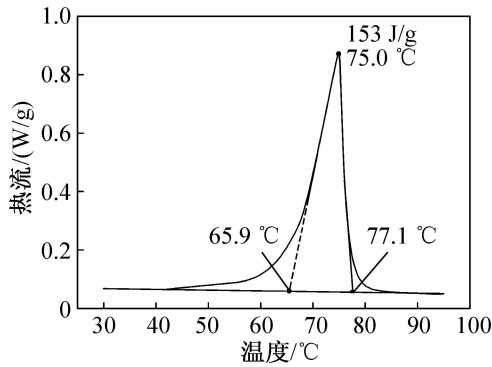


图 7 DSC 测试
Fig. 7 DSC testing

图 8 所示为储热器性能模拟结果,吸附床进口风速 1 m/s,管径 0.2 m,储热材料填充 1 kg。图中实线为上海夏季某晴朗一天太阳能集热器实际出口温度变化,作为储热器进口温度 T_{si} ;虚线为模拟的储热器出口温度 T_{so} 。可以看出,9:00 ~ 10:00 储热材料随着温度的升高而吸热发生相变,多余的热量储存在储热器里,但对储热器出口温度影响不大;中午,储热器使出口温度恒定;14:30 ~ 16:40 温度开始下降,储热材料放热,其中有一凸峰是因为储热材料在此温度范围内发生相变,放热量大大增加,最高温度可达到 89.3 °C。储热器的添加明显延缓解吸温度下降的趋势。

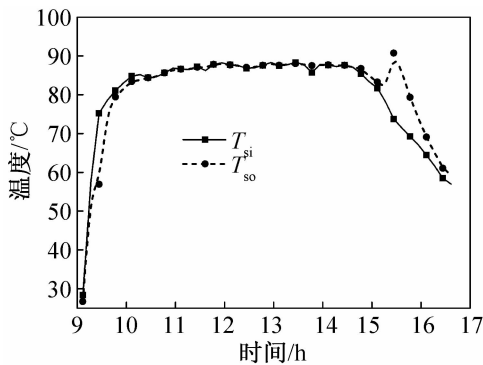


图 8 储热器性能模拟结果

Fig. 8 Simulation results of heat reservoir performance

2.4 系统取水性能分析

考虑到以 ENG-TSA 为基质的复合吸附剂的吸附性能低于以 ACF 为基质的复合吸附剂,对不同 ACF 为基质的吸附剂进行了解吸性能研究。图 9 所示为复合吸附剂在 30% RH、不同温度下的解吸量。吸附剂 ALi40V 的解吸量高于 ALi40A,但两者形状不易固

定,固化吸附剂 ASLi40 在 90 °C 下的解吸量为 1.22 g/g,并且 ASLi40 解吸量与吸附量比值最高,为 76.6%。虽然固化吸附剂的吸附量与解吸量均不高,但形状固定,适合工业化生产,所以储热型吸附式空气取水装置可采用 ASLi40 固化吸附剂,并且可采用模块化生产,满足不同取水量的目标。如吸附床进口温度最高可达到 89.5 °C,要满足 50 kg 取水量的目标,需要 41.0 kg 固化吸附剂。

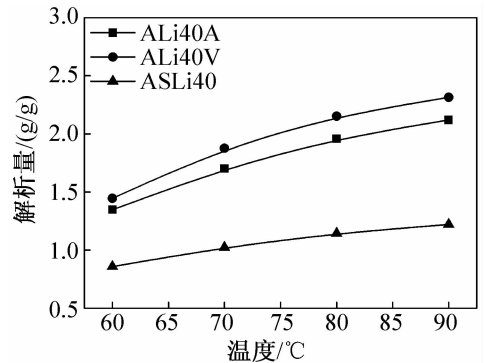


图 9 复合吸附剂在 30% RH 下的解吸量
Fig. 9 The desorption capacity of the composite adsorbent at 30% RH

3 结论

本文研究了储热型吸附式空气取水器吸附剂和储热材料的选择,分别用激光导热仪、恒温恒湿箱和同步热分析仪研究了以 ENG-TSA 和以 ACF 为基质的复合吸附剂的导热系数和吸附性能,ENG-TSA-SA 复合相变储热材料的导热系数与 DSC 测试。研究结果如下:

1) ENG-TSA-LiCl 复合吸附剂的轴向导热系数和径向导热系数随着吸附剂密度的增加都增大,径向导热系数高于轴向导热系数,样品在 25 °C 下导热系数最大可达到 5.67 W/(m·K)。复合吸附剂在 20 °C、80% RH 下的吸附性能随着吸附剂密度的增高而降低,吸附剂吸水量最大可达到 1.54 g/g。

2) ACF-LiCl 复合吸附剂的轴向导热系数和径向导热系数都随着 LiCl 溶液浓度的增高而增大。真空浸渍法获得的吸附剂的吸水量比大气浸渍法高,其中复合吸附剂 ALi40V 吸附性能最好,为 3.32 g/g。AS-Li 固化吸附剂最大吸水量为 1.59 g/g,但由于机械性能较强,适用于工业化大批量生产。

3) ENG-TSA-SA 复合相变储热材料的径向导热系数为 22.2 W/(m·K),相变温度区间为 65.9 ~ 77.1 °C,相变潜热为 153 J/g,适用于太阳能等低品位热能。储热器的添加明显延缓解吸温度下降的趋势。

参考文献

- [1] 刘业凤. 空气取水用复合吸附剂的吸附性能及吸附动力学特性研究[D]. 上海:上海交通大学, 2003. (LIU Yefeng. Study on adsorption property and adsorption kinetics characteristics of composite adsorption to extract water from atmosphere[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2003.)
- [2] 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(Suppl. 2): 46-50. (LIU Jinya, WANG Jiayun, WANG Liwei, et al. Performance test of sorption air-to-water device[J]. CIESC Journal, 2016, 67(Suppl. 2): 46-50.)
- [3] HAUER A. Adsorption systems for TES-design and demonstration projects[J]. Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption, 2007, 234: 409-427.
- [4] PAN Q W, WANG R Z, WANG L W, et al. Design and experimental study of a silica gel-water adsorption chiller with modular adsorbents[J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 67: 336-344.
- [5] FERNANDES M S, BRITES G J V N, COSTA J J, et al. A thermal energy storage system provided with an adsorption module-dynamic modeling and viability study[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 126: 548-560.
- [6] BALES C, NORDLANDER S. TCA evaluation: lab measurements, modelling and system simulations [EB/OL]. (2015-01-08) [2017-12-14]. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:522859/FULLTEXT01.pdf>.
- [7] ESSEN V M V, ZONDAG H A, GORES J C, et al. Characterization of MgSO_4 hydrate for thermochemical seasonal heat storage [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2009, 131: 041014.
- [8] ARISTOV Y I, TOKAREV M M, GORDEEVE L G, et al. New composite sorbents for solar-driven technology of fresh water production from the atmosphere[J]. Solar Energy, 1999, 66(2): 165-168.
- [9] ARISTOV Y I, TOKAREV M M, GACCIOLA G, et al. Selective water sorbents for multiple applications, 1. CaCl_2 confined in mesopores of silica gel: sorption properties[J]. Reaction Kinetics and Catalysis Letters, 1996, 59(2): 325-333.
- [10] ARISTOV Y I, TOKAREV M M, RESTUCCIA G, et al. Selective water sorbents for multiple applications, 2. CaCl_2 confined in micropores of silica gel: sorption properties [J]. Reaction Kinetics and Catalysis Letters, 1996, 59(2): 335-342.
- [11] ARISTOV Y I, SAPIENZA A, OVOSHCHNIKOV D S, et al. Reallocation of adsorption and desorption times for optimisation of cooling cycles [J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(3): 525-531.
- [12] INAGAKI S, FUKUSHIMA Y, KURODA K. Synthesis of highly ordered mesoporous materials from a layered polysilicate[J]. Journal of the Chemical Society, Chemical Communications, 1993, 24(35): 680-682.
- [13] 刘业凤, 王如竹. 空气中取水用的新型复合吸附剂的吸附和解吸性能[J]. 化工进展, 2002, 21(10): 733-735. (LIU Yefeng, WANG Ruzhu. Adsorption and desorption properties of new composite adsorbent to extract water from atmosphere[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2002, 21(10): 733-735.)
- [14] DAOU K, WANG R Z, XIA Z Z. Development of a new synthesized adsorbent for refrigeration and air conditioning applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(1): 56-65.
- [15] 胡雷鸣, 葛天舒, 江宇, 等. 金属基复合吸附剂的吸湿性能测试[J]. 制冷学报, 2014, 35(2): 69-75. (HU Leiming, GE Tianshu, JIANG Yu, et al. Hygroscopic property of metal matrix composite desiccant [J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(2): 69-75.)
- [16] WANG J Y, WANG R Z, WANG L W. Water vapor sorption performance of ACF-CaCl_2 and silica gel- CaCl_2 composite adsorbents [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 100: 893-901.
- [17] SHARMA S D, BUDDHI D, SAWHNEY R L. Accelerated thermal cycle test of latent heat-storage materials[J]. Solar Energy, 1999, 66(6): 483-490.
- [18] 周建伟, 程玉良, 王储备, 等. 硬脂酸/氧化石墨烯复合相变储热材料研究[J]. 化工新型材料, 2013, 41(6): 47-49. (ZHOU Jianwei, CHENG Yuliang, WANG Chubei, et al. Study on stearic acid/graphene oxide composite phase-change material for thermal storage[J]. New Chemical Materials, 2013, 41(6): 47-49.)
- [19] ZHANG Z G, ZHANG N, PENG J, et al. Preparation and thermal energy storage properties of paraffin/expanded graphite composite phase change material[J]. Applied Energy, 2012, 91(1): 426-431.
- [20] 孟祥睿, 张如波, 陈晓娟, 等. 固化吸附剂导热系数测量参数选择[J]. 制冷学报, 2008, 29(4): 42-46. (MENG Xiangrui, ZHANG Rubo, CHEN Xiaojuan, et al. Thermal conductivity measurement of consolidated adsorbent [J]. Journal of Refrigeration, 2008, 29(4): 42-46.)
- [21] YU N, WANG R Z, LU Z S, et al. Study on consolidated composite sorbents impregnated with LiCl for thermal energy storage[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 2015, 84: 660-670.

- der outdoor sol-air temperature conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8):141-289.)
- [17] ZHAO Chunjiang, HAN Jiawei, YANG Xinting, et al. A review of computational fluid dynamics for forced-air-cooling progress[J]. Applied Energy, 2016, 168:314-331.
- [18] DEGHANNYA J, NGADI M, VIGNEAULT C. Simultaneous aerodynamic and thermal analysis during cooling of stacked spheres inside ventilated packages[J]. Chemical Engineering & Technology, 2008, 31:1651-1659.
- [19] JOHN D. Computational fluid dynamics [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [20] 谢晶,施骏业,瞿晓华. 食品热物性的多项式数学模型[J]. 制冷, 2004, 23(4):6-10. (XIE Jing, SHI Junye, QU Xiaohua. The polynomial model for predicting the thermal properties of food[J]. Refrigeration, 2004, 23(4):6-10.)
- [21] 韩佳伟,赵春江,杨信廷,等. 送风风速对苹果压差预冷性能的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11):280-289. (HAN Jiawei, ZHAO Chunjiang, YANG Xinting, et al. Effect of air-inflow velocity on cooling efficiency during forced-air precooling of apples[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11):280-289.)
- [22] 吴天,谢晶. 果品冷藏库气体流场模拟及实验研究[J]. 流体机械, 2006, 34(6):9-12. (WU Tian, XIE Jing. Experimental research & simulation on fluent fields of the cold store[J]. Fluid Machinery, 2006, 34(6):9-12.)
- [23] 胡坤,李振北. ANSYS ICEM CFD 工程实例详解[M]. 北京:人民邮电出版社, 2014. (HU Kun, LI Zhenbei. ANSYS ICEM CFD Engineering examples [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2014.)
- [24] 郭嘉明,吕恩利,陆华忠,等. 冷藏运输厢体结构对流场影响的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2012, 28(Suppl. 1):74-80. (GUO Jiaming, LYU Enli, LU Huazhong, et al. Numerical simulation of effects of transport enclosure structure on flow field[J]. Transactions of CSAE, 2012, 28(Suppl. 1):74-80.)
- [25] HAN Jiawei, ZHAO Chunjiang, YANG Xinting, et. al. Computational modeling of airflow and heat transfer in a vented box during cooling: Optimal package design[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 91:883-893.
- [26] DELETE M A, SCHENK A, TIJSKENS E, et al. Optimization of the humidification of cold stores by pressurized water atomizers based on a multiscale CFD model[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(2):228-239.
- [27] DELETE M A, SCHENK A, RAMON H, et al. Evaluation of a chicory root cold store humidification system using computational fluid dynamics[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 94(1):110-121.

通信作者简介

杨信廷,男,研究员,国家农业信息化工程技术研究中心,(010)51503092, E-mail: yangxt@nrcita.org.cn. 研究方向:农业信息化关键技术。

About the corresponding author

Yang Xinting, male, research professorship, National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, +86 10-51503092, E-mail: yangxt@nrcita.org.cn. Research fields: key technologies of agricultural informatization.

(上接第 79 页)

- [22] 唐志伟,赵化涛,陈志峰. 硬脂酸与 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 混合相变材料储热性能[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(6):809-814. (TANG Zhiwei, ZHAO Huatao, CHEN Zhifeng. Study on mixtures of stearic acid and $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ as heat storage phase-change materials[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(6):809-814.)

通信作者简介

王丽伟,女,教授,上海交通大学制冷与低温工程研究所,(021)34208038, E-mail: lwwang@sjtu.edu.cn. 研究方向:吸附式制冷及其应用。

About the corresponding author

Wang Liwei, female, professor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, +86 21-34208038, E-mail: lwwang@sjtu.edu.cn. Research fields: sorption refrigeration and its application.