

固定床固体吸附除湿系统的性能分析与评价

李 维¹, 陈 欢¹, 陈泽民², 王明志²

(1. 南京工业大学城市建设与安全工程学院, 江苏 南京 210009;

2. 江苏知民通风设备有限公司, 江苏 丹阳 212300)

摘 要: 基于独立除湿的理念, 设计了一种新型的固体吸附床结构形式和一个测试吸附床除湿性能/ 吸附剂除湿性能的系统, 并以两种常见吸附剂活性氧化铝和 4A 分子筛为除湿材料, 测定了活性氧化铝和 4A 分子筛吸附剂及整个吸附床的除湿性能, 在实验数据的基础上, 提出了吸附床及吸附材料除湿性能的评价指标。

关键词: 吸附材料; 吸附除湿; 评价指标

中图分类号: TU831.5

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)05-0649-05

建设部《建筑节能“十五”计划纲要》要求:“加快夏热冬冷和夏热冬暖地区居住建筑节能工作步伐。”夏热冬冷和夏热冬暖地区其显著的气候特征为夏季气温高, 常年湿度大, 需要进行除湿处理以达到人们的舒适度要求^[1-2]。除湿, 是空调的主要任务之一, 也是空调能耗中重要的组成部分, 传统的除湿方式为冷凝除湿, 即将冷冻水温度降到 7℃, 占总负荷一半以上的显热负荷本可以采用高温冷源排走, 却与除湿一起共用 5~7℃的低温冷源进行处理, 造成能源利用品位上的浪费, 而且, 经过冷凝除湿后的空气, 虽然湿度满足要求, 但是温度过低, 需要进行再热处理到送风温度的要求, 造成了能源的进一步浪费。另外, 有冷凝水管道存在, 室内空气品质恶化^[3]。清华大学江亿院士指出, “将排湿和排除污染物的任务与排热的要求分别处理, 应该是未来综合解决热湿环境和空气质量的空调系统应考虑的方式”^[4]。除湿是改善室内热环境的最为有效、节能的措施; 采取合理的除湿方式, 最大可降低的除湿空调能耗可达 50%, 可以明显的减少大气污染物的排放, 利用大气环境质量的控制和改善, 实现室内外环境协调、可持续发展^[5]。现阶段的温湿度独立控制方式主要有溶液除湿、固体吸附除湿和转轮除湿。转轮除湿占地面积小, 结构简单, 但是处理风量小, 而且除湿空气出口温度有所提高。溶液除湿存在吸湿剂的腐蚀问题, 且目前的溶液除湿空调系统性能一般都较低, 冷却水消耗量较大^[6]。而固体吸附除湿以其处理风量大, 适用范围广, 可以通过冷却水使除湿空气温度维持在需要的温度等优势受到关注^[7], 但此种除湿方式却缺乏相应的评价指标来评价吸附床系统及吸附材料的除湿性能。

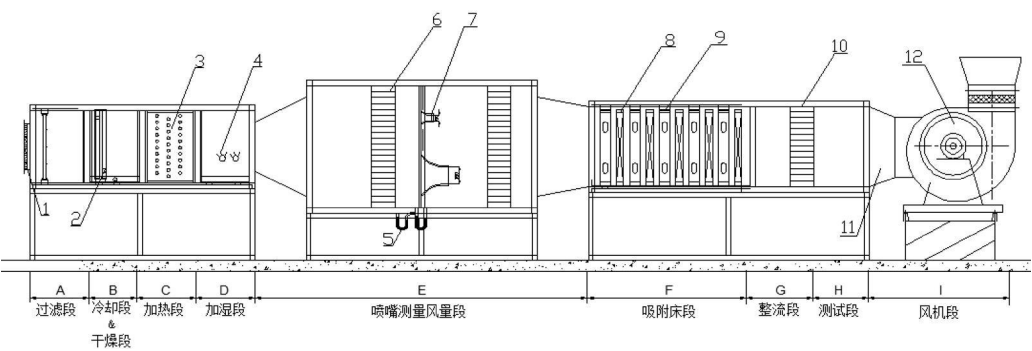
本文设计了一套固体吸附除湿系统, 并以活性氧化铝和 4A 分子筛为吸附剂, 对其在该吸附床结构下的吸附性能进行了实验研究, 根据实验数据提出吸附床及吸附材料除湿性能的评价指标, 用以评价吸附除湿系统及吸附材料的除湿性能。

1 实验系统

系统主要由功能段和吸附段两大部分组成。功能段又为包括: A 过滤段, B 冷却干燥段, C 加热段, D 加湿段, E 风量测试段, G 整流段, H 测试段, I 风机段。系统如图 1 所示。

收稿日期: 2010-11-22 修改稿日期: 2011-07-18

作者简介: 李 维(1963-), 男, 安徽寿县人, 副教授, 主要从事石化装置节能技术的开发与应用研究、建筑与建筑环境设备节能技术、室内空气质量控制与研究。



1. 初效过滤器; 2. 冷却水管; 3. 电加热棒; 4. 电极加湿器; 5. 微差压计; 6. 均流板; 7. 喷嘴; 8. 表冷单元;
9. 吸附单元; 10. 均流板; 11. 帆布软接; 12. 风机

图 1 实验台立面图

Fig. 1 Elevation of experiment system

吸附床段由五个吸附单元和五个表冷单元间隔组成, 如图 2 所示, 五个表冷单元通过管路连成一体, 用以降低吸附床床体内部的温度。

实验时, 通过温湿度变送器、喷嘴、微压差计等仪表, 对吸附床内空气的干球温度、相对湿度、风量、风速和吸附床进出口压降等参数进行测量. 为保证实验数据的准确性和可靠性, 实验中所用的仪表都进行了标定.

2 实验结果分析

本文以活性氧化铝和 4A 分子筛为吸附剂, 分别在如表 1 所示的实验参数下进行了除湿性能的实验研究.

表 1 实验进口空气参数

Tab. 1 Experimental parameters of inlet air

Regeneration process			Cooling process			Adsorption process			
T_1 / $^{\circ}\text{C}$	d_1 / $\text{g}^{\circ}\text{kg(a)}$	V_1 / $\text{m}^3^{\circ}\text{h}^{-1}$	T_2 / $^{\circ}\text{C}$	d_2 / $\text{g}^{\circ}\text{kg(a)}$	V_2 / $\text{m}^3^{\circ}\text{h}^{-1}$	T_{ci} / $^{\circ}\text{C}$	φ_d / $\%$	d_{ci} / $\text{g}^{\circ}\text{kg(a)}$	V_{ci} / $\text{m}^3^{\circ}\text{h}^{-1}$
40	9.6	3 638	15	9.6	3 638	15	75%	9.6	3 638

本文截取实验系统中极具代表性的两个吸附单元: 第 2 个吸附单元和第 5 个吸附单元分析实验系统及除湿材料的除湿性能。

由图 3 可以看出, 吸附单元出口的温度均随时间的增大而增大, 这主要是由于吸附过程产生的吸附热加热了空气; 同时, 第 2 个吸附单元出口的温度均高于第 5 个单元的出口温度, 说明第 3 至 5 吸附单元这一段湿空气与吸附剂之间由于存在温度差而进行热量交换, 导致尽管有部分吸附热的产生, 但总的得热量为负. 可以看出, 本实验中的吸附床结构前部分的吸附效果要优于后半段。

由图 4 可以得出, 活性氧化铝较之 4A 分子筛出口含湿量要大, 但整体来说趋势较平稳, 而 4A 分子筛虽然有除湿效果很好的一段, 但波动幅度比较大. 在空调除湿过程中, 希望得到的空气出口湿度较为平稳。

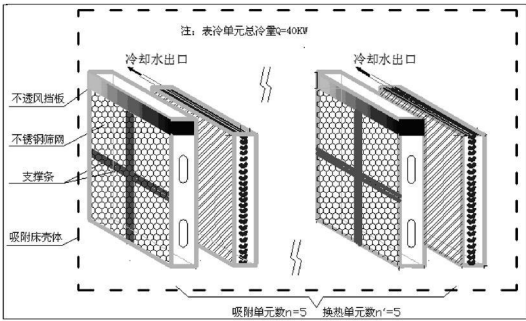


图 2 吸附床内部结构

Fig. 2 The internal structure of adsorbent bed design

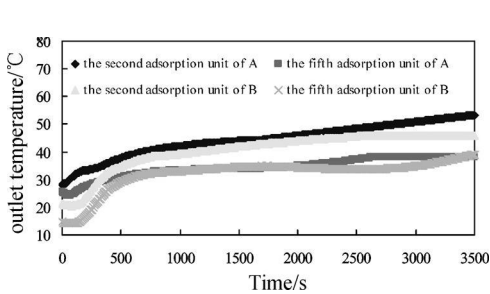


图 3 不同位置出口 温度随时间的变化曲线

Fig. 3 Temperature of outlet air of each adsorption unit at different time

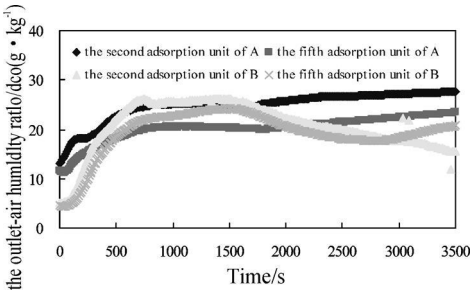


图 4 不同位置出口 含湿量随时间变化曲线

Fig. 4 The outlet-air humidity ratio at different time

从图 5 可以看出,在前 500 s,进出口含湿量之差较大,后面很长一段时间的含湿量之差为负值或者几乎为零,说明了整个床体只有在刚开始的一小段时间内较好发挥了除湿性能,后面很长一段时间由于吸附床内的温度升高,吸附剂的吸附性能减弱,除湿性能差,说明了两者在 3 500 s 的时间内,符合空调除湿要求的吸附时间太少,吸附时间短将意味着吸附阶段与再生阶段的频繁切换,吸附床及吸附剂的寿命将大大缩短。

比较图 6 和图 7 发现,第 2 个单元的吸附量明显高于第 5 个吸附单元,吸附床分层现象较明显,同时,活性氧化铝的吸附量明显高于 4A 分子筛的吸附量。

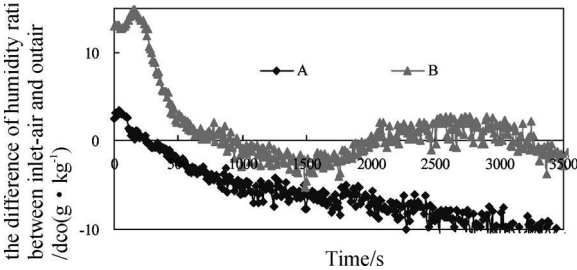


图 5 整个床体进出口 含湿量之差随时间变化曲线

Fig. 5 The difference of humidity ratio between inlet-air at different time

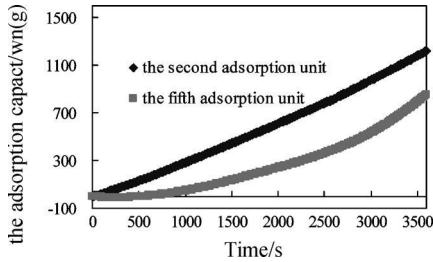


图 6 不同位置吸附 量随时间变化曲线 (活性氧化铝)

Fig. 6 The adsorption capacity of different position at different time(A)

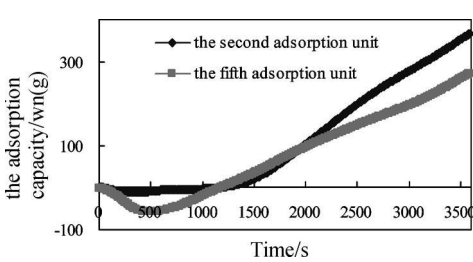


图 7 不同位置吸附 量随时间变化曲线 (4A 分子筛)

Fig. 7 The adsorption capacity of different position at different time(B)

3 评价指标讨论

从上述的实验数据分析可以看出,在空调除湿领域,有必要寻找一些合适的评价指标,综合材料消耗、再生能源消耗等各方面的因素,以体现固体吸附除湿的节能特性.现有的评价指标主要有比除湿效率 SDP 和比能耗 CEC1,在此基础上,本文提出以下三个评价指标。

3.1 再生效率 CRE(Cycle Regeneration Efficiency)

再生效率的高低直接影响到吸附效果的好坏,再生阶段包括加热再生和冷却两个阶段,两个阶段均为下一阶段的吸附做准备.现有的评价指标中比能耗 CEC 为一个循环周期内,再生空气的消耗量与除湿总量的比值,其中再生空气指加热再生和冷却两部分所消耗的空气总量.现定义再生效率 CRE 为

吸附材料在相应床体结构和运行工况下, 单个周期内其再生效果(再生度)与所消耗再生总电能的比值, 这里指的再生总电能, 包括加热再生和冷却过程中所有设备消耗的电能. 再生效率 CRE 的计算公式为:

$$CRE=\frac{\max(w'-w'')}{\sum_{i=1}^n P_i t_i} \tag{1}$$

式中: CRE 为再生效率, $\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{kW} \cdot \text{h})$; P_i 为单个周期内某个设备运行功率, kW ; t_i 为单个周期内某个设备运行时间, h ; n 为设备数量; w', w'' 为某一时刻再生时出口处, 进口处的空气绝对含湿质量分数 (g/kg);

再生效率 CRE 公式是对比能耗 CEC 公式某种程度上的修改, 修改主要出于三点考虑:

第一, 再生能耗分为电耗量和气耗量两部分, 由于考虑到电能是一种高品位的有序能量, 根据热力学第二定律, 电能到低品位能的转化是自发、不可逆的, 而由低品位能向电能转化是有偿的, 因此相比于空气的消耗量而言, 电能的消耗对衡量固体吸附床通风除湿实现的节能效果更有意义. 另外, 由于这里所指的电能消耗中, 是指一个完整循环中所有设备的电耗总量, 也包括了风机的耗电量, 因此也已经将气耗因素考虑进去.

第二, 比能耗 CEC 是对不同的除湿总量进行能耗比较, 但是通过分析实验结果发现, 对于同一种吸附材料, 其吸附能力的大小很大程度上取决于再生效果的好坏. 因此以再生效果(再生度)来代替除湿量, 更具有合理性.

第三, 一般的效率指标都是用收益除以付出, 所以将再生效率表示成再生度与能耗的比值, 可以更直观的表明相应工况条件下再生效率的大小. 再生效率 CRE 越大, 相应工况下消耗同样的再生电耗所达到的再生效果好, 也即除湿效率越高. 在本实验工况下, 以 4A 分子筛为例, 其再生效率为 $0.2 \text{ g}/(\text{kg} \cdot \text{kW} \cdot \text{h})$, 这个值便代表了 4A 分子筛在整个再生过程中的再生效率.

该指标是一个普适性指标, 适用于不同吸附床结构下, 同种材料的再生效率计算, 以预测吸附效果的好坏.

3.2 床层利用率 η

床层利用率 η 定义为吸附效果最优的吸附单元在一个周期内的除湿量与整个吸附床除湿总量的比值, 计算公式为:

$$\eta=\frac{W_{i\max}}{W_{\text{tot}}} \tag{2}$$

式中: η 为床层利用率; $W_{i\max}$ 为单个循环周期内, 吸附量最大的第 i 个吸附单元所吸附的水蒸气量, kg ; W_{tot} 为吸附床一个周期内水蒸气的吸附量, kg .

该指标适用于分层结构明显的分段式吸附床除湿系统, $W_{i\max}$ 代表了固体吸附床结构在传质上的特性, $W_{i\max}$ 越大表明吸附床单个吸附单元的内部结构设计越合理, 而其与吸附床实际除湿量的比值则说明了实际运行工况对于该结构下的吸附效率的影响. 如果 $W_{i\max}$ 很大而 η 很小, 则需要对吸附床的床体温度等工作环境参数做相应的调整.

3.3 床体温度波动比率 RTF (Ratio of Temperature Fluctuation)

定义床体温度波动比率 RTF 为吸附阶段, 湿空气最大温度与最小温度的比值:

$$RTF=\max(|T_{\max}-T_{Ri}|, |T_{\min}-T_{Ri}|) \tag{3}$$

式中: T_{\max}, T_{\min} 为某时刻测得的吸附床内部的最高和最低温度值, $^{\circ}\text{C}$; T_{Ri} 为再生阶段进口空气温度, $^{\circ}\text{C}$.

该指标说明了吸附床的传热性能, 根据实验结果, 温度是影响吸附剂在稳定吸附阶段时吸附能力的重要因素, 并且温度过高或过低都不利于吸附的进行, 床体温度波动比率 RTF 从床体温度和进口再生空气温度之差的较大值表征, 可以很好的反映床体内部温度波动情况, 是实现吸附剂处于最优吸附温度, 达到最佳除湿效果的保证.

4 结 论

从以上分析可以得到:

(1)氧化铝和 4A 分子筛用于固体除湿的效果并不理想, 需要寻找性能更好的、更适合于空调除湿的固体吸附材料。

(2)在此种工况下, 吸附床床层温度波动比率大, 有待调整吸附床结构和运行参数。

(3)固体吸附除湿技术尚缺乏相应的评价指标来评价除湿效率, 再生效率, 还需要进一步完善。

参考文献 References

- [1] GB50176-93 民用建筑热工设计规范[S] . 北京: 中国计划出版社, 1993.
GB50176-93 Civil Building Thermal Design Standard[S] . Beijing: China plans press, 1993.
- [2] JGJ143-2001, 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准[S] . 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
JGJ143-2001, Design standard for energy efficiency of residential buildings in hot summer cold winter zone[S] . Beijing: China architecture & building press, 1996.
- [3] 江 亿. 温湿度独立控制空调系统[M] . 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 3-8.
JIANG Yi. Temperature and humidity control air conditioning system independent[M] . Beijing: China architecture & building press, 2006: 3-8.
- [4] 周根明, 马建民, 路诗奎. 热湿独立处理空调系统的火用分析模型[J] . 制冷与空调, 2008, 22(6): 16-20.
ZHOU Gen-ming, MA Jian-min, LU Shi-kui. The Energy Analysis Model Based on the Temperature and Humidity Independent Control Air-conditioning System[J] . Refrigeration and Air Conditioning, 2008, 22(6): 16-20.
- [5] 李 娟. 改善夏季室内热环境的节能措施[J] . 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2001, 33(4): 365-368.
LI Juan. Effective ways for improving the indoor thermal environment quality[J] . J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2001, 33(4): 365-368.
- [6] 刘 雄, 王春苗, 程立娜. 混合式溶液除湿蒸发冷却空调系统性能优化分析[J] . 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 41(3): 413-419.
LIU Xiong, WANG Chun-miao, Cheng Li-na. Hybrid liquid desiccant evaporative cooling air conditioning system performance optimization analysis[J] . J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2009, 41(3): 413-419.
- [7] 张立志. 除湿技术[M] . 北京: 化学工业出版社, 2005: 251-259.
ZHANG Li-zhi. Dehumidification technology[M] . Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 251-259.

Property analysis and evaluation indexes of solid-adsorption desiccant system

LI Wei¹, CHEN Huan¹, CHEN Ze-min², WANG Ming-zhi²

(1. College of Urban Construction and Safety Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China;

2. Jiangsu Zhimin Ventilation Equipment Co., Ltd, Danyang 212300, China)

Abstract: Based on the concept of independent dehumidification, a system which can test the dehydration property of both the adsorbent bed and the adsorbent has been designed. As adsorbent, the activated alumina and the 4A molecular sieve are used to test the dehydration property of the whole adsorbent bed with two kinds of adsorbent. Finally, three new evaluation indexes about the dehumidification efficiency based on the experimental data are proposed in this paper.

Key words: adsorbent material; solid adsorbent bed; evaluation index; dehumidification