

# 金属填料型吸收式除湿器的除湿性能研究

天津大学 张欢<sup>☆</sup> 李春茹 李博佳

**摘要** 通过理论和实验相结合的方式,对金属填料型吸收式除湿器的除湿性能进行了研究,分析和讨论了空气和溶液的进口状态参数对出口状态参数的影响。依据双膜理论建立了该除湿器的传热传质数学模型,并进行了理论研究。实验测试与模拟计算结果表明,溶液的状态参数对除湿器传热传质的影响较大。实验过程中除湿器运行稳定,具有应用的可行性。

**关键词** 吸收式除湿器 金属填料 传热传质 除湿效率

## Research of dehumidification performance of a metal filler absorbing-type dehumidifier

By Zhang Huan<sup>★</sup>, Li Chunru and Li Bojia

**Abstract** Studies the dehumidification performance of the dehumidifier using theoretical and experimental methods. Analyses and discusses the effects of inlet parameters of air and liquid desiccant on outlet parameters. Establishes the mathematical model of the dehumidifier describing heat and mass transfer process between air and liquid desiccant based on double-film theory and performs theoretical research. The experimental results and numerical simulation results indicate that the effect of inlet parameters of liquid desiccant on heat and mass transfer performance is more obvious than that of the inlet parameters of air. The experiment also approves that the dehumidifier runs steadily and shows good applicability.

**Keywords** absorbing-type dehumidifier, metal filler, heat and mass transfer, dehumidification efficiency

★ Tianjin University, Tianjin, China

①

### 0 引言

湿度是影响居住环境舒适性的一项重要指标。传统机械压缩式制冷空调系统多采用利用高品位电能的冷却除湿方式,随着空调的普及,此类除湿方式极大地增加了城市的电能消耗,给城市电网带来了巨大的压力,同时机械压缩式空调系统用的氟氯烃制冷剂泄漏会造成大气臭氧层的破坏和产生温室效应。针对冷却除湿的这些缺点,新的除湿技术的开发就成为能源与环境领域的一项重要课题。

吸收除湿是采用吸收剂对空气进行除湿,然后利用高温冷源(冷源温度高于室内空气的露点温度,因为冷源不需要负担空气的湿负荷,所以冷源温度可以显著提高到 18~21℃)对除湿后的空气进行等湿冷却。除湿后的稀溶液通过各种低品位热源进行加热再生。这种方式为低品位热源的利用开辟了道路,处理过程可以做到温度、含湿量的

独立控制,显著提高冷源的温度,避免了再热损失,节约了大量能源。同时除湿溶液可以消除空气中的污染物,提高空气质量,是一种节能、绿色的除湿方式,近年来得到了较快的发展<sup>[1]</sup>。

除湿器是溶液除湿系统的主要部件,结合当前研究的主流,考虑到吸收除湿的过程及其在实际应用中的方便、可靠,选用氯化锂作为除湿剂,吸收除湿用的设备采用规整的铝合金斜波纹冲孔金属填料,空气与除湿溶液的接触方式采用叉流式,这样可以方便地将除湿器与组合式空调机组进行连接,风道的布置更容易、占用空间小,多个装置很容易

①☆ 张欢,女,1960年12月生,工学博士,副教授  
300072 天津大学环境科学与工程学院  
(022) 27400832  
E-mail: zhuan@tju.edu.cn  
收稿日期:2009-03-02  
修回日期:2009-08-05

结合起来,应用方便,还可以增加除湿的级数,实现多级吸收除湿。

图 1 是金属填料型吸收式除湿器的设备示意图。将金属填料放入风道中,除湿溶液经由溶液泵从储液罐中抽出,从顶部进入除湿器,经布液器后均匀分布在金属填料上,除湿后的稀溶液从下部依靠重力自由流出,利用管道引去加热再生;待处理空气从金属填料一侧进入,在填料中与除湿溶液进行热质交换,从金属填料的另一侧流出,进入下一个降温的处理过程。以下对该金属填料型吸收式除湿器的除湿性能进行研究。

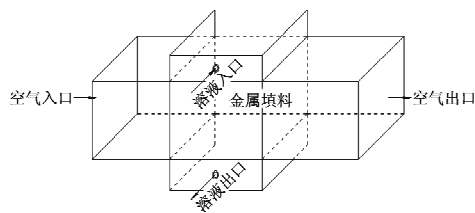


图 1 金属填料型吸收式除湿器的设备示意图

## 1 吸收除湿过程数学模型的建立

### 1.1 物理模型的建立

在建立交叉流除湿填料中热湿交换的理论模型前作如下的假设,这些假设对溶液与空气之间的热湿交换的最终计算结果没有明显的影响<sup>[2]</sup>。

1) 填料层发生的热质交换过程与外界是绝热绝湿的;

2) 填料层由高吸湿性材料构成,填料能被充分地浸润,传热和传质的面积相同;

3) 填料表面的液膜很薄,加之填料表面的不规则通道对液膜的扰动性很强,因而可以认为传热传质阻力主要取决于气相,液相阻力可以忽略;

4) 沿两流体流动的方向无导热和质扩散;

$$Gdy \cdot 1 \text{ m} \cdot \frac{\partial h_a}{\partial x} dx - Ldx \cdot 1 \text{ m} \cdot h_1 + \left( L + \frac{\partial L}{\partial y} dy \right) \left( h_1 + \frac{\partial h_1}{\partial y} dy \right) dx \cdot 1 \text{ m} = 0 \quad (2)$$

将式(1),(2)化简并将溶液比焓计算式  $h_1 = c_{pl}t_1$  (其中  $c_{pl}$  为除湿溶液的比定压热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ) 代入得

$$G \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial L}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$G \frac{\partial h_a}{\partial x} = -Lc_{pl} \frac{\partial t_1}{\partial y} - c_{pl}t_1 \frac{\partial L}{\partial y} \quad (4)$$

控制体内空气与溶液的显热、全热交换方程为

$$Gdy \cdot 1 \text{ m} \cdot c_{pm} \frac{\partial t_a}{\partial x} dx = \alpha_c (t_1 - t_a) A dx dy \cdot 1 \text{ m} \quad (5)$$

5) 忽略除湿溶液的溶解热;

6) 除湿溶液在横向能够充分混合,其参数仅沿其流动方向变化;

7) 空气在横向能够充分混合,其参数仅沿其流动方向变化。

### 1.2 控制体方程的建立

沿填料宽度方向无传热传质,这就成为一个二维传热传质问题<sup>[3]</sup>。取整体金属填料中的一个微元体来分析溶液与空气之间的热质交换过程。填料中取体积为  $dx \times dy \times 1 \text{ m}$  的微元体,其进出口参数如图 2 所示( $dz$  方向微元体的尺寸为  $1 \text{ m}$ )。图中  $L$  为溶液的喷淋密度,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $h_1$  为溶液的比焓,  $\text{kJ}/\text{kg}$ ;  $t_1$  为溶液的温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $G$  为空气的质量流量,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $t_a$  为空气的温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $W$  为空气的含湿量,  $\text{kg}/\text{kg}$ ;  $h_a$  为空气的比焓,  $\text{kJ}/\text{kg}$ 。流进、流出控制体的干空气质量流量不变,且流进、流出的流体的动能和位能差及控制体中流体的动能和位能的变化可忽略不计。根据质量守恒、能量守恒和传热传质方程式,并利用以上假设条件,在该微元体上可以建立以下的微分方程。

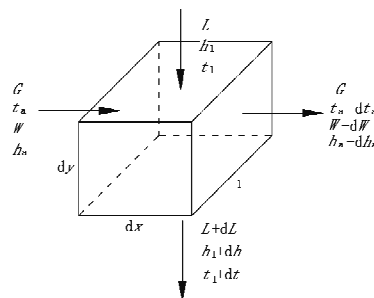


图 2 用于建立质量、能量守恒方程的微元体

控制体内质量与热量平衡方程为

$$Gdy \cdot 1 \text{ m} \cdot \frac{\partial W}{\partial x} dx + \frac{\partial L}{\partial y} dx \cdot 1 \text{ m} \cdot dy = 0 \quad (1)$$

$$G \frac{\partial h_a}{\partial x} dx = Gc_{pm} \frac{\partial t_a}{\partial x} dx + rG \frac{\partial W}{\partial x} dx \quad (6)$$

式(5),(6)中  $c_{pm}$  为湿空气的比定压热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\alpha_c$  为表面传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $A$  为填料的比表面积,  $\text{m}^2/\text{m}^3$ ;  $r$  为水的汽化潜热,  $\text{kJ}/\text{kg}$ 。

引入传质系数  $\alpha_D$ , 全热交换方程可化简为

$$G \frac{\partial h_a}{\partial x} = \alpha_D A \left[ h_s - h_a - \left( 1 - \frac{\alpha_c}{\alpha_D c_{pm}} \right) c_{pm} (t_1 - t_a) \right] \quad (7)$$

式中  $h_s$  为饱和水蒸气的比焓, kJ/kg。

本文建立模型时考虑了因空气中水蒸气凝结而引起的除湿溶液的质量变化, 摒弃了将路易斯数  $Le$  简化为 1 的处理方法, 取其值为 0.9, 当  $Le \neq 1$  时有

$$\frac{\alpha_c}{\alpha_D} = c_{pm} Le^{\frac{2}{3}} \quad (8)$$

由于填料中的传热传质过程与横流式冷却塔内的传热传质机理类似<sup>[4]</sup>, 因此表面传热系数  $\alpha_c$  取决于空气质量流量  $G$ 、溶液的喷淋密度  $L$ 、溶液质量分数  $\xi$ 。

$$\alpha_c = A_1 G^{A_2} L^{A_3} \xi^{A_4} \quad (9)$$

式中  $A_1 \sim A_4$  为系数。

边界条件的确定:

$$\left. \begin{aligned} x=0: t_a &= t_{ai}, h_a = h_{ai}, W = W_i \\ y=0: t_l &= t_{li}, L = L_i, \xi = \xi_i \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中  $t_{ai}$  为空气入口干球温度, °C;  $h_{ai}$  为空气入口的比焓, kJ/kg;  $W_i$  为空气入口的含湿量, kg/kg;  $t_{li}$  为溶液入口温度, °C;  $L_i$  为溶液入口质量流量, kg/(m<sup>2</sup>·s);  $\xi_i$  为溶液入口的质量分数。

笔者采用 Visual Fortran 语言编写了金属填料表面除湿溶液与空气热湿交换过程的计算程序。限于篇幅, 离散过程及程序计算过程不再详述。本文中差分方程的步长选为 10 mm。

## 2 实验测试

### 2.1 实验装置

该实验装置可分为空气系统和溶液系统。实验装置的主要部件有调速风机、空气加热器、超声波加湿器、溶液槽、溶液泵、除湿塔、加热再生箱、控制阀等, 并配有测量干球温度、湿球温度、空气流量、溶液

流量、溶液质量分数等的仪表。图 3 为金属填料型吸收式除湿器除湿性能测试的实验系统示意图。

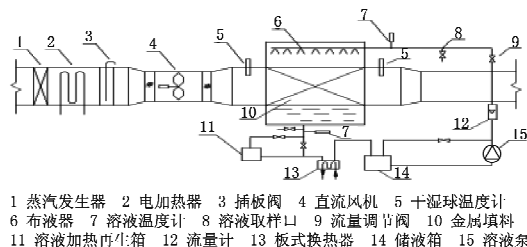


图 3 金属填料型吸收式除湿器除湿性能测试的实验系统示意图

### 2.2 除湿溶液和填料的选择

本实验中主要测定该金属填料型吸收式除湿器的除湿性能, 因此需选用一种除湿性能较好、再生容易的除湿溶液。选择除湿溶液时主要考虑的是除湿的效果。在参考前人除湿溶液研究的基础上, 经过综合考虑选用氯化锂溶液进行实验。

本实验中金属填料的几何尺寸为 420 mm × 400 mm × 400 mm, 填料的比表面积为 500 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>; 布液器是采用机器在厚度为 5 mm 的塑料板上均匀打孔制成, 孔径为 2 mm, 孔距为 20 mm。

在以下参数范围内进行该除湿器除湿性能的实验测试: 空气质量流量 0.7~1.75 kg/(m<sup>2</sup>·s); 空气干球温度 30~35 °C, 相对湿度 70%~85%; 溶液温度 23~36 °C; 溶液质量分数 15%~25%; 溶液质量流量 1.28~2.58 kg/(m<sup>2</sup>·s); 气液流量比 0.4~0.96。

## 3 实验与模拟计算结果的对比分析

当某一参数改变时被处理空气的温湿度变化趋势与模型计算值的比较见图 4~9。

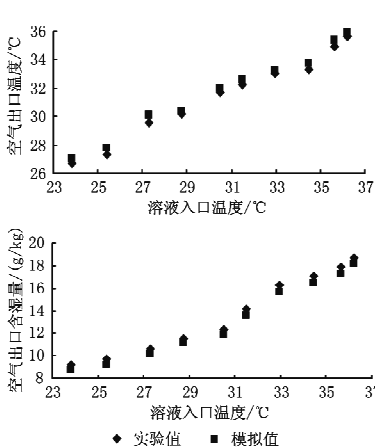


图 4 除湿器在不同溶液入口温度下的比较结果

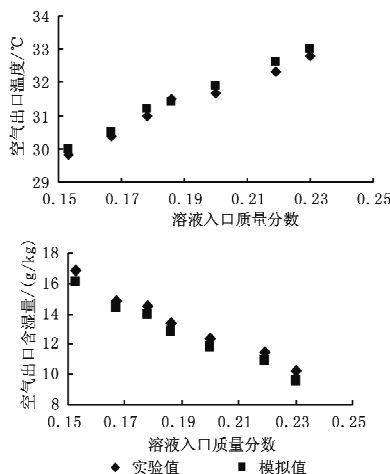


图 5 除湿器在不同溶液入口质量分数下的比较结果

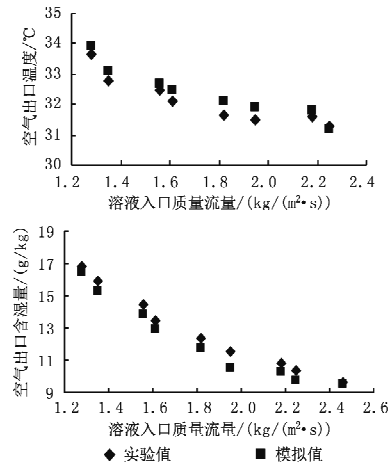


图 6 除湿器在不同溶液入口质量流量下的比较结果

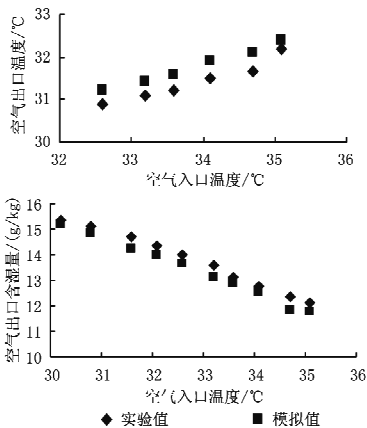


图 7 除湿器在不同空气入口温度下的比较结果

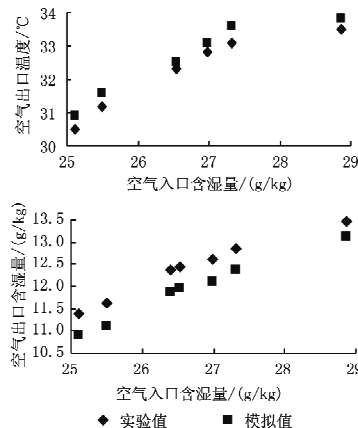


图 8 除湿器在不同空气入口含湿量下的比较结果

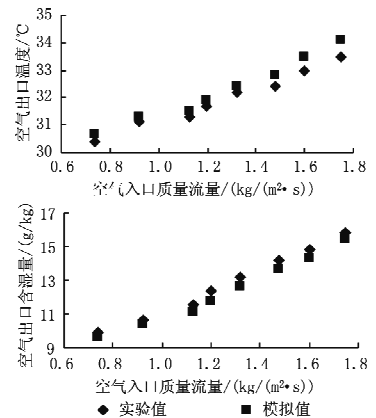


图 9 除湿器在不同空气入口质量流量下的比较结果

由图 4~9 可以看出,实验值和理论值吻合较好。空气除湿后的出口温度在各工况下都与溶液的入口温度非常接近,这说明实际运行中空气的出口温度主要受溶液入口温度的影响。另外,溶液入口温度和入口质量分数是影响空气出口含湿量的两个主要参数,其他各参数对空气出口工况的影响都比较小。溶液入口温度越低,入口质量分数越高,除湿性能越好。推动除湿的动力是被处理空气的水蒸气分压力与溶液的表面蒸汽压之间的差值,这个差值越大,除湿能力越强;而除湿溶液表面蒸汽压越小,在相同的处理条件下,除湿溶液的除湿能力越强。

#### 4 吸收式除湿器除湿性能的评价

除湿效率  $\eta$  可用式(11)计算,将其作为金属填

料型吸收式除湿器除湿性能的评价指标。

$$\eta = \frac{W_i - W_o}{W_i - W_e} \times 100\% \quad (11)$$

$$W_e = 622 \frac{p_s}{B - p_s} \quad (12)$$

式(11),(12)中  $W_o$  为空气出口的含湿量, g/kg;  $W_e$  为与除湿溶液状态等效的湿空气的含湿量, g/kg;  $p_s$  为溶液表面蒸汽压,是溶液温度与质量分数的函数,随着溶液温度的降低、溶液浓度的升高而降低, Pa;  $B$  为大气压力, Pa。

图 10~15 给出了改变溶液入口、空气入口 6 个参数中的 1 个参数后除湿效率随其变化的拟合曲线。

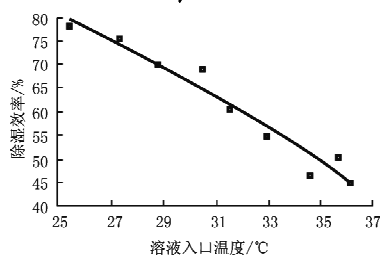


图 10 溶液入口温度对除湿效率的影响

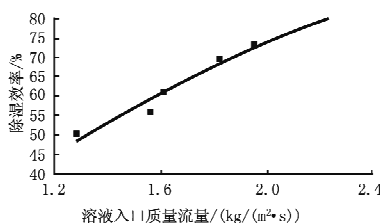


图 11 溶液入口流量对除湿效率的影响

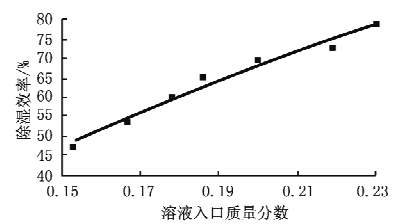


图 12 溶液入口质量分数对除湿效率的影响

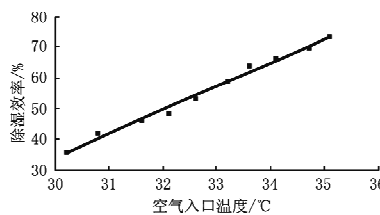


图 13 空气入口温度对除湿效率的影响

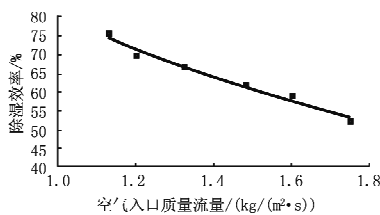


图 14 空气入口流量对除湿效率的影响

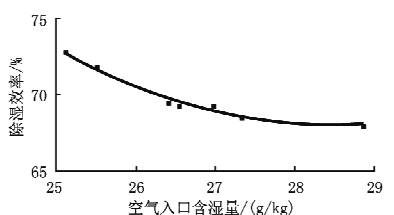


图 15 空气入口含湿量对除湿效率的影响

图 10~12 描述的是除湿溶液入口参数的改变对金属填料型吸收式除湿器除湿效率的影响。从

中可以看出,随着溶液温度的升高,除湿效率降低,因为随着溶液温度的升高,除湿溶液的表面蒸汽压

随之升高,造成空气中水蒸气的分压力与除湿溶液表面蒸汽压之差减小,这个压力差正是吸收除湿的推动力,所以就造成除湿能力下降,除湿效率降低。随着除湿溶液流量增加,空气与溶液的接触时间更长,除湿量更大,所以除湿效率提高。溶液浓度的改变也会对溶液表面蒸汽压产生影响,随除湿溶液质量分数的增加,溶液表面蒸汽压降低,气液两侧的蒸汽压力差增大,增大了传质的推动力,因而除湿量增加,除湿效率提高。

图 13~15 描述的是空气入口参数的改变对金属填料型吸收式除湿器除湿效率的影响。空气温度升高,增强了气液间的换热作用,造成除湿量增加,除湿效率提高。空气流量和含湿量的增加都弱化了除湿的效果,因为在溶液量固定的情况下,空气流量增加,单位空气中除掉的水分就会减少,除湿效率下降;在空气含湿量增加的情况下,空气中饱和水蒸气的分压力增大,由空气到溶液的传质过程得到了强化,同时由于入口空气含湿量的不断增加,尽管更多的水分被除湿溶液吸收了,但是除湿量的增加没有空气含湿量增加得快,所以除湿效率仍是下降的。

综上所述,除湿溶液状态参数的改变使除湿效率的改变幅度较大,空气状态参数的改变使除湿效率的改变幅度较小,说明除湿溶液的状态参数对空气出口参数的影响较大。

## 5 结论

5.1 吸收除湿是采用除湿溶液对空气进行除湿,可以做到温度、含湿量的独立控制,达到较好的节能效果;除湿溶液可利用低品位热能进行再生;由于空气直接同除湿溶液接触,除湿溶液具有杀菌作用,可净化空气;同时吸收除湿还具有减少高品位

电能的消耗,减少氟利昂消耗,节能环保、结构简单、运行稳定、安全可靠等优点。

5.2 除湿器模拟计算结果显示,出口空气含湿量随入口空气含湿量、空气质量流量和溶液温度的增大而增大,随入口空气温度、溶液质量分数和溶液质量流量的增大而减小;出口空气温度随入口空气温度、含湿量、空气质量流量和溶液质量分数、温度的增大而升高,随入口溶液质量流量的增大而降低。改变溶液入口的状态参数对空气出口参数影响较大,改变空气入口参数对空气出口参数的影响较小,说明溶液的状态参数对传热传质的影响较大。

5.3 除湿器实验测试结果与模拟计算结果表明,在实验测试的气液流量比(0.4~0.96)及其他参数的范围内,计算除湿效率在 40%~87%之间;当溶液温度为 30.4℃、溶液入口质量分数为 0.2、溶液质量流量为 2.58 kg/(m<sup>2</sup>·s)、空气质量流量为 1.2 kg/(m<sup>2</sup>·s)、空气干球温度为 34.9℃、空气含湿量为 25.92 g/kg 时,气液流量比为 0.46,除湿效率达到最大值 87%。

5.4 实验过程中该除湿器运行稳定,具有应用的可行性。

## 参考文献:

- [1] 徐学利,张立志,朱东生. 吸收除湿研究与进展[J]. 暖通空调,2004,34(7):22-25
- [2] 路则锋,陈沛霖,张旭. 填料式吸收除湿系统传递过程理论解及验证[J]. 同济大学学报,2001,29(2):149-153
- [3] 马福多. 金属填料型吸收式除湿器的除湿性能研究[D]. 天津:天津大学,2007
- [4] 杜鹃,武俊梅,黄翔. 直接蒸发冷却空调机与冷却塔内部传热、传质过程的类比分析[J]. 制冷与空调,2003,3(1):11-14
- [5] 吴志湘,黄翔,兰治科,等. 干工况风机盘管-半集中式蒸发冷却空调系统[J]. 西安工程大学学报,2008,22(2):182-186
- [6] 辛军哲,周孝清,何澄明. 直接蒸发冷却式空调系统的适用室外气象条件[J]. 暖通空调,2008,38(1):52-53
- [7] 由世俊. 空调用金属填料传热传质性能的实验研究与相关理论研究[D]. 天津:天津大学,2003
- [8] 张欢,由世俊,马德刚. 空调机组用填料型洗涤式空气过滤器的实验研究[J]. 流体机械,2004,32(4):48-50
- [9] 王一飞. 洗涤式金属填料空气过滤器应用于化纤油剂去除的试验研究[D]. 天津:天津大学,2006

(上接第 27 页)

多问题需要进行深入、细致的研究,需根据实际情况选择应用。

## 参考文献:

- [1] 郑爱平,张俊礼. 太阳能供暖与蒸发冷却技术适用性分析[J]. 长安大学学报,2003,20(3):50-53
- [2] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 2 版. 北京:中国建筑工业出版社,2008
- [3] 张登春,陈焕新. 蒸发冷却技术在我国干燥地区的应用研究[J]. 建筑热能通风空调,2001,20(3):12-14
- [4] 徐方成,黄翔,武俊梅. 与蒸发冷却复合的三种除湿空调系统对比分析[J]. 建筑热能通风空调,2008,27(6):47-49,59