

溶液除湿系统中再生子系统的运行参数分析

涂 敏¹, 刘泽华^{1*}, 汤广发², 任承钦³

(1.南华大学 土木工程学院,湖南 衡阳 421001;2.湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082;
3.湖南大学 机械与运载工程学院,湖南,长沙,410082)

摘 要:溶液除湿系统在生产和生活中已得到广泛应用,提高溶液除湿系统节能优势的关键措施之一是提高其再生子系统的效率.本文采用已得到实验验证的填料塔模型和逆流换热器模型,分别描述再生塔中溶液—空气传热传质过程和空气—空气换热器中逆流换热过程,然后用正交设计法安排数值实验.通过对实验结果的方差分析,确定了各运行参数及它们之间的交互作用的相对重要性.方差分析结果表明:以再生塔内水份蒸发速率作实验指标时,重要参数包括溶液入口温度和浓度、干空气与溶质之间的质量流量比率、再生空气入口温度;以再生塔再生效率作实验指标时,干空气与溶质之间的质量流量比率以及溶液入口温度是重要参数;参数之间的交互作用对再生塔内水份蒸发速率和再生效率都没有重要的影响.

关键词:溶液除湿;再生子系统;正交设计;方差分析;参数分析

中图分类号:TU 834.9 **文献标志码:**A

Analysis on Parameters of Regeneration Subsystem in Liquid Desiccant Dehumidification Systems

TU Min¹, LIU Ze-hua^{1*}, TANG Guang-fa², REN Cheng-qin³

(1.School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;
2.College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China; 3.College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: The liquid desiccant dehumidification system has been widely used in industries and lives, And one of the key measures to improve the energy saving advantages of liquid desiccant system is to increase the efficiency of the regeneration sub-system. In this study, models for the regeneration tower and counter-current heat exchanger, which are recognized by previous experiments, are employed and the corresponding VC++ computer program

收稿日期:2017-11-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51708272;11275093)

作者简介:涂 敏(1982-),男,讲师,博士,主要从事于溶液除湿与辐射供冷方面的研究.E-mail:tu_iron_min@163.com.通讯作者:刘泽华,E-mail:lzh_1966@126.com

modules are used to describe the heat and mass transfer processes between the liquid desiccant solution and moist air in the regenerator and the heat transfer process in heat exchanger respectively. The orthogonal design is used to arrange the numerical experiment. The results are analyzed by the method of variance analysis to determine the relative significance of operating parameters and the interactions between them. The analysis on the influence factors shows that for the evaporation rate of water vapor in the regenerator, the important parameters are the inlet temperature and concentration of the solution, the mass flow ratio of dry air to dehydrated desiccant, and the inlet temperature of air. For the regeneration efficiency, the mass flow ratio of dry air to dehydrated desiccant and the inlet temperature of solution are important parameters. There is no interaction that influences the evaporation rate of water vapor and the regeneration efficiency significantly.

key words: liquid desiccant dehumidification; regeneration subsystem; orthogonal design; variance analysis; parametric analysis

0 引言

除湿系统在工农业生产和人民生活中应用相当广泛.每年有大量的能源被用来对工农业生产中的原材料、最终产品等进行除湿^[1].同时,除湿对于保证工作生活环境的健康、舒适也非常重要.由于溶液除湿剂对水蒸气的高亲和力,溶液除湿系统能够直接除去湿空气中的水份,而不用像常规空调系统那样得将空气降到其露点温度以下.因此,溶液除湿系统的应用可以极大的减少能量的消耗.

从最早提出溶液除湿系统的 Lof^[2],溶液除湿技术经过了长期的发展.要提高溶液除湿系统相比常规除湿系统的优势,关键措施之一在于提高其再生子系统的效率.目前,溶液除湿技术中研究最广泛的是填料塔型再生塔^[3-7],另外还有内部加热型再生器^[8-9],太阳能集热/再生器^[10-12],多孔材料型再生器^[13],以上这些文献研究了各种系统参数对再生器性能的影响.这些系统参数包括系统运行参数(稀溶液入口温度、浓度、流量、再生空气入口温度、含湿量流量等)和系统结构参数(填料高度、集热器/再生器长度等).研究者分析的因素很多,然而没有明确归纳出哪些参数是最重要影响出风含湿量的参数,哪些参数最能影响除湿设备的除湿效率,以及这些参数之间是否存在交互作用等.

本文采用文献[14]提出的已经得到实验验证的填料塔一维耦合传热传质模型以及文献[15]中的逆流换热器模型,分别描述再生塔中溶液—空气传热传质过程和空气—空气换热器中逆

流换热过程.在用正交设计方法安排数值实验后,对所得的数据进行方差分析,由此来考察各影响因素的重要程度以及它们之间是否存在交互作用.以上这些工作可以为后续研究者进一步理清关于除湿系统中再生子系统的研究思路,并有助于他们在其实验研究或模拟研究中突破重点.

1 再生子系统模型

1.1 填料塔模型

再生子系统如图 1 所示.再生子系统中再生塔模型采用文献[14]提出的一维耦合传热传质控制方程描述,其微元部分上的热、质交换过程示意图 2 所示.

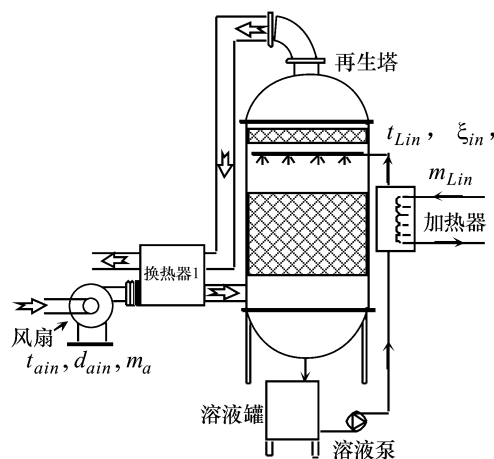


图 1 再生系统图

Fig.1 Schematic of regeneration-system

将文献[14]中的方程(2),(11)~(14)进行参数处理可以得到如文献[16]中方程(1)~(5)

所示的填料塔热、质交换过程的控制方程,这些控制方程如式(1)所示:

$$dd_a = (d_a - d_{eL})(1/Le)dNTU_{Reg} \quad (1)$$

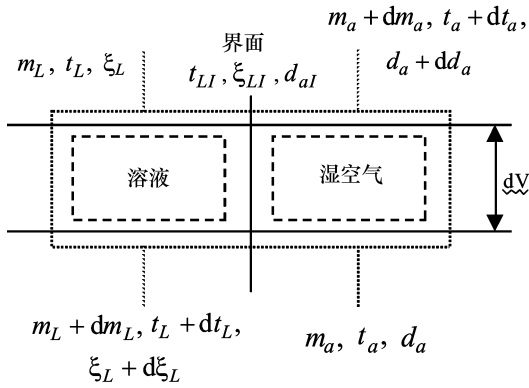


图2 再生塔中微元断面热、质交换过程示意图

Fig.2 Schematic of heat and mass transfer process in a small section of the dehumidification tower

其中, d_a 分别表示湿空气的含湿量, $\text{kg}/(\text{kg}$ 干空气); d_{eL} 表示与溶液处于平衡状态下的湿空气含湿量, $\text{kg}/(\text{kg}$ 干空气); Le 为刘易斯数; NTU_{Reg} 表示再生塔的换热单元数。

$$d\xi = 1.608(d_a - d_{eL}) \times \frac{R_m \xi^2}{Le[(2R_{dw}^2 - 2R_{dw})\xi - 2R_{dw}^2 + R_{dw}]} dNTU_{Reg} \quad (2)$$

其中, ξ 表示溶液质量浓度, %; R_m 为干空气与溶质之间的摩尔流量之比, $R_m = (m_a M_d)/(m_d M_a)$; m_a, m_d 分别表示空气与溶质的质量流量, kg/s ; M_a, M_d 分别表示空气与溶质的分子量, kg/kmol ; R_{dw} 为溶质与水的分子量之比, $R_{dw} = M_d/M_w$; M_w 为水的分子量, kg/kmol 。

$$dt_a = (t_a - t_L) \frac{Le - 1.608R_{va}(d_a - d_{eL})}{Le(1 + 1.608d_a R_{va})} dNTU_{Reg} \quad (3)$$

其中, t_a 表示空气温度, $^{\circ}\text{C}$; t_L 表示溶液温度, $^{\circ}\text{C}$; R_{va} 表示水与干空气之间的摩尔定压比热之比, $R_{va} = (M_w C_{pv})/(M_a C_{pa})$; C_{pa}, C_{pv} 分别表示干空气与水蒸气的定压比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

$$dt_L = C^* [(t_a - t_L) + 1.608(\tilde{h}_s/Le)(d_a - d_{eL})] dNTU_{Reg} \quad (4)$$

其中, C^* 为空气与溶液之间的热容量比; $\tilde{h}_s$ 为标淮化的吸收热, $\tilde{h}_s = (M_w h_s)/(M_a C_{pa})$, $^{\circ}\text{C}$; h_s 为

吸收热, kJ/kg 。

$$dm_L = -m_a dd_a \quad (5)$$

其中, m_L 为溶液的质量流量, kg/s 。

控制方程组(1)~(5)的边界条件为:

$$NTU_{Reg} = NTU_0, t_L = t_{Lin}, \xi = \xi_{in}, m_L = m_{Lin}$$

$$NTU_{Reg} = NTU_n, t_a = t_{ain}, d_a = d_{ain}$$

其中, NTU_0 表示从塔顶开始积分的换热单元数(此时 $NTU_0=0$), NTU_n 表示从塔顶到塔底的换热单元数; $t_{Lin}, \xi_{in}, m_{Lin}$ 表示从塔顶进入填料塔的溶液的温度、质量浓度、质量流量; t_{ain}, d_{ain} 表示从塔底进入填料塔的空气的温度、含湿量, 下标“in”表示入口参数。

1.2 换热器模型

再生子系统中还用到空气—空气换热器。由于如图1所示的换热器 HE1 中冷、热流体流动方向均为逆流, 所以能够用 $\varepsilon - NTU$ 方法方便的计算冷、热流体各自的出口温度。应用 $\varepsilon - NTU$ 方法的具体步骤为: 首先, 定义该逆流换热器的换热单元数 (NTU_{HE}); 然后比较热、冷两种流体的热容量 $m_h C_h$ 和 $m_c C_c$ 的大小, 较大的一项为 $(mC)_{\max}$, 较小的为 $(mC)_{\min}$ 。从文献[15]可以得到以下换热器的效率公式:

$$\varepsilon_{HE} = \frac{1 - \exp\{(-NTU_{HE})[1 - \frac{(mC)_{\min}}{(mC)_{\max}}]\}}{1 - \frac{(mC)_{\min}}{(mC)_{\max}} \exp\{(-NTU_{HE})[1 - \frac{(mC)_{\min}}{(mC)_{\max}}]\}} \quad (6)$$

式中, ε_{HE} 为换热器的换热效率。

换热过程总的换热量为:

$$Q_{HE} = \varepsilon_{HE} (mC)_{\min} (t_{hin} - t_{cin}) \quad (7)$$

式中, t_{cin} 和 t_{hin} 分别表示冷、热两种流体的入口温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

热流体的出口温度为:

$$t_{hout} = t_{hin} - \frac{Q_{HE}}{m_h C_h} \quad (8)$$

冷流体出口温度为:

$$t_{cout} = t_{cin} + \frac{Q_{HE}}{m_c C_c} \quad (9)$$

在文献[16]的研究中, 填料塔模型和逆流的空气—空气换热器模型均已经成功的用 VC++ 语言程序模拟模块描述。本文仍然用这些模拟程序研究几个相关因素对再生子系统的性能影响。

2 实验指标和实验方法

2.1 实验指标

参考相关文献[3, 8], 本文将再生子系统的

实验指标定为再生塔内水份蒸发速率 m_{evap} 和再生塔再生效率 ε_{Reg} , 它们的定义式分别如下所示:

$$m_{\text{evap}} = (d_{\text{aout}} - d_{\text{ain}}) m_a \quad (10)$$

式中, d_{aout} , d_{ain} 分别表示再生塔出口与入口空气含湿量, kg/(kg 干空气).

$$\varepsilon_{\text{Reg}} = \frac{d_{\text{aout}} - d_{\text{ain}}}{d_{\text{eLin}} - d_{\text{ain}}} \quad (11)$$

式(11)中, d_{eLin} 表示与入口溶液处于平衡状态的湿空气含湿量, kg/(kg 干空气).

2.2 实验设计与分析方法

文中进行数值实验时, 先用正交设计实验方法安排实验的实施, 然后用方差分析方法分析实验结果, 判断各影响因素的重要程度.

正交实验设计方法是研究多因素、多水平实验的优化实验设计方法. 为了解决多因素全面实验次数过多, 条件难以控制的问题, 可从全面实验的处理组合中挑选出部分有代表性的处理组合进行实验, 这些代表性处理组合可以通过正交表来确定. 关于正交设计方法的详细阐述见文献[17]. 方差分析是用来判断因素的水平间是否存在显著差异的统计方法. 一个复杂的事物, 其中往往有许

多因素相互制约又相互依存. 方差分析的目的是通过数据分析找出对该事物有显著影响的因素, 各因素之间的交互作用, 以及显著影响的最佳水平等, 关于方差分析方法的阐述详见文献[18].

3 参数分析

3.1 因素筛选

对本文提出的再生子系统进行分析后, 可以初步选定 t_{Lin} (稀溶液入口温度), ξ_{Lin} (稀溶液入口质量浓度), t_{ain} (空气入口温度), d_{ain} (空气入口含湿量), m_{ain}/m_d (空气与溶质的质量流量之比), 这五个运行参数. 在对这些运行参数(因素)进行筛选过程中, 因所考察的因素数目较多, 为了减少实验次数, 每个因素只取二个水平. 按照因素二水平选取原则, 其中一个水平取在中心位置, 而另外一个水平选择靠近边界位置, 这样才能正确识别因素对实验指标是否有显著影响. 中心位置是根据现有的专业知识和经验认为的最佳取值. 本文研究的再生子系统中五个影响因素以及各因素的水平均如表 1 所示.

表 1 因素水平分布

Table 1 The values of the two levels for the seven influence factors

水平	因素				
	$t_{\text{Lin}} / ^\circ\text{C}$	ξ_{Lin} (wt% salt)	$t_{\text{ain}} / ^\circ\text{C}$	$d_{\text{ain}} / (\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$m_{\text{ain}}/m_d / (\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$
1	50	32 0.833 501	26.0	0.012 79	1.185
2	70	38 0.793 544	30.5	0.016 72	2.843

正交表 $L_8(2^7)$ 被用来安排正交数值实验, 然后运用已经编制好的模拟程序进行数值实验. 为

后续分析方便, 实验的安排和所得实验结果均列在表 2 中.

表 2 实验的安排与实验结果

Table 2 Arrangement of the orthogonal experiment with $L_8(2^7)$ and the experiment results

	1	2	3	4	5	6	7	实验结果	
	t_{Lin}	ξ_{Lin}	t_{ain}	d_{ain}	m_a/m_d			m_{evap}	ε_{Reg}
1	1(50)	1(32%)	1(26.0)	1(0.012 79)	1(1.185)	1	1	0.005 7	0.843 3
2	1(50)	1(32%)	1(26.0)	2(0.016 72)	2(2.843)	2	2	0.008 2	0.635 4
3	1(50)	2(38%)	2(30.5)	1(0.012 79)	1(1.185)	2	2	0.002 7	0.847 4
4	1(50)	2(38%)	2(30.5)	2(0.016 72)	2(2.843)	1	1	0.001 9	0.5429
5	2(70)	1(32%)	2(30.5)	1(0.012 79)	2(2.843)	1	2	0.030 9	0.449 4
6	2(70)	1(32%)	2(30.5)	2(0.016 72)	1(1.185)	2	1	0.018 8	0.690 3
7	2(70)	2(38%)	1(26.0)	1(0.012 79)	2(2.843)	2	1	0.023 0	0.470 1
8	2(70)	2(38%)	1(26.0)	2(0.016 72)	1(1.185)	1	2	0.013 4	0.719 0

对实验数据作方差分析, 可以得到用来判断各

因素水平间是否存在显著差异的指标(P 值). P 值

是一个概率值,表示一个因素各水平有显著差异时犯错误的概率. P 值越小就可以认为该因素越重要,反之 P 值越大就表示这个因素越不重要. P 值与因素重要程度关系如下:当 $0 \leq P \leq 0.01$,表示该因素高度显著,非常重要;当 $0.01 < P \leq 0.05$,表示该因素显著,是重要因素; $0.05 < P \leq 0.2$ 时,该因素显著性很弱,对实验结果有弱影响;而 $0.2 < P \leq 1$ 时,该因素不显著,对实验结果没有影响.

利用统计学分析软件 SPSS,对表 1 中所示的再生塔内水份蒸发速率 m_{evap} ,再生塔再生效率 ε_{Reg} 的实验结果进行方差分析,可以得出关于 t_{Lin} , ξ_{Lin} , t_{ain} , d_{ain} , m_a/m_d 等五个因素的方差分析结果,分别如表 3,表 4 所示.

表 3 以再生塔内水份蒸发速率作为实验指标时的方差分析表

Table 3 The variance analysis table when the water evaporation rate of the regeneration tower is regarded as the experimental index

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值
总计	7	7.58E-04	1.08E-04		
误差	2	4.24E-06	2.12E-06		
t_{Lin}	1	5.70E-04	5.70E-04	268.926 1	0.003 7
ξ_{Lin}	1	6.33E-05	6.33E-05	29.863 1	0.031 9
t_{ain}	1	1.90E-06	1.90E-06	0.895 8	0.443 8
d_{ain}	1	5.04E-05	5.04E-05	23.790 6	0.039 6
m_a/m_d	1	6.80E-05	6.80E-05	32.071 0	0.029 8

表 4 以再生塔再生效率作为实验指标时的方差分析表
Table 4 The variance analysis table when the regeneration efficiency is regarded as the experimental index

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值
总计	7	0.166 984	0.023 855		
误差	2	0.002 349	0.001 175		
t_{Lin}	1	0.036 469	0.036 469	31.046 330	0.030 733
ξ_{Lin}	1	0.000 190	0.000 190	0.161 869	0.726 367
t_{ain}	1	0.002 377	0.002 377	2.023 624	0.290 820
d_{ain}	1	0.000 064	0.000 064	0.054 242	0.837 504
m_a/m_d	1	0.125 534	0.125 534	106.866 500	0.009 228

表 5 考虑 t_{Lin} 与其它四个因素的交互作用时的表头设计

Table 5 The head design of the interactions between t_{Lin} and other four factors

表 头 设 计	t_{Lin}	ξ_{Lin}	t_{ain}	d_{ain}	m_a/m_d	$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_a/m_d$						$t_{Lin} \times t_{ain}$						$t_{Lin} \times d_{ain}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$						$t_{Lin} \times m_d$						$t_{Lin} \times \xi_{Lin}$
------------------	-----------	-------------	-----------	-----------	-----------	----------------------------	--	--	--	--	--	--------------------------	--	--	--	--	--	--------------------------	--	--	--	--	--	--------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------	--	--	--	--	--	----------------------	--	--	--	--	--	----------------------------

当以再生塔内水份蒸发速率 m_{evap} 作为实验指标时,从表 3 中看出 t_{Lin} 的 P 值小于 0.01,对照“ P 值与因素重要程度关系”可知这个因素高度显著,对 m_{evap} 非常重要;又由 ξ_{Lin} , m_a/m_d , d_{ain} 的 P 值在 0.01 到 0.05 之间,表明这三个因素显著,是重要因素;而 t_{ain} 的 P 值大于 0.2,表明这个因素不显著,对实验结果几乎没有影响.这五个因素对 m_{evap} 的影响程度按照显著性由大到小(或 P 值由小到大)的排列顺序是: $t_{Lin} > m_a/m_d > \xi_{Lin} > d_{ain} > t_{ain}$.

当以再生塔再生效率 ε_{Reg} 作为实验指标时,从表 4 中看出因素 m_a/m_d 的 P 值小于 0.01,对照“ P 值与因素重要程度关系”判断出它是高度显著的,是影响 ε_{Reg} 的主要因素; t_{Lin} 的 P 值在 0.01 到 0.05 之间,说明该因素对实验指标 ε_{Reg} 有重要影响;而 ξ_{Lin} , t_{ain} , d_{ain} 的 P 值均大于 0.2,说明这三个因素不显著,对实验指标 ε_{Reg} 没有影响.这五个因素对 ε_{Reg} 的影响程度按照显著性由大到小(或 P 值由小到大)的排列顺序是: $m_a/m_d > t_{Lin} > t_{ain} > \xi_{Lin} > d_{ain}$.

3.2 分析因素间的交互作用

按照上一节中的方法,也可以分析因素间可能存在的交互作用对实验指标的影响.

首先,进行表头设计,安排正交数值实验方案.由于考察的因素加上可能存在的交互作用数目较多,决定用正交表 $L_{20}(2^9)$ 安排正交数值实验.在用 $L_{20}(2^9)$ 安排正交实验时,将因素间的交互作用也作为单个因素看待,按照文献[19]中得出的 $L_{20}(2^9)$ 交互作用异常列分布表安排在相应的列上.比如,考虑 t_{Lin} 与其它四个因素的交互作用时的表头设计如表 5 所示.其它因素间交互作用可以仿照表 5 进行表头设计.

然后,根据采用正交表 $L_{20}(2^9)$ 安排的实验方案,利用编制的模拟程序进行数值实验,得出数值实验结果.

最后,通过方差分析,对五个因素之间可能存在的交互作用进行考察后发现:

当以 m_{evap} 作为实验指标时,只有交互作用 $t_{\text{Lin}} \times m_a/m_d$ 的 P 值均介于 0.05 与 0.2 之间,其它交互作用的 P 值均大于 0.2.对照“ P 值与因素重要程度关系”,可知交互作用 $t_{\text{Lin}} \times m_a/m_d$ 对实验指标的影响是较弱的,其它交互作用对 m_{evap} 基本没有影响。

当以 ε_{Reg} 作为实验指标时,仅有交互作用 $\xi_{\text{Lin}} \times d_{\text{ain}}$, $d_{\text{ain}} \times m_a/m_d$ 的 P 值介于 0.05 与 0.2 之间;其它交互作用的 P 值均大于 0.2.对照“ P 值与因素重要程度关系”,可知两个交互作用 $\xi_{\text{Lin}} \times d_{\text{ain}}$, $d_{\text{ain}} \times m_a/m_d$ 对实验指标 ε_{Reg} 的影响是较弱的,其它交互作用对 ε_{Reg} 基本没有影响。

4 结 论

通过以上的分析过程,可以得出如下结论:

1) 对溶液除湿系统中再生子系统的运行参数进行筛选分析后可以发现:影响再生子系统性能的五个因素 t_{Lin} , ξ_{Lin} , t_{ain} , d_{ain} , m_a/m_d 中,以不同的参数作为实验指标,各因素的重要程度区别较大.当以再生塔内水份蒸发速率 m_{evap} 作为实验指标时, t_{Lin} 是最重要的因素,因素 ξ_{Lin} , d_{ain} 的重要程度依次递减,也是重要的因素, t_{ain} 的影响对实验结果不重要;当以再生塔再生效率 ε_{Reg} 作为实验指标时, m_a/m_d 是最重要的因素, t_{Lin} 的影响程度次之,也是重要的因素,其它三个因素对实验指标基本没有影响。

2) 进一步研究因素间可能存在的交互作用发现:当以 m_{evap} 作为实验指标时,仅有交互作用 $t_{\text{Lin}} \times m_a/m_d$ 对实验指标有较弱的影响,而其它交互作用对 m_{evap} 没有影响;当以 ε_{Reg} 作为实验指标时,两个交互作用 $\xi_{\text{Lin}} \times d_{\text{ain}}$, $d_{\text{ain}} \times m_a/m_d$ 对实验指标 ε_{Reg} 有较弱的影响,其它交互作用对 ε_{Reg} 基本没有影响,其它的交互作用的影响可以忽略不计。

3) 通过进一步分析还可发现:不管是以 m_{evap} 还是 ε_{Reg} 作为实验指标, t_{Lin} 、 m_a/m_d 都是重要的影响因素,即需要强化稀溶液被加热过程中的换热效率以提高溶液的入口温度,同时合理调节空气与溶质的质量流量比,使空气与溶液的热容量、质容量能合理匹配;因为空气—空气换热器回收了排气中的大部分热量,再生空气入口参数 t_{ain} 和 d_{ain} 对文中的两个实验指标基本没有影响。

参考文献:

[1] ANDREW L. High efficiency liquid-desiccant regenerator for air conditioning and industrial drying [EB/OL].

United States: AIL Research, Inc., 2005. <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/878712-3hMVWw/878712.PDF>.

- [2] LÖF G O G. Cooling with Solar Energy [C] // Tucson, Arizona: Congress on Solar Energy, 1955: 171-189.
- [3] NELSON P, GOSWAMI D Y. Study of an aqueous lithium chloride desiccant system: air dehumidification and desiccant regeneration [J]. Solar energy, 2002, 72(4): 351-361.
- [4] ANI F N, BADAWI E M, KANNAN K S. The effect of absorber packing height on the performance of a hybrid liquid desiccant system [J]. Renewable energy, 2005, 30: 2247-2256.
- [5] SULTAN G I, AHMED M H, SULTAN A A. The effect of inlet parameters on the performance of packed tower-regenerator [J]. Renewable energy, 2002, 26: 271-283.
- [6] SANJEEV J, DHAR P L, KAUSHIK S C. Experimental studies on the dehumidifier and regenerator of a liquid desiccant cooling system [J]. Applied thermal engineering, 2000, 20(3): 253-267.
- [7] ERTAS A, GANDHIDASAN P, KIRIS I, et al. Experimental study on the performance of a regeneration tower for various climatic conditions [J]. Solar energy, 1994, 53(1): 125-130.
- [8] YIN Y G, ZHANG X S, CHEN Z Q. Experimental study on dehumidifier and regenerator of liquid desiccant cooling air conditioning system [J]. Building and environment, 2007, 42(7): 2505-2511.
- [9] YIN Y G, ZHANG X S, WANG G, et al. Experimental study on a new internally cooled/heated dehumidifier-regenerator of liquid desiccant systems [J]. International journal of refrigeration, 2008, 31(5): 857-866.
- [10] PENG C S P, Howell J R. The performance of various types of regenerators for liquid desiccants [J]. Journal of solar energy engineering, 1984, 106: 133-141.
- [11] LI Y T, YANG H X. Investigation on solar desiccant dehumidification process for energy conservation of central air-conditioning systems [J]. Applied thermal engineering, 2008, 28: 1118-1126.
- [12] PENG D G, ZHANG X S. Experimental investigation on regeneration performance, heat and mass transfer characteristics in a forced solar collector/regenerator [J]. Energy, 2016, 101: 296-308.
- [13] KHOUDOR K, KAMEL G, NESREEN G. Study of solar regenerated membrane desiccant system to control humidity and decrease energy consumption in office spaces [J]. Applied energy, 2015, 138: 121-132.
- [14] REN C Q, JIANG Y, ZHANG Y P. Simplified analysis of coupled heat and mass transfer processes in packed bed liquid desiccant-air contact system [J]. Solar Energy, 2006, 80: 121-131. (下转第 24 页)

3) 基坑施工引起隧道结构内力增大或减小, 结构内力处于容许承载力范围内, 说明基坑施工期间, 结构不会发生强度破坏, 安全是可控的。

4) 右转匝道基坑由于基底距离 CD 匝道距离过近, 基坑开挖后, CD 匝道结构变形超标, 如设置该匝道, 需在实施前采取保证营盘路隧道结构安全的保护方案。

3 结论及建议

3.1 结论

1) 对于紧贴型工况基坑开挖后周围土体最大主应力较小, 说明基坑开挖对周边地层扰动较小, 施工影响较小; 对于浅埋型工况, 右转匝道基坑开挖后(工况四)周围土体最大主应力较大, 说明基坑开挖对地层扰动较大, 施工时应注意采取相应的加固保护措施。

2) 浅埋工况下, 基坑开挖深度增加, 隧道竖向位移呈先向下后向上的趋势; 紧邻工况下, 隧道竖向位移向上, 且随开挖深度增大而增大, 隧道位于基坑开挖深度附近时竖向位移达最大。两种工况下的隧道竖向位移较小, 施工影响较小。

3) 浅埋式工况或紧贴式工况下, 基坑开挖都会导致隧道向基坑一侧的水平位移, 且随着开挖深度的增加而逐渐增大。紧贴型工况下, 当隧道位于基坑最终开挖深度附近时, 隧道变形以竖向位移为主, 浅埋型工况时, 隧道变形以水平方向为主。右转匝道基坑(工况四)对湘江隧道水平位移过大, 隧道将呈横向椭圆形发展, 将影响隧道的安全使用。

4) 基坑开挖导致周围地层再次扰动而对隧道衬砌产生附加应力, 且隧道衬砌弯矩变化与基坑开挖深度呈非线性关系, 但基坑开挖对隧道产生的附加弯矩变化比较平稳, 对隧道的正常运营影响较小。

综上所述, 湘江大道快捷化改造工程对营盘路湘江隧道结构工程的影响总体安全可控, 其中湘江大道主隧道对营盘路湘江主隧道的安全风险低, 对营盘路隧道 C、D 匝道安全风险中等; 改造工程南转东匝道安全风险程度高。

3.2 建议

1) 采用合理的措施如土体加固, 设置抗拔桩、封堵墙, 采用抽条开挖方式等都可以很好的控制基坑开挖对隧道结构的变形, 有利于保护既有隧道, 效果也非常显著。

2) 在复杂的周边环境区域进行地下工程建设, 对周边的建筑物的变形进行动态监测是非常必要的, 监测结果不仅能验证数值结果的合理性, 又能动态保证建筑物的安全。

参考文献:

- [1] 王卫东, 吴江斌, 翁其平. 基坑开挖卸载对地铁区间隧道影响的数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊2): 251-255.
- [2] 张强. 开挖卸荷下既有地铁隧道的竖向变形及其控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [3] 郑刚, 刘庆晨, 邓旭. 基坑开挖对下卧运营地铁隧道影响的数值分析与变形控制研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1459-1468.
- [4] 戴鹏祥, 孙华圣. 基坑开挖卸荷对既有隧道变形影响的三维有限元分析[J]. 施工技术, 2016, 45(5): 125-128.
- [5] 徐立明. 近距离基坑开挖对下方既有隧道的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(增刊2): 1603-1607, 1611.
- [6] 王罡. 基坑开挖施工对邻近运营地铁隧道变形影响分析[J]. 施工技术, 2016, 45(20): 86-90.
- [7] 郭典塔, 周翠英, 谢琳. 紧邻地铁区间隧道基坑开挖对隧道结构的影响浅析[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(4): 88-95.
- [8] 刘文卿. 实验设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [9] 胡细宝, 王丽霞. 概率论与数理统计[M]. 2版. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006.
- [10] 陈雪平. 混合水平正交表交互作用的研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2009: 22-23.
- [11] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [12] TU M, REN C Q, ZHANG L A, et al. Simulation and analysis of a novel liquid desiccant air-conditioning system[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(11/12): 2417-2425.

(上接第17页)