

固体吸附转轮除湿性能的模拟研究

潘腾祥, 倪美琴, 申沛琳, 张玉雪

扬州大学电气与能源动力工程学院, 江苏 扬州

收稿日期: 2021年9月13日; 录用日期: 2021年10月11日; 发布日期: 2021年11月8日

摘要

利用TRNSYS软件的Type683模块, 以处理风出口温度、再生风进出口温度、再生风出口含湿量和除湿性能系数DCOP为性能评价指标, 采用控制变量法研究了处理风进口温度和含湿量、再生风进口含湿量和再生风风量对转轮除湿性能的影响。研究表明: 在指定处理风出口含湿量情况下, 处理风进口温度和含湿量都不宜过高, 应采用表冷器降温除湿进行预处理, 这样可降低再生能耗、再冷能耗和再生排风余热, 且处理风进口温度降低会提高除湿性能系数DCOP, 但处理风进口含湿量降低会使DCOP有所下降; 同时再生风进口含湿量也是越小越好, 但再生风通常是新风, 其进口含湿量无法控制。因此, 若工程上采用再生排风热回收以降低再生能耗时, 应只回收排风显热以控制再生进风含湿量; 而再生风量大小对处理风出口温度、再生风进口温度、DCOP均没有影响, 故再生风量不宜过大, 否则会增加再生风的加热能耗和风机能耗。一般再生区占转轮的1/4, 因此, 再生风量为处理风量的1/3为宜。

关键词

除湿转轮, Type683模块, 除湿性能, 模拟研究

Simulation Study on Dehumidification Performance of Solid Adsorption Rotary

Tengxiang Pan, Meiqin Ni, Peilin Shen, Yuxue Zhang

College of Electrical, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

Received: Sep. 13th, 2021; accepted: Oct. 11th, 2021; published: Nov. 8th, 2021

Abstract

Using the Type683 module of TRNSYS software and taking the process air outlet temperature, regeneration air inlet and outlet temperature, regeneration air outlet moisture content and dehumidification performance coefficient DCOP as performance evaluation indexes, the influences of

process air inlet temperature and moisture content, regeneration air inlet moisture content and regeneration air volume on the dehumidification performance of the rotary were studied by using control variable method. The results of research show that when the outlet moisture content of the process air is specified, the inlet temperature and moisture content of the process air should not be too high, and the surface cooler should be used for cooling and dehumidification, which can reduce the regeneration energy consumption, re-cooling energy consumption and regeneration exhaust waste heat. And the dehumidification performance coefficient DCOP will be improved when the process air inlet temperature decreases, while the decrease of process air inlet moisture content will decrease the DCOP; At the same time, the inlet moisture content of the regeneration air is also the smaller the better, while the regeneration air is usually fresh air, the moisture content of it cannot be controlled. Therefore, if regeneration exhaust heat recovery is used in engineering to reduce regeneration energy consumption, only sensible exhaust heat should be recovered to control the inlet moisture content of the regeneration air; The size of the regeneration air volume has no influence on the outlet temperature of the process air, the inlet temperature of the regeneration air and DCOP. Therefore, the regeneration air volume should not be too large, otherwise it will increase the heating energy consumption of the regeneration air and the fan energy consumption. Generally, the regeneration area accounts for 1/4 of the rotary, so the regeneration air volume should be 1/3 of the process air volume.

Keywords

Dehumidification Rotary, Type683 Module, Dehumidification Performance, Simulation Study

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

转轮除湿作为固体吸附除湿的方式, 能实现深度除湿, 且除湿和再生过程具有连续性, 在工艺性空调领域得到广泛的应用。因此, 了解转轮的除湿性能受什么因素影响, 可以使其得到更好地利用。很多学者针对转轮的自身结构、转轮转速和空气参数等因素对转轮除湿性能的影响进行了研究[1] [2]。也有不少学者针对除湿转轮提出了一些传热传质数学模型[3] [4] [5] [6]。但这些数学模型均较为复杂, 且大多数学者在研究空气参数对转轮除湿性能的影响时, 没有指定处理风出口含湿量, 即达到特定的工艺要求。而 TANSYS 软件中 Type683 模块所基于的数学模型与其他除湿转轮模型相比更为简单、灵活, 且可以指定处理风出口含湿量, 自动改变相关因变量使之达到需求, 更贴合实际应用, 因为在实际工程中往往需要将室内含湿量控制在一定范围内。因此, 本文将利用 Type683 模块研究为使处理风出口含湿量达到指定状态点, 处理风进口温度和含湿量、再生风进口含湿量和再生风风量这四个因素对除湿转轮性能的影响, 研究结果可以为转轮除湿空调系统的设计及实际运行提供理论参考和指导, 具有一定的工程应用价值。

2. 除湿转轮的数学模型

除湿转轮工作流程如图 1 所示。TRNSYS 软件中的 Type683 模块是以硅胶作为吸附材料的除湿转轮模型, 该模块是基于 Howe 和 Jurinak [7] [8]提出的 F1 和 F2 等势线数学模型开发的, 模型简单, 计时快捷, F1 和 F2 分别被定义如下:

$$F1 = \frac{-2865}{T^{1.490}} + 4.344d^{0.8624} \quad (1)$$

$$F2 = \frac{T^{1.490}}{6360} - 1.127d^{0.07969} \quad (2)$$

式中： T ——空气干球温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

d ——空气含湿量， g/kg 。

同时 Banks [9]通过两个有效值 ε_1 和 ε_2 对 $F1$ 和 $F2$ 等势线进行了进一步修正， ε_1 和 ε_2 分别被定义如下：

$$\varepsilon_{F1} = \frac{F1_D - F1_P}{F1_R - F1_P} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{F2} = \frac{F2_D - F2_P}{F2_R - F2_P} \quad (4)$$

式中： P ——处理风进口状态点；

D ——处理风出口状态点；

R ——再生风进口状态点。

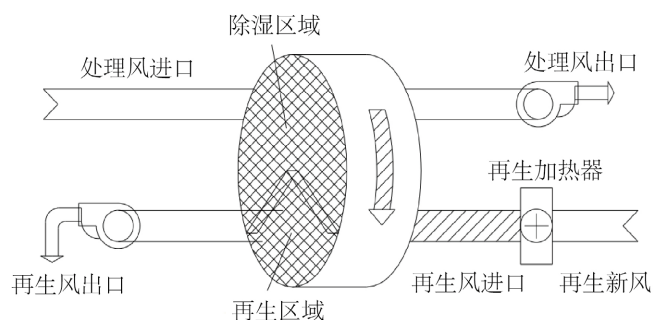


Figure 1. Schematic diagram of dehumidification rotary working process

图 1. 除湿转轮工作流程示意图

在利用 Type683 模块对硅胶除湿转轮进行数值模拟时，只需根据实验测得结果调整等势数 $F1$ 和 $F2$ ，使得模型模拟结果与实验结果一致即可，其他参数如转轮的尺寸、转速等对于该模块来说，无需另外设置。如表 1 所示，本文根据参考文献[10]中的实验数据不断调试得出，当 $F1$ 和 $F2$ 等势数分别为 0.032、0.225 时，再生风进口温度和除湿效率实验值与模拟值的误差较小，均小于 10%；除湿性能系数实验值与模拟值的误差稍大，但均小于 20%。总之，Type683 模块模拟结果与实验结果吻合度较高，在可接受范围内。其中，除湿性能系数是对除湿转轮整体除湿性能和能源利用情况的综合评价，除湿效率反映了除湿速度的快慢。

Table 1. Comparison of simulation results and experimental results

表 1. 模拟结果与实验结果对比

项目	处理空气状态	实验值	模拟值	误差
再生风进口温度($^{\circ}\text{C}$)	25 $^{\circ}\text{C}$, 75%	85	88.94	4.6%
	32 $^{\circ}\text{C}$, 75%	85	80.85	4.9%

Continued

除湿性能系数	25℃, 75%	10.4	12.3	18.3%
	32℃, 75%	7.36	6.0	18.5%
除湿效率	25℃, 75%	2.9	2.76	4.8%
	32℃, 75%	2.61	2.36	9.6%

3. 转轮除湿性能的模拟研究

3.1. 模拟工况

利用 Type683 模块采用控制变量法研究处理风进口温度、处理风进口含湿量、再生风进口含湿量和再生风风量这四个空气参数对转轮除湿性能的影响, 将该模块转轮处理风出口状态设定为温度 22℃, 相对湿度 30%, 则含湿量约为 5 g/kg, 处理风进口风量设定为 3000 m³/h。拟定的空气参数模拟基准工况及其变化范围如表 2 所示。

Table 2. Range of simulated operating conditions

表 2. 模拟工况范围

空气参数	基准工况	变化范围
处理风进口温度(℃)	28	12、16、20、24、28、32
处理风进口含湿量(g/kg)	8	6、6.5、7、7.5、8、8.5
再生风进口含湿量(g/kg)	16	13、14、15、16、17、18
再生风风量(m ³ /h)	1000	800、1000、1200、1400、1600、1800

3.2. 性能评价指标

本模拟研究以处理风出口温度、再生风进口温度、再生风出口温度、再生风出口含湿量和除湿性能系数 DCOP 作为性能评价指标。

(1) 处理风出口温度

由于转轮在除湿过程中, 会释放出大量吸附热, 导致处理风出口温度上升, 需要进行再次降温。而处理风出口温度越高, 则所需的再冷能耗就越大, 所以处理风出口温度是一个不可忽视的指标。

(2) 再生风进口温度

转轮的除湿量是根据再生风进口温度进行调节的, 再生风进口温度越高, 其除湿量越大; 反之, 再生风温度越低, 其除湿量越小。因此了解再生风进口温度受哪些因素影响, 对降低再生能耗有很大的帮助。

(3) 再生风出口温度、含湿量

转轮再生风出口的温度和含湿量反映了再生排风中余热的多少。分析了解再生出口排风的状态有助于合理利用再生排风的余热, 以节省再生能耗, 达到节能降耗的目的。

(4) 除湿性能系数 DCOP

除湿性能系数 DCOP 反映了转轮除湿效果和再生能耗之比。DCOP 越高, 说明转轮除湿性能越好, 能量利用率越高[11], 其计算公式如下:

$$DCOP = \frac{m_p r (d_{p1} - d_{p2})}{m_r (h_{r1} - h_{r2})} \quad (5)$$

式中： m_p ——转轮进风量，kg/s；
 m_r ——再生风量，kg/s；
 d_{p1} ——转轮进风含湿量，kg/kg；
 d_{p2} ——转轮出风含湿量，kg/kg；
 h_{r1} ——再生风进口比焓，J/kg；
 h_{r2} ——再生排风比焓，J/kg；
 r ——标准大气压下水蒸气蒸发潜热， 2.2567×10^6 J/kg。

3.3. 模拟结果分析

(1) 处理风进口温度对转轮除湿性能的影响

如图 2 所示，随着处理风进口温度的升高，处理风出口温度、再生风进、出口温度也在升高，再生风出口含湿量不变，而除湿性能系数 DCOP 却在下降。这是因为处理风进口温度升高使吸附材料表面温度升高，表面的水蒸气分压力增大，降低了传质驱动力，为达到设定出风含湿量，再生风进口温度需升高以提高转轮干燥能力，从而导致再生风出口温度和处理风出口温度升高。由于总湿负荷不变，故再生风出口含湿量不变。而 DCOP 随着处理风进口温度的升高而降低了，这说明可以对处理风进行预冷处理，以此来降低处理风进口温度，可降低再生能耗、再冷能耗和再生排风余热，且提高除湿性能系数 DCOP。

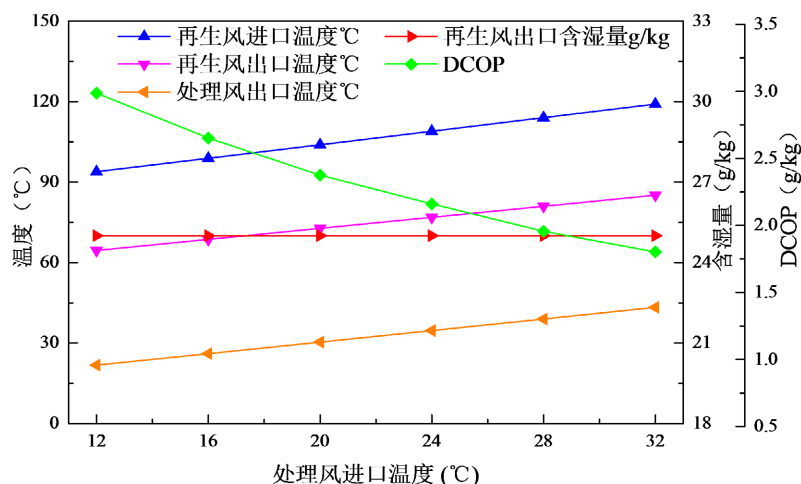


Figure 2. Diagram of performance evaluation index changing with process air inlet temperature

图 2. 性能评价指标随处理风进口温度变化图

(2) 处理风进口含湿量对转轮除湿性能的影响

如图 3 所示，随着处理风进口含湿量的增大，所需的再生风进口温度、处理风出口温度、再生风出口温度和除湿性能系数 DCOP 均在增大。这是因为处理风进口含湿量增大，为达到设定出口含湿量，总湿负荷增大，故需要提高再生风进口温度以增强转轮再生能力，从而导致再生风出口温度升高。由于再生风带走水分增多，故再生风出口含湿量增大。同时由于除湿过程转轮吸收水分增多，释放出更多潜热，故处理风出口温度也在升高。DCOP 随着处理风进口含湿量的升高而升高，说明当转轮除湿负荷增大时，再生风温度的升高使再生能量利用率变大。因此，对处理风进行预除湿处理，以此来降低处理风进口含湿量，可降低再生能耗、再冷能耗和再生排风余热，而除湿性能系数 DCOP 也会降低。

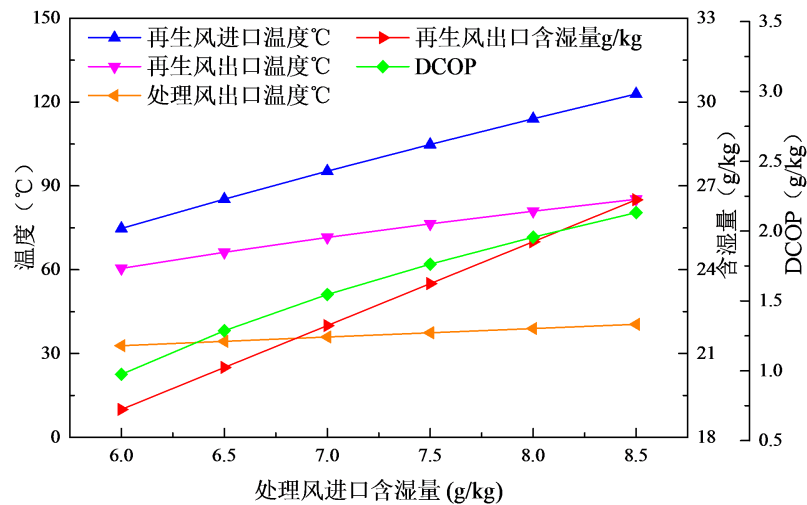


Figure 3. Diagram of performance evaluation index changing with process air inlet moisture content

图 3. 性能评价指标随处理风进口含湿量变化图

(3) 再生风进口含湿量对转轮除湿性能的影响

如图 4 所示，随着再生风进口含湿量的增大，所需的再生风进口温度、处理风出口温度和再生风出口温度均略有增加，而再生风出口含湿量增大明显，基本随进口同步增加，且除湿性能系数 DCOP 逐渐下降。这是因为总除湿负荷不变，再生风进口含湿量增大，导致再生风出口含湿量增大。同时由于再生风进口含湿量升高，再生风干燥能力会降低，再生能力会下降，故需要提高再生风进口温度以提高再生能力，从而导致再生风出口温度和处理风出口温度都升高，使得再生能耗、再冷能耗随之增加。且 DCOP 随着再生风进口含湿量的增大而减小，这也是不利的。但是，再生风通常是新风，其进口含湿量无法控制。根据研究结果建议：若工程上采用再生排风热回收以降低再生能耗时，应只回收排风显热以控制再生风进口含湿量。

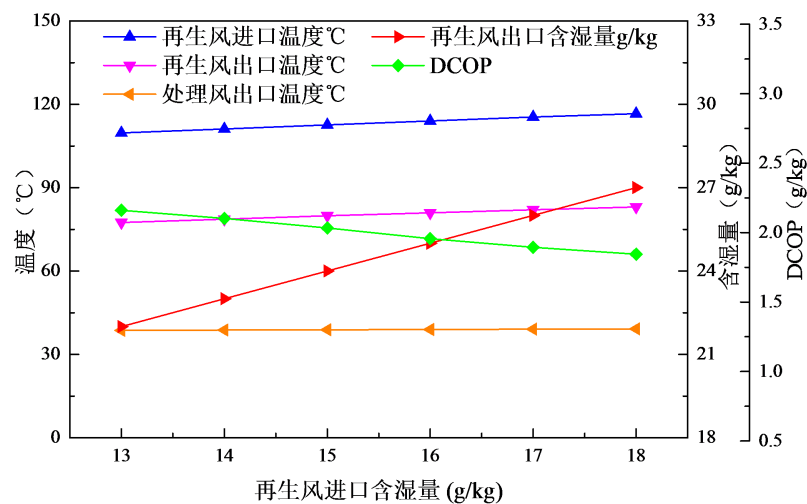


Figure 4. Diagram of performance evaluation index changing with regeneration air inlet moisture content

图 4. 性能评价指标随再生风进口含湿量变化图

(4) 再生风风量对转轮除湿性能的影响

如图 5 所示,随着再生风风量的增大,所需的再生风进口温度、处理风出口温度、除湿性能系数 DCOP 均不变,但再生风出口温度在上升,再生风出口含湿量在下降。这是因为转轮总除湿负荷、处理风进口温度和再生风进口含湿量均不变,再生风带走空气的总水分是一定的,再生风风量增大就会使再生风出口含湿量降低同时温度升高。而 DCOP 基本不变,说明 DCOP 不受再生风量的影响。因此可以得出,再生风量不宜过大,否则不仅会增加再生风的加热能耗和风机能耗,还会增加再生排风余热。一般的,再生区占转轮的 1/4,本文中处理风量为 3000 m³/h,则再生风量为 1000 m³/h 为宜。

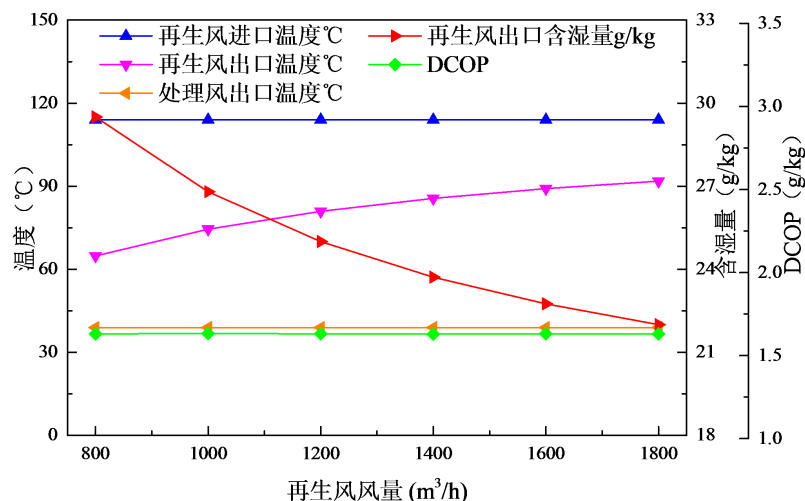


Figure 5. Diagram of performance evaluation index changing with regeneration air volume

图 5. 性能评价指标随再生风风量变化图

4. 结论

本文利用 TRNSYS 软件的 Type683 模块,以处理风出口温度、再生风进出口温度、再生风出口含湿量和除湿性能系数 DCOP 为性能评价指标,采用控制变量法研究了处理风进口温度、处理风进口含湿量、再生风进口含湿量和再生风风量对转轮除湿性能的影响,得出以下结论:

(1) 随着处理风进口温湿度的增加,处理风出口温度、再生风进出口温度均升高,因此,为了降低再生能耗、再冷能耗和再生排风余热,在工程应用中应对处理风进行预冷却除湿处理,以此来降低处理风进口温湿度。

(2) 随着再生风进口含湿量的增大,所需的再生风进出口温度、处理风出口温度均增大,而 DCOP 却逐渐下降。这说明再生风进口含湿量越小,不仅可以降低再生能耗、再冷能耗和再生排风余热,还能提高 DCOP。因此,为降低再生能耗回收排风余热时,应只回收其显热以控制再生进风含湿量。

(3) 随着再生风风量的增大,所需的再生风进口温度、处理风出口温度、DCOP 均不变。因此,再生风量不宜过大,否则不仅会增加再生风的加热能耗和风机能耗,还会增加再生排风余热。一般的,再生区占转轮的 1/4,因此,再生风量为处理风量的 1/3 为宜。

参考文献

- [1] Wu, X.N., Ge, T.S., Dai, Y.J. and Wang, R.Z. (2019) Investigation on Novel Desiccant Wheel Using Wood Pulp Fiber Paper with High Coating Ratio as Matrix. *Energy*, **176**, 493-504. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.006>

-
- [2] 许峰, 吴宣楠, 葛天舒, 等. 基于硅胶干燥剂的多孔基材性能测试[J]. 制冷学报, 2018, 39(6): 61-69.
- [3] Koronaki, I.P., Papoutsis, E., Papaefthimiou, V., *et al.* (2015) Numerical and Experimental Analysis of a Solid Desiccant Wheel. *Thermal Science*, **20**, 613-621. <https://doi.org/10.2298/TSCI141118041K>
- [4] Zhang, L.Z., Fu, H.X., Yang, Q.R. and Xu, J.C. (2014) Performance Comparisons of Honeycomb-Type Adsorbent Beds (Wheels) for Air Dehumidification with Various Desiccant Wall Materials. *Energy*, **65**, 430-440. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.042>
- [5] Zhang, L.Z. (2015) Transient and Conjugate Heat and Mass Transfer in Hexagonal Ducts with Adsorbent Walls. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, **84**, 271-281. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.029>
- [6] Yamaguchi, S. and Saito, K. (2013) Numerical and Experimental Performance Analysis of Rotary Desiccant Wheels. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, **60**, 51-60. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.12.036>
- [7] Howe, R.R. (1983) Model and Performance Characteristics of a Commercially-Sized Hybrid Air Conditioning System Which Utilize a Rotary Desiccant Dehumidifier. *Ms Mechanical Engineering*, **65**, 78-96.
- [8] Jurinak, J.J. (1982) Open Cycle Desiccant Cooling: Component Models and System Simulations. Ph.D. Thesis, University of Wisconsin-Madison, Madison.
- [9] Schultz, K.J. (1983) The Performance of Desiccant Dehumidifier Air-Conditioning Systems Using Cooled Dehumidifiers. Ph.D. Thesis, University of Wisconsin-Madison, Madison.
- [10] 郭友谊, 张旭. 硅胶转轮除湿器性能的实验研究及其评价方法[J]. 制冷空调与电力机械, 2011, 137(32): 6-8+37.
- [11] 李鹏越. 转轮除湿系统的改进和节能设计[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.