

流路布置对蒸发器除湿性能的影响

杨哲¹, 张浩², 邓海钊², 程超², 刘迎文¹

(1. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710049)

(2. 广东美的集团股份有限公司, 广东 佛山 528311)

(Tel: 029-82668727, Email: ywliu@xjtu.edu.cn)

摘 要: 本文模拟研究了四种不同流路布置对于蒸发器除湿性能的影响, 结果发现: 在相同换热条件下增加流路数可使压降损失大幅降低, 但由于多流程的分流降速作用, 制冷剂侧换热系数减小, 系统换热及除湿性能不佳; 相比而言, 两支路流路布置时除湿量增加约 30~70g/h, 对提升除湿能力更有优势; 其中 UN 顺流布置能够保证空气与制冷剂的温降趋势一致, 因而具有更大的除湿能力和潜热占比, 相比于同支路数目的其他流路除湿能力提升约 2.4%。

关键词: 流路布置, 除湿性能, 蒸发器

EFFECT OF CIRCUIT ARRANGEMENT ON THE DEHUMIDIFICATION PERFORMANCE OF EVAPORATOR

Zhe Yang¹, Hao Zhang², Haizhao Deng², Chao Cheng², Yingwen Liu¹

(1. MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shannxi 710049)

(2. Midea Group Co., Ltd, Foshan Guangdong 528311)

Abstract: In this paper, the effect of four different circuit arrangements on the dehumidification performance of evaporator is studied. It is found that under the same heat transfer conditions, with increasing the number of channels, the loss of pressure drop is greatly reduced, but the heat transfer coefficient of the refrigerant decreases which leads to lower capacity of overall heat transfer and dehumidification. In comparison, the dehumidification of the two branch arrangement increases about 30~70g/h, which is more advantageous for the dehumidification performance. Compared with the other circuits with the same branch number, the UN circuit arrangement can get a greater dehumidification and latent heat ratio, and the dehumidification capacity increases by about 2.4% because of the same temperature drop trend between air and refrigerant.

Keywords: Circuit Arrangement, Dehumidification performance, Evaporator

0 前言

研究表明, 现代人类每天约有 80~90% 的时间在室内进行各类生产, 学习, 工作等活动, 因此室内环境的舒适性越来越受到人们的重视。湿度作为一种环境舒适性的评价标准, 表征着空气中所含水分的多少, 湿度过高和过低都会影响人体健康。当空气湿度较高时, 身体的散热功能受到抑制, 容易诱发关节炎, 精神上容易烦躁不安; 当空气湿度较低时, 呼吸系统的抵抗力会降低, 从而引发一系列呼吸道疾病^[1]。因此维持室内适宜的环境湿度尤为重要。

冷冻除湿作为一种常见的除湿方式, 采用简单的制冷原理实现除湿目标: 在经过低于露点温度的蒸发器换热表面时, 湿空气中的水分凝结析出, 变为低温的干空气, 而后经过冷凝器提升温度, 空气温湿度均达到人体适宜水平被送入室内。由此可知, 蒸发器作为湿空气中水汽凝结的主要场所, 是整个冷冻除湿系统中的关键部件, 其流动换热特性直接影响到除湿系统性能的优劣。

对于一定换热铜管数目的蒸发器, 流路布置方式的不同将直接影响到蒸发器的换热流动特性^[2~5]。因此本文采用数值模拟研究, 对比分析了不同流路布置对蒸发器除湿性能的影响, 总结了除湿系统中蒸发器流路布置方式的一般规律, 为冷冻除湿系统能效提升提供改进意见。

1 模拟条件

本文的模拟对象选自某款经典除湿机，其蒸发器详细配置见表 1，模拟研究中蒸发器的运行条件根据其实际实验运行参数和测试标准而定，如表 2 所示。

表 1 蒸发器几何结构参数

换热管	材质	铜
	外径/mm	7
	内径/mm	6.52
	长度/mm	360
	间距/mm	21
	排数	3
翅片	内表面	内螺纹
	材质	铝
	类型	百叶窗

表 2 蒸发器运行条件

制冷剂				空气		
类型	进口饱和温度/℃	进口干度	质量流量/ kg h ⁻¹	温度	相对湿度	流量/m ³ h ⁻¹
R410A	2.5	0.1	56	18.33	60%	480

图 1 为本次模拟研究中各种蒸发器流路布置方式，其中流路 1 为采用两进两出的方式，整体上采用逆流换热的方式，局部为“Z”型顺逆流交替；流路 2 与流路 3 同样采用两进两出的方式，进一步简化为“UN”型布置，其中流路 2 为逆流换热，流路 3 为顺流换热；流路 4 采用了 3 个支路数，其余类似流路 1 布置方式。为了后续便于分析，将换热管按顺序编号排布，迎风第一排自上至下为 1~12，以此类推，迎风第二排自上而上为 13~24，迎风第三排自上至下为 25~36。

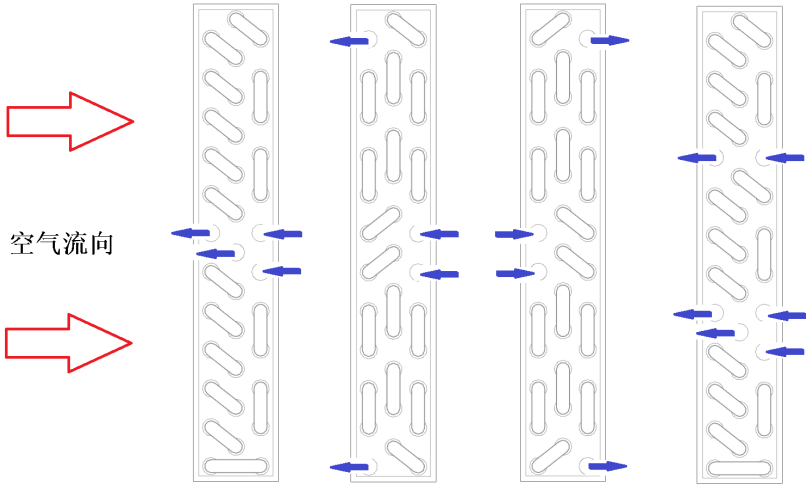


图 1 蒸发器流路布置示意图（由左至右分别为流路 1、流路 2、流路 3 和流路 4）

本次研究采用的模拟软件为美国标准与技术研究所（NIST）开发的 EVAP-COND，该软件在管翅式换热器的数值模拟方面具有很强的代表性，在国际上也具有广泛的影响。

2 模拟结果与分析

根据上述换热条件，分别对不同流路下的蒸发器性能进行模拟计算，计算结果汇总见表 3，其中折合除湿量是根据潜热量与水蒸气冷凝潜热之间的关系计算得到。对比四个流路的换热情况，采用两支路的蒸

发器流路换热能力明显优于三支路的蒸发器流路，其中流路 3 的换热量达到最大。流路 1、2 和 3 由于均采用两支路方式，总换热量相差不大，但是流路 3 的潜热占比更大，相同冷量下用于水蒸气凝结的热量更多，因此流路 3 的潜热量更大，除湿量增大 30~40g/h，提升约 2.4%。流路 4 采用更多的支路数，流经每一支路的制冷剂流速减小，因此制冷剂侧换热系数减小，整体换热水准减弱，换热量最小；相比于两支路流路，换热量减少约 30~50W，除湿量降低 30~70g/h。

根据表 3 中汇总结果，由于支路数目的减少，制冷剂流速增大，两支路蒸发器流路压降明显大于三支路流路，压降损失增大 1~2 倍。制冷剂侧压降的变化与换热情况正好相反：换热较优的流路压降损失大，而换热较差的流路压降损失小。

表 3 不同蒸发器流路模拟结果汇总表

对比	流路 1	流路 2	流路 3	流路 4
换热量/W	3090	3089	3099	3024
潜热量/W	1026	1019	1047	996
潜热占比	33.20%	32.99%	33.79%	32.94%
折合除湿量/g h ⁻¹	1477	1467	1508	1434
压降/kPa	26.3	24.8	33.3	8.4

2.1 传热除湿性能对比

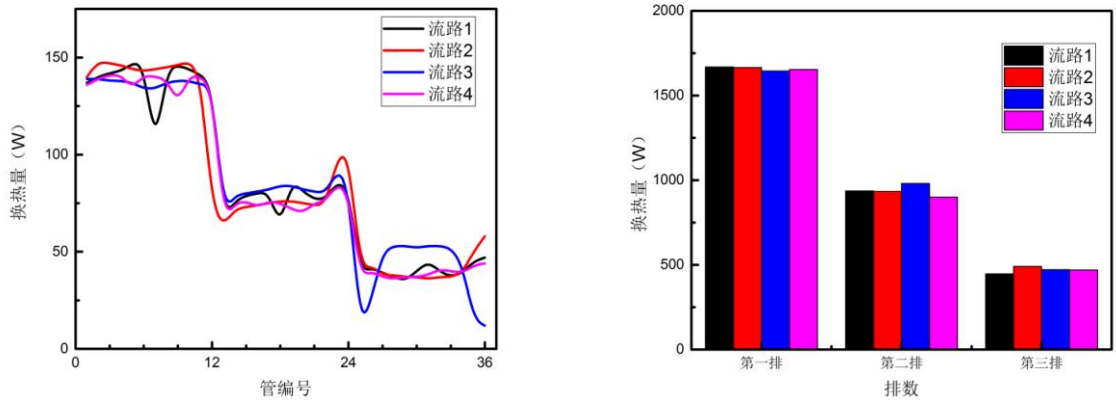


图 2 换热量沿换热管（左）和管排（右）分布情况

图 2 展示了不同蒸发器流路时沿着换热管和管排换热量的分布图，可以看出换热量沿着空气流动方向递减；流路 3 在迎风第一排时，换热能力最低，而第二三排换热管的换热量却明显优于其余三种流路布置；流路 4 中三排换热管的平均换热能力最低，整体换热量最小。

由传热学可知，换热量的大小与换热面积、换热系数和换热温差成正比。图片 3 展示的是不同蒸发器流路时各个换热管换热温差大小的分布图，三支路与两支路流路的换热温差相近。四种蒸发器流路采用相同的换热管和翅片，且换热管外空气的流动状态近似相等，因此空气侧换热系数也相差不大。对比两支路流路（流路 1、流路 2 和流路 3）和三支路（流路 4）蒸发器流路，由于支路数目的不同，流经每个支路的制冷剂流量差异较大，三支路平均每支路制冷剂流量为两支路的 2/3，因此三支路制冷剂侧表面换热系数较小，总换热系数较小。因此换热系数成为影响蒸发器在不同支路数换热能力的主要因素。

对于存在相同支路数的流路 1、流路 2 及流路 3，由上述分析可知，总换热系数相差不大，制冷剂与空气的温差成为了换热能力差异的重要原因。在图 3 中，流路 3 的第二、三排的换热温差略高于流路 1 及流路 2，因此换热能力更强。进一步分析可知，沿空气流动方向，空气吸收冷量温度降低，即从第一排至第三排换热管外空气温度逐渐降低；而管内制冷剂主要处于气液两相状态，若忽略压降因素，则制冷剂始终维持恒定的此压力下的饱和温度，但由于压降的存在，沿制冷剂流动方向，制冷剂饱和温度下降。因此对于顺流 U N 布置的流路 3 来说，沿流动方向制冷剂与空气的温降趋势一致，这与常规单相介质逆流换热

类似，此时整体换热温差达到最大。而逆流布置的回路，沿流动方向制冷剂与空气的温降趋势相反，其效果类似于常规介质顺流换热，相比而言整体换热温差小于顺流 UN 布置。

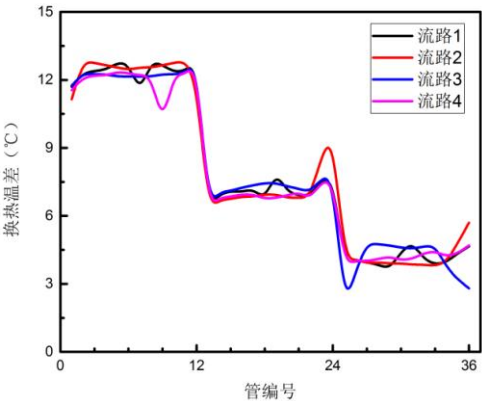


图 3 不同换热管处换热温差的变化情况

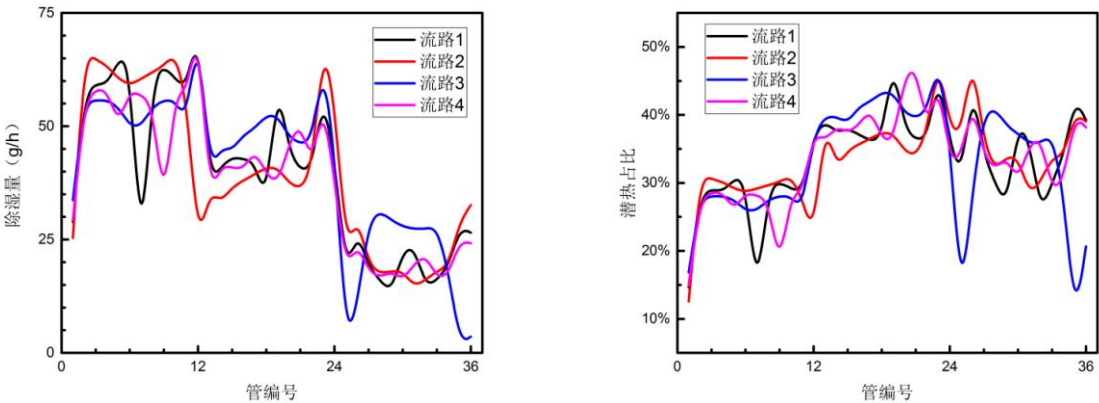


图 4 不同换热管处除湿量（左）和显热占比（右）的变化情况

根据模拟结果中流经每根换热管空气温度的变化，计算出每根换热管的除湿量及潜热占比，结果如图 4 所示。从图 4 左中可以看出除湿量的变化趋势与总换热量的变化趋势基本保持一致（图 2 左），即换热量多的换热管上除湿量也越多，但是每排换热管上除湿量之间的差距减小，尤其是第一、二排换热管上的除湿量。根据图 4 右的结果来看，迎风第一排上的换热热管的潜热占比小于后两排换热管，可能的原因因为在第一排中进行换热的空气温度最高，要实现凝结析湿需要一个空气冷却的过程，因此相比而言第一排换热管中更多的冷量用于空气的降温，潜热占比较小。由于第一排换热管的冷却作用，后续换热管上空气的凝结相比较易，冷量中更多的部分用于水蒸气的凝结，潜热占比升高。因而第一排与第二排换热管之间的除湿量差距变小。

从上述分析来看，蒸发器前排换热管主要作用是冷却空气，即将空气降温到一个有利于水蒸气凝结的温度，以便于后排换热管能够更加高效的除湿（更高的潜热占比）。对于本次模拟中采用的蒸发器流路，流路 3 中迎风第一排换热管换热温差最大，总换热量最小，但潜热占比相比于其他三种流路更小，综合来看显热量却最大，因此进入后续两排换热管道的空气温度更低，水蒸气更容易凝结析出，所以后排潜热占比相比更大，除湿量及换热量更多。

2.2 压降损失比较

图 5 为不同蒸发器流路制冷剂沿程压降变化趋势。可以看出，换热管中制冷剂的压降呈现先增后降的趋势，原因在于沿着流动方向，制冷剂吸热蒸发，其干度逐渐增大，在物性上表现为比容增大。对于一定制冷剂质量流量的系统，比容越大，体积流量越大，而制冷剂管道直径保持一致，这意味着沿流动方向，

制冷剂是一个加速的过程，因此压降损失逐渐增大。当制冷剂完全蒸发完全后，液态完全转化为气态，流速达到最大，但是由于气态制冷剂与管壁之间的摩擦系数远小于液态制冷剂，因此压降损失减小，其后随着继续吸收热量，过热度增大，制冷剂比容减小，流速减缓，因此压降损失持续保持着减小的趋势。

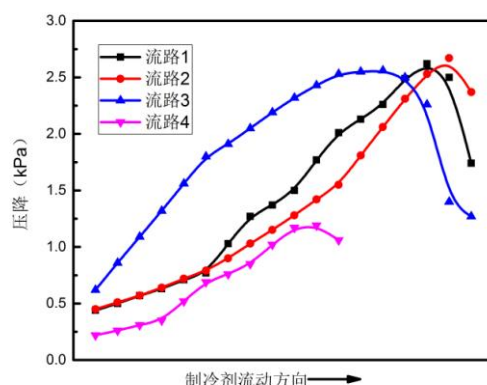


图 5 制冷剂压降沿程变化情况

对比四种流路的压降变化趋势，由于支路数目的增多，单支路中制冷剂流量减小，三支路蒸发器流路（流路 4）对于减小系统压降损失极为有利，单管压降及总压降远小于两支路流路。对比三种不同布置方式的两支路蒸发器流路，由于流路 3 采用顺流 UN 布置，其入口段位于换热能力最佳的迎风第一排，由于换热量多，干度及比容变化剧烈，制冷剂保持一个较大加速度的流动，因此在制冷剂入口阶段压降损失最大。而流路 1 与流路 2 在进口阶段流路布置相同，因此压降变化保持一致；到达后半程时，流路 1 的换热效率更大，吸收更多的热量，因此比容有了更大的变化，压降损失增大。在制冷剂流动的后半程，流路 1 与流路 2 的换热效果好（迎风第一、二排换热），压降损失达到了单管最大；但由于流路 3 整体拥有最大的换热量，制冷剂过热度最大，因此在出口阶段，其制冷剂压降最小。

3 结论

湿度的重要性越来越被广大群众重视，湿度控制逐渐也成为了空气调节过程中重要的一环。对于冷冻除湿方式，蒸发器的性能决定了除湿效率的优劣，而流路布置方式的不同直接影响到蒸发器的换热流动特性。因此本文分析研究了相同换热条件下四种不同流路布置对于蒸发器除湿性能的影响，模拟结果表明：增加流路数使得压降损失大幅降低，但由于多流程的分流降速作用，制冷剂侧换热系数减小，系统换热及除湿性能不佳；相比三支路流路，两支路流路布置可使除湿量增加约 30~70g/h，对于提升除湿能力更有优势；其中 UN 顺流布置能够保证空气与制冷剂的温降趋势一致，因而具有更大的除湿能力和潜热占比，相比于同支路数目的其他流路除湿能力增大约 2.4%。

参考文献

- [1] 何天祺. 供暖通风与空气调节[M]. 第 2 版. 重庆: 重庆大学出版社, 2002.
- [2] Liang S Y, Wong T N, Nathan G K. Numerical and experimental studies of refrigerant circuitry of evaporator coils[J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24(8):823-833.
- [3] 郭进军. 管路流程布置对换热器性能影响的数值模拟及实验研究[D]. 西安交通大学, 2003.
- [4] 黄东, 陈群, 袁秀玲. 支路数对热泵空调中冷凝和蒸发两用换热器性能的影响[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(5):543-548.
- [5] 黄东, 李权旭, 吴蓓, 等. 流路布置对热泵空调中冷凝和蒸发两用换热器性能的影响[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(9): 1107-1112.