

[文章编号] 1007-7405(2015)01-0041-06

船用转轮除湿空调系统运行性能的分析

朱 军¹, 杨光海², 郭国凡¹, 郑超瑜¹, 俞文胜¹, 陈 武¹

(1. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021; 2. 福建兆翔临港置业有限公司, 福建 厦门 361006)

[摘要] 以系统制冷量 Q_c 、除湿量 D 、电力性能系数 COP_e 和热力性能系数 COP_{th} 作为性能评价指标, 通过实验研究再生温度与处理空气参数对船用转轮除湿空调系统性能的影响. 研究表明: 处理空气进口温度和含湿量对系统的性能影响较大; 在除湿转轮的结构和干燥剂材料已确定的情况下, 系统存在一个最优的处理空气流量; 系统的合理再生温度应处于 $100 \sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间. 研究结果进一步证实船用转轮除湿空调在高温、高湿的海洋环境下具有良好的应用优势.

[关键词] 船用转轮除湿空调; 系统制冷量; 电力性能系数; 热力性能系数

[中图分类号] U 664. 86

[文献标志码] A

Analysis on the Performance of a Marine Rotary Desiccant Air-Conditioning System

ZHU Jun¹, YANG Guang-hai², GUO Guo-fan¹, ZHENG Chao-yu¹, YU Wen-sheng¹, CHEN Wu¹

(1. Fujian Province Key Laboratory of Naval Architecture and Ocean Engineering, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Panport Property Co. Ltd., Xiamen 361006, China)

Abstract: In this paper, the effect of regeneration temperature and process air parameters on the performance of a marine rotary desiccant air-conditioning (A/C) system was studied experimentally. The evaluation indices for system performance included the system cooling capacity (Q_c), moisture removal capacity (D), electric coefficient of performance (COP_e), and thermal coefficient of performance (COP_{th}). It was found that the impact of the inlet temperature and humidity of process air were most significant on the system performance. Moreover, the system had an optimal process air flux when the structure and the desiccant material of the desiccant wheel were fixed. Meanwhile the reasonable regeneration temperature of system should be between 100°C to 120°C . From the results it could be proved that the application of marine rotary desiccant A/C on board ships in the high temperature and high humidity marine environment was satisfactory and advantageous.

Key words: marine rotary desiccant air-conditioning system; system cooling capacity; electric coefficient of performance; thermal coefficient of performance

0 引言

据有关资料统计, 当前世界贸易海运量的能耗约占世界总能耗的 3%, 造成的污染占全球污染量的 3% ~ 7%^[1]. 船舶空调是船舶的主要用电设备之一, 其能耗约占整个船舶耗电量的 20%^[2]. 因此,

[收稿日期] 2014-05-30

[修回日期] 2014-07-24

[基金项目] 交通运输部应用基础研究项目 (2012329815280); 教育部科技重点项目 (201210090001)

[作者简介] 朱军 (1992—), 男, 硕士生, 从事船舶空调与制冷研究. 通讯作者: 陈武 (1973—), 男, 教授, 博士, 从事空调及冷藏设备的仿真控制、船舶余热利用及绿色制冷剂的研究.

所搭建的船用转轮除湿空调实验台采用一个蜂窝状硅胶除湿转轮, 并配置调速电机, 可对除湿转轮的旋转速度进行控制调节; 除湿转轮分为两个除湿区和两个再生区, 角度分别为 135°与 45°; 除湿转轮的干燥吸附剂为硅胶; 转轮直径为 450 mm, 厚度为 200 mm. 此外, 实验台配置了一系列相关的温度传感器 (1)、湿度传感器、热电偶 (2)、风量测试仪器和流量计; 并利用安捷伦 34972A 数据采集仪对实验数据进行采集和分析. 温度和相对湿度由 EE23 型温湿度传感器测得; TS18375 风量罩测风量; OPTIFLUX4000F 型流量计测水测量. 具体测量参数见表 1.

表 1 实验台主要测试仪表
Tab. 1 Testing instrument of testing

参数 Paramaters	温度(1) Temperature/℃	相对湿度 Relative humidity/%	温度(2) Temperature/℃	风量 Air flux /(m ³ · h ⁻¹)	水流量 Water flux /(m ³ · h ⁻¹)
测量范围 Measurement range	0 ~ 60	40 ~ 98	- 200 ~ 350	50 ~ 3500	0.3 ~ 3.5
测量精度 Measurement accuracy	±0.3	±2.3	±0.5	±0.5	±0.5

2 性能指标

1) 系统制冷量 $Q_c = m_p(h_1 - h_6)$. 式中: Q_c —系统制冷量, kW; m_p —处理空气流量, kg/s; h_1 —处理空气空气焓值, kJ/kg; h_6 —送入舱室的空气焓值.

2) 转轮除湿量 $D = d_1 - d_4$. 式中: D —转轮除湿量, g/kg; d —空气含湿量, g/kg (dry air). 转轮除湿量 D 可直观地表达为处理空气通过除湿转轮干燥后, 其含湿量的变化; 当处理空气进口含湿量相同时, D 越大, 表明转轮的除湿能力越大.

3) 电力性能系数 $COP_e = Q_c/W = Q_c/(W_f + W_p + W_m + W_r)$, 式中: COP_e —电力性能系数; W —系统电力功耗, kW; W_f —风机功耗, kW; W_p —水泵功耗, kW; W_m —辅助空调制冷机功耗, kW; W_r —转轮电机功耗, kW.

本实验系统中有关设备所消耗的电能, 包括送风风机、再生风机、转轮电动机、海水冷却泵的功耗以及辅助空调制冷机组的功耗.

4) 热力性能系数 $COP_{th} = Q_c/Q_{re} = Q_c/m_{re}(h_8 - h_7)$, 式中: COP_{th} —热力性能系数; Q_{re} —再生空气的加热能耗, kW; m_{re} —再生空气流量, kg/s.

由于船用转轮除湿空调运行的主要耗能是用来加热再生空气, 而系统耗电量相对较小, 因此, 热力性能系数 COP_{th} 是评价系统能量利用率的一个重要指标.

3 实验结果及分析

由于船舶在较短的时间内航行区域跨度大, 舱外环境参数变化剧烈, 因此, 其实验运行工况需要进行有针对性的设置. 根据 ISO7574 标准的要求, 舱外空气的干球温度为 35 ℃, 相对湿度为 70%, 舱内空气的干球温度为 27 ℃, 相对湿度为 50%, 新风比不小于 50%. 另外, 转轮转速为 8 r/h, 空调送风温度为 (18 ± 0.2) ℃, 海水温度为 32 ℃, 辅助制冷机组蒸发器表面温度为 15 ℃, 处理空气流量与再生空气流量之比为 3:1.

3.1 再生温度对系统性能的影响

运行工况参数设定为: 处理空气进口温度为 31.8 ℃, 相对湿度为 65.6%, 处理空气流量为 600 m³/h, 再生温度的调节范围为 80 ~ 140 ℃.

从图 2 和图 3 中可以看出, 随着再生温度的升高, 转轮除湿量由 3.25 g/kg (dry · air) 增加到 6.78 g/kg (dry · air), 增幅达到 108.6%, 热力 COP_{th} 和电力 COP_e 呈下降趋势, 下降率分别为 46.9% 和 65.6%, 而系统制冷量的变化相对比较稳定. 这表明: 随着再生温度的升高, 除湿转轮再生侧的解吸能力得到增强, 因此系统除湿量快速上升; 与此同时, 系统所需要的再生热量大幅度增

加,使除湿转轮内热质交换的程度加剧.但由于辅助制冷机组承担的冷负荷却越来越多,从而导致热力 COP_{th} 和电力 COP_e 随再生温度的升高而下降.因此,在满足船舶空调除湿量要求的前提下,综合考虑系统的热力 COP_{th} 和电力 COP_e 的变化趋势,合理优化的再生温度范围应处于 $100 \sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间.

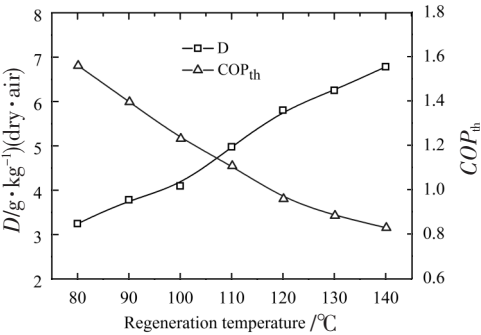


图 2 再生温度对除湿量 D 和热力 COP_{th} 的影响

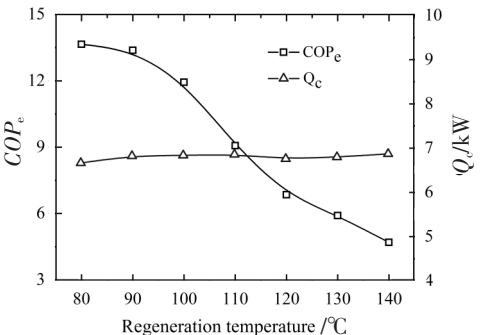


图 3 再生温度对电力 COP_e 和系统制冷量 Q_c 的影响

Fig.2 Effect of regeneration temperature on D and COP_{th} Fig.3 Effect of regeneration temperature on COP_e and Q_c

3.2 处理空气流量对系统性能的影响

运行工况参数设定为:处理空气进口温度为 $31.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 65.6% ,处理空气流量的调节范围为 $300 \sim 900\text{ m}^3/\text{h}$,再生空气温度为 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

从图 4 和图 5 中可以看出,当处理空气流量由 $300\text{ m}^3/\text{h}$ 提高到 $900\text{ m}^3/\text{h}$ 时,转轮除湿量和电力 COP_e 呈先平缓增加后急速下降的趋势,而系统制冷量呈直线增加,增幅达到 39.5% ,热力 COP_{th} 则变化较小,波动幅度小于 6.1% .对于船用转轮除湿空调系统,由于除湿转轮的基体结构和干燥剂材料固定,因此应存在一个最优处理空气流量.当处理空气流量过小时,处理空气在转轮除湿区中的分布则不均匀;而处理空气流量过大时,其对应的风速也过大,造成与除湿转轮内干燥剂的接触时间就越短,这样都不利于转轮的除湿.综合考虑系统性能评价指标的变化趋势,本实验台系统的最优处理空气风量为 $600\text{ m}^3/\text{h}$.

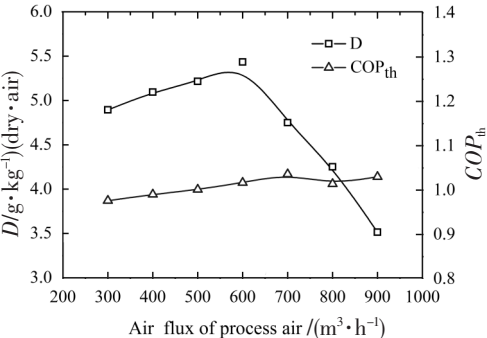


图 4 处理空气流量对除湿量 D 和热力 COP_{th} 的影响

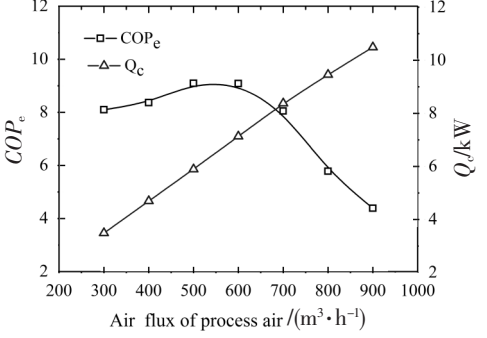


图 5 处理空气流量对电力 COP_e 和系统制冷量 Q_c 的影响

Fig.4 Effect of air flux of process air on D and COP_{th} Fig.5 Effect of air flux of process air on COP_e and Q_c

3.3 处理空气进口温度对系统性能的影响

运行工况参数设定为:处理空气进口温度的调节范围为 $27 \sim 39\text{ }^{\circ}\text{C}$,处理空气含湿量为 22 g/kg ($\text{dry} \cdot \text{air}$),处理空气流量为 $600\text{ m}^3/\text{h}$,再生空气温度为 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

从图 6 和图 7 中可知,随着处理空气进口温度的升高,转轮除湿量的变化并不明显,仅下降了 1.89 g/kg ($\text{dry} \cdot \text{air}$),热力 COP_{th} 和系统制冷量明显上升,增幅分别为 40.1% 和 39.5% ,而电力 COP_e 呈先增加后减小趋势,但总体变化较平缓.当其他条件保持不变时,处理空气中的水蒸气分压力随温度的升高只是略微下降,而转轮除湿的驱动力是处理空气和干燥剂之间的水蒸气分压力差,因此,转轮除湿量下降幅度不太明显.与此同时,由于处理空气在转轮出口处的显热负荷随进口温度的

升高而增加, 中冷器和辅助制冷机组所处理的显热负荷则随之增加, 从而导致系统制冷量和热力 COP_{th} 增加。此外, 当处理空气温度变化较小时, 处理空气中的潜热负荷随转轮除湿量的减小而增加, 而中冷器与辅助制冷机组蒸发器的换热效果则随潜热负荷的增加而下降, 因此, 电力 COP_e 呈现峰型变化趋势是由于处理空气的显热负荷与潜热负荷的变化引起的。

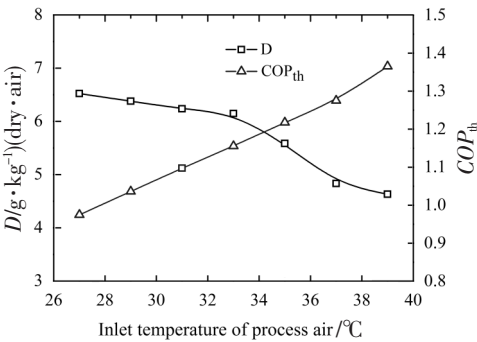


图 6 处理空气进口温度对除湿量 D 和热力 COP_{th} 的影响

Fig.6 Effect of inlet temperature of process air on D and COP_{th}

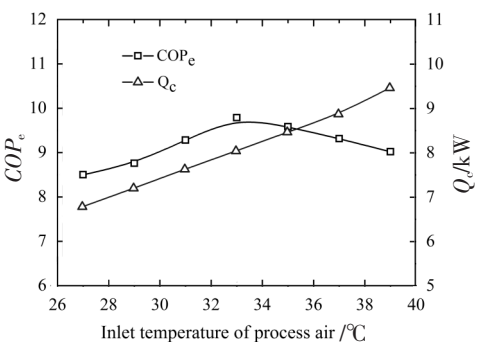


图 7 处理空气进口温度对电力 COP_e 和系统制冷量 Q_c 的影响

Fig.7 Effect process air of inlet temperature on COP_e and Q_c

3.4 处理空气进口含湿量对系统性能的影响

运行工况参数设定为: 处理空气进口温度为 31.8 °C, 处理空气进口含湿量的调节范围为 16 ~ 28 g/kg (dry · air), 处理空气流量为 600 m³/h, 再生空气温度为 120 °C。

从图 8 和图 9 中可以看出, 处理空气进口含湿量从 16 g/kg (dry · air) 增加到 28 g/kg (dry · air) 的过程中, 转轮除湿量、热力 COP_{th} 、电力 COP_e 和系统制冷量呈明显增加趋势。这主要是因为, 当其他条件保持不变的情况下, 处理空气的水蒸气分压力随处理空气进口含湿量的增加而明显升高, 这加大了处理空气和转轮干燥剂之间的水蒸气分压力差, 有利于提高转轮的除湿量。与此同时, 系统所处理的潜热负荷的增加, 加剧了除湿转轮内的热质交换程度, 致使除湿转轮出口处的处理空气的温度和湿度的增加, 以及海水换热器 (中冷器) 及辅助制冷机组所处理的潜热负荷和显热负荷的增加, 进而造成系统耗电量的增加。然而, 随着处理空气进口含湿量增加, 系统增加的制冷量始终大于系统增加的耗电量, 且系统再生能耗相对稳定。因此, 热力 COP_{th} 和电力 COP_e 呈明显增加趋势。总体来看, 整个空调系统的性能随着处理空气进口含湿量的增加而得到较大的提升, 这表明转轮除湿空调在高温高湿的海洋环境下应用具有明显的优势。

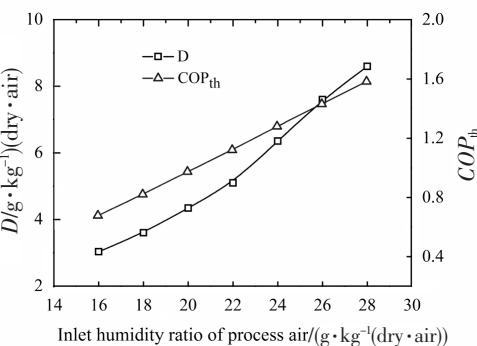


图 8 处理空气进口含湿量对除湿量 D 和热力 COP_{th} 的影响

Fig.8 Effect of process air inlet moisture content on D and COP_{th}

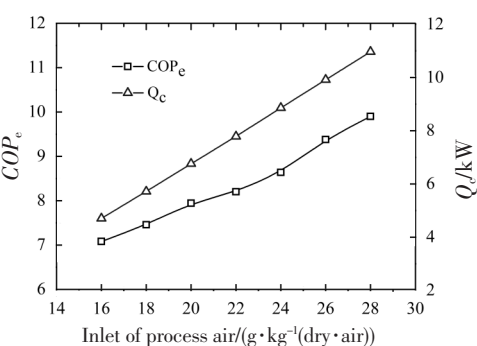


图 9 处理空气进口含湿量对电力 COP_e 和系统制冷量 Q_c 的影响

Fig.9 Effect of process air inlet moisture content on COP_e and Q_c

4 结论

船用转轮除湿空调在实际应用中,随着海洋气候条件和船舶航行地点的变化,系统的运行工况变化剧烈.因此,本文通过实验详细地研究了系统的再生温度和处理空气参数对系统性能的影响.研究表明:1)再生温度对系统性能的影响较大,需要综合考虑并进行合理选择,合理的再生温度范围应处于 $100\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间;2)对于船用转轮除湿空调系统,如果所采用的除湿转轮的基体结构和干燥剂材料一定时,则系统必然存在一个最优处理空气流量;3)处理空气进口温度的变化对热力 COP_{th} 和系统制冷量的影响较大,因此减小新风比或加大对回风能量的回收利用有助于减小系统的能耗;4)处理空气进口含湿量越大,船用转轮除湿空调的运行性能越好,这表明船用转轮除湿空调适合在高湿的海洋环境下应用.

[参考文献]

- [1] 蔡薇. 绿色船舶技术 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2013: 1-19.
- [2] 任文江, 施润华. 船舶动力装置节能 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1991.
- [3] 雷海燕, 刘雪玲. 固体吸附式除湿空调系统及其研究进展 [J]. 天津理工大学学报, 2005, 21 (3): 49-51.
- [4] DIGIOVANNI A, COLAHAN D J. Dynamic desiccant cooling system for ships: US, 6854279B1 [P]. 2005.
- [5] CHEN WU, YANG GUANGHAI. Study on the application of rotary desiccant air-conditioning system on ships [J]. Advanced Science Letter, 2011, 4(4/5): 1410-1415.
- [6] ZHENG GUOJIE, ZHENG CHAOYU. Development of a new marine rotary desiccant air-conditioning system and its energy consumption analysis [J]. Energy Procedia, 2012, 16: 1095-1101.
- [7] 郑国杰, 郑超瑜, 杨光海, 等. 船用转轮除湿空调及其系统方案的比较研究 [J]. 船舶工程, 2012, 34(5): 39-42.
- [8] 杨光海. 船用转轮除湿空调系统的研究 [D]. 厦门: 集美大学轮机工程学院, 2012: 28-36.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 陈 武)