

泡沫陶瓷填料湿化器加湿性能实验研究

刘建建, 徐震, 肖云汉

(中国科学院工程热物理研究所 先进能源动力重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 湿化器是湿空气透平(HAT)循环的关键部件,其性能优劣对于循环的性能有着重要的影响。对采用新型 SiC 泡沫陶瓷填料的湿化器在加压条件下的湿化性能进行了实验研究,分析了水气比、进口水温、操作压力以及进口空气温度对湿化过程的影响,研究表明,提高水气比或进口水温会使进出口空气温差、含湿量差相应增加,湿化器节点温差增大。操作压力升高,进出口空气温差增加,含湿量差减小。进口空气温度增加会使得出口水温升高,但对出口空气的温度及含湿量影响不大。

关 键 词: HAT 循环; 湿化器; 泡沫陶瓷填料; 节点温差

中图分类号: TK479 **文献标识码:** A

引 言

湿空气透平(HAT)循环具有高效率、高比功、低排放等良好的变工况性能,是重要的新型热力循环之一^[1~2]。湿化器是 HAT 循环的关键部件,其性能的优劣对循环的整体性能至关重要。燃气轮机对于湿化器的要求是结构简单、紧凑、低压损、高效低推动力。SiC 泡沫陶瓷填料由多孔泡沫材料制成,具有高比表面积、高空隙率和良好的润湿性能,这些优良的性能使得它适合用于湿化过程。在较宽的操作范围内,对填料湿化器开展实验研究,获取空气和水的进出口参数,是开发合适的湿化器模型及进行湿化器设计所必须要经历的步骤^[3~4]。然而文献中关于加压条件下空气-水系统的实验数据比较缺乏,目前仅有少数几个实验台能提供一些有价值的参考数据^[5~6]。鉴于此,本研究将 SiC 泡沫陶瓷填料应用于湿化器中,搭建了填料湿化器实验台,在较宽的工况范围内开展了空气湿化实验,探讨了各参数对湿化器中空气加湿过程的影响,这对于全面掌握这种新型填料湿化器的性能以及推动 HAT 循环走向实用化具有一定的借鉴意义。

1 实验装置

图 1 为所建立的加压填料湿化器的实验装置示意图。水箱中的水加热到一定温度,经螺杆泵加压后,由湿化器顶部的喷嘴喷入湿化器中。空气经压缩机升压并经空气预热器加热后进入湿化器底部,进口气温可通过改变空气预热器加热功率来调节。水和空气在湿化器中逆流接触,进行传热和传质。湿化器内径 0.125 m,塔高 1.6 m,内部放置 SiC 泡沫陶瓷波纹填料,填料结构如图 2 所示。该填料为板波纹型式,板体采用孔径为 2 mm 的泡沫陶瓷材料,波纹倾角 45°,波距为 25 mm,波峰高度为 9 mm。湿化器中填料直径为 123 mm,高度为 240 mm。测试表明,该填料空隙率为 93%,由 BET 法测得的比表面积为 1.05 m²/g。在湿化器的顶部装有惯性除雾器以除去湿空气中夹带的小液滴,防止小液滴中的金属离子腐蚀燃气轮机的高温部件。实验中,温度测量均采用 Pt100 型铂热电阻传感器。空气质量流量测量采用涡街流量计,精度为 1.0 级。水流量测量采用涡轮流量传感器,精度为 0.5 级。空气进口湿度测量采用美国 Honeywell 公司湿度传感器,测量精度 ±2% RH。空气出口湿度测量采用瑞士 Rotronic 公司高温型温湿度传感器,其测量介质温度可达 200 °C,测量精度可达 ±1.5% RH, ±0.3 °C。

为使实验结果有应用价值,设计的实验工况应尽可能与微燃机实际运行工况相近^[7]。实验选取的操作压力(p) 0.3~0.5 MPa,入口空气通量(G)为 1.79~2.11 kg/(m²·s),入口空气温度(T_{gl})为 35~80 °C。水气质量比(L/G)取为 0.9~1.5。入口水温(T_{w1})为 80~110 °C。通过正交设计实验工况,共获得了 87 组实验结果。

出口空气湿度的测量是湿化实验的难点。由于

收稿日期: 2009-12-11

基金项目: 国家 973 计划项目课题基金资助项目(2007CB210102)

作者简介: 刘建建(1984-),男,湖南株洲人,中国科学院工程热物理研究所、中国科学院研究生院硕士研究生。

出口空气在大部分工况下会接近或者达到饱和状态,湿度传感器长时间在接近于 100 % 的相对湿度下工作,往往出现传感器表面水蒸气冷凝现象。水蒸气冷凝释放出大量的潜热,导致温湿一体传感器所测得温度和相对湿度值与实际的温度和相对湿度值偏差很大。为解决这一问题,自行设计了专门的气体采样和湿度测量装置,通过节流阀与出气管路相连。装置外壁设置电加热系统,实验前先将装置的壁面预热到较高的温度,这样可以有效地防止湿空气在湿度测量装置中冷凝。高压气体经旁通阀节流后,压力降低至接近环境压力,出口空气远离饱和状态,以便于传感器测量。根据测量得到的温度、压力和相对湿度可以计算出节流后空气中的含湿量。由于节流前后空气中的含湿量不变,因而节流后空气中的含湿量等于湿化器出口空气中的含湿量。

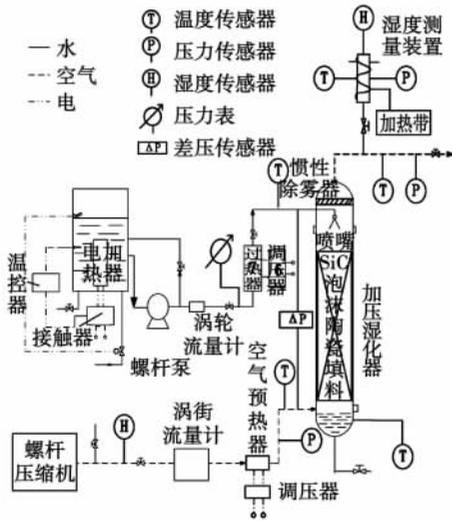


图 1 实验装置示意图

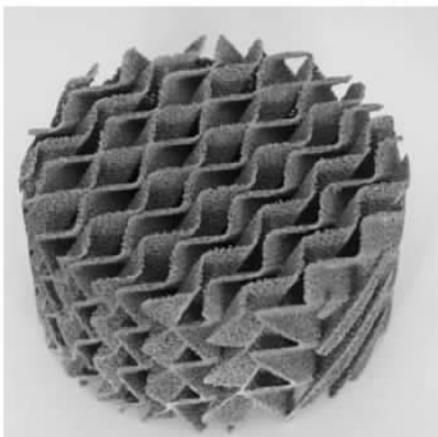
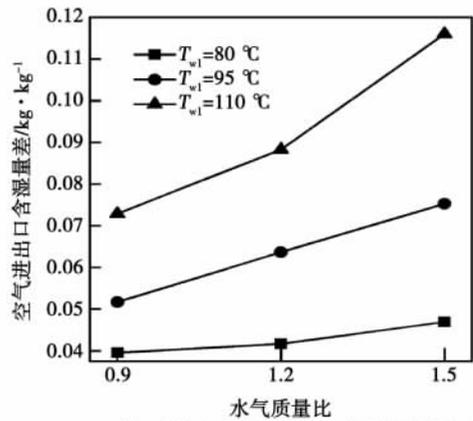


图 2 SiC 泡沫陶瓷波纹填料

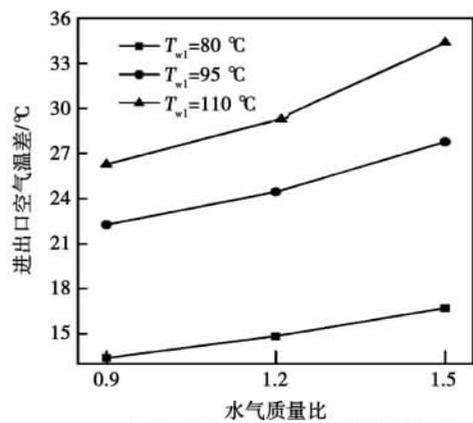
2 实验结果及分析

2.1 水气比、进口水温对湿化过程的影响

水气比、进口水温对空气湿化过程的影响如图 3 所示。此时湿化器内操作压力 0.4 MPa,空气质量通量为 $3.2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,入口空气温度为 $60 \text{ }^\circ\text{C}$,水温分为 $80、95$ 和 $110 \text{ }^\circ\text{C}$ 。由图可知,在同一水温条件下,进出口空气含湿量差、进出口空气温度差均随水气质量比增加而增加,这表明增加水气质量比促进了水气两相之间的传热传质,有利于空气加湿过程的进行。这是由于水流量的增加,会使得填料的润湿面积增加,增加了气液两相之间传热传质的接触面积,使气液两相间的传热传质数量增加。



(a) 水气质量比对空气进出口含湿量差的影响

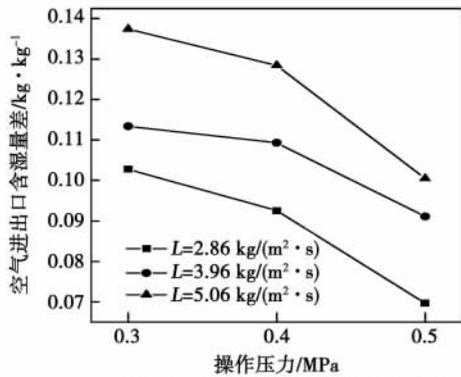


(b) 水气质量比对进出口空气温差的影响

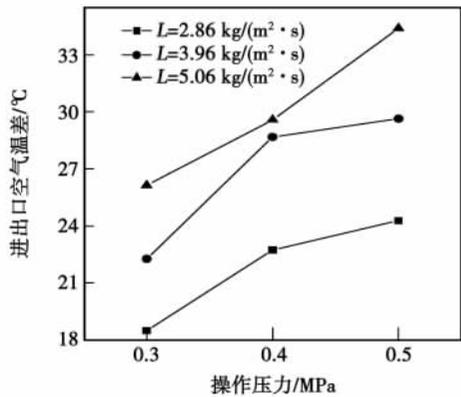
图 3 水气质量比、进口水温对湿化过程的影响

从图 3 中还可以看到,在相同水气质量比条件下,进口水温增加,空气进出口含湿量差和空气进出口温差均显著增大。这是由于水温升高,气液界面水蒸气的分压增加,气液两相间的传热传质推动力增加,因而促进了气液两相间的传热传质。但是进口水温并不是越高越好,进口水温若高于操作压

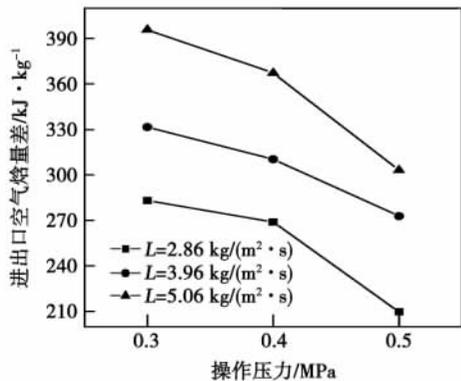
力对应的水的饱和温度,则水进入湿化器后会出现“闪蒸”现象,引起很大的焓损失,反而不利于湿化过程的进行。因此,应合理选择进口水温。



(a) 操作压力对空气进出口含湿量差的影响



(b) 操作压力对进出口空气温差的影响



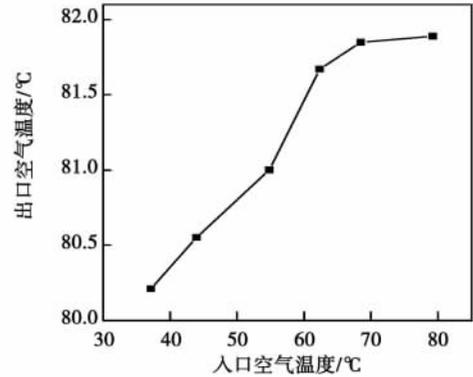
(c) 操作压力对进出口空气焓量差的影响

图 4 操作压力对湿化过程的影响

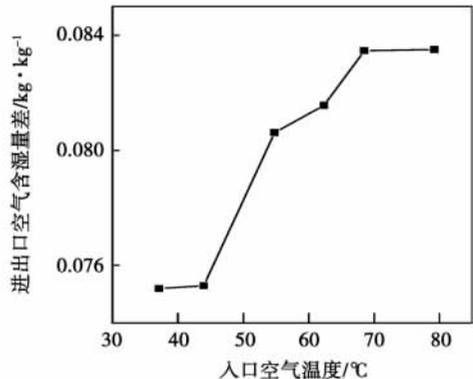
2.2 操作压力对湿化过程的影响

图 4 反映了操作压力对空气湿化过程的影响。此时进口空气质量通量为 $2.8 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 空气温度为 $60 \text{ }^\circ\text{C}$, 进水温度为 $110 \text{ }^\circ\text{C}$, 水气质量比为 0.9 、 1.2 、 1.5 。由图 4 (a)、(b) 可以发现, 在同一进口水量条件下, 随操作压力升高, 进出口空气含湿量差减小, 进出口空气的温度差增大。因此, 气液两相间的

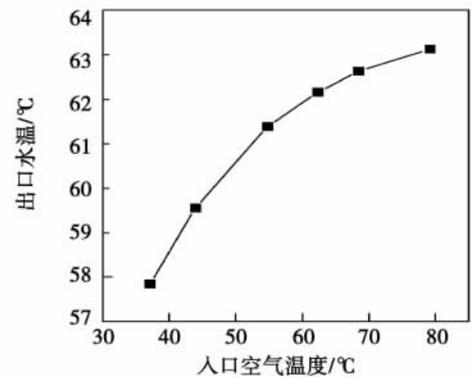
潜热传递量减小, 而显热传递量增加。气液两相间的总传热量等于显热传递量和潜热传递量之和, 它可以由进出口空气的焓差得到。由图 4 (c) 可知, 进出口空气的焓差值随操作压力升高而降低。由此可以推断, 空气湿化过程潜热传递对焓差的影响要远远高于显热传递对焓差的影响。



(a) 入口空气温度对出口空气温度的影响



(b) 入口空气温度对进出口空气含湿量差的影响



(c) 入口空气温度对出口水温的影响

图 5 入口空气温度对湿化过程的影响

2.3 入口空气温度对湿化过程的影响

图 5 反映了入口空气的温度对湿化过程的影响。此时, 进口空气质量通量为 $3.2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 水气质量比为 1.5 , 进水温度 $110 \text{ }^\circ\text{C}$, 操作压力为

0.4 MPa。从图 5 中可以发现,入口空气温度从 35 ℃ 增加到 80 ℃ 的过程中,出口空气温度仅增加了 1.6 ℃,进出口空气含湿量差也仅增加了 0.009 kg/kg (水/干空气)。这说明入口空气温度对出口空气温度及出口空气的湿度影响非常小。入口空气温度对湿化过程的影响主要体现在出口水温上,入口空气温度增加,湿化器的出口水温有所提高。

2.4 水气质量比和入口水温对湿化器节点温差的影响

在湿化器中,节点温差定义为水温和与湿空气具有相同焓值的气液相界面上饱和空气温度之间的最小差值。节点温差在湿化器设计中起着重要的作用,已知空气和水的入口参数(流量、温度)以及节点温差,湿化器的操作线位置就可以确定,就可以保证湿化器在硬件上实现是没有问题的。在湿化器中,节点温差越小,湿化器的出口水温越低,因而较小的节点温差可以增大系统的回热量。

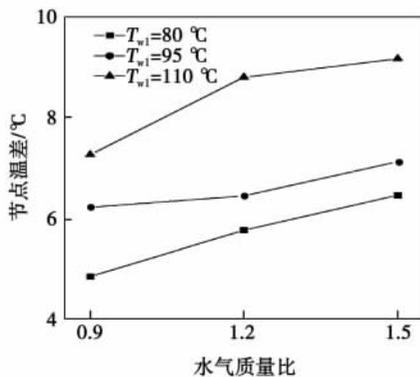


图 6 水气质量比和入口水温对节点温差的影响

图 6 给出了水气质量比和入口水温对节点温差的影响。此时,空气质量通量为 $2.44 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 操作压力为 0.4 MPa。从图中可以看到,随水气质量比增加,节点温差增大。这是由于水气比增加,操作线的斜率增加,操作线的位置远离饱和线,气液两相间的焓差推动力增加,因而节点温差增大。在同一水气质量比下,入口水温越高,节点温差越大。入口水温升高,饱和线位置向上方移动,饱和线和操作线之间的距离增加,气液两相间的焓差推动力增加,因而节点温差也增大。

3 结 论

本研究在很宽的操作工况范围内,对 SiC 泡沫陶瓷波纹填料湿化器的加湿性能开展了实验研究,考察了水气质量比、进口水温、操作压力以及入口空气的温度对空气湿化过程的影响,得出了以下结论:

(1) 水气质量比及进口水温的增加有利于空气加湿过程。随着水气质量比增加,气液两相间的传热传质增加,进出口空气温度差值以及空气含湿量差值增加。在同一水气质量比条件下,进口水温增加,空气进出口含湿量差、空气进出口温差均增大。

(2) 湿化器内操作压力升高,进出口空气含湿量差以及焓差减小,温度差增加。

(3) 随入口空气的温度升高,出口空气的温度及进出口空气含湿量差变化很小,出口水温有所增加。

(4) 水气质量比或入口水温增加,均会使得湿化器节点温差增加。

参考文献:

- [1] JONSSON M, YAN J Y. Humidified gas turbines—a review of proposed and implemented cycles [J]. Energy, 2005, 30: 1013–1078.
- [2] 王玉璋, 翁史烈, 李一兴, 等. 逆流式空气湿化器加湿性能的实验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 152–156.
- [3] PARENTE J O S, TRAVERSO A, MASSARDO A F. Saturator analysis for an evaporative gas turbine cycle [J]. Applied thermal engineering, 2003, 23: 1275–1293.
- [4] DALILI F. Humidification in evaporative power cycle [D]. Sweden: Royal Institute of Technology, 2003.
- [5] AGREN N D, WESTERMARK M O, BARTLETT M A, et al. First experiments on an evaporative gas turbine pilot power plant: water circuit chemistry and humidification evaluation [J]. Engineering for Gas Turbines and Power, 2002, 124(1): 96–102.
- [6] ARAKI H, HIGUCHI S, KOGANEZAWA T, et al. Test results from the advanced humid air turbine system pilot plant—part 2: humidification, water recovery and water quality // International Gas Turbine Institute Cycle Innovations [C]. Berlin: ASME, 2008. 701–712.
- [7] PARENTE J, TRAVERSO A, MASSARDO A. Micro humid air cycle part A: thermodynamic and technical aspects // International Gas Turbine Institute Cycle Innovations [C]. Atlanta: ASME, 2003. 221–229.

(编辑 伟)

ting the relationship between the average circumferential speed ratio and the rotor swirling constitute the key factors influencing the stability of the rotor system. The influence of other empirical coefficients, however, is invariably within 5%. This result can provide a theoretical basis for lowering relevant experiment costs. **Key words:** rotor-gland seal system, Muszynska model, stability, seal fluid excitation

泡沫陶瓷填料湿化器加湿性能实验研究 = **Experimental Study of the Humidifying Performance of a Foam Ceramic Packing Humidifier** [刊, 汉] LIU Jian-jian, XU Zhen, XIAO Yun-han (Key Laboratory on Advanced Energy and Power, Engineering Thermophysics Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100190) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26 (1) . - 27 ~ 30

A humidifier constitutes a key component in a humid air turbine cycle and its performance has an important influence over the cycle performance. The humidifying performance of a humidifier under a pressurization condition using a new-type SiC foam ceramic packing was experimentally studied and the influence of the water/air ratio, inlet water temperature, operating pressure and inlet air temperature on the humidifying process, analyzed. The research results show that to increase the water/air ratio or inlet water temperature can increase accordingly the inlet and outlet air temperature difference and moisture content difference as well as the node temperature difference of the humidifier. To increase the operating pressure can increase the inlet and outlet air temperature difference and decrease the moisture content difference. To increase the air temperature can increase the outlet water temperature but exercise no big influence on the outlet air temperature and moisture content. **Key words:** HAT (humid air turbine) cycle, humidifier, foam ceramic packing, node temperature difference

竖直矩形细通道内水沸腾换热的数值模拟 = **Numerical Simulation of Water Boiling Heat Exchange Inside a Vertical Rectangular Slim Passage** [刊, 汉] GUO Lei, ZHANG Shu-sheng, CHENG Lin (Research Center for Thermal Sciences and Engineering, Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(1) . - 31 ~ 35

Studied was the boiling heat exchange inside a vertical rectangular slim passage of 1 and 0.1 mm width. Through the adoption of a numerical simulation method, the bubble formation, growth and separation process were investigated. The influence of the phase interface movement and change on the pressure difference inside the system and average surface heat exchange coefficient was obtained by using a geometrical reconstruction and interface tracing method. During the calculation, the actions of gravity, surface tension and wall surface adhesion were taken into account. It has been found that the difference in the width of the passage produces a very big influence on the bubble growth mode and morphology and thereby leads to a change in the critical heat flux density. The action of the surface tension is far bigger than that of the gravity in the boiling heat exchange process inside the slim passage. With a decrease of the passage size, the boiling heat exchange coefficient will increase conspicuously, proving that the slim passage plays a role of intensifying the heat exchange. As idealization assumptions were made in the numerical calculation, they may result in a boiling heat exchange coefficient obtained by the numerical simulation calculation mostly higher than the test one currently available for boiling heat exchange inside a slim passage. **Key words:** slim passage, boiling heat exchange, numerical simulation, intensified heat exchange