

燃料电池用空气加湿塔工艺条件 对空气湿度的影响研究

黄波^{1,2}, 马云龙^{1,2}, 龙雨谦³, 胡像锋^{1,2}, 李全领^{1,2}, 雷姣^{1,2*}
(1. 东方电气(成都)氢能科技有限公司, 四川 成都 611731;
2. 氢电转换四川省重点实验室, 四川 成都 611731;
3. 西南化工研究设计院有限公司, 四川 成都 610225)

摘要:针对 100 kW 质子交换膜燃料电池发电系统用空气填料加湿塔,采用 Aspen Plus 软件建立空气加湿过程模拟流程,分别考察加湿喷淋水温度、加湿喷淋水流量和空气入口温度和湿度对加湿后空气湿度的影响。模拟计算结果表明,前三者对加湿后空气湿度均有影响,其中加湿喷淋水流量影响最大,空气入口温度和湿度的影响几乎可以忽略,加湿喷淋水温度影响介于两者之间。兼顾加湿塔出口空气湿度和系统经济性,典型的 100 kW 燃料电池发电系统最适宜的加湿喷淋水温度为 62℃,最适宜加湿喷淋水流量为 2 600~3 000 kg/h。加湿塔对进口空气温度及湿度剧烈扰动有良好的适应性,一方面可以减小环境温度变化对系统性能指标和稳定性的影响,同时可取消空压机出口中冷器,实现降低系统复杂性,提高系统经济性的目的。搭建了 100 kW 燃料电池发电用加湿试验装置,并进行了试验验证,验证结果表明,试验装置能够满足 100 kW 燃料电池发电系统对空气湿度的要求,试验结果与模拟计算结果吻合,为加湿塔进一步设计优化奠定了坚实的基础。

关键词:燃料电池;填料塔;加湿;Aspen Plus

中图分类号:TK91

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)01-0239-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.01.039

Study of the process conditions effect on air humidity in air humidification towers for fuel cell systems

HUANG Bo^{1,2}, MA Yun-long^{1,2}, LONG Yu-qian³, HU Xiang-feng^{1,2}, LI Quan-ling^{1,2}, LEI Jiao^{1,2*}
(1. DongFang Electric (Chengdu) Fuel Cell Technology Co., Ltd., Chengdu 611731, China;
2. Sichuan Provincial Key Laboratory of Hydrogen and Electricity Conversion, Chengdu 611731, China;
3. Southwest Institute of Chemical Co., Ltd., Chengdu 610225, China)

Abstract: A simulation model of the air humidification process in the packed tower is established, which is used for a 100 kW proton exchange membrane fuel cell power generation system. In the simulation model, the effects of spray water temperature, spray water flow rate, air inlet temperature and humidity on the humidity of the outlet air from the packed tower were investigated respectively. The simulation results show that the first three factors have an impact on the outlet air humidity, of which the spray water flow rate has the greatest impact, air inlet temperature and humidity are almost negligible, and the spray water temperature is between the two. Considering the outlet air humidity of the packed tower and system economy, the most suitable spray water temperature for the representative 100 kW fuel cell power generation system is 62℃, and the most suitable spray water flow rate is 2 600 kg/h to 3 000 kg/h. The packed tower has good adaptability to the severe disturbance of inlet air temperature and humidity, which can reduce the impact of ambient temperature changes on system performance and stability, and can also eliminate the intercooler at the outlet of the air compressor, thus reducing the complexity and lowering the cost of the system. A humidification test platform for a 100 kW fuel cell power generation system was built and experimentally verified. The test results show that the packed tower can meet the air humidity requirements of the 100 kW fuel cell power generation system, and the test results match the simulation results. The study lays a solid foundation for the further design optimization of the humidification tower.

Key words: fuel cell; packed tower; humidification; Aspen Plus

氢能是实现高碳能源向低碳能源、最终转变为零碳能源的第三次能源革命的重要能源载体。质子交换膜燃料电池 (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) 是一种能量转换装置,通过电化学反应将贮存在燃料(氢气或富氢燃料)和氧化剂(空气或氧气)中的化学能直接转换为电能,是实现氢能

清洁高效利用的重要途径。

PEMFC 发电系统主要由氢气子系统、空气子系统、热管理系统和控制系统构成,其高效长寿命运行需要质子交换膜处于充分的水合状态,具体来说需要控制氢气和空气湿度在合理的范围内,从而保证质子交换膜具有较高的质子电导率^[1],进而达到

收稿日期:2025-04-11;修回日期:2025-10-13

作者简介:黄波(1986-),男,硕士,高级工程师,研究方向为氢能及燃料电池系统集成,hbcetscu@163.com;雷姣(1985-),女,博士,高级工程师,研究方向为氢能及燃料电池系统集成,通讯联系人,cqzxljcd@163.com。

提高燃料电池发电系统整体性能、提高系统寿命的目的。

氢气加湿目前主要采用电堆阳极出口氢气循环的方式实现,空气加湿目前主要有膜增湿和焓轮增湿^[2] 2 种方式,其中膜增湿是目前燃料电池空气加湿的主要方式。膜增湿利用电堆阴极出口的湿热空气对干空气进行加湿,通过膜增湿器将电堆出口湿热空气中的水和能量传递给入堆干空气,从而实现入堆干空气加湿。受制于加湿原理和加湿器成本,目前大规模商业化应用的膜增湿器一般将干空气加湿至 40%~60%,无法满足系统长寿命对空气湿度的要求;膜增湿器属于被动型加湿器,无法根据环境湿度变化主动调节空气进堆湿度,当系统在低湿(如沙漠)等条件运行需要调整控制策略以保障系统稳定可靠运行;同时,膜增湿器压损大,导致空压机等辅助部件功耗增加,系统效率降低;最后,膜增湿器还存在寿命短、长期使用加湿性能下降、膜管破裂窜气、更换成本高等问题,不利于系统全生命周期寿命提高、效率提升和成本减控。

针对现有膜增湿器存在的加湿能力不足、环境适应性差、压损大、成本高等问题,目前多家科研机构/企业开始寻找其他的增湿方式以代替膜增湿器。Nikiforow 等^[3]采用鼓泡加湿器对 50 kW 固定式发电系统氢气和空气加湿进行了研究,研究人员首先对空气加湿性能进行研究,相对于电堆操作温度 65℃,通过鼓泡加湿可将空气露点温度提高到 59℃以上;同时,采用鼓泡加湿器对氢气进行加湿,通过控制加湿用水流量和热量可实现氢气出口湿度的调节。郑伟安等^[4]采用喷淋式加湿器,在增湿器中设置换热管实现空气的加湿和加热,该装置能使空气出口平均相对湿度达到 91%~95%。Zhang 等^[5]采用喷淋加湿方式对一台 5 kW 小型燃料电池空气加湿系统进行了研究,加湿用喷淋水通过电堆出口 90~95℃冷却液实现加热,加热后的喷淋水进入雾化喷嘴进行雾化,通过改变喷淋水的流量和温度可使燃料电池用空气露点超过 80℃。传统空气加湿或空气干燥系统主要用于海水淡化处理和空调系统加湿,普遍采用填料加湿塔方式。国内外研究者^[6-11]对相关的加湿系统进行了研究,研究结果表明,加湿塔通常采用板式塔和填料塔,其中填料塔在气体流量较小时,在传质效率、压降、成本方面的优势更为明显。

本研究采用填料加湿塔对典型的 100 kW PEMFC 发电系统用空气进行加湿性能研究,首先通过

Aspen Plus 建立填料加湿塔工艺流程和设备参数模型,考察加湿系统是否能够满足加湿后空气露点温度大于等于 60℃的系统设计要求,同时考察加湿喷淋水流量、加湿喷淋水温度、加湿塔入口空气温度和湿度对加湿塔出口空气湿度的影响,最后设计搭建了加湿试验装置并验证其对典型的 100 kW PEMFC 发电系统的适用性和模拟计算模型的可靠性。

1 模拟流程的建立

1.1 软件版本

本模拟计算采用 Aspen Tech 的 Aspen Plus V9 版本模拟软件。

1.2 模拟条件

采用典型的 100 kW PEMFC 发电系统额定操作点作为模拟的基本工艺操作条件,并考察加湿喷淋水温度、加湿喷淋水流量和空气进填料加湿塔的温度和湿度对加湿塔出口空气的相对湿度、露点和电堆温度下的相对湿度的影响,以确定经济和适宜的填料塔工艺操作条件。具体操作条件见表 1 所示。

表 1 100 kW 系统用空气加湿操作条件表

项目	AIRIN 填料塔进口干空气		H ₂ OIN 加湿用去喷淋水	
	体积流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	摩尔分数/ %	质量流量/ (kg·h ⁻¹)	质量分数/ %
Air	340	100	0	0
H ₂ O	0	0	3000	100
总计	340	100	3000	100
压力 P/kPa	131		130	
温度 T/℃	60		63	

1.3 物性方法选择

孙兰义^[12]在介绍 Aspen Plus 软件模拟物性方法的选择时,对于压力低于 200 kPa 的低压气体视为理想气体,将相互作用很小或者相互作用彼此抵消的液体视为理想液体,推荐采用 IDEAL 物性方法进行计算。理想物性方法包含了拉乌尔定律和亨利定律。本系统气体压力为 130 kPa,液体为水,由于系统压力低,故采用理想(IDEAL)物性方法进行模拟计算。

1.4 工艺流程的建立

利用 Aspen Plus 建立空气加湿过程模拟流程图 1 所示。利用 Aspen Plus 内置的 Block,选择 Rad-Frac 作为加湿用填料塔模型。AIRIN 为干空气进料,H₂OIN 为加湿喷淋水进料,AIROUT 为填料塔出

口被加湿空气, H₂O_{OUT} 为加湿后被冷却喷淋水。根据平衡模型(Equilibrium)计算得到初步的理论板数为 5, 填料塔直径为 0.45 m, 填料高度为 1 m。将以上初步计算结果输入基于速率(Rate-Based)的模拟模型, 干空气和加湿喷淋水分别从第 6 块和第 1 块理论板进入, 填料采用鲍尔环, 为了提高填料塔的传质效率, 采用比表面积最大的公称尺寸 DN 为 16 mm 的填料。

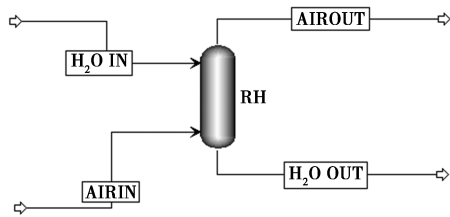


图 1 100 kW 燃料电池系统用空气加湿塔 Aspen Plus 模拟流程

采用灵敏度分析, 分别设置加湿喷淋水温度、加湿喷淋水流量和进填料加湿塔的空气温度和湿度为自变量, 加湿塔出口空气 AIR_{OUT} 的相对湿度 RH、露点温度 DT 和电堆温度下的相对湿度为因变量, 考察加湿塔的运行性能。

2 结果与讨论

2.1 加湿喷淋水温度对加湿塔出口空气湿度的影响

改变加湿喷淋水的温度, 考察加湿喷淋水温度对加湿塔出口空气的相对湿度、露点温度和电堆温度(本系统按照 65℃ 考虑)下的相对湿度的影响, 模拟结果如表 2 所示。

表 2 加湿喷淋水温度对出口空气湿度的影响

加湿喷淋水温度/℃	加湿塔出口空气相对湿度/%	露点温度/℃	电堆温度下的相对湿度/%
55.0	99.8	54.3	61.3
56.0	99.8	55.2	64.1
57.0	99.9	56.2	67.0
58.0	99.9	57.1	67.0
59.0	99.9	58.0	73.1
60.0	100.0	58.9	76.3
61.0	100.0	59.8	79.5
62.0	100.0	60.7	82.9
63.0	100.0	61.6	86.3
64.0	100.0	62.5	89.8
65.0	100.0	63.3	93.4

66.0	100.0	64.2	97.0
67.0	100.0	65.0	100.0
68.0	100.0	65.8	100.0
69.0	100.0	66.7	100.0
70.0	100.0	67.5	100.0
71.0	100.0	68.2	100.0
72.0	100.0	69.0	100.0
73.0	100.0	69.8	100.0
74.0	100.0	70.5	100.0
75.0	100.0	71.2	100.0
76.0	100.0	71.9	100.0
77.0	100.0	72.6	100.0
78.0	100.0	73.3	100.0
79.0	100.0	74.0	100.0
80.0	100.0	74.6	100.0

注:加湿喷淋水流量 3 000 kg/h, 空气入口温度 60℃, 进口空气为绝干空气, 其他操作条件见表 1。

由表 2 可以看出, 当加湿喷淋水温度从 55.0℃ 提高到 80.0℃ 时, 加湿塔出口空气的相对湿度在 59.0℃ 时达到 100.0%。随着加湿喷淋水温度进一步提升, 加湿塔出口的空气露点温度和电堆温度下的相对湿度也逐渐增大, 且两者增大趋势保持一致。在加湿喷淋水温度达到 62.0℃ 时, 加湿塔出口空气露点可达到 60.7℃, 电堆温度下的相对湿度超过 80%, 可满足该体系下的燃料电池电堆所需空气湿度要求。

从表 2 中可以分析得到, 提高加湿喷淋水温度可提高加湿塔出口的空气露点温度和电堆温度下的相对湿度, 但对加湿塔出口温度下空气的相对湿度影响不大, 本系统适宜的加湿喷淋水温度为 62℃。对 PEMFC 发电系统而言, 如果采用电堆出口冷却液对加湿用水进行加热, 加湿喷淋水温度的上限由电堆出口冷却液温度确定, 若要寻求更高的电堆温度下的相对湿度, 需要设置其他辅助加热措施。

2.2 加湿喷淋水量对加湿塔出口空气湿度的影响

通过改变加湿喷淋水流量考察加湿喷淋水流量对加湿塔出口空气的相对湿度、露点温度和电堆温度(本系统按照 65℃ 考虑)下的相对湿度的影响, 模拟结果如表 3 所示。

由表 3 可以看出, 在加湿喷淋水流量为 1 000 kg/h 时, 加湿塔出口空气的相对湿度达 100%, 加湿喷淋水流量超过 1 000 kg/h 对出口空气的相对湿度无影响。但随着加湿喷淋水流量从 1 000 kg/h 增大

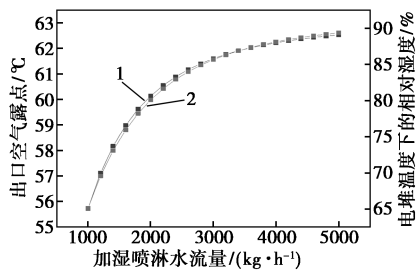
表 3 加湿喷淋水流量对出口空气湿度的影响

加湿喷淋水流量/ (kg·h ⁻¹)	加湿塔出口空气 相对湿度/%	露点温度/ ℃	电堆温度下的 相对湿度/%
1000	100.0	55.7	65.1
1200	100.0	57.1	69.5
1400	100.0	58.2	73.1
1600	100.0	59.0	75.9
1800	100.0	59.6	78.2
2000	100.0	60.1	80.1
2200	100.0	60.5	81.6
2400	100.0	60.9	82.9
2600	100.0	61.2	84.0
2800	100.0	61.4	84.9
3000	100.0	61.6	85.6
3200	100.0	61.8	86.3
3400	100.0	61.9	86.8
3600	100.0	62.0	87.3
3800	100.0	62.1	87.7
4000	100.0	62.2	88.1
4200	100.0	62.3	88.4
4400	100.0	62.4	88.7
4600	100.0	62.4	88.9
4800	100.0	62.5	89.1
5000	100.0	62.5	89.3

注:加湿喷淋水温度 63℃,空气入口温度 60℃,进口空气为绝干空气,其他操作条件见表 1。

到 5 000 kg/h, 出口空气的露点从 55.7℃ 增大到 62.5℃, 电堆温度下的空气相对湿度从 65.1% 增加到 89.3%。

以加湿喷淋水流量为横坐标, 出口空气露点和电堆温度下的相对湿度为纵坐标, 得到加湿喷淋水流量对加湿塔出口空气湿度的影响如图 2 所示。从图 2 可以看出, 随着加湿喷淋水流量增加, 出口空气露点和电堆温度下的相对湿度快速增加后趋势放缓, 这说明增加加湿喷淋水流量到一定程度后对出



1—出口空气露点; 2—电堆温度下的相对湿度

图 2 加湿喷淋水流量对出口空气湿度的影响

口空气湿度的影响减弱。因此当加湿喷淋水流量增大到一定程度时, 增加加湿喷淋水流量虽然可增加空气湿度, 但系统性能增加量不足以弥补因增加加湿喷淋水流量带来的循环泵功耗增加量。所以在选择加湿喷淋水流量时需合理取值以平衡空气湿度和循环泵功耗, 本系统最佳加湿喷淋水流量在 2 400~3 000 kg/h 之间。

2.3 环境温度对加湿塔出口空气湿度的影响

改变环境温度, 考察环境温度对加湿塔出口空气的相对湿度、露点温度和电堆温度(本系统按照 65℃ 考虑)下相对湿度的影响, 模拟结果如表 4 所示。

表 4 空气进口温度对出口空气湿度的影响

环境温度/ ℃	加湿塔出口空气 相对湿度/%	露点温度/ ℃	电堆温度下的 相对湿度/%
-40	100.0	61.2	84.1
-35	100.0	61.2	84.2
-30	100.0	61.2	84.3
-25	100.0	61.3	84.3
-20	100.0	61.3	84.4
-15	100.0	61.3	84.5
-10	100.0	61.3	84.6
-5	100.0	61.3	84.6
0	100.0	61.4	84.7
5.0	100.0	61.4	84.8
10.0	100.0	61.4	84.9
15.0	100.0	61.4	84.9
20.0	100.0	61.4	85.0
25.0	100.0	61.5	85.1
30.0	100.0	61.5	85.2
35.0	100.0	61.5	85.2
40.0	100.0	61.5	85.3
45.0	100.0	61.5	85.4
50.0	100.0	61.5	85.5
55.0	100.0	61.6	85.6
60.0	100.0	61.6	85.6
65.0	100.0	61.6	85.7
70.0	100.0	61.6	85.8
75.0	100.0	61.7	85.9
80.0	100.0	61.7	86.0
85.0	100.0	61.7	86.0
90.0	100.0	61.7	86.1
95.0	100.0	61.7	86.2
100.0	100.0	61.8	86.3

注:加湿喷淋水温度 63℃, 加湿喷淋水流量 3 000 kg/h, 进口空气为绝干空气, 其他操作条件见表 1。

由表4可以看出,环境温度的大幅度变化对出口空气的相对湿度无影响,均可实现100%加湿;随着环境温度从-40℃提高到100.0℃,出口空气露点从61.2℃增加到61.8℃,电堆温度下的相对湿度从84.1%增加到86.3%,表明进口空气温度对出口空气湿度几乎无影响。

为了考察加湿塔对环境湿度的适应性,通过改变加湿塔入口空气湿度,考察环境湿度对加湿塔出口空气的相对湿度、露点温度和电堆温度(本系统按照65℃考虑)下的相对湿度的影响,模拟结果如表5所示。

表5 空气湿度对出口空气湿度的影响

环境湿度/ %	加湿塔出口空气 相对湿度/%	露点温度/ ℃	电堆温度下的 相对湿度/%
12.2	100.0	61.6	85.6
16.3	100.0	61.6	85.6
20.9	100.0	61.6	85.6
26.1	100.0	61.6	85.6
32.0	100.0	61.6	85.6
38.6	100.0	61.6	85.6
45.9	100.0	61.6	85.6
54.2	100.0	61.6	85.6
63.5	100.0	61.6	85.6
73.9	100.0	61.6	85.6
85.5	100.0	61.6	85.6
98.5	100.0	61.6	85.6
99.9	100.0	61.6	85.6

注:加湿喷淋水温度63℃,加湿喷淋水流量3 000 kg/h,环境空气温度25℃,其他操作条件见表1。

从该结果可以分析得出,利用加湿塔对空气进行加湿时,环境湿度和环境湿度对出口空气湿度几乎无影响,加湿塔可大大增加系统的环境适应性。由于发电系统空气大多来自空压机,当环境温度较高时,空压机出口的空气温度较高,根据空压机升压比不同,空压机出口空气温度可能超过100℃,为了实现系统稳定可靠运行,目前系统设计一般会配置中冷器对空气进行冷却;当环境温度较低(如-30℃),空气水含量和湿度较低,采用膜加湿器对空气加湿能力有限,不能满足PEMFC发电系统对空气湿度的需求。采用加湿塔对空气进行加湿,其对空气的进口温度和湿度的适应性大大增强,且可取消空压机后的中冷器,从而降低系统复杂性,提升系统经济性。

3 试验验证

为了验证所设计加湿塔的性能,设计并搭建了加湿系统试验装置。试验装置的工艺流程简图如图3所示。

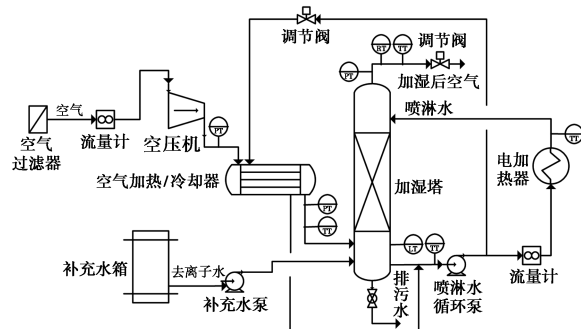


图3 加湿系统工艺流程简图

待加湿干空气经空气过滤器进入空压机,升压后进入空气加热/冷却器,空气被加热或冷却至所需温度后,进入加湿塔底部,在加湿塔中,空气至下而上与来自塔顶的加湿喷淋水进行传热传质后,经塔顶除沫器除去液滴后排放。空压机前的空气管道中设置了空气流量计,用于空气流量计量和控制。空气加热/冷却器后设置了压力和温度传感器,温度传感器与加湿/冷却水流量调节阀配合,控制入塔空气的温度。塔顶出口湿空气管道上设置了压力、温度和湿度传感器,压力传感器用于与出口管道上的背压调节阀配合,调节入塔空气压力,温度和湿度传感器用于对加湿后的空气参数进行精确测量。

加湿塔喷淋水采用循环喷淋方式,塔底被冷却的去离子水经喷淋水循环泵升压和电加热器加热后,进入加湿塔顶部喷淋,在加湿塔内将空气加湿后,进入塔底再次被循环泵升压,从而实现循环喷淋加湿。由于加湿过程会消耗去离子水,系统设置了补充水箱和补充水泵,补充水箱内储存的去离子水用于向加湿系统补水,补充水泵通过设置在加湿塔塔底的液位传感器控制加湿塔塔底液位在合理范围。喷淋水循环回路设置了去离子水流量控制传感器,用于计量和控制喷淋水循环泵转速,从而控制喷淋水的流量。喷淋水温度通过设置在电加热器后的温度传感器反馈调节电加热器加热功率实现。喷淋水循环泵出口还设置了加热/冷却支路,用于空气加热/冷却器中空气的加热或冷却。

按照图3所示的工艺流程,自主开发搭建了加湿塔试验装置。考察该装置用于100 kW燃料电池发电系统的适应性,分别对比100 kW操作参数、模

拟计算数据和实际试验装置数据,结果见表 6 所示。

表 6 加湿塔性能试验结果表

项目	100 kW 燃料电池发电系统操作参数及要求	模拟计算参数及结果	试验装置操作参数及结果
空气流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	340	340	335
喷淋水流量/($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	3000	3000	2965
喷淋水温度/ $^{\circ}\text{C}$	70.0	70.0	69.6
操作压力/kPa	131	131	131.5
加湿后空气露点要求/ $^{\circ}\text{C}$	≥ 66.0	67.4	66.1
加湿塔压力损失要求/kPa	≤ 2.0	0.6	1.0

从表 6 结果可以看出,加湿塔试验装置在加湿喷淋水量和加湿喷淋水温度均略小于 100 kW 燃料电池发电系统要求参数情况下实测的加湿后空气露点为 66.1 $^{\circ}\text{C}$,满足 100 kW 燃料电池发电系统要求,且加湿塔试验装置的空气压损仅为 1 kPa,优于 100 kW 燃料电池发电系统的压损要求。与模拟计算结果相比,试验装置的空气露点略小于模拟结果,可能的原因为试验装置的喷淋水量和喷淋水温度小于模拟计算要求。

通过本试验装置,验证了自主设计的加湿塔装置能够满足 100 kW 燃料电池发电系统的加湿性能要求;试验结果与模拟计算结果吻合,加湿塔设计计算模型合理,可以用于加湿塔设计优化。

4 结论

(1) 提高加湿喷淋水温度,可提高加湿塔出口空气湿度,但对空气露点影响不大。考虑到加湿喷淋水温度的上限受限于电堆冷却液出堆温度,针对典型的 100 kW PEMFC 发电系统,额定工况下适宜的加湿喷淋水温度为 62 $^{\circ}\text{C}$,也可采用辅助加热措施对加湿喷淋水进行辅助加热升温,从而进一步提升空气露点温度。

(2) 加湿喷淋水流量对出口空气湿度影响较大,但随着加湿喷淋水流量的增大,出口空气湿度增大趋势逐渐放缓。兼顾较高的出口空气湿度和较好的经济性,典型的 100 kW PEMFC 发电系统的经济加湿喷淋水流量为 2 400~3 000 kg/h。

(3) 进入加湿塔的空气温度宽范围变化对出口空气湿度影响几乎可以忽略。鉴于此,系统设计中可取消空压机出口中冷器,利用加湿塔对高低温空

气的缓冲能力,减小环境温度变化的影响,以及空压机升压后的高温对电堆的影响,从而降低系统复杂性,提高系统经济性。加湿塔的加湿性能不受入口空气湿度变化的影响,可以适应不同温湿度环境条件,增加了燃料电池发电系统运行稳定性和环境适应能力。

(4) 搭建了加湿系统试验装置,验证其对典型的 100 kW PEMFC 发电系统的适用性和模拟计算模型的可靠性。试验结果表明,加湿试验装置能够满足典型的 100 kW PEMFC 发电系统要求的空气露点和加湿塔的压降要求,试验结果与模拟计算结果基本吻合。

参考文献

- [1] 焦魁,王博文,杜清,等.质子交换膜燃料电池水热管理[M].北京:科学出版社,2020:17.
- [2] 衣宝廉,俞红梅,侯中军,等.氢燃料电池[M].北京:化学工业出版社,2021:260.
- [3] Nikiforow K, Ihonen J, Keranen T, et al. Modeling and experimental validation of H_2 gas bubble humidifier for a 50 kW stationary PEMFC system[J]. Hydrogen Energy, 2014, 39: 9768-9781.
- [4] 郑伟安,许思传,倪淮生.燃料电池发动机系统空气加湿器实验研究[J].上海汽车,2008,(12):6-9.
- [5] Zhang H, Qian Z, Yang D J, et al. Design of an air humidifier for a 5 kW proton exchange membrane fuel cell stack operated at elevated temperature[J]. Hydrogen Energy, 2013, 38: 12353-12362.
- [6] Rumen D, Simeon D N, Daniela D A, et al. Ceramic block packing of Honeycomb type for absorption processes and direct heat transfer[J]. Chemical Engineering Science, 2016, 155: 127-140.
- [7] Zohreh R A, Mohammad S H, Leile R A. Air humidification-dehumidification process for desalination: A review[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2020, 80: 1-32.
- [8] Mostafa H S, Ibrahim A S, Mohamed A A, et al. Experimental investigation of packed-bed cross-flow humidifier[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 117: 584-590.
- [9] Chen J J, Han D, He W F, et al. Theoretical and experimental analysis of the thermodynamic and economic performance for a packed bed humidifier[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 206: 1-16.
- [10] 赵全胜,郑宏飞,马兴龙,等.多级淡水吸收式交叉流加湿除湿海水淡化系统研究[J].工程热物理学报,2019,40(10):2226-2231.
- [11] 徐辉.太阳能辅助增湿除湿海水淡化增效机理与实验研究[D].上海:上海交通大学机械与动力工程学院,2020.
- [12] 孙兰义.化工过程模拟实训—Aspen Plus 教程[M].北京:化学工业出版社,2017:26. ■