

膜式热泵与 空气湿度调节膜 操作原理

黄斯珉 著



科学出版社

东莞理工学院学术专著资金资助出版

膜式热泵与空气湿度调节 膜操作原理

黄斯珉 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书结合作者的部分研究成果,以及在不同科研实践中的体会和积累的经验,系统地介绍了膜式热泵技术和膜式空气湿度调节中的膜操作原理。全书共分为9章,用通俗易懂的科学语言介绍了膜流道、膜接触器流动与传热传质及膜式热泵系统和液体除湿系统的集成方法。

本书适用于高等院校和科研单位的研究生、技术人员和研究人员,可以作为能源、化工、建筑暖通等专业的化工传递过程、膜分离、传质与分离工程、传热传质学应用进展等课程的教材或参考书,也可供对膜技术在暖通领域的应用基础研究感兴趣的人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

膜式热泵与空气湿度调节膜操作原理/黄斯珉著. —北京:科学出版社, 2017.3

ISBN 978-7-03-051869-9

I. ①膜… II. ①黄… III. ①太阳能-热泵-应用-空气调节系统-湿度调节系统-研究 IV. ①TK515 ②TU831.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第035524号

责任编辑:刘 冉 李丽娇/责任校对:贾伟娟
责任印制:张 伟/封面设计:北京图阅盛世

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年3月第一版 开本:720×1000 1/16

2017年3月第一次印刷 印张:13 1/4

字数:270 000

定价:88.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

近年来,膜技术在暖通空调(空调系统、采暖与生活热水)领域的应用取得了较大的进展。膜式常压吸收式热泵技术具有常压操作、结构紧凑、强扩展性、节能环保等优点,能实现连续制热制冷。膜式液体除湿技术有效解决了传统填料塔式直接接触液体除湿过程中存在液滴夹带的问题,由工业余热、可再生能源等驱动,实现等温除湿,减小不可逆热损失,降低系统运行能耗。膜式热泵技术可以和膜式液体除湿技术结合在一起,协调生活用水制热和空气湿度调节,形成一种膜式热泵制热、膜式空气加湿及膜式液体除湿协同控制装置,可通过控制热泵回路和液体除湿回路的电磁阀来获得所需制热量和除湿量,在高温高湿的夏季用于空气除湿与制冷,由太阳能再生稀溶液,浓溶液在储液槽中储存能量,在寒冷的冬季,溶液用于制热,水箱中的水可以用来加湿,调节室内空气湿度,有效解决冬季大量生活热水需求和太阳能相对缺乏的矛盾。

本书结合作者的部分研究成果,以及在相关科研实践中的体会和积累的经验,系统地介绍了膜式热泵技术和膜式空气湿度调节中的膜操作原理。本书共9章,第1章为绪论,结合国内外研究进展分别介绍膜式热泵技术和膜式液体除湿技术的发展情况,指出本书的框架、内容及其目的;第2章介绍平板膜式热泵的流动与传热传质膜操作原理;第3章介绍中空纤维膜式热泵膜操作原理;第4章介绍平板膜式热泵和中空纤维膜式热泵系统集成,给出系统运行原理;第5章介绍错流平行平板膜流道、错流弯曲形变平板膜流道及内冷型平板膜流道内的传递现象;第6章介绍侧进侧出准逆流平板膜流道和六边形准逆流平板膜流道内的传递现象;第7章介绍规则排列和随机排列逆流中空纤维膜流道中的自由表面模型、管间相互影响模型及耦合传热传质模型;第8章介绍规则排列和随机排列错流中空纤维膜流道中的自由表面模型、管间相互影响模型及耦合传热传质模型;第9章介绍膜式热泵、空气加湿和液体除湿系统集成方法,给出制热制冷、空气加湿和除湿协同系统的运行原理。

本书给出了关于膜流道内大量的阻力系数、努塞特数、舍伍德数等准数,为工程技术人员提供设计参数。读者通过对本书的学习,能对膜接触器内的流动与传热传质的数值模拟有较深刻的理解,从而为独立开展相应的研究工作打下较好的基础。

本书完稿之际,衷心感谢我的博士生导师——华南理工大学张立志教授,是

他引领我走进膜接触器液体除湿这一新的研究领域，是他教会了数值模拟方法，为师为学，无不使我受益终身，感恩至深！感谢东莞理工学院杨敏林教授为本书研究内容的完成提供大力帮助！感谢研究生黄伟豪为本书做的大量工作，是他整理了我们的部分科研成果并结合当前的研究进展，充实了书中的每一章内容。感谢研究生钟文锋、陈升的前期研究工作。感谢东莞理工学院各级领导的支持，尤其感谢东莞理工学院学科办和科研处。感谢那些帮助过我的亲朋好友。淡看世事去如烟，铭记恩情存如血！

我们的研究工作得到了国家重点研发计划项目（No. 2016YFB0901404）、国家自然科学基金项目（No. 51306038, 51236008）、广东省高等学校优秀青年教师培养计划项目（No. YQ2015159）及广东省高等学校特色创新项目（No. 2014KTSCX185）的资助，在此表示衷心的感谢！

尽管我们在撰写过程中倾尽全力，但是由于学识所限，书中难免有不妥之处。付梓之时，心中难免忐忑。诚请读者提出宝贵意见，以期共同进步！

黄斯珉

2016年12月

于东莞市松山湖

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 膜式吸收式热泵技术的发展	2
1.2 膜式液体除湿技术的发展	4
1.3 本书内容概要	6
参考文献	6
第 2 章 平板膜式吸收式热泵	9
2.1 平板膜式吸收式热泵制热过程数学模型	10
2.1.1 流体流动与传热传质控制方程	10
2.1.2 总传热和传质系数	13
2.1.3 边界条件	14
2.1.4 溶液状态方程	15
2.1.5 数值计算方法	16
2.2 平板膜式吸收式热泵制热实验研究	16
2.3 数学模型实验验证	18
2.4 流道内温度和平衡湿度分布分析	19
2.5 流道入口比和长宽比对于平板膜式热泵性能的影响分析	21
参考文献	22
第 3 章 中空纤维膜式吸收式热泵	24
3.1 中空纤维膜式吸收式热泵传热传质数学模型	25
3.1.1 总传热系数和总传质系数	25
3.1.2 热量和质量守恒方程	28
3.2 中空纤维膜式热泵制热实验研究	30
3.3 数学模型实验验证	31
3.4 温度和湿度分布分析	32
3.5 中空纤维膜式热泵结构参数对其性能的影响分析	33
3.6 膜传输参数对膜式热泵性能的影响分析	35
参考文献	36

第4章 膜式热泵系统集成	37
4.1 常压吸收式膜式热泵系统	37
4.1.1 膜式热泵系统介绍	37
4.1.2 膜式热泵系统的运行原理	38
4.2 膜式常压吸收式热泵和液体除湿系统协同装置	41
4.2.1 协同装置介绍	41
4.2.2 协同装置的运行原理	42
参考文献	43
第5章 错流平板膜流动	44
5.1 错流平行板式膜流动	44
5.1.1 错流平行板式膜流动数学模型	45
5.1.2 错流平行板式膜接触器除湿实验研究	50
5.1.3 数学模型实验验证	53
5.1.4 平行板式膜流动内努塞特数分析	54
5.1.5 平行板式膜流动内舍伍德数分析	56
5.2 错流弯曲形变平板膜流动	56
5.2.1 形变平板膜流动流动与传热数学模型	58
5.2.2 形变高度对错流平板膜流动的影响分析	62
5.2.3 流体流动雷诺数的影响分析	67
5.3 内冷型平板膜流动	69
5.3.1 流动与传热传质数学模型	70
5.3.2 内冷型膜除湿器液体除湿实验研究	77
5.3.3 数学模型实验验证	79
5.3.4 流动内努塞特数和舍伍德数分析	80
参考文献	82
第6章 准逆流平板膜流动	85
6.1 侧进侧出准逆流平板膜流动	85
6.1.1 侧进侧出膜流动流动与传热数学模型	86
6.1.2 数学模型数值验证	89
6.1.3 流动内阻力系数和努塞特数分析	90
6.2 六边形准逆流平板膜流动	91
6.2.1 六边形准逆流膜流动流动与传热数学模型	92
6.2.2 流动结构参数对阻力系数和努塞特数的影响分析	96
参考文献	100

第 7 章 逆流中空纤维膜流道	102
7.1 规则排列逆流椭圆中空纤维膜流道: 管间流动与传热	102
7.1.1 管间流动与传热数学模型	102
7.1.2 准逆流椭圆中空纤维膜接触器加湿实验测试	106
7.1.3 数学模型实验验证	109
7.1.4 左、右椭圆管半轴比相同的情况	110
7.1.5 左、右椭圆管半轴比不同的情况	114
7.2 规则排列逆流中空纤维膜流道: 耦合传热传质	118
7.2.1 耦合传热传质数学模型	119
7.2.2 逆流中空纤维膜接触器除湿实验测试	124
7.2.3 数学模型实验验证	126
7.2.4 努塞特数和舍伍德数分析	128
7.2.5 与自由表面模型的对比	130
7.3 随机分布的逆流椭圆中空纤维膜流道	131
7.3.1 随机分布管束流动与传热数学模型	132
7.3.2 随机分布椭圆中空纤维膜接触器加湿实验工作	137
7.3.3 数学模型实验验证	139
7.3.4 阻力系数和努塞特数分析	140
参考文献	147
第 8 章 错流中空纤维膜流道	151
8.1 错流椭圆中空纤维膜流道: 自由表面模型	151
8.1.1 自由表面数学模型	152
8.1.2 错流中椭圆中空纤维膜接触器除湿实验测试工作	158
8.1.3 自由表面模型实验验证	160
8.1.4 努塞特数和舍伍德数分析	162
8.2 规则排列错流椭圆中空纤维膜流道	165
8.2.1 流动与传热数学模型	166
8.2.2 四边形和三角形排列错流椭圆中空纤维膜接触器加湿实验测试	171
8.2.3 数学模型实验验证	173
8.2.4 流场和温度场分析	175
8.2.5 阻力系数和努塞特数分析	176
8.3 随机分布错流椭圆中空纤维膜流道	179
8.3.1 随机分布流动与传热数学模型	180
8.3.2 流场和温度场分析	186
8.3.3 阻力系数和努塞特数分析	187

参考文献	190
第9章 膜式热泵、空气加湿和液体除湿系统集成	194
9.1 热泵驱动的膜式液体除湿装置	194
9.1.1 膜式除湿蓄能装置介绍	194
9.1.2 膜式除湿蓄能装置的运行原理	195
9.2 用于医院病房的高效紧凑型空气除湿净化装置	196
9.2.1 空气除湿净化装置介绍	196
9.2.2 空气除湿净化装置的运行原理	197
参考文献	199
符号说明	200

第1章 绪 论

2013年,我国的建筑能耗是10.5亿~11.28亿吨标准煤,占全社会能源消耗的28%~30%^[1]。随着我国经济的发展,到2030年,我国建筑能耗将占全社会能源消耗的30%~35%^[2]。因此,建筑节能是保障我国能源安全的重要组成部分,关系到我国的能源安全和可持续发展。

随着科学技术的进步和社会的发展,建筑节能的重点应放在空调能耗、采暖与生活用水上,因为这部分能耗占建筑能耗的60%以上^[3]。建筑用能所需热源品位低、温度范围窄,并且与自然环境温度接近^[4]。热泵技术可以从自然界或工业余热中吸收热量,提高低温热源的品位,满足建筑空调、采暖与生活热水的需要^[5]。热泵工作原理包括喷射式、吸附式、蒸汽压缩式、吸收式等^[5]。其中,吸收式热泵可以直接由热能驱动,实现将热量从低温热源向高温热源输送,是回收利用低温热能的有效手段,并且采用环境友好型工质,具有节能环保的特点^[6]。随着分布式能源的发展和利用,吸收式热泵系统的应用越来越引起人们的关注^[7]。

根据《中国统计摘要》,空调系统是耗能大户,占建筑总能耗的30%~50%。我国的大部分地区属于季风型气候,尤其是广东省、香港特别行政区等地区,高温高湿,直接增大了空气湿度调节的负荷。在空调能耗中有20%~40%的能耗用于湿负荷的处理,仅大型公共建筑面积用于处理湿负荷的能耗折合耗电量就有66亿~220亿度/年。空气除湿主要有冷却除湿、固体吸附除湿、电化学除湿、液体除湿等几种方法。其中,液体除湿技术能够实现等温除湿,减少不可逆热损失,使得系统运行能耗降低30%左右,节约的能耗折合耗电量19.8亿~82.5亿度/年。由此可见,发展新型节能型液体除湿技术对建筑节能有巨大的潜力可挖。

然而,传统的填料塔直接接触式液体除湿技术中存在的液滴夹带问题在很大程度上限制了该技术的发展。空气湿度和空气温度一样,都是空气环境的重要因素,对人们的生活和生产环境有很大的影响。居住室内和工业环境中需要控制空气的相对湿度,适当的空气湿度能够提高人体的舒适度,减少静电,降低化学或生化反应速率等。随着当今社会的发展,人们越来越重视生活品质,追求健康、舒适的生活环境。据调查显示,人的一生有90%的时间在室内度过,因此控制好室内环境,保证室内人体舒适性就显得极其重要。温度和湿度是室内环境的重要指标,在调节室内温湿度的同时需杜绝挥发性有机物(VOC)、腐蚀性有害液滴等产生。

近年来,半透膜用于液体除湿,形成一种间接接触式液体除湿技术,称为膜式液体除湿技术。被处理空气和液体吸湿剂被半透膜隔离,该膜具有选择透过性,只允许水蒸气透过,阻止其他气体和液体通过。然而,空气和除湿溶液仍然可以通过膜进行热量和水蒸气的交换,从而实现除湿,彻底解决了传统填料式直接接触液体除湿技术中存在的液滴夹带问题。

膜式热泵的应用往往和膜式液体除湿技术结合在一起,协调生活用水制热和空气湿度调节。可以形成一种膜式热泵制热、膜式空气加湿及液体除湿膜式协同控制装置,可通过控制热泵回路和液体除湿回路的电磁阀来获得所需制热量和除湿量,在高温高湿的夏季用于空气除湿与制冷,由太阳能再生稀溶液,浓溶液在储液槽中储存能量,在寒冷的冬季,溶液用于制热,水箱中的水可以用来加湿,调节室内空气湿度,有效解决冬季大量生活热水需求和太阳能相对缺乏的矛盾。

1.1 膜式吸收式热泵技术的发展

传统吸收式热泵系统可分为两类:第一类增热型吸收式热泵系统^[8, 9]和第二类升温型吸收式热泵系统^[10],它们都在封闭的真空状态下进行。近年来,随着半透膜的发展,Woods等^[11]提出了一种敞开的膜式常压吸收式热泵(液液膜接触器),如图1-1所示。制冷剂(水)和吸收剂(盐溶液)在相邻的流道中流动,被空气隙膜隔离。该膜只允许水蒸气透过,阻止液体和其他气体渗透^[12-15]。水蒸气透过膜进入空气隙,再透过另一层膜进入溶液侧,被盐溶液吸收释放出潜热,导致溶液温度升高,相当于将水的热量通过水蒸气扩散“泵”到溶液侧。空气隙的热阻较大,减少了溶液显热传递回水侧。盐溶液吸收水蒸气变成稀溶液,进入再生器蒸发浓缩变成浓溶液,然后进入储液槽,形成能连续制热的吸收式热泵系统^[16-19]。该系统相比传统的真空吸收式热泵系统,存在一些潜在的优点^[16-19]:

①常压操作,可简化系统结构,减轻装置重量,降低设备制造成本。黄斯珉和杨敏林^[17]提出了一种膜式常压吸收式热泵及其热泵系统,该热泵为平板膜接触器,该系统包括水循环和盐溶液循环回路,在常压下工作,结构大幅简化且连续运行。②结构紧凑,能够在狭小的空间使用(电子设备、汽车等)。Kim等^[18]提出了一种用于电子冷却的微型吸收式热泵,采用基于膜的解吸-冷凝部件来再生稀溶液。③节能环保,系统采用环境友好型工质,同样可利用太阳能、工业余热(分布式能源系统缸套水、烟气余热等)作为驱动热源。④可扩展性强,盐溶液可储存能量,并且可用于液体除湿。黄斯珉等^[19]设计了一种膜式热泵和膜式液体除湿协同装置,可通过控制热泵回路和液体除湿回路的电磁阀来获得所需制热量和除湿量,在高温高湿的夏季用于空气除湿与制冷,由太阳能再生稀溶液,浓溶液在储液槽

中储存能量,在寒冷的冬季,溶液用于制热,有效解决了冬季大量生活热水需求和太阳能相对缺乏的矛盾。

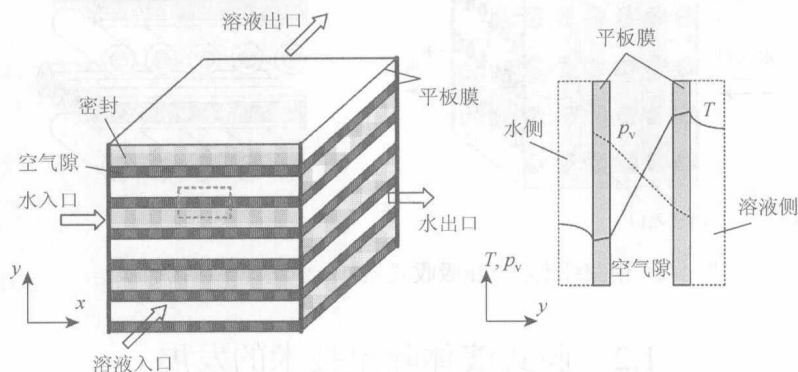


图 1-1 平板膜常压吸收式热泵(平板膜接触器)

常压吸收式热泵(液液膜接触器)作为膜式热泵系统的核心部件,直接影响系统的性能。半透膜通常被加工成平板膜或中空纤维膜,安装在外壳内部,设计出口和入口,分别形成平板膜接触器^[11, 16, 20]和中空纤维膜接触器^[21-23],其典型结构分别如图 1-1 和图 1-2 所示。Woods 等^[11]提出了一种平板膜接触器用于吸收式制热,建立了水和溶液通过空气隙平板膜进行热湿交换的活塞流数学模型,研究了空气隙厚度、入口工况、水蒸气扩散系数等对其性能的影响规律。结果表明,当溶液和水入口温度为 45℃ 时,溶液温度升高 20℃ 左右。Huang^[16]提出了一种用于吸收式制热的侧进侧出平板膜接触器,水沿着流道笔直地流动,而溶液由侧面入口进,斜对面出口出,水和溶液呈准逆流的流动形式,建立了该膜接触器中的传热传质数学模型并实验验证,研究了溶液流道入口比和流道长宽比对其性能的影响规律。结果表明,相比错流平板膜接触器,侧进侧出膜接触器中溶液温度升高的幅度提高 9% 以上。Khalifa 等^[20]将平板型空气隙膜接触器用于膜蒸馏,其原理为膜式热泵制热的逆过程,建立了接触器内传热传质活塞流模型,研究了变入口工况对其性能的影响规律。

Woods 等^[21]提出了一种错流中空纤维膜液液接触器,如图 1-2 所示。该接触器由一排排中空纤维膜管束交叉叠置而成,管束层与层之间留有空气隙,水和溶液在管束内交错流动。建立了该膜接触器中的传热传质数学模型,实验验证了膜接触器总传热和传质系数,研究了溶液质量分数对其性能的影响规律。Woods 和 Pellegrino^[22, 23]采用因次分析法研究了中空纤维膜接触器中膜本体热湿传输参数、空气隙厚度、流道传热传质系数等对其性能的影响程度,结果表明,膜本体及空气隙的湿阻和空气隙的热阻是影响其性能的关键因素。

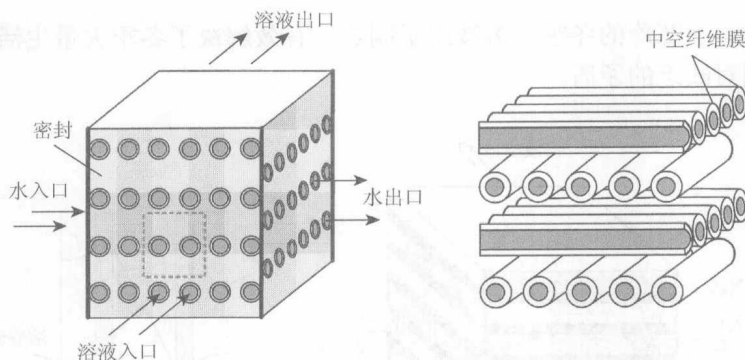


图 1-2 中空纤维膜常压吸收式热泵（中空纤维膜接触器）

1.2 膜式液体除湿技术的发展

空气除湿方法较多，根据空气除湿机理有以下几种方法：冷却除湿、膜渗透除湿、电化学除湿和干燥剂除湿（包括固体吸附除湿和液体吸收除湿）等。其中，液体吸收式除湿由于具有能利用低品位能源、高效率、无液态水凝结和除湿溶液能储存能量等潜在的优点，从 Lof 等^[24]在 1955 年提出并且试验了第一台以三甘醇为吸湿剂、太阳能驱动的溶液除湿空调系统开始，液体吸收除湿得到了迅速的发展。液体除湿系统中的两个关键部件是除湿器和再生器，通常都使用填料塔。空气和溶液在填料塔内直接接触，进行热量交换和湿交换，完成除湿过程。虽然除湿器空气流出口会安装除沫隔层，这种办法能够在一定程度上减少吸湿剂被夹带到空气中，但是还是存在一些缺点：①除沫器只能拦截住颗粒较大的液滴，对于较小的液滴，除沫器也无能为力，所以除沫器不能完全防止液滴夹带；②除沫隔层有一定厚度（ $>1\text{ cm}$ ），孔径较小（ $<1.5\text{ mm}$ ），空气流在除沫隔层中的压降可达 10 Pa 以上，额外增加了空气流道的压力损耗。

为了彻底解决传统填料塔式液体除湿技术中存在的液滴夹带问题，半透膜被用来实现间接接触式液体除湿^[25-29]。空气和除湿溶液被膜隔离，该膜具有选择透过性，只允许水蒸气透过，阻止其他气体和液体通过。由于空气和溶液被半透膜隔离，彻底防止了空气夹带溶液液滴。空气和除湿溶液仍然可以通过膜进行热量交换和水蒸气交换，从而实现除湿。通常将半透膜加工成平板膜和中空纤维膜，形成平板膜接触器和中空纤维膜接触器，用于实现液体除湿。

平行板式膜接触器结构简单，通常用来作气液接触器。Vali 等^[30]利用逆流和错流混合平行板式膜接触器对空气进行热湿全热回收。空气和溶液逆流和错流混合的形式进行热湿交换，从而回收全热。并且建立了相应的非稳态一阶集中参

数模型,其中,混合流道内的对流传热和传质系数通过关联式获得。建立了显热效率和潜热效率的计算关联式,并且对平行板式膜接触器结构参数和运行工况对膜接触器热湿回收性能进行了详细的分析。Mahmud 等^[31]提出了错流和逆流混合流动形态的膜全热换热器(RAMEE),并用于空气加热、通风及空调应用。每个 RAMEE 系统包括两个混合流气液热湿换热器。一个置于排风侧,一个置于新风侧,空气和除湿溶液被膜隔离。热量和水蒸气可以通过该膜进行有效交换,从而回收排风的全热。对该实验系统进行实验测试,对冬天和夏天的工况进行测试。对于夏天和冬天的工况,系统热湿回收效率随吸湿剂流量的增大而增大,随空气流量的增大而减小。在某些特殊工况下,全热回收效率可以达到 50%~55%,并且将实验结果和文献关联式进行了对比。Larson 等^[32]指出在设计气液全热回收装置中,膜的弹性和湿传递参数是关键因素。弹性能够保证流道内流体流过时微小的变形,湿渗透速率决定了水蒸气交换效率。完成对气液热交换平行板式膜接触器进行材料和组件结构方面的优化。平行板式膜单张膜面积较大,在吸湿剂重力作用下容易变形,影响流道形状。Seyed-Ahmadi 等^[33, 34]对错流平行板式膜热湿换热器(采用液体吸湿剂)进行了模型和实验研究。在第一部分中,建立了膜接触器中的二维非稳态数学模型,采用隐式有限差分法进行了数值求解。将模拟结果和实验进行了对比。第二部分中,研究了不同初始工况下对热湿交换的影响。Li 和 Ito^[35]提出了一种新的液体膜系统,采用一种表面润湿膜,并且用三甘醇对空气进行除湿;设计了一种板式膜接触器,作为除湿器,三甘醇液体膜厚度为 $18\text{ }\mu\text{m}$,膜接触面积为 0.13 m^2 ;建立了简单的湿渗透数学模型,预测了实验结果,并且研究了空气入口流量对除湿效果的影响。

中空纤维膜接触器较之平行板式膜接触器装填密度更大,在工程上应用比较广泛。Bergero 和 Chiari^[36]利用中空纤维膜接触器对空气进行除湿和加湿研究,组件中膜接触面积为 1.2 m^2 ,装填密度为 $593\text{ m}^2/\text{m}^3$,空气走壳程,溶液走管程,以错流的形式流动。他们分析了空气侧和溶液侧的热量和水蒸气传递机理,对中空纤维膜内流体流动和传质传热特性进行建模,分析了空气流量和溶液流量对组件性能的影响。Kneifel 等^[37]把中空纤维膜接触器用于空气湿度调节,指出了膜接触器用于空气湿度调节的优点。实验研究和分析了错流中空纤维膜接触器内空气流的压降和水蒸气传输特性,对膜的防泄漏和抗压能力进行了较为详细的实验研究。实验中采用无量纲的膜接触器,LiCl 溶液作为吸湿剂。证实了膜支撑层和涂层对湿渗透速率有决定性的影响。Johnson 等^[38]使用逆流中空纤维膜气液接触器对空气中的甲醛进行脱除。建立了相应的数学模型,研究了中空纤维膜接触器内部的传热传质机理。根据模型,分析了管程水流和空气流对甲醛脱除效率的影响,结果发现,脱除效率在水流量比较大的时候比较高。

1.3 本书内容概要

本书的研究对象为膜式热泵和用于湿度调节的膜接触器,膜式热泵和膜式加湿、除湿系统,后文将着重介绍膜式热泵和膜接触器中流道内的流动与传热传质及膜式热泵和膜式加湿、除湿系统的运行原理。具体内容如下:

(1) 认识到传统吸收式热泵系统在封闭的真空状态下运行的弊端,提出了一种基于半透膜的常压吸收式热泵,该热泵具有常压操作、结构紧凑、节能环保、可扩展性强等优点;建立了平板膜式热泵和中空纤维膜式热泵中的流动与传热传质数学模型,探究了结构参数、膜材料等对热泵性能的影响规律,给出了其性能优化原理;提出了常压吸收式膜式热泵系统,由工业余热、可再生能源(太阳能等)驱动的常压状态下工作的吸收式热泵,另外还介绍了一种常压膜式热泵和膜式液体除湿系统协同装置,能同时实现制热和空气除湿,并且介绍了这两种系统的工作原理。

(2) 认识到传统填料塔式液体除湿中存在液体夹带的问题,提出了膜式液体除湿技术。建立了膜接触器中的流动与传热传质数学模型,获得了流道内的传递参数,给出了其结构优化原理;提出了热泵驱动的膜式液体除湿与蓄能装置及用于医院病房等空气质量要求较高的高效紧凑型空气除湿净化装置,实现膜式热泵制热制冷、膜式加湿与除湿的协同应用,介绍了装置的运行原理。

参考文献

- [1] 蒋明麟. 2013 年我国建筑能耗占全社会能耗的 28% 以上. 人民政协报, 2014-05-22.
- [2] International Energy Agency. World Energy Outlook 2011. OECD/IEA, Paris, 2011.
- [3] Yang L, Lam J C, Tsang C L. Energy performance of building envelopes in different climate zones in China. Applied Energy, 2008, 85 (9): 800-817.
- [4] 张立志. 除湿技术. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [5] 张旭. 热泵技术. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [6] Stephan K. History of absorption heat pumps and working pair developments in Europe. International Journal of Refrigeration, 1983, 6 (3): 160-166.
- [7] Wu W, Wang B, Shi W, et al. Absorption heating technologies: A review and perspective. Applied Energy, 2014, 130: 51-71.
- [8] Zhai X Q, Wang R Z. A review for absorption and adsorption solar cooling systems in China. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13 (6-7): 1523-1531.
- [9] Ji G, Chen Y, Wu J, et al. Performance analysis on modified cycle of double absorption heat transformer with solution and coolant heat regeneration. Applied Thermal Engineering, 2016, 108: 115-121.
- [10] Rivera W, Best R, Cardoso M J, et al. A review of absorption heat transformers. Applied Thermal Engineering, 2015, 91: 654-670.

- [11] Woods J, Pellegrino J, Kozubal E, et al. Modeling of a membrane-based absorption heat pump. *Journal of Membrane Science*, 2009, 337 (1-2): 113-124.
- [12] Huang S M, Yang M L, Chen B, et al. Laminar flow and heat transfer in a quasi-counter flow parallel-plate membrane channel (QCPMC). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 86: 890-897.
- [13] Huang S M, Zhang L Z. Researches and trends in membrane-based liquid desiccant air dehumidification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 28: 425-440.
- [14] Abdel-Salam M R H, Fauchoux M, Ge G, et al. Expected energy and economic benefits, and environmental impacts for liquid-to-air membrane energy exchangers (LAMEEs) in HVAC systems: A review. *Applied Energy*, 2014, 127: 202-218.
- [15] Ge G, Abdel-Salam M R H, Besant R W, et al. Research and applications of liquid-to-air membrane energy exchangers in building HVAC systems at university of Saskatchewan: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 26: 464-479.
- [16] Huang S M. Heat and mass transfer in a quasi-counter flow parallel-plate membrane-based absorption heat pump (QPMHP). *Journal of Membrane Science*, 2015, 496: 39-47.
- [17] 黄斯珉, 杨敏林. 一种常压式吸收器以及吸收式热泵系统: 201510440700.7. 2015-07-24.
- [18] Kim Y J, Joshi Y K, Fedorou A G. An absorption based miniature heat pump system for electronics cooling. *International Journal of Refrigeration*, 2008, 31 (1): 23-33.
- [19] 黄斯珉, 黄伟豪, 杨敏林. 一种常压膜式热泵和液体除湿系统协同装置: 201610030357.3. 2016-01-18.
- [20] Khalifa A, Lawal D, Antar M, et al. Experimental and theoretical investigation on water desalination using air gap membrane distillation. *Desalination*, 2015, 376: 94-108.
- [21] Woods J, Pellegrino J, Kozubal E, et al. Design and experimental characterization of a membrane-based absorption heat pump. *Journal of Membrane Science*, 2011, 378 (1-2): 85-94.
- [22] Woods J, Pellegrino J. Heat and mass transfer in liquid-to-liquid membrane contactors: Design approach and model applicability. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 2013, 59: 46-57.
- [23] Woods J. An ambient-pressure absorption heat pump using microporous membranes: Design, modeling, and experimental investigation. PhD Dissertation, Mechanical Engineering, University of Colorado, 2011.
- [24] Lof G O G. Cooling with Solar Energy. Tucson USA, Congress on Solar Energy, 1995.
- [25] Huang S M, Zhang L Z, Pei L X. Fluid flow and heat mass transfer in membrane parallel-plates channels used for liquid desiccant air dehumidification. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55: 2571-2580.
- [26] Zhang L Z, Huang S M. Coupled heat and mass transfer in a counter flow hollow fiber membrane module for air humidification. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 54: 1055-1063.
- [27] Huang S M, Zhang L Z. Turbulent heat and mass transfer in a hollow fiber membrane module in liquid desiccant air dehumidification. *ASME Journal of Heat Transfer*, 2012.
- [28] Zhang L Z, Huang S M, Pei L X. Conjugate heat and mass transfer in a hollow fiber membrane module for liquid desiccant air dehumidification: A free surface model approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55: 3789-3799.
- [29] Zhang L Z. An analytical solution to heat and mass transfer in hollow fiber membrane contactors for liquid desiccant air dehumidification. *ASME Journal of Heat Transfer*, 2011, 133 (9): 1-7.
- [30] Vali A, Simonson C J, Besant R W, et al. Numerical model and effectiveness correlations for a run-around heat recovery system with combined counter and cross flow exchangers. *International Journal of Heat and Mass*

- Transfer, 2009, 52 (25-26): 5827-5840.
- [31] Mahmud K, Mahmood G I, Simonson C J, et al. Performance testing of a counter-cross-flow run-around membrane energy exchanger (RAMEE) system for HVAC applications. *Energy and Buildings*, 2010, 42 (7): 1139-1147.
- [32] Larson M D, Simonson C J, Besan R W. The elastic and moisture transfer properties of polyethylene and polypropylene membranes for use in liquid-to-air energy exchangers. *Journal of Membrane Science*, 2007, 302 (1-2): 136-149.
- [33] Seyed-Ahmadi M, Erb B, Simonson C J, et al. Transient behavior of run-around heat and moisture exchanger system. Part I: Model formulation and verification. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52: 6000-6011.
- [34] Seyed-Ahmadi M, Erb B, Simonson C J, et al. Transient behavior of run-around heat and moisture exchanger system. Part II: Sensitivity studies for a range of initial conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52: 6012-6020.
- [35] Li J L, Ito A. Dehumidification and humidification of air by surface-soaked liquid membrane module with triethylene glycol. *Journal of Membrane Science*, 2008, 325 (2): 1007-1012.
- [36] Bergero S, Chiari A. Experimental and theoretical analysis of air humidification/dehumidification processes using hydrophobic capillary contactors. *Applied Thermal Engineering*, 2001, 21 (11): 1119-1135.
- [37] Kneifel K, Nowak S, Albrecht W, et al. Hollow fiber membrane contactor for air humidity control. *Journal of Membrane Science*, 2006, 276 (2): 241-251.
- [38] Johnson D, Yavuzturk W C, Pruis J. Analysis of heat and mass transfer phenomena in hollow fiber membranes used for evaporative cooling. *Journal of Membrane Science*, 2003, 227 (1-2): 159-171.