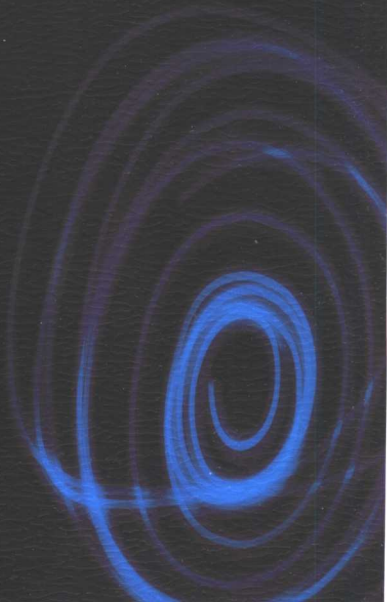


除湿 技术

张立志 编著



化学工业出版社



除湿技术

张立志 编著



化学工业出版社

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

除湿技术/张立志编著. —北京: 化学工业出版社, 2004. 12

ISBN 7-5025-6390-3

I. 除… II. 张… III. 防潮-技术 IV. TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 127040 号

除湿技术

张立志 编著

责任编辑: 廖叶华

文字编辑: 韩庆利 余纪军

责任校对: 顾淑云 周梦华

封面设计: 于剑凝

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 13 $\frac{1}{4}$ 插页 1 字数 338 千字

2005 年 2 月第 1 版 2005 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6390-3/TB·101

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序

近年来，随着生活水平的提高，人们对居住环境的舒适性也提出了更高的要求。空调作为能调节建筑物室内热环境和空气环境的有效手段，得到了前所未有的快速发展。空调是耗能大户，2002年我国建筑能耗总量达3.5亿吨标准煤，占全社会总能耗的27.6%。2002年全国各电网空调制冷负荷共达 $4500 \times 10^4 \text{ kW}$ ，相当于2.5个三峡电站的满负荷能力。预计到2010年，全国制冷电力高峰负荷将增加一倍以上，即达到约相当于5个三峡电站的满负荷能力。随着国家建设和人民生活水平的提高，建筑能耗所占比例还将持续大幅增长，达到目前世界的平均水平（33%左右）。预计到2020年，全国制冷电力高峰负荷比2010年还要再翻一番，相当于10个三峡电站的满负荷能力。建设每千瓦的电站和电网设施，平均约需8千元人民币的投资，也就是说，如果空调负荷全靠电力，那么电力建设总投资将高达1.4万亿元人民币左右。同时，燃煤发电也对资源与环境造成更加严重影响，包括 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 以及尘埃的排放、城市空调造成的热岛效应、噪声污染等，都危及到经济社会的可持续发展。未来的空调方式必须革新；新型空调必须满足经济、社会、人与环境协调发展的要求。

温度和湿度是空调过程需要控制的两个最重要参数。人们往往误以为空调只是调温，实际上，过高或过低的湿度使人体产生不舒适感，影响建筑环境质量，也是某些工业生产所不允许的。所以除湿或加湿是空调过程的重要内容。空气中的水蒸气含量很少，每千克空气中只含有几十克水蒸气，但是由于水的汽化潜热很高，除湿的能耗要占到空调总能耗的20%~40%。所以除湿技术是能源和环境领域的一项重要课题。特别是我国在经历“SARS”（非典型

肺炎)后,传统的空调方式受到人们质疑,全新风空调概念开始受到重视,增加新风的要求也对除湿技术提出了更高的要求,节能的、可靠的、小型化的独立除湿技术成为工业界和学术界的研究方向。然而目前国内非常缺乏除湿技术方面的专著,虽然有关除湿的一些传统技术在空调类书籍中常有提及,但都不够详细,也缺乏系统性,不利于这门技术在工程实际中的应用。

本书作者张立志博士是华南理工大学化工与能源学院的年轻教授。他从1995年开始进行吸附制冷与除湿技术研究,近十年来,他先后在清华大学、香港理工大学和华南理工大学从事先进除湿技术的基础理论与应用技术研究工作。他在吸附除湿制冷、转轮除湿与全热回收、膜法除湿与全热回收等除湿技术方面作出了创新性的成果,在这些领域已经发表四十多篇论文,其中二十多篇发表在国际著名学术刊物上,被SCI收录,并被国内外学者引用。在这本书里,也反映了他的这些最新研究成果。

本书有如下几个显著的特点。

系统阐述了空调除湿技术的分类、原理和应用。包括传统的除湿方法和新的除湿技术,如转轮除湿、膜法除湿、全热回收、膜湿泵的原理和特点;也介绍了比较成熟的一些除湿方法,如喷水室除湿、冷却盘管除湿、液体除湿、固体吸附剂除湿,在这些技术方面,作者总结吸收了国内外近几年来在这些方法上的一些最新研究成果,作为对传统技术的有益补充,便于学术界和工程界参考。对于除湿涉及的基础知识,如湿空气性质和焓湿图,湿度的概念,湿度对建筑环境的影响,各种除湿用的制冷机的结构、原理、特性等,也做了阐述,还介绍了湿度测量的方法、各种湿度测量仪器的结构以及各自的特性、优缺点等。不仅论述系统详尽,且涉及的知识面很广,包括:理论分析、定量计算以及实验测量方法等。这些都是以往的有关除湿技术方面著作所无法比拟的。

介绍了除湿技术的最新的研究动态和成果,包括先进的膜法除湿技术,以及江亿院士提出的“湿泵”的概念。对于膜法除湿技

术，从膜法空气除湿的模式，除湿膜的种类、特性与制作方法，基于膜的全热热交换器的传热传质的分析，膜热湿交换的准则方程的建立，基于膜的全热热交换器的节能效果的分析等方面做了详尽介绍。对于湿泵，则从概念、原理、膜湿泵的传热传质数学模型、适合应用于湿泵的膜材料的特性以及膜湿泵的性能等方面来阐述目前膜湿泵的研究状况。从热湿传递机理来分析各种除湿技术的原理和性能，为系统模拟和优化设计提供了基础，方便学习者使用。

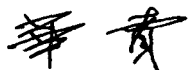
在书中介绍了各种除湿技术的传热传质数学模型：包括液体除湿传热传质数学模型，除湿转轮的传热传质数学模型；对于膜法除湿，建立膜塔回收器的传热传质数学模型，通过有限差分模拟来讨论膜全热交换器内的耦合传热性质规律。此外，还建立了膜湿泵的传热传质数学模型。这些数学模型，为系统模拟和优化设计提供了理论依据。对于工程设计有理论指导作用；也可以为系统模拟和优化提供理论基础。对于除湿膜的制备等技术也做了较为详细的介绍。

本书虽然是以空调中的除湿技术为主，但所介绍的除湿技术也包括了許多工业部门中的除湿技术。在本书中还给出了大量的实用数据以及图、表，方便设计者参考、选用。

张立志教授的这本著作较为系统地介绍了除湿理论和技术，有很强的实用性。为从事空调、制冷、化工、能源、环境等专业科研、教学和工程技术人员提供了一本除湿技术的专著，也会对从事该专业设计、安装、管理工作的工程技术人员有所借鉴。希望作者今后在原有研究基础上再有所深入，为我国空调技术的发展做出更大的贡献。

国家重点基础研究项目“高效节能的关键科学问题”首席科学家
强化传热与过程节能教育部重点实验室学术委员会主任

华南理工大学教授



2004年9月9日

前 言

除湿是工农业生产和人们日常生活中经常遇到的课题。除温度外，湿度是影响居住环境舒适性的另一重要指标，过高的湿度不仅影响生产安全和产品质量，由于结露引起设备故障会造成难以估量的损失。高湿更普遍的问题是影响建筑环境的热舒适感，降低建筑环境质量，严重的会引起家具、墙壁发霉、变烂，人们健康也会受到威胁。

空气中的水蒸气含量很少，每千克空气中只含有几十克水蒸气，但是由于水的汽化潜热很高，除湿的能耗要占到空调总能耗的20%~40%。随着国家经济的高速发展和人们对建筑环境舒适性的要求日益提高，新的空调方式——湿度的独立控制成为一种发展趋势，新的除湿技术的开发就成为能源和环境领域的一项重要课题。

但是，作者在科研和教学工作中发现，目前专门系统介绍除湿技术的著作很少，虽然有关除湿的一些方法在目前的空气调节类著作中常有提及，但是都比较粗略，基本是概念性的介绍，缺乏深入的性能和理论分析，也显得支离破碎。作者在研究工作中体会到，除湿这项古老的技术随着能源、环境与材料科学的迅猛发展在近几年来也有明显的进步，有必要将这些最新成果系统地介绍给相关专业同行。有鉴于此，作者在自己十多年来对该领域研究成果的基础上，结合该领域的发展，编著了本书。

本书从物理化学角度对除湿问题进行了深入的思考，详细论述了除湿的概念，湿度对人工环境热舒适性的影响，除湿负荷核算方法和各种除湿技术原理与方法。本书既总结了目前比较成熟的一些除湿方法，如喷水室除湿、冷却盘管除湿、液体除湿、固体吸附剂除湿，吸收了国内外近几年来在这些方法上的一些最新研究成果；

也结合作者自己的研究成果，论述了一些新颖的除湿方法，如转轮除湿、膜法除湿的原理和特点。本书侧重于从热湿传递的机理出发阐述各种除湿方法的理论与应用，为系统模拟提供理论基础。本书不仅为从事空调、制冷、化工、能源、环境等专业的科研、教学和工程技术人员提供一本除湿技术的专著，也可作为上述专业的研究生、大学生的一门重要教材，还可作为从事这些专业的设计、安装、管理工程技术人员实务的指导书。

作者在除湿技术与热湿传递的研究工作中，得到大连理工大学王玲教授、清华大学江亿院士和张寅平教授、香港理工大学牛建磊教授的关心与指导，本书的许多成果是在他们关心和指导下经过共同努力一起取得的，在此向他们致以深刻谢意。国家973计划首席科学家、华南理工大学华贲教授对本人的研究也非常关心，并在百忙之中为此书作序，作者深表谢意。作者的研究也得到国家自然科学基金的资助与973项目“高效节能的关键科学问题”的支持，在此一并致谢。

张立志

2004年8月1日于华南理工大学

内 容 提 要

除温度外，湿度是衡量建筑环境舒适性的另一重要指标，湿度的独立控制代表了未来空调的发展方向。本书以空调中的除湿技术为主，其他工业部门中的除湿为辅，系统阐述了除湿技术的分类、原理和应用。全书共分9章，较详细论述了除湿的概念、其物理化学特征、湿度对人工环境热舒适性的影响，除湿负荷核算方法和各种除湿技术原理与方法。

该书既总结了目前比较成熟的一些除湿方法如喷水室除湿、冷却盘管除湿、液体除湿、固体吸附剂除湿，叙述了国内外近几年来在这些方法上的一些进展，也结合作者多年的研究成果，论述了一些新颖的除湿方法（如转轮除湿、膜法除湿）的原理和特点。本书从热湿传递机理入手，分析了各种除湿技术的性能改进方法，给出热力学计算过程，为系统模拟和工程优化设计提供基础，以增强对工程设计的理论指导。为方便读者学习与理解，本书在开头还简要介绍湿空气性质与湿度测量与控制技术。

本书可作为制冷、空调、化工、环境、能源等相关专业博士生、硕士生和高年级大学生的课程教材，也可作为从事上述专业设计、安装、管理工程技术人员的重要参考资料。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 除湿的概念	1
1.2 除湿方法	8
1.3 除湿的基本理论	19
1.3.1 除湿能耗的分析	19
1.3.2 除湿的物理化学特征	24
1.4 除湿技术研究方向	27
参考文献	30
第 2 章 湿空气的焓湿图与状态参数	32
2.1 湿空气的组成和状态参数	32
2.1.1 湿空气的组成	32
2.1.2 湿空气的状态参数	34
2.2 湿空气的焓-湿图	46
2.3 湿球温度	49
2.3.1 热力学湿球温度	49
2.3.2 湿球温度	50
2.3.3 湿球温度在 $i-d$ 图上的表示	53
2.4 空气处理过程	54
2.4.1 几种典型的空气处理过程	55
2.4.2 两种不同状态的空气混合过程的计算	56
2.5 空气状态的计算机模拟	58
参考文献	60
符号说明	60

第3章 湿度的测量与控制	63
3.1 湿度传感器	63
3.1.1 伸缩式湿度传感器	64
3.1.2 干湿球湿度传感器	65
3.1.3 镜面冷凝式露点仪	66
3.1.4 电阻式湿度传感器	67
3.1.5 电容式湿度传感器	70
3.1.6 电磁波湿度传感器	71
3.1.7 其他湿度传感器	72
3.2 湿度的自动控制	72
3.2.1 干湿球式湿度控制	73
3.2.2 毛发式湿度控制	74
3.2.3 电阻式湿度控制器	77
参考文献	78
第4章 空调房间湿度及其负荷	80
4.1 湿度对工业生产过程中的影响	80
4.2 湿度对建筑环境污染物的影响	85
4.3 人体热平衡与热舒适区	86
4.3.1 人体热平衡	86
4.3.2 人体的热感觉与热舒适区	96
4.4 湿度与热舒适性关系	98
4.5 民用建筑室内环境参数	104
4.6 空调房间湿负荷	106
4.6.1 人体散湿量	106
4.6.2 敞开水表面或潮湿表面散湿量	108
4.6.3 人为散湿量	109
4.6.4 外部空气带入的水分	109
4.6.5 从围护结构渗入的水分	111
4.7 送风状态与送风量	111
参考文献	113

符号说明	113
第 5 章 冷却除湿	116
5.1 冷却除湿的原理和特征	116
5.2 喷水室除湿	118
5.2.1 喷水室的构造与类型	119
5.2.2 喷水室除湿的实际过程	121
5.2.3 喷水室的热交换效率系数和接触系数	123
5.2.4 喷水室热湿交换影响因素	125
5.2.5 喷水室除湿热工计算	128
5.2.6 喷水室阻力计算	129
5.3 表面式冷却器除湿	130
5.3.1 表面式冷却器除湿的概念	130
5.3.2 表面式冷却器的结构	132
5.3.3 表冷器除湿的热工计算	135
5.3.4 表冷器除湿的再热系统	151
5.3.5 表冷器除湿的除霜系统	156
5.4 除湿用制冷机	159
5.4.1 往复式制冷机	160
5.4.2 螺杆式压缩机	166
5.4.3 滚动转子式压缩机	170
5.4.4 涡旋式压缩机	173
5.4.5 离心式压缩机	174
5.4.6 溴化锂吸收式制冷机	178
参考文献	187
符号说明	188
第 6 章 液体除湿	191
6.1 液体除湿的原理和特征	191
6.2 常用液体吸湿剂	193
6.3 除湿器类型	200
6.3.1 绝热型除湿器	202

6.3.2 内冷型除湿器	214
6.4 液体除湿传热传质过程	216
6.5 除湿塔性能分析	221
参考文献	224
符号说明	225
第7章 固体吸附床除湿	227
7.1 固体除湿原理	227
7.1.1 吸附与吸附等温线	227
7.1.2 吸附热	231
7.1.3 吸附时的传质	231
7.1.4 常用吸湿剂	235
7.2 吸附剂的制备与表征	239
7.2.1 吸附剂的制备	239
7.2.2 吸附剂的性能要求	242
7.2.3 吸附剂的性能测试	244
7.2.4 吸附剂劣化的影响	245
7.3 吸附除湿方法	247
7.3.1 静态吸附法	247
7.3.2 固定层吸附	248
7.4 动态吸附除湿	251
7.4.1 连续除湿原理	251
7.4.2 吸附床动态特性	254
参考文献	259
符号说明	260
第8章 转轮除湿	263
8.1 转轮除湿原理与特征	263
8.2 除湿转轮的构造	266
8.3 除湿转轮的传热传质分析	268
8.3.1 数学模型	268
8.3.2 数学模型的无量纲化	272

8.3.3	性能指标	275
8.3.4	模型求解与实验验证	277
8.3.5	转轮传热传质过程分析	279
8.4	蜂窝流道的对流传热系数与阻力计算	291
8.4.1	异型流道中的传热与阻力	291
8.4.2	基本方程	293
8.4.3	贴体坐标与网格控制	298
8.4.4	控制方程离散格式	303
8.4.5	结果与讨论	305
	参考文献	313
	符号说明	314
第9章	膜法除湿	318
9.1	膜法除湿概况	318
9.1.1	膜技术简介	319
9.1.2	膜法空气除湿模式	321
9.1.3	除湿膜的种类	322
9.1.4	除湿膜的形态	333
9.2	基于膜的全热交换器传热传质分析	335
9.2.1	数学模型	336
9.2.2	数值方法与模型验证	344
9.2.3	膜全热交换器内热湿传递	346
9.2.4	膜内的传热传质	349
9.3	基于膜的全热交换器性能分析	353
9.4	膜全热交换器性能准则方程	358
9.4.1	膜的传质阻力	358
9.4.2	膜热湿交换准则方程的建立	361
9.4.3	全热交换器性能分析	368
9.5	基于膜的全热交换器节能效果分析	372
9.5.1	新风全年负荷	372
9.5.2	膜全热交换器全年节能潜力	377
9.5.3	室内设定状态的影响	381

9.6 膜湿泵的可行性研究	383
9.6.1 膜湿泵的原理	383
9.6.2 膜湿泵的数学模型	384
9.6.3 湿泵膜材料的吸附等温线	386
9.6.4 湿泵性能分析	388
参考文献	392
符号说明	395
附录	398
表 1 湿空气的密度、水蒸气压力、含湿量和焓	398
表 2 我国主要城市空调室外空气计算参数	400
表 3 部分冷水式表冷器的传热系数和阻力试验式	401
表 4 部分冷水式表冷器的 ϵ_2 值	402
表 5 JW 型冷水式表冷器的技术数据	402
表 6 华南地区温湿图各区域的逐月总小时数和温、湿度平均值	403

第1章 绪 论

我国幅员辽阔，气候差异较大，南方是一个雨量较多、气候潮湿、人口稠密、经济发达的地区。根据有关气象资料统计分析：广东、广西、海南、湖南、江西、福建等地区雨水连绵，常年潮湿，而像浙江、上海、江苏、四川、湖北等地区梅雨季节较长，在此期间同样潮湿难耐。而在其他地区，每年7、8月份，高温期同多雨期一致，空气湿度同样很高，又热又湿的天气给人们的生产生活带来许多不便。随着我国社会与经济的发展，人们对生活舒适性的要求越来越高，除湿的需求越来越强。此外，档案、烟草、军工、医药等部门，以及地下或半地下建筑物内根据不同用途，也都有除湿要求。

1.1 除湿的概念

除湿是工业生产和人们日常生活中经常碰到的问题。当大气的温度降到低于露点温度时，存在于大气中的一部分水分就会冷凝成雾或露，这对工业生产有着严重影响。地下室仓库的墙壁，经常被空气中水蒸气凝结的水浸泡，从而使保管的物品受潮、发霉。在水力发电站的地下配电室内，水分会使高压电气回路有漏电危险。这时，除了应采取除湿措施外，还应改用隔热措施好的材料做墙壁。在日温度变化剧烈的地方，即使是放在地上建筑物内的物体，如铁板等金属，也会由于其表面和室温之间的温度差而出现结露，引起金属腐蚀，在这种情况下，若室内不能密闭，则只有送入干燥空气以防结露。

在双层窗户中，为了防止封闭玻璃面之间由水蒸气冷凝或窗户

密封剂使用的溶剂引起玻璃面起雾，需要在双层玻璃之间放置除湿剂除湿。为了防止热交换器在低温下冻结堵塞，作为深冷法空气分离装置的原料的空气必须是无水和无二氧化碳的，所以要使用 13X 分子筛除湿和除碳。

在合成树脂的高速喷射成型机中，金属铸型被冷却时，经常出现产生水滴的情况。如果水滴出现在金属模具的内表面，高温喷射出的合成树脂与它相接触时，水蒸气汽化，体积就会急剧地膨胀，结果在成型品中出现空穴，而成为次品。这时需要用聚氯乙烯透明薄膜遮住金属模具部分，再用干燥空气置换内部的湿润空气，才能解决问题。

汽车制造厂的喷漆车间，喷漆时含在涂料中的溶剂（如甲苯、二甲苯等）急速蒸发，漆面温度显著降低，空气中的水分就会在其表面上凝结。因此，油漆和透明漆的表面变得不光滑，白颜色变得浑浊。在进行加热烘烤时，漆膜内部的水滴汽化、膨胀，降低了制品的质量。如果对室内空气进行除湿，工艺情况会有一定程度的改善，若用除湿装置干燥喷漆喷枪用的压缩空气，就能克服上述缺点^[1]。

在寒冷地区的仪表密封用气，气体中的水结冰会阻塞管路，引起仪表失灵，所以要将气体干燥到露点低于最低气温（如 -40°C ）；在有些化工仓储等行业中需要用干燥的富氮气作为保护气，除除湿外，还应考虑空气组分的变化。

除冷却外，空气压缩后也会有结露现象。对湿空气加压，当相对湿度提高到 100%，达到饱和以后，再继续压缩，水分将以雾的状态析出，凝集后变成水滴，用分离器除去。但若其中一部分水蒸气仍随着压缩空气一起流动，就会造成危害。大型化工厂和自动化装置中普遍采用气动控制系统，它的能源为压缩空气，如果有水滴析出，会锈蚀金属部件，使阀门不能平滑地动作，从而导致自动控制系统失灵。压缩空气通过一些气动传感器的喷嘴时，空气急剧膨胀，温度急剧降低，压缩空气中的水分会在喷嘴处结冰，使传感器出现错误信号，引起误操作。解决办法是在压缩空气后设置一个吸