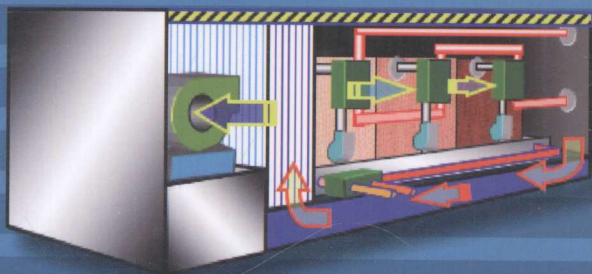


国家“985工程”三期清华大学人才培养建设项目资助

溶液除湿

Liquid Desiccant Dehumidification

刘晓华 李震 张涛 著



中国建筑工业出版社

国家“985工程”三期清华大学人才培养建设项目资助

溶液除湿

Liquid Desiccant Dehumidification

刘晓华 李 震 张 涛 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

溶液除湿/刘晓华等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2013. 12
ISBN 978-7-112-16247-5

I. ①溶… II. ①刘… III. ①溶液-防潮-化学吸附
IV. ①0645②TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 306549 号

国家“985 工程”三期清华大学人才培养建设项目资助

溶 液 除 湿

Liquid Desiccant Dehumidification

刘晓华 李 震 张 涛 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京市密东印刷有限公司印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 18 字数: 450 千字

2014 年 1 月第一版 2014 年 1 月第一次印刷

定价: 49.00 元

ISBN 978-7-112-16247-5
(24981)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

空气除湿（或加湿）过程是建筑室内热湿环境营造过程的重要环节，选取适宜的空气湿度处理方式对合理满足建筑室内环境需求、降低建筑能耗具有重要意义。溶液除湿（或称溶液调湿、液体除湿）是一种能够有效满足空气湿度处理需求、综合利用多种品位能源的高效除湿方式。本书共分为10章，对溶液除湿空气处理方式的相关研究及应用进行了全面阐述，涵盖了溶液除湿方式的基础理论、基本流程、处理装置及实际应用等多个方面，主要包括：吸湿溶液的基本性质、溶液除湿的基本原理及发展历程，溶液除湿装置的理论分析方法、性能影响因素及变化规律，溶液除湿过程的热湿耦合特性及流程构建原则，余热驱动型和热泵驱动型溶液除湿空气处理装置的工作原理及实际性能，以及基于溶液除湿装置构建的舒适性和工艺性空调系统解决方案等。

本书可作为高等学校建筑环境与能源应用专业及相关专业的教学参考书，也可供暖通空调行业的研究者、设计师及相关工程技术人员参考。

* * *

责任编辑：姚荣华 张文胜

责任设计：张虹

责任校对：张颖 党蕾

序

空气的湿度调节，尤其是干燥除湿，是空调工程空气处理中最困难的过程，又是很多对湿度有要求的工程中最主要的工艺过程。自一百多年前开利博士发明空调以来，通过对空气降温实现对空气除湿成为使用最广泛的除湿方式。然而这一方法并非在各种情况下都适宜：它必须把空气冷却到露点以下，得到低温的干空气，当不需要如此低温的空气时，就需要再热；这一工艺过程只能除湿，不能加湿，而当需要控制湿度时（夏天要除湿，冬天又要加湿），这就需要再配单独的加湿装置。

降温除湿的这些缺陷促使这一领域多少年来持续进行新的除湿和调湿方法的研究与新技术新产品的开发。这主要是采用吸湿材料的固体除湿与采用吸湿溶液的溶液除湿这两条技术路线。这两个技术方向都早在 20 世纪 30 年代先后被提出。至 20 世纪 80 年代，以转轮为代表的固体除湿技术已经在欧美得到充分发展，相应的产品也已经形成和完善。相比之下，尽管溶液除湿技术的基本原理和方法也在这些年中得到长足的发展，但由于工艺、流程以及对处理过程认识 and 理解的局限性，这一技术到 20 世纪末也一直没有成为市场上的主流技术，而直到 21 世纪在我国才得到系统、全面的技术进步和在市场上的快速发展。

在这里有必要回顾一下我国溶液除湿技术的发展过程。

溶液除湿技术在我国的第一次发展是源于 20 世纪 60 年代的“三线建设”。在当时的特定历史条件下，一些军工产业需要被搬迁至我国西南地区，开展“三线建设”，而其中相当主要的生产厂房和研究场所又建在了地下。西南地区气候潮湿，地下洞库更是常年处在接近 100% 相对湿度的高湿环境下。怎样解决地下空间的湿度问题，使这一大批精密的机械设备不会由于环境潮湿所损坏，成为当时“三线建设”的关键技术问题之一。采用常规的机械制冷方式除湿，当时的条件无法获得大量的大冷量压缩制冷设备，而固体转轮除湿装置当时在国内也看不到成熟的产品，这样，就把希望寄托在溶液除湿上。尽管当时还处在“文革”时期，但科学技术人员在几年的时间内就开发出如同一个小化工厂一样的溶液除湿装置，有效实现了地下洞库内的湿度控制。开始的吸湿溶液采用氯化锂溶液，由于当时塑料工业尚未起步，为解决溶液的强腐蚀性只能采用大量的不锈钢材料，造成材料供应的严重困难。为此又专门研究出采用有机物三甘醇溶液作为吸湿溶液的新流程。当时还专门设厂，大量生产三甘醇溶液。溶液除湿装置和系统的成功应用，使新中国成立后建立起来的第一代军工生产能力得以保存以及后来进一步的发展。这可以说是空调人对国防工业的重大贡献，当然也可以说是那个特殊年代溶液除湿技术对我国国防工业的贡献。

我在 1973 年进入清华大学暖通空调专业。1974 年开始学习专业课，拿到的教学参考书就是天津大学为当时所办的空军班专门编写的教材《地下通风工程》。这部标为“保密”的内部教材分上下册，下册完全是溶液除湿技术，从基本原理到流程以及详细的装置介绍和运行调节方式。从这本教材可以看出，当时溶液除湿技术已经得到充分的研究和发展，成功地应用于重要工程中，并列为当时国防建设的关键技术秘密。1976 年，我们班开始毕业工程实践训练，已有一个研究课题就是溶液除湿工程，可惜我被安排于其他项目，错过了接触溶液除湿的机会。

改革开放开始，1978 年我又回到清华大学，开始涉足空气处理过程的自动控制调节。表冷器只能降温或沿着饱和线除湿；喷水室可以通过选择冷水或热水，实现除湿和加湿，可还是离不开饱和线。当时就想到喷淋溶液：它可以在 $I-D$ 图上实现上下左右全方位的调节，这才是理想的空气处理过程！除了像化工厂一样的溶液除湿过程，常规民用建筑的空气处理也应该用这样的过程才好！这一愿望就一直存在我心里。

2000 年，当时主持绍兴吉利尔科技发展有限公司的袁一军先生找到了我，希望在燃气驱动型溶液除湿机组方向上与清华合作。听了他们创业的艰辛过程，看了他们开发的样机，我真心钦佩他们的创新精神，也为他们取得的进展所鼓舞。当时我们的除湿研究小组也已经开展了 4 年的工作，溶液除湿正是我们探讨的一个方向，所以一拍即合，我们开始了与绍兴吉利尔的合作。当时李震、薛志峰等博士研究生陆续投入了相关工作，以后除湿机组规模扩大，陆续有陈晓阳、刘晓华、谢晓云、刘拴强等研究生加入。李震提出采用热泵同时为溶液除湿和再生提供冷量与热量的多级溶液除湿方案，刘晓华提出用多级溶液循环地对新风和室内排风喷洒以实现全热回收的方案，这些成为后来发展出的新型溶液调湿机组的技术关键。

2003 年 SARS 猖獗，中国疾病预防控制中心（CDC）的实验表明：作为吸湿溶液的溴化锂溶液可以使各种细胞脱水，从而 SARS 病毒失去可以附着的载体而不能传播。这样，溶液调湿机组不就可以解决 SARS 传播问题吗？由我出面召集，几路人马 5 月 1 日就开始聚集在密云的清华同方人工环境有限公司厂房开始了新机组的试制。绍兴吉利尔公司冒着非典的危险日夜兼程，把刚研制好的喷淋段、刮片式溶液泵等部件运到了密云，当时任清华同方人环公司总经理的范新也马上组织研究和制作班子，全力支持研制样机。第一台热泵式溶液除湿样机经过三天三夜的努力就制造出来，但出现了各种可靠性、稳定性问题。马上再造第二台，第三台。经过多方无私的协作，5 月 10 日，我们把第一台热泵驱动的溶液除湿新风机组安装在北京市人民医院急症病房屋顶，正好赶上这个急症病房解除戒严、重新开张。溶液除湿可以消除 SARS 病毒，这在很大程度上减轻了当时惧怕急症病房再次感染的恐惧。溶液除湿机为战胜 SARS 起了作用，SARS 又成了一个难得的机遇，促进了溶液除湿技术的发展。没有当时 SARS 的紧急情况，不可能有这么多家全力合作，无私奉献。SARS 使溶液除湿的研究开发一下子加快了好几年。

按照当时的研发思路，还是着重发展热驱动的溶液除湿技术。在北京市科委的支持下，我们与北京热力公司合作，在双榆树供热厂的办公楼建成了世界上第一个热驱动的溶液除湿新风系统+干式风机盘管末端的空调系统。这也可以认为是最早采用溶液除湿处理新风的温湿度独立控制空调系统。整个建筑采用一套溶液再生装置，用热力厂提供的热水对溶液再生，再把浓溶液送到各层楼的新风机中对新风除湿。我们提出全套空调方案，绍兴吉利尔公司制造溶液除湿新风机和热水再生机组。当时陈晓阳还在读研究生，这个实验工程的实施与测试就成为他的硕士研究课题。在各方的配合下，双榆树项目完工，我们第一次感受到温湿度独立空调营造的舒适的室内环境，也看到这一系统的出色的能源利用效率。然而，复杂的运行管理要求和不断出现的各种各样的故障却让我们认识到，一个技术要真正用到工程中，不仅要解决技术原理问题，更要解决各种工艺与部件问题，还要解决安装、维护、运行中的可操作性问题。相比人民医院的热泵型机组，热水型机组可能面临更多的实际困难要解决。

未来的发展首先应该是热泵型机组，这是两个工程尝试后得到的认识。我们对未来在流程、模块化方式、一些关键部件的方案等方面总结出系统的发展思路，准备依托绍兴吉利尔开发和推广这种新的热泵型溶液调湿机组。然而，几次讨论发现在技术方案上双方的思路很不相同，放弃吉利尔开发的刮片式溶液循环泵而采用磁力耦合溶液泵、放弃吉利尔的整体式多段溶液喷淋结构而改用模块化结构、停止吉利尔的燃气再生机组研制而主攻热泵驱动型机组。在这三个主要思路上形不成一致意见，继续研究开发就很难再走到一起。2003年底，我们只好告别了绍兴吉利尔，自己再接着在溶液调湿的路上摸索。真心希望绍兴吉利尔在他们认定的技术路线上也闯出一条路来，有大的作为。2006年我在美国普林斯顿的一家研发公司发现他们正在美国能源部的支持下研发燃气驱动的溶液除湿机组，技术路线很多处与绍兴吉利尔的考虑类似，可是吉利尔要比美国早2年！

结束与绍兴吉利尔的合作后，我们回到学校，再找机会。在北京市科委和清华同方公司的支持下，当时我们正在建设现在已成为清华大学建筑节能研究中心的“建筑节能示范楼”。那就先拿自己的办公楼示范！几个研究生组成的溶液除湿小组，全凭两只手和简单的工具，粘塑料、焊管道，在节能楼装上了一套实验性溶液调湿系统。为了实验研究，每层楼都采用了不同的流程，构成了一个真正的溶液调湿实验平台。这段时间，参加节能楼溶液调湿系统搭建的有李震、陈晓阳、刘晓华、谢晓云、刘拴强。原来在绍兴吉利尔工作的马学桃也参加了平台的制作、调试和维护工作。

节能楼溶液调湿空调的成功和从实践中摸索出来的大量收获，使我们不断萌生出产业化的想法。2005年，经过对几位希望投资者的沟通和考察，确定了合作伙伴，成立了华创瑞风公司，由陈晓阳担任总经理，专门开发、生产和推广溶液调湿空调。从此溶液除湿工作就从研发、试制进入了产品化和全面推广的新阶段。随着溶液调湿技术和产品的成功，国内更多的高校和研究机构也进行相关研究，新的流程、新的产品构思也陆续出现。

国内已经有几家企业生产溶液除湿、调湿产品，溶液调湿设备的产品标准也已经成为国家标准。我国目前成为世界上这一方向上研究最深入、产品最成熟、产品应用规模最大的国家。在空调设备领域，溶液除湿可能可以算作我国带头发展成功的新技术的一个代表吧？

四十年来溶液除湿事业一个阶段一个阶段地发展，是我国社会发展中一个个机遇的推动，也离不开一代代研发和推广人员百折不挠的努力，更靠全社会尤其是空调制冷行业的鼎力支持。我至今还记得当溶液除湿在社会上推广遇到一些困难时，中国制冷学会的几位老前辈在各种会议上一次次给予的坚决支持。这绝不是对一个溶液除湿技术的支持，而是对空调制冷领域中国人自己独立培育出来的技术的珍惜。老一辈空调人盼望着在中国这片土地上生长发育出更多更好的空调制冷新技术，盼望着空调制冷在我们这一代人手中大发展！衷心感谢全国空调制冷行业同仁对溶液除湿技术发展的巨大信任和无私支持。

鉴于上述发展历史，我们觉得到了全面总结一下溶液除湿研究的时候了。这就是写作这本书的初衷。书的写作者是刘晓华、张涛、李震等几位，该书反映了清华大学溶液除湿研究小组十多年来的研究成果。除了本书的作者外，这些成果还来自已经毕业的研究生陈晓阳、刘拴强、谢晓云、李海翔、常晓敏、易晓勤、唐艺丹、张海强和在读的研究生张伦（理想与实际的溶液除湿流程，第7章）、江晶晶（内冷型溶液除湿装置）等，感谢他们对溶液除湿事业的贡献。

本书既是十余年来溶液调湿研究与开发的总结，也希望是其今后更深入的研究和更广泛的应用的开始。祝我国的溶液调湿事业进一步发展、强大，为人工环境工程事业作出贡献，也希望它能够成为我国空调事业走出国门、从最大到最强的突破口。

江 伦

清华节能楼

2013年岁末

前 言

空气除湿(或加湿)过程是建筑室内热湿环境营造过程的重要环节,相应的空气湿度处理方法或装置是满足民用建筑中舒适性需求及工业建筑中工艺性需求的基本环节。在节能减排形势日益严峻的时代背景下,除了满足建筑环境控制的基本需求外,还要求空气湿度处理过程能够提高能源利用效率、实现高效运行。

溶液除湿(或称溶液调湿、液体除湿)是一种可有效满足空气湿度处理需求、综合利用多种品位能源的高效除湿方式,与传统的冷凝除湿等方式相比具有显著优势。从20世纪60、70年代至今,溶液除湿方式在我国经历了兴起—沉寂—再兴起的发展历程,体现了一种技术不断发展、不断进步和不断完善的强大活力。近年来,国内众多高等院校和研究机构积极开展溶液除湿空气处理方式的相关研究,多种多样的溶液除湿空气处理流程也不断涌现。在合理利用多种低品位能源、合理构建处理流程的基础上,溶液除湿空气处理装置的能源利用效率得到了大幅提高。由于溶液除湿空气处理装置能效的大幅提升,使得该种除湿方式具有较强的竞争力,有力促进了溶液除湿方式的不断成熟和产品设备的市场化,并在实际建筑中得到越来越广泛的应用。

本书既是溶液调湿理论与装置研发的阶段总结,也是下一步开展更深入研究和更广泛应用的开始。全书共分为10章,对溶液除湿空气处理方式的原理及装置进行了全面阐述,主要内容包括:建筑环境对湿度处理过程的需求,吸湿溶液的基本性质及溶液除湿的基本原理,溶液除湿装置的理论分析方法、性能影响因素及变化规律,空气—溶液热质交换过程的热湿耦合特性,溶液全热回收装置与溶液除湿装置的流程构建原则,余热驱动型和热泵驱动型溶液除湿空气处理装置的工作原理及实际性能,以及基于溶液除湿装置构建的舒适性和工艺性空调系统解决方案等。

由于作者水平所限,书中难免存在纰漏与欠妥之处,恳请广大读者批评指正,以便我们进一步改进提高。

目 录

第 1 章 建筑环境对湿度处理过程的需求	1
1.1 建筑室内热湿环境的要求	1
1.1.1 民用建筑室内热湿环境的要求	1
1.1.2 工业建筑室内热湿环境的要求	3
1.2 我国室外气象参数与空气处理过程的要求	5
1.2.1 室外气象参数与处理过程需求	5
1.2.2 目前空调系统存在的问题	8
1.3 常用的空气湿度处理方式	12
1.3.1 对空气的除湿过程	12
1.3.2 对空气的加湿过程	15
1.4 溶液除湿技术的发展历史	16
1.5 本书的主要内容	21
第 2 章 溶液除湿的基本原理	23
2.1 吸湿溶液的基本物性	23
2.1.1 常用的吸湿溶液	23
2.1.2 吸湿溶液与纯水的物性比较	26
2.2 溶液除湿的基本原理	27
2.2.1 溶液除湿方式的基本原理	27
2.2.2 典型的除湿、再生装置	28
2.3 溶液除湿—再生的处理流程	32
2.3.1 溶液除湿—再生的基本处理流程	32
2.3.2 与太阳能结合的溶液除湿方式	35
2.3.3 与热泵结合的溶液除湿方式	37
2.3.4 与 BCHP 结合的溶液除湿方式	38
第 3 章 绝热型溶液除湿/再生装置的传热传质性能	42
3.1 传热传质数学模型	42

3.1.1 顺流流型	43
3.1.2 逆流流型	44
3.1.3 叉流流型	45
3.2 实验与模型验证	47
3.2.1 实验测试	47
3.2.2 传热传质系数与数学模型的实验验证	51
3.3 传热传质过程的解析解	54
3.3.1 简化假设条件	54
3.3.2 不同流型热质交换过程的解析解	56
3.3.3 对解析求解结果的分析	61
3.4 性能影响因素与变化规律	62
3.4.1 传质单元数 NTU_m 的影响	63
3.4.2 气液流量比 R 的影响	65
3.4.3 流型的影响	68
3.4.4 空气与溶液进口状态在焓湿图上相对位置的影响	68
第4章 内冷型溶液除湿/再生装置的传热传质性能	70
4.1 传热传质数学模型	70
4.2 实验与模型验证	74
4.2.1 内冷型溶液除湿装置	74
4.2.2 内冷型溶液除湿实验台	75
4.2.3 实验数据与模型验证	76
4.2.4 除湿性能的影响因素分析	78
4.3 内冷型溶液除湿装置流型分析	81
4.3.1 极端工况: 冷却介质冷却能力无穷大	81
4.3.2 极端工况: 冷却介质无冷却能力	83
4.3.3 常规工况: 冷却介质有限冷却能力	84
4.4 内冷型与绝热型除湿装置的比较	85
4.4.1 理论性能比较	85
4.4.2 计算性能比较	86
第5章 溶液除湿/再生过程的显著特点——热湿耦合	90
5.1 传热与传质过程的耦合影响特性	90
5.1.1 传热与传质过程的相互影响	90

5.1.2 传热与传质驱动力的解耦分析	92
5.2 空气终状态的可及处理区域	98
5.2.1 不同流型下溶液与空气热湿交换过程的终状态	99
5.2.2 可及处理区域与边界线的物理意义	102
5.2.3 热质交换过程的可及处理区域分析	104
5.2.4 热质交换过程驱动力的沿程变化情况	106
5.2.5 不同流型传热传质效果的比较	109
5.3 空气处理过程的区域分区特性	111
5.3.1 四区划分方法	112
5.3.2 六区划分方法	115
5.4 溶液除湿/再生装置的优化分析	117
5.4.1 位于 B 区和 C 区再生效果的比较	117
5.4.2 位于 A 区和 D 区除湿效果的比较	118
第 6 章 溶液全热回收装置与流程构建	120
6.1 溶液式全热回收装置的工作原理	120
6.2 逆流形式的全热回收装置性能分析	122
6.2.1 理想的逆流全热回收装置	122
6.2.2 逆流全热回收装置的性能分析	124
6.3 叉流与逆流全热回收装置的比较	127
6.3.1 叉流与逆流全热回收效率的比较	127
6.3.2 叉流全热回收装置内传热传质驱动力分布	129
6.3.3 叉流全热回收装置的流程优化分析	130
6.4 多级叉流全热回收装置	134
第 7 章 溶液除湿空气处理流程构建	137
7.1 理想的溶液除湿过程（利用室内排风再生）	137
7.1.1 理想的逆流溶液除湿流程	139
7.1.2 有限传热传质能力对流程性能的影响	142
7.1.3 从逆流到多级叉流处理流程	146
7.2 理想的溶液除湿过程（利用室外新风再生）	150
7.2.1 理想的逆流溶液除湿流程	151
7.2.2 有限传热传质能力对流程性能的影响	153
7.2.3 从逆流到多级叉流处理流程	155

第 8 章 余热驱动溶液调湿空气处理装置	158
8.1 溶液除湿—再生系统循环过程基本原理	158
8.1.1 余热驱动溶液调湿系统	158
8.1.2 溶液再生装置	159
8.1.3 溶液除湿装置(新风机组)	161
8.2 余热驱动型溶液调湿装置的运行	165
8.2.1 夏季运行性能	165
8.2.2 冬季运行性能	167
8.2.3 余热驱动型溶液除湿装置的运行调节	172
8.3 溶液的蓄能特性	173
8.3.1 溶液罐的蓄能特性	173
8.3.2 蓄能能力的计算	176
8.4 余热驱动溶液调湿空气处理流程的探讨	177
8.4.1 应用太阳能作为热源流程设计需注意的问题	177
8.4.2 应用蒸汽压缩式热泵流程设计需注意的问题	179
第 9 章 热泵驱动溶液调湿空气处理装置	182
9.1 热泵驱动型溶液调湿空气处理过程的基本原理	182
9.1.1 不同热泵驱动型溶液调湿流程的比较	182
9.1.2 各种类型的溶液调湿处理流程	184
9.2 带有热回收的溶液调湿空气处理机组	189
9.2.1 机组性能测试与性能分析	189
9.2.2 建筑排风量不足对带有热回收装置的系统性能影响	191
9.3 不带热回收的溶液调湿空气处理机组	193
9.3.1 带有预冷的溶液调湿空气处理机组	193
9.3.2 用于深度除湿环境的溶液调湿空气处理机组	198
9.4 热泵驱动型溶液调湿装置的运行调节	201
第 10 章 基于溶液调湿方式的空调系统及应用案例	204
10.1 基于溶液调湿的空调系统整体方案	204
10.1.1 温湿度独立控制空调系统	204
10.1.2 热泵驱动的溶液调湿系统应用实例(深圳某办公楼)	209
10.1.3 余热驱动的溶液调湿系统应用实例(北京某办公楼)	213

10.1.4 热泵驱动溶液除湿系统应用实例（北京某工业厂房）	218
10.2 溶液除湿方式与系统发展展望	223
附录 A 常用吸湿溶液的性质	226
A.1 溴化锂溶液	226
A.2 氯化锂溶液	229
A.3 氯化钙溶液	233
附录 B 绝热型溶液除湿装置的实验测试结果	236
B.1 溶液除湿性能测试结果	236
B.2 除湿装置的阻力测试结果	241
附录 C 溴化锂溶液与氯化锂溶液的除湿与再生性能对比	243
C.1 除湿性能比较分析	243
C.2 再生性能比较分析	247
C.3 传质性能讨论	249
附录 D 塑料内冷型溶液除湿/再生装置	253
D.1 塑料内冷型换热装置	253
D.2 塑料装置换热性能测试	254
附录 E 溶液除湿方式对室内空气质量的影响	257
E.1 溶液除湿方式送风中的离子含量	257
E.2 溶液除湿方式对室内空气品质的影响	258
参考文献	263

第1章 建筑环境对湿度处理过程的需求

1.1 建筑室内热湿环境的要求

在生产和生活环境里,空气湿度十分重要,湿度调节是关系到舒适条件、生产条件、物资保管储存条件的重要因素。空气湿度过高,会引起金属锈蚀,食品、粮食、药品等变质和霉烂,电气绝缘性能降级,给生产生活带来巨大损失。在精密机械、化工等生产过程中,如不对湿度进行控制,会严重影响产品质量。而且湿度与人体健康密切相关,潮湿的环境容易引发关节炎等疾病,人在适宜的温湿度环境下才能感觉舒适,从而提高工作效率。

从建筑功能的角度来看,建筑可分为民用建筑与工业建筑两大类,根据需求的不同,两种建筑类型中的室内环境控制系统的主要任务也存在较大差异。民用建筑中的室内环境控制系统主要用于满足人员的热舒适性要求,而工业建筑中的室内环境控制系统则主要用来满足工业产品的生产环境要求和工艺性需求。以下分别分析典型民用建筑和工业建筑室内环境的温湿度参数需求情况。

1.1.1 民用建筑室内热湿环境的要求

自然环境中的空气可以认为是由干空气和水蒸气组成的混合气体,其中水蒸气含量很少,每千克空气只含有几克到几十克水蒸气,但水蒸气的含量对空气状态的影响却很大。通常采用含湿量(绝对湿度)或相对湿度表示空气的湿度,含湿量(绝对湿度) ω 是指对应于一千克干空气的湿空气中所含有的水蒸气质量(单位:kg/kg干空气),而相对湿度 φ 则定义为湿空气中的水蒸气分压力 P_q 与同温度下饱和湿空气中的水蒸气分压力 $P_{q,b}$ 之比。两种度量湿空气中水蒸气含量的指标可分别用式(1-1)和式(1-2)计算,其中 B 为大气压力。

$$\omega = 0.622 \frac{P_q}{B - P_q} \quad (1-1)$$

$$\varphi = \frac{P_q}{P_{q,b}} \times 100\% \quad (1-2)$$

对于湿空气中的含湿量 ω 或相对湿度 φ ,前者用来表征湿空气中含有水蒸气的绝对量,而后者则用来表征湿空气中水蒸气含量接近饱和的程度。图1-1给出了在常压情况下湿空气的状态在焓湿图上的表示,当 ω 不变时, φ 随着温度的升高而降低;当 φ 不变时,

ω 随着温度的升高而增大。

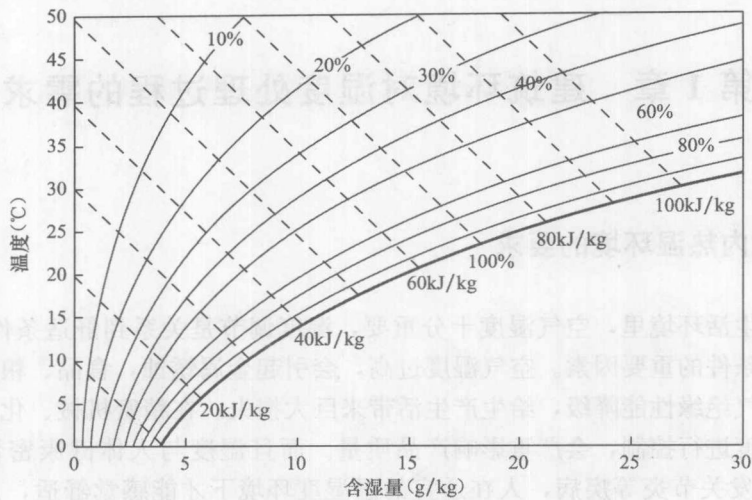


图 1-1 湿空气的焓湿图（标准大气压下）

在民用建筑中，室内环境控制系统的任务是提供舒适、健康的室内环境。舒适、健康的室内环境要求室内温度、湿度、空气流动速度和空气品质都控制在一定范围内。我国对舒适性空调的室内参数做出了具体的规定（GB 50189—2005），其冬夏室内参数的设置推荐值见表 1-1。类似地，《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB 50736—2012 中也给出了应用空调系统时室内推荐的温湿度参数值（见表 1-2），图 1-2 给出了上述设计参数在焓湿图上的表示。从图中室内设计参数的变化范围来看，为满足人员舒适性要求，建筑内温湿度参数在较小的范围内变化，这对空气处理装置提出了较为严格的要求。

民用建筑空气调节系统室内计算参数（GB 50189—2005）表 1-1

参 数		冬 季	夏 季
温度（℃）	一般房间	20	25
	大堂、过厅	18	室内外温差≤10
风速（v）（m/s）		0.10≤v≤0.20	0.15≤v≤0.30
相对湿度（%）		30~60	40~65

人员长期逗留区域空调室内设计参数（GB 50736—2012）表 1-2

类 别	热舒适度等级	温度（℃）	相对湿度（%）	风速（m/s）
供热工况	I 级	22~24	≥30	≤0.2
	II 级	18~22	—	

续表

类 别	热舒适度等级	温度 (°C)	相对湿度 (%)	风速 (m/s)
供冷工况	I 级	24~26	40~60	≤0.25
	II 级	26~28	≤70	≤0.3

注：I 级热舒适度较高，II 级热舒适度一般。

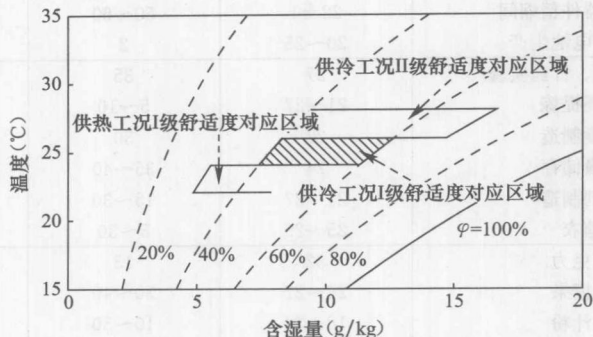


图 1-2 室内设计参数在焓湿图上的表示

1.1.2 工业建筑室内热湿环境的要求

在工业建筑中，很多工艺性生产、加工场合对室内温湿度、洁净度等有着严格的要求，对室内热湿环境调控是保障工艺生产需求的重要环节。与上述民用建筑中满足舒适性需求的室内热湿环境营造要求相比，工业建筑中对室内热湿环境的工艺性需求通常更加严格。由于工业产品类型众多，所要求的室内生产环境差异很大，表 1-3 给出了常见的工业低湿环境指标（《空气调节设计手册》（第二版），1995；联众控湿产品样本，2004）。电子零件装配车间要求室内温度 21℃、相对湿度在 40%~45%，室内的含湿量在 6.1~6.9g/kg。锂离子电池生产车间要求室内温度在 20~25℃、相对湿度仅为 2%，室内的含湿量仅为 0.3~0.4g/kg。图 1-3 给出了典型工业建筑中工艺生产过程的室内环境参数需求在焓湿图上的表示。从图中所示的不同室内状态点可以看出，多种工业生产过程中均需要较稳定、较低的室内湿度参数，室内含湿量通常在 10g/kg 以下，这也就对湿空气的湿度处理过程提出了严格要求。

常见的工业低湿环境指标

表 1-3

	典型工艺性生产过程	温度 (°C)	相对湿度 (%)	含湿量 (g/kg)	来源
机械类	高精度外圆磨床	16~24	40~65	4.5~12.1	手册
	高精度刻线机（机械刻划）	20±0.1~0.2	40~65	5.8~9.5	手册
	热学计量室（标准热电偶）	20±1~2	<70	<9.6~11.6	手册
	力学计量室（检定 1~3 级天平）	(17~23) ±0.5	50~60	5.8~10.9	手册
	长度计量室（检定一等量块）	20±0.2	50~60	7.2~8.8	手册
	I 级坐标镗床	20±1	40~65	5.4~10.1	手册