

除湿设计

[日] 鈴木謙一郎 · 大矢信男 著



李先瑞 译 吴元炜 校

中国建筑工业出版社

除湿设计

[日] 鈴木謙一郎 大矢信男 著

李先瑞 译 吴元炜 校

中国建筑工业出版社

本书详细阐述了除湿的基本知识，介绍了冷却式（露点法）、液体吸收式（化学法）、吸附式和非加热再生式（压力升降法）四类除湿方法的原理、特征、适用范围、组合使用方法、先进的除湿机种类及设计计算方法和计算用图表。书中还介绍了湿度自动控制原理及控制测试仪表。并列举了各种工艺中的应用实例。

本书内容较新，且完整系统，可供从事空调和除湿有关的工程技术人员阅读。

空調技術者のための

除湿の实用設計

鈴木謙一郎・大矢信男 著

共立出版株式会社

1980年10月20日 初版2刷發行

* *

除湿設計

李先瑞 译 吴元炜 校

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本：850×1168毫米 1/32 印张：8 3/4 字数：235 千字

1983年6月第一版 1983年6月第一次印刷

印数：1—10,000册 定价：1.10元

统一书号：15040·4442



原 序

日本气候高温多湿，因此在保存设施、美术馆、博物馆等建筑物中必须安装除湿装置，它已成为空调设备的一个组成部分，并正在迅速发展起来。在人们的生活环境中，除湿机也正在普及，特别是在烦人的黄梅雨季节里，有了它就会使我们过得舒适些。

众所周知，若把容易生锈的金属制品放在干燥的密闭容器中保存，就不易生锈。人们也总是把吸湿剂和容易受潮的药品、食品、糕点等包装在一起。不仅在人们的日常生活中，而且在各种工业部门内也广泛地应用了除湿技术。在工厂车间内，如不对环境的湿度进行控制，电气线路、精密机器、自动化装置等就会经常发生故障，以致增加相当可观的维修费用。

当今，电子元件（半导体和集成电路等）的发展十分令人瞩目，而在生产工艺过程中都要求有极严格的湿度控制。近来，精密机器已引进了电子控制，所以湿度对其质量有极大的影响。维生素和抗菌素等药品的生产和包装，也离不开湿度的控制。在化学工业方面，原料气体（乙烯、丙烯、丁二烯）的生成反应中，水分会使催化剂失去作用，为此必须将气体脱湿至极低程度。所以，今后在具有多种副产品的高价值化工生产过程中，除湿操作的重要性会愈加明显。然而，仅用以往空气调节技术是无法解决这些问题的。这就需要有除湿技术的专门知识。从需要出发而建立的除湿体系，其主要目标是确立从气体中除去湿分的技术，它是一门实用的技术。在实际生产工艺所要求的除湿技术中，必须具有包括传热、制冷、吸收、吸附等范围广泛的化工知识。自从除湿技术的入门书《除湿》（山田治夫，日刊工业新闻社，1958年）问世以来，这个领域的专门书籍还很缺乏。

11/81/05

本书作为所谓的入门书，详细解释并介绍除湿操作的基本理论，而且尽量满足作为实用技术书的条件。本书既能供除湿运行管理人员使用，又能供研究、设计除湿装置的技术人员使用。作者期望本书能对除湿技术的发展有所贡献。但遗憾的是作者才疏学浅，书中不足之处，深望读者指正。

著 者

1980年5月

译 者 的 话

空气湿度是一个与人们的生产和生活有密切关系的重要环境参数。空气湿度过高，会引起金属锈蚀，机器损坏，粮食、种籽、食品、茶叶、药品、水果等变质和霉烂，电气绝缘性能降级，给国民经济造成重大损失。在精密机械、计量仪器、电子、纺织和化工等生产过程中，如不对湿度进行控制，会严重影响产品质量。因此，随着生产的发展和水平的提高，逐步发展并形成了一门新的技术——空气除湿。它已日益成为工业、农业、国防、轻工业、商业和日常生活中不可缺少的一门专门技术了。

我国为解决地下工程中环境潮湿问题，也先后试验和发展了多种实用的除湿技术和设备。但目前尚未看到国内有系统介绍除湿技术方面的书籍，很不利于这门技术的推广应用。

为了了解国外在除湿方面的发展现状和动态，并从中学习和借鉴适合于我国的技术，因此把这本较新的专著介绍给我国读者。

本书详细阐述了除湿的基本知识，系统介绍了四种除湿方式的原理、特性、使用范围，各种较先进的除湿设备，各项设计计算方法、计算图表；书中还介绍了湿度自动控制的原理及测试控制仪表；此外，还列举了湿分给工艺过程和生活带来的危害，以及除湿机的应用和防湿措施；最后，作者展望了除湿技术的发展前景。这是当前较系统、较全面阐述除湿技术的专著，也是目前较新和较实用的一本书。因此译出以补我国这方面的空缺。

在翻译过程中，秦兰仪同志作了许多工作，在此表示感谢。

由于译者水平所限，加以时间仓促，不妥之处，敬请读者批评指正。

目 录

第一章 空气中的水分浓度和湿度

第一节 除湿操作的基础	1
一 调湿、减湿操作的热力学(静态特性)	1
二 调湿、减湿操作中的传质(动态特性)	8
三 除湿方法的种类	10
四 水分造成的危害和除湿装置	12
第二节 水分浓度和测定手段	30
一 水蒸气分压力	30
二 露点温度的测定	37
三 指示型(阿洛那式)露点温度计	41
四 电气式水分测定方法	41
五 电子式水分测定方法	46
文 献	48

第二章 冷却除湿(露点法)

符号表	49
第一节 冷却除湿的原理和特征	50
第二节 冷却除湿的种类	54
第三节 空气喷水室冷却除湿	55
一 空气喷水室的构造	55
二 喷水室的设计	56
第四节 冷却盘管式的冷却除湿	62
一 直接蒸发盘管式的冷却除湿	62
二 用冷水(不冻液)盘管的冷却除湿	92
三 冷却盘管的低露点除湿	108
第五节 冷却除湿的再热	112

一 再热量	112
二 再热方法	112
文 献	117

第三章 液体吸收式的化学除湿法

第一节 气液接触式除湿机	118
一 用吸收塔除湿	119
二 实际装置的设计	128
三 应用例子和今后的发展	138
第二节 蜂窝式除湿机	146
一 蜂窝式除湿机的构造和特征	146
二 除湿的原理和性能	148
三 蜂窝式除湿机的规格和性能	151
四 实用的选择计算方法	151
五 计算例题	155
第三节 湿度的自动控制	156
一 电气式湿度控制	156
二 电子式湿度控制	158
三 气动式湿度控制	160
四 电子-气动式湿度控制	161
文 献	161

第四章 用吸附剂的空气除湿方法

第一节 吸附的基础理论	162
一 吸附剂的选择吸附性	162
二 吸附时的传质	165
第二节 静态吸湿法的原理	171
第三节 动态吸附除湿装置	181
一 连续除湿原理	181
二 吸附装置的性能	185
第四节 实际使用的吸附除湿装置的设计	199
文 献	203

第五章 非加热再生法除湿

第一节	除湿装置的概要(压力升降再生法)	205
第二节	除湿装置的基础设计	214
一	吸附量 Δq_0 的计算	214
二	吸附带长度和层高的计算	215
三	影响出口干燥度的各种因素	217
四	再生空气量的计算	217
五	实际装置的设计和结果	218
文 献		221

第六章 利用特殊吸附床的除湿方法

第一节	旋转吸附床除湿装置	222
一	设计理论	223
二	再生区的设计	224
三	旋转吸附床的尺寸	225
第二节	移动床式除湿装置	225
一	双成分系的分离理论	227
二	单一成分系的分离(脱湿)	228
三	粒子的移动和输送	229
第三节	多段流动床除湿装置	230
一	段数的确定和段效率	230
二	流动床吸附装置的主要特征	233
文 献		234

第七章 除湿装置的应用

第一节	高炉送风用的除湿装置	235
第二节	钢铁制品	238
一	钢板的加工	238
二	冷轧钢带卷(Strip Coil)的冷却防锈法	240
三	钢板保管仓库的除湿空调	240
第三节	电气设备	241

第四节	船舶	243
第五节	仓库和保管	245
第六节	医疗(医院)	247
第七节	处理其它吸湿性制品	247
第八节	装置工业(化学工厂)	250
第九节	石油化学	251
第十节	湿度和生活环境	256
文 献	261
附录表1	与水(冰)相接触的空气性质表	262
附录图1	相对湿度和干球温度(t)、露点降($t-t'$)的 关系	269
附录图2	湿度图	270
附录图3	焓-温图	271

第一章 空气中的水分浓度和湿度

第一节 除湿操作的基础

一、调湿、减湿操作的热力学（静态特性）

调湿即是任意地增加或减少空气中水蒸气量的操作。在我们周围的空气内都含有一些水蒸气。含有水蒸气的空气叫湿空气，完全不含有水蒸气的空气叫干空气。把湿空气处理到干空气的过程叫做减湿或除湿。

若以湿空气作为原料，减湿或除湿这种操作就是“制造”过程，所得到的干空气就是“制品”。用水分含量这个重要数量来表征所得的干空气品质，它不是相对湿度，而是1公斤干空气内水分的含量，叫含湿量或简称湿度。湿度是个无因次量，为方便起见，记上单位（kg水/kg干空气）。

当将某容器内湿度为 x 的湿空气温度降低至某温度 t_s 时，一部分水蒸气再不能以气体的形式存在，变为液体。这个温度 t_s （°C）叫做空气的露点。当气体中发生雾时，说明水分含量达到了饱和蒸汽量。

用增加水蒸气量来代替降低温度，同样也能使空气达到饱和状态。此时取饱和空气含湿量 x_s ，初始的含湿量 x 与 x_s 的比用百分比表示，叫做饱和度^①。饱和度又叫比较湿度，它表示与同温度下饱和状态的差异。

某温度下水蒸气分压 p 与饱和水蒸气分压 p_s 的比，用百分比表示，称之为相对湿度。饱和水蒸气分压随温度的变化而变化。这就是说作为相对湿度的基准量是个变量，使用起来是不方便

^① 请注意，气象学中所说的相对湿度是水蒸气分压（mmHg）和饱和水蒸气分压（mmHg）之比 $p/p_s \times 100$ ，与此处的饱和度是不同的。

的。由于经常使用这一概念，读者应该十分熟悉。除湿技术中所用湿度，指的是不受温度和压力影响的含湿量。

如考察一下空气中的这种水分液体，则几乎与所有的液体一样，都是与其蒸气共存。与蒸气共存的液体叫做饱和液体，对蒸气而言，就叫做饱和蒸气。在气液共存的系统中，如温度一定，则覆盖在液面上的蒸气压也一定。把它称为饱和蒸气压，以 atm (气体)、 kg/cm^2 或者 mmHg 表示。在任何温度下，空气中的水分均具有一定蒸汽压，其值常在 1 atm 以下，加上空气的压力后为 1 atm。这个蒸汽压几乎与空气压无关，它表示液体固有的蒸汽压，所以也能用它计算溶于 1 m^3 空气内的水蒸气量。

能够测量出各温度下水和饱和蒸气压的关系 (见书后空气性质表)，表内同时还列出了与温度相对应的焓和饱和空气含湿量 x_1 。

调湿操作中不变的成分是什么？当然是空气，变化的成分是水。计算变化前后的物质得失量这项工作叫物质平衡计算。从空气中除去水分的操作中，必定存在水量的平衡，水分必定被浓缩或者积聚在某处。

这个过程中物质不灭定律必定成立。物质进入某容器内，其状态会不断地改变，特别重要的是连续流入容器，发生变化，又连续流出的情况，入口和出口间存在物质平衡问题。这时的所谓容器，本身就是一个在内部可对流入物质给予相应变化的调湿装置。则水分被积聚在入口和出口间有物质不平衡的装置内了。

其次，根据能量守恒定律进行能量平衡计算。进入某容器内的物质，当它的状态发生变化后离开容器时，入口和出口间存在能量平衡问题。此时要考虑如下几项能量。

- (1) 内能 $mV(\text{kcal})$ (V 是与以 0 作为内能基准状态的差)
- (2) 位能
- (3) 动能 (kg-m)
- (4) 加在装置内的功 $W(\text{kg-m})$
- (5) 加入装置的热量 $Q(\text{kcal})$

对调湿和除湿这种同时发生传热和传质的过程，必须考虑引起这种变化的能量。这时用焓表示能。

$$(6) \quad i = U + pV \quad (\text{kcal}) \quad (1-1)$$

若出口、入口处在同一基准面，动能很小，功 W 也为零，且在除湿过程中，入口和出口空气质量相等，则可简化能量平衡关系，即入口、出口的焓差就等于加入装置的热量 Q 。在绝热条件下除湿时，出、入口的焓差等于零，即入口、出口的焓相等。

(一) 热容量

热量分为显热和潜热。在到达沸点之前，使水温上升的热量为显热。达到沸点时，即使继续加入热量，温度也不上升，均变为使水汽化的潜热。

使物质温度上升 1°C 所必需的显热称为热容量。单位重量(kg)的物质的热容量称为比热(kcal/kg $^\circ\text{C}$)。混合气体的比热是它的各组成成分的比热之和。若空气的比热为 $C_{\text{空气}}$ ，水蒸气的比热为 $C_{\text{水}}$ ，湿空气的湿度为 x ，则温度从 t_1 上升至 t_2 时所必需的热量 Q 可用式(1-2)计算。表1-1列出了各种气体的定压比热。

平均定压比热¹⁾ (kcal/kg-mole $^\circ\text{K}$) 表 1-1

t ($^\circ\text{C}$)	空气	CO_2	H_2	水蒸气	N_2	O_2	SO_2
18	6.94	8.70	6.86	7.99	6.96	7.00	9.38
100	6.96	9.25	6.92	8.04	6.97	7.06	9.81
200	7.01	9.73	6.95	8.13	7.00	7.16	10.22
400	7.14	10.48	6.98	8.35	7.09	7.40	10.91
600	7.28	11.11	7.02	8.62	7.21	7.61	11.42
800	7.43	11.57	7.07	8.91	7.36	7.79	11.79
1000	7.57	11.94	7.13	9.20	7.50	7.94	12.08
1200	7.69	12.25	7.21	9.47	7.63	8.06	12.29
1400	7.79	12.50	7.29	9.74	7.74	8.18	12.46
1600	7.89	12.71	7.37	9.98	7.83	8.25	12.60
1800	7.97	12.88	7.46	10.22	7.92	8.34	12.71
2000	8.04	13.03	7.54	10.43	7.99	8.43	12.80

① 此处原文为 Q/m ，似有误。——译注

$$Q = (C_{\text{空气}} + xC_{\text{水}})(t_2 - t_1) \\ = (0.24 + 0.45x)(t_2 - t_1) (\text{kcal/kg}) \quad (1-2)$$

在有相变的混合气体的热量计算公式中，除了计算气体本身的热量之外，还必需加上潜热。在有水变为水蒸气的场合，就是求在各种不同温度下的蒸发潜热（见表1-2）和显热之和。冷凝时的情况也一样，空气中水蒸气在20°C凝结时，要放出与潜热相当的冷凝热。在除湿过程中，水分凝结并被除去，但此时由于水分浓度 x_1 （kg水/kg空气）很小，水蒸气相变的凝结热在总热量中所占的比率与显热相比是很小的，因此可以忽略不计。

水的性质¹⁾

表 1-2

温度 (°C)	比 重 (—)	比 热 (kcal/ kg°C)	蒸发潜热 (kcal/kg)	温度 (°C)	比 重 (—)	比 热 (kcal/ kg°C)	蒸发潜热 (kcal/kg)
0	0.99987	1.0076	597.1	50	0.98807	0.9988	568.8
4	1.0000			60	0.98324	0.9997	563.0
5	0.99999	1.003	594.3	70	0.97781	1.0009	557.1
10	0.99973	1.0015	591.5	80	0.97183	1.0025	551.1
15	0.99913	1.0000	588.7	90	0.96534	1.0046	545.0
20	0.99823	0.9991	585.9	100	0.95838	1.0072	538.8
30	0.99568	0.9983	580.2	110			532.4
40	0.99225	0.9983	574.5	120			525.9

(二) 相对湿度 H 和含湿量 x

通常气象学上所说的相对湿度和工程上的含湿量是不同的。若干球温度计的读数是 t (°C)，湿球温度计的读数是 t' (°C)，则可用下面的实验，公式求出水蒸气分压力 p 。

$$t' < 0^\circ\text{C}; \quad p = p'_s - 0.00079(t - t')\pi \\ t' > 0^\circ\text{C}; \quad p = p'_s - 0.00069(t - t')\pi \quad (1-3)$$

式中 p —— 水蒸气分压 (mmHg)；

π —— 计算时的大气压 (mmHg)；

p'_s —— 相应于湿球温度 t' 的饱和蒸汽压 (mmHg)；

p_s —— 相应于干球温度 t 的饱和蒸汽压 (mmHg)。

用 $\left(\frac{p}{p_s} \times 100\right)$ 表示相对湿度 $H(\%)$ 。通常可按上述方法，

利用附录图 1 求出相对湿度。

我们生活中经常使用相对湿度，所以很熟悉。气象学上使用的湿度是相对湿度。也可以用相对湿度表示不舒适指数。含湿量相同时，即使气温较高，只要相对湿度不大，人们仍然感到舒适。但相对湿度会随着温度的变化而变化。用普通干湿球温度计测定相对湿度时，随通风状态的改变，会产生相当的误差。因此，在要求测定精度较高的地方，则需使用阿斯曼通风干湿球温度计。

有毛发式湿度计，氯化锂式湿度计和双金属片式湿度计，其测定值都表示为相对湿度。但在工程上用它表示湿度不太方便，这是因为其值随着温度的变化而变化，所以不能用它作为设计时的基准值。工程上用绝对水分含量 x kg水/kg空气 (kg水/m³空气) 代替相对湿度 H 。本文中简称的“湿度”指的是含湿量 (kg水/kg干空气)。用下式定义含湿量 x 。

$$\text{含湿量} = \frac{\text{湿空气中的水蒸气量 (kg)}}{\text{湿空气中的干空气量 (kg或m}^3)}$$

$$= \frac{\text{湿空气中的水蒸气量}}{\text{湿空气量} - \text{水分含量}}$$

这时若取绝对水分含量为 x ，水蒸气分压为 p ，空气的全压为 π ，则

$$x = \frac{18}{29} \times \frac{p}{\pi - p} = 0.622 \times \frac{p}{\pi - p} \quad (1-4)$$

若湿度是用摩尔湿度 x_m (kg摩尔/kg摩尔) 表示时，则可按下式换算为工程中的湿度 x ，

$$x = 0.622 x_m \quad (1-5)$$

若以饱和水蒸气压 p_s 代替式(1-4)中的分压 p 时，则饱和含湿量 x_s (kg水/kg空气) 为

$$x_s = \frac{0.622 \times p_s}{(\pi - p_s)} \quad (1-6)$$

(三) 饱和度 (相对湿度) 的定义

$$\begin{aligned} \text{饱和度 } \psi &= \left(\frac{\text{不饱和空气的含湿量}}{\text{饱和含湿量}} \right) \times 100 \\ &= \frac{x}{x_s} \times 100 = \frac{p(\pi - p_s)}{p_s(\pi - p)} \times 100 \text{①} \quad (1-7) \end{aligned}$$

(四) 湿空气的比热

若干空气的比热为 C_a ，水蒸气的比热为 C_w ，则湿空气的比热 C_H 为

$$C_H = C_a + xC_w = 0.24 + 0.45x \quad (1-8)$$

(五) 湿空气的比容

把对应于 1 kg 干空气的湿空气容积定义为湿空气的比容 V_H ，则

$$V_H = 22.4 \left\{ \frac{(t+273)}{273} \right\} \left(\frac{1}{29} + \frac{x}{18} \right) \quad (1-9)$$

(六) 焓

1 kg 干空气的焓 i_a 与包含在其中的 x kg 水蒸气的焓 xi_w 的和即是湿空气的焓 i ，

$$i = i_a + xi_w \quad (1-10)$$

若温度 t_0 时的蒸发潜热为 L_{H_0} ，

$$i = i_a + xi_w = C_a(t - t_0) + x[L_{H_0} + C_w(t - t_0)] \quad (1-11)$$

$$= (C_a + xC_w)(t - t_0) + L_{H_0}x$$

$$= C_H(t - t_0) + L_{H_0}x \quad (1-12)$$

即焓是湿空气的比热乘以温度差与含湿量乘以蒸发潜热之和。当基准温度为 0°C 时，从表 1-2 查得 $L_{H_0} = 597.1 \text{ kcal/kg}$

$$i = C_H t + 597.1x \quad (1-13)$$

$$\text{或 } i = (0.24 + 0.45x)t + 597.1x \quad (1-14)$$

以 0°C 水为基准，则可用下式计算饱和空气的焓，单位是 (kcal/kg)。

$$i_s = (0.24 + 0.45x_s)t + 597.1x_s \quad (1-15)$$

(七) 湿度图表的制作方法

① 温度低时， p 、 p_s 比 x 小得多，所以饱和度 ψ 与相对湿度 H 一致。

温度计测出的温度叫干球温度。湿球温度 t_w 含义如下：由毛细管作用上升至湿球的水分，在其表面上蒸发，夺取热量，不久湿球表面的温度显示一定值，它表示的是水分持续蒸发的一种平衡状态，这个温度就是湿球温度。此种状态是空气传给水的热量和水的蒸发热相等的动平衡状态。根据传热和热扩散的理论，建立如下关系，

$$h(t-t_w)=kL_H(x_w-x) \quad (1-16)$$

式中 h ——空气边界层的放热系数 ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$)；

k ——传质系数 ($\text{kg}/\text{m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$)；

t ——温度 (下标 w 为湿球)；

x ——湿度 (kg/kg)；

L_H ——与湿球温度相对应的水的蒸发潜热 (kcal/kg)。

由于 $\frac{h}{k} \approx C_H \bullet$ ，所以公式(1-16)为

$$C_H(t-t_w)=L_H(x_w-x) \quad (1-17)$$

式中 C_H ——湿空气的比热 ($\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$)。

将干湿球温度计的读数代入式(1-17)，再按下式求出含湿量 x ，

$$x=x_w-C_H \cdot \frac{t-t_w}{L_H} \quad (1-18)$$

式中， x_w 是相应于该湿球温度的含湿量 (kg/kg)，从水蒸气表上，根据 t_w 查出 p_w 后，则可用下式求出 x_w ，

$$x_w=\frac{0.622 \times p_w}{(\sigma-p_w)} \quad (1-19)$$

例如，若 $t_w=30^\circ\text{C}$ ，则 $x_w=0.0272\text{kg}/\text{kg}$ ， $L_H=580.2\text{kcal}/\text{kg}$ 水，将它们代入公式(1-18)，则

$$x=0.0406-0.000448t$$

若把干球温度 $t^\circ\text{C}$ 代入上式，即能计算出含湿量 x (kg/kg 干空气)。(如代入 $t=40^\circ\text{C}$ ，则 x 为 $0.0227\text{kg}/\text{kg}$)。使用湿

● 刘依斯比 $\frac{h}{k}=C_H \approx 0.26$