

地下工程防潮除湿

程 绍 仁 编著



国防工业出版社

地下工程防潮除湿

程 绍 仁 编著

國防工業出版社

内 容 提 要

本书以地下工程维护管理的内容为重点,从理论到实践,比较全面、系统地论述了地下工程潮湿的原因以及地下工程防潮除湿的途径。

本书具有较强的独立性和系统性,从地下工程的维护管理实践出发,写得简明扼要,通俗易懂,适用于地下工程维护管理人员培训或自学,也可供从事地下工程的科技人员阅读和参考。

地下工程防潮除湿

程绍仁 编著

责任编辑 张仁杰

*

国防工业出版社出版、发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张7³/₄ 175千字

1990年6月第一版 1990年6月第一次印刷 印数: 0,001—1,565册

ISBN 7-118-00149-X/TU1 定价: 4.10元

目 录

第一章	地下工程防潮除湿的基本知识	1
第一节	地下工程的类别和特点	1
第二节	地下工程防潮除湿的意义	3
第三节	空气的组成和状态参数	4
第四节	焓湿图的组成和应用	14
第五节	地下工程防潮除湿常用测试仪表	22
第六节	对空气环境的要求	42
第七节	地下工程内部温、湿度变化的规律	46
第八节	地下工程的自然通风	48
第二章	地下工程潮湿的原因	58
第一节	壁面散湿	58
第二节	外界热湿空气进入工程	71
第三节	敞开水面和潮湿表面的散湿	71
第四节	人体散湿	73
第三章	地下工程的防潮	75
第一节	防止外界热湿空气自由侵入工程内部	75
第二节	严格控制工程内部的水分散发	82
第三节	地下工程内部的分区密闭	93
第四节	加强工程的维护管理	93
第五节	地下工程的封闭防潮	94
第四章	地下工程的除湿	97
第一节	自然通风驱湿	97
第二节	加热与通风驱湿	99
第三节	固体吸湿剂除湿	102
第四节	液体降湿	107
第五节	氯化锂转轮除湿机除湿	108
第六节	冷冻降湿机除湿	110
主要参考文献		118

第一章 地下工程防潮除湿的基本知识

第一节 地下工程的类别和特点

为了适应现代核战争的需要，为了节约能源和一些生产工艺的特殊要求，以及城市人口的增长，为了开发地下空间，国内外的地下工程在第二次世界大战后迅速发展。

一、地下工程的类别

地下工程的类别归纳起来可分为以下几种：

(一) 按用途分

1. 军事工程

用于军事目的的工程。

2. 非军事工程

应用于民用方面的工程。

3. 生产性工程

如地下厂房或车间，按工艺要求又分为恒温恒湿车间(或厂房)和非恒温恒湿车间(或厂房)。

4. 非生产性工程

如仓库、商店、学校及其它公共建筑。

5. 交通运输工程

如地下铁道、公路，地下街道、越江隧道等。

(二) 按工事的构筑时机分

1. 永备工事

战前构筑好的工事。

2. 野战工事

临战前就地构筑的工事。

(三) 按结构的处理可分

1. 毛洞

2. 被覆衬套结构

(四) 按构筑形式分

1. 坑道

构筑在地平线以上的工事。

2. 地道

构筑在地平线以下的工事。

(五) 按构筑材料分

1. 钢筋混凝土工程

2. 土木工程

3. 砖石工程

(六) 按施工方式分

1. 开挖式工程

通过挖开防护层而修建的工程。

2. 暗挖工程

未破坏防护层而修建的工程。

(七) 按所处的地区分

1. 山洞

处在山区,它是从山坡的侧面向内挖掘而成。

2. 埋设建筑

半埋设建筑:其建筑主体的一部分高出地平面。

全埋设建筑:其建筑的主体均位于地平面以下。

(八) 按覆盖层的深浅分

1. 深埋地下工程

指的是外界气温及其年周期性变化对坑内温度状况的影响可忽略不计,即坑内常年温度不随外界气温的变化而变化。其覆盖层的厚度大于 12m 的工程。

2. 浅埋地下工程

覆盖层的厚度小于 12m 的工程。

(九) 按顶部的防护特征分

1. 隧道式

它是利用建筑物上面的自然土壤或岩石直接承受冲击波和爆炸波作用的。

2. 多层式

顶部由多层——伪装层、防爆层、缓冲层、支撑层等组成。

3. 整体式

它是用支撑结构直接承受破坏作用的。

(十) 按使用情况分

1. 平时使用的工程

如地下工厂、商店、街道等。

2. 平时不使用的工程

为专门用途的工程,如用于军事目的,平时工程没有投入使用。

3. 平战结合的工程

间于上两种工程之间,虽为用于战时,但为了获得经济效益,平时也投入了使用,如城市的一些人防工程。

二、地下工程的特点

(1) 大多数地下工程深埋于地下,它具有目标小、不易暴露,有较好的密闭性能和一定的防护能力。因此,它适应未来战争的要求。

(2) 恒温节能。深埋地下建筑夏季不受太阳辐射热的影响,冬季没有围护结构的传

热损失，所以一年四季一般不受外界气候的影响，或影响甚微，常年内部气温可以认为是恒定的。因而，它不仅节约了夏季降温 和冬季采暖 的费用，而且 还有“冬暖夏凉”的感觉。

(3) 受外界干扰较小，易创造较好的气象条件和满足某些特殊要求。如地下粮库， 20°C 以下的温度贮存粮食或农产品可防止生虫和延长保管时间；地下油库安全；高精度的恒温恒湿、超净和防微震等要求在地下工程中较易得到保障。

(4) 可节省建筑用地。

(5) 城市人防工程的平战结合，广开了就业门路，为国民经济建设发挥了作用，收到了显著的经济效益。

但是，地下工程容易出现潮湿、空气不新鲜、噪音大和照度不足等问题。这些问题只要处理得好，是不难解决的。

第二节 地下工程防潮除湿的意义

随着形势的需要和我国社会主义建设事业的发展，我国各地兴建了大量的地下工程，由于地下工程利用的关键是解决内部的潮湿问题，所以，地下工程防潮除湿这一新课题已日益引起人们的高度重视。

潮湿，一般指的是相对湿度大于75%的空气。人员长期在潮湿的空气环境里生活和工作，会使身体受到“湿”的侵袭，这不仅影响人的身体健康，使体质下降，引起一些疾病，而且由于破坏了人体的热平衡，使人感到不舒适，影响人们的正常生活和工作，降低工作效率；物品在潮湿的环境里存放，会使金属生锈，粮食受潮、发霉、变质；木材受潮吸湿变形，纸张受潮吸水变软发霉，电器元件、仪器、仪表精度下降，电器设备绝缘参数降低。

目前，地下工程普遍存在的主要问题是潮湿。有的地下工程被覆层漏水，壁面结露，地面冒水、积水，空气相对湿度高达90~100%。有的工程有带雨具上下班现象。所有这些，都直接影响着地下工程的合理使用。地下工程潮湿带来的危害极大，因此，搞好地下工程的防潮除湿，使工程时刻处于良好的使用状态，具有十分重要的意义。

地下工程防潮，就是设法控制造成工程内部潮湿的湿源；除湿，即是采取一些有效的措施降低坑内的湿度。实践证明，地下工程的防潮除湿是一项综合性的技术措施，合理的工程勘察定点，正确的设计，确保质量的施工和安装，科学地维护、管理和使用等，都是不可忽视的重要环节。

地下工程的防潮除湿应本着“以防为主，以除为辅”的原则。只防不除，工程内部空气的湿度就会上升，致使不能保证工程的相对湿度要求；只除不防，必然会增加设备的运行费用和浪费劳动力，它不仅是不经济的，而且也不能解决工程的潮湿问题。

地下工程的防潮除湿，就是要设法创造一个相对湿度在75%以下的空气环境(在没有恒湿要求的工程，这可满足绝大多数人员和设备的基本要求)。地下工程防潮除湿对于通风专业来讲，属于空气调节的范围。如何做好地下工程的防潮除湿，使内部空气的湿度符合要求，是地下工程的平时维护、生产使用和未来工程投入战备使用要解决的一个主要矛盾。

第三节 空气的组成和状态参数

要解决地下工程的潮湿问题，必须首先对空气的成份和物理性质有所了解，并对衡量空气性质的常用状态参数以及它们之间的关系，要有明确的认识。

一、空气的组成

我们知道，人们的生存片刻离不开空气。地球是被一个相当厚的大气层所包围，这给我们的生存创造了一个最基本的条件。由于地球表面的大部分被水所覆盖，所以总有大量的水分通过蒸发而进入大气中。自然界里的空气和我们平时所说的空气，都是湿空气，它是干空气和水蒸气的混合物。绝对干燥的空气在自然界中是不存在的。

在正常的情况下，干空气主要是由氮、氧、二氧化碳和少量稀有气体(氦、氖、氩)组成，它们所占的比例见表1-1。

表1-1 干空气成份比例表

气 体 名 称	质 量 (%)	体 积 (%)
氮 (N ₂)	75.55	78.13
氧 (O ₂)	23.10	20.90
二氧化碳 (CO ₂)	0.05	0.03
稀有气体	1.30	0.94

此外，大气中还夹杂着少量的灰尘、烟雾和微生物等。一般情况下，干空气的组成比例是基本不变的。从卫生的角度来看，要求工作环境的空气新鲜和清洁，一是空气中要保持正常的含氧比例，二是要将空气中的灰尘和有害气体的浓度降低到许可的范围内。

湿空气中的水蒸气，平时我们用肉眼是看不见的，只有当水蒸气凝结成小水珠呈白色气雾状态时才能被觉察出来。空气中的水蒸气含量很少，没有固定的比例，它是随天气的变化和水蒸气的来源情况而经常改变。水蒸气在空气中的含量虽少，但它却异常活跃，变化异常。随着气候条件和空气物理状态的改变，空气中的水蒸气含量将发生变化。自然界中的云、雨、雾、霜、雪的出现，都是由于这种变化而引起的。我们在大气中生活，有时东西容易返潮，有时又会感到口干舌燥，这是由于空气的潮湿或干燥所决定的。水蒸气在空气中的含量多少，不仅对人们的日常生活，而且对许多工业生产过程都有很大影响，同时在某种程度上也决定着湿空气的热工性质。

地下工程由于水蒸气的来源多，散湿量大，空气潮湿，所以要防潮除湿，以降低工程内部空气的水蒸气含量，使之干燥，达到所要求的相对湿度。地下工程的空调，就是以除湿为主的空调工程。

二、空气的状态参数

空气具有的物理性质，不仅和它的组成有关，而且还用一些称之为状态参数的物理指标来衡量。例如用“温度”来衡量空气的冷热程度，用“湿度”来衡量空气的潮湿程度。温度、湿度就是空气的状态参数。空气的状态参数有很多，现就和地下工程防潮除湿有关的几个主要参数简述如下。

(一) 压力

气体的压力是指气体垂直作用于容器单位面积上的力。根据分子运动学说，气体压力是由于大量分子撞击容器内壁的结果。

压力的单位可用下式确定：

$$P = \frac{F}{A}$$
 (1-1)

式中 P——压力；
F——总压力(面积 A 上所受的力)；
A——力 F 所作用的面积。

一个压力单位就是在 1m² 的面积上，均匀垂直地作用着 1N (牛顿)的力。即：

$$[P] = \frac{1N}{1m^2} = 1N/m^2$$

这是一个常用单位，在 1971 年第 14 届计量大会上给予了一个专门名称——帕斯卡 (Pascal)，国际符号为 Pa，中文符号为帕。

Pa 与其它旧的压力单位换算关系列于表 1-2。

表 1-2 不同压力单位换算

帕 (Pa)	巴 (bar)	公斤力/毫米 ² (kgf/mm ²)	工程大气压 (at)	毫米水柱 (mmH ₂ O)	标准大气压 (atm)	毫米汞柱 (mmHg)
1	10 ⁻⁵	102 × 10 ⁻⁷	1.02 × 10 ⁻⁵	0.102	0.99 × 10 ⁻⁵	0.0075
10 ⁵	1	0.0102	1.02	10197	0.9869	750.1
98.067 × 10 ⁵	98.067	1	100	10 ⁶	96.78	76556
98067	0.98067	0.01	1	10 ⁴	0.9678	735.6
9.8067			0.0001	1	0.9578 × 10 ⁻⁴	0.0736
101325	1.013		1.033	10332	1	760
133.322			0.00133	13.6	0.00132	1

1. 大气压力

地球周围包围着很厚的大气层，因其受到地心引力的作用而呈现出压力，这种大气层呈现的压力称为大气压力。

大气压力实质上是水平单位面积上的空气柱重量，它随海拔高度、纬度的不同而不同。海拔愈高，压在该处水平面上的空气柱愈短，气压就愈低。从海平面至高度 1500m 范围内，大约每升高 12m 就降低 133.322Pa(1mmHg)。同一地区因季节、气候等变化而稍有变化，变化的规律是冬季高些，夏季低些；晴天高些，雨天低些等等。通常以气温 0℃时，北纬 45°处海平面的平均气压作为标准大气压，其值为 101.325kPa (760mmHg)。

大气压力的数值可用气压计测得，也可从各地的气象资料中查得。我国东部海滨与西部高原的大气压力相差很大，例如天津、上海两个沿海城市夏季的大气压力为 100.391kPa(753mmHg)，冬季则为 102.525kPa(769mmHg)，而拉萨这样的高原地区(海拔 3658m)，夏冬两季的大气压力只有 64.928kPa(487mmHg)，比沿海城市低得很多。由于大气压力的不同，空气的一些性质也会不同，所以在用到一些空气的物理性质时，必须考虑该地区的气压大小，否则就会造成一定的误差。

2. 水蒸气分压力

任何气体在分子运动下都具有一定的压力，水蒸气也不例外。但是空气中的水蒸气是和干空气同时存在的。根据物理学我们知道，这时两种气体各有自己的压力，称之为各自的分压力，而且二者的和应该是空气的总压力，用下式表示：

$$P = P_g + P_s \quad (1-2)$$

式中 P ——空气的压力，一般指大气压力，kPa；

P_g ——干空气的分压力，kPa；

P_s ——水蒸气的分压力，kPa。

水蒸气在空气中占有一定体积，它的分压力的大小直接反映了水蒸气数量的多少，是衡量空气湿度的一个指标(参看后面湿度部分)。此外，空气的加湿、除湿过程就是水分蒸发到空气中或水蒸气从空气中凝结出来的湿交换过程。这种湿交换和空气中的水蒸气分压力都是有密切关系的。

(二) 湿度

湿度是指大气中所含的水蒸气量。

水分通过蒸发而进入大气，其主要的来源为海洋，其次为江河和湖泊，也源于潮湿的表面、植物及小的水体。水蒸气经风的携带遍布地表上方。湿度的表示方法有以下几种：

1. 绝对湿度(Z)

在 1m^3 空气中含有水蒸气的量称为空气的绝对湿度，单位是 g/m^3 或 kg/m^3 。

2. 含湿量(d)

由于空气体积随温度而变化，在计算空气处理过程时用绝对湿度不大方便，所以引出了“含湿量”这个参数。在空气中，与 1kg 干空气混合在一起的水蒸气量，称为空气的含湿量，并用下式表示：

$$d = \frac{G_s}{G_g} \quad (1-3)$$

式中 G_s ——水蒸气的质量，g；

G_g ——干空气的质量，kg。

显然，如果 1kg 干空气与 $\frac{d}{1000}\text{kg}$ 的水蒸气相混合，则湿空气的质量应是 $1\text{kg} + \frac{d}{1000}\text{kg}$ 。

在一定温度、压力下，湿空气中干空气的质量和 水蒸气含量的多少，往往直接表现为它们分压力的大小。根据理论推导结果，含湿量可按 下式计算：

$$d = 622 \times \frac{P_s}{P_g} = 622 \times \frac{P_s}{P - P_s} \quad (1-4)$$

式中 P_g 、 P_s ——分别为干空气和水蒸气的分压力，

P ——大气压力，kPa。

从上式可知，在一定大气压力下 ($P = \text{常数}$)，空气的含湿量 d 与水蒸气分压力 P_s 有关，换句话说，水蒸气分压力也只取决于空气的含湿量。它们两个是互相联系的参数。在地下工程防潮除湿中，含湿量是一个很重要的参数，它反映出空气实际含有的水蒸气量。

应当注意的是，含湿量中的“湿”，指的是水气而不是水。

含湿量的单位为g/kg。

3. 饱和湿度

大家知道，空气具有吸收和容纳水蒸气的能力，比如湿衣服挂在比较干燥的空气环境里就会晾干，这是因为衣服上的水吸收热量变成水气散发到空气中去了。如果把湿衣服挂在十分潮湿的房间里，就不易晾干。这说明潮湿的房间里的空气能够吸收和容纳水蒸气的能力较差。

表1-3 空气的质量、体积、水蒸气压力和含湿量表（压力为101.325kPa）

空气温度 (°C)	1 m³ 干 空 气			水蒸气 压力 (× 0.133 kPa)	全饱和时水蒸气的含湿		
	标准大气 压时的质量 (kg)	以 0 °C为 基准换算成 t °C时的体 积值 (1 + at) (m³)	以 t °C为基 准换算成 0 °C 时的体积值 ($\frac{1}{1 + at}$) (m³)		在 1 m³ 空气中的含 量 (kg)	在 1 kg空 气水蒸气混 合物中的含 量 (kg)	在 1 kg干 燥空气中的 含量 (g)
1	2	3	4	5	6	7	8
-20	1.396	0.927	1.079	0.927	0.0011	0.0008	0.8
-19	1.390	0.930	1.075	1.015	0.0012	0.0008	0.8
-18	1.385	0.934	1.071	1.116	0.0013	0.0009	0.9
-17	1.379	0.938	1.066	1.207	0.0014	0.0010	1.0
-16	1.374	0.941	1.062	1.308	0.0015	0.0011	1.1
-15	1.368	0.945	1.058	1.400	0.0016	0.0012	1.2
-14	1.363	0.949	1.054	1.549	0.0017	0.0013	1.3
-13	1.358	0.942	1.050	1.680	0.0019	0.0014	1.4
-12	1.353	0.956	1.046	1.831	0.0020	0.0015	1.5
-11	1.348	0.959	1.042	1.982	0.0022	0.0016	1.6
-10	1.342	0.963	1.038	2.093	0.0023	0.0017	1.7
-9	1.337	0.967	1.034	2.267	0.0025	0.0019	1.9
-8	1.332	0.971	1.030	2.455	0.0027	0.0020	2.0
-7	1.327	0.974	1.026	2.658	0.0029	0.0022	2.2
-6	1.322	0.978	1.023	2.876	0.0031	0.0024	2.4
-5	1.317	0.982	1.019	3.113	0.0034	0.0026	2.60
-4	1.312	0.985	1.015	3.368	0.0036	0.0028	2.80
-3	1.308	0.989	1.011	3.644	0.0039	0.0030	3.00
-2	1.303	0.993	1.007	3.941	0.0042	0.0032	3.20
-1	1.298	0.996	1.004	4.263	0.0045	0.0035	3.50
0	1.293	1.000	1.000	4.600	0.0049	0.0038	3.80
1	1.288	1.004	0.996	4.940	0.0052	0.0041	4.10
2	1.284	1.007	0.993	5.302	0.0056	0.0043	4.30
3	1.279	1.011	0.989	5.687	0.0060	0.0047	4.70
4	1.275	1.015	0.986	6.097	0.0064	0.0050	5.00
5	1.270	1.018	0.982	6.534	0.0068	0.0054	5.40
6	1.265	1.022	0.979	6.998	0.0073	0.0057	5.82
7	1.261	1.026	0.975	7.492	0.0077	0.0061	6.17
8	1.256	1.029	0.972	8.017	0.0083	0.0066	6.69
9	1.252	1.033	0.968	8.574	0.0088	0.0070	7.12
10	1.248	1.037	0.965	9.165	0.0094	0.0075	7.64
11	1.243	1.040	0.961	9.762	0.0099	0.0080	8.07
12	1.239	1.044	0.958	10.457	0.0106	0.0086	8.69
13	1.235	1.048	0.955	11.162	0.0113	0.0092	9.39
14	1.230	1.051	0.951	11.908	0.0120	0.0098	9.91
15	1.226	1.055	0.948	12.699	0.0128	0.0105	10.62
16	1.222	1.059	0.945	13.536	0.0136	0.0112	11.23
17	1.217	1.062	0.941	14.421	0.0144	0.0119	12.19
18	1.213	1.066	0.938	15.357	0.0153	0.0127	12.93
19	1.209	1.070	0.935	16.346	0.0162	0.0135	13.75

(续)

空气温度 (°C)	1 m ³ 干 空 气			水蒸气	饱和时水蒸气的含量		
	标准大气 压时的质量 (kg)	以 0 °C 为 基准换算成 t °C 时的体 积值 (1 + at) (m ³)	以 t °C 为基 准换算成 0 °C 时的体积值 ($\frac{1}{1+at}$) (m ³)	压力 (× 0.133 kPa)	在 1 m ³ 空气中的含 量 (kg)	在 1 kg 空 气水蒸气混 合物中的含 量 (kg)	在 1 kg 干 湿空气中的 含量 (g)
1	2	3	4	5	6	7	8
20	1.205	1.073	0.932	17.391	0.0172	0.0144	14.51
21	1.201	1.077	0.929	18.495	0.0182	0.0153	15.66
22	1.197	1.081	0.925	19.659	0.0193	0.0163	16.60
23	1.193	1.084	0.922	20.888	0.0204	0.0173	17.69
24	1.189	1.088	0.919	22.184	0.0216	0.0184	18.71
25	1.185	1.092	0.916	23.550	0.0229	0.0195	19.95
26	1.181	1.095	0.913	24.988	0.0242	0.0207	21.20
27	1.177	1.099	0.910	26.505	0.0256	0.0220	22.55
28	1.173	1.103	0.907	28.101	0.0290	0.0234	24.09
29	1.169	1.106	0.904	29.782	0.0285	0.0248	25.47
30	1.165	1.110	0.901	31.548	0.0301	0.0263	27.03
31	1.161	1.114	0.898	33.406	0.0318	0.0278	28.65
32	1.157	1.117	0.895	35.359	0.0335	0.0295	30.41
33	1.154	1.121	0.892	37.411	0.0354	0.0312	32.29
34	1.150	1.125	0.889	39.565	0.0373	0.0331	34.23
35	1.146	1.128	0.886	41.827	0.0393	0.0350	36.37
36	1.142	1.132	0.884	44.201	0.0414	0.0370	38.58
37	1.139	1.136	0.881	46.691	0.0436	0.0392	44.90
38	1.135	1.139	0.878	49.302	0.0459	0.0414	43.35
39	1.132	1.143	0.875	52.039	0.0483	0.0438	45.93
40	1.128	1.147	0.872	54.906	0.0508	0.0463	48.64
41	1.124	1.150	0.869	57.910	0.0534	0.0489	51.20
42	1.121	1.154	0.867	61.055	0.0561	0.0516	54.25
43	1.117	1.158	0.864	64.346	0.0589	0.0545	57.56
44	1.114	1.161	0.861	67.790	0.0619	0.0575	61.04
45	1.110	1.165	0.858	71.391	0.0650	0.0607	64.80
46	1.107	1.169	0.856	75.158	0.0682	0.0640	68.61
47	1.103	1.172	0.853	79.093	0.0715	0.0675	72.56
48	1.100	1.176	0.850	83.204	0.0750	0.0711	76.99
49	1.096	1.180	0.848	87.499	0.0786	0.0750	81.45
50	1.093	1.183	0.845	91.982	0.0823	0.0790	86.11
51	1.090	1.187	0.843	96.661	0.0863	0.0832	91.39
52	1.086	1.191	0.840	101.542	0.0904	0.0877	96.62
53	1.083	1.194	0.837	106.636	0.0946	0.0923	102.25
54	1.080	1.198	0.835	111.945	0.0991	0.0972	108.22
55	1.076	1.202	0.832	117.478	0.1036	0.1023	114.43
56	1.073	1.205	0.830	123.244	0.1084	0.1076	121.06
57	1.070	1.209	0.827	129.251	0.1133	0.1132	127.98
58	1.067	1.213	0.825	135.565	0.1185	0.1191	135.13
59	1.063	1.216	0.822	142.015	0.1238	0.1252	142.58
60	1.060	1.220	0.820	148.791	0.1293	0.1317	152.45
65	1.044	1.238	0.808	186.945	0.1600	0.1689	203.50
70	1.029	1.257	0.796	233.093	0.1966	0.2161	275.00
75	1.014	1.275	0.784	288.517	0.2399	0.2760	381.00
80	1.000	1.293	0.773	354.643	0.2907	0.3528	541.00
85	0.986	1.312	0.763	433.041	0.3500	0.4521	824.00
90	0.973	1.330	0.752	525.392	0.4188	0.5825	1395.00
95	0.959	1.348	0.742	633.692	0.4983	0.7576	3110.00
100	0.947	1.367	0.732	760.000	0.5895	1.000	∞

在一定温度下,空气中的水蒸气含量达到最大限度(或称饱和量),再也不能容纳水蒸气了,这时会出现多余的水蒸气变成凝结水的现象,这种空气状态叫饱和空气。与饱和空气状态相适应的参数有饱和水蒸气分压力($P_{s,b}$)、饱和绝对湿度(Z_b)和饱和含湿量(d_b)等。如果空气中的水蒸气量小于饱和量,这种空气称为未饱和空气。

由实验得知,饱和湿度又随空气的温度高低而有不同,并且可由空气的物理性质表(见表1-3)查得。

在日常生活中,空气达到饱和状态的例子很多。如在炉子上烧开水,当水滚开时,就可以看到从水壶里冒出大量白色的“热汽”;冬天人们在寒冷室外说话,也可以看见从嘴里呼出一团团白色的“热气”。这是什么原因呢?人们往往以为这就是水蒸气,其实水蒸气是无色的,看不见的。我们所看到的是周围空气被饱和后,容纳不了的那一部分多余的水蒸气凝结成的雾状的小水珠。

显然,空气中能容纳水蒸气的最大值(即饱和绝对湿度)与空气的温度有关,温度越高,能容纳下的水蒸气量就愈大,反之则小。例如热天,就看不见人们说话时呼出的白色“热气”,就是因为天热,空气的“胃口”大,能“吃”掉的水蒸气量多。但是,只要水蒸气量超过了限度,即使在夏天,空气也有“吃”不下水蒸气的时候,热天炉子上的开水壶也会冒白气,就是这个道理。

由上表可见,随着空气温度的提高,饱和湿度也随之增加。空气温度已定,饱和湿度也就定了,因为温度和饱和湿度也是两个互相联系参数。

在饱和空气环境中,湿衣服就晾不干,一些希望水分蒸发成水蒸气散发到空气中的过程就无法实现。未饱和空气中的水蒸气量小于该温度下的饱和量,它仍能接受一定量的水蒸气。以绝对湿度为例,未饱和空气的绝对湿度 Z 小于同温度下的饱和绝对湿度 Z_b ,这时,每立方米的空气还可接受 $Z_b - Z$ 这么多公斤的水蒸气量。所以说, Z 愈小,与 Z_b 的差值愈大,空气可以接受的水蒸气量就多。对于许多和水分蒸发有关的工艺过程来说,这样的空气能够吸收水蒸气(吸湿)的能力就愈大,也就是一般所理解的愈干燥。用这种吸湿能力来衡量空气的潮湿程度,比绝对湿度(或含湿量)更能确切地反映人和生产工艺对空气湿度的需要。例如,温度为 16°C 、 $Z = 0.0136\text{kg/m}^3$ 的空气与温度为 40°C 、 $Z = 0.0254\text{kg/m}^3$ 的空气相比较,单纯从 Z 的大小来看,似乎后一种空气比前一种空气“潮湿”得多,可是实际上,湿衣服放在前一种空气里却干不了,在后一种空气里反而能晾干。这是因为在 16°C 时, $Z = 0.0136 = Z_b$ (参看表1-3),空气不能再吸湿了,而在 40°C 时, Z 比 Z_b 小得多($Z = 0.0254$, $Z_b = 0.0508$),空气还可以吸收 $Z_b - Z = 0.0508 - 0.0254 = 0.0254\text{kg/m}^3$ 的水蒸气。所以从吸湿能力来看,后者要比前者干燥得多。

4. 相对湿度(ϕ)。

仅用空气的绝对湿度和含湿量,还不能明确表达该空气状态的干湿程度对生产工艺和人体生理的影响,用 $Z_b - Z$ 反映空气的吸湿能力是比较明确的,但是用它来反映空气的湿度却不理想,因为二者差值愈大,空气愈干燥(湿度小),而二者差值愈小,空气愈潮湿(湿度大),在概念上似乎正好相反了。为了弥补这个缺点,引出了“相对湿度”这个参数。

所谓相对湿度,是指空气实际绝对湿度接近饱和绝对湿度的程度,即空气的绝对湿度 Z 与同温下饱和绝对湿度 Z_b 的比值,用百分数表示:

$$\phi = \frac{Z}{Z_b} \times 100\% \quad (1-5)$$

根据理论推导结果, 上式也可用水蒸气分压力 P_i 与同温下饱和水蒸气分压力 $P_{s,b}$ 的比值表示:

$$\phi = \frac{P_i}{P_{s,b}} \times 100\% \quad (1-6)$$

相对湿度是指空气接近饱和的程度, 它是衡量空气潮湿和干燥的重要标志。当 $\phi = 100\%$ 时, 这种空气就是饱和空气, 例如浴池内的空气就接近饱和状态。处于这样的空气环境中, 水分就不易蒸发。 ϕ 值越大, 空气越潮湿; ϕ 值越小, 空气越干燥, 吸湿能力越大; $\phi = 0$, 就是干空气。在地下工程防潮除湿中, 相对湿度这个参数很重要。

相对湿度对人体的舒适和健康, 对工业产品的质量都有一定的影响。人处在相对湿度很大的空气环境里, 就会感到很憋气, 当温度低时, 会感到阴冷, 温度高时, 会感到闷热; 在相对湿度小的环境里, 又会觉得口干舌燥。在某些生产过程中, 从保证产品有一定含水率出发, 对相对湿度也提出了一定的要求。以纺织厂为例, 若空气湿度太大, 会使纱线粘在一起不好加工; 湿度太小, 又会使纤维失去弹性, 容易断线, 产生静电和飞花。可见相对湿度的合适与否, 直接关系到产品的质量。

地下工程比较潮湿, 所以, 解决地下工程的潮湿问题, 就是要降低工程内部空气的相对湿度, 使之在要求范围内。

(三) 温度

温度是衡量物质冷热程度的指标。空气的温度就是表示空气的冷热程度。

要测量空气的温度须先确定温标。所谓温标就是指衡量温度的标尺, 它规定了温度的起点(零度)和测量温度的单位。目前国际上使用的有摄氏温标和热力学温标。

摄氏温标: 在标准大气压力下把纯水的冰点定为 0°C , 纯水的沸点定为 100°C , 在冰点和沸点之间分为 100 等份, 每一等份就是摄氏一度, 用 t 表示, 其单位符号为 $^{\circ}\text{C}$ 。

热力学温标: 又叫国际实用温标, 是目前国际上通用的一种温标, 它与以往所用的绝对温标(开氏温标)是一致的。热力学温度用 T 表示, 其单位是开尔文, 国际符号为 K 。它是以 -273.15°C 作为计算的起点, 将纯水在一个标准大气压下的冰点定为 273.15K , 沸点为 373.15K , 其间相差 100K , 所以 $1^{\circ}\text{C} = 1\text{K}$ 。

热力学温标与摄氏温标的关系为:

$$T = (273.15 + t) \text{K} \quad (1-7)$$

在一般情况下, 可近似地认为热力学温标比摄氏温标大 273 度。

在空气调节中, 温度是一个很重要的参数, 它对人的舒适和健康, 对生产工艺过程影响很大。

1. 干球温度 (t)

用温度计直接测量出来的空气温度叫做空气的干球温度, 也叫空气温度, 简称气温。它是表示空气冷热程度的指标, 用 t 表示, 其单位符号为 $^{\circ}\text{C}$ 。

空气温度的过冷过热或急剧的冷热变化都会使人感到不舒服, 甚至生病。另外, 温度的变化还直接影响各种材料的性能和生产工艺的正常进行。比如在不同温度下, 由于金属的热胀冷缩会改变零件的几何尺寸; 在不同的温度下, 电阻丝和导线会有不同的电阻

值。所以温度超过一定限度就会影响产品质量和仪表精度。因此,为保证产品质量,就需要根据生产工艺和产品的要求,选出自己的温度基数和波动范围。所以说,空气温度是空气调节中一个十分重要的参数。

2. 湿球温度 (t')

在温度计的温包上包上纱布,纱布的下端浸入盛水的玻璃小杯中,在毛细作用下纱布经常处于湿润状态,将此温度计称为湿球温度计,用它所测得的温度称为空气的湿球温度,以 t' 表示,单位符号为 $^{\circ}\text{C}$ 。它是用来与干球温度配合测量空气湿度的。

湿球温度计的读数,实际上反映了湿纱布中水的温度。当空气的相对湿度 $\phi < 100\%$ 时,必然存在着水的蒸发现象。若水温高于空气温度,蒸发所需要的汽化热必然首先取自水分本身,因此湿纱布的水温开始下降。无论原来水温多高,经过一段时间后,水温终将降至空气温度以下。这时,也就出现了空气向水面的传热,此热量随着空气与水之间温差的加大而增加。当水温降到某一数值时,空气向水面的温差传热恰好补充水分蒸发所吸收的汽化热,此时,水温不再下降,这一稳定的温度称之为湿球温度。

显然,当湿球上纱布的最初水温低于湿球温度时,则空气向水面的温差传热,一方面供水分蒸发用,另一方面供水温升高。随着水温增高,传热量减少,最终仍将达到温差传热与蒸发耗热相等,水温稳定于湿球温度的状态。

在空气相对湿度不变的情况下,湿球纱布上水分的蒸发可以认为是稳定的,从而蒸发所需要的热量也是一定的。当空气相对湿度较小时,湿球表面的水分蒸发快,蒸发需要的热量多,湿球水温下降得也愈多,因而干、湿球差就愈大;反之,如果空气相对湿度大,则干、湿球温差就小;当相对湿度 $\phi = 100\%$ 时,水分不再蒸发,干、湿球温度也就相等了。所以,湿球温度永远低于或等于干球温度。另外,在测量湿球温度时,一定要过一段时间待湿球温度稳定后再读数。由此可见,在一定的空气状态下,干、湿球温度的差值反映了空气的相对湿度的大小。

还应指出的是,湿球纱布周围空气的流动速度对湿球温度的读数有一定影响——风速愈大,湿球纱布与周围空气热湿交换愈充分,测量的误差就小些,当风速不小于 2 m/s 时,读数就较为准确。

3. 露点温度 (t_l)

在一定压力下的未饱和空气,如果将其温度不断降低,可以使其变为饱和空气。空气在含湿量不变的条件下,达到饱和状态的温度叫做露点温度,以 t_l 表示。露点温度也就是未饱和空气开始结露的临界温度。如果将温度稍微降到空气的露点温度以下,饱和空气中的水气就马上凝结成水珠。如日常生活中冬季早晨会发现玻璃窗上布满水珠(甚至布满一层薄冰),秋季早晨会看到草上、树叶上挂有露珠,所有这些,就叫结露现象。判断能否结露,主要看物体表面的温度是否低于空气的露点温度。如果物体表面温度高于空气的露点温度就不会结露;低于空气的露点温度,便会使空气达到饱和状态,多余的水分便会凝结成水滴从空气中分离出来。一定压力下的饱和空气,提高它的温度可以使其变为未饱和空气。可见未饱和空气和饱和空气之间在一定条件下是可以互相转化的。这种现象在我们日常生活中经常碰到。例如,冬天一个戴眼镜的人从寒冷的室外走进温暖的房间,他的镜片上会立即蒙上一层水雾,使人看不清楚。呆一会儿,水雾就慢慢消失了。这是因为在温暖的房间里,空气是未饱和的,当它一接触到温度低于它的露

点温度的镜片时，使镜片周围的空气立即变为饱和空气，并在镜片上凝成细小的水雾。随着室内空气对镜片的加热，镜片温度的提高，它上面的水雾又变为水蒸气重新回到空气之中，而镜片周围的空气也变为了未饱和空气。通常我们看到太阳一出来，树叶、石面和玻璃窗上的露珠逐渐消失，就是同一道理。

夏季地下工程潮湿的一个主要原因就是因为外界的热湿空气进入温度较低的地下工程内部，当接触到低于它的露点温度的壁面时，就会结露；当和低于它的露点温度的坑内空气混合时，就会加大工程内空气的相对湿度，甚至会使坑内空气饱和，使之出现雾气。这既影响工程使用寿命，又给人们带来不舒适感，是卫生、技术条件所不允许的。但在地下工程除湿中，又用对空气加热使之远离其本身的饱和状态或利用结露的规律去达到使空气除湿的目的。例如用表面式冷却器（其表面温度低于空气的露点温度）去处理空气，获得冷却减湿的效果；又如冷却风道去湿，就是利用低于外界空气露点温度的地下岩体表面把空气中的部分水蒸气初步凝结出来。

掌握了空气的露点温度和空气结露的规律，不仅可以解释生活中和生产中常见的一些现象，而且可以用来指导地下工程防潮除湿。

(四) 焓

焓代表热量，指的是单位质量的物质所含的全部热量。空气的焓，即是指单位质量空气所含有的总热量，也就是 1kg 干空气所含有的热量与 1kg 干空气所含有水蒸气的热量之和，叫做空气的焓，以 i 表示，单位是 kJ/kg。

对于 1kg 温度为 t 的干空气的焓为：

$$i_g = 1.01 t \quad (1-8)$$

式中 1.01——干空气的定压比热，kJ/(kg·°C)，即在定压条件下 1kg 干空气温度升高（或降低）1°C 所需要吸收（或放出）的热量；

t ——空气的温度，°C。

湿空气的这一部分热量（即干空气的热量）是由温度所显示出来的，故为显热。

对于 1kg 温度为 t 的水蒸气的焓（ i_s ）为：

$$i_s = 1.84 t + 2500 \text{ kJ/kg} \quad (1-9)$$

式中 1.84——水蒸气的定压比热，kJ/(kg·°C)，即在定压条件下 1kg 水蒸气升高（或降低）1°C 所需要吸收（或放出）的热量；

t ——水蒸气的温度，°C；

2500——水蒸气的汽化潜热，kJ/kg，即 1kg 0°C 的水变成 0°C 的水蒸气所需要的热量。

水蒸气的 1.84 t 这部分热量是由温度显示出来的，为显热；水蒸气的汽化热 2500 kJ 是 1kg 水由液态变为汽态时的物态变化过程中吸收的热量，所以 1kg 0°C 时的水蒸气就具有 2500 kJ 的热量。这部分热叫做汽化潜热，简称潜热。

空气的总焓为：

$$i = i_g + i_s = 1.01 t + (1.84 t + 2500) \frac{d}{1000} \quad (1-10)$$

上式中 $\left(1.01 t + 1.84 t \frac{d}{1000}\right)$ 这部分热量是空气的显热；而 $2500 \frac{d}{1000}$ 这一热量

是潜热，它随空气的含湿量而变化。显热加潜热，称为全热，在定压变化过程中即等于焓值。

在实际中，由于 d 很小，所以往往忽略掉 $1.84 t \frac{d}{1000}$ 这部分热量，只用干空气的含热量 $1.01 t$ 作为湿空气的显热量。

由上式可见，空气焓值的大小取决于空气温度和含湿量这两个因素。温度在 0°C 以上的湿空气其焓是正值； 0°C 以下的湿空气，当 $2500 \times \frac{d}{1000}$ 小于 $1.01 t + 1.84 t \frac{d}{1000}$ 时，焓值是负值，否则反之。

实际上，空气温度高时的焓值不一定比温度低时的焓值大，这主要是由空气含湿量的大小情况而定，因此，空气的温度提高，焓不一定增加，如果温度提高的同时，含湿量却减少了，完全可能出现焓值不变（如在后面讲到的地下工程中使用固体吸湿的等焓除湿升温过程），甚至焓值减小的现象。

（五）密度（ ρ ）

密度是指单位容积的物体所具有的质量。空气的密度就是指单位容积空气所具有的质量，用 ρ 表示。即：

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-11)$$

式中 m ——空气的总质量，kg；

V ——空气的总容积， m^3 。

由前述已知，湿空气为干空气与水蒸气的混合物，两者混合均匀并占有相同的容积。因此不难理解，湿空气的密度 ρ 为干空气的密度与水蒸气密度之和，即：

$$\rho = \rho_g + \rho_v = 3.49 \times \frac{P}{T} - 1.34 \times \frac{\phi P_{r,s}}{T} \quad (1-12)$$

式中 ρ_g ——干空气的密度， kg/m^3 ；

ρ_v ——水蒸气的密度， kg/m^3 ；

P ——大气压力，kPa；

ϕ ——空气的相对湿度，%；

$P_{r,s}$ ——同温下空气的饱和水蒸气分压力，kPa；

T ——气体的热力学温度，K。

从上式可以看出，湿空气的密度比干空气的密度小。空气越潮湿（相对湿度越大），湿空气就越轻；温度愈高，空气的密度就愈小；大气压力越低（空气越稀薄），空气的密度也就越小。

湿空气的密度和干空气的密度相差甚小。在工程上为简化计算，往往用干空气的密度来代替湿空气的密度，而所产生的误差在允许范围内。

在标准大气压力下，空气的密度可写为：

$$\rho = 3.49 \times \frac{P}{T} = \frac{353}{T} \quad (1-13)$$

在标准大气压下，不同温度的空气密度可从表 1-3 中查得。如非标准大气压下，应按实际大气压算出空气的密度。