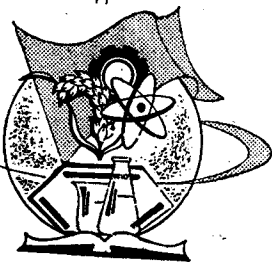


化学工人自学丛书



化工单元操作

# 干燥

中国化工学会科普工作委员会组织编写  
包丕琴 编

化学工业出版社

## 内 容 提 要

本书为初学者和具有初中以上文化程度的化工企业工人提供干燥的基础知识，主要介绍了干燥的概念，干燥过程的基本计算，干燥的装置，干燥器的应用和计算等。书中有例题和习题，供读者加深对书中内容的理解和掌握。

本书适合具有中等文化程度的化工厂工人阅读，也可作为有关技工学校 and 职工业余教育的参考书。

### 化学工人自学丛书

化工单元操作

### 干 燥

中国化工学会科普工作委员会组织编写

包丕琴 编

责任编辑：陈 丽

封面设计：季玉芳

化学工业出版社出版发行

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$  印张 $3 \frac{5}{8}$  字数78千字

1988年10月第1版 1988年10月北京第1次印刷

印 数 1—2,100

ISBN 7-5025-0136-3/TQ·98

定 价 1.20元

# 《化学工人自学丛书》

## 出版说明

为了普及化工生产技术知识及理论知识，提高我国化工企业广大工人的科学技术水平，以适应加速实现化学工业现代化需要，特组织编写出版这套《化学工人自学丛书》。

这套丛书的内容包括化学、化工技术、基础理论以及化工生产工艺和设备，并反映当代新技术、新工艺、新设备、新材料。叙述力求深入浅出，理论联系化工生产实际，便于自学。根据化学工业多行业、多工种的特点，本丛书除分册出版无机化学、有机化学、化工生产原理等基础理论和基础技术读物外，还将陆续出版主要化工生产的工艺操作、主要化工设备机器的安装和检修、生产分析、化工仪表及自动化等方面的图书。

本丛书主要供化工企业具有初中以上文化程度的工人和其他有关人员自学。通过自学，达到或接近中等专业学校毕业的水平。也可作为各化工企业的技工学校教学参考书和考工评级的参考读物，还可供化工中等专科学校教师和学生学习参考。

## 前 言

提高全国人民的科学文化水平是实现我国社会主义现代化建设的当务之急。化学工业及化工类型生产的操作工，在进行安全教育及熟悉工艺流程与反应条件，能按操作规程于本岗位进行熟练操作后，都必须进一步地具备化工单元操作知识。

化工单元操作是从各种化工生产过程中，将以物理变化为主的处理方法，概括出其共同特点的基本操作。其内容可归纳为：流体流动过程；传热过程；传质过程；机械过程等操作。目前这方面的书籍大都是各级教材，内容侧重于理论和计算。这套化学工人自学丛书中的《化工单元操作》则是以具有初中水平的在职操作工为对象，使他们以多年实践经验，结合化工单元操作的理论学习，可提高生产操作水平，而且可应用本岗位的数据，验算设备能力，既能挖潜，又能避免超负荷运转，做到心中有数。

由于我们初次组织编写这类图书，缺点与不妥之处在所难免，希广大读者提出宝贵意见，以便今后再版时修订。

拟出版的这套《化工单元操作》丛书有：《化工计算》、《流体输送》、《传热及换热器》、《蒸馏》、《吸收》、《萃取》、《干燥》、《冷冻》。

# 目 录

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 概述 .....                | 1  |
| 第一章 干燥的基础知识 .....       | 4  |
| 第一节 湿空气的性质及湿度图 .....    | 4  |
| 一、湿空气的性质 .....          | 4  |
| 1. 空气的湿含量 .....         | 5  |
| 2. 空气的相对湿度 .....        | 6  |
| 3. 湿空气的热含量 .....        | 6  |
| 4. 干球温度 .....           | 7  |
| 5. 露点 .....             | 7  |
| 6. 湿球温度 .....           | 8  |
| 7. 绝热饱和温度 .....         | 9  |
| 二、湿空气的湿度图及其应用 .....     | 11 |
| 1. 等湿含量线 .....          | 11 |
| 2. 等热含量线 .....          | 13 |
| 3. 等温度线 .....           | 13 |
| 4. 等相对湿度线 .....         | 13 |
| 5. 水汽分压线 .....          | 13 |
| 6. $I-x$ 图的用法 .....     | 14 |
| 第二节 干燥器的物料衡算和热量衡算 ..... | 18 |
| 一、物料衡算 .....            | 18 |
| 1. 物料中水分蒸发量的计算 .....    | 19 |
| 2. 空气消耗量的计算 .....       | 20 |
| 二、热量衡算 .....            | 22 |
| 1. 输入热量的计算 .....        | 23 |
| 2. 输出热量的计算 .....        | 23 |
| 三、干燥器的热效率 .....         | 25 |
| 第三节 水分与物料的结合形式 .....    | 26 |
| 一、湿物料中水分的存在形式 .....     | 26 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 1. 吸附水分 .....             | 26 |
| 2. 毛细管水分 .....            | 26 |
| 3. 溶胀水分 .....             | 27 |
| 二、自由水分与平衡水分 .....         | 27 |
| 第四节 干燥速率和干燥时间 .....       | 29 |
| 一、干燥曲线与干燥速率曲线 .....       | 29 |
| 二、影响干燥速率的因素 .....         | 31 |
| 1. 恒速干燥阶段 .....           | 31 |
| 2. 降速干燥阶段 .....           | 32 |
| 三、干燥时间 .....              | 34 |
| 1. 恒速干燥阶段 .....           | 34 |
| 2. 降速干燥阶段 .....           | 34 |
| 第五节 合理的干燥制度 .....         | 36 |
| 一、干燥极限温度 .....            | 37 |
| 二、空气的相对湿度 .....           | 38 |
| 三、空气流动速度和空气与物料的接触方式 ..... | 38 |
| 第二章 干燥装置 .....            | 41 |
| 第一节 厢式干燥器 .....           | 41 |
| 一、平行流式厢式干燥器 .....         | 41 |
| 二、穿流式厢式干燥器 .....          | 42 |
| 第二节 转筒干燥器 .....           | 43 |
| 第三节 气流干燥器 .....           | 45 |
| 一、多级气流干燥器 .....           | 48 |
| 二、脉冲式气流干燥器 .....          | 49 |
| 三、旋风气流干燥器 .....           | 50 |
| 第四节 沸腾干燥器 .....           | 51 |
| 一、单层式圆筒沸腾干燥器 .....        | 54 |
| 二、多层式圆筒沸腾干燥器 .....        | 55 |
| 三、卧式多室沸腾干燥器 .....         | 57 |
| 四、振动沸腾干燥器 .....           | 58 |
| 第五节 喷雾干燥器 .....           | 60 |
| 一、机械式喷雾器 .....            | 61 |
| 1. 旋转型机械喷嘴 .....          | 62 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 2. 离心型机械喷嘴 .....         | 63  |
| 二、气流式喷雾器 .....           | 63  |
| 1. 二流式喷嘴 .....           | 64  |
| 2. 三流式喷嘴 .....           | 65  |
| 三、转盘式喷雾器 .....           | 66  |
| 四、三种喷雾器的比较 .....         | 68  |
| 五、喷雾干燥器中热风与雾滴的运动方向 ..... | 68  |
| 1. 并流式 .....             | 69  |
| 2. 逆流式 .....             | 71  |
| 3. 混合流式 .....            | 72  |
| 第六节 传导加热干燥器 .....        | 73  |
| 一、物料搅拌式干燥器 .....         | 73  |
| 二、双锥型回转真空干燥器 .....       | 75  |
| 三、滚筒干燥器 .....            | 76  |
| 第三章 干燥器的应用例和计算例 .....    | 81  |
| 第一节 干燥器的应用例 .....        | 81  |
| 一、厢式干燥器的应用例 .....        | 81  |
| 二、转筒干燥器的应用例 .....        | 82  |
| 三、气流干燥器的应用例 .....        | 83  |
| 四、沸腾干燥器的应用例 .....        | 84  |
| 五、喷雾干燥器的应用例 .....        | 86  |
| 六、物料搅拌式干燥器的应用例 .....     | 88  |
| 七、双锥型回转真空干燥器的应用例 .....   | 89  |
| 八、滚筒干燥器的应用例 .....        | 90  |
| 第二节 干燥器的计算例 .....        | 91  |
| 一、转筒干燥器的计算 .....         | 91  |
| 二、气流干燥器的计算 .....         | 95  |
| 三、连续式单室和多室沸腾干燥器的计算 ..... | 98  |
| 四、喷雾干燥器的计算 .....         | 102 |
| 五、物料搅拌式干燥器的计算 .....      | 105 |
| 符号说明 .....               | 106 |
| 参考资料 .....               | 109 |

## 概 述

干燥是指含有水分或其它溶剂的湿物料，受热之后使其中的水分或其它溶剂汽化而脱除的过程。干燥过程的机理不同于机械去湿，即不同于压榨、过滤、离心分离，它是一个传热传质的过程。

干燥过程是费用相当大的单元操作，因此研究干燥过程对节约热能有很重要的作用。

干燥过程在国民经济的许多部门都有着广泛的应用，干燥的产品便于加工、运输、贮存和使用。正确地完成干燥过程有利于保证和改进产品的质量，对提高生产发展经济有很重要的作用。

化学工业中的干燥过程很多，其中化学肥料、染料、颜料、农药、无机盐、树脂等产品中都用到干燥。硝酸铵、尿素都是利用喷雾干燥造粒的方法，可以获得粒度均匀的产品。染料、颜料行业中的干燥过程更多，染料必须经过干燥才能贮存，否则染料在贮存中就要发生分层，出现色差。

医药工业对干燥过程的要求很严格，必须十分注意干燥过程的质量要求，例如热敏性物料、吸湿性物料都要慎重对待，不能让干燥过程破坏药品。有些要求在无菌条件下操作、无污染操作等，也促进了干燥方法、干燥设备的发展。

其它如粮食、燃料、食品、饲料、建筑材料等行业中都离不开干燥过程。

干燥过程所处理的物料多种多样，有固体，有液体；有



溶液，有淤浆，有糊膏状；对产品有不同的产量与质量的要求；这就使得目前应用的干燥设备种类繁多，干燥方法也很多。因此对于一定原料要制得一定标准的产品，如何选择干燥装置是个重要问题。

干燥过程按其热源种类和受热方式不同，可分成以下几种干燥方法：

**对流干燥：**将加热后的空气（或其它载热体如烟道气）通入干燥器，以对流传热的方式，将热量传给湿物料，湿物料中的水分或溶剂受热而汽化，形成的水汽及气体又被载热体带出干燥器。因此在这里热空气或其它载热体，同时又是载湿体。这种干燥方法的空气温度便于调节，可以控制物料的温度，产品不致过热而变质，产品质量好，所以目前各种工业生产中应用得很普遍。利用对流干燥方法的干燥器有许多种，如厢式干燥器、转筒干燥器、气流干燥器、沸腾干燥器及喷雾干燥器等。对流干燥的各种干燥器，其共同点是对流传热，而载热体与物料的接触方式、运动方式以及干燥器的结构都有极大的不同。

**传导干燥：**利用加热表面将热量传导给湿物料，湿物料中的湿分汽化而与物料分开。为了提高传热效果，常常对颗粒状、粉状、片状的固体物料进行搅拌。可以在常压或真空下进行，能够进行密闭或接近于密闭干燥，适于处理回收气体的干燥。目前常用的有处理固体物料的双锥回转真空干燥器，有处理溶液、悬浮液、淤浆物料的滚筒干燥器。

**远红外线干燥：**利用照射到湿物料上的远红外线的热量加热使其中的湿分汽化。有两种发射远红外线的方法。其一是利用远红外线灯泡来发射红外线，这是利用电能的方法；另一种是利用煤气来灼热金属板或陶瓷板，达到一定温度时

即发射红外线，这是利用热能的方法。这种干燥方法热量比较集中，适于干燥固体平面物。

微波干燥：它与上述的干燥方法不同，是利用强高频交流电压以物料中介电损失所产生的内部热使物料受到干燥，这是内部加热方式。加热效率高，所以干燥时间短。适于干燥一些形状复杂的含水量不均匀的物料。自动化比较容易，环境得到改善。

冷冻干燥：利用冷冻方法将含有水分的物料冷冻至冰点以下，使其中的水分结冰，再在低温高真空下利用传导或辐射供给很少热量，使固态冰升华变成水蒸汽而被抽走。这种干燥方法所消耗的热量比其它干燥方法少，又使干燥后的物料能够保持原来的化学性质与物理性质。特别适用于不耐热，必须低温干燥的物料，目前在药品、生物制剂、水果和蔬菜等。

干燥方法很多，选用时应根据被干燥物料的特点、产品的工艺要求及经济性等方面综合考虑。多数产品使用对流干燥方法，而且载热体多数使用热空气。本书也以介绍对流干燥为主，兼顾其它干燥方法。

本书首先介绍有关干燥计算的基础知识，介绍作为载热体和载湿体的湿空气的各种性质，介绍干燥过程中的物料平衡与热量平衡，还要说明有关干燥程度、干燥速率、干燥制度等基本知识。本书的第二部分将重点介绍一些典型干燥器的构造，着重说明不同干燥器所用的干燥方法、它的机理和它的主要特点。第三部分介绍各种干燥方法的一些实用状况，介绍它们的适用性并通过一些计算实例说明计算的主要参数与方法。

## 第一章 干燥的基础知识

### 第一节 湿空气的性质及湿度图

#### 一、湿空气的性质

在对流干燥方法中，经常用加热的空气作为载热体，它同时又是携带水蒸汽的载湿体。干燥过程的进行和空气的性质必然有直接的关系。举个日常生活的例子，如晒干衣服的过程就是干燥过程，当室外空气温度比较高，空气又比较干燥，衣服晒干就快，反之，天凉又潮湿，衣服就很不容易干。晒干衣服是个对流干燥过程，它就和空气的温度、空气中水汽的多少密切相关。因此，要研究干燥过程应当了解湿空气的性质。

作为干燥过程的载热体，我们又叫它为干燥介质。对流干燥的干燥介质多数是空气，而这种空气是干空气和水蒸汽的混合物，我们把它叫湿空气。在干燥过程中，湿空气首先经过预热，然后进入干燥器中与湿物料进行热量和质量的交换，湿物料中的水分蒸发而进入湿空气中，同时湿空气的温度要下降、湿空气的水汽量要增加。因此，湿空气进入干燥器时和离开干燥器时的性质或状态是不同的。为了研究干燥过程，我们应当知道用哪些参数、什么指标来说明湿空气的性质或状态。

表示湿空气性质或状态的参数有湿含量、相对湿度、热含量、干球温度、湿球温度、露点和比容等。下面分别介绍

它们的意义和相互之间的关系。

一般将湿空气作为理想气体来处理，即假定理想气体的各个定律对于湿空气均能适用。

在干燥过程中，湿空气中水分的重量是会增加的，而干空气的重量是不变的，所以在以下的计算中各参数均以单位重量干空气为基准。

### 1. 空气的湿含量

空气的湿含量又叫湿度。它是指单位重量干空气所带有的水分重量，用  $x$  [公斤水汽/公斤干空气]表示。即

$$x = \frac{\text{湿空气中水分的重量, 公斤}}{\text{湿空气中干空气的重量, 公斤}}$$

因重量等于公斤分子数乘以分子量，所以

$$x = \frac{M_v \cdot n_v}{M_g \cdot n_g} \quad (1-1)$$

式中： $M_v$ ——水分的分子量，公斤/公斤分子；

$M_g$ ——干空气的分子量，公斤/公斤分子；

$n_v$ ——水分的公斤分子数；

$n_g$ ——干空气的公斤分子数。

设湿空气的总压为  $P$  毫米汞柱，其中水分的分压为  $p$  毫米汞柱，则干空气的分压为  $(P-p)$  毫米汞柱。由道尔顿分压定律知道，气体混合物中各组分的分子数比等于其分压比，又因  $M_v = 18$ ， $M_g = 29$ ，代入式 (1-1) 中，可得：

$$x = \frac{18}{29} \cdot \frac{p}{P-p} = 0.622 \frac{p}{P-p} \quad (1-2)$$

此式说明空气的湿含量与湿空气的总压及其中水分分压有关，当总压一定时，则只与水分分压有关。

若式 (1-2) 中水分分压等于同一温度下的饱和蒸汽压  $p_s$ ，

则表明湿空气已达到饱和状态，称为饱和空气。

## 2. 空气的相对湿度

空气的相对湿度又叫蒸汽饱和度。它是在相同温度和总压下，湿空气的水汽分压  $p$  与饱和空气中水蒸汽分压  $p_s$  之比，用  $\varphi$  表示，即

$$\varphi = \frac{p}{p_s} \times 100\% \quad (1-3)$$

当相对湿度  $\varphi = 100\%$  时，表示湿空气中水汽已达饱和，这时湿空气中水蒸汽分压已达到同温度下水的饱和蒸汽压，即达到了湿空气中水汽分压的最高值。相对湿度  $\varphi$  愈低，就表示距饱和状态愈远，表示湿空气的吸收水蒸汽的能力愈强。我们见到阴雨天晾晒衣服不易干，而晴天时容易干，就是因为阴雨天空气的相对湿度大，而晴天空气的相对湿度小的缘故。

由式 (1-3) 可以知道，相对湿度  $\varphi$  取决于湿空气中水蒸汽的分压和温度。由式 (1-3) 又可得出

$$p = \varphi \cdot p_s$$

代入式 (1-2) 可得出湿空气的湿含量与相对湿度的关系为：

$$x = 0.622 \frac{\varphi \cdot p_s}{P - \varphi \cdot p_s} \quad (1-4)$$

由式 (1-4) 可以知道，总压一定时，空气的湿含量  $x$  随空气的相对湿度及温度而变，而当湿空气的总压和温度一定时，湿含量只由相对湿度决定。

## 3. 湿空气的热含量

湿空气的热含量为干空气的热含量与水蒸汽热含量之和。以 1 公斤干空气为基准，则湿空气的热含量  $I$  千卡/公斤干空气，为：

$$I = c_g t + x i \quad (1-5)$$

式中:  $I$ ——湿空气的热含量, 千卡/公斤干空气;

$c_g$ ——干空气的比热, 可取为0.24千卡/公斤干空气·°C;

$t$ ——湿空气的温度, °C;

$x$ ——空气的湿含量, 公斤水汽/公斤干空气;

$i$ —— $t$ °C时水汽的热含量, 千卡/公斤水汽。

$t$ °C时水汽的热含量为0°C的水变为0°C的水汽所需的潜热和水汽由0°C升温到 $t$ °C时所需显热之和。0°C时水的汽化潜热为595千卡/公斤水, 水汽的平均比热为0.46千卡/公斤·°C, 则水汽的热含量 $i$ 为:

$$i = 595 + 0.46t \quad (1-6)$$

将式(1-6)代入式(1-5)得:

$$\begin{aligned} I &= 0.24t + 0.46xt + 595x \\ &= (0.24 + 0.46x)t + 595x \end{aligned} \quad (1-7)$$

式中括弧内的数字代表湿空气的比热, 所以式中前一项为湿空气的显热, 后一项为湿空气中水汽的潜热。由式(1-7)可以知道, 湿空气的热含量随空气的温度和湿含量而变。

#### 4. 干球温度

在湿空气中用普通温度计测得的温度, 称为湿空气的干球温度, 也就是湿空气的真实温度, 用 $t$ (°C)表示。

#### 5. 露点

在总压及湿含量保持不变的情况下, 将不饱和空气冷却至饱和状态即结出露珠, 此时的温度, 称为该空气的露点, 用 $t_d$ 表示。当达到露点时, 空气的相对湿度 $\varphi = 100\%$ , 此时式(1-4)变为:

$$x = 0.622 \frac{p_s}{P - p_s} \quad (1-8)$$

上式中  $p_s$  即为露点时水的饱和蒸汽压。将式 (1-8) 改写成:

$$p_s = \frac{xP}{0.622 + x} \quad (1-9)$$

当湿空气的总压一定, 则  $p_s$  与  $x$  有关。如果已知湿空气的总压和湿含量  $x$ , 代入式 (1-9) 即可计算出  $p_s$ , 然后查饱和水蒸汽表即可得出对应于  $p_s$  的温度, 这就是这种湿空气的露点  $t_d$ 。

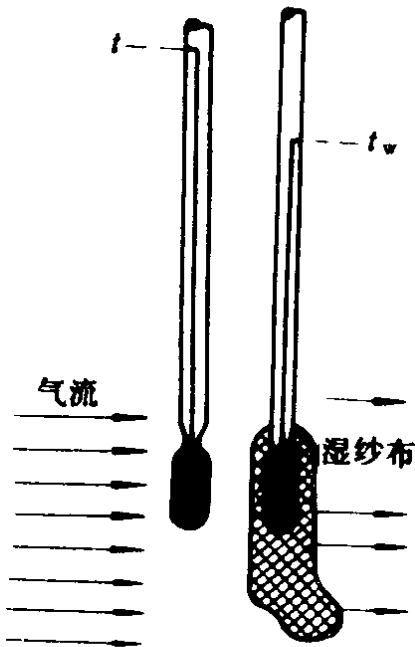


图 1-1 干湿球温度计

## 6. 湿球温度

见图1-1, 将温度计的水银球用纱布包裹, 纱布下端浸在水中, 由于毛细管的作用, 纱布总是被水润湿, 这个温度计称为湿球温度计, 它在空气中所测得的温度称为湿球温度, 用  $t_w$  表示。湿球温度  $t_w$  表示的是什么概念呢? 我们来分析一下

它的机理。当大量的不饱和空气流过包在温度计水银球外的湿纱布表面时, 由于湿纱布表面上水蒸汽分压大于空气中水汽的分压, 所以水分就要汽化到不饱和空气中去, 而水汽化所需的热量首先要取自湿纱布中的显热, 因此水温会下降。当水温下降到低于空气干球温度时, 则空气与水有了温差, 热量将由空气传入到湿纱布的水中, 其传热速率随着温差的增加而提高。当由空气传入湿纱布的传热速率, 恰好等于自纱布表面汽化水分所需的传热速率时, 湿纱布中水温即保持稳定, 这时水的温度就称为空气的湿球温度。

湿球温度不是空气的真实温度, 而只是表明空气的状态或性质的一种参数。湿球温度由空气的干球温度及相对湿度

或湿含量决定。对一定干球温度的空气而言，相对湿度愈低时，则水分从湿纱布中汽化的速率愈快，传热速率也愈大，空气和湿纱布的温差也愈大，所以湿球温度也愈低。对于饱和空气，则湿球温度就等于干球温度。

湿球温度的概念当用于干燥过程时，对于表面保持润湿的湿物料，其表面温度即可看作空气的湿球温度。

### 7. 绝热饱和温度

如图1-2所示为一绝热饱和器，即与外界没有热交换的饱和器。假定有不饱和空气连续通入与大量的喷洒水密切接触。水向空气中汽化，它所需要的潜热，只能取自空气的显热，结果空气的温度下降，而空气的湿度增加，但空气的热含量不变，因为水汽化所需要的潜热又因水变成水蒸汽而带回到空气中。直到空气被水汽所饱和时，空气的温度不再下降了，并且等于循环水的温度，这个温度称为该空气的绝热饱和温度，用 $t_s$ 表示。对于空气——水系统，可近似地认为绝热饱和温度和湿球温度在数值上是相等的。

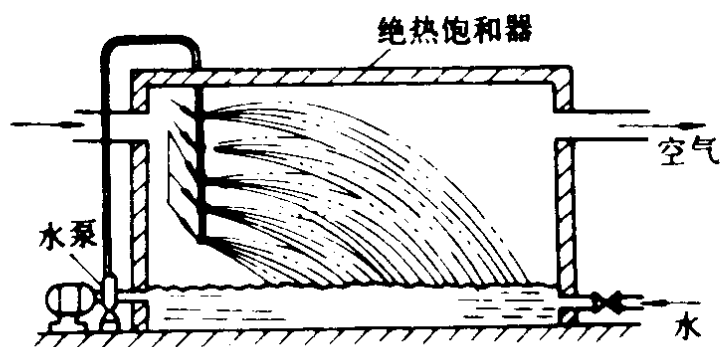


图 1·2 绝热饱和器

对于不饱和空气，干球温度 $t$ 、湿球温度 $t_w$ 和露点 $t_d$ 三者的大小为干球温度最高，湿球温度次之，露点最低，即 $t > t_w > t_d$ ，而对饱和空气，则三者相等，即 $t = t_w = t_d$ 。



湿空气的这些状态参数在干燥过程的计算中都是要用到的，它们可以用来作干燥过程的物料衡算和热量衡算。下面举一例题帮助读者更好地领会和使用这些参数。

**例题 1 1** 已知湿空气的总压为760毫米汞柱，相对湿度为70%，干球温度为20℃。试求：

- ① 湿空气中水汽分压，
- ② 空气的湿含量  $x$ ，
- ③ 空气的露点  $t_d$ ，
- ④ 将该空气在预热器内预热到95℃，以每小时100公斤干空气计算，所需热量为若干千卡？

解：

① 查得20℃时饱和水蒸汽压为  $p_s = 17.45$ 毫米汞柱，由式 (1-3) 得  $p = \varphi \cdot p_s = 0.7 \times 17.45 = 12.28$ 毫米汞柱。

② 由式 (1-4) 得：

$$x = 0.622 \frac{\varphi \cdot p_s}{P - \varphi \cdot p_s} = 0.622 \frac{0.7 \times 17.45}{760 - 0.7 \times 17.45}$$

$$= 0.0102 \text{ 公斤水汽/公斤干空气}$$

③ 因为露点是在湿含量不变的情况下空气冷却而达到饱和的温度，只要将湿含量0.0102代入 (1-9) 式得：

$$p_s = \frac{xP}{0.622 + x} = \frac{0.0102 \times 760}{0.622 + 0.0102}$$

$$= 12.28 \text{ 毫米汞柱}$$

从饱和蒸汽表查得与此  $p_s$  对应的温度  $t_d = 14.5^\circ\text{C}$ 。

④ 预热器中，空气受热而温度变化，但其湿含量不变，所以湿空气的热含量可由式 (1-7) 计算。95℃及  $x = 0.0102$  时的热含量为：