

中国建筑工业出版社



流态化干燥技术

童景山 张克 编著

.6

# 流 态 化 干 燥 技 术

童景山 张克 编著

中国建筑工程工业出版社

本书较全面地介绍了流态化干燥技术,其中包括气流干燥、流化床干燥、喷动床干燥以及各种组合式干燥等。书中除阐述了干燥的理论基础、固体颗粒流态化的基本规律之外,还以较多篇幅详细介绍了各种物料(如粉粒体、膏状物料、溶液等)的新干燥工艺和干燥设备及其实际使用情况,并以例题形式说明这些设备的计算及选择方法。本书可作为化工、建材、轻工、纺织、食品、医药、煤炭等工业部门的研究单位、设计单位、工厂技术人员的参考书,也可作为大专院校有关专业高年级学生的辅助教材。

## 流 态 化 干 燥 技 术

童景山 张克 编著

\*

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

北京市顺义县赵全营燕峰胶印厂印刷

\*

开本: 850×1168毫米 1/32 印张: 10<sup>3</sup>/<sub>8</sub> 插页: 1 字数: 277千字

1985年11月第一版 1985年11月第一次印刷

印数: 1—4,900册 定价: 2.20元

统一书号: 15040·4840

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第一章 绪 言 .....               | 1  |
| 第一节 干燥在国民经济中的意义 .....       | 1  |
| 第二节 干燥技术的进展 .....           | 2  |
| 第二章 干燥的理论基础 .....           | 5  |
| 第一节 湿空气 .....               | 5  |
| 一、概述 .....                  | 5  |
| 二、湿空气的绝对湿度和相对湿度 .....       | 6  |
| 三、湿空气的湿含量 .....             | 9  |
| 四、湿空气的焓 .....               | 10 |
| 五、湿空气的湿比容和湿比热 .....         | 11 |
| 六、湿空气的焓-湿 ( $t-x$ ) 图 ..... | 12 |
| 第二节 湿物料的含水量 .....           | 13 |
| 一、湿分与物料的结合形式 .....          | 14 |
| 二、湿物料的干燥特性 .....            | 15 |
| 三、湿物料的干燥特性曲线 .....          | 17 |
| 第三节 干燥器的热计算 .....           | 20 |
| 一、干燥器的物料衡算 .....            | 20 |
| 二、干燥器的热量衡算 .....            | 22 |
| 三、干燥介质消耗量的计算 .....          | 23 |
| 四、干燥器的理论干燥过程和实际干燥过程 .....   | 24 |
| 五、实际干燥过程的确定方法 .....         | 26 |
| 第四节 流态化原理及其特性 .....         | 29 |
| 一、流态化过程的基本概念 .....          | 29 |
| 二、颗粒状物料的性质 .....            | 32 |
| 第三章 气流干燥 .....              | 39 |
| 第一节 概述 .....                | 39 |
| 第二节 气流干燥器的类型及流程 .....       | 41 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 一、直管气流干燥器 .....        | 41  |
| 二、旋风气流干燥器 .....        | 45  |
| 三、脉冲气流干燥器 .....        | 47  |
| 四、文丘里管型气流干燥器 .....     | 50  |
| 五、套管式气流干燥器 .....       | 51  |
| 六、卷曲流气流干燥器 .....       | 53  |
| 七、喷气式气流干燥器 .....       | 55  |
| 八、环形气流干燥器 .....        | 56  |
| 第三节 气流干燥的基本理论 .....    | 57  |
| 一、颗粒在气流干燥管中的运动轨迹 ..... | 57  |
| 二、颗粒在气流干燥管内的传热 .....   | 63  |
| 三、气体与颗粒之间的传热 .....     | 67  |
| 第四节 气流干燥器的设计 .....     | 69  |
| 一、设计参数 .....           | 69  |
| 二、设计实例 .....           | 78  |
| 第四章 流化床干燥器 .....       | 87  |
| 第一节 概述 .....           | 87  |
| 第二节 流化床干燥器的类型及流程 ..... | 89  |
| 一、单层圆筒型流化床干燥器 .....    | 89  |
| 二、多层流化床干燥器 .....       | 91  |
| 三、穿流板式多层流化床干燥器 .....   | 95  |
| 四、卧式多室流化床干燥器 .....     | 96  |
| 五、振动流化床干燥器 .....       | 99  |
| 六、脉冲式流化床干燥器 .....      | 101 |
| 七、惰性粒子流化床干燥器 .....     | 102 |
| 第三节 流态化造粒技术 .....      | 103 |
| 一、流态化造粒机理 .....        | 103 |
| 二、影响颗粒物性的因素 .....      | 111 |
| 三、造粒机的种类及使用实例 .....    | 122 |
| 第四节 流化床干燥器的设计与计算 ..... | 127 |
| 一、流体力学计算 .....         | 127 |
| 二、流化床内的传热 .....        | 133 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 三、流化床内流体的分布 .....         | 137 |
| 四、流化床干燥器的设计实例 .....       | 142 |
| 第五章 喷动床干燥器 .....          | 153 |
| 第一节 概述 .....              | 153 |
| 第二节 喷动床干燥装置类型及使用情况 .....  | 155 |
| 一、单级及多级喷动床干燥器 .....       | 155 |
| 二、多室喷动床干燥器 .....          | 158 |
| 三、导向喷动床干燥器 .....          | 159 |
| 四、喷动床干燥造粒技术 .....         | 159 |
| 第三节 喷动床的设计 .....          | 162 |
| 一、一般喷动床的设计 .....          | 162 |
| 二、导向喷动床的设计 .....          | 172 |
| 三、喷动流化床的设计 .....          | 177 |
| 第四节 分离器的设计与计算 .....       | 184 |
| 一、旋风分离器的工作原理与计算 .....     | 184 |
| 二、扩散式旋风分离器的工作原理与计算 .....  | 185 |
| 三、湿式除尘器 .....             | 188 |
| 第六章 组合式干燥器 .....          | 189 |
| 第一节 概述 .....              | 189 |
| 第二节 结合各种干燥方法的组合式干燥器 ..... | 189 |
| 一、薄膜—流化床组合干燥器 .....       | 190 |
| 二、气流—流化床组合式干燥器 .....      | 192 |
| 三、螺旋—气流组合式干燥器 .....       | 195 |
| 四、旋风分离器—流化床组合式干燥器 .....   | 197 |
| 第三节 结合各种热过程的联合干燥器 .....   | 198 |
| 一、烘焙(干燥)—冷却联合干燥器 .....    | 198 |
| 二、脱水(造粒)—干燥联合干燥器 .....    | 201 |
| 三、结合其他过程的联合干燥器 .....      | 203 |
| 第七章 各种物料的干燥工艺 .....       | 206 |
| 第一节 粉粒状物料的流态化干燥 .....     | 206 |
| 一、矿产品及燃料的干燥 .....         | 206 |
| 二、硫氨的干燥 .....             | 219 |
| 三、白砂糖的冷却装置 .....          | 221 |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 四、高硼酸钠干燥和煅烧装置 .....                   | 221 |
| 五、氟化铝的干燥 .....                        | 223 |
| 六、聚合物和一些有机产品的干燥 .....                 | 223 |
| 七、淀粉的干燥 .....                         | 226 |
| 八、医药的干燥 .....                         | 227 |
| 第二节 膏状物料、溶液和悬浮液的干燥 .....              | 228 |
| 一、干燥物料床的干燥 .....                      | 230 |
| 二、在惰性载体流化床中的干燥 .....                  | 239 |
| 第八章 流态化干燥装置的选择及设计计算 .....             | 252 |
| 第一节 干燥器的选择原则 .....                    | 252 |
| 第二节 流态化干燥器的设计计算 .....                 | 255 |
| 一、基本原则 .....                          | 255 |
| 二、流态化干燥器的计算方法 .....                   | 256 |
| 桐荣设计计算法 .....                         | 257 |
| 罗曼科夫设计法 .....                         | 289 |
| 第三节 干燥装置的最佳设计 .....                   | 308 |
| 一、图解计算法 .....                         | 309 |
| 二、数学解析法 .....                         | 310 |
| 附录一 饱和水和饱和蒸汽表 .....                   | 313 |
| 附录二 某些干物料的比热 .....                    | 314 |
| 附录三 绝热材料的导热系数 .....                   | 315 |
| 附录四 各种建筑材料与金属的导热系数 .....              | 317 |
| 附录五 干燥空气的热物性质<br>(在大气压760毫米汞柱时) ..... | 319 |
| 附录六 颗粒物料的堆置性质 .....                   | 320 |
| 附录七 颗粒物料的形状系数 .....                   | 320 |
| 附录八 湿空气的焓—湿图(最高温度1050°C)              |     |
| 附录九 湿空气的焓—湿图(最高温度200°C)               |     |
| 符号一览表 .....                           | 321 |
| 参考文献 .....                            | 324 |

# 第一章 绪 言

## 第一节 干燥在国民经济中的意义

干燥技术在国民经济具有重要的意义，工农业各个部门都有广泛的应用。要进行干燥的物料是多种多样的，有粮食、药品、食品、饲料、燃料、肥料、矿物、陶瓷制品、织物及化工产品等。要进行干燥的既有年产数千万吨的大批量物料，也有年产仅几十公斤的贵重物品。许多产品生产中，干燥都是重要的工艺环节，而正确地设计和进行干燥操作，是保持和改善产品质量的重要手段之一。

对干燥设备的基本要求是保证获得必需的质量指标（如含水量，物料结构，机械性能等）保证最好的单位能耗指标。因此，制造相应于现代科学技术水平的，低费用高生产率的干燥设备，乃具有巨大的经济意义。

在化学和建材等工业中，干燥的对象是块状，粒状，溶液，膏状物料等，最为广泛的是颗粒状物料，特别是结晶物料，它们可能是有机的，也可能是无机的。干燥方法也是多种多样的，如带式干燥器，蜗旋式干燥器以及气流式、流化床、喷动床等干燥装置。

在制药工业中，干燥在生产过程中所占比例很大，制剂质量在一定程度上受干燥过程的控制。国外最近研制了供热一流化床和脉冲流化床联合干燥装置，可大大强化传热传质过程，从根本上改变了劳动条件，也改进了产品的质量。

在建筑陶瓷生产部门，箱式干燥装置应用较普遍，装置中混合上升和下降的气流可以强化干燥过程。此外，一些新型的干燥

设备，特别是喷射式干燥器，流态化干燥器等也逐渐推广应用，代替一些老式的干燥器，从而使产品质量，劳动条件，经济价值等均有较大的提高。

在其它一些工业部门，如燃料工业部门，随着固体燃料量的增加，干燥操作的地位也相应地得到增加。流态化干燥技术获得了相当规模的推广和应用。

对农业而言，干燥过程也具有很大意义。在这里，干燥不仅是保证长时间贮藏产品的手段，而且也是提高粮食质量的重要方法。如国外已投产的，每小时可干燥几十吨粮食的大功率再循环式干燥装置的应用，就是一例。在国内，谷物干燥的研究也已开展起来，一些小型的谷物干燥机已在推广使用。

在饲料加工部门，如采用人工干燥方法，那么饲料中所含的养料和维生素几乎可以全部保持下来；而用自然干燥，一般要损失60~80%。所以近年来国内外逐渐重视饲料干燥的研究，以便提高饲料的产量和质量。

综上所述，干燥在国民经济中的意义是很大的，但是，目前这个领域的研究工作还很不够，远远不能满足需要。特别是对一些能耗低、效率高的干燥方法的研究，更为欠缺。今后必须采取切实可行的措施把干燥过程的研究提高一步，以适应“四个现代化”的步伐，对国民经济的飞速发展作出贡献。

## 第二节 干燥技术的进展

随着我国工农业生产的发展，干燥技术和干燥设备也获得了很大的发展。在散粒状物料的干燥方面，流态化干燥技术获得了更为广泛的应用。流态化干燥技术改善了设备内气—固两相接触条件，减少了气膜阻力，因而传热、传质效率得到了提高。近几年流化床、喷动床以及流化与移动组合床等技术都有不同程度的提高，其中尤以流化床发展得最快。

多年来的生产实践证明，对散粒状物料，特别是对热敏性物

料的干燥，气流干燥器是比较理想的。无论在产量、占地面积等方面，均较烘箱干燥优越，因此，目前在制药、塑料、食品、化肥等工业部门使用较为广泛。但是，气流干燥也有缺点，如热利用率较低，设备较高，气—固相相对速度较低等等。因而，近年来又创造了脉冲气流、旋风气流、短管气流等新型气流干燥设备，各自在不同方面克服了一些气流干燥的缺点，扩大了其使用范围。使易氧化的物料能用空气作干燥介质，从而既降低了干燥的动力消耗，又提高了生产能力及产品质量。此外，多级气流干燥和组合式气流干燥也得到了应用。如上海药用辅料厂的二级流程，可使载体热利用率提高到75%左右。

流化床干燥器是最近几年发展起来的，生产实践证明，它可以实现小设备大能力。由于热容量系数较大，停留时间可任意调节等特点，对含表面水和需经降速阶段干燥的物料均适用，特别适用于散粒状物料的干燥。就已经工业化的型式来看，有单层圆筒型，多层圆筒型，振动流化床，卧式多层流化床等，其中以卧式多室流化床干燥器发展比较快，已在制药、化肥、食品、塑料、石油化工等部门使用。从使用情况来看，卧式多室流化床具有操作方便，结构简单、适应性强等优点，可得到干燥程度均匀的产品。从动力消耗来看，也是比较经济的，是干燥散粒状物料的理想设备之一。

根据操作方法的不同，我国锥形流化床干燥器大致可分为三种。一种是浓相溢流出料，较多的用于流态化造粒方面；另一种是喷动床干燥器，即是由床顶出料，由旋风分离器回收产品。该床结构简单，干燥强度大，床层内温度均匀，不会发生局部过热现象。因此，它不但适用于大颗粒物料如聚氯乙烯，近些年来还用于粉粒状物料的干燥，如工业青霉素等。其缺点是动力消耗较大。

在溶液、悬浮液物料的干燥方面也获得了发展。除用得较多的喷雾干燥外，还发展了锥形流化床造粒、流化床造粒干燥装置等，应用于化肥、医药和食品工业中。

膏状物料的干燥，我国多以烘房为主，如染料、颜料、中间体、无机盐等的干燥。烘房干燥膏状物料的缺点主要是物料处于静止状态，物料与干燥介质接触面积小，接触状态不佳，因而干燥时间长，在干燥过程中需要人工翻动等。卸料也是在高温下进行，因而粉尘飞扬，不仅操作条件极差，产品质量亦不好。

真空耙式干燥机对大多数膏状物料都是适用的，它有易于操作，产量和劳动条件方面都比烘房优越，但当产量大时，真空耙式干燥机的体积也大，因而也有占地面积大，造价高等缺点。

流态化技术应用于干燥领域所发展起来的薄膜一流化、螺旋一气流以及流化床一气流干燥器等干燥设备，可将膏状物料（如氧化铁、氢氧化铝等）干燥成粉末状，实现了干燥和粉碎相结合，并具有产量大、设备结构紧凑、占地面积小、劳动强度低、易于制造等优点，目前已在染料、颜料、无机盐等工业部门推广使用。

关于新技术在干燥过程中的应用，近年来也得到了重视。如微波干燥已开始应用于食品、医药、化工、印刷、制革、胶卷、文教用品等工业部门。远红外线干燥也在某些行业中开始使用。

总之，三十余年来我国广大工程技术人员、工人、科学工作者对干燥过程的开发，新型干燥设备的研究与推广，都做了很多工作，取得了很大成绩；但是，在我国与其他化工单元操作相比，与世界先进工业国家的水平相比，差距还是很大的，还是比较落后的，其中对于干燥理论的研究尤为突出。

## 第二章 干燥的理论基础

### 第一节 湿空气

#### 一、概述

在干燥作业中大多以空气作为干燥介质（即干燥剂）。对于不含有水蒸汽的空气，我们称之为“干空气”。平常的大气中或多或少总含有水蒸汽，不过含量很少，不为人们所注意。但是对诸如干燥、调湿等作业，空气中水蒸汽含量多少，就必须予以充分注意，并要求进行仔细的分析和研究。

干空气和水蒸汽的混合物，称为“湿空气”。

根据道尔顿分压定律。湿空气之总压力等于空气的分压力和水蒸汽分压之和，即

$$p = p_a + p_v \quad (2-1)$$

平常大气中水蒸汽含量毕竟比较少，水蒸汽分压又很低，所以湿空气可以作为理想气体来处理。故有关理想气体的一些基本定律和基础数据在这里均可以使用。

根据空气中所含水蒸汽的多少和温度高低，空气中水蒸汽可以是饱和态，也可以是非饱和态（过热状态）。

干空气和过热蒸汽所组成的湿空气，称为“非饱和湿空气”，参看图2-1。

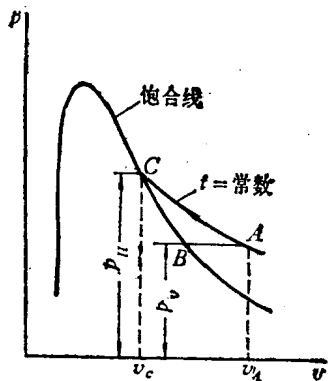


图 2-1 湿空气中水蒸汽之  $p-v$  图

若湿空气的温度为  $t$ ，所含水蒸汽分压  $p_v$ ，低于温度  $t$  时的饱和压强  $p_s$ ，则此蒸汽处于过热状态，可在水蒸汽的压容图 ( $p-v$ 图)上表示出来，如图2-1点A。而状态A的水蒸汽重度  $\gamma_v = \frac{1}{v}$ ，是小于相同温度  $t$  时的饱和水蒸汽的重度  $\gamma'' = \frac{1}{v''}$ ，即  $\gamma_v < \gamma''$ 。如果湿空气的温度  $t$  不变，而其水蒸气含量逐渐增加（如图2-1所示），沿着等温线  $t$  水蒸汽分压不断增加，一直到达C状态。此时分压达到极限值，该状态即为饱和状态，其分压为  $p_s$ 。 $p_s$ 值可以根据湿空气温度  $t$  从饱和水蒸汽表中直接查得。这种由于空气和饱和水蒸汽所组成的湿空气，称为“饱和湿空气”。除非提高其温度，否则湿空气在“饱和”后就不再具有吸湿能力了。

假如湿空气的水蒸气含量不变，即其分压  $p_v$  保持不变的情况下，对湿空气进行冷却（如图2-1所示），使湿空气沿等压线AB段冷却到与饱和蒸汽线相交的B状态时，所含水蒸气也达到饱和状态。如再冷却，湿空气中即将有水滴析出，B点的温度即为相应于水蒸汽分压  $p_v$  的饱和温度。该温度称为“露点”，用符号  $t_d$  表示。露点可用露点仪直接测得。因此，空气中水蒸汽的分压力  $p_v$ ，可根据  $t_d$  和饱和水蒸汽表查得。

## 二、湿空气的绝对湿度和相对湿度

湿空气是干空气和水蒸汽所组成的混合物，每单位体积湿空气中所含的水蒸汽，即称为湿空气的“绝对湿度”。

实际上，它就是湿空气中水蒸汽的重度。用  $\gamma_v$  表示， $\gamma_v$  越大，表明湿空气中水蒸汽量越大。当然，该量还不足以说明该湿空气还有没有继续吸湿的能力，因此我们通常用  $\phi = \frac{\gamma_v}{\gamma''}$  来表示湿空气的饱和程度。 $\gamma_v$  是湿空气在一定状态下实际上所含水蒸汽的重度， $\gamma''$  是同温度下空气可能包含水蒸汽最大量时的重度， $\phi$  称为相对湿度，显然， $\phi$  值越小，表明空气含水蒸汽量越小，离开“饱和状态”越远，干燥能力也越大；反之  $\phi$  值越大，干燥能力则越小。

这个量也可用水蒸汽的分压力来表示。由理想气体状态方程可得：

$$p_v = \gamma_v R_v T$$

$$p_s = \gamma'' R_v T$$

式中  $R_v$ ——水蒸汽的气体常数， $\left[ \frac{\text{公斤} \cdot \text{米}}{\text{公斤} \cdot \text{度}} \right]$ ，

$T$ ——绝对温度，K。

由此可得：

$$\varphi = \frac{\gamma_v}{\gamma''} = \frac{p_v}{p_s} \quad (2-2)$$

下面介绍相对湿度  $\varphi$  常用的两种确定方法。

#### (1) 露点法

用露点仪测得露点温度  $t_d$ ，从饱和水蒸汽表（见附录表1）查得水蒸汽分压  $p_v$ （或应用公式（2-4）求  $p_v$ ）后，再根据湿空气温度  $t$  查表（或按公式（2-3）确定对应于温度  $t$  的饱和压力  $p_s$ ）求  $p_s$  后，再按式（2-2）求  $\varphi$ 。

在  $0 \sim 100^\circ\text{C}$  范围内，水蒸汽饱和压力与饱和温度之间的关系为：

$$\log p_s = 0.662 + \frac{7.5 t}{238 + t} \quad (2-3)$$

式中  $p_s$ ——饱和压力[毫米汞柱]；

$t$ ——温度[ $^\circ\text{C}$ ]。

#### (2) 湿球温度计法

图2-2所示为一湿度计，其结构主要是由干、湿球温度计组成。干球温度计直接测出湿空气的实际温度  $t$ ，而湿球温度计所指示的确是温度  $t_w$ ，谓之“湿球温度”。该温度与空气湿度有密切的关系，因此空气的相对湿度  $\varphi$  是湿空气温度  $t$  和湿球温度  $t_w$  的函数，即  $\varphi = f(t, t_w)$ 。

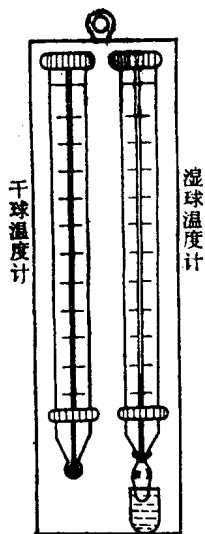


图 2-2 干湿球温度计

这个函数关系比较复杂，故一般都直接制成图或表的形式，以供实际使用。表2-1是湿度表，若已知  $t$  及  $t_w$  就可从表中查得出  $\varphi$  值。

湿度表

表 2-1

| $t(^{\circ}\text{C})$ | $\Delta t(^{\circ}\text{C})$ |    |    |    |    |    |
|-----------------------|------------------------------|----|----|----|----|----|
|                       | 0                            | 5  | 10 | 15 | 20 | 25 |
|                       | $\varphi(\%)$                |    |    |    |    |    |
| 10                    | 100                          | 44 | —  | —  | —  | —  |
| 15                    | 100                          | 53 | 12 | —  | —  | —  |
| 20                    | 100                          | 59 | 24 | —  | —  | —  |
| 25                    | 100                          | 63 | 33 | —  | —  | —  |
| 30                    | 100                          | 67 | 39 | 17 | —  | —  |
| 35                    | 100                          | 70 | 45 | 24 | —  | —  |
| 40                    | 100                          | 72 | 48 | 29 | 14 | —  |
| 45                    | 100                          | 74 | 52 | 34 | 19 | —  |
| 50                    | 100                          | 75 | 54 | 37 | 22 | 12 |
| 55                    | 100                          | 76 | 57 | 41 | 26 | 15 |
| 60                    | 100                          | 77 | 58 | 42 | 29 | 19 |
| 65                    | 100                          | 78 | 60 | 45 | 32 | 22 |
| 70                    | 100                          | 78 | 60 | 46 | 34 | 24 |
| 75                    | 100                          | 78 | 60 | 47 | 36 | 27 |
| 80                    | 100                          | 79 | 61 | 48 | 37 | 28 |
| 85                    | 100                          | 79 | 62 | 49 | 39 | 30 |
| 90                    | 100                          | 82 | 67 | 53 | 43 | 30 |
| 95                    | 100                          | 83 | 68 | 55 | 44 | 35 |
| 100                   | 100                          | 83 | 69 | 56 | 45 | 36 |

$\Delta t = t - t_w$  —— 干湿球温度差 [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$t$  —— 干球温度 [ $^{\circ}\text{C}$ ]

关于湿空气中水蒸汽分压  $p_v$ ，可根据  $t$  及  $t_w$ ，按如下公式计算之：

$$p_v = p_w - 0.524(t - t_w) \quad (2-4)$$

式中  $p_w$  —— 是对应于  $t_w$ ， [ $^{\circ}\text{C}$ ] 的饱和蒸汽压力，单位是[毫米汞柱]。式中0.524，是一经验数值。

若精确计算 $p_r$ 值时，可应用卡里尔（Carrier）公式：

$$p_r = p_w - \frac{p - p_w}{1550 - 1.44 t_w} (t - t_w) \quad (2-5)$$

当应用上述公式计算出湿空气中水蒸汽的分压力 $p_r$ 后，再根据温度 $t$ 查出 $p_s$ ，就可求出相对湿度 $\phi$ 来。

### 三、湿空气的湿含量

在干燥过程中常用的干燥介质是空气，干空气重量在过程中是不变的，而水蒸汽含量则在变化。为计算方便起见，通常以每公斤干空气作为计算基准。每公斤干空气所含水蒸汽的量，即为湿空气的湿含量，用 $x$ 表示，其单位为 $\left[ \frac{\text{克(水蒸汽)}}{\text{公斤(干空气)}} \right]$ 。

如果已知干燥器进出口处湿空气的湿含量 $x_1$ 及 $x_2$ ，两者的差值，即

$$\Delta x = x_2 - x_1 \quad \frac{[\text{克(水蒸汽)}]}{[\text{公斤(干空气)}]} \quad (2-6)$$

此式代表每公斤干空气通过干燥器时从湿物料中所带走的水分量。

空气中的湿含量 $x$ ，也可以用分压力表示。根据湿含量 $x$ 之定义，即每公斤干空气所含水蒸汽量，因干空气和水蒸汽都同时占据了湿空气之总体积，故湿含量 $x$ 可以直接用水蒸汽重度和干空气重度之比来表示。

$$x = \frac{\gamma_r}{\gamma_g} \quad (2-7)$$

由气体状态方程可知：

$$p_r = \gamma_r R_g T$$

$$p_g = \gamma_g R_g T$$

所以

$$\begin{aligned} x &= \frac{\gamma_r}{\gamma_g} = \frac{R_g}{R_v} \cdot \frac{p_r}{p_g} \\ &= \frac{29.3}{47.1} \cdot \frac{p_r}{p_g} = 0.622 \frac{p_r}{p_g} [\text{公斤(水蒸汽)/} \end{aligned}$$

$$\frac{\text{公斤(干空气)}}{\text{公斤(干空气)}} = 622 \frac{p_v}{p} [\text{克(水蒸汽)}] \quad (2-8)$$

根据道尔顿分压定律:

$$p = p_g + p_v$$

其中  $p$  为大气压, 在分析湿空气性质时, 一般定为  $p = 745$  [毫米汞柱] (也有采用 760 毫米汞柱)。这样, 式 (2-8) 可改写为

$$x = 622 \frac{p_v}{p - p_v} \left[ \frac{\text{克(水蒸汽)}}{\text{公斤(干空气)}} \right] \quad (2-9)$$

#### 四、湿空气的焓

当我们涉及到分析计算干燥器内所需要的热量时, 往往要考虑湿空气焓的变化问题。

如上所述, 湿空气是由干空气和水蒸汽两部分组成, 所以湿空气的焓也应等于干空气的焓与水蒸汽焓之和。为方便起见, 湿空气的焓还是以每公斤干空气为基准来表示, 即为:

$$I = i_g + x i_v \left[ \frac{\text{千卡}}{\text{公斤(干空气)}} \right] \quad (2-10)$$

式中  $I$  ——湿空气的焓, [千卡/公斤(干空气)];

$i_g$  ——每公斤干空气的焓, [千卡/公斤(干空气)];

$i_v$  ——每公斤水蒸汽的焓, [千卡/公斤(水蒸汽)];

$x$  ——湿空气的湿含量。

如果以  $0 [^{\circ}\text{C}]$  时的焓 (等于零) 为基准, 干空气的焓可表示为:

$$i_g = C_{pg} t$$

式中  $C_{pg}$  ——干空气定压比热,  $C_{pg} = 0.24 \left[ \frac{\text{千卡}}{\text{公斤} \cdot \text{度}} \right]$ , 故

$$i_g = 0.24 t \quad (2-11)$$

所谓水蒸汽的焓, 是把  $0 [^{\circ}\text{C}]$  的水加热到温度为  $t_s$  的饱和水 ( $t_s$  是对应于实际水蒸汽分压下的饱和温度), 再继续加热使之汽化为饱和蒸汽 (汽化潜热为  $r_s$ ), 最后再将饱和蒸汽加热成为温度为  $t$  的过热蒸汽。这样, 过热蒸汽的焓为: