

中等专业学校试用教材

# 烧结砖瓦工业热工设备 及热工测量

王家泰 主编

武汉工业大学出版社

鄂新登字13号

内容提要

本书经建筑材料类中等专业学校教材编审委员会审定为中等专业学校  
烧结砖瓦专业教学用书。

全书共分四章，介绍干燥基本理论和干燥设备以及烧结砖瓦工业广泛  
采用的隧道窑和轮窑的结构、操作、设计和热工测量等知识。

本书也可供从事烧结砖瓦工业的工程技术人员和技术工人参考。

中等专业学校试用教材

烧结砖瓦工业热工设备及热工测量

王家泰 主编

\*

责任编辑 王忠林 徐扬

武汉工业大学出版社出版(武汉市武昌珞狮路14号)

新华书店湖北发行所发行 各地新华书店经销

中南三〇九印刷厂印刷

\*

开本: 787×1092mm 1/16 印张: 16 插页: 7 字数: 285千字

1991年12月第一版 1991年12月第一次印刷

印数 1—1000 定价: 3.85元

ISBN 7-5629-0386-7/TQ·27

## 前 言

本教材根据1984年7月国家建筑材料工业局召开的“烧结砖瓦专业教学计划与教学大纲会议”制定的教学大纲编写，作为中等专业学校烧结砖瓦专业的试用教材，授课50学时。

此书主要讲解烧结砖瓦热加工过程中的下述内容：

干燥和焙烧过程中有关设备的结构和工作原理；

干燥和焙烧过程的热工计算、设备选型和一般设计计算；

干燥和焙烧过程的基本操作原理。

为使学生学习了解和掌握上述基本内容，干燥和焙烧设备分别以广泛使用的逆流式隧道干燥窑、烧煤隧道窑和轮窑为典型加以叙述。对于其它型式或国外新型的干燥、焙烧设备仅作一般概略介绍。

本书由中国建筑西北设计院建材分院王家泰主编，张庆奎和长春建筑材料工业学校刘克非参加编写。具体分工为：第一章、第二章第一、六节和第三章王家泰；第二章第二节至第五节张庆奎。第四章刘克非。

本书由方景从主审。

由于编者水平有限，书中缺点错误在所难免，恳望学校师生及其它读者批评指正。

编 者

1988年6月



# 目 录

第一章 干燥过程及设备	1
第一节 概述	1
第二节 湿空气的基本性质	2
一、湿度	2
二、湿含量	4
三、湿空气的密度	5
四、湿空气的热含量	5
五、温度参数	6
第三节 $I-x$ 图及其用法	8
一、 $I-x$ 图的作法	8
二、 $I-x$ 图的基本用法	9
第四节 干燥过程的物料平衡和热平衡	12
一、物料平衡	13
二、热平衡	15
三、干燥过程的图解计算	18
第五节 干燥机理	24
一、物料中水分的性质	24
二、干燥机理	25
三、干燥速率及其影响因素	27
第六节 干燥方法及设备	31
一、室式干燥室	31
二、隧道干燥室	32
三、链式干燥室	33
四、大断面隧道干燥室	33
第七节 干燥室的设计与计算	34
一、设计内容	34
二、计算内容	42
第二章 隧道窑	44
第一节 概述	44
第二节 工作系统及结构	45
一、工作系统及各带的划分	45
二、几种典型的工作系统	45
三、结构	47

四、隧道窑附属设备 .....	68
第三节 隧道窑的砌筑 .....	70
一、隧道窑用耐火材料 .....	71
二、隧道窑窑体砌筑 .....	78
三、隧道窑施工技术要求 .....	83
第四节 隧道窑操作 .....	84
一、隧道窑的烘窑 .....	84
二、隧道窑的码窑 .....	87
三、隧道窑的热工制度 .....	101
四、焙烧中的异常情况及其矫正 .....	110
五、砖瓦缺陷的消除 .....	111
第五节 隧道窑设计 .....	112
一、设计的基本要求 .....	112
二、设计的原始资料 .....	113
三、基本原则的确定 .....	113
四、窑体主要尺寸的计算 .....	115
五、工作系统的确定 .....	117
六、窑体的材料及厚度的确定 .....	118
七、窑体钢结构计算 .....	120
八、燃料燃烧计算 .....	121
九、燃料消耗量计算 .....	122
十、预热带及烧成带的热平衡计算 .....	123
十一、冷却带热平衡计算 .....	131
十二、全窑余热量计算 .....	133
十三、工作系统阻力计算和风机选型 .....	133
第六节 其它类型隧道窑 .....	141
一、一次码烧隧道窑 .....	141
二、烧柴隧道窑 .....	144
三、烧重油隧道窑 .....	144
四、烧天然气隧道窑 .....	145
五、全烧瓦隧道窑 .....	147
六、大断面吊平顶隧道窑 .....	147
七、装配式隧道窑 .....	148
第三章 轮窑 .....	150
第一节 概述 .....	150
第二节 轮窑结构及工作系统 .....	150
第三节 焙烧原理 .....	153
第四节 轮窑的设计计算 .....	154

一、设计前应收集的工艺参数 .....	154
二、选型计算 .....	154
三、轮窑热平衡计算 .....	156
第五节 轮窑的改进 .....	163
第四章 窑炉的热工测量 .....	165
第一节 热工测量仪表 .....	165
一、湿度的测量 .....	165
二、温度的测量 .....	167
三、压力的测量 .....	174
四、流量的测量 .....	175
五、烟气成分的测量 .....	179
第二节 热平衡测量与计算 .....	182
一、基准的确定 .....	183
二、研究范围 .....	183
三、全窑的热平衡计算 .....	183
四、烧砖隧道窑热平衡计算举例 .....	192
附录 .....	199
一、工程单位制和国际单位制的换算 .....	199
二、管道经济流速 .....	200
三、烟气(压力为 101325 Pa) 的物性参数 .....	200
四、干空气(压力为 101325 Pa) 的物性参数 .....	200
五、在饱和线上蒸汽的物性参数 .....	201
六、在饱和线上水的物性参数 .....	202
七、空气的相对湿度表 .....	203
八、各种不同材料的物性参数 .....	207
参考文献 .....	208

# 第一章 干燥过程及设备

## 第一节 概 述

从固体物料中用蒸发的方法除去水分的过程称为干燥。

在粘土烧结制品的生产过程中，成型后的坯体都含有一定量的水分，其强度一般都不高，均需要预先除去大部分水分后，才能入窑焙烧。砖瓦坯体入窑的水分要求一般为7%以下，如果入窑坯体的水分过高，在窑炉的焙烧过程中将延长整个烧成时间，严重时会导致坯体倒塌，无法正常生产。

湿坯体在干燥过程中排除水分的步骤是：坯体表面水分受热先汽化成水蒸气再扩散到周围的空气或烟气中去，坯体内部水分则由于与表面水分所形成的湿度差而移至表面（干燥后期，有的坯体内部水分汽化成水蒸气后再移向表面），表面蒸发的水蒸气被流动着的空气或烟气所带走，从而使坯体得到干燥。

湿坯体在蒸发水分的同时需要热量，因此干燥过程是传热过程和传质过程的综合。湿坯体获得热量，使其表面的水蒸气分压（或浓度），大于周围气流中的水蒸气分压（或浓度），干燥过程才得以连续不断地进行。

干燥过程湿坯体所需热量，可利用热气流的对流传热，或利用太阳能的幅射传热。

砖瓦工厂的湿坯体常用的干燥方法按有否专门的干燥设备可有自然干燥和人工干燥之分。自然干燥是将成型后的湿坯体码放在室外露天或棚子里的凉坯场上，经风吹日晒使坯体干燥。自然干燥虽不需要特殊的设备和供热，但受外界气候条件的影响大，不能做到常年生产，而且干燥速度很慢，产量很低。这种方法现只用于小型厂的生产。

人工干燥在特殊的设备——干燥室中进行。利用热空气或烟气作为干燥介质，干燥介质将热量以对流传热的方式传给坯体，使坯体的水分蒸发，从坯体蒸发出来的水气又扩散到干燥介质中并被干燥介质带走。这种方法很少受外界气候变化的影响，而且干燥速度加快，干燥时间大大地缩短。同时也可以做到常年生产。目前国内砖瓦厂较普遍采用的隧道干燥室就是人工干燥方法中的专用干燥设备之一。

在一次码烧生产工艺流程中，干燥作业和焙烧作业同时在一个热工设备——一次码烧隧道窑进行。该窑专门设置“干燥段”来完成坯体的干燥过程。这种工艺流程较简化，并减少热损失，但它只限于成型水分可较低的原料（一般坯体成型水分在14~16%），窑内坯体码放层数不太多的情况，否则仍须专设干燥室进行单独干燥作业。

在粘土烧结制品生产中，无论采用哪种干燥方法或哪种类型的干燥设备，坯体的干燥都必须按一定的干燥制度进行。这是由于水分排除时，坯体产生收缩应力，易使坯体开裂变形。收缩应力除与坯体内外水分的湿度差和坯体尺寸、几何形状有关外，更主要的跟干燥条件有关。

因此，学习干燥过程就必须了解物料的性质以及在干燥过程中的物理变化，必须了解干燥介质的性质，以确立正确的干燥制度，选择和设计合适的干燥设备。

## 第二节 湿空气的基本性质

空气中总会或多或少地带有一些水蒸气，这种干空气和水蒸气的混合物称之为湿空气。

粘土烧结制品的坯体干燥大多采用对流干燥的形式，即坯体的干燥在热空气或热烟气中进行。在干燥过程中，湿坯体表面水分汽化后，又不断地排入空气中，因此，作为干燥介质的热空气或热烟气本身就可看成干空气或干烟气与水蒸气的混合物。那么干燥过程自然就与湿空气或湿烟气的性质有关。研究干燥过程，就必须先了解湿空气或湿烟气具有哪些基本性质。烟气的干燥性能与空气十分相近，所以把空气作为研究对象，同样适用于烟气。

湿空气的基本性质用以下参数表示。

### 一、湿度

湿空气中所含水蒸气的量称为湿度。表示湿度的方法有三种，即绝对湿度、饱和绝对湿度、相对湿度。

#### (一) 绝对湿度

单位体积(即  $1\text{ m}^3$ )的湿空气中所含水蒸气的质量，称为空气的绝对湿度，用符号  $\rho_w$  表示，其单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

根据道尔顿气体分压定律，混合气体的总压力等于组成混合气体的各组分气体的分压力之和。每一组分气体的分压力就等于该气体独占混合气体原有体积时的压力。水蒸气的体积与湿空气的体积相等，所以湿空气的绝对湿度就等于在该温度及水蒸气分压下的水蒸气的密度。

#### (二) 饱和绝对湿度

单位体积的空气中，水蒸气的最大含量随温度不同而改变。当在一定温度和压力下，空气中的水蒸气含量达最大值时，该状态的空气称为饱和空气。饱和空气的绝对湿度称为饱和绝对湿度。用符号  $\rho_s$  表示。饱和绝对湿度随空气的温度升高而增加。

根据理想气体方程式：

$$P_w V = \frac{m_w}{M_w} RT \quad (1-1)$$

$$\text{因 } \frac{m_w}{V} = \rho_w, \text{ 故得 } \rho_w = \frac{P_w M_w}{RT} \quad (1-2)$$

式中  $\rho_w$ ——空气的绝对湿度，即水蒸气的密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ；

$P_w$ ——水蒸气分压，Pa；

$M_w$ ——水蒸气的分子量， $M_w = 0.018$  (kg/mol)；

$R$ ——气体常数， $R = 8.315$  (J/mol·K)；

$T$ ——湿空气的绝对温度，K；

$V$ ——湿空气的体积， $\text{m}^3$ ；

$m_w$ ——水蒸气的质量，kg。

把有关数值代入式(1-2)得：

$$\rho_w = \frac{0.018 P_w}{8.315 T} = 2.16 \times 10^{-3} \frac{P_w}{T} \quad (1-3)$$



当空气被水蒸气饱和时，式(1-3)可改写为：

$$\rho_s = 2.16 \times 10^{-3} \frac{P_s}{T} \quad (1-4)$$

式中  $P_s$  ——饱和水蒸气分压，Pa。

在各种温度下，饱和空气的绝对湿度  $\rho_s$  及饱和水蒸气分压  $P_s$  列于表 1-1 中。

绝对湿度的测定方法：将一定容积的湿空气通过已知质量的干燥剂(如  $P_2O_5$ 、 $CaCl_2$ 、 $H_2SO_4$  等)，则空气中的水气被吸收，从干燥剂增加的质量，即可计算出该湿空气的绝对湿度。

各温度下饱和空气的绝对湿度及其水蒸气分压

表 1-1

$t$ (°C)	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> 湿空气)	$P_s$ (Pa)	$t$ (°C)	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> 湿空气)	$P_s$ (Pa)
-15	0.00139	166.0	45	0.06542	9631.3
-10	0.00214	260.6	50	0.08294	12402.6
-5	0.00324	394.5	55	0.10428	15835.1
0	0.00484	611.7	60	0.13009	20055.5
5	0.00680	875.2	65	0.16105	25201.3
10	0.00940	1231.6	70	0.19795	31433.7
15	0.01282	1679.7	75	0.24165	38932.5
20	0.01729	2345.4	80	0.29299	47882.2
25	0.02303	3177.3	85	0.35323	58544.6
30	0.03036	4258.8	90	0.42807	71939.5
35	0.03959	5645.2	95	0.50411	85885.4
40	0.05113	7409.1	99.4	0.58625	101073.8

### (三) 相对湿度

空气的绝对湿度  $\rho_w$  与在同温同压下饱和空气的绝对湿度  $\rho_s$  之比，称为相对湿度，用  $\varphi$  (%) 表示。

$$\varphi = \frac{\rho_w}{\rho_s} \times 100\% \quad (1-5)$$

将式(1-3)和(1-4)代入式(1-5)得：

$$\varphi = \frac{P_w}{P_s} \times 100\% \quad (1-6)$$

由式(1-6)可知，湿空气的相对湿度，也就是湿空气中水蒸气分压与同温同压下饱和水蒸气分压之比。

对于绝干空气， $\varphi = 0$ ；饱和空气  $\varphi = 100\%$ ；一般湿空气， $0 < \varphi < 100\%$ 。

空气的相对湿度是表示被水蒸气饱和的程度，即表示了空气的干湿程度。从而它也反映了该空气作为干燥介质时所具有的干燥能力。在干燥过程中，空气的相对湿度越低，则吸收水蒸气的能力越强，湿坯体的干燥速度越快。反之，空气的相对湿度越高，其干燥速度也越慢。当相对湿度达 100%，即表示空气达到饱和，则此时湿坯体中的水分不能蒸发，干燥也即停止。

当温度降低时，反而会有水蒸气冷凝在坯体表面，造成干燥废品。

## 二、湿含量

空气的绝对湿度是湿空气中所含水蒸气的实际数量。当以湿空气作为干燥介质时，在干燥过程中其水蒸气含量不断增加。因此，以  $1 \text{ m}^3$  湿空气作为基准，其本身也不断变化，使计算困难。而干空气的质量是一个不变量。在干燥过程中，我们采用  $1 \text{ kg}$  干空气作为计算基准就比较方便。湿空气中  $1 \text{ kg}$  干空气所含水蒸气的质量，称为湿含量。用符号  $x$  表示，其单位为  $\text{kg}$  水气 /  $\text{kg}$  干空气。

设有一定量的湿空气，其中含有  $m_a \text{ kg}$  干空气， $m_w \text{ kg}$  的水蒸气，那么其湿含量  $x$  为：

$$x = \frac{m_w}{m_a} \quad (1-7)$$

式中  $x$  ——空气的湿含量， $\text{kg}$  水气 /  $\text{kg}$  干空气；

$m_w$  ——湿空气中水蒸气的质量， $\text{kg}$ ；

$m_a$  ——湿空气中干空气的质量， $\text{kg}$ 。

由式(1-1)得知

$$P_w V = \frac{m_w}{M_w} RT$$

同理可得：

$$P_a V = \frac{m_a}{M_a} RT \quad (1-8)$$

式中  $P_a$  ——湿空气中干空气的分压， $\text{Pa}$ ；

$M_a$  ——干空气的分子量， $M_a = 0.029 \text{ (kg/mol)}$ 。

式(1-1)除以式(1-8)可得：

$$\frac{P_w}{P_a} = \frac{m_w}{m_a} \frac{M_a}{M_w}$$

上式  $\frac{m_w}{m_a}$  用  $x$  代入； $M_a$  和  $M_w$  用相应数值代入，经整理可得：

$$x = 0.622 \frac{P_w}{P_a} \quad (1-9)$$

根据道尔顿分压定律，湿空气的总压  $P$  等于水蒸气的分压  $P_w$  和干空气的分压  $P_a$  之和：

$$P = P_w + P_a$$

即

$$P_a = P - P_w \quad (1-10)$$

式中  $P$  ——湿空气的总压， $\text{Pa}$ 。

将式(1-10)代入式(1-9)得：

$$x = 0.622 \frac{P_w}{P - P_w} \quad (\text{kg 水气 / kg 干空气}) \quad (1-11)$$

由式(1-6)得知  $P_w = \varphi P_s$ ，代入式(1-11)得：

$$x = 0.622 \frac{\varphi P_s}{P - \varphi P_s} \quad (\text{kg 水气 / kg 干空气}) \quad (1-12)$$

从(1-12)式可知：在一定总压  $P$  下，空气的湿含量  $x$  与饱和水蒸气分压  $P_s$  和相对湿度  $\varphi$  有关。由表 1-1 可知，饱和水蒸气分压是随温度变化而变化，因此也可以说，在总压一定时，

空气的湿含量  $x$  仅与温度和相对湿度  $\varphi$  有关。

### 三、湿空气的密度

湿空气的密度等于  $1 \text{ m}^3$  的湿空气中干空气的质量与水蒸气的质量之和，即：

$$\rho = \rho_a + \rho_w \quad (1-13)$$

式中  $\rho$  ——湿空气的密度， $\text{kg}/\text{m}^3$  湿空气。

因  $\rho_w = \frac{P_w M_w}{RT}$ ，同样  $\rho_a = \frac{P_a M_a}{RT}$ ，代入式(1-13)得：

$$\rho = \frac{P_a M_a}{RT} + \frac{P_w M_w}{RT} \quad (1-14)$$

因  $P_a = P - P_w$ ，代入式(1-14)得：

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{(P - P_w) M_a}{RT} + \frac{P_w M_w}{RT} \\ &= \frac{P M_a}{RT} - \frac{(M_a - M_w) P_w}{RT} \\ &= \frac{0.029 P}{8.315 T} - \frac{(0.029 - 0.018) P_w}{8.315 T} \\ &= \frac{P}{287 T} - \frac{P_w}{756 T} \end{aligned} \quad (1-15)$$

用  $P_w = \varphi P_s$  代入式(1-15)得：

$$\rho = \frac{P}{287 T} - \frac{\varphi P_s}{756 T} \quad (1-16)$$

从式(1-16)可以看出，当  $\varphi = 0$  时，干空气的密度为  $\frac{P}{287 T}$ ，当  $\varphi \neq 0$  时，湿空气的密度为  $\frac{P}{287 T} - \frac{\varphi P_s}{756 T}$ 。所以湿空气的密度总是小于干空气的密度，湿空气的相对湿度越大，其密度就越小。

### 四、湿空气的热含量

湿空气的热含量是干空气和水蒸气两者热含量之和。用符号  $I$  表示，其单位为  $\text{kJ}/\text{kg}$  干空气。如前所述，为了计算方便，仍采用  $1 \text{ kg}$  干空气为计算基准，则包含  $1 \text{ kg}$  干空气和  $x \text{ kg}$  水蒸气的湿空气的热含量为：

$$I = 1 \text{ kg 干空气热含量} + x \text{ kg 水蒸气热含量}$$

1 kg 干空气的热含量为：

$$I_a = C_a t \quad (1-17)$$

式中  $I_a$  ——干空气的热含量， $\text{kJ}/\text{kg}$  干空气；

$C_a$  ——干空气的平均比热， $\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ，(其值可查表 1-2)；

$t$  ——空气温度， $^\circ\text{C}$ 。

1 kg 水蒸气的热含量为：

$$I_w = 2490 + C_w t \quad (1-18)$$

式中  $I_w$  ——水蒸气热含量, kJ/kg 水蒸气;  
 2490——水蒸气在 0 °C 的汽化潜热, kJ/kg 水蒸气  
 $C_w$  ——水蒸气的平均比热, kJ/kg·°C, (其值可查表 1-2);  
 $t$  ——湿空气的温度, °C。

水蒸气和干空气的比热 (kJ/kg·°C)

表 1-2

温度(°C)	水蒸气	干空气	温度(°C)	水蒸气	干空气
0	1.8573	1.0015	1100	2.1759	1.0996
100	1.8719	1.0057	1200	2.2092	1.1080
200	1.8922	1.0112	1300	2.2418	1.1165
300	1.9177	1.0190	1400	2.2733	1.1243
400	1.9463	1.0281	1500	2.3039	1.1314
500	1.9760	1.0384	1600	2.3331	1.1382
600	2.0072	1.0495	1700	2.3617	1.1443
700	2.0406	1.0650	1800	2.3893	1.1502
800	2.0744	1.0708	1900	2.4156	1.1560
900	2.1082	1.0809	2000	2.4409	1.1612
1000	2.1421	1.0903			

在砖瓦制品干燥设备的温度范围内, 可取  $C_a = 1.004$ ,  $C_w = 1.93$ , 则式(1-17)和式(1-18)可得

$$I_a = 1.004t \quad (1-19)$$

$$I_w = 2490 + 1.93t \quad (1-20)$$

包含 1kg 干空气和  $x$  kg 水蒸气的湿空气的热含量为:

$$\begin{aligned} I &= 1.004t + (2490 + 1.93t)x \\ &= (1.004 + 1.93x)t + 2490x \end{aligned} \quad (1-21)$$

从式(1-21)可知, 湿空气的热含量  $I$  随温度  $t$  和湿含量  $x$  而变化。该式右侧第一项为湿空气显热, 第二项为水蒸气的潜热, 在干燥作业中可利用的仅是湿空气的显热。

## 五、温度参数

### (一) 干球温度

在湿空气中, 用普通温度计所测得的温度, 称为该空气的干球温度, 用符号  $t$  表示。干球温度为该空气的实际温度。

### (二) 湿球温度

在湿空气中, 用湿球温度计所测得的温度, 称为该空气的湿球温度, 用符号  $t_w$  表示。湿球温度不是空气的实际温度, 而是表征湿空气状态的物理量。

当大量的不饱和空气流经湿坯体表面时, 由于湿坯体表面的水蒸气分压大于周围空气的水蒸气分压, 湿坯体表面的水分就要不断汽化而吸收热量, 湿坯体表面温度势必逐渐降低, 从而产生了湿坯体表面与湿空气间的温差, 于是空气的热量传给湿坯体。当湿坯体表面水分汽化所需的潜热恰好等于空气传给湿坯体表面的显热时, 两者达到动平衡, 湿坯体表面的温度不再

降低而达到一定值，此时的这个温度即为湿球温度。亦即少量的水与大量空气接触，达到传热的动平衡时水表面的温度。若将玻璃温度计的温包上裹以湿布，置于湿空气中，该温度计所示温度即为湿球温度。

空气的湿球温度只与空气的温度和湿度有关。空气的湿球温度与干球温度的数值相差越大，表明该空气被饱和的程度越小。因此，可利用干球温度与湿球温度来测定空气的湿度。通常是采用干湿球温度计组成一个湿度计来测定空气的湿度。湿度计(图 1-1)由两支相同的温度计所组成，其中一支温度计的温包上缠有纱布，并将纱布的尾部放入盛水的容器中，即形成一个湿球，此温度计称为湿球温度计；另一支温度计称为干球温度计。在一定温度下，当湿空气的相对湿度越低，干湿球温度计的温度差也就越大。当空气在饱和的情况下，湿球上的水分蒸发不出去，因此两温度计上的温度读数是相同的。

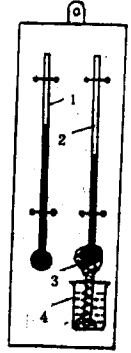


图 1-1 湿度计

- 1—干球温度计；
- 2—湿球温度计；
- 3—纱布；
- 4—盛水容器

用湿度计求空气的相对湿度，是根据干球温度  $t$  和湿球温度  $t_w$ ，先求出干球温度和湿球温度之差值  $\Delta t = t - t_w$ ，再用  $t$  和  $\Delta t$  就可以从附录七中查出湿空气的相对湿度  $\phi$ 。

**【例 1-1】** 当干球温度  $t = 40^\circ\text{C}$ ，湿球温度  $t_w = 38.3^\circ\text{C}$  时，求空气的相对湿度  $\phi$  及绝对湿度  $\rho_w$ 。

**【解】** 先求出  $\Delta t = t - t_w = 40 - 38.3 = 1.7^\circ\text{C}$ 。然后根据  $\Delta t = 1.7^\circ\text{C}$  和  $t = 40^\circ\text{C}$ ，查空气相对湿度(附录七)即可得相对湿度  $\phi = 90\%$ 。

再根据  $t = 40^\circ\text{C}$ ，查表 1-1 得饱和空气的绝对湿度  $\rho_s = 0.05113 \text{ kg/m}^3$ 。

利用公式(1-5)可求得绝对湿度为：

$$\rho_w = \phi \cdot \rho_s = 0.9 \times 0.05113 = 46.02 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$$

### (三) 露点

保持湿空气的湿含量不变而使其冷却，一直达到饱和状态( $\phi = 100\%$ )，此时的温度称为露点，用符号  $t_d$  表示。

当  $\phi = 1$  时，式(1-12)可写成：

$$x = 0.622 \frac{P_s}{P - P_s} \quad (1-22)$$

上式中的  $P_s$  此时即为露点时的饱和蒸气压，以  $P_d$  表示， $P_s = P_d$ ，则得：

$$P_d = \frac{x P}{0.622 + x} \quad (1-23)$$

式(1-23)说明了当湿空气的总压一定时，露点的饱和蒸气压仅与该空气的湿含量  $x$  有关。

### (四) 绝热饱和温度

在绝热情况下，若一定量的空气与大量的水相接触，水分汽化所需要的潜热以及升温所需要的显热，完全取自空气的显热。故空气的温度逐渐降低，而空气的湿度则逐渐增高，当此空气达到饱和状态( $\phi = 100\%$ )时，其温度等于水的温度且不再降低，此时的温度称为绝热饱和温度。

绝热饱和温度和湿球温度在概念上是完全不同的，但在水蒸气-空气系统中，它们两者的数

值近似相等，因此，可把湿球温度视为等于绝热饱和温度。这一关系对以后求湿空气的状态参数是极为方便的。

### 第三节 $I-x$ 图及其用法

按照数学公式来计算干燥过程，通常比较繁琐。为使计算简便，可将湿空气各参数之间的关系，用  $I-x$  图表示。所谓  $I-x$  图即纵坐标为湿空气的热含量  $I$  (kJ/kg 干空气)，横坐标为湿空气的湿含量  $x$  (kg 水气/kg 干空气) 的曲线图。见附图一。

#### 一、 $I-x$ 图的作法

$I-x$  图中的全部数据均以湿空气中所含 1kg 干空气作为基准，其总压力为 99.321 kPa，图中共有五组曲线：等热含量线、等湿含量线、等干球温度线、等相对湿度线、水蒸气分压线。为了避免图中各组线条聚集在一起，难以看清，故两坐标夹角采用  $135^\circ$  的方法绘制，如图 1-2a 所示。但在实际使用的  $I-x$  图中，是在  $I$  轴与  $x$  轴的交点处引一水平线作  $x$  的辅助轴，将湿含量的数值投影至该轴上，使之更便于运用。如图 1-2b 所示。

#### (一) 等湿含量线 (即等 $x$ 线)

等湿含量线为一组平行于  $I$  轴的直线。在每一条直线上的各点所表示的湿含量都是相等的，即  $x$  为常数。

#### (二) 等热含量线 (即等 $I$ 线)

等热含量线是一组相互平行且和  $I$  轴成  $135^\circ$  夹角的斜线。在每一条斜线上的各点所表示的热含量都是相等的，即  $I$  为常数。

#### (三) 等干球温度线 (即等 $t$ 线)

等干球温度线是连结不同  $I$ 、 $x$  而  $t$  相同的一组斜率不同的直线。它们可由式 (1-21) 即  $I = 1.004t + (2490 + 1.93t)x$  作出。当温度  $t =$  常数时，式中的  $I$  随  $x$  而变化，且两者成直线关系，即该式为一

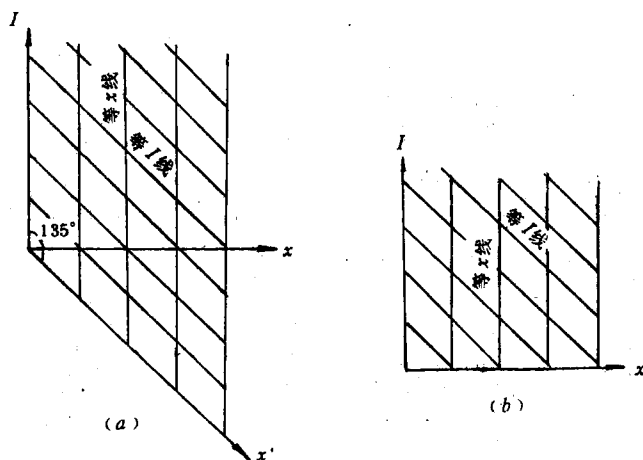


图 1-2  $I-x$  的坐标

直线方程，其截距为  $1.004t$ ，斜率为  $(2490 + 1.93t)x$ 。作图时是首先给定一个温度  $t$  值，然后代入两个不同的  $x$  值 (其中选一个  $x = 0$ )，则求得相应的两个  $I$  值，即可在  $I-x$  图上标出两点，连接此两点即可得到一条直线，即等  $t$  线。如图 1-3 所示。

等  $t$  线在  $I-x$  图中呈一束自左向右逐渐向上斜倾的直线。因表示不同温度的各等  $t$  线的斜率为  $(2490 + 1.93t)$ ，故温度越高其斜率必定越大，因此各等  $t$  线是相互不平行的。

#### (四) 等相对湿度线 (即等 $\varphi$ 线)

等相对湿度线是一组互不相交的曲线。每一条曲线上的各点所表示的相对湿度都是相等的，即  $\varphi$  为常数。

等相对湿度线是由式 (1-12):  $x = 0.622 \frac{\varphi P_s}{P - P_s}$  作出的。由此式可知，当  $\varphi =$  常数时，



$x$  随  $P_s$  而变化, 而  $P_s$  与不同温度有关, 所以  $x$  随  $t$  而变化。

作图时, 先确定一个  $\varphi$  值, 然后给出不同的温度  $t$ , 从表 1-1 中可查出各个  $P_s$  值, 再代入上面的公式求出相应的  $x$  值, 在图上将这些  $t$  和相应的  $x$  值的交点连接起来, 就成一条等  $\varphi$  线。用此方法可求得其它代表不同相对湿度的等  $\varphi$  线, 如图 1-4 所示。

等相对湿度线在  $I-x$  图中从左下角开始, 逐渐向上向右弯曲延伸, 与  $t = 99.4^\circ\text{C}$  的等  $t$  线相交后, 垂直向上的一组曲折线。

当湿空气的干球温度上升至  $99.4^\circ\text{C}$  (总压为  $99.321\text{kPa}$  时水的沸点) 时, 等  $\varphi$  线突然变更方向, 垂直向上, 说明当温度超过沸点时, 水蒸气达到饱和,  $x$  值保持一定不变。

#### (五) 水蒸气分压线 (即 $P_w$ 线)

水蒸气分压线是根据公式 (1-22):  $x = 0.622 \frac{P_s}{P - P_s}$

作出的, 式中的总压  $P$  不变时, 将不同的  $P_s$  值代入, 可以求得相应的  $x$  值。在  $I-x$  图中的下部右面是水蒸气分压坐标, 根据求得的  $P_s$  与相对应的  $x$  值的交点连接起来, 即可画出水蒸气分压线, 如图 1-5 所示。水蒸气分压线是一条自左下角开始并微向上凸起的曲线 (近似直线)。

### 二、 $I-x$ 图的基本用法

#### (一) 确定湿空气的状态参数

正如前述,  $I-x$  图是表示代表湿空气基本性质的各有关参数之间相互关系的曲线图, 图中任一点都有其一定的状态参数, 即热含量、湿含量、温度、相对湿度和水蒸气分压等。若已知湿空气其中某两个参数值, 即可在  $I-x$  图上确定一点, 进而找出其它各参数值。现举例说明如下:

**【例 1-2】** 已知干球温度  $t = 35^\circ\text{C}$ , 相对湿度  $\varphi = 90\%$ , 求湿空气的其它有关参数。

**【解】** 由  $t = 35^\circ\text{C}$  的等温线和  $\varphi = 90\%$  的等相对湿度线相交点, 即得空气的状态点 A, 见图 1-6 所示。

从 A 点引平行于等  $I$  线的直线与  $I$  轴相交, 可读出  $I = 121\text{kJ/kg}$  干空气。

从 A 点引平行于等  $x$  线的垂直线与  $x$  轴相交, 可读出  $x = 0.0335\text{kg}$  水气 /  $\text{kg}$  干空气。

从 A 点引平行于  $I$  轴的垂直线与水蒸气分压线相交, 再从此交点引一水平线, 与下部右

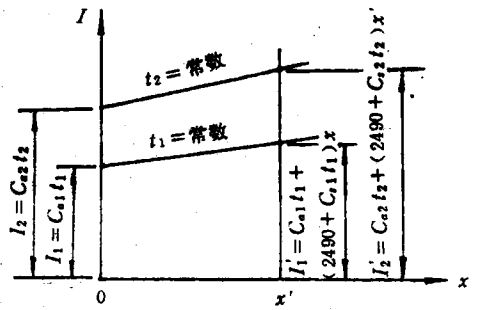


图 1-3 等  $t$  线的作法

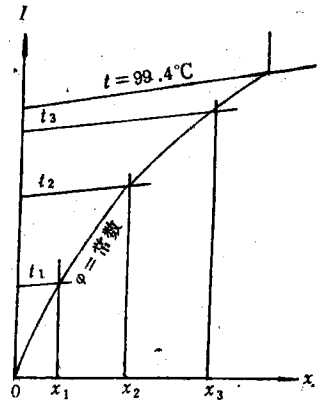


图 1-4 等相对湿度线的作法

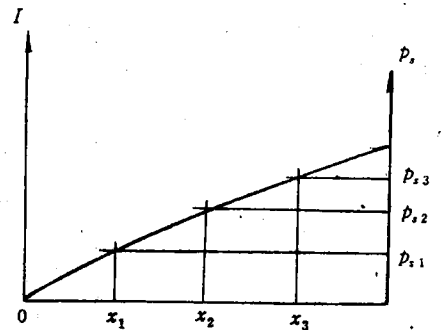


图 1-5 水蒸气分压线的做法

面的水蒸气分压坐标轴相交, 即可读出  $P_w = 5.0 \text{ kPa}$ 。

从  $A$  点沿等湿含量线向下(即说明湿空气的湿含量不变, 而温度下降), 和  $\varphi = 100\%$  的等相对湿度线相交(表示湿空气已达饱和), 据此交点可读出露点温度  $t_d = 32^\circ\text{C}$ 。

从  $A$  点沿等热含量线向下(即说明湿空气的热含量不变, 而湿含量增大, 温度下降), 和  $\varphi = 100\%$  的等相对湿度线相交(表示湿空气已达饱和), 此交点所示温度为绝热饱和温度。如前所述, 空气的湿球温度在数值上与空气的绝热饱和温度近似相等, 所以可得湿球温度  $t_w = 33^\circ\text{C}$ 。

**【例 1-3】** 已知湿含量  $x = 0.014 \text{ kg 水气/kg 干空气}$ , 干球温度  $t = 47^\circ\text{C}$ , 求其湿空气其它参数。

**【解】** 用  $x = 0.014 \text{ kg 水气/kg 干空气}$  的等湿含量线和  $t = 47^\circ\text{C}$  的等温线相交点, 即可得空气的状态点  $A$ , 如图 1-7 所示。同样, 用 [例 1-2] 的方法求得:

- (1) 热含量  $I = 84 \text{ kJ/kg 干空气}$ ;
- (2) 相对湿度  $\varphi = 20\%$ ;
- (3) 水蒸气分压  $P_w = 2.2 \text{ kPa}$ ;
- (4) 露点  $t_d = 19^\circ\text{C}$
- (5) 湿球温度  $t_w = 27^\circ\text{C}$
- (6) 绝对湿度  $\rho_w$  用公式(1-3)计算:

$$\begin{aligned} \rho_w &= 2.16 \times 10^{-3} \frac{P_w}{T} \\ &= 2.16 \times 10^{-3} \times \frac{2200}{273 + 47} = 0.0149 \text{ (kg/m}^3\text{)} \end{aligned}$$

- (7) 湿空气的密度  $\rho$  用公式(1-15)计算:

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{P}{287 T} - \frac{P_w}{756 T} \\ &= \frac{99321}{287 (273 + 47)} - \frac{2200}{756 (273 + 47)} = 1.07 \text{ (kg/m}^3\text{)} \end{aligned}$$

(二) 确定空气预热后的状态参数

在干燥流程中, 有时为了获得某一特定温度的干燥介质, 往往采取将冷空气通过预热器的办法。若冷空气由初始状态预热至某一温度后, 求其热空气所处状态时, 可先根据冷空气的有关参数, 在  $I-x$  图上找出其状态点  $A(t_0, x_0, I_0, \varphi_0)$ , 因在预热过程中, 虽然含量增加, 但湿含量保持不变, 因此, 可沿着湿含量等于  $x_0$  的等  $x$  线向上与预热后的温度  $t_1$  交于一点, 该点即为预热后热空气的状态点  $B(t_1, x_1, I_1, \varphi_1)$ , 如图 1-8 所示。

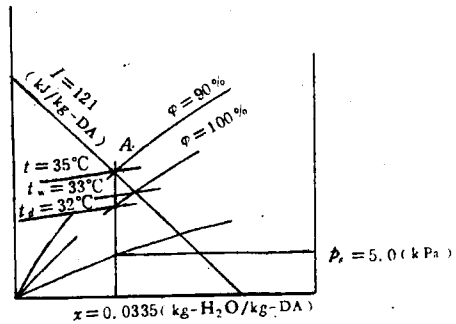


图 1-6 湿空气状态参数图解(一)

空气的湿球温度在数值上与空气的绝热饱和温度近似相等, 所以可得湿球温度  $t_w = 33^\circ\text{C}$ 。

**【例 1-3】** 已知湿含量  $x = 0.014 \text{ kg 水气/kg 干空气}$ , 干球温度  $t = 47^\circ\text{C}$ , 求其湿空气其它参数。

**【解】** 用  $x = 0.014 \text{ kg 水气/kg 干空气}$  的等湿含量线和  $t = 47^\circ\text{C}$  的等温线相交点, 即可得空气的状态点  $A$ , 如图 1-7 所示。同样, 用 [例 1-2] 的方法求得:

- (1) 热含量  $I = 84 \text{ kJ/kg 干空气}$ ;
- (2) 相对湿度  $\varphi = 20\%$ ;
- (3) 水蒸气分压  $P_w = 2.2 \text{ kPa}$ ;
- (4) 露点  $t_d = 19^\circ\text{C}$
- (5) 湿球温度  $t_w = 27^\circ\text{C}$
- (6) 绝对湿度  $\rho_w$  用公式(1-3)计算:

$$\begin{aligned} \rho_w &= 2.16 \times 10^{-3} \frac{P_w}{T} \\ &= 2.16 \times 10^{-3} \times \frac{2200}{273 + 47} = 0.0149 \text{ (kg/m}^3\text{)} \end{aligned}$$

- (7) 湿空气的密度  $\rho$  用公式(1-15)计算:

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{P}{287 T} - \frac{P_w}{756 T} \\ &= \frac{99321}{287 (273 + 47)} - \frac{2200}{756 (273 + 47)} = 1.07 \text{ (kg/m}^3\text{)} \end{aligned}$$

(二) 确定空气预热后的状态参数

在干燥流程中, 有时为了获得某一特定温度的干燥介质, 往往采取将冷空气通过预热器的办法。若冷空气由初始状态预热至某一温度后, 求其热空气所处状态时, 可先根据冷空气的有关参数, 在  $I-x$  图上找出其状态点  $A(t_0, x_0, I_0, \varphi_0)$ , 因在预热过程中, 虽然含量增加, 但湿含量保持不变, 因此, 可沿着湿含量等于  $x_0$  的等  $x$  线向上与预热后的温度  $t_1$  交于一点, 该点即为预热后热空气的状态点  $B(t_1, x_1, I_1, \varphi_1)$ , 如图 1-8 所示。

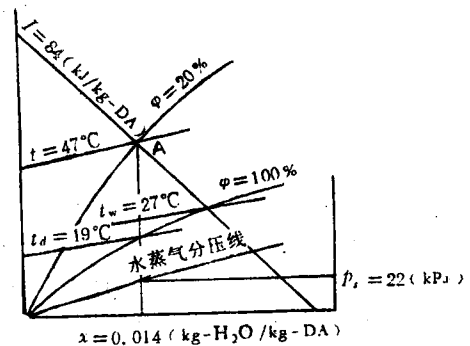


图 1-7 湿空气状态参数图解(二)

(DA—干空气)

### (三) 确定烟气的状态参数

确定空气在  $I-x$  图上的状态点, 需要有两个相互独立的状态参数。同样, 对于烟气也是如此。一般是先通过燃料燃烧计算求得烟气的热含量和湿含量两个参数, 然后在  $I-x$  图中确定其状态点, 进而找出其它状态参数。

根据燃料燃烧计算, 若已知燃料的化学成分组成, 1kg 燃料燃烧后产生的水气量为  $\frac{9H^y + W^y}{100}$  kg, 由助燃空气带入的水气量为  $1.293aV_0x_0$ , 所以 1kg 燃料燃烧生成的烟气中含有的水气总量应为这两部分之和, 即:

$$m_w = \frac{9H^y + W^y}{100} + 1.293aV_0x_0 \quad (\text{kg/kg 燃料}) \quad (1-24)$$

1kg 燃料燃烧时, 所需干空气量为:  $m_a = 1.293aV_0$  kg。

1kg 燃料燃烧生成的总干烟气量应等于燃烧后所生成的总烟气量减去其中的灰分和生成的水气量。即:

用于生成干烟气的燃料量

$$m_f = 1 - \frac{A^y + 9H^y + W^y}{100} \quad (\text{kg/kg 燃料}) \quad (1-25)$$

因此, 1kg 燃料燃烧生成的总干烟气量则为  $m_a$  和  $m_f$  之和, 即:

$$m_a + m_f = 1.293aV_0 + 1 - \frac{A^y + 9H^y + W^y}{100} \quad (\text{kg/kg 燃料}) \quad (1-26)$$

式中  $a$  ——过剩空气系数;

$V_0$  ——理论空气量 ( $\text{Bm}^3/\text{kg 燃料}$ );

$A^y$ 、 $H^y$ 、 $W^y$  ——分别为应用基燃料中灰分、氢、水分的百分含量 (%)。

根据式 (1-7), 烟气的湿含量为:

$$x_f = \frac{1.293aV_0x_0 + \frac{9H^y + W^y}{100}}{1.293aV_0 + 1 - \frac{A^y + 9H^y + W^y}{100}} \quad (\text{kg/kg 干烟气}) \quad (1-27)$$

1kg 燃料燃烧所生成的烟气的热含量为:

$$I_f = \frac{q_1 + q_2 + q_3}{m_a + m_f} \quad (\text{kJ/kg 干烟气}) \quad (1-28)$$

式中  $q_1$  —— 1kg 燃料所带入的显热;

$q_2$  —— 1kg 燃料燃烧的生成热;

$q_3$  —— 1kg 燃料燃烧所需空气带入的显热。

根据燃料燃烧计算知,  $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$  应分别为:

$$q_1 = C_{st}t_f \quad (\text{kJ/kg 燃料}) \quad (1-29)$$

$$q_2 = Q_{DW} \eta \quad (\text{kJ/kg 燃料}) \quad (1-30)$$

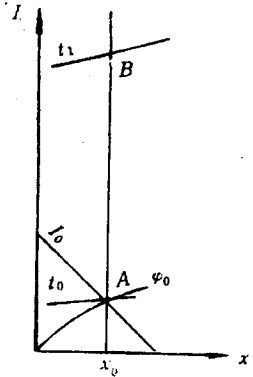


图 1-8 空气预热后的状态参数图解