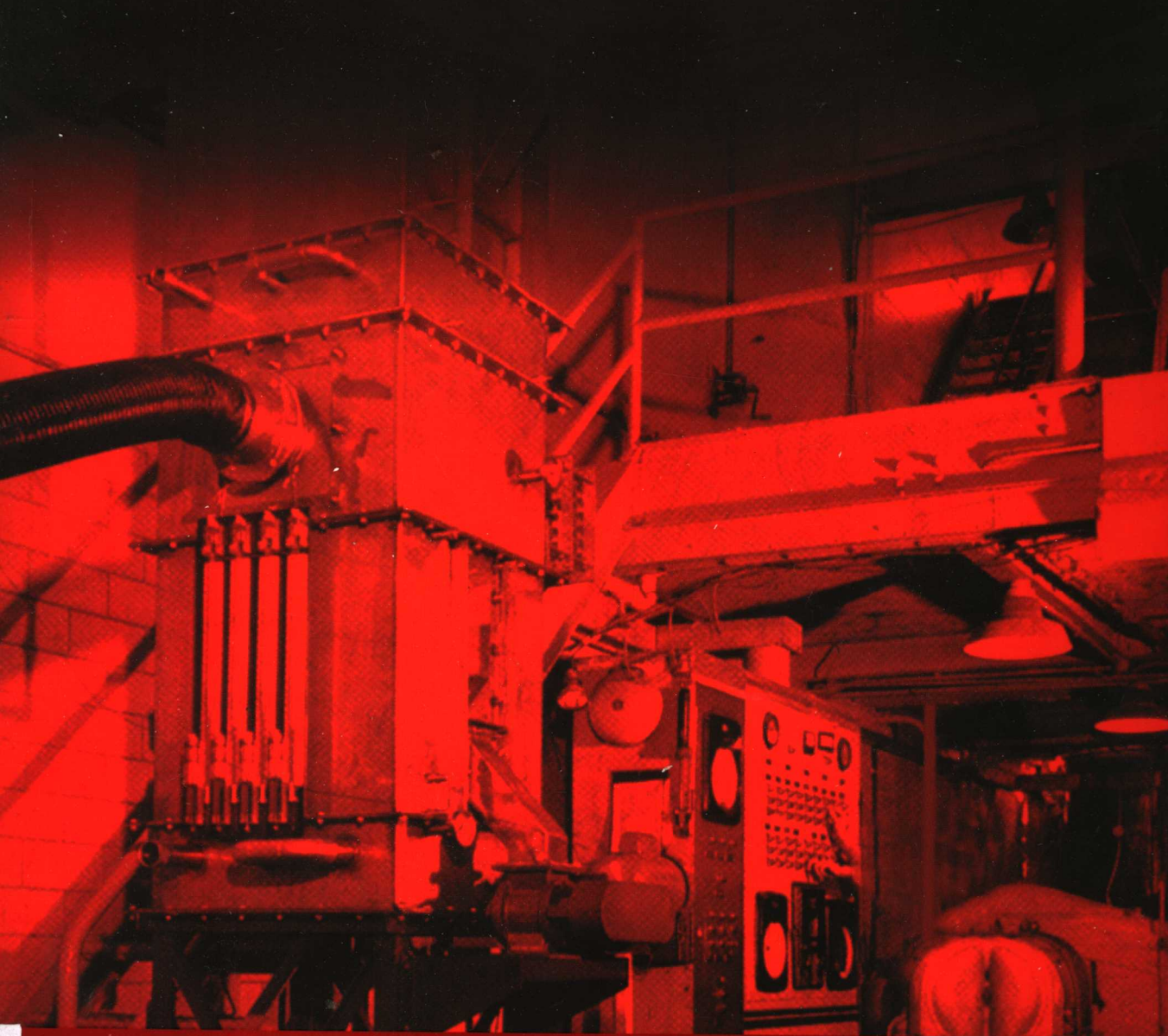


干燥装置设计手册

◎ 于才渊 王宝和 王喜忠 编著



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

干燥装置设计手册

于才渊 王宝和 王喜忠 编著



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

干燥装置设计手册/于才渊, 王宝和, 王喜忠编著.
北京: 化学工业出版社, 2005. 2
ISBN 7-5025-6520-5

I. 干… II. ①于…②王…③王… III. 干燥-化工设
备-设计-手册 IV. TQ051.802-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 143488 号

干燥装置设计手册

于才渊 王宝和 王喜忠 编著

责任编辑: 陈志良

文字编辑: 丁建华

责任校对: 郑捷

封面设计: 于兵

*

化学工业出版社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010)64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市昌平振南印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 22 字数 540 千字

2005 年 5 月第 1 版 2005 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6520-5/TQ·2142

定 价: 48.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

京化广临字 2005-01 号

前 言

由于化学及石油化学工业、食品工业、医药工业、生物制品、渔业、林业、陶瓷业、粮食储藏与加工等的迅速发展,促进了生产过程中的干燥装置需要量的骤增。现在,中国干燥装置的绝大多数是由自己制造的,因此,干燥工程技术人员迫切需要一本解决干燥装置的设计、制造、操作、研究及技术改造等方面问题的简明实用手册,为第一线的工程师提供方便,这就是编写该手册的目的。

该手册本着理论联系实际,实事求是,突出实用的原则,对设备结构、图表、公式及数据等资料进行反复核对,以提供可靠的技术数据,指出解决问题的途径;对于每个单元过程及设备,力争举一个计算例题,以加深理解和运用该书中介绍的结构与方法。

该手册的第1章、第7章、第8章及第12章由于才渊编写,第2章、第3章、第4章、第6章、第9章及第11章由王宝和编写,第5章及第10章由王喜忠编写。全手册由王喜忠统稿并最终定稿。

在本书编写过程中,得到干燥行业同仁与化学工业出版社的大力支持和鼓励,在此一并表示感谢。特别是江苏省常州市一步干燥设备厂、江苏省无锡市林洲干燥设备有限公司、上海远东制药机械总厂、辽宁省国能集团铁岭精工机器厂、甘肃省兰州瑞德干燥技术有限公司及哈尔滨东宇农业工程机械有限公司等提供了有关资料,谨于此致谢。

我们在编写过程中,深感知识与经验的不足,缺点和错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

大连理工大学 化工学院

于才渊

王宝和

王喜忠

2005年1月于大连

目 录

第 1 章 干燥过程的基本知识	1
1.1 湿空气的性质和湿度图	1
1.1.1 湿空气的基本性质	1
1.1.2 湿度图	5
1.1.3 I - H 图的用法	7
1.2 湿物料的性质	19
1.2.1 湿物料中湿分的分类	19
1.2.2 物料的湿含量表示法	21
1.3 干燥速率	22
1.4 干燥过程的基本算法及几种常见的干燥流程	23
1.4.1 干燥过程的物料衡算和热量衡算	23
1.4.2 干燥过程的图解计算	25
1.4.3 几种常见干燥过程的计算简介	27
1.5 干燥器的分类、选择与干燥器容积的估算	29
1.5.1 干燥器的分类	29
1.5.2 干燥器选择的原则	29
1.5.3 干燥器容积的估算	32
参考文献	35
第 2 章 厢式、洞道式及带式干燥器	36
2.1 厢式干燥器	36
2.1.1 平行流厢式干燥器	37
2.1.2 穿流厢式干燥器	38
2.2 洞道式干燥器	39
2.2.1 洞道式干燥器的分类及特点	39
2.2.2 设计计算	39
2.3 带式干燥器	41
2.3.1 平流带式干燥器	41
2.3.2 穿流带式干燥器	41
2.3.3 应用实例	42
2.3.4 企业标准	43
参考文献	43
第 3 章 气流干燥器	44
3.1 气流干燥的基本原理、特点及适用范围	44
3.1.1 气流干燥的基本原理	44

3.1.2	气流干燥的特点	44
3.1.3	气流干燥的适用范围	45
3.2	气流干燥器的类型	45
3.2.1	直管型气流干燥器	45
3.2.2	脉冲型气流干燥器	47
3.2.3	倒锥型气流干燥器	48
3.2.4	套管型气流干燥器	49
3.2.5	旋风型气流干燥器	49
3.2.6	带分散器型气流干燥器	50
3.2.7	带粉碎机型气流干燥器	51
3.2.8	部分干料返回型气流干燥器	52
3.2.9	闭路循环型气流干燥器	52
3.2.10	环型气流干燥器	53
3.2.11	旋流气流干燥器	57
3.2.12	文丘里气流干燥器	58
3.2.13	旋转快速干燥器	59
3.3	气流干燥器的设计	62
3.3.1	颗粒在气流干燥中的运动	62
3.3.2	颗粒在气流干燥器中的传热	64
3.3.3	直管型气流干燥器的设计	65
3.4	设计示例	67
3.4.1	物料衡算	67
3.4.2	热量衡算	67
3.4.3	气流干燥管直径 D 的计算	68
3.4.4	气流干燥管长度 Y 的计算	69
	参考文献	70
第4章	流态化干燥器	72
4.1	流态化干燥原理及特点	72
4.1.1	流态化干燥原理	72
4.1.2	流态化干燥特点	72
4.2	流态化干燥器类型	72
4.2.1	单层流化床干燥器	73
4.2.2	多层流化床干燥器	73
4.2.3	卧式多室流化床干燥器	78
4.2.4	振动流化床干燥器	79
4.2.5	喷动床干燥器	82
4.2.6	惰性粒子流化床干燥器	89
4.2.7	流化床喷雾造粒干燥器	91
4.2.8	离心流化床干燥器	96
4.3	流态化干燥器设计	97

4.3.1	常规流化床干燥器的设计	98
4.3.2	喷动床干燥器的设计	107
4.3.3	振动流化床干燥器的设计	113
4.3.4	惰性粒子流化床干燥器的设计	115
4.3.5	流化床喷雾造粒干燥器的设计	116
4.3.6	离心流化床干燥器的设计	117
4.4	设计示例	118
4.4.1	单层圆筒形(连续)流化床干燥器的设计	118
4.4.2	卧式多室流化床干燥器的设计	120
4.5	流化床喷雾造粒干燥机的企业标准	121
	参考文献	122
第5章	喷雾干燥器	124
5.1	喷雾干燥的流程布置和过程阶段	124
5.1.1	喷雾干燥的流程布置	124
5.1.2	喷雾干燥的过程阶段	129
5.1.3	喷雾干燥的优缺点	130
5.2	雾化器的结构和计算	130
5.2.1	气流式雾化器	131
5.2.2	压力式雾化器	146
5.2.3	旋转式雾化器	157
5.3	喷雾干燥塔的结构设计和尺寸估算	168
5.3.1	塔内空气-雾滴的流动方向	168
5.3.2	空气(热风)分布器	172
5.3.3	干燥塔锥形底出料和排气方式的组合	176
5.3.4	喷雾干燥操作中的粘壁问题	177
5.3.5	干燥塔直径和高度的估算	178
5.4	计算举例	182
5.4.1	计算举例之一	182
5.4.2	计算举例之二	192
5.4.3	计算举例之三	194
5.5	喷雾干燥的控制系统	198
5.5.1	控制系统 A	198
5.5.2	控制系统 B	199
5.5.3	控制系统 C	199
5.6	喷雾干燥技术在工业上的应用举例	201
5.6.1	典型产品的操作数据表	201
5.6.2	典型产品的喷雾干燥流程	206
5.6.3	喷雾干燥的产品目录	213
	参考文献	217
第6章	移动床干燥器	219

6.1 移动床干燥的工作原理及特点	219
6.1.1 工作原理	219
6.1.2 特点	219
6.2 移动床干燥器的类型	219
6.2.1 百叶窗式移动床干燥器	219
6.2.2 筛网柱式移动床干燥器	220
6.2.3 角状盒式移动床干燥器	222
6.2.4 聚酯切片移动床干燥器	223
6.3 移动床干燥器的设计	224
6.3.1 角状盒的设计原则	224
6.3.2 角状盒的结构形式及排列方式	225
6.3.3 角状盒数量的计算	227
6.3.4 角状盒移动床干燥器主要尺寸的确定	228
6.4 设计示例	228
6.4.1 物料衡算	228
6.4.2 热量衡算	228
6.4.3 角状盒的设计	230
6.4.4 干燥器主要结构尺寸的确定	231
6.5 企业标准	231
参考文献	231
第7章 转筒干燥器	232
7.1 转筒干燥器的工作原理	232
7.2 转筒干燥器的形式	233
7.2.1 间接加热转筒干燥器	233
7.2.2 直接加热转筒干燥器	233
7.3 转筒干燥的操作参数	235
7.3.1 填充率	235
7.3.2 传热	236
7.3.3 传动功率	237
7.3.4 物料在转筒干燥器中的停留时间	238
7.4 应用实例	238
7.5 计算举例	240
7.6 企业标准	244
参考文献	244
第8章 搅拌式干燥	245
8.1 桨叶式干燥器	245
8.1.1 分类及工作原理	245
8.1.2 应用实例	249
8.1.3 计算举例	250
8.1.4 企业标准	251

8.2 热风搅拌型干燥器	252
8.2.1 工作原理及特点	252
8.2.2 应用范围	253
8.2.3 计算举例	254
8.3 真空耙式干燥器	255
8.3.1 真空耙式干燥器的操作原理	255
8.3.2 真空耙式干燥器的特点及应用实例	256
8.3.3 真空耙式干燥器的企业标准	257
8.4 圆盘干燥器	258
8.4.1 圆盘干燥器的工作原理	258
8.4.2 圆盘干燥器的特点及应用实例	258
参考文献	259
第9章 转鼓干燥器	260
9.1 转鼓干燥器的工作原理及特点	260
9.1.1 工作原理	260
9.1.2 特点	261
9.2 转鼓干燥器的类型	262
9.2.1 单鼓干燥器	262
9.2.2 双鼓干燥器	263
9.2.3 对鼓干燥器	264
9.2.4 多鼓干燥器	265
9.2.5 带密封罩的转鼓干燥器	265
9.3 转鼓干燥器的设计	266
9.3.1 设计和操作参数	266
9.3.2 干燥器主要尺寸的确定	267
9.4 设计示例	268
9.4.1 物料衡算	268
9.4.2 热量衡算	268
9.4.3 干燥器主要尺寸的确定	268
9.5 企业标准	269
参考文献	269
第10章 双锥回转真空干燥机、真空冷冻干燥机及组合干燥技术	271
10.1 双锥回转真空干燥机	271
10.1.1 设备结构和流程	271
10.1.2 企业标准	272
10.2 真空冷冻干燥机	273
10.2.1 真空冷冻干燥的特点及其应用	273
10.2.2 真空冷冻干燥原理	273
10.2.3 真空冷冻干燥设备	276
10.2.4 真空冷冻干燥装置的企业标准	277

10.3 组合干燥技术·····	280
参考文献·····	286
第11章 干燥操作的安全、节能和干燥技术的未来发展趋势 ·····	287
11.1 干燥操作的安全问题·····	287
11.1.1 干燥系统的燃烧和爆炸特性·····	287
11.1.2 干燥操作的安全技术·····	291
11.1.3 干燥过程的安全管理问题·····	294
11.2 干燥过程的节能·····	294
11.2.1 干燥过程的能量消耗·····	294
11.2.2 干燥装置的能量利用率及干燥器的热效率·····	295
11.2.3 干燥操作的节能途径·····	297
11.2.4 干燥过程余热的回收·····	298
11.3 干燥技术的未来发展趋势·····	301
参考文献·····	301
第12章 干燥装置的附属设备 ·····	303
12.1 空气加热器·····	303
12.1.1 蒸汽加热器·····	303
12.1.2 燃油加热器·····	307
12.1.3 燃气加热器·····	308
12.1.4 电加热器·····	309
12.2 风机·····	310
12.2.1 风机在干燥系统中的布置方式·····	310
12.2.2 风机的选用方法·····	310
12.3 旋风分离器·····	312
12.3.1 旋风分离器的工作原理·····	312
12.3.2 旋风分离器的分类及特点·····	312
12.3.3 结构和操作条件对分离效率的影响·····	314
12.3.4 旋风分离器的压力降·····	315
12.4 袋滤器·····	317
12.4.1 袋滤器的结构与操作原理·····	317
12.4.2 滤袋材料·····	317
12.4.3 常用袋滤器的类型及适用范围·····	318
12.5 湿法除尘器·····	321
12.5.1 湿法除尘器的工作原理·····	321
12.5.2 湿法除尘器的类型及结构特点·····	321
12.6 粉体的排出装置·····	323
12.6.1 间歇排料阀·····	323
12.6.2 连续排料阀·····	324
12.6.3 涡旋气封·····	325
12.7 成品的气流输送系统·····	326

12.7.1 气流输送的导管尺寸的估算.....	327
12.7.2 气流输送系统在操作上存在的问题.....	328
12.8 干燥设备的清洗.....	328
参考文献.....	330
附录	331

第1章

干燥过程的基本知识^[1~3]

干燥操作是传热传质同时伴随发生的除湿过程。干燥所需的热量是由干燥介质通过对流、传导、热辐射及介电的方式传给被干燥物料的，使物料中的湿分获得热量后变成蒸汽从其中分离出来，最后得到湿含量较低的且达到某一规定要求的干燥产品。在干燥过程中，涉及到湿物料性质、干燥介质的性质、干燥速率以及基本干燥流程等概念，掌握这些基本知识，对于深入理解各种干燥过程的特点是必不可少的。特别值得提及的是，在对流干燥过程中，最常用的最廉价的干燥介质是空气，只有当除去的挥发分是有机溶剂时，才用氮气或其他惰性气体作为干燥介质，并采用密闭循环方式操作，而且，不管所用哪一种干燥介质，在干燥过程中的变化机理都是相同的。它既是热量的载体，同时又能将物料中挥发出来的湿分带出干燥器外。因此，本章在涉及干燥介质的有关内容时，主要介绍湿空气在干燥过程中的变化规律。对于其他干燥介质只给出湿度图，供设计时应用。

1.1 湿空气的性质和湿度图

1.1.1 湿空气的基本性质

含有水蒸气（水汽）的空气称为湿空气。表示空气中水汽含量多少有如下几种方法。

(1) 水蒸气分压 p_w 当总压 p 一定时，空气中水蒸气分压愈大，水汽含量就愈高。根据分压定律，水蒸气分压 p_w 与干空气分压 p_a 之比 $\frac{p_w}{p_a}$ 等于水汽分子数 n_w 与干空气分子数 n_a 之比，即

$$\frac{p_w}{p_a} = \frac{n_w}{n_a}$$

因总压 p 等于分压之和： $p = p_w + p_a$ ，或 $p_a = p - p_w$ ，故上式变为

$$\frac{p_w}{p - p_w} = \frac{n_w}{n_a} \quad (1-1)$$

(2) 空气的湿含量（简称湿度） H 在干燥过程中，由于物料中的水分蒸发到空气中去，湿空气的质量不断地增加，但是，其中干空气质量始终不变。因此，为了便于作物料衡算，空气的湿含量以每千克的干空气中含有若干千克的水蒸气计算（单位为 kg 水/kg 干空气，简写为 kg/kg），以 H 表示

$$H = \frac{n_w M_w}{n_a M_a}$$

代入式 (1-1), 得

$$H = \frac{p_w}{p - p_w} \times \frac{M_w}{M_a}$$

式中 M_w ——水蒸气相对分子质量, $M_w=18$;

M_a ——干空气平均相对分子质量, $M_a=29$ 。

将相对分子质量之值代入式中, 则

$$H = 0.622 \frac{p_w}{p - p_w} \quad (1-2)$$

(3) 空气的相对湿度 φ 在一定温度下, 含有最大水蒸气量的空气称为饱和空气。达到饱和的湿空气不能再容纳水汽, 也即在这一温度下的湿物料不能再向饱和空气中蒸发水分, 无法进一步干燥。

在一定温度下, 饱和空气中的水蒸气分压称为饱和蒸汽压 (以 p_s 表示), 可由实验测定之, 也可从手册中查得。在某一温度下空气中水蒸气分压 p_w 与同一温度下的饱和蒸汽压 p_s 之比称为相对湿度, 以 φ 表示

$$\varphi = \frac{p_w}{p_s} \quad (1-3)$$

当 $p_w = p_s$ 时, $\varphi = 1$ (或以百分比表示, 为 100%), 说明空气已经饱和。显然, φ 值比 1 愈小, 则空气离饱和愈远。温度愈高, 饱和蒸汽压 p_s 值也愈高。因此, 提高空气温度时, p_w 值不变而 p_s 值增大, 所以相对湿度 φ 就降低了, 空气的带水能力也提高了, 故通常总是用热空气作为干燥介质。

例 1-1 已知湿空气中水蒸气分压为 $p_w = 2338\text{Pa}$, 总压为 $p = 101325\text{Pa}$ 。求此湿空气在 20°C 时的相对湿度 φ 。若将此空气分别加热到 50°C 和 120°C , 各求其相对湿度是多少?

解 从饱和水蒸气表查得 20°C 时饱和水蒸气压, $p_s = 2338\text{Pa}$, 因此, 湿空气在 20°C 时的相对湿度为

$$\varphi_{20} = \frac{2338}{2338} = 1$$

由此说明湿空气已被水蒸气所饱和, 不能作为干燥介质。

当此湿空气加热到 50°C 时, 查表, $p_s = 12334\text{Pa}$, 因此得

$$\varphi_{50} = \frac{2338}{12334} = 0.19 \text{ 或 } 19\%$$

说明空气温度升高时, φ 减小, 又可作为干燥介质。

当温度升高到 100°C , 而总压仍为 101325Pa 时, 水就开始沸腾, 此时最大蒸汽压等于外界总压。如继续提高温度, 只能使气体过热, 这时蒸汽压仍为 101325Pa 。因此, 在 120°C 时

$$\varphi_{120} = \frac{2338}{101325} = 0.0231 \text{ 或 } 2.31\%$$

(4) 湿空气的焓 I

用空气来干燥湿物料时, 空气和物料之间不仅有水分的转移, 还有热量的交换。因此, 有必要知道空气的另一性质——焓。

湿空气的焓 I 等于干空气的焓 ($c_a t$) 与水蒸气的焓 (iH) 之和。以 1kg 干空气作为基准, 则湿空气的焓 I (单位为 kJ/kg 干空气, 简写为 kJ/kg) 为

$$I = c_a t + iH = 1.005t + iH$$

式中 c_a ——干空气比热容, $c_a = 1.005 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;

i ——在温度为 $t^\circ\text{C}$ 时水蒸气的焓, kJ/kg 。

若以 0°C 的水作为基准, 则在 $t^\circ\text{C}$ 时水蒸气的焓为

$$i = 2491 + 1.926t$$

式中 2491——水在 0°C 时的汽化潜热, kJ/kg ;

1.926——水蒸气的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

将此代入上式中, 则湿空气的焓为

$$\begin{aligned} I &= 1.005t + (2491 + 1.926t)H \\ &= (1.005 + 1.926H)t + 2491H \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中, $1.005 + 1.926H = c$, 称为湿空气的比热容, 或简称为湿比热容。

(5) 空气的绝热冷却过程和绝热饱和温度 图 1-1 所示为一空气增湿塔绝热冷却过程说明, 不饱和空气由塔底进入, 水从塔顶淋下, 气液两相在填料层中接触, 气体从塔顶排出, 水从塔底排出, 又送到塔顶使空气增湿。如果塔的保温很好, 则热量传递只在气液两相之间进行, 对周围环境是绝热的。与空气相接触的水的温度可能高于或低于空气温度, 最后所得结果是一致的。这里, 设以气温高于水温的情况进行分析。

若气温高于水温, 则由于两者之间的温度差, 空气将其显热传递给水, 而空气本身则不断冷却。与此同时, 一部分水接受空气显热而汽化, 热以潜热形式由水汽带回到不饱和的空气中。

起初, 气水之间温度差大, 空气供应的显热超过水分汽化所需的潜热, 于是水温将提高。随着水温升高、气温降低, 又使气液间的传热温度差变小了, 从而使得空气供应的显热也减少了。因此, 不断趋向于一种平衡状态, 这时空气供应的显热恰好等于水分汽化所需的潜热。在这种情况下, 由于水本身没有接受多余的显热, 所以水温将保持不变, 而达到稳定状态。此后空气继续供给显热使水汽化, 而空气本身沿塔高向上不断冷却和增湿, 这一过程称为空气的绝热冷却过程。假定增湿塔为无限高 (这是假定的极限情况), 则气液两相有足够的时间进行接触而达到平衡, 空气将增湿至饱和, 同时其温度将降低到与水温相等, 这一温度称为空气的绝热饱和温度 (或称绝热冷却极限温度)。

这里所讨论的绝热冷却过程, 只涉及到空气与水接触时所经历的过程。对于湿物料的干燥过程, 如果物料表面始终被水所润湿, 则其情况与空气-水接触的情况相同。这时, 物料表面的温度相当于上述情况的水温, 也即等于空气的绝热饱和温度。在物料干燥过程中, 到达稳定状态以前的不稳定阶段, 通常是很短促的, 一般不予以考虑。

通过热量衡算, 可以求得绝热饱和温度 t_s 与空气的其他有关参数之间的关系式。

在图 1-1 中, 进塔空气的湿含量、温度和湿比热容分别为 H_1 、 t_1 、 c_1 , 空气和水在塔中接触, 按绝热冷却过程而变化, 假定到塔顶排出的空气达到饱和状态, 则塔顶空气温度为绝热饱和温度 t_s , 并与塔中的水温相等, 与 t_s 相应的湿含量和湿比热容都是在饱和状态下的数值: H_s 、 c_s 。设取任一塔截面 (见图 1-1 中的虚线), 空气在此截面处的状态为 H 、 t 、 c 。取 1 kg 干空气作为基准, 以这一截面对塔顶作空气的热量衡算, 在稳定状态下, 空气释出

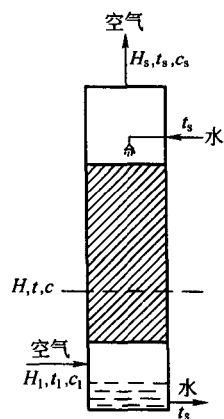


图 1-1 空气增湿塔绝热冷却过程说明

的显热等于水分汽化而带至空气中的潜热，由此得

$$c(t-t_s)=(H_s-H)r_s$$

式中 r_s ——在 t_s 时的汽化潜热，kJ/kg。

整理上式得

$$\frac{H_s-H}{t_s-t}=-\frac{c}{r_s} \quad (1-5)$$

式 (1-5) 表明，空气在绝热冷却过程中，其温度 t 和湿含量 H ，是沿着 (t, H) 和 (t_s, H_s) 两点之间的直线而变化的，此直线的斜率为 $-\frac{c}{r_s}$ 。

分析一下式 (1-5)，式中 6 个参数中，湿比热容 c 是近似不变的一个常数^①， H_s 和 r_s 不是独立变数，而是随绝热饱和温度 t_s 而变的。因此，其余的三个数值—— H 、 t 和 t_s 中，只要确定了其中两个数值，第三个数值也就被确定了。例如，测得空气的温度 t 和绝热饱和温度 t_s ，则由式 (1-5) 可以确定此空气的湿度 H 。进一步又由式 (1-2)、式 (1-3) 和式 (1-4) 还可以求得水蒸气分压 p_w 、相对湿度 φ 和焓 I 。

(6) 干球温度和湿球温度 在湿空气中用普通温度计所测得的温度称为干球温度。所谓“干球”温度是相对于下面要讨论的“湿球”温度而言的，通常只叫温度。

上面已经指出，只要测得了空气的干球温度 t 和绝热饱和温度 t_s ，就可以确定空气的湿含量 H ，但是绝热饱和温度不易测定。对于空气-水系统，实践和理论分析证明，可以用湿球温度来代替绝热饱和温度。

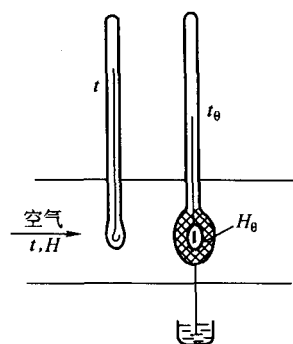


图 1-2 干、湿球温度计

将普通温度计的水银球包上湿纱布，纱布的一端浸入水杯中，以保持纱布经常处于润湿状态，这就是湿球温度计（见图 1-2）。将这种温度计放在气流中所测得的温度，就是湿球温度。与此同时，也在气流中放一支普通温度计，以测定空气的干球温度。测得空气的干、湿球温度后，也就确定了空气的湿含量，现讨论于下。

在湿纱布表面的空气温度 H_0 （即湿纱布温度下的饱和湿度）比空气主流中的湿度 H 大，于是表面水分汽化，并穿过纱布表面上的气膜向空气主流中扩散。水分汽化时要吸收热量，使纱布的温度下降，也即湿球温度计的指示下降，从而使气流与纱布之间产生温度差而引起热交换。湿纱布从空气取得热量供给水分汽化。当达到稳定状态时，空气传给湿纱布的显热等于水分汽化所需的潜热，这时湿球温度计的指示维持不变，这一温度称为湿球温度 t_0 。

空气向湿纱布中的水传递的显热为

$$q=\alpha F(t-t_0)$$

湿纱布中的水分汽化时所需的潜热为

$$q'=K_H F(H_0-H)r_0$$

式中 α ——空气与湿纱布之间的给热系数，kJ/(m²·h·℃)；

① 严格地说，湿比热容 c 并非不变的常数，而是随温度和湿度的变化而改变，但改变很小，故可认为绝热冷却线是直线。

K_H ——以湿含量差 ($H_\theta - H$) 为推动力的气相传质系数, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \Delta H)$;

F ——传热或传质面积, m^2 ;

t_θ ——湿球温度, $^\circ\text{C}$;

r_θ ——在 t_θ 时的汽化潜热, kJ/kg ;

H_θ ——在 t_θ 时的饱和湿含量, kg/kg ;

t 、 H ——空气的温度和湿含量。

在稳定情况下, 达到湿球温度时, $q=q'$, 即

$$\alpha F(t - t_\theta) = K_H F(H_\theta - H)r_\theta$$

整理此式得

$$\frac{H_\theta - H}{t_\theta - t} = -\frac{\alpha}{K_H r_\theta} \quad (1-6)$$

对空气-水系统, 当空气速度在 $3.8 \sim 10.2 \text{ m/s}$ 范围内, $\frac{\alpha}{K_H} \approx c$, 于是式 (1-6) 可写成

$$\frac{H_\theta - H}{t_\theta - t} = -\frac{c}{r_\theta} \quad (1-6a)$$

将式 (1-6a) 与式 (1-5) 相比较, 可以看出两式完全相似, 只要湿空气的性质 H 、 t 相同, 则湿球温度 t_θ 和绝热饱和温度 t_s 也相同。

必须指出, $t_\theta = t_s$ 只对空气-水系统才是正确的。对其他系统, 由于 $\frac{\alpha}{K_H} \neq c$, 因此 $t_\theta \neq t_s$,

通常湿球温度 t_θ 高于绝热饱和温度 t_s 。例如空气-甲苯系统: $\frac{\alpha}{K_H} = 1.8c$, t_θ 就比 t_s 高得多。

在绝热操作的干燥器中, 只要湿物料表面保持润湿 (干燥前期), 则在稳定情况下, 湿物料汽化所需热量等于空气传给湿物料的热量, 这时湿物料的表面温度就是湿球温度。对空气-水系统, 也就是绝热饱和温度。

(7) 露点 t_d 空气在其湿含量 H 不变的情况下, 冷却到饱和状态时的温度称为露点 (t_d)。空气冷却到露点以下就有水冷凝下来。根据前面的式 (1-2): $H = 0.622 \frac{p_w}{p - p_w}$, 在 H 不变的情况下将空气冷却到饱和, 则此时 $\varphi = 1$, 这时的水蒸气压力 p_w 即为露点时的饱和蒸汽压, 以 p_d 表示, 则由式 (1-2) 可得

$$p_d = \frac{H p}{0.622 + H} \quad (1-7)$$

如已知总压 p 和湿含量 H , 即可按式 (1-7) 求出 p_d 。然后, 查饱和水蒸气表, 与 p_d 相对应的温度就是露点 t_d 。

1.1.2 湿度图

按照上述公式可以计算出湿空气的各项性质。但是如果把空气的各项性质之间的关系做成图, 应用起来更为方便。目前常用的是 $I-H$ 图 (焓-湿图), 也有用 $t-H$ 图表示湿空气性质的。

现以图 1-3 来说明 $I-H$ 图的组成实际使用时, 若此图温度范围不够, 请参见图 1-5~图 1-7。

$I-H$ 图是斜角坐标系, 横轴表示空气的湿含量 H , 纵轴表示空气的焓 I (均按 1 kg 干空

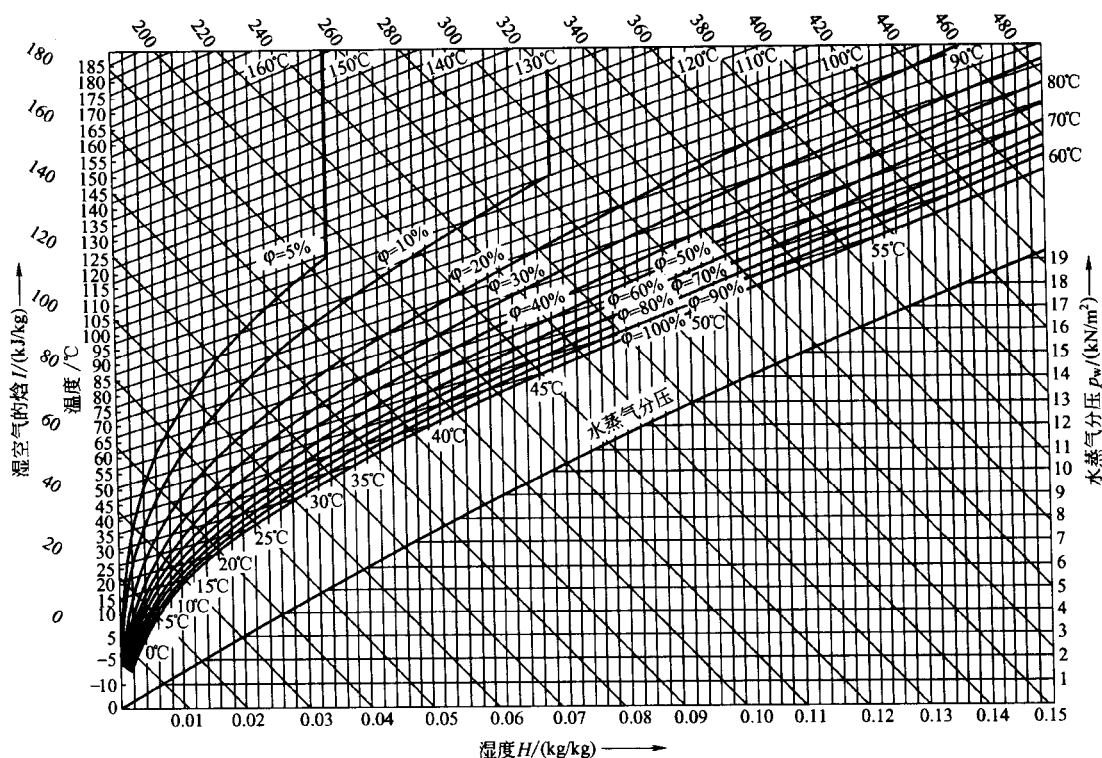


图 1-3 空气、水系统的焓-湿(度)图

(总压 100kPa)

气作为基准)。为了避免 $I-H$ 图中许多线条挤在一起而不便读出数据,故两轴不成正交,其间夹角取为 135° 。

$I-H$ 图包含六种线,说明如下。

(1) 等焓线(或等 I 线) 是平行于斜轴的若干直线,在每根线上 I 值相等,其单位为 kJ/kg 干空气。

(2) 等湿含量线(或等 H 线) 为了应用方便起见, H 的数值不在斜轴上,而另作一辅助水平轴,并在水平轴上标出 H 的读数。等 H 线都是与纵轴平行的直线。

(3) 等温线(或等 t 线, t 即干球温度) 是根据式 (1-4) 作出的。由该式可见,指定某一 t 值时, I 与 H 成直线关系,这是一系列向上倾斜的直线。

(4) 等相对湿度线(或等 φ 线) 等 φ 线在 $I-H$ 图上是一系列曲线。根据式 (1-2) 和式 (1-3),在某一 φ 值时,可由一系列 t 和 H 值作出。这一系列曲线中最下一根曲线是 $\varphi=1$ (或 100%) 的饱和湿空气线,即空气被水蒸气所饱和。此曲线以上的区域为不饱和湿空气的区域 ($\varphi<1$),在这个区域中的空气可以作为干燥介质。在 $\varphi=1$ 的饱和湿空气线下方的区域为过饱和区域,这时空气不仅完全为水蒸气所饱和,还含有未汽化的雾滴,因此不能用来干燥物料,过饱和区没有用处。

由 $I-H$ 图可见,等 φ 线在水的沸腾温度以上时是垂直向上的,表明水蒸气压等于外界大气压,湿含量 H 不再随温度提高而降低了,故等 φ 线垂直向上。仔细分析此垂直线略向左倾斜,这是因为湿空气并不与理想气体完全一致而造成的。

(5) 绝热冷却线 对空气-水系统,就是等湿球温度线。在 $I-H$ 图上一系列向下倾斜的