

张继宇 王文昌 2002

# 旋转闪蒸干燥与气流干燥技术手册

张继宇 王文昌 编著

东北大学出版社  
· 沈 阳 ·

# 前 言

20世纪80年代以来,随着工业的发展,干燥技术有了新的进展。对膏状、滤饼状和粉粒状物料的干燥,已研制出新机型,并得到广泛的应用,其中有丹麦的尼鲁公司和安海达诺公司(ANHYDRO)研制并投入生产的旋转闪蒸干燥机(Spin Flash Dryer)。这是早期翻译过来的名字,在我国多数都是用这个名称,其中“闪蒸”(Flash)在此的意思是湿分如闪电般的蒸发,即瞬间(快速)干燥。该机型的特点之一是物料在干燥机进行分散、粉碎、分级和瞬间完成干燥过程。气流干燥是物料在管式干燥器内完成干燥过程。

旋转闪蒸干燥技术进入我国后,得到了广泛的应用,目前已应用到有机化工、无机化工、染料、建材、矿业、医药、食品等诸多领域。20世纪80年代初国内仅有几台此种机型用于生产,目前我国生产运行的旋转闪蒸干燥机约有几千台。有关旋转闪蒸干燥技术书籍和资料,目前多是作为气流干燥中的一小部分来叙述,不适应生产技术发展的要求。经过20余年的生产运行和实验研究,我们总结出很多有益的试验数据、运行参数、工艺特性,并对其中的一些技术作了改进。基于这些,编写成《旋转闪蒸干燥与气流干燥技术手册》。

本书分为八章:1干燥基础、2闪蒸干燥机和气流干燥器、3送料装置、4供热装置、5除尘器、6管路、7风机、8典型物料闪蒸干燥系统。介绍了单机、系统的设计和配套选型等内容。单机设计包括主机,也包括配套的辅助设备;系统设计根据产品产量和物料特性选择主机型号以及配套的辅助设备。本书还通过例题介绍了单机设计、系统设计的计算方法和具体步骤,设计计算结果与生产测试参数相互对照,并进行了比较分析。其中介绍的典型实例,可作为干燥系统生产运行中进行操作的参考。旋转闪蒸干燥和气流干燥在主要参数计算,干燥系统的配套和设计上,基本一致,但它们的应用范围有所不同。本书是干燥膏状物料、滤饼状物料和粉粒状物料,以及设备选型、系统配套、系统安装和生产运行的技术指南。也可作为其他类型干燥的参考。

本书由张继宇、王文昌编著,参与编写人员还有汪毅、崔岩、关彦光、陶万生、乔森和程臣。书中引用了一些著作的文献资料,采用了沈阳科技机械工业技术研究所、辽宁东大粉体工程技术有限公司等许多生产单位的测试数据,在此对相关作者和科技人员深表谢意。

书中缺点、不足之处在所难免,欢迎批评指正。

编 者

2005年1月

# 目 录

<b>1 干燥基础</b> .....	<b>1</b>
1.1 物料的特性 .....	1
1.1.1 物料的状态 .....	1
1.1.2 物料的物理性质 .....	1
1.1.3 物料的化学性质 .....	1
1.2 混合气体的性质 .....	2
1.2.1 混合气体的总压与分压 .....	2
1.2.2 相对湿度 ( $\Phi$ ) .....	2
1.2.3 湿含量 ( $x$ ) .....	7
1.2.4 热含量 ( $I$ ) .....	9
1.2.5 露点 ( $t_d$ ) .....	10
1.2.6 湿比容 ( $\nu$ ) .....	11
1.2.7 烟气 .....	14
1.3 湿物料的性质 .....	14
1.3.1 湿分 .....	14
1.3.2 湿含量 ( $M$ ) .....	15
1.3.3 含固量 .....	15
1.3.4 湿分与物料的结合形式 .....	15
1.3.5 自由水分 .....	15
1.3.6 湿物料的吸湿平衡 .....	16
1.3.7 物料的分散度与粒径 .....	16
1.4 物料衡算 .....	17
1.4.1 去除的湿量 (水分) .....	17
1.4.2 送料量和绝干料质量 .....	18
1.5 热量计算 .....	18
1.5.1 热量衡式的计算方法 .....	18
1.5.2 按进出温度计算热量 .....	19
<b>2 闪蒸干燥机和气流干燥器</b> .....	<b>22</b>
2.1 气流干燥概述 .....	22
2.1.1 气流干燥的特点 .....	22
2.1.2 气流干燥装置的分类 .....	22
2.1.3 气流干燥系统的组成 .....	22
2.2 气流干燥器 .....	23

2.2.1	干燥器的结构形式	23
2.2.2	气流干燥器的干燥实例	25
2.2.3	气流干燥器的设计计算	27
2.3	精细干燥机	31
2.3.1	精细干燥机的机型	31
2.3.2	精细干燥机的应用实例和计算	33
2.4	旋转闪蒸干燥机的结构形式	36
2.4.1	结构形式的改进	36
2.4.2	SZ型闪蒸干燥机的结构特点	36
2.4.3	闪蒸干燥特点	38
2.5	闪蒸干燥机的选型	39
2.5.1	闪蒸干燥机的型号和参数	39
2.5.2	闪蒸干燥机选型和计算	39
2.5.3	闪蒸干燥实例	41
2.5.4	典型物料部分参数	43
3	送料装置	45
3.1	螺旋送料机	45
3.1.1	设计计算的已知条件	45
3.1.2	计算送料量	45
3.1.3	螺旋直径及螺旋转速	46
3.1.4	功率	47
3.2	滤饼状物料单螺杆送料机	47
3.3	双螺杆送料机	48
3.3.1	自清理功能	48
3.3.2	双螺杆送料机的结构形式	49
3.3.3	计算送料量	50
3.3.4	传动和驱动装置	50
3.4	星形加料器	51
3.4.1	星形加料器的结构形式	51
3.4.2	星形加料器的选型	54
3.4.3	星形加料器的设计计算	54
3.5	定量加料器	56
3.6	柱塞泵	56
4	供热装置	59
4.1	蒸汽换热器	59
4.1.1	SRZ型散热器	59
4.1.2	SRL型散热器	62
4.1.3	蒸汽换热器设计计算	64
4.2	电加热器	67

4.2.1	电热元件	67
4.2.2	电加热器设计	69
4.3	热风炉	74
4.3.1	燃料	74
4.3.2	燃烧计算	85
4.3.3	燃烧装置	96
4.3.4	燃烧室	103
4.3.5	燃烧室计算例题	107
4.3.6	热风炉的选择	114
5	除尘器	119
5.1	除尘器的类型和性能	119
5.2	扩散式旋风除尘器	120
5.3	长锥体旋风除尘器	125
5.4	袋式除尘器的滤料	127
5.4.1	典型机织滤料特性	127
5.4.2	典型针刺毡滤料特性	128
5.4.3	耐热抗腐蚀针刺毡滤料特性	130
5.4.4	典型高效滤料样品特性	132
5.4.5	防静电滤料及其特性	132
5.5	过滤筒	133
5.5.1	过滤筒用滤料	133
5.5.2	过滤筒除尘器特点	134
5.5.3	纸芯过滤筒样品特性参数	135
5.6	玻璃纤维过滤材料的选用	136
5.6.1	选用玻璃纤维过滤材料应注意的问题	136
5.6.2	玻璃纤维料应用实例	136
5.6.3	典型玻璃纤维滤料性能	137
5.7	袋式除尘器滤袋	139
5.7.1	滤袋的构成	139
5.7.2	滤袋的分类	140
5.7.3	滤袋的结构	141
5.7.4	滤袋的规格	141
5.7.5	滤袋尺寸偏差	142
5.7.6	与滤袋缝合在一起的配件	143
5.7.7	撑挂滤袋用配件	143
5.7.8	袋式除尘器滤袋专用配件	144
5.8	袋式除尘器清灰装置	144
5.8.1	脉冲阀	145
5.8.2	电磁阀	147
5.8.3	气动阀	148

5.8.4	电磁脉冲阀 .....	150
5.9	脉冲控制仪 .....	153
5.9.1	脉冲控制仪的功能 .....	153
5.9.2	气动脉冲控制仪 .....	153
5.9.3	电动脉冲控制仪 .....	154
5.9.4	其他清灰控制仪 .....	157
5.9.5	袋式除尘器控制柜 .....	157
5.10	典型袋式除尘器工作原理 .....	158
5.10.1	脉冲袋式除尘器 .....	158
5.10.2	机械回转反吹袋式除尘器 .....	159
5.10.3	反吹风袋式除尘器 .....	160
5.10.4	分室停风反吹袋式除尘器 .....	160
5.10.5	反吸(反吹)风电振袋式除尘器 .....	161
5.10.6	陶瓷微孔过滤式除尘器 .....	161
5.10.7	塑烧板除尘器 .....	161
5.11	脉冲袋式除尘器的结构设计和应用实例 .....	162
5.11.1	脉冲清灰装置 .....	162
5.11.2	气包 .....	164
5.11.3	孔板 .....	165
5.11.4	箱体、进出风口和灰斗 .....	166
5.11.5	分室低压脉冲袋式除尘器 .....	166
5.11.6	袋式除尘器的选型 .....	168
5.11.7	除尘设备选择实例 .....	168
<b>6</b>	<b>管 路 .....</b>	<b>171</b>
6.1	管 径 .....	171
6.2	管路中的阻力损失 .....	171
6.3	干燥机管路设计计算实例 .....	191
6.4	管路安装的误差补偿 .....	197
6.5	高温管路膨胀补偿 .....	199
<b>7</b>	<b>风 机 .....</b>	<b>205</b>
7.1	风机的分类和结构形式 .....	205
7.2	风机的性能和型号 .....	206
7.3	风机的选择 .....	212
7.4	风机的消声装置 .....	212
<b>8</b>	<b>典型物料闪蒸干燥系统 .....</b>	<b>224</b>
8.1	闪蒸 SZ145 干燥白炭黑 .....	224
8.2	闪蒸干燥 H 酸 .....	225
8.3	闪蒸 SZ65 干燥核黄素 .....	226
8.4	闪蒸干燥闭式系统 .....	227

---

附 录.....	228
附录 1 计算公式索引 .....	228
附录 2 表格索引 .....	233
附录 3 闪蒸干燥物料 .....	237
附录 4 辽宁东大粉体工程技术有限公司干燥系统与产品简介 .....	241
参考文献.....	242

# 1 干燥基础

干燥过程比较复杂，一方面它涉及到流体力学、热力学等诸多学科，另一方面干燥过程又取决于材料的物理和化学性质。而且同一种物料由于原料和制作工艺不同，其材料的物理和化学性质也有差异，这种差异影响着干燥过程。本章的内容侧重干燥基础理论的应用技术，并适用于气流干燥及其他干燥技术。

## 1.1 物料的特性

物料的干燥，一般首先用机械除湿法，除去物料中大量的非结合水，然后再用加热干燥法除去残余的水分(湿分)。加热干燥法简称干燥。物料的状态、材料的物理和化学性质与干燥过程以及干燥设备的选型密不可分。

### 1.1.1 物料的状态

- ① 溶液物料，如盐类的溶液。
- ② 膏糊状和滤饼状物料，如氧化铁红、氧化铁黄、D酸、H酸、超细碳酸钙、白炭黑等。
- ③ 泥浆状物料，如造纸厂的废液。
- ④ 粉粒状物料，如硫酸铵、高岭土、白糖等。
- ⑤ 块状和棒状等物料，如矿石、木材、木蓆草等。
- ⑥ 零件和设备的涂层、涂漆等。

其中②、③、④种适合选择气流干燥中的旋转闪蒸干燥机，第④种可选用管状干燥器的气流干燥。

### 1.1.2 物料的物理性质

- ① 物料的含水率或含固量。
- ② 物料的堆密度和真密度。
- ③ 物料的粒度和粒度分布、物料平均粒径和最小粒径等。
- ④ 物料的比热容、导热系数等。
- ⑤ 液状物料的浓度、黏度等。
- ⑥ 膏状和滤饼状物料的黏附性，温度和含湿量对黏附性的影响。
- ⑦ 膏状和滤饼状物料的触变性。在搅拌或振动的条件下，物料可以从塑性状态过渡到具有一定的流动性状态。例如，喷雾干燥白炭黑时，对白炭黑滤饼搅拌具有流动性。

### 1.1.3 物料的化学性质

- ① 物料的化学成分。
- ② 物料的热敏性。例如，软化点、熔点、分解点。



③ 物料的可燃性。例如，造纸厂废液中提取的木质素干燥时易燃。又如，MBS 添加剂干燥时在设备中停留时间较长会产生自燃。

④ 物料摩擦带电。例如，维生素 B<sub>2</sub> 在干燥时易产生静电，这样粉料易附在管壁上。

⑤ 物料的酸碱度，对设备的腐蚀。

⑥ 物料的毒性。在干燥中产生毒气等有害物质。

⑦ 物料的氧化、吸水等特性。

## 1.2 混合气体的性质

### 1.2.1 混合气体的总压与分压

在干燥过程的设计和计算中，把湿气体看作是干气体和湿分蒸汽的两种物质混合物，并且符合理想气体定律。

根据理想气体定律(Dalton 定律)，混合气体的总压(P)等于各组成部分的分压之和。

$$P = \sum P_i \tag{1-1}$$

式中 P<sub>i</sub>——各组成部分的分压。

混合气体为空气时，则有

$$P = P_j + P_g \tag{1-2}$$

式中 P<sub>g</sub>——干空气分压；

P<sub>j</sub>——水蒸气分压。

在理想混合气体中，分压比等于分子数之比

$$\frac{P_i}{P_g} = \frac{n}{n_g} \tag{1-3}$$

式中 n——液体蒸汽的分子数；

n<sub>g</sub>——绝干气体的分子数。

### 1.2.2 相对湿度(Φ)

液体与干气体接触时，液体就会逐渐地汽化到气体中去。湿气体中的液体蒸汽分压越大，表示湿气体含湿量越高，当湿气体中蒸汽的分压达到最大值时，两相处于动平衡状态，这时湿气体中蒸汽的分压近似地等于该液体在同温度下的饱和蒸汽压。所以液体的饱和蒸汽压反映了干气体能够容纳液体蒸汽的极限(最大值)。在干燥过程中，只有湿气体中蒸汽分压小于同温度下液体饱和蒸汽时，湿气体才能成为干燥介质，具有容纳湿分的能力。而且湿气体蒸汽分压与同温度下液体的饱和蒸汽压之差越大，容纳湿分的能力越大。为了直观地看出湿气体距离饱和有多远，把湿气体中蒸汽分压(P<sub>j</sub>)与同温度下液体饱和蒸汽压之比定义为湿气体的相对湿度(Φ)。

$$\Phi = \frac{P_j}{P_s} \tag{1-4}$$

式中 Φ——相对湿度；

P<sub>j</sub>——湿气体中蒸汽分压；

P<sub>s</sub>——液体饱和蒸汽压。

水在  $-40 \sim 100^{\circ}\text{C}$  时的饱和蒸汽压见表 1-1, 饱和水蒸气的饱和压力(温度在  $100 \sim 330^{\circ}\text{C}$ )见表 1-2。压力单位换算见表 1-3。对于绝干气体,  $\Phi = 0$ ; 对于饱和湿气体  $\Phi = 100\%$ 。中国各地区城市的室外相对湿度参见表 1-4。

表 1-1 水在  $-40 \sim 100^{\circ}\text{C}$  时的饱和蒸汽压<sup>[1]</sup>

温度 / $^{\circ}\text{C}$	压强		温度 / $^{\circ}\text{C}$	压强		温度 / $^{\circ}\text{C}$	压强		温度 / $^{\circ}\text{C}$	压强	
	Pa	/mm Hg		Pa	/mm Hg		Pa	/mm Hg		Pa	/mm Hg
-40	12.8	0.096	2	705.3	5.290	35	5623.5	42.18	68	28557.7	214.2
-38	16.1	0.121	3	758.6	5.690	36	5940.8	44.56	69	29824.2	223.7
-36	20.1	0.151	4	813.3	6.100	37	5275.5	47.07	70	31157.4	233.7
-34	24.9	0.187	5	871.9	6.540	38	6619.5	49.65	71	32517.3	243.9
-32	30.9	0.232	6	934.6	7.010	39	6991.4	52.44	72	36943.9	254.6
-30	38.4	0.288	7	1001.3	7.510	40	7375.4	55.32	73	35423.8	265.7
-28	47.1	0.353	8	1073.2	8.050	41	7778.0	58.34	74	36957.0	277.2
-26	57.2	0.429	9	1147.9	8.610	42	8199.3	61.50	75	38543.5	289.1
-24	70.1	0.526	10	1227.9	9.210	43	8639.3	64.80	76	40183.4	301.4
-22	85.8	0.644	11	1311.9	9.840	44	9100.6	68.26	77	41876.6	314.1
-21	94.4	0.708	12	1402.6	10.520	45	9583.2	71.88	78	43636.4	327.3
-20	102.9	0.772	13	1497.2	11.230	46	10085.8	75.65	79	45462.9	341.0
-19	113.3	0.850	14	1598.5	11.990	47	10612.5	79.60	80	47342.8	355.1
-18	124.6	0.935	15	1705.2	12.790	48	11160.4	83.71	81	49289.3	369.7
-17	136.9	1.027	16	1817.2	13.630	49	11735.0	88.02	82	51315.8	384.9
-16	150.4	1.128	17	1937.2	14.530	50	12333.7	92.51	83	53408.9	400.6
-15	165.0	1.238	18	2063.8	15.480	51	12958.9	97.20	84	55568.8	416.8
-14	180.9	1.357	19	2197.2	16.480	52	13612.2	102.1	85	57808.6	433.6
-13	198.1	1.486	20	2328.5	17.540	53	14292.2	107.2	86	60115.1	450.9
-12	216.9	1.627	21	2486.5	18.650	54	14998.8	112.5	87	62488.2	468.7
-11	237.3	1.780	22	2643.8	19.830	55	15732.0	118.0	88	64941.3	487.1
-10	259.4	1.946	23	2809.1	21.070	56	16505.3	123.8	89	67474.5	506.1
-9	283.3	2.125	24	2983.8	22.380	57	17305.2	129.8	90	70110.9	525.8
-8	309.4	2.321	25	3167.7	23.760	58	18145.2	136.1	91	72807.4	546.1
-7	377.6	2.532	26	3361.0	25.210	59	19011.8	142.6	92	75593.8	567.0
-6	368.1	2.761	27	3565.0	26.740	60	19918.4	149.4	93	78473.5	588.6
-5	401.0	3.008	28	3779.7	28.350	61	20851.6	156.4	94	81446.7	610.9
-4	436.8	3.276	29	4005.0	30.040	62	21838.2	163.8	95	84513.1	633.9
-3	475.4	3.566	30	4242.3	31.820	63	22851.5	171.4	96	87672.8	657.6
-2	517.2	3.879	31	4492.9	33.700	64	23904.7	179.3	97	90939.2	682.1
-1	562.1	4.216	32	4754.3	35.660	65	24998.0	187.5	98	94298.9	707.3
0	610.5	4.579	33	5030.3	37.730	66	26144.5	196.1	99	97752.0	733.2
1	657.3	4.930	34	5319.6	39.900	67	27331.1	205.0	100	101325	760.0

表 1-2 100~330℃ 时水蒸气饱和压力<sup>[4]</sup>

温度 <i>t</i> /℃	饱和压力 <i>P<sub>s</sub></i>		温度 <i>t</i> /℃	饱和压力 <i>P<sub>s</sub></i>	
	Pa	mm Hg		Pa	mm Hg
100	101325.0	760.0	220	2319606.6	17401.4
110	144044.0	1080.6	230	2797327.2	20985.2
120	198523.7	1489.3	240	3346923.1	25108.2
130	270105.8	2026.3	250	3977138.8	29836.0
140	361336.3	2710.7	260	4693812.9	35212.4
150	475961.0	3570.6	270	5505223.4	41299.5
160	618045.5	4636.5	280	6419501.4	48158.3
170	791895.3	5940.7	290	7445258.2	55853.4
180	1002522.6	7520.8	300	8591718.2	64454.0
190	1255006.2	9414.9	310	9868892.2	74035.2
200	1554664.6	11662.9	320	11288150.6	84682.3
210	1907576.3	14310.4	330	12860957.3	96481.3

表 1-3 压力单位换算<sup>[4]</sup>

SI 单位	非 SI 单位							
牛顿/米 <sup>2</sup> (N/m <sup>2</sup> ) 或帕斯卡 (Pa)	巴	公斤/厘米 <sup>2</sup> (kg/cm <sup>2</sup> ) 或工程大气压 (at)	磅/英寸 <sup>2</sup> (lb/in <sup>2</sup> )	大气压 (atm) (标准大气压)	毫米汞柱 (0℃) (mm Hg)	英寸汞柱 (0℃) (inHg)	毫米水柱 (15℃) (mm H <sub>2</sub> O)	英寸水柱 (15℃) (in H <sub>2</sub> O)
	1	10 <sup>-5</sup>	1.02 × 10 <sup>-5</sup>	1.45 × 10 <sup>-4</sup>	9.869 × 10 <sup>-6</sup>	7.501 × 10 <sup>-3</sup>	2.953 × 10 <sup>-4</sup>	0.1021
10 <sup>5</sup>	1	1.020	14.5	0.9869	750.1	29.53	1.021 × 10 <sup>4</sup>	401.8
9.807 × 10 <sup>4</sup>	0.9807	1	14.22	0.9678	735.6	28.96	1.001 × 10 <sup>4</sup>	394.1
6.895 × 10 <sup>3</sup>	6.895 × 10 <sup>-2</sup>	7.031 × 10 <sup>-2</sup>	1	6.805 × 10 <sup>-2</sup>	51.71	2.036	7.037 × 10 <sup>2</sup>	27.7
1.013 × 10 <sup>5</sup>	1.013	1.033	14.7	1	760	29.92	1.034 × 10 <sup>4</sup>	407.2
1.333 × 10 <sup>2</sup>	1.333 × 10 <sup>-3</sup>	1.36 × 10 <sup>-3</sup>	1.934 × 10 <sup>-2</sup>	1.316 × 10 <sup>-3</sup>	1	3.937 × 10 <sup>-2</sup>	13.61	0.5357
3.386 × 10 <sup>3</sup>	3.386 × 10 <sup>-2</sup>	3.453 × 10 <sup>-2</sup>	0.4912	3.342 × 10 <sup>-2</sup>	25.4	1	3.456 × 10 <sup>2</sup>	13.61
9.798	9.798 × 10 <sup>-5</sup>	9.991 × 10 <sup>-5</sup>	1.421 × 10 <sup>-3</sup>	9.67 × 10 <sup>-5</sup>	7.349 × 10 <sup>-2</sup>	2.893 × 10 <sup>-3</sup>	1	3.937 × 10 <sup>-2</sup>
2.489 × 10 <sup>2</sup>	2.489 × 10 <sup>-3</sup>	2.538 × 10 <sup>-3</sup>	3.609 × 10 <sup>-2</sup>	2.456 × 10 <sup>-3</sup>	1.867	7.349 × 10 <sup>-2</sup>	25.4	1

1 达因/厘米<sup>2</sup>(dyn/cm<sup>2</sup>) = 1 巴利(barye) = 1 微巴(μbar) = 10<sup>-3</sup>毫巴(mbar) = 10<sup>-6</sup>巴(bar)

1 毫米水柱(mm H<sub>2</sub>O)(4℃) = 1 公斤/米<sup>2</sup>(kg/m<sup>2</sup>)

1 毫米汞柱(mm Hg)(0℃) = 1 托(Torr)

1 磅达/英尺<sup>2</sup>(pdl/ft<sup>2</sup>) = 1.488 牛顿/米<sup>2</sup>(N/m<sup>2</sup>)

注：鉴于国内仪表设备和生产实际现状，本书将 SI 和非 SI 单位数据同时给出，建议首选 SI 单位。

表 1-4

中国主要城市室外气象条件<sup>[5]</sup>

序号	地 名	大气压力/kPa		年平均温度 /℃	室外相对湿度/%		平均
		冬	夏		最冷月平均(冬季)	最热月平均(夏季)	
1	北 京	102.04	99.86	11.4	45	78	57
2	密 云	101.80	99.69	10.8	42	77	52
3	天 津	102.66	100.48	12.2	53	78	63
4	塘 沽	102.66	100.47	12.0	62	79	72
5	承 德	98.00	96.28	8.9	46	72	57
6	唐 山	102.34	100.22	11.1	52	79	62
7	保 定	102.47	100.26	12.3	55	76	58
8	石 家 庄	101.60	90.56	12.9	52	75	62
9	张 家 口	93.9	92.4	8.2	(43)	(67)	55
10	太 原	93.29	91.92	9.5	51	71	61
11	运 城	98.21	96.28	13.6	57	69	62
12	海 拉 尔	94.72	93.55	-2.1	78	71	68
13	锡林浩特	96.57	89.56	1.7	71	62	60
14	通 辽	100.58	98.43	6.0	56	73	60
15	呼 和 浩 特	90.09	88.94	5.8	56	64	56
16	磴 口				49	55	50
17	赤 峰	95.6	94.1		40	66	50
18	开 原	101.30	99.43	6.5	66	80	60
19	抚 顺	101.06	99.24	6.6	69	80	60
20	沈 阳	102.08	100.07	7.8	64	78	66
21	朝 阳	100.46	98.57	8.4	44	73	60
22	本 溪	100.32	98.55	7.8	65	75	60
23	大 连	101.38	99.47	10.2	58	83	67
24	旅 顺			10.2			69
25	鞍 山	101.7	99.7	8.4	(61)	(76)	63
26	锦 州	102.0	99.9	9.0	47	81	65
27	营 口	102.7	100.5	8.6	61	79	65
28	丹 东	102.4	100.4	8.5	57	89	65
29	长 春	99.40	97.79	4.9	68	78	67
30	四 平	100.41	98.63	5.9	68	78	67
31	延 吉	100.03	98.65	5.0	60	80	65
32	通 化	97.45	96.07	4.9	72	80	68
33	伊 春	99.20	97.86	0.4	75	78	68
34	齐 齐 哈 尔	100.46	98.77	3.2	71	73	64
35	佳 木 斯	101.10	99.60	2.9	71	78	68
36	哈 尔 滨	100.15	98.51	3.6	74	77	70
37	牡 丹 江	99.21	97.85	3.5	71	76	68
38	蒙 自	87.1	86.5		70	66	68
39	嫩 江	99.3	97.9		73	79	68
40	博 克 图	92.9	92.1		70	80	68
41	海 伦	99.2	97.7		73	67	68
42	鸡 西	99.5	98.0		(64)	(59)	68
43	上 海	102.51	100.52	15.7	75	83	80
44	徐 州	102.18	100.07	14.2	64	81	71
45	南 京	102.25	100.40	15.3	73	81	77
46	芜 湖	102.4	100.3	16.0	(77)	(80)	78
47	杭 州	102.00	100.05	16.2	77	80	82
48	温 州	102.35	100.15	17.9	75	84	85

续表 1-4

序号	地 名	大气压力/kPa		年平均温度 /℃	室外相对湿度/%		
		冬	夏		最冷月平均(冬季)	最热月平均(夏季)	平均
49	定海				67	87	
50	衢县				76	76	
51	亳县	102.45	99.93	14.5	67	80	
52	蚌埠	102.41	100.23	15.1	71	80	
53	合肥	102.23	100.09	15.7	75	81	
54	安庆	102.37	100.29	16.5	74	79	
55	景德镇	101.76	99.82	17.0	76	79	
56	南昌	101.08	99.91	17.5	74	75	80
57	吉安	101.52	99.62	18.3	78	73	
58	赣州	100.38	99.09	19.4	75	70	
59	九江	102.2	100.1	17.0	(75)	(76)	79
60	淄博	102.26	100.10	12.9	60	76	
61	潍坊	102.07	99.97	12.3	61	81	
62	济南	102.02	98.85	14.2	54	73	57
63	青岛	101.69	99.72	12.2	64	85	73
64	菏泽	102.06	99.89	13.6	67	79	
65	开封	101.8	99.6	14.7	(64)	(79)	72
66	郑州	101.28	99.17	14.2	60	76	
67	洛阳	101.88	98.76	14.6	57	75	
68	驻马店	101.66	99.51	14.8	65	81	
69	信阳	101.25	99.09	15.1	74	80	
70	卢氏				61	73	
71	武汉	102.33	100.17	16.3	76	79	72
72	黄石	102.20	100.20	17.0	77	78	
73	岳阳	101.6	99.8	16.7	(77)	(75)	83
74	光化				69	78	
75	宜昌	101.5	99.3	16.7	72	80	79
76	衡阳	101.2	99.3	17.6	(80)	(71)	80
77	常德	102.15	100.02	16.7	79	75	
78	长沙	101.99	99.09	17.2	81	75	77
79	芷江	99.24	97.43	16.5	79	79	
80	零陵	100.39	98.52	17.8	79	72	
81	拉萨	65.00	66.23	7.5	28	54	
82	林芝	70.59	70.54	8.5	49	76	
83	日喀则	65.10	63.83	6.3	27	53	
84	昌都		68.1	7.4	34	67	54
85	延安	91.33	90.02	9.4	54	72	
86	西安	97.87	95.92	13.3	67	76	68
87	汉中	96.41	94.74	14.3	77	81	
88	榆林	90.2	89.0	8.1	57	63	
89	略阳				62	79	
90	敦煌	89.33	87.96	9.3	50	43	
91	酒泉	85.60	84.70	7.3	55	52	43
92	兰州	85.14	84.31	9.1	58	61	58
93	武都	89.69	88.58	14.5	56	67	81
94	山丹				58	51	
95	平凉				51	74	
96	天水	89.2	88.3	11.3	61	74	60

续表 1-4

序号	地 名	大气压力/kPa		年平均温度 /℃	室外相对湿度/%		
		冬	夏		最冷月平均(冬季)	最热月平均(夏季)	平均
97	西 宁	77.51	77.35	5.7	48	65	59
98	格 尔 木	72.35	72.40	4.2	41	36	
99	玛 多	60.33	61.08	-4.1	56	68	
100	银 川	89.57	88.35	8.5	58	64	
101	盐 池	86.92	85.95	7.7	50	57	
102	共 和				38	63	
103	伊 宁	94.71	98.35	8.4	78	58	67
104	乌 鲁 木 齐	91.99	90.67	5.7	80	44	62
105	吐 鲁 番	102.84	99.77	13.9	59	31	
106	哈 密	93.97	92.11	9.8	63	34	40
107	喀 什	87.69	86.50	11.7	67	40	
108	和 田	86.71	85.65	12.2	53	40	46
109	福 州	102.2	99.6	19.8	72	77	81
110	永 安				77	75	
111	厦 门	101.4	99.5	21.6	(73)	(81)	79
112	桂 林	100.3	98.5	19.2	68	79	77
113	百 色				73	80	
114	梧 州		99.1	21.5	72	81	76
115	南 宁	100.8	99.3	22.1	72	81	78
116	韶 关	101.4	99.7	20.3	70	75	
117	汕 头	101.9	100.5	21.5	78	84	83
118	广 州	101.9	100.4	21.9	68	84	78
119	阳 江				73	85	
120	海 口	101.5	100.1	24.3	84	83	85
121	甘 孜	67.1	67.5		39	73	
122	南 充				30	77	
123	成 都	96.3	94.7	17.0	80	86	81
124	宜 宾	98.5	96.9		82	83	
125	西 昌	88.3	83.5		52	76	
126	重 庆	99.1	97.2	18.6	81	76	83
127	遵 义	92.3	91.1		81	78	
128	峨 嵋 山		70.3	16.6			82
129	毕 节				85	78	
130	贵 阳	89.7	88.8		76	78	
131	兴 仁				81	84	
132	昆 明	81.1	80.8		69	65	
133	恩 施				83	79	
134	台 北			21.7			82
135	台 中			22.3			81

1.2.3 湿含量(x)

在干燥过程中，绝干气体的质量是不变的。湿含量(x)是湿气体中单位质量的绝干气体所含液体蒸汽的质量。

$$x = \frac{n \cdot M_h}{n_g \cdot M_g} \quad (1-5)$$

将式(1-2)、式(1-3)和式(1-4)代入式(1-5), 则有

$$x = \frac{P_i \cdot M_h}{P_g \cdot M_g} = \frac{M_h}{M_g} \cdot \frac{\Phi \cdot P_s}{P - \Phi \cdot P_s} \quad (1-6)$$

式中  $M_h$ ——液体蒸汽的相对分子质量;

$M_g$ ——绝干气体的相对分子质量;

$x$ ——湿含量, kg 湿分/kg 干气体。

湿气体为空气时,  $P = 101300\text{Pa}$ , 水蒸气相对分子质量  $M_h = 18$ , 干空气相对分子质量  $M_g = 29$ , 各参数代入式(1-6)后得

$$x = 0.622 \cdot \frac{\Phi \cdot P_s}{101300 - \Phi \cdot P_s} \quad (1-7)$$

例 1-1 沈阳地区空气温度  $t = 20^\circ\text{C}$  时, 空气的湿含量是多少?

解 沈阳地区空气的相对湿度由表 1-4 查得较小值为 64%, 较大值为 78%, 计算中取平均值为 71%。空气温度  $t_0 = 20^\circ\text{C}$  时, 由表 1-1 查得饱和压力  $P_s = 2328.5\text{Pa}$ , 将各值代入式(1-7)得

$$x = 0.622 \cdot \frac{\Phi \cdot P_s}{101300 - \Phi \cdot P_s} = 0.622 \cdot \frac{0.71 \times 2328.5}{101300 - 0.71 \times 2328.5} = 0.0103$$

按式(1-7)和表 1-1 计算出空气温度为  $-10 \sim 40^\circ\text{C}$  时的空气湿含量如表 1-5。

表 1-5 空气  $-10 \sim 40^\circ\text{C}$  时的湿含量  $x_0$  kg 水分/kg 干空气

温度 $t_0$ / $^\circ\text{C}$	相对湿度 $\Phi_0/\%$											
	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
-10	0.0005	0.0006	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009	0.0010	0.0010	0.0011	0.0012	0.0013	0.0014
-9	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009	0.0010	0.0010	0.0011	0.0012	0.0013	0.0014	0.0015
-8	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009	0.0010	0.0010	0.0011	0.0012	0.0013	0.0014	0.0015	0.0016
-7	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009	0.0010	0.0011	0.0012	0.0013	0.0015	0.0016	0.0017	0.0018
-6	0.0007	0.0008	0.0009	0.0010	0.0011	0.0012	0.0014	0.0015	0.0016	0.0017	0.0018	0.0019
-5	0.0007	0.0009	0.0010	0.0011	0.0012	0.0014	0.0015	0.0016	0.0017	0.0019	0.0020	0.0021
-4	0.0008	0.0009	0.0011	0.0012	0.0013	0.0015	0.0016	0.0017	0.0019	0.0020	0.0022	0.0023
-3	0.0009	0.0010	0.0012	0.0013	0.0015	0.0016	0.0018	0.0019	0.0020	0.0022	0.0023	0.0025
-2	0.0010	0.0011	0.0013	0.0014	0.0016	0.0018	0.0019	0.0021	0.0022	0.0024	0.0026	0.0027
-1	0.0010	0.0012	0.0014	0.0016	0.0017	0.0019	0.0021	0.0023	0.0024	0.0026	0.0028	0.0029
0	0.0011	0.0013	0.0015	0.0017	0.0019	0.0021	0.0023	0.0024	0.0026	0.0028	0.0030	0.0032
1	0.0012	0.0014	0.0016	0.0018	0.0020	0.0022	0.0024	0.0026	0.0028	0.0030	0.0032	0.0034
2	0.0013	0.0015	0.0017	0.0020	0.0022	0.0024	0.0026	0.0028	0.0030	0.0033	0.0035	0.0037
3	0.0014	0.0016	0.0019	0.0021	0.0023	0.0026	0.0028	0.0030	0.0033	0.0035	0.0037	0.0040
4	0.0015	0.0018	0.0020	0.0023	0.0025	0.0028	0.0030	0.0033	0.0035	0.0038	0.0040	0.0043
5	0.0016	0.0019	0.0021	0.0024	0.0027	0.0030	0.0032	0.0035	0.0038	0.0040	0.0043	0.0046
6	0.0017	0.0020	0.0023	0.0026	0.0029	0.0032	0.0035	0.0038	0.0040	0.0043	0.0046	0.0049
7	0.0018	0.0022	0.0025	0.0028	0.0031	0.0034	0.0037	0.0040	0.0043	0.0046	0.0050	0.0053
8	0.0020	0.0023	0.0026	0.0030	0.0033	0.0036	0.0040	0.0043	0.0046	0.0050	0.0053	0.0057

续表 1-5

温度 $t_0$ /°C	相对湿度 $\Phi_0/\%$											
	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
9	0.0021	0.0025	0.0028	0.0032	0.0035	0.0039	0.0043	0.0046	0.0050	0.0053	0.0057	0.0060
10	0.0023	0.0026	0.0030	0.0034	0.0038	0.0042	0.0046	0.0049	0.0053	0.0057	0.0061	0.0065
11	0.0024	0.0028	0.0032	0.0036	0.0041	0.0045	0.0049	0.0053	0.0057	0.0061	0.0065	0.0069
12	0.0026	0.0030	0.0035	0.0039	0.0043	0.0047	0.0052	0.0056	0.0061	0.0065	0.0070	0.0074
13	0.0028	0.0032	0.0037	0.0042	0.0046	0.0051	0.0056	0.0060	0.0065	0.0070	0.0074	0.0079
14	0.0030	0.0035	0.0040	0.0044	0.0049	0.0054	0.0059	0.0064	0.0069	0.0074	0.0080	0.0085
15	0.0032	0.0037	0.0042	0.0047	0.0053	0.0058	0.0063	0.0069	0.0074	0.0080	0.0085	0.0090
16	0.0034	0.0039	0.0045	0.0051	0.0056	0.0062	0.0067	0.0073	0.0079	0.0085	0.0091	0.0096
17	0.0036	0.0042	0.0048	0.0054	0.0060	0.0066	0.0072	0.0078	0.0084	0.0090	0.0097	0.0103
18	0.0038	0.0045	0.0051	0.0058	0.0064	0.0070	0.0077	0.0083	0.0090	0.0096	0.0103	0.0110
19	0.0041	0.0048	0.0054	0.0061	0.0068	0.0075	0.0082	0.0089	0.0096	0.0103	0.0110	0.0117
20	0.0043	0.0051	0.0058	0.0065	0.0073	0.0080	0.0087	0.0095	0.0102	0.0110	0.0117	0.0124
21	0.0046	0.0054	0.0062	0.0069	0.0077	0.0085	0.0093	0.0101	0.0109	0.0117	0.0125	0.0133
22	0.0049	0.0057	0.0066	0.0074	0.0082	0.0091	0.0099	0.0107	0.0116	0.0124	0.0133	0.0141
23	0.0052	0.0061	0.0070	0.0079	0.0087	0.0096	0.0105	0.0114	0.0123	0.0132	0.0141	0.0150
24	0.0055	0.0065	0.0074	0.0084	0.0093	0.0102	0.0112	0.0121	0.0131	0.0140	0.0150	0.0160
25	0.0059	0.0069	0.0079	0.0089	0.0099	0.0109	0.0119	0.0129	0.0139	0.0149	0.0160	0.0170
26	0.0063	0.0073	0.0084	0.0094	0.0105	0.0116	0.0126	0.0137	0.0148	0.0159	0.0170	0.0180
27	0.0066	0.0078	0.0089	0.0100	0.0111	0.0123	0.0134	0.0146	0.0157	0.0169	0.0180	0.0192
28	0.0070	0.0082	0.0094	0.0106	0.0118	0.0130	0.0142	0.0155	0.0167	0.0179	0.0191	0.0204
29	0.0075	0.0087	0.0100	0.0113	0.0125	0.0138	0.0151	0.0164	0.0177	0.0190	0.0203	0.0216
30	0.0079	0.0093	0.0106	0.0119	0.0133	0.0147	0.0156	0.0174	0.0188	0.0202	0.0216	0.0230
31	0.0084	0.0098	0.0112	0.0127	0.0141	0.0155	0.0165	0.0185	0.0199	0.0214	0.0229	0.0244
32	0.0089	0.0104	0.0119	0.0134	0.0149	0.0165	0.0175	0.0196	0.0211	0.0227	0.0243	0.0258
33	0.0094	0.0110	0.0126	0.0142	0.0158	0.0175	0.0191	0.0207	0.0224	0.0241	0.0257	0.0274
34	0.0100	0.0116	0.0133	0.0151	0.0168	0.0185	0.0202	0.0220	0.0237	0.0255	0.0273	0.0291
35	0.0105	0.0123	0.0141	0.0159	0.0178	0.0196	0.0214	0.0233	0.0251	0.0270	0.0289	0.0308
36	0.0111	0.0130	0.0149	0.0169	0.0188	0.0207	0.0227	0.0246	0.0266	0.0286	0.0306	0.0326
37	0.0118	0.0138	0.0158	0.0178	0.0199	0.0219	0.0240	0.0261	0.0282	0.0303	0.0324	0.0346
38	0.0124	0.0146	0.0167	0.0188	0.0210	0.0232	0.0254	0.0276	0.0298	0.0320	0.0343	0.0366
39	0.0131	0.0154	0.0177	0.0199	0.0222	0.0245	0.0269	0.0292	0.0316	0.0339	0.0363	0.0388
40	0.0139	0.0163	0.0187	0.0211	0.0235	0.0259	0.0284	0.0309	0.0334	0.0359	0.0385	0.0410

1.2.4 热含量( $I$ )

含有 1kg 绝干气体的湿气体所具有的热含量叫做湿气体的热含量。若以 1kg 的绝干气体为基准, 则湿气体的质量为  $(1+x)$ kg, 其热含量( $I$ )的计算式为



$$I = (c_g + c_v \cdot x)t + \gamma_0 \cdot x \quad (1-8)$$

式中  $c_g$ ——干气体的比热容, kcal/(kg·°C);

$c_v$ ——湿蒸汽的比热容, kcal/(kg·°C);

$t$ ——湿气体温度, °C;

$\gamma_0$ ——在  $t$ °C 时, 湿分蒸汽的汽化潜热, kcal/kg;

$I$ ——热含量, kcal/kg 干气体。

对于空气和水的混合气体, 查得各值代入式(1-8)后简化为

$$I = (0.24 + 0.46x)t + 595x \quad (1-9)$$

从式中看到湿气体的温度越高, 则湿气体的含热量越大。

**例 1-2** 沈阳空气温度  $t_0 = 20^\circ\text{C}$  时的热含量( $I_0$ )是多少? 在换热器将其加热到  $t_1 = 140^\circ\text{C}$  时的热含量( $I_1$ )是多少?

**解** 从例 1-1 得到  $t_0 = 20^\circ\text{C}$  时的湿含量  $x = 0.0103$  (kg 水分/kg 干空气), 将各值代入式(1-9)得

$$\begin{aligned} I_0 &= (0.24 + 0.46x)t_0 + 595x = (0.24 + 0.46 \times 0.0103) \times 20 + 595 \times 0.0103 \\ &= 4.894 + 6.069 = 10.963 \text{ kcal/kg 干空气} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_1 &= (0.24 + 0.46x)t_1 + 595x = (0.24 + 0.46 \times 0.0103) \times 140 + 595 \times 0.0103 \\ &= 34.263 + 6.069 = 40.332 \text{ kcal/kg 干空气} \end{aligned}$$

### 1.2.5 露点( $t_d$ )

若湿气体的总压  $P$  不变, 则湿分蒸汽压  $P_i$  也不变, 随着湿度  $t$  的下降, 饱和蒸汽压  $P_s$  则会降低, 这时相对湿度  $\Phi$  将逐渐增大。当  $\Phi = 100\%$  时, 湿气体达到饱和状态。此后若再降低温度时, 湿气体中的蒸汽将立即冷凝析出, 使湿气体中湿含量  $x$  减少。这种在总压和湿含量不变的条件下, 将湿气体冷却而达到饱和时的温度叫露点。也就是湿气体的相对湿度  $\Phi = 100\%$  时的温度  $t_0$  为露点。

当湿气体为空气时,  $\Phi = 100\%$  代入式(1-7)得

$$x = 0.622 \cdot \frac{P_s}{101300 - P_s}$$

或

$$P_s = \frac{101300x}{0.622 + x} \quad (1-10)$$

在干燥过程中, 干燥介质气体的温度不能低于露点。在干燥系统设计中, 排出气体的温度应比露点高  $15^\circ\text{C}$  或  $15^\circ\text{C}$  以上。

**例 1-3** 当露点温度  $t_d = -20^\circ\text{C}$  时, 求空气的湿含量  $x$ ; 当湿含量  $x = 0.0117$  时, 求空气的露点温度  $t_d$ 。

**解** 求空气湿含量( $x$ ), 当  $t_d = -20^\circ\text{C}$  时, 由表 1-1 查得  $P_s = 102.9\text{Pa}$ , 将各值代入式(1-10)得

$$x = 0.622 \cdot \frac{P_s}{101300 - P_s} = 0.622 \cdot \frac{102.9}{101300 - 102.9} = 0.00063 \text{ kg 水分/kg 干空气}$$

求空气的露点温度( $t_d$ )。将  $x = 0.0117$  值代入式(1-10)得

$$P_s = \frac{101300x}{0.622 + x} = \frac{101300 \times 0.0117}{0.622 + 0.0117} = 1870.3 \text{ Pa}$$