

第 17 篇 干 燥

主稿、编写人 王喜忠 大连理工大学化工学院 教授

符号说明	17-1	2.3	按照物料进入干燥器的形状进行干燥器分类	17-24
1 干燥的基本概念	17-2	2.4	按照附加特征的适应性进行干燥器的分类	17-25
1.1 物料干燥的目的	17-2	2.5	干燥器选择的原则	17-25
1.2 去湿方法	17-2	2.6	干燥器容积的估算	17-25
1.3 干燥操作的流程	17-2	3 干燥器设计	17-27	
1.4 物料内所含水分的种类	17-3	3.1	对流传热型干燥器	17-27
1.5 干燥速率和干燥阶段	17-5	3.2	传导传热型干燥器	17-72
1.6 物料内水分移动的机理	17-6	3.3	红外线干燥	17-85
1.7 湿空气性质及湿度图	17-8	3.4	微波干燥	17-87
1.8 干燥过程的基本计算	17-8	4 两级干燥	17-88	
1.9 特殊干燥过程的计算简介	17-21	5 干燥操作的节能	17-89	
2 干燥器的分类、选择与干燥器容积的估算	17-22	6 干燥器的发展趋势	17-91	
2.1 干燥器分类的目的	17-22	一般参考文献	17-91	
2.2 按操作方法和热量供给方法进行干燥器分类	17-24	参考文献	17-91	

符 号 说 明

A	面积,	m^2	G_1	湿物料量	kg/h
A_0	喷嘴孔截面积	m^2	G_2	干燥后物料量	kg/h
A_s	振幅	m	G_c	绝干物料量	kg/h
a	比表面积	m^2/m^3	G_c'	绝干物料流率	$kg/m^2 \cdot h$
a_s	非球形颗粒的面积系数		g	重力加速度	m/s^2
a_v	非球形颗粒的体积系数		H	高度	m
B	系数		h_1	叶片高度	m
C_H	湿空气比热容	$kJ/kg \cdot K$	I	空气热焓	kJ/kg 干空气
C_M	干物料比热容	$kJ/kg \cdot K$	K	传热系数	$W/m^2 \cdot K$
C_w	水的比热容	$4.187 kJ/kg \cdot K$	L	绝干空气质量流量	kg/h
D	直径	m	L_G	绝干空气质量流率	$kg/m^2 \cdot h$
d	旋转式雾化器直径	m	L_u	绝干空气质量流率	$kg/m^2 \cdot s$
d_0	喷嘴孔直径	m	l	比空气用量	kg 干空气/kg 水
d_p	颗粒或液滴直径	m	n	转速	r/min
f	频率	1/s	n_1	叶片数	
			p	压力	Pa
			Q	传热量	kJ/h

第 17 篇 干 燥

主稿、编写人 王喜忠 大连理工大学化工学院 教授

符号说明	17-1	2.3	按照物料进入干燥器的形状进行干燥器分类	17-24
1 干燥的基本概念	17-2	2.4	按照附加特征的适应性进行干燥器的分类	17-25
1.1 物料干燥的目的	17-2	2.5	干燥器选择的原则	17-25
1.2 去湿方法	17-2	2.6	干燥器容积的估算	17-25
1.3 干燥操作的流程	17-2	3 干燥器设计	17-27	
1.4 物料内所含水分的种类	17-3	3.1 对流传热型干燥器	17-27	
1.5 干燥速率和干燥阶段	17-5	3.2 传导传热型干燥器	17-72	
1.6 物料内水分移动的机理	17-6	3.3 红外线干燥	17-85	
1.7 湿空气性质及湿度图	17-8	3.4 微波干燥	17-87	
1.8 干燥过程的基本计算	17-8	4 两级干燥	17-88	
1.9 特殊干燥过程的计算简介	17-21	5 干燥操作的节能	17-89	
2 干燥器的分类、选择与干燥器容积的估算	17-22	6 干燥器的发展趋势	17-91	
2.1 干燥器分类的目的	17-22	一般参考文献	17-91	
2.2 按操作方法和热量供给方法进行干燥器分类	17-24	参考文献	17-91	

符 号 说 明

A	面积,	m^2	G_1	湿物料量	kg/h
A_0	喷嘴孔截面积	m^2	G_2	干燥后物料量	kg/h
A_s	振幅	m	G_c	绝干物料量	kg/h
a	比表面积	m^2/m^3	G_c'	绝干物料流率	$kg/m^2 \cdot h$
a_s	非球形颗粒的面积系数		g	重力加速度	m/s^2
a_v	非球形颗粒的体积系数		H	高度	m
B	系数		h_1	叶片高度	m
C_H	湿空气比热容	$kJ/kg \cdot K$	I	空气热焓	kJ/kg 干空气
C_M	干物料比热容	$kJ/kg \cdot K$	K	传热系数	$W/m^2 \cdot K$
C_w	水的比热容	$4.187 kJ/kg \cdot K$	L	绝干空气质量流量	kg/h
D	直径	m	L_G	绝干空气质量流率	$kg/m^2 \cdot h$
d	旋转式雾化器直径	m	L_u	绝干空气质量流率	$kg/m^2 \cdot s$
d_0	喷嘴孔直径	m	l	比空气用量	kg 干空气/kg 水
d_p	颗粒或液滴直径	m	n	转速	r/min
f	频率	1/s	n_1	叶片数	
			p	压力	Pa
			Q	传热量	kJ/h

q	比热量消耗	kJ/kg 水
q_D	在干燥器中加入的热量	kJ/kg 水
q_H	加热器加入的热量	kJ/kg 水
q_M	物料升温所需的热量	kJ/kg 水
q_L	干燥器散热损失	kJ/kg 水
r	半径	m
r_0	t_0 温度下的汽化潜热	kJ/kg
r_w	水的汽化潜热	kJ/kg
r_0	孔半径	m
t	温度	$^{\circ}\text{C}$
t_1	空气进干燥器的温度	$^{\circ}\text{C}$
t_2	空气离开干燥器的温度	$^{\circ}\text{C}$
t_M	物料的温度	$^{\circ}\text{C}$
t_0	空气的绝热饱和温度	$^{\circ}\text{C}$
U	面积蒸发强度	$\text{kg 水/m}^2 \cdot \text{h}$
U_s	体积蒸发强度	$\text{kg 水/m}^3 \cdot \text{h}$
u	速度	m/s
V	体积	m^3
v	比容	m^3/kg
W	水分蒸发量	kg/h
w_1	物料初始湿含量(湿基)	$\%$
w_2	物料干燥后湿含量(湿基)	$\%$
X	物料湿含量(干基)	$\%$

希腊字母

α_s	体积给热系数	$\text{W/m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$
ρ	密度	kg/m^3
ϵ	空隙率	$\%$
τ	时间	h, s
σ	表面张力	N/m
μ	动力粘度	$\text{kg/m} \cdot \text{s}$
ν	运动粘度	m^2/s
η	热效率	$\%$

准 数

$$Nu = \frac{\alpha d_p}{\lambda}$$
——努塞尔数, 无因次

$$Re = \frac{d_p u \rho}{\mu}$$
——雷诺数, 无因次

$$Pr = \frac{C_p \mu}{\lambda}$$
——普兰德数, 无因次

1 干燥的基本概念

1.1 物料干燥的目的

干燥操作几乎涉及到国民经济的所有部门, 广泛应

用于生产和生活中。

干燥操作的目的是除去某些原料、半成品及成品中的水分或溶剂, 以便于加工、使用、运输、贮藏等。现简单说明如下:

(1) 便于加工。某些加工原料, 由于加工工艺的要求, 需要将原料脱水到规定的含水率。如化纤工业的聚酯切片, 纺制短纤维含水率应 $\leq 0.012\%$, 纺制长纤维含水率应 $\leq 0.007\%$ 。上述这种高聚物切片干燥的目的, 是保证在纺丝过程中高聚物粘度不降低, 也不致产生气泡丝或断头丝; 另外, 提高高聚物的软化点, 以利于纺丝螺杆对切片的输送与挤压。又如某些药品, 经干燥到规定水分后去压片成型或分装, 以保持药品的稳定性。

(2) 便于使用。例如食盐、味素、尿素、硫酸等经干燥后, 不易结块, 便于使用。

(3) 便于贮存。如玉米, 收购时水分在 20% 以上, 要干燥到 13~14% 以后入库贮存, 否则要发霉变质。又如染料的滤饼, 含水 50~60% 左右, 不易保存, 干燥到含水 4~5% 以下装筒保存, 不易结块。再如鲜蘑菇等蔬菜经干燥后才能长期保存。

(4) 便于运输。含 70~80% 的悬浮液、膏状物等, 若长途运输, 不但主要运送的是水, 造成运费的浪费, 而且还很不安全 (如泄漏、腐蚀等)。

1.2 去湿方法

从物料中除去湿分的操作, 称为去湿。去湿方法按作用原理可作如下分类:

(1) 机械除湿法 用压榨、过滤、离心分离等机械方法除去湿分。此方法脱水快而节省费用。此法去湿程度不高, 如离心分离后水分含量达 5~10%, 板框压滤后水分含量为 50~60%。

(2) 化学除湿法 利用吸湿剂如浓硫酸、无水氯化钙、分子筛等除去气体、液体和固体物料中少量水分, 此法除湿有限, 且费用较高, 只用于少量物料的除湿。

(3) 加热 (或冷冻) 除湿法 用热能加热物料, 使物料中水分蒸发后而干燥。或者用冷冻法使水分结冰后升华而除去湿分。这是工业中常用的干燥方法。

在实际生产操作中, 一般先用机械法最大限度地除去物料中的湿分, 然后再用热能法除去部分湿分, 最后得到固体产品。

本篇主要介绍热能干燥法, 即用热空气加热物料, 使湿分蒸发, 最后得到固体产品的干燥法。

关于气体、液体的干燥问题, 不在此篇讨论范围之内。

1.3 干燥操作的流程

一个完整的干燥操作流程, 由加热系统、原料供给系统、干燥系统、除尘系统、气流输送系统、控制系统

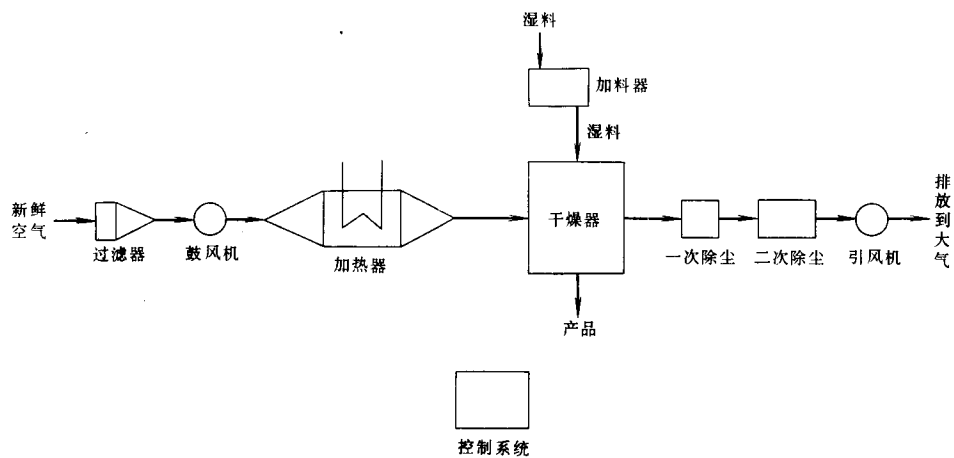


图 17-1 干燥操作的流程

组成,用方块图表示在图 17-1 上,在进行干燥器设计时,应考虑上述的全部系统。本篇只讨论干燥系统。

1.4 物料内所含水分的种类

- (1) 物料与水分的结合方式的分类
- (1.1) 化学结合水 包括水分与物料的离子结合和结晶型分子结合。若脱掉结晶水,晶体必遭破坏。
- (1.2) 物理化学结合水 包括吸附、渗透和结构水
- 分。吸附水分既可被物料外表面吸附,也可被物料内表面吸附,因此,吸附水分与物料的结合最强,此结合改变了水分的许多物理性质,如冰点下降,密度增大,蒸汽压下降,介电常数大幅度下降。
- 渗透水分是由于在物料组织壁内外存在着溶解物浓度差,由此而产生渗透压,此渗透压使组织壁内外存在渗透水。
- 结构水分,是在胶体形成时,将水分结合在物料的

表 17-1 固体物料中湿分的分类

项 目	化学结合水		物理化学结合水				机械结合水		
结合键能序列	离子结合	分子结合	吸附水		渗透水	结构水	微毛细管水	巨毛细管水	润湿水
键能,kg·m/kmol			3×10^5				$\geq 10^4$	$\leq 10^4$	0
键形成条件	水合作用	结晶	氢键/溶剂化 物理化学吸附		渗透吸入	溶解于胶体中	毛细管凝结		表面凝结
键结构原理	静电场		分子力场		渗透压	水包含于凝胶中	毛细管中的弯月液面作用		表面附着力
键破坏条件	离子间化学反应	分子间烘烤	所有分子汽化	内表面与外表面解吸	内表面解吸	浓度差	汽化或机械脱水	汽化或机械脱水	汽化或机械脱水
固体结构及湿分特性改变	形成新化合物	形成新晶体	湿分进入,如同溶解作用	湿分存留于微胞或胶体内部	湿分存留于分子层内	物理外观及性质有很大改变,如结合强度	湿分有微小的特性改变,固体结构则无甚变化		
举 例	石灰的水合作用	各种无机结晶体	离子/分子溶液	亲水性物料	疏水性物料	植物细胞与水溶液	各类凝胶类物质	毛细管 $r \leq 10^{-7} \text{m}$; 多孔体 $r \geq 10^{-7} \text{m}$	无孔亲水性物料

组织内部。

(1.3) 机械结合水 包括有毛细管水分、润湿水分和空隙水分。毛细管水分存在于纤维或微小颗粒成团的湿物料中。毛细管半径小于 $0.1\mu\text{m}$ 者,称为微毛细管。其中的水分,因毛细管力的作用而运动。水分的蒸汽压低于同温度下纯水的蒸汽压。毛细管半径在 $0.1\sim 10\mu\text{m}$ 者,称巨毛细管。水分受重力作用有较小的运动,毛细管弯月面上的饱和蒸汽压近似地等于平面上的饱和蒸汽压。当毛细管半径大于 $10\mu\text{m}$ 以上时,其中的水分为空隙水,受重力作用而运动,不产生蒸汽压降低。

润湿水分是水和物料的机械混合,易用加热和机械方法脱掉。

上述的物料中水分的分类列于表 17-1 中。

(2) 物料中水分去除的难易程度的分类

(2.1) 结合水分 这种水分难于去除。它包括物料细胞、纤维管壁、毛细管中所含的水分。结合水分产生不正常的低蒸汽压。

(2.2) 非结合水分 这种水分极易去除。它包括物料表面的润湿水分及空隙水分。此种水分不产生低蒸汽压。

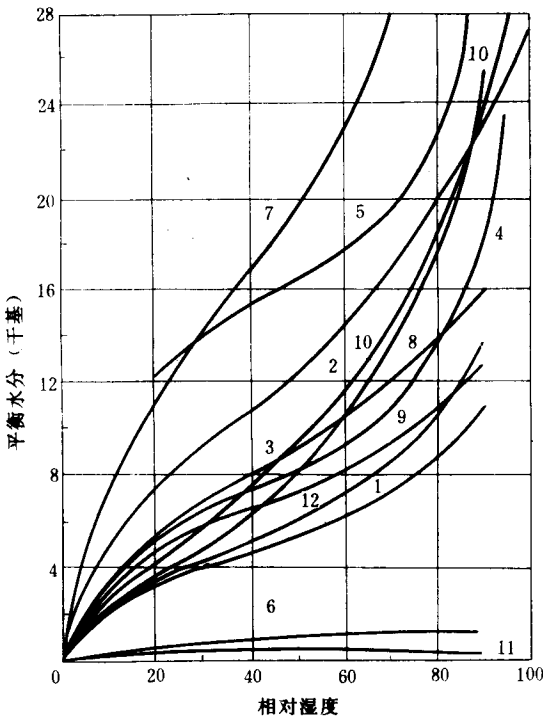


图 17-2 某些物料的平衡水分
(物料温度 25°C)

1—新闻纸; 2—羊毛、毛织品; 3—硝化纤维;
4—天然丝; 5—皮革; 6—瓷土; 7—烟叶;
8—肥皂; 9—牛皮胶; 10—木材;
11—玻璃丝; 12—棉毛

表 17-2 平衡水分

物 料	平 衡 水 分 $w, \%$				温度 $^{\circ}\text{C}$
	湿度, $\varphi 20$	40	60	80	
纸浆	5.3	7.2	8.6	11.5	25
纸	4.3	6.1	8.4	12.0	25
报纸	3.3	4.7	6.2	8.9	25
羊毛	7.5	10.6	14.7	19.6	25
丝	6.0	8.8	11.3	17.5	25
人造丝	7.0	11.0	12.5	18.5	25
棉花	4.5	5.5	7.2	11.0	25
棉花	3.9	6.1	9.0	13.2	35
棉花	3.6	5.7	8.2	12.3	45
棉花	3.2	5.2	7.6	11.5	58
棉花	3.0	4.9	7.1	10.6	75
棉花	2.7	4.4	6.4	9.4	90
棉花	2.1	3.8	5.8	8.8	105
木棉织品	3.6	5.8	8.0	11.3	25
硝化棉	5.0	7.5	11.0	14.0	25
醋酸纤维素	1.2	2.4	3.0	4.5	25
皮革	12.2	15.2	17.5	22.5	25
橡胶	0.8	1.0	1.5	2.8	25
骨胶	5.0	6.9	8.6	11.1	25
小麦	8.8	11.2	14.0	17.8	10
小麦	8.5	10.8	13.4	16.8	20
小麦	7.8	10.4	12.7	16.2	30
淀粉	3.9	6.5	8.5	10.5	25
木材	5.0	7.4	10.2	14.2	20
木材	4.2	6.7	9.8	13.6	40
木材	3.2	6.0	8.9	13.0	60
木材	2.4	4.8	7.1	11.0	80
硅砾土	0.7	1.1	1.7	2.5	25
高岭土	0.6	0.9	1.0	1.1	25
石棉纤维	0.4	0.4	0.4	0.7	25
玻璃纤维	0.2	0.2	0.2	0.2	25
灰泥	0.6	1.2	1.6	2.4	25
石膏	0.25	0.35	0.55	1.0	25
石棉	0	0.1	0.2	0.3	25
石膏板	6.5	8.0	10.0	16.0	25
砖	0.3	0.3	0.3	0.5	25
软木	0.7	1.2	1.5	2.0	25
海绵	8.6	11.5	15.2	21.2	25
木炭	3.0	4.8	6.0	8.0	25
焦炭	0.5	0.8	1.2	1.5	25
活性炭	1.7	2.7	8.5	8.0	25
炭黑	3.0	3.7	3.9	4.9	25
氧化锌	0.4	0.4	0.4	0.7	25
硅胶	9.8	15.5	19.0	21.5	25
烟草	9.0	13.2	19.5		25
烟叶	4.0	9.0	11.2	25.0	30
棉毛纤维	2.4	2.5			30
肥皂	3.9	6.6	10.6	17.7	25

(3) 物料中水分能否用干燥方法除去的分类

(3.1) 平衡水分 当一种物料与一定的温度及湿度的空气接触时,物料势必会放出水或吸收水分,物料的水分将趋于一定值。只要空气状态不变,此时物料中的水分将不因和空气接触时间的延长而再变化,这个定值,就称为该物料在此空气状态下的平衡水分。物料的平衡水分,在相同空气状态下,随物料的性质和温度而异。由图 17-2 可见,玻璃丝和陶土的平衡水分接近于零,木材和羊毛平衡水分则较大。

平衡水分代表物料在一定空气状态下的干燥的极限,即用热空气干燥法,平衡水分是不能除掉的。各种物料的平衡水分用实验测定,某些物料的平衡水分列于表 17-2。

(3.2) 自由水分 在干燥过程中能够除去的水分,只是物料中超出平衡水分的部分,这部分水分称为自由水分。

各种水分的关系表示在图 17-3 上。如采用热风干燥,棉花只能被 90℃,相对湿度为 20%的空气干燥到含水 2.7% (以上均为干基)。

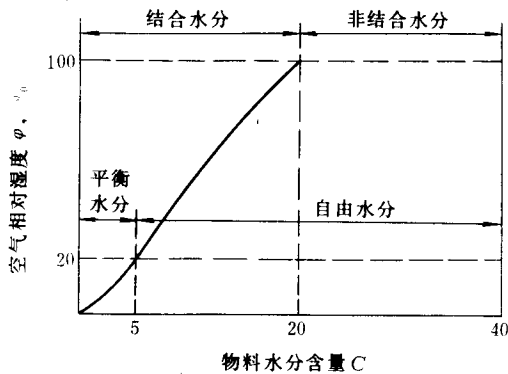


图 17-3 固体物料所含水分示意图
(温度=常数)

1.5 干燥速率和干燥阶段

(1) 干燥曲线

为了分析固体物料的干燥机理,要在恒定的干燥条件(即保持干燥介质(通常用空气)的温度、湿度、流动速度不变,也就是用大量的空气干燥少量的物料)下进行物料的干燥实验,将实验得到的物料湿含量 X (干基)、物料温度 t_M 和时间 τ 之间的数据加以整理,如图 17-4 中的 $X-\tau$ 曲线和 $t_M-\tau$ 曲线。 $X-\tau$ 曲线称为干燥曲线。由图 17-4 可以看到下述几点:①由 $X-\tau$ 线可见,在 ABC 段,物料中水分含量 X 随干燥时间 τ 的增加而下降的较快。 AB 段斜率略小,这是被干燥物料处于预热阶段,空气将部分热量用于物料的升温。 BC 段斜率较大,此时空

气传递给物料的显热基本上等于物料中水分汽化所需之潜热,物料的温度基本上保持不变(参看 $t_M-\tau$ 线的 FH 段)。干燥的后一段,即 C 点以后,物料湿含量 X 下降变慢,干燥曲线逐渐变平坦,此时空气将一部分热量供给物料升温(参看 $t_M-\tau$ 线的 HJ 段)。

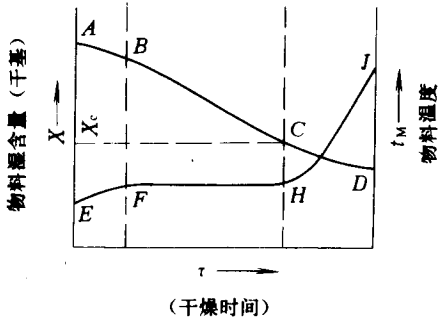


图 17-4 干燥曲线

设计者和操作者应当注意,在 HJ 段,由于物料温度升高而热敏性物料易变质,因此,要严格控制此段温度。

(2) 干燥速率曲线

干燥速率 U 的定义是单位时间、单位干燥面积蒸发的水分质量,即:

$$U = - \frac{G'_c dX}{A d\tau} \tag{17-1}$$

式中 U ——干燥速率, $\text{kg/h} \cdot \text{m}^2$;
 G'_c ——绝干物料量, kg ;
 A ——干燥面积, m^2 ;
 $\frac{dX}{d\tau}$ ——干燥曲线斜率。

根据干燥速率的定义,将图 17-4 中的 $X-\tau$ 线换算成干燥速率曲线,如图 17-5 所示。由图 17-5 干燥速率曲线上可以看到,若不考虑开始的短时间的预热段 AB ,则干

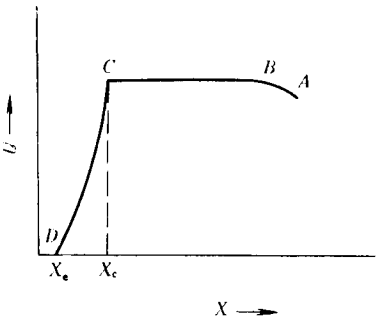


图 17-5 干燥速率曲线

干燥过程基本上可分为二个阶段: ABC 段, $U = \text{常数}$, 此阶段称为恒速干燥阶段。CD 段, 干燥速率下降, 称为降速干燥阶段。两个干燥阶段有一个转折点 C, 与该点对应的物料湿含量称为临界湿含量, 用 X_c 表示。

在一般情况下, 干燥速率曲线是随湿物料与水分的结合方式的不同而有差异, 但是, 干燥速率曲线的基本形状是相似的, 这就是各种物料干燥过程的共同点。

(3) 恒速干燥阶段

在恒速干燥阶段内, 湿物料表面为非结合水所润湿, 故湿物料的表面温度必须是该空气状态下的湿球温度。在此阶段内, 传热推动力 ($t - t_w$) 和传质推动力 (物料表面饱和水蒸汽压和空气中水蒸汽分压之差) 是定值, 传热系数和传质系数亦为定值, 故干燥速率必须是一个定值。

从上述的分析可见, 此阶段的干燥速率决定于物料表面水分汽化的速率, 决定于水蒸汽通过干燥表面的气膜扩散到气相主体的速率, 故恒速干燥阶段又称表面汽化控制阶段, 也叫干燥第一阶段。

在此阶段内, 干燥速率和物料湿含量无关, 和物料类别无关, 物料的干燥速度大约等于纯水的汽化速度, 如表 17-3 所示。影响干燥速率的主要因素是外部条件——空气的流速、温度和湿度。

表 17-3 恒速干燥阶段干燥速率

$t = 54 \sim 55^\circ\text{C}$, $\phi = 12 \sim 17\%$, $v = 3.4 \sim 3.5 \text{ m/s}$

物 料	$R, \text{g/h} \cdot \text{cm}^2$
水	0.27
白颜料	0.21
黄铜屑	0.24
砂	0.20 ~ 0.24
粘土	0.23 ~ 0.27

(4) 降速干燥阶段

物料湿含量降至临界点以后, 便开始进入降速干燥阶段。因为在此阶段, 物料中非结合水已被蒸发掉, 若干燥继续进行, 只能蒸发结合水分, 而结合水分产生的蒸汽压恒低于同温度下纯水的饱和蒸汽压, 所以, 水蒸汽由物料表面扩散至气相主体的传质推动力减小。随着水分的蒸发, 传质推动力愈来愈小, 故干燥速率亦愈来愈小。由于蒸发水分愈来愈少, 干燥空气的剩余热量只能用来加热湿物料, 使物料表面温度不再维持湿球温度而逐渐升高, 并局部表面变干。

在降速干燥阶段中, 干燥速率主要取决于水分和蒸汽在物料内部的扩散速度, 因此也把降速干燥阶段称为内部扩散控制阶段。影响干燥速率的主要因素是物料本身的结构、形状和大小等, 与外部的干燥条件关系不大。

对各类物料进行干燥试验, 将得到的干燥速率曲线大体上分为四大类, 如图 17-6 所示。由图可见, 它们的

主要区别是在降速干燥阶段。图 17-6 中的 (a)、(b) 是砂粒床层、薄皮革等多孔性物料。对这类物料而言, 是借助于毛细管作用, 水分由内部孔隙中向表面迁移的。图 17-6 中 (c) 是粘土、陶瓷、木材等物料, 存在二个降速阶段。第一降速阶段的传递机理类似于 (a)、(b)。第二降速阶段则与水在物料内部汽化后向表面扩散问题有关。图 17-6 中 (d) 是肥皂、胶类等无孔的吸湿性物料, 水分借扩散作用向表面移动, 这类物料一般不存在恒速干燥阶段。

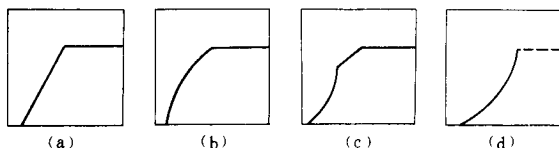


图 17-6 降速干燥阶段干燥速率曲线的分类

(5) 临界湿含量

物料的临界湿含量是恒速干燥阶段和降速干燥阶段的分界点, 是干燥器设计的重要参数。临界湿含量不仅和被干燥的物料性质 (结构、形状等) 有关, 而且还与干燥器型式及干燥条件有关, 请参见表 17-9。目前在手册中查到的物料临界湿含量, 一般是在烘箱中测定的, 与气流干燥、流态化干燥、喷雾干燥等差别甚大。实测数据应在相应的干燥器中相同的干燥条件下测得。

1.6 物料内水分移动的机理

前已讨论, 在恒速干燥阶段, 水蒸汽进入气相主体的控制因素是气膜的扩散传质系数。但在降速干燥阶段, 湿分的移动存在着两种机理, 即扩散机理和毛细管机理。

(1) 液体扩散的机理

这种机理认为, 湿分的迁移, 是由于传质推动力的存在, 依靠扩散进行的。在降速干燥过程中, 由于物料内部水分具有浓度梯度, 使水分由含水率较高的区域向含水率较低的表面扩散。对于非多孔性物料 (如肥皂、明胶等), 水分的移动符合这一机理。在降速阶段后期, 对于粘土、木材、皮革、纸张和纤维织物等物料, 水分也依靠扩散而移动。

(2) 毛细管机理^[1]

这种机理认为, 湿分的迁移, 是由于毛细管力的作用而进行的。对于由颗粒或纤维所组成的多孔性物料, 如果孔隙的大小合适, 水分也可能从含水率低的区域移动到含水率高的区域去, 这种水分的移动主要靠毛细管力。

有一半半径为 r 的毛细管插入液体中, 如图 17-7 所示。众所周知, 能润湿管壁的液体, 其表面在毛细管中呈凹形。由于表面张力的作用, 毛细管内凹形液面下的

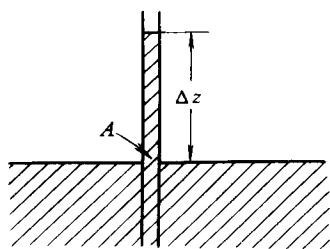


图 17-7 毛细管作用力示意图

压力比管外液面下的压力小（其差值称为毛细压力，以 $-\Delta p$ 表示），使液体上升 Δz 高度。如果液体能完全润湿壁面（如水），则液体与壁面的接触角为零，液面的曲率等于毛细管的内半径，于是：

$$-\Delta p = \frac{2\sigma}{r} = \Delta z \cdot g (\rho_L - \rho_g) \quad (17-2)$$

$$\text{或} \quad \Delta z = \frac{2\sigma}{r g (\rho_L - \rho_g)} \quad (17-3)$$

式中 $-\Delta p$ ——毛细压力，即凹面下液体的压力与平面下液体压力之差， N/m^2 ；

σ ——气液相接触处的相际表面张力， N/m^2 ；

r ——毛细管半径， m ；

ρ_L 、 ρ_g ——液体和气体密度， kg/m^3 。

式 (17-2) 或 (17-3) 说明，毛细管的半径愈小， $-\Delta p$ 愈大，液面上升也愈高。

由颗粒或纤维组成的多孔性物料，具有复杂的网状结构，孔穴（被固体颗粒所包围的空隙称孔穴）之间由截面大小不同的孔道互相沟通，孔道在表面上有大小不同的开口。当干燥进入降速阶段后，表面上每一开口形成凹表面，由表面张力产生的毛细压力，使水分从物料内部向表面移动，从大孔道向小孔道中流动。

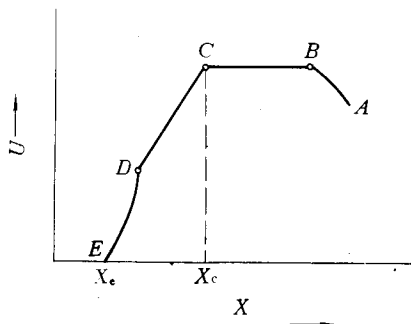


图 17-8 干燥速率曲线

受毛细管力控制时，降速干燥阶段的曲线形状如图 17-8 所示。在点 C 以后的 CD 段中，汽化表面开始从物料表面向内部移动，但移动速度因孔道截面大小不同而不同。大孔道中的水分一方面因汽化而减少，另一方面，因毛细压力作用，使部分水流入小空道中，这样，造成大孔道中的液面后移，如图 17-9 所示，部分物料的表面出现表面干燥现象。在干燥过程继续进行，大孔道中液面不断后移，直至退到孔道中直径较小的蜂腰（孔道中最小截面处），这时液面的曲率与小孔道中液面的曲率相当。

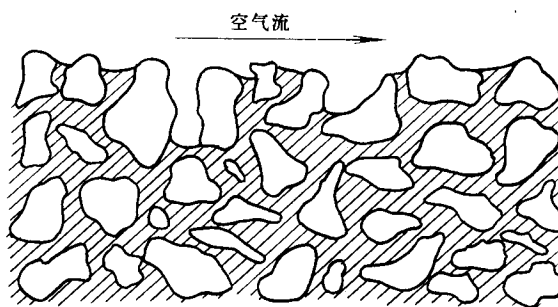


图 17-9 降速第一阶段某一瞬间水分在物料中的分布

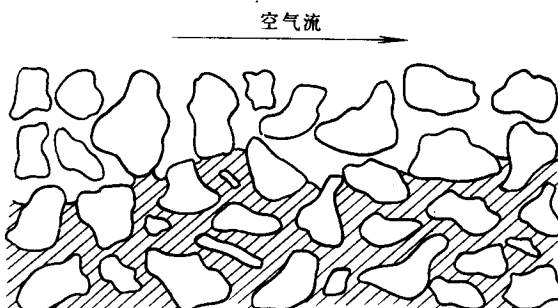


图 17-10 降速第二阶段某一瞬间水分在物料中的分布

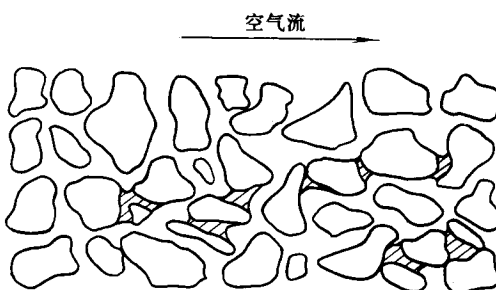


图 17-11 干燥终了时水分在物料中的分布

再继续干燥,小孔道中液面也开始后移,表面上有更多的孔隙失去水分,不饱和表面在总表面中的比例逐渐增加,干燥速率不断下降。

在达到D点(即第二临界点)时,表面空隙中的水分已经干涸,汽化面向后移到物料内部,如图17-10所示。这时干燥速率进一步下降,因为水分扩散要经过不断增厚的干物料层。

在干燥终了时,水分只是间断地分散在固体相互接触处的小孔穴中,如图17-11所示。

目前,对干燥机理的研究还很不充分,一些研究结果还不能用于设计,还主要依靠实验。

1.7 湿空气性质及湿度图

在一般情况下,干燥介质为空气。在设计空气加热干燥器时,要确定空气用量及干燥器尺寸,这些都离不开湿空气的性质。因此,对湿空气的性质应有一定了解。

(1) 湿空气性质

它包括空气中水蒸汽分压、湿度、相对湿度、热焓、干球和湿球温度、绝热饱和温度及露点(参见第十六篇)。

(2) 湿度图及其使用(参见第十六篇)

(3) 有机蒸汽系统的湿度图

空气-水蒸汽系统, $\alpha/K_H \approx C_N \approx 1$, $t_w \approx t_s$ (参见第十六篇), 但有机蒸汽不同, $\alpha/K_H \neq C_H$, 且 $t_w > t_s$ 。因此, 空气-水蒸汽系统的湿度图不能用。有机蒸汽系统的湿度图和空气-水蒸汽系统的湿度图制作方法相似。参照其公式进行计算, 便可得到各参数。

干燥过程中脱除有机蒸汽的操作, 绝大多数采用氮气作为干燥介质的闭路循环系统。空气-有机蒸汽系统湿度图参看文献^[2]。此处附上空气-水系统低温、中温、高温湿度图(见图17-12~17-14), 氮气-有机溶剂蒸汽系统及空气-四氯化碳系统的湿度图(见图17-15~17-22)^[3], 这些图对干燥器设计是必须的, 供设计者选用。

1.8 干燥过程的基本计算

干燥过程的基本计算内容包括水分蒸发量及干燥空气用量。在计算之前, 先介绍采用空气加热的干燥器基本流程示意图, 了解各参数所在的位置及其相互关系。其流程如图17-23所示。新鲜空气(其状态为环境温度 t_0 , 湿度 x_0 , 热焓 I_0 , 干空气流量 L) 进入空气加热器, 加热后(其状态为 t_1 , $x_1 = x_0$, I_1 , L) 进入干燥器, 在干燥器中, 物料被干燥, 由含水率 w_1 降至 w_2 , 物料由 t_{M1} 升至 t_{M2} 后排出干燥器; 而干燥空气温度下降, 湿度增加(由于空气携带物料蒸发的 W kg/h 的水分) 后排出干燥器(其状态为 t_2 , x_2 , I_2 , L)。

(1) 水分蒸发量

(1.1) 物料中水分含量的表示法

(a) 湿基含水率 w 湿基含水率的定义为:

$$w = \frac{\text{湿物料中水分的质量}}{\text{湿物料的总质量}} \times 100\% \quad (17-4)$$

(b) 干基含水率 X 干基含水率的定义为:

$$X = \frac{\text{湿物料中水分的质量}}{\text{湿物料中绝对干物料的质量}} \times 100\% \quad (17-5)$$

(c) 上述二者的关系为:

$$X = \frac{w}{1-w} \times 100\% \quad (17-6)$$

若已知湿物料 100kg, 其中含水分 60kg, 此时湿基含水率 $w = \frac{60}{100} \times 100\% = 60\%$, 干基湿含量 $X = \frac{60}{100-60} = \frac{60}{40} \times 100\% = 150\%$ 。

(1.2) 水分蒸发量的计算

通常在设计时已知干燥产品产量 G_2 , 湿含量 w_1 , w_2 , 确定水分蒸发量 W 。

对干燥器作总物料衡算, 可得:

$$G_1 = G_2 + W \quad (17-7)$$

对绝对干物料作物料衡算, 可得:

$$G_c = G_2 \frac{100-w_2}{100} = G_1 \frac{100-w_1}{100} \quad (17-8)$$

由式(17-7)和(式17-8)可得:

$$W = G_2 \frac{w_1-w_2}{100-w_1} = G_1 \frac{w_1-w_2}{100-w_2} \quad (17-9)$$

和

$$G_1 = G_2 \frac{w_1-w_2}{100-w_1} \quad (17-10)$$

式中 W ——水分蒸发量, kg/h;

G_1 ——进入干燥器的湿物料质量, kg/h;

G_2 ——离开干燥器的产品质量, kg/h;

G_c ——湿物料中绝对干物料的质量, kg/h;

w_1 ——湿物料的含水率(湿基), %;

w_2 ——干燥后产品含水率(湿基), %。

(2) 干燥空气用量的计算

设通过干燥器的绝干空气质量流量为 L (L 在干燥过程中是不变的), kg/h。对进出干燥器的空气中的水分作衡算, 得:

$$L(x_2 - x_1) = W \quad (17-11)$$

或

$$L = \frac{W}{x_2 - x_1} \quad (17-11a)$$

式中 L ——绝对干空气质量流量, kg/h;

x_1 ——进干燥器的空气湿度, kg/kg;

x_2 ——出干燥器的空气湿度, kg/kg。

$$\text{令 } l = \frac{L}{W} = \frac{1}{x_2 - x_1} \quad (17-12)$$

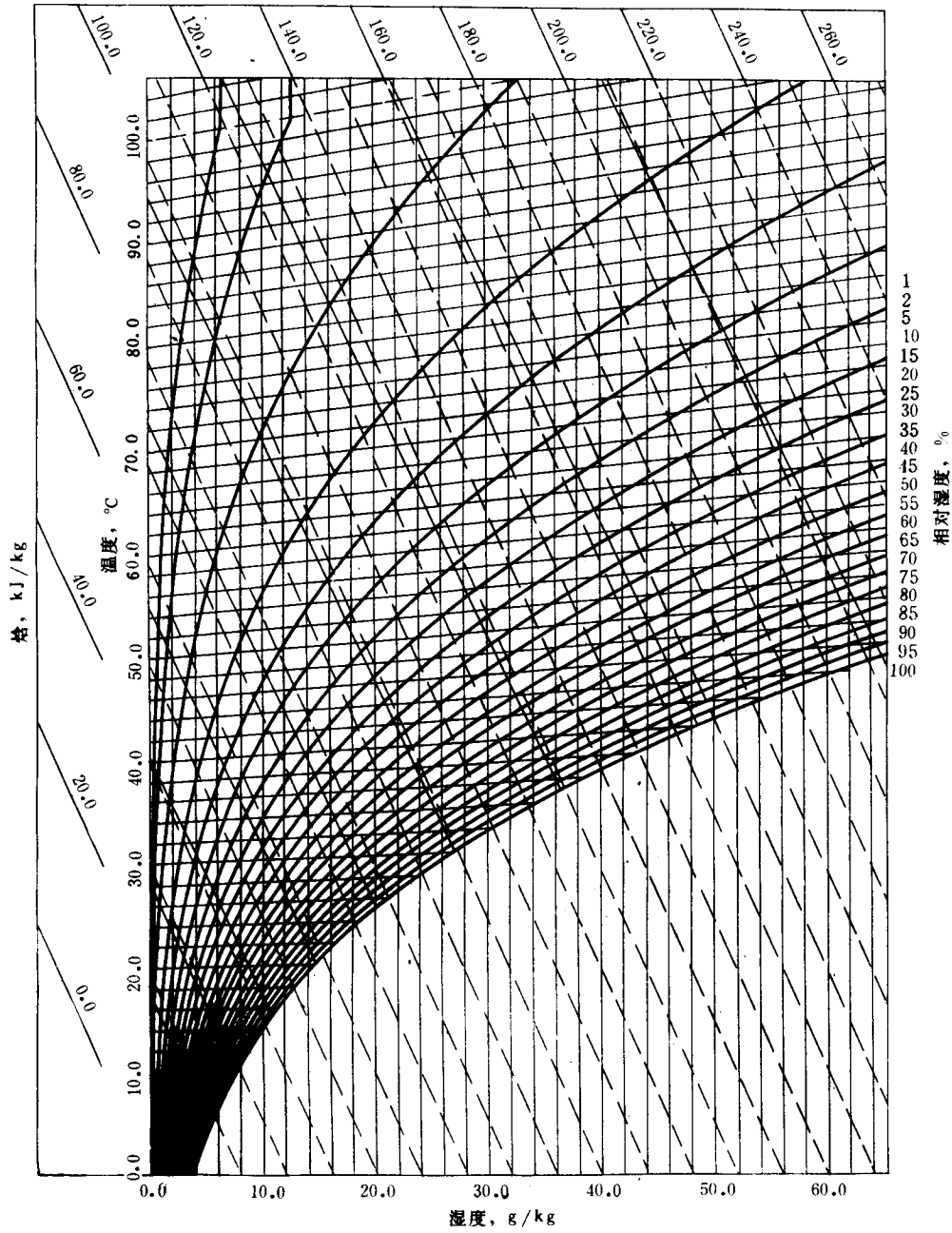


图 17-12 空气-水系统焓-湿图 (低温)
(压力 101.325kPa)

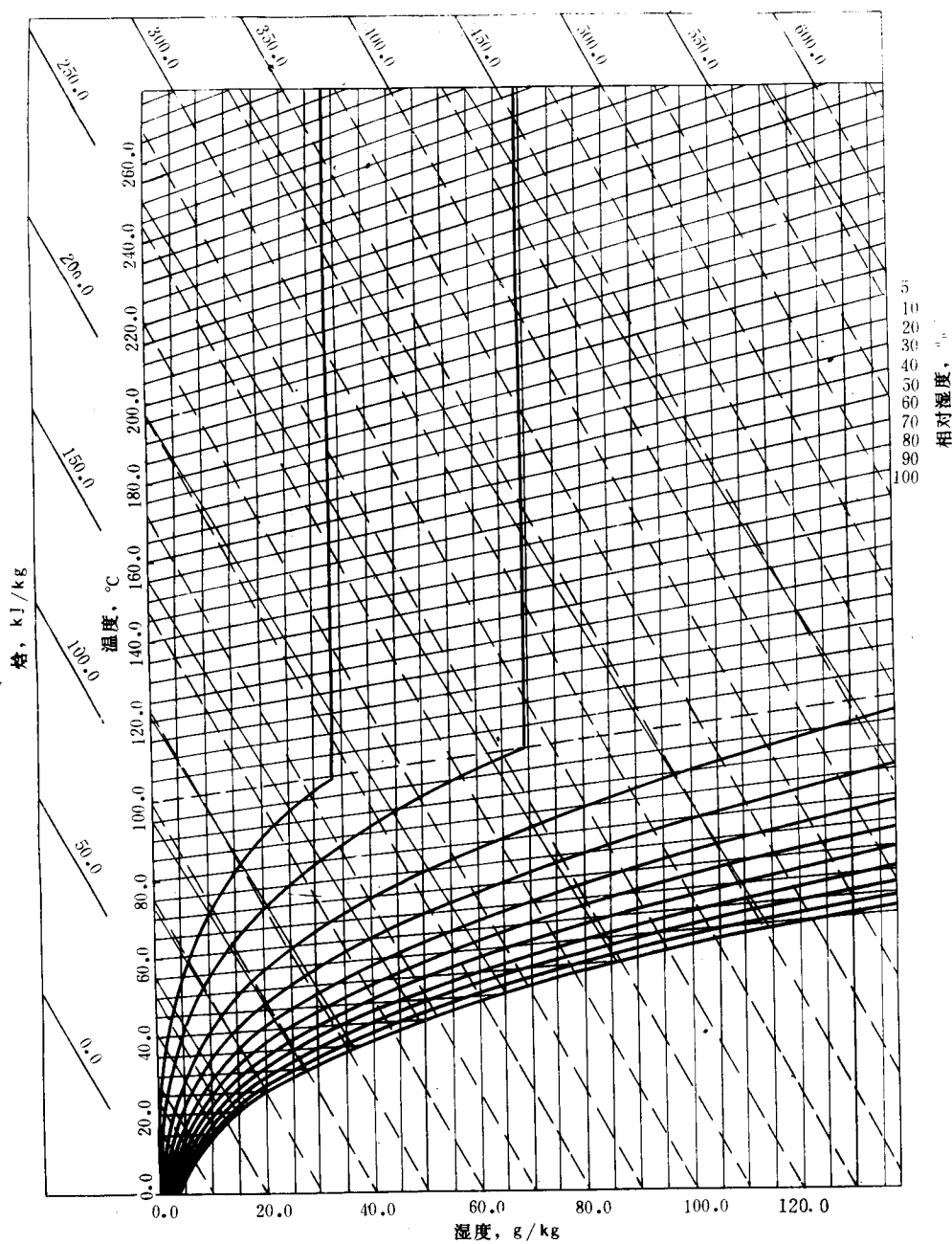


图 17-13 空气-水系统焓-湿图 (中温)
(压力 101.325kPa)

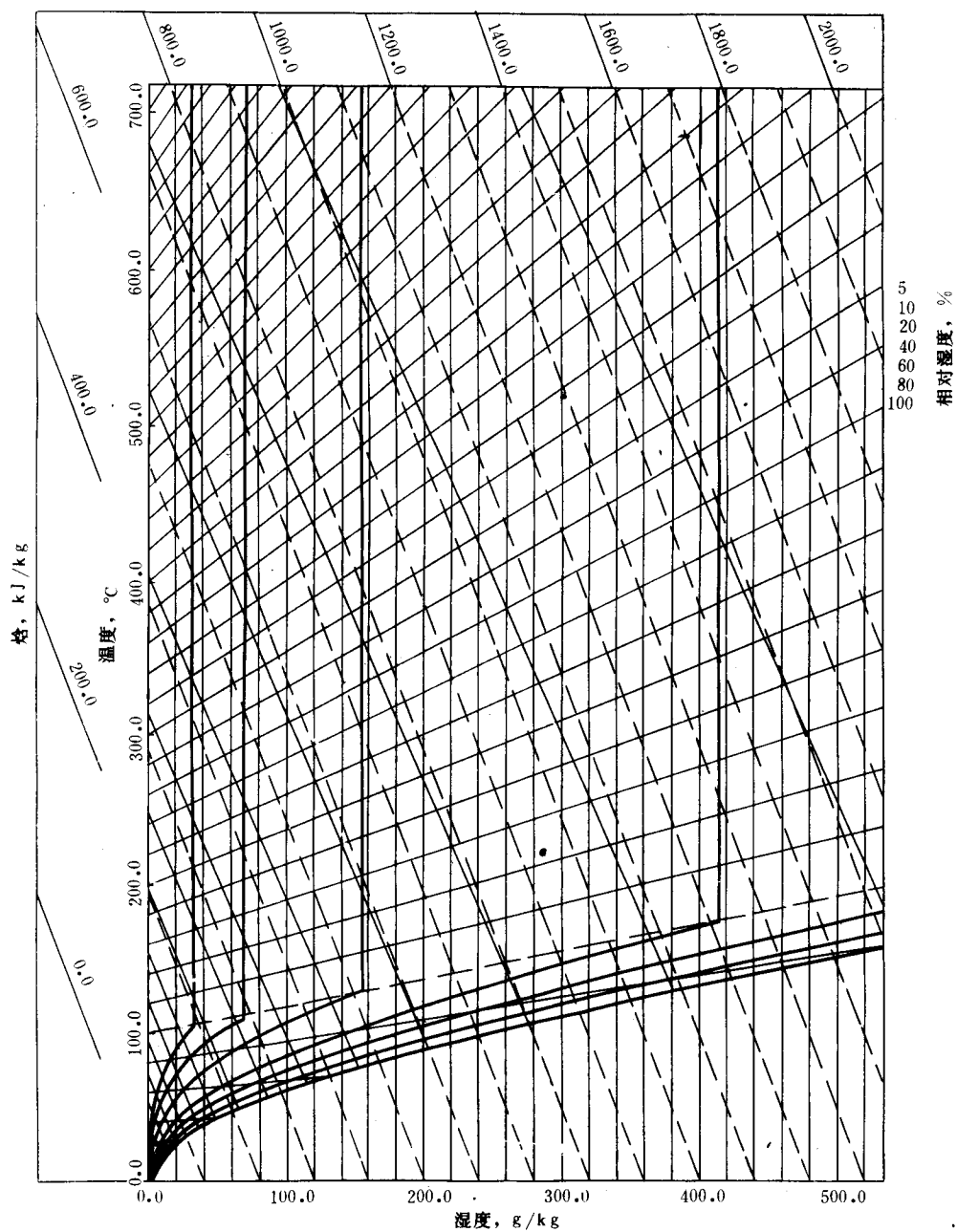


图 17-14 空气-水系统焓-湿图 (高温)
(压力 101.325kPa)

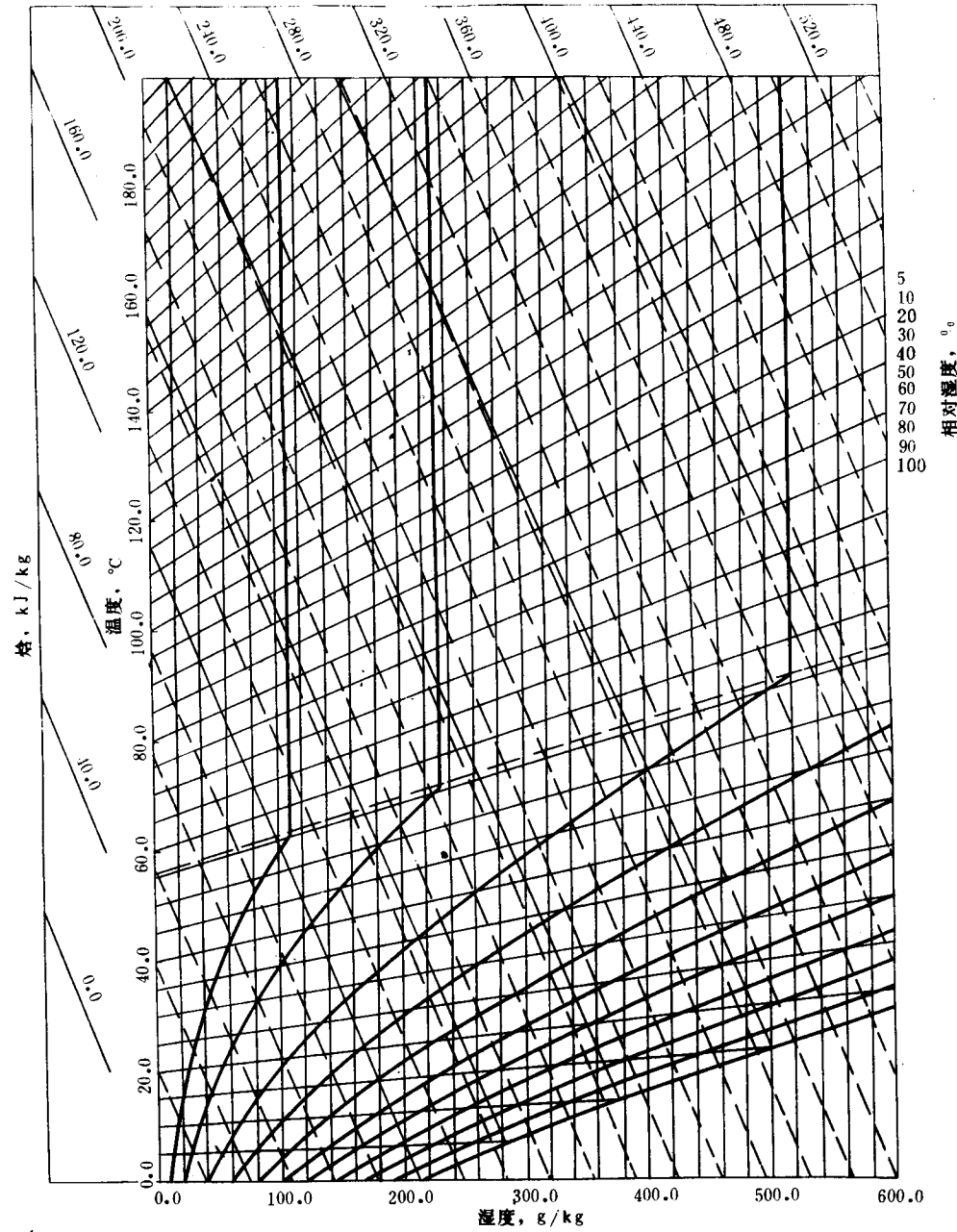


图 17-15 丙酮-氮气焓-湿图
(压力 101.325kPa)

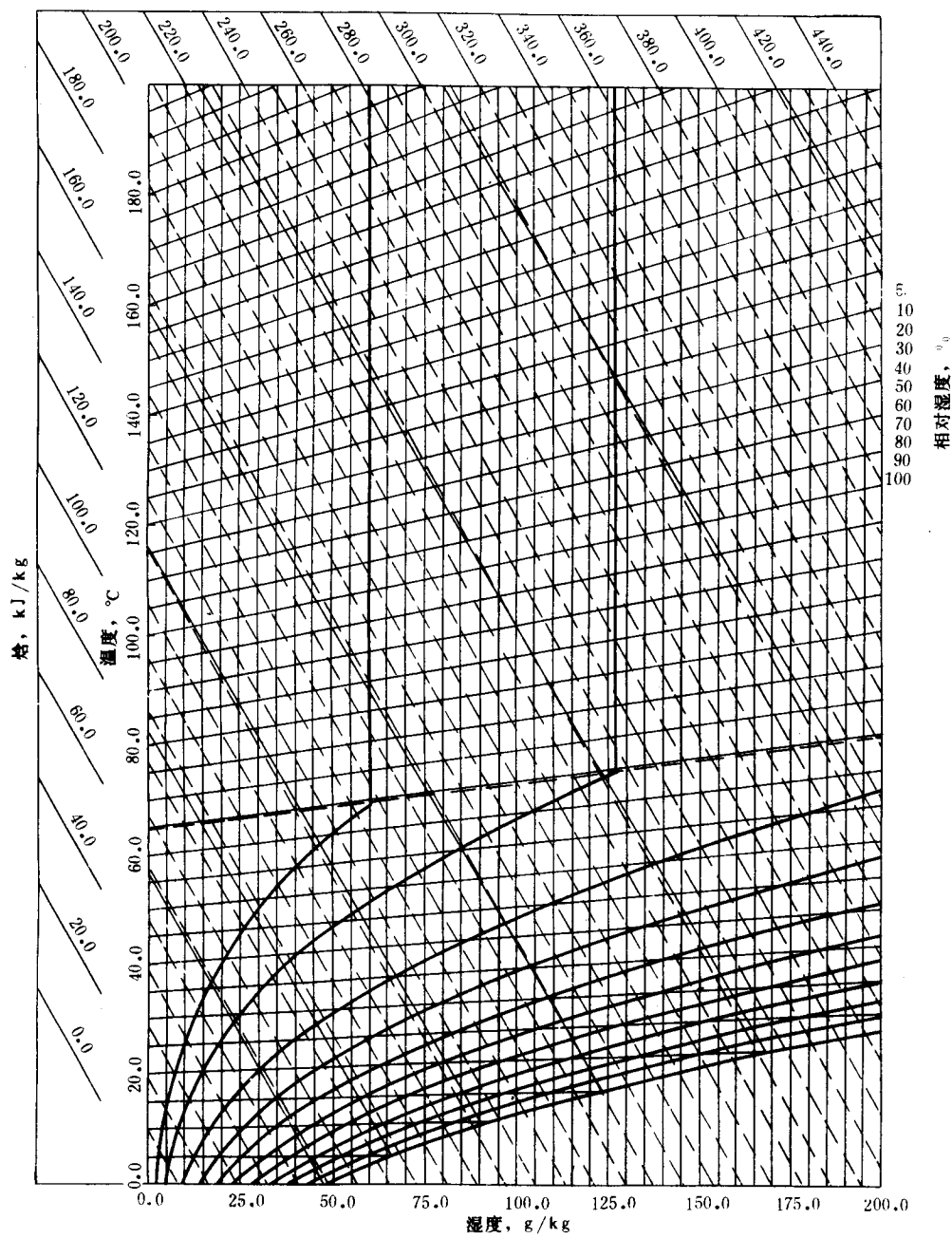


图 17-16 甲醇-氮气焓-湿图
(压力 101.325kPa)

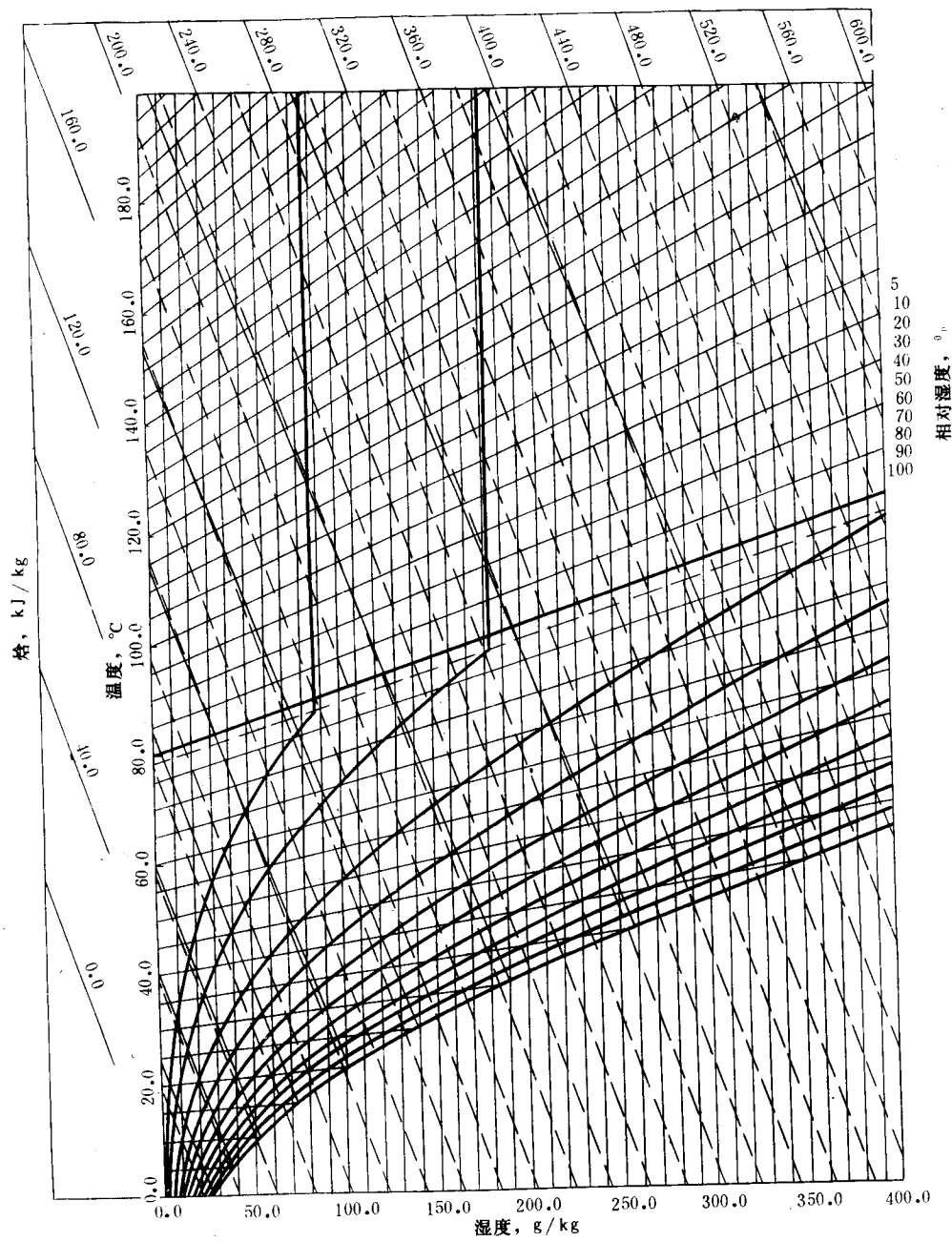


图 17-17 乙醇-氮气焓-湿图
(压力 101.325kPa)

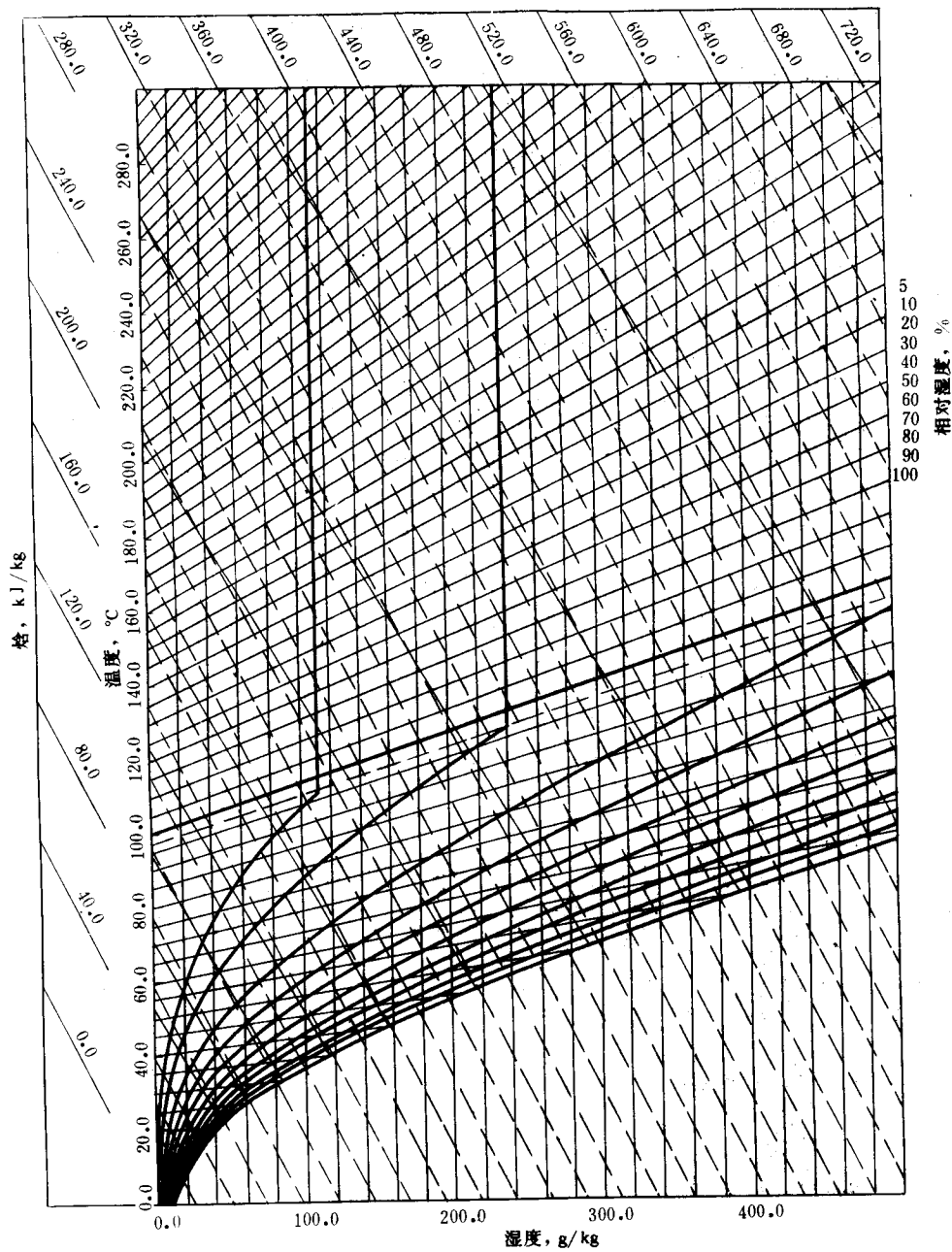


图 17-18 丙醇-氮气焓-湿图
(压力 101.325kPa)

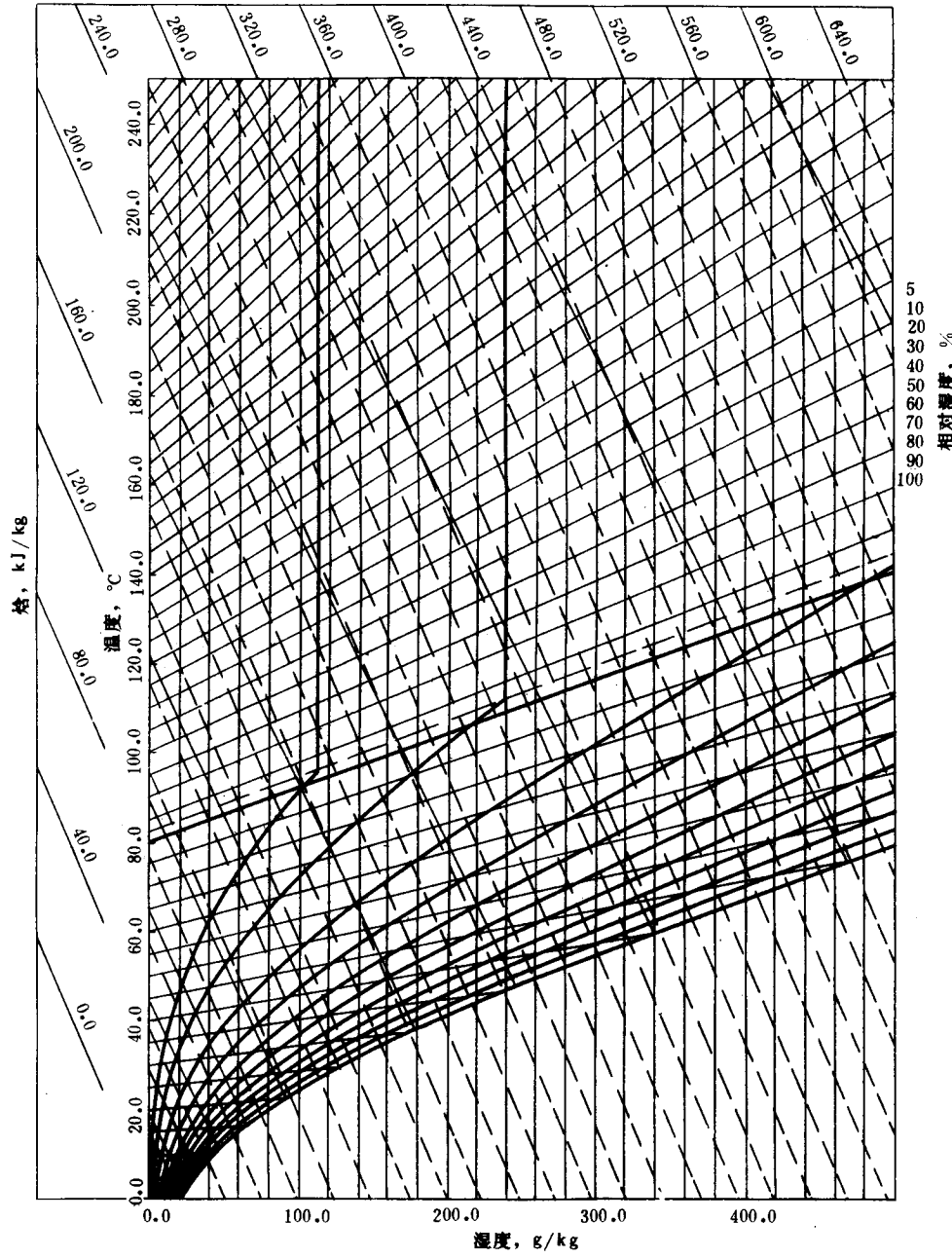


图 17-19 异丙醇-氮气焓-湿图
(压力 101.325kPa)