

干燥原理及应用

[美] R.B. 基伊 著



上海科学技术文献出版社

干燥原理及其应用

〔美〕 R. B. 基 伊 著

王士璠 章 丰 包家鹤 译

上海科学技术文献出版社

DRYING
PRINCIPLES AND PRACTICE

by

R. B. KEEY

PERGAMON PRESS

OXFORD • NEW YORK • TORONTO

SYDNEY • BRAUNSCHWEIG

干燥原理及其应用

[美] R. B. 基伊著

王士璠 章 韬 包家鹤 译

上海科学技术文献出版社出版
(上海市武康路2号)

新华书店上海发行所发行
上海市印十二厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 13 字数 314,000

1986年1月第1版 1986年1月第1次印刷

印数: 1—5,900

书号: 15192·418 定价: 2.40 元

《科技新书目》105-273

目 录

第一章	绪论	(1)
第二章	湿气-固体关系	(26)
第三章	传递现象	(67)
第四章	热传递	(98)
第五章	固体中水分的移动	(154)
第六章	蒸发和增湿	(189)
第七章	在恒定的外界条件下干燥	(224)
第八章	分批干燥	(257)
第九章	连续干燥	(291)
第十章	特殊的干燥方法	(338)
第十一章	测量与控制	(352)
第十二章	工程应用	(377)

第一章 绪 论

干燥，通常用以描述将水从物料中除去的过程。凡是水分在加压或加热时从其结合的物料中分出的过程，均属本书讨论范围。本书不讨论用机械除去水分的方法，例如加压过滤法；只讨论加热去水的方法。再者人们必须将这里的加热脱水区别于类似蒸馏的方法，例如某些有机液共沸混合物的脱水。其次，与惰性气体带走蒸发水分的那些方法也有区别。

干燥可认为利用热从固体成品的混合物中除去挥发物质（湿气）。一般，主要的挥发物质指水，是我们所想除去的唯一成份，为此叫它“湿气”。

干燥的原因是随被干燥物料的不同而异。有时干燥是为运输方便和节约运输费用。矿物干燥后相对可增加煅烧厂的容量。有许多物料必须干燥达到在它出售时对湿含量的要求。其他，如食品干燥以便贮藏保管和在运输中不需要冷冻。目前有大量的热能消耗在工业干燥中，例如在苏联用于干燥的约占总燃料的百分之十五。

不同的方法具有不同的用途。综观干燥历史，人类早已为了每天所需，利用风和太阳来干制物料。同时在气候宜人的地区，常用的干燥法是仅将湿物暴露在空气中，但这种方法太慢而且靠不住。强制干燥的方法早就采用了。如将物料依次堆积起来形成沟槽，以利风吹。或用火烘代替太阳晒。远在铁器时代以前，欧洲潮湿的西部和北部边缘地带，在农业收获后曾建造窑炉干燥谷物。英国在十三世纪采用炉灶干燥陶瓷。

• 1 •

但是,几世纪以来,干燥方法仍是很原始的。法国工业技术在所谓工业革命以前的状况已描绘于 Diderot 有插图的商业大全中。纸在空调干燥室中分张进行干燥。成束的染色纱线悬挂在终年用煤油炉加热的干燥室的框架上,而毛织物则悬挂于布满称为挂布钩的木钉上。暴晒的砖瓦坯在煅烧之前均在棚中最后干燥,棚中坯料都有规则地迭成高堆以利于空气流通。同时,在炉灶上装置干燥绞绳,完全适合老年妇女工作。

一个世纪以后,1851 年在伦敦举办博览会, Tomlinson 编写了另一本博览会商标大全。此后,用手把纸层分开成型的缓慢而细致的过程被造纸机代替了。在造纸机中渗干的纸浆被压进和滚过热滚筒。如今机器的转速比较快了,但基本的操作原理几乎无变化。棉和麻织物也都是在通蒸汽圆筒上烘干的,但薄棉布只需在暖房中用长的木框绷紧,每块布约需 10 至 15 分钟就干了。博览会的观众能看到一种粉末状的,用“热除去水分”而产生的“固化牛奶”样品。可以看到,蔬菜也能在温热的炉灶上干制保藏。用简单的火炉可以干燥如淀粉和块状盐等物料。木料则仍是放在大气中干燥的。但也曾有过缩短干燥时间的设想:即将木材放入室中,而在靠近地板处通入热的干空气。

由于各行业需要更快的、可靠的干燥方法。所以实验性的工厂随之发展起来。此时缺乏考虑在其他行业中处理同类物料时可否采用的问题。除此之外,新的干燥方法在十九世纪末已开始提出。1877 年德国专利局成立,翌年研制了第一台辐射热干燥器。四年后又创制了一台真空干燥器。这些创新逐渐被工业界所采用,丰富了干燥技术的内容。

本世纪初, Hausbrandl 写了短文论文,关于在给定的干燥负荷下所需的加热和通风。但以后工作做得很少,直到最近,才弄清楚作为合理的操作和设计基础的干燥过程。突出的例子

是 Luikov 的传热和水分传递两者不可分割的总体分析和 Krischer 的论文关于干燥工艺学的科学基础。将此类新知识充实到古老的技术中去,就可能促使生产成本大大下降和应用范围不断扩大。

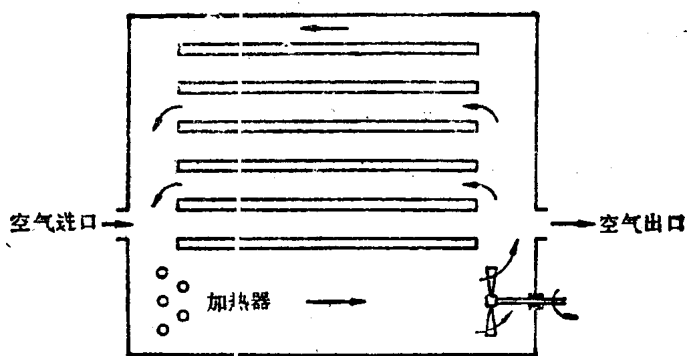
干 燥 方 法

广义的说干燥方法可以按照供热方法,操作方式,以至是连续的或是成批的性质来划分。连续工作的干燥器与相同容量的成批干燥器比较,具有所需的劳动力少、燃料省、占地面积小等优点,同时能生产较均匀的产品。但是成批干燥器的投资和维修费用小,便于操作和使用,能适用多方面的变化。所以在选用它时应考虑是否在同一装置中干燥大量物料,或干燥过程是否长而复杂。成批干燥器应选择用于被干燥的物料量很小,而要连续生产则需花非常大的成本,以配备很多辅助设备的场合。一般来说,生产量在 5000 kg/天以下时最好用成批干燥器,而大于 50,000 kg/天用连续干燥器。

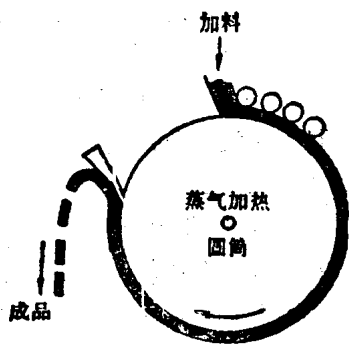
四种加热方法分别为:传导、对流、辐射和高频。

大多数加热干燥器为对流加热,这是由于蒸发和带走湿气的热空气温度和湿度容易控制的缘故。因为物料温度不会超过进口的空气温度,所以被干燥的物料可以避免过热。当然,对流干燥器由于出口气体中大量显热损耗,以致其热效率不高。蒸发的溶剂很难从这些气体中回收,同时从气流中淘洗掉很细的粉末也是麻烦的。对流干燥器的普通实例,即盘架式干燥器,在此干燥器内被干燥的物料放在浅盘中而热空气吹过它(图 1.1a)。

假如被干燥的物料很薄或很湿时,则可采用传导加热。因为蒸发水分的热量是从热表面经过物料的,所以热经济性好,但

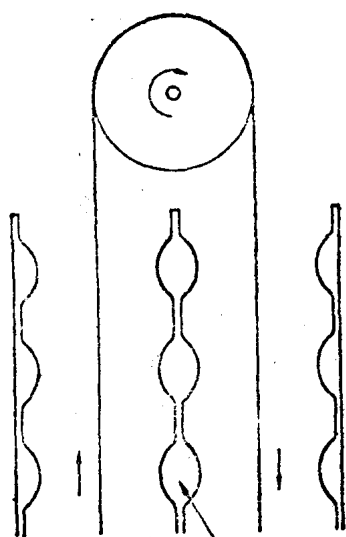


(a)



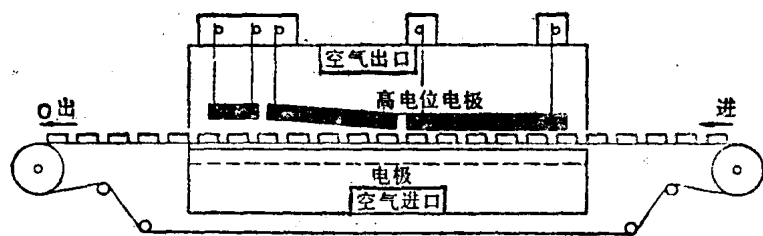
(b)

图 1.1 干燥中
(a) 对流的盘架干燥器; (b) 传导的转鼓干燥器;



装有液体的辐射器

(c)



(d)

的加热方法

(c) 辐射干燥纸张; (d) 介电的, Bremer 原理

干燥温度比对流干燥高。浆料可以涂布在慢慢旋转的加热转鼓上,当鼓旋转时,水分就蒸发,最后已干的物料用刀刮下(图1.1b)。薄片物料,例如纸制品可以铺在热滚筒的车上,蒸发就在滚筒上面和邻近滚筒之间的空间进行。几乎任何物料都可铺在循环的传动带上,以通过加热箱。但此法对于自由流动的颗粒是不很经济的。此类物料最好用对流干燥器,特别是在干燥时,可将这些颗粒物全部或部分地输送到加热的气流中。

能量可由各种电磁辐射源供给。它的波长范围可从太阳辐射到微波波长($0.2\text{ m} \sim 0.2\text{ }\mu\text{m}$)。在此波段范围内的辐射几乎没有穿透到暴露物料表面以外的地方。同时大部分物料仅能吸收 $4 \sim 8\text{ }\mu\text{m}$ 的波段,红外线加热用于干燥影片、涂层和相纸样的薄片物料。适宜的辐射器包括低温的用液体加热的金属嵌板(图1.1o)和高温的石英灯。

当电解质物料放在高频($\sim 10\text{ MHz}$)振荡电场中时,电能潮湿的电介质中转变为热能,不象已讨论过的其他方法那样,介电加热发生在整个物料的内部。因为液体的介电常数比固体大得多,随着水含量增加时由物料中介电损失所产生的热量就很快地增加。这种性质可提供方便的、自动适应的、能得到均匀干物料的方法。由于从高频设备中所产生的能量比从其他能源中产生的贵,故工业性的高频干燥仅用于少数地方,如干燥成型的木块等(图1.1d)。

水分含量和湿度

湿物料所含的水分量可用物料总量(湿基)或干物料(干基)为基准的水分含量表示。湿物料的水分含量可定义为干物料量与水分量之比。设在干燥前湿物料的水分含量为 X_1 ,干物料的水分含量为 X_2 ,则每单位干物料的蒸发量为 $(X_1 - X_2)$ 。因为

单位绝对干物料中的干成品量为 $(1+X_2)$ ，故每单位成品的蒸发量，即比蒸发量 E 为 $(X_1-X_2)/(1+X_2)$ 。例如干的纸张从水分含量从 65% 干燥到 8% 时，可求得：

$$E = \left(\frac{65}{35} - \frac{8}{92} \right) / \left(1 + \frac{8}{92} \right) = 1.63$$

所以比蒸发量为 1.63 kg 水/kg 出料。

湿物料上面的气体是潮湿的，其水分含量或湿度也可用质量-比基准表示。故气体的湿度为水汽量与完全干的气体质量之比。如果足够的液体 A 与干气体 B 接触，则液体蒸发至平衡，即汽-气混合物中 A 的分压达到该温度下液体的蒸汽压 p_A^0 。此汽-气混合物就说是被饱和了。在饱和时，水汽对于气的摩尔比是 $p_A^0/(P-p_A^0)$ ，式中 P 为总压(强)。因为在大气压下，湿气体常用理想气体定律来描述，这在工程计算中已够准确，故饱和时的湿度 Y_s 可写成质量比：

$$Y_s = \frac{p_A^0}{P-p_A^0} \cdot \frac{M_A}{M_B} \quad (1.1)$$

对于空气-水蒸气混合物， p_A^0 和 Y_s 的值见附表 A1，其分子量比 M_A/M_B 为 0.622。

习惯上，相对湿度 ψ 是不饱和气体中水汽的摩尔浓度与饱和时浓度之比，所以

$$\psi = \frac{c_A}{c_{As}} = \frac{p_A}{p_A^0} \quad (1.2)$$

根据定义

$$Y = \frac{p_A}{(P-p_A)} \cdot \frac{M_A}{M_B} = \frac{\psi p_A^0}{(P-\psi p_A^0)} \cdot \frac{M_A}{M_B} \quad (1.3)$$

从而得：

$$\frac{Y}{Y_s} = \psi \cdot \frac{(P-p_A^0)}{(P-\psi p_A^0)} \quad (1.4)$$

因此只有当蒸汽少量存在时，相对湿度将是湿度 Y 与饱和湿度

Y_s 之比。遗憾的是,物质比(湿度)和摩尔比(相对湿度)已在文献中固定了。这种二重性的产生是因为物质比便于绘出设备的物料平衡曲线,而摩尔比则便于考虑水分和固体的关系。

干燥器的物料平衡

连续操作

连续工作的干燥器首先考虑的是其全部情况均不随时间而改变,除其瞬间行为不是稳定状态的。因为干燥器是封闭系统,物料中蒸发的水分全部被干燥介质带走。经过干燥器(图 1.2)的总物料平衡为:

$$L(X_1 - X_2) = \pm G(Y_1 - Y_2) \quad (1.5)$$

式中 L 是干固体的流量 (kg/s); G 是绝对干燥气体的流量 (kg/s); 下角 1 表示固体进口位置; 下角 2 为固体出口; 负号表示气体和固体同方向前进; 正号表示逆流。

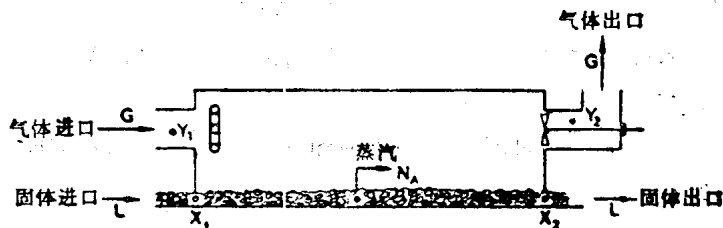


图 1.2 连续干燥器

式(1.5)可以重新整理得出逆流操作时的水分平衡式:

$$(\text{进料}) LX_1 + GY_2 = LX_2 + GY_1 (\text{出料}) \quad (1.6)$$

假定有些潮湿的出口气体在进口处再循环以改善热的经济性(见图 1.2)。令 r 为再循环比, 即送回的干气体量与通过干燥器的总量之比, 于是水分平衡式变成:

$$\begin{aligned} (\text{进料}) L X_1 + (1-r) G Y_2 + r^* G Y_1^* &= L X_2 + G Y_1^* (\text{出料}) \\ (1-r) G (Y_1^* - Y_2) &= L (X_1 - X_2) \end{aligned} \quad (1.7)$$

比较式(1.5)和(1.7)可得:

$$\begin{aligned} r &= 1 - (Y_1 - Y_2) / (Y_1^* - Y_2) \\ &= (Y_1^* - Y_1) / (Y_1^* - Y_2) \end{aligned} \quad (1.8)$$

当再循环比增大时, 出口气体的湿度 Y_1^* 升高, 同时新鲜气体被再循环的载湿气体所冲淡。干燥器内的气体仅有较低的吸收水分的势能, 故需较大的干燥器。干燥器较大的投资被较低的热负荷抵消, 所以要有一个能产生最小操作费用的再循环比。

分批操作

对于分批工作的干燥器要提出简单的物料平衡式是困难的。因为在干燥器内, 其干燥速度、湿度和水分含量是随时间和位置变化的。但人们可以对一个小区域写出水分平衡式, 在此区域中被干燥物料是均匀潮湿的(图 1.3)。令此区域的长度为 dz , 干燥器的截面积为 S ; 令 ε 为气体流过的有效部分面积, 假定气体是均匀分布。若 ρ_g 和 ρ_s 分别为干气和固体的密度, 在此

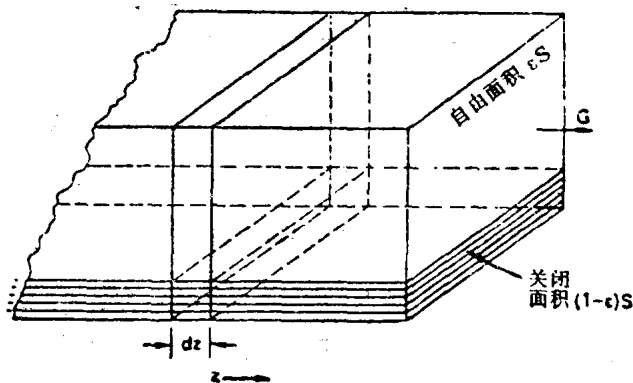


图 1.3 分批干燥器

* 原文无此 r , 疑有误——译者

区域中干气的量为 $\rho_g \varepsilon S dz$, 而干物料的量 $\rho_s(1-\varepsilon)S dz$ 。

从湿固体中蒸发的水分量应等于加入干气中的水分量和因对流而逸出的水分量之和。因此当干燥器的截面积均匀时,

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} (X \rho_s(1-\varepsilon)S dz) \\ = \frac{\partial}{\partial z} (Y G \varepsilon S dz) + \frac{\partial}{\partial \tau} (Y \rho_g \varepsilon S dz) \end{aligned} \quad (1.9)$$

式中 G 为干气的比流量 ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$)。

式(1.9)可简化成下式:

$$\rho_s(1-\varepsilon) \frac{\partial X}{\partial \tau} = \varepsilon \left[G \frac{\partial Y}{\partial z} + \rho_g \frac{\partial Y}{\partial \tau} \right] \quad (1.10)$$

人们可以希望气体中的水汽量随时间而变化很慢。这样, 在干燥器中由于连续的增湿就会产生明显的温度梯度; 再有, 在通常工业条件下 $G/\rho_g \sim 10^4$, 所以式(1.10)中的最后一项可略, 而水分平衡式变成:

$$\rho_s(1-\varepsilon) \frac{\partial X}{\partial \tau} = \varepsilon G \frac{\partial Y}{\partial z} \quad (1.11)$$

但式(1.11)不能单独解, 物料衡算结合速率和平衡关系可用以描述分批干燥。

然后, 在有规律的间距内如果能取得出口气体的湿度数据, 则可列出与式(1.5)相似的物料衡算式:

$$B(X_n - X_{n+1}) = -G \left[Y_1(\tau_{n+1} - \tau_n) - \int_{\tau_n}^{\tau_{n+1}} Y_2 d\tau \right] \quad (1.12)$$

上式中, B 为干料(kg)的总负荷, τ 为时间(s), 即取读数的时间。当在相等间距的时间内可观察得到数据, 则上述被积分的函数, 可由 Simpson 规则容易地估算出来。

焓

任何物体正常时均具有内能，并可用分子运动的位能和动能证明之。内能 U 的绝对值是不知道的。但在选择的基准温度以上，可给出其相对值。在稳定流动过程中，有附加的能量以克服压力，强制物料流入系统，同时强制流出。于是每单位物质的流动功为 PV ，此处 P 为压力 (kN/m^2)， V 为比容 (m^3/kg)。为方便起见，将内能和物流动能组合起来，此组合的能量就叫做焓 H ，即其定义为：

$$H = U + PV \quad (1.13)$$

焓的单位为单位质量的能量，即 kN/kg ，或 kJ/kg 。象内能一样，焓的绝对值是不能定的，只有相对值。在干燥时，它主要包括空气-水系统，焓为零的参考状态是选在 0°C 时的液体水，这时它本身的蒸汽压为 0.61 kN/m^2 。严格地说，这个参考状态是

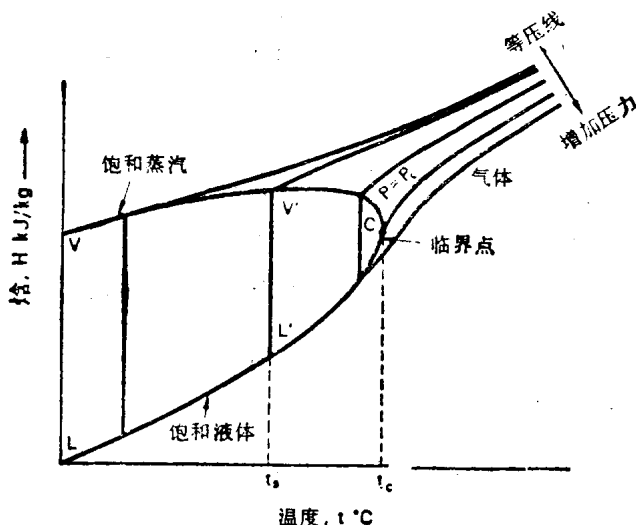


图 1.4 纯物质在液体、蒸汽和气态时等压的焓-温度图

虚拟的, 因为水的三相点温度是 0.0098°C 。

图 1.4 表示某一种纯物质在所有的聚合状态, 除固体外, 其焓随温度而等压变化。在低压时, 可用理想气体定律, 其蒸汽的焓几乎与压力无关, 它们的等压线互相接近重迭。包围线 VOI 与液体的常压曲线 (曲线 OL) 相切。它们的焓差 $V'L'$ 相当温度 t_g 时的汽化潜热。当温度升高时, 焓差渐渐减小, 到临界温度 t_c 时变为零。

一个物体的热容可定义为单位物质温度升高所需的热量。对于等压过程, 热容 C_P 可写成:

$$C_P = \left(\frac{\partial Q}{\partial T} \right)_P \quad (1.14)$$

热流 dQ 为内能变化 dU 与对压力 $P dV$ 所作的功, 故式 (1.14) 可写成:

$$C_P = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_P + P \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P \quad (1.15)$$

从图 1.4 的等压线可产生热容, 用式 (1.14) 来定义热容是不方便的, 故可取一定温度范围内的平均热容 $\bar{C}_P$ 。

$$\bar{C}_P = \left(\frac{\Delta Q}{\Delta T} \right)_P = \frac{\int_{T_1}^{T_2} C_P dT}{T_2 - T_1} \quad (1.16)$$

式 (1.16) 在计算中较有用。一个温度的二次多项式可以很好地描述气体在 300 到 1500 K 范围内的热容数据 C_P 。

如果

$$C_P = a + bT + cT^2 \quad (1.17)$$

则式 (1.16) 为:

$$\bar{C}_P = a + \frac{b}{2} (T_2 + T_1) + \frac{c}{3} (T_2^2 + T_2 T_1 + T_1^2) \quad (1.18)$$

对于普通气体, 因为 b/c 在 10^3 和 10^4 之间, 式 (1.18) 中的第三项可以忽略, 则其平均热容就成了算术平均温度下的热容。同

样也可以得到液体和固体的平均热容。

潮湿气体的热容象湿度一样是以单位质量的干气体为基准的。于是, 湿热 $\bar{C}_{PY}$ 可定义为单位质量的干气体及其结合的水汽温度升高时所需的热量。

$$\bar{C}_{PY} = \left(\frac{\Delta Q}{\Delta T} \right)_{PB} + Y \left(\frac{\Delta Q}{\Delta T} \right)_{PA} = \bar{C}_{PB} + Y \bar{C}_{PA} \quad (1.19)$$

式中下角 B 指干气, A 指水汽。在 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 温度范围内, 空气的 $\bar{C}_{PB}$ 可取为 1 kJ/kg K , 而水汽的 $\bar{C}_{PA}$ 约为 2 kJ/kg K 。比较准确的数值列于附表 A1 中。事实上, 湿空气的热容和完全干燥的空气之间无多大差异。在 55°C 以下, 湿的饱和空气的热容比干空气的稍大一些, 但也不大于 10% 。

在无相变化时, 从式(1.15)和(1.16)中可得到纯物质的焓, 即从热容中估算得到:

$$H = \bar{C}_P \theta \quad (1.20)$$

式中 θ 为前面选择的基准以上的多余温度, $\bar{C}_P$ 为在该温度范围内的平均热容。若基准取 0°C , 则气体在 $t^\circ\text{C}$ 的焓就等于 $\bar{C}_{Pt}t$, 而在同温度下液体的焓为 $\bar{C}_L t$ 。

湿固体内的大多数液体是不受约束的, 其蒸汽压等于在同温度下纯液体的蒸汽压。一部分的水分是被化学的和物理的力束缚的, 这种水分由于吸着要能量, 所以它的焓比纯液体的小。但仅在水分含量很小时, 才需要将吸着热来校正水分的焓。为了方便起见, 常用复合焓 i_L , 即全干物料单位质量的焓和它结合的水分,

$$i_L = (\bar{C}_L X + \bar{C}_S) t - X \Delta H_w \quad (1.21)$$

式中 ΔH_w 为吸着或束缚在物料上的平均焓。通常 $X \Delta H_w$ 的乘积比 $\bar{C}_S t$ 小得多, 可以忽略。

对于有相变化的物质, 焓应包括潜热一项, 即或是冷凝潜热