

# 噴霧干燥

〔苏〕M. B. 雷柯夫著

食品工業部上海科學研究所食品工業研究室譯

8.6

輕工業出版社

# 噴霧干燥

[苏] M. B. 雷柯夫 著

輕工業部上海科学研究所食品工業研究室譯



輕工業出版社

1958年·北京

## 內 容 介 紹

本書綜合有关各种溶液噴霧干燥的理論和實驗資料，闡明了噴霧設備的選擇和計算方法、噴霧干燥裝置及輔助設備的热量衡算方法，提供了選擇各种溶液最适宜的干燥制度的原理，並描述了噴霧干燥机的操作流程。

本書可供食品工業和化学工業企業及設計機構的工程技術人員參考，亦可供有关大学院校師生閱讀。

本書由輕工業部上海科學研究所食品工業研究室尹宗倫（五、六章）、宋瑜（一、二、三章）、鍾成竹（七、八章）、薊策（四章）四同志合譯（以姓氏筆畫為序），並由尹宗倫最後整理。

М. В. ЛЫКОВ  
СУШКА  
РАСПЫЛЕНИЕМ  
ПРИЦЕПРОМИЗДАТ, МОСКВА—1955

本書根據蘇聯國立食品工業出版社 1955 年版譯出

## 噴 霧 干 燥

〔蘇〕М. В. 雷 柯 夫 著

輕工業部上海科學研究所食品工業研究室譯

輕工業出版社出版

（北京市廣安門內白廠路）

北京市書刊出版業營業許可證出字第 000 号

北京市印刷二廠印刷

新華書店發行

850×1168 公厘 1/32 • 6<sup>14</sup>/<sub>32</sub> 印張 • 140,000 字

1958 年 4 月第 1 版

1958 年 4 月北京市第 1 次印刷

印數：1—4,000 定價：(10) 1.24 元

統一書號：15042 • 食 155 • (215)

# 目 录

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 緒 言 .....                     | 4   |
| 第一章 湿气体热力学的若干基本概念 .....       | 7   |
| 湿气体的基本性質 .....                | 7   |
| 干燥潛势 .....                    | 14  |
| 湿空气圖 .....                    | 15  |
| 第二章 噴霧干燥 .....                | 16  |
| 噴霧干燥的基本特点 .....               | 16  |
| 溶液的特性 .....                   | 19  |
| 噴霧分散度和干燥粉末的特性 .....           | 20  |
| 測定噴霧液滴和干燥粉末分散度的試驗方法 .....     | 30  |
| 第三章 噴霧干燥机的物料平衡和热量平衡 .....     | 40  |
| 干燥机的物料平衡 .....                | 40  |
| 用热空气干燥时设备的热量平衡 .....          | 42  |
| 用热空气干燥的干燥过程在 I-d 圖上的構圖 .....  | 43  |
| 用烟道气干燥 .....                  | 45  |
| 利用烟道气干燥的干燥过程在 I-d 圖上的構圖 ..... | 48  |
| 第四章 溶液的噴霧 .....               | 50  |
| 机械式噴霧器噴霧 .....                | 51  |
| 机械式噴霧的优缺点 .....               | 63  |
| 气流式噴霧器噴霧 .....                | 64  |
| 气流式噴霧的优缺点 .....               | 76  |
| 离心盤噴霧 .....                   | 77  |
| 离心盤噴霧的优缺点 .....               | 90  |
| 第五章 噴霧干燥时的热交換和質交換 .....       | 91  |
| 干燥室的气体动力学 .....               | 91  |
| 純淨液体液滴的蒸發 .....               | 100 |
| 溶液的干燥 .....                   | 111 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| <b>第六章 干燥成品的收集</b> .....        | 125 |
| 从干燥机卸出粉末.....                   | 125 |
| 从气流中分离粉末.....                   | 126 |
| 除塵設備的選擇.....                    | 141 |
| 开閉器.....                        | 142 |
| <b>第七章 干燥的热源</b> .....          | 145 |
| 空气預热器.....                      | 146 |
| 爐灶.....                         | 155 |
| <b>第八章 噴霧設備流程和干燥制度的選擇</b> ..... | 158 |
| 噴霧設備的結構和操作流程.....               | 158 |
| 某些物料的干燥.....                    | 175 |
| 最适宜的干燥制度的選擇.....                | 179 |
| 噴霧干燥机計算举例.....                  | 184 |
| 索引.....                         | 199 |
| 文献.....                         | 203 |

# 噴霧干燥

〔苏〕M. B. 雷柯夫 著

輕工業部上海科学研究所食品工業研究室譯

輕工業出版社

1958年·北京

# 目 录

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 緒 言 .....                     | 4   |
| 第一章 湿气体热力学的若干基本概念 .....       | 7   |
| 湿气体的基本性質 .....                | 7   |
| 干燥潛勢 .....                    | 14  |
| 湿空气圖 .....                    | 15  |
| 第二章 噴霧干燥 .....                | 16  |
| 噴霧干燥的基本特点 .....               | 16  |
| 溶液的特性 .....                   | 19  |
| 噴霧分散度和干燥粉末的特性 .....           | 20  |
| 測定噴霧液滴和干燥粉末分散度的試驗方法 .....     | 30  |
| 第三章 噴霧干燥机的物料平衡和热量平衡 .....     | 40  |
| 干燥机的物料平衡 .....                | 40  |
| 用热空气干燥时設備的热量平衡 .....          | 42  |
| 用热空气干燥的干燥过程在 I-d 圖上的構圖 .....  | 43  |
| 用烟道气干燥 .....                  | 45  |
| 利用烟道气干燥的干燥过程在 I-d 圖上的構圖 ..... | 48  |
| 第四章 溶液的噴霧 .....               | 50  |
| 机械式噴霧器噴霧 .....                | 51  |
| 机械式噴霧的优缺点 .....               | 63  |
| 气流式噴霧器噴霧 .....                | 64  |
| 气流式噴霧的优缺点 .....               | 76  |
| 离心盤噴霧 .....                   | 77  |
| 离心盤噴霧的优缺点 .....               | 90  |
| 第五章 噴霧干燥时的热交換和質交換 .....       | 91  |
| 干燥室的气体动力学 .....               | 91  |
| 純淨液体液滴的蒸發 .....               | 100 |
| 溶液的干燥 .....                   | 111 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| <b>第六章 干燥成品的收集</b> .....        | 125 |
| 从干燥机卸出粉末.....                   | 125 |
| 从气流中分离粉末.....                   | 126 |
| 除塵設備的選擇.....                    | 141 |
| 开閉器.....                        | 142 |
| <b>第七章 干燥的热源</b> .....          | 145 |
| 空气預热器.....                      | 146 |
| 爐灶.....                         | 155 |
| <b>第八章 噴霧設備流程和干燥制度的選擇</b> ..... | 158 |
| 噴霧設備的結構和操作流程.....               | 158 |
| 某些物料的干燥.....                    | 175 |
| 最适宜的干燥制度的選擇.....                | 179 |
| 噴霧干燥机計算举例.....                  | 184 |
| 索引.....                         | 199 |
| 文献.....                         | 203 |

## 緒 言

在原料資源豐富的我國，隨着工業和農業的發展，干燥技術已具有重大的國民經濟的意義，幾乎沒有一個工業部門不利用干燥操作。

目前，干燥技術已成為獨立的部門，它的基本的建立，在我國遠較國外為早；特別是在偉大的十月社會主義革命以後，有關物料干燥的科學，已得到巨大的發展。

干燥技術包括各種科學項目，其中主要是熱交換和質交換的學說。熱交換和質交換的學說，以 М. В. 羅蒙諾索夫 (Ломоносов) 首創的物質和能量不滅定律為基礎。必須指出，М. В. 羅蒙諾索夫研究出的理論問題，不是抽象的而是與研究試驗相結合的。

和 М. В. 羅蒙諾索夫同時，Г. В. 利赫曼 (Рихман) 在彼得堡科學院從事熱過程的研究。當研究液體蒸發時，他發現了“濕球溫度計”效應，由此而創立了對流的熱交換定律。

熱力學的研究，在俄羅斯科學研究機構中繼續不斷地進行，並經常保證了對俄羅斯科學起主導作用，科學的發現，與 Ф. Ф. 彼得魯舍夫斯基 (Петрушевский)、А. Г. 斯托列托夫 (Столетов) 和 Н. А. 烏莫夫 (Умов) 等學者的名字是分不開的。

物質（水份）內部轉移學說的發展，和農業物理學、土壤學的發展歷史有關。這裡，著名的土壤學家 В. В. 多庫察耶夫 (Докучаев) 和他的學生們 А. А. 伊茲麥洛夫斯基 (Измайловский) 和 П. С. 柯索維奇 (Коссович) 起了非常重大的作用。柯索維奇教授首先創立了在各個不同時期具有各種規律性的土壤干燥過程的週期性。

熱交換和質交換的研究，在目前已具有特別巨大的規模。

正如苏联其他科学部門一样，苏联热物理学的发展是和实践紧密联系的。我们的学者——А. С. 普列德沃季捷列夫(Предводителев)院士、М. В. 基尔皮切夫(Кирпичев)院士和А. А. 古赫曼(Гухман)教授等——都曾致力于热交换和质交换问题的研究。

苏联学者——А. В. 雷柯夫(Лыков)教授、Ю. Л. 卡夫卡左夫(Кавказов)教授、Г. К. 費洛年柯(Филоенко)教授、Б. Н. 波斯諾夫(Поснов)教授、П. Д. 列別傑夫(Лебедев)教授等——使干燥技术成功地发展着。科学技术博士 П. М. 費多罗夫(Федоров)的工作，具有重大的意义。科学技术碩士 А. П. 伏罗希洛夫(Ворошилов)、教授 М. Ю. 魯利耶(Лурье)、科学技术博士 Н. М. 米哈伊洛夫(Михайлов)等，对祖国干燥机結構的創建，曾有过莫大的贡献。

噴霧干燥法应用在工業上已经有五十多年了，但只到现在才被广泛地採用。此种干燥方法特別常用在食品工業、乳品工業、医药工業和化学工業中。在我国，随着农业的巨大高涨和食品工業广阔的发展，噴霧干燥法更具有重大的意义。用这种方法，能生产出质量优良的干制产品，能使产品保存维生素和 other 可贵的特性。亦能使食品很好地罐藏和長期地保存，並降低运输費用和减少包裝費用。

噴霧干燥时，發生像溶液的分散、热交换和质交换、从气流中分出粉末等等的过程。介質和高分散度物質的相互作用，不仅应用于噴霧干燥，亦同样应用于其他过程，如固体或液体燃料的燃燒和化学反应等等。高分散度物質的作用过程进行得非常剧烈，因此它在今后的发展中有着巨大的前途，並將广泛地应用在各个不同的工業部門。

现在已积累了大量有关噴霧干燥的實驗資料，这种干燥方法的理論基础已經研究出来，科学技术博士 Л. И. 庫德列耶朔夫(Кудряшов)和講師 А. М. 拉斯托夫切夫(Ластовцев)的工

作，有着重大的意义。在我国，对干燥技术起主导作用的，当推 Ф. Э. 捷尔任斯基全苏热工研究所干燥試驗室(ВТИ)、莫斯科化学机器制造研究所干燥試驗室(МИХМ)、В. М. 莫洛托夫莫斯科动力研究所(МЭИ)、影片科学研究所(НИКФИ)、莫斯科食品工業工艺学院(МТИИП)等科学机构。

本書綜合叙述了噴霧干燥的理論和实验資料，拟定了噴霧設備中热的計算方法，並介紹了选择最适宜的干燥制度的原理。

## 第一章 湿气体热力学的若干基本概念

### 湿气体的基本性質

干气体与任何液体蒸气的混合物称为湿气体。湿气体的状态由温度和压力来决定。假定液体过热蒸气为理想气体，则对湿气体可采用理想气体方程式。干气体与液体蒸气压力之和即等于湿气体的总压。

$$P_0 = P_n + P_i \quad (\text{I-1})$$

式中： $P_0$ —气压计所示的总压（毫米，水银柱），

$P_n$ —蒸气分压（毫米，水银柱），

$P_i$ —气体分压（毫米，水银柱）。

湿气体的特性可用下列参数来表示：温度、压力、体积、密度、湿度、湿含量、蒸气分压、热含量。

气体湿度可用绝对湿度或相对湿度来表示。

一立方米气体中所含液体蒸气的重量，称为气体的绝对湿度，因为混合物的体积等于各个组成份的体积，所以空气的绝对湿度即等于混合物中蒸汽的重量  $C_n$ （千克/米<sup>3</sup>）。

一立方米空气中所含蒸气的重量，与同温度、同压力（表压）、同体积下可能含有蒸气重量之比，称为空气的相对湿度  $\varphi$ （相对湿含量）。假若温度低于蒸气压力等于表压时的温度，那末蒸气的最大重量  $C_{\max}$  即等于同温度的饱和蒸气密度  $\gamma_n$ 。

$$\varphi = \frac{C_n}{C_{\max}} 100 = \frac{C_n}{\gamma_n} 100\% \quad (\text{I-2})$$

当温度超过沸点时，蒸气的最大重量等于该温度、该压力（表压）下过热蒸气的密度，由相应的特性方程式求得。

若对蒸气採用門德列也夫-克拉依彼龙 (Менделеев-  
клайперон) 方程式作近似計算, 就可以写成:

$$\varphi = \frac{P_n}{P_n} 100\%$$

式中  $P_n$ —該温度时的饱和蒸气压。

饱和蒸气压与沸点 ( $T_k = 273 + t_k^\circ C$ ) 之間的关系, 可用  
經驗式来表示:

$$\lg P_n = A - \frac{a}{T_k} \quad (I-3)$$

式中  $A$  与  $a$ —方程式常数。

根据 А. В. 包尔加爾斯基 (Болгарский)<sup>[7]</sup> 教授的数据,  
各种液体的  $A$  值与  $a$  值, 列于表 1。

表 1

| 液 体     | $A$ | $a$    | 温度范围 $^\circ C$ |      |
|---------|-----|--------|-----------------|------|
|         |     |        | 从               | 到    |
| 水.....  | {   | 5.9778 | +20             | +100 |
|         |     | 5.6485 | +100            | +200 |
| 氨.....  |     | 5.1472 | -50             | +30  |
| 碳酸..... |     | 4.703  | -50             | +30  |
| 乙醇..... |     | 6.266  | -20             | +120 |

通常按仟克干空气来进行干燥机的計算, 因为該数值在干  
燥过程中始終不变。

湿气体中所含蒸气的重量, 用仟克干气体重量表示, 称为  
湿含量  $d$  (克/仟克)。

气体湿含量等于

$$d = 1000 \frac{C_n}{C_{c,i}} \text{ 克/仟克} \quad (I-4)$$

或

$$d \approx 1000 \frac{M_n}{M_i} \cdot \frac{P_n}{P_0 - P_n} \text{ 克/仟克}$$

式中:  $C_{c.i}$ —干气体的浓度 (仟克/米<sup>3</sup>),

$M_n$  与  $M_i$ —蒸气与气体的分子量。

水蒸汽与空气的混合物的湿含量为:

$$d \approx 622 \frac{P_n}{P_0 - P_n} \text{ 克/仟克} \quad (\text{I-5})$$

湿气体的密度等于在同体积内干气体与液体蒸气浓度之和。

$$\gamma_{a.i} = C_{c.i} + C_n \text{ 仟克/米}^3 \quad (\text{I-6})$$

式中:

$$C_{c.i} = \gamma_{c.i}^0 \frac{273.16}{T} \cdot \frac{P_0 - P_n}{P_0},$$

$$\text{而} \quad C_n = \gamma_n^0 \frac{273.16}{T} \cdot \frac{P_n}{P_0},$$

$\gamma_{c.i}^0$ —干气体在 0°C 时的密度 (空气密度为 1.293 仟克/米<sup>3</sup>),

$\gamma_n^0$ —蒸气在 0°C 时的密度 (水蒸汽密度为 0.804 仟克/米<sup>3</sup>)。

$$\gamma_{a.i} = 0.289 \frac{P_0}{T} \cdot \frac{1000 + d}{\frac{804}{\gamma_{c.i}^0} + d} \text{ 仟克/米}^3 \quad (\text{I-7})$$

空气与水蒸汽的混合物的密度:

$$\gamma_{a.a} = 0.289 \frac{P_0}{T} \cdot \frac{1000 + d}{622 + d} \text{ 仟克/米}^3$$

用 1 仟克干空气表示的湿空气比容  $v_0$ , 可按下列式计算:

$$v_0 = 3.46 \frac{T}{P_0} \cdot \frac{622 + d}{1000} \text{ 米}^3/\text{仟克 干空气} \quad (\text{I-8})$$

湿空气密度乃可按下列式求得:

$$\gamma_{g.l.g} = \frac{1 + 0.001 d}{v_0} \text{ 仟克/米}^3$$

热容量：当压力不变时，蒸气与气体的热容量随温度的不同而有显著的变化。因此，在某种固定温度下的真正热容量 ( $\bar{c}$  仟卡/仟克·°C) 和在温度  $0 \sim t^\circ$  间的平均热容量 ( $c$  仟卡/仟克·°C) 是有区别的。

平均热容量，以后简称为热容量，可用下式确定：

$$C = \frac{\int_0^t \bar{c} dt}{(t - 0)} \text{ 仟卡/仟克} \cdot ^\circ\text{C} \quad (\text{I-9})$$

在干燥技术中，当压力不变时，蒸气与气体的混合物的湿气体热容量，可用仟克湿气体来表示 ( $C'_{g.l.g}$ )，也可用仟克干气体来表示 ( $C_{g.l.g}$ )。

用一仟克湿气体表示的湿气体的热容量等于：

$$C'_{g.l.g} = \frac{C_{c.g} + 0.001 d c_n}{1 + 0.001 d} \text{ 仟卡/仟克 湿气体} \quad (\text{I-10})$$

以 1 仟克干气体表示的湿气体的热容量等于：

$$C_{g.l.g} = C_{c.g} + C_n \frac{d}{1000} \text{ 仟卡/仟克 干气体} \quad (\text{I-11})$$

式中： $C_{c.g}$ —干气体的热容量 仟卡/仟克·°C，

$C_n$ —液体蒸气的热容量 仟卡/仟克·°C。

关系式 (I-10) 与 (I-11) 对于蒸汽和气体的真正热容量与平均热容量都是准确的。干空气和水蒸汽的真正热容量与温度的关系如图 1。

在由  $0^\circ\text{C}$  到  $500^\circ\text{C}$  的范围内，湿空气的平均热容量近似值，可按下式求得：

$$C_{g.l.g} = 0.244 + 0.45 \frac{d}{1000} \text{ 仟卡/}^\circ\text{C} \cdot \text{仟克 干空气}$$

热含量: 湿气体的热含量  $I$  等于蒸气与气体的混合物的各部分热含量之和。

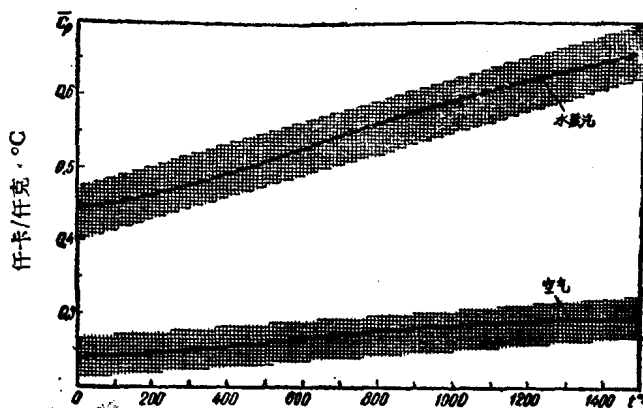


圖 1 热容量与温度的关系

以 1 仟克干气体表示的湿气体热含量等于:

$$I = \int_0^t \bar{C}_{c.v} dt + \frac{d}{1000} \left( i_0 + \int_0^t \bar{c}_n dt \right) \text{ 仟卡/仟克 干气体} \quad (\text{I-12})$$

式中:  $i_0$ —液体蒸汽在  $0^\circ\text{C}$  时的热含量 (仟卡/仟克),

或

$$I = C_{c.v} t + \frac{d}{1000} i_n \text{ 仟卡/仟克 干气体,}$$

式中:  $i_n$ —液体过热蒸汽的热含量 (仟卡/仟克)。

温度为  $t_n$  时, 存在于湿气体中的过热蒸汽的热含量等于:

$$i_n = i_n + c_n (t_n - t_p) \text{ 仟卡/仟克} \quad (\text{I-13})$$

式中:  $t_p$ —露点温度, ( $^\circ\text{C}$ ),

$i_n$ —饱和蒸汽的热含量, 等于:

$$i_n = c_m t + \gamma \text{ 仟卡/仟克,} \quad (\text{I-14})$$

式中:  $c_m$ —液体的热容量 (仟卡/仟克),

$r$ —蒸发比热 (仟卡/仟克)。

湿气体冷却到开始饱和时 ( $\varphi = 100\%$ ) 的温度, 称为露点温度  $t_p$ 。

过热蒸气的热含量, 可用下式确定:

$$i_{g,n} = 595 - 0.47 t \text{ 仟卡/仟克} \quad (I-15)$$

表 2 所列各种液体蒸发比热和沸点之间的关系。

表 2

| 蒸气                               | 关 系 式                                           | 温度范围 (°C) |      |
|----------------------------------|-------------------------------------------------|-----------|------|
|                                  |                                                 | 从         | 到    |
| H <sub>2</sub> O                 | $r = 597.2 - 0.545 t - 0.00038 t^2$             | 0         | +120 |
| NH <sub>3</sub>                  | $r = 301.5 - 0.85 t - 0.00264 t^2$              | -50       | + 50 |
| CO <sub>2</sub>                  | $r = 55.8 - 0.736 t - 0.0085 t^2 - 0.00009 t^3$ | -50       | + 20 |
| SO <sub>2</sub>                  | $r = 90.8 - 0.3018 t - 0.004324 t^2$            | -30       | + 40 |
| CH <sub>3</sub> Cl               | $r = 97.0 - 0.1733 t - 0.00144 t^2$             | -40       | + 40 |
| C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH | $r = 221.0 - 0.0374 t - 0.00188 t^2$            | 0         | +160 |

密度: 液体或气体的单位体积重量, 称为液体或气体的密度, 等于:

$$\gamma = \frac{\rho}{g} \text{ 仟克} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4 \quad (I-16)$$

式中:  $\rho$ —重度 (仟克/米<sup>3</sup>),

$g$ —重力加速度, 等于 9.81 米/秒<sup>2</sup>。

粘度: 实际气体与液体是具有粘度的。气体或液体运动时, 发生与其运动方向相反的摩擦力  $f$ , 根据牛顿定律, 此力与速度梯度成正比:

$$f = \eta \frac{dU}{dn} F \text{ 仟克} \quad (I-17)$$

式中:  $\frac{dU}{dn}$ —表面法线上的速度梯度 (1/秒),

$\eta$ —黏度系数 (仟克·秒/米<sup>2</sup>),

$F$ —面积 (米<sup>2</sup>)。