

# 化工单元设备资料

## 喷雾干燥 (三)

上海化学工业设计院医药农药工业设计建设组

编号：77-1-4

目 录

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 1. 喷雾干燥的操作和设计(21)..... | 1   |
| 2. 喷雾干燥的操作和设计(22)..... | 22  |
| 3. 喷雾干燥的操作和设计(23)..... | 47  |
| 4. 喷雾干燥的操作和设计(24)..... | 70  |
| 5. 喷雾干燥的操作和设计(25)..... | 89  |
| 6. 喷雾干燥的操作和设计(26)..... | 111 |
| 7. 喷雾干燥的操作和设计(27)..... | 134 |
| 8. 喷雾干燥的操作和设计(28)..... | 153 |

( 原文：化学装置，1972，No 11，No 12；1973，No 2，No 3，  
No 4，No 5，No 6，No 7 )

1977年7月

## 喷雾干燥的操作和设计(21)

### (b) 过热蒸汽中溶液等的干燥

特朗梅伦等人<sup>1)</sup>曾经在过热蒸汽中对各种溶液和悬浮液滴进行了干燥实验。

图1中示出了蔗糖溶液液滴在空气中与在过热蒸汽中水分与温度变化的实验结果。

当气体温度为150〔℃〕时，使用空气时的干燥速度较使用过热蒸汽时的干燥速度为快，而且最终产品也较漂亮，但有时形成粘结液滴。使用过热蒸汽进行干燥时，由液滴开始膨胀延续15〔秒〕后，在上述温度条件下的实验中，液滴发生破裂。

在250〔℃〕的气体中，过热蒸汽中的干燥速度较空气流中的干燥速度为快，而且在此温度条件下，无论在蒸汽中还是在空气中，均发生液滴的膨胀和破裂现象。

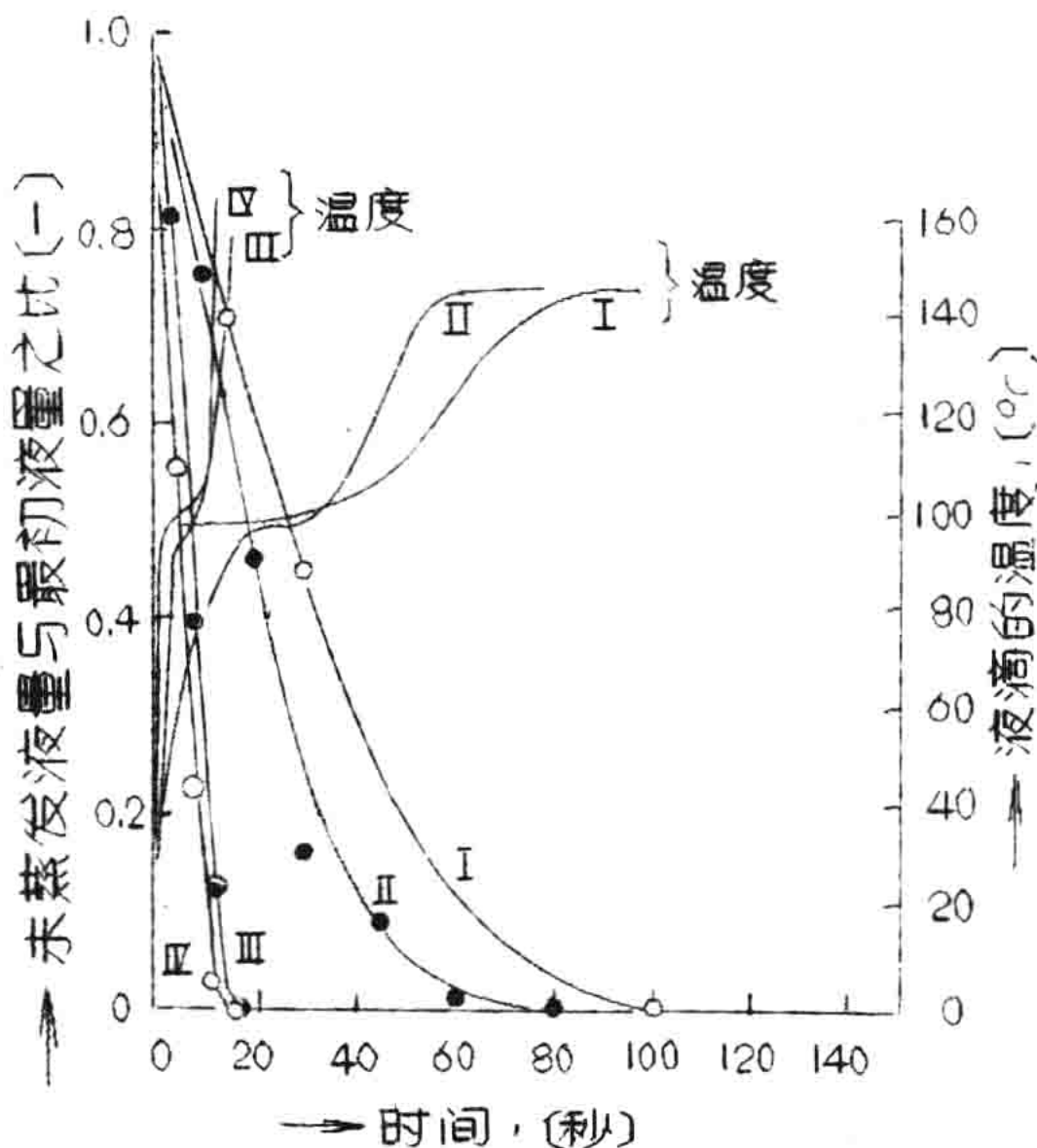


图1 蔗糖液滴的干燥  
(○ 过热蒸汽, ● 干燥空气)

|     | 最初的液滴重量, (毫克) | 气体温度〔℃〕 | 气体速度〔米/秒〕 |
|-----|---------------|---------|-----------|
| I   | 2.56          | 150     | 1.6       |
| II  | 2.40          | 150     | 1.7       |
| III | 2.29          | 250     | 1.9       |
| IV  | 2.33          | 250     | 2.1       |

图2中示出了番茄汁的干燥特性，在此情况下，在150〔℃〕的条件下，空气中的干燥速度较蒸汽中的干燥速度为快，在250〔℃〕的条件下几乎未看到干燥速度的差别。但是在250〔℃〕下进行干燥时，无论使用空气还是使用蒸汽均会使液汁的颜色发生变化，这可能是由于温

度使色素发生了化学反应的原故。

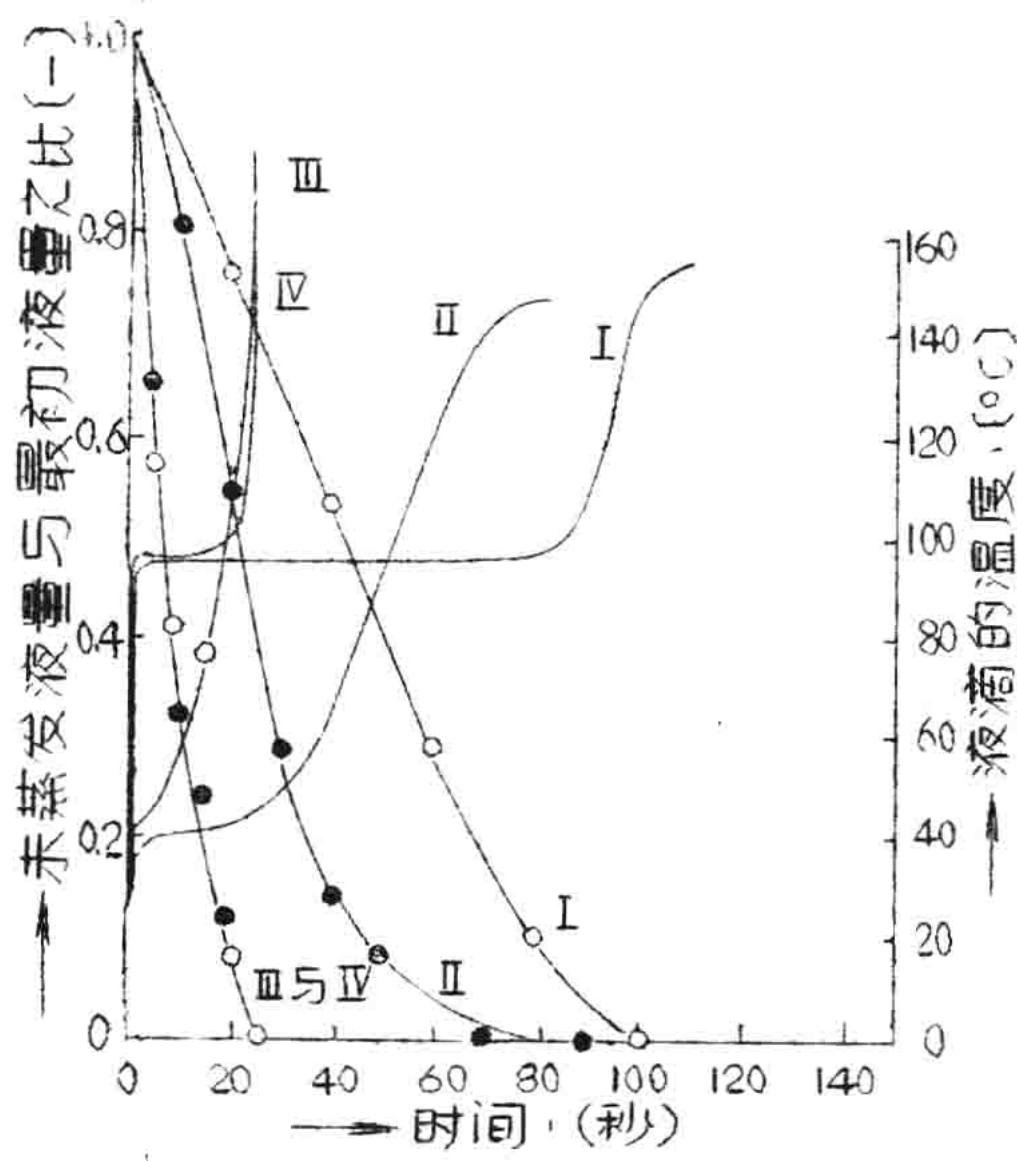


图 2 蕃茄汁液滴的干燥  
(○ 过热蒸汽, ○ 干燥空气)

|     | 最初的液滴重量(毫克) | 气体温度〔℃〕 | 气体速度〔米/秒〕 |
|-----|-------------|---------|-----------|
| I   | 1.80        | 155     | 1.7       |
| II  | 1.78        | 147     | 1.6       |
| III | 1.55        | 250     | 2.1       |
| IV  | 1.78        | 250     | 1.9       |

图 3 中示出了咖啡浓缩液滴的干燥特性，在 145〔℃〕的条件下，空气流中的干燥速度较快，除此之外，在上述温度条件下，在蒸汽流中进行干燥时，当达到干燥时间的一半时，即发生液滴的膨胀和破裂现象。

又在 250〔℃〕的条件下进行干燥时，蒸汽中的干燥速度较空气中的干燥速度为快，在两种气体中均会发生液滴的膨胀和破裂现象。

图 4 中示出了脱脂乳液滴在 150〔℃〕温度条件下的干燥特性。空气流中的干燥速度较快。无论是在空气中还是在蒸汽中，均会连续发生液滴的膨胀和破裂现象，但在蒸汽中膨胀较为利害，而且在上述两种情况下，均发生褪色现象。

在对上述这些食品液滴进行干燥时，如采用 150〔℃〕左右的温度，则空气中的干燥速度较快，如采用 250〔℃〕左右的温度，则大体上过热蒸汽中的干燥速度较快。但上述这些食品液滴的干燥速度系与物质本身有关，所以根据上述仅有的实验还不能作出结论。此外，不管是使用空气还是使用蒸汽，由于加热所产生的恶化现象都是一样的。

图 5 中示出了使粘土悬浮的液滴在空气中和蒸汽中干燥时的干燥特性，此特性与水滴的蒸发非常相似。

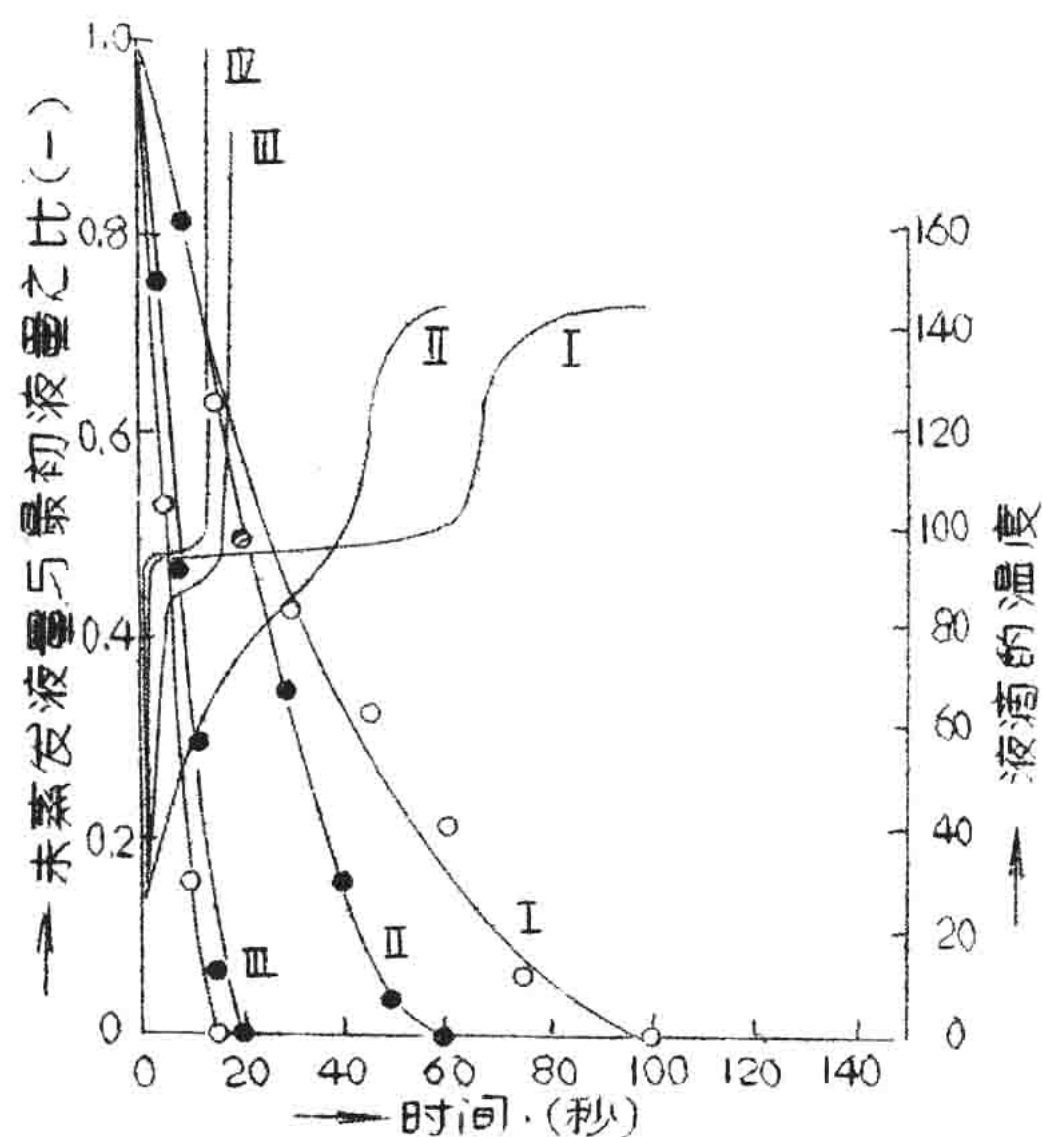


图3 咖啡浓缩液滴的干燥  
(○ 过热蒸汽, ● 干燥空气)

|     | 最初的液滴<br>重量(毫克) | 气体温度<br>[°C] | 气体速度<br>[米/秒] |
|-----|-----------------|--------------|---------------|
| I   | 2.08            | 145          | 1.7           |
| II  | 1.93            | 145          | 1.6           |
| III | 2.04            | 255          | 1.9           |
| IV  | 2.10            | 250          | 2.1           |

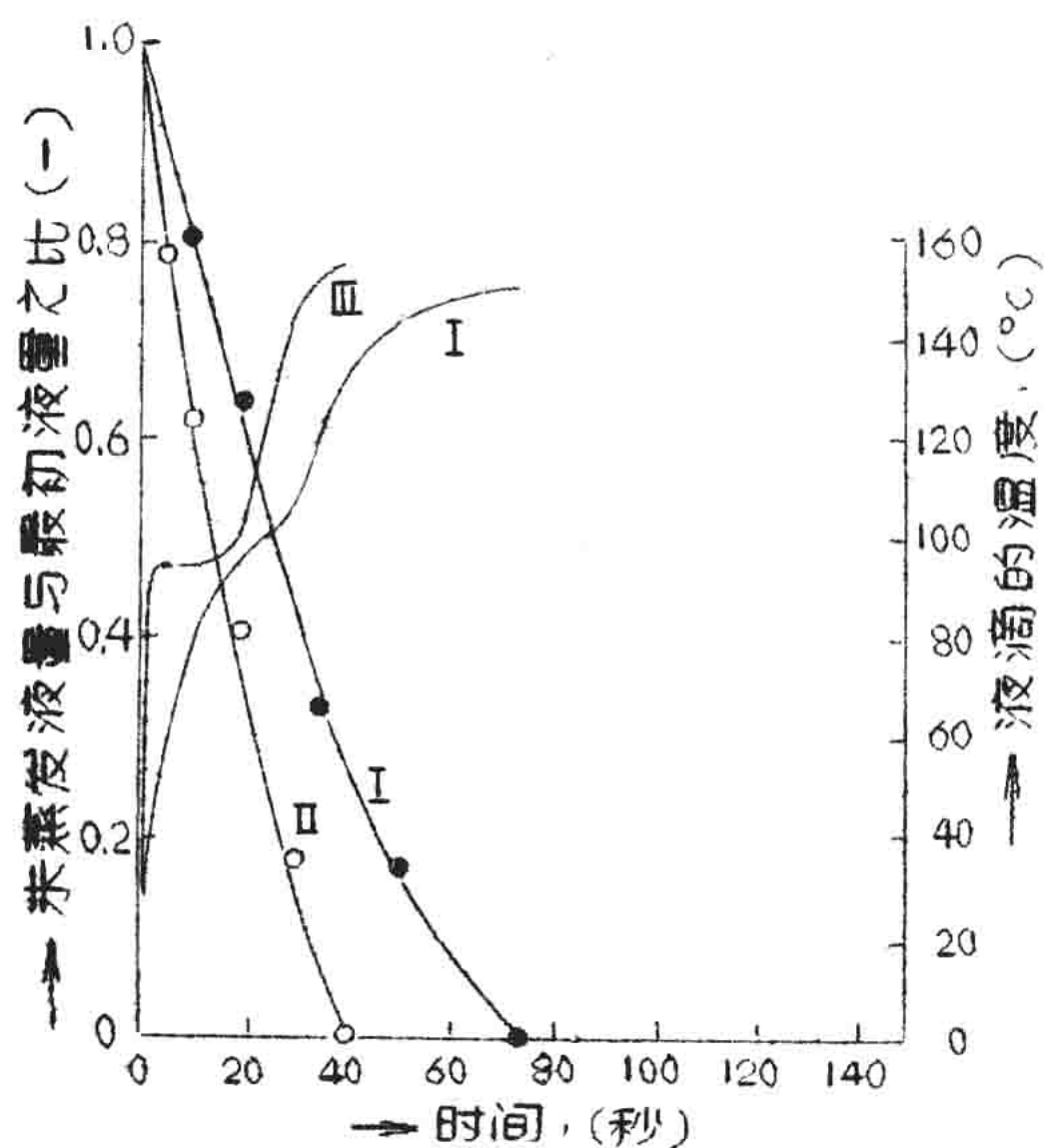


图4 脱脂乳液滴的干燥  
(○ 过热蒸汽, ● 干燥空气)

|    | 最初的液滴<br>重量(毫克) | 气体温度<br>[°C] | 气体速度<br>[米/秒] |
|----|-----------------|--------------|---------------|
| I  | 1.96            | 150          | 1.6           |
| II | 2.04            | 155          | 1.7           |

无论是在150[°C]还是在250[°C]的温度条件下,空气流中的干燥速度均较蒸汽中的干燥速度为快,但在150[°C]时,两者的差别很大,而在250[°C]时

则几无差别。

此外,使用上述的两种气体时,就液滴的温度而言,可以观察到一个恒定的温度阶段,这可能是由于液滴的浓度稀薄的原故。就形状

的变化而论,可以看到在蒸汽中膨胀的倾向较空气中为显著。

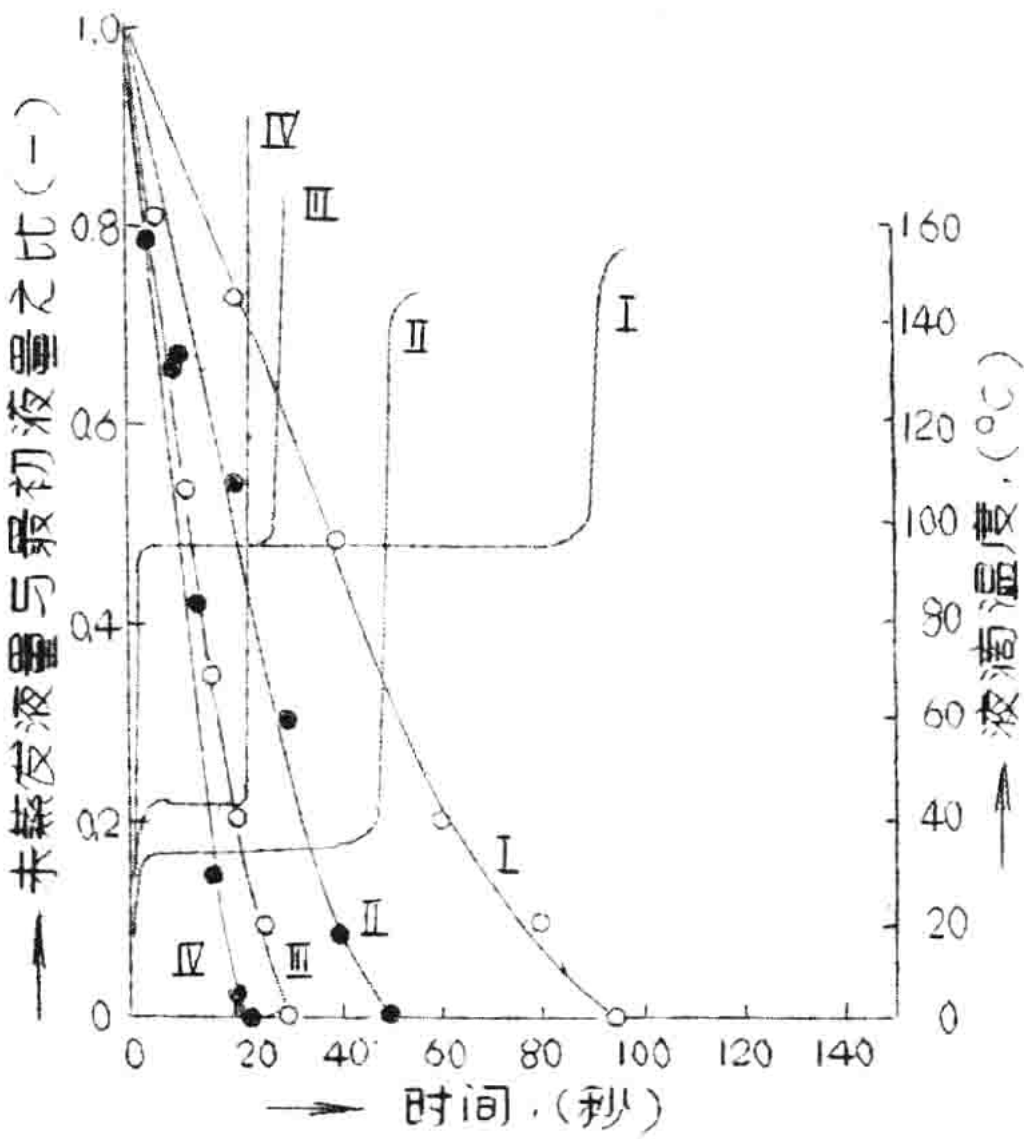


图5 粘土悬浮液滴的干燥  
(○ 过热蒸汽, ● 干燥空气)

|     | 最初的液滴重量, [毫克] | 气体温度 [°C] | 气体速度 [米/秒] |
|-----|---------------|-----------|------------|
| I   | 1.93          | 155       | 1.7        |
| II  | 1.98          | 145       | 1.6        |
| III | 1.98          | 250       | 2.1        |
| IV  | 2.08          | 255       | 1.9        |

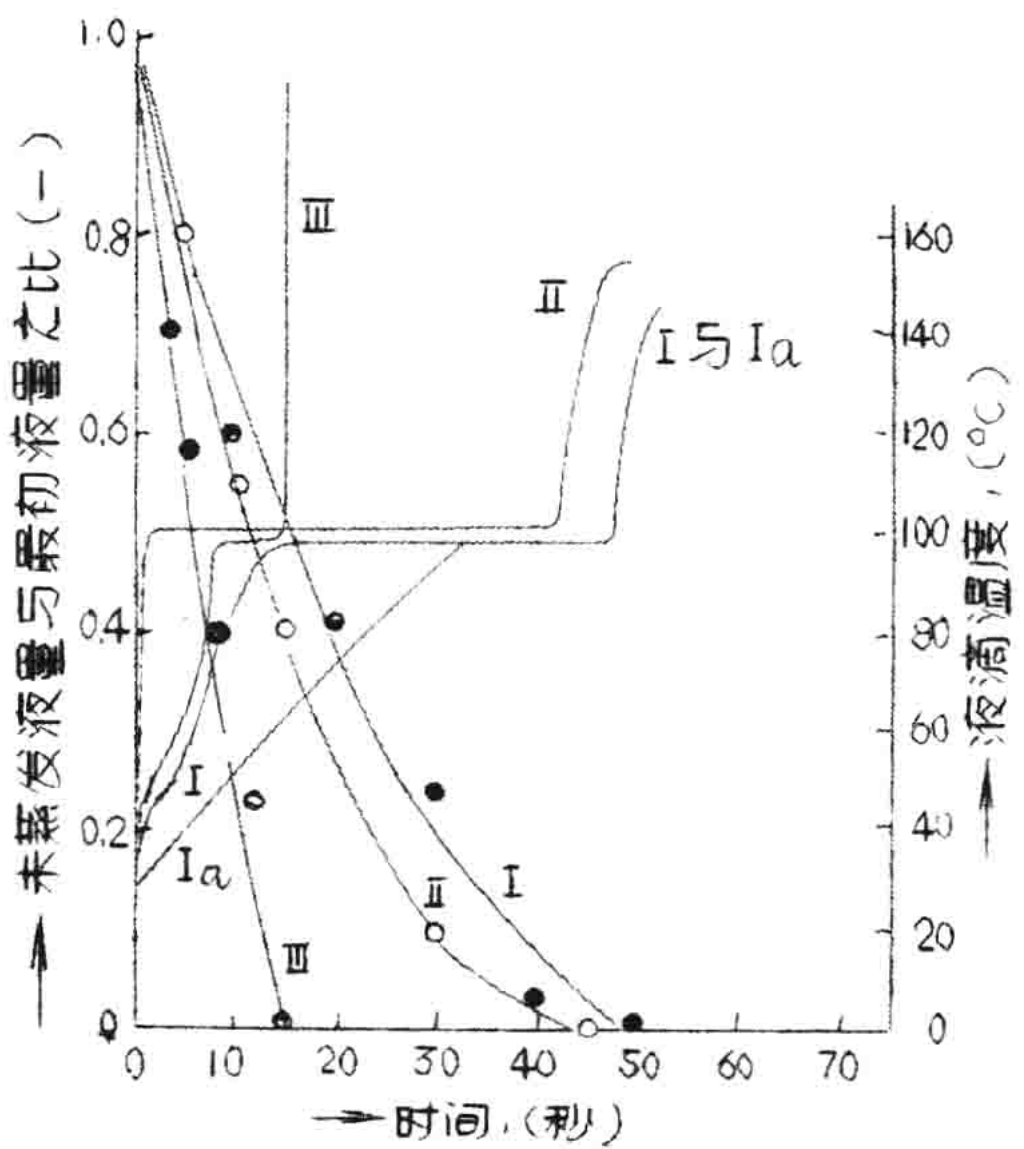


图6 硫酸钠溶液的干燥  
(○ 过热蒸汽, ● 干燥空气)

|     | 最初的液滴重量, [毫克] | 气体温度 [°C] | 气体速度 [米/秒] |
|-----|---------------|-----------|------------|
| I   | 1.46          | 145       | 1.6        |
| II  | 1.38          | 155       | 1.7        |
| III | 1.52          | 250       | 1.9        |

图6为硫酸钠溶液液滴的干燥情况。在150[°C]左右的温度条件下,其干燥特性与上述的干燥特性不同,蒸汽流中的干燥速度较空气中的干燥速度为快。

采用空气进行干燥时,液滴的温度接近水的沸点。此外,如前述的查尔斯沃思等人的实验所示,干燥时间系随液滴的外皮破裂与否,

破裂的程度如何而异，干燥曲线系示出其平均值。

当空气流的温度为 $250(^{\circ}\text{C})$ 时，发现液滴可以进行更为均匀的干燥过程。在此条件下不发生液滴外皮的破裂现象。

图7为硝酸钾溶液的干燥情况，它与硫酸铜溶液的干燥情况差别很大，在空气中进行干燥时，不存在恒定的温度阶段。

在 $150(^{\circ}\text{C})$ 的干燥条件下，空气中的干燥速度较蒸汽中的干燥速度要快得多，但是在 $250(^{\circ}\text{C})$ 的干燥条件下，则不存在上述那样大的差别。

就形状的变化而言，在蒸汽中干燥时，发生膨胀和破裂现象，而在空气中干燥时，则仅有膨胀现象而无破裂现象，因此，使用蒸汽干燥时，干燥粒子的密度要较使用空气干燥时高得多。

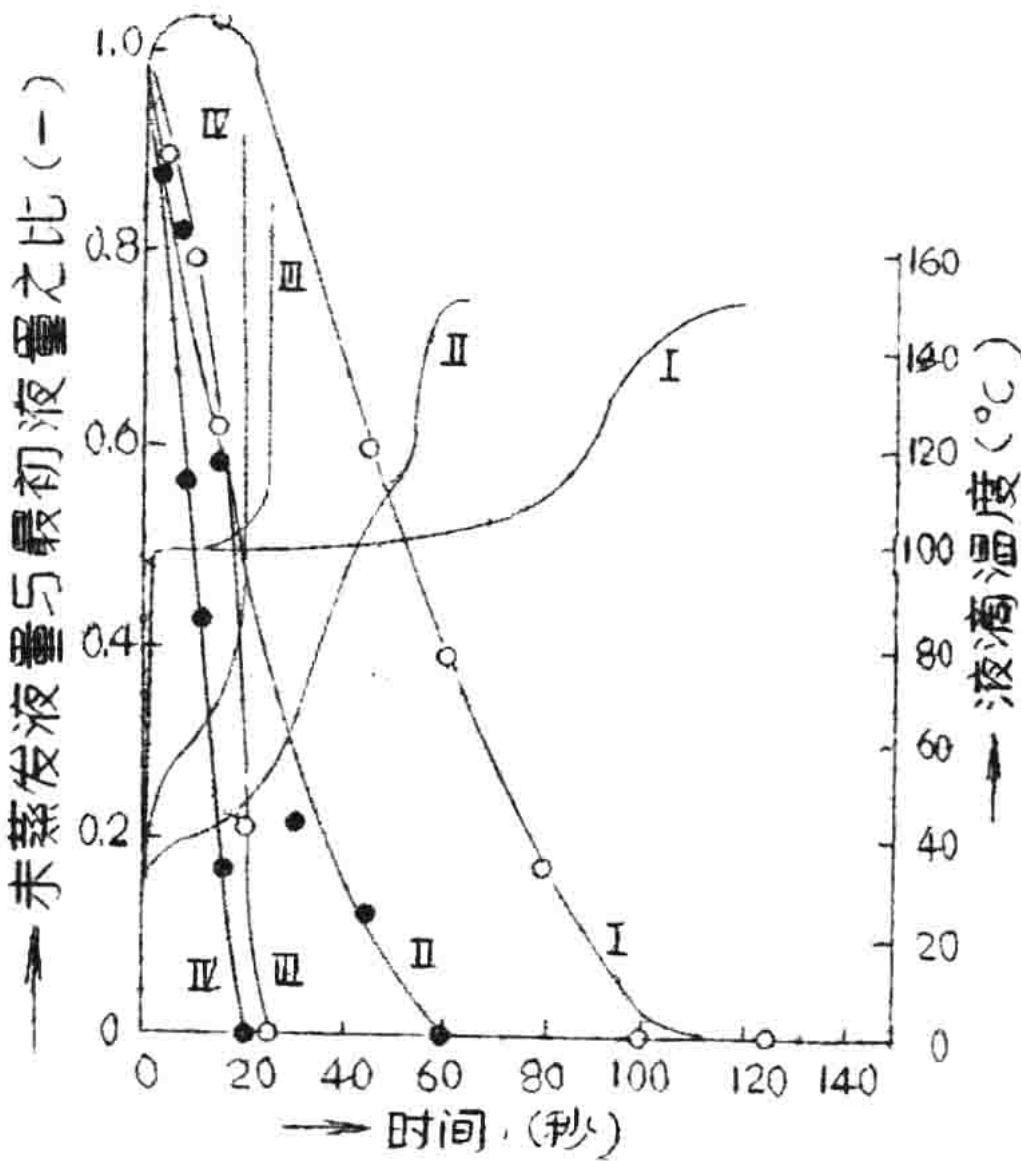


图7 硝酸钾溶液的干燥  
(○ 过热蒸汽, ● 干燥空气)

|     | 最初的液滴重量, [毫克] | 气体温度 $[^{\circ}\text{C}]$ | 气体速度 [米/秒] |
|-----|---------------|---------------------------|------------|
| I   | 2.30          | 150                       | 1.7        |
| II  | 2.04          | 150                       | 1.6        |
| III | 2.11          | 250                       | 2.1        |
| IV  | 2.16          | 250                       | 1.9        |

图8为洗涤剂液滴的干燥情况。在 $150(^{\circ}\text{C})$ 的温度条件下，空气中的干燥速度明显地较蒸汽中的干燥速度为大，但在 $250(^{\circ}\text{C})$ 的温度条件下则未看到差别。

此外，就液滴的温度而论，则与前述的硝酸钾时的情况相同，使用空气干燥时，未发现恒定的温度阶段，使用蒸汽干燥时，发生膨胀和破裂现象，而使用空气干燥时，则未产生此种现象。

使用蒸汽干燥时，所获得的干燥粒子的密度较在空气中干燥时所

获得的为大。

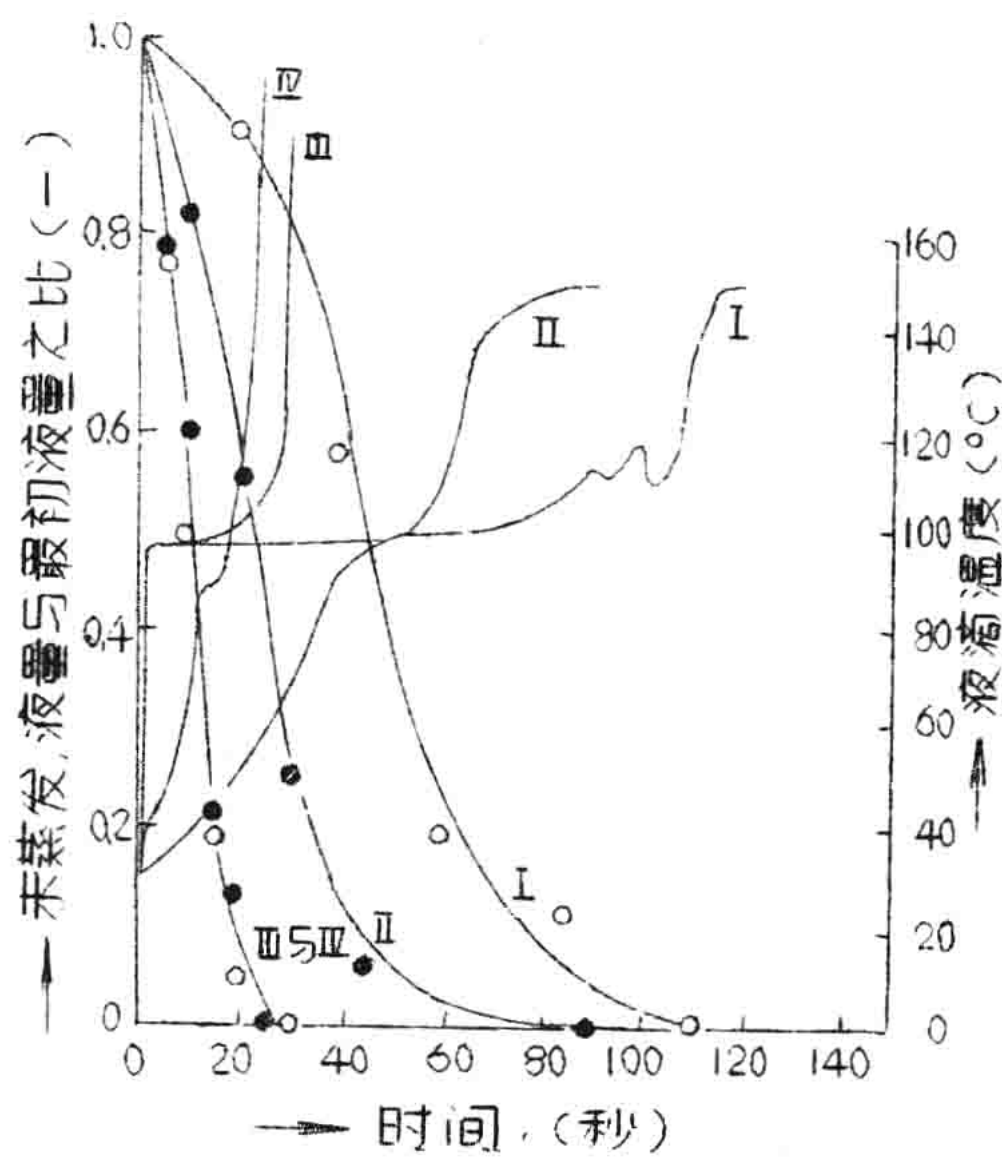


图 8 洗涤剂液的干燥  
(○ 过热蒸汽, ● 干燥空气)

|     | 最初的液滴重量, [毫克] | 气体温度 [°C] | 气体速度 [米/秒] |
|-----|---------------|-----------|------------|
| I   | 2.15          | 150       | 1.7        |
| II  | 2.06          | 150       | 1.6        |
| III | 2.16          | 250       | 2.1        |
| IV  | 2.09          | 250       | 1.9        |

在图 8 中的 I 与 II 两条件下, 最初的液滴状态及干燥粒子的状态示于图 9 中。

图 9 左侧的分图中, 上图于干燥前的液滴, 如使用 150 [°C] 的空气, 流速为 1.7 [米/秒], 亦即使用图 8 中 I 的条件令液滴干燥时, 即得左侧下图的状态。

右侧的分图中, 上图同样是干燥前的液滴, 如使用 150 [°C], 流速为 1.6 [米/秒] 的过热蒸汽 液滴干燥时, 即成为下图, 显然, 使用过热蒸汽干燥时, 干燥粒子变小, 还可以看到由于膨胀引起破裂的痕迹。

由上可知, 当对非食品液滴进行干燥时, 并不存在干燥速度的一般倾向, 而是和食品液滴的干燥相同, 这一点可能是由于和被干燥物质的性质以及干燥条件有关的原故。

此外, 对于图 1 到图 8 的数据而言, 将物料放在一般的浅盘中干燥时, 并未观察到有恒速干燥阶段存在, 这是由于蒸发作用而使得液滴的表面积不能保持恒定的原故。当然, 即使采用过热蒸汽干燥, 也应该存在恒速干燥阶段和降速干燥阶段, 例如在朱汝瑾等人<sup>2)</sup>采用过热蒸汽或过热蒸汽~空气混合气时的干燥研究实验中就曾观察到上述

两个阶段的存在。

### 7-9 根据液滴干燥实验等的设计法

根据对单一悬浮液滴的干燥实验，是不可能正确地对喷雾干燥器进行近似设计的，原因是液滴的不均一性，因之同时产生干燥速度的不均匀现象以及热风在塔内产生不均匀的速度等问题造成的。

但是，正如在其它化学工程中所遇到的问题一样，首先只抓住概数来进行研究，则非常有用。下述的设计法是从概数的概念出发的，在某种程度上是具有一定正确性的，但是它也并不是能够解决全部问题的东西。

如7-7项中所记述的那样，查尔斯沃思等人<sup>3)</sup>曾经使各种液滴悬浮于气流中进行了干燥实验，现将以他们的实验数据为基础的设计法叙述如下。

作为设计的例子，刊登的是有关硫酸钠溶液的问题，喷雾干燥是在如下条件下操作的。

|         |      |                 |
|---------|------|-----------------|
| 热风的入口条件 | 温度   | 260〔°C〕         |
|         | 湿度   | 0.01〔公斤水/公斤干空气〕 |
|         | 湿球温度 | 52.5〔°C〕        |

|       |      |                  |
|-------|------|------------------|
| 排气的条件 | 温度   | 138〔°C〕          |
|       | 湿度   | 0.060〔公斤水/公斤干空气〕 |
|       | 湿球温度 | 52.5〔°C〕         |

投入操作的料液 最初浓度为20%〔重量%〕的硫酸钠溶液

|      |           |      |
|------|-----------|------|
| 喷雾液滴 | 平均直径      | 100μ |
|      | 最小直径(约1%) | 40μ  |
|      | 最大直径(约1%) | 250μ |

各种盐类饱和浓度 $C_s$ 〔克溶质/克溶液〕与含水率 $W_s$ 〔克水/克干固体〕之间具有图10的关系，由此可得下式：

$$(W_s + 1) = 1/C_s \quad (1)$$

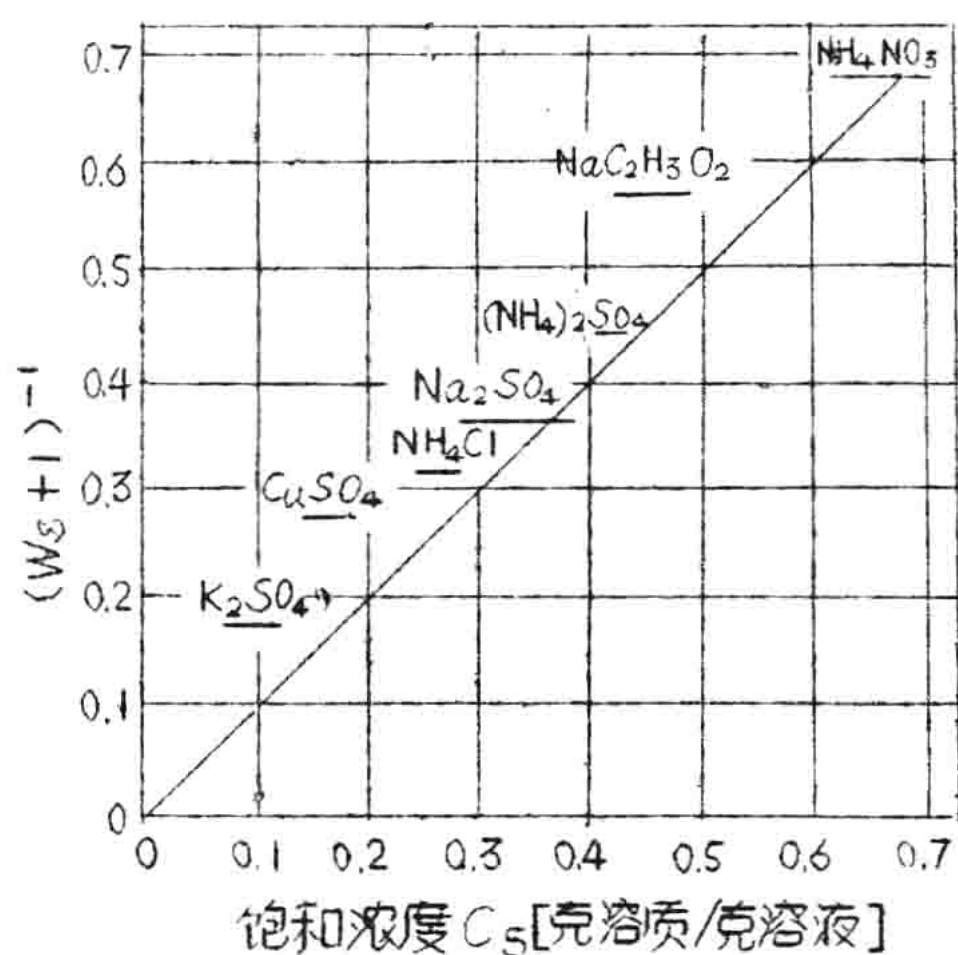


图 10 饱和浓度  $C_s$  与饱和时含水率  $W_s$  的关系 (各盐类名称下方的线段, 左端表示 15[°C] 时的情况, 右端表示 30[°C] 的情况)

度必为:

$$H_c = 0.100 + 0.46(0.060 - 0.010) \\ = 0.033 \text{ [公斤水 / 公斤干空气]}$$

从绝热冷却线及湿度可以看出  $H_c$  与此时的 19.9[°C] 的空气温度相当。

液滴蒸发时的平均温度可取最初空气温度与形成外皮时的空气温度两者的算术平均值:

$$t_{am} = (260 + 199) / 2 = 229.5 \text{ [°C]}$$

湿球温度保持上述的 52.5[°C] 不变, 湿度则取与上述平均温度 229.5[°C] 相当之值, 为 0.0223 [公斤水 / 公斤干空气] 令液滴在此状态的空气中蒸发。

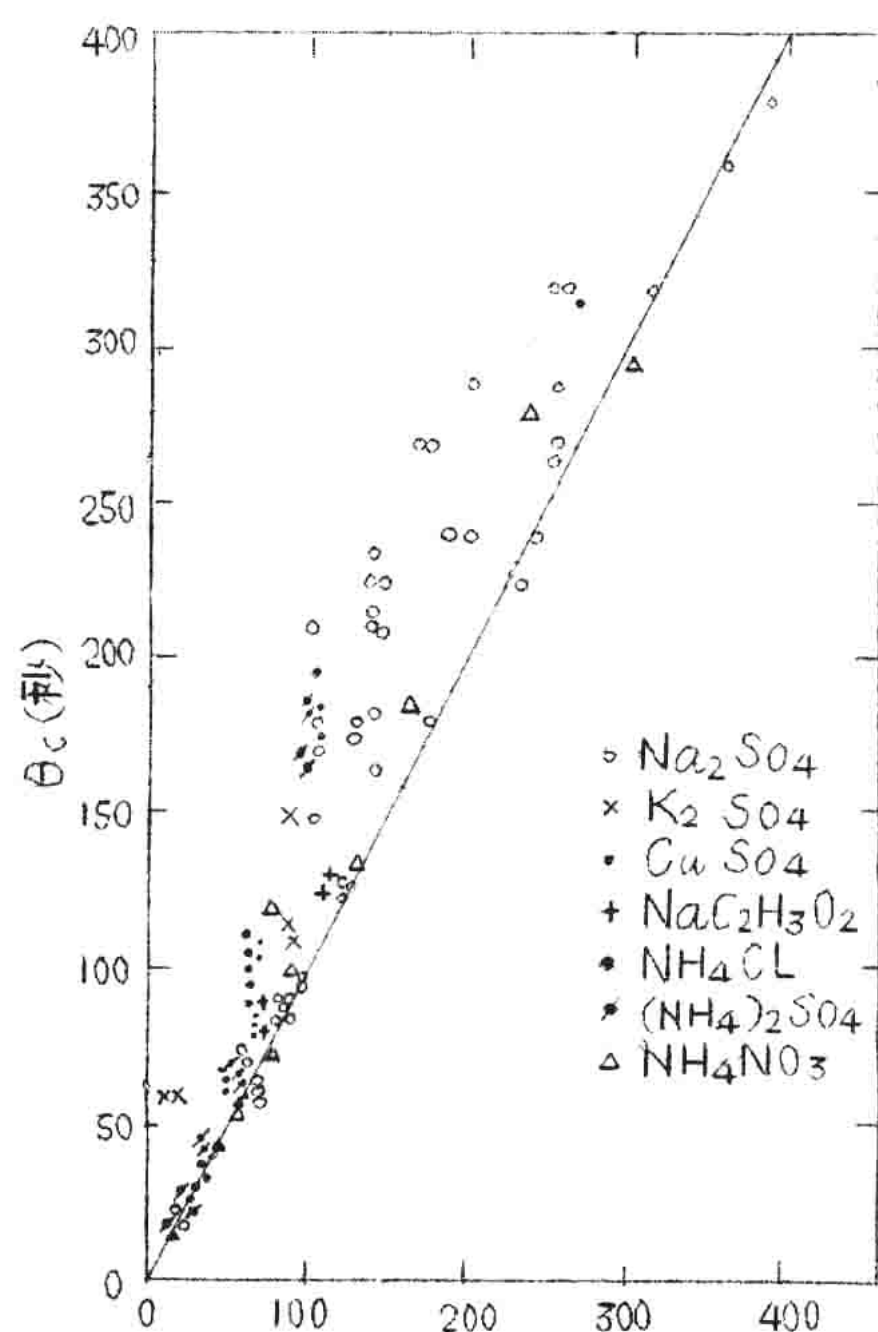
根据式 (1), 由表可以求出硫酸钠于 52.5 [°C] 时的溶解度, 亦即根据  $C_s = 0.317$ , 知与 1 [克] 硫酸钠相当的液滴外皮完全形成时的水分量为 2.16 [克]。

由于最初的浓度为 20% [重量%], 故到外皮形成为止对最初含水率而言的水分移动率  $(4.0 - 2.16) / 4.0 = 0.46$ 。

此外, 假如液滴的大小是均一的, 从而空气的湿度也呈均匀变化时, 则形成外皮时的湿

查尔斯沃思等人以外皮形成时间  $\theta_c$  与参数  $(D_{p0}^2 \rho_0 v) / (8K) \times [1 - (C_0 / C_s)]$  两者为基础对实验值进行了归纳，获得了图 1 1 所示的结果，由此可将外皮形成的最小时间表示为：

$$\theta_c = \frac{D_{p0}^2 \rho_0 v}{8K} \left[ 1 - \left( \frac{C_0}{C_s} \right) \right] \quad (2)$$



$$\frac{D_{p0}^2 \rho_0 v}{8K} \left[ 1 - \left( \frac{C_0}{C_s} \right) \right] \text{ [秒]}$$

图 1 1 式 (2) 与实验值的关系

式中：

$D_{p0}$  为最初的液滴直径，  
[ 厘米 ]

$\rho_0$  为最初的液体密度，  
[ 克 / 厘米<sup>3</sup> ]

$v$  为溶剂的比容，对水而言，可取为 1.0 [ 厘米<sup>3</sup> / 克 ]

$K$  为蒸发系数，[ 厘米<sup>2</sup> / 秒 ]，用  $-d(D_p^2) / d\theta = 8K$  来定义。它可以根据兰兹与马歇尔下述形式的式子算出，求出每秒的液滴直径的变化：

$$Nu = 2.0 + 0.60 Pr^{1/3} \cdot Re^{1/2} \quad (3)$$

当液滴到达最终速度时，形成外皮所需时间的计算结果如下：最初液滴直径为 40、100、250  $\mu$  时， $\theta_c$  则分别相应为 0.027、0.14、0.53 [ 秒 ]。

由此可知，当时间超过 0.6 [ 秒 ] 时，必须适当调节热风流速，使影响不致波及干燥器的器壁。

以上所述是仅就液滴蒸发而言的，液滴蒸发完毕之后即开始固相蒸发，对此查尔斯沃思等人也大致作过论述，但由于缺乏一般性，故

此处从略。

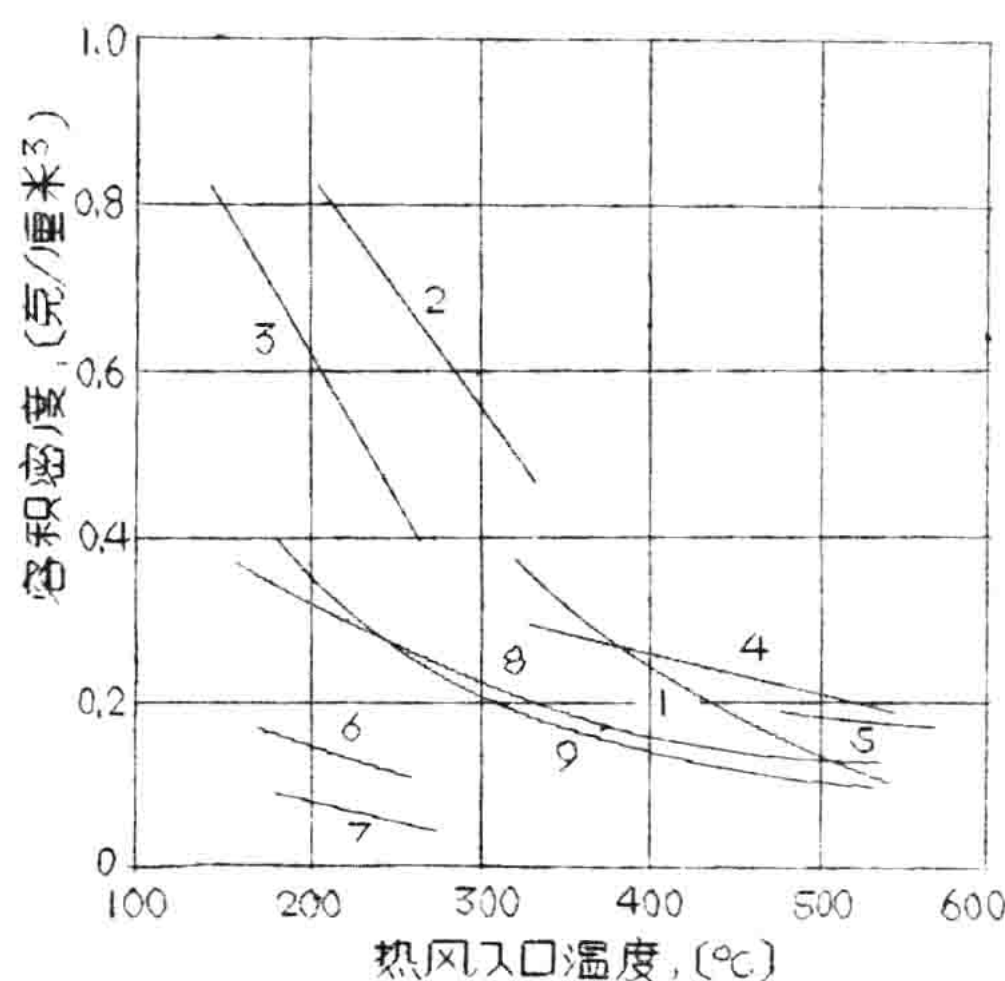
### 7-10 干燥粒子干燥条件所引起的变化

达非(Duffie)与马歇尔<sup>4, 5)</sup>使由喷嘴喷出的喷雾液滴自由下降, 对它们进行了干燥, 并对各种条件所引起的干燥粒子容积密度的变化进行了研究; 克罗斯比(Crosby)与马歇尔<sup>6)</sup>也作过同样的研究。此外, 以马歇尔<sup>7)</sup>达非等人的实验为基础也对喷雾干燥制品的容积密度作过归纳, 据此, 对干燥条件所引起的容积密度的变化、形状的变化等作了研究。

#### a) 热风入口温度的影响

达非等人对染料和硅酸钠液滴进行了并流干燥, 并就热风温度的变化所引起的干燥粒子密度的变化进行了研究, 现将他们的数据以及其他人的研究数据加以归纳, 示于图12中。

图中的1、4、5条曲线为根据达非等人的实验所标绘的, 2为根据沃尔曼(Wallman)等人的实验所标绘的, 这些曲线都是可靠的。



1.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (浓度为25%, 原液温度为60[°C])

2.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (浓度为25%, 原液温度为20[°C])

3.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$

4. 染料AQD 385A (浓度为19.5%, 原液温度为80[°C])

5. 马拉斯泊斯-C (Marasperse-C) 抗生素 (浓度为36%, 原液温度为80[°C])

6. 肥皂

7. 谷朊 (gluten, 面筋)

8. 山道曼斯 (Santomerse) 阴

9. 离子活性剂 (浓度为20%)

图12 热风温度所引起的干燥粒子容积密度的变化图

由于干燥粒子的容积密度受干燥器的型式、喷雾、捕集方法等因素的

影响，所以对另外几条曲线不能进行正确的比较。8、9 这两条曲线系根据朱汝瑾等人的实验所标绘的，由于在测定干燥粒子的容积密度以前已令其通过风机，所以条件不同。3、6、7 这三条曲线为根据拉蒙特 (Lamont) 专利的数据所标绘的，正确性和可靠性均较差。

不管如何做，上述的各条曲线都示出如下共性：热风温度上升，容积密度减小。

克罗斯比等人对硫酸钠液滴以及其它液滴作过同样的实验。就硫酸钠液滴而论，曾经测定了热风温度所引起的干燥粒子密度的变化，当原液温度为  $91\sim 97(^{\circ}\text{F})$  和  $172\sim 182(^{\circ}\text{F})$  时，它们的关系分别示于图 13 与图 14 中。

由两图都几乎观察不到在原液浓度为 10% 及 20% 时，热风温度对干燥粒子的直径、密度两者有什么影响。

但是，浓度为 15% 时，则所受的影响较大，象图 12 所示的那样，随热风温度的上升，粒子的密度减小，但不能一概而论。

上述事实的理由还了解得不够清楚，但原液浓度为 20% 时，空气温度所引起的变化之所以小，经考虑可能是由于液滴的物性与饱和时液滴的物性相近，故在干燥过程中几乎不发生变化；当原液浓度为 10% 时，由于固体成分的含量较少，所以固体成分对水分的蒸发影响也较小；但当原液浓度为 15% 时，则处于上述两种情况之间，显示出较为复杂的影响。

下面再来说明一下上述实验中喷雾液滴直径的影响。当液滴直径增大时，粒子的密度有减小的倾向。这一事实说明，当欲制造干燥粒子密度较大的产品时，使喷雾液滴变小是有利的。

图 15 中示出了空气温度对咖啡萃取液干燥粒子密度所引起的变化，此情况和硫酸钠的情况不同，而显示出较大的影响。

干燥粒子密度的变化与一般的倾向是一致的，即热风温度升高，密度变小。此外，一般而言，干燥粒子的直径较最初的液滴直径为小，但对特殊的溶液、发泡倾向较强的溶液，则粒子由于发泡而膨胀。

咖啡萃取液多少具有一些发泡的倾向，在高温、高浓度的情况下，干燥粒子的直径具有和液滴直径相同的倾向，亦即其关系与图中的 45°

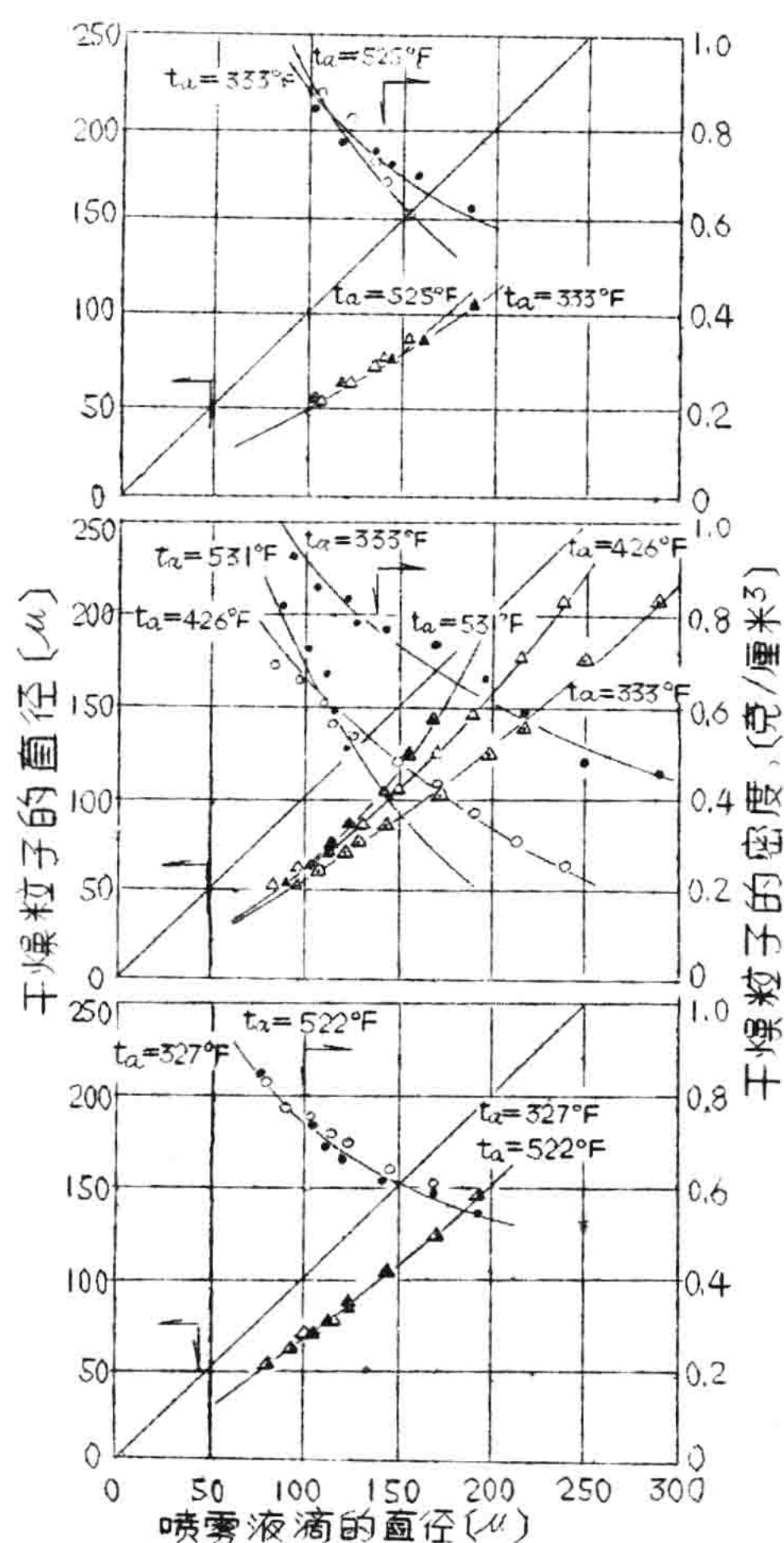


图13 热风温度对硫酸钠液滴的影响  
(原液温度: 91~97(°F),  
原液浓度: 上图为10%,  
中图为15%,下图为20%)

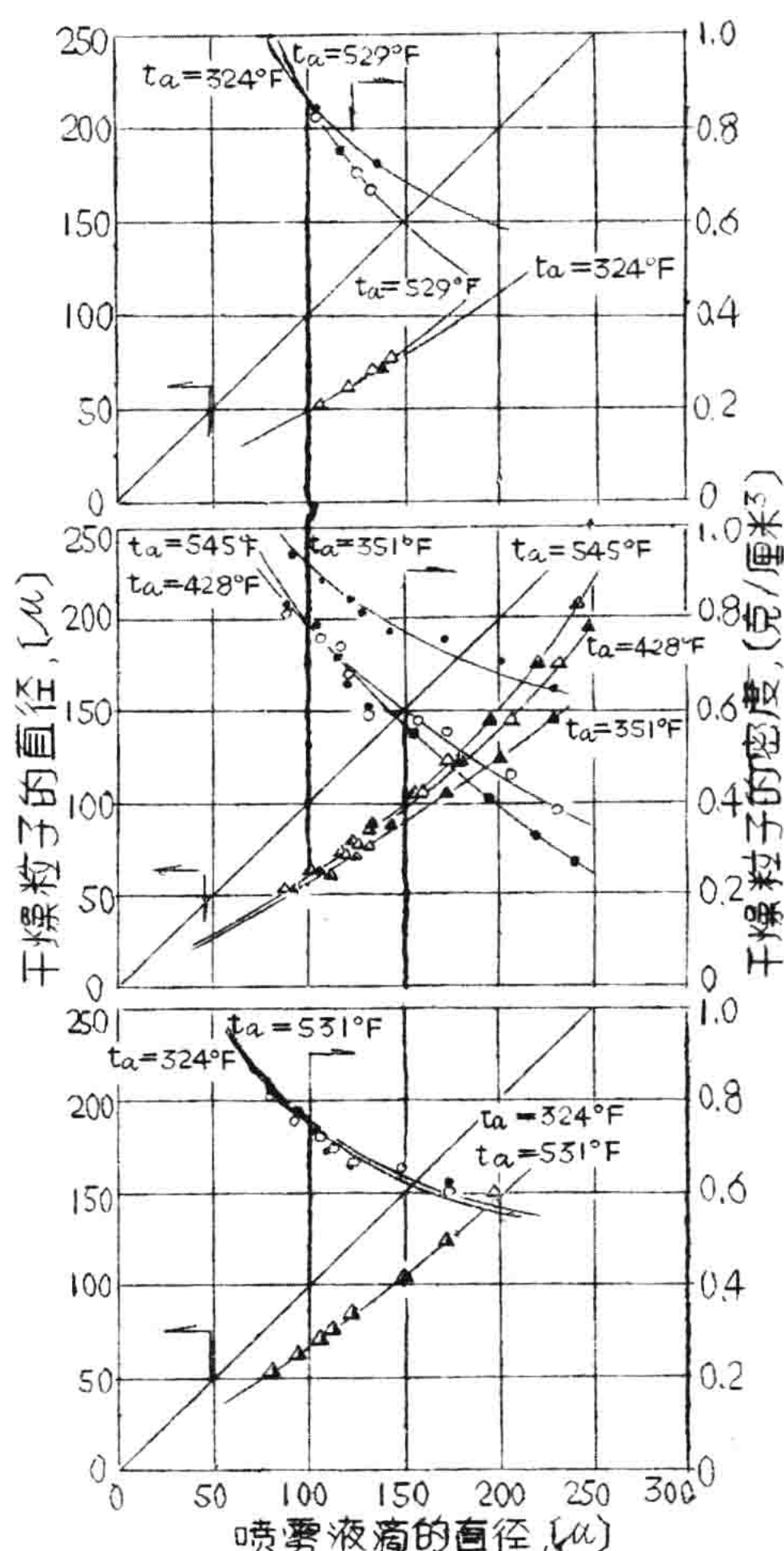


图14 热风温度对硫酸钠液滴的影响  
(原液温度: 172~182(°F),  
原液浓度: 上图为10%,  
中图为15%,下图为20%)

倾斜线靠近。

一般而论, 根据物质的不同, 上述的情况亦多少有些差别, 但总是随干空气温度的升高, 干燥粒子的密度下降。

由此可知, 如果不含温度最高的空气与喷雾液滴直接接触的话,

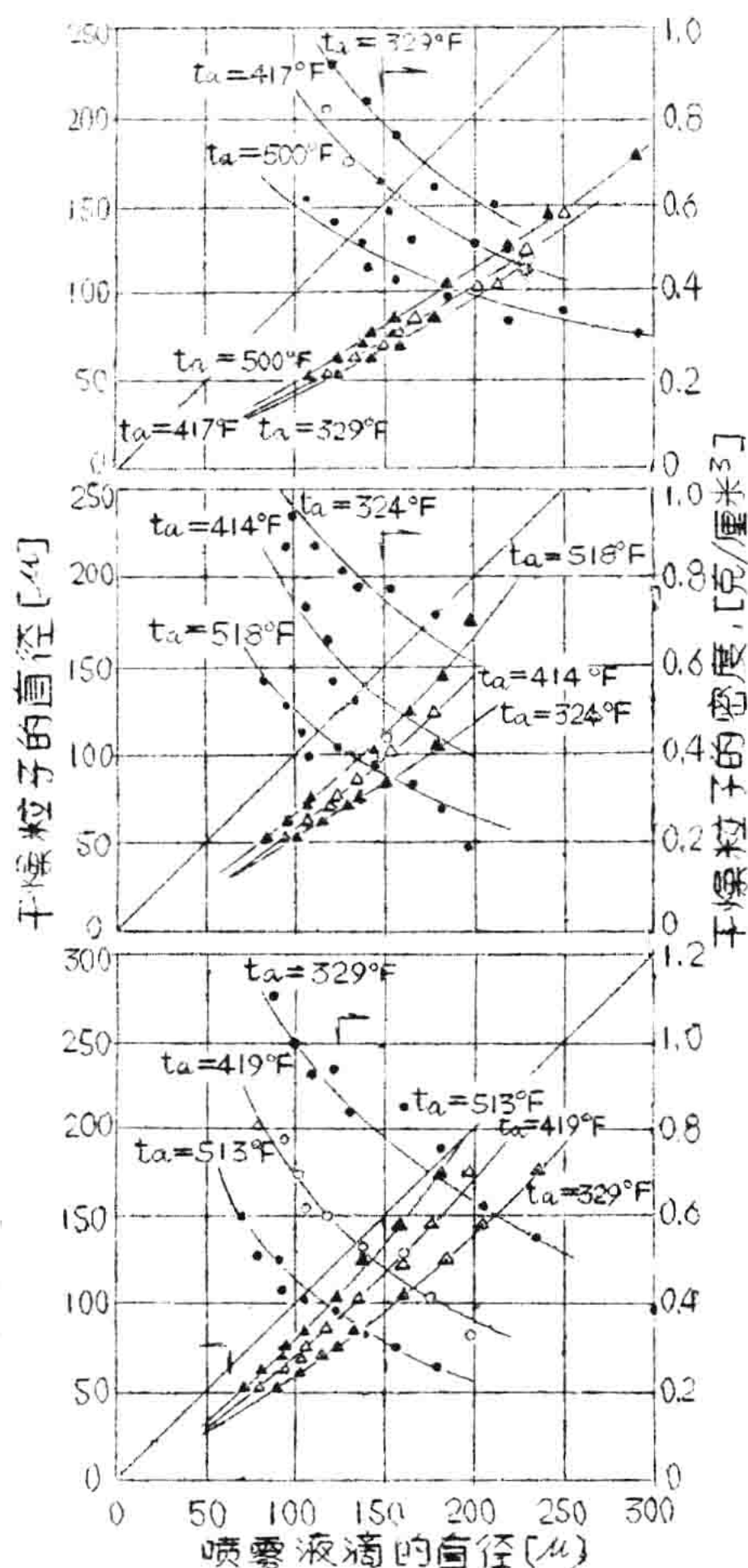


图 15 热风温度对咖啡萃取液滴的影响  
(原液浓度: 上图为 7%, 中图为 13.6%, 下图为 22%)

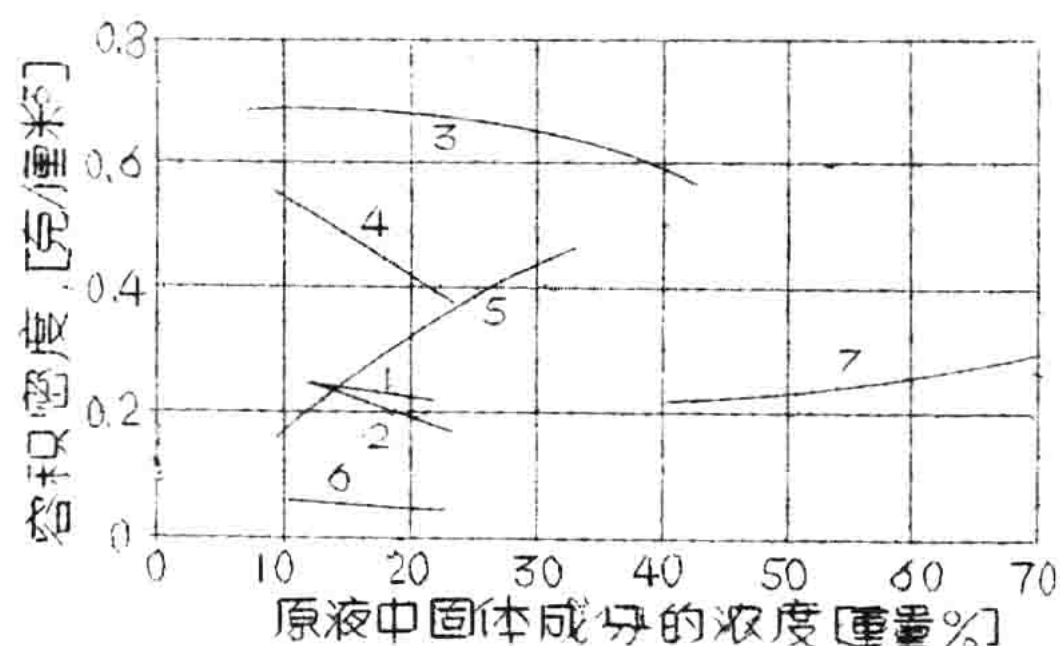


图 16 原液浓度与干燥粒子容积密度的关系

1. 染料 AQD 535 A (热风入口温度为 493 [°C], 原液温度为 93 [°C])
2. 同上, 染料 (热风入口温度为 493 [°C], 原液温度为 116 [°C])
3.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (热风入口温度为 260 [°C], 原液温度为 20 [°C])
4.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$
5.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$
6. 谷朊 (gluten, 面筋)
7. 肥皂

也可以使干燥制成品的密度变大, 故而并流操作方式可以较逆流操作方式制得密度较大的产品。

#### (b) 原液浓度的影响

达非 (Duffie) 等人的实验指出, 当令水溶性染料中固体成分的浓度由 19.5% 减少到 12.5% 时, 干燥粒子的平均直径将由 300 (μ)

下降到200[ $\mu$ ]，而相反，容积密度却随浓度的减少由0.194[克/厘米<sup>3</sup>]增加到0.222[克/厘米<sup>3</sup>]。

达非 (Duffie) 等人根据其他研究者得到的原液浓度的变化，对干燥粒子容积密度的变化进行了归纳，其影响如图16所示。

图中的曲线1、2为根据达非 (Duffie) 等人的实验所标绘的，3为根据沃尔曼等人的实验所标绘的，比较可靠。但曲线4、6是根据拉蒙特专利的数据，7是根据琼斯 (Jones) 专利的数据标绘的，所以并不十分可靠。

由上述的曲线可以看出，对大部分的物质而言，随浓度的增加，产品的容积密度是减小的，但另一部分物质却显示出相反的倾向。

图17、18图为克罗斯比等人的实验结果，它们是用来说明硫

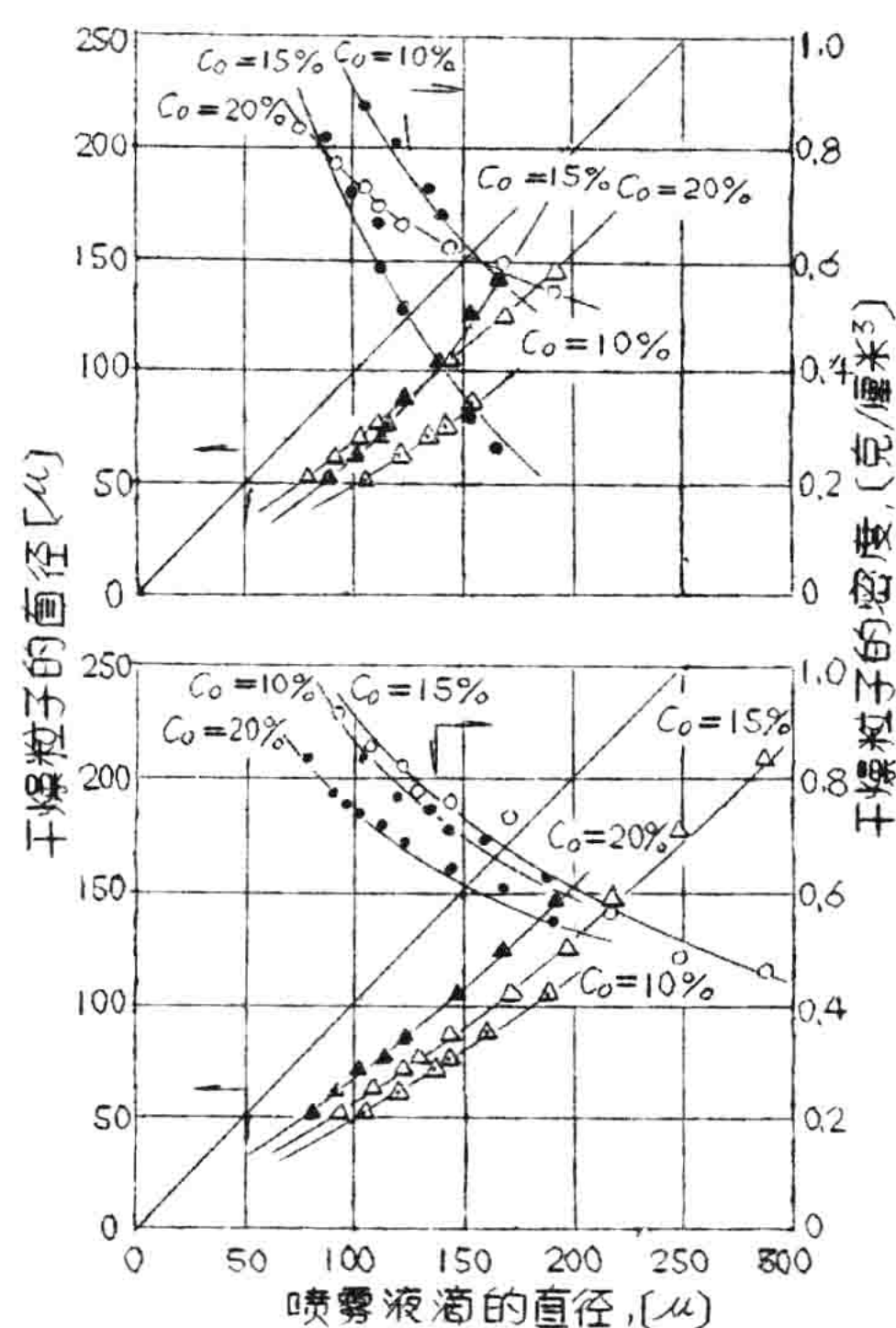


图17 硫酸钠液滴浓度的影响  
(原液温度: 91~99°F; 上图  
空气温度 521~531°F, 下图  
空气温度 327~333°F)

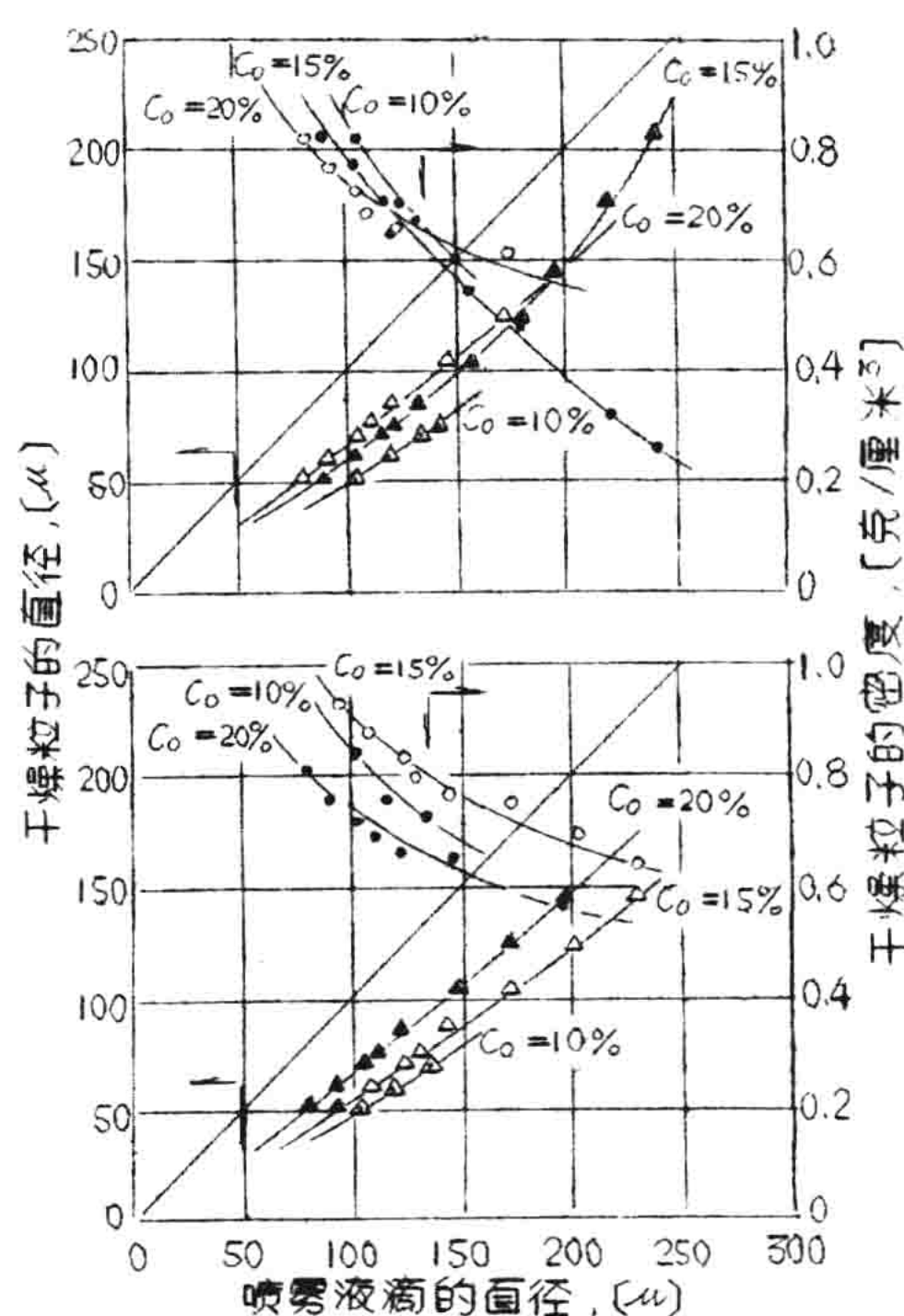


图18 硫酸钠液滴浓度的影响  
(原液温度: 172~182°F; 上  
图空气温度 529~545°F, 下  
图空气温度 323~351°F)

酸钠溶液在各种条件下浓度的变化与干燥粒子容积密度变化两者之间的关系的。由图可见，各种浓度均大致显示出同样的倾向，一般，随浓度的下降，喷雾液滴的直径也行减小，而干燥产品的容积密度则变大。但是，对15%的浓度，使用高温空气时，则多少显示出与10%、20%浓度时不同的倾向。

一方面，对于具有发泡倾向的液体而言，干燥粒子的直径受浓度影响的倾向较大，随温度的升高，其影响变大。

图19中表示出咖啡萃取液浓度对干燥粒子密度及直径的影响的实验结果。与图18中的硫酸钠溶液在320~330〔°F〕温度条件的情况相比较，图19中的咖啡萃取液浓度的影响要较前者浓度的影响大得多。

当温度为500~518〔°F〕时，液体浓度为22%的曲线其喷雾液滴直径为187〔μ〕，可以看出干燥粒子的直径也是相同的。

当干空气的温度在低温的范围内，干燥粒子的密度差别不大，但在温度较高的地方，随浓度的增加，密度减小，这与一般的倾向是一致的。

### (c) 料液温度的影响

提高料液的温度，加工液体的粘度就减少，喷雾的平均液滴直径也行减小，因之会使干燥粒子的密度产生增大的倾向。

此外，液滴直径小一些，使干燥粒子的含水率略微减少，对能够形成外皮的液体而言，会使干燥过程中的外皮形成提前，使液滴的直径稍稍增大，这一事实有使干燥粒子的密度下降的倾向，也就是说，显示出相反的两种倾向。

但是一般而言，如料液的温度上升和上升很小，干燥产品的容积密度是减小的。

图20中示出达非(Duffie)等人对自己的实验值及他人的数据加以归纳的结果。图中的曲线1、4、5是达非(Duffie)等人的实验标绘的结果，曲线2、3是根据沃尔曼等人的实验标绘的结果，是可靠的；曲线6为根据拉蒙特专利的数据标绘的结果，有些不够完整。