

高等学校教学用书

干燥作业

上册

M. Ю. 魯利耶著

高等教育出版社

高等学校教学用书



干 燥 作 業

上 册

M. Ю. 魯利耶著
張 洪 沅 等 譯

高等教育出版社



高等學校教學用書



干 燥 作 業

下 冊

M. Ю. 魯利耶著
張 洪 沅 等 譯

高等教育出版社



本書系根据苏联國立动力出版社 (Государственное энергетическое издательство) 1948 年出版的 М. Ю. 魯利耶 (М. Ю. Лурье) 教授著“干燥作業” (Сушильное дело) 第三版譯出, 原書經苏联高等教育部批准为高等学校热工專業教学参考書。

本書中譯本分上下兩册出版。上册講述干燥的一般原理及各种干燥方式, 下册講述各种廣泛应用的干燥器及其附屬設备的構造与計算以及干燥某些物料的特殊条件和適宜的干燥器。

本書由成都工学院化工教研組石炎福、周肇义、侯香模、張洪沅、傅焞街、鄧文煜等同志 (以姓氏筆划为序) 合譯。

干 燥 作 業

上 册

М. Ю. 魯利耶著

張洪沅等譯

高等教育出版社出版

北京琉璃廠一七〇號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號)

商務印書館上海廠印刷 新華書店總經售

書號 15010-169 開本 850×1168 1/32 印張 77/16 插頁 3 字數 208,000

一九五六年十一月上海第一版

一九五六年十一月上海第一次印刷

印數 1—5,500

定價 (10) 元 1.70

本書系根据苏联国立动力出版社 (Государственное энергетическое издательство) 1948 年出版的 М. Ю. 魯利耶 (М. Ю. Лurie) 教授著“干燥作業” (Сушильное дело) 第三版譯出, 原書經苏联高等教育部批准为高等学校热工类各專業教学参考書。

本書中譯本分上下兩册出版。上册講述干燥的一般原理及各种干燥方式; 下册講述各种广泛应用的干燥器及其附屬設備的構造与計算以及干燥某些物料的特殊条件和适宜的干燥器。

本書由成都工学院化工教研組石炎福、周肇义、侯香模、張洪沅、傅培街、邓文焜等合譯。書中第十六章的一部分由徐日新教授校閱, 又由孙啓才先生协助解决了一些問題。

干 燥 作 业

下 册

М. Ю. 魯利耶著

張洪沅等譯

高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺 7 号

(北京市书刊出版业营业許可証出字第 054 号)

上海大东集成联合印刷厂印刷 新华书店发行

統一書号 15010·476 开本 850×1168 1/32 印張 16 字數 428,000 印數 2,501—4,000

1957 年 7 月第 1 版 1958 年 8 月上海第 2 次印刷 定价 (10) 2.40

第 三 版 序

近二十五年來我們的工廠和農業方面的干燥設備已經變化得認識不出來了，在解決干燥各種物料的技術問題的方法上也有了變化。全蘇熱工研究所（ВТИ）的研究工作，對於干燥技術方面已獲得的進展發生了很大的影響。

在本書第二版以後的十年中，蘇聯的干燥技術已有飛躍的進展，超過了歐美的成就。

干燥技術是大多數生產過程中的一環，在發電站、化學工廠和汽車工廠、開礦廠和選礦廠、谷倉和食品企業、棉花及亞麻的初步加工、紡織工廠、磚及建築材料的製造、農業及其他方面都用到干燥技術。

在很多工廠中干燥業務是很複雜的，且消耗於干燥技術方面的燃料數量也很大（據粗略估計，蘇聯在 1940 年以前消耗於干燥技術所用的標準燃料就不少於 2—3 百萬噸）。當干燥任何物料時，應用不正確的操作條件或結構不適當的干燥器，往往引起在生產中產生廢品和遭致超過干燥本身費用的損失。因此，遵守干燥技術的正確操作條件和創制最合理的干燥器結構是極為重要的。

此外，我們還應盡力建立能夠提高干燥強度並降低燃料和能量消耗的干燥過程。當在大多數生產中運用着的陳舊而毫無根據的、需要應用低溫干燥介質的那些原則還保留時，干燥機械就會很笨重且耗費大量的金屬。因而要創制對金屬及其他材料耗量少且生產能力強而經濟的新型干燥器，就必須力求掌握新的干燥方法，採用高溫干燥介質，運用煙道氣直接干燥的有效方法。

我國社會主義的經濟條件，為干燥作業的發展和改善以及蘇聯工

業在這方面的豐富經驗的總結創立了一切的先決條件。也只有這樣的條件下才可能建立和發展像全蘇熱工研究所那樣的干燥實驗室。在這個實驗室內集中了蘇聯工業各部門中對物料干燥的知識和經驗，這樣就使它能够將某一些物料的干燥方法運用到另一些物料上，同時在掌握某些干燥器結構時所犯過的錯誤也不致在其他干燥器結構上重犯。

業經確定，同一類型的干燥器可以應用於完全不同的生產，因此，我們應該選擇和創制一些能滿足現代技術要求和適於國民經濟各不同部門應用的干燥器的結構。

同時也已經確定，干燥的理論基礎、干燥設備的計算方法及其操作的原理流程同樣都與干燥器是在那一種工業部門內使用無關。這就使得在解決一系列的科學問題和實際問題時無須考慮個別物料的特性，只須給出適用於各組或各類物料的綜合解決。

除選擇合理的干燥器結構外，干燥過程的強化也是干燥技術的基本問題之一。這種強化與在保證物料的良好攪拌的條件下提高干燥介質的容許溫度有關，也與由於較好的堆置及改善干燥介質對物料的環境的流體力學條件而產生的干燥的高度均勻性等有關。

直接用煙道氣干燥的方法使干燥技術繼續向前發展有很大的可能性，這種方法就是在低溫下也可保證很高的經濟指標，而在只有用這種干燥方法才能達到的高溫下，則可保證最大的效率。

按照全蘇熱工研究所干燥實驗室的設計，制造了一些用煙道氣干燥谷物、成材、茶葉、棉花、纖維素、硝石、白堊、苯胺染料、亞麻及大麻等的干燥器，運轉極為良好，在燃燒各種燃料（包括低級燃料）以獲得不損害被干燥物料的工業性質及保證設備安全運轉的干燥介質方面也作了很多工作。由於氣體淨化和消除火星技術的改善，致使能適用這種方法干燥的物料種類數量日益增加。

近年來在關於干燥過程的理論基礎的闡明方面也作了很多工作。

因此,科学和工業的工作者們在修正和摧毀陈旧的技術規程的同时,实现了在干燥介質溫度日益增高下的干燥过程,提高了过程的經濟性,降低了燃料和能量的消耗量,运用了煙道气直接干燥。

如此,理論与实际相互充实,一直地推动干燥技術向前發展,所以不久以前还是先進的,經過一个短的时间就变成落后的了。

廣泛地和正确地利用鍋爐及其他热工裝置的廢气的热量來干燥各种易受污損的物料,也是我們將來的一个重要任务。

还必须注意干燥器和換热設備的設計問題,在这些換热設備中利用廢干燥介質的热量來將水和空气干燥或加热。所有这些,都是進一步提高干燥設備經濟性的道路。

在層瀘时,採用过热蒸汽、紅外線、高頻率电流的新型強化干燥方法,也可应用於本書所述的各种情况。

本書某些章節系技術科学副博士 A. II. 伏洛希諾夫、B. O. 哥尔德什季克、H. M. 米哈依洛夫、H. M. 費多罗夫等参加寫成。

很多干燥器的流程圖为工程师 H. C. 亞斯塔什金所繪制,很多綜合性的表格和公式系工程师 B. A. 巴尔松和工程师 B. C. 格魯什金所編撰。

原稿經 E. K. 費洛甯科教授評閱和 C. E. 伽尔頓格工程师校訂,他們提出了一系列为作者所接受的意見。

作者謹向协助本書消除前版錯誤的同志們致以謝忱。

榮獲劳动紅旗勳章的 Ф. Д. 捷尔任斯基全苏热工研究所教授

M. Ю. 魯利耶

上 册 目 录

第三版序

第一章 基本概念及原理	1
1-1. 湿气体的基本性质及方程式	1
1-2. 物理常数	21
1-3. 给热系数与传热系数	28
1-4. 相似准数	33
1-5. 传热的基本方程式	36
1-6. 液体在气体中气化的基本方程式	53
第二章 空气干燥的热量和物料衡算	64
2-1. 物料衡算	64
2-2. 水分衡算与空气消耗量	69
2-3. 热量衡算	72
第三章 直接烟道气干燥	85
3-1. 燃料的性质	85
3-2. 烟道气的湿含量、热含量以及其他性质	93
第四章 湿空气的 I_d - 图和干燥器的热计算	104
4-1. I_d - 图的性质	104
4-2. I_d - 图上的理论干燥器	106
4-3. 在 I_d - 图上绘制过程时大气压的影响	108
4-4. 实际干燥器	109
4-5. I_d - 图上的 $Q =$ 常数的线、湿度计	116
4-6. 在 I_d - 图上空气与水的相互作用过程	121
第五章 基本空气干燥过程的各种变型	127
5-1. 在干燥室内加热的干燥器	127
5-2. 中间加热空气的干燥器	129
5-3. 废气循环的干燥器	132
5-4. 中间加热和每区段废气循环的干燥器	140
5-5. 封闭循环干燥器	146

5-6. 空气量改变的干燥器	150
5-7. 空气成錯流的干燥器	154
5-8. 在过程進行中空气部分干燥的干燥器	155
第六章 用煙道气干燥时的 Id- 圖和干燥器的热計算	158
6-1. 理論干燥器和实际干燥器	158
6-2. 基本干燥过程的各种变型	162
(1) 廢气循环的干燥器	163
(2) 在干燥室內加热的干燥器	168
(3) 中間升高溫度的干燥器	170
(4) 每区段廢气循环的干燥器	173
第七章 冷却器的計算	177
第八章 干燥过程及影响它的因素	181
8-1. 物料中水分的汽化	182
8-2. 干燥时所容許的空气(气体)溫度	215
8-3. 廢空气飽和程度的选择	217
8-4. 干燥時間	218
8-5. 干燥对物料質量的影响	224
8-6. 干燥器大小或容積的选择	227

下 册 目 录

第九章 干燥器主要型式的分类	231
第十章 連續操作的常压干燥器	234
10-1. 轉筒干燥器	234
10-2. 洞道式(隧道式、通道式)干燥器	254
10-3. 連續操作的厢式干燥器	285
10-4. 列管式干燥器	297
10-5. 刮板干燥器	307
10-6. 帶有攪拌器的干燥器	317
10-7. 豎式干燥器	322
10-8. 篩板式干燥器	330
10-9. 按照將物料噴洒的原理操作的干燥器	336
10-10. 滾筒式干燥器	352
10-11. 气流式干燥器	363
10-12. 物料成半悬浮状态运动的干燥器, 联合干燥器	379
10-13. 圓筒干燥器	386
10-14. 渦輪式干燥器	394
第十一章 間歇操作的常压干燥器	404
11-1. 厢式干燥器和干燥棚	404
11-2. 篩板式干燥器	418
11-3. 底部加热的干燥器、轉筒干燥器、帶攪拌器的干燥器以及其他干燥器	421
第十二章 真空干燥器操作的基本原理	425
第十三章 連續操作的真空干燥器	436
13-1. 圓筒干燥器	436
13-2. 滾筒式干燥器	437
13-3. 帶有攪拌器的干燥器	443
13-4. 帶式真空干燥器	443
第十四章 間歇操作的真空干燥器	445
14-1. 真空干燥厢和真空干燥棚	445

14-2. 物料被搅拌的真空干燥器(机械搅拌).....	446
第十五章 某些新的干燥方法	449
15-1. 用饱和水蒸汽干燥煤.....	449
15-2. 用过热蒸汽的干燥.....	454
15-3. 在高频率电场中的干燥.....	457
15-4. 用红外线的干燥.....	465
15-5. 在一个设备内进行过滤和干燥.....	474
第十六章 各种物料的干燥	478
16-1. 化学产品的干燥.....	478
16-2. 木材的干燥.....	484
16-3. 胶合板和原片的干燥.....	497
16-4. 锯木屑、木粉及刨木片的干燥.....	506
16-5. 绝热板的干燥.....	508
16-6. 火柴的干燥.....	511
16-7. 煤的干燥.....	515
16-8. 粉状泥煤的干燥.....	527
16-9. 谷物的干燥.....	534
16-10. 水果和蔬菜的干燥.....	543
16-11. 饲料产品和啤酒业、酿酒业、葡萄酒酿造业及糖厂等废料的干燥.....	549
16-12. 干面包的干燥.....	553
16-13. 茶叶的干燥.....	554
16-14. 铸型和型芯的干燥.....	560
16-15. 纱束的干燥.....	569
16-16. 布匹的干燥.....	572
16-17. 人造丝的干燥.....	580
16-18. 羊毛、棉花及其他纤维物料的干燥.....	585
16-19. 纸张、纸板和纸浆板的干燥.....	589
16-20. 鞋用纸板(皮革代用品)的干燥.....	599
16-21. 纸制品的干燥.....	601
16-22. 陶瓷制品的干燥.....	602
16-23. 陶瓷材料的干燥.....	608
16-24. 涂了底漆、清漆和油漆的制品的干燥.....	614
16-25. 亚麻和大麻的麻茎和生麻茎的干燥.....	617
第十七章 除塵器	622
17-1. 概論.....	622
17-2. 旋風分离器.....	626

17-3. 全苏热工研究所型的百叶窗式除塵器.....	632
17-4. 除塵室.....	634
17-5. 湿式除塵器.....	636
17-6. 袋濾机.....	641
17-7. 电除塵器.....	645
第十八章 热源	650
18-1. 燃燒室.....	650
18-2. 烟道气預热器.....	661
18-3. 蒸汽預热器.....	670
18-4. 电預热器.....	678
18-5. 鍋爐及其他热力裝置的廢烟道气.....	679
18-6. 捕热器.....	686
第十九章 干燥器、預热器及空气通道系統的阻力	690
19-1. 空气通道的摩擦阻力.....	690
19-2. 局部阻力.....	691
19-3. 空气通过物料層的阻力(ΔS_1).....	696
19-4. 預热器的阻力(ΔS_2).....	700
19-5. 過濾机与除塵器的阻力(ΔS_3).....	704
第二十章 干燥器的热計算示例	709
20-1. 中間加热和每区段空气循环的干燥器的热計算示例.....	709
20-2. 用烟道气干燥的干燥器的热計算示例.....	727

第一章 基本概念及原理

1-1. 湿气体的基本性質及方程式

(1) 道尔頓定律。假如有几种理想气体在同一容器內混合, 則每一种气体的存在状态, 就好像它单独佔据容器的整个容積 V 一样。混合气体的总压力 p 等於各个气体分压之和, 而且每一气体所顯示的压力, 就等於在混合气体温度下它单独佔据了整个容積时所具有的压力一样;

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots$$

假若使各气体組分的压力除以混合气体的总压力, 則

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \dots,$$

式中 V_1 、 V_2 、 V_3 —由下列各式算出的各气体組分的分容:

$$V_1 = \frac{V p_1}{p}, \quad V_2 = \frac{V p_2}{p} \text{ 等等。}$$

湿空气与湿煙道气(以下都称湿气体)为干燥器中的載热体, 它們是干气体与水蒸汽的混合物。對於这种混合物, 在实际上所遇到的水蒸汽之分压的变动范围不大时(不超过 1 大气压), 加上某些假設, 仍可应用道尔頓定律

$$B = p_a + p_s, \quad (1-1)$$

式中 B —大气压力;

p_s —水蒸汽分压;

p_a —气体的分压, 均以同一單位測定(千克/米² 或毫米汞柱)。

(2) 根据某些假設也可認為干气体和湿气体均遵从理想气体的狀

态方程式[克萊普朗方程式(Уравнение Клапейрона)]:

$$pV = GRT, \quad (1-2)$$

式中

p — t (气体压力), 千克/米²;

R — t (气体常数);

$T^{\circ}\text{K} = 273.1 + t^{\circ}\text{C}$ —绝对温度;

G —气体重量, 千克;

V — G 千克气体的体积, 米³。

1 米³ 干气体的重量(以千克表示), 称为该气体的重度(γ), 而 1 千克气体之体积(以米³表示), 则称为比容(v):

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{p}{RT}; \quad p = \gamma RT;$$

$$v = \frac{V}{G} = \frac{RT}{p}; \quad pv = RT;$$

$$\gamma = \frac{1}{v}; \quad v = \frac{1}{\gamma}.$$

p 、 v 与 T 或 p 、 γ 与 T 諸量間的关系式, 称为气体状态方程式或特性方程式。

气体状态方程式也適用於气体混合物:

$$\left. \begin{aligned} p_1 V &= G_1 R_1 T \\ p_2 V &= G_2 R_2 T \\ p_3 V &= G_3 R_3 T \end{aligned} \right\} BV = (G_1 R_1 + G_2 R_2 + G_3 R_3 + \dots) T = G_{\text{混}} R_{\text{混}} T,$$

$$G_{\text{混}} = G_1 + G_2 + G_3 + \dots,$$

$$\gamma_{\text{混}} = \frac{G_{\text{混}}}{V} = \frac{B}{R_{\text{混}} T};$$

$$\gamma_{\text{混}} = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \dots,$$

式中 γ_1 、 γ_2 、 γ_3 —气体组分在其相应分压下的重度, 或

① 气体压力可用以下的單位計量:

工程上的气压 = 1 千克/厘米² = 10000 千克/米² = 735.5 毫米汞柱 (0°C 时) = 10000 毫米水柱 (4°C 时) = 7733.9 毫米空气柱 (0°C 及 760 毫米汞柱时——即气体的对比状态或气体的标准状况) = 0.988 物理上的大气压。

$$\gamma_{\text{混}} = \frac{G_{\text{混}}}{\frac{G_1}{\gamma'_1} + \frac{G_2}{\gamma'_2} + \frac{G_3}{\gamma'_3} \dots}; \quad (1-3)$$

式中 $\gamma'_1, \gamma'_2, \gamma'_3$ —气体在 0°C 及 760 毫米汞柱下的重度。

(3) 依照亞弗加德羅定律, 在同一压力与温度下等体積的任何气体, 所含的分子数相同。在这样的情况下, 我們可以对两种气体寫出:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \frac{M_2}{M_1} \text{ 及 } \frac{R_1}{R_2} = \frac{M_2}{M_1}$$

或

$$M_1 V_1 = M V = \text{常数}。 \quad (1-4)$$

在最后一个等式中, M 是以千克表示的气体量, 其值等於气体的分子量, 並称为千克分子。

MV 为 1 千克分子的体積, 对所有遵从克萊普朗方程式的气体在 0°C 及 760 毫米汞柱 (10333 千克/米²) 时都等於 22.4 米³。

由对 1 千克分子而言的气体状态方程式

$$pV = MRT,$$

式中 M 为分子量, 千克;

若 $p = 10333$ 千克/米²;

$T = 273.1^\circ\text{K}$;

$V = 22.4$ 米³/千克分子;

於是得气体常数值:

$$R = \frac{10333 \times 22.4}{M \times 273.1} = \frac{848.5}{M}。 \quad (1-5)$$

气体的重度可由 (1-3) 式或由下面的关系計算

$$\gamma = \frac{M}{22.4} \text{ 千克/米}^3 \text{ (在 } 0^\circ\text{C} \text{ 及 760 毫米汞柱时)}。 \quad (1-6)$$

在表 1-1 中列举了各种气体之分子量 M 、气体常数 R 及重度 γ 的值。

表 1-1.

气 体 名 称	化 学 式	M	R	γ
氧	O ₂	32.0	26.5	1.429
氮	N ₂	28.02	30.26	1.251
氢	H ₂	2.016	420.6	0.09
一氧化碳	CO	28.0	30.29	1.25
二氧化碳	CO ₂	44	19.27	1.977
水蒸汽	H ₂ O	18.02	47.1	0.804
空气(不含CO ₂)	.	28.96	29.27	1.293
二氧化硫	SO ₂	64.06	13.24	2.93
乙炔	C ₂ H ₂	26.02	32.5	1.171
甲烷	CH ₄	16.03	52.80	0.717
乙烯	C ₂ H ₄	28.03	30.20	1.261

(4) 气体混合物的各个组成部分也可用重量分数表示:

$$a' = \frac{G_1}{G_{\text{混}}}; \quad b' = \frac{G_2}{G_{\text{混}}} \text{ 等等。}$$

或用体积分数表示:

$$a = \frac{V_1}{V}; \quad b = \frac{V_2}{V} \text{ 等等;}$$

在后面这种情况下, 每个组成部分都要换算到相同的压力和温度。假设各组分是用百分数表示, 则

$$a' = \frac{G_1}{G_{\text{混}}} \times 100 \quad \text{和} \quad b' = \frac{G_2}{G_{\text{混}}} \times 100 \text{ 等等。}$$

假若已知了各气体组分的重度或分子量, 则由体积分数 (a 、 b 、 c) 可以算出重量分数 (a' 、 b' 、 c'), 反之亦然。

因气体混合物的重度为:

$$\gamma_{\text{混}} = a\gamma_1 + b\gamma_2 + c\gamma_3 \quad (1-6)$$

或

态方程式[克萊普朗方程式(Уравнение Клапейрона)]:

$$pV = GRT, \quad (1-2)$$