

化学工程手册

《化学工程手册》编辑委员会

第 16 篇

干 燥

化学工业出版社

化 学 工 程 手 册

第 16 篇

干 燥

《化学工程手册》编辑委员会



化 学 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书是《化学工程手册》第16篇，主要介绍干燥原理和干燥用各类设备的设计与计算。

全书共十二章：第一章概论、第二章基础理论、第三章湿介质的性质与湿度图、第四章干燥速率、第五章干燥基础数据及其测试方法、第六章干燥器的特性与计算、第七章气流式干燥器、第八章流化床及喷动床干燥器、第九章喷雾干燥、第十章干燥系统的组成、干燥器的选型和第十二章干燥器的热效率与最佳化。

本书可供化工、轻工、食品、医药等有关部门的设计人员、研究人员、工厂技术人员及有关院校师生参考。

化 学 工 程 手 册

第 16 篇

干 燥

编写人 夏诚意 南京化工学院化工系
郭宜枯 大连理工大学化工学院
王喜忠 大连理工大学化工学院
审校人 张剑秋 北京燕山石油化工公司研究院

责任编辑：郭乃铎

封面设计：任 辉

化学工业出版社出版发行

（北京和平里七区十六号楼）

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

开本787×1092 1/32 印张24 1/8 插页1 字数624千字

1989年10月第1版 1989年10月北京第1次印刷

印 数1—4,800

ISBN 7-5025-0640-3/1Q·379

定 价14.20元

2056/58/2

《化学工程手册》总篇目

1. 化工基础数据
2. 化工应用数学
3. 化工热力学
4. 流体流动
5. 搅拌及混合
6. 流体输送机械及驱动装置
7. 传热
8. 传热设备及工业炉
9. 蒸发及结晶
10. 传质
11. 蒸馏
12. 气体吸收
13. 气液传质设备
14. 萃取及浸取
15. 增湿与减湿
16. 干燥
17. 吸附及离子交换
18. 薄膜过程
19. 颗粒及颗粒系统
20. 流态化
21. 气态非均一系分离
22. 液固分离
23. 粉碎、分级及团聚
24. 化学反应工程
25. 化工自动控制
26. 化工系统工程

《化学工程手册》编辑委员会成员

主任

冯伯华 化学工业部

副主任

陈自新 化学工业部橡胶司

苏元复 华东化工学院

汪家鼎 清华大学

李步年 陕西省化工设计院

蔡剑秋 化学工业出版社

委员

卢焕章 中国寰球化学工程公司

区灿棋 中国石油化工总公司

邓颂九 华南工学院

朱亚杰 华东石油学院

朱自强 浙江大学

余国琮 天津大学

时 钧 南京化工学院

沈 复 华东石油学院

吴锡军 南京化学工业公司化工研究院

林纪方 大连理工大学

杨友麒 化学工业部计算中心

张洪沅 成都科技大学

张剑秋 北京燕山石油化工公司研究院

郑 焜 上海医药设计院

郭慕孙 中国科学院化工冶金研究所

傅举孚 北京化工学院

萧成基 化学工业部北京化工研究院

第16篇《干燥》编写人员

编写人

夏诚意 南京化工学院化工系

郭宜枯 大连理工大学化工学院

王喜忠 大连理工大学化工学院

审校人

张剑秋 北京燕山石油化工公司研究院

前 言

化学工程是研究化工类型生产过程共性规律的一门技术科学，是化工类型生产重要的技术和理论基础。化学工程学科的内容主要包括：传递过程原理及化工单元操作；化学反应工程；化工热力学及化工基础数据；化工系统工程学等。研究和掌握化学工程，对于提高化工生产效率和经济效益，加速新技术的开发，提高科研、设计和生产技术水平，有着十分重要的作用。因此，对化学工业来说，化学工程是涉及提高技术水平的主要环节之一。

建国以来，我国的化学工程技术工作逐步发展，已经初步具有一定的基础，并取得了一定的成果。但是，目前国内还缺少一套较为完整实用的化学工程参考资料。编辑出版一套适合国内需要的，具有一定水平的《化学工程手册》，是化工技术工作者多年来的宿愿。早在五十和六十年代，国内的化学工程专家就曾酝酿和筹备组织编写《化学工程手册》，一九七五年化学工程设计技术中心站又曾组织讨论过编写计划。今天，在党中央提出加快实现四个现代化宏伟目标的鼓舞下，在化学工业部和中国化工学会的领导下，于一九七八年正式组成《化学工程手册》编委会，经过化工界许多同志的共同努力，《化学工程手册》终于与广大读者见面了。

希望这部手册的出版，将有助于国内的化工技术人员在工作中掌握和运用化学工程的科学技术原理，更好地处理和解决设计、科研和生产中遇到的化工技术问题。

本手册是一本通用性的工作手册。内容以实用为主，兼顾理论；读者对象为具有一定化工专业基础知识的工程技术人员和教学人员；内容取材注意了结合国内的情况和需要，并反映国内工作已取得的成果；对于国外有关的技术及数据，也尽量予以吸收。

根据当前国内的实际情况，计量单位一律采用“米-公斤（力）-秒”工程制（MKfS制）。但是考虑到我国将逐步过渡到采用国际单位制（SI），除了在第一篇中列出详细的单位换算表外，并在每篇之末加列简明的MKfS制-SI换算表。

参加本手册编写工作的，有全国各有关的设计、科研和高等院校等共二十多个单位，近二百人。此外，还有其它许多单位和人员提供资料或间接参与手册的有关工作。《化学工程手册》编辑委员会负责指导手册工作的开展，研究和确定编审工作中一些原则问题，并负责书稿的最后审定工作。手册编写的日常组织工作，由化工部化学工程设计技术中心站负责。

本手册系按篇分册陆续出版，今后还将定期修订再版并出版合订本。希望广大读者对本手册提出宝贵意见，以便再版时改进。

《化学工程手册》编辑委员会

重要物理量符号说明

符号	物理量	工程单位	SI单位	物理单位
A	传热传质表面积	m^2	m^2	cm^2
A_f	流化床床层截面积	m^2	m^2	cm^2
A_h	传导加热面积	m^2	m^2	cm^2
a	单位干燥器体积中的表面积	m^2/m^3	m^2/m^3	cm^2/cm^3
C	颗粒或液滴在流体中的曳力系数	—	—	—
C_H	湿比热容	$kcal/kg_{\text{绝干空气}} \cdot ^\circ C$	$J/kg_{\text{绝干空气}} \cdot K$	$cal/g_{\text{绝干空气}} \cdot ^\circ C$
C_m	绝干物料比热容	$kcal/kg_{\text{绝干空气}} \cdot ^\circ C$	$J/kg_{\text{绝干空气}} \cdot K$	$cal/g_{\text{绝干空气}} \cdot ^\circ C$
C_w	水的比热容	$kcal/kg \cdot ^\circ C$	$J/kg \cdot K$	$cal/g \cdot ^\circ C$
c	物料局部水含量	$kg_{\text{水}}/kg_{\text{绝干物料}}$	$kg_{\text{水}}/kg_{\text{绝干物料}}$	$g_{\text{水}}/g_{\text{绝干物料}}$
D	直径	m	m	cm
d_p	颗粒或液滴直径	m	m	cm
F	物料自由水含量 ($w-w_e$)	kg/kg	kg/kg	g/g
F_e	临界自由水含量	kg/kg	kg/kg	g/g
G	绝干空气重量流量	$kg_{\text{绝干空气}}/h$	$kg_{\text{绝干空气}}/h$	$g_{\text{绝干空气}}/s$
G_s	绝干空气重量流速	$kg_{\text{绝干空气}}/h \cdot m^2$	$kg_{\text{绝干空气}}/h \cdot m^2$	$g_{\text{绝干空气}}/s \cdot cm^2$
g	重力加速度	m/s	m/s	cm/s
H	气体的湿度	$kg_{\text{蒸汽}}/kg_{\text{气体}}$	$kg_{\text{蒸汽}}/kg_{\text{气体}}$	$g_{\text{蒸汽}}/g_{\text{气体}}$
h	高度	m	m	cm
I	空气的热焓量	$kcal/kg_{\text{绝干空气}}$	$J/kg_{\text{绝干空气}}$	$cal/g_{\text{绝干空气}}$
I_T	回转干燥器倾斜度	m/m	m/m	cm/cm
K	传质系数	$kg/m^2 \cdot h \cdot \Delta H$	$kg/m^2 \cdot h \cdot \Delta H$	$g/cm^2 \cdot s \cdot \Delta H$
L	干燥器长度或高度	m	m	cm
l	厚度	m	m	m
M	分子量	$kg/kg \cdot mol$	$kg/kg \cdot mol$	$g/g \cdot mol$
N	功率	kW	W	$dyn \cdot cm/s$
n	转速	$r \cdot p \cdot m$	$r \cdot p \cdot m$	$r \cdot p \cdot m$
P_s	总压	atm	N/m^2	dyn/cm^2
p	蒸汽压, 分压	atm	N/m^2	dyn/cm^2
Q	传热量	$kcal/h$	J/h	cal/s
R	气体常数	$kg \cdot m/kg \cdot mole \cdot k$	$J/kmol \cdot k$	$atm \cdot cm^3/g \cdot mol \cdot k$
R_o	恒速干燥速率	$kg/m^2 \cdot h$	$kg/m^2 \cdot h$	$g/cm^2 \cdot s$
R_d	降速干燥速率	$kg/m^2 \cdot h$	$kg/m^2 \cdot h$	$g/cm^2 \cdot s$
r	汽化潜热	$kcal/kg$	J/kg	cal/g
S_x	x 方向运动的距离	m	m	m
S_y	y 方向运动的距离	m	m	m
t	温度	$^\circ C$	K	$^\circ C$
t_m	物料温度	$^\circ C$	K	$^\circ C$

t_w	湿球温度	℃	K	℃
U	总包传热系数	kcal/m ² ·h·℃	W/m ² ·K	cal/cm ² ·s·℃
u	流速	m/s	m/s	cm/s
u_m	物料运动速度	m/s	m/s	cm/s
u_{mf}	最小流化速度	m/s	m/s	cm/s
u_t	颗粒沉降速度	m/s	m/s	cm/s
V	干燥器体积	m ³	m ³	cm ³
W	绝干物料进料量	kg/h	kg/h	g/s
W_o	绝干物料进料速率	kg/m ² ·h	kg/m ² ·h	g/cm ² ·s
w	湿含量	kg/kg绝干物料	kg/kg绝干物料	g/g绝干物料
w_c	临界湿含量	kg/kg绝干物料	kg/kg绝干物料	g/g绝干物料
w_o	平衡湿含量	kg/kg绝干物料	kg/kg绝干物料	g/g绝干物料
α	给热系数	kcal/m ² ·h·℃	W/m ² ·K	cal/cm ² ·s·℃
γ_g	气体的重度	kg/m ³		
γ_m	物料的重度	kg/m ³		
λ_g	气体的导热系数	kcal/m·h·℃	W/m·K	cal/cm·s·℃
λ_l	液体的导热系数	kcal/m·h·℃	W/m·K	cal/cm·s·℃
ϵ	空隙率	—	—	—
τ	时间	h	s	s
τ_c	恒速干燥时间	h	s	s
τ_d	降速干燥时间	h	s	s
η	热效率	—	—	—
σ	表面张力	kg/m	N/m	dyn/cm
μ_g	气体的粘度	kg·s/m ²	kg/m·s	g/cm·s
μ_l	液体的粘度	kg·s/m ²	kg/m·s	g/cm·s
φ	相对湿度	%	%	%

附注：上列单位有少数是习惯用单位，并非严格的工程单位或SI单位，如在有些单位中的时间以小时表示而不以秒表示，有些压力单位以大气压来表示等等。

上列符号与单位是本篇中通常用的表示法，其他不通常使用的符号在文中出现时，当以该处所作说明为准。

目 录

重要物理量符号说明

16.1 概论	16-1
16.1.1 去湿方法和干燥过程	16-1
16.1.2 干燥过程的特点	16-1
16.1.3 干燥操作的目的	16-2
16.1.4 分散悬浮态干燥在化学工业以及其他工业上的应用	16-2
16.1.5 干燥技术的进展概况	16-4
参考文献	16-8
16.2 基础理论	16-9
16.2.1 固体物料中湿分的种类	16-9
16.2.2 干燥时湿分运动的机理	16-12
16.2.3 颗粒与液滴的运动	16-19
(1) 颗粒液滴一维运动的系统	16-19
(2) 颗粒液滴在重力场中一维运动的统一基本方程	16-23
(3) 一维不等速运动所需的时间	16-25
(4) 一维不等速运动的高度	16-26
(5) $Re_0 < Re_c$ 加速沉降的计算及举例	16-31
(6) 颗粒、液滴在重力场中的二维运动	16-35
16.2.4 干燥过程中气固相间的给热与传质	16-50
(1) 对平板状物料的给热	16-50
(2) 板状物料真空干燥的传质	16-51
(3) 气流通过固定床的给热	16-51
(4) 稀相条件下静止气流中对颗粒或液滴的给热与传质	16-51
(5) 单颗粒或液滴在流动流体中的传热与传质	16-52
(6) 颗粒在气流式干燥器中的给热	16-53
(7) 气流干燥中物料温度的升高	16-57
(8) 笼式粉碎机的体积给热系数	16-57
(9) 聚式流态化干燥中气固相间给热系数简介与分析	16-59
(10) 热质同时传递的关联	16-64
参考文献	16-65
16.3 湿介质的性质与湿度图	16-67
16.3.1 湿介质的性质	16-67
16.3.2 干湿球温度计的讨论与热质传递关联方程的应用	16-72
16.3.3 低温范围内的湿度图	16-75
16.3.4 高温范围内的湿度图	16-78
16.3.5 总压改变时, 对湿度图的影响	16-80
16.3.6 有机溶剂蒸汽的湿度图	16-86

16.3.7 各类湿度图的应用	16-83
参考文献	16-85
16.4 干燥速率	16-86
16.4.1 恒定干燥条件下的干燥曲线	16-86
(1) 物料湿含量 (w) 及物料温度 (t_m) 与干燥时间 (τ) 曲线	16-86
(2) 物料的干燥速率曲线	16-87
(3) 干燥速率曲线的分析	16-87
16.4.2 恒速干燥速率	16-88
16.4.3 降速干燥速率	16-93
16.4.4 临界湿含量	16-99
参考文献	16-102
16.5 干燥基础数据及其测试方法	16-103
16.5.1 概述	16-103
16.5.2 颗粒粒径、形状系数与比表面积	16-103
16.5.3 颗粒粒径的测定	16-106
16.5.4 气体湿度的测定方法	16-135
16.5.5 物料湿含量的测试方法	16-141
16.5.6 湿物料临界湿含量测定	16-147
参考文献	16-150
16.6 干燥器的特性与计算	16-152
16.6.1 干燥器的分类	16-152
16.6.2 间歇箱式干燥器	16-152
(1) 概述	16-152
(2) 适用范围	16-153
(3) 设计用有关参数	16-153
(4) 各种箱式干燥器的运转操作数据	16-154
16.6.3 连续式热风干燥器总论	16-155
(1) 概述	16-155
(2) 连续式干燥器主体容积的计算(物料在恒定干燥条件下降速干燥速率线为一直线)	16-156
(3) 低物料临界湿含量条件下连续式干燥器主体容积计算	16-161
(4) 连续式干燥器主体容积计算(物料在恒定干燥条件下降速干燥线为曲线)	16-161
16.6.4 物料移动型干燥器	16-167
(1) 隧道式干燥器	16-167
(2) 穿流带式干燥器	16-168
(3) 喷流式干燥器	16-174
(4) 立式移动床干燥器	16-178
16.6.5 物料搅拌型干燥器	16-179
16.6.6 回转干燥器	16-185
16.6.7 膏糊状物料干燥器	16-193
16.6.8 红外及远红外干燥器	16-198
16.6.9 冷冻干燥器	16-201
16.6.10 微波干燥器	16-205
16.6.11 有机过热蒸汽干燥器	16-208

参考文献	16-211
16.7 气流式干燥器	16-213
16.7.1 气流干燥器的特征	16-213
16.7.2 气流干燥器的适用范围	16-214
16.7.3 气流干燥器的类型	16-215
16.7.4 气流干燥器的设计计算	16-227
(1) 基本数据	16-223
(2) 进行干燥管的物料衡算和热量衡算,以确定干燥除水量及干燥用热空气用量 $G(\text{kg/h})$	16-228
(3) 加速运动段气固相间给热系数关联式的确定	16-223
(4) 干燥管直径 D 的计算	16-229
(5) 气流干燥管高度计算	16-229
(6) 气流式干燥器设计计算示例	16-230
(7) 脉冲式气流干燥器的计算	16-244
参考文献	16-250
16.8 流化床及喷动床干燥器	16-251
16.8.1 概述及其特征	16-251
16.8.2 流化床干燥器的型式与分类	16-252
16.8.3 流化床干燥器的设计	16-261
(1) 间歇式	16-261
(2) 单室连续式或多室连续式	16-261
(3) 其他	16-262
(4) 卧式多室流化床干燥器床层截面积的计算	16-262
(5) 多层流化床干燥器所需层数的计算	16-265
(6) 设计计算举例	16-267
16.8.4 喷动床干燥器	16-275
参考文献	16-279
16.9 喷雾干燥	16-280
16.9.1 喷雾干燥原理及其特点	16-280
16.9.2 喷雾干燥器的工艺布置	16-283
16.9.3 喷雾干燥的优缺点	16-288
16.9.4 雾化器的结构和计算	16-289
(1) 雾化机理	16-289
(2) 雾滴(或颗粒)平均直径和尺寸分布的表示方法	16-291
(3) 压力式雾化器	16-293
(4) 旋转式(也称转盘式)雾化器	16-301
(5) 气流式雾化器	16-306
(6) 超声波雾化器	16-308
16.9.5 雾滴的传热和干燥	16-309
(1) 含有可溶性固体的液滴蒸发	16-309
(2) 物料干燥前后的粒度比	16-311
(3) 含有不溶性固体的液滴蒸发	16-312
(4) 喷雾干燥产品的物理性质及其影响因素	16-314
16.9.6 喷雾干燥塔的直径和高度的计算	16-315

16.9.7	喷雾干燥过程中的物料粘壁问题	16-316
16.9.8	干燥产品的分离和排出装置	16-318
16.9.9	喷雾干燥的节能	16-319
16.9.10	喷雾干燥的安全措施	16-321
16.9.11	喷雾干燥的控制系统	16-323
16.9.12	国内外喷雾干燥器应用实例	16-324
	参考文献	16-326
16.10	干燥系统的组成	16-327
16.10.1	热风动力系统	16-327
16.10.2	热源及其装置	16-332
	(1) 干燥过程中热源的选择	16-332
	(2) 气体燃料的燃烧	16-333
	(3) 液体燃料的燃烧	16-338
	(4) 空气预热器	16-340
16.10.3	干燥过程中的进料	16-343
	(1) 供料器的作用	16-343
	(2) 选择注意事项	16-343
	(3) 供料器的种类	16-344
	(4) 供料器的选择	16-349
	(5) 螺旋输送机的选型计算	16-349
	(6) 旋转式供料器的选型计算	16-352
	参考文献	16-354
16.11	干燥器的选型	16-356
16.11.1	选型前需要确定的条件	16-356
	(1) 物料性能及干燥特性	16-356
	(2) 对干燥产品的要求	16-356
	(3) 湿物料水含量的波动情况及干燥前的脱水	16-356
16.11.2	环境湿度改变对干燥器选型的影响	16-357
16.11.3	干燥器的选型步骤及选型表	16-357
16.11.4	干燥器容积的估算	16-361
	参考文献	16-363
16.12	干燥器的热效率与最佳化	16-364
16.12.1	热平衡在干燥过程中的应用	16-364
16.12.2	热风干燥器的热效率及其分析	16-365
16.12.3	典型干燥器热效率数据范围	16-369
16.12.4	提高干燥器热效率的途径	16-369
16.12.5	干燥装置的最优化设计	16-370
	参考文献	16-381
	附图1~5	16-382

16.1 概 论

干燥过程广泛应用于生产和生活中。最初,利用自然界的太阳能及风力,对物料及农副产品进行缓慢的干燥加工。而后,随着农业的发展,这种天然的、劳动强度极大而又不能受人们意志控制的干燥方法,逐步让位给各种人工去湿方法和人工干燥过程。

16.1.1 去湿方法和干燥过程

在工农业生产中,经常会遇到从各种物料中除去湿分的过程,各种物料可以是固体,液体或气体,而湿分则常常是水或水蒸汽,但在某些情况下,也可以是有机液体或有机蒸汽等其它湿分。

从物料中除去湿分的操作称为去湿。去湿方法按作用原理来分,可分为:

(1) 机械法

用压榨、沉降、过滤、离心分离等机械方法以除去湿分者,称之为机械法。此类方法过程进行快而费用省,但其去湿程度不高,以其中分离效果较好的离心分离为例,处理后粒状固体的含湿量仍在5~10%之间,而由过滤而得的膏糊状物料,其含湿量往往可高达50~65%。

(2) 热物理法

利用湿分在加热或降温过程中产生相变的物理原理以除去湿分者称热物理法,如用热空气吹过湿物料使湿分汽化的方法以去湿,或用冷冻方法使水分结成冰后除去。此类方法去湿程度较高,但过程及设备较为复杂,其费用亦高得多。

(3) 物理化学法

用浓硫酸、无水氯化钙、硅胶或分子筛等吸湿性物料以吸除湿分者属之。此法费用较高,只用于少量物料中的去湿。

在实际生产过程中,一般均先用机械法尽量降低物料中的湿分,而后再用热物理法除去其剩余的湿分。

工业生产中的干燥过程,主要为去湿过程中的热物理法,是指从固体物料中以加热方法使少量湿分汽化进入气相以达到干燥目的的过程。

16.1.2 干燥过程的特点

固体物料的干燥包括两个基本过程,首先是对固体加热以使湿分汽化的传热过程,然后是汽化后的湿分蒸汽由于其蒸汽分压较大而扩散进入气相的传质过程,而湿分从固体物料内部借扩散等的作用而源源被输送到达固体表面,则是一个物料内部的传质过程。因此,干燥过程的特点是传热和传质过程同时并存,两者相互影响而又相互制约,有时传热可以加速传质过程的进行,有时,传热又能减缓传质的速率。在生产操作、设备选型以及在干燥过程的解析中,均应对这一特点注意。

16.1.3 干燥操作的目的

在物料或制成品的工艺加工过程中，干燥操作的目的可分为下列四种：

(1) 各种生产工艺过程的要求

粗略地分为下列几类

1. 为提高粉磨加工的效率，在粉磨前必须对原材料进行干燥，如煤、水泥生产，谷物等的粉磨。

2. 为防止陶瓷、建筑材料成型制品在烧成时的开裂，或避免木材加工后的变形，故在烧成或加工前必须进行干燥。

3. 为防止某些高分子材料成型加工时产生气泡及物料降解，事先必须经过干燥。如涤纶切片在纺丝前必须干燥至含水量在0.02%以下。

4. 为改进工艺生产过程，提高产品收率而使用干燥操作。如木屑稀酸水解制取葡萄糖工艺，一般应用浓硫酸水解，由于酸量少，喷洒不够均匀，需采用机械碾压等方法以增加糖的收率。而如将木屑先浸渍于稀硫酸中，在滤去多余的酸后进行干燥，这样既可保证酸能均匀地分布于木屑的整个表面，又能使酸的分子深深地渗透到木屑组织内部。当物料干燥时，稀酸也随之浓缩，当浓度达到63%时，纤维素溶解，多糖解聚为单糖，反应速度快而均匀，糖的平均收率可达95%以上。

5. 为防止在生产过程中存在引起腐蚀的湿分而应用干燥，例如煤气的干燥或苯在氯化之前的干燥等。

(2) 为提高或强化大型设备的生产能力而应用干燥操作

如炼焦煤采用预热干燥，可使焦炉的生产能力提高50%，且还能提高焦炭的质量。

(3) 干燥原材料或产品

干燥原材料或产品，以减轻重量，降低运输费用，或使物料变干，以便于运输。如食盐干燥以保持其自由流动的特性。

(4) 提高燃料的热值

为提高燃料的热值以使劣质燃料能有效地应用于高温工业用炉，或增加产品的有效成分以使其便于处理及销售。如肥皂粉，染料以及各种化学肥料等。

(5) 使产品便于保藏

为使产品便于保藏，而不致中途变质腐烂而应用干燥操作。如各种抗生素药品，各种生化制品，各种食品，蔬菜等水分的存在，有利用微生物的繁殖，因而使产品分解或变质。干燥对这类物品的储存是十分必要的。

16.1.4 分散悬浮态干燥在化学工业以及其他工业上的应用

随着工农业生产的迅速发展，产品品种日益增多，质量要求也愈严格，生产能力则更快地向大型化发展，这样，传统的、原有的干燥装置已不能适应新的需要。因此，分散悬浮态干燥技术在化学工业以及其它工业中得到了广泛的应用和发展，现就国内部分资料分列如下⁽¹⁾⁽²⁾。

(1) 气流干燥

(1.1) 干燥的物料

药品：阿斯匹林、S. N、四环素、扑热息痛、苏打、安乃近、吡唑酮、S. O水杨酸钠等。

无机类产品：硫铵、磷酸三钠、磷酸氢钙、保险粉、亚硫酸钠、氯化锂、硼砂等。

有机类产品：聚氯乙烯、聚乙烯、季戊四醇、乌洛托平、促进剂M. D、717 离子交换树脂、微球催化剂、玉米淀粉、硬脂酸盐等。

(1.2) 脉冲气流干燥

干燥的物料有：磺胺嘧啶中间体对乙酰胺基苯磺酰氯 (A. S. C)、聚氯乙烯、聚丙烯、兰B. B染料、苯甲酸、亚硫酸钠、糖氯酸以及制药中间体缩合物等。

(1.3) 短管气流干燥

被干燥的物料有：焦亚硫酸钠、对氨基酚、醋酸钠、保险粉等。

(1.4) 倒锥形气流干燥

被干燥的物料有：小苏打、聚氯乙烯、重铬酸钾等。

(1.5) 套管形气流干燥

被干燥物料：癸二酸。

(1.6) 旋风气流干燥

被干燥的物料有：四环素、合霉素、氯霉素、土霉素、安眠酮、S. N、A. S. C、咖啡因等药品应用较广泛，其它尚有药用淀粉、硬脂酸镁、磷酸钙镁、二乙苯胺等。

从上述应用气流干燥的物料来看，主要应用在颗粒状物料，湿分主要是属于表面水的干燥过程中。

(2) 沸腾干燥

(2.1) 圆筒型沸腾干燥

单层：被干燥的物料有：硫铵、聚四氟乙烯、葡萄糖酸钙、氯化铵、无水亚硫酸钠、碱性青莲染料以及催化剂颗粒、椰容等。

多层：被干燥的物料有：涤纶切片、水杨酸钠、氨基匹林、片剂淀粉颗粒、土霉素、金霉素、四环素、糖粉等。

(2.2) 卧式多室沸腾干燥

干燥的物料有：聚氯乙烯树脂、聚丙烯树脂、尼龙1010，涤纶切片、氯化钠（精盐）、中药皂素及各种制剂药厂的片剂颗粒，如驱蛔灵、水杨酸钠、胃舒平、各类磺胺药、四环素、氯霉素、合霉素、肝粉、糖粉等。

这种卧式多室沸腾床干燥器在合成树脂及药品制剂厂应用较多。

(2.3) 喷雾沸腾造粒

其物料有：葡萄糖、尿素、硝铵、无水氯化钙、水杨酸钠、丙二酸钠、醋酸钾、溴化钠、溴化铵、及钛白粉等。

喷雾沸腾造粒可直接从溶液一步干燥成水分合格的颗粒，从而可使蒸发、结晶、过滤、干燥四道工序合并为一步完成，但控制粒度增长及一定的返料比是该法成败的关键。

(2.4) 喷动床干燥

被干燥的物料有：各种农产品，如稻谷、油菜子、豆类作物，以及玉米胚芽、过氯乙烯、苯乙醚胺，农药敌草隆、龙胶、聚矾等。

喷动床用以干燥颗粒较大、较难用常用硫化速度以使其均匀流化的物系。

(2.5) 其它类型沸腾干燥

如应用带惰性粒子的沸腾床以干燥钛白粉及农药代森锌等。

用分布板振动以使粘性物料均匀流动的振动干燥器，用以干燥糖精及砂糖。

用带有搅拌器的沸腾干燥器以使含湿量较大或带粘性的物料能均匀流化的装置,如用以干燥酞酐素等物料。

由此可见,沸腾干燥的应用范围十分广泛。

(3) 喷雾干燥

应用喷雾干燥处理的物料可按如下分:

乳蛋类:全脂或脱脂乳,黄油乳,奶油,黄油,冰淇淋粉,婴儿代乳粉等。

碳水化合物或谷物类产品:葡萄糖,麦精,淀粉,糖蜜,以及谷朊等。

酵母类:饲料酵母,酵母粉等。

水果及蔬菜类:柑桔,木瓜,芒果,杏,莢实,辣椒粉,植物蛋白,蛋白质水解物等。

咖啡以及茶类:速溶咖啡,速用咖啡代用品,速溶茶,速溶冬青茶等。

香料类:天然香料,合成香料。

药物类:维生素,酶,抗菌素,无菌人血清,糊精,肝精,培养基,中草药植物抽提液等。

动物屠宰产品类:血,血浆,腺体,肉精等。

海产品类:可溶性鱼粉,鱼浆,鱼蛋白质,可溶性鲸鱼粉等。

单宁酸类:植物单宁酸,合成单宁酸,铬单宁酸等。

合成树脂类:聚氯乙烯乳液聚合液,聚醋酸乙烯酯乳液,尿素甲醛树脂,蜜胺甲醛树脂,苯酚甲醛树脂,丁二烯共聚物等。

染料及颜料类:染料,染料中间体,无机颜料,有机颜料等。

农药类:除草剂,杀菌剂,杀虫剂等。

陶瓷和矿物类:瓷粉,骨石粉,钛酸盐,矾土,玻璃,陶瓷釉等。

其它:氮、磷、钾复合肥料,微球形催化剂及亚硫酸纸浆液等。

从上述情况看,分散悬浮态干燥技术已深入到化学工业及其它工业的各个领域,成为干燥过程的主力军。由于具有干燥速度快,过程中物料温度较低,适用于热敏物料,产品具有良好的分散性和疏松流动性,及干燥过程不易混入杂质,产品纯度高,生产控制方便,特别适于连续大规模生产等特点,故分散悬浮态干燥技术正在进一步向各个工业的深度和广度发展。

16.1.5 干燥技术的进展概况

随着工农业生产的迅速发展,干燥技术也有较大的进展,现分装置、过程及基础理论三部分介绍。

(1) 装置

由于物料特性各异,干燥要求不同,因此,干燥装置的发展种类可以说是五花八门,种类繁多,现将近几年来进展归纳和综合如下。

1. 为减低投资及操作费用,各类干燥装置向超大型化发展

如干燥煤的单层圆筒沸腾干燥器,其直径已达4.2m,产量可达375t/h,除水速率为35t/h^[3]。

而气流及喷雾干燥,其产量亦均已达80t/h^{[4][5]}。

2. 开发了一些变型的干燥装置

如:干燥膏状物料的Cyclo干燥器^[6],旋涡式(Convex)^[7]干燥器,空气喷射式(Air-

Jet) 干燥器^[6]等。

3. 改进和完善原有的干燥装置

如在卧式多室沸腾干燥器的进料端, 加装一每分钟仅数转的搅拌器, 以避免湿物料的成团和粘结^[8]。为使粘性物料在流化床分布板上均匀连续运动, 使用分布板作往复震动, 这都是附加机械装置以改进干燥器的性能。另外为了防止物料的返混, 这可使分布板作阶梯状的下降。为防止多层沸腾床物料溢流管的气体短路, 在溢流管上加装密封星形阀等^{[8][9]}。

气流干燥器的改进方向为: (1) 延长颗粒停留时间; (2) 提高热风和颗粒的相对速度; (3) 改进物料的分散程度 (在产量大的气流干燥器中宜特别注意这点^[1])。

喷雾干燥的改进主要为采用大功率离心盘雾化器, 传动功率可达440kW, 转速则可达21,000rpm^[11]。以及改善塔内气雾接触, 应用高速一次风以强化干燥, 引进贴壁二次风以减少粘壁等^[12]。

4. 联合干燥的应用, 采用二种不同的干燥装置串联使用以取长补短, 气流-流化, 喷雾-流化, 微波-热风, 滚筒-远红外等^{[13][14]}。

5. 物理新技术的应用, 推广应用了远红外及微波等的新技术干燥器^{[15][16]}。微波干燥还兼有对食品及药品的灭菌作用^[1]。

(2) 过程

(2.1) 提高干燥过程的热效率和节约能源

干燥作为一大量耗热的过程, 近年来由于能源危机及价格较贵, 故节能和提高过程热效率已成为急待解决的一大课题。主要措施为:

1. 在干燥前尽量降低物料的湿含量

以稀浆喷雾干燥为例, 若稀浆含水65%, 则其干基水含量为1.86kg/kg干物料, 现若将稀浆压滤, 使水含量下降为50%, 则其干基变为1kgH₂O/kg干物料, 这样, 每公斤干物料用机械方法先除去了0.86kg水, 使以干燥得到每公斤干物料所需的热耗量比原稀浆法节约热能50%左右, 而喷浆的动力消耗为0.077~0.1kW/kg干物料, 比原稀浆法节省动力85%左右。当然, 也提高了干燥器的生产能力。同时, 由于膏糊状物料含水率低, 雾滴干燥所需要时间短, 这也就容易避免粘壁, 从而可减小干燥器的容积。膏糊状物料的直接喷雾干燥, 现已在天津油漆厂试验成功, 并投入生产^[18]。其成功的关键是使用三流两次内混气流式雾化器进行膏糊状物料的雾化以及使用灰浆柱塞泵进行膏糊状物料的输送。

2. 干燥过程中废气带走的热量占总热量支出的分率很大, 若能降低这一热量的输出, 则能大大提高干燥过程的热效率^[8]。在沸腾干燥器内应用内加热装置, 由于原来气固给热量的一部分可由内加热管来担任, 而热源一般为蒸汽或热水, 可循环使用, 这样, 这部分给热的热效率可接近于100%。据有关文献报导^[19], 一台干燥能力为4.5t/h的聚氯乙烯树脂沸腾干燥器, 全部使用热风加热和使用部分床层内加热管, 热空气需用量各为92000kg/h及18300kg/h, 比值为5:1, 则沸腾床层横截面积之比两者亦为5:1, 而由于热风用量大幅度下降, 使干燥器的热效率由热风加热型的39.7%提高到内加热管型的72.5%, 几乎提高达一倍。聚氯乙烯树脂干燥采用内加热管后可用沸腾干燥来一步完成, 而不需用传统的气流-沸腾两步干燥。

3. 在保证干燥物料质量的前提下, 尽量采用高温干燥, 如在选矿矿砂的浆状喷雾干燥上, 有选用760℃^[20]或1000℃^{[12][21]}的高温进风, 出口温度为80~120℃, 这样就可使该过程的热效率高达85~90%。在气流干燥中, 亦有使用800℃的高温燃气作干燥介质的。