



粮食干燥解析法

李长友 著



科学出版社

广东科学技术学术专著项目资金资助出版

粮食干燥解析法

李长友 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以过程解析理论、能效评价方法为主线,面向产业应用,总结作者在干燥解析理论方面多年来的研究成果。全书包括粮食干燥科学及解析基础和深床干燥解析法两篇,共分8章。主要包括粮食水分结合形式的介绍,热物理特性、结构特征的理论表达,水分结合能、干燥动力学与传热、传质过程的模型解析,不同干燥工艺过程的分析解及其解析方法,干燥系统焓的分析及能效评价方法。重点考虑多学科交叉、干燥标准及解决产业应用中的现实问题,通过实例,讲述过程解析及能效评价分析的方法。

本书适合农业工程类、能源工程类、机械工程类等相关专业的高校师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

粮食干燥解析法/李长友著. —北京: 科学出版社, 2018.3

ISBN 978-7-03-055871-8

I. ①粮… II. ①李… III. ①粮食—干燥—技术 IV. ①TS210

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 305762 号

责任编辑: 郭勇斌 彭婧煜 / 责任校对: 杜子昂
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 涿州锦晖计算机科技有限公司

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年3月第一版 开本: 787×1092 1/16

2018年3月第一次印刷 印张: 15 插页: 6

字数: 356 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



李长友，1958年出生，华南农业大学教授、博士生导师、享受国务院政府特殊津贴专家。长期从事农业机械化工程、机械设计、干燥解析理论与控制工程领域的教学及科学研究。出版专著、教材8本，授权发明专利22项，被SCI、EI收录论文80余篇，其中“粮食水分结合能与热风干燥动力解析法”被评为2015年“中国百篇最具影响优秀国内学术论文”。获国家级教学成果二等奖1项，获省部级科技成果奖8项。

序

我国粮食年产量 6 亿多吨，是世界第一粮食生产和消费大国，但我国粮食干燥机械化装备技术水平较低，干燥机械化程度还不足 10%，与日本、美国、加拿大等发达国家在 20 世纪 80 年代就达到 90% 以上的水平相比，相差甚远；目前全国农作物耕种收综合机械化率已达 63.8%，发展很不平衡。近年来，在国家良好的政策导向下，干燥机市场持续走热，设备数量增长很快，但整体市场比较混乱，新技术应用不足，设备制造质量不高，适应性、通用性、可靠性、安全性差，处理工艺粗放，能耗高，效率低，品质不能保障。导致问题的原因有多方面，其中粮食干燥技术基础研究重视不够、设备效能评价标准不科学是问题的根源之一。我国的干燥机评价标准中缺乏公平、合理的干燥机作业能力和单位热耗评价方法，在一定程度上影响了新技术、新工艺的研发、应用和推广。

支撑粮食节能干燥与质量控制最重要的技术基础，在于揭示粮食自身固有的、适应外部条件变化的内部特征参数。为获得客观、真实的反映干燥过程的解析解，许多科研人员进行了大量的研究。基于宏观的质量、能量守恒定律和不可逆热力学原理，建立了含湿量、温度和气相压力解析方程，而方程中系数的物理意义不明确，大多假设其系数为常数并把干燥过程简化为一段降速干燥，建立并求解物料蒸发、相际水分交换、介质增湿三者之间的质平衡方程，将物料的最大干燥速率比等价于自由含水比，给出求解方法。由于自由液面蒸发的饱和含湿量，质量守恒定律要求扩散流的积累和流失必须保持一致，同时，在干燥中，还必须与粮食蒸发分数保持平衡，在不能精确掌握模型中诸多特征参数，如比表面积、有效蒸发面积系数、干燥过程中的传质系数及与系统热损关联的众多机制参数的情况下，难以得到较为切合实际的计算结果，导致提出的解析方法至今也未能应用于实际。就解析深床干燥和评价干燥系统的效能而言，并不一定要预先知道物料蒸发、相际水分交换等物理机制，可以通过研究系统中能够可靠测量的过程量、边界条件、初态和终态参数、定性尺寸等影响因素在干燥过程中的内在联系，综合成无量纲的数群，依此，揭示出机制参数在实际干燥过程中的变化规律，解析出干燥过程。

《粮食干燥解析法》一书，基于热力学方法，在深入分析过程特性和物理机制、水分结合能、干燥系统焓效率的基础上，揭示了干燥过程中，系统特征参数的内在联系，获得了分析解，发展了解析法理论，通过静置层、流动层的特定实例，说明过程解析及

能效评价的方法。为通过干燥工艺和装置结构设计来增大动力系数，开发干燥自适应控制系统，实现粮食优质、高效节能干燥提供了应用技术基础和分析方法。对干燥技术创新，制定科学、公平的评价标准，推动干燥领域科学技术进步具有重要的学术价值和现实意义。

罗锡文

2017年11月

前 言

干燥理论涉及热量和质量传递（以下简称热质传递）、水分同物料的结合形式、干燥品质形成机制，以及不可逆热力学、物性学和动力学等多个学科，干燥理论与干燥工艺、干燥技术的有机结合构成了干燥科学。研究干燥问题的方法有理论研究和试验探索两类。理论研究方法主要有数学解析法、有限元分析法、数值解析法等。随着人们对干燥认识的不断深入，数学解析法在研究复杂的干燥问题中逐渐得到重视。为了指导干燥设计，实现优质、高效节能的目的，针对粮食在稳态条件下的干燥特性，人们建立了各种粮食的薄层干燥模型及其特征参数计算式。基于薄层干燥模型、导热微分方程、对流换热微分方程和干燥质平衡微分方程，利用计算机模拟干燥过程获得了较为广泛的应用，但模拟精度主要取决于模型中的参数取值。在不能精确在线测量诸多粮食物性、干燥过程及机制参数的情况下，其模拟结果与实际情况往往存在较大的差异。由于在实际干燥过程中，粮食及其介质的物性、状态实时变动，其成分、质构、集群组态、形态、位置的变动导致热质传递、干燥系统焓（以下简称干燥焓）及其传递发生变化，影响因素很多，问题十分复杂。为了得到这一系统的分析解，基于唯象学、相似理论的研究方法，客观地揭示干燥动力系数与物性、结构及能够正确测量出的过程特征参数之间的关系，把干燥系统的若干因素，按照它们在过程中的内在联系，综合成无量纲，能够使复杂问题得到大幅度简化。然后，通过试验研究，找到规律，验证理论，进而指导干燥装备及工艺系统设计。

粮食干燥系统存在诸多不确定因素，许多机制参数难以揭示，诸多过程参数又很难获得可靠的实时在线测量结果，导致粮食干燥过程控制一直徘徊在开环调节的水平等诸多疑难问题上。对此笔者已展开了 30 多年的研究，积累了一些解决问题的思想和方法。尤其是近年，在完成国家自然科学基金项目“高湿稻谷热力场协同干燥能效评价与品质形成机理的研究”“稻谷干燥特征函数及其系统解析理论研究”“粮食干燥体系焓特征及热质运动规律的研究”和教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目“谷物种子干燥行为与能质传递解析法研究”的过程中，笔者揭示了高湿稻谷水分分布与干燥峰面的移动过程，给出了粒体内部水分结合能及温度分布解析式，解析出了非稳态干燥过程粮食籽粒内部温度及压力分布，求解了深床干燥质平衡基础方程，获得了不同干燥工艺方式下的含水率在线分析解。为正确把握粮食干燥过程，指导干燥设计，评价干燥机产能，制定干燥设备效能评价标准，实现干燥过程自适应控制，补充了一些理论分析和解析计算的方法。通过总结历年的研究成果，以过程解析理论、能效评价方法为主线，面向产业应用，笔者撰写了《粮食干燥解析法》一书。围绕物料中的自由水分集态变化、解析物料干燥、相际水分蒸发、

介质增湿平衡关系展开系统的研究工作,其理论基础是热力平衡与热质传递。基本任务是通过干燥系统、热力平衡、状态参数、干燥过程的分析,得到干燥系统的分析解,为指导干燥工艺及装备设计,实现干燥过程自适应控制提供技术基础,进而基于此衡量干燥系统的性能,制定评价标准。其目的是实现粮食优质、高效节能干燥,消耗最少的主观热能,实现最大去水效果。采用唯象学、研究宏观现象的基本方法,通过已经揭示的物性特征参数、干燥特性、扩散与指数模型,探究其干燥特性表示法。把水分在粮食内部及相际蒸发的内在机制及有关的具体性质,当作宏观真实存在的特征数据予以肯定,对微观结构及无法在线测量的系数不作任何假设,利用干燥系统的刚性参数、可测量特征状态点及其真实的状态变化过程,建立这些参数间的内在联系,得到基础方程的分析解。

全书包括粮食干燥科学及解析基础和深床干燥解析法两篇,共分8章。主要包括粮食水分结合形式的介绍,热物理特性、结构特征的理论表达,水分结合能、干燥动力学与传热、传质过程模型解析,不同干燥工艺过程的分析解及其解析方法,干燥系统焓分析及能效评价方法。本书重点考虑多学科交叉、干燥标准及解决产业应用中的现实问题。内容力求简明精炼,以便透彻地说明概念、详尽地介绍解析计算方法。由于笔者的知识水平有限,书中难免有疏漏和欠妥之处,敬请读者批评指正。

李长友

2017年10月

主要参数说明

c	质量热容, $J/(kg \cdot K)$
c_m	摩尔比热, $J/(mol \cdot K)$
c_p	定压比热容, $J/(kg \cdot K)$
c_v	定容热容, $J/(kg \cdot K)$
c'	容积比热, $J/(m^3 \cdot K)$
c_{mp}	定压摩尔热容, $J/(mol \cdot K)$
c_{mv}	定容摩尔热容, $J/(mol \cdot K)$
d	空气的含湿量, kg/kg
e_x	比焓, kJ/kg
E	焓, kJ
Fo	傅里叶数
g_0	单位干燥床层面积上的送风量, $kg/(h \cdot m^2)$
G_0	送风量, kg/h
h	比焓, J/kg
h_a	干空气的比焓, J/kg
h_v	水蒸气的比焓, J/kg
H	焓, J
I	焓损, kJ
k	干燥常数, h^{-1}
m	质量, kg
M	混合物的折合摩尔质量, $kg/kmol$
M_d	干基含水率, %
M_e	平衡含水率, %
M_x	湿基含水率, %
M_0	初始含水率, %
p	压力, Pa
p_v	水蒸气分压力, Pa
p_s	饱和水蒸气分压力, Pa
p_{gv}	粮食表面水蒸气分压力, Pa
q	$1kg$ 介质与外界交换的热量, kJ/kg
q_s	热损, kJ/kg
Q	热量, kJ
R	气体常数, $kJ/(kg \cdot K)$
R_m	通用气体常数, $kJ/(kmol \cdot K)$

R_v	水蒸气的气体常数, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
s	比熵, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
S	熵, kJ/K
t	摄氏温标, $^{\circ}\text{C}$
t_d	露点, $^{\circ}\text{C}$
t_g	粮食温度, $^{\circ}\text{C}$
t_w	湿球温度, $^{\circ}\text{C}$
T	热力学温度, K
T_v	水蒸气的热力学温度, K
u	比内能, kJ/kg
U	内能, kJ
v	比体积, m^3/kg
V	容积, m^3
V_m	摩尔容积, m^3/mol
w	质量分数
W_s	失水量, kg
x_i	摩尔分数
α	导温系数, m^2/h
β	粮食流道的体积分数, %
γ	汽化潜热系数, kJ/kg
γ_i	体积成分, %
γ_v	体膨胀系数
δ	无限大平板的厚度, m
ε	孔隙率
η	层厚无量纲
η_e	焓效率
η_q	热效率
η_{Ex}	干燥室焓效率
θ	干燥时间, h
λ	导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
μ	传质系数, $\text{kg}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$
ν	运动黏度, m^2/s
π	容积无量纲 (风量谷物比)
ρ	密度, kg/m^3
ρ_b	绝干粮食的堆积密度, kg/m^3
ρ_v	绝对湿度, kg/m^3
ρ_{bs}	湿粮密度, kg/m^3
τ	时间无量纲
φ	相对湿度, %
ϕ	自由含水比
χ	空气的含湿量差, $\text{kg 水}/\text{kg 干空气}$

目 录

序	
前言	
主要参数说明	
绪论	1
上篇 粮食干燥科学及解析基础	
第1章 含湿粮食	7
1.1 粮食中的水分	7
1.2 粮食的吸附特性	8
1.3 粮食的吸附和解吸过程	9
1.4 粮食含水率及其表达	11
1.5 粮食的热物理特性	14
1.6 粮食的空气动力学特性	20
第2章 稳态干燥系统的特征参数	26
2.1 干燥系统的基本状态参数	26
2.2 状态参数的特性	32
2.3 湿空气的状态参数图	34
2.4 理想混合气体	36
2.5 理想气体的内能、焓和熵	39
2.6 干燥系统的物质衡算及过程量的计算	44
2.7 干燥过程的热量衡算	46
第3章 干燥过程的理论表达	48
3.1 干燥理论研究概述	48
3.2 动量、热量、质量传递基本定律	49
3.3 薄层干燥特性及其理论模型	51
3.4 平衡含水率模型	62
3.5 深床干燥特性及模型	68
第4章 干燥动力解析法	74
4.1 干燥动力学	74
4.2 湿粮基础方程	74
4.3 干燥动力学因子解析法	76
4.4 水分结合能解析法	78
4.5 非稳态干燥过程籽粒内部温度分布解析法	86

下篇 深床干燥解析法

第 5 章 深床干燥基础方程及其求解方法	101
5.1 深床干燥理论研究概述.....	101
5.2 深床干燥过程特征.....	102
5.3 深层干燥特性表达.....	103
5.4 深层干燥系统状态参数变化特征.....	105
5.5 深床干燥基础方程.....	109
5.6 基础方程的求解方法.....	116
第 6 章 静置层干燥解析法	122
6.1 过程特征参数及干燥特性.....	123
6.2 静置层干燥过程解析法.....	125
6.3 无量纲式的有量纲化.....	132
6.4 稻谷静置层干燥解析实例.....	138
第 7 章 流动层干燥解析法	156
7.1 稳定流动深床干燥系统.....	156
7.2 流动层干燥过程特征与参数.....	157
7.3 逆流干燥解析法.....	158
7.4 多段逆流干燥-缓苏过程解析法.....	168
7.5 顺流干燥解析法.....	170
7.6 横流干燥解析法.....	178
第 8 章 干燥系统焓分析及能效评价	183
8.1 能量转换的差异性及焓.....	183
8.2 不同形式焓的计算.....	185
8.3 焓平衡方程及焓效率.....	189
8.4 粮食热风干燥系统焓分析.....	191
8.5 干燥系统的能效评价.....	195
8.6 干燥系统焓匹配及能效评价法.....	199
参考文献	202
附表 1 部分常用气体在理想气体状态下的平均定压比热容	204
附表 2 部分常用气体在理想气体状态下的平均定容热容	205
附表 3 饱和水与饱和水蒸气表 (按温度排列)	206
附表 4 饱和水与饱和水蒸气表 (按压力排列)	208
附表 5 未饱和水与过热水蒸气表	210
附表 6 大气压力 ($p=1.01325\times 10^5\text{Pa}$) 下空气的热物理性质	221
附表 7 未饱和水和饱和水的物理参数	223
附表 8 饱和水蒸气的物理参数	225
附表 9 0.1MPa 时饱和空气的状态参数	226
附表 10 大气压力 ($p=1.01325\times 10^5\text{Pa}$) 下烟气的热物理性质	228
彩图	229

绪 论

粮食干燥是在大惯性、非线性、湿、热、混杂粉尘及多种不确定扰动因素并存的条件下自发去水的过程,伴随水分蒸发,粮食自身的物性特征实时改变并发生一系列复杂的理化反应。影响干燥效果及品质的成因,不仅有内部因素、外部条件,还有干燥系统的扰动及能质的内损耗。干燥体系的外部条件主要是介质的温度、湿度、压力、比容、初期粮食的含水率等状态参数;内部因素包括干燥系统的工艺方式、机械结构特征、粮食与介质的相对位置及运动特征、过程物性变化特征等;扰动量主要是进粮水分不一、大气条件波动、粮食及介质流态变化、供热及机器工况不稳等不确定因素,会引起干燥系统宏观参数大范围波动甚至引起反向相变,过程的不确定性也导致了诸如粮食的比表面积、有效蒸发面积系数、传质系数、有代表性的排气温度、湿度测点等诸多参数动态变化。单纯依赖物理技术检测手段,得到精确、可靠的实时在线数据难度极大,加上粮食体积收缩、质构、组态变化引起空隙、迂曲度改变,导致水分运输通路及强度非线性变化,使得固定测点测量值的代表性降低,直接影响热效率、干燥特征参数、在线平衡水分、实际干燥时间、相对运动速率、相际放热强度、热质惯性流动等的定量评价。如何获得这一复杂系统的分析解,通过模型解析,客观、真实地揭示其变化规律,科学地评价系统的效能是干燥研究领域的重大课题。

为探究不确定干燥系统复杂的解析理论与方法,历代研究人员进行了大量的工作,获得了很多有价值的试验数据,给出了多种粮食物性特征参数及干燥特性计算式,有了较为精确的平衡含水率计算模型。在 20 世纪 20~30 年代,人们把多组分气体扩散的菲克(Fick)定律应用于干燥过程,在假定扩散系数为常数的条件下,建立了扩散理论模型。1937 年 Ceaglskec 和 Hougen 的实验结果及 Hougen 等的分析显示,常系数扩散理论模型解析结果与实际情况不符,他们认为干燥过程中物料内部水分迁移是毛细管作用的结果,用毛细管压力势与含湿量之间的关系,能正确表达干燥过程,但此做法没有考虑温度对干燥过程热质传递的影响,所给模型的应用同样有很大的局限性。1968 年 Luikov 基于宏观的质量、能量守恒定律和不可逆热力学原理,推导了一组关于含湿量、温度和气相压力的方程组,但方程中的系数没有明确表达,应用时常要假设为常数。Krischer 综合考虑液体浓度梯度引起的毛细管流动和水蒸气分压梯度引起的水蒸气扩散运动,基于温度差、浓度差和压力差三种驱动势,建立了一种干燥理论模型,利用吸附等温线来确定物料内部蒸气压分布。该模型中的系数同样要假定为常数,才能进行求解。同时期内研究人员基于连续流动,把体积平均运动方程和能量方程转换成含湿量、温度和气相压力三个方程,给出了多种不同形式、较复杂的偏微分数学方程,不足之处同样是方程中系数的物理意义不明确。

研究人员试图获得深床干燥过程的解析解, 1958年 van Meel 基于自由液面蒸发、介质湿球温度下的饱和含湿量, 假设相际传质系数为常数, 把干燥过程简化为一段降速干燥, 并把物料的最大干燥速率比等价于自由含水比, 建立并求解物料蒸发、相际水分交换、介质增湿三者之间的质平衡方程, 给出了基础方程的分析解。1959年桐荣良三基于 van Meel 的方法, 解析了粉体的一段降速干燥过程。1980年本桥国司基于 van Meel 的方法, 解析了稻谷的二段降速干燥过程。由于 van Meel 求解基础方程时, 基于的是自由液面蒸发的饱和含湿量, 质量守恒定律要求扩散流的积累和流失(随时间的变化率)必须保持一致, 同时在干燥中, 还必须与粮食蒸发分数保持平衡。显然, 在不能精确掌握模型中的诸多特征参数的情况下, 如比表面积、有效蒸发面积系数、干燥过程中的传质系数及与系统热损关联等众多参数, 难以得到较为切合实际的计算结果, 导致提出的解析方法至今也未能实际应用。

强化干燥过程, 可以通过增强过程的驱动力和增大动力学系数的方法来实现。由于粮食对其干燥温度要求比较严格, 在提高温度、增强干燥动力受到限制的情况下, 依赖工艺方式和装置结构设计来增大动力学系数, 是实现粮食优质、高效节能干燥的主要技术途径。要真实地表达动力学系数在动态干燥过程中的响应规律, 还必须深入考证干燥现象的理论表达, 探索反映干燥本质主流特征的解析方法, 进而确立基本参数之间的相互制约关系。就解析深床干燥现象、评价干燥系统的效能而言, 解析其干燥过程并不一定要预先知道反映物料蒸发、相际水分交换等物理机制, 可以通过研究系统中能够正确测量出的过程量、边界条件、初态和终态参数、设计的几何特征参数和确定的工艺条件等影响因素在干燥过程中的内在联系, 综合成干燥无量纲的数群。依此, 揭示出机制参数在实际干燥过程中的变化规律, 解析出干燥过程。也就是说, 对干燥发生的机制不做假设, 只对干燥现象做高度可靠的解析, 给出基础方程的分析解及其解析方法。

当粮食和介质间存在温度、水分及其他组分浓度差等不平衡势时, 必然发生能量及物质的宏观运动, 最后使干燥系统到达平衡态, 伴随过程发生热质传递和动量传递, 服从传递的基本原理。随着现代系统科学的发展, 干燥技术及其过程解析理论方法也在发展。基于热力学系统科学的思想和方法, 深入分析粮食干燥系统的过程特性和物理机制, 探索过程参数、干燥无量纲的物理意义和与过程特性参数间的内在联系, 发展干燥解析法理论, 是一项具有理论价值和重要现实意义的工作。

热和水在物料中迁移的机制, 取决于物料的物性特征, 而物性特征在迁移过程中不断改变, 又以粮食与介质之间的热质传递, 相互作用过程的干燥特征为基础。本书基于热力学及系统分析方法, 揭示粮食干燥系统的系统特征, 从整体宏观现象出发, 研究干燥宏观现象与物料、介质及其运动, 工艺系统结构特征, 扰动与功能、干燥条件与系统扰动等的相互联系和相互作用, 提出粮食在不确定干燥系统去水过程的理论, 阐明干燥水分、自由能、结合能的概念, 揭示结构参数、条件参数、干燥无量纲和过程特征参数的内在联系、干燥系统的能量结构, 给出粮食深床干燥特性的理论及其静置层干燥、流动干燥、多段逆流干燥-缓苏工艺过程的分析解及其能效评价方法。把水分迁移的现象看作一定数量的能量迁移, 建立水分结合能解析模型, 给出水分结合能随温度、含水率变化的规律, 为合理匹配干燥温度提供理论依据和分析方法。从揭示干燥层内单一颗粒粮

食的干燥行为中,找到表达深床干燥的统一特征参数及其数学表达式,基于状态函数表征干燥系统状态变化的综合特征,给出具有普遍意义的、能够表征其综合去水特征的数学模型,获得干燥层厚无量纲、干燥时间无量纲和容积无量纲,揭示不确定干燥系统物性、结构、运动、扰动等特征参数之间的内在联系及在干燥系统中的响应规律。从干燥分析动力学入手,基于热力学方法,讨论获取干燥系统分析解的理论表达与解析方法,从干燥现象和过程描述,导出干燥无量纲,深入分析具体过程特性和物理机制,解释结构特征参数、条件参数、干燥无量纲和过程参数间的内在联系,得到客观、真实地反映干燥过程的理论,获得具有实际意义的分析解,充实干燥应用技术基础理论。针对静置层、流动层等特定工艺方式,分析具体过程特性和物理机制,阐述粮食深床干燥解析理论及其在实际干燥中的应用及解析方法。

上篇
粮食干燥科学及解析基础