

GUORE ZHENGQI LIUHUACHUANG 肖志锋 吴南星 著  
GANZAO JILI JIQI SHUZHI MONI

学术理论研究著作

# 过热蒸汽流化床 干燥机理及其数值模拟



经济科学出版社  
Economic Science Press

学术理论研究著作

# 过热蒸汽流化床干燥 机理及其数值模拟

肖志锋 吴南星 著

经济科学出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

过热蒸汽流化床干燥机理及其数值模拟 / 肖志峰著.  
—北京: 经济科学出版社, 2013. 5

ISBN 978 - 7 - 5141 - 3795 - 8

I. ①过… II. ①肖… III. ①流化床 - 蒸汽干燥 -  
流化干燥 - 研究 IV. ①TQ051.1②TQ028.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 220015 号

责任编辑: 初少磊 孙 偲

责任校对: 王肖楠

版式设计: 代小卫

责任印制: 王世伟

## 过热蒸汽流化床干燥机理及其数值模拟

肖志锋 吴南星 著

经济科学出版社出版、发行 新华书店经销

社址: 北京市海淀区阜成路甲 28 号 邮编: 100142

总编部电话: 010 - 88191217 发行部电话: 010 - 88191522

网址: [www. esp. com. cn](http://www.esp.com.cn)

电子邮件: [esp@ esp. com. cn](mailto:esp@esp.com.cn)

天猫网店: 经济科学出版社旗舰店

网址: [http://jjkxcs. tmall. com](http://jjkxcs.tmall.com)

北京季蜂印刷有限公司印装

880 × 1230 32 开 6.75 印张 180000 字

2013 年 9 月第 1 版 2013 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5141 - 3795 - 8 定价: 23.00 元

(图书出现印装问题, 本社负责调换。电话: 010 - 88191502)

(版权所有 翻印必究)

# 前 言

过热蒸汽流化床干燥是近年来国内外最受关注的先进干燥技术之一，它组合了过热蒸汽干燥和流化床干燥的各自优点，具有节能、环保、干燥品质好、干燥效率高、干燥周期短、干燥均匀等特点，在化工、建材、医药、食品、粮食、农产品加工贮藏、城市污泥处理等诸多领域有重要的应用前景。

在过热蒸汽流化床干燥中，过热蒸汽作为干燥介质，具有较大的可压缩性和凝结性，其干燥机理远不同于常规热空气干燥。过热蒸汽在工程应用中不可假设为理想气体，具有很大的可压缩性和凝结性，现有的过热蒸汽干燥模型多为经验模型或半经验模型，适用性差。流化床干燥是一种高效干燥技术，流化床干燥过程是一个伴有传热、传质和相变的气体—颗粒两相湍流的复杂过程。热质传递相互耦合，影响因素众多，现有的数学模型大多为一维或准二维模型，对干燥过程中干燥室内的气固两相运动过程进行了大量的简化，不符合实际，导致目前流化床干燥系统的优化和控制仍依赖于经验或半经验手段，阻碍了流化床干燥技术的创新应用。近年来，随着计算机硬件和计算方法的飞速发展，基于传递过程原理，采用计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）方法对气固两相流系统（如喷动床、流化床等）流动过程和热质传递过程建立数学模型，进行精确模拟已成为研究热点。

干燥过程热质传递机理研究是干燥技术创新的先导。因此，本书在传递过程原理的基础上，从计算流体动力学的角度研究过热蒸

流化床干燥过程机理模型, 讨论模型数值求解方法, 开展干燥动力学实验验证优化模型, 以油菜籽干燥为示例, 进行不同工况条件下的干燥过程数值模拟仿真, 形成干燥特性分析及过程优化控制方法, 为过热蒸汽流化床干燥技术的创新发展与工程应用提供理论指导。

针对过热蒸汽流化床干燥时干燥室气固两相流态化激烈掺混, 并伴有蒸汽凝结、颗粒湿分扩散与蒸发等现象, 首先介绍干燥模型模拟方法、过热蒸汽干燥特性、流化床干燥特性等基础知识, 分析过热蒸汽流化床干燥过程蒸汽—颗粒两相湍流行为及传热传质机理, 详细讨论冷凝加热阶段、恒速干燥阶段和降速干燥阶段的热质传递理论, 为了解过热蒸汽流化床干燥技术和研究过热蒸汽流化床干燥机理奠定基础。

针对过热蒸汽流化床干燥动力学试验研究不足的问题, 设计并制作过热蒸汽流化床干燥实验装置, 进行常压下油菜籽在过热蒸汽中的流化试验, 通过常压下油菜籽的过热蒸汽流化床干燥试验验证干燥过程数学模型的正确性。油菜籽的过热蒸汽流化床干燥过程所需时间较短, 可明显划分为冷凝加热阶段 (“负干燥” 阶段)、恒速干燥阶段和降速干燥阶段; 揭示实际流化床干燥过程中蒸汽相和颗粒相的部分参变量时空分布的非均匀性; 干燥过程中干燥室内物料温度较均匀, 没有局部过热现象发生, 床层内物料干燥均匀, 同一时刻床层内颗粒物料湿含量的空间分布较均匀。

针对实际过热蒸汽流化床干燥时蒸汽相和颗粒相的两相湍流运动与蒸汽凝结、颗粒湿分扩散、蒸发等热质传递过程, 研究利用双流体模型 (Eulerian-Eulerian 模型) 对过热蒸汽流化床干燥过程中进行数理模型构建。分别推导过热蒸汽流化床干燥的冷凝加热阶段、恒速干燥阶段和降速干燥阶段的气固方程, 最终建立过热蒸汽流化床干燥过程的非稳态轴对称二维数学模型。该数学模型主要由基本控制方程组、颗粒群动力模型、湍流模型、曳力模型及气固两相热质传递模型等组成, 实现对过热蒸汽流化床干燥过程中干燥室

内两相湍流运动、传热与传质过程的更真实描述。将过热蒸汽的物性参数模型应用到过热蒸汽流化床干燥过程模型中，解决过热蒸汽不能当作理想气体、具有很大的可压缩性和凝结性等给模型模拟制造的困难。利用 C 语言对非稳态过热蒸汽流化床干燥过程中蒸汽—颗粒两相间热质传递（有冷凝和蒸发相变）模型、曳力模型、物性参数模型等进行了大量的编程，并通过用户自定义函数（UDF）嵌入到计算流体力学求解器中，完成干燥过程数学模型的有效数值计算。

针对现有干燥特性分析、过程控制优化费时费力，效果不好等问题，以油菜籽干燥为示例，在模型验证优化的基础上，开展不同工况条件的过热蒸汽流化床干燥过程计算机模拟仿真，仿真结果表明：（1）双流体模型能较真实地描述过热蒸汽流化床干燥室中固体颗粒的流态化状态，同样条件下二维物理模型模拟得到的颗粒流态化结果比轴对称二维物理模型的结果更接近实际；（2）干燥室内操作压力、进口过热蒸汽温度及表观速度对过热蒸汽流化床干燥过程都有非常重要的影响；（3）在其他干燥条件保持不变时，若进口过热蒸汽温度和表观速率越高，则干燥室内物料干燥速率越大，整个干燥过程所耗费的时间越短；（4）在同样的进口过热蒸汽温度和表观速率条件下，存在一个最佳的操作压力值，使得物料恒速干燥阶段的干燥速率最大，干燥时间最短。因此，基于双流体方法的过热蒸汽流化床干燥过程模型能较好地揭示操作压力、进口过热蒸汽温度、进口过热蒸汽表观速度等重要参数对干燥过程的影响规律，为流态化干燥特性定量分析与过程优化控制提供了新方法。

本书是第一作者肖志锋从在中国农业大学攻读博士学位以来部分研究成果的综合，此书的完稿离不开其导师刘相东教授多年来在学术理论上的精心指导，在工程实践上的耐心讲解，在此谨向刘相东教授表示崇高的敬意和诚挚的感谢！

作者在编写本书的过程中得到了多方面的帮助，参考了大量文

献，从中获益匪浅，并得到了江西省自然科学基金项目(20132BAB216010)、景德镇市2012年度科技计划项目和景德镇陶瓷学院博士科研启动项目的大力支持。在此，谨向所有提供参考文献的作者和资助单位表示衷心的感谢。

过热蒸汽流化床干燥技术发展很快，内容也很丰富，但限于时间和作者的水平，书中不妥之处在所难免，竭诚希望使用本书的同志批评指正。

**肖志锋 吴南星**

2013年3月16日

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	4
1.2.1 过热蒸汽干燥研究现状	4
1.2.2 流化床干燥研究现状	10
1.2.3 气体—颗粒两相流模型研究现状	14
1.3 主要研究内容	19
1.3.1 干燥模型模拟概述	19
1.3.2 过热蒸汽流化床干燥机理	20
1.3.3 过热蒸汽流化床干燥实验	20
1.3.4 过热蒸汽流化床干燥过程的数学模型	20
1.3.5 数学模型的数值求解	21
1.3.6 过热蒸汽流化床干燥过程模拟	21
第 2 章 干燥模型模拟方法概述	22
2.1 模型模拟基础	22
2.1.1 模型	22
2.1.2 模拟	25
2.1.3 干燥过程的模型模拟	26
2.2 基于被干燥物料模型	27



---

2.2.1	温度模型	27
2.2.2	湿度模型	30
2.3	基于干燥过程的模型	33
2.3.1	固定床稳态干燥模型	34
2.3.2	连续式流化床干燥模型	38
2.3.3	喷雾干燥模型	41
2.4	干燥过程模拟	43
<b>第3章</b>	<b>过热蒸汽流化床干燥机理</b>	<b>44</b>
3.1	流态化技术基础	44
3.1.1	流态化现象	44
3.1.2	流化床特性	48
3.1.3	颗粒物料的物理特性	48
3.2	流化床气体动力学	54
3.2.1	流化曲线	55
3.2.2	床层压降	56
3.2.3	临界流化速度	56
3.2.4	挟带速度	58
3.2.5	操作流化速度	59
3.3	流化床内的传热传质	59
3.3.1	流化床内的传热	59
3.3.2	流化床内的传质	62
3.4	流化床干燥设备	63
3.4.1	单级圆筒型流化床干燥器	64
3.4.2	卧式多室连续流化床干燥器	66
3.4.3	多层流化床干燥器	67
3.4.4	脉冲流化床干燥器	67
3.4.5	冲击流干燥器	68
3.4.6	离心流化床	69

---

3.5 过热蒸汽流化床干燥理论	70
3.5.1 湿物料性质	70
3.5.2 过热蒸汽干燥机理	71
3.5.3 过热蒸汽流化床干燥过程	85
3.6 本章小结	86
<b>第4章 过热蒸汽流化床干燥实验</b>	<b>88</b>
4.1 实验目的与内容	88
4.2 实验装置	89
4.3 实验物料	92
4.3.1 实验材料的制备	92
4.3.2 实验材料的物理参数测定	93
4.4 实验测量方法	94
4.4.1 流化曲线	94
4.4.2 干燥曲线	95
4.4.3 油菜籽温度曲线	96
4.4.4 干后产品物性的分析方法	96
4.5 实验工况及条件	97
4.6 实验结果	98
4.6.1 油菜籽的流化曲线	98
4.6.2 油菜籽的干燥曲线	99
4.6.3 干后油菜籽物性的对比分析	103
4.7 本章小结	105
<b>第5章 过热蒸汽流化床干燥的数学模型</b>	<b>106</b>
5.1 物理模型	107
5.1.1 过热蒸汽流化床干燥系统	107
5.1.2 模拟区域	107
5.2 过热蒸汽流化床干燥过程的数学模型	108

5.2.1	气体—颗粒两相流动系统控制体 .....	109
5.2.2	体积平均概念 .....	110
5.2.3	基本假设 .....	110
5.2.4	控制方程组 .....	111
5.2.5	颗粒群动力模型 .....	115
5.2.6	湍流模型 .....	118
5.2.7	曳力模型 .....	120
5.2.8	蒸汽—颗粒两相间热质传递模型 .....	121
5.3	物性参数模型 .....	126
5.4	边界条件 .....	127
5.4.1	进口边界 .....	128
5.4.2	出口边界 .....	128
5.4.3	对称轴边界 .....	128
5.4.4	壁面边界 .....	128
5.5	本章小结 .....	129
<b>第 6 章</b>	<b>数学模型的数值求解 .....</b>	<b>130</b>
6.1	模拟区域网格化 .....	131
6.2	控制方程离散化 .....	133
6.3	气粒两相体积分方程离散化 .....	135
6.4	压力—速度耦合 .....	136
6.4.1	SIMPLE 算法 .....	137
6.4.2	PC-SIMPLE 算法 .....	141
6.5	干燥过程的模拟计算流程 .....	142
6.6	本章小结 .....	143
<b>第 7 章</b>	<b>过热蒸汽流化床干燥过程模拟 .....</b>	<b>145</b>
7.1	常压下油菜籽过热蒸汽流化床干燥过程模拟 .....	145
7.1.1	油菜籽物性参数 .....	145

---

7.1.2	过热蒸汽物性参数 .....	146
7.1.3	干燥参数 .....	147
7.1.4	边界条件与初始条件 .....	149
7.1.5	计算机硬件配置 .....	151
7.1.6	模拟结果与分析 .....	151
7.2	过热蒸汽流化床干燥过程模拟试验 .....	162
7.2.1	不同物理模型的流态化模拟结果比较 .....	163
7.2.2	干燥室内操作压力对干燥过程的影响 .....	165
7.2.3	进口过热蒸汽温度对干燥过程的影响 .....	171
7.2.4	进口过热蒸汽表观速度对干燥过程的 影响 .....	173
7.3	本章小结 .....	175
<b>第 8 章</b>	<b>总结与展望</b> .....	<b>176</b>
8.1	工作总结与主要创新 .....	176
8.2	研究展望 .....	181
	<b>参考文献</b> .....	<b>183</b>
	<b>符号表</b> .....	<b>194</b>
	<b>论文论著发表情况</b> .....	<b>198</b>

# 第 1 章

## 绪 论

### 1.1 研究背景及意义

干燥作业涉及国民经济的广泛领域，是大批工农业产品不可或缺的基本生产环节。干燥也是我国的耗能大户，所用能源约占国民经济总能耗的 12%。另外，干燥过程造成的污染又是环境污染的重要来源，干燥技术的进步同整个国民经济的发展有十分紧密的关系。随着我国节能减排战略的进一步实施，为确保实现我国中长期节能减排目标，探索节能环保、品质改善和操作经济的先进干燥技术势在必行。过热蒸汽流化床干燥是近年来国内外最受关注的先进干燥技术之一，它组合了过热蒸汽干燥和流化床干燥的各自优点，具有传热传质系数大、干燥效率高、单位耗能低、干燥周期短、干燥均匀、干燥品质好等特点，在农副产品加工、陶瓷、化工、食品、医药、城市污泥处理等行业有重要的应用前景。

进入 21 世纪以来，我国面临严峻的人口、资源与环境形势，迫切需要对传统的干燥技术和装备进行改造升级。据有关资料统计，我国现有干燥装备普遍存在能量消耗大、干燥效率低、干燥成本高、干后产品质量差等缺点。当前，国内外研究人员都正围绕提高产品质量、节能环保和操作经济等方向改进现行干燥技术和设

备。过热蒸汽干燥 (Superheated Steam Drying, SSD) 就是一项在工业应用领域较新的技术, 它是指利用过热蒸汽直接与被干燥物料接触而去除水分的一种干燥方式。过热蒸汽干燥的整个环境中仅有一种气体成分 ( $H_2O$ ) 存在, 因而其传热传质机理不同于传统热空气干燥。据国际干燥协会主席牟久大 (Mujumdar) 教授介绍, 过热蒸汽干燥的单位热耗仅为  $1000 \sim 1500$  千焦/千克 ( $kJ/kg$ ) 水, 为传统对流热风干燥热耗  $4000 \sim 6000 kJ/kg$  的  $1/4$ , 是一种很有发展前景的干燥新技术。与传统的热风干燥相比, 过热蒸汽干燥在干燥效率、干燥能耗、干后产品质量和环保等方面都具有非常明显的优势。过热蒸汽干燥的许多潜在优势已逐渐被国内外研究人员所证实。21 世纪以来, 我国对过热蒸汽干燥的研究开始逐步重视, 并取得了一些初步成果, 但还缺乏对其干燥机理、工艺等方面知识的深入认识和理解, 导致过热蒸汽干燥技术在我国尚无工业化应用。流化床干燥也是一种高效干燥技术, 它具有传热传质系数大、热利用效率高、结构紧凑、产品一致性好和物料干燥时间可任意调节等优点。流化床干燥器是发展最快和工业化应用最广泛的一种干燥装备, 其结构紧凑、操作方便, 适用于干燥各种难以干燥的粒状物料和热敏性物料, 并逐渐推广到粉状、片状等物料的干燥。

为此, 结合过热蒸汽干燥和流化床干燥各自优点的过热蒸汽流化床干燥应运而生, 备受人们关注和期待。在过热蒸汽流化床干燥过程中, 以过热蒸汽代替热空气作为流化床的干燥介质, 既可达到节能环保安全和干后产品质量改善的目标, 同时, 干燥室内激烈的流态化过程又将提高对流传热传质系数和热利用效率, 极大缩短干燥时间。因此, 以过热蒸汽为干燥介质的流化床干燥是一种具有巨大潜力、实用可行的新型现代干燥技术。过热蒸汽流化床干燥过程是一个涉及气体—颗粒两相流的复杂传热传质过程, 准确而有效地预测和控制整个干燥过程是快速发展过热蒸汽流化床干燥技术的关键。

然而, 一方面人们还缺乏对以过热蒸汽为干燥介质的过热蒸汽

干燥机理、工艺及工业应用等方面的深入认识和理解，尤其是描述实际过热蒸汽干燥过程的传热传质机理模型还不成熟，极大限制了这种新型干燥技术的设计和应用。另一方面，虽然干燥技术工作者对传统流化床干燥过程和流化床干燥器的设计做了大量的研究，建立了许多描述流化床干燥过程的数学模型，但这些模型大多是在对流化床干燥的大量不符合实际的假设之上，或者是粗略的热力学方程，或者是由一些简单的微分方程和许多经验公式构成。虽然早期流化床干燥数学模型对流化床干燥的发展做出了贡献，但由于这些模型建立在大量与实际相差较大的假设基础上，其经验性强、适用范围窄，而且无法详细地给出干燥过程中干燥介质和物料颗粒的速度、温度、湿含量等的时空分布细节，不能有效地应用于干燥器的优化及放大设计。

20世纪80年代后期，出现了一种新型模拟技术，即计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）技术。CFD数值模拟技术可以解决复杂空间几何形状内的流体动力学问题和气流均匀性问题，可以进行流场的分析、计算及预测，能把实验减少到最低限度，节省实验所需的大量经费、时间和人力，是一种现代化的高新模拟技术。随着多相流研究的发展，CFD技术已逐渐应用于多相流的数值模拟研究，如喷雾干燥、煤粉燃烧，以及陶瓷练泥、造粒、压型等，其考虑了湍流扰动对传递过程的影响，实现了人们对多相流过程中动量传递、热质传递、燃烧和物理化学变化等问题的定性和定量认识。

结合CFD技术和干燥原理对流化床干燥过程进行数值模拟将更符合实际，而且还可以全面地预报流化床干燥的真实过程，得到工程设计所需的详细数据，如干燥室内气体和颗粒物料的复杂运动情况及相互扰动情况，颗粒物料在流态化过程中瞬时的体积分数分布、速度矢量场和温度场，干燥室内气体的温度场、速度场等，甚至还可以预测到一些流化床干燥过程的特殊现象，如沟流、腾涌等。流化床干燥过程的模型模拟也是流化床优化或放大设计的理论

基础和有效手段。

因此,本书首先介绍干燥模型模拟方法、过热蒸汽干燥特性和流化床干燥特性等基础知识,依据气体—颗粒两相流和传递过程理论,深入分析流化床干燥过程中过热蒸汽与颗粒物料之间的动量传递过程与传热传质过程,建立更接近实际情况的过热蒸汽流化床干燥过程数学模型并进行 CFD 数值模拟,定量认识过热蒸汽流化床干燥过程中的流化特性及传热传质特性,揭示过热蒸汽的压力、温度、速度等重要参数对过热蒸汽流化床干燥过程的影响,为过热蒸汽流化床干燥系统的优化设计、控制和运行提供可靠依据,并能对过热蒸汽流化床干燥系统的性能和干燥状态做出准确预测。该研究还将加深对过热蒸汽干燥机理及干燥过程的认识,同时也为 CFD 技术在流态化干燥领域的应用开辟一条新途径,从而推动过热蒸汽干燥技术和流态化干燥技术的更加迅猛发展,使其能更好地为工农业生产实践服务。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 过热蒸汽干燥研究现状

过热蒸汽干燥是指利用过热蒸汽直接与物料接触而去除水分的一种干燥方式。它具有节能效果突出、干后产品品质好、无火灾和爆炸危险、传热传质效率高等特点。过热蒸汽干燥是一项最近发展起来的新技术,特别是近 10 年来发展迅速,关于过热蒸汽干燥研究的文献资料也越来越多,其中具有代表性的研究综述如下:

日本野村(Nomura)等研究表明过热蒸汽干燥表面无硬化现象,他们用过热蒸汽和热风分别干燥一种速食方便面,发现前者会形成一种多孔结构,在热水中很快变软,而后者则比较坚硬。我国多年的研究证实,用过热蒸汽干燥蚕茧不仅可以提高供茧效率,也可以调整茧质和提高出丝率。泰国研究者指出过热蒸汽干燥的稻米



口感更好；过热蒸汽干燥可以明显提高可食用薄膜的张力和延伸性等物理性能；胡萝卜、土豆条等蔬菜过热蒸汽脱水干燥后色泽鲜艳，干燥变形小，复水性能好，具有更高的价格竞争力。由于过热蒸汽干燥过程为无氧干燥过程，所以有利于易氧化物质（如脂肪等）的干燥过程保护。

过热蒸汽干燥的整个环境中仅有一种气体成分（ $H_2O$ ）存在，传质阻力可忽略不计。众所周知，一个大气压下空气的比热容为1千焦/(千克·开) $[kJ/(kg \cdot K)]$ ，而蒸汽的比热容为1.96kJ/(kg·K)，接近空气的2倍。过热蒸汽有较高的传热系数，波特（Potter）等用流化床干燥机干燥煤炭得出过热蒸汽干燥时的传热系数为200~500瓦/(平方米·开) $[W/(m^2 \cdot K)]$ ，而同样条件下热风干燥的传热系数仅为20~50W/(m<sup>2</sup>·K)。日本的桐荣良三对过热蒸汽干燥的逆转点（Inversion Point）温度进行了理论研究，并推导出了逆转点值的计算公式，此逆转点模型已被很多学者所证实。

法国库托伊斯（Courtois）等利用过热蒸汽干燥的节能和改善产品质量等优点来干燥苜蓿草，并进行了干燥模拟和试验验证，作者利用巴塞尔（Bassel）等在1993年提出的解吸附等压线来建立模型，而不是通常热空气干燥用的解吸附等温线，模型还考虑了干燥过程中的冷凝和苜蓿叶的变形收缩等。澳大利亚的雷伊（Looi）等对单个颗粒多孔物料煤炭和陶瓷进行了带压过热蒸汽干燥动力学研究并进行了模拟，用来进行试验的颗粒直径为10~14毫米（mm），用来模拟的过热蒸汽压力为0.29兆帕（MPa），入口温度为160摄氏度（℃），入口流速约为3米/秒（m/s），研究发现水分蒸发干燥锋界面现象与热风干燥相同，都是从颗粒表面逐渐退往颗粒中心的，但其干燥模型假设过多，大多参数取经验值，变量参数少。

唐（Tang）和岑科夫斯基（Cenkowski）对酒糟的固定床过热蒸汽干燥过程进行了模拟，建立的模型包含有物料湿含量、物料温度、蒸汽流速和温度等四个变量，并采用FORTRAN语言进行了数