

NONGCHANPIN JIAGONG YUANLI JI SHEBEI

农产品

加工原理及设备

周江 王昕 任丽丽 编



化学工业出版社

NONGCHANPIN JIAGONG YUANLI JI SHEBEI

农产品 加工原理及设备

周江 王昕 任丽丽 编



化学工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

农产品加工原理及设备/周江等编. —北京: 化学工业出版社, 2015. 7

ISBN 978-7-122-24223-5

I. ①农… II. ①周… III. ①农产品加工-教材②农产品加工机-教材 IV. ①S37②S226

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 123398 号



责任编辑: 周 红
责任校对: 王素芹

装帧设计: 孙远博

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 高教社 (天津) 印务有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 15 字数 378 千字 2015 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 39.00 元

版权所有 违者必究

前 言

农产品加工是以农业产品（粮、油、水果、蔬菜、肉、蛋、奶、水产品、棉麻、毛皮、林产品及野生动植物资源）为原料，按照一定的工艺要求进行的处理、加工和制造过程，其目的是生产人类消费品以及对农业资源进行转化。农产品加工原理及其设备涉及农产品加工中工程技术的基本理论和实践方法，是农业机械化及其自动化工程技术的重要组成部分，也是农业机械化及其自动化专业学生的必修课程。

本教材是为农业机械化及其自动化专业的学生编写的。目前国内出版的同类教材不仅较少，而且只是侧重于农产品加工机械与设备的功能和结构，较少涉及农产品加工原理的系统论述。依据农业机械化及其自动化专业的培养方案，结合本专业学生的知识背景，我们编写了《农产品加工原理及设备》这本教材，希望学生在掌握农产品加工技术基本理论的基础上，认识和理解相关设备的功能和结构，培养综合工程思维能力与创新能力。本书是在总结笔者多年讲授相关课程积累的大量素材以及参考国内外相关专著和文献的基础上编写而成的。

鉴于农产品种类繁多，涉及面非常广泛，其加工设备的类别也是多种多样，本教材的内容不可能面面俱到。本书以农产品加工过程中的主要单元操作为主线，在重点阐述各种单元操作目的和原理的基础上，对涉及的加工设备按单元操作分类介绍，并对主要工作部件的工作原理、结构和工作过程以及主要性能参数进行叙述。然后，结合农产品加工（包括粮油加工、果蔬加工和畜牧产品加工）的工艺流程，讲述单元操作的应用和加工设备的选择，使读者进一步加深对各种单元操作以及相关设备的认识和理解。本教材力求涉及面广、内容丰富，单元操作设备以共性为主、个性为辅，力争使读者能够抓住要领，举一反三。此外，本教材还反映了农产品加工领域的一些最新技术成果和发展趋势。

参加本书编写工作的有吉林大学周江（第一章、第五章、第八章）、吉林大学任丽丽（第二章、第三章、第四章、第六章）和吉林大学王昕（第七章、第九章、第十章）。吉林大学周作伸教授对部分章节的编写提出了建设性意见。全书由周江统稿及审核。本教材得到教育部高等学校“农业机械化及其自动化专业综合改革试点”项目的资助，出版过程中得到化学工业出版社的大力支持，在此表示感谢。同时，对本教材众多参考文献的作者表示感谢。

由于笔者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 绪论	1
第一节 引言	1
一、我国农产品加工业的现状和特点	1
二、农产品加工在国民经济中的作用	2
三、农产品加工的基本任务	3
第二节 农产品加工中的单元操作	3
第三节 学习《农产品加工原理及设备》的目的与方法	4
第二章 物料输送及其设备	5
第一节 物料的流体输送	5
一、物料的气力输送	5
二、物料的液力输送	15
第二节 带式输送机	18
一、带式输送机的结构和工作原理	18
二、带式输送机的主要构件	18
三、带式输送机输送能力的计算	19
第三节 螺旋输送机	19
一、螺旋输送机的结构和工作原理	20
二、螺旋输送机的主要构件	21
三、螺旋输送机输送能力的计算	22
第四节 刮板输送机	22
一、刮板输送机的结构和工作原理	22
二、刮板输送机输送能力的计算	23
第五节 斗式提升机	23
一、斗式提升机的结构和工作原理	23
二、斗式提升机的主要构件	24
三、斗式提升机输送能力的计算	24
第三章 清洗、分选及其设备	25
第一节 清洗原理与方法	25
一、清洗原理	25
二、清洗方法	26
第二节 清洗机械	27
一、栅条滚筒式清洗机	27
二、螺旋式清洗机	28
三、组合式清洗机	29
第三节 谷物分选及设备	29

一、气流分选	29
二、筛分	31
三、比重（密度）分选	38
四、按物料其他物理性质分选	40
第四节 果蔬分选及设备	42
一、按尺寸形状分选	42
二、按重量分选	44
三、光电分选	44
第五节 分选工作质量	47
第四章 分离及其设备	49
第一节 颗粒在流体介质中的相对运动	49
第二节 分离原理	51
一、沉降	51
二、过滤	54
三、离心分离	56
第三节 分离设备	59
一、沉降设备	59
二、过滤设备	60
三、离心分离机	63
四、旋液分离器	67
第四节 膜分离及设备	68
一、膜分离原理	68
二、膜分离设备	69
第五节 压榨及设备	71
一、压榨原理	71
二、压榨设备	72
第六节 超临界流体萃取及设备	74
一、超临界流体萃取原理	74
二、超临界流体萃取设备	75
第五章 干燥及其设备	77
第一节 物料的水分及其测定方法	77
一、水分在物料中存在的形式	77
二、物料水分的表示方法	77
三、物料水分的测定方法	78
四、物料的平衡水分与水分活度	78
第二节 湿空气的性质	79
一、绝对湿度和相对湿度	79
二、湿空气的状态参数	80
三、干球温度和湿球温度	81
第三节 热交换	81

一、热传导	82
二、对流换热	84
三、辐射换热	85
第四节 干燥机理和干燥方法	86
一、干燥机理	86
二、干燥方法	89
三、物料干燥过程的衡算	91
第五节 干燥设备	93
一、对流干燥设备	94
二、传导干燥设备	105
三、辐射加热干燥设备	108
四、真空及冷冻干燥设备	110
第六章 粉碎及其设备	113
第一节 粉碎的方法和理论	113
一、粉碎方式	113
二、粉碎物料的尺寸	113
三、粉碎能耗理论	115
第二节 粉碎机械与设备	117
一、切碎机械	117
二、粉碎机械	121
三、磨碎机械	123
四、其他破碎方式的机械	126
第七章 其他单元操作及其设备	129
第一节 杀菌及其设备	129
一、杀菌原理	129
二、杀菌方法及设备	130
第二节 混合及其设备	138
一、液体混合及设备	138
二、固体混合设备	140
三、固液混合设备	142
第三节 均质及其设备	144
一、均质理论	144
二、均质设备	145
第四节 浓缩及其设备	148
一、浓缩原理	149
二、蒸发浓缩设备	149
三、冷冻浓缩设备	153
四、其他浓缩方法	156
第八章 粮油加工	158
第一节 稻谷制米	158

一、概述	158
二、砻谷及砻下物分离	158
三、碾米	162
四、成品及副产品整理	166
第二节 小麦制粉	167
一、概述	167
二、小麦制粉的原理	167
三、研磨	169
四、筛理	171
五、清粉	172
六、小麦粉的后处理	174
第三节 淀粉生产	175
一、概述	175
二、玉米淀粉生产	176
三、马铃薯淀粉生产	181
四、小麦淀粉生产	182
第四节 植物油制取	184
一、概述	184
二、机械压榨法制油	185
三、溶剂浸出法制油	186
四、超临界流体萃取法制油	189
第五节 种子加工	190
一、种子加工的基本内容	190
二、种子加工工艺流程的设计原则	191
三、种子加工设备	191
四、其他种子加工的特点	191

第九章 果蔬的贮藏与加工 193

第一节 果蔬的生物化学特性	193
一、果蔬的组织结构与成分	193
二、果蔬采后的生理特点	195
第二节 果蔬的贮藏	199
一、果蔬在贮藏过程中的变化	199
二、果蔬贮藏方法	200
第三节 果蔬加工	204
一、蔬菜的采收与加工	204
二、水果的采收和加工	207

第十章 畜牧产品的贮藏与加工 211

第一节 肉类加工	211
一、肉的分级与检验	211
二、屠宰	212

三、肉的结构和组成·····	212
四、肉的成熟及贮藏·····	214
五、肉的加工·····	215
第二节 蛋类加工·····	216
一、鸡蛋的结构与成分·····	216
二、鸡蛋的质量因素·····	217
三、鸡蛋的贮存·····	218
四、鸡蛋的加工·····	219
第三节 乳品加工·····	220
一、乳的成分及性质·····	220
二、消毒鲜乳制品·····	222
三、牛乳分离产品·····	224
四、发酵乳制品·····	225
第四节 畜牧副产物的综合利用·····	226
一、畜禽血液的综合利用·····	226
二、畜骨的利用·····	227
三、畜禽脏器的利用·····	228
四、畜皮的利用·····	229

参考文献	230
-------------------	------------

第一章 绪 论

第一节 引 言

农产品是人类赖以生存的基础。农产品加工是以农业产品（粮、油、水果、蔬菜、肉、蛋、奶、水产品、棉麻、毛皮、林产品及野生动植物资源）为原料，按照一定的工艺要求进行的处理、加工和制造过程。按照中国国民经济分类划分，我国在统计上将农产品加工业分为五大类，即：食品、饮料和烟草加工；纺织、服装和皮革工业；木材和木材产品包括家具制造；纸张和纸产品加工、印刷和出版；橡胶产品加工。同时，还划分了与农产品加工业有关的12个行业，即食品加工业、食品制造业、饮料制造业、烟草加工业、纺织业、服装及其他纤维制品制造业、皮革毛皮羽绒及其制品业、木材加工及竹藤棕草制品业、家具制造业、造纸及纸制品业、印刷业记录媒介的复制和橡胶制品业。

本教材所涉及的农产品加工主要是对原粮、油料、果蔬、畜牧产品等的加工内容。根据农产品的加工程度，农产品加工可分为初加工和精深加工两个不同的加工过程。初加工是指对农产品原料进行的直接、简单的处理过程，如清理、分级、干燥等；对稻谷、小麦、玉米等原粮，通过碾、磨等方法，加工成粒状或粉状成品等；对油菜子、花生仁、芝麻等各种油料，用压榨、浸出等方法从中制取油脂等。随着经济的发展和人民生活水平的提高，特别是科学技术的进步，农产品加工逐步从初加工向深加工发展。农产品深加工，也称多层次加工，指的是对初加工产品做进一步的再加工或者对原料直接进行多层次的深加工，包括农产品及其副产品综合利用的各种加工。农产品深加工采用的加工技术及工艺设备一般比较复杂，必须根据原料在深加工过程中的物理、化学和生物学特性来决定所采取的加工方法和工艺设备。食品工业、饲料工业、制药业，甚至化学工业均可以以农产品为原料，进行深层次新产品的开发，其中一些产品已经改变了农产品原料原来的性态，不但发生了物理变化，而且发生了化学变化和生物变化。本教材所述的农产品加工内容主要涉及的是物料的物理变化。

现代农产品加工与食品加工的关系越来越密切，这两个方面正逐渐向融为一体的方向发展。事实上，食品加工是以农产品为主要原料的加工，是农产品加工的继续和延伸。一般说来，农产品加工主要以初加工为主，深加工为辅；而食品加工则以深加工为主。此外，农产品加工还包括饲料加工和动植物纤维加工等内容，涉及的范围更加广泛，内容更加丰富。虽然农产品加工和食品加工在生产技术和工艺要求上有所不同，但是它们采用的方法和使用的设备却有许多相同之处，而且都是以单元操作为基础，并对这些单元操作进行合理的组合和科学的运用。

一、我国农产品加工业的现状和特点

与国民经济增长的大环境相协调，我国农产品加工业已经从起步阶段开始进入全面成长

的新时期。尽管如此,与发达国家相比,我国农产品加工业尚存在许多不足,主要包括初加工产品多深加工产品少、企业的效益和竞争力差、综合利用低和耗能高、企业缺乏技术创新能力和发展活力;技术装备相对落后,机电一体化水平低;产品标准和质量控制体系不完善等。

我国的农产品加工以中小型企业居多,生产规模小,具有国际竞争力的大型名牌企业较少。中小企业管理成本较高,与大企业争原料,又造成大企业设备的利用率降低,致使形成产品的生产成本居高不下和产品质量不稳定。另外,企业分布也不合理,过分集中或过分分散,造成产品成本的增加和资源难以有效利用。此外,无论是企业还是科研单位和大专院校,普遍缺乏适应农产品加工业发展的技术支撑和储备,特别是拥有自主知识产权的技术较缺乏,这是我国农产品加工业落后于发达国家的根本原因。

先进的加工工艺必须有先进的技术装备来保障,这样才会生产出高质量、低成本、强竞争力和高附加值的产品。我国农产品加工企业尽管引进了一些先进的设备,但整体水平与国外相比仍存在较大差距,一方面是由于装备制造业整体水平偏低;另一方面也有对引进设备消化吸收不够的原因。

近年来,我国主要农产品相对过剩的现象时有发生,严重影响了农民收入的增加和农村市场的繁荣,以致成为现阶段农业发展亟待解决的重要问题之一。在主要农产品由卖方市场转为买方市场后,人们对基本农产品的直接消费趋于下降,而对农产品的优质化和品种的多样化提出了更高要求。我国农产品加工能力低下与人们日益丰富的消费需求之间的矛盾突显出来。

我国农业发展已经进入新的阶段,为了迎接激烈的国际竞争,提高农产品的附加值和增加农业的整体效益,成为农业发展的首要任务。这就需要农产品加工业有较大的发展,承担起引导农业产业结构调整、增强国际竞争力和增加农民收入的重任。从农产品的总产量来看,我国主要农产品如粮食、水果、肉类和奶类等已位居世界前列,成为名副其实的农业大国。但是,从农产品加工产值和出口创汇等指标分析,与世界先进水平相比存在较大差距。

二、农产品加工在国民经济中的作用

农产品加工业对支撑农业发展和竞争,保证农民收益,调整与优化农村经济结构,提高农业质量和效益,增加就业等方面发挥了积极作用,对国家积累资金和争创外汇等,具有重要的意义。农产品加工业已成为国民经济的支柱产业,在国民经济中占有重要的地位。

农产品加工业的发展,能够为市场提供更多的农产品,这不仅能扩大农产品的销售品种,丰富市场,还可以从各个方面满足农产品消费者的需要。随着人民生活水平的不断提高,对农产品市场提出了更多、更高的需求。为实现农产品市场多样化、优质化、绿色化、营养化和方便化,改善食物产品结构和营养结构,农产品加工业的发展扮演着重要的角色。

发展农产品加工业,能引导农业生产结构调整,延伸农产品产业链。以高新技术促进农产品加工增值是一个新的产业和经济增长点。发展农产品加工业就是按照市场经济规律,用现代科学技术和发展工业的理念发展农业,以市场经济知识经营农业,最大限度地优化、配置好生产要素,形成以农产品加工为主的支柱产业,壮大农产品加工龙头企业,培植农产品加工产业化发展的服务体系。

发展农产品加工业对促进农业资源的综合利用和转化增值,提高农业综合效益和增加农民收入具有重要作用。建设社会主义新农村是我国现代化进程中的重大历史任务,促进农业产业化是解决“三农”问题的重要措施之一。国家支持在农产品主产区进行加工转化,作为增加农民收入的主要措施,并提出了一系列支持政策。在国家大力提倡发展“循环经济”和建设环境友好型和资源节约型社会的今天,农产品加工业通过提高农产品的加工深度,可以

最大限度地提高资源的综合利用率和产品的附加值,为提高农业的综合效益、增加农民收入开辟了新的有效途径。由于农产品的集散地往往在小城镇,农产品加工业的发展又可以推动小城镇建设,同时带动第三产业的发展,安排更多的劳动力就业。

总而言之,农产品加工业作为农产品面向市场的主要后续加工业,具有农产品丰欠平衡器、增值转化器、效益放大器的重要作用。农产品加工业的技术进步和持续发展,直接影响着国家农产品产业结构的调整和综合能力的提升,对促进农业发展、农村繁荣和农民富裕,带动关联行业发展和提供大量就业机会,具有十分重要的意义。

三、农产品加工的基本任务

农产品加工的基本任务是以科技为先导,遵循市场规律,满足市场多层次的需要,并取得较好的经济效益。

要在市场调查与预测的基础上,结合我国国情,运用现代科学技术,使农产品加工从初加工向精加工和深加工发展,调整产品结构,研制新产品,满足生产消费、生活消费和对外贸易不断增长的需要。积极发展副产品综合利用,提高名、优、新、特产品比重。

依靠科技进步,加大技术改造力度,在保证产品质量的前提下,提高农产品原料利用率,这就要求农产品加工业要积极采用诸如超临界流体萃取,膜分离、超微粉碎等技术,开发高技术含量和高附加值的深加工产品。应用自动控制、信息化、生物、精细化工等高新技术改造传统的农产品加工业,开发研制一批先进的大型农产品加工装备,通过技术创新和设备改造实现对原料的节约和合理利用,降低能源消耗,提高资源利用率,走资源节约型和发展循环型经济的道路。

此外,农产品加工企业还需改善生产经营管理,节约劳动消费,提高经济效益。

第二节 农产品加工中的单元操作

虽然不同的农产品加工方法不同,产品形式也千差万别,但其加工过程中的操作原理却有许多共同之处。例如,奶粉的加工从原料乳的验收开始,需要经过离心分离及标准化处理、加热杀菌、浓缩、干燥等基本的工艺过程;而浓缩苹果汁的生产通常需要经过分选、洗涤、破碎、榨汁、过滤、杀菌、浓缩等工艺过程。这两种产品从原料到产品形式都有较大的不同,但却包含了流体的输送、物质的分离、加热杀菌、浓缩等相同的物理操作过程。我们将农产品加工生产工艺过程中所共有的基本操作称为单元操作。

单元操作的概念源于化工原理,它是人们经过长期的生产实践总结,根据所用设备相似、原理相近、基本过程相同的原则提出的,是工业生产过程中共有的操作。单元操作统一了通常被认为各不相同的独立的工业生产技术,使人们可以系统深入地研究每一单元操作的基本原理、内在规律和工程实现方法。

任何一个农产品的加工过程都是由若干个单元操作串联起来形成的。例如,玉米淀粉的生产过程就包含粉碎、分离、洗涤、干燥等单元操作。每一个单元操作都在一定的设备中进行,也就是说粉碎操作是在粉碎机中进行的;分离操作是在分离设备中进行的;干燥操作是在干燥器中进行的。将这些单元操作连接起来的则是物料输送这一单元操作。对于上述玉米淀粉的生产过程,物料输送包括固体颗粒物料的输送、固液混合物料的输送以及粉体物料的输送。

农产品加工设备的分类可以按单元操作(加工原理和功能)划分,如清选和分级设备、洗涤设备、物料输送设备、粉碎设备、干燥设备、分离浓缩设备等。但是,农产品加工设备

有时也按加工对象划分,如粮油加工机械、饲料加工机械、种子加工机械、淀粉加工机械、果蔬加工机械、畜产品加工机械等。

把单元操作按其理论基础划分,将更便于学习和研究。在化工产品、生物工程产品、农产品(包括食品)的生产过程中,主要的单元操作可以归纳为以下几类过程。

流体流动过程:以动能传递过程原理作为主要理论基础的过程,包括流体的输送、悬浮物的沉降和过滤、颗粒物料的流态化等。

热量传递过程:以热量传递过程原理作为主要理论基础的过程,包括加热、冷却、蒸气的冷凝、溶液的蒸发等。

质量传递过程:以质量传递过程原理作为主要理论基础的过程,包括固体物料的干燥、液体溶液的蒸馏等。

机械过程:以机械力学为主要理论基础的过程,如物料的粉碎、分级等。

热力学过程:以热力学为主要理论基础的过程,如压缩、冷冻等。

化学反应及生物反应过程:以化学及生物学为主要理论基础的过程,如发酵等。

有些单元操作可能同时包含几种过程原理,如干燥操作就同时有热量传递和质量传递。

第三节 学习《农产品加工原理及设备》的目的与方法

本书结合农业机械化及其自动化专业学生的知识背景,首先以农产品加工过程中主要的单元操作为主线,在重点阐述各种单元操作目的和原理的基础上,对农产品加工涉及的机械设备按单元操作分类介绍,并对其结构、主要工作部件的工作原理和工作过程进行叙述。然后,结合农产品加工(包括粮油加工、果蔬加工和畜牧产品加工)的工艺过程,讲述单元操作的应用,使读者进一步加深对各种单元操作以及相关设备的认识和理解。

本书以农产品加工原理为主,初加工和深加工并重;单元操作设备以共性为主、个性为辅。本书力求涉及面广、内容丰富,同时力争使读者能够抓住要领,掌握农产品加工原理及设备的精髓。

本课程是农业机械化及其自动化专业的一门必修课,在学生完成“工程图学”、“机械原理”、“传热学”、“工程流体力学”、“机械设计”等课程后讲授。其具体目的是:通过本课程的学习,使学生在掌握农产品加工各种单元操作原理的基础上,熟悉各种农产品加工机械设备的性能和构造,可以根据农产品加工的要求和生产需要,选择合适的加工机械与设备,实现某个环节或整个生产过程的机械化,并初步具有一定的改进现有设备和设计新机器的能力。

在本课程的学习过程中,应采用理论联系实际的学习方法,做到既要学习好教材中出现的农产品加工原理及相应的机械设备,也要联系在认识实习和生产实习中接触过的相关设备的工作原理和工作过程;既要掌握农产品加工各个操作单元中带有普遍性质的内容,也要注意农产品加工工艺及设备所具有的特殊性质的东西。由于农产品加工设备的种类很多,不可能在有限的课堂教学中详细分析各种机械设备。因此,在学习过程中,要十分注意学习和掌握分析问题的方法,对教材中出现的机械设备例子能够举一反三、融会贯通,这样在今后的工作中,即使遇到新的机械设备,也能正确分析其工作原理和使用中应该注意的事项。

第二章

物料输送及其设备

在农产品加工过程中，物料输送是连接不同加工处理步骤的桥梁，是重要的单元操作之一。农产品加工过程中的原料、辅料、废料、半成品和成品等的输送，需要采用各种输送机械与设备来完成。合理地选择和使用物料输送机械与设备，对保证生产连续性、提高产品质量、减轻工人劳动强度、降低生产成本、缩短生产周期等都有着重要的意义。

第一节 物料的流体输送

物料的流体输送是指用流体（气体或液体）作为介质输送固体物料的运输方式。流体输送采用通风机、泵等动力设备和相应的管路，将气固混合物或固液混合物输送到预定位置。

一、物料的气力输送

采用风机（或其他气源）使管道内形成具有一定速度的气流，将散粒物料沿管道输送的方法称为气力输送。在农产品加工中，气力输送是比较先进的输送方式，得到了广泛的应用。例如，谷物、麦芽、糖、可可等颗粒体物料以及面粉、饲料、淀粉、奶粉等粉体物料都可以采用气力输送。

1. 气力输送原理

（1）颗粒在垂直管路中的悬浮

在无界管路（物料颗粒尺寸远小于管路直径）的情况下，物料颗粒在静止的空气中自由降落，当颗粒重力、浮力及空气阻力三力平衡时，颗粒在空气中以不变的速度作匀速降落，此时颗粒所具有的运动速度称为颗粒的自由沉降速度。当空气以颗粒的沉降速度自下而上流过颗粒时，颗粒将自由悬浮在气流中，这时的气流速度称为颗粒的悬浮速度。如果气流速度进一步提高，大于颗粒的悬浮速度，则在气流中悬浮的颗粒将被气流带走，即发生气流输送。所以，在垂直管路中，气流速度大于颗粒的悬浮速度，是颗粒物料气流输送的流体力学条件。

（2）颗粒在水平管路中的悬浮

颗粒在水平管路中悬浮较为复杂，颗粒能克服重力而悬浮在气流中，是由于多种因素作用的结果。①当气流为湍流运动状态时，气流本身的波动速度在垂直方向的分量可使颗粒悬浮；②湍流状态的气流，沿管截面上的风速分布是较为复杂的抛物线形，管中心风速最大，越靠近管壁风速越低；这种沿管截面上的风速差，将产生沿管子截面上的压强差，在其作用下，颗粒可产生悬浮；③流体运动对管道底部颗粒水平方向的作用合力在颗粒中心上方，使颗粒向前运动的同时产生旋转，颗粒上下部的速度差产生静压差，即马卡诺夫效应；④颗粒之间以及颗粒与管壁之间碰撞产生的向上分力。

(3) 颗粒在管路中的运动形式

通常在流场中,只有当垂直管路中的气流速度大于颗粒的悬浮速度时,颗粒才能被气流带走。在实际的气力输送系统中,由于弯头、挡板、阀门等处气流的不均匀性,物料颗粒之间、颗粒与管壁之间的摩擦和碰撞以及颗粒在水平管道中的下沉等因素的影响,所需的气流速度远大于颗粒的悬浮速度。

研究表明,输料管中颗粒体的流动形式与颗粒体的输送量、空气速度、系统的结构形式、管道的输送直径和长度以及颗粒体的大小和形状等因素有关,情况复杂。在给定的管路系统中,当物料的混合比(单位时间内输送的物料质量与空气质量之比)一定时,颗粒能否得到输送,与气流速度以及物料的物理性质密切相关。对于特定的物料,则主要受气流速度所支配,气流速度不同,管道中颗粒的流动形式有很大的差异,一般可能出现以下6种。

均匀流 当气流速度相当大时,颗粒在气流中呈悬浮状态,借气流的推力作用基本上得到均匀输送,是气力输送的理想流动状态。

底密流 若减小气流速度,接近输送管道底部空间的颗粒浓度增大,但还未出现停滞现象。由于颗粒形状不对称,受到不均匀的推力而产生碰撞,从而不规则地向前输送。

疏密流 若再减小气流速度,颗粒在管内疏密不均匀地流动,也有一部分颗粒在管底滑动,但还未停顿向前。疏密流是颗粒悬浮输送的极限状态。

停滞流 当气流速度小于某一极限值时,大部分颗粒失去悬浮能力,聚集在管底局部的颗粒使管道断面变窄,该处的气流速度增大,在一瞬间又把停滞的颗粒群吹走,因而颗粒时而停滞堆积,时而被吹走,输送不均匀。

部分流 若气流速度过小时,颗粒堆积于管底,气流在上部流动,堆积在表面层的部分颗粒在气流作用下作不规则移动,堆积层则作沙丘式移动,甚至导致堵塞。

柱塞流 当堆积的物料层在局部充满管道时,就靠空气压力来推动输送,因而形成柱状流动。

上述几种流动形式可归纳为悬浮运动和成团运动两大类,前三种属悬浮运动,靠气流的动能推动;后三种属成团运动,靠气体的压力能进行输送。

气力输送属气相和固相两相流动,输送管内气体和固体量的比例对输送过程影响很大。混合比是气流输送装置的一个重要技术参数,可用下列形式表示。

质量混合比 β 单位时间内输送的物料质量与空气质量之比,即

$$\beta = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_a} = \frac{\rho_s Q_s}{\rho_a Q_a} \quad (2-1)$$

输送浓度 β_v 所输送的物料的质量流量与空气的体积流量之比,即

$$\beta_v = \frac{\dot{m}_s}{Q_a} = \rho_a \beta \quad (2-2)$$

式(2-1)、式(2-2)中, Q_a 为空气的体积流量; Q_s 为物料的体积流量; $\dot{m}_a$ 为单位时间内输送的空气质量; $\dot{m}_s$ 为单位时间内输送的物料质量; ρ_a 为所输送的空氣的密度; ρ_s 为所输送的物料的密度。

一般情况下,气流速度一定时,混合比越大,单位时间内通过输料管的物料质量就越多,气力输送系统的能量损失也随之增大。混合比过大,将造成管道堵塞,降低输送的可靠性。

2. 气力输送机械的特点及应用

气力输送只能用于散粒体物料的输送。气力输送机械移动灵活, 装配快捷方便, 特别适用于大型粮库的补仓、出仓、翻仓、倒垛以及粮食加工等生产工艺中的物料装卸和输送, 主要具有以下优点: 气力输送设备结构简单, 易于制造、安装和维护, 便于实现自动化操作; 在输送过程中可以与干燥、冷却、分选及混合等生产工艺结合起来, 工艺布置灵活, 不受距离、地形的限制; 物料的输送在管道中进行, 输送过程密封, 因此物料不易吸湿、污损或混入其他杂质, 降低了物料输送过程中的损耗, 有效控制了粉尘飞扬, 使工作环境良好、产品生产卫生; 物料输送生产率较高, 有利于实现物料的运输机械化, 降低物料装卸成本, 节约劳动力。

但是, 气力输送也存在以下不足之处: 动力消耗大, 噪声高, 输送磨削性大的物料时, 管道易磨损; 不宜输送湿度和黏度大的物料; 气流速度选择不当, 物料易破损, 系统不能稳定工作。

在常规的气力输送装置中, 动力消耗大以及工作构件磨损较快, 主要原因在于单位空气流中所含的物料量很少, 而输送气流的速度却很高。为了克服气力输送的上述缺点, 发展起来了推动输送, 其输送原理不是依靠管内速度为 $10\sim 30\text{m/s}$ 的高速空气流使物料呈悬浮状态来输送物料, 而是依靠速度不大 (通常只有 $4\sim 6\text{m/s}$) 但压力较高的空气流来推动输送物料。因此, 在同样的生产率下, 推动输送所需的空气消耗量大大降低, 并且输送速度小, 因而使整个气力系统能量消耗降低, 管壁磨损减少。

需要指出的是, 气力输送装置的应用范围与被输送物料的物理性质有着十分密切的关系。物料特性对气力输送装置应用范围的影响主要表现在以下几个方面。

物料粒度 气力输送装置一般要求物料颗粒直径小于 50mm , 或物料颗粒最大尺寸不超过输料管直径的 $0.3\sim 0.4$; 物料颗粒最小尺寸是不受限制的, 但是需要考虑小尺寸物料对分离和除尘装置的影响。

物料重度 物料重度影响气力输送装置的结构设计尺寸和能量消耗的大小。物料重度增加, 输送管道中气流的速度就必须提高, 这将使动力消耗增加、管壁磨损加快, 故气力输送不适宜输送重度太大的物料。

物料湿度 物料湿度与气力输送装置的工作可靠性有很大的关系。湿度过高将破坏物料的松散性, 使物料黏附在装置构件的内壁上, 从而引起供料不均匀、能量消耗增加及生产率降低, 甚至引起整个气力输送系统堵塞。

物料温度 在一定浓度和温度下, 被输送物料产生的粉尘会引起爆炸, 造成严重事故, 故在输送粉状物料时, 物料温度应低于该物料的发火点。粉尘发火所需要的最低温度, 一般都小于 400°C , 否则应该用惰性气体输送。同时还应防止金属工具撞击发火或者具有摩擦发火特性的物料进入气力输送装置。

物料磨琢性 物料磨琢性的大小与物料颗粒的硬度、表面特性、形状尺寸等有关, 它影响气力输送装置的动力消耗和使用寿命。

总之, 在农产品加工过程中采用气力输送装置输送各种物料时, 应注意分析被输送物料的物理性质。

3. 气力输送装置

根据物料流动状态可以分为悬浮输送和推动输送两大类。目前采用较多的是使颗粒物料呈悬浮状态的输送形式, 悬浮输送又分为吸送式、压送式和混合式 (吸、压送相组合) 三种 (见图 2-1)。

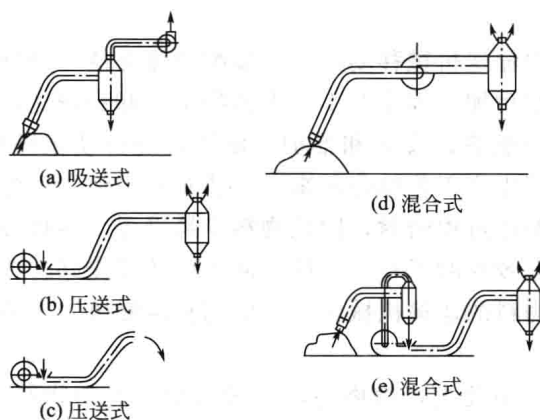


图 2-1 气力输送装置类型

(1) 吸送式气力输送装置

吸送式气力输送装置是借助压力低于 0.1MPa 的空气流来进行工作的。当风机启动后, 整个系统被抽至一定的真空度; 在压力差的影响下, 大气中的空气流从物料堆间隙透过, 并把物料携带入吸嘴, 进而沿输料管移动至物料分离器中, 空气与物料在此被分离; 物料由分离器的底部卸出, 而含尘空气流继续被送到除尘器, 灰尘由除尘器底部卸出; 经过除尘的空气流通过风机被排入大气中。

吸送式气力输送装置最大的优点是供

料简单方便, 能够从一个或多个物料堆吸取物料。但是由于输送装置的压力差不大, 输送物料的距离和生产率将受到限制。吸送式气力输送装置对密封性要求很高, 为了保证风机可靠工作、减少零件磨损, 进入风机的空气必须预先除尘。

(2) 压送式气力输送装置

压送式气力输送装置在高于 0.1MPa 的条件下进行工作, 它依靠鼓风机械排出的高于大气压的气流, 将输料管中的物料与气流混合物一起输送, 系统内保持正压。鼓风机把具有一定压力的空气压入导管, 被输送物料由料斗供入输料管中, 空气和物料的混合物沿着输料管运动, 物料通过分离器卸出, 空气则经除尘器净化后排入大气。

压送式输送装置的特点与吸送式气力输送装置恰恰相反。由于它便于装设分岔管道, 故可以同时将物料输送至几处, 且输送距离较长、生产率较高。它的主要缺点是由于必须从低压向高压输料管中供料, 故料斗结构较复杂, 并且较难从几处同时吸取物料。

(3) 混合式气力输送装置

混合式气力输送装置是吸送式和压送式气力输送装置的组合。在风机之前, 属于真空(负压)系统, 风机之后属于正压系统。真空部分可从几处吸料并集中送到一个分离器内, 分离出来的物料经料斗送入压力系统, 在送到指定位置之后, 经第二个分离器分出物料并排出, 分离出来的空气经净化后排出。

混合式气力输送装置综合了吸送式和压送式气力输送装置的优点, 既可以从几处吸取物料, 又可以把物料同时输送到几处, 且输送的距离可以较长。其主要缺点是含尘的空气要通过鼓风机, 使其工作条件变差, 同时整个气力输送装置的结构也较复杂。

综上所述, 气力输送装置不管采用何种形式, 也不管风机以何种方式供应能量, 它们总是由能量供应、物料输送和空气净化等几部分组成, 只不过是不同场合采用不同形式的装置罢了。

(4) 推动输送装置

推动输送是一种依靠空气压力来推动物料的新型气力输送方式。推动输送的原理就是利用较高压力的脉冲气流, 将料柱分割成料栓, 使料栓和气栓一段一段相间地向前运动。这种气力输送形式与悬浮输送不同, 它是依靠静压, 即依靠料栓两端的压力差 ($P_1 - P_2$) 来推动料栓向前运动的, 故又称柱塞流静压输送, 输送原理如图 2-2 所示。

料栓的形成和稳定是推动输送的关键。料栓的形成与物料的粒度、性质及输料管管径有很大关系。在保证物料输送量的前提下, 由于管径小易形成料栓, 故要尽量减小管径; 内摩