

环模制粒成型技术与装备

武凯 孙宇 著



科学出版社

环模制粒成型技术与装备

武 凯 孙 宇 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书针对环模制粒装备的技术原理、设计、测试与应用进行了全面阐述,旨在为环模制粒成型技术提供完整的基础理论体系,为环模制粒装备的高效、低能耗设计提供技术支撑。全书主要内容包括:环模制粒成型技术的国内外研究现状;制粒成型过程的力学原理与力学模型;制粒装备的结构组成;制粒装备的设计流程与设计实例;制粒过程数值模拟技术;制粒过程试验与测试技术;制粒装备的应用。

本书既强调理论体系的完整性,又强调对实践应用的指导性,力求简洁、实用,既可为生物质固化成型、饲料加工、制药、化工等技术领域直接从事环模制粒成型技术研究的数学、科研及工程技术人员提供系统的参考,也可供机械工程、粉体工程领域从事装备设计、粉体技术研究的有关人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

环模制粒成型技术与装备/武凯,孙宇著. —北京:科学出版社,2013
ISBN 978-7-03-038141-4

I. ①环… II. ①武… ②孙… III. ①制粒-成型过程②制粒-工艺装备
IV. ①TF046.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 271629 号

责任编辑:裴 育 / 责任校对:陈玉凤
责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

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>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 12 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 12 月第一次印刷 印张:15 1/4

字数:296 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

环模制粒成型技术是将粉体物料经旋转辊轧挤压压缩而制备成颗粒的技术,是国际制粒成型技术领域的主流技术,广泛应用于生物质固化成型、饲料加工、制药、能源与化工等技术领域。在饲料机械领域,环模制粒装备是饲料机械的四大主机之一,是生产颗粒饲料的核心装备,在饲料工业中占有很重要的地位;在生物质能源领域,环模制粒成型技术可将农林废弃物压制成生物质颗粒燃料,消除秸秆焚烧造成的环境污染,是发展清洁能源的重要装备。

当前,由于缺乏全面、系统的基础理论体系,环模制粒成型技术在我国的应用存在能耗高、产量低、核心部件(环模、压辊)寿命短、成套生产线智能化程度低等问题,严重制约了相关产业的发展。研究高效、节能、绿色化的环模制粒成型技术对提升我国环模制粒装备的整体水平和国际竞争力,促进生物质能源产业、饲料产业、绿色化装备产业的发展以及推动三农建设、降低环境污染具有重要的理论意义与实用价值。

环模制粒成型技术涉及机械工程、食品工程、粉体工程、材料工程、控制工程等多学科知识以及饲料生产工艺、生物质致密成型、装备设计与制造等技术领域,既与基础学科密切相关,又与工程应用存在广泛的联系,表现出特有的技术规律与技术难度。

本书主要从环模制粒成型技术的国内外现状、力学基础理论、装备结构与设计、数值模拟技术、试验与测试技术、应用实例等六个方面进行论述。第1、2、4章由武凯撰写,第3章由武凯、孙宇撰写,第5章由蒋清海、武凯、孙宇撰写,第6章由夏先飞、武凯、孙宇、范文海、李庆凯撰写;孙宇对全书进行了审定。

另外,江苏牧羊集团有限公司在本书撰写过程中提供了相关案例,在此表示感谢。

作 者
南京理工大学
2013年9月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 环模制粒成型技术简介	1
1.2 环模制粒成型技术典型应用领域及其重要性	3
1.3 环模制粒成型技术的国内外技术现状	5
1.4 环模制粒成型技术的国内外研究现状	7
参考文献	15
第2章 环模制粒机理分析	20
2.1 环模制粒成型原理	20
2.2 力学建模与受力分析	22
2.2.1 环模、压辊受力分析	22
2.2.2 挤压过程物料受力分析	26
2.2.3 扭矩模型	31
2.3 产量模型及影响因素分析	33
2.3.1 被压入物料高度	33
2.3.2 生产率模型	35
2.3.3 生产率影响因素分析	36
2.4 能耗模型及影响因素分析	37
2.4.1 能耗模型	37
2.4.2 物料特性对能耗的影响	38
2.4.3 结构参数对能耗的影响	39
2.4.4 环模线速度对能耗的影响	42
2.4.5 负载率对能耗的影响	43
2.5 环模、压辊的磨损机理	45
2.5.1 失效形式	45
2.5.2 磨损机理分析	46
参考文献	48
第3章 环模制粒成型装备	49
3.1 环模制粒机发展历史	49
3.2 饲料颗粒成型环模制粒机	52

3.2.1 环模制粒机主要构成	52
3.2.2 不同结构形式环模制粒机的对比分析	67
3.2.3 环模制粒机控制系统	74
3.2.4 环模制粒机设计流程与设计实例	77
3.3 生物质颗粒成型环模制粒机	88
3.3.1 生物质秸秆致密成型工艺	88
3.3.2 秸秆颗粒成型与饲料颗粒成型对比	89
3.3.3 秸秆颗粒成型装备	91
3.3.4 秸秆成型颗粒燃料自动化生产线	93
参考文献	102
第4章 环模制粒成型过程数值模拟技术	103
4.1 物料挤压过程有限元模拟分析	103
4.1.1 粉体物料力学模型	103
4.1.2 模辊间隙物料受力有限元模拟分析	106
4.1.3 模孔挤压过程有限元模拟分析	111
4.2 核心部件受力有限元模拟分析	122
4.2.1 环模受力分析	122
4.2.2 压辊支撑系统受力分析	134
4.3 转子系统动态特性有限元模拟分析	139
4.3.1 转子系统模态分析	139
4.3.2 转子系统动力学模型	141
4.3.3 转子系统动态特性及影响因素分析	142
参考文献	146
第5章 环模制粒成型过程试验与测试技术	148
5.1 环模制粒装备性能测试	148
5.1.1 环模制粒装备生产率测试	149
5.1.2 环模制粒装备吨电耗测试	150
5.1.3 环模制粒装备运行状态测试	151
5.2 颗粒品质测试	162
5.2.1 颗粒共性品质测试	163
5.2.2 颗粒其他品质测试	168
5.3 原料特性测试	171
5.3.1 粒度测试	171
5.3.2 水分测试	172
5.3.3 容重测试	173

5.3.4 摩擦特性测试	174
5.3.5 流动特性测试	177
5.4 基于单孔挤压装置的制粒性能测试与试验	179
5.5 现代测试技术(虚拟仪器)的应用	182
5.5.1 虚拟仪器介绍	183
5.5.2 基于虚拟仪器的环模制粒机测试案例	185
参考文献	193
第6章 环模制粒成型技术与装备的应用	196
6.1 饲料机械领域的应用	196
6.1.1 饲料加工装备发展现状	196
6.1.2 饲料环模制粒成型技术与装备应用现状	196
6.1.3 饲料环模制粒成型技术与装备应用实例	206
6.1.4 饲料环模制粒成型技术与装备应用存在的问题	217
6.1.5 饲料环模制粒成型技术与装备发展趋势	219
6.2 生物质能源领域的应用	220
6.2.1 生物质致密成型技术发展现状	220
6.2.2 生物质环模制粒成型技术与装备应用现状	221
6.2.3 生物质环模制粒成型技术与装备应用实例	222
6.2.4 生物质环模制粒成型技术与装备应用存在的问题	227
6.2.5 生物质环模制粒成型技术与装备发展趋势	228
6.3 其他领域的应用	229
6.3.1 制药领域的应用	229
6.3.2 有机肥料生产领域的应用	232
参考文献	234

第 1 章 绪 论

1.1 环模制粒成型技术简介

环模制粒成型技术又称旋转辊轧挤压制粒技术,是将粉体类物料经旋转辊轧挤压压缩而制备成颗粒的技术,是当前国际制粒成型技术领域的主流技术,广泛应用于生物质固化成型、饲料加工、制药、能源与化工等技术领域。环模制粒成型技术既与机械摩擦学、粉体力学等基础学科密切相关,又与工程应用存在广泛的联系,表现出明显的跨学科、跨技术特征。

图 1.1 为环模制粒过程示意图:粉体物料进入制粒室,在环模、压辊的带动下进入环模、压辊之间的压制区域,随着环模、压辊的旋转及压制区域的不断缩小,物料逐渐被压缩成型,并从环模孔中被挤出,经切断,最终形成所需颗粒。

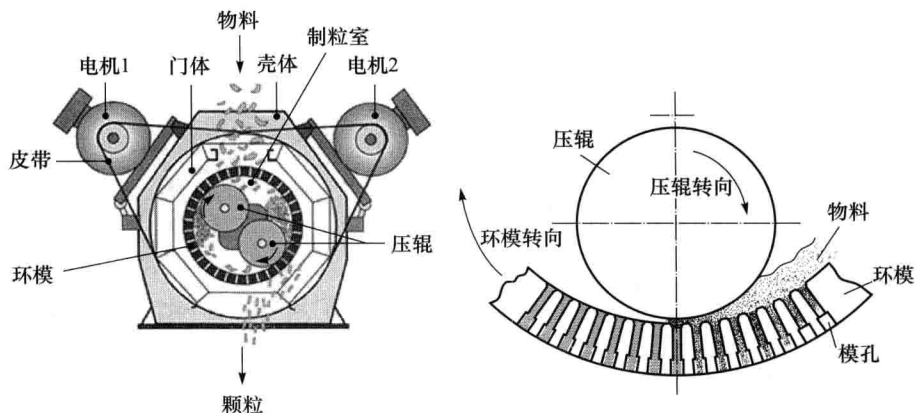


图 1.1 环模制粒过程示意图

图 1.2 为环模制粒机生产的典型颗粒,包括饲料颗粒、木屑颗粒、秸秆颗粒、有机肥料颗粒等。

在不同的应用领域,根据不同的制粒工艺,环模制粒装备表现出不同的结构形式。图 1.3 为饲料颗粒环模制粒机结构简图,图 1.4 为生物质颗粒环模制粒机结构简图。可以看出,饲料颗粒环模制粒机配置了喂料器、调质器,环模一般立式放置;而生物质颗粒环模制粒机则不需要调质,粉碎后的物料直接进入制粒室进行

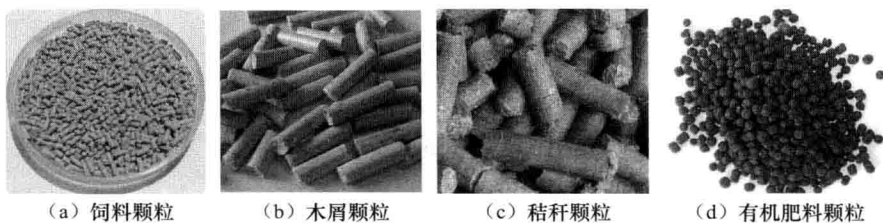


图 1.2 环模制粒机生产的典型颗粒

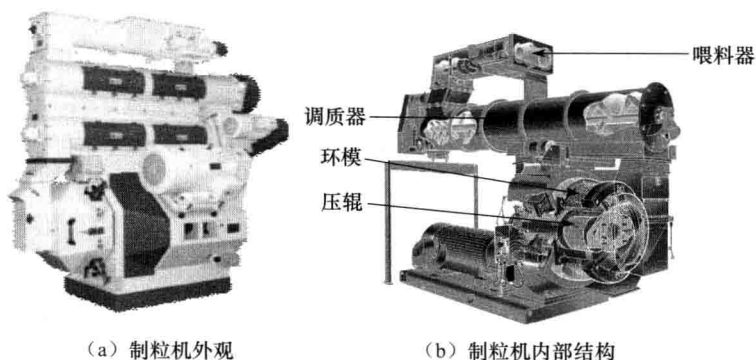


图 1.3 饲料颗粒环模制粒机结构简图

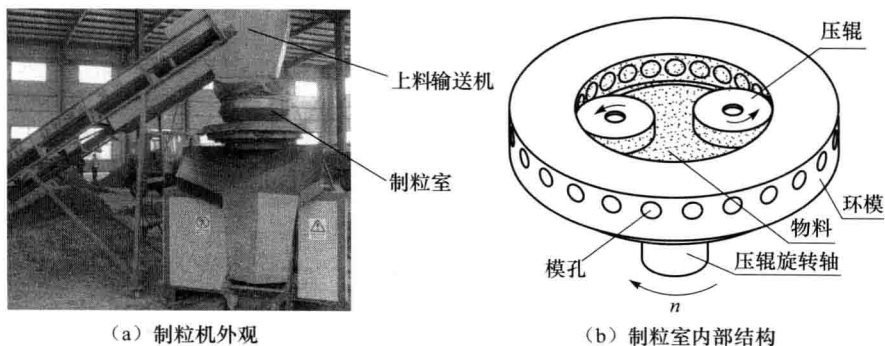


图 1.4 生物质颗粒环模制粒机结构简图

颗粒压制成型,环模卧式放置。同时还可看出,两种制粒设备的制粒室结构及环模、压辊的配置形式均具有不同的特点。

制粒装备一般并不单台使用,而是根据工艺需求组成成套生产线,并配置相应控制系统。图 1.5 为以环模制粒机为核心的饲料颗粒成套生产线示意图,图 1.6 为以环模制粒机为核心的生物质燃料颗粒成套生产线示意图。

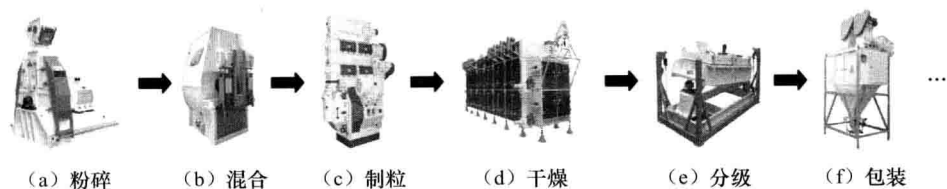


图 1.5 以环模制粒机为核心的饲料颗粒生产线

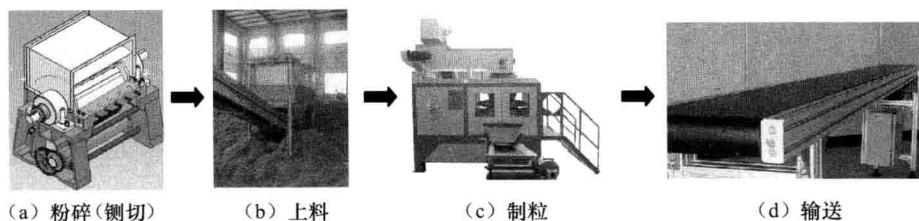


图 1.6 以环模制粒机为核心的生物质燃料颗粒生产线

1.2 环模制粒成型技术典型应用领域及其重要性

如前所述,环模制粒成型技术的应用非常广泛,涉及生物质固化成型、饲料加工、制药、能源与化工等国民经济重要技术领域及绿色化装备、清洁能源等高新技术产业。下面以该技术在饲料颗粒生产及生物质燃料颗粒生产两个领域的应用为例,对环模制粒成型技术的重要性予以阐述。

1. 对于饲料工业发展的重要意义

饲料工业是国民经济的支柱产业和基础产业,在国民经济中具有举足轻重的地位。随着人民生活水平的不断提高,肉蛋奶等动物性食品的需求大幅度增加,这直接促进了饲料工业的迅猛发展。目前,我国饲料产量已超过美国,成为世界第一饲料生产大国,饲料工业总量在国内生产总值(GDP)中的比例超过了 1.3% (图 1.7),饲料工业在国民经济中扮演着越来越重要的角色。

饲料加工装备是将饲料原料加工成饲料成品的机械装备,是饲料工业和现代养殖业的基础。全球每年 7 亿多吨配合饲料完全依靠饲料加工装备生产,因此其在整个饲料工业产业链中处于不可替代的核心位置。饲料加工按照饲料加工工艺的不同加工阶段,可分为清理、粉碎、混合、喷涂、膨化、制粒、烘干、除尘除臭等多种技术。饲料加工装备包括饲料原料的接收、清理、粉碎、定量配料、混合、调质、膨化、制粒、压片、干燥、冷却、分级、液体添加、后喷涂、仓储、除尘除臭、成品定量包装、输送等类别。其中,环模制粒机是饲料加工装备的四大主机之一,是直接生产

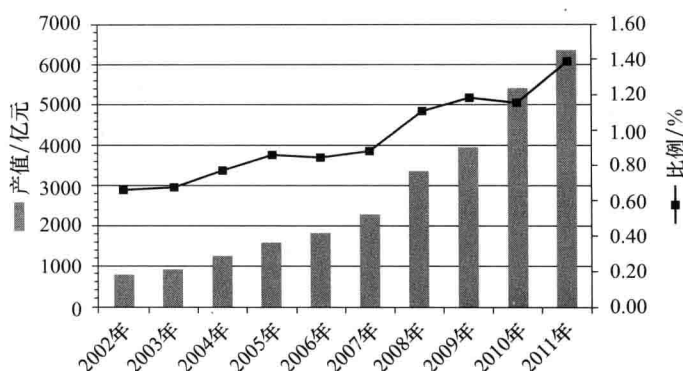


图 1.7 2002~2011 年我国饲料行业产值及其在国内生产总值中的比例

成品饲料颗粒的装备,在很大程度上决定了饲料加工的产量和质量,是所有饲料装备中最重要的设备之一,在饲料生产中占有重要地位。

当前,国际高端制粒机市场由欧美制造商,如瑞士 BUHLER 公司、美国 CPM 公司、奥地利 Andritz 公司、德国 MUNCH 公司、丹麦 Sprout-Matador 公司等垄断;国内饲料机械企业近年来虽然在制粒机的设计、制造领域取得了很大进步,产品的外观、性能指标也不断提高,但是与国外同类型设备相比较,仍然存在结构不合理、生产效率偏低、能耗偏高等缺陷,这极大地制约了产品的国际竞争力,严重制约了饲料工业的健康发展。研究环模制粒机理与技术对开发高效、节能、稳定制粒技术与装备,提升我国制粒装备的国际竞争力,进而提升饲料机械整体设计、制造水平,促进饲料工业的发展具有重要的理论意义与实用价值。

2. 对于生物质能源产业发展的重要意义

生物质材料包含通过光合作用而形成的各种有机体,如农作物秸秆、木材及林业废弃物、城市及工业有机废弃物和动物粪便等,其内部储存的生物质能是一种清洁、可持续发展且资源丰富的可再生能源。联合国开发计划署、世界能源委员会都将其列为可再生能源的首选。加强可再生能源开发利用,是应对日益严重的能源和环境问题的必由之路,也是人类社会实现可持续发展的必由之路。

目前,生物质能技术的研究与开发已成为世界热门课题之一,受到世界各国政府与科学家的关注。许多国家都制订了研究开发计划,如日本的阳光计划、印度的绿色能源工程、美国的能源农场等,其中生物质能源的开发利用占有相当大的份额。我国《可再生能源发展“十二五”规划》中明确提出要“继续加快开发生物质能”,到 2015 年生物质燃料年利用规模要达到 1500 万 t,生物质的能源化利用已成为一项重要研究课题。作为农业大国,我国具有丰富的农作物秸秆类生物质资源,生物质能源的储量保守估计超过 20 亿 t,仅每年可利用的秸秆资源量就超过 7 亿 t。

然而,这些巨大的生物质资源浪费严重。一方面,我国大部分地区的农民随意露天焚烧秸秆已成为污染环境的一大祸害;另一方面,能源紧缺、价格飞涨,节能减排、发展低碳经济的呼声越来越高。所有这些客观条件为我国发展生物质能源提供了有力的资源保障。

生物质颗粒燃料致密成型技术具有生产成本低、产品能量密度较高和便于储运等优点,并可以处理农林废弃物,消除秸秆焚烧造成的环境污染,而且生物质颗粒燃料热值相当于中质煤炭,市场前景非常广阔。环模制粒机即是用于生物质颗粒燃料致密成型的主要装备。

用于生物质颗粒成型与饲料颗粒成型的环模制粒机的核心结构基本相同,都是基于环模挤压成型原理,只是由于物料特性不同而需要配置不同的电机功率及不同结构、尺寸的环模和压辊。国际上生物质颗粒成型制粒机高端市场同样由国外垄断,我国对于生物质颗粒成型制粒机的技术储备甚至远低于饲料颗粒成型制粒机,其高能耗及环模、压辊的低寿命问题非常突出。业内人士分析认为:如果我国能够掌握高效节能制粒技术并用来生产木质颗粒,木质颗粒的批量生产成本将大幅降低,不仅在国内可与煤炭价格相抗衡,在国际市场上的竞争力也毋庸置疑。将高效节能制粒技术与设备在农村广泛推广,可使农村多余的秸秆和林业等废弃物全部转化为生物质固体颗粒,大大增加能源供应能力,并显著增加农民收入,促进农村经济和社会的持续发展。

可见,高效节能制粒技术对于生物质能源产业的发展非常重要,但目前制粒技术的高能耗、低产能以及环模、压辊的低寿命问题已成为制约该产业发展的瓶颈。因此,开展制粒技术的基础研究对开发低能耗、高产能的生物质能源制粒技术与装备,促进生物质能源产业发展,促进三农发展,降低环境污染具有非常重要的意义。

1.3 环模制粒成型技术的国内外技术现状

国外环模制粒成型技术已经历了几十年的发展,进行了大量的基础理论研究,培养了一大批专业技术人员,掌握了大量先进技术,技术水平明显领先于国内同类产品。

1. 国外技术现状

1) 拥有完善的技术体系

目前,发达国家已经形成了健全的环境制粒装备技术体系,能够提供多种优质、高效的生产设备与完善的工程解决方案。国际著名的环模制粒装备企业主要有瑞士 BÜHLER 公司、美国 CPM 公司、奥地利 Andritz 公司、德国 MUNCH 公

司、丹麦 Sprout-Matador 公司等一些欧美发达国家和地区的企业,它们在环模制粒成型技术方面研究较早,已分别从制粒工艺、装备设计与制造、智能控制技术、专家诊断与服务技术等多个方面进行了系统研究,形成了完善的技术体系。

2) 不仅可靠性高,而且高效、节能、环保

国外环模制粒装备企业重视基础研究,对于装备涉及的材质性能和加工技术进行了大量研究工作,关键零部件的使用寿命均超出国内同类产品的 2~3 倍;装备的材质、润滑油、润滑脂的使用均充分考虑了环保问题;大量应用了除尘、除臭、在线检测技术;结构、工艺参数进行了优化,节能效果显著;进行了大量的关于工艺与装备之间的优化组合研究。高效、节能、环保技术的应用大力提升了装备的整体性能。

3) 不断向大型化、智能化方向迈进

国外环模制粒装备的研发趋向大型化、智能化方向发展,时产 50t 甚至 100t 的环模制粒装备成为主流机型,单机功率有的已经达到几百千瓦。这些大型设备自动化程度非常高,生产车间可以实现无人操作。而且,装备的智能化程度不断提高,可以实现一键开机、全过程智能监控。大型化、智能化技术的应用进一步提升了环模制粒装备的整体技术水平。

4) 成套化、智能化程度高,实现了颗粒生产的智能管理

国外著名的环模制粒装备制造厂商在成套装备集成化的基础上进一步开发了管控一体化系统与智能控制系统,提供从半自动生产单元到大规模全自动生产的过程控制系统的自动化服务,具有工艺流程优化与控制、能量消耗优化、设备状况实时监测与管理、专家诊断等诸多功能,实现了颗粒生产的精细化管理。

2. 国内技术现状

1) 已形成相对完善的环模制粒装备产业体系与技术体系,但技术平台与基础研究相对滞后

我国环模制粒装备产业的发展经历了引进、消化吸收、自主开发、合资合作生产、规模化发展等几个阶段,现在已经形成了相对完善的产业体系,基本能够满足国内各领域的生产应用需求。但是总体而言,我国环模制粒装备技术平台与基础研究相对滞后,产品设计缺乏先进的试验与检测条件支撑,经验设计仍占有相当大的比重;环模制粒装备技术领域的高端人才比较短缺,极大制约了产品的创新力度与技术水平。

2) 部分指标已达到或接近国际先进水平,但是总体技术水平与国际先进水平相比还有较大差距

近年来,通过技术创新,国内制粒技术得到了快速发展:成功开发了双齿轮驱动制粒机、双级同步带驱动制粒机、双辊制粒机、平模制粒机、双轴分功能制粒机调

质器等多种新型制粒装备,制粒机的适应性不断增强;对环模、压辊几何参数及环模转速等结构、工艺参数不断优化,开发了适应不同物料的系列化产品,在保证颗粒质量的前提下使制粒能耗不断降低;制粒装备不断向大型化方向发展,目前国内已经开发出了功率为 350kW 的大型制粒机;设计了新型环模、压辊调节机构,提高了装配、维修效率;针对环模、压辊的磨损问题进行了材料技术、表面处理技术及表面形状优化技术的攻关,使环模、压辊的使用寿命不断提高。虽然我国制粒技术与装备得到了长足发展,但是在绿色环保、能耗、核心部件使用寿命等核心指标上与国际先进水平相比仍差距较大,急需改进与提升。

3) 以环模制粒机为核心的颗粒成套生产线大型化、智能化水平不高

环模制粒机是颗粒生产的核心设备,其技术水平的提升非常关键;但同时,以环模制粒机为核心的颗粒生产成套生产线整体水平的提升也非常关键,否则环模制粒机单机性能将得不到充分发挥。目前,我国已开发出具有自主知识产权的环模制粒装备自动控制系统及以环模制粒机为核心的颗粒生产成套生产线自动控制系统,并得到一定程度的应用,可以满足目前国内建设大型颗粒加工厂对装备的需求,但当前成套控制系统的智能化水平较低,且成套生产线的大型化水平与国际先进水平相比差距较大。

1.4 环模制粒成型技术的国内外研究现状

与传统的机械加工技术不同,环模制粒成型技术的加工对象为粉体类物料,不仅涉及机械摩擦学、粉体力学、材料工程等多学科知识,而且涉及各学科领域的交叉应用;环模制粒成型技术的机理、工艺及设备均表现出了其特有的技术特征及技术难度。虽然国外在环模制粒成型技术的研究与应用方面水平较高,但环模制粒挤压成型过程中相当一部分技术规律迄今仍不明确。

国内外学者针对环模制粒成型技术进行了大量研究,取得了一批研究成果,为高效节能制粒技术的研究提供了一定的研究基础。本节从成型机理、制粒生产率、制粒能耗、颗粒质量、制粒稳定性及核心部件寿命等几个方面对国内外的研究现状进行综述。

1. 挤压成型机理

挤压机理的研究主要集中在三个方面:环模制粒挤压成型力学模型的研究;环模制粒挤压成型压缩过程的研究;环模制粒挤压成型过程粉体颗粒间内部结合机制的研究。

针对环模制粒挤压成型力学模型,在国外,丹麦技术大学开展的“制粒过程基础性研究”项目(EFP-2005 Project(33031-037))对于木质粉体制粒进行了一系列

基础性研究,项目组成员 Holm 等^[1~3]建立了木质粉体在环模孔内挤压的力学模型,推导出了挤压力的方程式,并分别用小型试验制粒机和单孔制粒单元试验装置进行了试验验证;为了解决力学模型关系式中三个变量(泊松比、摩擦系数和预加作用力)相互耦合而难以确定的难题,Holm^[4]又对力学模型方程进行了改进。在国内,曹康^[5]对制粒的机理、工艺进行了全面的论述,对挤压区的受力状况进行了比较详细的力学分析;张维果、吴劲锋^[6,7]通过对不同粒度的苜蓿草粉进行压缩实验,得到了颗粒挤出力与粉体粒度、密度之间的关系,并建立了数学模型;周晓杰、王春光^[8]采用电测技术,选择初始密度和压缩速度为试验因素,对苜蓿草径向力进行测试研究,获得了压缩密度、初始密度和压缩速度对苜蓿草径向压缩力的影响规律;武凯^[9,10]针对粉体环模制粒成型理论进行了一系列研究,建立了环模制粒挤压过程完整的力学模型及扭矩模型。

针对粉体物料的压缩过程,杨明韶等^[11]开展了秸秆类物料开式压缩实验,对其流变学特性进行了研究;白炜等^[12]进行了三种秸秆颗粒冷态压缩成型的开式实验研究,将其压缩成型特性曲线定义为松散、过渡、压紧和推移四个阶段,并对前三个阶段进行了回归分析;孙启新等^[13]将生物质成型过程划分为松散、压紧和固化三个阶段(图 1.8),认为固化过程是塑性变形和黏性变形的结合;对于成型过程中物料的变化规律,Rehkuglar 等^[14]利用流变力学模型进行了分析;董玉平、回云埔则应用有限元软件模拟了成型过程的应力应变^[15]和温度场^[16],证明存在适宜的温度使原料流动性增强,成型更加容易。

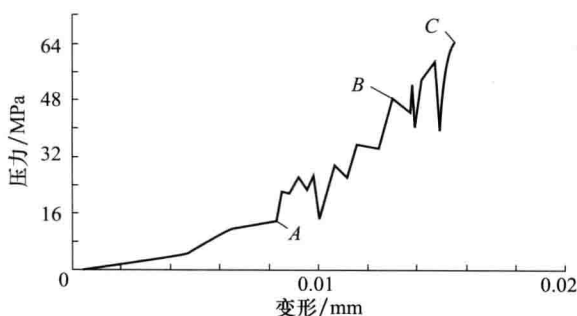


图 1.8 生物质压力-变形曲线^[13]

0-A 为松散阶段, A-B 为压紧阶段, B-C 为固化阶段

针对粉体颗粒间内部结合机制,Lindley^[17]将成型物内部的黏结力类型和黏结方式分成五类:固体颗粒桥接或架桥、非自由移动黏结剂作用的黏结力、自由移动液体的表面张力和毛细压力、粒子间的分子吸引力或静电引力、固体粒子间的充填或嵌合,认为生物质燃料特性可以用上述的一种或几种黏结类型来解释其内部的成型机制;田潇瑜^[18]研究表明,秸秆燃料的内部结合形式主要为机械镶嵌和天然

黏结剂黏结;Kaliyan^[19]利用电子扫描显微镜(SEM)观察了不同方式制出的玉米秸秆颗粒和柳枝稷颗粒,发现颗粒之间的结合方式主要是固体桥接,并且通过紫外荧光照片发现固体桥接主要是由天然黏合剂(纤维素、蛋白质)形成(图 1.9),因此提出了有必要调节物料的水分含量和制粒温度来使得这些黏合剂融化,进而形成质量更好的颗粒;霍丽丽^[20]研究表明,玉米秸秆等生物质燃料(环模成型)的微观成型机理为分层间断性压缩,分为中心层、过渡层和表层,层与层间距为 $25 \sim 40 \mu\text{m}$;吴云玉^[21]则研究了生物质颗粒微观成型机理,建立了微观接触几何模型(图 1.10),认为压辊对原料的正压力 F 与生物质颗粒表面斜角 α_i 的余弦成正比。

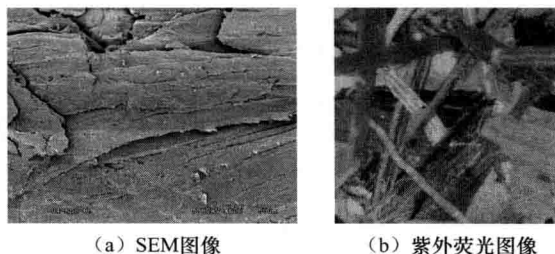


图 1.9 玉米秸秆 SEM 和紫外荧光(UV-AF5)图像^[19]

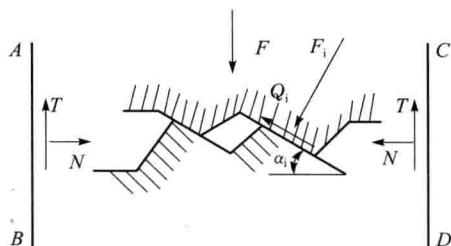


图 1.10 生物质机械接触几何模型^[21]

2. 制粒成型生产率

针对提高制粒成型生产率的研究主要集中在两个方面,一方面是针对现有结构提出参数选择、优化规范,另一方面是通过新的结构提升制粒效率。

针对制粒机结构参数对制粒生产率的影响,陈炳伟^[22]指出,环模和压辊的结构参数对环模制粒机的生产效率影响很大,选用大直径环模和压辊可以提高制粒生产率,但压辊数目与模辊直径比有相互制约的关系,因此单纯增加压辊个数并不一定能提高环模制粒机的生产效率。王敏^[23]、李艳聪^[24]研究了环模转速与制粒生产率之间的关系:王敏^[23]研究表明,环模制粒机的生产率与环模的转速没有严格的正反比关系,环模存在最佳转速范围对应最高的生产率;而李艳聪^[24]则通过实

验研究了环模线速度和饲料加工产量之间的关系,得出制粒机产量与环模线速度之间存在拐点,即对应特定的物料,制粒机采用合理的线速度可使得制粒产量最大。环模表面开孔率方面,高放^[25]研究表明,环模开孔率直接影响到制粒机的生产效率,理论上,环模表面的开孔率越大,制粒机的生产率越高,但是开孔率的大小也直接影响到加工的难易程度及环模的强度,因此在保证环模有足够的强度及加工容易的情况下,应尽可能地提高环模开孔率。辊模间隙也影响到环模制粒机的生产效率,林云鉴^[26]研究表明,辊模间隙过大时,物料打滑,生产率降低;而当间隙过小时,粉料经挤压温升加剧,水分蒸发较快,使物料干结堵塞模孔,生产率也降低。此外,Blank^[27]对制粒过程进行了优化分析,研究了如何在保证加工质量的前提下提高加工效率;Wu^[28]建立了环模制粒生产率模型,对影响生产率的各因素进行了分析。

除了针对现有结构参数对制粒机生产率的研究外,专利文献中提出了多种新型结构以提高制粒效率。方亨志^[29]提出了一种带切线搅拌桨的混合制粒机,在搅拌机构中设置了搅拌桨和传动装置,并将搅拌桨按其圆周的切线方向均匀分布放置,可以提高物料的混合效果,并提高生产率;迈斯特^[30]提出在制粒机中使用切割转子,该转子的外周面上布有切割的刀片都由一驱动系统带动旋转,在制粒过程中对颗粒可以进行及时地定向切割,有助于效率的提高;江苏牧羊集团有限公司^[31,32]提出了两种高效率制粒机:环模和压辊可同时转动的制粒机(图 1.11)和双环模内置式制粒机,环模、压辊同时转动可减小堵机概率,进而提升效率,而双环模内置式制粒机增置了内环模,在内环模壁上同样设有若干径向的模孔,这样两个环

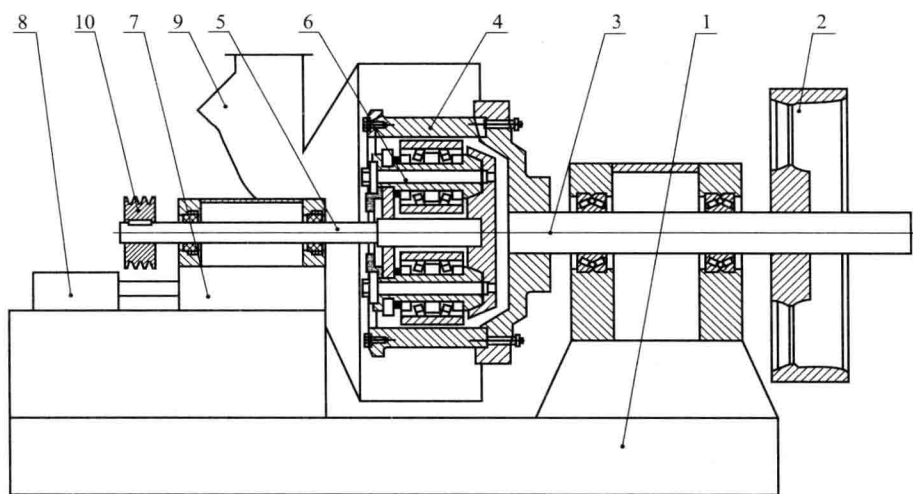


图 1.11 环模和压辊可同时转动的制粒机^[31]

1. 机架;2. 环模动力轮;3. 环模支撑轴;4. 环模;5. 压辊支撑轴;6. 压辊组件;7. 移动底座;
8. 移动机构;9. 进/出料部件;10. 压辊动力轮