

生物质全降解制品 关键技术与装备

郭安福 李剑峰 李方义 著



科学出版社

生物质全降解制品 关键技术与装备

郭安福 李剑峰 李方义 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

为贯彻落实《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》和《国务院关于加强发展循环经济的若干意见》(国发〔2005〕22号)等文件精神,科技部于2006年10月在“十一五”国家科技支撑计划中设立了“绿色制造关键技术及装备”重大项目。

本书研究来源于由山东大学和山东九发生物降解工程有限公司共同承担的“绿色制造关键技术及装备”重大项目之“生物质全降解制品关键技术及成套装备”课题。以生物质全降解制品“成分配伍技术及成形机理—成形工艺技术—产品性能”为主线,重点研究生物质全降解制品成分配伍技术及成形机理、成形工艺技术及成形模具、力学性能、降解机理和环境友好性分析等关键技术。同时,本课题得到国家自然科学基金资助(51275278、51305239、51775318),部分研究成果也列入本书中。

本书可供从事全降解制品领域工作的工程技术人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

生物质全降解制品关键技术与装备/郭安福,李剑峰,李方义著. —北京:科学出版社,2018.11

ISBN 978-7-03-059266-8

I. ①生… II. ①郭… ②李… ③李… III. ①废弃物—生物降解—研究 IV. ①X172

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第249489号

责任编辑:邓 静 张丽花 罗 娟 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:吴兆东 / 封面设计:迷底书装

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>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年11月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018年11月第一次印刷 印张:9

字数:200 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

严重的环境污染、大量的资源能源消耗，是制约 21 世纪可持续发展的重大问题。为治理“白色污染”，目前国内外已有多种绿色产品推出：淀粉基塑料类、纸浆模塑类、生物质全降解类等。其中，生物质全降解类制品是以植物纤维（稻草纤维、秸秆纤维、蔗渣纤维）和淀粉为主料，其他添加剂为辅料，经过发泡成形、喷涂防水防油胶、杀菌包装等工艺生产出的绿色环保产品。该绿色环保产品具有原料可再生、环境污染小、生产成本低等优点，是塑料产品的最佳替代品之一。

但是目前生物质全降解制品存在成形机理不明确、成分配伍不成熟、核心生产装备不完善、生物质全降解材料基础性能研究较少和国内外缺乏有效的评价标准等问题。因此，发展生物质全降解制品关键技术成为当前亟待解决的问题。作者在综合国内外相关研究的基础上，以生物质全降解制品“成分配伍技术及成形机理—成形工艺技术—产品性能”为主线，对生物质全降解制品成分配伍技术及成形机理、成形工艺技术及成形模具、力学性能、降解机理和环境友好性分析等关键技术进行重点研究。

然而，一方面由于生物质全降解制品生命周期的复杂性，另一方面由于生物质全降解制品关键技术涉及多学科交叉，目前国内外的研究尚处于探索阶段，无论在理论方法还是在技术工具上都需进一步研究和深化。作者希望本书的出版，能在一定程度上开阔生物质全降解制品关键技术研究的思路。

本书的出版，得到了聊城大学机械与汽车工程学院领导和同事给予的大力支持，同时得到山东大学可持续制造研究中心李剑峰教授、李方义教授的指导和帮助，谨在此向他们致以衷心的感谢。在本书撰写过程中，参考和引用了国内外相关文献，在此对这些文献的作者一并表示感谢。最后向参与本书审稿工作的专家表示真诚的感谢。

由于作者能力和水平有限，书中难免存在不当之处，敬请读者批评指正。

作 者

2018 年 7 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.1.1 研究背景	2
1.1.2 研究意义	4
1.2 生物质全降解材料研究现状	7
1.2.1 成分配伍及成形机理	7
1.2.2 生产装备及成形工艺技术	8
1.2.3 组织结构及力学性能研究	10
1.2.4 降解机理及降解评价方法研究	10
1.2.5 环境友好性评价	11
1.2.6 存在的主要问题	13
1.3 主要研究内容	13
第 2 章 生物质全降解制品成分配伍技术及成形机理	17
2.1 成分配伍及制备技术	17
2.1.1 淀粉的结构及性质	17
2.1.2 纤维素的结构及性质	19
2.1.3 发泡剂	21
2.1.4 其他添加剂	22
2.1.5 制备过程	26
2.1.6 制品成形影响因素	27
2.1.7 成分配伍技术方案	28
2.2 四步式发泡机理	29
2.2.1 理论基础	29
2.2.2 气泡成核阶段	34
2.2.3 气泡增长阶段	36
2.2.4 气泡塌陷和破裂	38
2.2.5 固化定型阶段	39
2.3 水桥连接成形机理	40
2.3.1 高聚物共混	40

2.3.2	固液两相流体	41
2.3.3	纤维受力分析	41
2.3.4	成形过程中的水桥连接	42
2.4	本章小结	43
第 3 章	生物质全降解制品成形工艺技术及成形模具研究	44
3.1	新型成形模具技术	44
3.1.1	快排汽无余料技术	45
3.1.2	楔形自动定位技术	46
3.1.3	强制自动脱模技术	47
3.1.4	掩口柔性自动调整技术	47
3.2	成形工艺参数选择	48
3.3	成形模具热力耦合分析	50
3.3.1	理论基础	50
3.3.2	成形模具热场分析	51
3.3.3	成形模具热力耦合分析	63
3.4	本章小结	72
第 4 章	生物质全降解材料微观结构及力学性能实验研究	74
4.1	发泡材料泡孔结构及表征	74
4.1.1	气体结构单元概念	74
4.1.2	开孔结构和闭孔结构	75
4.1.3	泡孔构型	75
4.1.4	泡孔结构的表征	77
4.2	生物质全降解材料微观结构分析	78
4.2.1	气泡存在形式分析	78
4.2.2	能谱分析	79
4.3	餐盒有限元分析	80
4.3.1	力学性能基础参数测定	80
4.3.2	餐盒有限元分析	84
4.3.3	结果分析	87
4.4	餐盒使用性能研究	88
4.4.1	实验内容及方法	88
4.4.2	实验结果及分析	90

4.5 本章小结	91
第5章 生物质全降解制品降解机理及实验验证	92
5.1 基础理论	92
5.1.1 降解理论	92
5.1.2 降解环境条件	95
5.2 生物质全降解材料双阶段降解机理	97
5.2.1 填埋之前降解机理	98
5.2.2 填埋之后降解机理	100
5.3 生物全降解材料降解性能实验研究	102
5.3.1 实验原理及材料	102
5.3.2 实验方法及步骤	104
5.4 实验结果及分析	105
5.4.1 霉菌生长程度分析	105
5.4.2 质量损失率分析	107
5.4.3 环境条件对材料降解性能的影响	108
5.4.4 试样大小对材料降解性能的影响	109
5.5 本章小结	109
第6章 基于层次分析法的生物质全降解包装材料绿色度评价	111
6.1 基于生命周期的模糊层次分析法	111
6.2 可降解包装材料绿色度评价	114
6.2.1 建立评价指标体系及层次结构模型	114
6.2.2 计算各评价指标权重	114
6.2.3 计算综合重要度	116
6.2.4 确定各指标隶属度	117
6.2.5 综合评价	118
6.2.6 结果分析	118
6.3 典型可降解包装材料绿色度对比分析	118
6.3.1 典型可降解包装材料	118
6.3.2 结果分析	119
6.4 本章小结	119
第7章 结论与展望	121
参考文献	124

第1章 绪 论

为治理“白色污染”，目前国内外已有多种绿色产品推出：淀粉类、双降解塑料类、纸浆模塑类、生物质全降解类等^[1,2]。其中，生物质全降解类制品是以植物纤维(稻草纤维、秸秆纤维、蔗渣纤维)和淀粉为主料，其他添加剂为辅料，经过发泡成形、喷涂防水防油胶、杀菌包装等工艺生产出的绿色环保产品。该绿色产品具有原料可再生、环境污染小、生产成本低等优点，是塑料产品的最佳替代品^[3]。生物质全降解制品存在成分配伍不成熟、核心生产装备不完善、生物质全降解制品材料基础性能研究较少和国内外缺乏有效的评价标准等问题。因此，发展生物质全降解关键技术成为当前亟待解决的问题。通过对生物质全降解技术现状以及核心装备技术进行分析和总结，将生物质全降解制品产品的成分配伍机理、成形机理及技术、力学性能、降解机理和产品全生命周期绿色度分析等关键技术作为研究重点，对主要研究内容和本书结构进行阐述。

1.1 研究背景和意义

最近半个世纪是人类历史上经济发展迅速膨胀的时期，长期以来为求得短期经济效益而过度开发自然资源，破坏人类与其他生物赖以生存的生态环境等现象在全球范围内广泛存在；同时，未能充分认识到环境、生态对经济持续发展的基础性支持作用，已造成了严重的后果^[4-10]。

作为新材料的塑料，由于具有坚实耐用、加工性能好、质量轻、使用性能优良、价格低廉等优点，其用途已渗透到国民经济各个部门和人们生活的各个方面。然而，在塑料改善生活质量，给人们生活带来便利的同时，大量塑料废弃物给人类赖以生存的自然环境造成了严重影响，特别是一次性塑料包装制品，不易回收利用，也不易被环境降解，形成了“白色垃圾”^[11-13]。

1.1.1 研究背景

1. 环境污染方面

石油工业的迅猛发展,促进了塑料产品的生产,其年产量已达约1亿吨,其中美国和欧洲各3000万吨、日本约1200万吨、中国约400万吨。美国、欧盟和日本年产塑料垃圾分别为1300万吨、450万吨和6.5万吨^[14]。

由于大量使用塑料包装材料,其废弃后造成的“白色垃圾”也非常多,塑料类“白色垃圾”的质量轻,收集困难,回收利用价值低、成本高,并且难以降解,在自然状态下可存在200年以上,已对环境造成非常严重的后果。目前消除“白色垃圾”的方法主要包括焚烧和掩埋。但“白色垃圾”在焚烧过程中会产生包括二氧化硫在内的多种有毒有害气体,对大气造成二次污染。掩埋虽然可以暂时处理“白色垃圾”,但随着时间的延长,塑料制品中的有毒物质会分解、渗入地下,造成严重的土壤污染和水污染^[15]。发泡塑料制品的制作原料是聚苯乙烯,所用的发泡剂是氟利昂,里面还含有二噁英及其他一些有毒物质。当温度超过65℃时,一些毒素和二氧化硫就会析出并渗入食品中,对人的肝脏、肾脏、生殖系统、中枢神经系统造成损害,甚至可能致癌,影响人们的身体健康。作为生活垃圾的废塑料制品和遗留在土壤中的废塑料等散落在田野或填埋进入土壤后,会影响土壤透气性、阻碍水分流动和作物根系发育,影响土壤内物、热的传递和微生物生长,影响农作物吸收养分和水分,导致农作物减产。据调查,每亩(1亩 $\approx 666.7\text{m}^2$)地若含残膜3.9kg,可使玉米减产11%~23%,小麦减产9%~16%。同时,塑料的碎屑混入土壤中,长期不能降解,会破坏土壤的团粒结构,紊乱毛细管体系,导致深层土质劣化,上百年不能恢复,进而破坏地球生态平衡,最终威胁人类生存^[16,17]。

2. 资源方面

目前,广泛使用的一次性塑料制品大都由石油提炼而来,而石油属于不可再生资源,据估计,以目前的开采能力计算,全球的石油资源仅还能开采40余年^[18-20]。我国是位列美国之后的世界上第二大石油进口国,由于油价的持续上涨和国际环境的紧张,石油将成为制约我国经济发展的一个瓶颈^[21-23]。

3. 贸易壁垒

为更好地保护环境和资源,现在许多国家都已禁止使用一次性发泡塑料餐具,要求进口的包装材料符合ISO 14000等一系列绿色标准。ISO 14000环境管

理体系国际标准规定不符合该标准的产品,任何国家都可以拒绝进口,因此使不符合标准的产品被排除在国际贸易之外。目前,我国的包装材料符合 ISO 14000 标准的种类较少,远不能满足对外贸易发展的需要,许多包装产品被绿色壁垒挡在了国际市场的大门之外,形成了我国的国际贸易壁垒^[24,25]。

4. 法令法规

世界各国已采取了积极的措施来限制和禁止一次性塑料制品的使用,并积极引导全降解材料产业的发展,以解决本国的环境问题,如表 1-1 所示。

表 1-1 国内外相关的政策法规一览表

年份	国家或地区	内容
1989	美国	限制使用一次性非降解塑料制品,并制定实施降解塑料的时间表
1991	欧盟	限制使用一次性非降解塑料制品,并制定实施降解塑料的时间表
1993	德国	禁止使用一次性非降解塑料制品
1995	中国	限制使用一次性塑料餐盒的地方法规相继出台
1996	中国	铁道部在全国铁路各站禁止使用泡沫塑料餐盒
1997	欧盟	全面禁止使用一次性非降解塑料制品
1998	中国	国家环境保护总局主持召开会议,计划从 1999 年 7 月 1 日起,用一到两年时间淘汰一次性发泡塑料餐具
1999	中国	国家经济贸易委员会发布第六号令,要求在 2001 年前淘汰泡沫塑料餐具
1999	中国	《一次性可降解餐饮具通用技术条件》和《一次性可降解餐饮具降解性能试验方法》两项国家标准获得通过
2000	中国	《一次性可降解餐饮具通用技术条件》和《一次性可降解餐饮具降解性能试验方法》两项国家标准正式实施
2002	荷兰	对一次性塑料袋征税,使全国一次性塑料袋的使用量下降了 90%
2007	中国	《降解塑料的定义、分类、标识和降解性能要求》国家标准正式实施
2009	中国	《塑料一次性餐饮具通用技术要求》国家标准正式实施

5. 各国对策

资源和能源的过度消耗及其给人类生存构成的严重威胁,使当今世界掀起了以保护生态环境为核心的绿色浪潮,绿色包装则是这股浪潮的重要组成部分。绿色包装是指能够循环利用、再生利用或自然降解,并在产品的整个生产周期中对人体和环境不造成危害的适度包装。世界发达国家对发展绿色包装提出了“4R1D”,即 Remanufacture(再制造)、Reduce(减量化)、Reuse(重复使用)、Recycle(再循环)、Degradable(可降解)^[11,21]。

德国是世界上最早提出绿色环保材料概念的国家,早在 1977 年,德国政府

就推出“蓝天使”绿色环保标识,用以授予具有绿色环保特性的产品,包括一次性制品、包装材料和容器等。具有绿色环保标识的产品将得到政府向消费者推荐的特权,并在税收上享有一定的特权^[26]。

荷兰政府计划采用大量生物降解材料,以促进荷兰绿色包装的使用。政府已准备了几十亿欧元购买可持续材料制造的物品,这些产品包括生物降解三明治包装、酒杯、罐和垃圾袋等。荷兰政府决心担当荷兰的行为榜样,并提高消费者的有关意识^[27]。

日本目前降解原材料生产企业约有 20 家,同时有多达 170 家企业在生产、加工和研制降解材料制品,这些企业大多有多年降解材料制品生产和经营经验,极大地推动了全降解材料行业的发展^[28]。

我国早在 20 世纪 90 年代初就已下大力气治理“白色污染”,90 年代末又对各行各业提出了“绿色环保”的要求。进入 21 世纪后,我国将发展循环经济提高到一个战略高度。我国在《国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》中明确提出要全面贯彻落实科学发展观,大力发展循环经济,建设资源节约型、环境友好型社会,加大环境保护力度,改变长期以来只注重加快经济增长的政策,转而支持改善社会服务和限制范围越来越广泛的环境破坏。

1.1.2 研究意义

本书研究生物质全降解制品的重大意义主要体现在原料具有可再生性、产品废弃后实现全降解和市场需求量大等方面。

1. 生物质的概念

生物质是指利用大气、水、土地等通过光合作用而产生的各种有机体,即一切有生命的可以生长的有机物质,包括植物、动物和微生物。

广义上,生物质包括所有的植物、微生物,以及以植物、微生物为食物的动物及其产生的废弃物。有代表性的生物质有农作物、农作物废弃物、木材、木材废弃物和动物粪便等。

狭义上,生物质主要是指农林业生产过程中除粮食、果实以外的秸秆、树木等木质纤维素、农产品加工业下脚料、农林废弃物及畜牧业生产过程中的畜禽粪便和废弃物等物质^[29]。

各种生物质之间存在相互依赖和相互作用的关系。生物质对人类有广泛而重要的用途:①用作食物;②用作工业原料;③用作能量;④改善环境、调剂气候、保持生态平衡。

2. 生物质组成

生物质的主要组成元素为 C、H、O，化石资源的主要组成元素为 C 和 H。通过光合作用，植物每年转化约 2000 亿吨 CO_2 ，把其中的碳转为碳水化合物，并储存 $3.1 \times 10^{13} \text{J}$ 的太阳能。其储存的能量是目前世界能源消耗量的 10 倍左右。

生物质分为以下三大类。

1) 木质纤维素

木质纤维素是指植物的根、茎、叶及果实的外壳，如农林副产物(如玉米芯、甘蔗糖、秸秆、树皮、木屑)等，这类生物质的主要化学成分是纤维素、半纤维素和木质素这三部分，全球数量最大的三种木质素生物质的原料是稻草、麦秸秆和玉米秸秆。

2) 籽粒

籽粒(粮食、果实)是植物生长产生的种子，如玉米、小麦等，这类生物质的主要化学成分是糖类(可溶性糖和不溶性糖)、脂类(油脂和磷脂)、蛋白质(结构蛋白和储藏蛋白)。

3) 甲壳素

甲壳素又称甲壳质、几丁质，是一种特殊的纤维素，也是自然界中少见的一种带正电荷的碱性多糖。它的化学名称是聚葡萄糖胺(1,4)-2-乙酰氨基-2-脱氧- β -D-葡萄糖，或简称聚乙酰氨基葡萄糖。甲壳素广泛存在于甲壳纲动物(如虾、蟹和昆虫)的甲壳中，以及真菌(如酵母、霉菌)的细胞壁和植物(如蘑菇)的细胞壁中。

3. 原材料优势

生物质全降解制品由植物纤维、纯天然淀粉制备而成，其淀粉主要来源于玉米，其植物纤维主要来源于农作物秸秆、花生壳、蔗渣和竹粉等可再生原料。我国玉米的产量高，库存量大，国家数次颁布深加工产业政策，鼓励和提倡对陈化粮食的深加工。农作物秸秆和花生壳是很好的全降解材料原料，据有关资料报道，我国年产可利用的农作物秸秆达 6 亿多吨，年产花生壳 3000 多万吨。以往多以焚烧为主，既浪费资源，又污染环境。利用农作物秸秆和花生壳作为全降解材料原料两全其美，既使废弃物资源化，又保护了环境，是既经济又实惠的可持续发展循环经济。我国南方地区分布着大量的竹林，其所在地区大部分经济欠发达，发展竹粉加工业将是促进地区经济发展、缓解就业压力、提高人民生活水平的一个重要途径。

4. 生物质全降解材料市场需求分析

据报道，中国塑料包装材料在未来几年内年需求量将达到 500 万吨，按其中

30%为难以收集的一次性塑料包装材料和制品计算,塑料废弃物产生量将达 150 万吨;在塑料地膜方面,中国可覆盖地膜的面积为 5 亿多亩,目前覆盖面积仅达到 30%左右,加上育苗钵、农副产品保鲜材料,塑料地膜预计需求量将达到 100 万吨^[16];另外,一次性日用杂品和医疗材料也是难以收集或不宜回收利用的,预计其需求量达 100 万吨;因此,难以回收利用的塑料废弃物将达到 350 万吨。若其中 30%采用降解塑料替代,则约占中国塑料制品总产量的 4%^[30,31]。

目前,全国一次性快餐盒年消费量大约 120 亿只,可回收、可降解的环保饭盒占 60%,国家明令禁止的一次性发泡塑料餐盒占 40%。在 60%的环保饭盒中,有 1/2 左右不能完全达到安全、卫生和环保要求,真正符合要求的环保饭盒大约只有 36 亿只。另外,全国一次性水杯的用量大约 100 亿只,一次性托盘的用量大约 80 亿只,一次性碗类(包括方便面碗)的用量大约 60 亿只,一次性筷子用量大约 400 亿只,还有刀、叉、勺等目前尚无统计数据^[32]。

市场上还有很大比例的纸制一次性餐饮具,虽然纸制品属于可降解材料,但纸制一次性餐饮具需要消耗大量的木材,将对我国本来就贫乏的森林资源造成巨大的威胁。除此之外,造纸工业会排放大量的污水,污染河流,破坏居住和生态环境。一次性餐饮具的需求逐年增加,而生物质全降解材料的发展还不是很迅速,不可避免地造成环境污染和资源浪费,如图 1-1 所示。

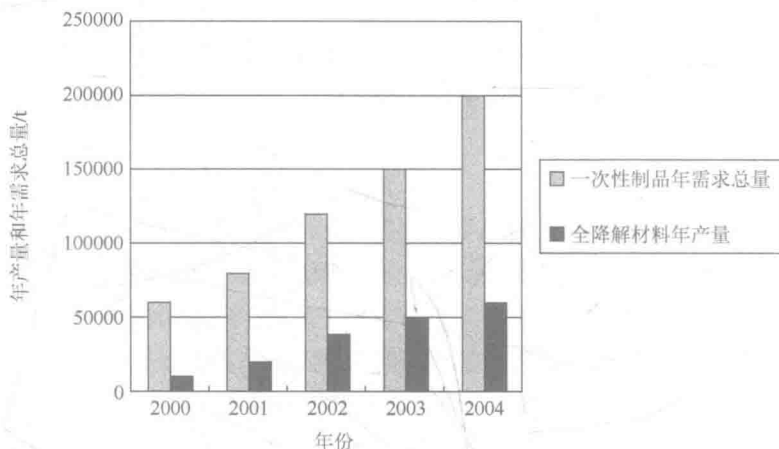


图 1-1 一次性制品材料需求总量与全降解制品材料年产量对比

5. 生物质全降解材料重大意义

发展生物质全降解材料的重要意义如下。

(1) 生物质全降解材料及制品是普通塑料制品等不可或不易降解材料的理想

替代品,是可降解类餐饮具制品的升级换代产品。

(2)符合环保要求,对保护环境、防止白色污染有重要的现实意义。

(3)可回收再生利用,全生命周期无污染,对促进循环经济的产生、实现可持续发展具有巨大的生态效益和社会效益。

(4)能够降低大规模消费品对石化产品的依赖性,具有重要的战略意义。

(5)可以促进和实现我国的粮食深加工产业政策,缓解玉米储存压力,使农作物秸秆、蔗渣等变废为宝。

(6)能够满足我国加入世界贸易组织(WTO)的需要,大幅度提高有关产品的国内外竞争力,打破 ISO 14000 环境标准等有形和无形的国际贸易壁垒。

(7)促进和带动制造、化工、控制、管理等一大批相关学科的研究和发展,具有重要的科学研究意义。

(8)一次性全降解餐饮具制品及包装材料可满足人们生活高质量、快节奏的绿色需求。

(9)全降解材料是国家环保政策支持的新兴材料类别,有长远的发展空间和潜力,是极具发展前途、经济效益显著的新兴产业。

1.2 生物质全降解材料研究现状

1.2.1 成分配伍及成形机理

国内外学者对生物质全降解包装材料成分配伍、成形机理及工艺技术的研究多见于对淀粉基塑料包装制品、泡沫塑料、纸浆模塑等可降解制品的研究。研究重点多见于材料配伍研究、成形机理和成形方法的研究。

1. 成分配伍机理研究

国内外学者分别采用各种生物质原料来研究可降解包装材料成分配伍机理。

淀粉及改性淀粉的配伍技术: Miladinov 等^[33]采用乙酰化淀粉作为原料制备泡沫塑料; Lawton 等^[34,35]认为高直链淀粉具有最短的烘焙时间并能制得相对轻便的碟子; Nabar 等^[36]研究了淀粉发泡材料的性质与所用淀粉的种类、发泡剂、添加剂的关系,得到了泡沫材料; Frank 等^[5,37]以易分解、低成本的有机材料和植物纤维为主要原料生产可生物降解的碗碟。

植物纤维配伍技术: Marechal 等^[38]以向日葵秆茎纤维为原料制造包装产品,

其强度与聚苯乙烯材料相当；李媛媛等^[39]对天然植物纤维的固有属性进行改性，增强相容性，通过发泡工艺增强其柔韧性和弹性。

添加剂配伍技术：未友国等^[40]利用天然胶乳、植物纤维、蒙脱土等经过发泡工艺制备橡胶发泡复合材料，并利用扫描电子显微镜(SEM)对微孔结构进行观察研究；宋晓利等^[41]研究了在不同增塑剂用量的情况下，实验样品的密度、动态缓冲曲线和静态缓冲曲线。通过对增塑剂用量与实验样品密度、动态缓冲系数及静态缓冲系数关系的分析，得出了增塑剂对缓冲材料的影响规律。

2. 成形机理研究

Chinnaswamy 等^[42]研究了不同温度对各种直链含量淀粉的影响；Wang 等^[43]建立了数学模型来描述淀粉基挤出发泡的发泡膨胀现象，模型由三部分组成：泡孔生长过程、挤出发泡的泡孔生长和挤出时的泡孔转移现象；杨文斌等^[44]对植物纤维发泡包装材料的干燥工艺和水分移动机理进行了研究。

1.2.2 生产装备及成形工艺技术

西方发达国家对可降解材料的研究较早，相关的生产设备研发也取得了一定的成果。国内一些企业和研究人员对生物质可降解一次性餐饮具生产装备也开展了一些研究工作。研究工作多致力于生产线的开发与优化、模具的开发与仿真、模具特征等方面。

1. 生产线装备

生产装备开发：德国 WALTER 公司研发了两种型号的淀粉快餐具生产设备，并开始进行工业化生产^[45]；美国^[46,47]、日本^[48]、西欧一些国家^[49]进行了生物质颗粒成形及燃烧技术的研究，并开发了生物质颗粒成形机及燃烧设备，形成了产业化，在加热、供暖、干燥、发电等领域已得到普遍推广应用。

生产原理：莫海军等^[50]介绍了目前我国一次性可降解环保餐具的发展概况，同时介绍了一次性可降解餐具的生产原理及工艺流程；王文生^[51]和刘志忱^[52]介绍了国内的纸浆模压自动化生产线的生产工艺、工作原理、生产装备和生产现状。

生产线仿真优化：山东大学刘刚^[53]建立了生物质全降解材料制备整条生产线的仿真模型，经过模型仿真，得出生产相关数据，在此基础上确定生产瓶颈，进而得出优化方案。

生产线控制系统：黄英等^[54,55]研究了 DZJ-A 型全自动纸浆模塑成形机生产工艺中的控制原理及可编程逻辑控制器(PLC)全自动控制系统的设计方法，并对

用 FX2N-80 型 PLC 实现工艺流程的程序控制、工艺过程中的温度、机构运动位置、工序时间等工艺参数的计量与控制,进行了分析研究。

2. 成形模具装备

成形模具仿真:东北大学张以忱等^[56]对 DZJ-A 型全自动纸浆模塑生产线的热压干燥模具加热过程中的工作表面温度分布和温度时间历程进行了模拟仿真;华南理工大学陈耀武等^[57]对一模多腔模具在加热过程中由散热问题引起的模腔温度不一致问题进行了仿真研究;焦安勇^[58]模拟了生物质的压缩成形过程及其内部温度场变化,分析得到生物质压缩过程的内部位移规律、应力应变规律以及摩擦应力分布状况。

新型模具设计:山东大学鲁海宁等^[59,60]设计了一种基于自动脱模技术的新型模具装置,结合生物质全降解材料成形原理和特点,采用有限元分析的方法,对新型成形模具的实际工作状况进行模拟仿真分析,并采用迭代法对新型成形模具进行优化。

模具特征:刘志忱^[52]分析了纸浆留着与成形模具的关系,探讨了成形模具的特征;胡玉峰等^[61]针对模压成形,从塑性成形基本原理出发对成形 R 值进行了试验研究。

3. 成形工艺技术研究

烘焙发泡成形方法:Preechawong 等^[62,63]研究了淀粉、聚乳酸、聚乙烯醇混合物和相关添加剂的烘焙发泡条件;Soykeabkaew 等^[64]研究了黄麻和亚麻纤维增强淀粉烘焙发泡的工艺条件;Shey 等^[65]和 Rosa 等^[66]采用烘焙法生产具有低密度泡沫塑料性能的谷物和块茎淀粉发泡材料。

临界熔体挤出法:Alavi 等^[67,68]运用超临界熔体挤出法获得了泡孔直径在 $50\sim 200\mu\text{m}$ 范围内的生物聚合物泡沫。

溶液机械发泡法:谢拥群等^[69]通过溶液机械发泡的方法构造了植物纤维材料的网状结构,利用气泡的内外压差、薄膜的表面吸附及膜间对纤维的顶推和束缚作用,以及纤维羟基形成的氢键结合,并结合胶黏剂增强实现纤维间的连接而构筑网状结构。

真空吸滤成形:张以忱等^[70,71]对纸浆物料的真空吸滤成形过程进行了理论分析,建立了相对应的真空吸滤模型,探讨了影响真空吸滤效率的因素,提出了型坯空隙率修正系数,并根据模型通过计算和推导,得出对于某一特定浆料的真空吸滤过程中纸坯厚度、过滤时间及压力差之间的关系式。

1.2.3 组织结构及力学性能研究

国内外学者对生物质全降解材料力学性能的研究多见于对淀粉基塑料、纸浆模塑等可降解材料的研究,研究内容主要包括材料组织的微观结构、产品性能仿真与实验和缓冲包装材料缓冲机理的研究。

1. 组织结构研究

Rutiaga^[19]、张以忱等^[71-73]和 Iman 等^[74]研究了淀粉基降解薄膜的抗拉强度和断裂伸长率等力学性能指标,并采用扫描电子显微镜分析了其组织结构;Gomes 等^[75]研究了由木薯淀粉、壳聚糖和聚乙烯醇组成的不同组分降解薄膜的抗拉强度;Scarascia-Mugnozza 等^[76]和 Briassoulis 等^[77]研究了降解地膜的力学性能的衰变周期和使用过程中抗拉强度的变化情况;Casavola 等^[78]采用拉伸实验的方法测定了该降解材料的力学性能,且该材料可以采用传统技术进行生产。

2. 仿真研究

赵东等^[79]通过有限元程序计算了植物秸秆压制杯形容器时的力-位移关系,研究了成形杯的应变分布,以及材料在模具中的流变规律,并探讨了变形程度、摩擦因子、模具锥度等因素对杯形容器成形的影响;徐锋等^[80]和景全荣等^[81]应用可降解餐具力学性能测试结果,采用有限元方法,对其在外载作用下所反映的力学性能进行分析,与实验结果进行对比,确定在外载作用下可降解餐具最易破损部位。

3. 工业缓冲包装材料缓冲机理

曹世普等^[82]研究了纸浆模塑工业包装制品的材料性能、结构和所受的载荷,提出了纸浆模塑工业包装制品的缓冲机理,并利用有限元方法模拟此类制品在载荷下的响应。

1.2.4 降解机理及降解评价方法研究

国内外学者对生物质全降解材料的降解机理也进行了一些研究工作,研究方法多采用堆肥法和自然环境法等。

1. 实验室法

Mohee 等^[83,84]在厌氧和需氧条件下,对生物可降解塑料的降解性能进行了实