

全国“粮食工程”专业系列规划教材

食品挤压与膨化技术

石彦国 主编



NLIC 2970776422



科学出版社

全国“粮食工程”专业系列规划教材

食品挤压与膨化技术

主 编 石彦国

副主编 李次力 李远志



NLIC 2970776422

科学出版社

北京

内 容 简 介

挤压与膨化技术是集混合、搅拌、破碎、加热、蒸煮、杀菌、灭酶、膨化及成型于一体的高新技术之一,其在食品领域的应用越来越广泛,挤压膨化食品在食品大家族中的地位越来越重要。本书全面系统地阐述了淀粉质原料挤压技术理论和植物蛋白质原料挤压技术原理;介绍了食品挤压与膨化技术的概念与特点及其发展概况,淀粉质原料挤压设备和淀粉质原料挤压膨化食品加工工艺,大豆蛋白及主要植物蛋白挤压组织化工艺,非挤压膨化技术——气流膨化、微波膨化、油炸膨化及焙烤膨化,挤压膨化技术在发酵工业、制油工业、淀粉糖浆生产及油料饼粕脱毒中的应用。书中有大量的图表和数据,更方便读者学习和理解。

本书既可作为高等院校相关专业的教材,又可作为相关领域科研与生产的重要参考书。

图书在版编目(CIP)数据

食品挤压与膨化技术/石彦国主编. —北京:科学出版社, 2011

全国“粮食工程”专业系列规划教材

ISBN 978-7-03-032050-6

I. ①食… II. ①石… III. ①食品加工-高等学校-教材 IV. ①TS205

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 165066 号

责任编辑:席 慧 景艳霞/ 责任校对:宋玲玲

责任印制:张克忠/ 封面设计:北京科地亚盟图文设计有限公司

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>

新 蕾 印 刷 厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011 年 8 月第一次印刷 印张:13

印数:1—2 500 字数:305 000

定价:30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

全国“粮食工程”专业系列规划教材编写委员会

- 顾 问 殷涌光 (吉林大学) 王 国英 主
夏文水 (江南大学) 李 永 主
刘静波 (吉林大学) 李 志 主
李里特 (中国农业大学) 委
杨同舟 (东北农业大学) 王 敏
- 主 任 江连洲 (东北农业大学) 王 显
- 副主任 王兴国 (江南大学) 王 国英
李新华 (沈阳农业大学) 王 永 保
石彦国 (哈尔滨商业大学) 王 永 保
(学大业来南半) 王 志 永
- 委 员 (按姓氏笔画排序) 王 国英 王 志 永
于国萍 于殿宇 马 莺 马 涛
肖志刚 张秀玲 张 敏 周凤英
周慧秋 郭顺堂 程建军 翟爱华

《食品挤压与膨化技术》编写人员名单

- 主 编** 石彦国 (哈尔滨商业大学)
- 副主编** 李次力 (哈尔滨商业大学)
李远志 (华南农业大学)
- 委 员** (按姓氏笔画排序)
- 王 娟 (华南理工大学)
- 王显伦 (河南工业大学)
- 石彦国 (哈尔滨商业大学)
- 孙冰玉 (哈尔滨商业大学)
- 李次力 (哈尔滨商业大学)
- 李远志 (华南农业大学)
- 陈凤莲 (哈尔滨商业大学)

前 言

挤压与膨化技术是一种集混合、搅拌、破碎、加热、蒸煮、杀菌、灭酶、膨化及成型于一体的技术，其在食品领域的应用已有 100 多年的历史。随着挤压与膨化技术研究的深入，挤压膨化理论日趋完善，挤压膨化工艺和装备不断改进，其在食品领域的应用越来越广泛，被称为 21 世纪食品加工领域的高新技术之一。

采用挤压膨化技术加工食品，具有原料适用性广、营养成分的保存率和消化率高、产品适口性好、产品易于储存、生产设备简单、占地面积小、耗能低、生产效率高等特点，其在粮食谷物食品加工中越来越显现出优势。近年来，采用挤压膨化技术生产的食品涵盖了主食类、早点类、儿童食品、休闲小食品、人造肉等。有关挤压膨化技术和设备的专利层出不穷，挤压产品遍及世界各地，挤压膨化食品在食品大家族中的地位也越来越重要。

20 世纪 70 年代末，我国开始膨化技术与膨化食品的研究。本书的主要作者所在单位——哈尔滨商业大学（原黑龙江商学院）就是在国内最早开展这方面研究工作的机构之一，并取得了一系列的成果，积累了一定的经验。为了推动我国食品挤压膨化技术的发展，承蒙业界同仁的鼓励与支持，作者在参阅大量国内外文献资料和相关书籍的基础上，组织编写了这本理论结合实际、系统性好、适用性强、有特色的教材以供相关学科专业的学生学习参考，并期望能给业内人士一点借鉴和帮助。

本书共 5 章。第一章介绍食品挤压与膨化技术的概念与特点及其发展概况；第二章阐述淀粉质原料挤压技术理论，并介绍淀粉质原料挤压设备和淀粉质原料挤压膨化食品加工工艺；第三章阐述植物蛋白质原料挤压技术原理，以及大豆蛋白和主要植物蛋白挤压工艺；第四章介绍非挤压膨化技术——气流膨化、微波膨化、油炸膨化及焙烤膨化；第五章介绍挤压膨化技术在发酵工业、制油工业、淀粉糖浆生产及油料饼粕脱毒中的应用。为方便读者学习和理解，作者收集整理了大量的图表和数据。在此也对原图表的作者表示诚挚的谢意。

本书由石彦国主编，李次力、李远志为副主编。其中，第一章第一节，第二章第三节，第五章第一、二节由哈尔滨商业大学李次力编写；第一章第二节，第二章第二节由哈尔滨商业大学石彦国编写，第二章第四节由哈尔滨商业大学陈凤莲编写；第二章第一节，第三章由哈尔滨商业大学孙冰玉编写；第四章第一、四节由华南理工大学王娟编写；第四章第二、三节由华南农业大学李远志编写；第五章第三、四节由河南工业大学王显伦编写。

由于编者水平及资料收集等诸多限制，本书难免存在不足和疏漏，恳请读者批评指正。

编者

2011 年 5 月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 食品挤压与膨化技术的概念与特点	1
第二节 食品挤压与膨化技术的发展概况	3
第二章 淀粉质原料挤压技术	14
第一节 淀粉质原料	14
第二节 淀粉质原料挤压技术理论基础	20
第三节 淀粉质原料挤压设备	37
第四节 淀粉质原料挤压膨化食品加工工艺	73
第三章 植物蛋白质原料挤压技术	100
第一节 植物蛋白质原料	100
第二节 植物蛋白质原料挤压技术原理	110
第三节 大豆蛋白挤压加工工艺	119
第四节 其他植物性蛋白质原料挤压工艺	128
第四章 非挤压膨化技术	134
第一节 气流膨化技术	134
第二节 微波膨化技术	144
第三节 油炸膨化技术	161
第四节 焙烤膨化技术	171
第五章 挤压膨化技术在食品工业中的应用	177
第一节 挤压膨化技术在发酵工业中的应用	177
第二节 膨化技术在淀粉糖浆生产中的应用	188
第三节 膨化技术在油脂浸出中的应用	189
第四节 膨化技术在油料饼粕脱毒中的应用	193
主要参考文献	197

第一章 绪 论

第一节 食品挤压与膨化技术的概念与特点

一、食品挤压与膨化技术的概念

膨化是利用相变和气体的热压效应原理,通过外部能量的供应,使加工对象——物料内部的液体迅速升温汽化,物料内部压力增加,并通过气体的膨胀力带动组分中高分子物质发生变性,从而使物料成为具有蜂窝状组织结构特征的多孔性物质的过程。

膨化的方式主要有两种,一种是气流式膨化,另一种是挤压式膨化,两种膨化方式对物料的作用不同,因而物料被膨化的状态也不同。气流式膨化是靠外部气流加热的方法使体系获得能量而达到高温高压状态,并使物料膨化的过程。挤压式膨化是借助挤压螺杆的推动力,将物料向前挤压,物料受到混合、搅拌和摩擦以及高剪切力作用而获得和积累能量达到高温高压,并使物料膨化的过程。

挤压膨化是食品挤压加工技术的一个分支,食品挤压加工技术包括挤压膨化技术、挤压蒸煮技术和挤压组织化技术三种。食品挤压加工技术的共同点就是物料被送入挤压机后,在螺杆、螺旋的推动下,物料向前呈轴向移动;同时,物料被强烈地挤压、搅拌、剪切,螺杆与物料、物料与机筒以及物料内部的相互摩擦,其结果使物料进一步细化、混匀;随着机腔内部压力的逐渐增大,相应地温度不断升高,在高温、高压、高剪切力的条件下,物料物性发生变化,由粉状或粒状变成糊状,淀粉发生糊化、裂解,蛋白质发生变性、重组,纤维发生部分降解、细化,微生物被杀死,酶及其他生物活性物质失活。三种技术不同的是:挤压膨化技术是当糊状物料在接近模孔时温度达到最高、压力达到最大,由模孔喷出的瞬间,在强大压力差的作用下,水分急骤汽化,物料被膨化,形成疏松、多孔结构。挤压蒸煮技术是糊状物料在接近模孔时,温度较低,压力也相应较小,由模孔挤出时,内外压差较小,模孔主要起塑形作用,物料挤出后成为具有一定形状的熟化或半熟化产品。挤压组织化技术主要是对蛋白质含量较高(50%以上)的植物原料,其在挤压机内,由于受到剪切力和摩擦力的双重作用,维持蛋白质三级、四级结构的氢键、范德华力、离子键和二硫键被破坏。随着蛋白质高级结构的破坏,形成了相对呈线性的蛋白质分子链,这些分子链在一定温度和水分含量条件下,受定向前进推动力的作用发生定向排列,产生分子间的重组,由模孔挤出后即形成了一种类似于肉类组织结构的产品——组织化蛋白。

二、食品挤压与膨化技术的特点

挤压膨化食品的加工过程与通常食品加工的蒸煮、熟化过程不同。在挤压过程中,

剪切应力是引起高分子聚合物在分子水平上发生物化反应的根本原因。利用挤压技术可以在一台挤压机内将若干个食品加工操作单元连续在一起,并减小营养损失。概括起来,挤压膨化加工技术具有以下几个特点。

1. 产品多样化

食品挤压膨化加工物料混合均匀,可在同一挤压机上依靠改变物料品种、配方和加工条件而得到多种多样的食品。挤压机的螺杆元件和模头结构具有多样性,可以根据具体食品加工的要求自由组合。生产挤压膨化食品时,利用同一台挤压机,只需改变原料配比及模具,就可生产出形状各异的加工产品。

2. 营养成分的保存率和消化率高

与食品加工的其他方法相比。挤压加工热处理速度快,因此在淀粉降解和蛋白质变性的高温快速挤出过程中,提高了食品的可消化性并且营养成分损失少。同时高温短时处理也能破坏原料中的抗营养因子,消除其他对人体不利的酶。所以挤压膨化技术不仅改变了原料的外形,也改变了内部的分子结构,有利于营养成分的保存和消化吸收。例如,维生素 B₁、维生素 B₆ 的含量明显高于蒸煮后的食品;大米蒸煮后蛋白质消化率为 75.3%,而膨化后可提高到 83.8%。

3. 改善食品原料的品质结构

谷物中含有较多的纤维素、半纤维素等,这些对人体极为有益,但口感较差。谷物经挤压膨化后,在挤压机中受到高温、高压和剪切、摩擦作用,以及在挤压机挤出模具口的瞬间膨化作用,使得这些成分微粒化,并且产生了部分分子的降解和结构变化,使其水溶性增强,改善了口感。经膨化处理后,由于产生了一系列的质构变化而使其体轻、酥松,具有独特的焦香味道。膨化后的制品其质地是多孔的海绵状结构,吸水力强,容易复水,因此不管是直接食用还是冲调食用均较为方便。

4. 不易老化,易于储存

通常主食加工的方法是采用蒸煮的方法,如刚做好的米饭软而可口,但放置一段时间后即变硬而不好吃,即所谓“回生或老化”。该现象的产生主要是糊化后的淀粉在保放置期间慢慢失水,淀粉分子之间重新形成氢键而相互结合在一起,由糊化后无序的分子排布状态重新变为有序分子排布状态,即 α -淀粉 β 化。利用挤压技术加工,由于加工过程中的高强度的挤压、剪切、摩擦、受热作用,淀粉颗粒在水分含量较低的情况下,充分溶胀、糊化和部分降解,再加上挤出模具后,物料由处于高温、高压状态突变到常压状态下,便发生瞬间的“闪蒸”,这就使糊化之后的 α -淀粉不易恢复其 β -生淀粉结构,而仍保持其 α -淀粉分子结构,故不易产生“老化”现象。

5. 原料适用性广

挤压膨化技术加工的原料品种多,不仅可以对谷物、薯类、豆类等粮食进行深加工,使粗粮细作,生产精美的小吃食品,而且还能加工果品蔬菜、香料及一些动物性蛋白质。还可以应用于酿酒、酒精和油脂浸出、淀粉糖浆生产等方面,用来处理加工食品的原料,提高产品出品率。

6. 生产设备简单,占地面积小,耗能低,生产效率高

用于挤压膨化食品加工的设备简单,结构设计独特,可以较简便和快速地组合或更

换零部件而成为一个多用途挤压膨化加工系统；加工单位质量产品的设备所需占地面积很小；可节省电、汽、水的消耗；由于挤压加工集供料、输送、加热、成型为一体，避免了串联多台单功能机种，极大地提高了能源的利用率，又是连续生产，生产效率是传统生产方法的 60%~80%。所以，与传统的蒸煮方法相比，采用现代挤压技术加工产品，生产成本低。

7. 原料利用率高，无污染

挤压加工是在密闭容器内进行的，在生产过程中，除了开机和停机时需投入少许原料作头料和尾料，使设备操作过渡到稳定生产状态和顺利停机外，一般无原料浪费现象（头料和尾料可进行综合利用），也不会向环境排放废气和废水而造成污染。

第二节 食品挤压与膨化技术的发展概况

挤压（extrude）一词来源于拉丁语“ex-”（离去）和“trudere”（推），即施加推动力使物料受到挤压并通过模具成型之后离去的过程。按照这个概念，食品挤压技术最早可追溯到 700 多年前中国饴饴面的生产。而现代食品工业意义上的挤压技术，可从 19 世纪肉肠食品的生产应用算起。20 世纪 30 年代，用于食品挤压膨化的第一台单螺杆挤压机组面世，标志着真正意义上的食品挤压膨化技术的工业化，并表现出了强大的生命力。20 世纪五六十年代，迅速发展起来的食品蒸煮挤压加工技术，其应用领域已由单纯的生产谷物食品发展到食品工业原料的预处理及植物组织蛋白生产等领域；到了 20 世纪 70 年代，许多发达国家纷纷开展挤压机理的探讨，研究了各种淀粉及蛋白类食物在挤压过程中发生的一系列变化以及挤压食品的营养与吸收等问题。

一、国外食品挤压与膨化技术的发展概况

挤压技术的发展可以追溯到 1797 年，Joseph 首次使用活塞驱动的挤压装置来生产铅管，这是挤压技术在工业上应用最早的例子。1856 年，美国人沃德申请了第一份关于食品挤压技术的专利，1869 年第一台用于生产香肠的双螺杆挤出机问世。1936 年第一台应用于谷物加工的单螺杆挤压蒸煮机问世，并在食品行业中取得成功，第一次生产出了膨化玉米圈。日本在第二次世界大战期间，就用挤压方法加工米、麦，再经过压制成型作为军粮，在加工过程中，通过添加某些营养元素，如矿物质、维生素等制成食用方便、营养价值高、深受人们喜欢的食品。但这时的挤压技术都是冷挤压技术。

到了 20 世纪 40 年代中期，应用于早餐谷物加工的单螺杆挤压蒸煮机诞生，这种挤压机的套筒部分还没有引进加热装置，但是由于挤压螺杆沟槽及机筒内表面的特殊设计，在挤压过程中的高度摩擦及强烈剪切效应可产生一定热量，对食品组分进行蒸煮，因此，这种挤压机可生产出高度膨化的风味小吃食品。20 世纪 40 年代末，在挤压机的套筒部分引进了加热装置，这种挤压机可对物料进行有效的连续蒸煮，大大改进了挤压物料的功能和性质，提高了其生物利用率和消化能力。随着挤压膨化技术的发展，挤压机的应用在食品领域中进一步扩大，种类繁多的大量方便食品、即食食品、小吃食品、

断乳食品、儿童营养米粉等挤压方便产品相继问世。美国用挤压式膨化机生产出小学生课间食品，深受欢迎。

20 世纪 50 年代初，迅速发展的挤压蒸煮由于省时省力，很大程度上取代了当时的饼干焙烤。在这段时间内，美国第一次将单螺杆挤压机应用于干的宠物膨化食品加工中。挤压机也由单一功能向多功能发展，螺杆长径比越来越大，由最初的 5:1 发展到 20:1，甚至还出现了长径比达 45:1~50:1 的大型挤压机。加热的方式由自热式发展到外热式，产量也由每小时几千克的小产量发展到每小时 6~7t 的大产量。

美国在 20 世纪 60 年代中期，挤压膨化技术进一步发展完善，应用高温短时挤压机对食物进行有效热处理、杀菌、钝化酶活力，挤压手段对营养成分破坏较少。同时，挤压快餐食品迅速发展起来。挤压加工技术应用领域由单纯生产谷物食品，发展到生产家畜饲料、鱼类饲料、植物组织蛋白等，同时，对所用挤压机的结构设计、工艺参数和挤压过程机理也进行了研究，提高了对挤压加工技术的理论认识。挤压设备由单螺杆发展到双螺杆，适合于加工不同原料的高剪切力挤压机和低剪切力挤压机也被分别应用于不同的生产领域。新的挤压设备，对于改善产品质量，拓宽挤压技术的应用领域起到了推动作用。

1970 年，Arkinson 发现挤压机可以使生物聚合物塑化，他认为生物聚合物在剪切力的作用下，能重新定向，彼此之间发生反应，从而形成新的组织结构（如组织化植物蛋白），开拓了挤压机在工程食品领域开发的新方向。

1980 年以来，挤压机作为一种生化反应器，受到了更多的重视，在食品工业中的应用领域也不断得到新的拓展。并且由于计算机技术的应用，挤压机的操作也由手工间歇式的操作发展到全自动计算机控制的连续作业。如今食品挤压技术已成为食品加工高新技术中最为活跃和重要的组成部分，食品挤压技术的研究也得到了迅速而全面的发展。

20 世纪 90 年代后，世界上已有美国 Wenger 公司、德国 WP 公司、意大利帕万-马布公司和法国 Cletral 公司为代表的食品挤压机生产厂家，生产各种系列的食物挤压机投放市场。

目前，美国、日本及西欧等国家对挤压技术的理论研究越来越完善，应用领域越来越广阔，各种各样的挤压食品遍布超市货架。美国生产的大型挤压机生产能力每小时已达几吨至十几吨，有关挤压技术和设备的专利已达百余项，挤压产品遍及世界各地，仅挤压膨化食品年产值达十几亿美元。由于食品工业日新月异的发展，挤压设备的不断改进，挤压理论的不完善，挤压食品在消费者中的地位也越来越重要。日本长期以来对挤压技术及理论，尤其是谷物膨化淀粉的性质方面做了大量的研究。

近年来，采用挤压膨化技术生产的食品主要有主食类、早点类、儿童食品、各种小食品等方便食品；膨化大米可做主食面包、点心面包、蒸制品、炸制品等；美国、日本等国将脱脂大豆挤压膨化后配以调料，制成人造肉（肉松、肉干、火腿）；美国和西欧一些国家在挤压谷物粉中添加适量膨化大豆粉和调料，制成冲剂、油茶、面茶、杏仁茶等，可以即时饮用，既方便又富营养；作为主食类的食品还有用挤压谷物做的快餐粥、油煎面包、夹心点心及预煮食品；采用挤压技术加工脱水水果产品，可做果酱，也可做

水果夹心蛋糕、馅饼及面包的添加料；马铃薯经挤压膨化后，经油炸可制成香脆可口的美味食品；美国学者将花生蛋白粉进行挤压膨化，使蛋白质组织化、塑性化，作为食品添加料。日本也发表了许多制造挤压膨化产品的专利，以马铃薯、小麦粉、燕麦等为主要原料制作多种主食快餐食品。还发表了挤压奶酪制品、挤压淀粉的制法以及用豆腐渣制作挤压食品等专利。瑞典、美国等国家用廉价的麦麸作原料，经挤压膨化处理，生产高纤维松脆食品（如黑麦干面包），有利于人体消化吸收。谷物中添加适量花粉、胡萝卜素及干海藻粉、核黄素等经挤压膨化后，膨化食品含有大量营养素及维生素，可作为强化食品。

日本还将挤压技术应用于发酵工业中，用挤压原料制曲酒、酱油及豆酱等。例如，日本龟甲万酿造株式会社将原料大豆进行膨化处理后酿造酱油，蛋白质利用率可达90%，提高了酱油的产量和质量，改善了酱油的风味。

进入21世纪，国外食品膨化技术及其理论的研究进一步深入。英国食品制造业不少食品研究中心正在研究食品在挤压机中发生变化的复杂过程。食品公司希望从膨化技术中发掘出新产品的制作方法；最近，法国蒙特皮利欧语言科学和技术大学的食物生化和工艺实验室也对蛋白质在长筒型连续式挤压机中发生的变性和蛋白质结构以及快速酶的淀粉水解等项目进行了研究。美国的Frito-Lay公司、日本的Calbee公司以及欧洲和东南亚很多著名的膨化食品生产企业近年来也纷纷在中国投资建厂，生产各种膨化食品。

二、我国食品挤压与膨化技术的发展概况

（一）我国膨化食品与挤压膨化技术的发展

食品膨化技术在我国有着悠久的历史，很早就得到了应用，民间的爆米花及各种油炸食品都属于膨化食品。早在青铜炊具诞生之后，周代“八珍”中的“炮豚”就出现了炸法，也就是把油炸作为食品膨化的重要方法之一，到了唐宋时期，炸制技术已经十分精湛。另外一种沙炒膨化技术在我国也历史悠久，利用沙炒玉米、麦粒、稻米等，这些原料在沙炒时可膨化，体积可增大。

我国应用现代挤压膨化技术生产膨化食品的时间并不长，20世纪70年代末，才开始膨化技术与膨化食品的研究。一些高等院校和科研单位相继研制出各种各样膨化挤压机。黑龙江商学院（现哈尔滨商业大学）1979年首先研制出系列膨化食品及将挤压膨化技术应用于发酵食品工业中。1988年，黑龙江商学院吴孟等发表了《谷物膨化技术的研究与应用》的论文。1987年，北京农业工程大学（现中国农业大学）沈再春等研制了6SLG54-18型双螺杆食品挤压机，并在该机上进行了挤压食品膨化机和膨化物料性能方面的研究。1992年，江苏工学院（现江苏大学）孙一源等以法国BC-45型双螺杆食品挤压机为原型，利用相似理论研制了符合实验要求的小型食品挤压机。无锡轻工业学院（现江南大学）丁霄霖等（1995）利用本校引进的法国BC-45型双螺杆食品挤压机，采用玉米等食品原料，在挤压加工过程中研究了各种因素对淀粉、蛋白质等质构变化的影响，并对食品风味变化的影响做了深入研究。1992年，黑龙江商学院（现哈

尔滨商业大学)石一兵等研制 PS-40 型夹馅膨化食品机。1996 年,北京化工大学朱复华、林炳鉴和陈存社等自行设计制造了可视双螺杆挤压机,将我国食品挤压技术的研究手段提高了一大步。

(二) 我国膨化食品工业的成就

作为我国食品工业中的一个重要组成部分——膨化休闲食品及其产业,经历了 20 年的快速发展,取得了长足的进步。其成就主要有以下几个方面。

1. 产品不断丰富

1990 年以前,我国的膨化食品品种很少,在 20 世纪 80 年代初期,膨化休闲食品开始出现,丰富了中国传统的以瓜子、花生、饼干及糖果为代表的休闲类食品,同时带动了一批新兴企业的建立和成长。20 世纪 90 年代初,主要以油炸型膨化食品为主,但此类产品口感粗糙,含油量高,从而被 20 世纪 90 年代中期兴起的全膨化非油炸食品所取代。到 20 世纪 90 年代中后期,由于挤压型膨化食品生产工艺简单,花品种多,投资少,可利用原材料广而开始成为主打膨化工艺,但挤压型膨化食品的口味比较单调。进入 21 世纪以来,随着消费市场的进一步扩大,交流的增多和市场竞争的加剧,各膨化食品生产企业在焙烤型和花色型上下工夫,开发出各种形状、口味和香味的产品,丰富着食品市场和人们的生活。

2. 市场销量不断扩大

随着人民生活水平的不断提高,膨化食品以其口感鲜美松脆、易于消化吸收、携带和食用方便、原材料适用广泛、口味和产品品种较多变化等特点,日益成为消费大众喜爱的食品,已成为食品行业中的重要组成部分,且市场潜力巨大。进入 21 世纪以后,国内膨化食品市场呈稳定上升趋势:消费量基本以 7%~9% 的年均增长率上升。预计未来几年我国的膨化食品销售额每年增幅为 15% 左右。

3. 产业规模不断扩大,出现了一批龙头企业和知名品牌

首先是市场需求不断增加带动企业的生产规模不断扩大,膨化休闲食品行业每年以 15% 的速度增长,企业品牌影响力日益增强。扩大到全部膨化食品生产企业,加上原辅料、机械、包装、调味料等相关企业,也已形成一个庞大的产业链。

4. 生产技术和产品质量水平不断提高

目前我国上规模上档次的膨化食品加工企业都拥有先进的生产技术装备和成熟的加工工艺,不仅在生产上有严格的质量标准,在原料采购和选用上,也有严于国标和行标的企业标准。有的企业从田间地头抓起,从种子的供应到种植指导再到系列产成品的收购、储藏、运输等环节上都建立起一整套质量控制标准,从而确保产品质量。一批新技术,如各种变性淀粉选用、双螺杆挤压膨化技术、天然调味基料的应用等,也对促进我国膨化食品的发展起到了重要的推动作用。

调查数据显示,在各种休闲食品中,膨化食品最受欢迎,它是城市家庭消费综合指数最高的休闲食品,一半以上的家庭曾经购买过膨化食品,其次是饼干类食品。对应分析显示,目前时尚食品尤其是休闲食品,不再是孩子们的专利,成人尤其是年轻女性已成为主流消费人群。

三、食品挤压与膨化技术的发展趋势

挤压膨化技术作为一种多步骤、多功能以及热与机械结合的加工方法,在食品加工方面获得了广泛的应用,是一种规模化生产休闲食品、谷物早餐及婴幼儿食品的理想方法。由于挤压膨化技术非常适合于产品的工业化生产,对于该技术的研究也日益多样和深入。综述近年国内外食品挤压膨化技术的发展趋势有以下几个方面。

(一) 原材料的多样化

除了单独利用谷物粉作为挤压原料外,谷物与果蔬(如豆类、番茄等)及果蔬加工副产品(如葡萄渣等)的混合物进行挤压膨化生产休闲食品的研究也较为热门。

Gonzalez 等(2007)通过挤压香蕉淀粉来获得既具有功能又能消化的挤压产品。实验结果显示:未糊化的样品中有 37.4% 的直链淀粉且抗性淀粉含量很高,而当香蕉淀粉糊化后直链淀粉含量降低。挤压产品比糊化的天然淀粉含有更高的抗性淀粉,这表明挤压过程增加了天然淀粉的(抗性淀粉)RS 含量,因为淀粉的解聚作用以及冷却过程中这些直链形成一种不能被 α -淀粉酶水解的形式。

Rocha-Guzman 等(2008)研究了 3 种墨西哥普通豆类挤压食品的物理性质。研究表明,采用普通豆类生产新型的、具有良好物理性质的挤压食品是可能的。

Bhattacharyya 等(2006)利用双螺杆挤压设备加工大米、玉米与芋头混合物休闲食品,研究了产品的理化性质。结果表明改变挤压机腔体温度时,产品的膨化率、密度也有改变。

Balasubramanian 和 Singh(2007)利用国产的单螺杆挤压机研究了挤压工艺变化对玉米、豆类混合挤压物的影响。目的是将去壳豆类与玉米混合挤压成为休闲谷物食品或麦片粥。使用的豆类包括鹰嘴豆、绿豆、黑豆。几种豆类的加入导致产品的膨化度降低、堆积密度和硬度增加。随着豆类用量的增加,亨特色度中的 L 值增加, b 值降低, a 值几乎不受影响。挤出产品(粥)的稠度系数使用布氏黏度计(model DV-II)测定。加入豆类后稠度系数增加,剪切速率为 $0.66 \sim 132 \text{ s}^{-1}$ 。在所研究的豆类中,黑豆的加入使得挤压产品的特性变化最大。

Camire 等(2007)将去芯的白玉米粉、蔗糖、柠檬酸及果粉(蓝莓、小红莓、葡萄和树莓)以一定的比例混合,然后利用实验型双螺杆挤压机加工。结果表明,对照样品颜色没有果粉谷物红且果粉谷物的可溶性酚和花青素含量较高。储藏 3 周和 6 周后,采用气相色谱分析测得果粉谷物的己醛含量降低。虽然挤压后的产品保留了一些果粉的花青素,保持了一定的抗氧化能力,但是本研究中使用的果粉(含花青素)含量可能太低。如果加大果粉的用量,会增加成本,但这个花费可能会因谷物产品更美观且具有功能而弥补。

为控制学龄前儿童的缺铁性贫血症而生产由鹰嘴豆、玉米、牛肺组成的挤压型营养强化食品,这种食物富含蛋白质、维生素及铁元素,被用于贫困地区控制学龄前儿童的缺铁性贫血症。这种食品在巴西一些贫血症高发的地区试用。研究结果表明这种营养强

化食品的效果良好,且无不良反应。

Altan 等 (2008a) 对大麦-番茄渣混合物挤压休闲食品进行了感官评价,考察了产品的颜色、质构、口感、香味、被接受性,用回归方程描述变量与产品指标之间的关系。研究表明,产品指标受到温度、番茄渣含量变化的影响最大,受螺杆转速的影响较小。番茄渣与大麦粉混合能够通过挤压膨化制造出令人接受的、富有营养的休闲食品。此外,Ruiz-Ruiz 等 (2008) 研究了 HTC 豆 (hard-to-cook bean) 与高蛋白玉米混合面粉的挤压。

Altan 等 (2008b) 利用同速旋转的双螺杆挤压机生产大麦粉与番茄、葡萄果渣混合粉挤压食品。大麦-果渣挤压产品的吸水指数受到果渣用量的影响。总体而言,挤压工艺显著增加了产品中淀粉的体外消化率。但是,番茄和葡萄果渣用量的增加均会降低淀粉消化率。

Stojceska 等 (2009) 用同速转动的双螺杆挤压机生产挤压膨化食品,研究不同的物料湿含量 (12%~17%) 对产品特定营养及物理性质的影响。以小麦淀粉和玉米淀粉为基础,加入 10% 的啤酒渣和红色甘蓝渣以降低淀粉含量,形成 4 种配方,分别是:小麦面粉+啤酒渣、玉米淀粉+啤酒渣、小麦面粉+红色甘蓝渣、玉米淀粉+红色甘蓝渣。此外,Paul 等 (2008) 研究了啤酒糟添加量与螺杆转速对挤压休闲食品特定的物理及营养特性的影响。

以乳制品为原料之一,进行挤压实验的报道有一些,但为数不多。Taylor 等 (2006) 用乳清浓缩液与玉米淀粉混合使得原料蛋白质含量为 32%,并通过挤压获得膨化食品。研究发现挤压过程中打开蛋白质折叠的能力增加了,这可能促进了蛋白质-淀粉的相互作用,使得膨化率降低,此外二硫键含量确实影响了乳清蛋白质挤压膨化食品的理化性质。

挤压乳清蛋白浓缩 (WPC) 物和挤压乳清蛋白分离 (WPI) 物是新型的食品原料,可赋予食品更多的营养。

宁更哲等 (2010) 以单因子燕麦全粉挤压膨化试验样品为分析材料,采用基本统计分析、相关性分析和因子分析法,研究了燕麦全粉挤压膨化食品质量性状变异程度及相关关系,并为主要质量性状赋予权重。最终得出燕麦全粉挤压膨化产品主要质量性状构成及权重分别是:膨化率 (21%)、脆度 (27%) 和硬度 (26%)。

任嘉嘉等 (2008) 探讨高温处理燕麦籽粒对制粉及其营养成分和黏度特性的影响,并进一步研究纯燕麦粉挤压膨化操作参数对产品特性的影响。研究认为,高温烘烤处理对燕麦制粉、面粉营养特性以及黏度参数有显著影响;通过工艺设计及优化,纯燕麦粉可以通过挤压膨化,获得较为满意的膨化谷物食品。

(二) 挤压工艺技术控制数模化

数学模型的建立对于挤压膨化工艺的研究、控制、参数优化、产品预测等方面具有重要作用,目前主要有神经网络建模的探索,其中对与物料在挤压机腔内的停留时间分布 (residence time distribution, RTD) 研究较多。

RTD 的控制对于确定挤压过程的最优参数是非常重要的。Ganjyal 和 Hanna

(2002) 综述了食品挤压物料停留时间分布研究情况, 并叙述了神经网络方法在 RTD 建模中的应用。认为区段物料停留时间分布以及平均物料停留时间分布随着工艺变化而变化, 即随着进料量、螺杆转速、物料水分含量、腔体温度、螺杆直径等因素而变化。并且认为对于预测物料在挤压膨化设备中的停留时间分布而言, 神经网络模型比回归模型更好。Kumar (2006) 等假想双螺杆挤压内部为一系列理想状态的稳流反应而对物料停留时间分布建模。综述了已经被提出的 RTD 模型, 并与实验数据进行了比较。已知的最合适的模型是一种活塞流, 与有限数量的稳定搅拌的容器反应体 (a finite number of constantly stirred tank reactor) 相联系, 考虑了死体积比例 (dead volume fraction)。最适合模型的参数由输入变量预测, 包括水分含量、螺杆转速、管口直径以及套筒温度, 在研究范围内, 水分含量、套筒温度和管口直径对 RTD 的影响显著。

挤压过程被描述为一个复杂的输入输出体系。Ganjyal 等 (2003) 以各种交联玉米淀粉为原料进行挤压试验, 设置物料初始水分含量和螺杆转速参数, 用神经网络方法给挤压玉米交联淀粉建模。采用多输入、单输出神经网络模型来预测独立的产品特性; 采用多输入、多输出模型来预测从选定输入工艺参数开始在一定时间段时特定的产品特性。模型解释了工艺过程以及特定的过程参数对产品性质的影响。

Ficarella 等 (2006) 研究中采用方差分析考察谷物在同速转动的双螺杆挤压中的挤压蒸煮过程, 采用有限元流体动态仿真模型, 通过变化温度、螺杆转速、流动速度和挤压几何形状, 来研究螺杆机中剪切速率、停留时间和内部混合指数。研究采用显著性分析, 结果表明工艺的四个部分: ①剪切速率、螺杆转速、螺杆轴比例的相互影响很强; ②显著性分析表明, 温度和流动速率的变化对剪切速率的影响不是很大; ③流动速度和螺杆轴比例对停留时间的影响比螺杆转速和温度的影响更有意义。数学模拟显示了许多可以用来改进挤压工艺的方面: 流体温度主要受到螺杆转速和轴比例的影响, 在不改原料凝胶性质的范围内变化。

Fodil-Pacha 等 (2007) 利用一种模糊控制系统来改善食品挤压工艺启动阶段, 这个挤压过程通常主要基于螺杆转速与扭矩成反比的原理。控制结构包括 3 个操控系统, 与一个并联配置相连, 并联配置用多输入、单输出 (multiple-input, single-output, MISO)、Takagi-Sugeno-Kang (TSK) 模糊控制器, 它们能在良好同步方式下监控螺杆转速、进料量及输入水分量, 如能达到没有螺杆障碍、启动迅速的效果。玉米淀粉挤压实验中运用了这一模糊控制系统。

Wang 等 (2008) 设计及应用了 Laguerre 函数的连续时间模型预测控制食品挤压机。通过控制螺杆转速与液体泵速度来控制实验型挤压膨化机的发动机扭矩与比机械能。连续时间的转移函数模型使用了基于可变滤波器的方法。预测控制系统通过运用螺杆机现有的实时管理控制与数据获得系统 (SCADA)。实验数据结果显示了与设计的预测控制系统的良好吻合。

综上所述, 国内外挤压膨化技术理论研究主要有以下几个方面。

(1) 不同来源的挤压膨化原料在理化性质、组分含量、营养价值等方面均存在一定差异, 将不同来源的原料进行合理地复配后挤压, 不仅可以改善挤压产品的感官质量和组织结构, 也可以提高产品中各营养成分的平衡和生物效价。

(2) 机筒内和挤出模口时物料特性的研究。包括物料的流变学特性(黏度)和物理化学特性(密度、热容、热导率等)。

①黏度模型的建立,在挤压食品的加工过程中,黏度是影响物料流速、功率消耗、物料温度变化,乃至产品加工质量的重要参数。随着流变学的不断发展,食品流变学的进一步完善,关于挤压膨化加工中物料黏度模型的研究也越来越深入。挤压机腔内的物料实际上是一种非牛顿流体,但为了研究方便,在挤压过程的理论研究中,常将其视为牛顿流体。在描述挤压机腔内物料的表观黏度与温度、剪切强度、物料水分含量等挤压系统参数之间的关系时,魏益民等(2008)做了大量的研究工作,提出了许多黏度模型。

②物料在机筒内停留时间的研究,挤压膨化物料在挤压机腔体内所发生的复杂物理化学变化与物料在挤压机腔体内的停留时间有着密切的关系,因此,了解挤压系统参数与物料在挤压机腔体内的停留时间之间的关系,对于较好地控制挤压膨化产品的质量是十分必要的。

③流量和能量模型的建立,在挤压机流量的研究中,一般将挤压机腔体内的物料假定为牛顿流体,将挤压机腔体内物料的流动用 Navier-Stokes 方程来描述。此方程中的黏度并非常数,而是物料温度、剪切速率、物料含水量等挤压系统参数的函数。为解决这个问题必须建立能量模型,用以确定物料的温度。在描述挤压机腔体内物料流动的动量方程和温度分布的能量方程时,一般采用量级分析的方法,略去了一些小分量,从而简化方程。由于动量方程中的黏度随着温度变化,而能量方程中又包含速度分量,因此,两方程必须同时求解,属于耦合流动。在采用数值法求解时,压差是求解的主要障碍。

④其他方面,江顺亮(1997)在单螺杆挤压理论研究过程中认为挤压机操作中的不稳定性是一种混沌(chaos)现象。尽管人们对挤压过程理论的研究正在不断地深入,但挤压原料特性的复杂性,从而影响到挤压过程的复杂性,对于食品原料更是如此。所以,很难用统一的、准确的数学模型来进行描述。因此,对于挤压过程理论的研究还有待进一步深入探讨。

(3) 物料组分在挤压过程中的变化。食品物料在挤压机腔内主要经历了固体输送、过渡态到熔融态,最后由模头排出。在挤压膨化加工的整个过程中,物料主要组分(如淀粉、蛋白质及脂肪等)发生了复杂的物理、化学变化,这些组分的变化情况与挤压膨化加工条件如挤压温度、喂料速度、原料水分含量、螺杆转速、模口大小等有密切关系。

(三) 设备螺杆多样化

我国挤压膨化设备在技术含量上与发达国家相比,存在很大差距。学习、消化和吸收国外先进的膨化设备,进一步提高国产膨化设备的研制水平,是缩短差距的捷径。首先,利用计算机进行优化设计,积极探索计算机在膨化机及其生产线的设计、模拟,自动化控制方面的应用,提高膨化机的技术性能和自动化水平;简化膨化机在开机、停机时的程序,节约时间,减少物料和能量的损失;实现加工温度、喂料速度、压力和扭矩的全程监测,提高设备生产效率和稳定性。其次,加强螺杆与机筒耐磨性的研究。研究螺杆与机筒的磨损机理;选择既耐磨又符合食品卫生要求的材料;进行磨损实验,寻求降低磨损的方法。最后,研制多功能、多用途膨化机,扩大其在非食品工业中的应用领域。