

螺杆挤压机及其在食品工业中的应用^①

杨薇

(昆明理工大学现代农业工程学院, 云南昆明 650224)

摘要 简述了螺杆挤压机的历史、工作原理; 分析比较了单螺杆和双螺杆挤压机的结构特点. 综述了螺杆挤压机在食品工业中的主要应用方面, 生产淀粉膨化食品、蛋白质挤压食品、膨化饲料, 还可作为特殊的化学和生化反应器. 提出今后对挤压机的重点研究方向为设备结构参数的优化设计, 螺杆与机筒磨损的分析研究, 通过对挤压膨化过程进行模拟、优化来提高挤压膨化机的自动化控制水平.

关键词: 螺杆挤压机; 工作原理; 结构特点

中图分类号: TS233 文献标识码: A 文章编号: 1007-855X(2001)03-078-06

0 前言

挤压机是挤压加工技术的关键. 挤压加工技术作为一种经济实用的新型加工方法广泛应用于食品生产中, 并得到迅速发展. 挤压加工主要由一台挤压机一步完成原料的混炼、熟化、破碎、杀菌、预干燥、成型等工艺, 制成膨化、组织化产品或制成不膨化的产品. 只要简单地更换挤压模具, 便可以很方便地改变产品的造型.

世界上第一台螺杆挤压机的专利是由英国 Gray 于 1879 年获得的, 主要用于橡塑工业. 到本世纪 30 年代, 第一台用于谷物加工的单螺杆挤压机问世, 它开始用于生产膨化玉米. 二战期间, 日本人用于生产压缩军粮. 60 年代, 又开始出现了双螺杆挤压机, 并用于食品加工领域. 我国从 70 年代开始研究食品挤压技术和挤压加工机械. 1980 年 3 月, 北京食品研究所仿制出第一台自热式 PJ-1 型谷物膨化挤压机. 1982 年无锡轻工业大学从法国 Cletral 公司引进一台 BC-45 型双螺杆挤压机, 开始了对挤压加工技术的研究. 与此同时, 国内许多生产厂家也先后从世界各大公司引进了先进的挤压设备. 国际上有代表性的挤压机生产企业除法国 Cletral 公司外, 还有美国 Wenger 公司, 德国的 WP 公司, 意大利 MAP 公司, 日本的恩奴比食品有限公司, 瑞士的 Buchler 公司等. 在引进国外设备的同时, 国内的许多厂家也先后生产了不同类型的挤压设备, 其中以单螺杆设备居多.

螺杆挤压机用于食品生产具有工艺简单、一机多能、生产连续化、效率高、能耗低、投资少、收效快的特点. 生产出来的食品口感细腻、易消化吸收、营养成分损失少、贮藏时间长、不易产生“回生”现象、食用方便. 目前, 挤压技术已经发展成为最常用的膨化食品生产技术之一. 挤压机的研究与开发也势在必行.

1 螺杆挤压机的挤压膨化原理和结构特点

1.1 挤压膨化原理

含有一定水分的物料, 在挤压机套筒内受到螺杆的推动作用和卸料模具或套筒内节流装置(如反向螺杆)的反向阻滞作用. 另外还受到来自于外部的加热或物料与螺杆和套筒的内部摩擦热的加热作用. 此综合作用的结果使物料处于高达 3~8 MPa 的高压和 200℃左右的高温状态之下. 如此高的压力超过了挤压温度下的饱和蒸汽压, 所以在挤出机套筒内物料中的水分不会沸腾蒸发, 在如此的高温下物料呈现出熔融状态. 一旦物料从模头挤出, 压力骤降为常压, 物料中水分瞬间闪蒸而散发, 温度降至 80℃左右, 导致物料成为具有一定形状的多孔结构的膨胀食品^[1].

① 收稿日期: 2000-11-16;

第一作者简介: 杨薇(1963~), 女, 硕士, 主要研究农副产品加工及机械.

1.2 结构特点

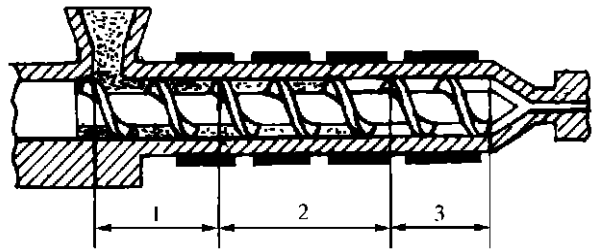
食品挤压机类型很多, 目前用于食品工业中的挤压机主要是螺杆挤压机. 螺杆挤压机主要由套筒和在套筒中旋转的带螺旋的螺杆所构成.

螺杆挤压机按螺杆的根数分类可分为单螺杆、双螺杆和多螺杆挤压机. 其中, 多螺杆挤压机由于制造加工困难, 对传动系统要求高, 因而在食品加工行业中极少使用.

1.2.1 单螺杆挤压机

单螺杆挤压机在机筒内只有一根螺杆, 它是靠螺杆和机筒对物料的摩擦来输送物料和形成一定压力的. 一般情况, 物料与机筒之间的摩擦系数大于物料与螺杆之间的摩擦系数. 否则, 物料将包裹在螺杆上一起转动而起不到向前推进的作用. 单螺杆挤压机的结构如图 1 所示^[2].

螺杆分为三段: 喂料(加料)输送段、压缩熔融段、计量均化段. 在加料输送段, 物料从料斗进入机筒内, 随着螺杆的转动, 沿着螺槽方向向前输送. 进入压缩熔融段后, 由于螺旋结构上的变化, 物料逐渐被压实, 压力升高, 又由于受到来自机筒的外部加热以及物料在螺杆和机筒的强烈搅拌、混合、剪切下, 物料温度升高, 开始熔融, 直至全部熔融. 由于螺槽空间进一步变小, 物料进一步升温升压, 得到蒸煮, 对于食品原料, 出现淀粉糊化, 脂肪、蛋白质变性等一系列复杂的生化反应, 组织进一步均化, 最后定量、定压地由机头通道均匀挤出, 称为计量均化段.



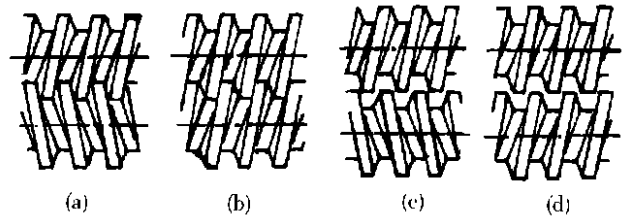
1—加料输送段; 2—压缩熔融段; 3—计量均化段;

图 1 单螺杆挤压机结构示意图

1.2.2 双螺杆挤压机

双螺杆挤压机是在单螺杆挤压机的基础上发展起来的. 在双螺杆挤压机的机筒中, 并排放两根螺杆. 按照两根螺杆的啮合程度可以分为相互啮合型和非啮合型. 按照两根螺杆转轴的旋转方向可以分为反向旋转型和同向旋转型. 见图 2 所示^[1].

(1) 啮合型双螺杆: 如图 2(a), 2(b) 所示. 在螺杆的啮合处, 螺杆之一的螺纹部分或全部插入另一螺杆的螺槽中, 使连续的螺槽被分成相互间隔的“C”形小室. 螺杆旋转时, 随着啮合部位的轴向向前移动, “C”形小室也作轴向向前移动. 螺杆每转一周, “C”形小室就向前移动一个导程. “C”形小室中的物料, 由于受啮合螺纹的推力, 使物料抱住螺杆旋转的趋势受到阻碍, 从而被螺纹推向前进. 由于啮合形的螺杆的啮合处间隙很小, 对物料具有强制输送的能力, 不易产生倒流、漏流现象. 它能在较短的时间内建立起高压, 推送物料经过螺杆的各个部位. 这种配合方式, 料流稳定, 输送效果较好.



(a) 反向旋转的相互啮合型; (b) 同向旋转的相互啮合型;

(c) 反向旋转的非啮合型; (d) 同向旋转的非啮合型

图 2 双螺杆的常见配合方式

(2) 非啮合型双螺杆: 如图 2(c), 2(d) 所示. 因为非啮合型的双螺杆不完全啮合, 其间的间隙较大, 不同的“C”形小室中的物料各自混合效果好, 但螺杆的输送能力较啮合型的差, 易产生漏流、倒流和料流不稳定现象, 难于达到强制输送效果.

(3) 反向旋转型双螺杆: 如图 2(a), 2(c) 所示. 在反向旋转型双螺杆中, 物料进入挤压螺杆后, 首先在两螺杆之间产生压力, 此压力易造成两螺杆分离和偏心, 因而套筒和螺杆之间易产生摩擦, 造成设备磨损. 因此, 反向旋转的双螺杆挤压机转速不宜太高, 一般控制在 50r/min 以下. 反向旋转的螺杆啮合处, 螺纹和螺槽之间存在速度差, 能够产生一定的剪切速度, 旋转过程中会相互剥离粘在螺杆上的物料, 使螺杆得到自洁.

(4) 同向旋转的双螺杆: 如图 2(b), 2(d) 所示. 对于同向旋转的螺杆, 啮合处螺纹和螺槽间的旋转方向

相反,因此被螺纹带入啮合间隙的物料也会受到螺杆和螺槽间的挤压、剪切、研磨作用,同时由于相对速度比反向旋转的大,啮合处物料所受的剪切力也大,更加提高了物料的混合、混炼效果.由于同向旋转的螺杆在啮合处的旋转方向相反,两根螺杆对物料所起的作用也不大相同.一根螺杆要把物料拉入啮合间隙,而另一根螺杆则要把物料从间隙中推出,结果使物料由一根螺杆转移到另一根螺杆,物料呈图 3 所示方向前进,即物料从 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$. 运动方向改变了一次,轴向移动前进了一个导程.料流方向的改变,更有助于物料相互间的均匀混合.

同向旋转的双螺杆在啮合处,螺纹和螺槽的旋转方向相反,相对速度很大,产生的剪切力也大,更有助于粘附物料的剥离,自洁效果更好.同向旋转的双螺杆挤压机,由于不会产生使螺杆相互分离的压力,对磨损的敏感性较小,它可在较高转速 300r/min 的情况下工作.

在食品加工中,最常用的是同向、完全啮合的平行双螺杆挤压机.双螺杆挤压机虽然和单螺杆挤压机十分相似,但在工作原理上,它们之间存在较大的差异.与单螺杆相比,双螺杆具有以下特点^[1]:

(1) 强制输送.由于双螺杆具有强制输送的特点,不论其螺槽是否填满,输送强度基本保持不变,不易产生局部积料,焦料和堵机等现象.

(2) 混合作用.确切地讲,物料在挤压机中发生的混合作用称之为“混炼”,其主要作用是物料之间水分的转移,不同物料之间的细微混合,以及不同物料之间不同成分的重新组织化等作用.

(3) 自洁作用.粘附在螺杆螺纹和螺槽上的积料,如果滞留时间太长,将引起物料受热时间过长,产生焦料,严重时会使旋转阻力增大,能量消耗增大,甚至会产生堵机、停机等现象,不利于质地均一产品的稳定正常生产.对于热敏性物料这个问题尤为突出.若能及时清除粘附的积料,将有助于生产的正常进行与产品质量的提高.无论是反向旋转的螺杆还是同向旋转的螺杆均有自洁作用,其中同向旋转的螺杆自洁效果更好.

(4) 压延作用.物料进入双螺杆挤压机后,被很快拉入啮合间隙.由于螺纹和螺槽之间存在速度差,所以物料立即受到研磨、挤压的作用,此作用与压延机上的压延作用相似,故称“压延作用”.

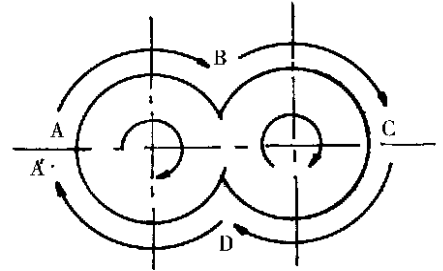


图 3 同向旋转的双螺杆挤压机中料流的方向

2 螺杆挤压机在食品工业中的应用

螺杆挤压机在食品工业上主要被用于淀粉膨化食品、蛋白挤压食品、膨化饲料的生产,还可用作特殊的化学或生化反应器.

2.1 淀粉膨化食品

在挤压机的高温高压下,谷物中的淀粉会产生凝胶化(α 化).实验证明,玉米粉膨化后,淀粉 α 化程度在 98% 以上,粗脂肪下降 60%,甚至全部消失.水溶性增加 40% 以上.故,挤压机可代替滚筒干燥机生产糊化淀粉^[3].无锡轻工业大学顾正彪等人利用挤压机对淀粉进行了深加工研究,以淀粉为原料,制备出淀粉磷酸酯和焦糖色素^[4].国外学者 Carr 和 Cunningham 成功地用双螺杆挤压机,由淀粉生产乙二醇糖苷. Meuser 等人在双螺杆挤压机上将淀粉衍生物生成阴离子和阳离子淀粉^[5].

2.2 蛋白挤压食品

在高温高压下,植物蛋白产生组织化.植物蛋白在挤压机螺槽与筒壁之间剪切力的作用下,蛋白质被强烈展开,相对地呈现直线排列.展开后的分子链变得自由而能够进行重新定向和再组合,从而形成纤维状态.其纤维组织结构类似瘦肉,复水后有一定的弹性,有咀嚼感^[3].另外,可将鱼糜和干燥鱼粉等鱼肉蛋白质再次组织化,生产模拟对虾、甲鱼、鸡肉风味的食品.利用双螺杆挤压机磨碎剁肉,生产各类工程肉制品.如,牛肉干,猪肉干等^[6].

2.3 膨化饲料

在饲料加工工艺中,挤压机主要用于处理全脂大豆粉、玉米淀粉、各种饼粕、稻壳、米糠、鸡蛋壳、鱼粉、血粉等。生产的饲料有鱼类喜欢的漂浮性饲料,高蛋白的虾饲料,仔猪饲料,鸡饲料,玩赏动物饲料,特种水产饲料等^[6]。(1)通过挤压膨化全脂大豆,使其中的脲酶等抗营养因子失活,提高了大豆饲料的适口性和消化吸收性,可将其作为仔猪饲料中蛋白质和能量的来源。(2)饲用淀粉原料以玉米为主。我国玉米含淀粉量(71~72)%,其中直链淀粉占27%,支链淀粉占73%。饲料中淀粉含量的高低主要影响饲料的膨化度。其中直链淀粉或变性淀粉含量高,就容易膨化。如果饲料配方中淀粉含量低或根本就不含淀粉,则很难达到一定的膨化度^[7]。(3)各种油料饼粕富含蛋白质,通过高温高压处理,使其中的蛋白质变性,破坏了抗营养因子,提高了能量物质的消化率和利用率。且这些饼粕又都含有一定量的有毒成分,用挤压膨化法可有效地脱毒。(4)对稻壳、米糠进行挤压膨化处理后,保存期可延长10倍,解脂酶和氧化酶失活,微生物、害虫被杀死,脂肪不易水解、氧化,相对较稳定^[7]。(5)农作物秸秆作为一种非常规性饲料资源,其质地粗硬,适口性差,消化率低,营养价值不高,但经蒸煮膨化加工后,可提高营养价值和消化率。有报道证明,在 $5 \times 10^5 \sim 9 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的压力下蒸煮,植物细胞壁被破坏。经高压水蒸汽处理后突然降压,破坏了纤维的结构,对桔杆有较好效果^[8]。

我国桔杆资源十分丰富,按传统的方法用于作饲料的桔杆所占比率很低,且动物对其中的营养物质的吸收率也较低。大量的桔杆都被当作燃料或被直接还田,造成资源浪费。如果能充分利用好这些资源,将节约大量的粮食,并可充分发展我国的畜牧业。

2.4 特殊的化学或生化反应

挤压机是一种新型的生物化学反应器,食品在被挤压的过程中,会发生一系列的生化反应。例如,大豆粉的挤压过程除了使蛋白质变性外,同时使得脂酶、脂肪氧化酶、抗胰蛋白酶因子及一些自然形成的毒性物质失去活性,也会使贮藏期间能导致食品劣变的各种酶的活性钝化,这样就大大降低了产品的微生物平板记数值,基本上不存在致病菌、沙门氏菌、昆虫及其它污染物^[3]。

将挤压机作为食品加工中的生化反应器来进行研究,还属刚刚起步不久的新技术。在食品加工领域,将挤压机作为生化反应器,研究蛋白质、碳水化合物、脂肪、粗纤维等成分的相互作用,研究挤压过程中物料的营养价值及生化反应规律,更进一步还可从分子水平揭示食品的挤出加工机理。

2.5 其它应用功能

代替搅拌反应器,完成乳制品酪蛋白盐反应物的生产;代替蒸煮器和浇模机,用于甘草、水果软糖的生产;代替精磨机用于巧克力的生产;代替烤箱用于烘烤调料、焦糖生产;代替烤炉用于面包片、饼干的生产;作为榨汁机用于生产各种果汁、油料。螺杆挤压机还可以用于其它工业制品的加工,如造纸工业、纺织工业、金属铸造业、油井钻探等^[9]。

目前,世界上采用挤出法生产的食品范围已经相当广泛。有快餐食品、早餐食品、焙烤食品、冲调食品、儿童食品、植物蛋白食品、保健医疗和强化营养食品。在我国,近年来膨化和休闲食品的发展也非常迅速,并且仍具有巨大的发展潜力。

3 螺杆挤压机的研究方向

螺杆挤压机最早应用于塑料工业,其理论研究起步较早,形成了多种用于描述挤压过程中流动和传热基本原理的数学模型,运用这些模型,实现了精确的挤压机模拟设计。食品工业应用挤压技术稍迟于塑料行业,这主要是食品原料的复杂性所致。适用于单纯塑料原料挤压体系的模型不能用来模拟食品体系。因此,食品工程师在开发过程中所遇到的问题,更多的是靠实践来解决。但是,在70年代初,人们开始在食品挤压领域中应用模拟、优化技术。引用工程和科学的原理,建立起尽可能接近实际食品挤压体系的模型和模拟体系,对于指导人们增加对这复杂工艺过程的了解,提高挤压机技术的应用效益、最终彻底弄清挤压基本原理,并以此指导此技术更进一步发展却是极为有意义的。这方面的工作在全球范围内正方兴未艾^[10]。本文限于篇幅,仅就螺杆挤压机的几个研究方向进行综述。

3.1 螺杆挤压机结构参数的优化设计

挤压机的性能在很大程度上取决于螺杆的设计. 螺杆参数较多, 相互之间关系复杂, 其参数的确定与加工物料、产品的性能均有关系, 如何正确地建立他们之间的数学模型, 是当前的研究方向之一. 目前, 设计螺杆的主要方法是经验性的, 且多数是参照塑料挤压机的设计方法, 在食品挤压机中, 还缺乏一套成熟的方法. 无锡轻工业大学陆振曦教授等参照橡塑理论的研究成果建立了挤压螺杆数学模型, 对食品挤压机的螺杆结构参数进行优化设计. 主要设计步骤如下^[11].

3.1.1 确定设计变量和设计常数

螺杆优化设计的变量包括螺杆的几何参数, 例如螺杆的轴向长度 l 、螺槽深度 h 、螺距 s 和挤压工艺参数, 如螺杆转速 n .

优化设计的常数(给定的参数)即物料的性能参数和挤压的工艺参数, 例如, 物料与机筒内壁的摩擦系数 f_b 、物料与螺杆接触面的摩擦系数 f_s 、固态物料的密度 ρ_s 、比热容 C_s 、熔态物料的密度 ρ_m 、比热容 C_m 、机筒温度 T_b 及物料温度 T_s 、压缩比 ϵ 等.

3.1.2 目标函数

作为挤压机, 优化设计就是为了获得单位功耗下最大的挤压量. 因此取挤压机单位功耗下的挤压量作为目标函数. 可表达如下:

$$F(X) = - 0.5(Q_s + Q_L)/N$$

式中: Q_s ——从进口加入固体物料的质量流速, kg/h; Q_L ——熔体流经机头通道的质量流速, 它等于熔体输送段的质量流速, kg/h; N ——驱动螺杆时的总功率, KW.

3.1.3 约束条件

根据不同的螺杆类型将有不同的约束条件. 常见的约束条件有(1)边界约束;(2)强度约束;(3)刚度约束;(4)压缩比和长径比约束.

3.1.4 数学模型

在明确上述设计变量、目标函数、约束条件及相应的一些概念后, 数学模型可以规范为如下形式:

$$\begin{aligned} & \min F(X) \\ & X = [x_i], i = 1, 2, \dots, n. \\ & S. T. \begin{cases} g_u(X) \leq 0 & (u = 1, 2, \dots, m) \\ h_v(X) = 0 & (v = 1, 2, \dots, p; p < n) \end{cases} \end{aligned}$$

这里 x_i 为设计变量, 共有 n 个, 表征螺杆的几何结构特征; $F(X)$ 为目标函数; $g_u(X)$ 为不等式约束条件; $h_v(X)$ 为等式约束条件.

3.1.5 优化方法

由上面的分析可知, 挤压机螺杆结构参数的优化设计是一个多变量、多约束的非线性规划问题. 对于这类问题, 较为有效的优化方法是鲍威尔(Powell)法, 这种方法是一种共轭方向法, 它不需要对目标函数作求导计算, 用于变量 n 不超过 20 的情况, 或者在目标函数的一阶导数不连续的情况下, 能得到很好的计算结果.

3.2 螺杆与机筒耐磨性的分析研究

螺杆挤压机的螺旋、机筒、出料模头均是易磨损的元件, 为了提高膨化机的使用寿命、稳定性和产品质量, 必须对其磨损的机理进行深入研究, 选择耐磨优质的材料来制造这些元件. 目前这方面的研究相对较少, 为了建立食品挤压机中螺杆与机筒磨损机理的研究模型, 必须从下面几方面着手.(1)研究机筒与螺杆的磨损形式;(2)选择既耐磨又符合食品卫生要求的材料;(3)进行磨损实验, 分析磨损结果, 提出降低磨损的措施. 这方面 J. L. Kokini 做了大量的工作^[2].

3.3 螺杆挤压机的可视化研究

在我国利用可视化技术对挤压膨化原理进行研究的单位主要有北京化工大学的刘延华、朱复华, 其研究课题为“双螺杆可视化试验研究与非充满固体输送与熔融理论”(北京化工大学博士学位论文, 1995).

可视化技术在航空工业的基础研究中很早得到应用,在聚合物成型加工中的研究还属刚起步不久的新技术,在生物聚合物加工的应用研究则更是一种创新.将可视化技术应用于食品挤压加工过程的研究上,可直观分析食品加工的真实过程^[6].

3.4 实现挤压机的自动化水平

积极探索计算机在挤压膨化机及其生产线设计、模拟、自动化控制方面的应用,提高整机的自动化水平、稳定性和可靠性.实现自动化开机,研究自动开机阀,简化挤压机在开、停机时的操作步骤,节省时间,降低物料损失和能量损失.开机时,要达到由计算机自动调节挤压机的转速、加水量、蒸汽量、糊化物量和干物料量,使其在尽可能短的时间里达到稳定的工作状态.实现给料量、膨化温度、压力的自动控制和数字显示,以提高生产效率,降低劳动强度^[12].

3.5 研制多功能、多用途膨化机

目前,我国挤压膨化机的种类还很少,结构规格还未能系列化,故研制系列规格的挤压膨化机势在必行.在制定不同规格的挤压机生产标准时,要考虑一机多用,如一种规格的挤压机可与几种规格的螺杆,几十种挤压模头相配合,这样即可满足不同用途和要求的用户的需要.重点开发更先进的双螺杆挤压机,提高挤压机的多功能性,扩大挤压机的应用领域,使其适应在非食品工业领域中的用途,例粉末材料的加工等.

参考文献:

- [1] 高福成,王海毳.现代食品工程高新技术[M].北京:中国轻工业出版社,1997.560~569.
- [2] 张裕中,王景.食品挤压加工技术与应用[M].北京:中国轻工业出版社,1998.4~23,120~135.
- [3] 陈迎春.食品高压加工设备及其应用.包装与食品机械[J],1999,17(3):30~32.
- [4] 顾正彪等.挤压机在淀粉深加工中的应用.粮食与饲料工业[J],2000,(4):42~43.
- [5] 朱国洪等.食品挤压技术及最新研究进展.食品与发酵工业[J],2000,26(4):59~62.
- [6] 刘天印,陈存社.挤压膨化食品生产工艺与配方[M].北京:中国轻工业出版社,1999.122~172.
- [7] 吴运生.膨化技术与膨化饲料.现代食品技术学术研讨会论文[C].扬州:江苏牧羊集团,2000.5~6.
- [8] 晏向华.秸秆饲料资源的开发与应用研究的新进展.粮食与饲料工业[J],2000,(5):22~25.
- [9] 顾华孝.粮谷挤压加工综合技术功能应用.粮食与饲料工业[J],2000,(9):44~46.
- [10] 高福成等.食品加工过程模拟·优化·控制[M].北京:中国轻工业出版社,1999.284~327.
- [11] 陆振曦,陆守道.食品机械原理与设计[M].北京:中国轻工业出版社,1995.257~268.
- [12] 张守文.挤压膨化技术的进一步研究与开发.粮食与饲料工业[J],2000,(5):18~19.

The Screw Extruder and Its Application In Food Industry

YANG Wei

(The Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China)

Abstract This paper briefly discusses the history and principle of screw extruder. The structural feature of the single and twin screw extruder are compared. Then, their application in the food industry is introduced. Now the screw extruder is used to produce the starch expanding food, protein expanding food, expanding feed, and to be reacting vessel in the biochemistry. In the future, there are many important study fields on screw extruder. They are optimum design of extruder's parameter, the wear analysis of screw and fuselage, the improving of its automatic control quality by imitating and optimizing extrusion.

Key words: screw extruder; principle; structural feature