

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2020.04.002

双螺杆挤压过程中停留时间分布的测定及影响因素研究

Determination of residence time distribution and its influencing factors during twin screw extrusion

崔维真 陶海腾 崔波

CUI Wei-zhen TAO Hai-teng CUI Bo

(齐鲁工业大学〔山东省科学院〕食品科学与工程学院, 山东 济南 250353)
(College of Food Science and Engineering, Qilu University of Technology
〔Shandong Academy of Sciences〕, Jinan, Shandong 250353, China)

摘要:停留时间分布是表征双螺杆挤压过程中物料流动状态的重要参数,与挤压食品品质的形成密切相关。文章着重介绍了指示剂测定停留时间分布的方法及相关参数,分析了温度、水分、螺杆构型、模孔、喂料速度和螺杆转速等操作参数对双螺杆挤压过程中停留时间分布的影响。由于淀粉、蛋白等营养组分结构比较复杂,现有关于停留时间分布的研究成果不够完善,还需要进一步的深入细化。

关键词:停留时间分布;测定方法;双螺杆挤压

Abstract: Residence time distribution is an important parameter to characterize the flow state of materials during twin screw extrusion, which is closely related to the quality formation of extruded materials. The paper introduced the measurement method of residence time distribution by indicator method and parameters. The impacts of temperature, moisture, screw configuration, die hole, feeding speed and screw speed on residence time distribution in twin-screw extrusion process were analyzed. Due to the complex structure of food ingredients (e.g. starch, protein), researches on determination methods and influencing factors need to be further improved.

Keywords: residence time distribution; measurement methods; twin screw extrusion

食品挤压是将食品原料经粉碎、调湿、混合等预处理

基金项目:国家重点研发计划(编号:2016YFD0400304)

作者简介:崔维真,女,齐鲁工业大学(山东省科学院)在读硕士研究生。

通信作者:崔波(1971—),男,齐鲁工业大学(山东省科学院)教授,博士。E-mail: cuibopaper@163.com

收稿日期:2020-01-07

后,在高温条件下被螺杆挤压剪切、摩擦等机械作用强制通过模具,由于强大的压力差及温度骤降使其膨化,从而得到疏松、多孔的膨化产品的过程。挤压加工效率高、成本低、无化学污染,经挤压处理后的产品拥有消化吸收率高、营养素损失少、货架期长等特点^[1-2]。挤压加工是通过螺杆挤压机完成的,按螺杆数量不同,主要分为单螺杆和双螺杆两种。最初广泛应用的是单螺杆,主要用于意大利通心粉、灌肠等,但加工能耗高,产品形态单一^[3]。相对于单螺杆,双螺杆能耗低,原料适应性好,通过工艺调节可以生产多种不同状态的产品,能较好的改变产品的品质^[4]。目前双螺杆挤压不仅被广泛应用于豆类蛋白组织化^[5-6],以及杂粮^[7-8]、肉类^[9-10]等挤压膨化食品的加工,而且被用于蛋白质改性^[11-12]、淀粉改性^[13-14]、纤维改性^[15-16]、细胞破壁^[17-18]等方面。

停留时间分布(residence time distribution, RTD)是指物料从进入挤压腔开始,到离开模口为止,熔融态原料在挤压机中停留的时间的流动状态分布情况,决定了生化反应程度的大小和最终挤压产品的质量,被认为是挤压加工过程中的重要参数。通过 RTD 的测定建立数学模型,分析物料在挤压机内的流体状态,可以将产品品质与操作参数有机关联^[19]。粮豆类是挤压加工食品的常用原料,其主要成分为淀粉和蛋白属于大分子复合物,在挤压力、剪切力、摩擦力等双螺杆挤压作用力下,发生分子链断裂、重组、糊化等众多结构变化,由于双螺杆比单螺杆的能耗低,具有更短的 RTD,细微差异可能导致不同的产品品质,如疏松多孔组织、结构纤维化、重组致密化^[20-22],这就对 RTD 的研究提出了更精准的要求。

文章拟对国内外对 RTD 的测定及影响因素的研究成果进行分析比较,以期阐明挤压加工参数对粮豆类物

料 RTD 分布的影响,为后续挤压食品品质形成机理深入研究提供理论依据。

1 测定方法

目前,RTD 主要通过指示剂来测定的,即在挤压加工过程中,将指示剂按一定的输入方式加入,观测在系统出口的指示剂浓度随时间的变化,从而分析食品物料在挤压腔内流体特性,有脉冲法、阶跃法、周期输入法和随机输入法^[23]。由于前两种方法操作方便,便于处理数据,所以应用最广泛。

(1) 脉冲法:当挤压机达到稳定状态,在 $t=0$ 时瞬时加入指示剂,并对输出的量进行观测,直至指示剂全部从出口输出。脉冲法的关键是要在一瞬间(即时间间隔为

0),就将全部指示剂均匀地加入到进料截面中去。

(2) 阶跃法:将一定浓度的指示剂提前均匀混入物料中,当挤压机达到稳定状态,瞬间进行两种物料的切换,先发纯物料后切换成指示剂物料,观测指示剂从无到有的变化称为阶升法,反之为阶降法。阶越法关键是两种物料切换要快,尽量不影响稳定挤压加工状态。

1.1 指示剂的选择

指示剂的选择直接影响 RTD 测定的精确度,需要满足两个要求:① 示踪剂不影响被测物质在桶内的流动特性;② 指示剂拥有容易检测的理化特性,如色度差、荧光性、导电率等,不同指示剂使用的检测方式不尽相同。常用的指标剂如表 1 所示。

表 1 RTD 测定常用指示剂

Table1 Common indicators on RTD determination

类型	研究人员	原料	指示剂	检测方式
有色染料	Schmid 等 ^[24]	小麦粉	胭脂红	色度计
	Likimani 等 ^[25]	玉米淀粉/大豆蛋白混合	玫瑰红	测色度
	Ziegler 等 ^[26]	巧克力	咖啡	比色法
	Seker ^[27]	玉米淀粉	胭脂红钠	色度计
	Xu 等 ^[28]	米粉	赤藓红钠	比色法
	张波 ^[29]	大豆蛋白	炭黑	色度计
无机盐	Unlu 等 ^[30]	玉米粉	KCl	测电导率
	张蕊等 ^[31]	糖浆	KCl	电导率仪
放射性物质	Mange 等 ^[32]	小麦粉	⁴² KNO ₃	同位素追踪
其他类型	Eitzlmayr 等 ^[33]	光滑粒子	无需指示剂	开源粒子模拟器 IIGGGHTS
	熊辉等 ^[34]	聚乙烯	色母粒	光纤传感器
	Tomás 等 ^[35]	大分子聚合物	色母粒	光敏电阻(LDR)传感器
	Wook 等 ^[36]	聚合物	CaCO ₃	无损超声设备

由表 1 可知,由于食品挤压膨化主要的原料是粮豆类,淀粉和蛋白为主要成分的普遍使用有色染料作为示踪剂,从染色的挤出物中浸提染料,通过比色法/色差法测定 RTD,该方法操作简单方便,有色染料具有便宜易得,样品容易处理,且不会造成挤压机和原料的污染,但有些耗时,而且测定滞后;无机盐也是常用的一种示踪剂,与有色染料相比,由于其导电性好,更容易被检测,但化学物质不适宜用于以食品原料为主的检验,主要原因是可能对挤压机造成损害;放射性物质虽然可以对挤压机的样品进行实时追踪,但由于价格昂贵,而且存在污染和辐射危险,不常在实际操作中使用;而模拟器虽然能较好地模拟物料在系统内的流动行为,但由于改装设备投入较大,并不适用于所有挤压生产设备,目前仍在研究阶段,没有被广泛应用。

1.2 主要参数

随着挤压膨化后的样品出机筒时间不同,与原料混

合示踪剂的浓度发生变化,被挤出的样品中示踪剂的浓度变化反映了食品在机筒内的流动状态及 RTD。样品测定点处示踪剂的浓度,依据示踪剂浓度与色差值之间的方程关系进行计算^[37]。其中, E 曲线是对示踪剂在机筒内变化最直接的曲线,可以反映以大分子蛋白及淀粉为主的物料停留时间的变化及纵向混合程度; F 曲线是示踪剂的累积量变化曲线,可以用于数学拟合以改善挤压参数;平均停留时间和方差可用于增加数据的准确度;波克列准数可将食品的流动状态以数据的方式直观展现,增加数据可信度^[38]。

1.2.1 E 曲线 E 曲线呈倒 U 型,随着时间的变化示踪剂在出口处先增加,达到峰值后减小, E 曲线的峰值表示示踪剂浓度最高值,它与食品组成成分及挤压参数的变化相关^[39]。 E 曲线的半峰宽度表示物料在体系内停留时间长短以及纵向混合量的大小,挤压过程中,半峰宽度小

表示纵向混合量小,物料没有充分混合熔融,膨化效果差;半峰宽值大,表示物料在挤压腔内挤压时间长,纵向混合性好,但是以淀粉和蛋白为主要成分的物料在机筒内停留时间过长,会出现焦糊现象,影响最终产品品质。 E 曲线的峰底宽表示挤出机的自洁作用大小,合适的峰底宽度可以避免食品在挤压腔中停留时间过长,熔融的食品在螺杆和机筒的沉积和粘附会增加机械损耗^[40]。因此对于食品挤压,可通过 E 曲线的变化对应不同物料组成取适当值,从而达到改善挤压食品品质的目的。

1.2.2 F 曲线 累积停留时间分布函数 $F(t)$ 是依据 $E(t)$ 曲线进行计算的, $F(t)$ 曲线表示食品在机筒内的流动状态,被认为是挤出机喷嘴出口处的示踪剂浓度的累积量和时间,代表这一瞬间以前 C 曲线下面的面积,并对 F 曲线进行归一化处理,以便进行比较分析。样品在机筒内的流动状态基于两种理想状态的流动形式中间:柱塞式和完全混合式(图 1)。使用 F 曲线与挤压模型公式进行拟合,常用的模型为 CSTRs 系列模型^[41-42]、Wolf-Resnick 模型^[43]、Wolf-White 模型^[44]、Yeh-Jaw 模型^[45]、Logistic 模型^[46]等,可以在理论上优化挤压参数,达到优化产品的目的。

1.2.3 平均停留时间及方差 平均停留时间(t_m)及其方差(σ^2)也是 RTD 的重要参数。粒子停留时间的所有值都可以通过将单独停留时间除以平均停留时间进行归一化,或用其实时值进行评估^[47]。

1.2.4 波克列准数 混合状态通常用波克列准数(Pe)表示,用于描述轴向分散程度,是平均轴向对流传递和扩散传递的比值。Pe 越大,曲线越窄,轴向分散程度越低^[48]。当接近于无穷大时,类似于柱塞式;当接近于 0 时,类似于完全混合式。

不同于分子结构单一的工程塑料挤压聚合,粮豆类物料中的蛋白和淀粉分子量巨大,分子链长,分子结构变化多样,因此上述的函数计算公式只能大致推算,推算出的 RTD 不能很好预测食品挤压的反应与流动状态,后续

还需要开发适合食品原料挤压的函数及修正计算方法,用以精确的分析 RTD。

2 影响因素

挤压属于连续反应的加工过程,除了食品原料成分不同造成 RTD 的变化^[49],温度、水分、螺杆构型、螺杆转速、模孔尺寸、喂料速度等挤压参数,都会影响挤压腔内的摩擦力、剪切力、压力,进而影响原料及产品的流变学特性,从而造成物料在挤压腔内 RTD 的区别。

2.1 水分

水分含量是挤压加工的主要参数,挤压初始随着温度的升高,对于以淀粉、蛋白为主的粮豆类原料,水分具有较好的传热性能,水分含量越高,通过水分在淀粉及蛋白的均匀混合实现对物料充分加热,形成混合结构快速达到熔融态;水分含量较高时同时起到润滑的作用,降低了物料、套筒、螺杆之间的摩擦,物料在机筒内的流动性越强,RTD 越短。陈锋亮^[50]13-19 研究挤压植物蛋白发现,水分含量较低时的 E 曲线波动明显,随着物料水分含量增加, E 曲线变得逐渐光滑;当物料水分增加时, E 曲线宽度变窄,峰度增加,此时平均停留时间大幅度减小。 E 曲线均介于柱塞流曲线和全混流曲线之间,流动状态随物料水分含量的增加变化不大,趋向于柱塞流。Sisay 等^[39]、Chen 等^[51]在研究中提到有相似的发现,即进料水分含量越高,RTD 越低。但 Kumar 等^[52]研究发现,RTD 在其他变量保持不变时,平均停留时间随着水分含量的增加而增加。水分过高导致物料黏度增大,附着在挤压腔及螺杆,从而阻碍食品的流动, E 曲线延长,RTD 增大。

水分作为挤压加工可调节的技术参数,不仅对 RTD 影响大,而且影响着淀粉糊化、蛋白组织化等复杂的品质变化过程,现有的研究大多集中在水分含量、温度变化趋势这些普通变量上,在水分 pH 值、水分矿物质、水分渗透速度等细节变量上关注得少,导致具体影响机理还不是很明显。

2.2 温度

温度对以食品为原料 RTD 的影响主要体现在改变其物理状态,通常协同水分对挤压过程中 RTD 造成影响。陈锋亮^[50]22-27 研究发现,温度增加会使 E 曲线向左上方偏移,流动状态由完全混和流趋向于柱塞流。Kumar 等^[52]发现,温度由 120 °C 升高到 140 °C 会使物料在机筒内的 RTD 升高,这是因为温度过高后,蛋白组织化或淀粉糊化提前,混合后使流动性降低,与挤压腔及螺杆摩擦力增加,RTD 延长。Shan 等^[53]通过研究不同种类的面粉挤压过程中的流动特性及物理性质,发现机筒温度的升高降低了 RTD。随着温度的持续增加,RTD 不会一直降低,反而呈增加趋势。范玉艳等^[54]在挤压过程中研究发现,随着温度的升高,RTD 跨度呈先升高后降低

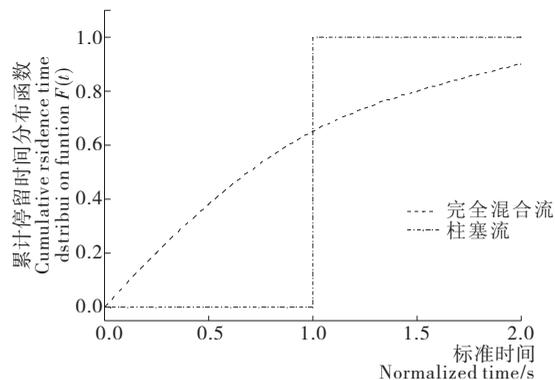


图 1 F 曲线表示的两种理想流动状态

Figure 1 Two ideal flow conditions expressed by F curves

趋势,在挤压机末端温度为 70 °C 时的 RTD 跨度最大。宋超洋^[55]发现,温度高于 160 °C 后继续升高会使淀粉由稳定糊化状态转向降解状态,颗粒解体后重新分散在水中,糊化度降低,从而使 RTD 降低。温度的变化对 RTD 的影响,主要是促进物料中水分的蒸发、淀粉的糊化和蛋白性质的变化。

需要指出的是,现有大多数研究成果是通过电加热的试验机得到的,而大多数工厂投入生产的挤压机是蒸汽加热,两种加热方式的效果有差异,忽略了蒸汽加热的特有指标,如蒸汽饱和度、压力、管路布局等,这是后续研究需要补充的。

2.3 螺杆构型

目前,双螺杆挤压机一般采用组合式,即由不同的元件排列组合,形成不同构型的螺杆,这也是影响 RTD 的主要因素,螺杆元件的类型及其排列组合均对 RTD 有显著影响,贡献率可达 70% 以上^[56-58]。

2.3.1 螺杆元件的类型 螺杆元件主要有输送元件、捏合元件、齿形元件 3 种类型。输送元件一般呈螺旋形,分两种类型:1.5D~2.0D 大螺距,输送速度快,RTD 短;0.25D~0.75D 小螺距,输送速度慢,RTD 长^[59]。输送元件分为正向和反向两种类型,反向元件与模头方向逆向输送,形成反向压力,起到封闭腔体的作用。捏合元件捏合盘厚度的作用类似于输送元件的螺距越厚,RTD 越短,左旋捏合元件作用类似反向输送元件^[60]。齿形元件,因形似多个齿轮集合在一起,起到涡轮混合作用,但齿轮之间存在间隙、互不啮合,形成反向压力小,齿形元件的 RTD 比捏合元件短。

2.3.2 螺杆元件的排列组合 配置反向元件、增加捏合元件、增加反向元件的长度等调整螺杆构型措施,会加强螺杆阻流性能,可以有效增加螺杆填充度,降低螺杆的输送性能,样品的停留时间增加。较长的反向元件组成的螺杆会使得物料在机筒内的混合程度增加,RTD 显著增加。反向元件距模头的距离和元件间距越大,食品达到熔融态越早,蛋白质和淀粉黏度增加,E 曲线延长^[61-62]。物料熔融后环绕前进,到达啮合区剪切应力使熔体充分混合,过渡段熔体在螺杆头的影响下形成涡流,导致已形成熔融态的蛋白或淀粉滞留,可能是引起焦糊的原因^[63]。

螺杆构型差异使挤压食品呈现不同的品质状态,但由于螺杆运转与挤压腔的耐受度、电机的功率、加热方式等其他单元具有一定的配套性,调整螺杆构型有可能涉及整体设备改造,工作量大,故在生产上一般很少调整螺杆构型,对 RTD 的影响在试生产前进行探讨。

2.4 螺杆转速

螺杆转速是挤压加工最灵活的过程变量之一,螺杆转速提高缩短了物料在挤压腔内滞留的时间,增加进料通过挤出机的前推力^[64-65]。但螺杆转速的变化,对挤压

产品特性影响不显著,Xu 等^[28]在淀粉酶促挤压浸提大米研究中发现增加螺杆转速使 $E(t)$ 曲线向左移动,并缩短了 RTD,但 E 曲线的形状保持相似。赵学伟等^[66]通过对小米—豆粕复合挤压中 RTD 的测定和分析,发现 RTD 随螺杆转速增大而减小,螺杆转速对 σ^2 的影响很小或者不确定。Iwe 等^[67]研究发现,提高螺杆转速,缩短了 RTD,但是分散系数无显著性差异。刘骏^[68]、刘淑婷等^[69]研究得出同样的结论,当螺杆转速较低时,随螺杆转速增加物料在膨化过程中受机械作用增大,颗粒结构破坏明显,淀粉较易糊化,RTD 增大;反之,当螺杆转速过快,物料在机筒内吸收的热量减少,淀粉糊化程度减少,RTD 减小。

增加螺杆转速对混合程度的影响不大,因为增加螺杆转速并没有很好地增加轴向混合,只是使食品的输送速度加快。螺杆转速与 RTD 的关系相对稳定,当螺杆转速提高时,RTD 缩短,生产效率提高,但螺杆转速提高会使得耗能提高、损耗加大,可以根据生产所需和螺杆寿命适当调整螺杆转速。螺杆转速还会对温度产生一定的影响,螺杆转速增加,螺杆与物料的摩擦力变大,产生热量导致温度升高,从而影响 RTD,但这方面的研究不多。

2.5 模孔

模孔的大小决定着物料在机筒中受到的压力的大小,影响着最终成型的产品挤出模孔的速度,从而影响 RTD 及物料在机筒内的分散程度。压力沿挤出方向的分布规律为在模头前压力逐渐升高,在模头后压力逐渐降低,该规律主要受模头处阻流作用的影响,从而影响物料在机筒内的流动状态^[70-71]。在一定范围内,由于充模程度的降低,RTD 随着模孔直径的增大而减小,但是模孔过大对 RTD 影响不大^[72]。Chuang 等^[73]研究发现,增加模孔直径,轴向分散程度增加,在模孔直径 10~40 mm 时,压力低于 11.5 kPa;当模孔直径达到 40 mm,压力几乎为 0,说明随着阻流作用的减弱,物料在机筒内的轴向分散程度受到影响。

模孔的大小影响食品体系出模头时所受的压力,不仅通过阻流食品挤出,影响食品分散程度,同时也决定着蛋白质和淀粉中水蒸气的迅速蒸发,进而对挤压食品膨胀度、孔隙率等品质有着决定性的影响。现有的研究多集中在模孔直径这个单一参数,但实际生产过程中由于对不同食品外观的需要,模孔是不规则的,无法用直径来衡量,建议后续采用模孔面积为研究指标。

2.6 喂料速度

喂料速度对物料在挤压腔内的流动状态具有显著影响,喂料速度较低时,RTD 分布会更宽, F 曲线更接近柱塞流,喂料速度会影响轴向分散,较高的进料速率提高了挤出机对自由空间的填充程度,使得粉状物料在机筒内被更快的压实,从而缩短平均停留时间。喂料速度过高,

则会使柱塞流所占的比例增大,混合程度减弱^[52]。Iwe 等^[67]通过将机筒中大豆流量(400 g/kg)显著增加,发现 RTD 降低,豆类物料在机筒内的分散系数随喂料速度的提高而减小。Gao 等^[74]发现,在转速恒定条件下,增加喂料速率导致 RTD 曲线向左侧方向移动并使曲线分布变窄。说明增加喂料量会减小轴向混合,改变喂料量可以更好地改变轴向混合效果。张余^[75]研究发现,增加喂料速度,C 型空间被迅速填满,导致挤出速度加快,RTD 缩短;通过分析 $F(t)$,喂料速度过高,降低蛋白在挤压加工中的混合程度。喂料速度对 RTD 的影响是通过对挤压机内壁与螺杆间物料填充度起作用的,较高的喂料速度尽管会降低 RTD,但不利于食品体系的混合。

目前对于喂料速度的研究只关注于挤压腔的填充,而忽略了喂料仓内物料的变化,尤其工业生产喂料仓巨大,将仓内所有料泵出需要一定的时间。因此,后续需要研究喂料仓内物料的理化变化规律,合理设计仓的容量体积,确保所有喂出的物理化性质一致。

3 展望

综上所述,通过分析挤压原料中指示剂在机筒内的流动状态测定 RTD,从而建立数学模型,方法简易可行,结果可靠性高。但由于构成粮豆类物料主要成分的蛋白和淀粉,分子链很长,空间构象复杂,挤压加工涉及众多物理化学过程,现有的数学模型不能充分体现,需要进一步的完善。通过近些年的研究,初步掌握了操作参数对双螺杆挤压过程中停留时间分布的影响规律。随着温度/水分的增加,RTD 呈先减少后增加趋势,螺杆转速、模孔尺寸与 RTD 负相关,输送功能螺杆构型、喂料速度与 RTD 正相关。但由于双螺杆挤压反应过程复杂,现有 RTD 研究不够全面,忽略了很多变化的细节,如挤压腔内熔融体的理化特性变化、挤压技术参数的互作用、营养组分的分子空间构象变化等等。因此,关于 RTD 的研究还需要进一步的深入细化,建立系统完整理论体系,才能有效掌握挤压食品品质的形成规律。

参考文献

[1] RIAZ M N. Handbook of farm, dairy and food machinery engineering[M]. 3rd ed. Salt Lake City: American Academic Press, 2019: 483-497.

[2] LIU Yun-fei, CHEN Jun, WU Jiang-yong, et al. Modification of retrogradation property of rice starch by improved extrusion cooking technology[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 213: 192-198.

[3] 杨涛, 辛建美, 徐青, 等. 双螺杆挤压技术在食品工业中的研究应用现状[J]. 食品与生物技术学报, 2009, 28(6): 733-740.

[4] 刘霁莎, 白永亮, 李敏, 等. 青稞粉挤压膨化工艺优化、品质

研究及产品开发[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(15): 118-123.

[5] 张金闯, 魏益民, 张波, 等. 组织化大豆蛋白生产工艺研究与应用进展[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(10): 135-139.

[6] 王旭. 豌豆蛋白挤压组织化机理及工艺优化[D]. 北京: 北京化工大学, 2014: 25-26.

[7] 王瑞斌, 李明, 苏笑芳, 等. 荞麦挤压膨化产品的理化特性研究[J]. 中国食品报, 2019, 19(9): 83-92.

[8] 谢仲寅, 任欣, 张敏, 等. 小米挤压粉与小米生粉理化性质及营养品质的差异比较[J]. 食品工业科技, 2019, 40(22): 13-17, 23.

[9] 季金箭. 金枪鱼碎肉的挤压组织化及其腥味抑制技术的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015: 27-45.

[10] 金佳幸. 挤压肉干的工艺、保藏及全程水分变化规律研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016: 14-24.

[11] GUERRERO P, BEATTY E, KERRY J P, et al. Extrusion of soy protein with gelatin and sugars at low moisture content[J]. International Journal of Food Engineering, 2012, 110(1): 53-59.

[12] 张金闯. 高水分挤压过程中花生蛋白构象变化及品质调控[D]. 北京: 中国农业科学院研究生院, 2019: 7-13.

[13] 齐晓艳. 挤压法制备阳离子淀粉及其性能研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012: 12-17.

[14] 刘凤茹. 挤压法制备硬脂酸玉米淀粉酯的工艺、性质及应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009: 3-7.

[15] 杜冰, 黄守耀, 姜龙波, 等. 双螺杆挤压对绿豆皮中膳食纤维的改性研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(10): 170-173, 176.

[16] TREVISAN A J B, AREAS J A G. Development of corn and flaxseed snacks with high-fibre content using response surface methodology (RSM) [J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2012, 63(3): 362-367.

[17] 杜冰, 黄继红, 程燕锋, 等. 双螺杆挤压膨化破碎啤酒酵母细胞壁的研究[J]. 中国酿造, 2009(12): 26-29.

[18] 焦艳丽, 温升南, 杜冰, 等. 挤压处理灵芝孢子粉提取灵芝多糖[J]. 食品科学, 2011, 32(16): 67-70.

[19] PINTO G, TADMOR Z. Mixing and residence time distribution in melt screw extruders[J]. Polymer Engineering and Science, 1970, 10(5): 279-288.

[20] GAUTAM A, CHOUDURY G C. Screw configuration effects on starch breakdown during twin-screw extrusion of rice flour[J]. Journal of Food Process Engineering, 1999, 22: 355-375.

[21] GAO Wei, LIU Peng-fei, CUI Bo, et al. The co-plasticization effects of glycerol and small molecular sugars on starch-based nanocomposite films prepared by extrusion blowing[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 133: 1 175-1 181.

[22] LIU Ke-shun, HSIEH Fu-hung. Protein-protein interactions during high-moisture extrusion for fibrous meat analogues and

- comparison of protein solubility methods using different solvent systems[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(8): 2 681-2 687.
- [23] FILLI K, NKAMA I, JIDEANI V A, et al. The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of millet-cowpea based fura[J]. *European Journal of Food Research & Review*, 2012, 2(1): 1-23.
- [24] SCHMID A H, DOLAN K D, NG P K. Effect of extruding wheat flour at lower temperatures on physical attributes of extrudates and on thiamin loss when using carbon dioxide gas as a puffing agent[J]. *Cereal Chemistry*, 2005, 82(3): 305-313.
- [25] LIKIMANI T A, SOFOS J N, MAGA J A, et al. Methodology to determine destruction of bacterial spores during extrusion cooking[J]. *Journal of Food Science*, 1990, 55(5): 1 388-1 393.
- [26] ZIEGLER G R, AGUILAR C A. Residence time distribution in a co-rotating, twin-screw continuous mixer by the step change method[J]. *Journal of Food Engineering*, 2003, 59(2): 161-167.
- [27] SEKER M. Residence time distributions of starch with high moisture content in a single-screw extruder[J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 67(3): 317-324.
- [28] XU En-bo, WU Zheng-zong, LI Jing-peng, et al. Residence time distribution for evaluating flow patterns and mixing actions of rice extruded with thermostable α -amylase[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2017, 10(6): 1 015-1 030.
- [29] 张波. 双螺杆挤压机螺杆作用表征研究[D]. 北京: 中国农业科学院研究生院, 2010: 27-46.
- [30] UNLU E, FALLER J F. RTD in twin-screw food extrusion[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 53(2): 115-131.
- [31] 张蕊, 黄雄斌, 何庆阳. 连续搅拌槽内假塑性流体停留时间分布的数值模拟[J]. *北京化工大学学报: 自然科学版*, 2009, 36(6): 5-10.
- [32] MANGE C, BOISSONNAT P, GELUS M. Distribution of residence times and comparison of three twin-screw extruders of different size[J]. *Extrusion Technology for the Food Industry*, 1987, 1(1): 117-131.
- [33] EITZLMAYR A, KHINAST J. Co-rotating twin-screw extruders: Detailed analysis of conveying elements based on smoothed particle hydrodynamics Part 2: Mixing [J]. *Chemical Engineering Science*, 2015, 134(29): 880-886.
- [34] 熊辉, 冯连勋, 方辉. 挤出过程聚合物停留时间分布的在线测量新系统[J]. *塑料*, 2008(6): 111-113.
- [35] TOMAS J A M, SEBASTIAO V C. An optical device to measure in-line residence time distribution curves during extrusion[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2002, 42(1): 170-181.
- [36] SANG M L, JONG C P, SANG M L, et al. In-line measurement of residence time distribution in twin-screw extruder using non-destructive ultrasound[J]. *The Korea-Australia Rheology Journal*, 2005, 17(2): 87-95.
- [37] 王炉钢. 双螺杆挤出机停留时间分布的在线测量[D]. 杭州: 浙江大学, 2005: 6-25.
- [38] MAGDALEN S, PIOTR M S. Study of fluid dynamics conditions in selected static mixers Part II: Determination of the residence time distribution [J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2017, 95(12): 2 410-2 422.
- [39] SISAY M T, EMIRE S A, RAMASWAMY H S, et al. Residence time distribution and flow pattern of reduced-gluten wheat-based formulations in a twin-screw extruder[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 79: 213-222.
- [40] DAVID B T. Residence time distribution in twin-screw extruders[J]. *Polymer Engineering and Science*, 1975, 15(6): 437-443.
- [41] APRUZZESE F, PATO J, BALLE S T, et al. In-line measurement of residence time distribution in a co-rotating twin-screw extruder [J]. *Food Research International*, 2003, 36(5): 460-467.
- [42] PUAUX J P, BOZGA G, AINSER A. Residence time distribution in a corotating twin-screw extruder: A review[J]. *Chemical Engineering Science*, 2000, 55(9): 1 641-1 651.
- [43] WOLF D, RESNICK W. Residence Time distribution in real systems[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1963, 2(4): 287-293.
- [44] WOLF D, WHITE D H. Experimental study of the residence time distribution in plasticating screw extruders[J]. *Aiche Journal*, 1976, 22(1): 122-131.
- [45] YEH A I, JAW Y M. Predicting residence time distributions in a single screw extruder from operating conditions[J]. *Journal of Food Engineering*, 1999, 39(1): 81-89.
- [46] YU Liang, MENG Yang, RAMASWAMY H S, et al. Residence time distribution of soy protein isolate and corn flour feed mix in a twin-screw extruder[J]. *Journal of Food Processing & Preservation*, 2014, 38(1): 573-584.
- [47] 郎珊珊. 双螺杆构型及挤压参数的建模与试验研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014: 12-34.
- [48] 徐恩波. 加酶挤压大米品质调控机理及其黄酒应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019: 47-59.
- [49] 吕庆云, 郭吉, 贾喜午, 等. 双螺杆挤压过程中食品成分对其停留时间分布影响的研究[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(5): 141-146.
- [50] 陈锋亮. 植物蛋白挤压组织化过程中水分的作用[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [51] CHEN Feng-liang, WEI Yi-min, ZHANG Bo, et al. System parameters and product properties response of soybean protein extruded at wide moisture range[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 96(2): 208-213.
- [52] KUMAR A, GANJYAL G M, JONES D D, et al. Modeling residence time distribution in a twin-screw extruder as a series of

ideal steady-state flow reactors [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 84(3): 441-448.

[53] SUE S L, SULAIMAN R, SANNY M, et al. Effect of extrusion barrel temperatures on residence time and physical properties of various flour extrudates[J]. International Food Research Journal, 2015, 2(3): 965-972.

[54] 范玉艳, 段方方, 马成业, 等. 添加淀粉酶脱胚玉米的挤压停留时间分布和淀粉转化率研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(11): 59-63, 69.

[55] 宋超洋. 小米速溶粉的制备及其性质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016: 18-27.

[56] 白兴达, 于双双, 马成业, 等. 挤压机螺杆构型对玉米胚剪切强度的影响[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(15): 6-11.

[57] 张新超, 张福国, 史媛媛. 不同螺杆构型对挤出机性能影响的试验研究[J]. 橡塑技术与装备, 2016, 42(4): 3-4, 40.

[58] 高健. 同向双螺杆柔和剪切元件的混合性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2012: 4-11.

[59] 耿孝正. 啮合同向双螺杆挤出过程不同功能段的螺杆构型和整根螺杆的组合设计[J]. 中国塑料, 2000, 14(8): 68-73.

[60] 王远, 马秀清. 新型捏合盘元件不同螺杆构型混合性能的数字模拟[J]. 橡塑技术与装备, 2016, 42(12): 63-67.

[61] CHUANG C C, YEH A I. Effect of screw profile on residence time distribution and starch gelatinization of rice flour during single screw extrusion cooking[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 63(1): 21-31.

[62] FICARELLA A, MILANESE M, LAFORGIA D. Numerical study of the extrusion process in cereals production: Part I fluid-dynamic analysis of the extrusion system[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 73(2): 103-111.

[63] 韦鸿钰, 朱立学, 周玉梅, 等. 双螺杆食品挤压流动过程数值模拟[J]. 机电产品开发与创新, 2014, 27(4): 90-92.

[64] 张先明, 李广赞, 冯连芳, 等. 双螺杆挤出机中局部停留时间分布研究 [J]. 高校化学工程学报, 2008, 22(3): 435-440.

[65] FILLI K B, NKAMA I, JIDEANI V A, et al. Effect of process variables on the hydration properties and acceptability of extruded millet-soybean blends for fura manufacture[J]. British Food Journal, 2013, 115(6): 884-898.

[66] 赵学伟, 魏益民, 张波. 小米—豆粕混合物在双螺杆挤压机内的停留时间分布及其模拟[J]. 食品工业, 2012, 33(9): 147-150.

[67] IWE M O, ZUILICHEM D J V, NGODDY P O, et al. Residence time distribution in a single-screw extruder processing soy-sweet potato mixtures[J]. LWT-Food Science and Technology, 2001, 34(7): 478-483.

[68] 刘骏. 淮山全粉挤压膨化特性的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015: 8-23.

[69] 刘淑婷, 王颖, 沈琰, 等. 豆基杂粮米稀挤压膨化工艺优化[J]. 食品与机械, 2019, 35(10): 218-222.

[70] YEH A I, HWANG S J. Effect of screw profile on extrusion-cooking of wheat flour by a twin-screw extruder [J]. International Journal of Food Science and Technology, 1992, 27(5): 557-563.

[71] 张波, 魏益民, WOLFGANG Sietze, 等. 双螺杆挤压螺杆元件类型对扭矩和压力的影响[J]. 农业机械学报, 2007(9): 77-80.

[72] MANEPALLI P H, DOGAN H, MATHEW J M, et al. Mathematical modeling of flow behavior and cell structure formation during extrusion of starchy melts [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 198: 7-16.

[73] CHUANG C C, YEH A I. Effect of screw profile on residence time distribution and starch gelatinization of rice flour during single screw extrusion cooking[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 63(1): 21-31.

[74] GAO Jun, WALSH G C, BIGIO D, et al. Residence-time distribution model for twin-screw extruders[J]. Aiche Journal, 1999, 45(12): 2 541-2 549.

[75] 张余. 花生蛋白挤压组织化技术及其机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007: 36-43.

信息窗

加拿大就食品调味品中食品添加剂的使用征求意见

2020 年 4 月 21 日,加拿大卫生部发布消息,就食品调味品中食品添加剂的使用进行意见征求。

加拿大拟修订清单,规定这些调味制剂中允许使用哪些着色剂、防腐剂和乳化剂,以及它们的最大使用量。意见征求内容如下:

(1) 目前符合提取物和香精或调味成分标准用于调味制剂的着色剂、防腐剂和乳化剂的清单。

(2) 每种食品添加剂在调味制剂中的使用目的(需

要解释其使用目的而不是简单地提及添加剂的功能类别)。

(3) 调味制剂中使用的食品添加剂的类型和最高使用水平,如果使用水平为 1%或高于 1%,则以重量百分比表示;如果使用水平低于 1%,则以百万分率表示。相关意见需在 2020 年 6 月 20 日前提交。

(来源: <http://news.foodmate.net>)