

农产品可控瞬时压差加工技术研究进展

易建勇¹, 毕金峰¹, 彭健¹, Tamara Allaf², Karim Allaf³

(1. 中国农业科学院农产品加工研究所, 农业部农产品加工综合性重点实验室, 北京 100193)

(2. Laboratory of Engineering Science for Environment LaSIE-UMR-CNRS 7356, University of La Rochelle, La Rochelle 17042, France) (3. ABCAR-DIC Process, BP12053 La Rochelle Cedex01 17010, France)

摘要: 可控瞬时压差加工技术 (Instant controlled pressure drop processing, 法语为 Détente instantan e contrôlée, 简称 DIC), 又称变温压差膨化技术, 于 1988 年由法国学者发明。DIC 加工技术的原理是基于将处理仓内高压 (或大气压力) 瞬时下降到真空状态, 利用这一过程中产生的热力学效应使物料内部水分快速闪蒸, 实现体积膨胀或质构改性等目的。经 DIC 技术处理后的农产品可获得多孔的组织结构和酥脆的口感。此外, DIC 技术的优点还体现在色泽、风味, 以及较低的生产成本等方面。本文综述了国内外可控瞬时压差加工技术的研究和应用现状, 重点介绍了 DIC 在农产品质构改性、化学成分提取、杀菌消毒、食物脱敏、粮食干燥过程减损、生物能源制造、生物大分子改性和农产品干燥等方面的研究进展, 分析了国内可控瞬时压差加工技术存在的主要问题, 并对该技术未来的发展趋势进行了展望。

关键词: 质构改性; 提取; 膨化; 干燥; 杀菌; 瞬时压差

文章编号: 1673-9078(2017)5-311-318

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.5.050

Advances of Instant Controlled Pressure Drop (DIC) Technique in Agro-product Processing

YI Jian-yong¹, BI Jin-feng¹, PENG Jian¹, Tamara Allaf², Karim Allaf³

(1. Institute of Food Science and Technology, CAAS, Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China) (2. Laboratory of Engineering Science for Environment LaSIE-UMR-CNRS 7356, University of La Rochelle, La Rochelle 17042, France) (3. ABCAR-DIC Process, BP12053 La Rochelle Cedex01 17010, France)

Abstract: A process called instant controlled pressure drop (Détente instantan e contrôlée in French, DIC), also known as explosion puffing (EP) at variable temperature and pressure, was developed by French researchers in 1988. The principle of this process is based on a thermomechanical effect induced by a rapid pressure drop from high pressure (or ambient pressure) to a vacuum, leading to the instant evaporation of water, which results in volume expansion or texture modification. DIC-processed agro-products can have a porous structure and a pleasant crispy taste. Additionally, other favorable characteristics of DIC-processed products are found in terms of color, flavor, and competitive production costs. The current status of international and domestic research and applications of the DIC process are reviewed in this paper, which focused on the research progress of the use of DIC in the agro-products in terms of texture modification, extraction of chemical components, sterilization, food desensitization, loss reduction in drying process, bioenergy production, modification of biological macromolecules, drying, and other factors. The main issues regarding the applications of DIC technique in China as well as the trends and outlook of the future DIC development are discussed.

Key words: texture modification; extraction; puffing; drying; sterilization; instant pressure drop

可控瞬时压差加工技术是在传统压差膨化技术上

收稿日期: 2016-01-12

基金项目: 十三五国家重点研发计划项目 (2016YFD0400704); 农业部公益性行业 (农业) 科研专项 (201503142)

作者简介: 易建勇 (1983-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 果蔬加工技术和品质调控

通讯作者: 毕金峰 (1970-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 果蔬营养与加工工程理论与技术

建立起来的一种农产品加工技术。传统的压差膨化技术作为一种重要的休闲食品加工技术, 长期被用于玉米、稻米等农产品的膨化。近年来, 随着人们对果蔬脆片等休闲食品的需求不断上升, 对产品品质要求不断提高, 传统的果蔬脆片加工方式 (热风干燥、太阳能干燥、油炸) 因其产品品质较差, 含油率高已难以满足市场需求。可控瞬时压差膨化技术作为一种新型的休闲食品加工技术, 不但可用于生产高品质的果蔬

脆片等膨化休闲食品，还逐渐发展成为一种具有多用途的农产品加工技术。

最早的关于压差膨化的历史记载可追溯至宋代，范成大在《吴郡志·风俗》中记载“爆糯穀於釜中，名曰孛娄，亦曰米花”。古人将糯米置于密封反应釜中加热升压，瞬间泄压至常压得糯米花，成为了最早的压差加工产品。而农产品压差加工技术的具体研究则可追溯至上世纪 50 年代。1950 年，Harrington 等^[1]将马铃薯片加热至 163 °C，随后泄压至常温，开发了第一代膨化技术。1977 年至 1984 年间，以美国农业部东部研究中心（USDA-ARS）Sullivan 教授为代表的科学家首次提出了半连续性瞬时压差加工技术，并发明了相应的半连续性压差膨化设备，使单缸产量提高至 200~450 kg/h^[2,3]。装备和工艺上的改进使得该技术很快得以商业化应用，但这种半连续性的瞬时压差膨化技术与第一代压差膨化的原理类似，所用设备的核心部分也都是基于“炮缸系统”（gun system）。“炮缸系统”是基于一个一端封闭的腔体，其开口部分可以在舱内压力达到设定范围时瞬时爆开，使腔内物料经历一个由高压至常压的瞬时压差处理。90 年代开始，基于该原理的压差膨化技术在中国也逐渐得以商业化应用。1988 年，法国学者 Allaf 发明了第三代压差膨化技术-可控瞬时压差加工技术（Instant controlled pressure drop processing，法语为 Détente instantannée contrôlée，简称 DIC）^[4]。经过 DIC 处理后的农产品一方面可获得多孔酥脆的质构特征；另一方面，DIC 技术的优势还体现在对物料营养成分、色泽、风味及复水性等品质的保持或改善^[5]。

1 基本原理

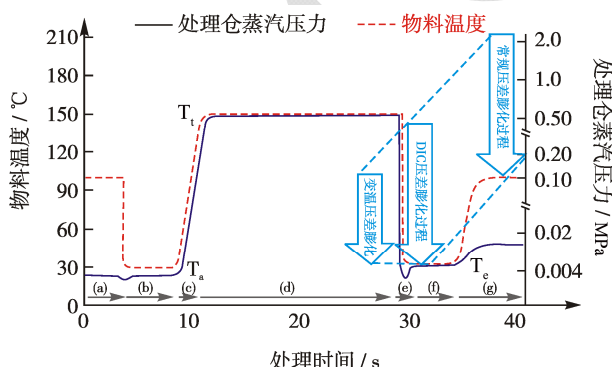


图 1 可控瞬时压差处理过程中温度和压力的变化

Fig.1 Evolution of temperature and pressure during the DIC process

注：a，表示起始大气压力；b，表示处理仓抽真空；c，表示处理仓通入蒸汽升温升压；d，表示物料平衡阶段；e，表示瞬时泄压至真空；f，表示真空压力下平衡；g，表示恢复大

气压力。

可控瞬时压差加工技术是指物料在特定的压力、温度和含水量状态下，瞬间经历由高压（或大气压）至低压（真空状态）的过程，利用气体的瞬间相变和热压效应产生的膨胀力，促使物料内部水分瞬间汽化并向外闪蒸，实现改变物料组织结构、杀菌、脱水、脱敏和提取等目的^[4]。DIC 加工技术与前两代压差加工技术不同，主要体现在以下几个方面：首先，常规压差技术膨化后仅降压至大气压状态，而 DIC 加工技术通过蒸汽加压和降压至真空状态（0.3~0.5 kPa）加大了物料在泄压瞬间经历的压差变化（0.1~0.6 MPa）（图 1），从而加剧了物料内部水分的闪蒸强度^[6]。瞬间水分闪蒸强度加剧，带来的结果是更大的体积膨胀和形成更酥松的多孔结构。其次，通过降压至真空状态，增加压差强度加大了水分蒸发的动力；当预期的水分蒸发量相同时，DIC 可以通过采用较低的膨化温度实现，这对于一些热敏性的果蔬原料是一个明显的优势。再者，更多的水分闪蒸将带走更多的蒸发潜热，因此，DIC 技术处理后样品的温度可瞬间下降至接近环境温度（30~40 °C），这使得产品很快硬化并得以继续保持膨化后的组织状态^[6]。

国内常见的变温压差膨化干燥技术（Explosion puffing drying, EPD），其原理和可控瞬时压差加工技术类似，都基于降压至真空压力^[7-10]。两者的区别主要在于变温压差膨化工艺中，普遍采用蒸汽管道间接加热物料，因此初始压力仅略高于大气压（<0.15 MPa）。虽然压差减小使得膨化时闪蒸强度降低和闪蒸水分相对较少，但对于一些热敏性或不能接触饱和蒸汽的原料却非常有利。

2 可控瞬时压差加工技术在农产品加工中的应用

应用

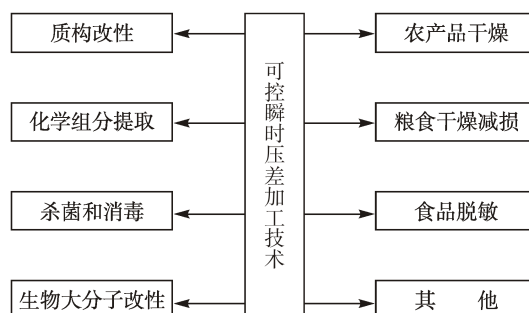


图 2 可控瞬时压差加工技术在农产品加工中的用途
Fig.2 Applications of DIC technology in agro-product processing

针对可控瞬时压差加工技术,近年来国内外学者以不同农产品为原料开展了大量研究。如图2所示,采用该技术处理农产品的目的主要包括质构改性、化学组分提取、杀菌和消毒、生物能源制造、粮食干燥减损、食品脱敏、干燥以及生物大分子改性等。许多上述应用是基于DIC处理使物料形成了多孔微结构,从而改变了物料的吸湿性、溶液渗透特性和水分扩散速率等物理性质,进而影响宏观质构品质、化学组分提取率等特性。其次则是压差膨化瞬间对组织细胞的损伤,以及对生物大分子物质的结构影响,如果胶、纤维素和蛋白质等,这些影响与DIC的杀菌效果、生物能原制造和食品脱敏等应用相关。

2.1 质构改性

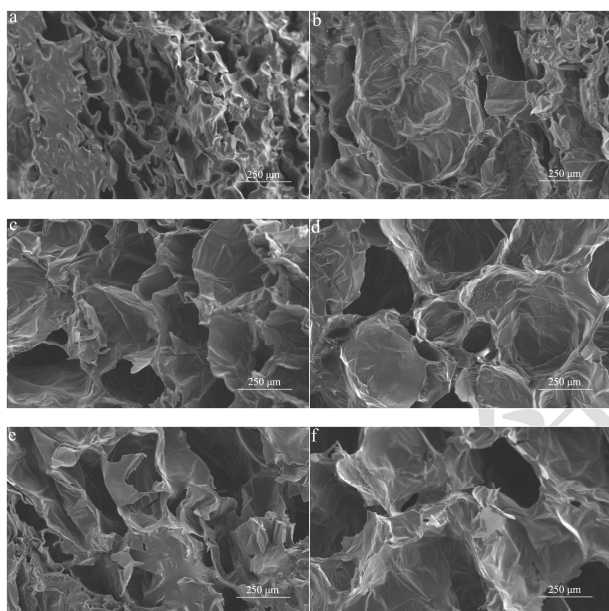


图3 压差膨化次数对苹果脆片微观结构的影响

Fig.3 Effects of the number of puffing times on the microstructure of apple chips

注: a表示0次; b表示1次; c表示3次; d表示5次; e表示7次; f表示9次。

利用可控瞬时压差加工技术对农产品进行质构改性,主要目的在于获得疏松的多孔结构和酥脆的口感。国内外学者在DIC质构改性领域开展了大量研究,其对象包括果蔬、谷物、肉制品和乳制品等。特别是采用DIC技术处理苹果^[11-13]、草莓^[14]、枣^[5,8]、芒果^[15]、桃^[16]、香蕉^[17]、哈密瓜^[18,19]、柑橘^[20]、菠萝蜜^[10]、火龙果^[21]、番木瓜^[22]和梨^[23]等水果,以及马铃薯^[24]、甘薯^[25,26]和洋葱^[27]等蔬菜。利用DIC所制得的果蔬脆片口感酥脆,同时营养和色泽保持较好。

影响DIC质构改性的因素很多,其中最重要的就是预处理后半干原料的初始水分含量。Louka等^[28]研

究了初始水分含量10~40% (dry basis, db), 处理压力0.2~0.6 MPa 和处理后物料的冷却速度对质构改性效果有显著影响; 在较优的参数下, 马铃薯、胡萝卜和洋葱片的体积膨胀率可分别达到2.1、2.4和2.8。易建勇等^[11]研究了初始水分含量、DIC处理次数对苹果脆片体积膨化率、微观结构和质构品质的影响, 研究发现初始水分含量决定产品的膨化效果; 水分含量过高情况下膨化效果较差, 而当初始水分含量过低时, 由于多孔微观结构已获得较高的刚性, 继续进行DIC膨化则会导致这些刚性结构被破碎和崩塌(图3)。一般情况下, 如采用蒸汽加压, 物料的初始干基水分含量应控制在30%左右; 而当采用非蒸汽加热时, 初始干基水分含量可提高至50~100%。其次, 预处理方式也可通过改变半干原料理化特性而影响最终产品的质构品质, 常见的预处理方式包括渗透处理、热烫处理、冻融处理、护色处理等^[15,26,29,30]。再者, 预干燥方式对半干原料在DIC过程中的质构改性效果也有明显的影响^[10]。此外, 样品升温(平衡)时间^[31]、压差处理前后压力、压差处理后样品温度和降温速度^[28], 以及后续干燥方式等因素也会影响DIC的质构改性效果。此外, DIC作为预处理手段还可有效保持解冻后苹果片硬度, 而这一效果和半干苹果片的水分含量关系密切^[32]。

2.2 化学组分提取

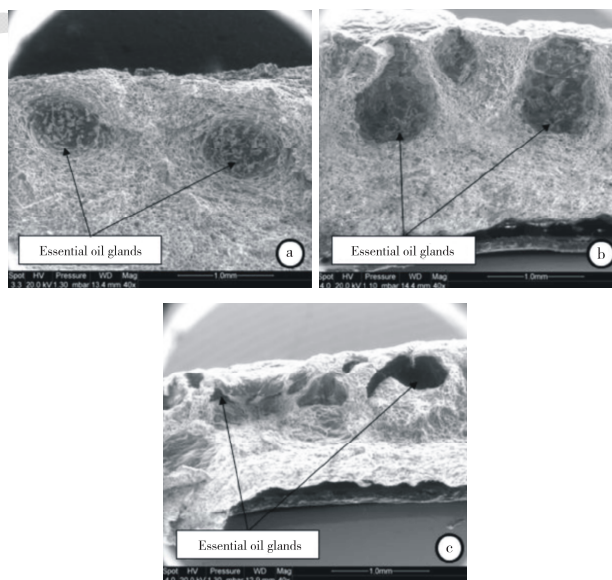


图4 瞬时压差加工技术对未处理(a) DIC处理(b)和传统溶剂浸提后(c)橙皮油脂腺微观结构的影响

Fig.4 Effect of DIC on the microstructures of oil glands in orange peel (a) untreated; (b) DIC treated; (c) extracted using traditional solvent^[34]

通过在DIC处理设备真空罐出口处加上一组冷凝

系统, DIC 处理技术则可用于农产品中挥发性化学成分的提取。这一技术由于经历了物料与溶剂混合、DIC 处理和挥发性成分分离三个阶段,因此也称为“三段式提取”(Three-poles process)^[33]。利用 DIC 技术处理柑橘皮,橙皮精油的提取得率可提高至 $(1.66\pm 0.15)\times 10^{-2}\text{g/g db}$ ^[34]。常规溶剂提取过程中,橙皮的油脂腺易发生皱缩和塌陷,而 DIC 处理可改变橙皮的微观结构,使油脂腺膨胀利于溶剂的渗透和精油的扩散(图 4)。DIC 处理的次数影响挥发性成分的提取率,Kristiawan 等^[35]研究表明经 8 次 DIC 循环处(0.6 MPa)后,依兰香(*Cananga odorata*)干花精油的提取率达到最高。此外, DIC 处理也可用于非挥发性活性成分的提取, Amor 等^[36]研究发现, DIC 处理有效增加了马来西亚玫瑰茄(*Hibiscus sabdariffa*)中花青素的提取率,而这一效果归因于 DIC 处理使花青素的扩散率提高了 10.3~45.8%。Mkaouar 等^[37]发现传统工艺提取橄榄叶中多酚物质的提取率为 49.84 mg/g db,而当原料经 DIC 处理后,最佳提取率可达到 248.6 mg/g db。

2.3 粮食干燥过程减损

水稻加工过程中,为了延长贮藏时间和控制产品质量,一般需将其水分含量从 28~38%降低至 12%左右。目前,常采用热风干燥或晾晒进行脱水,经这一过程,稻米的破损率在 28~42%之间。采用 DIC 技术处理大米,可将碎米率控制在 3%以内^[38]。此外,热风干燥的稻米,一般最佳煮制时间为 17~20 min,超过该时间则会影响米饭质量。而经 DIC 处理后的最佳煮制时间降低至 6 min,最佳煮制时间的范围较大(6~18 min),因此更容易控制煮制后米饭的质量^[39]。目前,法国 ABCar-DIC Process 公司生产的用于粮食干燥减损的设备产能已达到 50 t/h,这使得 DIC 技术在该领域具备了商业化应用的可能。

2.4 杀菌和消毒

许多传统的农产品干制过程工艺都比较粗放,如晾晒、热风干燥等。经传统工艺脱水的农产品一般不附加额外的杀菌工艺,如葡萄干和哈密瓜干等。然而,微生物污染却是一个不能忽视的安全隐患。针对固态农产品的杀菌技术较少,辐照技术就是其中一种^[40]。然而,如要达到较好的杀菌效果,所需辐照的剂量强度需要达到 10~50 kGy。目前,世界卫生组织仅认可剂量在 10 kGy 以下的农产品无需再进行毒理学验证,加上许多国家对辐照食品的限制,使得该技术的应用范围受限^[41]。DIC 处理可作为固态食品有效的杀菌手段,其原理是通过瞬间压力差造成微生物营养体、芽

孢细胞壁或细胞器的物理损伤,进而达到将其杀灭的效果。Allaf 等^[4]研究表明,经过泄压速度为 3 MPa/s 的 DIC 处理后,芽孢(*Bacillus stearothermophilus*)形态观察表明其已遭受严重的物理损伤(图 5)。由于 DIC 杀菌主要基于物理损伤而非热效应,因此对物料的营养和风味影响较小。目前, DIC 对固态和粉状物料的杀菌效果已在果蔬、肉制品、藻类、香料和调味品等上得到验证。特别是,当采用高压二氧化碳(1.5~5.5 MPa)替换 DIC 处理仓内的高压蒸汽,其其对大肠杆菌、酵母菌、粪肠球菌的杀菌效果进一步增强^[42]。此外,通过多次循环 DIC 处理,也可以增加杀菌效果,特别是针对细菌芽孢的灭活。

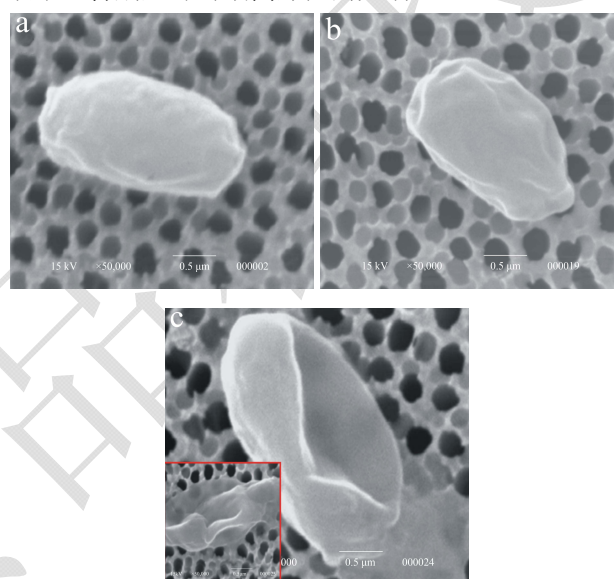


图 5 显微状态下芽孢形态结构

Fig.5 Morphology of *Bacillus stearothermophilus* spores^[4]

注: a 表示未处理; b 表示 130 °C 处理 30 s; c 表示 DIC 处理。

2.5 食品脱敏

水产品、豆类食品富含蛋白,但也常常含有过敏原。针对过敏人群,脱敏处理是食品加工过程中的重要环节。然而,针对一些固态食品的脱敏技术却仍然缺乏。Cuadrado 等^[43]研究了 DIC 对花生、大豆、扁豆、鹰嘴豆中过敏原蛋白的脱敏效果,结果表明 DIC 处理通过改变过敏原蛋白分子量和空间结构,大幅降低了其在体内与 IgE 抗体结合的能力,特别是经 0.6 MPa 处理后的大豆蛋白已实现完全脱敏。此外, Takács 等^[44]也发现 DIC 对不同原料的脱敏效果不同,例如经 DIC 处理后的烘焙花生,仍然检测到相当强烈的 IgE 介导免疫反应。

2.6 生物大分子改性

固态的胶原蛋白凝胶可用于止血、组织结构再造等用途,但由于其高度的热敏性($\leq 37\text{ }^{\circ}\text{C}$),因此常采用真空冷冻法干燥。采用多次DIC技术干燥胶原蛋白,在保证物料温度低于 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下仅需270 min即可获得表面光滑厚度为 0.13 mm 的胶原蛋白膜^[45]。此外,利用DIC技术不仅可提高核菌葡聚糖干燥速率,同时也可改善产品的复水特性^[46]。

2.7 农产品干燥

DIC处理可作为一种预处理提高农产品的干燥速率。Abdulla等^[47]研究发现,经DIC预处理后,橡木塞在干燥过程中的水分扩散速率由 $4.34\times 10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$ 提高到了 $6.99\times 10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$,相应的干燥能耗也显著降低了。DIC技术也被用于木材和一些工艺品干燥,连续或单次的DIC处理可以提高真空冷冻干燥后期真空脱水的速度,也可防止热风干燥过程中物料的皱缩^[48]。

2.8 其他

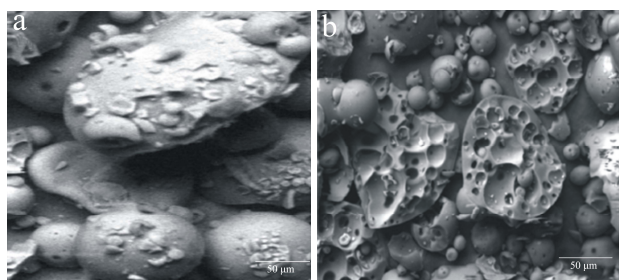


图6 显微状态下DIC处理后的乳清蛋白粉

Fig.6 Microstructure of DIC-treated whey protein powders^[54]

注: a表示喷雾干燥; b表示喷雾干燥-DIC处理。

谷物麸皮富含脂多糖、谷维素、角鲨烯、N-脂酰鞘氨醇、生育酚和 γ -氨基丁酸等活性物质,研究发现,经DIC处理稻米麸皮在发酵后的 γ -氨基丁酸含量提高了近2倍,达到 144.2 mg/g ^[49]。

奶粉等粉状食品的比表面积一般需大于 $200\text{ m}^2/\text{kg}$,与此对应的则是粉体粒径小于 $50\text{ }\mu\text{m}$ 。然而,通过传统喷雾干燥中间加入DIC处理环节,则可打破上述关系,即粒径大于 $50\text{ }\mu\text{m}$ 而比表面积同时也大于 $200\text{ m}^2/\text{kg}$ 。Mounir等^[50]研究发现,在 70 kPa ,利用DIC处理初始水分含量为 $16\%\text{ db}$ 的乳清蛋白粉,可有效将其比表面积增加至约 $300\text{ m}^2/\text{kg}$,同时粉体平均粒径膨大至 $70\text{ }\mu\text{m}$ 。如图6所示,粉体颗粒经DIC处理后获得了多孔的微观结构,这将有利于其溶解性的提高。

Kamal等^[51]利用DIC处理咖啡豆,发现处理后的咖啡豆的烘焙时间明显缩短,同时更易研磨,且咖啡因等活性成分的溶出率增加。针对茶叶的研究也呈现

出类似的结果,即经过DIC处理的茶叶在冷浸时的咖啡因、茶多酚和游离氨基酸等物质的溶出率显著提高^[52]。利用DIC技术处理三文鱼和金枪鱼,可有效改善其复水特性和色泽品质^[53]。此外, Lee等^[54]研究发现,大豆异黄酮经DIC处理后,不同黄酮物质的分布规律与热风 and 烘烤工艺下的明显不同,这一结果提示DIC可能对于特定黄酮化合物的降解或保持具独特的作用。

4 结论

4.1 DIC加工技术已被证实在许多领域具有明显的技术优势和产业应用价值,但目前仍存在几个问题:首先,要提高DIC技术的产业化应用,大型商业化设备的运行参数精密度和自动化程度仍需进一步提高。其次,目前关于DIC处理瞬间的物料传热、传质的研究尚不系统,明确DIC加工技术机理并建立相关模型,将有利于指导其对不同类型产品工艺参数的优化。再者,针对生物大分子改性、生物能源制造、食品脱敏方面的研究才刚刚起步, DIC技术在这些方面是否具有产业应用价值还需进一步探讨。

4.2 展望未来, DIC技术可能在以下方面实现产业化应用:一是果蔬休闲食品方面,随着我国经济社会的发展,人们对健康、方便和安全的果蔬休闲食品需求不断增加, DIC技术生产的苹果、梨等脆片目前已实现产业化,但随着技术和装备的成熟, DIC将在更多的果蔬品种上得到应用;二是粮食干燥减损方面,我国是粮食生产大国,每年干燥加工过程中碎米率带来的损失巨大, DIC在稻米干燥减损上的显著效果可能带来巨大的经济效益;三是化学组分提取方面, DIC技术在挥发性和非挥发性化学组分提取上的优势可能在一些生物活性物质提取领域发挥作用。综上所述, DIC在农产品质构改性、化学成分提取、粮食干燥过程减损、杀菌消毒、食品脱敏、生物大分子改性和木材干燥等方面具有独特的优势,在未来农产品加工产业中将大有可为。

参考文献

- [1] Harrington W O, Griffiths F P. Puffs potatoes [J]. Food Industry, 1950, 22(1872): 2005-2006
- [2] Sullivan J F, Konstance R P, Aceto N C, et al. Continuous explosion-puffing of potatoes [J]. Journal of Food Science, 1977, 42(6): 1462-1463
- [3] Heiland W K, Sullivan J F, Konstance R P, et al. Continuous explosion puffing system [J]. Food Technology, 1977, 31(11): 32

- [4] Allaf T, Allaf K. Instant controlled pressure drop (D.I.C.) in food processing [M]. New York: Springer, 2014
- [5] Du L, Gao Q, Ji X, et al. Comparison of flavonoids, phenolic acids, and antioxidant activity of explosion-puffed and sun-dried Jujubes (*Ziziphus jujuba* Mill.) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(48): 11840-11847
- [6] Mounir S, Allaf T, Mujumdar A S, et al. Swell drying: coupling instant controlled pressure drop DIC to standard convection drying processes to intensify transfer phenomena and improve quality-an overview [J]. Drying Technology, 2012, 30(14): 1508-1531
- [7] 毕金峰,魏益民.果蔬变温压差膨化干燥技术研究进展[J].农业工程学报,2008,24(6):308-312
BI Jin-feng, WEI Yi-min. Review on explosion puffing drying for fruits and vegetables at variable temperature and pressure difference [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(6): 308-312
- [8] 何新益,程莉莉,刘金福,等.膨化温度对冬枣变温压差膨化干燥特性的影响[J].农业工程学报,2011,27(12):389-392
HE Xin-yi, CHENG Li-li, LIU Jin-fu, et al. Effects of puffing temperature on drying characteristics of winter jujube by explosion puffing drying at variable temperature and pressure [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(12): 389-392
- [9] 黄寿恩,李忠海,何新益.果蔬变温压差膨化干燥技术研究现状及发展趋势[J].食品与机械,2013,29(2):242-245
HUANG Shou-en, LI Zhong-hai, HE Xin-yi. Research status and development trends of explosion puffing drying for fruits and vegetables at variable temperature and pressure difference [J]. Food and Machinery, 2013, 29(2): 242-245
- [10] 王萍,易建勇,毕金峰,等.菠萝蜜热风-变温压差膨化干燥工艺研究[J].食品与机械,2015,31(4):218-222
WANG Ping, YI Jian-yong, BI Jin-feng, et al. Study of jackfruit and the technology for hot air-explosion puffing drying [J]. Food and Machinery, 2015, 31(4): 218-222
- [11] Yi J, Zhou L, Bi J, et al. Influence of number of puffing times on physicochemical, color, texture, and microstructure of explosion puffing dried apple chips [J]. Drying Technology, 2015
- [12] Bi J, Wang X, Chen Q, et al. Evaluation indicators of explosion puffing Fuji apple chips quality from different Chinese origins [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 60(2): 1129-1135
- [13] 王雪媛,高琨,陈芹芹,等.苹果片中短波红外干燥过程中水分扩散特性[J].农业工程学报,2015,31(12):275-281
WANG Xue-yuan, GAO Kun, CHEN Qin-qin, et al. Water diffusion characteristics of apple slices during short and medium-wave infrared drying [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(12): 275-281
- [14] Alonzo-Macias M, Montejano-Gaitan G, Allaf K. Impact of drying processes on strawberry (*Fragaria* var. Camarosa) texture: Identification of crispy and crunchy features by instrumental measurement [J]. Journal of Texture Studies, 2014, 45(3): 246-259
- [15] Zou K, Teng J, Huang L, et al. Effect of osmotic pretreatment on quality of mango chips by explosion puffing drying [J]. LWT - Food Science and Technology, 2013, 51(1): 253-259
- [16] Lyu J, Zhou L, Bi J, et al. Quality evaluation of yellow peach chips prepared by explosion puffing drying [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(12): 8204-8211
- [17] Setyoprato P, Fatmawati A, Sutrisna P D, et al. The dehydration kinetics, physical properties and nutritional content of banana textured by instantaneous controlled pressure drop [J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2012, 7(5): 726-732
- [18] 毕金峰,魏益民,王秋,等.哈密瓜变温压差膨化干燥工艺优化研究[J].农业工程学报,2008,24(3):232-237
BI Jin-feng, WEI Yi-min, WANG Di, et al. Optimization of explosion puffing drying technology for Hami melon at variable temperature and pressure difference [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(3): 232-237
- [19] 孟宪军,王秋,毕金峰.哈密瓜变温压差膨化干燥工艺研究[J].食品科学,2007,28(12):183-187
MENG Xian-jun, WANG Di, BI Jin-feng. Explosion puffing drying of Hami-melon at modified temperature and pressure [J]. Food Science, 2007, 28(12): 183-187
- [20] 毕金峰.柑橘变温压差膨化干燥工艺优化研究[J].中国农业大学学报,2008,13(5):40-47
BI Jin-feng. Optimization of explosion puff drying process for citrus at variable temperature and pressure difference [J]. Journal of China Agricultural University, 2008, 13(5): 40-47
- [21] 陈晓旭,易建勇,毕金峰,等.不同联合干燥方式对火龙果粉品质的影响[J].食品与发酵工业,2015,41(1):106-112
CHEN Xiao-xu, YI Jian-yong, BI Jin-feng, et al. Effect of different combined drying methods on the quality characteristics of pitaya powder [J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41(1): 106-112
- [22] 高鹤,易建勇,刘璇,等.响应面法优化番木瓜变温压差膨化

- 干燥工艺[J].食品科学,2014,35(24):51-56
- GAO He, YI Jian-yong, LIU Xuan, et al. Optimization of explosion puffing drying process for papaya at variable temperatures and pressure difference [J]. Food Science, 2014, 35(24): 51-56
- [23] 刘志勇,吴茂玉,葛邦国,等.梨低温气流膨化干燥工艺研究[J].食品工业,2012,33(9):59-63
- LIU Zhi-yong, WU Mao-yu, GE Bang-guo, et al. Explosion puffing drying of pear at low temperature and air current [J]. The Food Industry, 2012, 33(9): 59-63
- [24] Louka N, Allaf K. New process for texturizing partially dehydrated biological products using controlled sudden decompression to the vacuum: application on potatoes [J]. Journal of Food Science, 2002, 67(8): 3033-3038
- [25] 曹菲菲,梁鹏,暴悦梅,等.预处理对红薯丁变温压差膨化干燥的影响[J].食品研究与开发,2013,34(13):76-78
- CAO Fei-fei, LIANG Peng, BAO Yue-mei, et al. Effect of different pretreatments on the product effect of explosion puffing for sweet potato butyl [J]. Food Research and Development, 2013, 34(13): 76-78
- [26] 郭婷,邓放明,何新益.预处理方式对甘薯变温压差膨化干燥产品品质的影响[J].食品与机械,2012,28(6):202-204
- GUO Ting, DENG Fang-ming, HE Xin-yi, et al. Effect of different pretreatments methods on the product quality of explosion puffing drying for sweet potato [J]. Food and Machinery, 2012, 28(6): 202-204
- [27] Albitar N, Mounir S, Besombes C, et al. Improving the drying of onion using the instant controlled pressure drop technology [J]. Drying Technology, 2011, 29(9): 993-1001
- [28] Louka N, Allaf K. Expansion ratio and color improvement of dried vegetables texturized by a new process "controlled sudden decompression to the vacuum": Application to potatoes, carrots and onions [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 65(2): 233-243
- [29] Bi J, Yang A, Liu X, et al. Effects of pretreatments on explosion puffing drying kinetics of apple chips [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 60(2): 1136-1142
- [30] 黄宗海,何新益,王佳蕊,等.预处理方式对胡萝卜变温压差膨化干燥品质的影响[J].食品与机械,2011,27(1):124-126
- HUANG Zong-hai, HE Xin-yi, WANG Jia-rui, et al. Effect of pre-treatment on puffing carrots properties by explosion puffing drying at different temperature and pressure [J]. Food and Machinery, 2011, 27(1): 124-126
- [31] Louka N, Juhel F, Allaf K. Quality studies on various types of partially dried vegetables texturized by controlled sudden decompression: General patterns for the variation of the expansion ratio [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 65(2): 245-253
- [32] Said L B H, Bellagha S, Allaf K. Optimization of instant controlled pressure drop (DIC)-assisted dehydrofreezing using mechanical texture measurements versus initial water content of apple [J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(5): 1102-1112
- [33] ALLAF T. Method for intermittent solvent extraction: France, WO2015162393 A1 [P] 2015
- [34] Allaf T, Tomao V, Besombes C, et al. Thermal and mechanical intensification of essential oil extraction from orange peel via instant autovaporization [J]. Chemical Engineering and Processing, 2013, 72(10): 24-30
- [35] Kristiawan M, Sobolik V, Allaf K. Isolation of Indonesian cananga oil using multi-cycle pressure drop process [J]. A Journal of Chromatography A, 2008, 1192(2): 306-318
- [36] Amor B B, Allaf K. Impact of texturing using instant pressure drop treatment prior to solvent extraction of anthocyanins from Malaysian Roselle (*Hibiscus sabdariffa*) [J]. Food Chemistry, 2009, 115(3): 820-825
- [37] Mkaouer S, Bahloul N, Gelicus A, et al. Instant controlled pressure drop texturing for intensifying ethanol solvent extraction of olive (*Olea europaea*) leaf polyphenols [J]. Separation and Purification Technology, 2015, 145: 139-146
- [38] Cong D T, Al Haddad M, Rezzoug Z, et al. Dehydration by successive pressure drops for drying paddy rice treated by instant controlled pressure drop [J]. Drying Technology, 2008, 26(4): 443-451
- [39] Pilatowski I, Mounir S, Haddad J, et al. The instant controlled pressure drop process as a new post-harvesting treatment of paddy rice: impacts on drying kinetics and end product attributes [J]. Food and Bioprocess Technology, 2010, 3(6): 901-907
- [40] Wei M, Zhou L, Song H, et al. Electron beam irradiation of sun-dried apricots for quality maintenance [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2014, 97(6): 126-133
- [41] Farkas J, Mohácsi-Farkas C. History and future of food irradiation [J]. Trends in Food Science & Technology, 2011, 22(2): 121-126
- [42] Debs-Louka E, Louka N, Abraham G, et al. Effect of compressed carbon dioxide on microbial cell viability [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, 65(2): 626-631
- [43] Cuadrado C, Cabanillas B, Pedrosa M M, et al. Effect of

- instant controlled pressure drop on IgE antibody reactivity to peanut, lentil, chickpea and soybean proteins [J]. *International Archives of Allergy and Immunology*, 2011, 156(4): 397-404
- [44] Takács K, Guillamon E, Pedrosa M M, et al. Study of the effect of instant controlled pressure drop (DIC) treatment on IgE-reactive legume-protein patterns by electrophoresis and immunoblot [J]. *Food and Agricultural Immunology*, 2014, 25(2): 173-185
- [45] Maache-Rezzoug Z, Rezzoug S A, Allaf K. Development of a new drying process - dehydration by cyclical pressure drops (DDS): Application to the collagen gel [J]. *Drying Technology*, 2002, 20(1): 109-129
- [46] Maache-Rezzoug Z, Rezzoug S A, Allaf K. Kinetics of drying and hydration of the scleroglucan polymer. A comparative study of two conventional drying methods with a new drying process: Dehydration by successive pressure drops [J]. *Drying Technology*, 2001, 19(8): 1961-1974
- [47] Abdulla G, Belghit A, Allaf K. Impact of instant controlled pressure drop treatment on moisture adsorption isotherm of cork granules [J]. *Drying Technology*, 2009, 27(2): 237-247
- [48] Sanya E A, Rezzoug S A, Allaf K. A new method for drying waterlogged wooden artefacts: Comparison of cyclical pressure drops with conventional methods [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2003, 81(A9): 1243-1249
- [49] Wang J, Chen G, Han Y, et al. Enhancement of the yield of γ -aminobutyric acid by *Aspergillus oryzae* and antioxidant activities of rice bran through explosion puffing processing [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2014, 49(5): 1420-1424
- [50] Mounir S, Allaf K. Three-stage spray drying: new process involving instant controlled pressure drop [J]. *Drying Technology*, 2008, 26(4): 452-463
- [51] Kamal I M, Sobolik V, Kristiawan M, et al. Structure expansion of green coffee beans using instantaneous controlled pressure drop process [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2008, 9(4): 534-541
- [52] He X, Liu J, Huang Z. Preparation of cold brew tea by explosion puffing drying at variable temperature and pressure [J]. *Drying Technology*, 2011, 29(8): 888-895
- [53] Haddad J, Juhel F, Louka N, et al. A study of dehydration of fish using successive pressure drops (DDS) and controlled instantaneous pressure drop (DIC) [J]. *Drying Technology*, 2004, 22(3): 457-478
- [54] Lee S, Lee J. Effects of oven-drying, roasting, and explosive puffing process on isoflavone distributions in soybeans [J]. *Food Chemistry*, 2009, 112(2): 316-320