

动态高压处理对牛乳中生物活性物质的影响

Effects of dynamic high-pressure processing on bioactive components of milk

艾正文^{1,2,3} 徐致远^{1,2,3} 叶景锦^{1,2,3}

AI Zheng-wen^{1,2,3} XU Zhi-yuan^{1,2,3} YE Jing-jin^{1,2,3}

(1. 乳业生物技术国家重点实验室, 上海 200436; 2. 上海乳业生物工程技术研究中心, 上海 200436; 3. 光明乳业股份有限公司乳业研究院, 上海 200436)

(1. State Key Laboratory of Dairy Biotechnology, Shanghai 200436, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Dairy Biotechnology, Shanghai 200436, China; 3. Dairy Research Institute, Bright Dairy & Food Co., Ltd., Shanghai 200436, China)

摘要:牛乳中含有乳铁蛋白、免疫球蛋白等多种有益身体健康的生物活性成分,在加工过程中如何降低其损失一直是重点关注的方向。动态高压处理技术又称超高压均质(UHPH),是一种较为新颖的加工技术手段之一。文章从美拉德反应产物、乳铁蛋白和免疫球蛋白等生物活性成分保留以及维生素损失等多个维度,总结了超高压均质在牛乳加工过程中的热负荷强度和关键营养成分保留方面的相关研究进展,并对超高压均质在乳制品加工领域的发展方向进行了展望。

关键词:动态高压处理; 高压均质; 牛乳; 活性物质; 维生素

Abstract: Milk contains a variety of bioactive ingredients, such as lactoferrin and immunoglobulin, which are beneficial to health. Reducing the loss of these proteins during processing has always been the focus of attention. Dynamic high-pressure processing technology, also known as ultra-high-pressure homogenization (UHPH), is one of the relatively novel processing technology means. In this review, the research progress of the heat load intensity and the retention of key nutrients in the processing of dairy products were summarized from the aspects of Maillard reaction products, lactoferrin, immunoglobulin and other bioactive ingredients and vitamin loss. Moreover, the development direction of ultra-high-pressure homogenization in dairy product processing was prospected.

Keywords: dynamic high-pressure processing; high-pressure

homogenization; milk; bioactive components; vitamin

牛乳中含有人体所需的蛋白质、碳水化合物、脂肪以及矿物质和维生素等营养物质,其中的乳铁蛋白、免疫球蛋白等具有生物活性成分^[1]。牛乳的 pH 值接近中性,是微生物繁殖的良好载体,因此必须通过有效的手段杀灭微生物才能保证食品的安全性。巴氏杀菌和超高温杀菌作为乳制品工业中传统的加热杀菌方式,可以将牛乳的保质期延长至几天或几个月。传统的加热杀菌方式简单易行,但牛乳在加工过程中所受的热伤害较大,会造成牛乳营养物质流失以及风味变化等问题^[2]。高压均质在乳品加工中作为一种颗粒微粒化手段,在减少脂肪球粒径、防止脂肪上浮^[3]等方面被广泛运用,常用的均质压力为 18~25 MPa。当均质压力 > 200 MPa 时,超高的均质压力带来的剪切、湍流和空化效应急剧增加,从而使得超高压均质(UHPH)替代传统加热杀菌成为可能^[4-6];当均质压力为 300 MPa,进样温度为 75 °C 时,生牛乳经超高压均质后可以达到无菌状态^[7]。目前,超高压均质研究多集中在对食品中的微生物杀灭效果评价上,忽略了其对牛乳等食品中营养成分保留方面的研究。文章拟总结超高压均质在牛乳加工过程中的热损伤及关键活性营养物质的保留情况,旨在为超高压均质在乳制品加工领域的应用提供依据。

1 动态高压处理对牛乳的热损害

乳制品在加工处理过程中,为了保证食品的安全性通常采用加热的方式升温至 65~150 °C,并维持数秒至数分钟^[8]。热处理虽然可以杀死微生物达到延长产品货架期的目的,但另一方面较高的热处理负荷可能会造成乳制品在加工过程中产生具有潜在危害的化合物并造成

基金项目:上海乳业生物工程技术研究中心(编号:19DZ2281400)

作者简介:艾正文(1992—),男,光明乳业股份有限公司工程师,硕士。E-mail: aizhengwen_neau@163.com

收稿日期:2022-10-21 改回日期:2023-03-22

营养损失^[9-10]。超高压均质虽然不属于传统的加热处理方式,但是流体通过均质机狭小的缝隙后会产生巨大的剪切和空化效应,从而导致流体瞬间发生温度激增。研究^[11-12]表明,均质压力每增加 100 MPa,物料温度可以瞬间增加 16~20 ℃。均质时温度的增加同样会导致牛乳在加工过程中发生美拉德反应,而美拉德反应产物可以间接反映牛乳受到的热损伤程度。乳果糖以及作为美拉德反应重要产物的糠醛类化合物(糠氨酸、5-羟甲基糠醛、糠醛、2-呋喃甲基酮和甲基糠醛)含量与乳制品热处理程度密切相关^[13]。邢倩倩等^[14-15]基于不同热处理条件下糠醛类化合物含量的变化规律,构建了以糠醛和 5-羟甲基糠醛为基础的标志物用以预测牛乳加工的热处理参数。Liu 等^[16]研究表明牛乳随着均质时温度和压力的增加,其在 330 nm 处的荧光吸收强度具有一定的热累积效应,从而提示有美拉德反应产物产生。当均质压力为 200~300 MPa(进样温度为 30,40 ℃)时,其微生物杀灭效果与高温巴氏杀菌的基本相同(90 ℃,15 s)^[17]。与传统热处理方式相比,牛乳在超高压均质时受到的热负荷更低,当均质压力为 300 MPa(进样温度 40 ℃)时,非酶促反应褐变吸光值以及 5-羟甲基糠醛等产物含量均低于高温短时杀菌(90 ℃,15 s)的^[18]。此外,利用固相微萃取技术对经超高压均质后的样品挥发性成分进行分析^[19]表明,采集到的挥发性物质中醛、酮以及氧化异味成分含量低于传统热处理方式的,因此超高压均质在替代热处理和牛乳风味改良方面存在潜力。

α -乳白蛋白和 β -乳球蛋白作为牛乳中乳清蛋白的重要组成部分,其变性程度可以用来评价牛乳加工过程中受到的热处理强度。 α -乳白蛋白在 80 ℃以上时会发生不同程度的不可逆变性,而 β -乳球蛋白在 70 ℃下加热 30 min 则会导致蛋白质结构展开并形成不可逆的二聚反应^[20]。 α -乳白蛋白和 β -乳球蛋白在瞬变高压作用下,蛋白质结构会出现凝聚或解聚现象,从而导致蛋白质结构发生变化。当均质压力>80 MPa 时, β -乳球蛋白结构发生解聚^[21],而相对于压力,均质过程中引起的温度剧增是引起 α -乳白蛋白和 β -乳球蛋白变性的主要因素。Carullo 等^[22]通过对经超高压均质后的乳清蛋白(WPI)一级(羰基)、二级(α -螺旋、 β -折叠、转角)、三级和四级结构(游离-SH 基团)进行分析,发现超高压均质不影响蛋白质的一级结构,而主要影响其二级结构,但是 100 MPa 以下时对蛋白质的结构基本无影响。由表 1 可知,超高压均质对 α -乳白蛋白和 β -乳球蛋白变性程度的影响略高于传统巴氏杀菌,这与超高压均质时的进样温度密切相关,但是两者变性程度仍低于高温杀菌,而导致蛋白质变性聚集的机理主要是经超高压均质后蛋白质的疏水作用发生了改变^[25]。

表 1 加工方式对牛乳中 α -乳白蛋白和 β -乳球蛋白变性的影响

Table 1 Effects of processing methods on the denaturation of α -lactalbumin and β -lactoglobulin in cow milk

处理方式	工艺参数	α -乳白蛋白 变性率/%	β -乳球蛋白 变性率/%	文献
超高温杀菌	90 ℃, 15 s	13.4	46.9	[18]
超高压均质	200 MPa, 40 ℃	10.2	37.1	
巴氏杀菌	72 ℃, 15 s	2.9	12	[23]
超高压均质	300 MPa, 30 ℃	12.2	34.6	
	200 MPa, 30 ℃	8.6	20.5	
超高温杀菌	直接式	27~58	74~92	[24]
	间接式	25~90	>90	

2 动态高压处理对牛乳中活性蛋白的影响

牛奶的营养价值除了可以提供蛋白质、脂肪和无机元素等常规营养外,牛奶中还含有种类繁多、无法通过其他普通食物提供的生物活性物质(如乳铁蛋白、免疫球蛋白、糖巨肽、乳过氧化物酶、鞘脂类等)。这些生物活性物质在维持和增加机体免疫力、抑菌、抗病毒以及维护肠道健康等方面发挥着重要作用,因此在加工过程中最大限度地保留牛乳中的这些营养成分具有重要的意义^[26-27]。超高压均质作为一种新兴的杀菌方式,在处理过程中对牛乳中关键活性蛋白的保留具有重要的研究意义。

2.1 动态高压处理对乳铁蛋白的影响

乳铁蛋白(lactoferricin, LF)作为牛乳中一种重要的生物活性物质,是一种 80 kDa 铁结合糖蛋白^[28]。乳铁蛋白中铁结合位点位于 4 个蛋白配体和碳酸根离子以及有助于碳酸根离子结合的精氨酸残基和 5-螺旋 *n* 端形成的区域^[29],根据铁结合情况乳铁蛋白可分为缺铁型(apo-LF)和铁饱和型(Holo-LF)两种形式。现有研究^[30]表明,常规巴氏杀菌处理可导致约 60% 的乳铁蛋白损失,而通过提高乳铁蛋白铁离子结合能力有助于使其在热处理过程中更加稳定。超高压均质的热处理强度相对较低,但是由于超高压均质带来的强机械作用和由此产生的瞬间温度变化,可能会导致蛋白质的功能和性质发生变化^[25]。乳铁蛋白协同超高压均质处理可以提高其抑菌活性,可能是超高压均质处理改变了乳铁蛋白分子结构,增加了其疏水性,从而提高了乳铁蛋白对微生物的抑制作用^[31-32]。当均质压力>300 MPa 时,蛋白质会出现与常规热处理相似的蛋白粒径变大以及聚集等现象^[17]。

2.2 动态高压处理对免疫球蛋白的影响

根据抗原特异性不同,牛乳中免疫球蛋白主要包含 IgG、IgM 和 IgA,其中以 IgG 含量最高。免疫球蛋白属于

热敏性物质,即 60 ℃ 以上时开始失活^[33]。Liang 等^[34]研究表明正常的均质工艺(<17 MPa)对牛乳中免疫球蛋白的结构和免疫原性基本无影响,但由表 2 可知,随着均质压力的提升,超高压均质对免疫球蛋白具有一定的灭活作用。相比于静态超高压处理(HHP),超高压均质(UHPH)对牛乳中活性物质的保留率略低。与热处理相比,当均质压力<250 MPa($T_{in}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,UHPH 对免疫活性物质的保留率优于低温长时杀菌(HoP;62~65 ℃,30 min),特别是 IgG 和 IgM 的保留率明显高于巴氏杀菌的,随着均质压力的提升($\geq 300\text{ MPa}$),牛乳中免疫球蛋白含量快速下降至与 HoP(62.5 ℃,30 min)的相同甚至更低。

2.3 动态高压处理对乳过氧化物酶、溶菌酶等酶的影响

牛乳中乳过氧化物酶和溶菌酶在发挥抑制微生物生长方面具有重要作用。乳过氧化物酶对温度比较敏感,当加热温度>75 ℃时,其活性迅速丧失^[36]。与热处理不同的是,低压处理不仅不会导致乳过氧化物酶和溶菌酶

的失活,反而还会提高其功能特性。Vannini 等^[42]研究表明,用 75,100,130 MPa 对乳过氧化物酶进行处理后,可以显著提高其对大肠杆菌、假单胞菌以及沙门氏菌的抑制能力。当均质压力<120 MPa 且进样温度为室温时,经处理后的溶菌酶活性和其抑菌活性也有不同程度的提高^[43]。随着均质压力的增加,超高压均质对乳过氧化物酶和溶菌酶的负面效应开始显现,20 ℃、300 MPa 下乳过氧化物酶和溶菌酶的酶活大约分别降低 30% 和 50%^[4]。但 Brclj 等^[44]研究表明,乳过氧化物酶在 250 MPa($T_{in}=45\text{ }^{\circ}\text{C}$)下即全部失活,可能是乳过氧化物酶对温度的敏感性高于压力,进样温度较高时,即使压力较小也会导致乳过氧化物酶快速失活。此外,热处理加工过程中,碱性磷酸酶活性程度通常被当作巴氏杀菌是否充分的参考指标^[45-46],在碱性磷酸酶灭活方面,动态超高压处理的效率则明显高于静态超高压的,270 MPa(20 ℃)下即将碱性磷酸酶灭活,而静态超高压处理在 600 MPa 下也很难使其完全失活^[4]。

表 2 加工处理方式对牛乳和母乳中活性物质变性的影响

Table 2 Effects of different processing methods on the denaturation of bioactive components in cow milk and human milk

原料	活性物质	处理条件	保留率/%	文献
牛乳	碱性磷酸酶	UHPH 270 MPa,20 ℃	0	[4]
	乳过氧化物酶	UHPH 300 MPa,20 ℃	<70	
水牛乳	IgG	63 ℃,30 min	65	[33]
		80 ℃,15 s	66.67	
母乳	IgA	UHPH 250 MPa,20 ℃	71.5	[35]
	IgG		104	
	IgM		71	
	溶菌酶		几乎无损失	
	IgA	62.5 ℃,30 min	52	[36]
	IgM		27	
	IgG		66.5	
	溶菌酶		几乎无损失	
脱脂奶	乳过氧化物酶	78 ℃,15 s	0	[36]
	乳铁蛋白	72 ℃,15 s	50~60	
母乳	乳铁蛋白	60 ℃,30 min	34	[37]
	sIgA		74.1	
	溶菌酶		轻微减少	
牛乳	IgG	HPP 300 MPa,50 ℃,1 min	基本无损失	[38]
	IgM		<75	
	IgA		<48	
母乳	乳铁蛋白	HPP 600 MPa,20 ℃,10 min	55	[39-40]
初乳	IgA	HPP 600 MPa,8 ℃,2.5 min	几乎不损失	[41]
	IgM		<21	
	IgG		<21	

3 动态高压处理对牛乳中维生素含量的影响

牛乳中除了含有人体所需的蛋白质、脂肪等常量营养素外,还含有矿物质和维生素等微量营养素,其中牛乳中主要的维生素包含维生素 A(V_A)、维生素 B₁(V_{B1})、维生素 B₂(V_{B2})以及维生素 D(V_D), V_A 、 V_{B2} 和 V_D 相对比较稳定,在热处理过程中不易损失^[47],而 V_{B1} 和维生素 C(V_C)对热加工较为敏感^[48]。有研究^[49-50]表明,通过超高压均质可以显著降低常规热处理带来的果蔬汁中维生素等生物活性物质的损失。Amador-Espejo 等^[51]研究了 300 MPa 下不同进样温度(45,55,65,75,85 °C)对牛乳中水溶性和脂溶性维生素的保留情况,并与巴氏杀菌(90 °C,15 s)和 UHT(138 °C,4 s)灭菌进行了对比。结果表明,超高压均质对牛乳中维生素的保留具有较为明显的作用,特别是当进样温度 ≤ 45 °C 时,经超高压均质后的牛乳样品中维生素含量除了 V_C 发生较为明显的降低外,其他维生素与生乳含量基本相同。Sharabi 等^[52]研究表明,超高压均质对牛乳中 V_C 含量的影响不显著(200 MPa, $T_{in}=25$ °C),但是相同均质条件下,货架期内 V_{B2} 的降解率为巴氏杀菌(72 °C,15 s)的 150%,而造成 V_{B2} 降解率较高的原因可能是均质后乳成分粒径变化以及蛋白质结构变化协同作用导致的。

4 结语与展望

超高压均质作为一种新兴的加工处理手段,具有可连续化操作且相对热处理更加节能环保,已在生物医药、纳米科技等领域得到了商业化应用,但是受限于现有设备处理能力以及成本等原因,目前在食品领域的商业化应用还较少见。随着超高压均质在维持产品货架期稳定性、杀菌和关键营养成分保留等方面的潜力逐渐被挖掘和显现,动态超高压处理有助于减少牛乳在加工过程中受到的热负荷,在免疫球蛋白、乳铁蛋白、乳过氧化物酶以及维生素等营养成分保留方面与巴氏杀菌基本相同甚至表现更佳,因此超高压均质有望在乳品工业中得到进一步应用。然而,由于动态超高压处理的杀菌和关键营养成分的保留与均质时的温度和压力具有较强关联性,因此未来如何平衡杀菌效率和营养保留两者的平衡需进一步研究。

参考文献

- [1] PARK Y W. Bioactive components in milk and dairy products[M]. Singapore: John Wiley & Sons, 2009: 43-82.
- [2] KILIC-AKYILMAZ M, OZER B, BULAT T, et al. Effect of heat treatment on micronutrients, fatty acids and some bioactive components of milk [J]. International Dairy Journal, 2022, 126: 105231.
- [3] D'INCECCO P, ROSI V, CABASSI G, et al. Microfiltration and ultra-high-pressure homogenization for extending the shelf-storage stability of UHT milk[J]. Food Research International, 2018, 107: 477-485.
- [4] PINHO C R G, FRANCHI M A, TRIBST A A L, et al. Effect of ultra high pressure homogenization on alkaline phosphatase and lactoperoxidase activity in raw skim milk[J]. Procedia Food Science, 2011(1): 874-878.
- [5] D'INCECCO P, LIMBO S, JOHANNES A, et al. Novel technologies for extending the shelf life of drinking milk: Concepts, research trends and current applications[J]. LWT, 2021, 148: 111746.
- [6] 艾正文. 超高压均质对牛乳中微生物和酶的影响研究进展[J]. 乳业科学与技术, 2022, 45(2): 42-46.
- [7] AI Z W. Recent progress in understanding the effects of ultra-high pressure homogenization on microorganisms and enzymes in milk [J]. Journal of Dairy Science and Technology, 2022, 45(2): 42-46.
- [8] DEETH H C, LEWIS M J. High temperature processing of milk and milk products[M]. West Sussex: John Wiley & Sons, 2017: 427-450.
- [9] 谷鸣. 乳品工程师实用手册[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2009: 637-686.
- [10] GU M. Technical handbook for dairy engineers[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2009: 637-686.
- [11] ZHU R G, CHENG H, LI L, et al. Temperature effect on formation of advanced glycation end products in infant formula milk powder [J]. International Dairy Journal, 2018, 77: 1-9.
- [12] WADA Y, LÖNNERDAL B. Effects of different industrial heating processes of milk on site-specific protein modifications and their relationship to in vitro and in vivo digestibility [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(18): 4 175-4 185.
- [13] SEVENICH R, MATHYS A. Continuous versus discontinuous ultra-high-pressure systems for food sterilization with focus on ultra-high-pressure homogenization and high-pressure thermal sterilization: A review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2018, 17(3): 646-662.
- [14] OSORIO-ARIAS J C, VEGA-CASTRO O, MARTÍNEZ-MONTEAGUDO S I. Fundamentals of high-pressure homogenization of foods [M]. Amsterdam: Elsevier BV, 2020: 244-273.
- [15] MARTÍNEZ-MONTEAGUDO S I, SALDAÑA M D A. Kinetics of lactulose formation in milk treated with pressure-assisted thermal processing [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2015, 28: 22-30.
- [16] 邢倩倩. 巴氏杀菌乳中糠醛类化合物质量分数研究[J]. 中国乳品工业, 2022, 50(2): 31-33.
- [17] XING Q Q. Study on contents of furfural compounds in pasteurized milk[J]. China Dairy Industry, 2022, 50(2): 31-33.
- [18] XING Q, MA Y, FU X, et al. Effects of heat treatment, homogenization pressure, and overprocessing on the content of furfural compounds in liquid milk[J]. J Sci Food Agric, 2020, 100(14): 5 276-5 282.
- [19] LIU J, ZAMORA A, CASTILLO M, et al. Modeling the effect on skim milk during ultra-high pressure homogenization using front-

- face fluorescence [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 47: 439-444.
- [17] DUMAY E, CHEVALIER-LUCIA D, PICART-PALMADE L, et al. Technological aspects and potential applications of (ultra) high-pressure homogenisation [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2013, 31(1): 13-26.
- [18] PEREDA J, FERRAGUT V, QUEVEDO J M, et al. Heat damage evaluation in ultra-high pressure homogenized milk [J]. *Food Hydrocolloids*, 2009, 23(7): 1 974-1 979.
- [19] PEREDA J, JARAMILLO D P, QUEVEDO J M, et al. Characterization of volatile compounds in ultra-high-pressure homogenized milk[J]. *International Dairy Journal*, 2008, 18(8): 826-834.
- [20] ZHANG L, ZHOU R, ZHANG J, et al. Heat-induced denaturation and bioactivity changes of whey proteins[J]. *International Dairy Journal*, 2021, 123: 105175.
- [21] 付敏. 瞬变高压与酶对鲜牛乳中 β -乳球蛋白变性的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009: 18-21.
- FU M. Effects of instantaneous high-pressure on denaturalization of β -lactoglobulin [D]. Hefei: Hefei University of Technology: 18-21.
- [22] CARULLO D, DONSI F, FERRARI G. Influence of high-pressure homogenization on structural properties and enzymatic hydrolysis of milk proteins[J]. *LWT*, 2020, 130: 109657.
- [23] ZAMORA A, FERRAGUT V, JARAMILLO P D, et al. Effects of ultra-high pressure homogenization on the cheese-making properties of milk[J]. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90(1): 13-23.
- [24] DEETH H C. The effect of UHT processing and storage on milk proteins[M]. 3th ed. Queensland: Academic Press, 2020: 385-421.
- [25] GRATIA-JULIA A, RENE M, CORTES-MUNOZ M, et al. Effect of dynamic high pressure on whey protein aggregation: A comparison with the effect of continuous short-time thermal treatments[J]. *Food Hydrocolloids*, 2008, 22(6): 1 014-1 032.
- [26] ANEMA S G. A comparison of the kinetics of the thermal denaturation of the immunoglobulins in caprine and bovine skim milk samples[J]. *International Dairy Journal*, 2017, 65: 1-4.
- [27] MORENO-EXPÓSITO L, ILLESCAS-MONTES R, MELGUIZO-RODRÍGUEZ L, et al. Multifunctional capacity and therapeutic potential of lactoferrin[J]. *Life Science*, 2018, 195: 61-64.
- [28] WAKABAYASHI H, ODA H, YAMAUCHI K, et al. Lactoferrin for prevention of common viral infections[J]. *Journal of Infection and Chemotherapy*, 2014, 20(11): 666-671.
- [29] BAKER E N, BAKER H M. A structural framework for understanding the multifunctional character of lactoferrin [J]. *Biochimie*, 2009, 91(1): 3-10.
- [30] FERNANDEZ-MENENDEZ S, PEIXOTO R R A, FERNANDEZ-COLOMER B, et al. Effect of holder pasteurisation on total concentrations and iron-binding profiles of holo-lactoferrin used as fortifier in donor human milk[J]. *International Dairy Journal*, 2020, 100: 104564.
- [31] FRANCO I, PEREZ M D, CONESA C, et al. Effect of technological treatments on bovine lactoferrin: An overview[J]. *Food Res Int*, 2018, 106: 173-182.
- [32] IUCCI L, PATRIGNANI F, VALLICELLI M, et al. Effects of high pressure homogenization on the activity of lysozyme and lactoferrin against *Listeria monocytogenes*[J]. *Food Control*, 2007, 18(5): 558-565.
- [33] EL-LOLY M M, HASSAN L K, FARAHAT E S A. Impact of heat treatments and some technological processing on immunoglobulins of Egyptian buffalo's milk[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 123: 939-944.
- [34] LIANG N, KOH J, KIM B, et al. Structural and functional changes of bioactive proteins in donor human milk treated by vat-pasteurization, retort sterilization, ultra-high-temperature sterilization, freeze-thawing and homogenization[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 926814.
- [35] IRAZUSTA A, RODRIGUEZ-CAMEJO C, JORCIN S, et al. High-pressure homogenization and high hydrostatic pressure processing of human milk: Preservation of immunological components for human milk banks[J]. *J Dairy Sci*, 2020, 103(7): 5 978-5 991.
- [36] XIONG L, LI C, BOEREN S, et al. Effect of heat treatment on bacteriostatic activity and protein profile of bovine whey proteins [J]. *Food Res Int*, 2020, 127: 108688.
- [37] CHANG J C, CHEN C H, FANG L J, et al. Influence of prolonged storage process, pasteurization, and heat treatment on biologically-active human milk proteins[J]. *Pediatrics & Neonatology*, 2013, 54 (6): 360-366.
- [38] DELGADO F J, CONTADOR R, ÁLVAREZ-BARRIENTOS A, et al. Effect of high pressure thermal processing on some essential nutrients and immunological components present in breast milk[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2013, 19: 50-56.
- [39] MAYAYO C, MONTSERRAT M, RAMOS S J, et al. Kinetic parameters for high-pressure-induced denaturation of lactoferrin in human milk[J]. *International Dairy Journal*, 2014, 39(2): 246-252.
- [40] MALINOWSKA-PANCZYK E. Can high hydrostatic pressure processing be the best way to preserve human milk? [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 101: 133-138.
- [41] SOUSA S G, DELGADILLO I, SARAIVA J A. Effect of thermal pasteurisation and high-pressure processing on immunoglobulin content and lysozyme and lactoperoxidase activity in human colostrum[J]. *Food Chem*, 2014, 151: 79-85.
- [42] VANNINI L, LANCIOTTI R, BALDI D, et al. Interactions between high pressure homogenization and antimicrobial activity of lysozyme and lactoperoxidase[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2004, 94(2): 123-135.
- [43] TRIBST A A L, RIBEIRO L R, CRISTIANINI M, et al. Comparison of the effects of high pressure homogenization and high pressure processing on the enzyme activity and antimicrobial profile of lysozyme [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 43: 60-67.

(下转第 222 页)

- 壳刀具的整仁率预测[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(6): 113-117.
- GONG J, FU Y F, HUANG H, et al. Prediction of whole-kernel rate of adaptive cashew shelling cutter based on grey neural network[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(6): 113-117.
- [49] 张旭. 一种智能化腰果自动开壳去壳设备: CN202110905735.9 [P]. 2021-10-01.
- ZHANG X. An intelligent cashew nuts automatic shelling and shelling equipment: CN202110905735.9[P]. 2021-10-01.
- [50] 中国热带农业科学院农产品加工研究所. 一种腰果破壳方法: CN201410671134.6[P]. 2015-04-01.
- Institute of Food Science and Technology CAAS. A cashew nut shelling method: CN201410671134.6[P]. 2015-04-01.
- [51] 李双红. 一种用于榛子的连续剥壳装置: CN202011499900.7[P]. 2021-04-06.
- LI S H. A continuous shelling device for hazelnuts: CN202011499900.7[P]. 2021-04-06.
- [52] 马士龙. 板栗剥壳机的设计与试验[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018: 10-53.
- MA S L. Design and experimental study of chestnut peel removing shelling machine[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2018: 10-53.
- [53] 李强, 刘俊凤, 汪卓, 等. 板栗去壳机优化设计及实验研究[J]. 蚌埠学院学报, 2022, 11(5): 25-28, 44.
- LI Q, LIU J F, WANG Z, et al. Optimization design and experimental study of chestnut sheller [J]. Journal of Bengbu University, 2022, 11(5): 25-28, 44.
- [54] 石鑫, 杨豫新, 乔园园, 等. 薄皮扁桃低损伤脱壳分析与试验[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(9): 81-87.
- SHI X, YANG Y X, QIAO Y Y, et al. Analysis and experiment of low damage shelling of thin shelled almond[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(9): 81-87.
- [55] 张远东, 王东伟, 尚书旗, 等. 滚筒凹板筛式花生脱壳结构仿真试验研究[J]. 农机化研究, 2023, 45(3): 152-158.
- ZHANG Y D, WANG D W, SHANG S Q, et al. Simulation test study on peanut shelling structure of roller concave sieve [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(3): 152-158.
- [56] 赵乐然, 王涛. 组合式橡胶籽脱壳机构设计与试验[J]. 食品与机械, 2022, 38(4): 114-120.
- ZHAO L R, WANG T. Design and test of combined rubber seed shelling machine[J]. Food & Machinery, 2022, 38(4): 114-120.
- [57] LI C H, ZHANG Y B, JIA D Z, et al. Semi-theoretical analyses on mechanical performance of flexible-belt shearing extrusion walnut shell crushing[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2016, 32(4): 459-467.
- [58] LIU M Z, LI C H, ZHANG Y B, et al. Advances and recent patents about cracking walnut and fetching kernel device [J]. Recent Patents on Mechanical Engineering, 2015, 8(1): 44-58.
- [59] 张禹鑫. 差速对搓式油茶果脱壳机脱壳受力分析与参数优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2022: 10-68.
- ZHANG Y X. Stress analysis and parameter optimization of different-speed-pair-rubbing camellia oleifera fruit sheller [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2022: 10-68.
- [60] 汤晶宇, 张禹鑫, 吴昊, 等. 立锥结构式油茶脱壳机技术分析研究[J]. 林业机械与木工设备, 2021, 49(6): 21-24.
- TANG J Y, ZHANG Y X, WU H, et al. Technical analysis and research on cone-structured camellia shelling machine[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2021, 49(6): 21-24.
-
- (上接第 214 页)
- [44] BRCLJ A, MTKK B, PEDA C, et al. High-pressure homogenization on food enzymes[J]. Innovative Food Processing Technologies, 2021: 293-314.
- [45] 韩荣伟, 王加启, 郑楠. 热处理对牛乳成分的变化影响及热损标识物的选择[J]. 中国食物与营养, 2011, 17(7): 22-29.
- HAN R W, WANG J Q, ZHENG N. Effect of heat treatment on milk and determination of heat indicators in milk [J]. Food and Nutrition in China, 2011, 17(7): 22-29.
- [46] 周玲, 徐广新. 乳制品中碱性磷酸酶检测的影响因素及控制措施[J]. 中国乳业, 2021(9): 102-105.
- ZHOU L, XU G X. Influencing factors and control measures of the determination of alkaline phosphatase in dairy products[J]. China Dairy, 2021(9): 102-105.
- [47] FULIAS A, VLASE G, VLASE T, et al. Thermal degradation of B-group vitamins: B₁, B₂ and B₆ [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2014, 118(2): 1 033-1 038.
- [48] 赵新淮. 乳品化学[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 189-208.
- ZHAO X H. Dairy chemistry [M]. Beijing: Science Press, 2007: 189-208.
- [49] VELÁZQUEZ-ESTRADA R M, HERNÁNDEZ-HERRERO M M, RÜFER C E, et al. Influence of ultra high pressure homogenization processing on bioactive compounds and antioxidant activity of orange juice[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 18: 89-94.
- [50] ZHOU L. High-pressure homogenization effect on the stability and bioaccessibility of bioactive phytochemicals and vitamins in the food matrix [M]. Elsevier: Innovative Food Processing Technologies, 2021: 359-368.
- [51] AMADOR-ESPEJO G G, GALLARDO-CHACON J J, NYKAENEN H, et al. Effect of ultra high-pressure homogenization on hydro-and liposoluble milk vitamins[J]. Food Research International, 2015, 77: 49-54.
- [52] SHARABI S, OKUN Z, SHPIGELMAN A. Changes in the shelf life stability of riboflavin, vitamin C and antioxidant properties of milk after (ultra) high pressure homogenization: Direct and indirect effects [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 47: 161-169.