

王忠琨,耿梦洁,杜林笑,等. 高能振动球磨对核桃酱流变学特性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(2): 230-236.

DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.02.025

高能振动球磨对核桃酱流变学特性的影响

王忠琨,耿梦洁,杜林笑,江楠,胡昊

华中农业大学食品科学技术学院,武汉 430070

摘要 利用高能振动球磨技术制备核桃酱,研究不同球磨处理时间对核桃酱的粒径、质构、流变性能及微观结构的影响。结果表明,以核桃仁为原料,球磨处理不同时间(2、4、8、16、24 min),可以得到不同粒径与质地的核桃酱。球磨处理能有效降低核桃酱的粒径,球磨处理 24 min 后核桃酱平均粒径由 79.89 μm 下降到 37.88 μm ,整体下降了 53%。球磨处理后的核桃酱是一种典型的非牛顿假塑性流体,表现为弹性固体特征,且具有正触变性。根据流变及质构测量结果可以看出,随着球磨处理时间的延长,核桃酱的凝胶强度、黏着性和黏聚力逐渐下降,流动性逐渐增强。其中,球磨处理 8 min 的核桃酱体系具有较高的黏弹性,适合加工为涂抹酱产品;球磨处理 16 min 和 24 min 的核桃酱流动性较强,粒径较小,适合作为沙拉汁的原材料。因此,高能球磨技术可作为一种制备核桃酱的技术,并可通过工艺改变调控核桃酱的流变学特性。

关键词 高能振动球磨; 乳液凝胶; 流变性能; 质构; 触变性; 核桃酱; 球磨技术

中图分类号 TS 255.6 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)02-0230-07

我国是世界上核桃主要生产国,2019 年我国核桃产量约达 100 万 t,且近年来国内消费量及出口量也在持续增长^[1]。因为其富含不饱和脂肪酸和生物活性物质(如多酚和植物甾醇等),具有较高营养价值与独特风味^[2]。据报道,核桃仁中含有 55%~70% 的脂质,其中约 70% 是由不饱和脂肪酸组成,这对调节心血管系统和神经系统疾病,降低其发病率具有重要意义^[3]。核桃可以用来制备核桃酱,同其他坚果酱一样,可以作为面包、饼干的配料食用,或添加在点心、糖果中增强风味^[4]。

减小固体颗粒尺寸是制备坚果酱的主要加工环节,即通过研磨将固体颗粒的粒径减小到特定范围^[4-5]。固体颗粒的粒径直接影响感官特性和流变特性^[6]。如粒径大于 35 μm 的巧克力口感会变得粗糙,可接受度降低^[7]。研究表明,坚果酱的粒度分布受原料配方^[8-10]和多个工艺参数的影响,如烘烤^[11]、研磨工艺^[12]、研磨时间^[13]等。

工业中常采用胶体磨、石磨等方法制备核桃酱,但其存在研磨时间长、需要分步研磨等问题。高能振动球磨技术是一种绿色、环保、低成本的新型超细研磨技术,能够短时间内改善固体颗粒粒度分布,被

广泛应用于化工和医药等领域,近年来也逐渐被应用于食品加工领域。该技术是将物料放置于装有研磨介质的研磨筒中,通过碰撞、摩擦和剪切来提供机械力作用;当作用力施加在物料上时,分子的结构被破坏,颗粒的粒径减小,颗粒表面被脂肪相包裹,从而赋予其独特的流变和质构特性^[14]。一些研究人员利用球磨技术来改变食品原料的特性,如玉米淀粉^[15]、燕麦^[16]、玫瑰花粉^[17]、大豆蛋白^[18]等,但是国内外关于将球磨技术应用于核桃酱制备的研究还鲜有报道。

在本研究中,利用高能振动球磨技术制备核桃酱,研究不同球磨时间处理对核桃酱粒度分布、流变特性、质构特性及微观结构的影响,可为核桃酱加工工艺参数及品质评价提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

核桃购自河北绿岭康维食品有限公司。

1.2 仪器与设备

G100 高通量组织研磨仪,卡尤迪生物科技(北京)有限公司;AR2000ex 流变仪,美国 TA 仪器公

收稿日期: 2020-10-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31871726);中国科协青年人才托举工程(2019QNR001)

王忠琨, E-mail: 347612209@qq.com

通信作者: 胡昊, E-mail: huhao@mail.hzau.edu.cn

司;Mastersizer 2000 激光粒度分布仪,英国马尔文仪器有限公司;TA-XT Plus 质构仪,英国超技仪器有限公司;倒置荧光显微镜,日本尼康公司。

1.3 核桃酱的制备

取去壳后的核桃整仁在烘箱中 150 ℃ 条件下烘烤 20 min。快速取出并去皮。称取去皮后的核桃仁于粉碎机中粉碎 15 s。取 5 g 核桃粉末于 50 mL 球磨容器中,放入直径 20 mm 钢球,在 1 500 r/min 转速下进行球磨处理。每工作 30 s,暂停 30 s。

1.4 粒径测量

称取 0.1 g 核桃酱置于 15 mL 离心管中,并加入 10 mL 蒸馏水后涡旋 10 s,进行样品稀释与分散。遮光度 10%~20%,测定转速 2 000 r/min,折射指数为 1.33。

1.5 质构特性测定

参考徐群英等^[19]的方法并进行细微调整。采用 P 0.25S 探头,下压模式,触发力 5 g,测试前速度 2 mm/s,测试速度 1 mm/s,测试后速度 2 mm/s。

1.6 流变特性测定

1)静态剪切流变特性。采用 AR2000ex 流变仪对不同的样品进行流变学特性分析,测试条件为 25 ℃,平行板直径 40 mm,测定模式为 flow ramp,剪切速率设置为 0.1~100 s⁻¹。

2)触变性测定。测试条件为剪切速率从 0 s⁻¹ 上升到 100 s⁻¹,100 s⁻¹ 保持 120 s,之后立即以同样的变化速率从 100 s⁻¹ 下降到 0 s⁻¹。

3)动态剪切流变测定。线性黏弹区的确定:在 25 ℃ 下采用直径为 40 mm 的平行板进行应变扫描测量,平板之间的间隔为 1 mm,频率选择 1 Hz。在本试验中,选择 0.05% 作为频率扫描的应变。频率扫描:振荡频率范围为 0.1~10 Hz,测定频率扫描过程中 G' 和 G'' 的变化。

1.7 基本成分测定

参照 GB 5009.6—2003《食品中脂肪的测定》,采用酸水解法测定脂肪含量;参照 GB 5009.5—2016《食品中蛋白质的测定》,采用凯氏定氮法测定蛋白质含量。

1.8 微观结构观察

参考 Ahmed 等^[20]的方法并进行细微调整。采用 20 倍普通光学显微镜和荧光显微镜观察微观结构。荧光显微镜观察前取 0.1 g 样品与 20 μ L 的染料混合,避光搅拌 5 min。

1.9 数据处理

使用 SPSS 22.0 进行统计分析,Duncan's 分析比较差异性($P<0.05$)。用 Origin 9.0 软件绘制曲线图形。除另有说明,数值为 3 次重复的平均值,误差条所显示的是标准偏差。

2 结果与分析

2.1 球磨处理对核桃酱粒径分布及质构特性的影响

图 1 表示在不同球磨处理时间下核桃酱的粒径分布变化。所有样品的粒径分布均呈现具有中心主峰的多峰形态,曲线峰值区间粒度分别为 0.5~2、3~70 与 200~900 μ m。与球磨处理 2 min 的粒径分布曲线相比,球磨处理 4 min 的粒径分布曲线在小粒径和中粒径区域向左平移,在大粒径区域几近重合;球磨处理至 8 和 16 min 时,粒径曲线整体向左平移幅度显著,且两者曲线几乎重合;当继续球磨至 24 min 时,中粒径和大粒径区域明显向左平移,而小粒径区域变化幅度较低。整体而言,随着球磨时间的延长,样品的粒径分布曲线在小粒径一端变化较小,而中粒径和大粒径区域不断向左平移,最终表现为核桃酱的平均粒径不断减小。

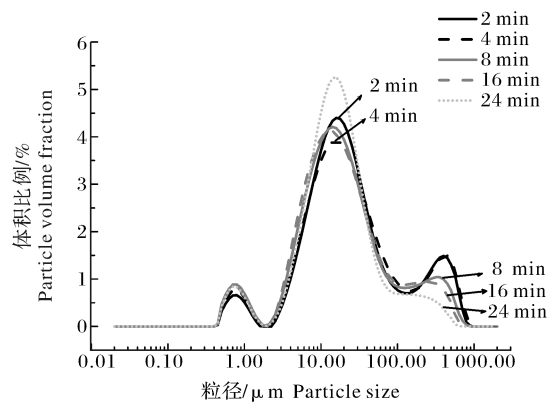


图 1 不同球磨处理时间下核桃酱的粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of walnut butter at different milling time

将核桃酱在不同球磨处理时间的粒径分布数据进行统计处理(表 1)。在球磨 8 min 时, $D_{0.5}$ 开始明显减小,相比于球磨处理 2 min 的样品,其平均粒径 $D_{0.5}$ 减小约 14.71%,继续延长球磨时间, $D_{0.5}$ 减小不明显。在所有处理时间下,样品的 $D_{4.3}$ 明显大于 $D_{3.2}$,表明样品颗粒分散且整体颗粒较大。球磨处理 4 min 时,与前一处理时间段样品相比, $D_{3.2}$ 显著

减小,而 $D_{4,3}$ 没有明显变化;球磨处理至 8 min 和 16 min 时, $D_{3,2}$ 和 $D_{4,3}$ 均显著降低 ($P < 0.05$),且两者间没有显著差异;当继续球磨处理至 24 min 时, $D_{3,2}$ 没有继续呈现明显降低,而 $D_{4,3}$ 始终呈现减小趋势。在球磨 2~4 min 时,由于最初样品中大粒径颗粒含量较高,虽然大部分颗粒粒径减小,但平均粒

径仍未呈现出降低趋势;当继续延长球磨时间,颗粒在剪切力的作用下被破坏,大粒径颗粒逐渐减少,平均粒径开始显著降低。为进一步分析粒径分布的变化,对 $D_{4,3}$ 和 $D_{3,2}$ 作差后进行分析,发现其差值随球磨时间延长而降低,表明样品中大颗粒粒径不断减小,呈现整体平均粒径减小的趋势。

表1 球磨处理过程中核桃酱的粒径特征参数和质构特性

Table 1 Size characteristics and texture of walnut butter at different ball milling time

球磨时间/min Ball-milling time	$D_{0,5}/\mu\text{m}$	$D_{3,2}/\mu\text{m}$	$D_{4,3}/\mu\text{m}$	$(D_{4,3} - D_{3,2})/\mu\text{m}$	凝胶强度/g Firmness	黏着性/(g·s) Consistency	黏聚力/g Cohesiveness
2	20.80±0.57a	8.62±0.19a	79.89±8.00a	71.27±7.84a	78.98±3.90a	538.03±40.99a	-53.11±3.86d
4	21.40±1.63a	7.92±0.69b	84.77±12.92a	76.85±12.43a	24.22±2.96b	154.00±10.64b	-21.25±1.42c
8	17.74±0.94b	6.84±0.34c	60.44±16.69b	53.59±16.49b	13.24±1.48c	84.55±9.69c	-16.87±0.53b
16	17.06±0.90b	7.02±0.51c	52.90±3.83b	45.88±3.58b	3.39±0.48d	21.30±3.95d	-8.24±1.78a
24	16.57±0.23b	7.05±0.14c	37.88±3.05c	30.83±2.95c	2.88±0.22d	16.74±6.43d	-6.55±1.24a

注:同一列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。Note: Different letters in the same column indicated significant differences ($P < 0.05$).

由表1可知,球磨 2 min 样品的凝胶强度、黏着性和黏聚力最大。随着球磨处理时间的增加,核桃酱的凝胶强度、黏着性及黏聚力随之降低,且不同处理时间之间具有显著性差异 ($P < 0.05$)。当球磨处理 16 min 时,与短时间处理 2 min 相比,核桃酱的凝胶强度降低约 75 g,黏着性降低约 517 g·s,黏聚力绝对值降低约 45 g。球磨 16 min 和 24 min 时,样品的凝胶强度、黏着性和黏聚力继续降低,但两者没有表现出明显差异。

2.2 球磨处理对核桃酱静态剪切流变特性的影响

由图2可以看出,在整个剪切范围内 ($0.1 \sim 100 \text{ s}^{-1}$),随着剪切速率的增大,核桃酱的黏度均呈下降趋势,出现剪切稀化现象,表现出假塑性流体特征。在初始时,球磨 4、8 和 16 min 的样品,与前一处理时间段样品相比,黏度均降低了一个数量级,而球磨至 24 min 时样品不再表现出明显差异。在 $0.1 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 剪切速率范围内,随着球磨时间的延长,核桃酱的流变曲线均向下移动,黏度有一定程度的降低;球磨 16 min 和 24 min 的曲线几乎重合。同时,在 $10 \sim 100 \text{ s}^{-1}$ 剪切速率范围内,所有样品的流变曲线趋向一致。

2.3 球磨处理对核桃酱触变性的影响

图3为核桃酱的触变性测定结果。由图3可知,球磨 4 min 后的核桃酱样品均具有正触变性。球磨处理 4 min 和 8 min 的核桃酱的触变性无明显差异。当继续球磨至 16 min 和 24 min 时,滞后环面积开始显著降低,由 $20\ 839 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 降低至 $10\ 726 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,降低约 48%。说明球磨 16 min 时样品的流

动状态发生明显变化,体系流动所需要克服的能量减少,触变性降低,流动性增强。

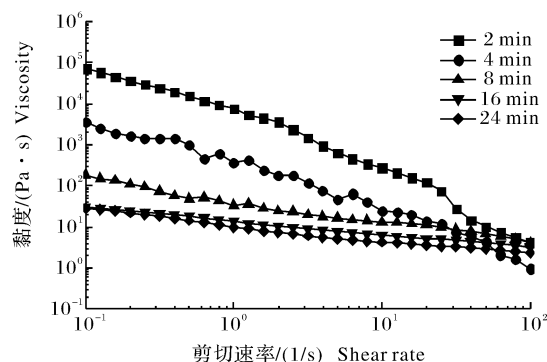


图2 球磨处理过程中核桃酱的黏度与剪切速率的关系
Fig.2 Relationship between viscosity and shear rate of walnut butter at different ball milling time

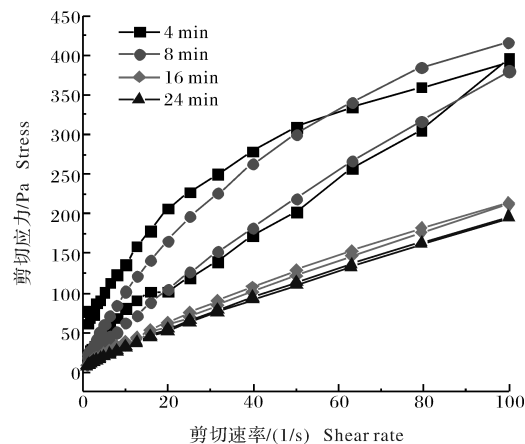


图3 球磨处理过程中核桃酱的触变性变化
Fig.3 Thixotropic properties of walnut butter at different ball milling time

2.4 球磨处理对核桃酱动态剪切流变特性的影响

图4和图5是球磨处理不同时间后核桃酱的频率扫描结果。由图4,图5可知,所有核桃酱的储存模量 G' 均大于损耗模量 G'' ,表现为典型的凝胶行为。随着振荡频率的增加,所有样品的 G' 和 G'' 均呈现增大趋势,表现出对频率的依赖性,说明各个处理时间下的核桃酱具有弱凝胶性质的结构特征。同时可以看出,核桃酱的 G' 与 G'' 随球磨时间的延长而降低。球磨处理2~8 min后的核桃酱的 G' 与 G'' 相对较高,凝胶性较强;而在球磨处理16 min和24 min之后,样品的 G' 和 G'' 值明显低于其他样品,且两个样品的变化曲线几乎重合,黏弹性差异较小。由此可知,随着球磨时间的延长,核桃酱的粒径逐渐减小, G' 与 G'' 总体呈下降趋势,凝胶性逐渐减弱。

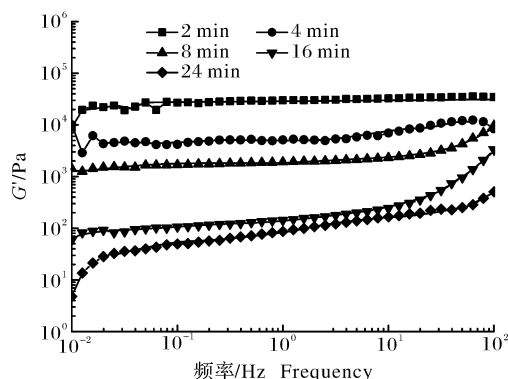


图4 不同球磨处理时间对核桃酱储存模量 G' 的影响

Fig.4 The effect of ball milling time on storage modulus (G') of walnut butter

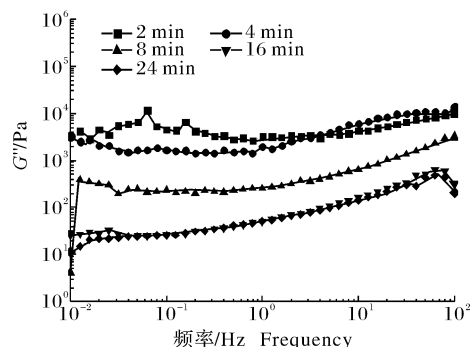


图5 不同球磨处理时间对核桃酱损耗模量 G'' 的影响

Fig.5 The effect of ball milling time on loss modulus (G'') of walnut butter

2.5 球磨核桃酱的外观形态及微观形貌的影响

图6为不同球磨处理时间后的核桃酱外观形

态。球磨2、4 min的核桃酱弹性和黏度较大,流动性低,涂抹后容易恢复原有形态;球磨处理8 min的核桃酱颗粒较均匀,弹性和黏度降低,流动性增强,涂抹效果较好;继续球磨至16、24 min时,样品颗粒变小,弹性和黏度较低,呈现流动状。

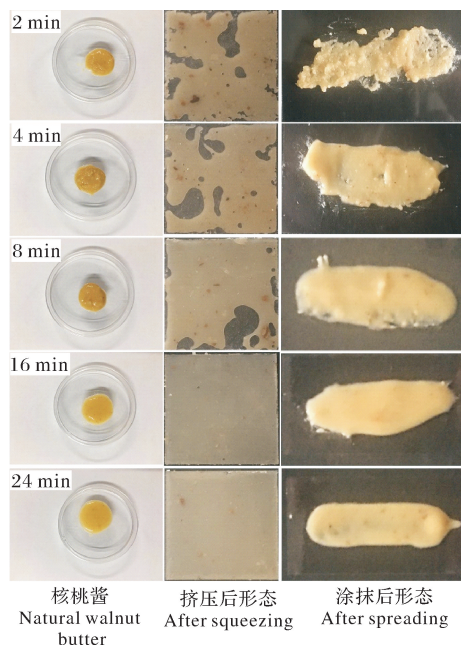


图6 不同球磨处理时间后核桃酱的外观形态

Fig.6 Appearance of ball milling treated walnut butter at different time

所有球磨核桃酱都是由同一批烘烤核桃仁制备而成的,因此这些样品均具有相同的化学组成。根据基本成分测定结果,脂肪和蛋白质分别约占总质量的52.75%和19.10%,是核桃酱的主要组成成分。为进一步观察核桃酱的微观结构形貌,分别采用异硫氰酸荧光素和尼罗红染色液对蛋白质和油滴进行染色,并在荧光显微镜下进行观察,如图7所示。结合普通光学显微镜和荧光显微镜观察结果可以看出,随着球磨时间延长,样品的聚集状态逐渐减弱,油滴或蛋白质等其他颗粒物质逐渐分散。这与粒度分布结果基本一致,即大颗粒粒径不断减小,呈现整体平均粒径减小的趋势。在球磨2 min和4 min时,样品中蛋白质和油滴呈现明显的聚集形态。球磨时间8 min时,蛋白质和油滴的聚集状态被破坏,尺寸不断减小;继续球磨至16 min和24 min时,可以看出明显的油滴状形态,表现为油滴聚集,并且分散程度变大。

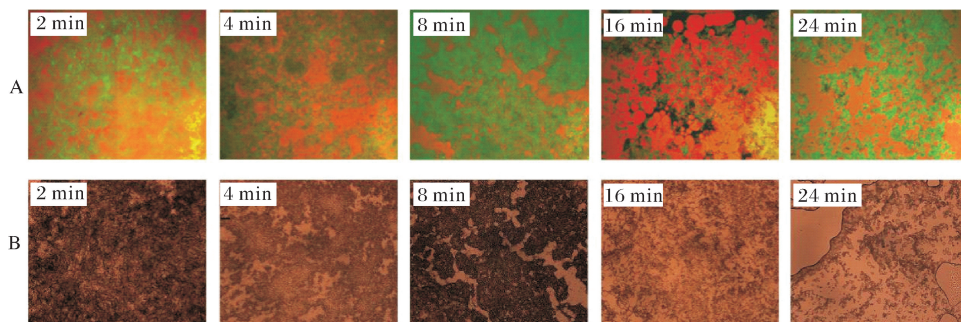


图 7 不同球磨处理时间后核桃酱的荧光显微镜(A)和普通光学显微镜(B)观察结果

Fig.7 Fluorescence microscopy micrographs(A) and optical microscopy images(B) of ball milling treated walnut butter at different time

3 讨论

本研究利用高能振动球磨技术,从具有相同化学成分组成的原料出发,通过调控球磨时间制备具有不同流变特性的核桃酱,如高黏度、高触变性、高流动性等。具体而言,当球磨处理 2~8 min 时得到的核桃酱具有较好的凝胶稳定性,黏稠度更高,结构恢复能力较弱,适合作为涂抹酱类黏稠度较大的产品;球磨处理 16~24 min 的核桃酱流动性最佳,黏稠度较低,适合加工为沙拉汁类流动性较强的产品^[21-22]。

在本研究的粒径范围内,静态剪切流变测量结果显示,随着球磨时间的延长,样品的黏性逐渐降低。这可能是由于研磨程度较低时,样品的平均粒径较大(图 1),大颗粒更有利于形成稳定的骨架结构,从而将流动相固定在其中;随着研磨程度的增加,颗粒平均粒径减小,骨架结构被破坏,释放出更多的油脂作为体系的连续相,从而提供足够空间使颗粒在流动方向上进行有序排列,如图 7 所示。Zhang 等^[23]研究芝麻酱时也发现研磨时间延长,体系中更多的油脂释放出来,并且完整的子叶细胞区域逐渐消失。此外,图 2 的结果也表明所有核桃酱均呈现剪切稀化特征,这可能是因为是在剪切力的作用下,样品中蛋白质、纤维的缠绕被拆解,而这些大分子聚合物重新排列缠绕的速率小于被剪切拉伸的速率,从而体现出剪切稀化行为^[24-25]。在芝麻酱^[26]、蛋黄酱^[27]的研究中也发现类似现象。

触变性可以反映出样品在搅拌或涂抹后的流变学稳定性,显示了样品随时间变化的流动特性^[28]。图 3 结果显示,球磨处理 4~24 min 的样品呈现明显的触变性,且触变环面积随球磨时间延长而降低,这可能与粒径分布变化有关。在剪切速率上升阶

段,在剪切力的作用下大分子发生解聚,导致在剪切速率下降阶段时表现出剪切应力的降低;当样品平均粒径较大时,体系具有更多的聚集结构,触变性更为明显。Abu-Jdayil 等^[29]发现了芝麻酱的流动曲线具有滞后现象,这表明在剪切力作用于样品后,体系结构改变,表现为黏度降低。Muresan 等^[30]采用胶体磨制备不同粒度的芝麻酱,也发现其触变环面积随着粒度的减小而减少,结果与本研究相似。

根据动态剪切流变学结果,所有样品的 G' 与 G'' 均显示出频率依赖性。特别是在 10~100 Hz,球磨时间越长,样品的 G' 与 G'' 的增加速率越高,即样品在低频率时表现为液体,而在高频率下表现为固体特征,且小粒径样品体系的趋势更为明显。这可能是因为球磨作用时间延长后,颗粒间形成的骨架结构被破坏,相互作用强度降低。这一现象与流变曲线、触变性、质构特性和粒径分布测定结果一致。

高能球磨技术在短时间、不添加辅料的情况下可制备具有不同流变学特性的核桃酱。随着球磨时间的延长,样品的黏度、弹性均逐渐降低,流动性逐渐增强。本研究为高能振动球磨技术在核桃酱制备领域中的应用提供了科学依据,加强了对核桃酱流变行为和微观结构的理解,将有助于糖果、坚果等制造厂商控制核桃酱、酥糖等加工食品的产品质量和制造工艺,拓宽核桃酱的应用前景。

参考文献 References

- [1] United States Department of Agriculture(USDA). Tree nuts; world markets and trade[EB/OL][2020-10-25].<https://apps.fas.usda.gov/PSDOnline/CircularDownloader.ashx?year=2020&month=11&commodity=TreeNuts>.

- [2] FUENTEALBA C, HERNÁNDEZ I, SAA S, et al. Colour and *in vitro* quality attributes of walnuts from different growing conditions correlate with key precursors of primary and secondary metabolism[J]. Food chemistry, 2017, 232: 664-672.
- [3] HAYES D, ANGOVE M J, TUCCI J, et al. Walnuts (*Juglans regia*) chemical composition and research in human health[J]. Critical reviews in food science and nutrition, 2016, 56(8): 1231-1241.
- [4] MOHD ROZALLI N H, CHIN N L, YUSOF Y A. Grinding characteristics of Asian originated peanuts (*Arachis hypogaea* L.) and specific energy consumption during ultra-high speed grinding for natural peanut butter production[J]. Journal of food engineering, 2015, 152: 1-7.
- [5] GORREPATI K, BALASUBRAMANIAN S, CHANDRA P. Plant based butters[J]. Journal of food science and technology, 2015, 52(7): 3965-3976.
- [6] BECKETT S T. Is the taste of British milk chocolate different? [J]. International journal of dairy technology, 2003, 56(3): 139-142.
- [7] SERVAIS C, RANC H, ROBERTS I. Determination of chocolate viscosity[J]. Journal of texture studies, 2003, 34: 467-497.
- [8] LONČAREVIĆ I, PAJIN B, PETROVIĆ J, et al. The impact of sunflower and rapeseed lecithin on the rheological properties of spreadable cocoa cream[J]. Journal of food engineering, 2016, 171: 67-77.
- [9] SHAHIDI-NOGHABI M, NAJI-TABASI S, SARRAF M. Effect of emulsifier on rheological, textural and microstructure properties of walnut butter[J]. Journal of food measurement and characterization, 2018, 13(1): 785-792.
- [10] WAGENER E A, KERR W L. Effects of oil content on the sensory, textural, and physical properties of pecan butter (*Carya illinoensis*) [J]. Journal of texture studies, 2018, 49(3): 286-292.
- [11] VEENA R, BHATTACHARYA S. Rheological characterization of raw and roasted green gram pastes [J]. LWT-food science and technology, 2012, 46(1): 260-266.
- [12] ROHM H, BÖHME B, SKORKA J. The impact of grinding intensity on particle properties and rheology of dark chocolate [J]. LWT-food science and technology, 2018, 92: 564-568.
- [13] FIDALEO M, MIELE N A, MAINARDI S, et al. Effect of refining degree on particle size, sensory and rheological characteristics of anhydrous paste for ice creams produced in industrial stirred ball mill[J]. LWT-food science and technology, 2017, 79: 242-250.
- [14] KUMAR M, XIONG X, WAN Z, et al. Ball milling as a mechanochemical technology for fabrication of novel biochar nanomaterials [J/OL]. Bioresource technology, 2020, 312: 123613 [2020-10-25]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852420308853>. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123613.
- [15] LIU T Y, MA Y, YU S F, et al. The effect of ball milling treatment on structure and porosity of maize starch granule[J]. Innovative food science and emerging technologies, 2011, 12(4): 586-593.
- [16] RAMADHAN K, FOSTER T. Effects of ball milling on the structural, thermal, and rheological properties of oat bran protein flour [J]. Journal of food engineering, 2018, 229: 50-56.
- [17] YANG Y, ZHANG J L, ZHOU Q, et al. Effect of ultrasonic and ball-milling treatment on cell wall, nutrients, and antioxidant capacity of rose (*Rosa rugosa*) bee pollen, and identification of bioactive components[J]. Journal of the science of food and agriculture, 2019, 99(12): 5350-5357.
- [18] LIU B, WANG H, HU T, et al. Ball-milling changed the physicochemical properties of SPI and its cold-set gels[J]. Journal of food engineering, 2017, 195: 158-165.
- [19] 徐群英, 赵锦妆. 脂肪替代物对人造奶油物性品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(8): 52-56. XU Q Y, ZHAO J Z. Effect of fat substitute on physical properties of margarine [J]. Food science, 2020, 41(8): 52-56 (in Chinese with English abstract).
- [20] AHMED T, TAN H, ZHUO Z, et al. Effect of different oils and ultrasound emulsification conditions on the physicochemical properties of emulsions stabilized by soy protein isolate[J]. Ultrasonics sonochemistry, 2018, 49: 283-293.
- [21] MA Z, BOYE J I, FORTIN J, et al. Rheological, physical stability, microstructural and sensory properties of salad dressings supplemented with raw and thermally treated lentil flours[J]. Journal of food engineering, 2013, 116(4): 862-872.
- [22] KLAOCHANPONG N, PUNCHA-ARNON S, UTTAPAP D, et al. Octenyl succinylation of granular and debranched waxy starches and their application in low-fat salad dressing[J]. Food hydrocolloids, 2017, 66: 296-306.
- [23] ZHANG W, XU T, YANG R. Effect of roasting and grinding on the processing characteristics and organoleptic properties of sesame butter [J/OL]. European journal of lipid science and technology, 2019, 121(7): 1800401 [2020-10-25]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ejlt.201800401>.
- [24] BHANDARI P N, SINGHAL R S, KALE D D. Effect of succinylation on the rheological profile of starch pastes [J]. Carbohydrate polymers, 2002, 47(4): 365-371.
- [25] YOO B. Steady and dynamic shear rheology of glutinous rice flour dispersions [J]. International journal of food science and technology, 2006, 41(6): 601-608.
- [26] RAZAVI S M A, NAJAFI M B H, ALAEE Z. The time independent rheological properties of low fat sesame paste/date syrup blends as a function of fat substitutes and temperature [J]. Food hydrocolloids, 2007, 21(2): 198-202.
- [27] YANG X, GONG T, LU Y H, et al. Compatibility of sodium alginate and konjac glucomannan and their applications in fabricating low-fat mayonnaise-like emulsion gels [J/OL]. Carbohydrate polymers, 2019, 229: 115468 [2020-10-25]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861719311361>. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.115468.
- [28] 杨颖, 单杨, 丁胜华, 等. 高能球磨处理对赣南脐橙全果原浆粒

- 径和流变特性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(11): 109-115.
- YANG Y, SHAN Y, DING S H, et al. Effect of high-energy ball milling on particle size and rheological properties of whole pulp of Gannan navel orange[J]. Food science, 2019, 40(11): 109-115(in Chinese with English abstract).
- [29] ABU-JDAYIL B, AL-MALAH K, ASOUD H. Rheological characterization of milled sesame (tehneh)[J]. Food hydrocolloids, 2002, 16(1): 55-61.
- [30] MURESAN V, DANTHINE S, RACOLTA E, et al. The influence of particle size distribution on sunflower tahini rheology and structure[J]. Journal of food process engineering, 2014, 37(4): 411-426.

Effect of high-energy ball milling on rheological properties of walnut butter

WANG Zhongkun, GENG Mengjie, DU Linxiao, JIANG Nan, HU Hao

College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract Walnut butter is a semi-solid paste, which is made from ground and roasted walnut. In order to obtain the product with consumer acceptability on the market, it is necessary to analyze the effect of grinding on processing characteristics of walnut butter. In this study, the walnut kernel was ball milled for different durations (2, 4, 8, 16, and 24 min) to develop walnut butter products, reduce the particle size and improve rheological properties. The average particle diameter of walnut butter after ball milling for 24 min decreased from 79.89 μm to 37.88 μm , by 53% overall. Walnut butter was a typical non-Newtonian pseudoplastic fluid, which had the characteristics of viscoelasticity and positive thixotropy. The results revealed that the hardness and consistency of the walnut butter decreased, and the fluidity gradually increased during the ball milling treatment. The walnut butter ball milled for 8 minutes showed the higher viscosity and smaller in particle size, and was suitable for processing as a spreadable butter. As for ball milling process for 16 and 24 min exhibited the best fluidity and was suitable for the processing of salad sauce. Results could be useful in development of the walnut butter making process system design. Therefore, high-energy ball milling technology could be used as a technique for preparing walnut butter, and gradually change the rheological properties of finely divided walnut butter through the process.

Keywords high-energy ball milling; emulsion gel; rheological properties; texture; thixotropy; walnut butter; ball milling

(责任编辑: 赵琳琳)