

超声波处理对全蛋液流变特性的影响

Effect of ultrasonic treatment on the rheological properties of liquid whole egg

白喜婷^{1,2,3} 朱文学^{1,2,3} 马怡童^{1,2,3} 刘思佳^{1,2,3} 李 宁^{1,2,3}

BAI Xi-ting^{1,2,3} ZHU Wen-xue^{1,2,3} MA Yi-tong^{1,2,3} LIU Si-jia^{1,2,3} LI Ning^{1,2,3}

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023; 2. 国家级实验教学示范中心[河南科技大学], 河南 洛阳 471023; 3. 农产品干燥技术与装备河南省工程技术研究中心, 河南 洛阳 471023)

(1. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 2. National Demonstration Center for Experimental Food Processing and Safety Education, Luoyang, Henan 471023, China; 3. Agricultural Products Drying Technology and Equipment of Henan Engineering Technology Research Center, Luoyang, Henan 471023, China)

摘要:采用不同超声声能密度(0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0 W/g)及超声作用时间(0, 5, 10, 15, 20 min)对全蛋液进行处理, 再用流变仪测其流变特性。试验结果表明, 全蛋液是一种假塑性非牛顿流体, 具有剪切稀化现象, 其流变曲线在温度为 0~40 ℃ 时服从 Herschel-Bulkley 模型。随着超声作用时间及声能密度的增大, 全蛋液的流变特性指数增大, 屈服应力及黏稠系数减小, 流动性增加, 全蛋液的非牛顿流体特性减弱, 牛顿流体特性增强。动态流变试验结果表明, 随着超声作用时间及声能密度的增大, 全蛋液的损耗模量 G'' 和储能模量 G' 均减小, 说明全蛋液的黏性特征和弹性特征均减弱, 流动性增强, 与静态流变试验结果一致。

关键词:超声波; 流变特性; 假塑性流体; 全蛋液

Abstract: In order to study the effect of ultrasonic treatment on the rheological properties of liquid whole egg, the different ultrasonic energy density (0.4, 0.8, 1.2, 1.6, and 2.0 W/g) and the ultrasonic time (0, 5, 10, 15, and 20 min) on the liquid whole egg were studied, and then the rheological properties of rheometer was measured. The static rheological experimental results showed that the egg was a pseudoplastic non-Newtonian fluid with the shear thinning phenomenon. The rheological curve was obedient to the Herschel-Bulkley model at the temperature of 0~40 ℃. With the increase of ultrasonic time and ultrasonic en-

ergy density, the index of rheological properties and liquidity of liquid whole egg were increased, and the yield stress and viscosity coefficient were decreased, which weaken the non-Newton fluid characteristics and enhanced Newton fluid characteristics. Dynamic rheological experimental results showed that with the increase of ultrasonic time and ultrasonic energy density, both the loss modulus and the storage modulus were decreased, and the viscosity characteristics and elastic characteristics were decreased. Finally, the liquidity of the liquid whole egg was enhanced, and this phenomenon was consistent with the static rheological experimental results.

Keywords: ultrasonic; rheological properties; pseudoplastic fluid; liquid whole egg

全蛋液流变特性是全蛋液所表现出来的黏性流体力学和弹性力学的性质, 对全蛋液的加工、运输及咀嚼等有着密切的关系^[1-3], 研究全蛋液的流体特征及黏度的变化对进一步拓展全蛋液在工业中的应用和控制全蛋液加工过程中的品质, 及对工艺、设备设计提供必要的数据等方面具有积极意义^[4-5]。

产生微射流, 增加流体的运动, 同时破坏大分子物质之间的空间网络结构, 降低流体黏度^[6-7]。目前, 将超声波技术应用于流变性质方面的研究逐渐增多, Arzeni 等^[8]发现, 经 20 kHz、(4.27 ± 0.71) W 的超声条件处理后, 卵白蛋白溶液的表现黏度降低, 表面疏水性增加, 而其他分子结构未见改变。聂卉等^[9]研究发现, 不同超声作用下马铃薯淀粉糊均呈假塑性流体特征, 符合幂律定律, 同时, 马铃薯淀粉糊的表现黏度随着超声时间和声强的增强而降低, 流动性增加。陈洁等^[10]研究发现, 不同功

基金项目:河南省高校科技创新团队支持计划项目(编号: 17IRTSTHN016)

作者简介:白喜婷, 女, 河南科技大学副教授, 硕士。

通信作者:朱文学(1967—), 男, 河南科技大学教授, 博士。

E-mail: zwx@mail.haust.edu.cn

收稿日期:2019-03-03

率超声波处理后的木薯淀粉均属于假塑性流体,具有剪切稀化现象及明显的触变环。朱巧巧等^[11]发现,超声前后锥栗淀粉均属于非牛顿流体,其表观黏度随超声时间的延长呈先减小后增大再减小的趋势。

目前,未见将超声应用于全蛋液流变方面的研究,本试验拟以全蛋液为试验材料,探究超声波作用时间及声能密度对全蛋液流变性质的影响,建立全蛋液流变模型,以为全蛋液在工业上的广泛应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料

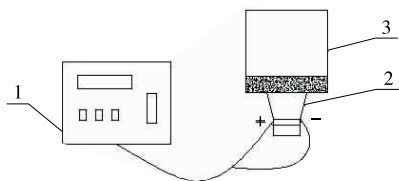
新鲜的红皮鸡蛋:干基含水率为 3.17 g/g,购于洛阳丹尼斯超市。

1.1.2 仪器与设备

超声波设备(见图 1):KMD-1000 型,深圳科美达超声波设备有限公司;

电子秤:SB-B30002 型,盛博电子衡器有限公司;

流变仪:DHR-2 型,美国 TA 公司。



1. 超声波发生器 2. 超声波换能器 3. 超声波接收装置(物料槽)

图 1 超声波装置示意图

Figure 1 Schematic diagram of ultrasonic device

1.2 试验方法

1.2.1 全蛋液的超声处理方法 称取 50 g 混合均匀的全蛋液,放入超声波接收装置中,打开超声波发生器,在一定超声声能密度下超声一定时间。

在室温 25 °C 条件下,分别进行单因素试验,研究超声声能密度及作用时间对全蛋液流变特性的影响。固定因素为:超声声能密度 1.2 W/g,超声时间 10 min。变量及水平:超声波作用时间 0,5,10,15,20 min;超声声能密度 0.4,0.8,1.2,1.6,2.0 W/g。试验平行 3 次。

1.2.2 静态流变特性的测定

(1) 不同温度下全蛋液的表观黏度及流变模型:参考陈洁等^[10]的方法,稍作修改,取少量样品置于流变仪的测定平台上,选取直径为 40 mm 的平板模具,两平板间的距离为 1 000 μm,刮去多余样品,选择稳剪切测试程序,在 0,20,40 °C 条件下,测定表观黏度及剪切应力随剪切速率从 0~300 s⁻¹ 递增的变化曲线,采用 Herschel-Bulkley 模型对流变曲线进行拟合,得出各流变模型及流变特性参数。Herschel-Bulkley 模型:

$$\sigma = \sigma_0 + k\gamma^n, \quad (1)$$

式中:

σ ——剪切应力,Pa;

γ ——剪切速率,s⁻¹;

σ_0 ——屈服应力,Pa;

k ——黏稠系数,Pa·sⁿ;

n ——流变特性指数。

(2) 不同超声处理条件下全蛋液的表观黏度及流变模型:按步骤 1.2.1(1)进行放样,在 20 °C 条件下,测定不同样品的表观黏度及剪切应力随剪切速率从 0~300 s⁻¹ 递增过程中的变化。采用 Herschel-Bulkley 模型对流变曲线进行拟合,得到全蛋液在不同超声处理条件下的流变模型及流变特性参数。

1.2.3 动态流变性质测定

(1) 线性黏弹区的确定:参考余振宇等^[12]的方法,在 20 °C 条件下,采用动态测试程序,40 mm 的平板模具,振荡频率固定在 29.5 Hz,测定复合模量 G^* 随振荡应变的变化,在全蛋液的线性黏弹区内,其复合模量 G^* 恒定,从而确定合适的振荡应变。

(2) 频率扫描:振荡应变固定在 0.3%,对样品进行频率扫描,振荡频率范围为 10~40 Hz。测定贮能模量 G' 、损耗模量 G'' 的变化。

1.3 数据处理

采用 Origin 8.5 软件对试验数据进行分析 and 绘图。

2 结果与分析

2.1 温度对全蛋液静态流变特性的影响

2.1.1 表观黏度 由图 2 可知,在不同温度下,随剪切速率的增大,全蛋液的表观黏度减小,呈现出假塑性流体特有的剪切稀化现象。这是由于剪切速率较低时,蛋液中分子取向混乱,随着剪切速率的增大,分子取向逐渐一致,表观黏度降低^[13]。在低剪切速率为 0~10 s⁻¹ 时,表观黏度减小的程度尤为明显。

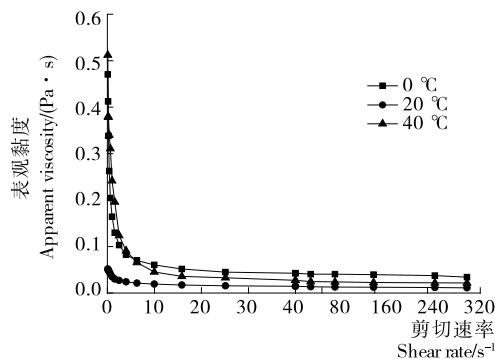


图 2 温度对全蛋液表观黏度的影响

Figure 2 Effect of temperature on apparent viscosity of liquid whole egg

当剪切速率 $<6.31\text{ s}^{-1}$ 时,随着剪切速率的增大, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 蛋液的表观黏度小于 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 蛋液的表观黏度;当剪切速率为 6.31 s^{-1} 时,其表观黏度分别为 $0.069, 0.065\text{ Pa}\cdot\text{s}$;当剪切速率 $>6.31\text{ s}^{-1}$ 时,随着剪切速率的增大, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 蛋液的表观黏度大于 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 蛋液的表观黏度。

在整个剪切过程中, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 全蛋液的表观黏度始终大于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 蛋液的表观黏度,这是由于在温度 $<20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,分子之间的相对运动在低温下较慢,流动性降低,分子表观黏度相对较大,而当温度 $>20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,随着温度的升高,分子之间运动加剧,加速分子之间的碰撞,导致分子发生凝结缠绕,分子取向不一,不利于流动,表观黏度也相对较大^[13]。

2.1.2 流变模型 由图3可知,当温度 $0, 20, 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,随剪切速率的增大,全蛋液的剪切应力增加。这是由于剪切速率增大,液体流速加快,速度梯度变大,要使流体中缠绕在一起的大分子物质变形或解体,剪切力也随之增大^[12]。

从图3中还可以看出, $0\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,其剪切应力随温度的降低而升高,而 $20\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,其剪切应力随温度的升高而升高,这是由于在温度 $<20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,温度越低,分子

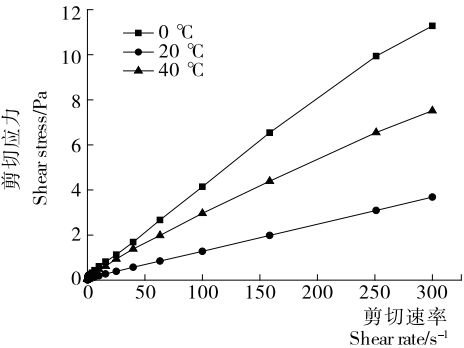


图3 温度对全蛋液剪切应力的影响

Figure 3 Effect of temperature on shear stress of liquid whole egg

之间的相对运动越慢,表观黏度降低,剪切所需要的剪切力相对较大。而当温度 $>20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,随着温度的升高,分子之间运动加剧,加速分子之间的碰撞,导致分子发生凝结缠绕,表观黏度增大,因此,剪切力也随之增大。

在整个剪切过程中, $0\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 全蛋液的流变曲线符合非牛顿流体的屈服—假塑性流体^[14],可采用 Herschel-Bulkley 模型 $\sigma = \sigma_0 + k\gamma^n$ 进行拟合,得到拟合参数见表1。

表1 温度对全蛋液流变特性参数的影响[†]

Table 1 Effect of temperature on rheological parameters of liquid whole egg

温度/ $^{\circ}\text{C}$	屈服应力 σ_0/Pa	黏稠系数 $k/(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	流变特性指数 n	决定系数 R^2	残差平方和 χ^2
0	0.080 ^a	0.057 ^a	0.931 ^a	0.999 1	0.009 5
20	0.025 ^c	0.016 ^b	0.952 ^a	0.999 7	0.000 3
40	0.064 ^b	0.055 ^a	0.863 ^b	0.999 8	0.000 7

[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

由表1可知,全蛋液的流变特性指数(n)均 <1 ,且随着温度的升高,呈先增大后减小的趋势,流变特性指数的大小反映了流体剪切变稀的难易程度,表示流体偏离牛顿流体的程度^[12]。表1中蛋液的流变特性指数减小,表明全蛋液的非牛顿流体行为增强,牛顿流体行为减弱。

因此,从 $0\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,随着温度的升高,流变特性指数 n 增大,蛋液的牛顿流体行为增强,屈服应力减小,黏稠系数相应减小,表观黏度减小,易于剪切。而温度在 $20\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,随温度的升高,流变特性指数 n 显著($P<0.05$)减小,蛋液的非牛顿流体行为增强,屈服应力增大,黏稠系数相应增大,表观黏度增大,不易剪切,与蛋液流变曲线的变化趋势相符合。模型的决定系数(R^2)为 $0.999\text{ }1\sim 0.999\text{ }8$,残差平方和 χ^2 为 $0.000\text{ }3\sim 0.009\text{ }5$,说明 Herschel-Bulkley 模型可用来拟合全蛋液的流变曲线。

2.2 超声作用时间及声能密度对全蛋液静态流变特性的影响

2.2.1 表观黏度 由图4、5可知,不同超声处理条件下,全蛋液的表观黏度随剪切速率的增大而降低,表现为剪

切稀化现象,这是由于剪切过程破坏了蛋液的胶体状态及其大分子物质之间紧密的结构,分子之间重新排列,使其流动性增强,表观黏度降低^[12],且在较低剪切速率($0\sim 10\text{ s}^{-1}$)下,表观黏度下降较多,随着剪切速率的增大,分子之间取向逐渐趋于相同,表观黏度也逐渐稳定^[13]。

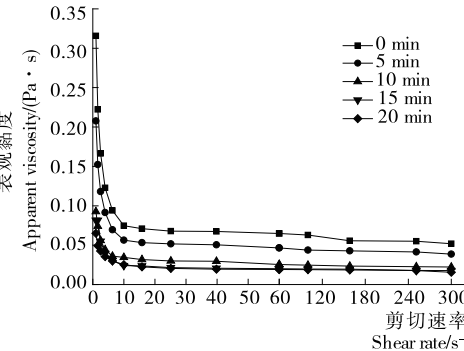


图4 超声作用时间对全蛋液表观黏度的影响

Figure 4 Effect of ultrasonic treatment time on apparent viscosity of liquid whole egg

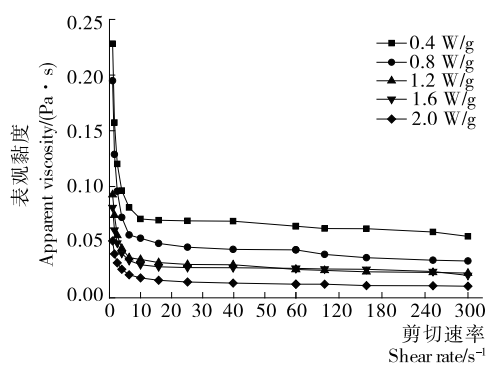


图5 超声声能密度对全蛋液表观黏度的影响

Figure 5 Effect of ultrasonic energy density on apparent viscosity of liquid whole egg

当剪切速率一定时,随着超声作用时间及声能密度的增大,全蛋液的表观黏度降低,未超声(0 min)时初始表观黏度为 $0.316 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,而超声作用时间 5, 10, 15, 20 min 后其黏度分别为 $0.208, 0.093, 0.082, 0.065 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 分别降低了 34%, 71%, 74%, 79%, 当超声声能密度为 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0 W/g 时其黏度分别为 $0.228, 0.195, 0.093, 0.081, 0.051 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 分别降低了 28%, 38%, 71%, 74%, 84%。这是由于超声在液体中传播时,其空化效应可产生强烈的高温、高压,且空化泡的塌陷、崩溃可产生冲击波及固-液界面微射流,同时,结合其机械效应产生的强大剪切力,共同破坏蛋液内部的胶团结构,及大分子之间键合作用,使液体流动性增加,黏度降低,且随着超声作用时间及声能密度的增加,其机械效应随之增强,在强大的破坏力下,物料组织被反复拉伸、断裂,此外,空化泡的不断崩溃使液体流动性增强,因此表观黏度下降得更多^[15]。

2.2.2 流变模型 由图 6, 7 可知,随剪切速率的增加,不同超声作用时间及声能密度处理全蛋液的剪切应力增大,当剪切速率一定时,全蛋液的剪切应力随超声作用时间的延长而降低,如剪切速率在 300 s^{-1} 时未处理(0 min)

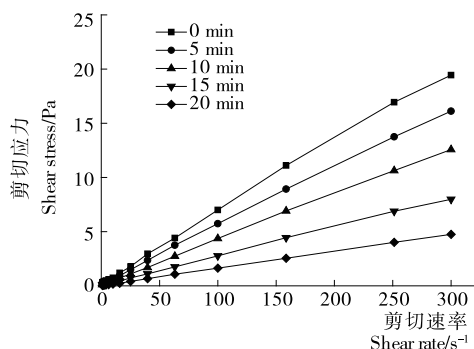


图6 超声作用时间对全蛋液剪切应力的影响

Figure 6 Effect of ultrasonic treatment time on shear stress of liquid whole egg

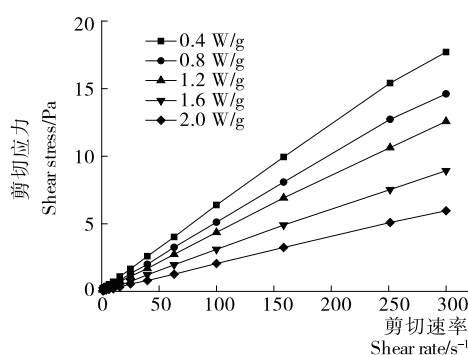


图7 超声声能密度对全蛋液剪切应力的影响

Figure 7 Effect of ultrasonic energy density on shear stress of liquid whole egg

的全蛋液其剪切应力为 19.44 Pa ,当超声处理时间为 5, 10, 15, 20 min 时全蛋液的剪切应力分别为 $15.62, 11.98, 7.99, 4.14 \text{ Pa}$ 。同样,在剪切速率一定时,全蛋液的剪切应力随超声声能密度的增大而降低,如剪切速率在 300 s^{-1} ,超声声能密度为 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0 W/g 时,全蛋液的剪切应力分别为 $17.71, 14.63, 11.98, 8.63, 5.57 \text{ Pa}$ 。

经超声处理后,其剪切应力均比未经超声处理的小,这是超声空化效应和机械效应作用的结果。采用 Herschel-Bulkley 模型 $\sigma = \sigma_0 + k\gamma^n$ 对流变数据进行拟合,得到拟合参数见表 2、3。

由表 2、3 可知,流变特性指数 $n < 1$,且随着超声作用时间及声能密度的增大而增大,而屈服应力及黏稠系数随之减小,表明超声作用可使全蛋液的牛顿流体行为增强,非牛顿流体行为减弱。由于全蛋液中含有蛋白质、脂肪等大分子物质,其复杂的空间结构相互缠绕,形成一定的空间网络,使得全蛋液具有一定的屈服应力,而超声的空化效应及机械效应打破大分子物质间的网络结构,从而降低屈服应力,黏稠系数也相应降低^[16-17]。

曲线拟合的决定系数 R^2 为 $0.9994 \sim 0.9998$,残差平方和 χ^2 为 $0.0009 \sim 0.0166$,说明不同超声条件下,全蛋液的流变曲线均符合 Herschel-Bulkley 模型。

2.3 超声作用时间及声能密度对全蛋液动态流变特性的影响

2.3.1 线性黏弹区的确定 线性黏弹区是指复合模量 G^* 不随振荡应变变化的区域^[18],表明在线性黏弹区内,全蛋液的内部结构不会被剪切力破坏。由图 8 可知,未经超声处理和经超声处理一定时间的全蛋液,其振荡应变在 $0.15\% \sim 0.50\%$ 时复合模量保持稳定,不同超声声能密度处理下,全蛋液的振荡应变也在此范围内,因此,该振荡应变区间为全蛋液的线性黏弹区。后续选定 0.30% 的振荡应变作为测定全蛋液动态流变特性的条件。

表 2 超声作用时间对全蛋液流变特性参数的影响[†]

Table 2 Effect of ultrasonic treatment time on rheological parameters of liquid whole egg

作用时间/min	屈服应力 σ_0 /Pa	黏稠系数 $k/(\text{Pa} \cdot \text{s}^n)$	流变特性指数 n	决定系数 R^2	残差平方和 χ^2
0	0.104 ^a	0.087 ^a	0.949 ^d	0.999 3	0.033 4
5	0.077 ^b	0.067 ^b	0.957 ^c	0.999 8	0.007 6
10	0.023 ^c	0.049 ^c	0.973 ^b	0.999 6	0.003 4
15	0.013 ^d	0.031 ^d	0.975 ^{ab}	0.999 7	0.003 3
20	0.012 ^d	0.018 ^e	0.977 ^a	0.999 3	0.000 3

[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

表 3 超声声能密度对全蛋液流变特性参数的影响[†]

Table 3 Effect of ultrasonic energy density on rheological parameters of liquid whole egg

声能密度/ $(\text{W} \cdot \text{g}^{-1})$	屈服应力 σ_0 /Pa	黏稠系数 $k/(\text{Pa} \cdot \text{s}^n)$	流变特性指数 n	决定系数 R^2	残差平方和 χ^2
0.4	0.059 ^a	0.064 ^a	0.950 ^d	0.999 5	0.016 6
0.8	0.052 ^a	0.057 ^b	0.964 ^c	0.999 4	0.014 4
1.2	0.023 ^b	0.049 ^c	0.973 ^b	0.999 8	0.003 4
1.6	0.012 ^c	0.034 ^d	0.975 ^b	0.999 7	0.002 6
2.0	0.009 ^c	0.022 ^e	0.983 ^a	0.999 8	0.000 9

[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

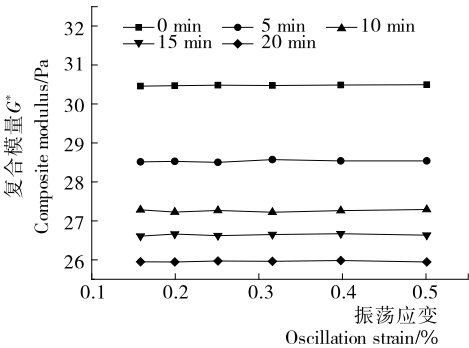


图 8 超声作用时间对全蛋液线性黏弹区的影响
Figure 8 Effect of ultrasonic treatment time on linear viscoelasticity region of liquid whole egge

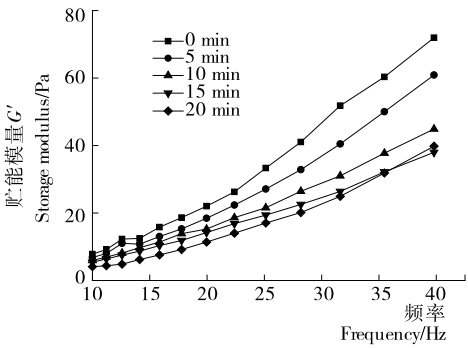


图 9 超声作用时间对全蛋液储能模量的影响
Figure 9 Effect of ultrasonic treatment time on G' of liquid whole egg

2.3.2 超声对全蛋液储能模量与损耗模量的影响

(1) 超声时间的影响:对不同超声时间下的全蛋液进行频率扫描,测定频率扫描过程中储能模量 G' 、损耗模量 G'' 的变化,结果见图 9、10。由图 9、10 可知,在 10~40 Hz 的频率范围内,全蛋液的损耗模量 G'' 和储能模量 G' 与频率具有一定的依赖性,同时,随着超声作用时间的增大,损耗模量 G'' 和储能模量 G' 均减小,说明全蛋液的黏性特征和弹性特征均减弱。这是因为损耗模量 G'' 主要是由小分子的碳水化合物、维生素、无机盐等所表现出的黏性行为,而储能模量 G' 主要是由大分子的蛋白质、脂肪等所表现出的固体弹性行为^[19]。超声作用会使大分子链断裂,同时破坏大分子物质之间的排列方式及其空

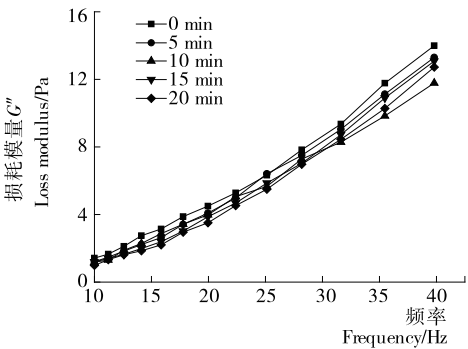


图 10 超声作用时间对全蛋液损耗模量的影响
Figure 10 Effect of ultrasonic treatment time on G'' of liquid whole egg

间结构,呈现更疏松的趋势,从而使损耗模量 G'' 和贮能模量 G' 均减小。

流体的黏弹特征可以用损失正切 ($\tan\delta$) 来表示, $\tan\delta=G''/G'$, 当 $\tan\delta<1$ 时,说明 G' 相对于 G'' 占主要优势,流体主要表现固体弹性性质,反之则主要表现为流体黏性性质^[20]。由表 4 可知, $\tan\delta$ 始终小于 1,说明全蛋液的储能模量 G' 始终大于损耗模量 G'' , 即其弹性特征大于黏性特征,主要是由于全蛋液中的蛋白质、脂肪等大分子物质所表现出的弹性特征占优势,全蛋液主要表现为弹性性质^[21-22]。

(2) 超声声能密度的影响:对不同超声声能密度下的全蛋液进行频率扫描,测定频率扫描过程中贮能模量 G' 、损耗模量 G'' 的变化,由图 11、12 可知,在 10~40 Hz 的频率范围内,全蛋液的损耗模量 G'' 和贮能模量 G' 与频率具有一定的依赖性,同时,随着超声声能密度的增大,损耗模量 G'' 和贮能模量 G' 均减小,说明全蛋液的黏性特征和弹性特征均减弱。由表 5 可知, $\tan\delta$ 始终小于 1 且呈波动状,说明全蛋液中的蛋白质、脂肪等大分子物质所表现出的弹性特征占优势,全蛋液主要表现为弹性性质^[21]。

表 4 超声作用时间对全蛋液损耗模量/储能模量 ($\tan\delta$) 的影响[†]

Table 4 Effect of ultrasonic treatment time on $\tan\delta$ of liquid whole egg

超声作用 时间/min	10.000 Hz	11.220 Hz	12.589 Hz	14.125 Hz	15.849 Hz	17.783 Hz	19.953 Hz
0	0.182±0.012 ^d	0.181±0.007 ^c	0.173±0.013 ^d	0.220±0.005 ^b	0.199±0.006 ^d	0.208±0.012 ^d	0.204±0.008 ^d
5	0.177±0.002 ^d	0.185±0.007 ^c	0.166±0.012 ^d	0.206±0.010 ^c	0.202±0.001 ^d	0.224±0.012 ^c	0.221±0.010 ^c
10	0.199±0.001 ^c	0.188±0.011 ^c	0.230±0.015 ^b	0.235±0.013 ^b	0.252±0.012 ^b	0.247±0.009 ^b	0.261±0.005 ^b
15	0.220±0.013 ^b	0.219±0.007 ^b	0.219±0.012 ^c	0.228±0.012 ^b	0.231±0.009 ^c	0.255±0.006 ^b	0.273±0.001 ^b
20	0.240±0.005 ^a	0.305±0.021 ^a	0.334±0.015 ^a	0.298±0.009 ^a	0.291±0.012 ^a	0.322±0.010 ^a	0.308±0.006 ^a
超声作用 时间/min	22.387 Hz	25.119 Hz	28.184 Hz	31.623 Hz	35.482 Hz	39.811 Hz	
0	0.201±0.011 ^d	0.190±0.004 ^c	0.191±0.005 ^c	0.181±0.011 ^d	0.195±0.008 ^c	0.195±0.010 ^c	
5	0.223±0.014 ^c	0.237±0.010 ^d	0.228±0.007 ^d	0.223±0.009 ^c	0.222±0.014 ^d	0.218±0.002 ^d	
10	0.271±0.013 ^b	0.263±0.012 ^c	0.275±0.007 ^c	0.267±0.006 ^b	0.261±0.010 ^c	0.262±0.011 ^c	
15	0.278±0.012 ^b	0.303±0.009 ^b	0.312±0.010 ^b	0.331±0.007 ^a	0.339±0.013 ^a	0.345±0.015 ^a	
20	0.323±0.004 ^a	0.323±0.012 ^a	0.346±0.002 ^a	0.339±0.005 ^a	0.323±0.016 ^b	0.320±0.007 ^b	

† 同列字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)。

表 5 超声声能密度对全蛋液的损耗模量/贮能模量 ($\tan\delta$) 的影响[†]

Table 5 Effect of ultrasonic energy density on $\tan\delta$ of liquid whole egg

超声声能密度/ ($W \cdot g^{-1}$)	10.000 Hz	11.220 Hz	12.589 Hz	14.125 Hz	15.849 Hz	17.783 Hz	19.953 Hz
0.4	0.176±0.012 ^c	0.171±0.007 ^c	0.178±0.012 ^d	0.201±0.014 ^d	0.213±0.017 ^d	0.218±0.010 ^c	0.223±0.009 ^d
0.8	0.181±0.018 ^c	0.183±0.003 ^b	0.193±0.008 ^c	0.223±0.012 ^c	0.226±0.013 ^c	0.220±0.013 ^c	0.237±0.007 ^c
1.2	0.199±0.007 ^b	0.188±0.002 ^b	0.230±0.001 ^a	0.235±0.012 ^b	0.252±0.005 ^a	0.247±0.008 ^b	0.261±0.012 ^b
1.6	0.225±0.010 ^a	0.217±0.004 ^a	0.216±0.016 ^b	0.241±0.009 ^a	0.240±0.004 ^b	0.275±0.012 ^a	0.302±0.015 ^a
2.0	0.162±0.012 ^d	0.159±0.011 ^d	0.183±0.006 ^d	0.236±0.019 ^b	0.261±0.004 ^a	0.272±0.007 ^a	0.302±0.005 ^a
超声声能密度/ ($W \cdot g^{-1}$)	22.387 Hz	25.119 Hz	28.184 Hz	31.623 Hz	35.482 Hz	39.811 Hz	
0.4	0.247±0.016 ^d	0.261±0.002 ^c	0.262±0.006 ^d	0.264±0.011 ^c	0.270±0.010 ^b	0.266±0.012 ^c	
0.8	0.252±0.009 ^d	0.254±0.015 ^c	0.252±0.012 ^c	0.263±0.011 ^c	0.272±0.007 ^b	0.276±0.013 ^b	
1.2	0.271±0.015 ^c	0.263±0.011 ^c	0.275±0.008 ^c	0.267±0.006 ^c	0.261±0.003 ^c	0.262±0.007 ^c	
1.6	0.284±0.009 ^b	0.299±0.005 ^b	0.288±0.018 ^b	0.282±0.003 ^b	0.276±0.008 ^b	0.278±0.011 ^b	
2.0	0.300±0.010 ^a	0.324±0.015 ^a	0.330±0.021 ^a	0.341±0.017 ^a	0.355±0.011 ^a	0.387±0.002 ^a	

† 同列字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)。

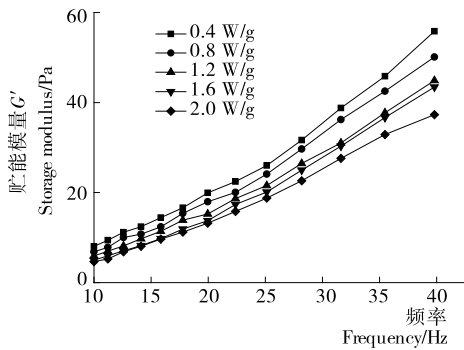


图 11 超声声能密度对全蛋液储能模量的影响
Figure 11 Effect of ultrasonic energy density on G' of liquid whole egg

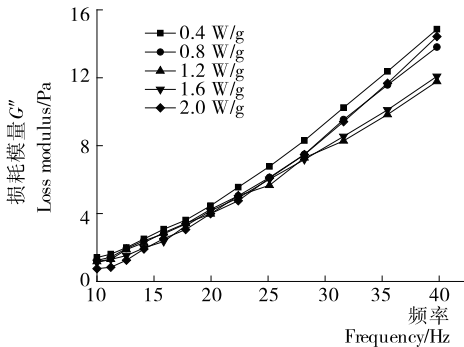


图 12 超声声能密度对全蛋液损耗模量的影响
Figure 12 Effect of ultrasonic energy density on G'' of liquid whole egg

3 结论

采用不同超声声能密度及超声作用时间对全蛋液进行处理,研究不同超声条件下全蛋液的流变特性,静态流变试验表明,全蛋液及超声处理后的全蛋液是一种假塑性非牛顿流体,其表观黏度随剪切速率的增大而减小,呈现出典型的剪切稀化现象,其流变曲线在温度为 $0\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时服从 Herschel-Bulkley 模型。动态流变试验表明,全蛋液线性黏弹区的振荡应变为 $0.15\%\sim 0.50\%$ 。在线性黏弹区内进行频率扫描,全蛋液的 $\tan\delta$ 始终小于 1,说明全蛋液主要表现为固体弹性性质,且不依赖于振荡频率。同时,随着超声作用时间及声能密度的增大,其损耗模量 G'' 和储能模量 G' 均减小,说明全蛋液的黏性特征和弹性特征均减弱,流动性增强,与静态流变试验结果一致。本研究从流体力学的角度分析全蛋液在超声作用下的黏度及流变特性,表明超声可以起到降低流体黏度的作用,从而降低加工能耗,但本试验未对超声温度及超声频率等因素进行研究,如何控制超声温度、超声温度和频率对流体影响及作用原理是后续研究的方向。

参考文献

[1] BEMILLER J N. Pasting, paste, and gel properties of starch-hydrocolloid combinations [J]. Carbohydrate

Polymers, 2011, 86(2): 386-423.
[2] 刘志东, 郭本恒. 食品流变学的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(11): 211-215.
[3] 雷勇刚. 大豆酸奶流变学特性及微观结构的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013: 4-5.
[4] 陈坤杰. 蜂乳的流变特性研究[J]. 农业机械学报, 2000, 31(4): 64-66.
[5] AHMED J, SINGH A, RAMASWAMY H S, et al. Effect of high-pressure on calorimetric, rheological and dielectric properties of selected starch dispersions[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 103(4): 12-21.
[6] 马空军, 贾殿赠, 包文忠, 等. 超声场强化渗透脱水传质机理模型研究[J]. 食品科学, 2011, 32(13): 94-101.
[7] 孙英杰. 超声波处理对大豆分离蛋白结构和功能性影响研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014: 21-22.
[8] ARZENI C, PÉREZ O E, AMR P. Functionality of egg white proteins as affected by high intensity ultrasound[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 29(2): 308-316.
[9] 聂卉, 李辰, 陈雨, 等. 超声处理对马铃薯淀粉糊流体性质和表观黏度的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(15): 19-24.
[10] 陈洁, 郭泽候, 刘贵珍, 等. 超声波处理木薯淀粉对其流变特性的影响[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2013, 42(1): 86-92.
[11] 朱巧巧, 兰冬梅, 林晓岚, 等. 不同超声时间处理对锥栗淀粉流变性质的影响[J]. 贵州农业科学, 2014(12): 214-216.
[12] 余振宇, 姜绍通, 潘丽军, 等. 芋头浆的流变特性[J]. 食品科学, 2015, 36(7): 36-40.
[13] 王常斌, 魏淑惠, 贾辉. 超声波频率对聚合物溶液流变性的影响[J]. 石油钻采工艺, 2004, 26(1): 72-74.
[14] 田少君, 雷继鹏, 孙阿鑫. 大豆蛋白的流变特性及其黏度的数学模型研究[J]. 中国粮油学报, 2005(2): 53-56.
[15] 刘云宏, 苗帅, 孙悦, 等. 接触式超声强化热泵干燥苹果片的干燥特性[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 228-236.
[16] LU Ting-jiang, LIN Jheng-hua, CHEN Jia-ci, et al. Characteristics of taro (*Colocasia esculenta*) starches planted in different seasons and their relations to the molecular structure of starch[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2008, 56(6): 2 208-2 215.
[17] 孙忠伟. 芋头淀粉的提取及其性质的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2004: 6-10.
[18] 杨述, 高昕, 于甜, 等. 4 种蛋黄酱的流变特性比较研究[J]. 食品科学, 2011, 32(15): 121-125.
[19] 许学勤, 朱巧力, 徐莹秋. 芒果浓缩汁的流变学特性[J]. 食品与生物技术学报, 2011, 30(1): 32-36.
[20] 汪海波, 王孟津, 张寒俊, 等. 草鱼鱼鳞胶原蛋白的流变学性能研究[J]. 食品科学, 2009, 30(23): 138-142.
[21] 罗昌荣, 麻建国, 许时婴. 破碎温度对番茄浆流变性质与果胶分子结构的影响[J]. 食品科学, 2001, 22(8): 24-29.
[22] AND S I, NISHINARI K. "Weak gel"-type rheological properties of aqueous dispersions of nonaggregated κ -carrageenan helices [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2001, 49(9): 4 436-4 441.