

豆浆在凝固过程中的动态流变特性研究

熊秀芳, 张炜, 李星恕, 靳红玲, 郭康权

(西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了研究豆腐的凝固工序, 实现豆腐的规格化和标准化生产, 本研究对豆浆在凝固过程中的动态流变特性进行了研究, 并进行了动力学分析。在凝固温度分别为 75 °C、80 °C、85 °C 时进行动态时间扫描, 得出豆浆的凝固过程由两段一级反应组成且符合连续一级反应模型; 第一段反应速率远远大于第二段反应速率; 根据弹性模量和黏性模量计算所得活化能分别为 19.19×10^1 kJ/mol 和 8.67×10^1 kJ/mol; 当温度小于 70 °C 时, 豆浆不能形成豆腐凝胶; 当温度在 75 °C 时, 弹性模量 G' 和黏性模量 G'' 相交, 豆浆的凝胶温度为 75 °C。通过动态温度扫描得出豆浆的凝固过程可分为三个阶段: 诱导阶段 (65~70 °C), 弹性模量 G' 和黏性模量 G'' 缓慢增大, 豆浆体系中有絮状沉淀生成; 加速阶段 (70~92 °C), 弹性模量 G' 和黏性模量 G'' 急剧增大; 稳定阶段 (温度大于 92 °C), 弹性模量 G' 和黏性模量 G'' 趋于稳定, 凝胶反应结束, 豆腐凝胶形成。

关键词: 豆浆; 凝固过程; 流变特性; 连续一级反应

文章编号: 1673-9078(2015)11-227-233

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.11.035

Dynamic Rheological Properties of Soymilk during the Coagulation Process

XIONG Xiu-fang, ZHANG Wei, LI Xing-shu, JIN Hong-ling, GUO Kang-quan

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: To achieve normalization and standardization of tofu production, the dynamic rheological properties of soymilk and related kinetics during the coagulation process were investigated. Dynamic time scanning was performed at 75 °C, 80 °C, and 85 °C; coagulation of soymilk consisted of two first-order reactions and matched a consecutive first-order reaction model. The rate constant in the first stage was much higher than that in the second stage and the calculated activation energy values from elastic modulus and viscous modulus were 19.19×10^1 kJ/mol and 8.67×10^1 kJ/mol, respectively. Tofu gel could not be formed from soymilk at temperatures below 70 °C. The elastic modulus G' -t and viscous modulus G'' -t curves intersected at 75 °C, which indicated that the coagulation temperature of soymilk was 75 °C. Through dynamic temperature scanning, it was found that the coagulation process could be divided into three stages: induction stage (65 °C~70 °C), acceleration stage (70 °C~92 °C), and stabilization stage (above 92 °C). The elastic modulus G' and viscous modulus G'' increased slowly and a small amount of flocculent precipitate was generated in soymilk during induction; G' and G'' increased rapidly during acceleration and tended to be stable during stabilization, indicating that the coagulation process was complete and tofu gel was formed.

Key words: soymilk; coagulation process; rheological properties; consecutive first-order reaction

随着人们健康意识的增强, 大豆的营养价值被人们重新认识和接受。科学研究表明, 大豆食品可以预防心血管疾病、癌症、骨质疏松、减轻妇女更年期综合症等, 具有防病保健作用。豆腐是我国主要的传统

收稿日期: 2014-11-21

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201003063-07); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(Z109021106, Z109021303)

作者简介: 熊秀芳(1973-), 女, 博士, 讲师, 主要从事农产品加工及品质检测方面的研究

通讯作者: 李星恕(1974-), 男, 博士, 副教授, 主要从事农业机械装备开发, 农副产品加工及机械设计, 农产品加工过程控制与品质无损检测方面的研究

豆制品, 历史悠久, 深受人们喜爱。我国近邻的日本, 是较早接受豆腐等大豆食品的国家。日本在《健康 21 世纪》计划中就提出: 每人每天吃一盒纳豆、一块豆腐。继日本之后, 美国在 20 世纪 80 年代也出现了“豆腐热”。近几年, 德国、加拿大、澳大利亚等国也开始生产和消费大豆食品。有专家预言, 豆腐等豆制品在 2020 年将风靡全球。大豆食品风靡全球, 推动了豆制品加工业尤其是豆腐制造业的迅速发展^[1-2]。

凝固工序是豆腐生产的关键工序, 直接影响豆腐的品质和得率。在凝固工序中, 工艺参数不确定, 大多靠生产者经验, 很难把握豆浆的凝固程度, 因此不同操作者或同一操作者不同时间生产出的豆腐质量都

不相同,这些都导致生产的豆腐质量不稳定。目前对豆浆凝固过程的研究较少,为了实现豆腐的规格化和标准化生产,有必要研究豆浆在凝固过程中的凝固机理^[1-3]。

一般测定食品的化学成分和组织结构是一个比较复杂的过程,有时甚至是不可能的,但是这些组织结构和化学成分的变化常常在食品的物性上表现出来,食品物性的测量相对容易,因此可以通过测量食品的物性来分析其内部组织结构和化学成分及其变化。豆浆在凝固过程中凝胶网络结构的形成,可以通过测定豆浆体系的动态流变特性来分析研究^[4]。监测豆浆体系中豆腐凝胶的形成速率,可以通过动态流变学方法检测豆腐凝胶过程中 G' 的变化,比较 G' 随时间的变化来监测凝胶速率,这是一种最常用的监测凝胶形成速率的方法,这种方法假设 G' 值代表了豆浆体系的弹性性质或固体性质,可直接反映出豆浆体系的强度^[5-7]。因此对豆腐凝胶过程可以用动态流变试验进行研究。

豆浆的凝固过程及生成的凝胶的强度受温度等外部环境的影响很大。豆腐凝胶形成过程中,温度直接影响豆腐凝胶的形成速率及品质,因此本论文对不同凝固温度时豆浆的凝固过程进行研究。

1 材料与方法

1.1 原料

大豆: 陕豆 125 (2013 年咸阳产大豆); 水: 蒸馏水 (西北农林科技大学蒸馏水厂); 凝固剂: 葡萄糖酸- δ -内酯 (上海黄浦食品添加剂有限公司)。

1.2 试样制备

精选大豆 250 g,用蒸馏水冲洗 3 次后沥干,按蒸馏水与干大豆的质量比为 6:1 加入 1500 g 蒸馏水,在室温(25 °C)下浸泡 12 h。浸泡结束后,将剩余的蒸馏水倒出、大豆沥干。磨浆时先把膨胀的大豆倒入磨浆机的料斗中,连续均匀地添加与泡豆剩余蒸馏水同量的蒸馏水进行研磨。研磨第一遍时加入 1/2,其余 1/2 与第一遍的豆渣混合后研磨第二遍。把第一遍豆浆和第二遍豆浆混合后用 120 目的尼龙网过滤,得到生豆浆。加热生豆浆至 95 °C 并保持 5 min,得到豆浆。将豆浆倒入不锈钢桶中,并把钢桶放入冰水中冷却,最后把盛有豆浆的钢桶放入 4 °C 的冰箱中备用。

1.3 试验装置

试验仪器采用美国 TA 公司生产的 Advanced

Rheometer-1000ex 应变控制型流变仪,在平行板模式下进行动态流变试验。下平板珀尔贴、上平板转子均连接加热系统,可对物料进行加热。平行板间试样边缘是自由边界,与空气接触,忽略自由边界的应力和压力对轴向应力和扭矩的影响^[8]。

在进行试验前,先将仪器校零,再将仪器预热到需要的温度,取适量的加有 GDL 凝固剂的豆浆试样放在直径为 40 mm 的平板夹具的下平板上,调节上平板位置至 1000 μ m 处,刮去平板周围压出的试样,在样品裸露部位添加一层硅化油 (防止高温时水分的蒸发),然后即可进行试验。

1.4 试验方法

对黏弹性材料的动态非线性响应方面的研究,目前还很少,还没有统一的描述参数,为了简化模型,动态流变试验在线性黏弹性范围内进行试验^[9]。

1.4.1 动态时间扫描

豆浆在加热凝固过程中的动态时间扫描是在恒定的凝固温度下,给平行板间的豆浆溶液施加恒定频率的正弦应变 (在线性黏弹性范围内),在一定时间范围内连续测量弹性模量 G' 、黏性模量 G'' 和损耗角 δ ,通过测定豆浆黏弹性指标随时间的变化,反应豆浆的凝固过程及所形成的豆腐凝胶的性质。

本研究中,凝固温度分别在 70 °C、75 °C、80 °C 和 85 °C 时对豆浆进行动态时间扫描,频率为 0.5 Hz,应变为 3%,扫描时间 40 min。

1.4.2 动态温度扫描

一般聚合物对温度都很敏感,随着温度的升高,不仅豆浆凝固速率不同,生成的豆腐凝胶的品质也有很大差别,因此研究豆浆在凝固过程中的温度依赖性,可以确定最优的凝固温度。

豆浆在凝固过程中的动态温度扫描,可以表征豆浆在加热凝固过程中流变参数 G' 、 G'' 和 $\tan \delta$ 的温度依赖性,根据流变参数的变化,可以确定在凝固过程中豆腐凝胶空间网络结构的形成。在线性黏弹性范围内,给豆浆试样施加频率为 0.5 Hz 的正弦应变,在 50~95 °C 区间内进行等变率温度扫描,扫描方向为温度递增方向。

2 试验结果与分析

2.1 动态时间扫描结果分析

2.1.1 在不同温度下弹性模量 G' 随时间的变化

图 1 是在不同温度下弹性模量 G' 随时间的变化图。由图 1 知：在 75 °C、80 °C、85 °C 三个凝固温度下，豆浆体系的 G' 远远大于凝固温度为 70 °C 时的 G' 。 G' 是弹性模量， G' 越高，样品的弹性越好，豆浆体系中凝胶形成得越多，豆浆体系越具有豆腐凝胶的性质^[10]。70 °C 的 G' 小是由于凝固温度在 70 °C 以下时，只有絮状沉淀生成，无豆腐凝胶产生^[11]，因此后面不再讨论凝固温度为 70 °C 时的凝胶情况。

图 2 是图 1 去掉凝固温度为 70 °C 时的时间扫描曲线后的放大图，由图 2 知：(1) 凝固温度为 75 °C、80 °C、85 °C 时， G' 刚开始上升很快，当凝固时间超过 8 s 后，75 °C 温度下 G' 趋于稳定，但 80 °C、85 °C 温度下的 G' 仍然缓慢上升。(2) 可以将凝胶过程中 G' 的变化分为急剧增加和缓慢增加两段。(3) 温度越高，反应初期凝胶形成速度越快，到达 G' 缓慢变化的时间越短。由于大豆蛋白的结合速率太快，对豆腐凝胶网络结构的形成不利^[12]，因此在反应初期，应该控制凝胶形成速度。(4) 凝固温度为 80 °C 时的曲线上升比较均匀，这说明 80 °C 温度下对豆腐凝胶网络结构有利。

大豆球蛋白的主要组分是 11S 和 7S 球蛋白。Saio 等人研究得出，与 7S 球蛋白形成的豆腐凝胶相比，11S 球蛋白形成的豆腐凝胶强度更大，11S 球蛋白的含量对豆腐凝胶的强度影响大。Hashizume 等人用 GDL 作为凝固剂，得到同样的结论：11S 球蛋白比 7S 球蛋白形成的豆腐凝胶强度大。当凝固温度、蛋白浓度（在此为豆浆浓度）和 GDL 凝固剂浓度一定时，7S 球蛋白比 11S 球蛋白凝胶反应开始的时间迟，即随着凝固的进行，11S 球蛋白先凝固，11S 凝固一段时间后，7S 球蛋白才开始凝固^[13]。另外 7S 球蛋白比 11S 球蛋白到达饱和弹性率需要的时间多^[14]。因此在反应初期，11S 变性蛋白首先发生凝胶反应，由于豆浆中 11S 蛋白含量多，同时由于温度高，GDL 水解快，产生的 H^+ 多，因此凝胶反应速度快， G' 快速上升。当反应进行一段时间后，7S 变性蛋白开始发生凝胶反应。当 11S 变性蛋白凝胶完成后，7S 变性蛋白反应还在继续。由于豆浆中 7S 含量比 11S 少得多，因此反应速率减慢， G' 上升缓慢（在反应的后期，不排除由于水分的挥发而使 G' 上升）。凝固温度在 75 °C 时，凝固终了豆腐凝胶强度偏低，分析原因，可能是在制作豆浆的过程中，豆浆冷却后，大豆蛋白发生了部分复性，一些疏水基又被掩盖。而当温度升高到 75 °C 时，部分复性大豆蛋白还不足以发生变性（11S 变性温度为 90 ± 2 °C，7S 变性温度为 70 ± 2 °C），这部分不能发生变性的复性大豆蛋白不能形成凝胶，当凝胶反

应结束， G' 基本保持不变，豆浆溶液中球蛋白没有完全凝胶，整个豆浆溶液形成的凝胶网络强度就低，即 G' 偏小。

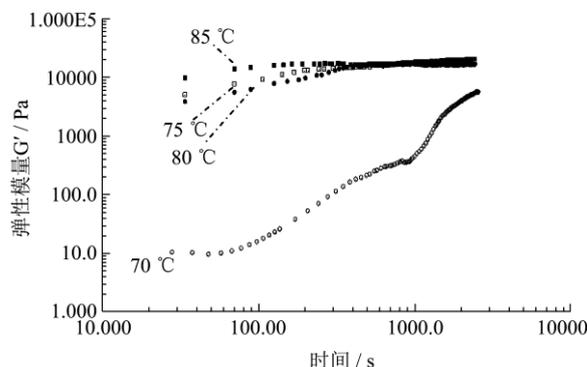


图 1 G' -时间扫描曲线(70、75、80、85 °C)

Fig.1 G' -time curve at 70 °C, 75 °C, 80 °C, and 85 °C

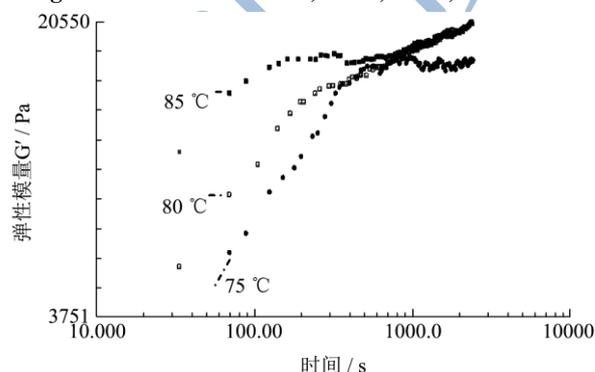


图 2 G' -时间扫描曲线(75、80、85 °C)

Fig.2 G' -time curve at 75 °C, 80 °C, and 85 °C

2.1.2 在不同温度下黏性模量 G'' 随时间的变化

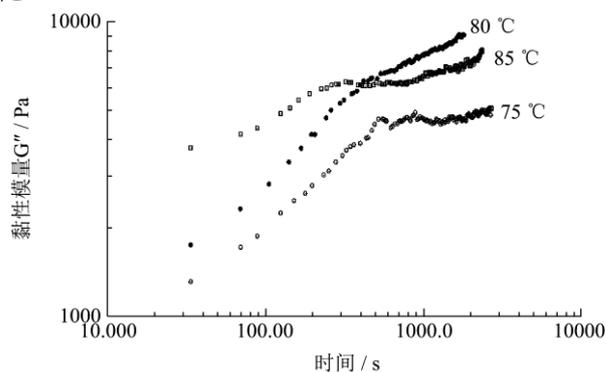


图 3 G'' -时间扫描曲线(75、80、85 °C)

Fig.3 G'' -time curve at 75 °C, 80 °C, and 85 °C

图 3 为黏性模量 G'' 的时间扫描曲线。由图 3 知：

(1) G' 与 G'' 随时间变化趋势相同。在初始阶段，黏性模量 G'' 迅速增加，当凝固时间 8 s 后，温度为 75 °C 下的时间扫描曲线趋于平直，而凝固温度为 80 °C、85 °C 下的时间扫描曲线还呈上升趋势，但上升趋势比初始阶段缓慢得多。原因如前面弹性模量 G' 随时间的变化中所述，随着凝胶反应的进行，豆浆体

系强度增大, G' 与 G'' 均增加。(2) 在 G'' 缓慢上升阶段, 80 °C 的上升趋势比 85 °C 的上升趋势更大, 最后超过 85 °C 时的曲线。这说明 G'' 的增加不仅仅是水分的蒸发所致, 如果仅仅是水分蒸发所致, 85 °C 水分蒸发应该更快, 即 85 °C 温度下的 G'' 应该比 80 °C 温度下的 G'' 更大。而在图中, 80 °C 的 G'' 更大, 综合前面的 G' 的变化可知: 凝固温度为 80 °C 时, 体系中形成凝胶强度高, 黏弹性好。因此适宜的温度有利于豆腐凝胶的形成, 温度过高反而不利于豆腐凝胶的形成, 因此凝固温度为 80 °C 时有利于豆腐凝胶的形成。

2.1.3 不同温度下损耗角正切随时间的变化

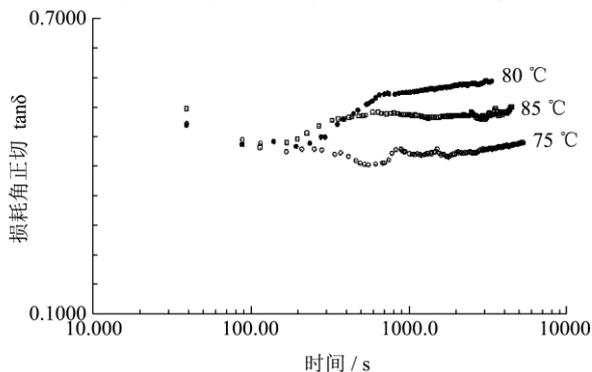


图 4 损耗角正切-时间扫描曲线(75、80、85 °C)

Fig.4 Loss tangent (tanδ)-time curve at 75 °C, 80 °C, and 85 °C

图 4 是损耗角正切随时间的变化图。由图 4 知, 随着凝固过程的进行, 损耗角正切 $\tan \delta$ 的变化很小(在 0.25 到 0.5 之间)。损耗角正切是黏性模量 G'' 与弹性模量 G' 之比, 豆浆在加热凝固过程中, G' 和 G'' 均增加, 且增加趋势相同, 增加幅度相差不大, 因此 $\tan \delta$ 变化很小。

2.1.4 G' 的连续一级反应拟合

图 1 是为了分析方便而做的双对数图, 豆浆在加热凝固过程中弹性模量 G' 随时间的变化如图 5 所示。

分析图 5, 不同温度下 G' 的变化可分为两段: 第一段: 凝固初期, G' 急剧增加; 第二段: 随着凝固的进行, G' 增加变缓, 最后趋于稳定^[15]。因此反映豆浆凝固过程的 G' 曲线符合连续一级反应模型, 反应经验公式如 (1) 式所示:

$$G' = G'_{sat} \left(1 - \frac{k_2}{k_2 - k_1} e^{-k_1 t} + \frac{k_1}{k_2 - k_1} e^{-k_2 t} \right) \quad (1)$$

式中: G'_{sat} - 弹性模量饱和值, Pa。

对豆浆凝固过程中 G' 的变化曲线用式 (1) 进行拟合, 拟合结果如图 6 所示, 75 °C、80 °C、85 °C 三个温度下拟合的 R^2 值分别为 0.963、0.957 和 0.943。对 (1) 式进行拟合得到不同凝固温度下的两个阶段的

反应速率常数 k_1 和 k_2 如表 1 所示: (1) 85 °C 的 k_1 值最大, 80 °C 的其次, 75 °C 的最小, 即在第一段反应中, 随着凝固温度越高, 反应速率越大。(2) 80 °C 的 k_2 最大, 即在第二段反应中, 凝固温度为 80 °C 的反应速率快。

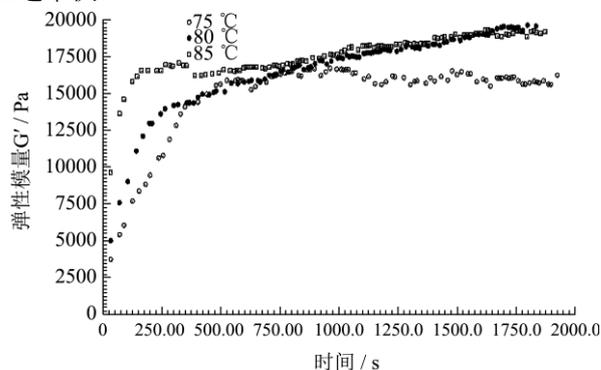


图 5 G' 随时间的变化

Fig.5 Variation of G' over time

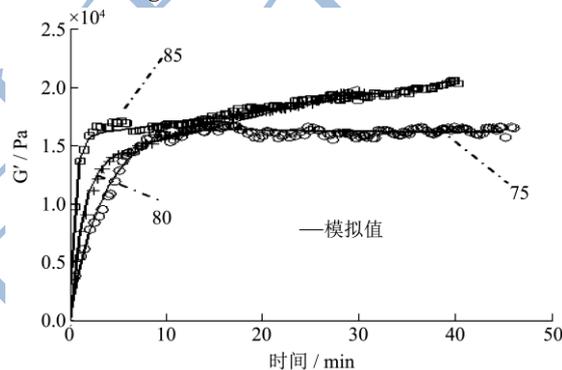


图 6 G' 的连续一级反应拟合

Fig.6 Consecutive first-order reaction kinetics fitting of G'

表 1 G' 连续一级拟合方程反应速率常数 k_1 和 k_2

Table 1 Rate constant k_1 and k_2 at different temperatures for

fitted G' consecutive first-order equation			
温度/°C	G'_{sat}	k_1	k_2
75	17305	0.20554	0.016076
80	18854	0.72959	0.019883
85	19205	1.30529	0.018602

这与前面分析结论一致: 凝固温度为 75 °C 时, 豆浆体系中有部分复性蛋白不能形成凝胶, 凝胶反应两阶段反应速率都低; 凝固温度为 85 °C 时, 第一阶段反应速率过快, 影响豆腐凝胶的形成, 因此第二阶段反应速率低; 凝固温度为 80 °C 时, 有利于豆腐凝胶网络结构的形成, 得到的豆腐凝胶强度高。因此为了有利于豆腐凝胶网络结构的形成, 在保证豆浆完全凝固的前提下, 应该控制第一反应阶段的速率, 第一反应阶段速率减慢, 有利于第二阶段的速率提高。

根据表 1 不同温度下的凝固反应速率常数 k_1 , 以 $\ln k_1$ 和 $1/T$ 作线性回归, 如图 7 所示, 斜率:

-23.082×10³, 相关系数 R²=0.978, 求出活化能 E_a 和指前因子 A 分别为 19.19×10¹ kJ/mol 和 1.69×10²⁸/s。

由于豆浆在加热凝固过程中, 第一阶段反应速率太快, 导致第二阶段的反应速率慢, 因此表 1 中 k₂ 变化没有明显规律, 在此没有进行回归。

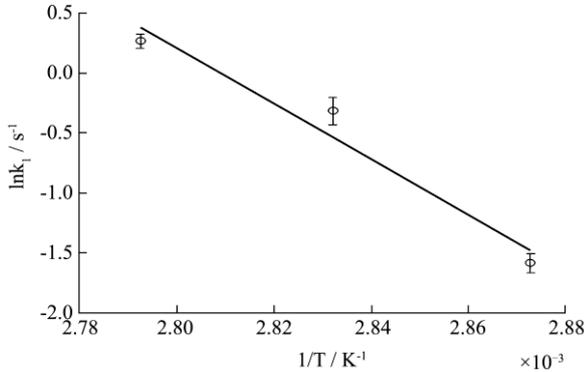


图 7 反应速率常数 k₁ 的 Arrhenius 图

Fig.7 Arrhenius plot of the rate constant k₁

2.1.5 G'' 的连续一级反应拟合

由图 3 可知, G'' 变化趋势与 G' 的变化趋势相同, 因此反映豆浆凝固过程的 G'' 曲线也符合连续一级反应模型, 反应经验公式如下:

$$G'' = G''_{sat} \left(1 - \frac{k_2}{k_2 - k_1} e^{-k_1 t} + \frac{k_1}{k_2 - k_1} e^{-k_2 t} \right) \quad (2)$$

对豆浆凝固过程中 G'' 的变化曲线用式 (2) 进行拟合, 拟合结果如图 8 所示, 75 °C、80 °C、85 °C 三个温度下拟合的 R² 值分别为 0.962、0.974 和 0.950。第一段直线比第二段直线斜率大, 80 °C 第二段直线斜率大于 75 °C、85 °C 第二段直线的斜率, 即第一阶段反应速率比第二阶段反应速率快, 80 °C 在第二阶段的反应速率比 75 °C、85 °C 在第二阶段的反应速率快, 与豆浆在加热凝固过程中的反应相符, 因此豆浆在加热凝固过程的反应是连续一级反应。

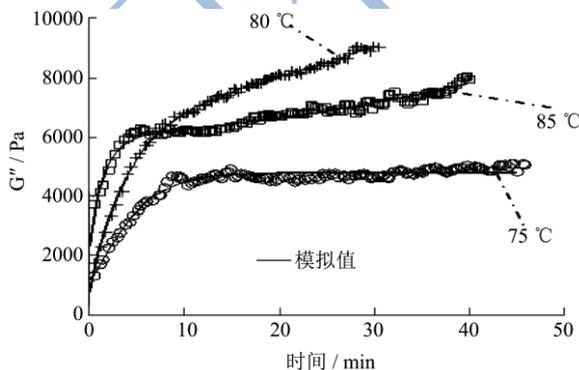


图 8 G'' 的连续一级反应拟合

Fig.8 Consecutive reaction kinetics fitting of G''

对 (2) 式进行拟合得到不同凝固温度下的两个阶段的反应速率常数 k₁ 和 k₂ 如表 2 所示, 凝固温度为

80 °C 时的 k₂ 值最大, 原因如 G' 的连续一级反应拟合中分析相同。

表 2 G'' 连续一次拟合方程反应速率常数 k₁ 和 k₂

Table 2 Rate constant k₁ and k₂ at different temperatures for fitted G'' consecutive first-order equation

温度/°C	G'' _{sat}	k ₁	k ₂
75	4948.5	0.28416	0.035639
80	9057.7	0.42317	0.041694
85	7589.4	0.65622	0.038163

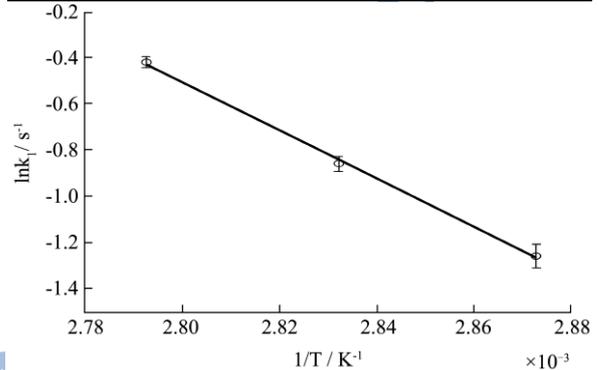


图 9 反应速率常数 k₁ 的 Arrhenius 图

Fig.9 Arrhenius plot of the rate constant k₁

表 3 活化能与指前因子

Table 3 Activation energy and pre-exponential factor

	指前因子 A/s ⁻¹	活化能 E _a /(kJ/mol)
弹性模量 G'	1.69×10 ²⁸	19.19×10 ¹
黏性模量 G''	3.93×10 ¹²	8.67×10 ¹

根据表 2 不同温度下的凝固反应速率值 k₁ (k₂ 随温度变化无递增递减规律), 以 ln k₁ 和 1/T 作线性回归, 如图 9 所示, 斜率为 -10.43×10³, R²=0.998, 求出活化能 E_a 和指前因子 A 分别为 8.672×10¹ kJ/mol 和 3.93×10¹² s⁻¹。对豆浆在凝固过程中 G'、G'' 进行连续一级反应模型拟合得到的反应速率 k 值如表 1 表 2 所示: 在相同凝固温度下, 连续一级反应第一个一级反应速率 k₁ 远远大于第二个一级反应速率 k₂。这可以用 Kohyama K 在 1992 年和 1993 年在研究中得出的结论来解释: 在豆浆的凝固过程中, 7S 初始凝固时间晚, 凝固总时间长, 因此在凝固初期主要是 11S 在反应, 在凝固后期主要是 7S 在反应。而在豆浆中, 与 11S 相比, 7S 含量少的多, 因此凝固初期反应速率快, 凝固后期反应速率慢。

根据连续一级反应模型模拟结果求得的活化能与指前因子如表 3 所示, 弹性模量 G' 发生变化的活化能比较大, 黏性模量 G'' 发生变化的活化能比较小, 即豆浆在加热凝固过程中, G' 发生变化所需的能量大。

2.2 动态温度扫描分析

动态温度扫描结果如图 10 所示。由图 10 知：温度在 65 °C 以下时，豆浆体系中没有凝胶生成，因此 G' 和 G'' 保持不变；当温度在 65~70 °C 时， G' 和 G'' 开始缓慢上升，豆浆体系中只有絮状沉淀生成，没有发生凝胶反应；当温度大于 70 °C 后，豆浆体系发生凝胶反应。

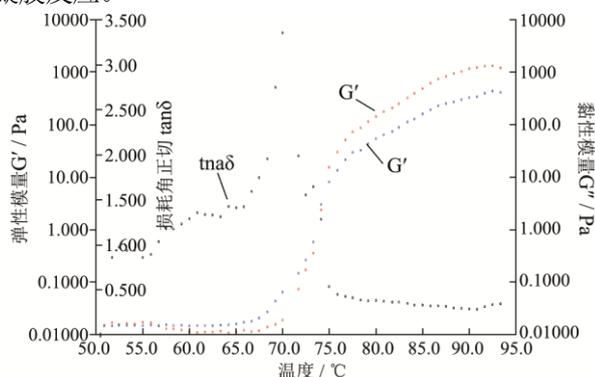


图 10 豆浆在凝固过程中动态温度扫描图

Fig.10 Dynamic temperature scanning during soymilk coagulation process

根据图 10 可以将豆浆的凝固过程分为三个阶段：第一阶段：诱导阶段。当温度在 65~68 °C 时，豆浆体系中有絮状沉淀生成，弹性模量 G' 和黏性模量 G'' 开始增加。当温度在 68~70 °C 时，豆浆体系中变性蛋白质开始发生凝胶反应。11S 和 7S 的等电点分别为 5.8 和 4.4 左右^[16,17]，本试验中，豆浆溶液的 PH 值为 6.51，在 GDL 凝固剂作用下，豆浆溶液先到达 11S 的等电点，于是 11S 发生凝胶反应， G' 、 G'' 升高。虽然 11S 在豆浆里含量高，但由于 GDL 水解过程缓慢，豆浆溶液中 H^+ 浓度低，凝胶反应速率慢，体系强度增加慢，即 G' 和 G'' 变化小。第二阶段：加速阶段。当温度大于 70 °C 时，随着温度的升高，GDL 水解速度加快，体系中 H^+ 急剧增加，蛋白分子的负电荷快速减少，蛋白分子间的斥力减弱，11S、7S 的凝胶反应速率加快，因此豆浆体系的强度急剧增加，即 G' 和 G'' 急剧增大。当温度为 75 °C 时， G' 和 G'' 相交，交点所对应的温度 75 °C 就是豆浆的凝胶温度。当温度大于 75 °C， G' 大于 G'' ，标志豆腐凝胶的形成。第三阶段：稳定阶段。当温度大于 92 °C 时，在此阶段，凝胶反应结束，豆腐凝胶形成， G' 、 G'' 趋于稳定。

3 结论

3.1 豆浆在加热凝固过程中，弹性模量 G' 、黏性模量 G'' 变化趋势相同，在凝固初期，都急剧增加，随着凝固过程的进行，增加变缓，直至基本不变。当基本不变时凝固到达终点，因此可以用弹性模量 G' 、黏性模量 G'' 来判断凝固终点。

3.2 豆浆在保温凝固过程中，温度过高过低均不利于豆腐凝胶的形成，影响豆腐得率。形成豆腐凝胶的条件是温度必须大于 70 °C，当温度在 70 °C 以下，不能形成豆腐凝胶。当温度大于 70 °C 时，豆浆里开始形成豆腐凝胶，当温度大于 75 °C 时，豆腐凝胶开始从液态体转变为固态体，表现出固体的性质。因此 75 °C 为豆腐的凝胶温度。

3.3 豆浆在加热凝固过程中弹性模量 G' 、黏性模量 G'' 符合连续一级反应，可以用连续一级反应模型模拟。

3.4 随着温度的升高，豆浆在加热凝固过程中凝胶的形成可以分为三个阶段：诱导阶段、加速阶段和稳定阶段。诱导阶段是温度从 65~70 °C，豆浆体系强度变化不大；加速阶段是温度从 70~92 °C， G' 和 G'' 急剧增大；稳定阶段是温度大于 92 °C， G' 和 G'' 基本保持不变，凝固结束。

参考文献

- [1] 宁添媛.大豆异黄酮防治慢性疾病的研究进展[J].现代中西医结合杂志,2011,20(32):4162-4165
NING Tian-yuan. Prevention of chronic disease by soy isoflavones: a Review [J]. Modern Journal of Integrated Traditional Chinese And Western Medicine, 2011, 20(32): 4162-4165
- [2] 刘志胜,李里特,辰巴英三,等.大豆蛋白营养品质和生理功能研究进展[J].大豆科学,2000,19(3):263-268
LIU Zhi-sheng, LI Li-te, TATSUMI Eizo, et al. Nutritional quality and physiological functions of soy protein: a review [J]. Soybean Science, 2000, 19(3): 263-268
- [3] Murdia L K, Wadhvani R. Effect of processing parameters on texture and yield of tofu [J]. Asian Journal of Food and Agro-industry, 2010, 3(20): 232-241
- [4] 刘志胜.豆腐凝胶的研究[D].中国农业大学,2000
LIU Zhi-sheng. Study on tofu gel [D]. China Agriculture University, 2000
- [5] 李里特.食品物性学[M].北京:中国农业出版社,1998
LI Li-te. Physical Properties of Foods[M].Beijing: Chinese Agricultural Press, 1998
- [6] 段洪东.部分水解聚丙烯酰胺/Cr凝胶的交联机理及交联动力学研究[D].浙江:浙江大学,2002
DUAN Hong-dong. Study on the Crosslinking Mechanism and Dynamics of Gelation of Partial Hydrolyzed Polyacrylamide/Cr Systems [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2002
- [7] Ono T. The Mechanism of soymilk and tofu formation from

- soybean, and the factors affecting the formation [J]. *Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi*, 2008, 55(2): 39-48
- [8] 周持兴. 聚合物流变实验与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003
- ZHOU Chi-xing. Rheological test and application of polymer [M], Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2003
- [9] 郭咏梅, 倪富健, 肖鹏. 基于线黏弹范围的改性沥青动态流变性能[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2011, 32(4): 460-463
- GUO Yong-mei, NI Fu-jian, XIAO Peng. Dynamic rheological properties of modified asphalt based on linear viscoelastic range [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2011, 32(4): 460-463
- [10] 钟芳, 王璋. 大豆蛋白速凝特性研究. I. 热处理条件对大豆蛋白速凝特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2001, 16(4): 47-50
- ZHONG Fang, WANG Zhang. Instant-gelation properties of soy protein (I): influence of preheating condition. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2011, 16(4): 47-50
- [11] Saio K. Food processing characteristics of soybean 11S proteins. I Effect of difference of protein components among soybean varieties on tofu-gel [J]. *Agr. Biol. Chem.*, 1969, 33(9): 1301-1307
- [12] Kohyama K, Nishinari K. Rheological studies on the gelation process of soybean 7S and 11S proteins in the presence of glucono-delta-lactone [J]. *J. Agric. Food Chem.*, 1993, 41: 8-14
- [13] Kohyama K, Yoshida M, Nishinari K. Rheological studies on the gelation process of soybean 11S proteins by Glucono- δ -lactone [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1992, 40: 740-744
- [14] Iwabuchi S, Yamauchi F. Determination of glycinin and β -conglycinin in soybean proteins by immunological methods [J]. *J. Agric. Food Chem.*, 1987, 35: 200-205
- [15] Li Xingshu, Kiyohiko Toyoda, Ikko Ihara. Coagulation process of soymilk characterized by electrical impedance spectroscopy [J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 105: 563-568
- [16] 熊秀芳. 豆浆通电加热特性与凝胶流变特性及其在线检测方法的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012
- XIONG Xiu-fang. Ohmic heating characteristics of soymilk and rheological properties of tofu gel with online detection [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012
- [17] Liu Zhi-Sheng, Chang Sam K.C., Li Li-Te, et al. Effect of selective thermal denaturation of soybean proteins on soymilk viscosity and tofu's physical properties [J]. *Food Research International*, 2004, 37(8): 815-822