

# 豆腐凝固机理的研究

杨方琪 高福成 孟 旭

(食品科学与工程系)

**摘要** 发现了在豆腐凝固过程中豆乳的 pH 随温度升高而下降,证明了二价金属离子引起豆乳 pH 下降的原因是与植酸盐、柠檬酸盐等发生络合反应所致,阐明了酸和盐凝固豆腐本质上的一致性。

**关键词** 豆腐;凝固机理

## 0 引 言

豆腐在我国可分为传统豆腐和袋装豆腐,后者在我国 80 年代才出现,现在所占的比重仍很小。豆腐品种不同,其加工工艺也不同,但无论哪一种工艺,都共同有一个使豆浆凝固成豆腐的过程,即凝固过程,此是豆腐制造工艺的核心,对豆腐的品质影响最大,然而恰恰又是人们最少了解的过程。常说的“手艺高低看点浆”说到了要害,但知其然不知其所以然。西方人把豆腐制造的操作称为“art”正是以此为依据的<sup>[1]</sup>。

凝固机理是指豆腐胶是如何形成的,对于用内酯(GDL)和醋酸(HAC)作为凝固剂的情况,一致认为利用了蛋白质在等电点时发生沉淀的性质。而对用盐卤( $MgCl_2$ )、石膏( $CaSO_4$ )作为凝固剂的情况则有不同的看法。

1978 年,Cherl<sup>[2]</sup>等研究了酸凝固与盐凝固豆腐的微观结构,发现两者有明显的差异,从而推测盐凝固与酸凝固有着不同的机理,盐凝固豆腐胶是通过蛋白质的羟基和咪唑基与二价金属离子的桥联作用而形成的,这是一种离子桥成胶学说。由于蛋白质只有在碱性条件下才能和重金属离子发生不可逆沉淀,而豆腐是偏酸性的,且  $Mg^{2+}$  又不是重金属,因此这种离子桥对豆腐的形成是无足轻重的。另一方面,若离子桥在豆腐形成中确实起主要作用,从理论上说  $Mg(OH)_2$  比  $MgCl_2$  更有利于这种桥的形成,即更容易形成豆腐胶。但事实上, $Mg(OH)_2$  加入越多,溶液 pH 值越高,豆浆越稳定。显然,“桥理论”难以自圆其说。

在解释盐凝固豆腐的形成时,人们一般用胶体化学中的 D. L. V. O 理论来解释,如图 1。即加入盐凝固剂后,总位能曲线中位垒  $E_c$  下降,使蛋白质粒子容易碰撞聚沉,而对盐凝固剂引起  $E_c$  下降的原因有两种说法:一是建立于人们对蛋白质和凝固剂一般性质认识的基础

收稿日期:1992-07-16

上<sup>[1,3,4]</sup>,认为凝固剂的离子在蛋白质表面的吸附,使稳定蛋白质的双电层(扩散层)被压缩,从而使 $E_0$ 减小;一种是1980年由Lu<sup>[5]</sup>通过实验,发现豆浆中加入盐后pH下降,在pH 6时形成豆腐这一事实而提出的。认为盐凝固与酸凝固一样, $E_0$ 下降都是由于溶液的pH值接近蛋白质的等电点,引起自身(表面层)带电量下降造成的。遗憾的是Lu未说明pH的值的测定条件,特别是凝固状态下豆腐pH的测定方法和对pH大小有显著影响的测定温度,更没有进一步分析中性盐造成豆浆pH下降的原因。

随着研究的深入,发现了许多无法解释的现象:为什么磷的含量与豆腐的硬度<sup>[6,7]</sup>和产量<sup>[8]</sup>有如此密切的相关关系?同时K、Mg、Ca<sup>[7,8]</sup>与豆腐的品质也存在着一定的内在联系?如果仅仅从蛋白质与凝固剂的性质去考虑是找不到答案的。

国内外对豆腐生产的机械化、自动化进行了长期的努力,在工艺操作,特别是磨浆、煮浆、分离中获得了很大的成功,但由于对豆腐凝固的本质缺乏认识,在最关键的凝固操作中只能进行对手工操作形式上的模仿,以致使产品的质量和产量都无法达到手工操作的要求。同样因为对凝固机理了解不透,使新的凝固剂的研究难有所作为。因此,凝固机理的研究就具有迫切性和实用性。本实验的目的是建立一种新的豆腐凝固模型,以推动豆腐生产技术的进步。

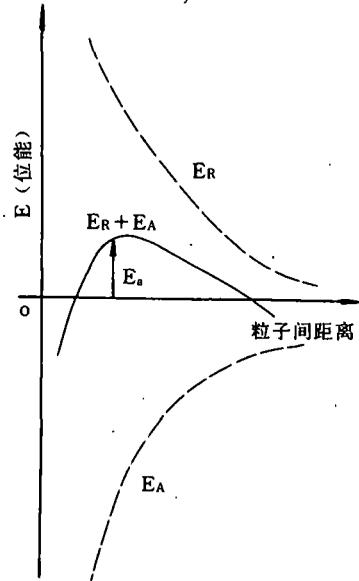


图1 盐凝固豆腐的D.L.V.O理论

## 1 实验原料和方法

### 1.1 实验原料

东北黄豆 蛋白质 37.5%,脂肪 18.0%,灰分 5.0%.

豆乳 8kg 豆乳/kg 豆,豆乳固形物 7.5%.

MgCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O (A.R)

葡萄糖内酯(GDL) (A.R)

醋酸(HAC) (A.R)

消泡剂 单硬脂酸甘油酯

### 1.2 实验方法

1.2.1 pH与温度关系的测定 测定装置如图2.升温速度 40℃/20min,降温速度 40℃/30min.

1.2.2 植酸磷的测定 按[9]的上清液差示法分离出植酸后,按[10]的方法测定。

1.2.3 豆腐中微量元素的测定 原子吸收法[11],其中Na、K、Mg用1%的HCl取液,Ca、Fe用1%HCl灰化液。

1.2.4 模拟溶液的配制 模1:含0.524g磷的植酸+500mlH<sub>2</sub>O+含300mgMg<sup>2+</sup>的MgCl<sub>2</sub>

+含 90mgCa<sup>2+</sup>的 CaCl<sub>2</sub>+含 7mg Fe<sup>3+</sup>的 FeCl<sub>3</sub>  
+含 150mg Na<sup>+</sup>的 NaCl,用 KOH 滴定至 pH6.60,加 KCl 调至 K<sup>+</sup>总量为 1800mg+H<sub>2</sub>O 调至总体积为 1000ml;模 2:先加入 1.2g 柠檬酸,以下步骤与模 1 同。

1.2.5 酶作用影响试验 0.4g13 万单位/g 的 1398 蛋白酶用少量水分散后加入 200ml 40℃ 的豆乳中,隔一定时间取出 25ml,立即加热灭酶,冷却至 70℃时,用 MgCl<sub>2</sub> 滴定,测其胶凝性。

1.2.6 DSC 样品的准备 200ml 4℃豆乳加入

0.4g MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 溶液后,混匀,取 4ml 测定的曲线为盐凝固的 DSC 曲线;200ml 4℃豆乳加入 1.5mg 当量的 HAC 混匀后,取 4ml 测定的曲线为酸凝固的 DSC 曲线。

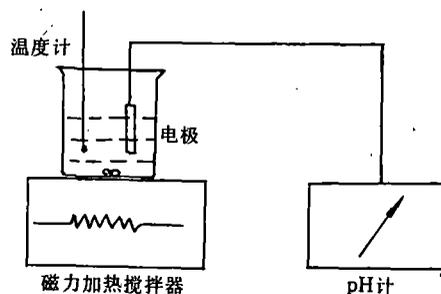


图 2 pH 与温度关系的测定

## 2 结果与讨论

在凝固机理研究中,通过比较盐凝固与酸凝固对豆乳 pH 的影响寻找豆乳凝固的原因。因为各种因素对生豆乳与熟豆乳 pH 影响类似,而熟豆乳粘度较大,加入凝固剂到一定程度后形成凝胶,使 pH 的测定无法进行,因此,在很多情况下用生豆乳代替熟豆乳做 pH 的试验。

### 2.1 凝固剂与豆乳 pH 的关系

MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 和 GDL 对豆乳 pH 的影响见表 1。

表 1 MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 和 GDL 对生豆乳 pH 的影响  
(1000ml 豆乳 15℃)

凝固剂添加量(g)	0	1	2	4	6	8	10
MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O (pH)	6.60	6.45	6.33	6.12	5.99	5.95	5.90
GDL (pH)	6.60	6.30	6.10	5.90			

从表 1 可知,MgCl<sub>2</sub>,GDL 加入到豆乳中都使 pH 下降,GDL 水解成葡萄糖酸使豆乳的 pH 下降,MgCl<sub>2</sub> 是强酸(HCl)和 Mg(OH)<sub>2</sub> 形成的盐引起 pH 下降的,但是不是水解反应而引起的呢?



发生此反应所需最低 Mg<sup>2+</sup> 浓度为

$$[\text{Mg}^{2+}]_{\min} = K_{sp} / [\text{OH}^-]^2$$

实验所用的豆乳 pH 在 6 左右,正常的  $MgCl_2$  加入量为 2% 豆乳量,即 mol/L,则

$$[Mg^{2+}]_{\min} = \frac{1.8 \times 10^{-11}}{(10^{-8})^2} \quad (\text{温度 } 25^\circ\text{C}) = 1.8 \times 10^5 \text{ mol/L} \gg 10^{-2} \text{ mol/L}$$

因此,在豆腐制作过程中,上述水解反应不会发生。

$MgCl_2 \cdot 6H_2O$  和 GDL 对水的影响如表 2。

表 2  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  和 GDL 对水的 pH 影响 (15°C)

凝固剂添加量(g)	0	0.5	1	2	5
$MgCl_2 \cdot 6H_2O$ (pH)	6.60	6.67	6.80	6.90	7.10
GDL (pH)	6.60	6.20	5.71	3.91	

由表 1 表 2 的比较可以看出,GDL 起酸的作用使豆乳的 pH 下降。 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  是一种中性盐,因此,使 pH 下降只能解释为在豆乳中发生了化学反应。

## 2.2 凝固温度与豆乳 pH 值的关系

尽管许多人研究过豆腐的 pH 大小<sup>[5,8,12]</sup>,但温度对豆腐凝固过程 pH 的影响尚未见报道,而这一问题的研究对正确理解豆腐凝固的本质是有意义的。

豆乳 pH 与温度关系见表 3。

表 3 豆乳 pH 与温度关系 (200ml 豆乳)

温度(°C)	15	20	25	30	35	40	45	50	ΔpH	过程
生豆乳 (pH)	6.60	6.58	6.56	6.53	6.52	6.48	6.45	6.42	0.18	加热
		6.54		6.51		6.46				冷却
熟豆乳 (pH)	6.68	6.65	6.61	6.59	6.56	6.52	6.50	6.48	0.20	加热
			6.63	6.61	6.58	6.54				冷却

豆乳+HCl 体系 pH 与温度关系见表 4。

表 4 豆乳+HCl 体系 pH 与温度关系

(以 200ml 豆乳汁,生熟豆乳开始 pH 分别为 6.60 和 6.68)

温度(°C)	15	20	25	30	35	40	45	50	ΔpH	过程
生豆乳	6.34	6.32	6.30	6.28	6.27	6.25	6.25	6.25	0.09	加热
+0.6				6.28		6.25				冷却
毫克当量 HCl										
熟豆乳	6.30	6.29	6.27	6.25	6.23	6.21	6.20	6.20	0.10	加热
+1.2			6.28			6.22				冷却
毫克当量 HCl										

豆乳+ $MgCl_2$  体系 pH 与温度关系见表 5。

表 5 豆乳+MgCl<sub>2</sub>体系的 pH 与温度关系  
(以 1000ml 豆乳汁,生熟豆乳开始 pH 分别为 6.60 和 6.68)

温度(°C)	15	20	25	30	35	40	45	50	ΔpH	过程
生豆乳	6.52	6.50	6.47	6.42	6.39	6.36	6.33	6.30	0.22	加热 冷却
+0.5g MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O			6.45		6.38					
生豆乳	6.38	6.31	6.27	6.21	6.17	6.14	6.12	6.10	0.28	加热 冷却
+1.5g MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O		6.25			6.16					
生豆乳	6.00	5.98	5.93	5.89	5.81	5.74	5.70	5.66	0.34	加热 冷却
+5g MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O			5.96			5.73				
熟豆乳	6.58	6.54	6.52	6.50	6.45	6.40	6.35	6.30	0.28	加热 冷却
+1g MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O			6.49		6.42		6.32			

由表 3,4,5 可得出:

- (1) 任何一种豆乳系统的温度越高,溶液的 pH 值越低,且这一过程对温度几乎是可逆的。
- (2) 对豆乳中加 HCl,豆乳,豆乳+MgCl<sub>2</sub> 三种体系而言,温度对体系 pH 值变化的影响依次增强。
- (3) 在相同温度变化情况下,MgCl<sub>2</sub> 浓度越大,豆乳的 pH 值变化越大。

### 2.3 凝固剂量与模拟溶液 pH 值的关系

由 2.1 的结果可看出,当 MgCl<sub>2</sub> 加入到豆乳中后,溶液中发生了使 pH 下降的反应;由 2.2 的结果可知,温度可逆地影响着这个化学反应。引起溶液反应 pH 值变化的原因可能有三种情况,即:产生气体,产生沉淀或者形成络合物,豆乳形成豆腐的过程因无气体产生,故仅能属后两种情况。一是蛋白质可以与重金属离子形成不溶性的重金属-蛋白质复合物而沉淀析出,但这需要在碱性条件下才能实现,而且该沉淀是不可逆的。然而豆腐制造过程中,豆乳一直在偏酸性的范围内,随着反应的进行,豆乳的 pH 值越来越小,且这一反应过程对温度有很明显的可逆性。由此看出,豆乳中蛋白质与镁离子的作用是有限的。二是豆乳中可能有与金属离子产生络合物的因子存在,据报道大豆中植酸盐和柠檬酸盐的含量很高,分别占豆重的 1.5%<sup>[8,13-18]</sup>和 1.2%<sup>[19]</sup>,这两种物质都有与金属离子形成络合物的能力,因此有必要探讨它们与 pH 变化的关系,以认识豆腐的形成过程。

豆腐胶形成过程的熵变分析如下:

$$dS(\text{总}) = dS(\text{豆乳体系}) + dS(\text{环境}) > 0$$

$$dS(\text{蛋白质}) + dS(\text{其它}) + \frac{dQ(\text{环境})}{T} > 0$$

$$dS(\text{豆乳体系}) = dS(\text{蛋白质}) + dS(\text{其它})$$

$$dS(\text{其它}) > \frac{dQ(\text{环境})}{T} - dS(\text{蛋白质}) > 0$$

豆腐胶形成时,豆乳中的蛋白质由无序变为有序,根据“负熵成序”应有  $dS(\text{蛋白质}) < 0$ ;豆腐胶形成时必须加热,是一吸热过程,即  $dQ(\text{环境}) < 0$ 。

络合反应是熵增加的反应<sup>[20]</sup>,事实上植酸盐与  $\text{Ca}^{2+}$  的反应确为吸热反应<sup>[21]</sup>,即熵增过程。因此,我们推测豆腐胶形成过程中有可能存在植酸等与二价离子的络合反应,且这一反应的存在与豆腐胶的形成有着密切的联系,是否如此,由下面的实验来验证。

本实验的目的是研究豆乳中的植酸盐与柠檬酸盐对形成豆腐时 pH 变化的关系,因而分析出 1000ml 豆乳中植酸磷和金属离子的含量。

物质	植酸磷	K	Mg	Ca	Fe	Na
重量(mg)	524	1800	300	90	7	150

以此分析测定的结果为基准配制的模拟溶液为模 1,按计算加入一定量的柠檬酸后的模拟溶液为模 2,得出试验结果如表 6。

表 6 溶液的 pH 值与凝固剂  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  关系  
(1000ml 溶液)

$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}(\text{g})$	0	1	2	4	6	8	10	$\Delta\text{pH}$
生豆乳	6.60	6.49	6.33	6.12	5.99	5.95	5.90	0.70
模 1	6.60	6.52	6.47	6.39	6.32	6.26	6.20	0.40
模 2	6.60	6.32	6.02	5.75	5.60	5.52	5.48	1.22

从表 6 可知,显然豆乳的 pH 变化介于模 1 与模 2 之间,但 pH 的变化趋势完全一致。表 7 为溶液的 pH 值与温度关系。

表 7 溶液 pH 值与温度关系  
(1000ml 溶液,开始 pH 都是 6.60)

温度( $^{\circ}\text{C}$ )	15	20	25	30	35	40	45	50	$\Delta\text{pH}$	过程
生豆乳	6.38	6.31	6.27	6.21	6.17	6.14	6.12	6.10	0.28	加热
+1.5g $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$			6.25		6.16		6.10			冷却
模 1	6.44	6.42	6.40	6.36	6.32	6.30	6.27	6.25	0.19	加热
+1.0g $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$			6.38		6.30					冷却
模 1	6.40	6.38	6.35		6.27		6.20	6.18	0.22	加热
+2.0g $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$			6.33		2.24					冷却

由表 7 可以看出,尽管生豆乳与模 1 的 pH 变化有较大的差异,但其变化趋势也是完全一致的。

就其差异而言,豆乳中的蛋白质有很大的缓冲能力,且 K, Mg, Ca, Fe, Na 等在豆乳中大部分都是以植物素态而非无机盐的状态存在<sup>[3]</sup>,这与模拟溶液是有差别的,因而与生豆乳的 pH 变化并不完全吻合。

从模拟溶液的 pH 变化趋势与豆乳完全一致的实验结果可推断,植酸盐和柠檬酸盐的络合作用对溶液 pH 下降起了相当的影响,现将凝固剂加入到豆乳中所出现的反应推断如下:



式中  $M^{2+}$  代表二价金属离子,  $H_2P$  代表植酸(盐)等,  $MP$  代表金属离子与植酸(盐)等形成的络合物。

$$\text{平衡常数 } K = \frac{[MP][H^+]^2}{[M^{2+}][H_2P]}$$

$$[H^+]^2 = \frac{K[M^{2+}][H_2P]}{[MP]} \quad (K = k \cdot \frac{-\Delta H}{102.303RT})$$

$$2pH = -1gk + \frac{\Delta H}{2.303RT} - 1g[M^{2+}] - 1g[H_2P] + 1g[MP]$$

$$pH = \frac{1}{2} \left[ \frac{A}{T} + 1g[MP] - 1g[M^{2+}] - 1g[H_2P] - 1gk \right]$$

$$(A = \frac{\Delta H}{2.303R} > 0, \text{吸热反应, } \Delta H > 0)$$

$$pH = \frac{1}{2} \left[ \frac{A}{T} - 1g[M^{2+}] + X \right] \quad (2)$$

( $X = 1g[MP] - 1g[H_2P] - 1gk$ , 是与大豆品种密切相关的因素)

从式(2)可以看出, 温度升高,  $[M^{2+}]$  的增加, 都将使溶液的 pH 下降。

即豆乳的  $pH = f(\text{豆乳的温度, 凝固剂加入量, 大豆的自身品质})$

式(2)可以解释 2.1、2.2 所出现的各种趋势, 也可以解释一些以前无法解释的实验现象, 如人们发现大豆中磷的含量与豆腐的硬度<sup>[6,7]</sup>和产量<sup>[8]</sup>有密切的关系, 得到磷的含量越高, 豆腐产量越低, 豆腐越硬的结果。根据式(2), 可以作如下解释: 因大豆中磷的含量与植酸盐的含量呈正相关( $r = 0.998$ )<sup>[8]</sup>, 所以磷含量高的豆乳, 植酸盐的含量也高, 因此加入等量的凝固剂时, 豆乳的 pH 值将下降更多, 加快了豆腐的形成速度, 从而不利于形成质构均一的凝胶, 因此豆腐的保水性差, 产量低, 硬度增加(水分含量少所致)。

由 2.1 及 2.2 的结果和式(2)的预测, 可得到豆腐 pH 值的差别比常温下所测得的 pH 值的差别要小得多, 甚至没有差别。如按一般生产中,  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  和 GDL 的加入量分别为 2‰ 和 2.5‰ 来推算<sup>[3]</sup>, 在 15℃ 时, 测出未加凝固剂的豆乳 pH 值为 6.60; 加入  $MgCl_2$

和 GDL 分别为 6.30 和 6.00, 在 50℃ 时, 豆乳的 pH 值分别为 6.00 和 5.90, 其变化趋势由图 3 可以推断为, 在凝固温度下(70℃)两者的 pH 值将趋于一致。

值得指出的是, 1000ml 豆乳中的  $Mg^{2+}$  有 300mg, 而传统豆腐生产中加入 2‰ 的  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ,  $Mg^{2+}$  也仅 300mg 左右, 所以温度对豆乳中不加凝固剂与加入凝固剂时的 pH 值变化有类似的影响, 如果在较高的温度下, 温度对豆乳 pH 变化的影响与表 3 所示的一致, 则豆乳自身也将凝结, 这也许是豆乳高温杀菌时蛋白质产生沉淀的另一原因。

#### 2.4 蛋白酶作用后的豆乳对豆腐胶形成的影响

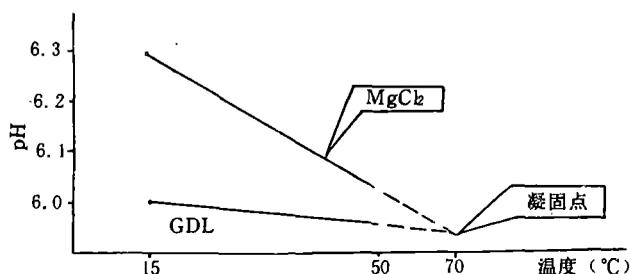


图 3 推测凝固点 pH 与温度的示意图

— 实测变化  
 ... 预计的变化

1398 蛋白酶是一种蛋白分解酶,可打断蛋白质的长链分子。酶作用不同时间后,豆乳的凝固情况如下:

作用时间(min)	2	5	10	20
豆乳的凝固情况	凝	凝	凝弱	不凝

显然,要形成豆腐胶必须有较长链的蛋白质分子存在。

### 2.5 十二烷基硫酸钠(SDS)对豆腐胶形成的影响

据报道<sup>[22]</sup>, SDS 是一种很强的表面活性剂,可大量吸附在蛋白质分子上,使蛋白质带同一种电荷,因此可以用来分析电荷对蛋白质形成的影响。

200ml 80℃的豆乳加入 5g SDS 后,豆乳不凝固,说明要形成豆腐胶,必须使蛋白质的电性中和到一定的程度。

### 2.6 豆腐凝固过程的 DSC 曲线

豆腐凝固过程的差热分析尚未见报道,由实验结果可看出,豆腐凝胶形成是一个吸热过程,如图 4,图 5(豆乳已煮沸 3min,蛋白质已完全变性)。

$T_{\text{peak} \cdot \text{酸}} = 71.3^\circ\text{C}$

$T_{\text{peak} \cdot \text{盐}} = 78.7^\circ\text{C}$

( $T_{\text{peak}}$ —温度峰)

在低温下(4℃)加入 HAC 和  $\text{MgCl}_2$  到豆乳中后,体系的 pH 下降,在加热过程中,因络合反应的影响和蛋白质— $\text{H}_2\text{O}$  之间形成的次级键被破坏,使体系吸热。随着温度的升高,豆乳的 pH 更接近蛋白质的等电点,加上热效应的影响,使蛋白质分子进一步扩张,以致在空间上达到能够相互渗透的程度,在蛋白质分子之间形成了大量的蛋白质—蛋白质之间的次级键,使体系放热,因此出现了“吸热峰”(这种峰的前部分拖得很长是一个吸热过程,当到某一温度后,大量次级键的形成改变了吸热的速度,出现了“峰”,因此严格地说,这种峰与相变所出现的峰是不同的)。

对纯豆乳而言,因溶液的 pH 离蛋白质的 PI 较远,温度升高时,尽管次级键的破坏和络

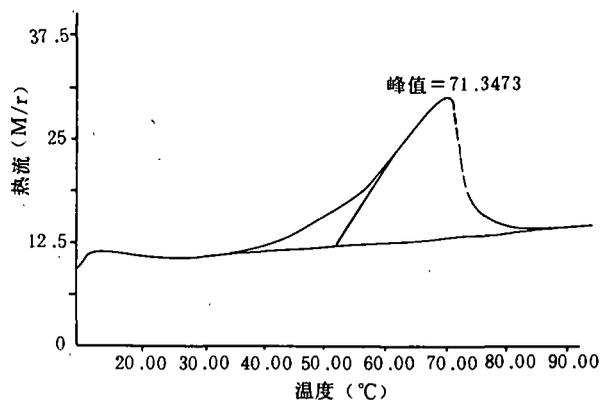


图 4 豆乳酸凝过程的差热曲线

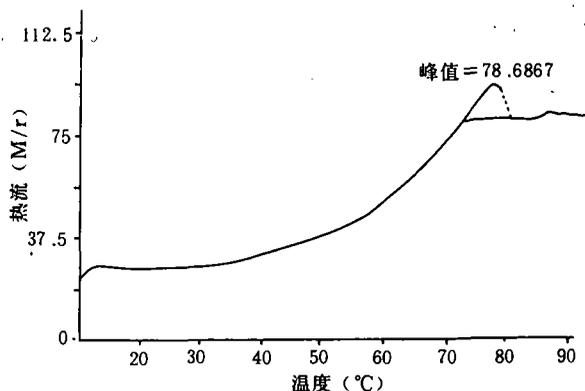


图 5 豆乳盐凝过程的差热曲线(豆乳+ $\text{MgCl}_2$ )

合反应的发生使体系吸热,但在空间上,蛋白质的各个片断之间的距离尚未被迫“拥挤”到形成次级键的距离,因而没有蛋白质—蛋白质之间的次级键的形成,所以没有出现吸热峰。

上述推测的另一证据有:低温下加入大量凝固剂到豆乳中形成的物质,是粘度巨大的溶液或者毫无弹性的凝胶,因此可以认为在蛋白质—蛋白质之间未形成网络。豆腐胶是有弹性的,说明蛋白质—蛋白质之间已发生了作用。

### 3 结 语

大豆浸泡充分吸水后,磨浆制成豆糊而后豆浆,此时蛋白质没有变性;豆浆煮沸过程中,蛋白质先分解成各种亚单位,接着形成分子量数 10 万至 1000 万的聚集物<sup>[22,23,24]</sup>。

当酸和盐加入到豆浆中后,盐的二价金属离子与植酸(盐)和柠檬酸(盐)发生络合反应使豆乳的 pH 值下降,酸直接使豆乳的 pH 下降;接近等电点的变性蛋白质分子,相互聚集的位垒  $E_a$  变小,较高的温度使大豆蛋白质具有足够克服位垒  $E_a$  的能量,当充分膨胀扩张的蛋白质分子碰撞时,依靠各种次级键特别是静电力的作用随机缠绕聚合地一起形成豆腐胶。温度越高越接近蛋白质的等电点,缠绕的程度也就越大,形成的豆浆胶越硬。当成型降温时,随机缠绕的线状蛋白质分子并不能恢复到原来状态,而维持豆腐胶的静电力越大,豆腐也就越来越硬了。本研究的结果赞同 Lu<sup>[5]</sup>的二价金属离子使豆乳 pH 下降的结论,指出了 pH 下降的原因并阐明了酸和盐凝固豆腐本质上在凝固温度时的一致性。

### 参 考 文 献

- 1 Robret, Plant proteins: Applications Biological Effects and chemistry. American chemical society Washington DC. 1986:45
- 2 Cherl. J. Food Sci. 1987;43:79
- 3 杨淑媛等. 新编大豆食品. 商业出版社, 1989
- 4 白至德等. 大豆制品的加工. 轻工业出版社, 1985
- 5 Lu JY. J. Food Sci. 1980;45:32
- 6 Schaefer. Dissertation Abstracts International. 1987;47(11),4366
- 7 许显滨等. 中国油料, 1990;1:74
- 8 Lim. J. Food Sci. 1990;55(4):1088
- 9 丽伟章. 食品科学, 1988;4:49
- 10 黄伟坤等. 食品检验与分析. 轻工业出版社, 1981
- 11 郑州粮食学院译. 食品分析方法. 四川科技出版社, 1985
- 12 吴文涛. 食品科学, 1983;12:55
- 13 Rham O de. J. Food Sci. 1979;44(22):596
- 14 Ford J R. J. Am. Oil Chem Soc. 1978;571
- 15 Joseph A Maga. J. Agric. Food Chem. 1982;30(1):1
- 16 Kyoka Saio. Agri. Biol. Chem. 1967;31(10):1105
- 17 Johames J L. J. Agric. Food Chem. 1986;34:680
- 18 Frida Grysban. J. Am. Oil Chem. Soc. 1989;66(1):93

- 19 骆承痒译. 大豆与大豆食品. 轻工业出版社, 1983
- 20 大连理工大学. 无机化学. 商务印书馆, 1990
- 21 Erst Grat. J. Agric. Food Chem. 1983;31:851
- 22 Jiang Rutao. The Nutrition Value of the Soybean Products and the Gelatication Effect in Production. 会议记录, 首届豆腐文化节上的讲话. 1990;9. 15
- 23 Shigerv Utsuni. J. Food Sci. 1985;50:1278
- 24 Hermansson A M. J. Am. Oil Chem. Soc. 1986;63(5):658

## The research of tofu coagulation mechanism

Yang Fangqi Gao Fuchen Mong Xu

(Dept. of Food Science and Eng. )

**Abstract** it was found that the pH of Soy milk decrease as the temperature increase. And the complex reaction between divalent metallic ion and citrate and phycyate causes the pH of Soy milk decrease is proved. So there is no difference between acid coagulation and salt coagulation during the tofu-making process.

**Key-words** Tofu; Coagulation mechanism