

# 不同冻结速率对温氏鸡冻结特性的影响研究

廖彩虎, 芮汉明\*

(华南理工大学轻工与食品学院, 广东 广州 510640)

**摘 要:** 以汁液流失率、蛋白质变性、质构为指标, 研究超快速冻结(11.46cm/h)、快速冻结(4.21、2.07cm/h)、慢速冻结(0.25cm/h)对温氏鸡冻结特性的影响。结果表明: 随着冻结速率的增加, 温氏鸡肌原纤维盐溶性蛋白含量和肌动球蛋白  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性的降低率、汁液流失率先呈下降趋势, 然后呈增加的趋势, 其他几种 ATPase 活性变化不大; 差示扫描量热法(DSC)分析冻结后肌肉蛋白的变性与传统方法有较好的相关性( $R^2=0.8367$ ), 冻结对肌球蛋白头部的变性程度要大于对肌浆蛋白和肌球蛋白尾部、肌动蛋白的变性程度; 随着冻结速率的上升, 温氏鸡肉的硬度和咀嚼性都有增加的趋势, 而弹性和回复性都有下降的趋势。综合理化指标和质构指标, 增加冻结速率利于保护温氏鸡的品质, 但是过快的冻结速率破坏了其品质。

**关键词:** 温氏鸡; 冻结速率; 蛋白变性; 质构; 差示扫描量热法

## Effect of Freezing Rate on Characteristics of Wenshi Chicken

LIAO Cai-hu, RUI Han-ming\*

(College of Light Industry and Food Sciences, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In order to investigate the characteristics of Wenshi chicken during freezing process, four freezing rates such as ultra-rapid freezing at 11.46 cm/h, rapid freezing at 4.21 or 2.07 cm/h and slow freezing at 0.25 cm/h were studied to examine the effect on characteristics of chicken through evaluating its drip loss rate, protein denaturation and texture. Results indicated that the reduction rate of salt-soluble protein content and  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase activity and drip loss rate in Wenshi chicken displayed a change trend to first drop and then rise as freezing rate rose. However, No obvious change in the activity of other ATPase enzymes was observed at different freezing rate conditions. Differential scanning calorimetric (DSC) analysis exhibited that protein denaturation after being frozen had a good correlation with traditional methods ( $R^2 = 0.8367$ ). Denaturation degree of myosin heads was larger than sarcoplasmic protein and myosin tails throughout freezing process. With increasing freezing rate, the hardness and chewiness of Wenshi chicken exhibited an increase, while the elasticity and resilience exhibited a decrease. According to comprehensive evaluation and texture analysis, increasing freezing rate will be helpful to maintain original quality of Wenshi chicken, but ultra rapid freezing rate can result in the damage of its original quality.

**Key words:** Wenshi chicken; freezing rate; protein denaturation; texture; DSC

中图分类号: TS255.1; S377

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2010)03-0064-05

温氏鸡作为一种特色的鸡种, 关于其冻结加工技术鲜见报道。而且, 由于各种鸡肉化学组成不同, 其蛋白质变性特点, 进行冻结加工的技术要求也不尽相同。目前, 关于鸡肉冻结理化指标的研究鲜见报道, 大多数是对鱼冻结理化指标的研究。本实验以温氏鸡作为研究对象, 通过浸渍、鼓风、冰箱等几种不同的冷冻方式对其进行冷冻。通过研究不同的冻结速率对鸡肉汁液流失率、蛋白质变性、质构等指标的影响, 旨在探究

温氏鸡在不同冻结速率下蛋白质冷冻变性的程度, 从而可以确定较好的冻结速率; 同时也应用 DSC 研究蛋白质的变性, 为温氏鸡冻结提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料、仪器与设备

新鲜的温氏鸡(又名三皇鸡)购自华南理工大学, 鸡平均体质量 1500g。新鲜鸡肉经宰后脱毛、去内脏, 并

收稿日期: 2009-05-06

基金项目: 农业部公益性行业(农业)科研专项经费项目(nyhyzx07-038); 广东省科技攻关重大专项项目(2007A020400006)

作者简介: 廖彩虎(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事食品加工与贮藏研究。E-mail: liaocaihu@yahoo.com.cn

\* 通信作者: 芮汉明(1953—), 男, 副教授, 主要从事食品科学、农产品加工和保藏研究。E-mail: RHMSLY@163.com

用流动冷却水洗去内脏,随后去皮、去表皮脂肪、去筋,将胸肉和腿肉作为研究对象。

TA-XT2i 型质构仪 英国 Stable Micro Systems 公司; CS-WS-2.4/-60 低温速冻机 苏州昆拓冷机有限公司; TGL-16G 高速冷冻离心机 上海安亭科学仪器厂; BS224S 电子天平 北京赛多利斯科学仪器有限公司; HLSY-B 实验速冻机 郑州亨利制冷设备有限公司; TAQ100 DSC 仪 美国 TA 公司; BCD-219SK 冰箱 海尔公司。

## 1.2 冻结和解冻

将胸肉和腿肉分别放置于实验速冻机、冰箱、低温速冻机等冻结设备中进行冻结。对于实验速冻机,通过调节冻结室内的初始温度( $-30^{\circ}\text{C}$ )和风速(4、8m/s)控制鸡肉的冻结速率(鼓风冻结也称为快速冻结,冻结速率在  $0.5\sim 3\text{cm/h}$ );对于冰箱,通过控制冻藏室的温度( $-20^{\circ}\text{C}$ )调节鸡肉的冻结速率,其冻结过程被视为静置冻结(静置冻结也称为慢速冻结,冻结速率小于  $0.5\text{cm/h}$ );对于低温冷冻机,是一种以氟利昂为制冷剂、以乙醇为载体的快速冷冻机,也是通过调节乙醇的温度( $-55^{\circ}\text{C}$ )来进行冻结,鸡肉冻结前需要密封包装,其冻结方式属于浸渍冷冻(浸渍冻结也称为超快速冻结,冻结速率大于  $10\text{cm/h}$ )。当鸡肉中心温度降至  $-18^{\circ}\text{C}$  时,取出鸡肉,密封于聚乙烯塑料袋中,置于  $20^{\circ}\text{C}$  水中解冻,解冻到中心温度为  $0^{\circ}\text{C}$  为止,解冻后样品用于理化指标测定。

## 1.3 冻结速率的计算

冻结速率( $v$ )按照国际制冷协会提出的计算方法<sup>[1]</sup>进行计算:

$$v = \frac{\delta_0}{\tau_0}$$

式中:  $\delta_0$  为食品表面与热中心的最短距离/cm;  
 $\tau_0$  为食品表面达到  $0^{\circ}\text{C}$  后食品中心温度降至比食品冰点(冻结点温度)低  $10^{\circ}\text{C}$  所需的时间/h。

计算时,取鸡腿中心 3 个温度探头中温度下降最慢的探头点为中心温度点,对应取该位置的表面探头温度作为表面温度点;鸡腿的厚度用游标卡尺来测量。

## 1.4 理化指标的测定

### 1.4.1 汁液流失率

按照 AOAC 的方法<sup>[2]</sup>进行。

### 1.4.2 盐溶性蛋白含量

样品为鸡腿的上、下两段混合样;根据 MFRD 的方法<sup>[3]</sup>进行测定,蛋白质含量的校正曲线如图 1 所示。

$$\text{盐溶性蛋白降低率}/\% = \frac{\text{冻结前含量} - \text{冻结后含量}}{\text{冻结前含量}} \times 100$$

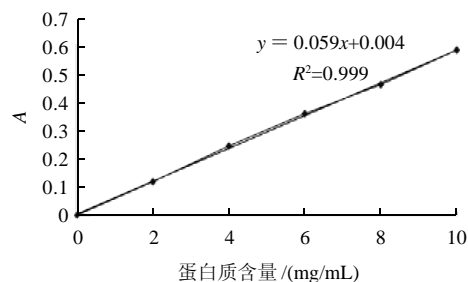


图1 蛋白质含量的校正曲线

Fig.1 Calibration curve of protein content

### 1.4.3 肌动球蛋白含量的提取

参考 Benjakul 等<sup>[4]</sup>的方法并稍作修改。称取样品 6g,加入 60mL 冷却的  $0.6\text{mol/L}$ 、 $\text{pH}7.0$  的 KCl,用高速分散均质机低温均质 4min,然后用高速冷冻离心机在  $10000\text{r/min}$ 、 $4^{\circ}\text{C}$  离心 30min,收集清液并加入 4 倍的冷却蒸馏水沉淀肌动球蛋白,静置 12h 后,用吸管小心的抽取上清液,剩余的沉淀在  $9000\text{r/min}$ 、 $4^{\circ}\text{C}$  离心 20min 收集沉淀,然后加入约 20mL 冷却的  $0.6\text{mol/L}$ 、 $\text{pH}7.0$  的 KCl,并于低温下磁力搅拌 30min 以溶解肌动球蛋白,最后于  $9000\text{r/min}$ 、 $4^{\circ}\text{C}$  离心 30min 以除去未溶解的蛋白质。

### 1.4.4 肌动球蛋白 ATPase 活性的测定

按 Benjakul 等<sup>[4]</sup>、张志良等<sup>[5]</sup>和万建荣等<sup>[6]</sup>的方法进行测定,并稍作修改。将提取出来的肌动球蛋白用  $0.6\text{mol/L}$ 、 $\text{pH}7.0$  的 KCl 定溶至 25mL,取 0.5mL 加入  $0.3\text{mL}$   $0.5\text{mol/L}$ 、 $\text{pH}7.0$  Tris- 马来酸溶液、 $0.5\text{mL}$   $0.1\text{mol/L}$   $\text{CaCl}_2$  溶液( $0.5\text{mL}$   $0.02\text{mol/L}$   $\text{MgCl}_2$  溶液、 $0.5\text{mL}$   $0.001\text{mol/L}$   $\text{CaCl}_2$  和  $0.02\text{mol/L}$   $\text{MgCl}_2$  溶液、 $0.5\text{mL}$   $0.02\text{mol/L}$   $\text{MgCl}_2$  和  $0.005\text{mol/L}$  EGTA 溶液)、 $3.45\text{mL}$  蒸馏水和  $0.25\text{mL}$   $0.02\text{mol/L}$  ATP 的溶液里,在  $25^{\circ}\text{C}$  反应 10min 后用  $2.5\text{mL}$  15% 三氯乙酸阻断反应。反应完后,反应液在  $6500\text{r/min}$  离心 5min 得上清液,采用钼酸铵法测定反应中释放出来的无机磷含量。 $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性采用每毫克肌动球蛋白每分钟所释放磷离子的物质的量表示。具体操作为:取上清液  $0.5\text{mL}$  加入  $2.5\text{mL}$  蒸馏水,摇匀后加入  $2\text{mL}$  硫酸亚铁、钼酸铵试剂于室温放置 1min 后显色,用分光光度计于  $660\text{nm}$  波长下比色测定吸光度,无机磷含量校正曲线如图 2 所示。

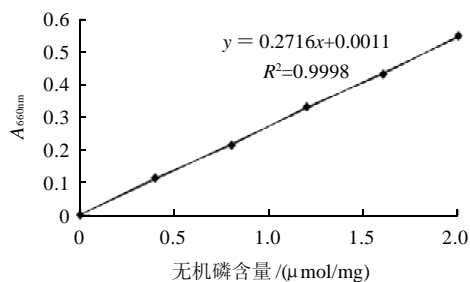


图2 无机磷含量校正曲线

Fig.2 Calibration curve of inorganic phosphorus content

1.4.5 质构<sup>[7]</sup>

采用 TA-XT2i 型质构仪进行测定, 平行 10 次, 主要测定 5 种质构特性参数即硬度、耐咀嚼性和回复性、黏着性、黏聚性。测定胸肉作为研究对象, 规格  $1.5\text{cm} \times 1.5\text{cm} \times 0.5\text{cm}$ 。测定前将样品用保鲜袋包住并在室温下放置 0.5h, 剔除低温影响。测定条件为: 探头型号: P35; 测前速率:  $2.00\text{mm/s}$ ; 测试速率:  $2.00\text{mm/s}$ ; 测后速率:  $10.00\text{mm/s}$ ; 压缩变形率: 40%; 探头两次测定间隔时间: 5.00s; 触发类型: 自动。将对照样置于  $(4 \pm 1)^\circ\text{C}$  冰箱中。当贮藏时间与冻结样品的解冻时间相同时, 取出进行理化指标测定。

## 1.4.6 DSC 测定

参考 Deng 等<sup>[8]</sup>和陈韬等<sup>[9]</sup>的方法并修改如下: 取 16~18mg 鸡胸肉放于铝盘(固体盘)中, 立刻密封后, 放入 DSC 仪中, 在  $30^\circ\text{C}$  的温度下以  $5^\circ\text{C}/\text{min}$  升到  $120^\circ\text{C}$ 。冷却方式为液氮, 样品吹扫气和保护气为氮气(纯度 > 99%), 实验时将气阀调到最小档, 保证有充足氮气即可。

## 1.4.7 数据处理

测定和分析结果采用 SPSS13.0 for Windows、TA Universal analysis 和 Excel2003 进行处理, 质构数据结果采用  $\bar{x} \pm s$  形式。指标的比较采用最小显著差异法(least significant difference, LSD), 取 95% 置信度( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

## 2.1 冻结速率对汁液流失率的影响

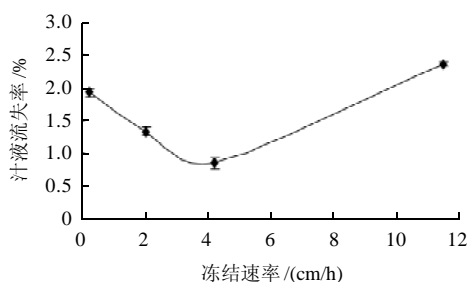


图3 不同的冻结速率对汁液流失率的影响

Fig.3 Effect of freezing rate on drip loss of Wenshi chicken

从图3可知, 不同的冻结速率, 汁液流失量也不相同。通常冻结速率越大, 越可以避开最大冰晶带的形成, 从而可以减少冰晶对组织的破坏, 有利用阻止汁液的流失, 但从图3可以看出, 并不是冻结速率越快越好。随着冻结速率的增加, 汁液流失量在减少, 当冻结速率从  $0.25\text{cm/h}$  增加到  $4.21\text{cm/h}$  时, 其汁液流失率也从 1.94% 下降到 0.85%, 但是当冻结速率继续从  $4.21\text{cm/h}$  增加到  $11.24\text{cm/h}$  时, 其汁液流失量从 0.85% 增加到 2.37%, 其原因可能是超快速冻结使得食品表面的裂解, 肌细胞纤维组织破坏严重, 蛋白质变性也更加严

重, 从而导致汁液流失量过大。对于鸡肉来说,  $4.21\text{cm/h}$  的冻结速率有利于防止汁液流失, 继续增大冻结速率反而导致了较大的汁液流失。

## 2.2 冻结速率对肌原纤维盐溶性蛋白和肌动球蛋白 ATPase 活性的影响

鸡肉中蛋白按其溶解特性可分为水溶性的肌浆蛋白、盐溶性的肌原纤维蛋白和不溶性的基质蛋白 3 大类, 这 3 类蛋白表现出完全不同的物性特性, 但是一般认为肌原纤维蛋白发生变性对鸡肉加工特性影响最大。通常肉制品蛋白的冷冻变性越严重, 其肌原纤维蛋白的盐溶性含量降低、 $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性下降<sup>[10]</sup>。

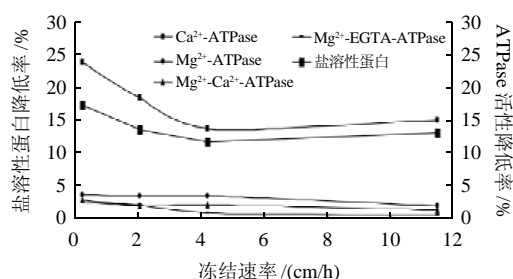


图4 冻结速率对盐溶性蛋白降低率和ATPase活性降低率的影响

Fig.4 Effect of freezing rate on salt-soluble protein content and ATPase activities in Wenshi chicken

从图4可以看出, 随着冻结速率的增加,  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性和肌原纤维蛋白盐溶性含量呈下降趋势, 但是降低率在减小; 但当速率增加到一定程度时, 其  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性和肌原纤维盐溶性蛋白含量仍呈下降趋势, 且下降率增加。当冻结速率分别为 0.25、2.07、4.21、11.42cm/h 时, 其盐溶性蛋白降低率、 $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性的降低率分别为 17.41%、13.65%、11.72%、13.11% 及 23.82%、18.46%、13.80%、15.01%, 其原因可能是慢速冻结导致了大的冰晶, 肌细胞内纤维被挤压集结成束, 并因冰晶形成时蛋白质失去结合水, 从而导致了蛋白质反应基相结合形成各种交连导致变性; 增加冻结速率可以防止大的冰晶形成, 而且使得冰晶在肌细胞内形成, 从而减少了因细胞损伤减少而导致蛋白质的变性<sup>[11]</sup>; 但是超快速冻结导致的蛋白质变性更大, 其原因可能是超快速冻结导致鸡肉表面的冻裂, 从而使得肌细胞损伤更大, 反而使得蛋白质变性更加严重。其他几种 ATPase 活性随着冻结速率的改变, 变化不大, 其降低率都小于 5%, 差异也不显著( $P > 0.05$ )。

盐溶性蛋白溶解度和  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性分别反映肌球蛋白两种不同方式的变性<sup>[12]</sup>。盐溶性蛋白溶解度反映的是肌球蛋白杆部的性质, 而  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 来源于肌球蛋白头部, 表征其肌球蛋白 S-1 的性质。实验结果表明, 肌球蛋白的头部比肌球蛋白的杆部更容易变性, 这与汪之和等<sup>[13]</sup>对文蛤、关志强等<sup>[14]</sup>对鲢鱼的研究有点差异。

## 2.3 DSC 分析不同冻结速率对肌肉蛋白质变性的影响

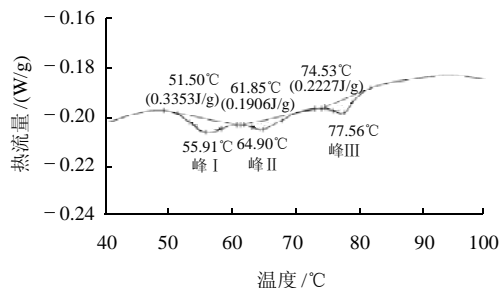


图5 温氏鸡的肌肉蛋白质 DSC 热流图

Fig.5 DSC thermogram of Wenshi chicken protein

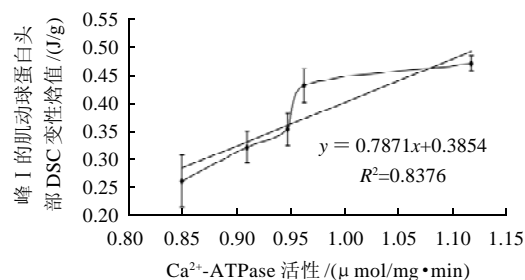
从图5可以看出,3个吸收峰中峰I代表肌球蛋白头部引起的热流变化;峰II代表肌球蛋白尾部和肌浆蛋白引起的热流变化;峰III代表肌动蛋白引起的热流峰。变性焓与变性温度由与DSC仪连接的TA Universal分析软件得出。

变性焓值代表了蛋白质的变性程度,变性焓值与蛋白质的变性程度呈负相关性,即变性焓值越大,其变性程度越小,反之亦然。由表1可知,随着冻结速率的增加,温氏鸡肌肉蛋白质的变性焓值及其变性温度相对于新鲜鸡肉均有下降的趋势。与新鲜的鸡肉作比较,当冻结速率为0.25、2.07、4.21、11.42 cm/h时,其峰I、峰II、峰III的变性焓值分别下降了44.82%、32.01%、8.53%、25.24%;17.98%、13.05%、11.94%、22.16%;45.10%、19.32%、5.73%、2.73%,可知,冻结对肌球蛋白头部的变性程度要大于对肌浆蛋白、肌动蛋白的变性程度。从峰I、峰II的变性焓值可以看出,增大冻结速率可以增加其变性焓值,也有利于防止肌球蛋白和肌浆蛋白的变性,但是冻结速率过快,其变性焓值反而下降;从峰III可以看出,随着冻结速率的增加,变性焓值在增加,但是当冻结速率大于4.21 cm/h时,其变性焓值变化不大,差异也不显著( $P > 0.05$ )。总体来看,当冻结速率为4.21 cm/h时,峰I、峰II、峰III的变性焓值都较为接近新鲜的,而且差异性也不显著( $P > 0.05$ )。

表1 DSC 分析结果 ( $\bar{x} \pm s$ )Table 1 Results of DSC analysis for myosin heads, sarcoplasmic protein and myosin tails, and myosin in Wenshi chicken ( $\bar{x} \pm s$ )

冻结速率/ (cm/h)	峰I 肌球蛋白头部		峰II 肌浆蛋白和肌球蛋白尾部		峰III 肌动蛋白	
	变性温度/°C	变性焓值/(J/g)	变性温度/°C	变性焓值/(J/g)	变性温度/°C	变性焓值/(J/g)
0.25	54.44 ± 0.39	0.2606 ± 0.0470 <sup>b</sup>	64.55 ± 0.11	0.2376 ± 0.0214 <sup>b</sup>	77.56 ± 0.11	0.1446 ± 0.0076 <sup>b</sup>
2.07	55.31 ± 0.41	0.3211 ± 0.0290 <sup>b</sup>	64.59 ± 0.57	0.2519 ± 0.2331 <sup>a</sup>	77.71 ± 0.29	0.2125 ± 0.0038 <sup>ab</sup>
4.21	56.48 ± 0.01	0.4320 ± 0.0287 <sup>a</sup>	64.84 ± 0.88	0.2551 ± 0.0315 <sup>a</sup>	78.01 ± 0.21	0.2483 ± 0.0021 <sup>a</sup>
11.42	55.52 ± 0.30	0.3531 ± 0.0297 <sup>b</sup>	62.97 ± 0.28	0.2255 ± 0.0191 <sup>c</sup>	77.71 ± 0.76	0.2562 ± 0.0168 <sup>a</sup>
新鲜	56.72 ± 0.06	0.4723 ± 0.0140 <sup>a</sup>	66.28 ± 0.25	0.2897 ± 0.0237 <sup>a</sup>	78.42 ± 0.20	0.2634 ± 0.0294 <sup>a</sup>

注: 同列字母肩标不同, 表明差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

图6 DSC 峰I 变性焓值与Ca<sup>2+</sup>-ATPase 活性的相关性Fig.6 Correlation between DH<sub>peak I</sub> in DSC and Ca<sup>2+</sup>-ATPase activity

从图6可以看出,峰I 变性焓值与Ca<sup>2+</sup>-ATPase 活性存在着一定的相关性。峰I 变性焓值反应的是肌球蛋白的变性程度,而Ca<sup>2+</sup>-ATPase 来源于肌球蛋白头部,表征其肌球蛋白S-1的性质,也是评价肌球蛋白分子完整性和冷冻蛋白变性的良好指标<sup>[13]</sup>。Ca<sup>2+</sup>-ATPase 活性越大,峰I 变性焓值也越大,具有较好的相关性,其相关系数为0.8367,相关方程为 $y = 0.7871x + 0.3854$ 。这也可以说明用DSC来检测冻结后蛋白质的变性程度是一种有效的方法。同时陈韬等<sup>[9]</sup>认为用DSC方法测定蛋白质变性程度比用测定蛋白质溶解性的方法更灵敏。

## 2.4 不同冻结速率对温氏鸡质构的影响

表2 不同冻结速率对温氏鸡质构的影响

Table 2 Effect of freezing rate on textural properties of Wenshi chicken

冻结速率/ (cm/h)	硬度/g	弹性	咀嚼性/g	回复性/%
0.25	2293.81 ± 16.26 <sup>a</sup>	0.932 ± 0.018 <sup>a</sup>	1000.22 ± 53.19 <sup>a</sup>	0.588 ± 0.094 <sup>b</sup>
2.07	2243.57 ± 34.13 <sup>a</sup>	0.935 ± 0.038 <sup>a</sup>	985.35 ± 57.16 <sup>a</sup>	0.586 ± 0.071 <sup>b</sup>
4.21	2179.44 ± 16.31 <sup>b</sup>	0.937 ± 0.020 <sup>a</sup>	955.86 ± 28.35 <sup>a</sup>	0.594 ± 0.022 <sup>b</sup>
11.42	2277.19 ± 58.37 <sup>a</sup>	0.934 ± 0.014 <sup>a</sup>	1034.28 ± 98.90 <sup>a</sup>	0.578 ± 0.014 <sup>b</sup>
新鲜	2078.81 ± 58.41 <sup>c</sup>	0.958 ± 0.043 <sup>a</sup>	712.11 ± 84.51 <sup>b</sup>	0.633 ± 0.081 <sup>a</sup>

从表2可以看出,随着冻结速率的增加,温氏鸡的硬度和咀嚼性都有增加的趋势,而弹性和回复性都有下降的趋势。当冻结速率为0.25、2.07、4.21、11.42 cm/h时,其硬度和咀嚼性分别增加了10.34%、7.92%、4.84%、9.52%及40.46%、34.58%、34.23%、45.24%,

相反其弹性和回复性分别下降了2.71%、2.40%、2.20%、2.51%及7.11%、7.43%、6.16%、8.69%。当冻结速率为4.21cm/h时,其硬度、弹性、咀嚼性、回复性更接近新鲜的鸡肉。质构的改变可能主要是由汁液的流失造成的。

### 3 结 论

3.1 随着冻结速率的增加,其汁液流失量呈逐渐减少的趋势,但是当冻结速率过大时,汁液流失量反而增加。

3.2 随着冻结速率的增加,  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性和肌原纤维蛋白盐溶性含量均呈现下降的趋势,但是降低率表现为先减少后增加的趋势。实验还测得  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性降低率要大于肌原纤维蛋白盐溶性含量降低率,其他几种 ATPase 活性变化不大,差异性不显著( $P > 0.05$ )。

3.3 随着冻结速率的增加,温氏鸡肌肉蛋白质的变性焓值及其变性温度相对于新鲜鸡肉均有下降的趋势。从峰Ⅰ、峰Ⅱ、峰Ⅲ的变性焓值的下降率可以看出,冻结对肌球蛋白头部的变性程度要大于对肌浆蛋白、肌动蛋白的变性程度。当冻结速率为4.21cm/h时,其变性焓值较为接近新鲜的,而且差异性不显著( $P > 0.05$ )。

3.4 随着冻结速率的增加,温氏鸡的硬度和咀嚼性都有增加的趋势,而弹性和回复性都有下降的趋势。当冻结为4.21cm/h时,其硬度、弹性、咀嚼性、回复性更接近新鲜的鸡肉,质构的改变可能主要是由于汁液的流失造成的。

### 参考文献:

- [1] 曾庆孝, 芮汉明, 李汴生. 食品加工与保藏原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [2] AOAC. Official method of analysis[M]. 16th ed. Washington DC: Association of the Official Analytical Chemists, 1995.
- [3] Marine Fisheries Research Development. Laboratory manual analytical methods and procedures for fish and fish product[M]. Singapore: South-east Asian Fisheries Development Center, 1987.
- [4] BENJAKUL S, MORRISSEY M T, AN H J, et al. Physicochemical change in pacific whiting muscle protein during iced storage[J]. Journal of Food Science, 1997, 62(4): 729-733.
- [5] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学研究指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 50-52.
- [6] 万建荣, 洪玉笋, 奚印慈, 等. 水产食品化学分析手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1993: 145-147.
- [7] 芮汉明, 蒋宇飞. 微波处理对白切鸡肌肉质构的影响[J]. 食品工业科技, 2008(3): 138-139.
- [8] DENG Y, ROSENVOLD K, KARLSSON A H, et al. Relationship between thermal denaturation of porcine muscle proteins and water-holding capacity[J]. Journal of Food Science, 2002, 67(5): 1642-1647.
- [9] 陈韬, 周光宏, 徐幸莲. 不同持水性冷却肉的品质比较和蛋白质的DSC测定[J]. 食品科学, 2007, 28(6): 31-34.
- [10] 冯志哲, 沈月新. 食品冷藏学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2001: 48-58.
- [11] 阮征, 李汴生, 朱志伟, 等. 不同冻结速率对脆肉鲩鱼片冻结特性的影响研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 250-254.
- [12] 新井健一, 山本常治. 冷冻鱼糜[M]. 万建荣, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 1991.
- [13] 汪之和, 王隼, 苏得福. 冻结速率和冻藏温度对鲢鱼肉蛋白质冷冻变性的影响[J]. 水产学报, 2001, 26(6): 564-569.
- [14] 关志强, 蒋小强, 李敏, 等. 冻结速率和冻藏温度对文蛤蛋白质冷冻变性的影响[J]. 食品发酵与工业, 2005, 31(11): 137-140.