

等离子电场辅助冷冻羊肉过程中冰晶变化及热力学分析

乔丹丹¹, 李斯琦¹, 格日勒图¹, 满都呼², 吴金迪¹, 莎日娜^{1*}

¹ 内蒙古农业大学食品科学与工程学院 呼和浩特 010018

² 呼和浩特市绿碧电子科技有限公司 呼和浩特 010010

摘要 为探究等离子电场辅助冻结对羊肉品质及冻结过程的影响,选用羊背最长肌作为试验材料,研究辅助不同场强(1,3 kV/m 和 5 kV/m)的等离子电场对羊肉冻结速度的影响,以及对冻结过程中肉中冰晶分布及冰晶粒径和圆度的影响,并用热力学理论进行分析。结果表明:在-20℃和-35℃时,辅助 5 kV/m 等离子电场环境下的肉样通过最大冰晶生成带的时间最短,分别为 70 min 与 40 min,与对照组相比均有差异显著($P<0.05$)。组织切片显示-35℃辅助 5 kV/m 等离子电场冻结时形成的冰晶面积和粒径最小,-20℃辅助 5 kV/m 等离子电场冻结的冰晶圆度最高,平均值为 0.88。以上指标与对照组相比均有显著差异($P<0.05$)。运用波尔兹曼公式分析体系的熵,结果显示:在-20℃和-35℃时,辅助 5 kV/m 等离子电场冻结的肉样的熵最小,与对照组相比有显著性差异($P<0.05$),表明辅助 5 kV/m 等离子电场可以显著提高体系冷冻肉水分玻璃化程度,可使结晶过程更加可控,电场辅助冷冻所需的能量更低,提高过冷度,加快肉样的冻结速率,且场强越大作用越显著。综合试验结果以及实际生产中节约能源,认为-20℃辅助 5 kV/m 电压冷冻可以作为一种新型冷冻方式应用于生产。

关键词 等离子电场; 羊肉; 冰晶面积; 冰晶粒径; 热力学

文章编号 1009-7848(2023)11-0223-08 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2023.11.022

水溶液的结晶由两个变化过程组成:首先是晶核的形成过程,其次是晶体的生长过程。冰晶的成核过程主要是由热力学条件决定,而冰晶的生长过程主要由动力学条件决定。肉中溶液的冷冻并不是瞬时完成的,溶液热量的转移与形态改变需要有过程,主要分为 3 个阶段:液态降温阶段、相变阶段和固态降温阶段。其中,每个阶段都伴随着热量的传递与温度的改变,并引起冷冻介质相的转变^[1-4]。常规冷冻对于食品的影响主要在于食品冷冻时冰晶的形成过程,然而,结晶的过程是随机的,细胞内、外溶液浓度不同,结晶所需的过冷度不同,使胞内结晶难以生成,胞外结晶大量生长,破坏细胞结构^[5-6]。冰晶的形成对冷冻肉类的质量起着至关重要的作用,冰晶体积过大可能会对组织造成不可逆的损伤,导致解冻时汁液损失增加^[7-10]。

等离子电场(静电场)技术主要是通过设备营

造低温等离子体环境,当设备通电时,等离子体体系中粒子之间发生非弹性碰撞,为化学反应提供激发能量,产生高反应性的活性粒子,主要包括活性氧(Reactive oxygen species, ROS)、活性氮(Reactive nitrogen species, RNS)、激发态粒子、OH 自由基等^[11-13]。低温等离子体被称为气、液、固三态之外的第 4 态物质,主要存在于自然界中,也可以通过人工方式获得^[14-15]。

等离子电场技术主要作用于过冷阶段和初始冻结的发生,等离子电场的引入可以改变过冷阶段的吉布斯自由能(ΔG_0),从而影响冰核的形成^[16]。在晶体形成过程中,生成的晶核越多,晶核与水分接触的总面积越大,结晶的时间越短,生成晶体的体积越小^[17]。当引入电场时,结晶过程更加可控,水分子的极化和重新排列使冰晶的形成更加均匀和细小,同时与常规冷冻技术相比,电场辅助冷冻所需的能量更低^[18-19]。

羊肉因具有肉质细嫩、味美多汁、易消化吸收等特点,备受广大消费者的青睐。然而,由于我国地域广大、幅员辽阔,因此受地理环境和经济条件的限制,常规冷冻贮藏(-18~-20℃)羊肉成为主要的贮藏和流通方式,在冷冻贮藏过程中如何更好地保障肉品质是关键问题^[20-21]。等离子电场技术

收稿日期: 2022-11-30

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目(2021MS03058);
财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术
体系资助项目(CARS38)

第一作者: 乔丹丹,女,硕士生

通信作者: 莎日娜 E-mail: huercha0505@163.com

作为一项节能型新技术,具有环保、无污染等特点^[22-23],满足现代食品工业向绿色食品生产方式转变的发展趋势,更是目前食品生产中所提倡的。

本研究以羊背最长肌为试验材料,通过施加等离子电场辅助肉品冷冻贮藏,探究等离子电场在肉品保藏中的作用,为等离子电场技术的实际应用提供一定的理论基础和试验参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜羊背最长肌:呼和浩特东瓦窑菜市场;O.C.T.冷冻切片包埋剂,美国 SAKURA 公司;苏木精伊红染液,白鲨生物科技有限公司;中性树胶,上海华灵康复器械厂。

1.2 仪器与设备

京制 00000246 号电子天平,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;KT300 探针温度计,北京利尔金福科技有限公司;DM4000B 显微镜,德国 LEICA 公司;等离子电场设备,呼和浩特市绿碧电子科技有限公司;MEV 冷冻切片机,德国 SLEE 公司;BC/BD-100HEGW 海尔电冰柜,青岛海尔特种电冰柜有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 等离子电场辅助冷冻曲线的绘制 将新鲜的羊背最长肌切成 50 g 的方形块,选取 12 块肉样随机分为 4 组,以自然冷冻(未施加电场)的肉样为对照组,等离子电场(冰箱内装有等离子电场设备)环境下冷冻的肉样为试验组。将试验组羊肉分别置于 1,3 kV/m 和 5 kV/m 的场强下,用聚乙烯自封袋包装后分别置于-20℃和-35℃冰箱中冷冻。温度测定均采用探针式温度计,每隔 10 min 记录 1 次数据。

1.3.2 肌肉组织形态及冰晶观察 参考刘晓兰等^[24]的方法,将肉样切成约 3 mm×3 mm×5 mm 的长方体肉柱,置自封袋内,于-20℃和-35℃冰箱中冷冻,备用。冷冻 48 h 后取出,迅速投入固定液中固定,然后切片、HE 常规染色、封片。切片观察使用 DM4000B 显微镜 4 倍物镜(带有 DFC450 摄像头及图像分析软件 LAS V4.4) 并拍摄组织图像。对肉样形成的冰晶进行计算和分析。

1.3.2.1 冷冻羊肉冰晶面积的测定 冰晶面积测

定采用图像分析软件 LAS V4.4 和 Image J。

1.3.2.2 冷冻羊肉冰晶粒径(相当直径)的计算 粒径定义为与研究对象具有相等面积的直径(d),计算公式:

$$d(\mu\text{m}) = (4A/\pi)^{1/2} \quad (1)$$

式中, A ——冰晶面积(由图像分析软件进行面积抓取), μm^2 。

1.3.2.3 冷冻羊肉冰晶圆度的计算 圆度(R)计算公式:

$$R = 4\pi A/p^2 \quad (2)$$

式中, p ——周长(由图像分析软件进行面积抓取), μm 。 R 值介于 0 和 1 之间,其值越大,对象越圆。

1.3.3 热力学变化 将肉样解冻后的汁液在 415 nm 处测定吸光值。此处为氧合肌红蛋白特征吸收峰,代表系统的分子微观运动状态数,计算体系的熵(S),公式:

$$S = k \ln \Omega \quad (3)$$

式中, k ——玻尔兹曼常数; Ω ——系统分子的微观状态数。

1.4 数据分析

以上试验数据均为 3 次重复试验的平均值,用 Excel 2016 和 SPSS 26.0 等统计软件统计分析。

2 结果与分析

2.1 等离子电场辅助对羊肉冻结和解冻速率的影响

肉样冻结温度分别为-20℃和-35℃。为研究等离子电场对羊肉冻结过程的影响,对不同电场强度处理肉样的中心温度变化进行比较。

由图 1 可知,几组羊肉样品在-20℃的冻结冷冻曲线趋势大体一致,温度降低过程都经过冷冻前期急剧、最大冰晶生成期平缓和冷冻后期快速 3 个阶段。其中,对照组总冻结时长为 710 min,通过最大冰晶生成带的时间为 130 min;1 kV/m 等离子电场环境下冷冻的总冻结时长为 580 min,通过最大冰晶生成带的时间为 120 min;3 kV/m 等离子电场环境下冷冻的总冻结时长为 470 min,通过最大冰晶生成带的时间为 80 min;而 5 kV/m 等离子电场环境下冷冻肉样仅用时 340 min 达到冻结温

度,通过最大冰晶生成带的时间为 70 min,与对照组相比差异显著($P<0.05$)。试验结果显示,经辅助不同等离子场强处理的肉样在冷冻过程中都不同程度地缩短了通过最大冰晶生成带所需时间,说明辅助等离子电场影响肉样冻结过程中水的相变过程,且辅助电场强度越大,冻结速率越快,冻结时间越短。

由图 2 可知, $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下肉样冻结速率更快,相比于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结时下降趋势也更为陡峭。其中,对照组总冻结时长为 350 min,通过最大冰晶生成带的时间为 110 min; 1 kV/m 等离子电场环境下冷冻的总冻结时长为 250 min,通过最大冰晶生成带的时间为 100 min; 3 kV/m 等离子电场环境下冷冻的总冻结时长为 210 min,通过最大冰晶生成带的时间为 80 min; 而 5 kV/m 等离子电场环境下冷冻的肉样仅用时 160 min 达到冻结温度,通过

最大冰晶生成带的时间为 40 min,与对照组相比差异显著($P<0.05$),说明等离子电场环境下 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻可以有效加快肉品的冻结速率和通过最大冰晶生成带的时间,且对冰晶的生成也有较好的影响。

肉类冷冻过程关键是通过最大冰晶生成带所需时间越短冷冻效果越好。综合以上不同条件冷冻试验结果可知,深冷冻即 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下肉中水分通过最大冰晶区所需时间为 110 min; 而辅助 3 kV/m 和 5 kV/m 等离子电场后常规冷冻即 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下冷冻肉中水分通过最大冰晶生成带所需时间分别为 80 min 和 70 min,少于无辅助电场深冷冻($-35\text{ }^{\circ}\text{C}$)时间,说明辅助适当的等离子电场后常规冷冻温度即可达到深冷冻效果且缩短冷冻时间,从而节约能源。

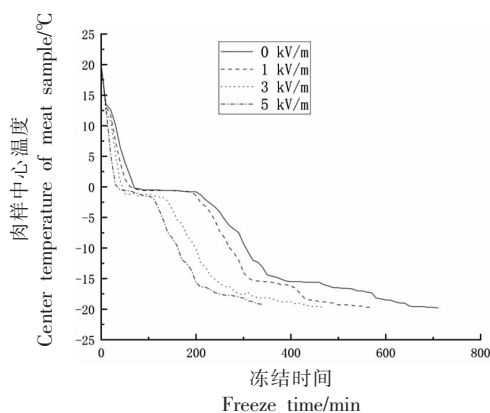


图 1 羊肉样品 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结过程中中心温度变化曲线图

Fig.1 The curve of the change of central temperature of mutton samples during freezing at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

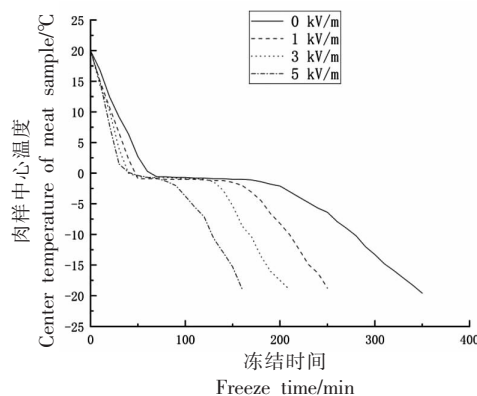


图 2 羊肉样品 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结过程中中心温度变化曲线

Fig.2 The curve of the change of central temperature of mutton samples during freezing at $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$

2.2 等离子电场辅助对羊肉冷冻后微观结构的影响

羊肉在不同条件下(无电场及 1, 3 kV/m 和 5 kV/m 等离子电场)冷冻($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$)后的冰晶形态如图 3 和图 4 所示:新鲜羊肉的肌纤维组织分布均匀且密集,肌纤维之间空隙很小。肌肉在冻结过程中组织内水分结晶,体积膨胀,冰晶的生长过程导致肌肉组织受到破坏。

由图 3 可见, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 无电场条件下冷冻羊肉形成的冰晶粒径大,在组织内分布混乱,肌纤维被冰晶挤压出现明显断裂,机械损伤严重,视野可见冰晶面积大。经辅助等离子电场处理后,1 kV/m 等离

子电场与对照组区别较小; 3 kV/m 等离子电场环境下冻结的肉样肌纤维排列开始变得有序,受冰晶挤压变形现象得到改善,冰晶粒径明显变小,视野可见冰晶面积明显缩小; 5 kV/m 等离子电场环境下冻结的效果更好,并达到传统速冻条件下肉样的冻结效果,甚至比传统速冻效果更好。这是由于等离子电场辅助冻结可使肉样冻结速率加快,形成的冰晶有序粒径小、分布均匀,对肌纤维细胞造成的挤压损伤轻微。

如图 4 所示,在 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结条件下,肉样中的冰晶粒径基本比较小,对细胞组织构成压迫损伤也小,肌细胞相对完整,总体优于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻,并且

肉样中冰晶的状态随电场强度的增加变得越来越好。

综合分析图3与图4结果可知,-35℃(快速冷冻)与-20℃(常规冷冻)相比,肉样冻结速率更快,形成的冰晶更小,从而使肌纤维受到的破坏更小。辅助等离子电场冷冻后,-20℃辅助5 kV/m等离子电场冷冻其冰晶形成状态及冷冻后肌肉细胞排列状态完全可以达到快速冷冻效果(-35℃),说

明辅助等离子电场后可以提高冷冻效率,在常规冷冻温度下达到深冷冻效果。Jin等^[25]研究发现,施加静电场冻结的生理盐水冻结速率更快,形成的冰晶粒径小且分布均匀。Xanthakis等^[26]研究发现12 kV高压静电场下冻结的猪肉肌纤维微观结构更接近于鲜肉肉样,可以抑制猪肉冻结时冰晶的成长,与本研究结果类似。本研究仅用5 kV/m电压,更加节能。

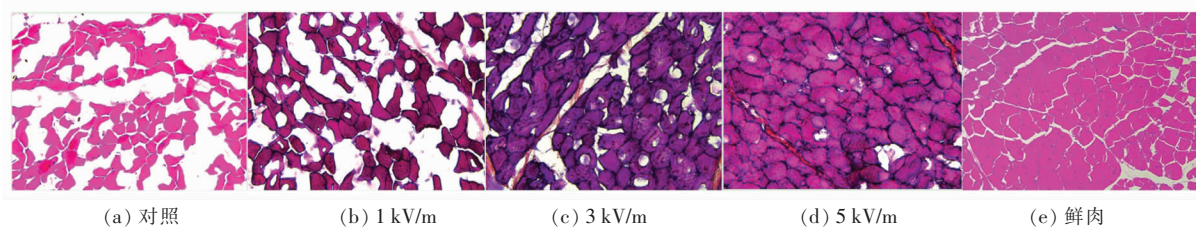


图3 -20℃冷冻羊肉肌肉纤维和冰晶显微图

Fig.3 Micrograph of muscle fiber and ice crystal of -20℃ frozen mutton

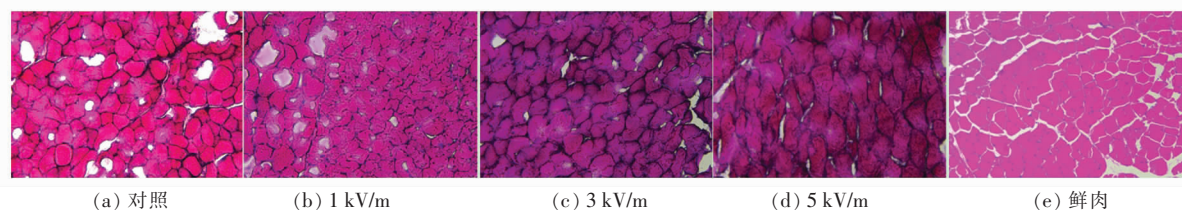


图4 -35℃冷冻羊肉肌肉纤维和冰晶显微图

Fig.4 Micrograph of muscle fiber and ice crystal of -35℃ frozen mutton

2.3 等离子电场辅助对羊肉冷冻后冰晶结构的影响

采用LAS V4.4和Image J图像分析软件和

相应计算公式对冰晶粒径(相当直径)、圆度、面积进行测定,结果见表1,表2及图5。

表1 -20℃冷冻方式处理肉样的冰晶分析

Table 1 Ice crystal analysis of meat samples treated by freezing at -20℃

贮藏方式	面积/ μm^2	相当直径/ μm	圆度
-20℃冷冻(冰晶)			
无电场	$2\,486.09 \pm 589.80^a$	56.01 ± 6.53^a	0.63 ± 0.07^b
1 kV/m 等离子电场	$2\,335.69 \pm 49.42^a$	54.53 ± 0.58^a	0.79 ± 0.01^a
3 kV/m 等离子电场	$1\,059.75 \pm 164.59^b$	36.66 ± 2.83^b	0.87 ± 0.06^a
5 kV/m 等离子电场	572.57 ± 103.24^b	26.93 ± 2.46^c	0.88 ± 0.05^a

注:表中数据为 $\bar{x} \pm s$,同一列中a、b、c等字母表示不同处理间存在显著差异($P < 0.05$)。

由表1可得,在温度-20℃下辅助不同等离子电场冻结后羊肉中冰晶面积、冰晶粒径(相当直径)、冰晶圆度都有不同的变化。随着辅助电场强度的增加,冰晶面积和冰晶粒径明显减少,其中辅助5 kV/m电压的冰晶面积、冰晶粒径(相当直径)

均为最小,与未辅助电场的对照组均有显著差异($P < 0.05$)。冰晶圆度越接近1形成的冰晶越圆,对周边肌纤维细胞的挤压破坏越小。本试验结果中冰晶圆度值在0.63~0.88之间,其中辅助5 kV/m电压的冰晶圆度值最大,与对照组相比有显著差

异($P<0.05$)。试验结果表明,辅助等离子电场冷冻后形成的冰晶面积小,冰晶粒径(相当直径)小,圆

度值大,对周边羊肉肌纤维细胞造成的机械损伤小,且辅助等离子电场场强越大效果越显著。

表 2 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻处理肉样的冰晶分析

Table 2 Ice crystal analysis of meat samples treated by freezing at $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$

贮藏方式	面积/ μm^2	相当直径/ μm	圆度
$-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻(冰晶)			
无电场	720.93 ± 105.03^a	30.24 ± 2.18^a	0.78 ± 0.14
1 kV/m 等离子电场	648.64 ± 38.89^a	28.73 ± 0.87^a	0.82 ± 0.04
3 kV/m 等离子电场	193.77 ± 64.14^b	15.57 ± 2.51^b	0.80 ± 0.07
5 kV/m 等离子电场	56.92 ± 9.53^c	8.49 ± 0.72^c	0.85 ± 0.004

注:表中数据为 $\bar{x} \pm s$,同一列中 a、b、c 等字母表示不同处理间存在显著差异($P<0.05$)。

由表 2 可得,在 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 辅助不同等离子电场冻结后羊肉中冰晶面积、冰晶粒径、冰晶圆度的变化规律与趋势与表 1 中 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下辅助不同等离子电场冻结结果基本相似,而不同的是 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 各组的数据更优。冰晶面积和冰晶粒径小,冰晶圆度值均在 0.80 以上,3 个辅助电场试验组间没有显著差异($P>0.05$)。 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 辅助 5 kV/m 电压组的冰晶面积、冰晶粒径(相当直径)和冰晶圆度值均优于 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 对照组和 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 辅助 1 kV/m 电压组,特别是 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 辅助 5 kV/m 电压组冰晶圆度值是所有试验组中最大的。

图 5 所示,在相同的冷冻温度下,随着辅助等离子电场强度的增加,冰晶面积比例均有明显下降趋势。辅助 5 kV/m 等离子电场 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结的冰晶面积比例仅为 3.79%,显著低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 无电场冷冻的冰晶面积比例 49.89%($P<0.05$),并且低于 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 速冻的冰晶面积比例 5.97%。因此,辅助 5 kV/m 等离子电场 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻羊肉的方式可以代替 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 速冻方式。

综合以上试验结果,辅助等离子电场冷冻可有效改善冷冻速率,冰晶形成状态,冰晶粒径(相当直径)、冰晶圆度,减少冷冻过程中肌纤维细胞损伤,保持肌纤维组织的完整性。结合本次试验与实际应用,从节约能源等综合考量,确认 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 辅助 5 kV/m 电压冷冻羊肉条件是最理想的冷冻条件。

2.4 热力学角度分析等离子电场辅助对羊肉冷冻效果的影响

肉是一种胶体体系,在冷冻过程中会发生部分玻璃化转变,经等离子电场处理,可以加速肉中

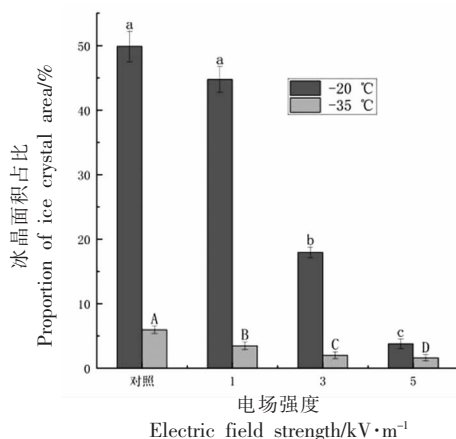


图 5 不同冷冻处理条件下冰晶面积占比

Fig.5 Proportion of ice crystal area under different freezing treatment conditions

冰晶冻结,以形成数量更少,体积更小的冰晶,减少对肉的伤害,增加肉的玻璃化程度。与此同时,体系的稳定性增加^[27],熵随之减少。 $S=k\ln\Omega$ 是统计学中心概念,系统某一宏观态对应的微观态数愈多,即它的混乱度愈大,则该状态的熵也愈大^[28]。肉样的玻璃化程度会影响肌纤维的完整度,玻璃化程度越高,肌原纤维越完整,解冻后肉汁中肌红蛋白含量越少,肌红蛋白在紫外-可见区域具有特征吸收,在 410 nm 波长附近的强吸收峰称为 Soret 带(B 带),在空气中转化为氧合肌红蛋白时 Soret 会发生蓝移,在 415 nm 左右^[29-30],因此,可使用样品解冻后肉汁在 415 nm 处的吸光值来表示系统的微观状态数 Ω ,并以此计算不同样品的熵。

由表 3 可知,在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻条件下,随着电场强度的增大,所对应的吸光值减小,且具有显著性差异($P<0.05$),表明在冻结过程中施加电场可显著降低熵值。

表3 -20℃冷冻处理肉样和鲜肉在415 nm处的吸光值
Table 3 Absorbance at 415 nm of meat sample frozen at -20℃

贮藏方式	新鲜肉样	吸光值
-20℃冷冻	新鲜肉样	0.574 ± 0.044 ^d
	无电场	0.961 ± 0.012 ^a
	1 kV/m 等离子电场	0.871 ± 0.014 ^{ab}
	3 kV/m 等离子电场	0.844 ± 0.102 ^{ab}
	5 kV/m 等离子电场	0.738 ± 0.019 ^c

注:表中数据为 $\bar{x} \pm s$,同一列中a、b、c等字母表示不同处理间存在显著差异($P < 0.05$)。

由表4可知,在-35℃冷冻条件下,随着电场强度的增大,所对应的吸光值减小,且具有显著性差异($P < 0.05$)。在5 kV/m 等离子电场下处理肉样的吸光值与鲜肉最为接近。

综上所述,在-35℃辅助5 kV/m 电压下冷冻效果最好,解冻后与鲜肉最为接近。-20℃辅助5 kV/m 电压冷冻优于-35℃无电场冷冻。考虑到实际生产中常规速冻即可达到日常使用要求,以及从节约能源的角度考量,选用-20℃下5 kV/m 冻结最为适合。

3 结论

1) 辅助不同场强等离子电场时肉样冻结速率均优于对照组(无辅助电场),在-20℃和-35℃冷冻条件下,均是辅助5 kV/m 等离子电场组最大冰晶生长期时间最短,与对照组(相同温度无电场)相比均有差异显著($P < 0.05$)。

2) 组织切片显示辅助不同场强(1,3,5 kV/m) 等离子电场冻结肉样冰晶的形态也优于对照组。-35℃辅助5 kV/m 冻结冰晶面积和平均粒径最小,肌纤维细胞断裂破坏程度更小;-20℃辅助5 kV/m 冻结肉样的冰晶圆度最大。上述两个试验组和对照组(相同温度无电场)相比均有显著性差异($P < 0.05$)。

3) 运用玻尔兹曼公式间接分析肉样的熵值,在-20℃和-35℃冷冻条件下,辅助5 kV/m 等离子电场冻结时的熵值最小,与对照组相比均具有显著性差异($P < 0.05$)。

4) 综合试验结果和日常生产,以及从节约能源的考量,-20℃辅助5 kV/m 等离子电电场冷冻

表4 -35℃冷冻处理肉样和鲜肉在415 nm处的吸光值
Table 4 Absorbance at 415 nm of meat sample frozen at -35℃

贮藏方式	新鲜肉样	吸光值
-35℃冷冻	新鲜肉样	0.574 ± 0.044 ^d
	无电场	0.775 ± 0.025 ^a
	1 kV/m 等离子电场	0.721 ± 0.036 ^{ab}
	3 kV/m 等离子电场	0.672 ± 0.061 ^{bc}
	5 kV/m 等离子电场	0.615 ± 0.020 ^{cd}

注:表中数据为 $\bar{x} \pm s$,同一列中a、b、c等字母表示不同处理间存在显著差异($P < 0.05$)。

可作为一种新型冷冻方式应用于生产。

参 考 文 献

- [1] 吴宇桐, 崔梦晗, 王宇琦, 等. 超声辅助冷冻技术的作用机制及其对食品品质影响的研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(17): 275-280.
WU Y T, CUI M H, WANG Y Q, et al. Mechanism of ultrasonic-assisted freezing technique and its effect on the quality of frozen foods: A review[J]. Food Science, 2018, 39(17): 275-280.
- [2] ANWAR M, SCHILLING T. Crystallization of polyethylene: A molecular dynamics simulation study of the nucleation and growth mechanisms[J]. Polymer, 2015, 76: 307-312.
- [3] LEMANOWICZ M, MIELAŃCZYK A, WALICA T, et al. Application of polymers as a tool in crystallization - A review[J]. Polymers (Basel), 2021, 13(16): 2695.
- [4] JUNIUS N, VAHDATAHAR E, OKSANEN E, et al. Optimization of crystallization of biological macromolecules using dialysis combined with temperature control[J]. Journal of Applied Crystallography, 2020, 53(3): 686-698.
- [5] NORTON T, DELGADO A, HOGAN E, et al. Simulation of high pressure freezing processes by enthalpy method[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(2): 260-268.
- [6] SURÍS-VALLS R, VOETS I K. Peptidic antifreeze materials: Prospects and challenges[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(20): 5149.
- [7] AROEIRA C N, FILHO R, FONTES P R, et al.

- Freezing, thawing and aging effects on beef tenderness from *Bos indicus* and *Bos taurus* cattle[J]. *Meat Science*, 2016, 116: 118–125.
- [8] SANZ P D, DE ELVIRA C, MARTINO M, et al. Freezing rate simulation as an aid to reducing crystallization damage in foods[J]. *Meat Science*, 1999, 52: 275–278.
- [9] JO Y J, JANG M Y, JUNG Y K, et al. Effect of novel quick freezing techniques combined with different thawing processes on beef quality[J]. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 2014, 34(6): 777–783.
- [10] FADIJI T, ASHTIANI S M, ONWUDE D I, et al. Finite element method for freezing and thawing in industrial food processes[J]. *Foods*, 2021, 10(4): 869.
- [11] SCHOLTZ V, PAZLAROVA J, SOUSKOVA H, et al. Nonthermal plasma – A tool for decontamination and disinfection[J]. *Biotechnology Advances*, 2015, 33(6): 1108–1119.
- [12] BERMÚDEZ-AGUIRRE D, WEMLINGER E, PEDROW P, et al. Effect of atmospheric pressure cold plasma (APCP) on the inactivation of *Escherichia coli* in fresh produce [J]. *Food Control*, 2013, 34: 149–157.
- [13] OBROVÁ K, VAŇKOVÁ E, SLÁMA M, et al. Decontamination of high-efficiency mask filters from respiratory pathogens including SARS-CoV-2 by non-thermal plasma [J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2022, 10: 1–13.
- [14] DE GEYTER N, MORENT R. Nonthermal plasma sterilization of living and nonliving surfaces[J]. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 2012, 14: 255–274.
- [15] BEKESCHUS S, KRAMER A, SUFFREDINI E, et al. Gas plasma technology – an asset to healthcare during viral pandemics such as the COVID-19 crisis [J]. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*, 2020, 4(4): 391–399.
- [16] ORLOWSKA M, HAVET M, LE-BAIL A. Controlled ice nucleation under high voltage DC electrostatic field conditions[J]. *Food Research International*, 2009, 42(7): 879–884.
- [17] CHENG X F, ZHANG M, XU B G, et al. The principles of ultrasound and its application in freezing related processes of food materials: A review[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2015, 27: 576–585.
- [18] JUNG D H, YANG J H, JHON M S. The effect of an external electric field on the structure of liquid water using molecular dynamics simulations[J]. *Chemical Physics*, 1999, 244: 331–337.
- [19] SUN W, CHEN Z, HUANG S Y. Effect of an external electric field on liquid water using molecular dynamics simulation with a flexible potential [J]. *Journal of Shanghai University*, 2006, 10: 268–273.
- [20] 王守经, 王维婷, 胡鹏, 等. 羊肉冰温贮藏技术研究进展及发展趋势[J]. *农产品加工*, 2016(20): 63–66.
- WANG S J, WANG W T, HU P, et al. Research advancement and development trend of mutton ice-temperature storage technology [J]. *Farm Products Processing*, 2016(20): 63–66.
- [21] 张进, 王卫, 郭秀兰, 等. 羊肉制品加工技术研究进展[J]. *肉类研究*, 2011, 25(11): 50–54.
- ZHANG J, WANG W, GUO X L, et al. Recent research progress on mutton product processing technologies[J]. *Meat Research*, 2011, 25(11): 50–54.
- [22] BOURKE P, ZIUZINA D, BOEHM D, et al. The potential of cold plasma for safe and sustainable food production[J]. *Trends Biotechnol*, 2018, 36(6): 615–626.
- [23] FADIJI T, ASHTIANI S M, ONWUDE D I, et al. Disinfection and sterilization using plasma technology: Fundamentals and future perspectives for biological applications[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, 20(20): 5216.
- [24] 刘晓兰, 刘燕, 宋月晗, 等. 冰冻切片制作体会及常见问题[J]. *现代生物医学进展*, 2010, 10(14): 2737–2738, 2741.
- LIU X L, LIU Y, SONG Y H, et al. Influencing factors and innovative approaches in process of making frozen section[J]. *Progress in Modern Biomedicine*, 2010, 10(14): 2737–2738, 2741.
- [25] JIN H M, CHOI W, PARK S H, et al. Emerging pulsed electric field (PEF) and static magnetic field (SMF) combination technology for food freezing [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 50: 137–145.
- [26] XANTHAKIS E, HAVET M, CHEVALLIER S, et al. Effect of static electric field on ice crystal size reduction during freezing of pork meat[J]. *Innovative*

- Food Science & Emerging Technologies, 2013, 20 (4): 115–120.
- [27] LEVIVINE H, SLADE L. A food polymer science approach to the practice of cryostabilization technology[J]. *Commence on Agricultural and food Chemistry*, 1989, 1(6): 315–396.
- [28] 朱晓东. 热学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2014.
- ZHU X D. Thermodynamics[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2014.
- [29] 林森森, 廖明涛, 刘书臣, 等. 鲭鱼 4 °C 贮藏期间色素物质及脂质氧化的变化[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(7): 87–94.
- LIN S S, LIAO M T, LIU S C, et al. Changes of pigments and lipid oxidation of skipjack tuna during 4 °C storage[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2014, 14(7): 87–94.
- [30] CHAIJAN M, BENJAKUL S. Changes of pigments and color in sardine (*Sardinella gibbosa*) and mackerel (*Rastrelliger kanagurta*) muscle during iced storage[J]. *Food Chemistry*, 2005, 93(4): 607–617.

Ice Crystal Changes and Thermodynamic Analysis during Plasma Electric Field Assisted Freezing of Mutton

Qiao Dandan¹, Li Siqu¹, Ge Riletu¹, Man Duhu², Wu Jindi¹, Sha Rina^{*}

¹College of Food Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018

²Huhhot Lobi Electronic Technology Co. Ltd., Huhhot 010010)

Abstract In order to explore the effect of plasma electric field assisted freezing on the quality and freezing process of mutton, the longissimus dorsi muscles of sheep was selected as the experimental material, the effect of the auxiliary plasma electric field of different field strength (1, 3 kV/m and 5 kV/m) on the freezing velocity of mutton and the distribution of ice crystal and the diameter and roundness of ice crystal in the frozen meat were studied, and the thermodynamic theory was used to analyze it. The results showed that the meat samples in the auxiliary 5 kV/m plasma field environment had the shortest time to pass the maximum ice crystal generation zone at -20 °C and -35 °C, 70 min and 40 min, respectively, with significant differences compared with the control group ($P < 0.05$); the tissue sections showed the smallest ice crystal area and grain size formed at -35 °C assisted 5 kV/m plasma field freezing, and -20 °C assisted the roundness of ice crystals was the highest in 5 kV/m plasma field freezing, with a mean value of 0.88, and the above indexes were significantly different from the control group ($P < 0.05$). The entropy of the system was analyzed using Boltzmann's formula, and the results showed that the entropy of the meat samples frozen by the assisted 5 kV/m plasma electric field was the smallest at -20 °C and -35 °C, with significant differences compared with the control group ($P < 0.05$). It proved that the auxiliary 5 kV/m plasma electric field could significantly improve the system frozen meat moisture vitrification degree, could make the crystallization process more controllable, the electric field assisted freezing required less energy to improve the subcooling degree, accelerate the freezing rate of meat samples, and the larger the field strength the more significant the effect. Based on the experimental results and energy-saving requirements, it was considered that -20 °C assisted 5 kV/m voltage freezing can be used as a new freezing method in production.

Keywords plasma electric field; mutton; ice crystal area; ice grain size; thermodynamics