

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.03.002

新型高压静电解冻柜设计

唐树培, 李保国, 高志新

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘 要:针对肉食品专营店和餐饮店对冷冻肉的解冻需求,设计研制了一台新型高压静电解冻柜。该解冻柜采用了高压静电解冻技术。设计了基于可编程逻辑控制器(PLC)的控制系统,可自动调控解冻柜温湿度和电场强度。根据设计性能参数,计算了解冻过程所需加热、制冷负荷和加湿蒸汽量。经解冻实验表明,该解冻柜能缩短解冻时间,降低汁液流失率,抑制微生物的繁殖,且解冻后肉样外观新鲜,肉色泽鲜红,具有实际应用价值。

关 键 词:解冻柜;解冻技术;高压静电场;电场强度;可编程逻辑控制器

中图分类号:TS251.3

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2016)03-0005-04

Design of New Type High Voltage Electrostatic Thawing Machine

TANG Shupe, LI Baoguo, GAO Zhixin

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the requirements of meat shops and restaurants to thaw frozen meat, a new high voltage electrostatic thawing machine was designed. The thawing machine adopted high voltage electrostatic thawing technology. Control system based on programmable logic controller (PLC) was designed, which could control the temperature humidity and electric field intensity automatically. According to the performance parameters of design, the thawing process need for heat load, cool load and wet steam were calculated. Thaw experiment showed that the thawing machine could decrease thawing time and juices loss, inhibit the growth of bacteria. The appearance of meat was fresh, color and luster was bright red, it did have practical application value.

Key words: thawing machine; thawing technology; high voltage electrostatic field; electric field intensity; Programmable Logic Controller (PLC)

目前,我国冷链物流体系还不完善,生鲜肉冷链配送仍然存在断链问题,冷冻肉成为肉食品流通的主体^[1]。冷冻肉在肉食品终端销售和进行二次深加工前要进行解冻,不合理的解冻方式易影响解冻肉类品质,解冻过程中易产生色泽褪变、脂肪氧化、脱水及蛋白降解等问题^[2]。目前,肉食品专营店冻肉多采用在室温库房自然解冻或水解冻,这些解冻方法操作成本低,但解冻速度慢、汁液流失率高、易产生微生物繁殖污染^[3],存在食品安全隐患等急待解决的难题。

从20世纪90年代开始,国内外学者通过试验研究,证明高压静电场解冻效率高,肉食品实现同步均匀

解冻,营养损失率低,能有效改善冷冻肉的色泽,且对细菌具有抑制作用,能提高肉食品质量,是一种新型解冻技术^[4-7]。

本文设计了新型高压静电解冻柜,对加热、制冷负荷及加湿蒸汽量等参数进行了计算,并运用解冻柜进行了解冻实验,以期解决肉食品专营店等现有解冻方法存在的问题,改善冷冻肉解冻效率和品质。

1 解冻柜总体设计

1.1 设备构成

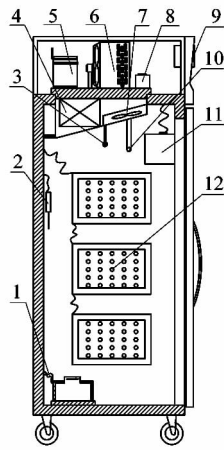
所设计的高压静电解冻柜的尺寸为1 220 mm × 760 mm × 2 050 mm(长×宽×高),主要由解冻柜体、

收稿日期:2015-11-30;修回日期:2016-01-10

基金项目:上海市教委科研创新项目(14ZZ133);上海市教委产学研助推计划(ZB1307LG);上海市联盟计划资助(LM2014191)。

作者简介:唐树培(1990),男,湖南邵东人,硕士研究生,主要研究方向为制冷与低温工程、食品冷冻冷藏、食品干燥技术。通信作者:李保国(1961),男,河南济源人,教授,博士生导师,主要研究方向为食品和农产品加工新技术。E-mail:lbaoguo@126.com

制冷模块、加热加湿模块、高压静电发生模块及控制系统等构成,结构示意图如图 1 所示,实物如图 2 所示。



1—空气加热器;2—物料温度传感器;3—温湿度传感器;4—出风口;
5—压缩机;6—风冷冷凝器;7—风机;8—高压静电发生器;9—控制
器;10—吊杆;11—加湿器;12—高压静电极板。

图 1 高压静电解冻柜结构示意图

Figure 1 Schematic of high voltage
electrostatic thawing machine



图 2 高压静电解冻柜

Figure 2 High voltage electrostatic thawing machine

1.2 整体设计方案

考虑到肉食品专营店的工艺解冻要求和低温保鲜,设计解冻柜温度: $-5 \sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$;相对湿度: $55\% \sim 95\%$;高压静电电压: $0 \sim 30\text{ kV}$;解冻时间: $1 \sim 12\text{ h}$;解冻能力: $0 \sim 100\text{ kg}$ 。

解冻柜内设计了不锈钢承重吊杆,可承受 100 kg 的大块冻肉吊挂。对于小块状冻肉原料,柜内设计了可拆卸的不锈钢搁架。选用 SHT20 系列温湿度感应器,测温湿度: $-20 \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;相对湿度 $0\% \sim 100\%$,精度 $\pm 2\%$ 。检测到的温湿度信号传至

PLC 控制器,用于实时监控柜内温湿度。另外配备了 2 个 MFS8 型温度传感器,测量温度: $-20 \sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,用于检测冻肉的表面和中心温度。

1.3 主要部件设计

1.3.1 解冻柜体

考虑冻肉解冻卫生条件和保温,解冻柜体内外采用不锈钢板,中间隔热层选择厚度 75 mm 的聚氨酯发泡料。在高压静电极板下面采用 15 mm 双层聚乙烯 (PE) 板进行绝缘。为方便观察解冻过程,柜门采用双层密封的玻璃门。

1.3.2 加热加湿模块

冻肉解冻时会使解冻柜内温湿度下降,为满足设计的温湿度要求,选用 MZ45-96A1-200 型空气加热器,功率为 200 W ,用于调节解冻柜内温度。设计加湿器 2 个,单个蒸气量为 $0.05\text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$,以调节柜内湿度。

以解冻牛肉为设计计算依据,牛肉进柜平均温度为 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$,解冻出柜平均温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,每批次解冻量为 100 kg ,解冻时间为 12 h 。 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 牛肉热焓值 h_1 为 $4.61\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 牛肉热焓值 h_2 为 $211.85\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ [8]。考虑牛肉均解冻完成,则冷冻牛肉解冻所需的热负荷

$$q_{\text{hot}} = m \cdot (h_2 - h_1) / t_1 = 0.48\text{ kW}。$$

式中: m 为冷冻牛肉质量/ kg ; t_1 为解冻时间/ s 。

解冻柜热负荷由 3 部分组成:围护结构的负荷、电加热空气的热负荷和加热蒸气的放热。围护结构的负荷

$$q_{\text{wall}} = KF\Delta t = 0.11\text{ kW}。$$

式中: K 为传热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$; F 为围护结构的面积/ m^2 ,取 9.9 m^2 ; Δt 为传热温差/ $^{\circ}\text{C}$;高温库中 $K\Delta t$ 为 $11\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ [9] 247。

空气升温温差设为 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$,且加热 5 min 内完成,则电加热空气负荷

$$q_{\text{air}} = V\rho c_p \Delta t_{\text{air}} / t_2 = 0.07\text{ kW}。$$

式中: V 为柜内空气总体积/ m^3 ,取 1.9 m^3 ; ρ 为空气密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$,取 $1.29\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; c_p 为空气比热容/ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$,取 $1.01\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$; Δt_{air} 为温差/ $^{\circ}\text{C}$; t_2 为加热所需时间/ s 。

加热蒸气放热量

$$q_v = q_{\text{hot}} - q_{\text{wall}} - q_{\text{air}} = 0.3\text{ kW}。$$

根据所设计的温度范围,解冻柜内平均温度为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,考虑温差 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$,则蒸发温度为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,通过查阅空

气焓湿图^[10],可得含湿量变化

$$\Delta d = d_1 - d_2 = 3.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}。$$

式中: d_1 为 10 ℃ 空气的饱和湿度,取 $9.59 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; d_2 为 2 ℃ 空气的饱和湿度,取 $6.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

加湿蒸气量

$$m_1 = W \Delta d = 0.06 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}。$$

假定供热介质为饱和蒸气,回水为饱和水,则蒸气蒸发比焓为 $2\,200 \text{ kJ}^{[9]247}$,所需加热蒸气量

$$m_2 = q_v / 2\,200 = 0.14 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}。$$

总蒸气量

$$M = m_1 + m_2 = 0.2 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}。$$

根据计算结果可知,解冻柜选用的空气加热器和加湿器满足解冻过程所需负荷和蒸气量。

1.3.3 制冷模块

为了在解冻柜运行升温时,保证柜内温度满足设置范围,并在解冻结束后,实现对冻肉低温保鲜。选用涡旋压缩机 SC12CL,制冷量 $365 \sim 1\,620 \text{ W}$ 。考虑加快空气换热速率,采用 SCL100D 型离心式冷风机 4 台,单台风量 $40 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。经蒸发器冷却后的空气由风机送至柜内,到达吊挂于柜内的冷冻肉,与解冻柜内空气进行热交换,实现解冻柜内降温,又经风道口流至风道,进而形成一个冷空气循环。

解冻柜冷负荷主要是围护结构的负荷、空气温度降低的负荷及除湿消耗的负荷。空气降温负荷是电加热空气热负荷的逆过程,且由于加湿的蒸气量少,故除湿负荷可忽略不计。则制冷负荷

$$q_{\text{cool}} = q_{\text{wall}} + q_{\text{air}} = 0.18 \text{ kW}。$$

根据所设计的温度范围,循环风的平均温度为 10 ℃,所需风量

$$W = q_{\text{cool}} / (c_p \times 10) = 0.02 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}。$$

每小时风量

$$w = W \times 3\,600 / \rho = 55.81 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}。$$

根据计算结果可知,解冻柜选用的涡旋压缩机和离心式风机满足解冻过程所需负荷和风量。

1.3.4 高压静电发生模块

高压静电场解冻设计选用 ME-50P 型高压变频静电电源,输入电压 220 V,50 Hz,输出电压 0 ~ 50 kV,调节精度为 1.0%。

在解冻柜内两侧平行放置 3 对高压静电金属极板。金属极板通过导线与高压静电电源连接,解冻时,由 PLC 控制器调控高压静电电源输出设定的电压,使金属极板获得静电。解冻柜内的空气经静电极板电离,使空气分子离解成电子和离子,产生大量的带电粒

子,从而在静电极板间形成高压静电场。做加速运动的带电粒子与冷冻肉样表面接触时,冻肉表面的水分子就会吸收带电粒子拥有的热量,提高水分子的热能和导热速率,使其解冻速率加快^[11]。由于静电极板间距是固定的,故电场强度可通过调节电源输出电压实现,即

$$E = U/D。$$

式中: E 为电场强度/($\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$); U 为输出电压/kV; D 为静电极板间距/m。

1.3.5 控制系统

控制系统是解冻柜是否能安全可靠生产的关键,负责对柜内温湿度、冷冻肉实时温度等参数进行监测,并对制冷模块、高压静电发生模块及加热加湿模块等进行调控。控制系统由触摸屏 MC07A 和可编程逻辑控制器 S7-200 系列组成,图 3 为控制器操作屏主界面。通过触摸屏人机操作界面,可设置解冻工序参数,并在设备运行过程中显示监控信息^[12]。



图 3 控制器操作屏主界面

Figure 3 Main interface of controller operating screen

通过触摸屏设置解冻柜内温湿度范围、解冻时间及高压静电电压等参数。解冻开始后,由于冷冻肉吸收热量,使柜内温湿度下降。当温湿度感应器检测到柜内温湿度低于设定的下限值时,由 PLC 控制器启动加热加湿模块,分别通过空气加热器和加湿器,提升解冻柜内温湿度,达到设定的上限值后,停止加热加湿。随着解冻的进行,解冻柜内温度会逐渐升高,当温湿度感应器检测到柜内温度高于设定的上限值时,通过 PLC 控制器启动制冷模块,实现柜内降温,达到设定的温度要求后,制冷模块停机。控制系统工作流程如图 4 所示。

2 解冻实验

2.1 性能测试

对解冻柜进行了性能测试,开机启动后,检测解冻柜体绝缘符合 GB 4706.1—2008 要求。在试运行过程中,设置了 5 个阶段的解冻程序,如图 5 所示。在解冻

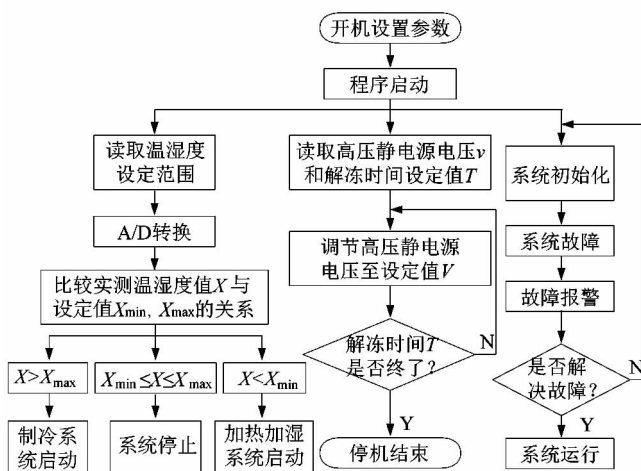


图4 工作流程图

Figure 4 Flow chart of working

时间内,各设备系统均按设定的解冻程序正常运行,符合解冻柜设计要求。



图5 程序设置界面

Figure 5 Interface of application setting

2.2 解冻羊胴体实验

选用某食品公司进口羊胴体, -18°C 储存,单个羊胴体平均重量 18 kg,解冻实验如图 6 所示。实验分为 6 组,各组设置的解冻温度: $4 \sim 8^{\circ}\text{C}$,相对湿度: $70\% \sim 80\%$,电场场强: $0 \sim 12.5 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$,间隔 $2.5 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 选取。每隔 5 min 记录羊胴体温度变化,解冻完成后对羊胴体取样测定汁液流失率、色差及微生物菌落总数指标。

实验结果表明,当高压静电场强度为 $12.5 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$,与未加电场对照组相比,解冻时间缩短 11.1%,汁液流失率降低 49.6%,微生物菌落总数减少了一个数量级,且解冻后羊胴体外观新鲜,肉色泽鲜红。

3 结语

本文设计的新型高压静电解冻柜,以高压静电解冻技术为核心,通过 PLC 控制系统调控制冷、加热加



图6 解冻冷冻羊胴体实验

Figure 6 Experiment on thawing frozen lamb

湿、高压静电等各模块联合工作,满足了解冻工艺设计要求。解冻羊胴体试验结果表明,高压静电场解冻与未加电场解冻相比,当电场强度增加到一定值后,解冻时间缩短、汁液流失率降低、微生物菌落总数减少,并能显著提高解冻羊肉的色泽。因此,高压静电解冻柜为肉食品专营店等提供一种方便、快捷、卫生的新方式,在实际解冻工程方面具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] 汤晓艳,钱永忠.我国肉类冷链物流状况及发展对策[J].食品科学,2008,29(10):656-660.
- [2] XIA Xiufang, KONG Baohua, LIU Jing, et al. Influence of different thawing methods on physicochemical changes and protein oxidation of porcine longissimus muscle[J]. Food science and technology, 2012, 46(1):280-286.
- [3] 张珂,关志强,李敏,等.解冻方法对冻肉类食品品质影响的研究进展[J].肉类研究,2014,1(8):24-29.
- [4] 谢晶,华泽钊.速冻马铃薯在高压直流电场中解冻的实验研究[J].制冷学报,2001(2):1-6.
- [5] 谢晶,张源,华泽钊,等.猪肉在高压静电场中的冻结和解冻[J].制冷技术,2001,31(4):25-28.
- [6] 郭衍银,朱艳红,赵向东,等.高压静电对速冻冬枣解冻品质的影响[J].制冷学报,2009,30(2):45-48.
- [7] 孙芳,李培龙,孟繁博,等.高压静电解冻技术对牛肉品质的影响研究[J].中国牛业科学,2011,37(6):13-17.
- [8] 李银,李侠,贾伟,等.低温高湿变温解冻库的研制与应用[J].农业工程学报,2014,30(2):244-251.
- [9] 关志强,蒋小强.食品热焓和比热容的经验计算公式[J].食品工业,2006,27(3):55-58.
- [10] 李云飞,葛克山.食品工程原理[M].北京:中国农业大学出版社,2009:257.
- [11] 白亚乡,栾忠奇,李新军,等.高压静电场解冻机理分析[J].农业工程学报,2010,26(4):347-350.
- [12] 陈会莲,谷明月,郑艳博,等.基于PLC的温湿度自动控制系统的的设计[J].中国农机化学报,2015,36(2):246-248.