

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.04.014

# 熟食品真空冷却机的改进设计

刘山山<sup>1</sup>, 李保国<sup>1</sup>, 顾小杰<sup>2</sup>

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海伊茨郎机械设备有限公司, 上海 201201)

**摘 要:**为了解决熟食品真空预冷过程中,封闭式捕水器不易清洗,自来水补水不均匀,空气回压导致二次污染等问题,设计了一种集冷却、补水、杀菌、回压一体化的全自动新型真空预冷机。采用罗茨-水环真空机组解决了封闭式捕水器的弊端;采用小分子水替代自来水,改善补水的均匀性问题;采用臭氧发生器设计臭氧回压模块,解决了空气污染问题。根据初始性能参数,对设备进行了理论计算和选型。改进设计的新型真空预冷机易于清洗、补水均匀,有效解决了常规真空预冷机在工业应用中存在的问题,具有实际应用价值。

**关 键 词:**真空预冷机;臭氧杀菌;小分子水;开式捕水器

中图分类号:TS203

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2017)04-0065-04

## Improved Design of Vacuum Cooling Machine for Cooked Food

LIU Shanshan<sup>1</sup>, LI Baoguo<sup>1</sup>, GU Xiaojie<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 20093, China;

2. Shanghai Izzlang Machinery Equipment Co., Ltd., Shanghai 201201, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of vacuum pre-cooling of cooked food that closed-type water trap is not easy to clean, the tap water replenishment is not uniform, the air back pressure causes secondary pollution and so on, a new set of cooling, replenishment, sterilization, back pressure integration automatic vacuum pre-cooling machine was designed. Roots-water ring vacuum pump unit was used to solve the shortcomings of closed-type water trap; Small molecules of water was used to improve the replenishment of non-uniform problems; ozone generator was adopted to design an ozone back pressure module to solve the air pollution problems. According to the initial performance parameters, the equipment was calculated and selected. This improved design solved the problems of conventional vacuum pre-cooling machine in industrial application effectively, and had practical application value.

**Keywords:** vacuum precooling machine; ozone sterilization; small molecules of water; open collector

近年来,在熟食品冷却领域,真空预冷技术以其快速降温、降温均匀、清洁环保的优势受到食品加工企业的欢迎。研究表明,温度是影响熟食品品质的重要因素之一,30~60℃是细菌的最佳繁殖区<sup>[1]</sup>,为了将加工好的高温熟食快速跃过这一区域,以熟肉为主食的国家对食品冷却时间均出台了严格规定。英国对高温肉制品的规定为:对于质量2.5 kg、厚度5 cm的大块熟肉,其芯部从74℃降到10℃所需时间应低于2.5 h。上海市政府要求熟食品的芯部温度从74℃到10℃的冷却时间小于2 h<sup>[2]</sup>。传统的风冷、水冷等冷却方式多采用热传导方式散发热量,降温缓慢,很难达到规定

要求;而真空预冷技术主要依靠热对流方式将食品内部水分蒸发吸热来降低温度,可在食品内外同时传递热量,传热效率高,降温速度快,很好地降低了物料在高温阶段产生的淀粉糊化、油脂氧化等反应;同时也有效地减少了物料冷却过程中在30~60℃范围所产生的细菌繁殖,有利于提高食品的保鲜期、货架期<sup>[3-4]</sup>。真空预冷技术能满足食品安全的需求,但现有真空预冷机在使用过程中还存在一些问题,为了保证密封性,通常将捕水器密封在真空室与真空泵之间,但在工业应用中,这种密封式捕水器随着长期工作,熟食品中油性物质在捕水器盘管上凝结,导致捕水器制冷效果变

收稿日期:2016-11-19;修回日期:2017-02-15

第一作者简介:刘山山(1990),男,河南周口人,硕士研究生,主要研究方向为食品冷冻冷藏、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

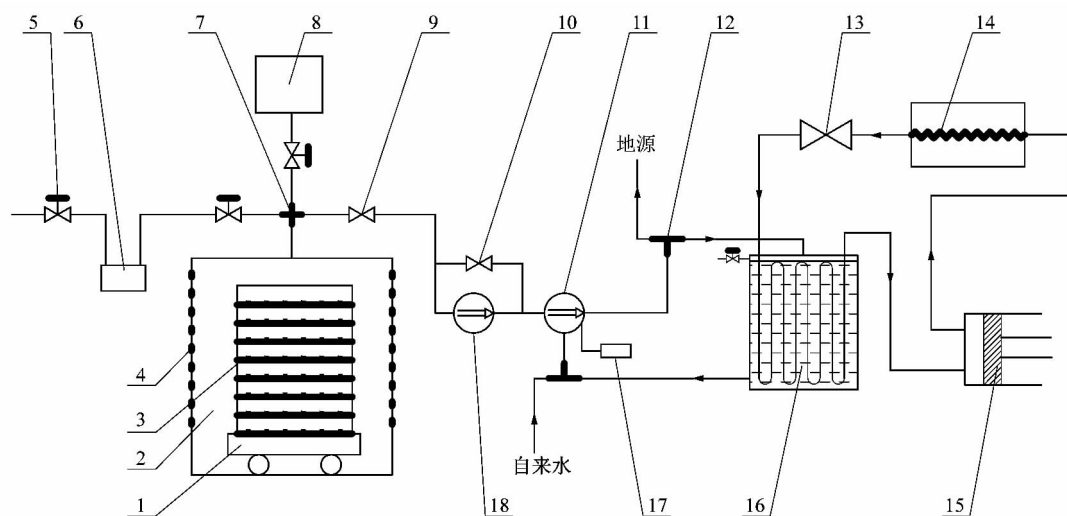
差,能耗增加,由于采用焊接密封,不易对内部盘管进行清洗。另外,产品冷却后,真空室回压方式多采用直接通空气或简单过滤,食品再次接触空气容易导致二次污染。为减少真空预冷中的产品失水,目前广泛的做法是在真空室顶部安装喷头喷洒自来水对食品补水,这种补水工艺存在不均匀性。

## 1 真空冷却机改进设计

针对真空预冷机使用过程中存在的问题,提出了一种改进型真空预冷系统,其主要包含真空系统、制冷

系统、臭氧回压系统、补水系统、控制系统,如图1所示。与传统真空预冷机相比,本系统具有以下优点:

- 1) 将密封式捕水器更改为可打开的冷水水箱,便于对水箱内盘管清洗;
- 2) 增加臭氧发生装置产生臭氧用于冷却后的回压杀菌,更加安全可靠;
- 3) 在工艺上用小分子水替代自来水对冷却后的食品补水,小分子水渗透性强,补水更加均匀。



1—推车;2—真空室;3—托盘;4—雾化喷头;5—电磁阀;6—臭氧发生装置;7—四通连接件;8—小分子水水箱;9—真空阀;10—旁通阀;11—水环泵;12—三通阀;13—节流阀;14—冷凝器;15—压缩机;16—开式捕水器;17—变频器;18—罗茨泵。

图1 新型真空预冷机系统示意图

Figure 1 Schematic of new vacuum cooling machine

### 1.1 真空系统

真空系统是真空预冷机的核心组成部分,用于降低真空室压力。本系统选用罗茨—水环泵真空机组对真空室抽真空,水环泵适宜于抽除大量水蒸气。但水环泵的极限压力为3 300 Pa左右,仅使用水环泵无法满足预冷终温要求,因此串联罗茨泵后可满足降压降温需求<sup>[5]</sup>。将水环泵作为前级泵对真空室预抽真空,前期先启动水环泵,此时,由于罗茨泵进气口、排气口气压差较大,开启旁通阀,真空室中的气体一部分经过旁通阀进入水环泵,另一部分通过罗茨泵转子自转也进入水环泵,显然抽气速率增加,可快速达到罗茨泵的预真空压力。当罗茨泵进排气压差较小,关闭旁通阀,开启罗茨泵,真空机组正式运行,这种方法能大大缩短预抽时间。采用变频器实时控制水环泵功率,可降低能耗。水环泵进水口连接开式捕水器水箱,其中冷却水作为水环泵补水水源,当水环泵抽真空时,会将真空

室内的高温蒸气与水环泵中的冷却水混合并进行热交换,蒸气随之冷凝,与气体一起通过排气口进入开式捕水器水箱。

### 1.2 制冷系统

制冷系统主要冷却开式捕水器中水温,水环泵抽取水箱中冷却水,用于冷凝来自真空室的高温水蒸气。所设计的开式捕水器由水箱和盘管构成,由于水的比热容大,用水做载冷剂换热速度快,高温水蒸气在水环泵将热量传递给冷却水并与其凝结混合,水环泵将混合水、空气一起排进捕水器水箱,水箱盘管内制冷剂对混合水循环冷却。本系统中开式捕水器水箱可打开,便于对内部盘管清洁,有利于提高预冻机预冷效率。

### 1.3 臭氧回压装置

在真空冷却系统中增设了臭氧发生器,将臭氧作为真空室的回压补气,可避免空气中的微生物污染食品,同时对真空室杀菌消毒<sup>[6]</sup>。为满足工业应用,在

冷却过程中将臭氧发生器产生的臭氧先保存在高压储气罐中,等真空室温度降到设定值后,将高压储气罐与真空室接通可快速回压。

#### 1.4 补水装置

设计超雾化喷头喷洒小分子水对食品补水,雾化喷头安装在真空室两侧,喷头位置根据推车大小及托盘位置可调节,使得小分子水的喷洒更加均匀,小分子水渗透性强,在负压作用下更易渗透到食品内部,使得补水均匀。

#### 1.5 控制系统

控制系统对真空室温度、压力等参数实时监测,并对真空系统、制冷系统、补水系统、臭氧回压系统等进行调控,控制着整机的工作过程<sup>[7-9]</sup>。图2为改进型真空冷却机工作流程图,通过触摸屏人机操作界面,设置真空室终温、终压、冷却时间及开式捕水器水箱温度等重要参数,并在设备运行过程中显示监控信息。当监测到真空室冷却效果达到要求后,控制打开补水系统,按照设定好的补水量对产品补水<sup>[10]</sup>,随之打开臭氧储存装置,将臭氧通入真空室回压杀菌,监测到内外压力平衡后,等待一定时间,打开箱门完成冷却过程。

### 2 新型真空冷却机工艺流程

根据图2所示,所设计的真空冷却系统工作流程为:开始在PLC显示屏设定预冷终温,打开三通阀将自来水注入开式捕水器水箱,浸没水箱内部盘管,打开节流阀、冷凝器、压缩机,将开式捕水器中水降温至略低于真空室设定的预冷终温;将物料放入真空室;关闭真空室,打开真空阀和旁通阀,开启水环泵开始抽真空。由于刚开始抽真空时,水蒸气温度较高,为了提高换热效率,直接使用自来水冷却水蒸气,并直接排出,有利于降低捕水器中油垢的凝结;当真空度降到水环泵抽真空极限压力时,关闭旁通阀,启动水环泵串联的罗茨泵,继续降低真空室温度;关闭自来水管,水环泵抽取开式捕水器水箱中的冷却水冷却来自真空室中的水蒸气,水蒸气冷凝并与空气混合,水环泵将混合后的水与空气排至开式捕水器水箱;制冷系统将水冷却,继续循环利用;当真空室内温度达到设定终温后,关闭真空阀打开电磁阀,通过超雾化喷头向真空室内部喷洒

小分子水对食品补水;补水过程中打开电磁阀,臭氧发生器将臭氧通入真空室,对真空室回压并对真空室、食品杀菌消毒;当真空室压力回升至与外界压力平衡后关闭电磁阀,打开真空室,取出,完成食品冷却杀菌过程。

### 3 主要部件计算

#### 3.1 初始工况

根据SB/T 10791—2012《熟食品真空预冷机》标准,以热水为对象进行理论计算<sup>[11]</sup>,设定真空室容积 $V_0 = 1 \text{ m}^3$ ,水的装载量 $M_0 = 200 \text{ kg}$ ,水比热容 $C_p = 4.2 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,起始温度 $T_1 = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ ,终点温度 $T_2 = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,初压 $P_1 = 101\,300 \text{ Pa}$ ,终压 $P_2 = 872 \text{ Pa}$ ,失水量 $M_1$ ,取水蒸气蒸发潜热 $L = 2\,485 \text{ kJ/kg}$ 。

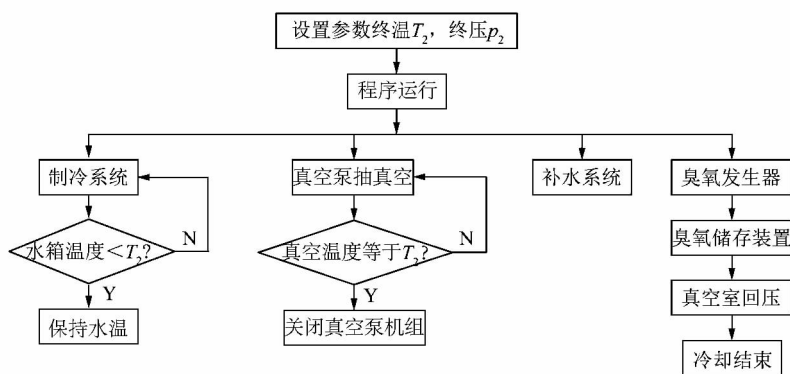


图2 改进型真空冷却机工作流程图

Figure 2 Working flow chart of improved vacuum cooling machine

#### 3.2 真空泵

为满足生产工艺工作压力要求,真空泵选型时,其工作压力应低于要求真空度的1/5。设定极限情况下要求真空度为600 Pa,真空获得设备工作压力应低于120 Pa,取100 Pa。设定将 $1 \text{ m}^3$ 的容器从101 300 Pa降到100 Pa所需时间为240 s,主泵(罗茨泵)抽气速率按照公式计算:

$$s_{p1} = 2.3 \frac{V_0}{t} \cdot \ln \frac{P_1}{P_2} = 66.3 \text{ L/s}。$$

式中: $t$ 为空载时达到终压所用时间, $s_{p1}$ 为真空泵抽气速率。

各级真空泵之间抽速比(主泵抽速与前级泵抽速比值)不宜大于3,一般取2。则水环泵抽气速率 $s_{p2}$ 为:

$$s_{p2} = 66.3/2 = 33.1 \text{ L/s}。$$

根据SB/T 10791—2012《熟食品真空预冷机》标准以及抽气速率需求,本系统所选择的罗茨泵、水环泵具体参数如表1~2所示。

表1 罗茨泵性能参数

Table 1 Roots pump performance parameters

| 型号     | 抽气速率/(L·s <sup>-1</sup> ) | 最高允许压差/Pa | 极限压力/Pa                   |
|--------|---------------------------|-----------|---------------------------|
| ZJP-70 | 70                        | 8 000     | 0.05                      |
| 型号     | 功率/kW                     | 噪声/dB     | 转速/(r·min <sup>-1</sup> ) |
| ZJP-70 | 1.1                       | 75        | 2 825                     |

表2 水环泵性能参数

Table 2 Performance parameters of water ring pump

| 型号       | 抽气速率/(L·s <sup>-1</sup> )    | 极限压力/Pa | 功率/kW                     |
|----------|------------------------------|---------|---------------------------|
| 2BV-5110 | 45.8                         | 3 300   | 4                         |
| 型号       | 工作液流量/(L·min <sup>-1</sup> ) | 噪声/dB   | 转速/(r·min <sup>-1</sup> ) |
| 2BV-5110 | 6.7                          | 63      | 1 440                     |

### 3.3 制冷机组

本系统中制冷机组选用 R22 为制冷剂,主要降低水箱和来自真空室中的水蒸气温度,因此制冷机组的制冷量计算可分为两部分。水环泵工作液流量为 6.7 kg/min,考虑到冷却时间、制冷效率、管道等因素,设定水箱中水为 100 kg,常温 20 ℃。为防来自真空室的液体进入水箱后溢出,需预留一部分容积,水体积占水箱体积的 80%,且能浸没盘管,据此可根据空间设计水箱规格。

预冷前将水箱内 100 kg 水从 20 ℃降至 4 ℃,为冷却高温蒸气做准备,所需制冷量  $Q_1$  为:

$$Q_1 = C_p \cdot 100 \cdot (20 - 4) = 6\,720 \text{ kJ}。$$

预冷过程中将真空室内水温从 90 ℃降至 5 ℃所需制冷量  $Q_2$  为:

$$Q_2 = C_p \cdot M_0 \cdot (T_1 - T_2) = 71\,400 \text{ kJ}。$$

根据能量守恒定律,物料降低到终温散出的热量  $Q_2$  等于水分完全蒸发吸收的热量  $Q_3$ ,即:

$$Q_2 = Q_3 = M_1 \cdot L。$$

由此可求得理论失水量:

$$M_1 = 28.7 \text{ kg}。$$

假定这部分水全部进入水箱且被冷却到 4 ℃,则所需制冷量  $Q_4$  在极限条件下(温度为最大值 90 ℃)应为:

$$Q_4 = 10\,475 \text{ kJ}。$$

故制冷机组选型时只需考虑满足预冷过程中所需制冷量  $Q_4$  即可。设定冷却时间为 20 min,可选制冷机组制冷量为 12 000 W<sup>[12]</sup>。

### 3.4 臭氧储存罐

根据气体状态方程,已知真空室容积  $V_0$ ,初压  $p_1$ ,

终压  $p_2$ 。根据实际空间要求选择合适的储气罐体积  $V_1$ ,则:

$$p_1(V_0 + V_1) = p_2V_0 + pV_1。$$

式中: $p$  为储气罐内压力,终压  $p_2$  远小于  $p$ ,可忽略。

设定储罐内压力为 5 MPa,则储气罐体积为 0.25 m<sup>3</sup>,由此还可求出所需臭氧质量,臭氧发生器持续产生臭氧,并通入储气罐,直到达到要求终止。

## 4 结 语

课题组设计的新型真空预冷机以真空预冷技术为核心,通过罗茨-水环泵真空机组,避免了封闭式捕水器由于油垢凝结导致制冷效果变差的不足;加入臭氧回压模块,将臭氧通入抽真空后的真空室,在回压的同时,起到杀菌消毒的作用,避免了空气回压带来的二次污染;同时小分子水渗透性强,溶解性好,采用小分子水能够使得补水更加均匀。课题组设计的改进型真空预冷机系统,解决了工业应用中熟食品真空预冷机存在的问题,通过对系统中主要部件的选型计算,确定了系统功率,在实际生产冷却中具有重要的应用价值。

### 参考文献:

- [1] 宋晓燕,刘宝林. 食品真空冷却技术研究进展[J]. 食品科学, 2014,35(11):319-324.
- [2] HUA Zezhao, ZHANG Hua, LIU Baolin, et al. Refrigeration Technology[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [3] BRILEY G C. Vacuum cooling of vegetables and flowers[J]. American society of heating refrigerating and air-conditioning engineers, 2004,46(4):52-53.
- [4] 宋晓燕,刘宝林. 食品真空冷却技术[M]. 北京:科学出版社, 2016:4.
- [5] 周杰,刘宝林,宋晓燕. 新型熟食品真空冷却装置研究[J]. 安徽农业科学, 2012,40(19):10269-10270.
- [6] 彭群英,李保国,郭彦伟,等. 真空预冷机臭氧杀菌回压装置:CN 202630558 U[P]. 2012-12-26.
- [7] 唐树培,李保国,高志新. 新型高压静电解冻柜设计[J]. 轻工机械, 2016,34(3):5-8.
- [8] 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.
- [9] 王雪芹,刘宝林,闫静文. 真空冷却控制系统优化设计[J]. 低温与超导, 2011,39(9):6-8.
- [10] BROSAN T, SUN Dawen. Precooling techniques and applications for horticultural products: a review[J]. International journal of refrigeration, 2001,24(2):154-170.
- [11] 全国制冷标准化技术委员会. 熟食品真空预冷机:SB/T 10791-2012[S]. 北京:中国标准出版社, 2014:4.
- [12] 苏树强,肖洪海,华泽钊. 食品真空冷却的机制、特性与实验装置[J]. 制冷技术, 2002(2):7-11.