

文章编号:1672-3961(2025)06-0083-07

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2024.080

# 大型直冷式制冰机结冰过程的建模

王晓鹏<sup>1</sup>, 张志强<sup>2</sup>, 赵红霞<sup>1\*</sup>, 柏超<sup>1</sup>, 程义广<sup>2</sup>, 高晨晨<sup>3</sup>, 李广鹏<sup>4</sup>

(1.山东大学核科学与能源动力工程学院, 山东 济南 250061; 2.山东宝成制冷设备有限公司, 山东 聊城 252400; 3.山东神舟制冷设备有限公司, 山东 济南 250220; 4.山东商业职业技术学院冷链物流与供应链产业学院, 山东 济南 250103)

**摘要:**依据大型直冷式制冰机制冰单元的传热形式以及内部相态的改变,将制冰过程划分为水的对流换热降温过程、水的导热换热降温过程、水的冻结过程、冰的降温过程4个阶段。运用能量守恒方程和传热方程等,建立制冰全过程各单元的数学模型,通过MATLAB软件编程求解各阶段的时间。对大型直冷式制冰机制冰单元内的结冰过程进行了试验测定,经验证,传热模型各阶段的计算误差均在8.00%以内,总误差小于4.00%,模型准确性较高。对大型直冷式制冰机的设计优化提供技术指导和理论支持。

**关键词:**直冷式制冰机;传热过程;数学模型;制冰原理;求解程序

**中图分类号:**TB657.1 **文献标志码:**A

**引用格式:**王晓鹏,张志强,赵红霞,等.大型直冷式制冰机结冰过程的建模[J].山东大学学报(工学版),2025,55(6):83-89.

WANG Xiaopeng, ZHANG Zhiqiang, ZHAO Hongxia, et al. Modeling on icing process of large direct cooling ice maker[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(6):83-89.

## Modeling on icing process of large direct cooling ice maker

WANG Xiaopeng<sup>1</sup>, ZHANG Zhiqiang<sup>2</sup>, ZHAO Hongxia<sup>1\*</sup>, BAI Chao<sup>1</sup>, CHENG Yiguang<sup>2</sup>, GAO Chenchen<sup>3</sup>, LI Guangpeng<sup>4</sup>

(1. School of Nuclear Science, Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 2. Shandong Baocheng Refrigeration Equipment Co., Ltd., Liaocheng 252400, Shandong, China; 3. Shandong Shenzhou Refrigeration Equipment Co., Ltd., Jinan 250220, Shandong, China; 4. Cold Chain Logistics and Supply Chain Industry College, Shandong Institute of Commerce and Technology, Jinan 250103, Shandong, China)

**Abstract:** This study divided the ice making process into four stages based on the heat transfer form of the ice-making unit of the large direct-cooled ice maker and the change of internal phase state: the convective heat transfer cooling process of water, the conductive heat transfer cooling process of water, the freezing process of water, and the cooling process of ice. By using energy conservation equations and heat transfer equations, mathematical models of each unit in the whole ice-making process were established, and the time of each stage was solved by MATLAB software programming. In this study, the icing process in the ice making unit of a large direct-cooled ice maker was experimentally determined. It had been verified that the calculation errors of each stage of the heat transfer model were all within 8.00%, and the total error was less than 4.00%, which indicated the high accuracy of the model. This study provided technical guidance and theoretical support for the design optimization of a large direct-cooled ice maker.

**Keywords:** direct cooling ice maker; heat transfer process; mathematical model; ice making principle; solution program

收稿日期:2024-04-17

基金项目:山东省科技型中小企业创新能力提升工程资助项目(2022TSGC2574)

第一作者简介:王晓鹏(2002—),男,山东德州人,硕士研究生,主要研究方向为制冰机原理。E-mail: 202314526@mail.sdu.edu.cn

\* 通信作者简介:赵红霞(1977—),女,山东鄄城人,教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为空调热泵、喷射器等。

E-mail: hongxia.zhao@sdu.edu.cn

## 0 引言

冰块是冷链运输行业最主要的储冷介质。近年来,国内医疗冷链运输需求呈爆发式增长<sup>[1-2]</sup>,制冰产业随之得到飞速发展。在“双碳”目标背景下,低碳环保政策对制冰行业提出更高的要求:在提高制冷设备性能的同时要兼顾低碳排放、环境友好。这为制冰产业的发展提出新的挑战。

目前的制冰过程存在流程复杂、能耗高等问题。国家低碳政策对制冷设备能效标准提出更高要求,同时市场对便捷高效、低能耗的制冰机的需求日益增加。因此,开发和研制方便快捷、高效低能耗的制冰机已经成为制冷行业的重要课题。制冰机以及制冰过程的研究成为制冷行业研究的重要方向,也是响应市场需要和国家低碳政策的重要举措。文献[3]对直冷式多通道蒸发器制冰机的制冷循环进行试验,研究多通道蒸发盘管内的流体温度分布和各冷却回路的动态变化,提出提高制冰机运行性能的改进建议;文献[4]提出一种新型的双过冷换热器制冰装置,在无需停机以及额外加热器的条件下解决过冷水换热器的冰堵问题,提高过冷水制冰装置的产冰量;文献[5]基于差示扫描量热仪试验数据,提出一个基于热量和质量运输方程的模型,用于预测小容器内溶液冻结过程,阐明潜热释放与测量时间和时间的关系;文献[6]研究磁场对液滴冻结的影响,揭示不同磁场强度、表面温度和液滴体积条件对液滴冻结时间和内部温度变化的影响;文献[7]提出一种基于 Stefan 方程的三维移动边界模型,预测冰格中水的凝固过程,发现模型预测的凝固过程与实际凝固过程具有高度一致性;文献[8]对家用制冰机结冰过程的相变导热进行有限差分数值模拟,讨论不同水温工况对制冰机结冰性能的影响;文献[9]提出在水中加入中介物质降低真空制冰系统对真空度的要求,证明相同蒸发温度下,氨水对真空度的要求远低于蒸馏水;文献[10]提出一种冰桶动态制冰工艺,模拟不同制冰桶形状及制冰桶倾角对制冰过程的影响,综合考量制冰时间和脱冰次数对制冰量的影响,提高冰桶的制冰效率;文献[11]分析制冰桶结构形式对大型砖冰机制冰池盐水流场的影响,得出制冰桶近似椭圆形时盐水流速更均匀,温升及流动阻力更小,有利于加快制冰速度,提高冰块质量,为大型制冰机的优化设计提供参考和建议。

在制冰产业迅速发展的背景下,直冷式制冰机

操作简单、自动化程度高、制冰效率高,广泛应用于食品加工、冷链运输、医药保鲜等行业。块冰制冰机分为直冷式制冰机和盐水式制冰机。相对于盐水式制冰机,直冷式制冰机的制冷剂和水直接换热,无需盐水作为中间介质,系统能耗和运行成本更低;并且冰模蒸发器不会被盐水腐蚀,制得的冰块更加干净卫生。同时,直冷式制冰机设备更小,可以实现全过程自动化运行,安装周期更短,空间和人工成本更低。直冷式制冰机已经成为块冰制冰机市场中的主流产品。

当前,对于大型直冷式制冰机的理论性研究匮乏,制冰机的研发仍处于依赖经验数据进行探索的阶段,设备的能耗、运行稳定性和使用寿命等方面仍需优化。本研究以大型直冷式工业制冰机为研究对象,依据其制冰系统的工作原理和蒸发器结构,进行热力学分析。通过建立制冰机蒸发器内水结冰过程的数学模型,与实际制冰过程中蒸发器内水的结冰过程进行对比验证,以便深入了解制冰机的制冰过程,为大型直冷式工业制冰机的设计优化提供理论指导。

## 1 制冰过程分析

### 1.1 蒸发器原理

制冰机冰模蒸发器结构如图1所示。

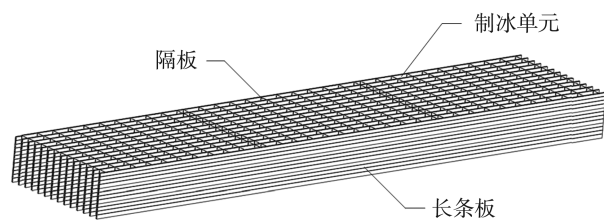


图1 冰模蒸发器结构图

Fig.1 Structure diagram of ice mold evaporator

由图1可知,制冰单元由长条板和隔板隔离成冰格结构,可以根据需要的冰块尺寸对隔板进行调整。长条板是空心铝板,其中分布有制冷剂管路和融冰水路。在制冰过程中,制冷剂流过制冷剂管路与水(冰)换热,从而实现制冰。隔板是实心铝板,与长条板固定在一起,起到分隔制冰单元以及固定冰块的作用。冰模蒸发器放置在保温托盘上,每个制冰单元与托盘接触位置采取密封措施,以防止制冰单元内的水流出,确保制冰过程的顺利进行。同时,冰模蒸发器上部覆盖一层保温材料,与保温托盘一起形成上下两端的隔热层,以减少冷量损失,确保制得的冰块质地均匀。

### 1.2 制冰过程

为了对制冰单元内水的结冰过程进行研究,本研究在制冰单元内布置了5个测温点,如图2所示。

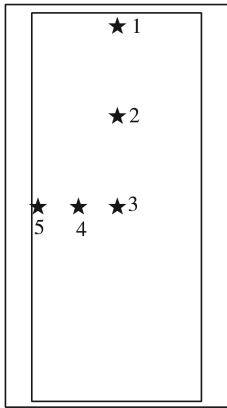


图2 制冰单元内温度测点分布图(俯视图)

Fig.2 Distribution of temperature measurement points inside the ice making unit (top view)

经过试验测量,得到各测温点的温度变化曲线,如图3所示。

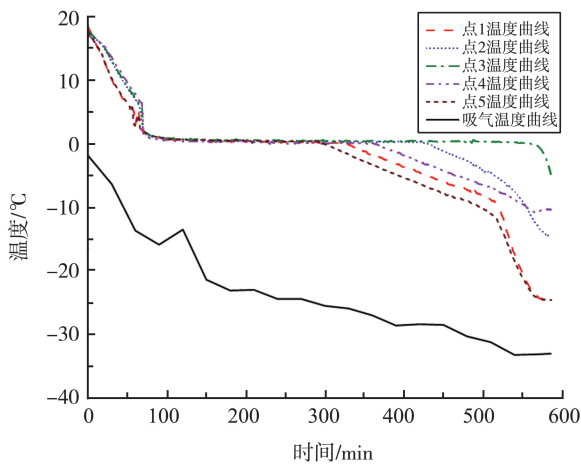


图3 制冰单元内各测温点处温度变化图

Fig.3 Temperature variation diagram at various temperature measurement points inside the ice making unit

由图3可知,制冰机启动后,制冰单元内不同测点位置水的温度几乎是同时均匀下降,当水的温度下降到2℃左右时,制冰单元内水的温度下降趋于平缓。水温到达0℃后,靠近蒸发器长条板的测点5处温度率先降低到0℃以下,并且不同测点处温度由外向内先后降低。当中心位置处冰的温度降到规定温度时,制冰机结束工作。同时,由图3中压缩机吸气温度曲线可知,在制冰机运行过程中,冰模蒸发器的蒸发温度是随着制冰时间而动态变化的。

基于试验数据构建制冰单元内的制冰过程,如图4所示。制冰机开始运行时,制冰单元内部充斥着水,随着水的温度降低,由制冰单元壁面处开始凝结成冰,形成由外向内发展的结冰面,最后冰层

不断向内推进,直至制冰单元内的所有水凝结成冰,并降到要求的停机温度后制冰结束。

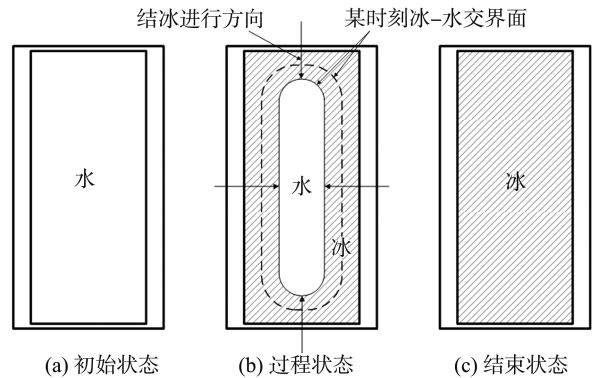


图4 制冰单元内结冰过程俯视图

Fig.4 Top view of the icing process inside the ice making unit

## 2 建立数学模型

### 2.1 计算数据准备

直冷式制冰机是生产工业用块冰常用的制冰机。制冰单元示意图如图5所示,本研究的制冰单元尺寸如表1所示。

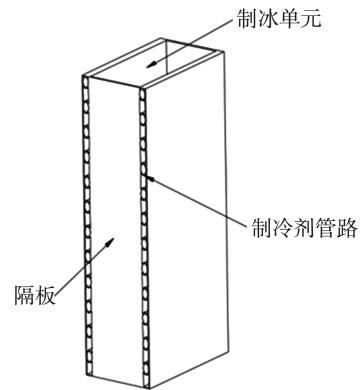


图5 制冰单元示意图

Fig.5 Schematic diagram of ice making unit

表1 制冰单元尺寸

Table 1 Ice making unit size 单位:mm

长度	宽度	高度	制冷剂管路 外径长半轴
380.0	175.0	920.0	19.0
制冷剂管路 外径短半轴	制冷剂管路 管壁厚度	制冷剂管路 管间中心距	隔板厚度
12.5	3.0	76.5	7.0

由于制冰单元尺寸足够大,在水的冷却过程中距壁面距离不同处的水的温度不同,导致不同位置水的密度存在差异,从而引起水的自然对流换热。水的自然对流换热系数和壁面温度有关。为了方便计算,在计算水的自然对流换热系数时,忽略蒸发器不同高度上壁面温度差异,假设蒸发器壁面温度在高度方向上均匀分布。取制冰机稳定运行时

的定性温度以及干度确定该状态下制冷剂的各项参数。同时,在已知制冷剂管路结构和制冷剂流量的情况下可以通过两相流系数修正后的 D-B 公式<sup>[12-15]</sup>求得制冷剂侧的换热系数。

修正的 D-B 公式和换热系数计算公式分别为

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.43} \left( (1-x)^{0.8} + \frac{3.8 x^{0.76} (1-x)^{0.04}}{Pr^{0.38}} \right), \quad (1)$$

$$h_1 = \frac{\lambda_1}{d} Nu, \quad (2)$$

式中:  $Nu$  为努塞尔数;  $Re$  为雷诺数;  $Pr$  为普朗克数;  $x$  为制冷剂干度;  $\lambda_1$  为制冷剂导热系数,  $W/(m \cdot ^\circ C)$ ;  $d$  为管道内径,  $m$ ;  $h_1$  为制冷剂与管路壁面的换热系数,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

冰模蒸发器的制冷剂管路是镶嵌在蒸发器长条板之中的,其固体部分导热不均匀。为解决物体的不均匀导热问题,将制冷剂管路之间的铝板视为肋片进行导热分析。制冷剂管路为椭圆形管,并且只有两侧与铝板接触,也可视为肋片进行导热分析。其肋片凸出部分为变截面,同时肋基温度和蒸发器中水(或冰)的温度相关。由于肋基温度处于动态过程中,所以无法通过控制方程求解肋效率。本研究制冷剂管路近似为直肋,运用矩形截面直肋的肋效率计算公式进行隔板间不均匀固体导热过程的热力学计算,从而求得近似直肋的肋效率。

矩形截面直肋的肋效率计算公式<sup>[12,16]</sup>为

$$\eta_f = \frac{th(mH')}{mH'}, \quad (3)$$

$$m = \sqrt{\frac{2h_2}{\lambda_2 \delta_1}}, \quad (4)$$

$$H' = H + \frac{\delta_1}{2}, \quad (5)$$

式中:  $h_2$  为肋片与介质换热系数,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $\lambda_2$  为肋片导热系数,  $W/(m \cdot ^\circ C)$ ;  $\delta_1$  为肋片宽度,  $m$ ;  $H$  为肋片长度,  $m$ 。

本研究将制冰单元内水的结冰过程分为4个阶段:水的对流降温阶段、水的导热降温阶段、水的冻结阶段以及冰的降温阶段。其中水的导热降温过程和冰的降温过程可以看作物体的动态导热过程进行分析,水的冻结过程可以看作水在结冰前沿处的潜热沿着已经冻结的冰层和壁面释放到制冷剂并且结冰前沿不断向内推进的过程。这3个过程需要计算水和冰的导热。

由于制冰单元空间足够大而且距壁面不同距

离处的水存在一定的温差,所以水与蒸发器长条板的换热方式是自然对流,水侧的冷却过程的换热系数需要代入自然对流公式求解。根据制冰机结构以及初步计算判定,选取有限空间自然对流的格拉晓夫数计算公式以及竖直夹层的努塞尔数计算公式<sup>[12,17]</sup>求得定性温度下水的冷却过程中水与蒸发器壁面的换热系数和温差的关系式,并通过能量守恒方程,求得水的冷却过程中水与蒸发器壁面的换热系数。

有限空间自然对流的格拉晓夫数计算公式以及竖直夹层的努塞尔数计算公式分别为

$$Gr = \frac{g \alpha_v \Delta t \delta_3^3}{\nu^2}, \quad (6)$$

$$Nu = 0.073 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{H_1}{\delta_3} \right)^{-\frac{1}{9}}, \quad (7)$$

式中:  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $\alpha_v$  为体积膨胀系数,  $1/^\circ C$ ;  $\delta_3$  为有限空间宽度(本研究取蒸发器冰模宽度的一半),  $m$ ;  $\nu$  为动力黏度,  $Pa \cdot s$ ;  $H_1$  为有限空间高度,  $m$ ;  $\Delta t$  为有限空间冷热侧温差(本研究取水与蒸发器冰模壁面温差),  $^\circ C$ ;  $Gr$  为格拉晓夫数。

## 2.2 制冰过程建模

### 2.2.1 水的对流换热降温过程建模

制冰单元沿隔板中线划分的左半部分的制冰过程示意图如图6所示。

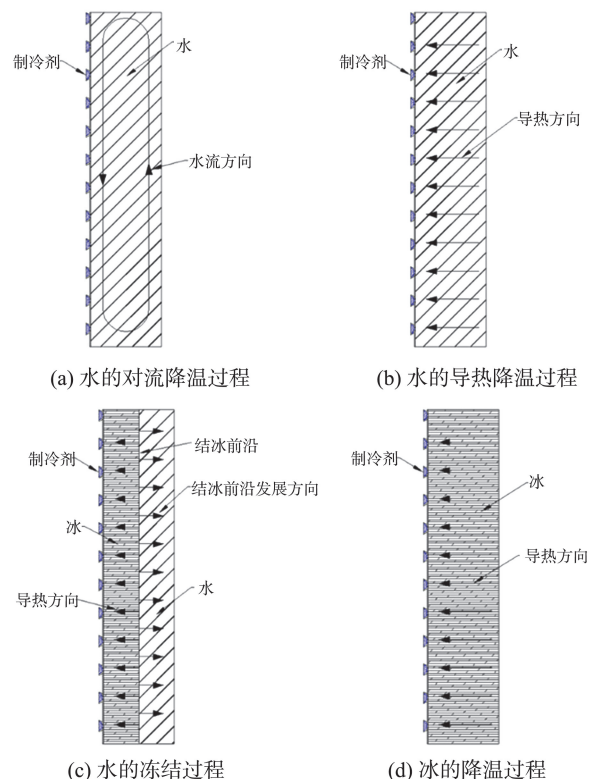


图6 制冰过程示意图

Fig.6 Schematic diagram of ice making process

水的对流换热降温过程如图6(a)所示。水的冷却过程中,当水与蒸发器壁面温差较大时,水与蒸发器壁面的换热方式主要是自然对流。水在制冰单元内不断流动,本研究近似认为水的内部是整体降温的,采用集总参数法<sup>[12,17-18]</sup>进行水的冷却过程热力计算。如图3所示,根据试验过程中制冰单元内水温变化趋势,取2℃为分界温度,当水温高于2℃时,认为制冰过程处于水的对流换热降温阶段。

水的对流换热降温阶段控制方程为

$$\rho c V \frac{dt}{d\tau} = -\frac{t-t_1}{\theta_1+\theta_2}, \quad (8)$$

式中: $\theta_1$ 为制冷剂侧考虑制冷剂管路肋效率后的热阻,℃/w; $\theta_2$ 为水侧考虑长条板和隔板肋效率后的对流换热热阻,℃/w; $t_1$ 为蒸发温度,℃; $t$ 为水的温度,℃; $\rho$ 为水的密度,kg/m<sup>3</sup>; $c$ 为水的比热容,J/(kg·℃); $V$ 为制冰单元体积,m<sup>3</sup>; $\tau$ 为换热时间,s。

控制方程等号的左侧为单位时间内水整体降温所释放出的热量,等号右侧为单位时间内某一温度下的水与制冷剂的换热量。

根据已知的定解条件可以获得时间和水温的关系式为

$$\tau = \rho c V (\theta_1 + \theta_2) \ln \left( \frac{t_0 - t_1}{t - t_1} \right), \quad (9)$$

式中: $t_0$ 为水的初始温度,℃。

通过式(9)可求得第一部分水的冷却过程所消耗的时间。

### 2.2.2 水的导热换热降温过程建模

水的导热换热降温过程如图6(b)所示。当蒸发器冰模内的水降低到一定温度时,水与蒸发器壁面温差所引起的水与壁面的自然对流换热可以忽略,此时,制冰单元内的水向外散热的方式主要是导热。如图3所示,根据试验过程中制冰单元内的水温变化趋势,在水温低于2℃时水温变化趋势明显变缓,且在温度到达0℃时,由外向内各测温点处温度变化趋势依次变大,认为水温在0~2℃时制冰过程处于水的导热换热降温阶段。

水的导热换热降温过程是一个非周期性的非稳态导热过程。由于蒸发器冰模隔板内部没有制冷剂管路分布,且隔板与长条板之间存在接触热阻,隔板壁面的导热对水的导热降温过程影响不大。制冰单元内部的水向外的导热主要集中在垂直于长条板方向,同时,由于冰模的厚度与长度相

差较大,所以可以近似为一维非稳态导热过程,从而运用平板的第3类边界条件下的非稳态导热无量纲分析解进行降温时间的求解。

平板的第3类边界条件下的非稳态导热无量纲分析解<sup>[12,19]</sup>公式为

$$\frac{\theta(\eta, \tau)}{\theta_0} = \sum_{n=1}^{\infty} c_n e^{-\mu_n^2 Fo} \cos(\mu_n \eta), \quad (10)$$

$$C_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \cos \mu_n \sin \mu_n}, \quad (11)$$

$$\tan \mu_n = \frac{Bi}{\mu_n}, \quad (12)$$

式中: $Bi$ 为毕渥数; $Fo$ 为傅里叶数; $\eta$ 为计算点距平板中心的距离与平板厚度一半的百分比; $\theta_0$ 为初始状态平板与介质间的温差,℃; $\theta(\eta, \tau)$ 为对应时间下对应位置与介质的温差,℃。

公式(10)是一个无穷多项级数,取其中前3~5项计算即可获得较小误差的计算结果。本研究取其中前3项进行计算,以公式(10)计算结果近似为水的导热换热降温过程所消耗的时间。

### 2.2.3 水的冻结过程建模

水的冻结过程建模如图6(c)所示。在水的冻结过程中,由于发生相变,所以制冰单元中心处的液态部分温度不变。本研究认为水温到达0℃时水的冻结过程开始,此时结冰前沿在壁面处,结冰厚度为0。随着冻结过程的进行,结冰前沿不断向内发展,直至结冰前沿到达制冰单元中心位置,水的冻结过程结束。

由于蒸发器冰模隔板内部没有制冷剂管路分布,且隔板与长条板之间存在接触热阻,隔板壁面的导热对水的冻结过程影响不大,制冰单元内部的导热主要集中在垂直于长条板方向,而且冰模的厚度与长度相差较大,所以可以近似为一维非稳态导热过程。冻结过程中释放的热量通过固相传导,然后传递到制冷剂中<sup>[10]</sup>。其中,随着时间变化,制冰单元内的冰层由外向内逐渐发展,固态冰层部分热阻逐渐变大。

上述过程的控制方程为

$$\rho \lambda_3 A \frac{d\delta_4}{d\tau} = \frac{0-t_2}{\frac{\delta_4}{k} + \theta_1 + \theta_3}, \quad (13)$$

式中: $\lambda_3$ 为冰的潜热,J/kg; $k$ 为冰的导热系数,w/(m·℃); $\delta_4$ 为结冰厚度,m; $\theta_3$ 为长条板导热热阻,℃/w; $A$ 为结冰面的面积,m<sup>2</sup>; $t_2$ 为制冷剂

温度,℃。

控制方程等号左侧为冰水交界面处单位时间内冻结单位厚度的冰所释放出的潜热的热量;控制方程等号右侧为单位时间内,以蒸发温度为温差的动力下,通过已经冻结的冰层以及蒸发器隔板向制冷剂传递的热量。

根据已知的定解条件即  $\tau$  为 0 时,冰层厚度为 0,可以得出时间关于冰层厚度的关系式为

$$\tau = \frac{\rho\lambda_3 A}{-t_2} \left( \frac{\delta_4^2}{2Ak} + \theta_1 \delta_4 + \theta_3 \delta_4 \right) \quad (14)$$

通过式(14)即可求得第 2 部分水的冻结过程所消耗的时间。

### 2.2.4 冰的降温过程建模

冰的降温过程如图 6(d) 所示。冰的降温过程同水的导热换热降温过程相同,也是一个非周期性的非稳态导热过程。由于蒸发器冰模的结构,冰的厚度与长度相差较大,所以亦可以近似为一维非稳态导热过程,从而运用平板的第 3 类边界条件下的非稳态导热无量纲分析解<sup>[12,19]</sup>进行冰的降温过程的时间求解。

本研究认为冰的降温过程在结冰前沿到达制冰单元中心位置时开始。在制作工业用块冰时,为了保证冰块的品质,其中心部分温度要降到  $-5\text{ }^\circ\text{C}$  以下,所以冰的降温过程计算在中心温度降至  $-5\text{ }^\circ\text{C}$  时结束。

以上 4 个过程所求出的时间加和即为制冰机制冰过程中从注水结束到出冰时所消耗的总时间。

## 3 MATLAB 程序编写

### 3.1 MATLAB 建模流程

MATLAB 建模流程如图 7 所示。

计算需要的参数包括注水温度、不同过程的蒸发温度、制冷剂干度、制冷剂流量以及冰模的尺寸等。首先,根据输入变量调取需要的水和不同状态的制冷剂的物性以及计算各换热部分的换热面积;其次,进行水和制冷剂对流换热系数的求解。获得水和制冷剂对流换热系数后,根据肋效率计算公式获得隔板、长条板以及制冷剂管路的肋效率,进而可以根据前面计算得到的换热面积获得各部分换热热阻。根据前文建立的数学方程解出制冰机各运行过程所需要的时间。

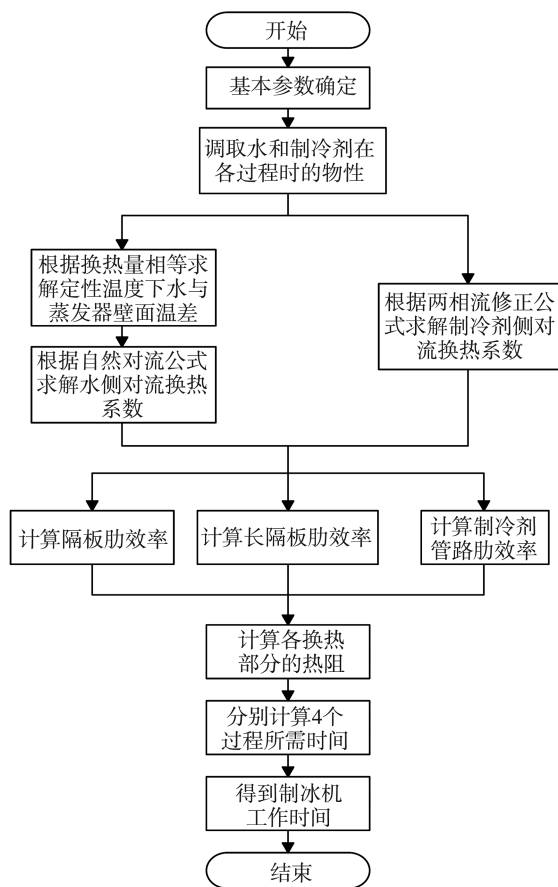


图 7 MATLAB 建模流程图

Fig.7 MATLAB modeling flowchart

### 3.2 验证程序准确性

为了验证计算程序的准确性,本研究进行了试验验证。程序的输入变量如表 2 所示。试验中冰模注水温度为  $18\text{ }^\circ\text{C}$ ,试验设备充注制冷剂类型为 R22。试验测得的温度如图 3 所示。根据上述各阶段的划分条件获得各制冰阶段消耗的时间,进而与程序计算所得各阶段时间进行对比验证。考虑到在蒸发器中制冷剂干度的变化,采用定性干度 0.6 进行计算。不同阶段的蒸发器蒸发温度根据图 3 中的吸气温度确定。

表 2 MATLAB 程序输入量

Table 2 Input quantity of MATLAB program		
注水温度/ $^\circ\text{C}$	制冷剂流量/ $(\text{t}\cdot\text{h}^{-1})$	制冰结束时冰块中心温度/ $^\circ\text{C}$
18.0	4.2	-5.0
水对流传热和导热 的划分温度/ $^\circ\text{C}$	水开始结冰的 温度/ $^\circ\text{C}$	冰模材料(铝)导热 系数/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{k}^{-1})$
2.0	0	201.0
水对流降温阶段制冷剂 定性温度/ $^\circ\text{C}$	水导热降温阶段 制冷剂定性温度/ $^\circ\text{C}$	
-7.0	-20.5	
水的冻结阶段制冷 剂定性温度/ $^\circ\text{C}$	冰的降温阶段 制冷剂定性温度/ $^\circ\text{C}$	
-29.0	-33.0	

将输入变量代入程序运算,所得计算时间和试验的制冰时间对比如表3所示。由表3可知,水对流降温时间的计算结果和试验结果误差为0.13%;由于试验的温度测量精度和温度探头放置位置存在一定误差,无法精确划分水的导热降温过程和冻结过程的时间区间,所以将试验中的这两部分时间合为一部分再与计算所得的水的导热降温时间和冻结时间的和进行对比,结果误差为4.22%;冰的降温时间的计算结果和试验结果误差为7.88%;将各个过程的计算时间和试验时间相加,得到制冰总时间的计算结果和试验结果的误差为3.88%。

表3 MATLAB 计算时间与试验时间对比

Table 3 Comparison of MATLAB calculation time and experimental time

项目	计算时间/min	试验时间/min	误差/%
水对流降温时间	67.91	68.00	0.13
水导热降温时间和水冻结时间	512.75	492.00	4.22
冰降温时间	28.05	26.00	7.88
总时间	608.71	586.00	3.88

注:水导热降温和水冻结时间分别为129.58、383.17 min。

通过制冰过程不同阶段以及总的制冰过程的计算时间和试验时间对比,计算程序和试验的各阶段时间误差均小于8.00%,总时间误差小于4.00%。

## 4 结论

本研究依据大型直冷式工业制冰机的工作原理和冰模蒸发器结构,进行了热力学分析计算。依据制冰单元的传热形式及其内部相态的改变,将制冰过程划分为水的对流降温过程、水的导热降温过程、水的冻结过程以及冰的降温过程4个阶段,运用能量守恒方程和对应形式的传热方程建立了数学模型,通过MATLAB 软件编程求解各个制冰阶段的时间。本研究旨在通过建立大型直冷式制冰机冰模蒸发器内部水结冰过程的数值模型,深入了解制冰机的制冰过程,为大型直冷式工业制冰机的设计优化提供理论指导。经试验验证各阶段的计算误差均在8.00%以内,且总误差小于4.00%,模型准确性较高。同时,本研究所建立的模型普遍适用于不同类型制冷剂以及不同结构尺寸的工业用块冰制冰机,对大型直冷式工业制冰机的设计优化以及对新型环保制冷剂的选取具有一定的指导意义,也为大型直冷式工业制冰机的研究提供了理论支持,为国家低碳政策贡献力量。

## 参考文献:

- [1] 汪超, 韩美顺. 2019 年度中国制冷设备市场分析[J]. 制冷技术, 2020, 40(增刊1): 68-89.  
WANG Chao, HAN Meishun. 2019 China refrigeration equipment market analysis [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2020, 40(Suppl.1): 68-89.
- [2] 韩美顺. 2020 年度中国制冷设备市场分析[J]. 制冷技术, 2021, 41(增刊1): 67-86.  
HAN Meishun. Analysis on refrigeration equipment market of China in 2020 [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2021, 41(Suppl.1): 67-86.
- [3] LIU Zhan, TAN Haihui. Thermal performance of ice-making machine with a multi-channel evaporator [J]. International Journal of Green Energy, 2019, 16(7): 520-529.
- [4] WANG Hong, FENG Rongzhen, DUAN Huanlin, et al. Investigation into the ice generator with double supercooled heat exchangers[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 98:380-386.
- [5] RAMACHANDRA V D, PERRY H L, JOHN S L, et al. Measurement and numerical analysis of freezing in solutions enclosed in a small container [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(9): 1915-1931.
- [6] GOU Yujun, QIN Yi, LI Jiachun, et al. Experimental investigation of the effect of stable magnetic field on droplet freezing [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2024, 150: 111060.
- [7] BERNO G M, KNABBEN F T, HERMES C J L. Modeling of the time evolution of the solidification front in ice cubes[J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 143: 37-42.
- [8] 周全, 蔡松素, 孔晓鸣, 等. 家用制冰机结冰过程的建模研究[J]. 机电一体化, 2013, 19(11): 63-65.  
ZHOU Quan, CAI Songsu, KONG Xiaoming, et al. Modeling study on household ice-making process of ice-maker[J]. Mechatronics, 2013, 19(11): 63-65.
- [9] 时竞竞, 刘道平, 余守杰, 等. 改进型真空制冰系统的性能研究[J]. 制冷学报, 2012, 33(1): 60-64.  
SHI Jingjing, LIU Daoping, YU Shoujie, et al. Performance study on improved vacuum ice slurry making equipment [J]. Journal of Refrigeration, 2012, 33(1): 60-64.
- [10] 杜玉吉, 周长江, 丁为俊, 等. 制冰桶结构对制冰性能影响的数值模拟分析研究[J]. 建筑热能通风空调, 2021, 40(7): 6-9.