

冷冻剑结构对块冰机制冰性能影响的数值模拟

Numerical simulation of the effect of freezing sword structure on the ice performance of block ice machine

孙 欢 杨 凯 刘晓彤

SUN Huan YANG Kai LIU Xiaotong

(天津商业大学天津市制冷技术重点实验室, 天津 300314)

(Tianjin University of Commerce, Key Laboratory of Tianjin Refrigeration Technology, Tianjin 300314, China)

摘要:目的:在直冷式块冰机冰模蒸发器内部增设冷冻剑以实现快速制冰。方法:使用 COMSOL 模拟冷冻剑截面形状及冷冻剑倾角对制冰过程的影响。结果:随着制冰过程的持续进行,增设不同截面形状冷冻剑的冰模内部平均温度不断降低,冰模内固相体积分数也随时间而增加,但在相同时间内增设圆形截面冷冻剑的冰模内部平均温度要比三角形、矩形和菱形低 $0.1\sim 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此外,冷冻剑倾角越小制冰速率越快。结论:冷冻剑截面形状为圆形或近圆形时,制冰速率较快;且在保证便于脱冰的前提下,应尽可能减小冷冻剑倾角。

关键词:块冰机;冷冻剑;截面形状;倾角;数值模拟

Abstract: **Objective:** To add a freezing sword inside the evaporator of the ice mould of a direct-cooled block ice machine to achieve rapid ice production. **Methods:** COMSOL was used to simulate the effects of the cross-sectional shape of the freezing sword and the freezing sword inclination angle on the ice production process. **Results:** As the ice making process continued, the average internal temperature of the ice mould with additional freezing swords of different cross-sectional shapes decreased and the volume fraction of solid phase in the ice mould increased with time, but the average internal temperature of the ice mould with additional freezing swords of circular cross-section was $0.1\sim 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ lower than that of triangular, rectangular and diamond shapes in the same time. In addition, the lower the freezing sword inclination angle was, the faster of the ice production rate it was. **Conclusion:** The ice-making rate is faster when the cross-section shape of the freezing sword is round or nearly round. Under the premise of ensuring easy de-icing, the angle of inclination of the freezing sword should be reduced as much as possible.

基金项目:天津市企业科技特派员项目(编号:22YDTPJC00250)

作者简介:孙欢(1981—),男,天津商业大学副教授,博士。

E-mail: sunhuan@tjcu.edu.cn

收稿日期:2023-06-01 **改回日期:**2023-10-25

Keywords: block ice machine; freezing sword; cross-sectional shape; inclination; numerical simulation

直冷式块冰机是一种利用制冷剂与冰模蒸发器内低温水直接进行换热的制冰装置,其特征需要将冰模内的水冻结成整块冰后再脱冰。相比于盐水制冰机,直冷式块冰机在技术上具有制冰速率快、制冰过程稳定的优点;在操作运行方面具有操作简单,容易控制的优点;此外,尽管与流化冰、管冰和片冰等其他制冰设备相比,在制冰能耗、设备体积以及使用成本上存在劣势^[1],但由于其制取的成品冰温度低、硬度大、形状规整,远距离运输过程中冷量损失较小等诸多优势,它仍然是农业、渔业的主要制冰设备之一。

目前有关直冷式块冰机的研究主要集中在块冰机脱冰方式^[2-5]、冰模蒸发器结构改进^[6-7]以及块冰机产冰特性等方面。陈红兵等^[8]、贾磊等^[9]通过试验和数值模拟的方式研究了环境温度和初始水温对成品冰厚度、产冰量和耗电量的影响,并指出环境温度是影响制冰速率的主要因素。其中水温通过影响系统的热负荷而影响系统性能,环境温度决定了冷凝器的散热环境优劣^[10]。Fatahillah 等^[11]对盐水制冰的研究表明,初始水温和盐水温度越低,盐水罐内的结冰速率越快,冻结时间越短。此外,Sukborom 等^[12]根据冻结时间对池温的敏感性区分,确定了最佳池温为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。持续降低制冰温度虽然会提高制冰速率,但系统能耗也会随之增加。因此,无论是直冷式块冰机,还是盐水制冰机,通过降低制冰温度提高制冰速率是受限的。相比于降低制冰温度和给水温度,从结构上对冰模蒸发器进行改进也是提高制冰性能的一个有效措施。

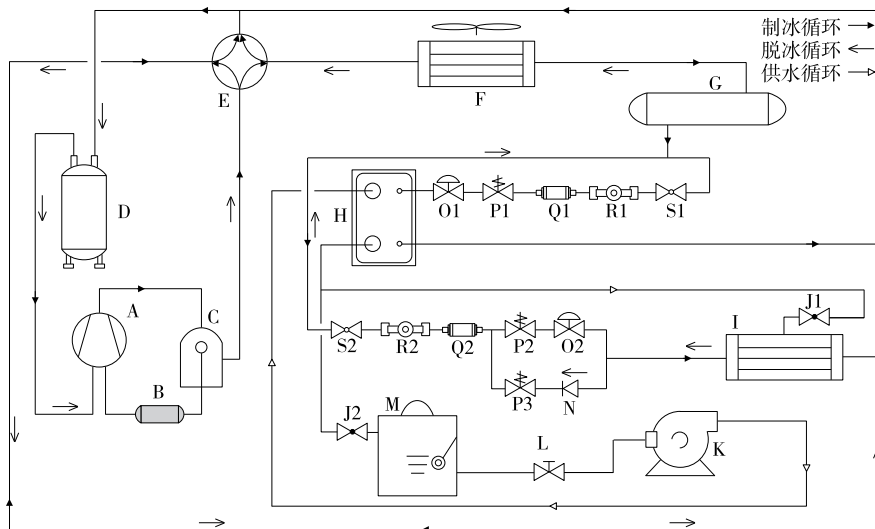
直冷式块冰机主要存在的技术缺陷之一是随着制冰时间的增加,冰层厚度增加,传热热阻也随之增加,从而降低了传热速率^[13-14]。因此,对于中大型块冰机,冰块厚度不宜过大,否则不仅会延长制冰周期,降低制冰效率,块冰有时还会因冻结时间不足存在空心冰的现象。

为了克服以上缺陷,研究提出在块冰机冰模内部设置冷冻剑,其实质上是一种蒸发器,呈细长形状,并且具有适度倾斜,类似于剑。冷冻剑内部设有制冷剂通道,低温制冷剂通过冷冻剑外表面与水进行热交换。因此,通过在冰模内部增设冷冻剑,可以增加冰模与水的换热面积,从而在保证冰块温度、硬度的同时实现快速制冰。

1 直冷式块冰机制冰系统

直冷式块冰机制冰系统工作原理如图 1 所示。该制冰机包括制冷循环和供水循环,其工作流程通过 PLC 实现自动控制。其中制冷循环存在制冰和脱冰两种运行模式。制冰模式和脱冰模式的切换依靠换向四通阀来实现,当处于脱冰模式时整个制冷系统处于逆向运行模式,冰模蒸发器作为冷凝侧冷却制冷剂,而冷凝器作为蒸发侧吸收环境的热量。

制冰模式循环过程:压缩机 A 排出的高温高压气态制冷剂经油分离器 C 后进入风冷式冷凝器 F 放热,冷凝为液态制冷剂。系统内多余的制冷剂储存在储液器 G 中,其余的制冷剂在储液器出口分为两路,其中一路经电子膨胀阀 O1 节流之后进入板式换热器 H 中,预冷制冰循环水;另一路经电子膨胀阀 O2 节流之后进入蒸发器吸热蒸发制取冰块,之后,板式换热器和蒸发器出口的气态制冷剂在换向四通阀 E 出口汇合,然后进入气液分离器 D 中,之后被吸入压缩机 A 中压缩。脱冰模式循环过程为制冰循环的逆过程,脱冰模式运行过程中,电磁阀 P1 和 P2 关闭,电磁阀 P3 打开,单向阀 N 工作,四通换向阀 E 切换。值得指出的是,在制冰用水预冷过程中,注水球阀 J2 打开, J1 关闭,当循环水预冷到指定温度时,板式蒸发器 H 停止工作,而注水球阀 J1 仅在向冰模内注水的过程中开启。



A. 压缩机 B. 干燥过滤器 C. 油分离器 D. 气液分离器 E. 换向四通阀 F. 风冷式冷凝器 G. 储液器 H. 板式换热器 I. 冰模蒸发器 J1、J2. 注水球阀 K. 给水泵 L. 截止阀 M. 储水箱 N. 单向阀 O1、O2. 电子膨胀阀 P1、P2、P3. 电磁阀 Q1、Q2. 干燥器 R1、R2. 视镜 S1、S2. 手球阀

图 1 直冷式块冰机制冰系统工作原理图

Figure 1 Principle of operation of the direct cooling block ice machine

2 模型的建立

2.1 物理模型

冰模体积的大小将会影响冰块冻结速度。冰块过厚时,冰块冻结时间过长,制冰效率降低;当冰块过薄时,冻结时间缩短,但由于制冰模式和脱冰模式切换频繁,会导致机组运行效率降低。因此,应在保证冰块使用厚度的前提下,尽可能增加冰块高度而减小冰块厚度^[15]。

试验所用的冰模蒸发器为 4 个冰模组成的冰模组。图 2 为冰模三维示意图,每块冰横截面 1/3 处和 2/3 处有两个冷冻剑。图 3 为 4 种截面形状冷冻剑的平面示意图,分别是:圆形冷冻剑、三角形冷冻剑、矩形冷冻剑和菱形冷冻剑。为了保证冷冻剑的换热面积相同,冷冻剑横

截面周长均为 100 mm。

2.2 数学模型

冰的凝固属于相变过程,其特点是区域存在着一个随时间移动的两相界面,界面的位置未知,在该界面上放出或吸收潜热,这类问题被称为移动边界问题。在对相变传热进行求解时,主要有等效热容法、焓法等,等效热容法把物质的相变潜热看作是在足够宽的相变区域内有一个很大的显热热容;焓法是以焓作为因变函数,将其带入传热微分方程对温度场进行求解的一种计算方法^[16]。研究基于 COMSOL 软件提供的等效热容法对冰模内水结冰过程进行数值模拟。

根据能量守恒原理,冰水相变传热方程的微分形式为:

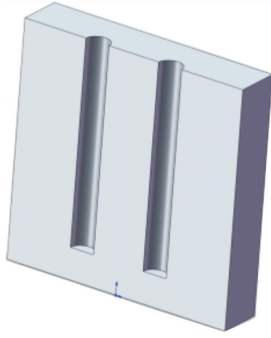


图 2 冰模三维示意图

Figure 2 3D schematic of the ice mould

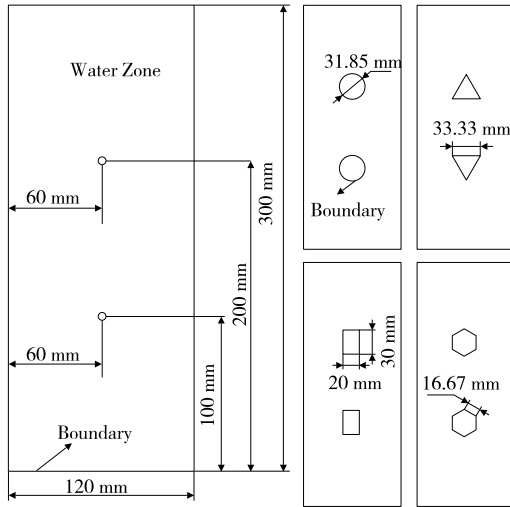


图 3 不同截面形状冷冻剑的平面示意图

Figure 3 Plan view of different cross-sectional shapes of frozen swords

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} + \rho L \frac{\partial \theta_1}{\partial t} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

式中:

k ——导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

$\dot{q}$ ——体积热生成率, W/m^3 ;

ρ ——密度, kg/m^3 ;

L ——相变潜热, J/kg ;

C_p ——比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

θ_1 ——液相率。

假设式(1)中 θ_1 在相变区间内呈线性分布, 则 θ_1 表示为:

$$\theta_1 = \begin{cases} 0 & T \leq T_s \\ \frac{T - T_s}{T_1 - T_s} & T_s \leq T \leq T_1 \\ 1 & T \geq T_1 \end{cases}, \quad (2)$$

式中:

T_s ——相变下限温度, $^{\circ}\text{C}$;

T_1 ——相变上限温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

将式(2)代入式(1)中整理得:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho \left(C_p + \frac{L}{T_1 - T_s} \right) \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (3)$$

其中 $C_{p,e} = C_p + L/(T_1 - T_s)$ 为显热热容, 可定义为:

$$C_{p,e} = \begin{cases} C_s & T \leq T_s \\ \frac{C_s - C_l}{2} & T_s \leq T \leq T_1 \\ C_l & T \geq T_1 \end{cases}, \quad (4)$$

式中:

C_s ——水的固态比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

C_l ——水的液态比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

将式(4)代入式(1), 得到等效热容法的相变传热微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho C_{p,e} \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (5)$$

求解式(5)可以得到瞬时的温度场, 进而可确定相变界面瞬时迁移变化。

2.3 网格划分及网格独立性验证

采用 COMSOL6.0 自动划分网格, 即选择物理场控制网格。由于网格质量会影响数值计算结果, 因此分别选择常规、较细化、超细化和极细化的网格单元类型进行网格独立性验证, 图 4(a)和图 4(b)分别为采用 4 种不同网格单元类型时, 冰模内平均温度和固相体积分数的变化曲线, 可以看出随着网格密度增加, 网格单元大小不断减小, 曲线波动幅度不断减小, 误差不断趋于稳定, 当采用超细化和极细化网格单元大小时, 平均温度和相体积分曲线几乎重合, 结果趋于一致。因此, 为了减少计算时间, 最终选定二维和三维模型的网格单元类型均为超细化网格, 网格划分如图 5(a)和图 5(b)所示。

2.4 模型验证

利用 MATLAB 建立焓法的数值模型^[9], 并对二维结冰过程进行数值计算来验证试验数值模型的正确性。为了保证模型验证的可靠性, 采用多组模拟条件: 无冷冻剑, 冰模内水域温度 T_{water} 为 5°C , 制冰温度 T_e 。分别为 -10°C , -15°C 进行验证。图 6 为模型验证结果。此外提出利用固相体积分数相对误差来量化 COMSOL 模拟结果的可靠性, 如式(6)所示。

$$\delta = \left(\frac{\theta_{\text{ice},a} - \theta_{\text{ice},b}}{\theta_{\text{ice},b}} \right) \times 100\%, \quad (6)$$

式中:

δ ——固相体积分数相对误差, %;

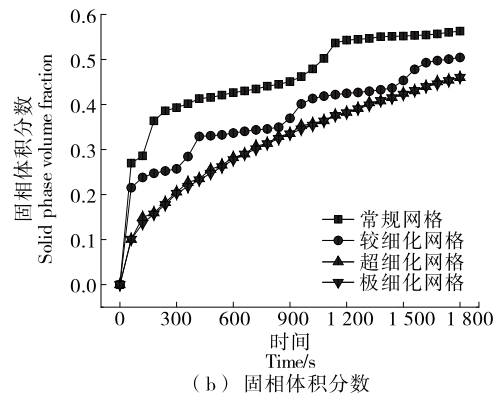
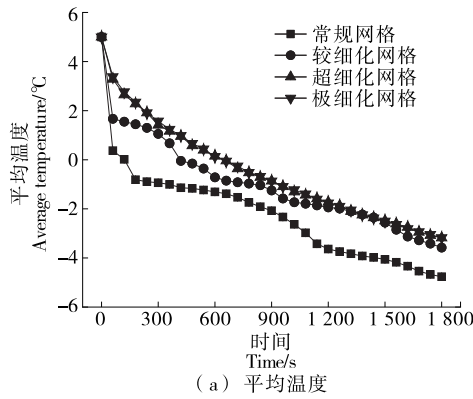


图4 网格独立性验证

Figure 4 Grid independence verification

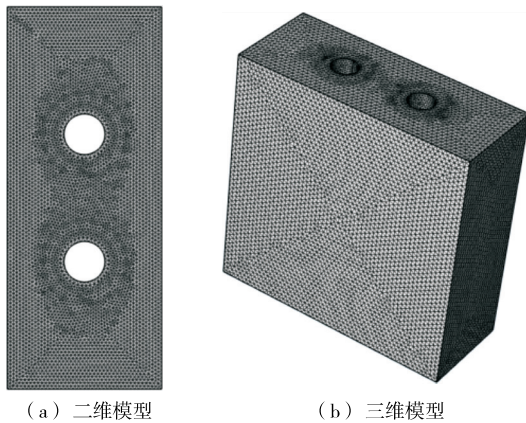


图5 网格划分示意图

Figure 5 Schematic diagram of the grid division

$\theta_{ice,a}$ ——采用等效热容法利用 COMSOL 模拟的固相体积分数;

$\theta_{ice,b}$ ——采用焓法利用 MATLAB 模拟的固相体积分数。

由图 6 可知,2 种工况下,COMSOL 与 MATLAB 模拟的固相体积分数的相对误差仅在模拟初期的较短时间内较大,随着时间增加,相对误差均位于 $\pm 10\%$ 的范围内。因此,利用 COMSOL 模拟的其他二维以及三维结冰过程具有一定的可靠性。

3 结果与讨论

3.1 冷冻剑对制冰性能的影响

在制冰系统实际运行过程中,制冰用水通过板式换热器被预冷,水温维持在 $2\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。试验中,冰模内水域温度 T_{water} 设置为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,冰模壁面和冷冻剑表面温度恒定为 T_e ,为减少模拟时间,几何模型采用图 3 中的二维模型,模拟结果如图 7 所示。从图 7(a)可以看出,在相同时间内,制冰温度为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰模内温降速率要快于制冰温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的;而在制冰温度均为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,在增设圆形冷冻剑后,冰模内温降速率加快,且几乎与 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 制

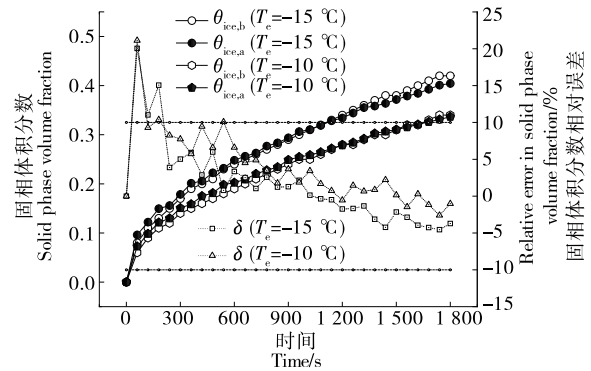


图6 模型验证结果

Figure 6 Model validation results

冰温度下的温降速率保持一致的趋势。类似的,随着制冰时间延长,冰模内固相体积分数随之增加,但在相同时间内, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的制冰温度下冰模内固相体积分数要明显低于其他两者。说明降低制冰温度能够提高制冰速率,而在不改变制冰温度的情况下,增设冷冻剑可以达到相同的效果。因此,相比于降低制冰温度会在一定程度上降低制冰系统效率,从冰模结构上通过增设冷冻剑来增加冷冻面是一种提高制冰性能的有效措施。

3.2 冷冻剑截面形状对制冰性能的影响

将冰模内水域温度 T_{water} 设置为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,冰模壁面和冷冻剑表面温度 T_e 设置为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的边界条件下进行数值模拟,为减少模拟时间,几何模型仍采用图 3 中的二维模型,模拟结果如图 8 所示。

其中冰模内平均温度差值 ΔT_{ave} 的计算:

$$\Delta T_{\text{ave}}^i = T_i - T_0, \quad (7)$$

式中:

T_i ——冰模内部平均温度, $^{\circ}\text{C}$;

i ——0,1,2,3,分别对应圆形冷冻剑、菱形冷冻剑、矩形冷冻剑和三角形冷冻剑。

冰模内固相体积分数差值 $\Delta \theta_{\text{ice}}$ 的计算:

$$\Delta \theta_{\text{ice}}^i = \theta_i - \theta_0, \quad (8)$$

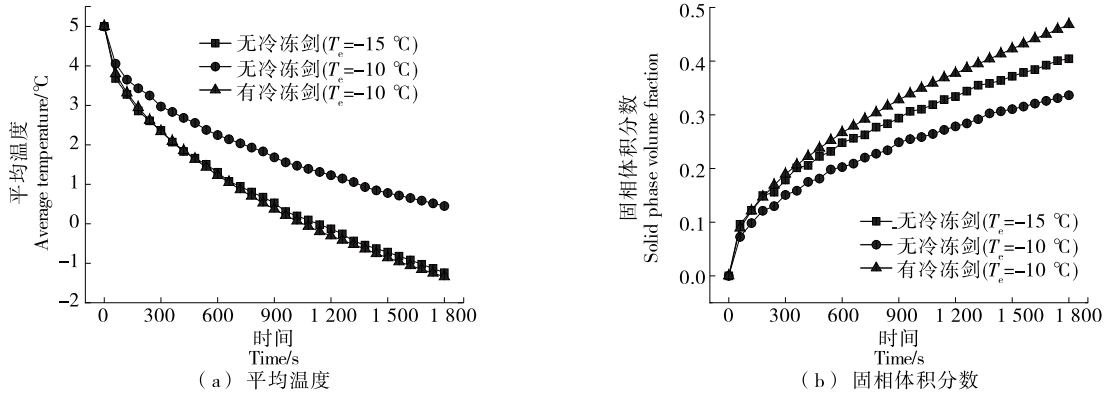


图 7 冷冻剑对制冰过程的影响

Figure 7 The effects of freezing swords on the ice making process

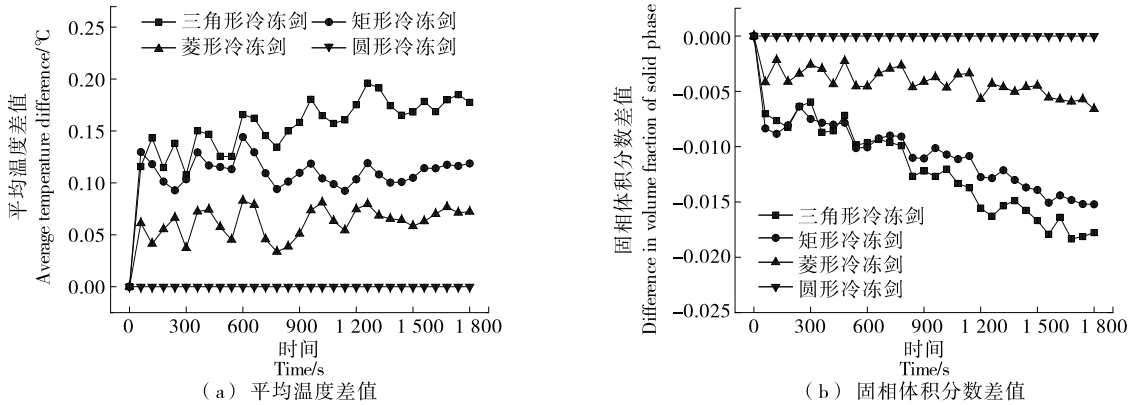


图 8 冷冻剑截面形状对制冰过程的影响

Figure 8 The effects of the cross-sectional shape of the freezing sword on the ice making process

式中:

θ_i ——冰模内固相体积分数。

从图 8(a)可以看出,相同时间内, $\Delta T_{\text{ave}}^3 > \Delta T_{\text{ave}}^2 > \Delta T_{\text{ave}}^1 > \Delta T_{\text{ave}}^0$, 平均温度差值越小表示实际冰模内平均温度越低,因此,相同时间内,冷冻剑截面为三角形的冰模内部平均温度最高,矩形和菱形的次之,冷冻剑截面为圆形的冰模内部平均温度最低。如制冰时间为 1 800 s 时,增设圆形冷冻剑的冰模内部平均温度为 -5.92°C , 分别比菱形、矩形和三角形低 $0.07, 0.12, 0.18^\circ\text{C}$; 并且随着制冰时间增加,平均温度差值在波动中呈增加趋势。从图 8(b)可以看出,相同时间内, $\Delta \theta_{\text{ice}}^0 > \Delta \theta_{\text{ice}}^1 > \Delta \theta_{\text{ice}}^2 > \Delta \theta_{\text{ice}}^3$, 固相体积分数差值越大表示实际冰模内固相体积分数越高,即结冰率越高,因此相同时间内,冷冻剑截面为圆形的冰模内固相体积分数最大,矩形和菱形的次之,冷冻剑截面为三角形的冰模内固相体积分数最小,如制冰时间为 1 800 s 时,增设圆形冷冻剑的冰模内固相体积分数为 0.657 8, 分别比菱形、矩形和三角形高 $0.006 6, 0.015 2, 0.017 8$ 。因此,综合冰模内平均温度和固相体积分数的结果曲线,相同时间内在冰模内部设置圆形冷冻剑时,制冰速率要优于其他截面形状的冷冻剑,并且冷冻剑的截

面形状越接近于圆形,制冰速率越快。

3.3 冷冻剑倾角对制冰性能的影响

在增设冷冻剑后,为了便于脱冰过程中脱模,冷冻剑需要具备一定的倾角,加工成横截面上粗下细的形状。

水域温度 T_{water} 设置为 5°C , 冰模壁面(包括侧面和底面)和冷冻剑表面温度 T_c 设置为 -20°C , 几何模型采用图 2 中的三维模型,由于冰模顶面与水面接触不严,存在空气间隙,因此在块冰的实际生产中,冰模顶面一般做保温处理,设置顶面为热绝缘的边界条件,模拟结果如图 9 所示。相同时间内,冷冻剑倾角越小,冰模内平均温度越低,固相体积分数越高,结冰速度越快。因此,为了保证顺利脱冰的同时提高结冰速率,冷冻剑倾角应设置得尽可能小(图 10)。

4 结论

研究提出了一种直冷式块冰制冰系统,并通过 COMSOL 模拟了在块冰机的冰模蒸发器内部增设不同截面形状冷冻剑和冷冻剑倾角对制冰性能的影响。结果表明,降低制冰温度能够提高制冰速率,而在冰模内部增设冷冻剑可以达到相同效果。相同制冰温度下,相同时间内冷冻剑截面形状为圆形时,冰模内固相体积分数最

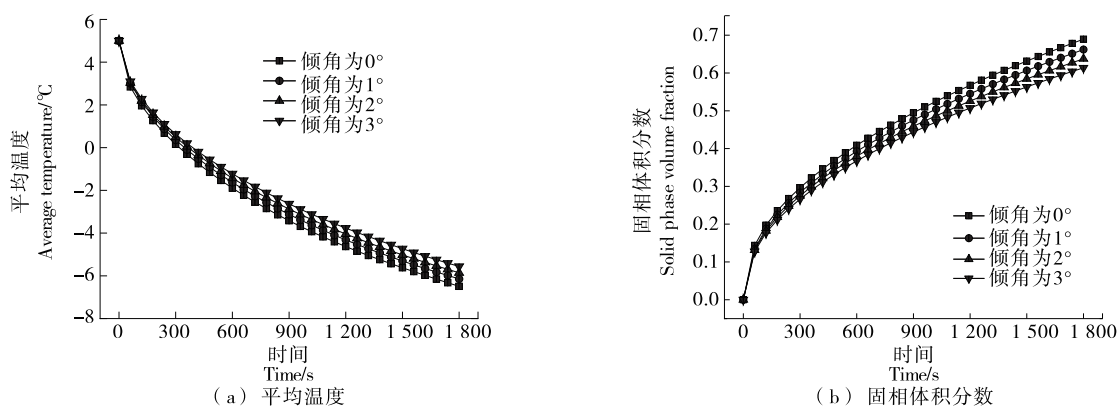


图9 冷冻剑倾角对制冰性能的影响

Figure 9 The effects of freezing sword inclination on ice production performance

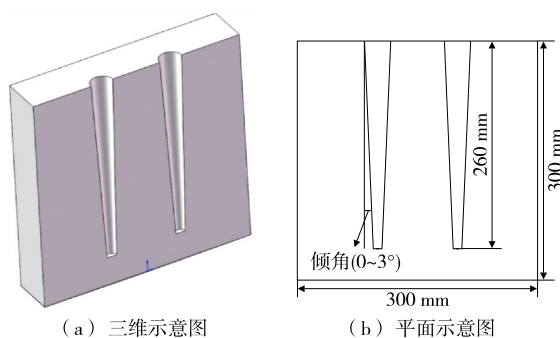


图10 冷冻剑倾角示意图

Figure 10 Diagram of freezing sword inclination

高,其次分别为菱形、矩形和三角形,因此,增加圆形或近圆形截面的冷冻剑时制冰速率较快。冷冻剑倾角的模拟结果表明,相同制冰温度下,冷冻剑倾角越小,结冰速率越快。

此外,增设冷冻剑虽然会提高制冰速率,但会使系统结构变得复杂,需要单独设置引入冷冻剑的制冷剂回路,为了充分利用冷冻剑可以提高制冰速率的作用,维持系统稳定,冰块尺寸不宜过小,否则制冰和脱冰模式的频繁切换不利于系统稳定,降低系统效率,而且尺寸过小的冷冻剑不利于生产加工制造。因此,建议中大型的块冰机采用冷冻剑结构。

参考文献

- [1] 张皖君, 蓝蔚青, 肖蕾, 等. 流化冰在水产品保鲜中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2016, 32(7): 214-218.
ZHANG W J, LAN W Q, XIAO L, et al. Research progress on application of slurry ice for aquatic products preservation[J]. Food & Machinery, 2016, 32(7): 214-218.
- [2] 徐延辉. 制冰机热气除霜对压缩机可靠性影响研究[J]. 家电科技, 2018(1): 60-62.
XU Y H. Study on the effect of hot gas defrost on compressor reliability [J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2018(1): 60-62.
- [3] 王小伟, 莫绍飞, 罗远仁, 等. 一种直冷式块冰机蒸发器:

CN202022738503.2[P]. 2021-08-10.

WANG X W, MO S F, LUO Y R, et al. A kind of direct-cooled block ice machine evaporator: CN202022738503.2[P]. 2021-08-10.

- [4] 金伟, 霍广东. 一种直冷式块冰机节能高效快速融冰系统: CN202020077865.9[P]. 2020-10-23.

JIN W, HUO G D. A kind of direct-cooled block ice machine energy-saving and high-efficiency rapid ice melting system: CN202020077865.9[P]. 2020-10-23.

- [5] 邱江文. 制冷板及块冰机蒸发器: CN202020209637.2[P]. 2020-10-30.

QIU J W. Refrigeration panels and block ice machine evaporator: CN202020209637.2[P]. 2020-10-30.

- [6] 于荣富, 林建振. 块冰机蒸发器: CN201120077983.0[P]. 2011-11-23.

YU R F, LIN J Z. Block ice machine evaporator: CN201120077983.0 [P]. 2011-11-23.

- [7] 邱江文. 拼接式蒸发器及块冰机: CN202121439134.5[P]. 2021-12-28.

QIU J W. Spliced evaporator and block ice machine: CN202121439134.5[P]. 2021-12-28.

- [8] 陈红兵, 贾磊, 舒国安, 等. 家用自动制冰机产冰特性研究[J]. 流体机械, 2008(4): 80-82, 62.

CHEN H B, JIA L, SHU G A, et al. Research on freezing process property of household automatic ice machine[J]. Fluid Machinery, 2008(4): 80-82, 62.

- [9] 贾磊, 蒋德伦. 家用制冰机结冰过程的理论与实验研究[J]. 制冷, 2007(1): 10-13.

JIA L, JIANG D L. Theoretical and experimental research on freezing process of household ice machine[J]. Refrigeration, 2007 (1): 10-13.

- [10] 魏华锋, 郭光华. 商用制冰机的性能研究[J]. 制冷与空调, 2013, 13(11): 106-109.

WEI H F, GUO G H. Research on performance of commercial ice maker [J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2013, 13 (11): 106-109.

(下转第138页)

- [12] 彭丽, 高姗, 熊思国, 等. 不同预冷温度对甜樱桃果实保鲜效果的影响[J]. 包装工程, 2023, 44(7): 104-114.
- PENG L, GAO S, XIONG S G, et al. Effects of different precooling temperature on the preservation of sweet cherry[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(7): 104-114.
- [13] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
- CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Experiment guidance on postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.
- [14] ZHENG Q L, ZUO J H, GU S T, et al. Putrescine treatment reduces yellowing during senescence of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) [J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 152: 29-35.
- [15] WANG J H, YOU Y L, CHEN W X, et al. Optimal hypobaric treatment delays ripening of honey peach fruit via increasing endogenous energy status and enhancing antioxidant defence systems during storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 101: 1-9.
- [16] SHI J Y, ZUO J H, ZHOU F H, et al. Low-temperature conditioning enhances chilling tolerance and reduces damage in cold-stored eggplant (*Solanum melongena* L.) fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 141: 23-38.
- [17] XIONG S G, SUN X S, TIAN M X, et al. 1-Methylcyclopropene treatment delays the softening of *Actinidia arguta* fruit by reducing cell wall degradation and modulating carbohydrate metabolism[J]. Food Chemistry, 2023, 411: 135485.
- [18] JIAO W X, XI Y, CAO J K, et al. Regulatory effects of CaCl_2 , sodium isoascorbate, and 1-methylcyclopropene on chilling injury of banana fruit at two ripening stages and the mechanisms involved[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(2): e13442.
- [19] LI X, ZHANG C Y, WANG X Q, et al. Integration of metabolome and transcriptome profiling reveals the effect of modified atmosphere packaging (MAP) on the browning of fresh-cut Lanzhou lily (*Lilium davidii* var. *unicolor*) bulbs during storage [J]. Foods, 2023, 12(6): 1 335.
- [20] 张鹏, 康丹丹, 魏宝东, 等. 微环境气调包装对兰州百合采后衰老与防御酶的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(13): 317-323.
- ZHANG P, KANG D D, WEI B D, et al. Effects of micro-environment modified atmosphere package on postharvest senescence and defense enzymes of Lanzhou lily[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(13): 317-323.
- [21] 田密霞, 胡文忠, 王艳颖, 等. 山梨酸钾、异抗坏血酸钠及包装方式对鲜切梨的影响[J]. 食品工业科技, 2011, 32(7): 382-385.
- TIAN M X, HU W Z, WANG Y Y, et al. Effect of potassium sorbate, sodium isoascorbate and the different packing on fresh-cut pears[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(7): 382-385.

(上接第 83 页)

- [11] FATAHILLAH A, SETIAWAN T B, SHOLIHIN A. Numerical analysis of ice freezing processes of block ice production in a brine tank factory using the finite volume method[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1 832(1): 12-23.
- [12] SUKBOROM P, CHINSUWAN A. Effects of feed water temperature, pool temperature, and pool side heat transfer coefficient on freezing time of the conventional block ice production[J]. Energy Procedia, 2017, 138: 63-68.
- [13] 方贵银, 邢琳, 杨帆. 蓄冷空调技术[J]. 电力需求侧管理, 2005(2): 42-45.
- FANG G Y, XING L, YANG F. Cool storage conditioning technology[J]. Power Demand Side Management, 2005(2): 42-45.
- [14] ZHAO J D, LIU N, KANG Y M. Optimization of ice making period for ice storage system with flake ice maker[J]. Energy & Buildings, 2008, 40(9): 1 623-1 627.
- [15] 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.
- DU Y J, ZHOU C J, DING W J, et al. Influence of ice bucket structure on ice making performance based on fluent[J]. Building Energy & Environment, 2021, 40(7): 6-9.
- [16] 潘艾刚, 王俊彪, 张贤杰. 基于等效热容法和焓法的相变传热数值分析[J]. 计算机仿真, 2014, 31(2): 315-319.
- PAN A G, WANG J B, ZHANG X J. Numerical analysis of phase-change heat transfer characteristics using effective heat capacity method and enthalpy method[J]. Computer Simulation, 2014, 31(2): 315-319.

(上接第 116 页)

- [24] 余雯, 梁瑞红, 李俣, 等. 南酸枣糕贮藏过程中非酶褐变的研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(2): 319-321, 326.
- YU W, LIANG R H, LI T, et al. Research on non-enzymatic browning reaction of *Choerospondias axillaris* fruit cake during storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(2): 319-321, 326.
- [25] 徐鹏程, 王苒玮, 罗小虎, 等. 电子束辐照对留胚米理化性质及食用品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(4): 41-47.
- XU P C, WANG J W, LUO X H, et al. Effect of electron beam irradiation on physicochemical properties and edible qualities of rice with remained germ [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(4): 41-47.
- [26] ROIG M G, BELLO J F, RIVERA Z S, et al. Studies on the occurrence of non-enzymatic browning during storage of citrus juice[J]. Food Research International, 1999, 32(9): 609-619.