

文章编号: 1004-7271(2001)04-0359-05

·综述·

## 食品冻结装置配风系统的优化

### Optimization of air distribution system in food freezing equipment

葛茂泉, 曾春利

(上海水产大学食品学院, 上海 200090)

GE Mao-quan, ZENG Chun-li

College of Food Science Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China)

关键词: 冻结装置; 配风系统; 气流状态

Key words: freezing equipment; air distribution system; airflow state

中图分类号: TD66 文献标识码: A

采用尽可能快的冻结速度是保证食品冻结质量的主要方法。冻结时间的长短取决于被冻食品的几何尺寸、几何形状、含水率、热导率、冷却介质温度及其与被冻食品之间的对流换热强度等因素。冷却介质温度取决于热交换器的复合换热效率; 而食品的含水率、热导率等参数是由食品固有性质决定的, 不能进行人为地改变。因此, 对于以空气为冷却介质的冻结装置, 为了实现快速冻结, 唯一可行的途径就是在技术经济指针允许的前提下, 最大限度地降低冷却介质的温度和提高冷却介质与被冻食品之间的对流换热强度。由此可见, 除了冷却介质温度高低之外, 配风系统是否合理和高效是衡量冻结装置优劣的主要标志。

## 1 配风系统与食品冻结速度的关系

### 1.1 食品冻结装置热交换器的增强传热

制冷剂蒸发温度和冷分配设备传热面积相同时, 冷却介质温度高低取决于热交换器的传热效果。目前大宗采用的食品冻结装置离不开冷风机。增强传热的主要措施之一是提高热交换器的传热系数。由于构成热交换器的金属盘管管壁热阻很小, 为便于分析研究, 可将传热系数简化为:  $K = \alpha_1 \alpha_2 / (\alpha_1 + \alpha_2)$ 。该式示出,  $K$  值必然比  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  两者中任何一个都小。提高传热系数最有效的途径是提高最小的一项  $\alpha$  值<sup>[1]</sup>。对于冷风机, 首先是在控制空气流动阻力大小的前提下, 提高最小截面上的风速和优化空气的流动状态。

### 1.2 食品冻结过程的增强传热

食品的冷加工, 包括冷却和冻结两个阶段。食品的冷却过程属于基本传热方式, 与食品的种类、形状和冷却介质有关。在以空气为冷却介质的冷却过程中, 冷却速度的快慢可用毕渥数  $Bi$  及傅利叶数  $Fo$  这两个准则数界定<sup>[1,2]</sup>。

收稿日期: 2001-04-10

基金项目: 企业资助研究项目(上海水产大学 98-03)

作者简介: 葛茂泉(1939-), 男, 山东省济南人, 教授, 主要从事制冷装置热力学教学与研究。Tel: 021-65710949, E-mail: tracyk@online.sh.cn

毕渥数  $Bi$  ( $Bi = \alpha L / \lambda$ ) 是固体内部单位导热面积上的导热热阻与固体表面单位面积上的对流换热热阻的比值, 反映在食品表面被冷却时, 其内部温度的变化和食品表面与周围环境的换热条件及其内部导热条件之间的关系。换热条件越强烈, 食品热量向表面传递的速度越快; 食品内部的导热热阻越小, 传递一定热量所需要的温度梯度则越小。究竟哪一个因素对食品冷却的影响更大, 可用毕渥数来衡量。当  $Bi < 0.1$  时, 表征着食品的热导率很大, 或者几何尺寸很小, 或者表面传热系数极低, 可以认为食品表面温度与热中心温度相等, 食品内部温度的变化只与时间有关, 而与空间无关, 即  $T = f(t)$ ; 当  $Bi > 40$  时, 表面对流换热热阻可以被忽略, 可以认为食品表面温度等于冷却介质温度。这是在食品表面传热系数很大的情况下发生的。只有当  $0.1 < Bi < 40$  时, 才需考虑导热热阻和表面对流换热热阻两方面的影响, 食品内部的温度分布是空间坐标和时间的函数, 即  $T = f(x, y, z, t)$ 。

傅利叶数  $Fo$  ( $Fo = \alpha t / L^2$ ) 的物理意义, 可以理解为从被冻食品边界发生热扰动的时刻到计算时刻的时间间隔与使热扰动扩散到  $L^2$  面积上所需时间相除得出的无量纲时间, 它反映导热速率与固体中热能储备速率之比。在不稳定导热过程中, 傅利叶数  $Fo$  越大, 热扰动就能越深入地传播到食品的内部, 使其内部各点的温度越接近于周围冷却介质的温度。

食品的冻结过程, 由于其物理性质发生了较大的变化, 使得冻结时间求解变得复杂。各种求解方法都是在设定的约束条件下, 结合试验修正归纳得出的。现以普朗克修正式为例, 分析影响食品冻结速度的诸多因素。

数学模型的适用条件:  $0.2 < Bi < 20$ ;  $0 < Pk < 0.55$ ;  $0.15 < Ste \leq 0.35$ 。

$$t = \frac{h_{10}}{(T_i - T_\infty)(ED)} \left[ P \frac{L}{\alpha} + R \frac{L^2}{\lambda} \right] \left[ 1 - \frac{1.65 Ste \ln\left(\frac{T_i - T_\infty}{-10 - T_\infty}\right)}{\lambda} \right]$$

式中——  $h_{10}$ : 食品的冻结点与  $-10^\circ\text{C}$  时的比焓差, ( $\text{kJ/kg}$ );  $T_i$ : 食品的冻结点, ( $^\circ\text{C}$ );  $T_\infty$ : 冷却介质温度, ( $^\circ\text{C}$ );  $\alpha$ : 食品的表面传热系数, [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ];  $ED$ : 当量尺寸。大平板  $ED = 1$ ; 长圆柱  $ED = 2$ ; 球体  $ED = 3$ ;  $L$ : 食品表面与热中心的最短距离;  $c, c_i$ : 食品冻结前和冻结后的比热容, [ $\text{J}/(\text{kgK})$ ]; ( $\text{cm}$ );  $\lambda$ : 食品冻结层的热导率, [ $\text{W}/(\text{mk})$ ];  $T_0$ : 食品的初温, ( $^\circ\text{C}$ );  $P$ : 食品的形状系数。  $P = 0.5 [1.026 + 0.5808 Pk + Ste(0.2296 Pk + 0.105)]$ ;  $R$ : 食品的形状系数。  $R = 0.125 [1.202 + Ste(3.41 Pk + 0.7336)]$ ;

$$Ste = c_i \frac{(T_i - T_\infty)}{h_{10}} \quad Pk = C \frac{T_0 - T_i}{h_{10}}$$

从上述分析可知, 热交换器换热表面和食品表面的表面传热系数都是影响冻结速度的决定因素。因此, 研究冻结装置的配风系统, 自然成为优化冻结装置性能的关键所在。

## 2 配风方式解析

### 2.1 间歇式冻结装置的配风方式

目前普遍应用的间歇式冻结装置, 无论是下送风直吹式、上送风吸入式, 还是静压箱条缝下吹式, 冷气流都是单向通过食品表面进行热交换, 不可避免的结果是: 上风侧的风温低、风速高, 食品降温快, 如图 1 中的曲线 b; 下风侧的风温高、风速低, 食品降温慢, 如图 1 中曲线 a。当上风侧的食品已经达到设定温度时, 下风侧的食品尚需继续降温 5、6 个小时, 甚至继续 10 余小时才能冻好, 不仅大幅度放慢了整体的冻结速度, 而且由于运转时间长、蒸发温

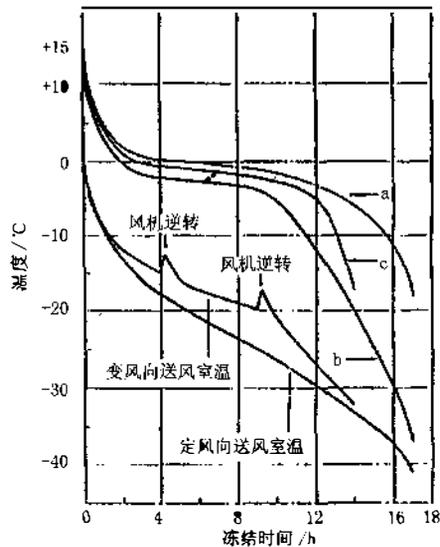


图 1 间歇式冻结装置中两种配风方式冻结曲线的比较

Fig. 1 Comparison of freezing curves of two air distribution patterns among intermittent freezing equipment

度低,造成能源的浪费。

为了改变这一弊端,人们曾经通过改变食品货位(回转式输送轨道)的方式,试图提高冻结速度的均匀性。但因在这种低温高湿的恶劣环境中,机械故障率高,初投资和经常运转费用也高,终究不是最妥善的解决办法。

更好地解决办法是:改变配风方式,实现均衡冻结。

采用可以正、逆送风的特型鼓风机,根据冻结室空气温度场和速度场的分布状态,在实时微机测控系统的监控下,自动的改变送风方向,让各个货位食品的受风上风侧与下风侧交替变换,使其上、下风侧食品冻结曲线 b 和 a 合并为图 1 中曲线 c,降温速度自然变得均匀快速,而且可以提高冷却介质温度,亦即提高蒸发温度,实现节能运行<sup>[3]</sup>。如果在这种配风方式的基础上,再采用变频技术控制鼓风机的送风量,采用可变蒸发面积的冷风机等新技术,在各个冻结阶段,控制与食品热负荷相匹配的最佳风速,定能进一步提高节能冻结的效果。

### 2.2 直线式连续冻结装置的配风方式

直线式连续冻结装置,一般把冷风机配置在传送带的上部,采用有风道纵向水平流、有风道垂直流、无风道纵向水平流等多种配风方式。有的则把热交换器置于传送带上方的两侧,采用钳形风道,形成对食品的上下对冲气流。

水平气流与冻品的关系大都是顺逆交叉配置形式。亦即进冻端呈逆流,出冻端呈顺流;或者进冻端呈顺流,出冻端呈逆流。前者使进出货口处在负压区,容易造成外界热湿空气的侵入,增加制冷装置的热负荷及热交换器表面的结霜量;后者使进出货端处在正压区,虽然会有冷气外溢现象,但通过一些技术措施比较容易形成空气幕效果,一定程度上阻断冷、热空气的对流。

目前,更加合理、有效的配风方式有如下两种:

一种是热波动间歇式气流 - 在冷风机与传送带之间设置配风装置。图 2 所示是一种条缝形配风装置的气流状态模型。冷气流以较高风速沿条缝下吹,然后贴附在食品的上下表面水平流向冷风机的吸入端。在气流流经条缝折板下方时,流速减缓并形成涡流。这种快慢交替的间歇风,形成食品表面传热系数强弱的交替,和食品放热机理更加吻合,使得食品表面与冷风之间的温度差变大,获得更好的冷却效果。

图 3 中的曲线 No.1 是风道式配风的冻结曲线及空气温度,曲线 No.2 是采用条缝配风装置的冻结曲线及空气温度。在风量、空气温度相同的条件下,后者的冷却效果可以提高 30%<sup>[4]</sup>;另一种是上下

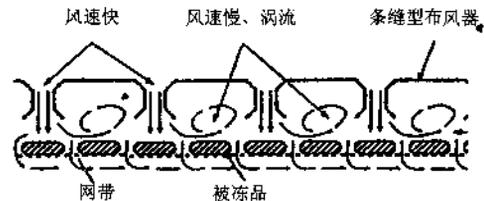


图 2 条缝形配风装置的气流状态模型  
Fig. 2 Airflow state model of chink air distribution equipment

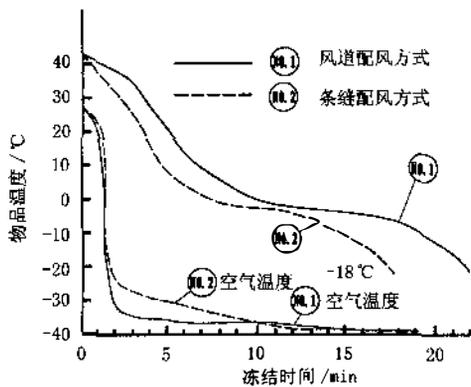


图 3 条缝形与风道式布风冻结时间的比较  
Fig. 3 Comparison of freezing time between chink-style air-distribution and piping-style air-distribution

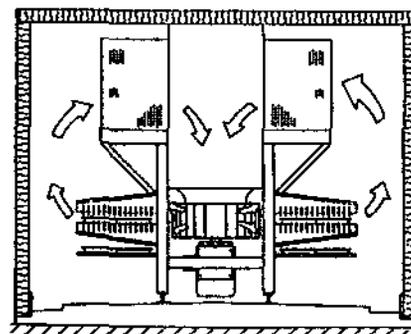


图 4 对冲喷射式冻结装置的结构示意图  
Fig. 4 Principle of twin-lane JET freezing equipment

对冲喷流式气流(图4)为对冲喷流式冻结装置的结构示意。钳形风道对食品上下表面喷射高速气流,进行强烈地热交换。从图5可见,这种配风方式无疑能极大地提高食品的冻结速度<sup>[5]</sup>。

### 2.3 螺旋式冻结装置的配风方式

螺旋式冻结装置的配风方式有水平送风、垂直下吹和上下对吹等多种气流组织方式。因其热交换路径短,而且很容易造成冻品移位、倒伏,所以已很少采用。现在大都采用如下两种配风方式:一种是垂直下吹式—瑞典 Frigoscandia 开发的堆积带螺旋式冻结器首先采用了这种配风方式。如图6所示,把气流流通断面限制在由链带内外侧壁围成的面积之内,不仅提高了气流流速,而且延长了气流与食品的热交换时间,同时又避免了食品发生位移、倒伏的可能;另一种是上下对吹式—美国 York 采用了这种气流组织方式。如图7所示,冷气流自下而上和自上而下地流经食品表面,然后从带塔的中部回风,不仅保持了较高的气流速度,而且使得食品的迎风面从单面顺序变成了上下两面,同时也能避免食品的位移和倒伏。显而易见,这种配风方式更有利于提高食品的冻结速度。

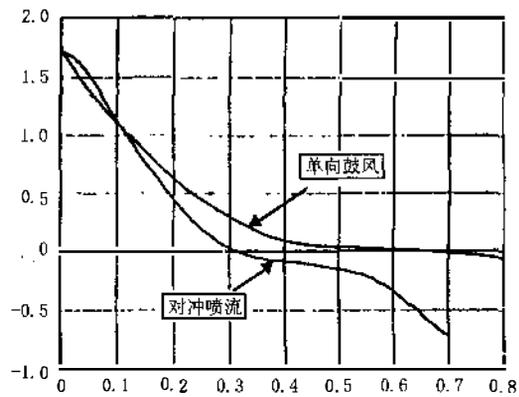


图5 对冲喷流式布风冻结效果比较  
Fig.5 Freezing effect comparison between stroke air-distribution and one-way

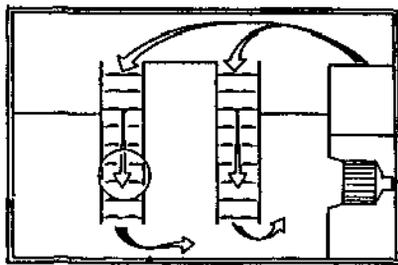


图6 螺旋式冻结器下吹式布风方式  
Fig.6 Down airflow pattern of spiral freezing equipment

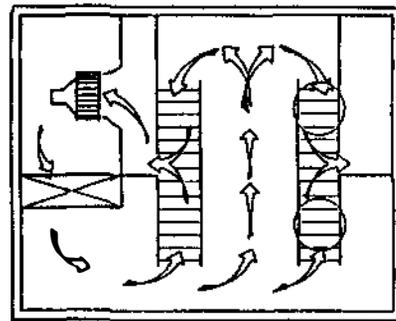


图7 螺旋式冻结器上下对吹式布风方式  
Fig.7 Stroke up and down air-distribution pattern of spiral freezing equipment

## 3 结论

进行冻结装置设计或选型,其配布风方式的合理性和气流组织的有效性,无疑是重要依据之一。根据以上对几种冻结装置配风系统的对比分析,有以下几点启示:

(1)在一定范围内提高食品表面对流换热的表面传热系数,可以提高冻结速度。但不能把加大鼓风机风量和风压作为提高送风风速的唯一手段。在同样风量和风压条件下,只要采取合理的布风系统和气流组织方式,同样可以获得较高的送风风速,降低鼓风机动力消耗,从而降低食品的冻结负荷。

(2)应把待冻食品作为一个整体看待。布风的均匀性、对称性是提高食品整体冻结速度的关键。在条件允许时尽量采用可变风向的布风系统,以实现整体均衡、快速、节能冻结之目的。

(3)鼓风机式冻结装置,食品受风面积的大小也对冻结速度构成影响。双面受风自然比单面受风的冻结速度快。因此,在进行气流组织时,一定要尽量加大食品的受风面积。

(4)食品在冻结过程中,其物性值将发生一定变化。而且在冻结过程的不同阶段,食品在单位时间

内的散热量也会有所不同。如果能使冻品的货间风速和冻品的放热规律相匹配,亦即采用变风量送风方式<sup>[6]</sup>,再加上可变换热面积、可变蒸发温度等进一步的技术措施,食品冻结装置的性能将发生革命性的变化。

(5)无论是间歇式冻结装置,还是连续式冻结装置,配风风口都是一个重要部件。有了相应的适用风口,可以实现送风口与回风口的随机转换;有了相应的适用风口,也可以取得热波间歇流的综合效果;有了相应的适用风口,又可以利用上下对冲喷流,最大限度地提高冻结速度。

### 参考文献

- [1] 章熙民,任泽霖,梅飞鸣.传热学[M].北京:中国建筑工业出版社,1998.49-72.
- [2] 华泽钊,李云飞,刘宝林.食品冷冻冷藏原理与设备[M].北京:机械工业出版社,1999.77-119.
- [3] Oaizaburo Fujitaka. Reverse Quick Freezer system[J]. Refrigeration, 1989, 7: 768-774.
- [4] Susumu Murai. Linear Type Continuous Freezing Equipment[J]. Refrigeration, 1995, 3: 238-244.
- [5] Kouichi Tsubeta. Jet Flow Belt Freezer, Coping With HACCP[J]. Refrigeration, 1999, 3: 181-185.
- [6] 葛茂泉,何 为,厉建国.鱼类冷加工过程的能量匹配[J].水产学报.2000,24(3):280-284.