

文章编号: 1000- 0615(2000)03- 0280- 05

鱼类冷加工过程的能量匹配

葛茂泉, 何 为, 厉建国
(上海水产大学食品学院, 上海 200090)

摘要: 以鱼类冷加工过程放热的动态特性为依据, 以冷加工时间为目标函数, 按照鱼体热物性非单值性特点, 对冻结室温、货间风速、鱼类类别及其几何尺寸和冻结速度之间的关系进行分析研究。论证用“三段法”取代“焓差法”计算货物负荷, 把最大冰结晶生成带放热量作为制冷能量配置主要依据的可行性。提出按照鱼体放热特点适时变换风速和保持室温稳定的制冷能量配置方案, 以期在维持必要的冻结速度、保证冻品质量的前提下, 实现节能运行之目的。

关键词: 鱼类冷加工; 冻结时间; 能量匹配

中图分类号: S983 文献标识码: A

Energy matching for fish cold processing

GE Mao-quan, HE Wei, LI Jiar-guo
(College of Food Science, Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China)

Abstract: Based on a dynamic characteristic of heat transfer in fish cold processing, with the objective function of the cold processing time, the relationships among freezing rate, freezer temperature, air velocity, fish category and fish size were analyzed and studied, according to a non-unique character of fish thermophysical properties. It pointed out that it is feasible to consider the amount of heat released in the zone of maximum crystallization as a major foundation for matching refrigeration capacity, and to calculate product load with three-stage method instead of enthalpy difference method. A method was put forward to match energy by changing air velocity in time and to maintain freezer temperature steady according to different fish properties so that it can save energy on the precondition of maintaining essential freezing rate and pledging frozen product quality.

Key words: fish cold processing; freezing time; energy matching

构成制冷装置的机器、设备、管件、控制点与需冷环境热负荷的优化匹配, 是提高制冷剂循环热效率, 实现节能运行的关键。制冷装置作为一个动态的分布参数系统, 所有参数均是时间的函数。大气温度、需冷环境热负荷、制冷压缩机输气量和蒸发器换热面积中任何一个发生扰动, 都可能引起系统内部的扰动, 并通过参数间的耦合关系, 引起相关参数的变化, 破坏制冷工况的平衡状态, 沿着接近或远离最佳匹配点的方向移动, 直到建立新的平衡点。如果新的平衡点偏离最佳匹配工况, 必然降低热效率和增加能耗。

在制冷压缩机容积输气量不变的条件下, 最易造成外部扰动的因素莫过于需冷环境的热负荷了。

收稿日期: 1999- 10- 08

基金项目: 企业资助研究项目(上海水产大学 98- 3)

作者简介: 葛茂泉(1939-), 男, 教授。Tel: 021- 65710343, E-mail: SfuGe@public3.sta.net.cn

鱼类冷加工过程中放热量和放热速度的不均匀分布, 造成冷分配设备负荷及制冷工况的波动, 使制冷效率下降。因此, 研究鱼类冷加工过程的放热机理和能量匹配的方法, 对实现制冷装置的优化设计具有重要意义。

1 鱼类冷加工过程的放热特性

1.1 鱼类冷加工过程的阶段性

鱼类在冷加工过程中, 其热中心温度的变化模式, 按照鱼体的放热特性划分为鱼体从初温至冻结点的预冷, 鱼体内部水组分的冻结和环境介质(本文指空气)低温向鱼体深部延伸的过冷却三个阶段^[1]。

以产业规模进行鱼类冷加工时, 科学地、定量地把握上述各阶段鱼体的放热特性、热量传递方式及降温所需时间, 是实现制冷装置优化设计、进行能量匹配的主要依据。

由于鱼体中水组分的固化相变是在冻结点至共晶点范围内逐渐完成的, 使实际热负荷的计算变得十分复杂。因此一般假设水组分的固化相变全部在鱼体冻结点完成。

冷加工热负荷可用下列公式表述:

$$\text{预冷阶段: } Q_1 = \int_{T_0}^{T_i} c \cdot m \cdot dT \quad (1)$$

$$\text{冻结阶段: } Q_2 = m \cdot h \cdot X_w \quad (2)$$

$$\text{过冷却阶段: } Q_3 = \int_{T_i}^{T_f} c_i \cdot m \cdot dT \quad (3)$$

$$\text{冷加工总热负荷: } Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (4)$$

式中, T_0 为鱼体的初温, $^{\circ}\text{C}$; T_i 为鱼体的冻结点, $^{\circ}\text{C}$; T_f 为鱼体的平均终温, 可近似等于设定的鱼体最终热中心温度 T_c , $^{\circ}\text{C}$; C 为鱼体温度高于冻结点时的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; C_i 为鱼体温度低于冻结点时的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; X_w 为鱼体中水组分的质量分数(%); h 为每千克鱼体的冻结潜热, kJ/kg ; m 为鱼体质量, kg 。

1.2 在两种对流条件下冷加工时间数学模型

鱼类在空气自然对流或强制对流条件下, 计算冷加工时间的数学模型参考文献[2]。

1.2.1 鱼品条冻时的冷加工时间

$$t = (1 + 0.008T_0) \frac{h}{16\lambda(T_{m,f} - T_A)} D_e \left(D_e + \frac{4\lambda}{\alpha} \right) \quad (5)$$

式中, t 为该冷加工条件下的耗时, h 为鱼体的冻结潜热, kJ/kg ; $T_{m,f}$ 为鱼体的平均冻结温度, $^{\circ}\text{C}$; T_A 为环境介质(空气)平均温度, $^{\circ}\text{C}$; λ 为冻结点以下冻结过程中的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; λ_i 为冰的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; D_e 为鱼体的当量直径, m ; α 为鱼体表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 其它符号同前。

1.2.2 盘装鱼的冷加工时间

$$t = (1 + 0.008T_0) \frac{h'}{(T_{m,f} - T_A)} \left(P \frac{\delta}{\alpha} + R \frac{\delta^2}{\lambda} \right) \quad (6)$$

式中, t 为该冷加工条件下的耗时, h' 为盘装鱼的冻结潜热, kJ/kg ; δ 为盘装鱼厚度, m ; α 为盘装鱼表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; λ' 为盘装鱼的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; P, R 为冻盘尺寸的系数; 其它符号同前。

2 影响鱼类冷加工速度因素的解析

鱼类的冷加工速度取决于冻结装置的性能、鱼类的品种、几何尺寸及其冻结方式等多种因素。对各种影响因素进行定量解析, 是进行制冷能量优化配置, 保证冻品质量的基本依据。

根据文献记载^[3], 采用搁架半鼓风冻结对金枪鱼进行冻结模拟, 运用相关数学模型对风速、冻品品

种、冻品几何尺寸, 冻结室环境介质温度等因素进行解析, 自能得出可资借鉴的重要推论。

2.1 风速对冻结速度的影响

以 70kg 肥壮金枪鱼为冻结对象, 在相同冻结室温条件下采用不同的货间风速, 取得图 1 所示的冻结曲线。从图中可见, $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下的货间风速对提高冻结速度有显著影响, 而 $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的货间风速对鱼类冻结速度的影响急剧下降。做进一步考察, 同一室温条件下, 在通过最大冰结晶生成带之后把风速从 $2.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 切换到 $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 观察货间风速对冻结速度的影响, 如图 2 所示。虽然在一定程度上延长了冻结时间, 但其影响甚微, 对冻品质量不会构成大的伤害。甚至可以象图 3 所示那样, 在最大冰结晶生成带过程中就切换成低风速, 也可以获得比较满意的结果。

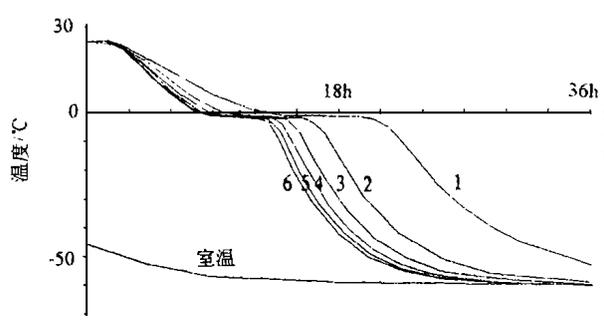


图 1 货间风速对鱼类冻结速度的影响

Fig. 1 Effect of storage air velocity on freezing rate

- 1. 风速 $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 2. 风速 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 3. 风速 $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;
- 4. 风速 $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 5. 风速 $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 6. 风速 $6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

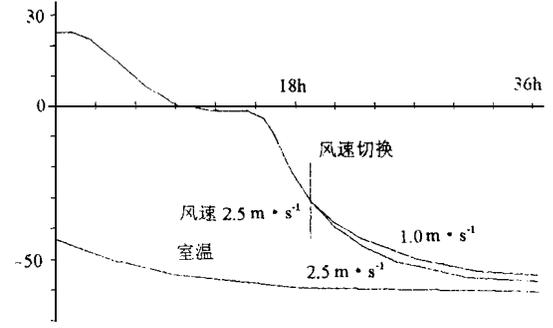


图 2 在通过最大冰结晶生成带之后 变换风速对冻结速度的影响

Fig. 2 Effect of air velocity change on the freezing rate after the biggest ice crystal producing band

2.2 冻结室温对冻结速度的影响

热货进入冻结室, 品温与室温之间的温度差最大, 热货表面对流换热强烈。但制冷压缩机的制冷能力和蒸发器的换热面积一般是按冻品初终温焓差的均值选定, 由于没有考虑食品放热的不均匀性, 致使在预冷及最大冰结晶生成带阶段制冷能力不足, 而在过冷却阶段制冷能力过剩。所以, 造成冻结室温前扬后抑, 延长了预冷和最大冰结晶生成带的降温速度, 必然对冻品质量造成不良影响, 如图 4 所示。如果在制冷能量配置上充分考虑了冻结过程食品非线性放热的特点, 避免预冷阶段冻结室温急剧升高, 如图 5 所示那样, 对提高冻结速度、保证冻品质量将是非常有益的。

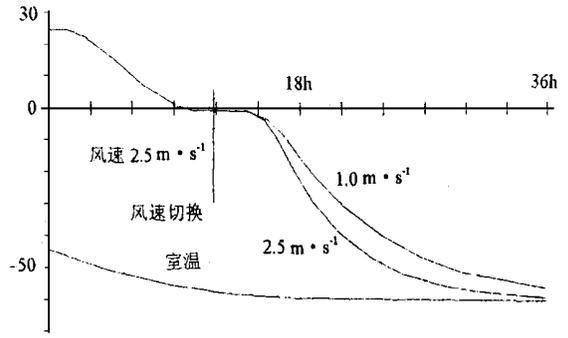


图 3 在最大冰结晶生成带中期 切换风速对冻结速度的影响

Fig. 3 Effect of air velocity change on the freezing rate during the biggest ice crystal producing band

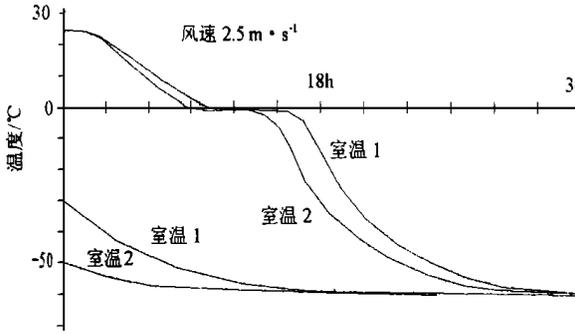


图4 冻结室温对冻结速度的影响

Fig. 4 Effect of freezer temperature on freezing rate

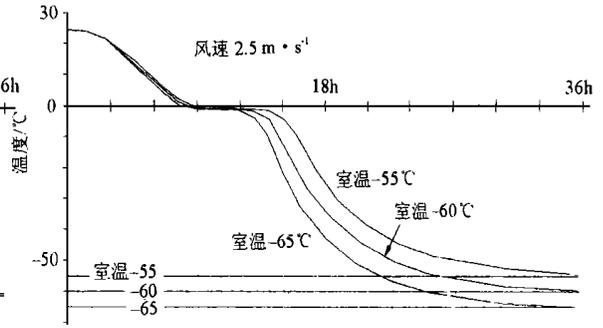


图5 稳定的冻结室温对冻结速度的影响

Fig. 5 Effect of steady freezer temperature on freezing rate

3 鱼类冷加工过程能量匹配的设计

3.1 几点分析

3.1.1 鱼类热物理性质的动态特性是研究鱼类放热过程的基础

鱼类冷加工过程是除去热量,降低温度,继而使鱼体中水组分发生相变固化的过程。由于可以定量地处理该过程中各种物理量的变化,使得计算冷加工所需制冷量、冷却和冻结所需时间成为可能。但由于鱼类的热物理性质数值不是单值性的,较难确定其准确值。因此,往往用实测的方法求取。而工程实用中并不需要十分精确,可以根据鱼类基本组分的已知物理特性来计算鱼类的热物性值。

鱼体中水组分所占的比例大都在40%~80%之间。冻结过程中80%的水分在最大冰结晶生成带(一般为-1~-5℃)内结冰。温度降到-18℃时仍会有5%左右的结合水未冻结。全部水分冻结要到达其共晶点-60℃。鱼体冻结后的密度和比热容都将变小,而热导率却将增大。

3.1.2 半数热负荷发生在最大冰结晶生成带

鱼类热物性值的非单值性及放热过程的不均匀性,使得制冷能力的匹配变得复杂。以鱼的冷加工为例,从初温15℃降到终温-20℃,如果把降温过程划分为15~-1℃、-1~-5℃、-5~-12℃、和-12~-20℃四个温度段,每个温度段放热量占总放热量的百分比分别为16.8%、56.5%、16%、和10.7%。由此可知,-1~-5℃温度段的放热量占总放热量的半数以上,是决定冻结速度的关键阶段;通过最大冰结晶生成带之后放热量占总放热量的百分比逐步递减。

3.1.3 货间风速不是越大越好

货间风速大,冻结速度快,只是在一定范围内是正确的。当风速超过 $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,风速对冻结速度的影响将渐趋微弱。如果继续维持大风速,利弊得失将很快发生逆转。这是因为货间风速的大小取决于鼓风机风量的大小,风量大,电机功率必然大,而电机功率的增加和风量增加倍数的三次方成正比^[4],

即: $N_2 = N_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^3$, 设风量为 Q_1 时,电机功率为 N_1 ,如果把风量增加到 $Q_2 = 1.5Q_1$,则 $N_2 = N_1$

$\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^3 = 3.375N_1$ 。显而易见,由电功率转化的热量,最终变成制冷装置的热负荷,这部分热负荷在冻结过程的后期甚至成为制冷负荷的主要部分,这从技术上、经济上都是不合理的。

3.1.4 尽量减少鱼体的厚度或半径

随着鱼体厚度或当量直径的增加,风速对冻结速度的影响呈递减趋势,实验证明,当量直径大的鱼体,在相同的风速条件下,其传热系数比当量直径小的鱼体小。食品表面冻结之后,表面温度迅速降低,最终和室温趋近平衡。而鱼体内部的热量是以导热的方式向鱼体表面转移,热量的传导距离不断增大,纵使货间风速再大,也无法取得与能量消耗相对应的效果。因此,尽可能地减少鱼体的厚度或当量直

径,方能发挥风速对提高冻结速度应有的影响。

3.2 鱼类冷加工过程能量匹配方案

3.2.1 改变货物负荷的计算方法,采用新的能量匹配依据

在计算货物负荷时,应该充分考虑鱼类冷加工过程中非线性放热的特点,废弃焓差法这种以均匀放热为前提的计算模式,改用三段负荷算法。以最大冰结晶生成带的热负荷作为选配制冷压缩机和冷风机的主要依据。通过最大冰结晶生成带的时间,可根据实际需要选择快速冻结(冰锋推进速度 $v \geq 5 \sim 20 \text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)、中速冻结(冰锋推进速度 $v \geq 1 \sim 5 \text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)或慢速冻结(冰锋推进速度 $v = 0.1 \sim 1 \text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)。

3.2.2 在冷加工过程中实行变风速控制

以预冷、冻结、过冷三段所需时间为控制参数,对鼓风机电机实行转速控制,实现变风速运行。采用由变频器控制的鼓风机电机或变速电机,在鱼体初温到冻结点的预冷阶段和最大冰结晶生成带释放潜热的冻结阶段,控制 $4 \sim 5 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的货间风速;通过最大冰结晶生成带之后把风速降至 $2.5 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;进入过冷却阶段中期再把风速降为 $1 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。以期达到风速和鱼类放热特点相匹配,实现节能运行,又不至于对冻品质量造成大的影响。

3.2.3 维持冻结室室温稳定

制冷压缩机的制冷能力应把冻结室温作为控制参数之一,避免热货进入初期室温的急剧升高和冻结后期室温的大幅降低。因此,宜采用变频控制的制冷压缩机电机或变速风机,调节压缩机和冷风机的制冷量。

4 结语

制冷装置的节能运行是当今制冷业界关注的热门话题。本文根据鱼类冷加工过程中的放热规律,提出的能量匹配设想,虽然将在一定程度上增加制冷装置的初投资,但由于可以大幅度降低冻结装置的日常运转费用,并为冻结装置的计算机程序控制提供切实可行的模式,当可推动制冷装置优化设计发展的进程。

参考文献:

- [1] 高井陆雄. 鱼类冷冻の物理[M]. 食品冷テキスト. 东京:(株)与英文化社, 1990. 54~ 69.
- [2] 长冈顺吉. 冻结装置に於ける热作用及び冻结时间[J]. 冷冻, 1961, 36(402): 20~ 37.
- [3] 山口繁, 藤原慎一. 鱼体(マグロ)の冻结時間の予測システム[J]. 冷冻, 1989, 64(743): 20~ 24.
- [4] 冯志哲, 张伟民, 沈月新等. 鱼类冷冻工艺学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984. 32~ 58, 96~ 122.