冰鲜鱼贮运过程中耗冰量估算模型的建立与验证

吴国金^{1,2},许钟¹,杨宪时¹,郭全友¹,李学英¹

(1. 中国水产科学研究院 东海水产研究所, 上海 200090; 2. 上海海洋大学 食品学院, 上海 201306)

摘要:运用传热学基本理论对冰鲜鱼贮运过程中泡沫箱内与泡沫箱外环境间的传热过程进行分析,建立了一维 稳态传热条件下的耗冰量估算模型。5~25℃条件下的导热系数测定表明,在该温度段范围内泡沫箱的导热系数 变化不明显,为 0.035 6~0.036 4 W/(m·K)。通过箱外温度分别为 5℃、10℃、15℃、20℃、25℃环境条件下的稳 态传热模拟实验,用获得的实际耗冰量数值,验证建立的估算模型。数学检验表明各,温度条件下耗冰量估算模 型的估算值和实验实际值的相对偏差在 6.5%~15.5%,平均偏差为 11.4%;耗冰量估算模型的偏差因子(*B*_t)和准确 性因子(*A*_t)分别为 0.897 和 1.114,实验结果显示,所建立的耗冰量估算模型能较准确地估算箱外温度基本恒定条 件下,箱内鱼体温度不超过 1℃时的耗冰量。本研究旨在为冰鲜鱼贮运过程中用冰量的准确估测提供技术依据。 [中国水产科学, 2010, 17(6): 1334–1339]

关键词:冰鲜鱼;耗冰量;估算模型;一维稳态传热 中图分类号:TS254.4;S984.1 文献标识码:A

鲜鱼是易腐食品,其中温度是影响鲜鱼腐败 的关键因素。有研究表明,鲜鱼在15~20℃环境中 暴露仅仅几个小时,就可以使它的货架期缩短几 天^[1],因此温度控制是鲜鱼贮运过程中的重要一 环^[2]。虽然目前国外有部分企业使用干冰、冷却 凝胶等作为冷却介质,但是加冰仍是最简单的冷 却和保存鲜鱼的方法^[3],而且也是被广泛采用的 最经济和实用的方法^[4]。这是因为冰可以保持鲜 鱼鱼体表面湿润和光泽,防止脱水^[5],而且冰的 价格便宜,融化潜热大,降温快。因此,冰在鲜鱼 冷却链物流中扮演着重要的角色。

由于缺乏理论指导,实际生产中大多根据平时的经验来控制加冰量。由于环境温度、贮运时间等的不确定性,仅凭经验很难控制正确的冰量需求以保证鲜鱼品质,因而极有可能增加生产贮运成本。目前,国内尚未见耗冰量估算模型方面

文章编号:1005-8737-(2010)06-1334-06

的研究,国外在这方面的研究也不多。究其原因 主要是涉及到复杂的传热计算问题、要准确计算 冰的消耗量难度较大。早期, Boeri 等^[6]通过对 1~9℃之间不同温度条件下鱼箱内的冰融化进行 实验, 表明当外界温度保持一定时, 融冰量和时 间之间存在一种线性关系, 这为以后从稳态传热 角度,估算鱼箱内冰的消耗量奠定了基础。Gary Burgess^[7]、Napawan Kositruangchaid 等^[8]对特定 温度条件下的泡沫箱内冰融化速度的测定、来获 得该规格的泡沫箱在此温度下的热阻 R 值, 以此 计算泡沫箱在相应温度条件下的耗冰量。但是如 果箱外温度和泡沫箱的规格改变,则只能再次进 行相应条件下的冰融化速度测定,因此,该方法 估算耗冰量不太实用、而且实验较麻烦。本研究 旨在应用传热学基本理论对泡沫箱内侧与外侧的 传热过程进行分析,在简化部分外部条件后,探

收稿日期: 2009-10-20; 修订日期: 2010-04-19.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30771675);科技部农业科技成果转化资金资助项目(2007GB23260281);中央级公益 性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(2007M05).

作者简介:吴国金(1983-),男,硕士研究生,主要从事水产品保鲜与贮运研究.

通讯作者:杨宪时,研究员. Tel: 021-65678984, E-mail: xianshiyang@126.com

讨冰鲜鱼运输过程中,维持箱外温度恒定条件下 耗冰量的估算,为冰鲜鱼实际贮运过程中选择合 适的用冰量和今后的深入研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

实验所用泡沫箱为冰鲜大黄鱼生产实际流通 中通用的聚苯乙烯泡沫箱,由福建省宁德市夏威 食品有限公司提供,厚度 25 mm,规格 455 mm× 315 mm×115 mm(箱内尺寸)。实验选用的养殖大 黄鱼(*Pseudosciaena crocea*)由福建省宁德市夏威 食品有限公司提供,规格 300~400 g/尾,加冰保 持鱼体温度在 0~1℃,15 h内送达上海实验室。 养殖大黄鱼的水分含量约为 70%^[9]。

1.2 泡沫箱导热系数测定

泡沫箱的导热系数采用热流法测定。热流法 作为稳态平板法的一种,可用于直接测量低导热 率与绝热材料的导热系数。对于低导热材料的测 试,热流法具有准确、快速、易操作等特点。

热流法导热分析仪(Netzsch HFM 436,德国),
准确性±(1%~3%)。较正标样 NIST SRM 1450c
598,密度 157.09 kg/m³,厚度 25 mm。在上下板
温差温度为 5.0℃、10.0℃、15.0℃、20.0℃、25.0℃,
中心温度分别为 2.5℃、5.0℃、7.5℃、10.0℃、
12.5℃条件下测定泡沫箱的导热系数。

1.3 鱼的比热容及吸收热量的计算

鱼的比热容采用 Siebel 公式估算^[10]:

$$c_{\rm f} = 0.837 + 3.349 X_{\rm w} \tag{1}$$

式中, c_f 为鱼的比热容(kJ/kg), X_w 为鱼的水分含量 (%)

鱼体温度上升所吸收的热量由以下公式计算:

$$Q_{\rm fe} = c_{\rm f} m_{\rm fe} \Delta T \tag{2}$$

式中, Q_@为鱼体所吸收的热量(kJ), m_{\oplus} 为鱼的质量 (kg), ΔT 为鱼体温度的变化($^{\circ}$ C)。

1.4 冰消耗量实验与实际耗冰量测定

泡沫箱内鱼冰比例为 1:1.2(鱼 5.5 kg, 冰 6.6 kg), 按层冰层鱼方式摆放, 保证鱼体周围有冰覆 盖, 初始的鱼温和冰温均为 0~1℃。在泡沫箱底 部一角处开个直径为 5 mm 的小孔, 使得融化的 水能及时流出泡沫箱,避免浸泡鲜鱼。时间温度 积分仪(Testo 175-T2,德国,精度±0.1℃)2个探头 分别插入泡沫箱中心位置和鱼体肛门,设置每小 时自动记录 1 次温度,同时设置温度上下限为 ±1℃,超出这个范围会自动报警。将泡沫箱放入 高精度低温培养箱中(Sanyo MIR 553,日本,精 度±0.1℃),分别控制贮藏温度 5℃、10℃、15℃、 20℃、25℃。设平行实验 3 次。

为保证进入泡沫箱的热量全部用来融化 冰,贮藏实验在鱼体温度上升到1℃时结束。实验 前后分别对泡沫箱内冰量用台秤(华鹰 ATZ-8 型, 浙江,精度±10g)称重,记录。计算实验前后的冰 量,两者之差即为该贮藏实验过程中冰的实际消 耗量。

泡沫箱内冰的融化率计算公式如下:

2 估算模型与模型验证

2.1 耗冰量估算模型

在一个外部尺寸为 505 mm×365 mm×165 mm、 厚度为 25 mm 的泡沫箱中, 鲜鱼和冰按照层冰层 鱼的方式摆放, 即鲜鱼四周都有冰存在, 保证鲜 鱼温度在 0℃左右。环境温度为 *T*₁, 箱内温度为 *T*₂, 且两者温度基本维持恒定, 研究对象的物理 模型和坐标系统如图 1 所示。

针对泡沫箱内与泡沫箱外之间的传热过程, 本研究作了如下假设:

a. 物性为常数;

b. 对于计算精度要求不是很高的耗冰量估算, 忽略泡沫箱壁两侧的对流, 只考虑泡沫箱壁
 的导热问题;

c. 由于泡沫箱内外温差基本维持恒定, 而且 泡沫箱的厚度远小于其长度和宽度, 可以忽略侧 边效应。因此, 可以把各个壁面的传热问题看成 是一维, 无内热源的稳态传热过程;

d. 进入泡沫箱的热量全部用来融化冰。

以泡沫箱的 B 面为例来分析泡沫箱壁两侧的 传热问题。如图 2 所示,外界热流沿图中箭头



图 1 研究对象的物理模型和坐标系统

1—泡沫箱的一个侧面 B; 2—泡沫箱外环境温度 T₁; 3—泡沫
箱内温度 T₂; 4—时间温度积分仪探头; 5—时间温度积分仪.
Fig. 1 Physical model and coordinate system of research object

1: B side of foam box. 2: Temperature outside the foam box— T_1 . 3: Temperture inside the foam box— T_2 . 4: Probe of time-temperature recorder. 5: Time-temperature

recorder.



图 2 泡沫箱 B 面的传热分析图

 泡沫箱的一个侧面 B; 2. 进入泡沫箱的热流量 Φ_B; 3. 泡 沫箱外环境温度 T₁; 4. 泡沫箱内温度 T₂.

Fig. 2 Heat transfer analysis of foam box's B side 1: B side of foam box. 2: The quantity of heat tansfer into foam box— $\Phi_{\rm B}$. 3: The temperature outside the foam box— T_1 . 4: The temperture inside the foam box— T_2 .

所示方向从泡沫箱外进入箱内。泡沫箱壁外侧环 境温度为 *T*₁, 箱壁内侧温度为 *T*₂。

参考稳态条件下,冷热流体通过一块大平壁 交换热量的传热过程^[11]。通过平壁的传热过程计 算公式如下:

$$\Phi_{\rm A} = \frac{A\Delta T}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} \tag{4}$$

公式(4)中, $Φ_A$ 为通过平壁的热量(J), A 为平壁的 表面积(m²), ΔT 为平壁两侧的温差(C), h_1 为平壁 高温侧的表面传热系数[W/(m²·K)], h_2 为平壁低 温侧的表面传热系数[W/(m²·K)], δ 为平壁的厚度 (m), λ 为平壁材料的热导系数[W/(m·K)]。

则泡沫箱 B 面在忽略壁面两侧对流后, 通过 壁面的热流速率为:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} A (T_1 - T_2) \tag{5}$$

式中, q 为通过 B 面的热流速率(J/s), T_1 为泡沫箱 B 面外环境温度(C), T_2 为泡沫箱 B 面内侧温度 (C)。

因为泡沫箱 B 面为一维稳态导热, 所以在 *t* 时间内经过 B 面进入泡沫箱的热量为:

$$\Phi_{\rm B} = \frac{\lambda}{\delta} A(T_1 - T_2)t \tag{6}$$

式中, Φ_B 为经 B 面进入泡沫箱的热量(J), t 为经历的时间(s)。

把这一理论应用到泡沫箱的其他面,则*t*时 间内进入泡沫箱的总热量为:

$$\Phi = \frac{\lambda}{\delta} S(T_1 - T_2)t \tag{7}$$

式中, σ 为t时间内进入泡沫箱的总热量(J), S 为 泡沫箱的内表面积(m²)。

由公式(7)可得到 *t* 时间内, 热量进入泡沫箱 使冰融化的质量(*M*), 即冰鲜鱼贮运过程中耗冰 量估算模型为:

$$M = \frac{\Phi}{L} = \frac{\lambda S}{1000\delta L} (T_1 - T_2)t \tag{8}$$

式中,M为时间t内整个泡沫箱中所消耗冰的质 量(kg),L为冰的融化潜热(kJ/kg)。

2.2 估算模型验证

采用相对偏差、偏差因子(*B*_f)和准确性因子(*A*_f) 来对耗冰量估算模型进行检验评价。偏差因子和 准确性因子分别表示模型的结构偏差和平均准确 性^[12-13]。

相对偏差 =
$$\frac{obs - est}{est}$$
 (9)

$$B_{\rm f} = 10^{\left[\frac{\sum \lg({\rm est/obs})}{n}\right]}$$
(10)

$$A_{\rm f} = 10^{\left\lfloor \frac{\sum |\lg(\text{est/obs})|}{n} \right\rfloor}$$
(11)

公式(9)、(10)、(11)中 est 为耗冰量的估算值, obs 为耗冰量的实测值;公式(11)中, *n* 为实验的次数。

3 结果与分析

3.1 泡沫箱导热系数

上下板温差温度为 5.0℃、10.0℃、15.0℃、 20.0℃、25.0℃条件下,测定冰鲜鱼生产实际流通 中通用的聚苯乙烯泡沫箱的导热系数(λ)结果如 表1所示。

由表 1 可知, 泡沫箱的导热系数在中心温度 为 2.5~12.5℃时, 总体上随着温度的升高而略有 升高, 但是变化不大。

3.2 鱼体温度的变化与冰的融化率

在箱外温度分别为 5.0℃、10.0℃、15.0℃、 20.0℃、25.0℃条件下,泡沫箱内鱼体温度变化过 程如图 3 所示,鱼体温度达到 1℃时所需时间与 箱内冰的融化率如表 2 所示。

表 1 泡沫箱的导热系数 Tab. 1 Thermal conductivity of foam box						
泡沫中心温度/℃ Central temperature of foam box	上下板温差/℃ Temperature differential	样品厚度/mm Sample thickness	温度梯度/(℃·m ⁻¹) Temperature gradient	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹) Thermal conductivity		
2.5	5.0	25	200.0	0.0356		
5.0	10.0	25	400.0	0.0358		
7.5	15.0	25	600.0	0.0361		
10.0	20.0	25	800.0	0.0363		
12.5	25.0	25	1000.0	0.0364		



Fig. 3 Temperature variations of fish in foam box

由表 2 可知, 在泡沫箱内外温差分别为 5℃、 10℃、15℃、20℃、25℃条件下, 箱内鱼体温度 达到 1℃所需的时间分别为 112 h、60 h、37 h、 26 h 和 21 h。由图 3 可见, 在箱外温度低于 5℃时, 泡沫箱内鱼体温度维持 0℃时间相对较长, 因此, 从冰量消耗和能效角度考虑, 冰鲜鱼的冷却链流 通环境温度为 5℃左右较为合适。

由表 2 中可知, 各组箱外冰的融化率达到 66%左右时, 鱼体温度开始达到 1℃以上。由公式 (1)可计算得水分含量约为 70%的大黄鱼的比热容 为 3.233 kJ/kg。假设鱼体温度均从-0.1℃上升到 1℃,则由公式(2)可得箱内鱼体所吸收的热量为

表 2 鱼体温度达到 1℃时的时间及冰的融化率 Tab. 2 Time of fish temperature reaching 1℃ and melting rate of ice

	泡沫箱内外温差/ ℃ Temperature differential	泡沫箱热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹) Thermal conductivity	时间/ h Duration time	融化率/% Melting rate	
	5	0.0356	112	67.6	
	10	0.0358	60	69.0	
	15	0.0361	37	65.8	
	20	0.0363	26	64.7	
	25	0.0364	21	66.5	

17.8 kJ,相当于应融化的冰量为 0.053 kg, 远小于 实测耗冰量均值的 4.4 kg。由此可知由于鱼体温 度上升而对实验产生的干扰很小,可以忽略不计, 验证了估算模型的假设,即进入泡沫箱的热量都 用于冰的融化。

3.3 耗冰量估算模型的评价

泡沫箱内外温差/℃

Temperature differential

5

10

15

20

25

各实验温差条件下泡沫箱的导热系数(λ)见 表 1, 整个实验所经历的时间 t 由温度时间记录仪 记录, T_2 为泡沫箱内温度(0°C), T_1 为泡沫箱外环 境温度, 泡沫箱的内表面积(S)为 0.464 m², 冰的 融化潜热(L)为 334.9 kJ/kg, 由式(8)得到相应实验 条件下的估算耗冰量。实测耗冰量、估算耗冰量

3.9

4.2

3.9

3.7

3.8

和耗冰量估算模型的评价如表 3 所示。

近年来,偏差因子(*B*_f)和准确性因子(*A*_f)已广 泛应用于模型的检验评价^[12-14]。从表 3 可知,在 箱外温度为 5~25℃条件下,耗冰量估算模型的 相对偏差在 6.5%~15.5%,全部为正偏差,平均 偏差为 11.4%,在工程领域这属于可接受范围。耗 冰量模型的偏差因子和准确性因子分别为0.897和 1.114,均在1左右,显示该模型的结构偏差较小,平 均准确性较好。综合考虑该模型的数学检验结果, 表明该模型能较准确地估算冰鲜鱼在箱外温度维 持恒定条件下的耗冰量,可以为冰鲜鱼生产贮运 过程中的加冰量提供参考依据。

Tab. 3 Evaluation	n of the ice consumption n	nodel
估算耗冰量/kg	实测耗冰量/kg	相对偏差/%
Estimated values	Observed values	Relative deviation

 4.4 ± 0.3

 4.5 ± 0.2

4.3±0.2

4.2±0.3

 4.4 ± 0.4

表 3 耗冰量估算模型的评价

4 讨论

(1)对于冰鲜鱼的运输而言,鲜鱼脱离了冰或者周围没有冰覆盖,鱼体温度将快速上升,这将对鲜鱼的品质造成不可逆的影响,因此在鲜鱼运输过程中确保有适量的冰存在或鱼体温度不超过1℃对维持鲜鱼的品质至关重要。有研究表明,冰鲜大黄鱼在0℃冰藏时的货架期是10℃贮藏时的3~4倍^[15],罗非鱼也有类似的情况^[16]。由此,建立一个稳态条件下预测鲜鱼鱼体温度维持在0℃左右的耗冰量估算模型比建立一个非稳态条件下适用于鱼体温度波动的耗冰量估算模型更有实际意义。本实验建立的耗冰量估算模型,与 Gary Burgess^[7]、Napawan Kositruangchaid^[8]等计算耗冰量的方法相比,相对简便准确,实用性强。

(2)本实验估算模型的估算耗冰量值均比实测耗冰量值小,这可能是因为泡沫箱在包装过程中的气密性和泡沫箱底部的小孔,以及对流、温

度变化以及焓等因素造成实际传热量比理论传热 量大。由于估算值与实际值平均有 11.4%的正偏 差,因此为了更为准确的估算实际耗冰量,应考 虑对估算值作 110%的校正。

12.3

6.5

9.0

13.8

15.5

 $B_{\rm f}$

0.897

 $A_{\rm f}$

1.114

(3) 在箱外温度为 5℃条件下,泡沫箱内冰的 融化速率要显著低于其他温度条件下冰的融化速 率,鲜鱼在 1℃以下维持的时间也显著长于其他 温度条件。因此综合考虑能效,鲜鱼品质等因素, 笔者建议采用箱外温度为 5℃的冰鲜鱼运输温度 能有效地减少运输过程中冰的消耗量和保持鱼的 鲜度。

参考文献:

- Hansen P, Jensen J. Bulk handling and chilling of large catches of small fish[J]. Infofish Marketing Digest, 1982, 3: 38–41.
- [2] Dincer D, Dost S. Thermal diffusivities of geometrical objects subjected to cooling[J]. Applied Energy, 1995, 51: 111–118.

1339

- [3] Govindan T K. Fish Processing Technology[M]. India: Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd, 1985, 23–26.
- [4] Jain D, Ilyas S M, Pathare P, et al.. Development of mathematical model for cooling the fish with ice[J]. J Food Engin, 2005, 71(3): 324–329.
- [5] Graham J, Johnston W A, Nicholson F J. FAO Fish Technical Paper No.331[M]. FAO Rome Ice in Fisheries, 1992.
- [6] Boeri R L, Davidovich L A, Giannini D H, et al. Method to estimate the consumption of ice during fish storage[J]. Intern J Refriger, 1985, 8(2): 97–101.
- [7] Burgess G. Pratical thermal resistance and ice requirement calculations for insulating packages[J]. Packag Technol Sci, 1999, 12: 75–80.
- [8] Napawan K. Theoretical, experimental and computer model for package R-value using regular ice and dry ice[D]. Michgan: Michigan State University, 2003: 36–41.
- [9] 张农, 刘海新, 李庐峰, 等. 养殖大黄鱼和天然大黄鱼的

理化指标比较[J]. 渔业现代化, 2007, 34(6): 26-30.

- [10] Siebel J E. Specific heat of various products[J]. Ice Refriger, 1982, 2: 256–257.
- [11] 陶文铨. 传热学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
- [12] 许钟,肖琳琳,杨宪时.罗非鱼特定腐败菌生长动力学模型和货架期预测[J].水产学报,2005,29(4):540-546.
- [13] Dong Q T, Tu K, Guo L Y, et al. Response surface model for prediction of growth parameters from spores of Clostridium sporogenes under different experimental conditons[J]. Food Mcriob, 2007, 24(6): 642–632.
- [14] Wilson P D G, Brocklehurst T F, Arino S, et al. Modelling microbial growth in structured foods: towards a unified approach[J]. J Food Microb, 2002, 73: 275–289.
- [15] 李学英, 许钟, 郭全友, 等. 大黄鱼冷藏过程中的鲜度变 化[J]. 中国水产科学, 2009, 16(3): 442–450.
- [16] 杨宪时, 郭全友, 许钟. 罗非鱼冷藏过程中细菌种群的变化[J]. 中国水产科学, 2008, 15(6): 1050–1055.

Construction and verification of a model used for estimating ice consumption during iced fresh fish distribution

WU Guojin^{1,2}, XU Zhong¹, YANG Xianshi¹, GUO Quanyou¹, LI Xueying¹

(1. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China; 2. Food Science College, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Using the basic theory of heat transfer we analyzed the heat transfer between inside foam box and outside foam box during iced fresh fish distribution and established mathematical model to estimate the ice consumption during iced fresh fish distribution under one-dimensional steady-state condition. Foam box thermal conductivity tests were conducted under $5-25^{\circ}$ C. The results showed that the values of foam boxes thermal conductivity were among 0.035 6–0.036 4 W·m⁻¹·K⁻¹. Through steady-state heat transfer simulation experiments that were conducted under the temperatures outside the foam boxes, which were 5° C, 10° C, 15° C, 20° C and 25° C respectively, the observed values of ice consumption were used to validate the exactness of the estimated ice consumption model. Mathematical tests showed that the relative deviation between estimated and observed values of ice consumption were in the range of 6.5% to 15.5%, mean relative deviation was 11.4%, and the bias factor and accuracy factor of ice consumption model were 0.897 and 1.114 respectively. All of these showed that the estimated ice consumption model based on the one-dimensional steady-state heat transfer, can precisely estimate the ice consumption for maintaining the temperature of fish below 1°C in foam box and the temperature outside the foam box is invariableness. So the established mathematical model could provide reference for ice addition during iced fresh fish distribution.[Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(6): 1334–1339]

Key words: iced fresh fish; ice consumption; estimated model; one-dimensional steady-state heat conduction **Corresponding author:** YANY Xianshi. E-mail: xianshiyang@126.com