

包装对食品冻结过程的影响研究*

王贵强 邹平华 刘明生 刘永鑫

(哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要: 通过模拟和实验方法研究食品包装对冻结过程的影响,首先,使用 CFD 方法模拟食品的冻结条件,包括食品周围空气的温度、流动速度及紊流强度等空气参数,以此来计算得到食品的表面传热系数,然后使用自然对流和辐射换热经验公式计算食品与包装材料之间的空气层内的传热过程,在食品内部每一点应用傅里叶导热公式模拟食品内部的传热过程,最后使用迭代方法将这几部分计算结合起来。在一实际的小型冷库中进行不同包装材料食品的冻结实验,以验证模型的准确性。结果表明,相对于传统的空气层热阻处理方式,该模型能够获得更加准确的计算结果,与实验结果吻合较好。不同包装材料的食品降温曲线差别较大,包装材料与食品之间的空气层对食品冻结过程有很大的影响,其热阻在整个过程中是不断变化的,变化趋势与食品降温曲线相反。

关键词: 食品冻结 包装 空气层 数学模型

中图分类号: TB69 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)07-0171-06

引言

冷库中通常使用强制空气循环对食品进行降温冻结。食品内部的导热过程使热量不断向外传递,食品温度下降,在食品表面,冷空气通过对流换热带走了食品热量,同时食品内部的水分不断向表面扩散,以补充食品表面的水分流失^[1]。实际很多食品都包裹在包装材料中^[2],包装能够有效阻挡食品的水分流失,降低食品的干耗,同时减小外界环境温度波动对于食品的影响。对于食品自身而言,食品的冻结条件不但包括食品外部的空气温度、流速、紊流强度等空气参数,还应该包括包装材料的影响。

由于食品冻结实验花费大、耗时长,近年来数值模拟在食品冻结研究中得到了越来越多的应用。实际食品的形状及摆放形式复杂多样,使食品所处气流场环境往往非常复杂,在这种情况下,使用传统解析法无法计算食品放热过程^[3],而基于计算流体力学(CFD)的数值模拟可以较为准确地模拟得到食品周围的空气参数,进而计算得到食品的表面传热系数^[4-6],而在食品内部,应用数值模拟可以同时模拟食品内部的传热传质过程^[7-9]。以往的研究主要集中在对单体食品处于复杂流场环境下的传热传质耦合计算,而对于同时冻结大量食品的大型冷库研究较少。另外,在 CFD 模型中,通常使用表观比热容法来处理食品冻结过程中的潜热释放,这种方法

往往会低估冻结过程的潜热量^[10]。

很多食品置于包装中进行冻结,以冻结分割肉为例,食品表面包裹有一层聚乙烯薄膜,然后放入纸盒或铁盒冻结^[11],在食品和外层包装之间往往留有一定空隙。由于外包装的阻隔作用,食品向外界空气的水分传递往往可以忽略不计。对于包装材料与食品之间的空气层,很多学者使用空气导热系数计算其热阻,将其模拟成单纯的导热过程^[12]。用这种方法计算得到的热阻会有很大的误差,因为在空气层的封闭空间内往往会发生自然对流,同时食品表面与包装材料之间的辐射换热也不能忽略。

本文主要研究包装材料对食品冻结的影响,使用解耦方法将食品的冻结过程模拟分成 3 部分,包括食品冻结条件的模拟、包装材料内部空气层的模拟以及食品内部的传热过程模拟,结合冻结实验与传统空气层热阻方式的结果,对冻结过程中包装材料的影响进行研究。

1 数学模型

1.1 食品冻结条件的模拟

本文的研究对象是带有包装的分割肉,由于包装的阻隔作用,不考虑食品向外界空气的水分散失。将食品放入一个强制空气循环冻结间中,该冻结间使用冷风机作为制冷设备,冻结间几何尺寸为 4.05 m × 2.52 m × 2.32 m,其外形结构如图 1 所示,

收稿日期: 2014-02-28 修回日期: 2014-03-15

* 黑龙江省自然科学基金面上项目(E201309)

作者简介: 王贵强,博士生,主要从事冷库节能优化研究,E-mail: wgq_hit@126.com

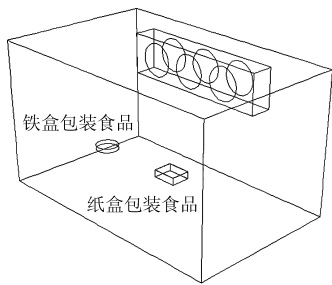


图 1 冻结间外形结构
Fig. 1 Geometry of air-blast freezer

食品置于冷风机出口轴平面上。

使用 CFD 方法可以有效地模拟食品冻结过程中库房内的空气参数分布^[13-16],假设食品的表面传热系数在整个冻结过程中保持不变。一般来说,当考虑自然对流的时候,食品的表面传热系数会随着空气流场变化而发生改变。有研究表明,当空气流速大于 0.5 m/s 时,自然对流的影响就可以忽略不计^[1],在冻结间中,为了保证冻结质量,一般要求掠过食品表面的风速达到 1~2 m/s,所以在模型中忽略自然对流的影响,认为食品表面传热系数在整个冻结过程中保持不变。

在以上假设基础上,对库房内的空气进行稳态模拟,固定食品表面温度,模拟库房空气与食品之间的传热以及空气参数分布。为了准确模拟食品表面的传热,使用加强型墙方法处理食品表面区域。在远离食品表面的主流区,使用 $k-\varepsilon$ 模型,而在近墙的粘度影响区域,使用 Wolfshtein 的一方程模型^[17]。食品表面需要构建细密的网格,使输运方程能够一直求解到层流底层。冷风机风机送风口设为速度入口,风机回风口设为自由出流边界条件,实验测得冷风机的出口风速,作为冷风机出口的边界条件。食品、围护结构和冷风机的壁面取第一类边界条件,速度取为无滑移条件,即壁面上各个速度分量为零。

在得到的库房空气参数分布中,取食品表面近墙区域的空气温度梯度计算食品表面的局部热流,使用该热流以及食品表面与主流空气的温差,就可以根据牛顿冷却公式计算得到食品的局部表面传热系数,对不同位置的局部表面传热系数进行积分处理以计算单体食品的平均表面传热系数^[6]。

1.2 食品包装的模拟

本文所研究的食品为分割肉,在分割肉表面包裹聚乙烯薄膜,然后分别放入铁盒或纸盒,其几何形状如图 2 所示。

在食品包装中,聚乙烯薄膜的存在几乎完全隔绝了水分传递,而对传热过程影响不大。在已知包装材料本身的几何参数和物性参数的情况下,模拟食品包装内传热过程的主要困难在于包装内空气层

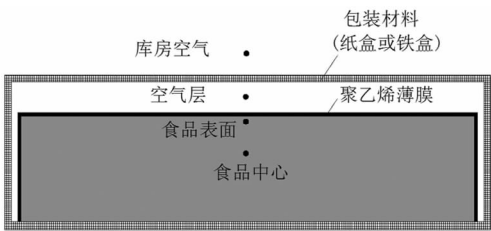


图 2 食品的几何形状
Fig. 2 Geometry of packaged food

的模拟。在空气层中,传热过程主要表现为自然对流和辐射换热。对于水平封闭空间,当空气层的底层表面温度高于顶层表面温度的时候,自然对流就会发生^[18]。可以通过经验公式计算得到空气层的有效导热系数,即

$$\frac{k_e}{k_a} = C (Gr_\delta Pr)^n \left(\frac{L}{\delta_g} \right)^m$$

(1)

式中 k_e ——空气层的有效导热系数
 k_a ——空气导热系数
 Gr_δ, Pr ——格拉晓夫数和普朗特数
 L, δ_g ——空气层的长度和厚度

当 $Gr_\delta Pr$ 小于 1 700 时,空气层中传热过程主要为导热, k_e 等于 k_a ; 当 $Gr_\delta Pr$ 大于 1 700 时,公式中系数 C 、 n 、 m 如表 1 所示^[18]。

表 1 封闭空间内自然对流经验公式中的系数
Tab. 1 Correlation constants of empirical relations for free convection in enclosures

形状	$Gr_\delta Pr$	Pr	C	n	m
	1 700 ~ 7 000	0.5 ~ 2	0.059	0.4	0
水平平板	7 000 ~ 3.2×10^5	0.5 ~ 2	0.212	1/4	0
	$> 3.2 \times 10^5$	0.5 ~ 2	0.061	1/3	0

由于自然对流的传热速率通常很小,空气层两表面之间的辐射换热不能忽略,则空气层中的辐射换热量计算公式为

$$q_{\text{rad}} = \frac{\sigma (T_{\text{ms}}^4 - T_{\text{pi}}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

(2)

式中 σ ——黑体辐射常数
 $T_{\text{ms}}, T_{\text{pi}}$ ——空气层上、下表面温度,即分割肉外表面和包装材料内表面温度

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ ——空气层上、下表面的发射率

在空气层同时发生自然对流和辐射换热,考虑这两部分传热过程,得到空气层的有效热阻计算公式为

$$R_{\text{eff}} = \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{rad}}} + \frac{1}{R_{\text{conv}}}} = \frac{1}{\frac{q_{\text{rad}}}{\Delta T} + \frac{k_e}{\delta_g}}$$

(3)

式中 ΔT ——空气层上下表面的温差

R_{rad} ——空气层内辐射换热热阻
 R_{conv} ——空气层内对流换热热阻

1.3 食品本身的模拟

在食品中的每一点应用傅里叶导热方程得到冻结过程食品内部的传热模型

$$\rho_m c_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \nabla (k_m \nabla T_m) + q_m \tag{4}$$

式中 ρ_m 、 c_m 、 k_m ——食品的密度、比热和导热系数等物性参数

t ——冻结时间
 q_m ——热源项,在食品表面节点上为食品与外部空气的对流换热量
 T_m ——食品内部各点的温度

使用准焓法处理食品的潜热释放以及冻结过程中的物性突变,使用 Kirchhoff 变换处理初始冻结点附近的热导率的变化。使用有限差分法对食品在厚度方向上离散^[10],得到一组关于食品节点温度的常微分方程组,使用显式方法进行求解。

1.4 模拟方法

为了模拟食品内部的传热过程,需要计算空气层的热阻,然而在计算空气层热阻的公式中,却需要事先已知食品表面和包装材料内表面的温度,造成计算的困难。本文使用迭代方法从一个假设的食品表面温度不断逼近食品表面温度的真值。

在食品冻结的过程中,从外向内,分别有以下 3 种传热过程:

包装材料外表面与外部空气之间的对流换热计算公式为

$$q_1 = h_a (T_{po} - T_a) \tag{5}$$

式中 h_a ——食品对流换热系数
 T_{po} ——包装材料外表面的温度
 T_a ——外部空气温度

包装材料内部的导热计算公式为

$$q_2 = \frac{K_p}{\delta_1} (T_{pi} - T_{po}) \tag{6}$$

式中 K_p ——包装材料导热系数
 δ_1 ——包装材料厚度

包装材料与食品之间空气层内部的自然对流和辐射换热计算公式为

$$q_3 = \frac{T_{ms} - T_{pi}}{R_{\text{eff}}} \tag{7}$$

由于包装材料相对于食品本身热容较小,忽略包装材料自身的蓄热作用^[19],可以认为 q_1 、 q_2 、 q_3 三者相等。分别取 $q_1 = q_2$ 和 $q_2 = q_3$,经过推导,可以得到

$$\frac{h_a K_p (T_{pi} - T_a)}{h_a \delta_1 + K_p} = \frac{\sigma (T_{ms}^4 - T_{pi}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} + \frac{C g^n \beta^n \delta_g^{3n-m-1} \mu^n C_p^n L^m (T_{ms} - T_{pi})^{n+1}}{\nu^{2n} k_a^{n-1}} \tag{8}$$

式中 g ——重力加速度
 ν ——空气的运动粘滞系数
 β ——体积膨胀系数
 C_p ——空气定压比热
 μ ——动力粘滞系数

令 $A' = h_a K_p / (h_a \delta_1 + K_p)$, $B' = \sigma / (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1)$, $C' = C g^n \delta_g^{3n-m-1} L^m$,则 A' 、 B' 和 C' 的数值取决于食品及包装材料的物性参数和几何参数,对于特定的食品及包装材料,都是定值。而 β 、 C_p 、 μ 和 k_a 等空气参数都与空气温度有关,都可以写成空气参数的函数 $f(T_g)$,空气层内的空气温度 T_g 取为上下两表面的平均温度,式(8)可以写成

$$A' (T_{pi} - T_a) = B' (T_{ms}^4 - T_{pi}^4) + C' f\left(\frac{T_{pi} + T_{ms}}{2}\right) (T_{ms} - T_{pi})^{n+1} \tag{9}$$

假设一个食品表面温度值 T_{ms} ,通过求解上述非线性方程得到包装材料内表面温度 T_{pi} ,进而计算得到包装材料外表面温度 T_{po} 和空气层的热阻,代入到食品的传热过程模拟中,计算得到食品内部的温度分布和一个新的食品表面温度值 T'_{ms} ,反复进行数次迭代,直到误差精度满足要求。

2 实验验证

为了验证上述模型的准确性,进行不同包装材料的食品冻结实验。冻结间内空气温度采用双位调节,温度上限为 -19°C ,下限为 -24°C ,采用温湿度记录仪记录冻结过程中空气温湿度的变化并输入到食品的冻结模型中。在冻结过程中冷风机始终保持运行,维持库房内一定的空气流速。风机出口直径经测量为 0.53 m,使用热线风速仪测得冷风机出口风速为 7.82 m/s。

冻结实验的对象为带有外包装分割肉,外包装分别为长方体形状的纸盒和圆柱体形状的铁盒。分割肉表面均覆盖有一层聚乙烯薄膜,与包装材料之间均留有空气层。食品几何参数如表 2 所示。

表 2 包装食品的几何参数
Tab.2 Geometry of packaged foods

外包装	外形尺寸	包装材料	空气层
		厚度/mm	厚度/mm
纸盒	279 mm × 354 mm × 100 mm	5.5	16
铁盒	Φ340 mm × 62 mm	1	22

在食品内部不同位置安置热电偶,记录冻结过程中的温度变化情况,食品内热电偶的分布位置如图 2 所示。

3 结果与讨论

对上述实验条件下的食品冻结过程,应用本文提出的模型进行模拟,以验证模型的准确性。另外,分别采用忽略空气层和以热阻处理空气层的方法对冻结过程进行模拟,与本文的模型结果进行比较分析。

图 3 是纸盒包装的分割肉在冻结过程中的温度变化情况,通过食品中心和上表面的温度对比,可以看到,模型预测结果与实验数据吻合较好,误差主要来源于模拟中对食品所作的一维假设。从图中可以看到,食品上、下表面的降温曲线有很大的差异,由于食品上表面与包装材料之间存在空气层,导致食品下表面的温度下降要比上表面快得多,空气层的存在增加了食品外包装的热阻,在起到一定保护作用的同时,也减小了食品的降温速度。当忽略空气层的影响时,由于没有考虑空气层的热阻,使食品的中心温度下降过快,与实验结果有较大误差,如果进一步忽略包装材料的热阻,模拟结果的准确度会进一步下降;当使用导热来处理空气层传热时,由于空气的导热热阻远大于实际空气层发生的自然对流和辐射换热的热阻,使预测结果降温过慢,甚至不能在规定时间内完成冻结。

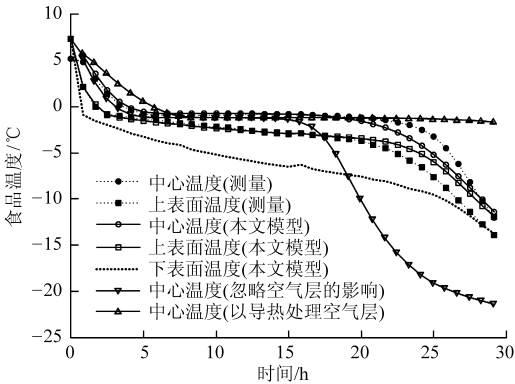


图 3 纸盒包装食品冻结过程中食品的温度变化
Fig. 3 Temperature profile of food packed in carton box during freezing process

图 4 为纸盒包装食品在冻结过程中包装材料的温度变化情况。从图中可看到,模拟得到的空气层温度变化与实验数据较为一致。由于库房温度的控制策略的影响,库房内的空气温度不断在上下限之间波动,这种波动在向食品内部深入的过程中,逐渐减弱。包装材料内外表面的温度仍然有很大的波动,空气层温度的波动已经很小,而食品内部各点的

温度几乎看不到任何波动,可见包装的存在确实能够对食品本身起到一定的保护作用,减小外部环境温度波动对于食品本身的影响。

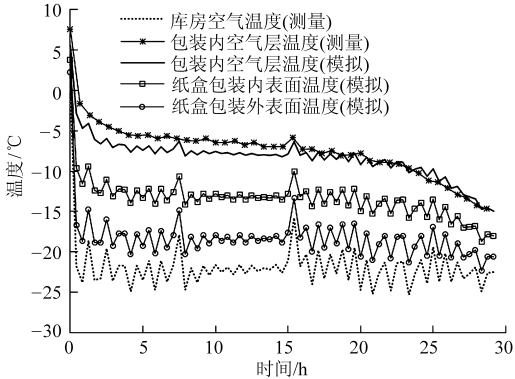


图 4 纸盒包装食品冻结过程中包装材料的温度变化
Fig. 4 Temperature profile of packaging system in packaged food with carton box during freezing process

图 5 是铁盒包装的分割肉在冻结过程中的温度变化情况,由于铁盒包装的食品厚度仅为纸盒内食品的 1/2,其几何形状更加趋于无限大平板,模拟中所作的假设对模拟精度影响更小,铁盒模拟结果要比纸盒模拟结果有着更高的准确度。从图中可以看到,铁盒包装食品的降温过程要比纸盒快得多,与纸盒食品的冻结过程类似,食品上下表面的温度存在差异,由于空气层的存在,下表面的降温过程要比上表面快得多,食品中心位置与上表面之间的温差很小。当忽略空气层热阻或者以导热来处理空气层传热时,模拟结果与实验结果都有较大的误差。可见本文提出的模型能够更加准确地模拟带有包装的食品的冻结过程。

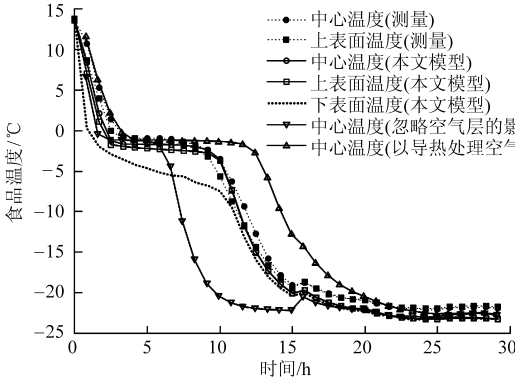


图 5 铁盒包装食品冻结过程中食品的温度变化
Fig. 5 Temperature profile of food packed in iron box during freezing process

铁盒包装食品的内部温度波动情况与纸盒类似,如图 6 所示。从图中可以看到,模型预测结果与测量结果误差很小。由于铁盒材料本身的导热系数很大,铁盒包装材料的内外表面温度几乎相等。在铁盒包装食品的冻结过程中,从外向内,温度的波动

幅度越来越小,可见包装的存在减缓了外部环境波动对冻结过程的影响。铁盒包装食品冻结过程中食品外部的热阻主要为空气层的热阻以及食品与外部空气间的对流换热热阻。

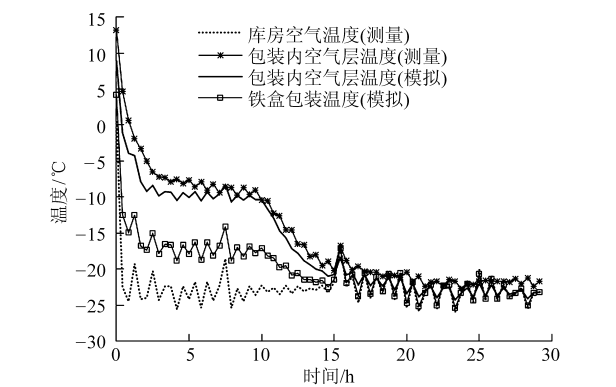


图 6 铁盒包装食品冻结过程中包装材料的温度变化
Fig. 6 Temperature profile of packaging system in packaged food with iron box during freezing process

冻结过程中纸盒食品的包装的热阻变化情况如图 7 所示。假设包装材料本身的热力学性质在冻结过程中保持不变。在食品底层,仅存在包装材料本身,而在食品顶层,除了包装材料外,还存在一层空气层。从图 7 中可以看到,食品底层的热阻在冻结过程中保持不变,而在食品的顶层中,空气层的热阻与包装材料本身的热阻比较接近,使食品顶层总的热阻达到底层热阻的 2 倍以上。随着冻结过程的进行,空气层的热阻缓慢增大,增大的幅度不大。

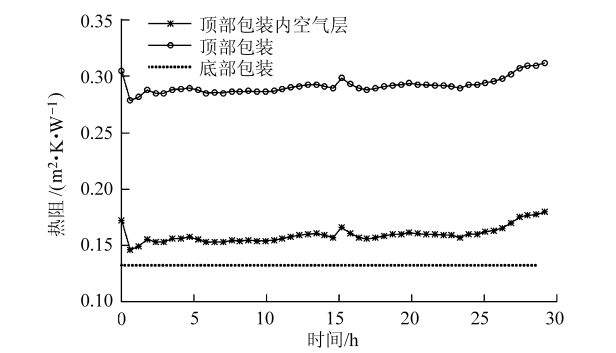


图 7 纸盒包装食品冻结过程热阻变化
Fig. 7 Thermal resistance profile of food freezing packed in carton box

图 8 是铁盒食品的包装的热阻变化趋势图,同

纸盒一样,假设铁盒材料本身的热阻不变。从图中可以看到,空气层的热阻远大于包装材料本身的热阻,使食品顶层的热阻远大于食品底层,造成食品内部不同位置冻结过程的差异。另外,空气层的热阻在冻结前期迅速增大,而当食品冻结完成后,食品本身的温度趋于稳定,空气层的热阻也趋于稳定。空气层热阻的变化与食品温度的变化具有相反的趋势,同时空气层热阻还受到外界空气的温度波动的影响。可见食品与包装材料之间的空气层对于食品冻结有很大的影响,而且其影响还会随着冻结过程的进行不断发生改变。

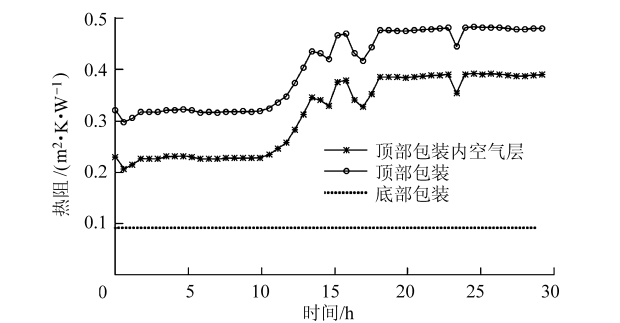


图 8 铁盒包装食品冻结过程热阻变化
Fig. 8 Thermal resistance profile of food freezing packed in iron box

4 结束语

本文研究了包装材料对食品冻结过程的影响,首先使用 CFD 方法模拟食品的冻结条件及食品表面传热系数,在食品包装的传热过程模拟中,使用经验公式计算空气层中的自然对流和辐射换热,最后使用有限差分方法模拟食品内部的传热过程。将模拟结果与实验结果进行对比,本文的模型可以比较准确地模拟带包装食品的冻结过程。在食品冻结过程中,包装的存在确实可以对外界环境温度的波动起到一定的阻隔作用,但同时却也减慢了食品的冻结速率,影响食品的冻结质量。在食品包装中,空气层对食品冻结往往有很大的影响,尤其是对于自身热阻较小的包装材料而言,空气层的热阻在冻结过程中不断增大,其变化趋势与食品本身的降温过程相反。

参 考 文 献

- 1 Trujillo F J, Pham Q T. A computational fluid dynamic model of the heat and moisture transfer during beef chilling [J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(6): 998 – 1009.
- 2 田雪. 冻分割肉包装状况对产品质量的影响 [J]. 肉类工业, 2001(4): 33.
- 3 Kondjoyan A. A review on surface heat and mass transfer coefficients during air chilling and storage of food products [J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(6): 863 – 875.
- 4 Pham Q T, Trujillo F J, Mcphail N. Finite element model for beef chilling using CFD-generated heat transfer coefficients [J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(1): 102 – 113.
- 5 Hu Z, Sun D W. Predicting local surface heat transfer coefficients by different turbulent $k-\varepsilon$ models to simulate heat and moisture

transfer during air-blast chilling[J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24(7): 702 – 717.

6 Verboven P, Nicolaï B M, Scheerlinck N, et al. The local surface heat transfer coefficient in thermal food process calculations; a CFD approach[J]. Journal of Food Engineering, 1997, 33(1): 15 – 35.

7 Sun D W, Hu Z. CFD predicting the effects of various parameters on core temperature and weight loss profiles of cooked meat during vacuum cooling[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 34(1 – 3): 111 – 127.

8 Hu Z, Sun D W. CFD simulation of heat and moisture transfer for predicting cooling rate and weight loss of cooked ham during air-blast chilling process[J]. Journal of Food Engineering, 2000, 46(3): 189 – 197.

9 Delgado A E, Sun D W. Heat and mass transfer models for predicting freezing processes—a review [J]. Journal of Food Engineering, 2001, 47(3): 157 – 174.

10 Sun D W. Handbook of frozen food processing and packaging[M]. Boca Rato, FL: CRC Press, 2012.

11 黄劲松,苑增之,王献文,等. 分割肉冻结过程的测试及分析[J]. 冷藏技术,2004(3):7 – 14.

12 Nahid A, Bronlund J E, Cleland D J, et al. Modelling the freezing of butter[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(1): 152 – 160.

13 Nahor H B, Hoang M L, Verboven P, et al. CFD model of the airflow, heat and mass transfer in cool stores[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(3): 368 – 380.

14 陆蓓蓓. CFD 在低温流场中的应用[J]. 制冷空调与电力机械,2005(4):21 – 24.

15 赵春江,韩佳伟,杨信廷,等. 基于 CFD 的冷藏车车厢内部温度场空间分布数值模拟[J]. 农业机械学报,2013,44(11): 168 – 173.

Zhao Chunjiang, Han Jiawei, Yang Xinting, et al. Numerical simulation of temprature field distribution in refrigerated truck based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(11):168 ~ 173. (in Chinese)

16 王剑锋,胡熊飞. 冷库冻结间气体流场模拟[J]. 冷藏技术,1995(4):7 – 17.

17 Wolfshtein M. The velocity and temperature distribution in one-dimensional flow with turbulence augmentation and pressure gradient[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1969, 12(3): 301 – 318.

18 Holman J P. Heat transfer[M]. New York: McGraw Hill Higher Education, 2010.

19 Moureh J, Laguerre O, Flick D, et al. Analysis of use of insulating pallet covers for shipping heat-sensitive foodstuffs in ambient conditions[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 34(1 – 3): 89 – 109.

Study on the Effects of Packaging on Food Freezing

Wang Guiqiang Zou Pinghua Liu Mingsheng Liu Yongxin

(School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The effects of packaging on food freezing was investigated using both modeling and experimental methods. First, CFD method was employed to model the freezing condition of food in freezing chamber, including air temperature, air velocity and turbulent intensity, which was then used to calculate the surface heat transfer coefficient of food product. Empirical relations for free convection and radiation were used to simulate the heat transfer inside the air layer between food and packaging material. Fourier formula was applied to model the heat transfer inside food. Finally, an iteration scheme was used to combine all parts together. Freezing experiments were conducted in a small freezer to verify the model, which showed encouraging agreements on freezing curves of food at different locations. Packaging has a big influence on food freezing, food with different packaging differs greatly in freezing process. The thermal resistance of air layer in packaging changes in a reverse trend of food temperature drop.

Key words: Food freezing Packaging Air layer Mathematical model