

# 胡萝卜冷冻干燥预冻过程温度场的三维数值模拟

姚智华<sup>1</sup>, 郭玉明<sup>2</sup>

(1. 安徽科技学院机电与车辆工程学院, 安徽凤阳 233100) (2. 山西农业大学工学院, 山西太谷 030801)

**摘要:** 预冻是食品冷冻干燥的重要阶段, 在预冻阶段, 食品必须冻结至共晶点温度以下。为了弥补实验温度测量耗时耗材且获得信息有限的缺陷, 本文在建立预冻过程数学模型的基础上, 采用计算流体力学的方法, 用 FLUENT6.3 软件对胡萝卜预冻过程的温度场和冻结相变界面的动态推进过程进行了三维非稳态数值模拟。模拟结果表明, 随着时间的推移, 冻结界面从胡萝卜底部逐渐推进到胡萝卜表面, 但由于胡萝卜外表面与周围冷空气存在自然对流作用, 因此最后冻结凝固的位置位于略低于胡萝卜上表面的区域。对于 10 mm 厚度的胡萝卜而言, 大约 25 min 时, 内部冻结完成。在 40 min 以后, 内部的温度就已经低于共晶点温度-10 °C。对胡萝卜冷冻干燥预冻过程进行了实验验证, 数值模拟结果与验证实验结果较为吻合, 并且准确的预测了预冻过程。

**关键词:** 冷冻干燥; 预冻; 数学模型; 温度场; 计算流体力学

**文章编号:** 1673-9078(2014)2-165-169

## Three Dimensional Numerical Simulation of Temperature Field of Carrot Pre-Freezing Process During Freeze-drying

YAO Zhi-hua<sup>1</sup>, GUO Yu-ming<sup>2</sup>

(1.School of Mechanical and Automobile Engineering, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, China) (2.College of Engineering, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

**Abstract:** Pre-freezing is a significant stage during freeze-drying of foods in which the freezing temperature must be under the eutectic point. In order to compensate the defects in terms of consuming time and materials as well as getting limited information for experimental temperature measurement, the mathematical model of freezing was established and three dimensional unsteady numerical simulation of temperature field and dynamic propulsion of freezing interface were analyzed using FLUENT 6.3 based on computational fluid dynamics. The simulation results indicated that the freezing interface gradually moved from bottom to surface of carrot as the time increased. Due to the natural convection of cold air surrounding carrot surface, the last solidification zone was slightly below the upper surface area. The solidification time was about 25 minutes for carrot with thickness of 10 mm. After 40 minutes, the internal temperature was -10 °C lower than the eutectic point temperature of carrot. Numerical simulation verified by experiments showed that the result was in good agreement with the experiment, and could be accurately prediction of the freezing process.

**Key words:** freeze-drying; pre-freezing; mathematical model; temperature field; computational fluid dynamics

食品冷冻干燥技术由于充分保留了食品的营养成分、色泽风味和形态, 因此在食品领域得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。冷冻干燥一般分为三个阶段: 预冻阶段、升华干燥阶段和解析干燥阶段。在预冻阶段, 为了防止升华干燥过程中食品表面起泡变皱, 食品必须冻结至共晶点温度以下 5~10 °C。预冻时食品内部温度获取的传统方法是热电偶实验测量, 但这种做法耗时耗财, 局限性大且获得的信息有限。而计算流体力学

收稿日期: 2013-08-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30771242, 31171450); 安徽省教育厅自然科学研究项目 (KJ2011Z071)

作者简介: 姚智华 (1977-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 食品冷冻干燥

通讯作者: 郭玉明, 男, 教授, 博士生导师

(CFD) 可以很好地解决这个问题。近年来, 以有限体积法和有限元法发展起来的计算流体力学技术在制冷领域得到了广泛的研究与应用<sup>[4]</sup>。Nahor 利用 CFD 方法对冷库内部的温度场、速度场和水汽流场进行了非稳态模拟<sup>[5]</sup>。Chhanwal 利用 CFD 方法对面包烘烤过程中的温度场和烘烤变色进行了数值模拟<sup>[6]</sup>。Santos 应用有限元法, 利用 Matlab 6.5 软件编程模拟了蘑菇的冷冻干燥时间, 模拟结果和实验数据非常吻合<sup>[7]</sup>。Jafari 利用 FLUENT 6.0 软件模拟了射流冷却过程中射流孔间距、空气流速和喷嘴到平板状食品的距离等因素对冻结时间的影响<sup>[8]</sup>。Roberto 应用有限体积法数值模拟了番木瓜片三维热风干燥过程的温度与水汽分布, 模拟数据与试验数据较为一致<sup>[9]</sup>。在国内, 李杰

采用计算流体力学方法,对虾仁在鼓风冻结装置中的冻结过程及冻结时间进行了二维非稳态模拟,模拟结果与实验结果吻合较好<sup>[10]</sup>。

虽然计算流体力学方法在食品加工领域得到了广泛应用,但食品冷冻干燥预冻过程的 CFD 模拟在国内外研究极少。本文采用计算流体力学方法,应用 FLUENT 6.3 软件,对胡萝卜冷冻干燥预冻过程进行了三维非稳态数值模拟,得到了胡萝卜预冻过程中温度场和相变界面的动态变化,并进行了实验验证。本文的数值模拟方法对深入研究食品冷冻干燥预冻过程机理,指导实际生产提供了一定的理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

本文以 JDG-0.2 型真空冻干试验机为实验装置。该冻干机主要由冻干室、冷阱、加热系统、真空系统、制冷系统、电气控制设备、微机监控系统等组成,冻干机的各部分组成情况和冻干室内部结构如图 1 所示。电加热板和冷阱分别位于冻干室的前后两侧,冷阱是不锈钢薄板,冷凝管紧贴在该不锈钢的背面,因此该不锈钢板充当了冷阱的功能。冷阱的最低温度一般设定为 -40 ℃。

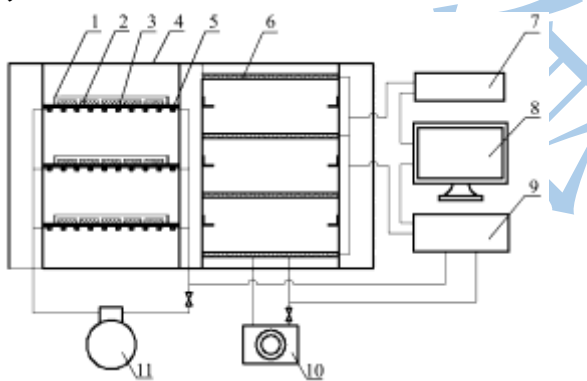


图 1 JDG-0.2 冻干机结构简图

Fig.1 Diagram of JDG-0.2 freeze drying machine

注: 1.预冻料盘, 2.胡萝卜, 3.冷阱, 4.冻干室, 5.冷凝管, 6.加热板, 7.测量系统, 8.微机, 9.电气设备, 10.真空系统, 11.制冷系统。

预冻时,胡萝卜切片均匀的布置在铝制料盘中,料盘与冷阱不锈钢板直接接触,因此冷阱可对该盘装食品进行预冻,在干燥过程中冷阱也可以捕获从物料中排出的水汽。

### 1.2 数学模型

在预冻过程中,加热系统和真空系统都没有启动,冻干室内部为空气自然对流,压强为一个标准大气压。

为了研究方便,作出如下假设:

- (1) 不考虑冻干室内部的辐射影响。
- (2) 冻干室内的空气不可压缩且符合 Boussinesq 假设;
- (3) 胡萝卜物性各向同性,初始冻结温度保持不变。

考虑到胡萝卜切片为短圆柱体,故采用三维极坐标系建立其冻结方程。由于胡萝卜内部形成固、液两相区,因此应分别建立其传热方程。

#### 1.2.1 液相区传热方程

$$\rho_l c_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = k_l \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_l}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_l}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T_l}{\partial z^2} \right] + q$$

注:  $\rho_l$ 、 $c_l$  和  $k_l$  分别表示液相区的密度、比热容和导热系数,  $T_l$  表示液相区的温度,  $q$  为内热源。

#### 1.2.2 冻结区传热方程

$$\rho_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = k_f \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_f}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial z^2} \right] + q$$

注:  $\rho_f$ 、 $c_f$  和  $k_f$  分别表示冻结区的密度、比热容和导热系数,  $T_f$  表示冻结区的温度。

#### 1.2.3 两相界面传热方程

冻结界面通常认为很薄,不能积累能量,在任何时刻通过液相区和冻结区传递到两相界面处的热量等于水分凝固所放出的热量,必须满足温度连续性条件和能量守恒条件。

$$T_l = T_f = T_i$$

$$k_s \left( \frac{\partial T_s}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_s}{\partial \theta} + \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) - k_l \left( \frac{\partial T_l}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_l}{\partial \theta} + \frac{\partial T_l}{\partial z} \right) = \rho_s L \left( \frac{dr}{dt} + r \frac{d\theta}{dt} + \frac{dz}{dt} \right)$$

注:  $\rho_s$  表示胡萝卜的密度,  $L$  表示胡萝卜的凝固潜热。

### 1.3 初始条件和边界条件

胡萝卜料盘在室温下放入冻干室,因此胡萝卜内部初始温度应等于室温。假设料盘在放入冻干室时,冷阱与冷阱周围冷空气已经达到预定的温度。因此胡萝卜底部应该属于第一类边界条件,而胡萝卜的侧面和顶面与冷空气自然对流,属于第三类边界条件。

初始条件:

$$T_l|_{t=0} = T_f|_{t=0} = T_0,$$

$T_0$  为初始温度。

边界条件:

$$T = T_w \quad (\text{底面})$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{\partial T}{\partial z} = h(T - T_a) \quad (\text{侧面和顶面})$$

注:  $T_w$  是胡萝卜底面料盘表面温度,  $T_a$  是周围冷空气温

度,  $h$  是空气自然对流传热系数。

### 1.4 胡萝卜物性参数

胡萝卜的物性参数如表 1 所示。

表 1 胡萝卜物性参数<sup>[11-12]</sup>

Table 1 Physical parameters of carrots	
物性参数	取值
初始含水率	88%
初始冻结温度/°C	-2
共晶点温度/°C	-18.1
冻前比热容/[kJ/(kg·K)]	3.88
冻后比热容/[kJ/(kg·K)]	1.95
导热系数/[W/(m·k)]	0.515
冻结潜热/(kJ/kg)	2.95
热扩散系数/(10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s)	0.139

### 1.5 胡萝卜切片尺寸和网格划分

本次模拟和试验的胡萝卜切片的尺寸和网格划分情况如图 2 所示, 其直径为 40 mm, 厚度为 10 mm: 在 GAMBIT 2.2.30 中, 采用 copper 方法对胡萝卜进行三维网格划分, 单元类型为六面体, 共有 62400 个单元, 193040 个面和 68334 个节点。

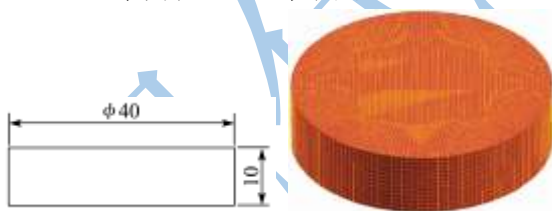


图 2 胡萝卜网格划分图与几何尺寸

Fig.2 Mesh and geometry size of carrots

### 1.6 离散格式与边界条件设置

采用有限体积法对控制方程进行离散, 非稳态时间项的离散采用一阶隐式格式, 采用 PISO 算法实现压力、速度的耦合, 松弛因子取默认设置。控制方程中各项的离散格式选择二阶迎风格式。

胡萝卜底面为导热方式, 实验中热电偶测得料盘表面的温度为 -35 °C, 略低于冷阱温度, 这是由于冷阱与料盘之间存在热阻, 因此设置胡萝卜底面温度为

238.15 K。胡萝卜侧面和顶面均为冷空气自然对流传热, 一般取自然对流系数为 5~10, 本次模拟取 10。实验中测得冻干室内预冻胡萝卜周边空气温度为 -30 °C, 故设置冷空气温度为 243.15 K。在操作条件设置工作压力为标准大气压, 激活重力项, 在 Z 轴处设重力加速度为 -9.8 m/s<sup>2</sup>, 设置胡萝卜内部初始温度为 293 K。

## 2 结果与分析

### 2.1 数值模拟结果

采用 FLUENT6.3 软件进行数值模拟。能量方程的收敛精度设置为 10<sup>-8</sup>, 其他方程的收敛精度为 10<sup>-5</sup>, 时间步长取为 1 s。

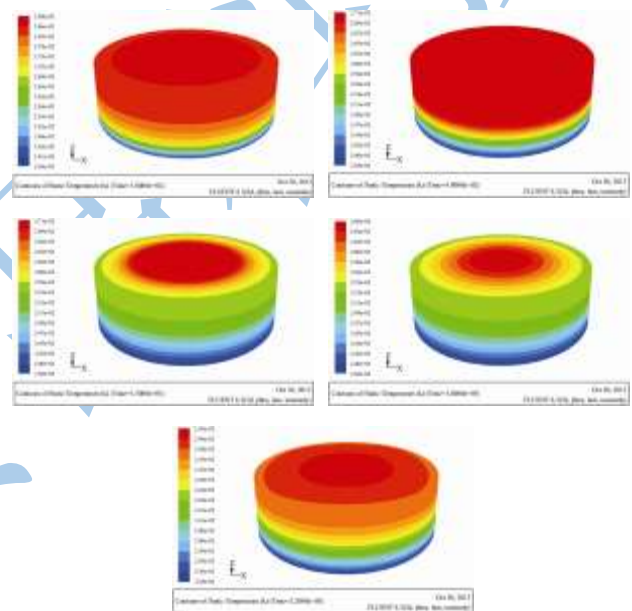


图 3 不同冻结时间三维温度场

Fig.3 Three dimensional temperature fields of different freezing time

图 3 和图 4 是胡萝卜冻结过程中三维温度场和中心切片温度场的变化情况。从图 3 和图 4 可以看出, 在预冻初期 100 s 内, 胡萝卜的整体温度下降很快, 在 500 s 到 1500 s 这个阶段, 可以看到内部最高温度为 271 K, 说明此时胡萝卜正处于结晶阶段。而且在 1500 s 时, 最高温度区域处于胡萝卜上表面的中心圆形区域内。到 1600 s 时, 可以看到胡萝卜内部的最高温度已经降到 266 K, 说明此时胡萝卜整体已冻结完毕; 到 2200 s 时, 此时最高点温度已经降至 245 K, 低于其共晶点温度 -10 °C, 此时可以认为预冻完成。

图 5 为中心切片处冻结相变界面的动态推进过程。从图 5 可以看出, 在预冻开始 3 s 时, 胡萝卜内部基本都是液相。由于受到周围冷空气自然对流的影

响,最低温度处于底层的边缘。随着时间的推移,相变界面逐渐向胡萝卜上表面推进。在 1000 s 时,只有紧贴上表面的环形区域处于液态,此处温度低于周围温度的原因是胡萝卜上表面和侧面均受到冷空气自然对流的影响。随后这个区域开始逐渐变小,到 1600 s 时,胡萝卜内部水分全部冻结,变为固态。

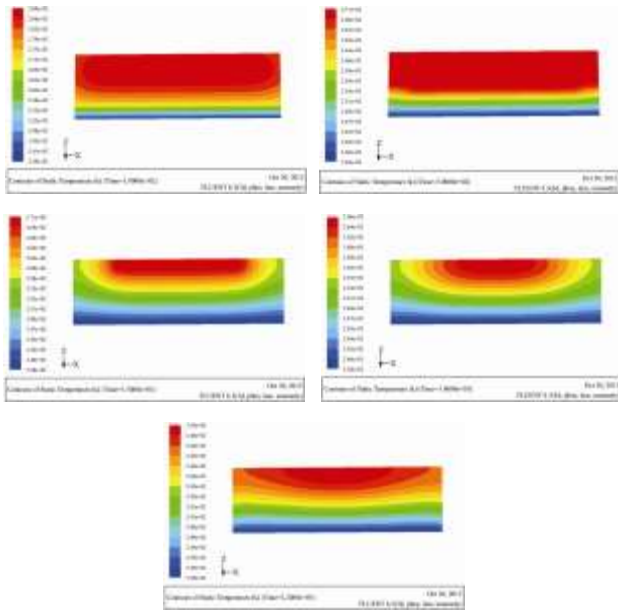


图 4 不同冻结时间中心切片的温度场

Fig.4 Center slice temperature fields of different freezing time

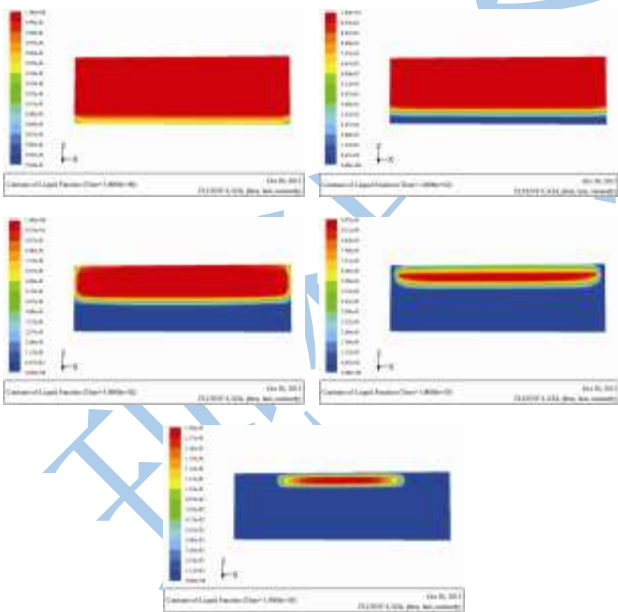


图 5 中心切面处相变界面的动态变化

Fig.5 Dynamic variation of phase change interface of center slice face

## 2.2 实验验证结果

为了验证数值模拟的正确性,在 JDG-0.2 型真空冻干试验机上进行了验证实验。将新鲜的胡萝卜按照

规定尺寸切片。为了使实验条件与模拟条件一致,待冷阱与周围空气温度恒定后,方将料盘放置在冷阱不锈钢板上,在胡萝卜中心位置布置好试验机自带的测温热电偶。在预冻过程中,每隔 2 min 记录一次数据,并绘制预冻曲线。

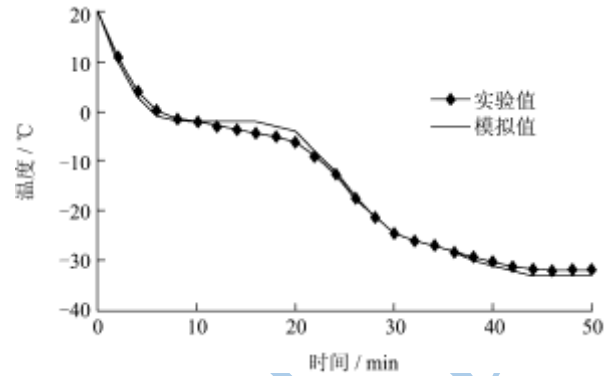


图 6 胡萝卜预冻时中心温度随时间的变化情况

Fig.6 Variation of central temperature with respect to time during freezing stage of carrots

图 6 所示为胡萝卜预冻时中心温度数值模拟结果与实验测量结果的变化情况。从图 6 可以看出,模拟结果与实验结果基本吻合。在 8 min 左右时,胡萝卜中心温度很快下降到初始冻结温度-2 °C,图 4 的模拟结果显示中心温度场的温度也下降到-2 °C,图 5 的相变界面也显示在 500 s 时,相变界面推进到中心面处。在 8~18 min 的时间段内,实验测得温度在缓慢下降,而数值模拟温度则出现了一个平台,略有差异,这是因为这段时间胡萝卜中心处正处在冻结过程,由于胡萝卜内部水分冻结时会释放出冻结潜热,所以此处温度下降较慢,但由于胡萝卜含有多种组分,因此冻结过程是从初始冻结温度开始,在较宽的温度范围内不断进行的,在此过程中不会出现明显的温度平台。而数值模拟设定冻结温度为定值,所以出现明显的温度平台。在 18~30 min 这段时间,温度下降很快,这是因为此时中心面已冻结,不再释放冻结潜热。在 30~40 min 时间段,温度下降缓慢,这是因为温差变小,传热驱动力变小。在 40~50 min 时,温度保持不变,稳定在-33 °C。

虽然数值模拟结果与试验结果在冻结平台处出现小的差异,但是无论从冻结各阶段温度和时间的,还是从冻结界面的推进情况来看,两者是较为吻合的。

## 3 结论

本文在建立预冻过程数学模型的基础上,应用计算流体力学方法与软件,对胡萝卜冷冻干燥预冻过程的温度场和冻结相界面的推进情况进行了数值模拟。验证实验结果与数值模拟结果较为吻合。数值模拟结

果表明,在胡萝卜预冻阶段,冻结界面从胡萝卜底部逐渐推进到胡萝卜表面,但由于胡萝卜周围存在冷空气的自然对流作用,因此最后冻结的位置应是略低于胡萝卜表面的区域。对于厚度为10 mm的胡萝卜制品,大约40 min以后,内部的温度就已经低于共晶点温度-10 °C,此时可以认为预冻完成。本文数值模拟的结果可以为冷冻干燥预冻过程的生产操作提供一定的理论指导。

### 参考文献

- [1] 华泽钊.冷冻干燥新技术[M].北京:科学出版社,2000  
HUA Ze-zhao. New Technology of Freeze Drying [J]. Beijing: Science press, 2006
- [2] 乔晓玲,闫祝炜,张原飞,等.食品真空冷冻干燥技术研究进展[J].食品科学,2008,29(5):469-474  
QIAO Xiao ling, YAN Zhu wei, ZHANG Yuan-fei, et al. Research Progress on Food Freeze-drying [J]. Food Science, 2008, 29(5): 469-474
- [3] 郭玉明,姚智华,崔清亮,等.真空冷冻干燥过程参数对升华干燥能耗影响的组合实验研究[J].农业工程学报,2004,20(4):180-184  
Guo Yu-ming, Yao Zhi-hua, Cui Qing-liang, et al. Combined Experimental Study on the Effects of the Operational Parameters on Energy Consumption of Sublimation-drying During Vacuum Freeze-drying [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(4): 180-184
- [4] Roberto A, Lemus M. Computational Simulation and Developments Applied to Food Thermal Processing [J]. Food Eng Rev, 2011(3): 121-135
- [5] 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: 368-380
- [6] Chhanwal N, Tank A K, Raghavarao S M, et al. Computational Fluid Dynamics (CFD) Modeling for Bread Baking Process-A Review [J]. Food Bioprocess Technology, 2012, 5: 1157-1172
- [7] Santos M V, Lespinard A R. Numerical Simulation of Mushrooms during Freezing Using the FEM and an Enthalpy [J]. Heat Mass Transfer, 2011, 47: 1671-1683
- [8] Jafari M, Alavi P. Effect of Some Parameters on Freezing Time of Slab Shaped Foods Under Two Impinging Slot Jets [J]. Journal of Applied Sciences, 2008, 12: 2234-2241
- [9] Roberto A, Mondaca L, Carlos E, et al. Coupled 3D Heat and Mass Transfer Model for Numerical Analysis of Drying Process in Papaya Slices [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116: 109-117
- [10] 李杰,谢晶.鼓风冻结虾仁时间的数值模拟及实验验证[J].农业工程学报,2009,25(4):248-252  
Li Jie, Xie Jing. Numerical Simulation of Freezing Time of Shelled Shrimps in an Air Blast Freezer and Experimental Verification [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4): 248-252
- [11] 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,2002  
HUA Ze zha, Li Yun fei, LIU Bao-lin. Theory and Equipment of Food Freezing and Cool Storing [M]. Beijing: China Machine Press, 2002
- [12] 徐林,王金鹏,邓力,等.热敏电阻法测量胡萝卜及马铃薯的热物性[J].农业工程学报,2008,24(11):237-241  
Xu Lin, Wang Jin-peng, Deng Li, et al. Thermistor for Measuring Thermophysical Properties of Carrot and Potato [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(11): 237-241