

苹果冷藏保鲜过程的传热学分析^{*}

张 敏¹, 张百良¹, 孙治强¹, 赵惠忠²

(1 河南农业大学 农业部可再生能源重点实验室, 河南 郑州 450002;

2 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200030)

[摘 要] 从传热学角度分析了采后苹果冷藏过程中果实内部的热量传递状况, 并利用数值方法模拟计算了苹果果实内部一维有内热源不稳态温度场, 并根据结果定量分析了环境温度、组织导温系数以及组织呼吸代谢热等对传热的影响。

[关键词] 苹果; 冷藏保鲜; 传热分析

[中图分类号] S661.109⁺.3

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2004)12-0061-04

植物作为具有生命特征的有机体, 其体温的改变取决于所处环境温度的变化, 在大多数情况下, 环境温度通过改变植物体温而影响其生理生化代谢、生长发育和开花结果等一系列生命活动。在果实采后的代谢过程中, 其水和无机物供应全部断绝, 光合作用基本停止, 呼吸成为新陈代谢的主导过程, 而其呼吸速率的变化受温度的影响极大, 在一定温度范围内, 温度升高, 酶活性增强, 呼吸速率随之增大; 温度降低, 呼吸速率随之下降, 某些果实在某一阶段还会发生呼吸跃变^[1]。这一特殊的生理现象将直接影响植物的热传递过程。目前, 我国在此方面已作了大量工作, 但这些研究大多是从生物学的角度, 而很少从热传导方面进行研究, 且定性研究较多, 定量研究较少^[2]。现以采后苹果果实为研究对象, 结合热物理学研究方法, 采用数值计算中的有限差分法研究了苹果内部各层瞬时的温度场变化规律, 尝试用基本的导热微分方程导出具有生命特征的植物组织传热方程, 并用以进行实例模拟计算, 旨在探索植物传热特性的一般规律, 以期深入了解植物逆境生理的时间迟滞效应^[3], 解释植物的某些生理现象, 并为苹果的低温保鲜贮藏提供科学的理论依据。

1 果实采后生物组织热传递微分方程

1.1 基本的导热微分方程^[4]

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad } T) + q_v$$

式中, ρ 为物体的有效密度, kg/m^3 ; c 为物体的有效比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T 为物体内某点某时刻的温度, K ; t 为时间, s ; λ 为物体的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; q_v 为物体内部热源, W/m^3 。

1.2 果实采后生物组织传热方程

采后的果实, 由于其特殊的生物结构, 使得其热传递现象不同于一般的生物组织, 即活体动物组织存在血液灌流问题, 活体植物组织存在水分和无机盐的输运问题等。基于此, 可以作以下宏观处理^[5]:

- (1) 组织物性只受温度影响, 但在某一温差范围内, 可视为均匀物性;
- (2) 为便于计算, 将组织按均匀同质处理, 其热物性可采用当量热物性参数进行计算;
- (3) 生化反应不改变主要成分组成;
- (4) 在某一温度范围内, 某一时间段内组织呼吸代谢热按常量处理;
- (5) 不考虑细胞组织骨架的可能形变。

取半径为 r , 厚度为 dr 的球壳为控制体积, 则球形果实一维常物性、有内热源的不稳态导热方程^[6]为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{q_v}{\rho c}$$

式中, $a (= \frac{\lambda}{\rho c})$ 为生物组织导温系数, m^2/s ; λ 为生物组织的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; q_v 为生物组织体内热源, W/m^3 ; T 为生物组织内某点某时刻温度, K ; t

* [收稿日期] 2003-10-27

[基金项目] 河南省重大科技攻关项目 (0322010900)

[作者简介] 张 敏 (1969 -), 女, 河南郑州人, 高级工程师, 在读博士, 主要从事植物传热与果蔬贮藏研究。E-mail: zhangmin9 @eyou.com

为时间, s; r 为生物组织某点(层)半径, m。

2 数值模拟

2.1 有限差分方程的建立^[7,8]

对于苹果升温或降温过程中的热传递, 可视为对时间一维的不稳态导热过程。因此, 可利用有限差分法进行数值求解。实际分析中, 在一定温度、时间区域内可将苹果果实视作常物性、内热源恒定的球体, 故可将苹果内部空间分割成网格单元, 将时间分割成许多间隔, 如图 1 所示。

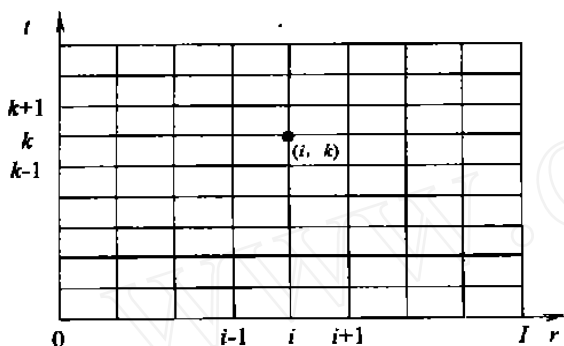


图 1 有限差分网格

Fig. 1 Finite difference grid

由图 1 可见, 将苹果沿半径方向按间距 Δr 分割成 I 层, 时间从 $t=0$ 开始按 Δt 分割, 用 i 表示内部某点(层)位置, k 表示时刻, 对应于图 1 中网点 (i, k) 。

2.1.1 苹果果实不稳态导热的数学描述 对处于第三类边界条件下, 半径为 r 的具有均匀内热源、常物性的球体, 其非稳态导热的完整数学描述为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{q_v}{\rho c} \quad (t > 0, 0 \leq r \leq R) \quad (1)$$

$$\text{初始条件: } T(r, 0) = T_0, (t = 0, 0 \leq r \leq R) \quad (2)$$

$$\text{边界条件: } -\lambda \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=R} + \alpha (T_\infty - T) +$$

$$\frac{q_v}{2} = \rho c \cdot \frac{\Delta r}{2} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}, (t > 0, r = R) \quad (3)$$

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, (t = 0, r = 0) \quad (4)$$

2.1.2 苹果内部节点的差分方程式 温度对时间 t 的一阶导数采用向前差分, 即

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{i,k} = \frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\Delta t} \quad (5)$$

温度对半径 r 的二阶导数采用中心差分, 即

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right)_{i,k} = \frac{T_{i+1}^k - 2T_i^k + T_{i-1}^k}{\Delta r^2} \quad (6)$$

温度对半径 r 的一阶导数采用向前差分:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{i,k} = \frac{T_{i+1}^k - T_i^k}{\Delta r} \quad (7)$$

式中, T_i^k 为网点 (i, k) 的温度, 下标表示位置点, 上标表示时间, 依次类推。

将式(5), (6), (7)代入式(1)和(4), 整理得内节点温度方程:

$$T_i^{k+1} = \frac{2 \cdot a \cdot \Delta t + a \cdot \Delta t \cdot r_i}{r_i \cdot \Delta r^2} T_{i+1}^k + \frac{a \cdot \Delta t}{\Delta r^2} T_{i-1}^k + \frac{r \cdot \Delta r^2 - 2 \cdot a \cdot \Delta t \cdot \Delta r - 2a \cdot \Delta t \cdot r}{r \Delta r^2} T_i^k + \frac{q_v \cdot \Delta t}{\rho c}, (i = 1, 2, \dots, I-1) \quad (8)$$

$$T_i^k = T_{i+1}^k \quad (i = 0) \quad (9)$$

2.1.3 苹果边界节点的差分方程式 温度对半径 r 的一阶导数采用向后差分, 可表示为

$$\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{I,k} = \frac{T_I^k - T_{I-1}^k}{\Delta r} \quad (10)$$

温度对时间 t 的一阶导数采用向前差分, 即

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_I^{k+1} - T_I^k}{\Delta t} \quad (11)$$

将式(8), (9)代入式(3), 整理得到边界层温度方程:

$$T_I^{k+1} = (1 - \frac{2N+2}{M}) T_I^k + \frac{2N}{M} T_\infty + \frac{2}{M} T_{I-1}^k + \frac{2 \cdot \Delta r}{\lambda \cdot M} \cdot q_v$$

其中, $M = \frac{\Delta r^2}{a \Delta t}$, $N = \frac{\alpha \Delta r}{\lambda}$ 。

2.2 理论分析

以采后新鲜苹果果实(含水量 840 g/kg)降温贮藏过程为例。实际分析中, 设苹果直径 $D = 2r = 0.08$ m, 初始温度为 26℃, 突然放入空气温度为 6℃ 的恒温箱中, 苹果表面的平均对流换热系数 α 为 57 W/(m²·K)^[9]。苹果可视做球体, 内部各项同性, 而在果实采后的代谢过程中, 水和无机物供应全部断绝, 光合作用基本停止, 呼吸成为新陈代谢的主导过程, 新鲜果实在呼吸过程中要产生 CO₂, 正常的呼吸每产生 1 g CO₂ 放出 10.467 kJ 的热量, 并且在一定温度范围内, 温度升高, 酶活性增强, 呼吸速率随之增大, 放出的热能就多; 温度降低, 呼吸速率随之下降低, 放出的热能就少, 通常在 535℃, 温度每上升 10℃ 呼吸强度增大 11.5 倍^[10]。为简化计算, 这里采用 16℃ 时的呼吸热, 即 q_v 为 77 W/m³, 其组织

热物性取 16 时的热物性值 $a = 1.149 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $\rho c_p = 3.654 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$, $\lambda = 0.42 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ [11]。

计算过程是选取某一半径间隔 Δr 将苹果内部分割成 I 层,再根据边界节点差分方程式的稳定性条件 $M \geq 2N + 2$,选取时间间隔 Δt ,将初始温度及

已知条件代入方程 (12), (8), (9), 得到内部各点 (层) 温度,然后依次计算 $2\Delta t, 3\Delta t, \dots$, 各时刻的各点 (层) 温度直至所设定终止时间为止。

将计算结果绘成温度 - 时间关系曲线 (图 2), 图 2 中曲线 1, 2, 3, 4 分别为表面层、距表面 0.01 m 层、距表面 0.02 m 层、距表面 0.03 m 层的温度 - 时间关系曲线。

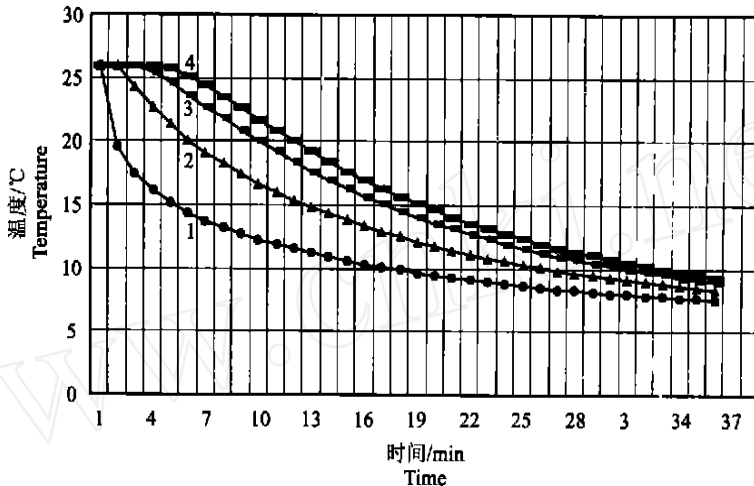


图 2 苹果内部温度变化与时间的关系曲线

Fig. 2 Relationship between time and temperature change in apple

3 结 论

3.1 外界温度对果实传热的影响

环境温度越高,果实体温越高,但植物体对外界温度变化的响应在时间上出现较长的滞后现象,即在降温开始后一段时间 (约 30 min) 内变化显著,当温度降到某一临界值后,降温变得十分缓慢,即生物学中的时间滞后效应,这一现象符合传热学的基本规律。

3.2 果实导温系数对传热的影响

由图 2 可以看出,在初始阶段,果实外部降温速率明显大于内部。由式 (1) 温度场分布模型可知,果实内外温差与其导温系数密切相关,导温系数越小,

果实内部温度变化传播得越慢,内外温差越大。

3.3 代谢热对传热的影响

植物体内由于呼吸作用产生的代谢热量可以增大体温,但对其自身温度变化影响较小 (小于 0.5 °C),其体温的改变主要取决于其所处环境温度的变化。

3.4 物理值的选取

在一定温度范围内,果实的导热系数、比热、导温系数等物性值可视为常数 [12, 13]。本文理论分析中,采用 16 时果实的常物性值,这一选取对果实内部各处实际温度值产生一定影响,但对冷藏过程中整体温度场的分布趋势影响不大。

[参考文献]

- [1] 刘道宏. 果蔬采后生理 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [2] 香山科学会议办公室. 生命科学中的热物理问题 [J]. 科学前沿与学术评论, 1997, 19(6): 49 - 54.
- [3] 刘祖祺, 张石城. 植物抗性生理学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1994.
- [4] 王补宣. 工程传热传质学 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [5] 王补宣, 王艳民. 生物传热基本方程的研究 [J]. 工程热物理学报, 1993, 14(2): 166 - 170.
- [6] Haghighi K. Modeling simultaneous heat and mass transfer in an isotropic sphere [J]. Transaction of the ASAE, 1988, 31(2): 629 - 637.
- [7] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [8] 王 俊, 许乃章, 陈贵祥. 采用有限差分法研究各向同性物料内部温度水分场 [J]. 农业工程学报, 1994, 10(9): 134 - 139.

- [9] 皮茨 D. 传热学[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [10] 华中农业大学. 蔬菜贮藏加工学[M]. 北京:农业出版社,1991.
- [11] 扈文盛. 食品常用数据手册[M]. 北京:中国食品出版社,1987.
- [12] 郑金宝,颜 波. 同时测定生物组织热物性参数(比热、导热系数和导温系数)的实验方法[J]. 低温工程,1991,62(4):44-50.
- [13] Lisowa H, Wujec M, Lis T. Influence of temperature and variety on the thermal properties of apples[J]. Int Agrophysics,2002,16:43-52.

Heat transfer analysis of apple during cold storage

ZHANG Min¹, ZHANG Bai-liang¹, SUN Zhi-qiang¹, ZHAO Hui-zhong²

(1 Key Laboratory of Renewable Energy, Ministry of Agriculture, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450002, China;

2 College of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract :Based on heat transfer, the process of heat transfer in apple fruit after harvest is analyzed during the cold storage. One-dimensional unsteady conduction with internal heat generation to apple fruit by using numerical method is calculated. The effects of heat transfer caused by the environmental temperature and metabolized heat are quantitatively analyzed, which plays an important role in further researching of fruit products during cold storage and on plant stress resistance.

Key words :apple; keeping fresh in cold storage; heat transfer analysis

(上接第 60 页)

Selection and indentification of antagonistic actinomycetes S-5210-6 from siol

SHU Xiur-lin¹, AN De-rong¹, ZHAN Qin-fu², MA Chi²

(1 College of Plant Protection, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Xi'an Hi-level Chemical Industry Co. Ltd., Shaanxi, Xi'an 710000, China)

Abstract :750 strains of actionmycetes were isolated from different soil samples collected from various areas with different vegetations at different altitude in Qinling mountainous, from which we selected antagonistic actinomycetes through agar plate method in culture dish, fermentation process and cell fermentation process from different soil samples collected. The result indicates that S-5210-6 has both antagonism and bacteriolysis against *Pyricularia grisea*, *Fusarium graminearum*, *Bipolaris sorokiniana*, *Exserohilum turcicum leonard*, *Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumerium*, *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*, *Altermaria solani*, *Erysiphe graminis* eight pathogenic fungi. According to its morphological, cultural, physio-biochemical characteristics and the analysis of the chemical components in its cell wall, it was designated as *streptomyces*.

Key words :soil-actinomycetes; antagonism selection; identification; *streptomyces*