

果蔬气调包装内相对湿度的预测模型与试验验证

卢立新^{1,2}, 蔡 明¹

(1. 江南大学包装工程系, 无锡 214122; 2. 国家轻工业包装制品质量监督检测中心, 无锡 214122)

摘 要: 包装内相对湿度调节控制是保证果蔬产品气调保鲜包装质量的重要技术环节。该文较完整地考虑果蔬包装内外热量交换和气体质量传输, 依据质量与能量守恒定律, 建立包装内质量与能量平衡关系。在此基础上, 导出气调包装内产品呼吸-蒸发模型, 得到包装内相对湿度变化的预测模型。以香菇产品为研究对象, 测定表征香菇呼吸速率, 设计 3 种工况 (不同质量、初始气体组分), 对香菇气调包装内的湿度进行预测与验证测试。结果表明, 理论预测与试验结果总体上吻合, 在包装的初始阶段理论结果稍有偏高; 初始气体组分对包装内相对湿度影响较大, 低氧高二氧化碳组分显著降低了相对湿度上升的速率, 同时延长了达到饱和状态的时间。

关键词: 果蔬; 气调包装; 相对湿度; 模型; 呼吸; 蒸发; 香菇; 预测

中图分类号: S609.2; S379

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)5-0021-06

卢立新, 蔡 明. 果蔬气调包装内相对湿度的预测模型与试验验证[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 21-26.

Lu Lixin, Cai Ming. Predicting model and experimental validation of relative humidity in modified atmosphere packages for fruits and vegetables[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 21-26. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

气调包装技术是先进的果蔬保鲜包装方法之一, 气调包装的效果和质量主要取决于包装容器内气体成份、温湿度的调节。人们在果蔬呼吸机理及测定方法, 包装内外气体交换机理, 不同产品适宜的气体组份等方面取得了大量的研究成果^[1-3], 并已进入工程应用。近年来, 包装内温湿度变化对气调包装产品质量的影响引起了工程技术人员的关注。

由于果蔬产品具有蒸发性, 包装内相对湿度将产生变化。尤其是呼吸速率较大的产品, 由于大多数包装材料的水蒸气透过率较低, 包装容器内会形成较高的相对湿度。当水蒸气达到饱和状态或者环境温度降低时易产生凝结水, 过高湿度也使微生物繁殖加快, 加速产品腐败变质。因此研究气调包装中相对湿度的变化, 对于控制调节包装中的相对湿度以及果蔬类产品的保鲜保质都是十分重要的^[4]。

气调包装中相对湿度的变化受产品呼吸作用、产品内部水分蒸发、包装材料渗透作用、贮藏环境条件以及包装工艺条件等多种因素的影响, 贮藏过程中相对湿度变化是一个动态过程且变化过程相当复杂; 同时由于产品的呼吸与蒸发过程的测试较困难, 故目前这一方面的

研究只是刚刚起步。

预测控制气调包装中相对湿度的变化, 产品呼吸-蒸发模型的建立和表征是关键。目前气调包装系统中蒸发速率数学模型还未很好地建立, 主要原因是在变化的 O₂ 和 CO₂ 的环境中产品表面由于呼吸发热而引起的蒸发现象还未很好地认识^[1]。Song^[5]应用热量和质量传输原理建立了一个呼吸蒸发模型用于预测越橘包装内温湿度变化, 但所建模型忽略了多种因素的影响。Kang^[6]建立了一简单的蒸发模型用于预测包装内苹果的质量变化。蔡明等^[7,8]对多种果蔬产品气调包装内的温湿度变化进行了实验测定与理论分析研究。

在此基础上, 本文较完整地考虑果蔬包装内外热量交换和气体质量传输, 建立包装内质量与能量平衡关系; 导出气调包装内产品呼吸-蒸发模型, 得到包装内相对湿度变化的预测模型。构建果蔬气调包装内湿度测试系统, 以香菇产品为研究对象, 测定香菇呼吸速率, 对香菇气调包装内的湿度进行试验测试与理论预测结果比较。分析不同包装工艺条件对包装内湿度变化的影响。

1 气调包装内果蔬产品呼吸-蒸发模型

产品的呼吸作用伴随着能量的产生。有氧呼吸产生的能量一部分储存在化学键内, 另一部分以呼吸热的形式释放出来。呼吸热在释放的过程中, 部分被产品本身吸收, 而使产品的温度升高; 部分被产品内部的自由水吸收, 而使这些水分蒸发; 其余部分释放到包装容器中。

根据能量守恒定律, 建立包装内能量平衡关系为:

收稿日期: 2006-03-14 修订日期: 2006-12-28

基金项目: 国家“十五”重大科技专项项目(2001BA804A23)

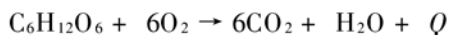
作者简介: 卢立新(1966-), 男, 江苏宜兴人, 教授, 主要从事农产品与食品保鲜保质包装与贮运技术、包装工艺与设备等研究。无锡江南大学包装工程系, 214122。Email: lulx@sytu.edu.cn

$$Q_r = Q_p + Q_t + Q_g + Q_f + Q_e \quad (1)$$

式中 Q_r ——产品的呼吸放热; Q_p ——产品吸热; Q_t ——产品内水蒸气的蒸发吸热; Q_g ——包装内气体吸热; Q_f ——包装体的吸热; Q_e ——包装内外气体渗透引起的热交换量。

1.1 呼吸热

气调包装内果蔬的呼吸为有氧呼吸。通常以葡萄糖为呼吸底物的呼吸方程可表示为^[5]:



产品的呼吸速率一般用氧气的消耗速率(R_{O_2})或者二氧化碳的产生速率(R_{CO_2})来表示。通常可采用 Michaelis-Menten 式方程表征果蔬产品的呼吸速率^[9]

$$R_{O_2} = \frac{V_{m1}[O_2]}{K_{m1} + (1 + [CO_2]/K_{u1})[O_2]} \quad (2)$$

$$R_{CO_2} = \frac{V_{m2}[O_2]}{K_{m2} + (1 + [CO_2]/K_{u2})[O_2]} \quad (3)$$

式中 $[O_2]$ ——包装内 O_2 浓度; $[CO_2]$ ——包装内 CO_2 浓度; V_{m1}, V_{m2} ——果蔬 O_2, CO_2 最大呼吸速率; K_{m1}, K_{m2} —— O_2, CO_2 米氏常数; k_{u1}, k_{u2} —— O_2, CO_2 非竞争抑制系数。

注意到包装内 O_2, CO_2 量在包装贮藏过程中是动态变化的。根据包装内外气体物质量平衡关系,可得到包装内 O_2, CO_2 物质量的变化^[10],即

$$\frac{dn_{O_2}}{dt} = \left[\frac{P_{O_2} \cdot A_p \cdot (p_{O_2}^{out} - p_{O_2}^{in})}{z} - R_{O_2} \cdot W_p \right] / V \quad (4)$$

$$\frac{dn_{CO_2}}{dt} = \left[\frac{P_{CO_2} \cdot A_p \cdot (p_{CO_2}^{out} - p_{CO_2}^{in})}{z} - R_{CO_2} \cdot W_p \right] / V \quad (5)$$

式中 n_{O_2}, n_{CO_2} ——包装内 O_2, CO_2 的物质量; P_{O_2}, P_{CO_2} ——包装透气膜 O_2, CO_2 的渗透系数; A_p ——包装透气膜表面积; z ——包装透气膜厚度; W_p ——果蔬产品的质量; $p_{O_2}^{out}, p_{O_2}^{in}$ ——外界环境中与包装内 O_2 分压; $p_{CO_2}^{out}, p_{CO_2}^{in}$ ——外界环境中与包装内 CO_2 分压; V ——包装内的自由体积。

大量研究表明,果蔬产品 O_2, CO_2 的呼吸速率通常不相同,其呼吸商 $RQ = R_{CO_2}/R_{O_2}$ 一般介于 0.7 ~ 1.3^[2]。本文采用二者的平均值来表征产品的呼吸速率 $R^{[6]}$,即:

$$R = \frac{R_{CO_2} + R_{O_2}}{2} \quad (6)$$

故单位时间呼吸产生的热量为

$$Q_r = RW_p(Q/6) \quad (7)$$

1.2 产品吸热 Q_p

产品的吸热通过产品本身温度的升高而体现。由于产品本身的水分蒸发散失,所以其质量也会有所减少,

考虑到水蒸气蒸发造成的产品失重相对于产品本身的质量是微不足道的,故不考虑这部分失重。单位时间内产品吸热可表示为

$$Q_p = C_p W_p \frac{dT_p}{dt} \quad (8)$$

式中 C_p ——产品表面组织的比热; T_p ——产品表面的温度。

1.3 水蒸气蒸发吸热 Q_t

研究表明,某种状态下的单位质量的液态水蒸发成为气态水所吸收的热量是一定的。因此在单位时间内,水蒸气蒸发吸收的热量为

$$Q_t = L_m \lambda \quad (9)$$

式中 L_m ——产品失水速率; λ ——蒸发吸热系数。

1.4 包装容器内气体的吸热 Q_g

包装容器内的气体吸热由两部分构成:

- 1) 包装内产品周围气体吸热而使其温度升高;
- 2) 由于产品周围气体与远离产品气体之间的温差,使包装内气体产生对流换热。

1.4.1 包装内产品周围气体吸热 Q_{g1}

单位时间内包装内产品周围气体吸收的热量为

$$Q_{g1} = W_s C_s \frac{dT_s}{dt} \quad (10)$$

式中 W_s ——产品周围气体质量; C_s ——气体的比热; T_s ——产品周围气体温度。

1.4.2 包装内气体对流换热 Q_{g2}

在包装内的混合气体处于容器内的封闭空间,对流是由于产品表面层气体与包装顶部气体之间存在的温差造成的,属于有限空间中的自然对流放热。故可应用努赛尔准则和格拉晓夫准则来描述这种封闭空间的自然对流状况。自然对流放热时的准则关系为:努塞尔常数 Nu 是格拉晓夫常数 Gr 和普朗特常数 Pr 的函数。不论是层流状态还是湍流状态,对于比较简单的几何形状,在工程 and 实际应用中,可用下面的方程进行关联^[11]

$$Nu = \frac{HL}{k} = C(Gr_L Pr)^m \quad (11)$$

式中 H ——对流换热系数; L ——封闭空间内的定性长度,可取放热面与封闭面之间的距离; k ——流体的导热系数; C ——比例常数; Gr_L ——定性长度为 L 的格拉晓夫常数;指数 m 的取值根据经验,对层流流动取 1/4,对湍流流动取 1/2。

由式(11)得到平均对流换热系数 H 的计算式为^[11]

$$H = \frac{Ck(Gr_L Pr)^m}{L} \quad (12)$$

故单位时间内气体的对流换热量可表示为

$$Q_{g2} = HA(T_s - T_h) \quad (13)$$

单位时间内包装容器内气体的吸热为

$$Q_g = Q_{g1} + Q_{g2} \quad (14)$$

1.5 包装体的吸热 Q_f

包装体的吸热是由于包装内外存在的温差而产生的热传递。对于硬质包装型式, 包装体通常由包装托架与封口膜组成, 对于软质包装型式, 包装体则全由包装膜组成。不失一般性, 以下讨论硬质包装型式。

单位时间内包装托架吸收的热量 Q_{ft} 为

$$Q_{ft} = W_t C_t \frac{dT_t}{dt} \quad (15)$$

式中 W_t ——托架质量; C_t ——托架材料比热; T_t ——托架温度。

单位时间内封口膜吸收的热量 Q_{fm} 为

$$Q_{fm} = W_m C_m \frac{dT_m}{dt} \quad (16)$$

式中 W_m ——包装膜质量; C_m ——包装膜比热; T_m ——包装膜温度。

则单位时间内包装体的吸热为

$$Q_f = Q_{ft} + Q_{fm} \quad (17)$$

1.6 包装内外气体渗透的热交换量 Q_e

这一部分的换热本质上是透过气膜透出、透入气体之间存在能量差, 从而使包装内部的热量产生变化。

气体所含能量为其内能与压力位能之和。理想气体的内能是由气体分子热运动产生的, 仅由温度决定。单个气体分子平均移动动能与绝对温度有如下的正比关系^[10]

$$E_k = \frac{i}{2} kT$$

式中 i ——气体分子自由度; k ——波尔茨曼常数, $k = R_c/N_A$ 。其中 N_A ——阿伏伽德罗常数, R_c ——气体常数。

所以摩尔质量为 M , 质量为 m 的气体所含的内能为

$$E_k = \frac{i}{m} \frac{m}{M} N_A kT = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R_c T$$

而压强为 P , 体积为 V 的气体所含的压力位能为二者之乘积 PV , 由理想气体状态方程可知 $PV = nR_c T$ 。

根据分子结构, CO_2 、水蒸气、 O_2 的分子自由度分别为 6、12、5^[12]。由于通常气调包装环境为低浓度 O_2 、高浓度 CO_2 , 与水蒸气, 故单位时间内通过薄膜渗透出去的气体所含能量为

$$E_{out} = \left(\frac{dn_{CO_2}}{dt} \times \frac{6}{2} + \frac{dn_{H_2O}}{dt} \times \frac{12}{2} \right) R_c T_h + \left(\frac{dn_{CO_2}}{dt} + \frac{dn_{H_2O}}{dt} \right) R_c T_h = \left(4 \frac{dn_{CO_2}}{dt} + 7 \frac{dn_{H_2O}}{dt} \right) R_c T_h \quad (18)$$

式中 nn_{H_2O} ——通过薄膜渗透出的水蒸气量。

同理, 单位时间内通过薄膜渗透进包装容器气体所含能量为

$$E_{in} = \frac{7}{2} \frac{dn_{O_2}}{dt} R_c T_{out} \quad (19)$$

式中 T_{out} ——包装贮藏环境温度。

整理得到单位时间内通过包装薄膜渗透气体产生的热增量为

$$Q_e = E_{in} - E_{out} \quad (20)$$

1.7 气调包装内果蔬产品呼吸 - 蒸发模型

综合以上结果, 可得到气调包装内果蔬产品呼吸 - 蒸发模型为:

$$RW_p \left(\frac{Q}{6} \right) = W_p C_p \frac{dT_p}{dt} + L_m \lambda + HA(T_s - T_h) + W_s C_s \frac{dT_s}{dt} + W_t C_t \frac{dT_t}{dt} + W_m C_m \frac{dT_m}{dt} + \frac{7}{2} \frac{dn_{O_2}}{dt} R_c T_{out} - \left(4 \frac{dn_{CO_2}}{dt} + 7 \frac{dn_{H_2O}}{dt} \right) R_c T_h \quad (21)$$

2 气调包装内相对湿度变化的预测模型

包装容器内含水量的变化取决于以下因素:

- 1) 产品蒸发作用产生的水蒸气质量;
- 2) 透过包装薄膜渗透出(入)的水蒸气质量。

2.1 产品蒸发作用引起的水蒸气质量变化

由式(21)得到单位时间内产品蒸发作用产生水蒸气质量, 即水蒸气蒸发速率为

$$L_m = \left[\frac{Q}{6} RW_p - W_p C_p \frac{dT_p}{dt} - HA(T_s - T_h) - W_s C_s \frac{dT_s}{dt} - W_t C_t \frac{dT_t}{dt} - W_m C_m \frac{dT_m}{dt} - \frac{7}{2} \frac{dn_{O_2}}{dt} R_c T_{out} + \left(4 \frac{dn_{CO_2}}{dt} + 7 \frac{dn_{H_2O}}{dt} \right) R_c T_h \right] / \lambda \quad (22)$$

2.2 包装薄膜渗透引起的水蒸气质量变化

单位时间透过薄膜的水蒸气质量为

$$\frac{dm_{H_2O}}{dt} = \left[\frac{P_{H_2O} \cdot A_p \cdot (p_{H_2O}^{out} - p_{H_2O}^{in})}{z} \right] \left[\frac{0.018 p_{atm}}{R_c T_h} \right] \quad (23)$$

式中 p_{H_2O} ——包装膜水蒸气的渗透系数; $p_{H_2O}^{out}$, $p_{H_2O}^{in}$ ——外界环境中与包装容器内的水蒸气分压; p_{atm} ——1个大气压力。

2.3 包装容器内相对湿度变化

考虑到通常包装内相对湿度较外界环境相对湿度高, 根据以上分析, 可得到包装内水蒸气质量即绝对湿度的变化率为

$$\frac{dH_{in}}{dt} = \frac{L_m - \frac{dm_{H_2O}}{dt}}{W_a} \quad (24)$$

式中 H_{in} ——包装内绝对湿度; W_a ——包装内干空气质量。

包装容器内的相对湿度为

$$RH_{in} = \frac{H_{in}}{H_{sp}} \quad (25)$$

式中 H_{sp} ——对应温度下饱和水蒸气的绝对湿度。

3 试验验证

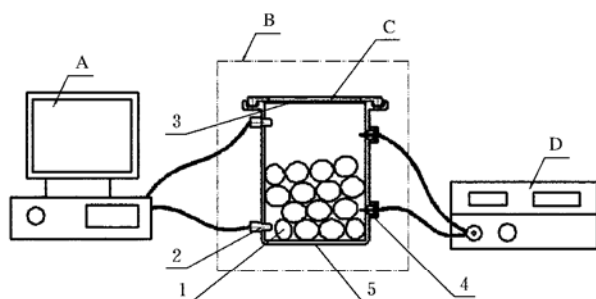
3.1 试验材料

鲜香菇采摘于无锡一蔬菜基地,挑选大小相近、无明显缺陷的产品。采摘后立刻运往实验室。

包装薄膜: LDPE 膜, 厚度 0.032 mm; 经国家轻工业包装制品质量监督检测中心测定, CO_2 渗透系数为 $16.12 \times 10^{-14} (m^3 \cdot m/m^2 \cdot h \cdot Pa)$; O_2 渗透系数为 $5.66 \times 10^{-14} (m^3 \cdot m/m^2 \cdot h \cdot Pa)$; 水蒸气渗透系数为 $4.32 \times 10^{-15} (m^3 \cdot m/m^2 \cdot h \cdot Pa)$ 。

3.2 试验测试系统

如图 1 所示, 试验测试系统由 4 部分构成, 即气调测试罐装置、智能温湿度巡检系统、恒温恒湿环境、包装内气体分析系统。自制气调测试罐装置以模拟硬质包装容器。在金属罐体的上下端固联温湿度传感器、气体抽取器并分别连接于智能温湿度巡检仪、气体分析仪, 用于测定罐内上下部分的温湿度、气体成份。金属罐体开口端可封盖金属盖或包装膜, 以进行密闭或渗透包装测试。包装后整个测试罐装置放置在恒温恒湿箱中实施设定条件下的贮藏。



A. 智能温湿度巡检系统 B. 恒温恒湿环境 C. 气调测试罐装置 D. 气体分析仪 1. 试样 2. 温湿度传感器 3. 封口膜 4. 气体抽取器 5. 测试罐体

图 1 试验测试系统

Fig. 1 Schematic of testing system

主要仪器设备: SSGM-W 型智能温湿度巡检记录系统(传感器精度: 湿度 $\pm 2.0\% RH$; 温度 $\pm 0.5^\circ C$); 6600 型顶空气体分析仪(精度: $O_2 \pm 0.2\%$; $CO_2 \pm$

2.0%); THS-AOC-100AS 型恒温恒湿试验机(温度控制精度: $0.2^\circ C$, 湿度控制精度: $\pm 2.0\% RH$); MA-35 型气体自动混合机(精度 $\pm 2.0\%$); 电子天平。自制金属罐(内腔尺寸: 直径 15 cm, 深 20 cm)。

3.3 试验方法

3.3.1 香菇呼吸速率测试与模型参数计算方法

1) 香菇呼吸速率测试方法

将试样、测试罐进行预处理($10^\circ C$, $60\% RH$, 4 h)。将预处理后的试样称重(570 ± 8 g)、装入测试罐中并密封, 整个作业过程在国家轻工业包装制品质量监督检测中心的恒温恒湿实验室($10^\circ C$, $60\% RH$)进行。其后立即放入恒温恒湿试验机($10^\circ C$, $60\% RH$)进行试验, 每隔 2 h 测定一次测试罐内的 O_2 、 CO_2 浓度, 测定总时间为 36 h。采用密闭法进行呼吸速率参数的计算^[1]。

重复试验 3 次, 取平均值进行分析。

2) 香菇呼吸模型参数计算方法

采用 Michaelis-Menten 式方程并其转化为线性形式, 可表达为

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{V_m} + \frac{K_m}{V_m} \frac{1}{[O_2]} + \frac{1}{K_u V_m} [CO_2] \quad (26)$$

依据不同时刻测定的 O_2 、 CO_2 浓度, 计算呼吸速率, 应用 SAS 软件对多组呼吸速率和气体浓度的组合数据进行线性回归, 以计算确定呼吸模型参数。

3.3.2 香菇包装内温湿度的测定

包装内温湿度的测定采 3 种工况进行:

1) 包装内产品包装质量: (480 ± 10) g, 充入贮藏条件下的空气;

2) 包装内产品包装质量: (700 ± 10) g, 充入贮藏条件下的空气;

3) 包装内产品包装质量: (700 ± 10) g, 充入调节气体, 组分为: $3.5\% O_2/11\% CO_2/85.5\% N_2$ 。调节气体初始相对湿度为 $32\% RH$, 温度为 $8^\circ C$ 。

将试样、测试罐进行预处理($10^\circ C$, $60\% RH$, 4 h)。试样预处理后, 称重, 装罐, 充入空气或预定比例的调节气体, 进行薄膜密封。整个作业过程在恒温恒湿实验室($10^\circ C$, $60\% RH$)进行。其后立即放入恒温恒湿试验机进行试验测定。贮藏条件为 $10^\circ C$, $80\% RH$ 。测定总时间为 40 h。

每种试验重复试验 3 次, 取平均值进行分析。

3.4 理论模型数值分析

3.4.1 呼吸-蒸发模型的简化

结合上述试验设计与条件, 为简化计算, 对结果影响不大的因素可忽略, 具体如下:

1) 气调包装贮藏过程中, 内外气体通过包装膜进行交换。考虑到渗透产生的包装内气体质量变化极小,

忽略由此引起的包装内外气体渗透引起的热增量。

2) 通常果蔬包装产品容积率较高, 即包装内上部自由体积较小, 同时考虑到包装容器内的温度变化很小(试验已证实), 产品周围气体与远离产品气体间将在短时间内达到热平衡, 故可忽略包装内气体的对流换热。此时包装内的气体吸热可等同为包装内所有气体吸热, 且视包装内所有气体温度分布均匀。此时单位时间内包装内气体吸收热量简化为

$$Q_g = W_a C_a \frac{dT_{in}}{dt}$$

式中 C_a ——包装内干空气比热; T_{in} ——包装内气体温度。

3) 包装体的吸热只考虑由于包装内外温差引起的热量交换, 忽略罐体与产品接触部分的热传导影响。

为此产品呼吸-蒸发模型可简化为

$$RW_p \left(\frac{Q}{6} \right) = W_p C_p \frac{dT_p}{dt} + L_m \lambda + (C_t W_t + C_m W_m) \frac{d(T_{in} - T_{out})}{dt} + W_a C_a \frac{dT_{in}}{dt} \quad (27)$$

3.4.2 模型中相关参数的确定

1) 蒸发吸热系数 λ 随温度、压强变化。在产品气调包装中, 由于通常情况下包装内压强变化很小, 故取一个大气压下的值; 同时认为其值与温度成线性关系, 以此计算不同温度下的蒸发吸热系数 $\lambda^{[13]}$ 。

2) 在确定包装内气体物性参数时, 为简化计算, 调节气体包装时, 包装内气体黏度、导热系数等取同样条件下空气的物性参数。

3.4.3 数值分析

结合试验工况及相应参数, 采用 Adams-Moulton

方法对模型相关方程进行数值求解, 得到试验工况下包装内相对湿度的变化。

4 结果与分析

4.1 香菇呼吸模型参数

依据测定的包装内 O_2 、 CO_2 浓度, 应用 SAS 软件对多组呼吸速率和气体浓度的组合数据进行线性回归, 得到香菇呼吸模型参数见表 1。

表 1 香菇 Michaelis-Menten 呼吸模型参数($10^\circ C$)

Table 1 Parameters of respiration model for *Lentinula edodes* at $10^\circ C$

气体	$V_m / mL \cdot (kg \cdot h)^{-1}$	$K_m / \%$	$K_a / \%$	R^2
O_2	122.52	26.73	-88.30	0.982
CO_2	110.81	30.11	-83.23	0.957

4.2 香菇包装内湿度变化的预测与试验结果比较

初始气体为空气, 香菇包装内相对湿度变化见图 2a、2b。结果发现, 贮藏前期包装内相对湿度上升速率较快。在质量分别为 480 g、700 g 的包装中, 经历约 10 h、8 h 后, 包装内相对湿度即达到饱和。这主要是由于初始气体为空气, 包装内外气体交换较缓慢, 产品呼吸速率、蒸发速率较高。增加包装产品质量, 包装内水蒸气蒸发总量加大, 包装内自由体积减少, 导致包装内相对湿度上升速率加快。同时结果表明, 理论预测与试验结果比较吻合, 在包装的初始阶段理论结果稍有偏高, 相对湿度达到饱和的时间相应缩短(缩短约 1 h)。这主要是由于理论分析中作了相关简化, 忽略了一些因素对能量变化的影响所造成的。

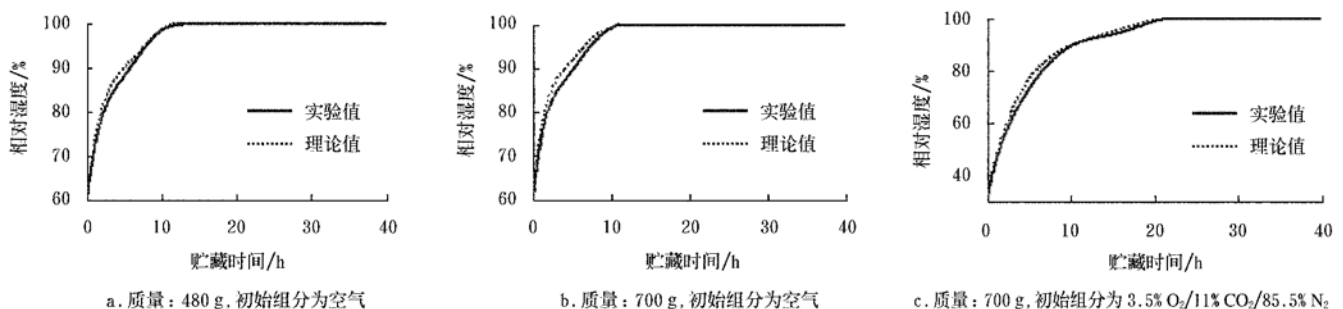


图 2 香菇气调包装内相对湿度的变化

Fig. 2 RH in packages of *Lentinula edodes* during storage

初始气体为调节气体, 香菇包装内相对湿度变化见图 2c。与初始气体为空气的同质量包装比较(图 2b), 包装内相对湿度上升速率大大减缓。在经历约 22 h 后, 包装内相对湿度达到饱和。这主要是由于低氧高二氧化碳的调节气份降低了产品的呼吸速率, 继而产品蒸发速率减缓。由此可见, 初始气体成份显著地影响包装内相对

湿度的变化。同样地, 理论预测与试验结果较吻合。

5 结论

本文较完整地考虑果蔬包装内外热量交换因素, 包括产品呼吸放热、产品吸热、产品内水蒸气的蒸发吸热、包装内气体吸热、包装体的吸热以及包装内外气体渗透

引起的热增量;结合产品的呼吸作用以及由此通过包装膜进行的气体质量传输过程,依据能量守恒定律,导出了气调包装内产品呼吸-蒸发模型;在此基础上,依据产品的蒸发作用以及包装内外水蒸气的质量传输变化,得到了包装内相对湿度变化的预测模型。以香菇产品进行了试验验证,测定表征香菇呼吸速率,设计3种工况,对香菇气调包装内的湿度进行实验测试;结合试验条件,对产品呼吸-蒸发模型进行数值分析,将理论预测与试验结果进行比较。结果表明:

1) 理论预测与试验结果总体上很吻合,只是在包装的初始阶段理论结果稍有偏高;

2) 初始气体组分对包装内相对湿度影响较大,低氧高二氧化碳组份显著降低了相对湿度上升的速率,同时延长了达到饱和的时间;

所建模型为果蔬产品气调包装内的相对湿度预测与调节控制提供理论基础。

[参 考 文 献]

- [1] 卢立新. 果蔬气调包装理论研究进展[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 175- 180.
- [2] Fonseca S C, Oliveira F A, Brecht J K. Modelling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages: a review [J]. Journal of Food Engineering, 2002, 52(2): 99- 119.
- [3] Church I J, Parsons A L. Modified atmosphere packaging technology: a review[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 1995, 67(2): 143- 152.
- [4] Evelo R G, Horst J. Modified atmosphere packaging of tomatoes; controlling gas and humidity [J]. Packaging Technology and Science, 1996, 9: 265- 273.
- [5] Kang J S, Lee D S. A kinetic model for transpiration of fresh produce in a controlled atmosphere[J]. Journal of Food Engineering, 1998, 35: 65- 73.
- [6] Song Y, Nick V, Kit L. Modeling respiration-transpiration in a modified atmosphere packaging system containing blueberry[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 53: 103 - 109.
- [7] 蔡 明, 卢立新. 草莓气调包装内的温湿度变化的实验研究[J]. 包装工程, 2005, 26(4): 32- 33.
- [8] 蔡 明. 果蔬气调包装温湿度预测及试验研究[D]. 无锡: 江南大学, 2005.
- [9] Lee D S, Hagggar P E, Lee J, et al. Model for fresh produce respiration in modified atmospheres based on principles of enzyme kinetics[J]. Journal of Food Science, 1991, 56: 1580- 1585.
- [10] Fishman S, Rodov V, Peretz J, et al. Model for gas exchange dynamics in modified atmosphere packages of fruits and vegetables[J]. Journal of Food Science, 1995, 60: 1078- 1083.
- [11] 皮茨 D, 西索姆 L. 传热学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [12] 马文蔚. 物理学(上册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [13] 刘 谦. 传递过程原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.

Predicting model and experimental validation of relative humidity in modified atmosphere packages for fruits and vegetables

Lu Lixin^{1,2}, Cai Ming¹

(1. Department of Packaging Engineering, Southern Yangtze University, Wuxi 214122, China;

2. China National Control and Test Center for Packaging Quality, Wuxi 214122, China)

Abstract: Adjusting and controlling relative humidity(RH) in packages is crucial to ensuring the quality of modified atmosphere packaging of fresh produce. A modified respiration-transpiration model was developed. The model was based on heat exchange and gases mass transport phenomena across the package, gases heat convection inside the package, and mass and heat balances accounting for the respiration and transpiration behavior of fresh produce. And then the predicting model of the RH in modified atmosphere packages was proposed. The testing system of the gas composition and RH-temperature in modified atmosphere packages was established. Fresh *Lentinula edodes* were packaged in different initial gas composition and sample mass, and stored for 40h at 10℃, 80% RH. The parameters of respiration model for *Lentinula edodes* were estimated, and the RH and temperature in packages were measured during storage. In general, the model predictions agreed well with the experimental data, except the model predictions were slightly high in the initial period. The effect of the initial gas composition on the RH in packages was notable. In modified atmosphere packages of lower oxygen and higher carbon dioxide, the ascending rate of RH was reduced, and the packages were saturated slowly during storage.

Key words: fresh produce; modified atmosphere packaging; RH; model; respiration; transpiration; *Lentinula edodes*; predicting