

果蔬气调包装计算机辅助设计方法研究

曹菲

(天津职业大学, 天津 300410)

摘要: **目的** 为提高果蔬气调包装的设计效率,对果蔬气调包装CAD方法进行研究。**方法** 在建立果蔬气调包装数学模型、果蔬产品呼吸速度及塑料薄膜透气性数据库的基础上,利用Matlab GUI开发果蔬气调包装CAD系统,并进行实例研究。**结果** 系统界面清晰,操作简便。可根据产品的理想气调环境参数,选择合适的薄膜材料,计算有利于气体交换的塑料薄膜面积或厚度。果蔬产品呼吸速度数据库包含17种果蔬呼吸速度模型,塑料薄膜透气性能数据库包含21种塑料薄膜材料的透气性数据。**结论** 该系统可快速进行常见果蔬产品的气调包装设计。

关键词: 气调包装; 果蔬; 呼吸速度; 包装膜; 渗透性

中图分类号: TB485.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2015)03-0015-07

CAD Method for Modified Atmosphere Packaging of Fruits and Vegetables

CAO Fei

(Tianjin Vocational Institute, Tianjin 300410, China)

ABSTRACT: In order to improve the design efficiency of modified atmosphere packaging (MAP) for fruits and vegetables, a CAD method for MAP design of fruits and vegetables was studied. The CAD system was developed via MATLAB GUI based on the establishment of mathematical model of fruits and vegetables packaging, databases of respiration rate of fruits and vegetable, and database of permeability of plastic films. The system was applied in a case study. The system had clear interfaces that were easy to operate. According to the ideal gas environment parameters of products, the software could select suitable packaging materials and calculate the area or thickness of the plastic film beneficial for gas exchange. Two databases were built in the software, including the respiration rate database containing the respiration rate models for 17 fruits and vegetables, and the film permeability database containing the permeability data for 21 polymeric films. This system could facilitate quick MAP design of common fruit and vegetable products.

KEY WORDS: MAP; fruits and vegetables; respiration rate; packaging films; permeability

果蔬气调包装(MAP)设计的目的是为产品创造一个适宜的理想气体浓度环境,使果蔬的呼吸速度降到最低代谢水平,以延长果蔬产品货架寿命。MAP分为自发气调包装和主动气调包装,其共同点是均利用果蔬的呼吸作用和包装薄膜的透气性来调节包装容器内的气体浓度以达到理想值。自发气调包装容器内的初始气体浓度与大气相同,具有包装成本低和操作简便等优点,被广泛应用于各种果蔬产品的包装。主动气调包装一般是根据包装产品种类、呼吸类型、质量、尺寸等,按设计好的比例将 O_2 、 CO_2 、 N_2 等气体混

合,在真空条件下充入果蔬产品包装内^[1],可以在最短时间内达到气调平衡,但是会额外增加包装成本,且工艺流程复杂。

目前国内外学者对气调包装进行了大量研究,取得了一定的理论成果,并开展了实际应用。果蔬气调包装设计主要有试验法和数学模型算法^[2]。试验法是在已设定的贮藏条件下,利用不同透气性能的包装材料进行包装试验,从而得到相对理想的包装设计参数。该方法只能针对单一品种的果蔬进行试验,需要大量的试验周期和成本,很难找到最优化的设计结

收稿日期: 2014-12-25

作者简介: 曹菲(1980—),女,内蒙古包头人,硕士,天津职业大学讲师,主要研究方向为食品包装材料与技术。

果。数学模型计算法主要是根据已经开发的气调包装数学模型来进行包装系统的参数设计,Jaime^[3]测试了29种不同直径和厚度的穿孔膜的O₂和CO₂透过率,从而得到其势能方程。Rennie^[4]描述了穿孔介导气调保鲜包装的数学模型,包括呼吸模型、蒸腾模型、冷凝模型、CO₂/H₂O/N₂/O₂的传输模型等。Julio^[5]提出了一种数学模型,考虑了CO₂通量对氧气气体交换率的影响。Xanthopoulos^[6]提出了一种预测草莓冷链储藏的穿孔介导气调保鲜包装中O₂,CO₂,N₂和H₂O浓度的数学模型。盛娜^[7]对密封容器包装内外气体交换模型、带孔材料内外气体交换模型、微孔材料包装的内外气体交换模型进行了阐述。数学模型法计算复杂,涉及的参数和变量多,不适宜推广应用,开发与之相对应的设计软件可以简化工作流程,提高设计效率。Mahajan^[8]介绍了一种用于新鲜鲜切产品气调包装的MAP计算机软件,初步开展了相关研究工作。段华伟^[9]提出了一种面向工程应用的鲜果气调包装设计方法,开发了鲜果气调包装计算机辅助设计软件,软件针对番石榴、杨桃和荔枝等3种水果,可以完成呼吸速度的计算、包装薄膜参数选择和包装袋内气体浓度预测。

果蔬气调包装的影响因素较多,设计过程复杂,建立相应的知识管理系统并开发人性化的气调包装计算机辅助设计软件是非常必要的。文中将在建立果蔬气调包装数学模型,以及果蔬产品呼吸速度模型和塑料薄膜透气性数据库的基础上,利用Matlab GUI开发果蔬气调包装CAD系统,使用者通过软件清晰的流程式操作即可快速进行常见果蔬产品的气调包装设计。

1 设计方法

气调包装内部气体浓度变化是一个动态过程,其中包装材料的渗透性和果蔬自身的呼吸速度是影响气调包装效果的主要因素。当从包装外部渗透到内部O₂的速度等于果蔬呼吸消耗O₂的速度,果蔬呼吸作用产生的CO₂速度等于渗出速度时,包装内部会形成一个低O₂和低CO₂浓度的平衡状态^[10]。该状态下的气体浓度如果接近果蔬的最佳气调环境,就可以使产品产生微弱的有氧呼吸,从而延长果蔬的货架寿命。果蔬气调包装设计的最终目标是在一定温度条件下确定气调包装合适的薄膜材料,材料的面积和厚度,果蔬的质量,气体平衡时间和构成等。文

中对无孔透气性薄膜等和穿孔薄膜2种类型的包装材料建立气体交换数学模型。

1.1 气体交换数学模型

采用无孔透气性薄膜进行气调包装设计时,果蔬MAP保鲜的薄膜袋中O₂浓度和CO₂浓度主要由2个因素决定:果蔬的呼吸速率和薄膜的透气性。由此,薄膜包装袋内气体交换方程为^[8]:

$$\frac{d(y_{O_2})}{dt} = \frac{P_{O_2}A(y_{O_2}^{out} - y_{O_2})}{eV_f} - \frac{R_{O_2}m}{V_f} \quad (1)$$

$$\frac{d(y_{CO_2})}{dt} = \frac{P_{CO_2}A(y_{CO_2}^{out} - y_{CO_2})}{eV_f} - \frac{R_{CO_2}m}{V_f} \quad (2)$$

式中: R_{O_2} , R_{CO_2} 为蔬菜呼吸速度(mL/(kg·h)); m 为果蔬质量(kg); e 为薄膜厚度(μm); P_{O_2} , P_{CO_2} 分别为薄膜对O₂, CO₂的透气系数(mL· μm /(m²·h·0.1 MPa)); A 为薄膜表面积(m²); V_f 为薄膜包装的自由体积(mL); y_{O_2} , y_{CO_2} 分别为包装袋内O₂, CO₂的体积分数(%); $y_{O_2}^{out}$, $y_{CO_2}^{out}$ 分别为外界环境O₂体积分数(21%)和CO₂的体积分数(0%)。

V_f 是通过包装容器的体积和被包装果蔬的体积由式(3)计算得到^[11]:

$$V_f = V_p - V_c = V_p - \frac{m}{\rho} \quad (3)$$

式中: V_p 为包装容器的体积(m³); V_c 为果蔬的体积(m³); ρ 为果蔬的密度(kg/m³)。

常见的透气性薄膜不能满足部分高呼吸速度的产品,需要采用穿孔薄膜进行气调包装设计。果蔬MAP保鲜的薄膜袋中O₂浓度和CO₂浓度主要由3个因素决定:果蔬的呼吸速率、穿孔的直径和数量以及薄膜的透气性。由此,薄膜包装袋内的气体交换方程为^[8]:

$$\frac{d(y_{O_2})}{dt} = \left(P_{O_2} + \frac{16 \cdot 4\pi R_H^2 N_H}{e + R_H} \right) \cdot \frac{A(y_{O_2}^{out} - y_{O_2})}{eV_f} + \frac{R_{O_2}m}{V_f} \quad (4)$$

$$\frac{d(y_{CO_2})}{dt} = \left(P_{CO_2} + \frac{16 \cdot 4\pi R_H^2 N_H}{e + R_H} \right) \cdot \frac{A(y_{CO_2}^{out} - y_{CO_2})}{eV_f} + \frac{R_{CO_2}m}{V_f} \quad (5)$$

式中: R_H 为穿孔的半径(mm); N_H 为穿孔的数量。

当包装袋内气体浓度达到平衡时,包装内气体体积聚为0,有:

$$\frac{d(y_{O_2})}{dt} = \frac{d(y_{CO_2})}{dt} = 0$$

(6)

非稳态模型方程(1)和(2)简化为稳态模型方程为:

$$mR_{O_2} = \frac{AP_{O_2}}{e}(y_{O_2}^{out} - y_{O_2})$$

(7)

$$mR_{CO_2} = -\frac{AP_{CO_2}}{e}(y_{CO_2}^{out} - y_{CO_2})$$

(8)

将式(8)除以式(7)可得:

$$\frac{R_{CO_2}}{R_{O_2}} = \frac{P_{CO_2}}{P_{O_2}} \frac{y_{CO_2}}{21 - y_{O_2}}$$

(9)

定义呼吸商 $RQ=R_{CO_2}/R_{O_2}$, 薄膜透气系数比 $\beta = P_{CO_2}/P_{O_2}$, 式(9)可以写成:

$$y_{CO_2} = \frac{RQ}{\beta}(21 - y_{O_2})$$

(10)

在果蔬气调包装设计中,如果已知目标气调环境浓度和呼吸商,就可以利用公式(10)计算理想的薄膜材料 β 值范围和最佳值,作为初步选择薄膜包装材料的依据,因为只有 β 值在理想范围内的薄膜才能创建与 O_2 和 CO_2 理想气体浓度比例接近的气调环境。考虑到薄膜厚度、气体交换面积、果蔬质量等参数的优化设计需求,一般选取2种或以上在此范围内的薄膜进行下一步的筛选,当然还需要考虑薄膜材料的透湿性、成本和外观等综合指标。

1.2 设计变量

果蔬气调包装CAD系统的设计变量有环境的气体构成($y_{O_2}^{out}, y_{CO_2}^{out}$)、温度(T)、果蔬的质量(m)、密度(ρ)、呼吸速度(R_{O_2}, R_{CO_2})、期望气体构成(y_{O_2}, y_{CO_2})、包装膜的包装自由体积(V_f)、气体交换面积(A)、包装膜厚度(e)、 O_2 和 CO_2 渗透性(P_{O_2}, P_{CO_2})、穿孔半径(R_H)、穿孔数量(N_H)等,共计16个,其中通用变量14个,打孔膜的变量2个。这些变量主要涉及环境、果蔬和包装膜等方面。一旦果蔬产品和运输环境条件确定,这14个通用设计变量中的8个将被确定,包括环境气体构成和温度、产品密度、消耗 O_2 速度、释放 CO_2 速度、期望延长果蔬保质期的气体构成等,其余6个设计变量包括果蔬质量、包装内的自由体积、气体交换面积、包装膜厚度、 O_2 和 CO_2 渗透性等是不确定的。在工程实践中,一般单位包装的果蔬质量是固定的,假设包装膜选定, O_2 和 CO_2 渗透性也确定,包装容器的体积一般根据运输和销售需要确定(包装内

自由体积 V_f 是果蔬体积 V_c 的1~3倍^[9]),在选定包装膜厚度(厚度的选择应适宜,一般为20~60 μm ^[9])的情况下可以计算理想气体交换面积(交换面积是否合适取决于包装的类型和产品的规格),或者已知气体交换面积气体就可以确定薄膜的厚度。如果包装工艺选定了薄膜种类、厚度、气体交换面积和果蔬质量,就可以利用稳态方程计算所需要薄膜的 P_{O_2} 和 P_{CO_2} 的值。

1.3 数据库

气调包装CAD系统数据库包括果蔬产品和塑料薄膜2个,见表1。果蔬产品数据库主要包含17种果蔬产品的不同类型呼吸速度模型,数据来源于已出版文献资料^[9,12-17]。塑料薄膜数据库包括21种常用于果蔬气调包装用塑料薄膜的 O_2 和 CO_2 透气系数及 β 值,数据来源于文献资料和试验测试^[9,12,18]。数据库具有查看、修改、添加和删除数据等功能。

表1 果蔬气调包装数据库

Tab.1 Information in the built-in MAP databases of the software

数据库	类型	信息收集
果蔬产品	菠菜、草莓、平菇、双孢蘑菇、青花菜、	呼吸速度模型
	番石榴、杨桃、荔枝、青椒、西红柿、黄	理想气体浓度
	桃、青豌豆、茄子、花椰菜、蓝莓、硬花	产品样图
	甘蓝、香菇	
塑料薄膜	高密度聚乙烯薄膜、低密度聚乙烯薄	
	膜、线性低密度聚乙烯薄膜、聚丙烯	
	薄膜、定向聚丙烯薄膜、聚丁二烯薄	
	膜、陶瓷聚苯乙烯薄膜、聚对苯二甲	
	酸乙二醇酯薄膜、乙烯-醋酸乙烯共	P_{O_2}, P_{CO_2}, β 值
	聚物薄膜、天然橡胶、硅橡胶、丁基合	
	成橡胶、醋酸纤维素膜、乙酸纤维素	
	膜、尼龙复合膜、聚偏氯乙烯膜、CPP/	
	OPP复合膜、充瓷LDPE膜、聚氯乙烯	
	膜、乙醛纤维素膜、聚碳酸酯膜	

2 系统开发与实例研究

2.1 设计流程

果蔬气调包装设计涉及的变量较多,且变量与变量之间存在相互制约的关系,因此优化设计流程、提高设计效率和开发人性化的用户使用界面是果蔬气

调包装 CAD 系统的指导思想。该系统按照整合后的 工作流程进行开发,见图 1。

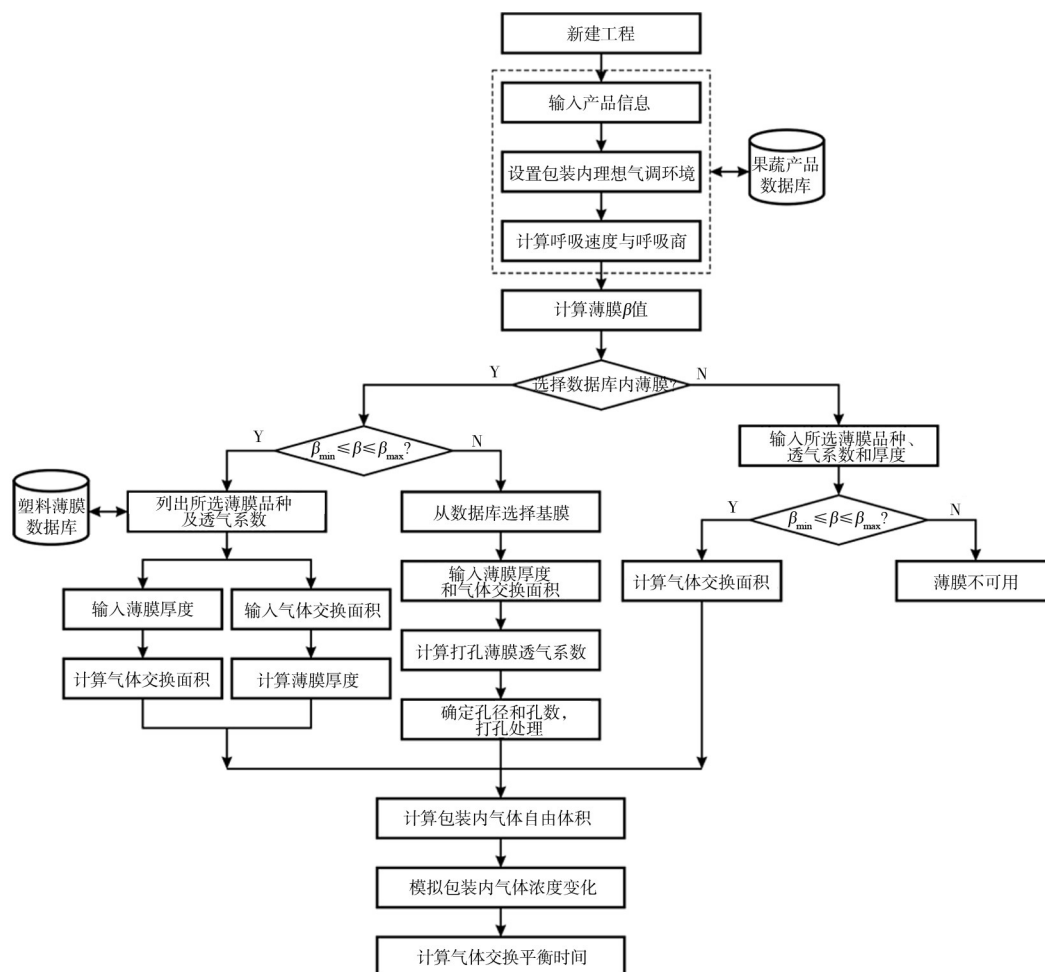


图 1 果蔬气调包装 CAD 系统流程

Fig.1 Flowchart of the CAD system for MAP design

2.2 系统功能

开发果蔬气调包装 CAD 系统的目的是利用计算机辅助完成气调包装设计,在简单易用的同时优化设计参数,提高设计质量。系统拟实现的功能主要包括:通过输入或从数据库导入选择产品,设置理想的内部气体(O_2 , CO_2)浓度范围,利用呼吸速度模型数据库确定产品在该温度和气体浓度条件下的呼吸速度和呼吸商;计算所需薄膜的透气系数比 β 值的范围和最佳 β 值,从现有包装薄膜数据库中选择 β 值在范围内的薄膜材料,在已知产品包装质量的前提下,计算薄膜厚度或包装气体交换面积;若数据库中材料的 β 值不满足产品需要,可以考虑使用穿孔薄膜,并设计穿孔半径和穿孔数量;判断数据库以外已知透气性能、厚度基本参数的薄膜能否用于选择产品的气调包装,设计包装表面积、包装质量、包装体积等相关的参数;根据用户选择的薄膜材料,模拟气调包装气体浓

度随时间变化的特征,计算达到平衡需要的时间。

2.3 系统用户界面

系统用户界面是利用 Matlab GUI 开发的,包含 3 个主要功能模块:工程模块、数据库模块和帮助模块。工程模块主要完成新建工程、打开工程、保存工程和退出等任务。数据库模块可用于查看、编辑和调用,主要包括果蔬产品和塑料薄膜等 2 个部分。果蔬产品被分成水果和蔬菜等 2 类,帮助模块介绍了该系统的操作方法。用户打开软件新建工程后,只需按照界面左侧的设计流程自上而下逐步进行操作,即可完成果蔬气调包装设计。下面以菠菜气调包装为例,介绍如何使用该 CAD 系统进行果蔬气调包装设计。

1) 从数据库中导入产品名称,输入包装质量为 0.2 kg,密度为 320 kg/m^3 ,容器选择为塑料包装袋,显示产品样图,见图 2,如果是数据库外产品也可以人工输入产品信息。点击“保存”后选择“下一步”。



图2 输入产品信息界面

Fig.2 Interface for inputting product information

2) 界面自动切换到设置包装内理想气调环境流程。选择贮存温度为5℃,导入理想气调环境中气体的浓度范围,O₂体积分数为3%~4%,CO₂体积分数为4%~10%。O₂最佳气体体积分数为3%,CO₂为5%,见图3。



图3 设置包装内理想气调环境界面

Fig.3 Interface for setting ideal atmosphere environment in the package

3) 系统自动调用数据库中菠菜化学动力学呼吸速度模型,计算菠菜在该理想贮存条件下的呼吸速度, $R_{O_2}=7.5\text{ mL}/(\text{kg}\cdot\text{h})$, $R_{CO_2}=5.2\text{ mL}/(\text{kg}\cdot\text{h})$, $RQ\approx 0.7$,见图4。

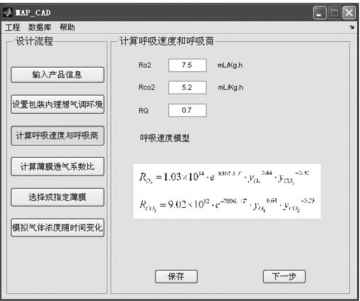


图4 计算呼吸速度与呼吸商界面

Fig.4 Interface for calculating respiratory rate and respiratory quotient

4) 系统自动计算理想的薄膜透气系数比 β 值的

范围和最佳值,在此环境条件, $\beta_{\min}$ 和 $\beta_{\max}$ 分别为1.32和2.98,并用图形的方式直观模拟 β 值对气调包装内气体浓度的作用影响,见图5。

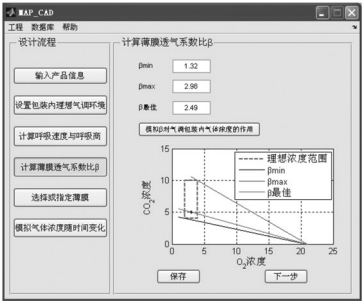


图5 计算薄膜透气系数比 β 界面

Fig.5 Interface for calculating film permeability coefficient ratio β

5) 用户可以单击“选择数据库内薄膜”或“用户指定薄膜”2个按钮确定包装材料选用方式。如果单击“选择数据库内薄膜”按钮,数据库中4种 β 值符合范围的薄膜名称和透气性能参数会显示在界面中,选择PP薄膜,输入薄膜厚度为35 μm ,计算出所需包装气体交换面积为0.22 m^2 ,根据产品外形和包装质量,可以判断此面积是比较合适的,见图6。也可以选择其他薄膜进行计算。

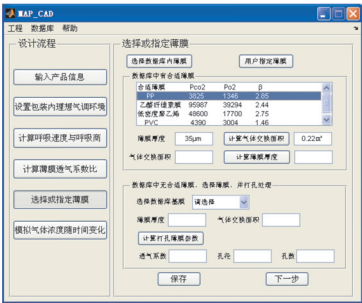


图6 选择或指定薄膜界面

Fig.6 Interface for choosing or appointment of film

6) 计算出包装内自由气体体积为0.00045 m^3 ,气体交换达到平衡的时间大约需要150h。单击“模拟气体交换过程”按钮就可用图形的方式模拟气调包装内O₂,CO₂气体浓度随时间变化的曲线(见图7)。从图7可以看出,包装袋内平衡气体浓度基本在理想值附近波动。单击“保存”和“完成”按钮,完成气调包装设计流程。

2.4 实例验证

通过菠菜MAP自发气调包装实验,对利用果蔬气调包装CAD系统进行气调包装设计的准确性进行

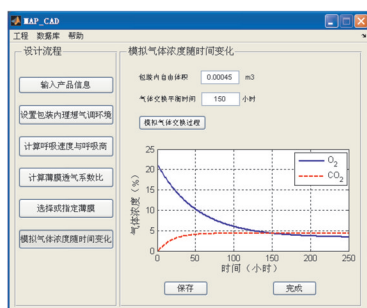


图7 模拟气体浓度随时间变化界面

Fig.7 Interface for simulating changes of gas concentration with time

验证。

产品名称为尖叶菠菜,购于天津市郊一农户菜田,要求当天上午4:00~5:00采收,无黄叶、未浸水、无病害、无明显机械损伤、色泽鲜绿,平均包装质量为0.23 kg。包装薄膜为PP,厚度为32 μm , P_{O_2} 为1452 $\text{mL}\cdot\mu\text{m}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot0.1\text{ MPa})$, P_{CO_2} 为4098 $\text{mL}\cdot\mu\text{m}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot0.1\text{ MPa})$,尺寸为35 cm×30 cm,表面积为0.21 m^2 。

将待试菠菜称重放入薄膜袋中热封封口,并将包装袋浸入水中,检查封口的气密性,必须保证所有薄膜袋都没有漏气的情况发生。然后将直径为8 mm的硅胶垫粘贴到薄膜袋的适宜位置,每隔24 h将CheckMate 9900型O₂/CO₂气体分析仪的探针小心地通过硅胶垫插入薄膜袋内部,抽取袋中气体2 mL测定薄膜袋中O₂,CO₂的体积分数。每次抽取气体完毕后都应严格检查薄膜包装袋的气密性,防止实验期间薄膜袋出现漏气现象,影响实验结果的准确性。包装袋内O₂,CO₂的体积分数随时间的变化关系曲线见图8。将产品和包装薄膜参数输入果蔬气调包装CAD系统中,模拟的气体浓度随时间变化的曲线见图9。

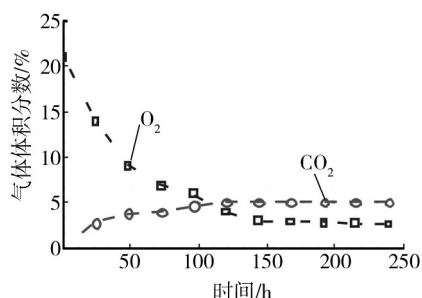


图8 包装袋内气体体积分数变化曲线

Fig.8 Variation curves of gas compositions inside the package as a function of time

对比图8与图9,实验结果与果蔬气调包装CAD系统模拟生成的O₂,CO₂浓度变化趋势基本接近,验证

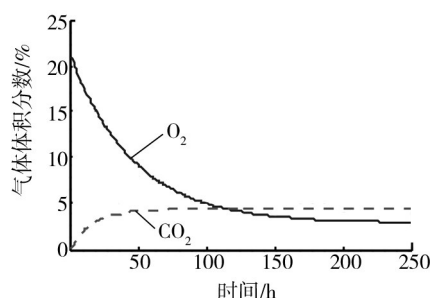


图9 模拟气体体积分数变化曲线

Fig.9 Simulated variation curves of gas compositions as a function of time

了该系统的可靠性。由于模型没有考虑内环境湿度对产品呼吸速度、薄膜透气性能和包装内气体浓度的影响,以及产品呼吸速度模型存在不同程度的不精确性,因此该系统在使用过程中还需要进一步完善。

3 结语

目前有关果蔬MAP的相关参数信息很多,但缺乏一种有效的软件系统来整合和应用这些参数信息,以提高果蔬气调包装的设计效率。文中在建立果蔬气调包装数学模型、果蔬产品呼吸速度模型数据库和塑料薄膜透气性能数据库的基础上,研究了利用Matlab GUI开发果蔬气调包装计算机辅助设计的方法,优化了设计流程。与传统气调包装设计相比,利用该CAD系统进行果蔬气调包装设计可以极大地提高设计效率和结果的可靠度。在以后的研究中,可进一步加大果蔬和塑料薄膜数据库的建设,提高该系统适应不同果蔬产品进行MAP设计的需要。

参考文献:

- [1] SANDHYA M. Modified Atmosphere Packaging of Fresh Produce: Current Status and Future Needs[J]. LWT—Food Science and Technology, 2010, 43: 381—392.
- [2] 段华伟,王志伟,胡长鹰. 面向工程应用的果蔬气调包装设计理论与方法[J]. 包装工程, 2010, 31(3): 1—4.
DUAN Hua-wei, WANG Zhi-wei, HU Chang-ying. Engineering Oriented Theory and Method of Modified Atmosphere Packaging Design of Fruits and Vegetables[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(3): 1—4.
- [3] JAIME G, FERRER A, SALVADOR O R. Determination of O₂ and CO₂ Transmission Rates through Microperforated Films for Modified Atmosphere Packaging of Fresh Fruits and Vegetables[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 86: 194—201.

- [4] RENNIE T J, TAVOULARIS S. Perforation-mediated Modified Atmosphere Packaging Part I: Development of a Mathematical Model[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2009, 51:1—9.
- [5] MONTANEZ J C, FERNANDA A S, PRAMOD V M, et al. Modelling the Effect of Gas Composition on the Gas Exchange Rate in Perforation-mediated Modified Atmosphere Packaging[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 96:348—355.
- [6] XANTHOPOULOS G, KORONAKI E D, BOUDOUVIS A G. Mass Transport Analysis in Perforation-mediated Modified Atmosphere Packaging of Strawberries[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 111:326—335.
- [7] 盛娜, 刘晔. 果蔬气调包装(MAP)数学模型研究现状[J]. *包装工程*, 2009, 30(1):30—33.
SHENG Na, LIU Ye. Current Status of Research on Mathematical Models of Fruits and Vegetables Modified Atmosphere Packaging[J]. *Packaging Engineering*, 2009, 30(1):30—33.
- [8] MAHAJAN P V, OLIVEIRA F R A, MONTANEZ J C, et al. Development of User-friendly Software for Design of Modified Atmosphere Packaging for Fresh and Fresh-cut Produce[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2007, 8:84—92.
- [9] 段华伟. 鲜果气调包装的理论与试验研究[D]. 无锡:江南大学, 2010.
DUAN Hua-wei. Theoretical and Experimental Research on Modified Atmosphere Packaging for Fresh Fruits[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010.
- [10] 徐文达. 食品软包装材料与技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
XU Wen-da. Food Flexible Packaging Material and Technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [11] RACIO R A, JORGE C O, MONTANEZ J C, et al. Gas Exchange Dynamics in Modified Atmosphere Packaging of Soft Cheese[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 95:438—445.
- [12] 万森. 菠菜气调包装数学模型的理论与试验研究[D]. 天津:天津科技大学, 2012.
WAN Sen. Theoretical and Experimental Research on Modeling of Modified Atmosphere Packaging for Spinacia Oleracea[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2012.
- [13] 李霞. 双孢蘑菇气调包装呼吸速率模型与品质变化试验研究[D]. 淄博:山东理工大学, 2009.
LI Xia. Studies on Respiration Rate and Quality of Atmosphere Packaged Agaricus Bisporas[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2009.
- [14] 雷桥, 徐文达. 青花菜气调包装材料的选择[J]. *食品与机械*, 2007, 23(3):98—101.
LEI Qiao, XU Wen-da. Material Selection of Modified Atmosphere Packaging for Broccoli[J]. *Food and Machine*, 2007, 23(3):98—101.
- [15] 肖功年, 张慤, 汤坚. 气调包装条件下草莓、平菇呼吸特性变化规律[J]. *无锡轻工大学学报*, 2003, 22(5):25—29.
XIAO Gong-nian, ZHANG Min, TANG Jian. Respiration Characteristics Research of Strawberry and Mushroom under Modified Atmosphere Packaging[J]. *Journal of Wuxi University of Light Industry*, 2003, 22(5):25—29.
- [16] 刘颖, 李云飞. 基于 Michaelis-Menten 型呼吸速率模型的实验研究[J]. *上海交通大学学报*, 2004, 6(1):1170—1173.
LIU Ying, LI Yun-fei. Experimental Study on Michaelis-Menten Type Respiration Model[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2004, 6(1):1170—1173.
- [17] 卢立新, 陶瑛. 青豌豆呼吸速率的测定与模型表征[J]. *食品与生物技术学报*, 2006, 25(2):33—36.
LU Li-xin, TAO Ying. Respiration Rate Measurement and Mathematical Modelling for Pea[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2006, 25(2):33—36.
- [18] 李霞, 王相友, 王娟. 温度对气调包装薄膜透气性的影响[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(2):113—116.
LI Xia, WANG Xiang-you, WANG Juan. Effects of Temperature on Gas Permeability of Films for Modified Atmosphere Packaging[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(2):113—116.

(上接第9页)

Dispersion of Amphoteric Polyacrylamide[D]. Wuhan: Hubei University, 2013.

- [16] 李国栋, 赵金琴, 张方东, 等. 填料在助留剂作用下的絮聚

行为研究[J]. *中华纸业*, 2013(12):20—24.

LI Guo-dong, ZHAO Jin-qin, ZHANG Fang-dong, et al. A Study on Filler Flocculation Behavior Induced by Retention Aid[J]. *China Pulp & Paper*, 2013(12):20—24.