

基于介电特性的白蘑菇微波冻干传热传质模拟

段续, 闫莎莎, 曾凡莲, 任广跃

(河南科技大学食品与生物工程学院, 河南洛阳 471003)

摘要: 真空冷冻干燥技术常用来生产高品质的冻干白蘑菇, 但其能耗大、干燥时间长的缺点限制了其推广应用。与传统冷冻干燥技术相比, 微波冷冻干燥可节约干燥时间和能耗, 同时可保持其冻干产品的特点。微波冷冻干燥过程的质热传递现象极为复杂, 其过程的预测对干燥过程的控制至关重要。此外, 目前国内外对于微波冻干过程的传热传质模拟都未考虑物料介电损耗因子变化会导致其微波吸收特性的改变, 故模拟结果都不甚理想。本文通过矢量网络分析仪对白蘑菇介电特性进行精确测定, 得出白蘑菇介电损耗因子相对其温度和水分含量的回归方程; 在此基础上利用较为通用的升华-冷凝模型对微波冻干过程质热传递进行了数值模拟研究, 通过白蘑菇微波冻干试验验证, 表明考虑了介电特性的微波冻干质热传递模型可对物料温度分布进行较准确的预测。

关键词: 白蘑菇; 微波冷冻干燥; 传热传质; 模拟; 介电特性

文章编号: 1673-9078(2016)6-177-182

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.6.028

Simulation of Heat and Mass Transfer During Microwave Freeze Drying of White Mushrooms Based on Dielectric Property

DUAN Xu, YAN Sha-sha, ZENG Fan-lian, REN Guang-yue

(Food and Biology Engineering College, Henan University of Science & Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: Vacuum freeze drying technology is often used to produce high quality dried white mushrooms, but its disadvantages of high energy consumption and long drying time limit its application. Compared with conventional freeze drying technology, microwave freeze drying can greatly save drying time and energy consumption, while retaining the characteristics of the freeze dried products. The process of heat and mass transfer during microwave freeze drying is very complicated, and the precise prediction of the heat and mass transfer is important for control of the drying process. In addition, international and domestic reports on the simulation of heat and mass transfer during microwave freeze drying have not considered that a material's dielectric loss factor can lead to variation in microwave absorption ability, resulting in imprecise simulation results. In this study, a vector network analyzer was used to determine the dielectric properties of the mushrooms and a regression equation of dielectric loss factor versus temperature and moisture content was generated. Based on the dielectric property, a numerical simulation of heat and mass transfer during microwave freeze drying was carried out using a commonly used sublimation-condensation model, and was experimentally verified by conducting microwave freeze drying on white mushrooms. The results show that the simulation of heat and mass transfer based on dielectric property can precisely predict the temperature distribution of the samples during microwave freeze drying.

Key words: white mushrooms; microwave freeze drying; heat and mass transfer; simulation; dielectric property

白蘑菇(*Agaricus bisporus*)又称双孢菇, 是全球范围内种植和食用最为广泛的食用菌。由于其含水量高, 质地细嫩, 不耐贮存, 故常采用干燥方法对其进行储藏^[1]。目前有多种干燥方法: 自然晒干, 热风干燥、冷冻干燥等。晒干法易致使菌褶变黑, 质量不稳定, 不适合大规模生产。而热风干燥产品外形收缩严重、复原率低、营养成分损失大。冷冻干燥(Freeze drying,

收稿日期: 2015-08-05

基金项目: 国家自然科学基金(U1204332)

作者简介: 闫莎莎(1989-), 女, 硕士研究生, 从事农产品加工技术研究

通讯作者: 段续(1973-), 男, 博士, 副教授, 从事农产品加工与贮藏技术研究

FD)基本可以保持产品原有形状结构和颜色, 且复水性好, 蛋白质、维生素C等均高于热风干制品^[2]。但白蘑菇的冷冻干燥耗时长、能耗高, 导致冷冻干燥成本高^[2-3]。

微波冷冻干燥(Microwave Freeze drying, MFD)可弥补以上不足, 因为作为冷冻干燥的加热源, 微波能以电磁波形式穿透到介质内部, 冰晶受热升华快, 从而提高干燥速率, 缩短干燥时间。与传统冷冻干燥技术相比, 微波冷冻干燥可节约干燥时间和能耗, 同时保持产品质量。但微波冷冻干燥过程中质热传递机理复杂, 其干燥过程难以控制, 因而产品质量不稳定, 故该技术还未能大规模应用在实际生产中。

Nastaj 等^[4]指出微波冷冻干燥过程中物料微波吸收特性呈动态变化,尤其是干区和湿区对微波响应特性具有较大差别,是模拟过程需要解决的重要问题。Witkiewicz 等^[5]确立了任意固体微波冷冻干燥的数学模型,该模型考虑在冰峰移动中未知的升华前温度 T_s 和水蒸气的质量浓度 C_s 。Wang 等^[6]和 Sun 等^[7]提出微波冷冻干燥过程中的升华-冷凝现象,并建立了升华-冷凝模型,可以较好地模拟干燥过程。

然而,目前国内外所有报道中都没有考虑物料的介电特性在微波冻干过程中的变化,事实上介电特性的变化会导致物料的微波吸收特性产生动态变化。因此,微波冻干过程的数值模拟值都很难如实反映物料的精确定温分布情况。针对这些问题,本文将进行以下两方面研究:(1)在升华-冷凝模型的基础上,考虑物料介电特性的变化,对白蘑菇介电损耗因子 ϵ'' 进行测定并建立回归方程,进而建立精确的质热传递方程;(2)对白蘑菇的微波冷冻干燥参数进行试验,并对考虑物料介电特性的质热传递模型进行验证。

1 材料与方法

1.1 质热传递模型

本文针对非饱和含湿多介质微波冻干过程进行分析,其传热传质物理模型如图1所示,同时考虑了物料介电特性的变化。在微波冻干中,内热源强度^[8,9]可用下式表示。

$$P_v = 2\pi f \epsilon'' \tan \sigma |E|^2 = 2\pi f \epsilon'' |E|^2 \quad (1)$$

式中: P_v —功率耗散密度, W/m^3 ; f —电场频率, Hz; E —电场强度, V/cm ; $\tan \sigma$ —损耗角正切; ϵ'' —介电损耗系数。

该式中考虑了介电损耗因子,各部分传热传质方程组如下。

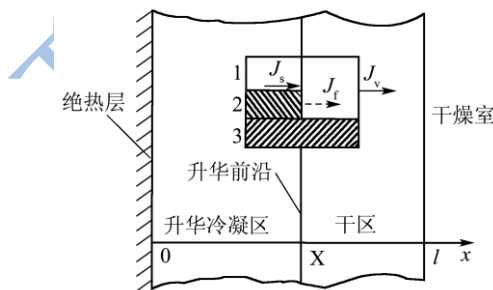


图1 升华-冷凝物理模型

Fig.1 Physical model of sublimation-condensation

注: 1.蒸汽, 2.冰, 3.固体骨架。

1.1.1 干区质热传递控制方程

(1)质量守恒方程为:

$$\epsilon \frac{\partial \rho_v}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (D_e \frac{\partial \rho_v}{\partial x}) \quad (2)$$

式中: ρ_v —蒸汽密度, kg/m^3 ; ϵ —孔隙率, τ —时间, s; x —空间坐标, m; D_e —干物料有效扩散系数, m^2/s 。

该式中孔隙率 ϵ 、有效扩散系数 D_e 为常数, 冰的饱和蒸汽密度 ρ_v 随着时间 τ 和距离 x 的变化而变化。

(2) 能量守恒方程为:

$$\rho_i c_i \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_i \frac{\partial T}{\partial x}) + q = \lambda_i \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + P_v \quad (3)$$

式中: ρ_i —密度, kg/m^3 ; c_i —比容热, $J/(kg \cdot K)$; T —温度, K; λ_i —导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; P_v —内热源强度 $P_v=2\pi f \epsilon'' |E|^2$, 见式(1)。

其中, 密度 ρ 、比热容 c 、导热系数 λ 视为常数, 均可依表查出, 具体数值见附表。温度 T 随着时间和距离变化而变化。

1.1.2 升华冷凝区质热传递控制方程

在该区主要是在蒸汽浓度和压力梯度作用下产生气流。

(1) 质量守恒方程为下式(2-4):

$$-\mu_m \frac{\partial S}{\partial \tau} = -\frac{\partial}{\partial x} (K_s \frac{\partial T}{\partial x}) + f_T \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_e \frac{\partial T}{\partial x}) + f_T P_v \quad (4)$$

式中, μ_m —物料最大含水量, kg/m^3 ; S —冰的饱和度; K_s —有效热质系数, $kg/(m \cdot s \cdot ^\circ C)$; f_T —源转换系数, kg/J , 表示了内热源引起质量升华能力。

(2) 能量守恒方程为下式(2-12):

$$[\rho_i c_i]_e \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_e \frac{\partial T}{\partial x}) + P_v \quad (5)$$

式中 λ_e —有效导热系数, $\lambda_e=\lambda+K_s \Delta H$, ΔH 表示冰升华潜热, J/kg 。有效导热系数 λ_e , $[\rho_i c_i]$ 的数值依据附表数据进行计算, 温度 T 随着时间和距离的变化而变化。

1.1.3 升华前沿质热控制方程

在冻干过程中, 干区和升华冷凝区两部分之间是升华前沿, 其传质和传热控制方程分别为:

$$(-D_e \frac{\partial \rho_v}{\partial x})|_{x=x^+} - (-K_s \frac{\partial T}{\partial x})|_{x=x^-} = J_F \quad (6)$$

$$(-\lambda_e \frac{\partial T}{\partial x})|_{x=x^-} - (-\lambda \frac{\partial T}{\partial x})|_{x=x^+} = J_F \cdot \Delta H \quad (7)$$

式中: J_F —升华前沿处升华引起的蒸汽流的质量流速,

$kg/(m^2 \cdot s)$ 。

1.1.4 计算方法

对微分方程进行有限差分推导, 以干区热守恒方程为例:

将 $q = P_v = 2\pi f \varepsilon'' \tan \sigma |E|^2 = 2\pi f \varepsilon'' |E|^2$ 代入式(3)整理得:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + a\varepsilon'' \quad (8)$$

式(8)中, $a = 2\pi f |E|^2$, 试验中由于物料厚度远小于微波穿透深度, 为简化计算可将电场强度视为定值, E 为常数。

对式(8)进行差分推导如下:

$$\rho c \frac{T_{i,k+1} - T_{i,k}}{d\tau} = \lambda \frac{T_{i+1,k} - 2T_{i,k} + T_{i-1,k}}{(dx)^2} + a\varepsilon'' \quad (9)$$

$$T_{i,k+1} - T_{i,k} = \frac{\lambda d\tau}{\rho c (dx)^2} \frac{T_{i+1,k} - 2T_{i,k} + T_{i-1,k}}{1} + a\varepsilon'' \quad (10)$$

令

$$\alpha = \frac{\lambda d\tau}{\rho c (dx)^2}, i=1,2,\dots,N-1; k=0,1,\dots,M$$

将 α 代入式(10)得

$$T_{i,k+1} = \alpha T_{i+1,k} + T_{i,k} (1 - 2\alpha) + \alpha T_{i-1,k} + a\varepsilon'' \quad (11)$$

运用 MATLAB 软件将公式(11)编程, 模拟干区温度随着时间 τ 和距离 x 变化的趋势。计算中, 距离步长为 0.0001 m, 时间步长为 0.2 s。

1.2 白蘑菇介电特性测定

介电特性主要参数为相对介电常数 ε' 、相对介电损耗因子 ε'' 和介质损耗角正切 $\tan \delta$ 等。本部分使用 Agilent 网络分析仪^[10]测样品的介电特性。

1.2.1 材料选择及处理

白蘑菇购于蔬菜批发市场, 菇型完整, 大小均一, 无损伤, 无褐变, 初始含水率为 90%~93.5% (w.b.)。为了介电特性测试所用矢量网络分析仪同轴线探头能完全覆盖样品, 应选用个体较大的白蘑菇。清洗干净后垂直于菇柄方向进行切片, 厚度为 3 mm。将切好的蘑菇片按数量等分为四份, 分别放入 60 °C 的电热鼓风干燥箱中, 每隔 20 min 对样品进行称重并计算含水率, 最终获得不同含水率的样品 (93.5%、85.1%、76.9%、64.0%), 用密封袋密封后放入冰箱 (-25 °C) 待用。需要说明的是当蘑菇样品含水率低于 64% 时, 样品表面变形较大, 产生凹凸不平现象, 在进行介电特性测试时与探头接触面不紧密而导致信号偏移极大, 故本文暂时只对 64% 以上含水率物料进行介电特性测定并建立回归模型, 而对低含水率物料的介电特性测定方法有待于进一步研究。

1.2.2 介电特性测定

采用 Agilent E5062A 矢量网络分析仪进行白蘑菇介电特性的测定, 网络分析仪通过 82537B USB/GPIB 界面与计算机相连。介电探头套件选用 slim probe, 测定五次取其平均值。样品的介电特性 (介电常数和介电损耗因子) 由制造商所提供的计算机软件 (Agilent 80570E) 自动计算。测定的温度范围为 -35 °C 到 65 °C。网络分析仪和探头测量前需要进行调节与校准, 可先测量 25 °C 去离子水, 以验证获得的介电常数与介电损耗因子与已知的数据是否匹配, 如果不匹配, 则需要重新校准。测量样品时, 将物料加热或冷却至一定的温度后取出, 在内部插上热电偶探针, 再将矢量网络分析仪的探头与物料表面接触紧密并开始测定。冻结物料需在测定冻结前就将热电偶探针插入物料, 测定时将热电偶端子与测温套件迅速连接, 观察温度读数, 待温度升至所需温度时记录介电损耗值。

1.3 白蘑菇微波冷冻干燥试验

白蘑菇微波冻干试验中, 使用微波真空冷冻干燥机 (YHW-3S 南京亚泰微波能技术研究所), 微波功率连续可调, 测温方式为光纤测温传感器 (0.4 mm, 深圳普罗迪技术有限公司; 物料内部温度) 和红外测温器 (HE-300, 北京时代瑞资科技有限公司; 物料表面温度)。白蘑菇厚度为 10 mm, 微波功率为 500 W, 干燥压力为 100 Pa, 冷阱温度为 -40 °C, 干燥时间为 650 min 条件下, 测量白蘑菇含水率变化、切片表面温度与中心温度变化。

1.4 数据统计分析及数值模拟

采用 DPS9.5 数据分析软件进行数据处理分析, 试验重复三次; 传热传质模拟方程采用 MATLAB2012b 进行求解。

2 结果与讨论

2.1 白蘑菇介电损耗因子变化特性

介电损耗因子直接决定了物料对微波的吸收能力, 对微波冻干过程中的质热传递具有重要影响。将得到的介电损耗因子数据导出, 经计算得出微波频率为 2450 MHz 下不同含水率和不同温度的介电损耗因子, 如表 1 所示。

从实验结果可以看出, 白蘑菇在冻结状态 (-10 °C 和 -20 °C) 下时, 其介电损耗因子明显处于很低水平, 而且随着含水率下降时的变化并不明显。也就是说, 白蘑菇在冻结状态时其微波吸收能力很低, 这对微波冷冻干燥操作时具有两方面的影响。一方面在干燥初

期物料饱和度较高,冰晶较多,故其微波吸收率也较低,则初始干燥速率较低;另一方面冻结部分较低的微波吸收率使其内部不易升温过快,从而又有利于升华过程的保持,对干燥品质具有积极作用。在温度升高到一定程度后,白蘑菇的介电损耗因子呈倍数增长,即使在含水率很低的情况下,其介电损耗因子依然比低温状态高很多,这也说明在微波干燥过程中,一旦

温度上升到 10℃ 以上,微波吸收率就会比冻结状态下高几倍,此时需要注意控制微波输入功率,这一规律也和 Duan 等人^[8]对其他物料的研究结果是一致的。水分含量是否设计得太高?因为升华结束时物料中的水分含量很低,远低于 64%。再者,-20℃应该于-10℃介电损耗,而表中相反,需检查。

表 1 不同含水率的白蘑菇切片在 2450 MHz 下不同温度的介电损耗因子

Table 1 Dielectric loss factor of white mushroom slices with different moisture content under different temperatures at 2450 MHz

含水率/%	温度/℃				
	20	10	0	-10	-20
93.5	26.746±0.426	24.594±0.824	26.324±0.364	9.528±0.294	10.412±0.686
85.1	24.842±0.382	22.429±0.276	21.476±0.474	8.367±0.385	8.472±0.485
76.9	23.758±0.212	22.868±0.568	18.012±0.526	7.583±0.466	7.641±0.536
64.0	22.634±0.562	20.865±0.821	19.843±0.418	7.254±0.728	7.573±0.526

由试验结果,可建立白蘑菇的介电损耗因子随含水率和温度变化的回归方程:

$$y=62.494-124.618X_1+0.283X_2+89.722X_1^2 \quad (12)$$

其中 X_1 为含水量, X_2 为温度。由 DPS 分析软件还可得到:相关系数 $R=0.95962$, F 值为 43.6446,显著水平 p 为 0.01, 剩余标准差 S 为 1.01606,调整后相关系数 R_a 为 0.94857,因此回归方程高度显著。

回归方程系数的 t 检验如表 2 所示。由上述分析结果可知,回归方程及系数高度显著。

表 2 回归方程系数的检验表

Table 2 Test table of regression equation coefficients

系数所在项	t 值	显著水平
X_1	3.43750	0.01
X_2	2.37528	0.1
X_1^2	3.88934	0.01
X_1X_2	1.04468	不显著

2.2 物料干区和升华-冷凝区温度变化

利用升华-冷凝模型分析白蘑菇非饱和和含湿多孔介质的微波冻干过程,工况参数为: $L=10\text{ mm}$, $f=2450\text{ MHz}$,试验过程中电场强度 $E=100\text{ V/cm}$ 。方程(3)和(5)中,内热源强度是介电损耗因子的函数,而介电损耗因子由上文可知,是关于温度和含水率的函数,即方程(12)。当含水率为 90%时,物料的温度分布如图 2 和图 3 所示。图中横坐标距离表示距离表面的距离,从图中可以看出,干区外部温度高于内部,随着干燥的进行,温度在逐渐升高,温度梯度逐渐加大,这主要是因为该区导热系数较小。温度变化规律与 Wang 等^[6]对牛肉微波冷冻干燥过程模拟的计算结果变化趋势基本相似。在干燥过程中,当物料表面温度大幅度

高于外部环境温度时,此时该干区大量热量将传向物料内部。因此,在微波冻干过程中如若出现烧焦的现象,则可能出现在物料的内部。在升华冷凝区,温度分布比较平坦,由物料中心到升华前沿逐渐降低。升华-冷凝区相对于干区温度分布更为平坦的主要是因为这两个区导热系数的差别较大。

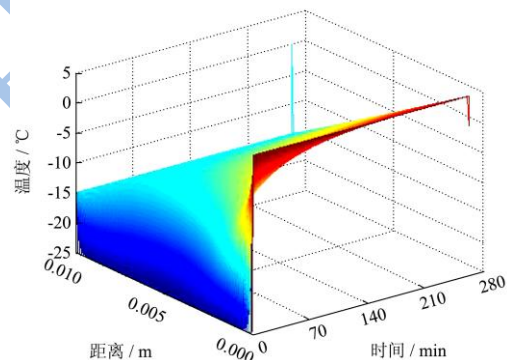


图 2 含水率为 90%的物料干区温度分布

Fig.2 Temperature distribution in the material dry area with a moisture content of 90%

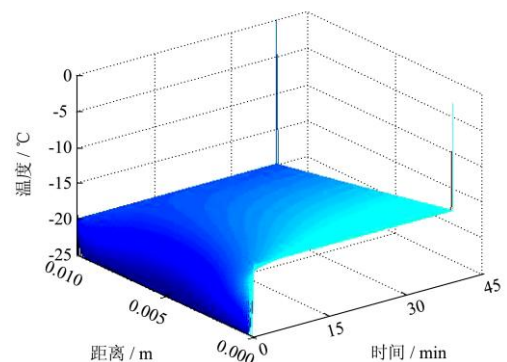


图 3 升华-冷凝区温度变化

Fig.3 Temperature changes of the sublimation-condensation zone

2.3 试验值与模拟值的变化

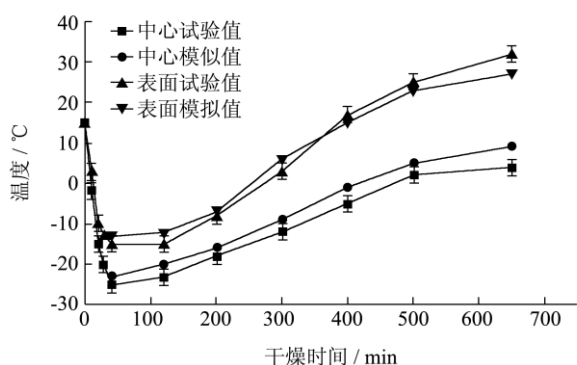


图4 微波冻干过程中不同位置温度变化

Fig.4 Changes of temperature in different positions during microwave freeze-drying

物料温度变化曲线对于冷冻干燥极为重要，事实上，它揭示了冷冻干燥的一般过程。由图4可看出，实验中白蘑菇大约前40 min是预冻结，而之后的大约300 min内缓慢升温，接着剩下时间内则是较快速升温。微波冷冻干燥过程可分为三个阶段，预冻段、升华段以及解析段，这和普通冷冻干燥是相似的。但微波冷冻干燥有其特别的地方，其升华段不象普通冷冻干燥那么明显，且持续时间较短，解析段温度升高速度则更快。采样温度时间有些长，是否时间间隔小些。

从数值模拟结果来看，冻结的白蘑菇在干燥过程中，物料形态由冻结状态转为干物质状态，即由升华-冷凝区转向干区。与图2、图3的变化趋势一致，整个干燥过程物料温度由低向高转变，升华-冷凝区持续时间短于干区持续时间，这是因为干区在有结合水需要继续干燥，从而整体温度变化趋势表现为前期缓慢升温，后期快速升温，并且后期持续时间比前期持续时间长。因为数值模拟是从微波加载开始进行，故图4中模拟结果的开始时间是预冻段结束时刻(40 min)。由图4可见，对物料温度变化的数值模拟结果与试验过程中实测的温度变化具有较好的一致性，这也说明本文所采用的基于物料介电损耗因子变化的传热传质模拟方法是可行的。本模型的价值正在于其可以较为准确的预测不同微波加载条件下物料不同部位的温度变化趋势，从而可以在干燥过程中加以有效控制。

3 结论

3.1 温度、含水率对白蘑菇的介电特性均有显著影响，随着温度的升高、含水率升高其介电损耗因子逐渐增大。

3.2 通过实验值和预测值的比较，表明升华-冷凝模型结合了物料介电特性的精确回归方程可准确模拟微

波冻干中的质热传递过程，从而能够精确预测物料的温度分布。

附表1 白蘑菇热物性数据

Table 1 Thermophysical data of white mushrooms				
名称	符号	数值或表达式	单位	引用
冰比热	c_i	2090	J/(kg K)	[11]
冰密度	ρ_i	913	kg/m ³	[11]
冰导热系数	λ_i	2.22	W/(m·°C)	[11]
冰升华潜热	ΔH	2821500	J/kg	[4]
水蒸气导热系数	λ_v	0.0022	W/(m·°C)	[12]
水蒸气比热	c_v	1867	J/(kg K)	[12]
冰饱和蒸汽密度	ρ_v	$0.1 \times \exp(-53.8 + 0.295 \times T - 3.988 \times 10^{-4} \times T^2)$	kg/m ³	[4]
水蒸气动力粘度	μ_v	7.6×10^{-6}	kg/(m s)	[12]
骨架导热系数	λ_s	0.20	W/(m·°C)	[4]
物料密度	ρ_s	1044	kg/m ³	[13]
物料冻后比热	c_s	1.99	kJ/(kg K)	[14]
物料导热系数	λ_s	0.557	W/(m·°C)	[14]
物料孔隙率	ϵ	41.4%	-	[13]
含水量	w	91%	-	-
最大含湿量	μ_m	940	kg/m ³	-
扩散系数	D	$0.254/P_v$	m ² /s	[14]
有效扩散系数	D_e	$(7.85 \times 10^{-3}) / (3.4 + P_v / 133.3)$	m ² /s	[14]
干物料渗透系数	K_D	$(4 \times 10^{-8}) / P_v$	m ²	[14]
相对渗透率	K_r	1-S	-	[14]

参考文献

[1] 王丽芳,王晓拓,王志东.贮藏温度对双孢蘑菇褐变和抗氧化活性的影响及动力学研究[J].现代食品科技, 2015, 31(2):157-163
WANG Li-fang, WANG Xiao-tuo, WANG Zhi-dong. Kinetics and effect of storage temperature on the browning and antioxidant activity of agaricus bisporus [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(2): 157-163

[2] 赵凤敏,李树君,张小燕,等.常见浆果的真空冷冻干燥特性研究[J].现代食品科技,2014,30(4):220-225
ZHAO Feng-min, LI Shu-jun, ZHANG Xiao-yan et al. Vacuum freeze-drying characteristics of common berries [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30 (4): 220-225

[3] 王俊,张敏华,叶飞华,等.食用菌的四种干燥特性研究[J].浙江农业学报,1997,1:21-25
WANG Jun, ZHANG Min-hua, YE Fei-hua,et al. Characteristics of mushroom by four drying methods [J]. Journal of Zhejiang Agricultural, 1997, 1: 21-25

- [4] Nastaj J F, Witkiewicz K, Wilczyńska B. Experimental and simulation studies of primary vacuum freeze-drying process of random solids at microwave heating [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2008, 35(4): 430-438
- [5] Witkiewicz K, Nastaj J. Optimal control policy of the microwave primary freeze drying of random solids [J]. *Drying Technology*, 2011, 29(2): 217-229
- [6] Wang Z H, Shi M H. The effects of sublimation-condensation region on heat and mass transfer during microwave freeze drying [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1998, 120(3): 654-660
- [7] Sun H, Zu H M, Fen H D et al. Thermo electromagnetic coupling in microwave freeze-drying [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2007, 30(2): 131-149
- [8] Duan X, Zhang M, Mujumdar A S, et al. Trends in microwave-assisted freeze drying of foods [J]. *Drying Technology*, 2010, 28(4): 444-453
- [9] Nastaj JF, Witkiewicz K. Mathematical modeling of the primary and secondary vacuum freeze drying of random solids at microwave heating [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(21-22): 4796-4806
- [10] ASTM D2520-90. Test methods for complex permittivity (Dielectric Constant) of solid, electrical insulating materials at microwave frequencies and temperatures to 1650 °C [M]. Philadelphia, PA: American Society for Testing Materials, 1990
- [11] 马庆芳等编.实用热物理性质手册,中国农业机械出版社,北京,1986
- [12] 沈维道,郑佩芝,蒋淡安.工程热力学[M].高等教育出版社,1983
- [13] 杨哪,金亚美,赵娟娟,等.基于离子电流盐渍蘑菇的工艺条件优化[J].食品科学,2014,35(12):13-17
YANG Na, JIN Ya-mei, ZHAO Juan-juan, et al. Optimization of process conditions based on ion current Salted Mushroom [J]. *Food Science*, 2014, 35(12): 13-17
- [14] 刘成梅,罗舜著,张继鉴.食品工程原理.北京,化学工业出版社,2011