

风速对双孢蘑菇预冷过程的影响*

王娟 谭金翠 王相友

(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049)

摘要: 利用传热学理论对双孢蘑菇预冷过程进行分析,通过集总参数模型对其预冷时间进行预测,并对该数学模型进行了试验验证。结果表明:该数学模型可以用于预测双孢蘑菇在预冷过程中的温度变化,可预测不同条件下双孢蘑菇降温过程;冷却速率随着风速的增加而增加,二者符合幂函数关系。拟合不同风速下蘑菇中心温降曲线,得到其拟合曲线方程。

关键词: 双孢蘑菇 通风预冷 集总参数模型 风速

中图分类号: S646.1⁺1; TS205 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)10-0203-06

Effect of Air Velocity on Pre-cooling Process of *Agaricus bisporus*

Wang Juan Tan Jincui Wang Xiangyou

(School of Agricultural and Food Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: The pre-cooling process of *Agaricus bisporus* by using heat transfer theory was analyzed. The cooling time was predicted with the lumped parameter model, and the performance of the mathematical model was checked using experimental data. It was turned out that the model could be used to predict the temperature change during the pre-cooling process of *Agaricus bisporus*, and it could be used to predict different conditions on pre-cooling. At the same time, the increase in cooling air velocity beyond the above values did not affect the cooling rate significantly. The pre-cooling rate was increased with the increase of the air velocity, and fitted the power function. The equation of the fitting curves between the air velocity and central temperature was obtained.

Key words: *Agaricus bisporus* Cold storage precooling Lumped parameter model Air velocity

引言

新鲜双孢蘑菇色泽洁白,营养丰富,组织细嫩,但采后后熟过程极其活跃,影响其商品质量和货架寿命,给生产和贮运造成很大损失和制约^[1-4]。采后温度过高是双孢蘑菇品质快速下降的一个主要因素。预冷能够使果蔬快速冷却,全部或部分释放出田间热,使果蔬采后代谢活动迅速降低,从而有效控制果蔬呼吸过程,抑制组织内糖、酶和蛋白质等物质的变化,延长保鲜时间^[5-8]。预冷方式有真空预冷、强制通风预冷、冰预冷和水预冷等^[9-16]。预冷方式的选择和预冷过程各参数(预冷时间、热载荷等)的

准确预测需要综合考虑预冷成本、预冷时间和冷却过程等方面的情况^[17-20]。对于双孢蘑菇来说,强制通风预冷由于操作简单,投资和运转费用较少,是目前较为实用、有效的预冷方法,但传统上仅依赖于工程预冷试验积累的数据、归纳出的经验算式及得出的一些经验图表,不能准确预测预冷过程蘑菇内部温度随时间的变化。Kumar等对易腐果蔬预冷过程进行了研究^[20];苗玉涛等建立了单体球形果蔬压差预冷过程的简化数学模型并对其进行了试验验证^[21];张敏等对苹果冷藏保鲜过程进行了传热学分析^[22];孙勇等研究了单体马铃薯种子的预冷模型^[23]。但迄今未见对单体双孢蘑菇的预冷模型的

收稿日期: 2013-04-26 修回日期: 2013-05-04

* 国家农业科技成果转化资金资助项目(2010GB2C600253)

作者简介: 王娟,副教授,主要从事农产品加工及贮藏研究,E-mail: wangjuan7912@163.com

通讯作者: 王相友,教授,博士生导师,主要从事农产品加工及贮藏研究,E-mail: wxy@sdut.edu.cn

研究。

本文对双孢蘑菇预冷过程进行传热学分析,利用集总参数模型对其进行预冷时间的研究,并通过试验与模型对比。

1 数学模型的建立

1.1 集总参数模型

集总参数法是指忽略物体内部导热热阻,将其看作集总热容来定量分析瞬态非稳态导热过程的方法^[24]。

双孢蘑菇的外形示意图如图 1 所示。以双孢蘑菇伞盖最大直径中点处的温度作为其中心温度。根据毕渥准则,不考虑形状因子的影响,可忽略蘑菇内部导热热阻,只考虑表面换热热阻,则描述其预冷过程的数学模型为

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{\Phi}}{\rho c} \quad (1)$$

式中 t ——温度 τ ——预冷时间

λ ——导热率 ρ ——双孢蘑菇密度

c ——比定压热容

x, y, z ——直角坐标,确定蘑菇各点的几何位置

$\dot{\Phi}$ ——双孢蘑菇单位体积内热源生成热

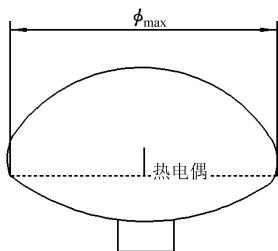


图 1 双孢蘑菇外形示意图

Fig. 1 Schematic diagram of construction of *Agaricus bisporus*

由于物体的内部热阻可以忽略,温度与坐标无关,所以式中温度的二阶导数项为零。于是式(1)可简化为

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\dot{\Phi}}{\rho c} \quad (2)$$

式中, $\dot{\Phi}$ 是广义热源,因发生热交换的边界不是计算边界,所以界面上交换的热量应折算成整个物体的体积热源 $-\dot{\Phi}V = Ah(t - t_{\infty})$,于是有

$$\rho c V \frac{dt}{d\tau} = -hA(t - t_{\infty}) \quad (3)$$

式中 h ——表面对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$

A ——表面积, m^2 V ——体积, m^3

引入过余温度 $\theta = t - t_{\infty}$, 则式(3)可表示为

$$\rho c V \frac{d\theta}{d\tau} = -hA\theta \quad (4)$$

以过余温度表示的初始条件为

$$\theta(0) = t_0 - t_{\infty} = \theta_0 \quad (5)$$

对 τ 从 0 到 τ 积分,有

$$\int_{\theta_0}^{\theta} \frac{d\theta}{\theta} = - \int_0^{\tau} \frac{hA}{\rho c V} d\tau \quad (6)$$

解得无量纲温度 $\bar{T}$ 为

$$\bar{T} = \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{t - t_{\infty}}{t_0 - t_{\infty}} = \exp \left(- \frac{hA}{\rho c V} \tau \right) \quad (7)$$

式中 θ ——任意时刻蘑菇过余温度

θ_0 ——初始过余温度

V/A 是具有长度的量纲,定义特征尺寸 $l_c = V/A$,

则式(7)右端中的指数项可作如下变化

$$\frac{hA}{\rho c V} \tau = \frac{hl_c}{\lambda} \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\tau}{l_c^2} = \frac{hl_c}{\lambda} \frac{a\tau}{l_c^2} = Bi Fo$$

其中 $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ $Fo = \frac{a\tau}{l_c^2}$ $Bi = \frac{hl_c}{\lambda}$

式中 a ——蘑菇热扩散系数, m^2/s

Fo ——傅里叶数 Bi ——毕渥数

用集总参数法得到的解析式又可写作

$$\frac{t - t_{\infty}}{t_0 - t_{\infty}} = e^{(-Bi Fo)} \quad (8)$$

根据式(7)得到双孢蘑菇预冷过程所需时间为

$$\tau = - \frac{\ln \frac{\theta}{\theta_0}}{\frac{h}{\rho c V} A} \quad (9)$$

1.2 双孢蘑菇的热物性参数

食品热物性取决于本身的含水率。对于所有水果和蔬菜,温度在其冰点以上的食品热物性(比热容、导热率、热扩散率和表面对流换热率)可以按以下公式计算^[25]

$$c = 1\,000(1.381 + 2.930W) \quad (10)$$

$$\lambda = 0.148 + 0.493W \quad (11)$$

$$a = 0.088 \times 10^{-6} + (a_w - 0.088 \times 10^{-6})W \quad (12)$$

$$h = \frac{\lambda_w(2.0 + 0.552Re^{0.53}Pr^{0.33})}{D} \quad (13)$$

其中 $Re = \frac{vD}{\gamma}$

式中 W ——蘑菇含水率,取 $(90 \pm 0.1)\%$

a_w ——水的热扩散率,取 $1.48 \times 10^{-7} m^2/s$

λ_w ——空气导热系数,取 $0.025 W/(m \cdot K)$

Re ——雷诺数 v ——气流速度, m/s

γ ——空气运动粘度,取 $1.4 \times 10^{-5} m^2/s$

Pr ——普朗特常数,取 0.71

D ——当量直径, m

双孢蘑菇的热物性参数为:密度 $655 kg/m^3$,热扩散率 $0.142 \times 10^{-6} m^2/s$,比热容 $4.018 kJ/(kg \cdot K)$,导热系数 $0.5917 W/(m \cdot K)$ 。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

双孢蘑菇采自山东省久发食用菌股份有限公司食用菌培养基地,菌株为 F₅₆,采后立即运至山东理工大学试验冷库。挑选大小均匀,单体质量约 30 ~ 40 g,伞盖当量直径为 43.8 mm,颜色洁白,菇体完整、无病虫害及无机械伤的样本进行试验。

2.2 试验仪器

(1)温度记录仪

OctTemp 型温度记录仪 (MadgeTech),分辨率 0.01℃,测量精度 ±0.5℃。

测温热电偶为 PT100 型铂电阻,φ5 mm × 50 mm,引线 10.0 m,测量精度 0.1℃。

(2)风速记录仪

数字式风速仪 (MadgeTech),测量精度 ±2 m/h,最大风速 95 m/s。

2.3 试验方法

试验在果蔬预冷库进行,试验参数为:流经双孢蘑菇周围的气流速度为 0.50、1.03、1.25、1.51、2.04 和 2.50 m/s。冷空气初温 (0 ± 1)℃ 和 (2 ± 1)℃;双孢蘑菇初始温度 (12 ± 1)℃、(17 ± 1)℃ 和 (22 ± 1)℃。单体双孢蘑菇中心横截面测试位置选取伞盖最大直径中心处。

挑选直径为 42 ~ 44 mm 的双孢蘑菇若干,热电偶插于蘑菇中心,平铺在尺寸为 350 mm × 285 mm × 115 mm 的孔质塑料包装箱内,置于冷库中。

2.4 试验数据处理

采用平均误差 MD 和均方根误差 RMSE 来评价试验结果和预测结果的差异

$$E_{MD} = \frac{\sum_{i=1}^N [(t_i - t_p) / t_i]}{N} \times 100\%$$
$$E_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(t_i - t_p) / t_i]^2}{N}} \times 100\%$$

式中 E_{MD} ——平均误差 E_{RMSE} ——均方根误差

t_i ——试验温度 t_p ——预测温度

3 结果与讨论

3.1 风速对双孢蘑菇中心温度的影响

图 2 为冷空气温度为 1℃,不同风速下双孢蘑菇中心温度随时间变化曲线。从图中可以看出,随着风速的增加,双孢蘑菇温度降到环境温度所需时间逐渐减少,风速由 0.5 m/s 提高到 1.51 m/s 时冷却速度明显提高。这主要是因为随着风速的增加,

空气掠过双孢蘑菇的流动由层流边界层转变为紊流边界层,换热过程得到增强,对流换热系数增大。风速超过 1.51 m/s 时冷却速度变化比较平缓,此时再通过增加风速提高预冷速度意义不大,只会增加风机功率。

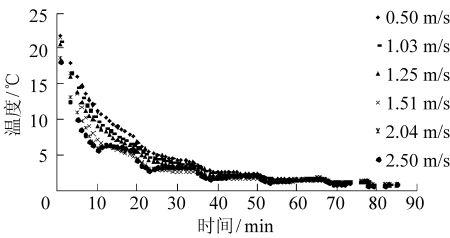


图 2 不同风速下预冷过程中蘑菇中心温度随时间的变化曲线

Fig.2 Central temperature of *Agaricus bisporus* vs time under different air velocities

拟合不同风速下蘑菇预冷过程的温降曲线,温度随时间呈指数关系变化,得到不同风速下蘑菇中心温降曲线方程为

$$\theta = \theta_0 \exp(-R_0 \tau)$$

(14)

式中 R_0 ——双孢蘑菇中心的冷却速率

各风速下参数拟合结果如表 1 所示。冷却速率与风速 v 经曲线拟合后得二者呈幂函数关系且符合 $R_0 = 0.034\ 3v^{0.134\ 8}$ 。

表 1 各风速下参数拟合结果

Tab.1 Parameter fitting results under different air velocities

风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\theta_0 / ^\circ\text{C}$	$R_0 / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	决定系数 R^2
0.50	10.585 0	0.035 0	0.990 7
1.03	10.167 0	0.036 8	0.985 1
1.25	9.617 5	0.039 7	0.986 5
1.51	10.077 0	0.041 1	0.988 2
2.04	9.762 6	0.042 1	0.990 2
2.50	10.023 0	0.045 0	0.992 0

3.2 特征尺寸对建模结果的影响

利用式(7)对双孢蘑菇中心温度在预冷过程中随时间变化的规律进行研究。由于形状非标准球体,研究过程中采用了不同的特征尺寸。表 2 给出了双孢蘑菇不同特征尺寸 ($l_c = D、D/2、D/3$) 时对应的对流换热系数和毕渥数。设定不同的特征尺寸后进行双孢蘑菇的预冷试验。图 3 为双孢蘑菇初始温度 (12 ± 1)℃、冷空气温度 (2 ± 1)℃ 时不同风速下的预测结果。

由图 3 可知,特征尺寸相同时不同风速下双孢蘑菇的中心温度随时间变化情况不同。随着风速的增加,双孢蘑菇的温度降到环境温度所需时间逐渐减少,冷却速率逐渐变大且达到一定风速后冷却速

表 2 不同特征尺寸对应的对流换热系数和毕渥数
($D = 43.8\text{ mm}$)

Tab.2 Convective heat transfer coefficient and Bi of <i>Agaricus bisporus</i> on different feature sizes		$v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$				
特征尺寸	参数	0.50	1.03	1.25	2.04	2.50
D	$h/W\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$	15.9	21.28	26.1	30.2	33.86
	Bi	1.09	1.55	1.89	2.19	2.46
$D/2$	$h/W\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$	21.64	30.21	36.9	42.3	47.66
	Bi	0.78	1.09	1.34	1.54	1.73
$D/3$	$h/W\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$	26.86	41.48	37.36	52.23	58.35
	Bi	0.65	1.00	0.91	1.26	1.41

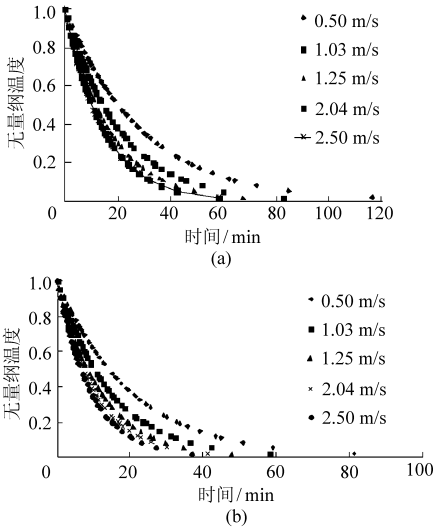


图 3 特征尺寸为 D 、 $D/2$ 时不同风速下无量纲温度随时间的变化曲线
Fig.3 Dimensionless temperature vs time in different air velocities with feature size of D and $D/2$
(a) $l_c = D$ (b) $l_c = D/2$

率不再增加。

图 4 为风速 0.50 m/s 和 1.03 m/s 时的温度随时间的变化曲线。由图 4 可知,处于小风速场时,计算模型的结果与实际测量值有较大差异。这可能是由于风速较小时,特征尺寸的影响起决定作用,所取的特征尺寸不能很好地模拟温度随预冷时间的变化情况,需要寻求更合适的特征尺寸。

特征尺寸为 D 的误差小于特征尺寸为 $D/3$ 的误差。当库内空气流速为 0.50 m/s 时,蘑菇实测中心温度要达到 2℃ 所需时间大于 120 min,特征尺寸为 D 的模型用时约为 100 min,特征尺寸为 $D/3$ 的模型用时约为 80 min。当风速为 1.03 m/s,蘑菇中心温度为 2℃ 时,实测时间为 90 min,特征尺寸为 $D/3$ 的模型计算所需要时间为 60 min,相差为 30 min;而特征尺寸为 D 的模型所计算的时间为 80 min,相差 10 min,误差较小。因此,在小风速时,采用较大的特征尺寸较符合真实的预冷过程。

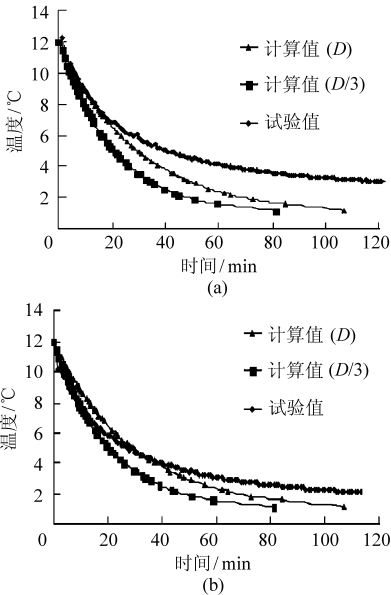


图 4 风速 0.50 m/s 和 1.03 m/s 时温度随时间的变化曲线
Fig.4 Temperature vs time at air velocity of 0.50 m/s and 1.03 m/s
(a) 0.50 m/s (b) 1.03 m/s

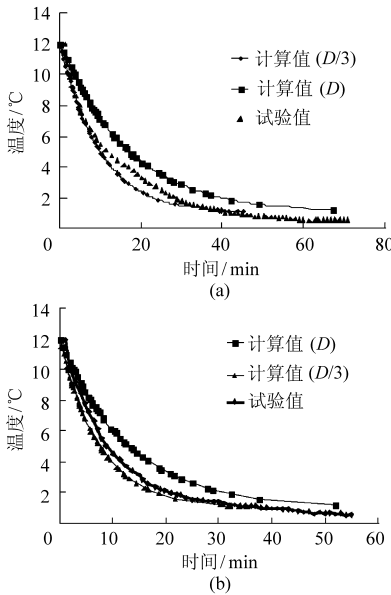


图 5 风速 1.51 m/s 和 2.50 m/s 时温度随时间的变化曲线
Fig.5 Temperature vs time at air velocity of 1.51 m/s and 2.50 m/s
(a) 1.51 m/s (b) 2.50 m/s

图 5 为风速 1.51 m/s 和 2.50 m/s 时的温度随时间的变化曲线。从图 5 可知,随着风速的增大,实际测量结果越来越接近特征尺寸为 $D/3$ 的变化趋势。当风速为 1.51 m/s,蘑菇中心温度为 2℃ 时实测时间为 30 min,特征尺寸为 $D/3$ 的模型计算所需要时间为 20 min,相差为 10 min。而特征尺寸为 D 的模型所计算的时间为 50 min,相差 20 min。当风速为 2.50 m/s,蘑菇中心为 2℃ 时,实测时间为 25 min,特征尺寸为 $D/3$ 的模型用时约 20 min,相差

5 min,而特征尺寸为 D 的模型用时约 40 min,相差 15 min,存在较大误差。因此,在冷库内风速较大时,采用特征尺寸为 $D/3$ 的模型能取得较好的预测预冷时间。

综上,风速较小时特征尺寸的影响起决定作用,当风速超过一定值时风速影响起决定作用。比较结果如表 3 所示。

表 3 计算值与实测值所需时间比较

Tab.3 Time for calculated value and predicted value					
				min	
风速 /m·s ⁻¹	达到预冷温度所需时间			模拟与试验时间差	
	模拟值		试验值	D 与试 验值	D/3 与 试验值
	D	D/3			
0.50	100	80	>120	>20	40
1.03	80	60	90	10	30
1.51	50	20	30	20	10
2.50	40	20	25	15	5

表 4 列出了蘑菇初始温度为 $(17\pm1)^{\circ}\text{C}$,冷空气初始温度为 $(2\pm1)^{\circ}\text{C}$ 时,试验温度与预测温度的比较情况。对数据采用平均误差 E_{MD} 和均方根误差 E_{RMSE} 来评价试验结果和预测结果的差异,处理后得平均误差 E_{MD} 为 12.06%,均方根误差 E_{RMSE} 为 12.80%。

4 结论

(1)增加风速可明显缩短预冷时间,使蘑菇在短时间内达到库内的贮藏温度,但相应会增加能耗,经济操作风速为 1.0~1.5 m/s。

(2)利用集总参数模型能较准确地预测双孢蘑菇的预冷时间。但在实际预冷过程中,由于双孢蘑菇自身性质的影响,以及库内风速的不同,可考虑使用不同的特征尺寸预测这一过程。

参 考 文 献

1 王相友,王健,朱继英,等. 双孢蘑菇酶促褐变特性及褐变的控制[J]. 食品科学,2011,32(20):318~322.
Wang Xiangyou, Wang Jian, Zhu Jiying, et al. Enzymatic browning characteristics and control of button mushroom (*Agaricus bisporus*) [J]. Food Science,2011,32(20):318~322. (in Chinese)

2 王娟,王相友,朱继英,等. 基于 Langmuir 吸附理论的双孢蘑菇呼吸速率模型[J]. 农业机械学报,2011,42(4):110~115.
Wang Juan, Wang Xiangyou, Zhu Jiying, et al. Respiration rate model of *Agaricus bisporus* based on Langmuir adsorption theory [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(2):110~115. (in Chinese)

3 朱继英,王相友,许英超. 贮藏温度对双孢蘑菇采后生理和品质的影响[J]. 农业机械学报,2005,36(11):92~94,97.
Zhu Jiying, Wang Xiangyou, Xu Yingchao. Effects of storage temperature on the postharvest physiology and quality of *Agaricus biosporus*[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(11):92~94, 97. (in Chinese)

4 王娟,王相友,李霞. 低温气调贮藏下氧气含量对双孢蘑菇品质的影响[J]. 农业机械学报,2010,41(4):110~113,123.
Wang Juan, Wang Xiangyou, Li Xia. Effects of oxygen concentration on storage quality of *Agaricus bisporus* under low temperature and controlled atmosphere storage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(4):110~113,123. (in Chinese)

5 王世清,张岩,张晶,等. 草莓的单体通风预冷试验研究[J]. 食品与机械,2009,25(1):57~60,116.
Wang Shiqing, Zhang Yan, Zhang Jing, et al. Studies on forced air precooling of single strawberry[J]. Food & Machinery,2009,25(1):57~60,116. (in Chinese)

表 4 试验温度与预测温度比较

Tab.4 Comparison of test temperature and predicted temperature

试验温度	预测温度	绝对误差	相对误差
$t_i/^{\circ}\text{C}$	$t_p/^{\circ}\text{C}$	$/^{\circ}\text{C}$	$/\%$
16.47	16.16	0.31	1.882 2
15.52	14.76	0.76	4.896 9
15.20	14.33	0.87	5.723 7
14.55	13.44	1.11	7.628 9
14.12	12.96	1.16	8.215 3
13.53	12.12	1.41	10.421 3
13.32	11.83	1.49	11.186 2
12.38	10.84	1.54	12.439 4
11.63	10.03	1.60	13.757 5
11.43	9.77	1.66	14.523 2
11.20	9.52	1.68	15.000 0
10.57	8.98	1.59	15.042 6
10.39	8.85	1.54	14.821 9
9.74	8.21	1.53	15.708 4
9.54	8.04	1.50	15.723 3
9.41	7.89	1.52	16.153 0
9.21	7.73	1.48	16.069 5
8.49	7.05	1.44	16.961 1
7.52	6.26	1.26	16.755 3
6.51	5.40	1.11	17.050 7
6.37	5.34	1.03	16.169 5
5.55	4.67	0.88	15.855 9
5.41	4.56	0.85	15.711 6
4.66	4.02	0.64	13.733 9
4.55	3.92	0.63	13.846 2
4.42	3.86	0.56	12.669 7
3.67	3.36	0.31	8.446 9
3.58	3.31	0.27	7.541 9
3.50	3.23	0.27	7.714 3
3.40	3.15	0.25	7.352 9
3.37	3.21	0.16	4.747 8
平均误差 $E_{\text{MD}}/\%$			12.06
均方根误差 $E_{\text{RMSE}}/\%$			12.80

(3)预冷过程中当风速较小时,预冷速度的变化较为平缓,随着风速的逐渐增大,冷却速率的变化逐渐加大,两者大致呈幂函数关系。拟合得出了不同风速下蘑菇中心温降曲线方程。

- 6 王强,陈焕新,董德发,等. 黄金梨差压通风预冷数值分析与实验验证[J]. 农业工程学报,2008,24(8):262~266.
Wang Qiang, Chen Huanxin, Dong Defa, et al. Numeral analysis and experimental verification of pressure precooling of golden pears[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8):262~266. (in Chinese)
- 7 谭晶莹,杨昭. 苹果强制通风预冷试验[J]. 农业机械学报,2008,39(7):95~98.
Tan Jingying, Yang Zhao. Experimental study on forced-air precooling of apples in bulk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(7):95~98. (in Chinese)
- 8 徐鑫. 食用菌贮藏保鲜探析[J]. 食用菌,2002,24(2):43~44.
Xu Xin. Adiscussion and analysis of edible fungi storage technology[J]. Edible Fungi, 2002,24(2):43~44. (in Chinese)
- 9 谢晶,刘敏. 真空预冷和贮藏温度对双孢蘑菇品质的影响[J]. 江苏农业学报,2010,26(5):1 060~1 063.
Xie Jing, Liu Min. Effect of vacuum precooling and storage temperature on quality of spinach [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences,2010,26(5):1 060~1 063. (in Chinese)
- 10 颜丽萍,刘升,饶先军,等. 不同预冷方式包装及果实规格对番茄预冷效果的影响[J]. 保鲜与加工,2010,10(5):17~20.
Yan Liping, Liu Sheng, Rao Xianjun, et al. Influence of different precooling patterns, packagings and specifications on precooling effects of tomato[J]. Storage & Process,2010,10(5):17~20. (in Chinese)
- 11 贾德翠,王仁才,涂洪强,等. 不同预冷处理对猕猴桃果实冷藏效果的影响[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版,2008,34(3):314~316.
Jia Decui, Wang Rencai, Tu Hongqiang, et al. Effects of different pre-cooling treatment on kiwifruit cool storage[J]. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences,2008,34(3):314~316. (in Chinese)
- 12 刘凤珍,刘晓东. 甘蓝通风预冷实验研究[J]. 制冷,2001,20(1):6~9.
Liu Fengzhen, Liu Xiaodong. The experimental study in cabbage pressure pre-cooling[J]. Refrigeration,2001,20(1):6~9. (in Chinese)
- 13 杨洲,黄燕娟,赵春娥. 果蔬通风预冷技术研究进展[J]. 中国农学通报,2006,22(9):471~474.
Yang Zhou, Huang Yanjuan, Zhao Chun'e. Research advances on forced-air pre-cooling technique for fruits and vegetables[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2006,22(9):471~474. (in Chinese)
- 14 Brosana T, Wensun D. Precooling techniques and applications for horticultural products a review[J]. International Journal of Refrigeration, 2001,24(2):154~160.
- 15 陶菲. 真空预冷处理延长白蘑菇贮藏期的研究[D]. 无锡:江南大学,2006.
Tao Fei. Extending the shelf-life of mushroom by vacuum cooling[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2006. (in Chinese)
- 16 陶菲,张慇. 真空预冷对白蘑菇贮藏品质的影响[J]. 食品与机械,2006,22(2):47~49.
Tao Fei, Zhan Min. Effect of vacuum cooling on quality of *Agaricus bisporus* during storage[J]. Food & Machinery,2006,22(2):47~49. (in Chinese)
- 17 刘斌,郭亚丽,邹同华. 强制通风预冷风速选择研究[J]. 食品科学,2004,25(7):181~183.
Liu Bin, Guo Yali, Zou Tonghua. Study on selection of supplying air velocity of the forced-air pre-cooling[J]. Food Science, 2004,25(7):181~183. (in Chinese)
- 18 Zhang Lin, Cleland A C, Cieland D J, et al. A simple method for prediction of chilling times for objects of two-dimensional irregular shape[J]. International Journal of Refrigeration, 1996,19(2):95~106.
- 19 杨昭,刘斌,谭晶莹,等. 准球形葡萄预冷时间的研究[J]. 制冷学报,2003,24(3):52~54.
Yang Zhao, Liu Bin, Tan Jinying, et al. Study on the definition of time of the grape precooling[J]. Refrigeration Journal,2003,24(3):52~54. (in Chinese)
- 20 Kumar R, Kumar A, Murthy U Narayana. Heat transfer during forced air precooling of perishable food products [J]. Biosystems Engineering, 2008,99(2):228~233.
- 21 苗玉涛,邹同华,黄健. 单体球形果蔬压差预冷过程的简化数学模型及其实验验证[J]. 食品研究与开发,2006,27(2):164~167.
Miao Yutao, Zou Tonghua, Huang Jian. The monomer sphere fruits and vegetables differential pressure precooling process's simplification mathematical model and the experiment confirm[J]. Food Research and Development, 2006, 27(2):164~167. (in Chinese)
- 22 张敏,杨乐,赵惠忠,等. 球形果蔬在冷藏过程中内部温度场的试验研究[J]. 河南农业大学学报,2010,44(5):576~579.
Zhang Min, Yang Le, Zhao Huizhong, et al. Experiment study on temperature distribution change of spherical fruits and vegetables during refrigeration process[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2010,44(5):576~579. (in Chinese)
- 23 孙勇,陈忠海,冀卫兴,等. 单体马铃薯种子预冷模型研究[J]. 制冷学报,2009,30(3):50~53.
Sun Yong, Chen Zhonghai, Ji Weixing, et al. Predictions on pre-cooling of potato seeds[J]. Refrigeration Journal, 2009, 30(3):50~53. (in Chinese)
- 24 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,1998:66~67.
- 25 查世彤,马一太,魏东. 食品热物性的研究与比较[J]. 工程热物理学报,2001,22(3):275~277.
Zha Shitong, Ma Yitai, Wei Dong. Investigation of food thermophysical properties[J]. Journal of Engineering Thermal Physics, 2001,22(3):275~277. (in Chinese)
- 26 Lentz C P, van Den Berg L. Thermal conductivity data for foods: their signifiance and use[J]. ASHRAE Thans., 1978,83:533~540.