

采后果实表面对流换热系数测定^{*}

张敏 卢佳华 杨乐 陈健华 车贞花 谢晶

(上海海洋大学食品科学与工程学院, 上海 201306)

【摘要】 以苹果、黄瓜为实验对象,通过对采后果实热空气处理中表面对流换热系数的实验测定,得到换热实验关联式。结果表明:在相同的热空气温度下,果实表面对流换热系数随空气流速的增大而增大;随果实径向尺寸的增大而减小;采后果实作为生物体,由于自身的蒸腾作用,传热过程中出现了流体的相变,进而导致换热效果显著增强。

关键词: 采后果实 热空气处理 对流换热系数 实验关联式

中图分类号: TS201 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)10-0150-04

Determination of Heat Transfer Coefficients of Postharvest Fruit

Zhang Min Lu Jiahua Yang Le Chen Jianhua Che Zhenhua Xie Jing

(College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract

A test was applied to determine the heat transfer coefficients of apple and cucumber to obtain the experimental correlation of heat transfer. The results showed that the heat transfer coefficients of fruit increased with the increasing of air velocity, decreased with the increasing of radial dimension of fruit under the same condition of the hot air temperature. The heat exchange efficiency between fruits and hot air was enhanced significantly for the biological transpiration. Phase transition occurred in the process of heat transfer.

Key words Postharvest fruit, Hot air treatment, Heat transfer coefficient, Experimental correlation

引言

采后贮前热处理是近年来颇受关注的果实采后保鲜方法之一,特别是随着农药残留问题的日益严重,国内外学者们开始注重这种无毒、无农残的果实保鲜方法,相关领域的研究非常活跃^[1-3]。依据处理介质的不同,热处理可分为热蒸汽、热水和热空气处理等,其中以热空气处理应用最为广泛。但热处理是一种带有破坏性的物理方法。热处理的温度过低或处理时间太短,则达不到理想效果;温度过高或处理时间太长,则造成果皮变色、异常软化、失水和损伤等热伤害^[4-6]。因此,有必要对采后果实在热处理过程中与外界换热效果进行研究,采后果实表面对流换热系数表征着果实与外界环境换热效果的

强弱^[7]。目前,国内外对采后果实表面对流换热系数的研究尚少,仅是借助传热学上普遍使用的经验公式^[8],这一类公式没有考虑采后果实作为生物体本身蒸腾作用对换热效果产生的影响。

本文运用相似理论和量纲分析法,在传热学基本理论指导下,对采后果实热空气中表面对流换热系数进行实验研究,分析其影响因素,并以实验数据为基础,得到采后果实热空气处理中的换热实验关联式,求解果实热空气中不同状态下的表面对流换热系数,为实际果蔬贮藏业提供参考。

1 测定原理

对流换热是流体与固体表面直接接触时所发生的换热过程,它是由热对流和导热构成的复杂的热

收稿日期: 2011-01-02 修回日期: 2011-02-26

^{*} 国家自然科学基金资助项目(30771245)、上海市科委农业重点资助项目(10391900404)和上海市教委重点学科建设资助项目(J50704)

作者简介: 张敏,教授,主要从事果蔬贮藏及食品热物性研究,E-mail: zhangm@shou.edu.cn

量传递过程。反映果实热空气处理过程的果实与空气之间对流换热的强弱可用表面对流换热系数来衡量,表面对流换热系数与换热过程中对流流动的起因、流动的状态、流体的物性、物相的变化、传热表面的形状、尺寸和相对位置以及换热表面的状态等都有密切关系,用数学方法可定性表示为^[9]

$$h = f(u, l, \rho, \eta, \lambda, c_p) \quad (1)$$

式中 u ——空气流速 ρ ——空气密度

l ——果实换热表面的特征尺寸

η ——空气动力粘度 λ ——空气热导率

c_p ——空气定压比热容

由于对流换热的影响因素非常复杂,要测定各种情况下的实验数据,工作量十分巨大,因此本研究采用传热学理论中的相似原理和无量纲分析法来确定果实热处理中不同状态下的表面对流换热系数。相似原理是利用描述彼此相似现象的同名特征数对应相等这一特性,以较少的实验次数确定关键物理量的实验方法^[10-11]。对果实热处理这种强制对流换热现象进行描述的主要特征为努塞尔数(Nu)、雷诺数(Re)和普朗特数(Pr)

$$Nu = \frac{hd}{\lambda_m} \quad (2)$$

$$Re = \frac{ud}{\nu_m} \quad (3)$$

$$Pr = \frac{\nu_m}{\alpha_m} \quad (4)$$

式中 d ——果实径向尺寸, m

带下标 m 的 λ_m 、 ν_m 、 α_m 表示以空气边界的平均温度 T_m 为定性温度时的空气热导率、空气运动粘度、空气热扩散率。

$$T_m = \frac{1}{2}(T_w + T_f) \quad (5)$$

式中 T_m ——空气定性温度, K

T_w ——果实表面温度, K

T_f ——空气温度, K

根据量纲分析法, Nu 、 Re 、 Pr 存在如下关系

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (6)$$

因为实验是在果实的热空气环境下,空气强制外掠物体表面时,其中 Pr 是常数^[9], $Pr \approx 0.7$, 故一般将式(6)整理成对数形式

$$\lg Nu = \lg C + n \lg Re \quad (7)$$

式中, C 、 n 为系数, 由实验确定。

联立式(2)、(3)和(7), 得到

$$h = \frac{Cu^n d^{n-1} \lambda_m}{\nu_m^n} \quad (8)$$

于是, 求解对流换热系数 h 就转换为确定对流

换热相似准则关联式(8)中的系数 C 和 n 。

2 测定装置

实验装置如图 1 所示, 主要由风洞、电加热器、热线风速仪、电加热棒、测温热电偶、风机、温控仪、控制箱、数据采集仪等组成。风洞是由有机玻璃制成的矩形管道, 有良好的隔热效果。风机置于一端, 进风口做成双扭线形, 通过温控仪来调节进风口的空气温度, 并设导风板和金属网等整流装置, 以确保进入实验段的气流平稳。电加热棒为供热均匀的电加热棒, 其功率大小可由控制箱调节, 且可由控制箱仪表读出其电压和电流值。取若干个径向尺寸相同的果实样品, 在尺寸均匀段中部打孔, 将电加热棒紧密嵌入果实孔中, 果实样品均匀整齐排列视为一圆柱体。以热线风速仪测量果实样品侧风速, 热线风速仪与果实样品置于同一高度。以直径为 0.5 mm 的 T 型热电偶测量果实样品表面温度, 分别于果实样品上、下、迎风面和背风面布点, 取测试值的平均值为果实样品表面温度。于果实样品两侧分别置有热电偶测定空气温度, 取平均值为空气温度。热电偶在使用前均采用二级标准水银温度计作为标准仪表进行标定(其误差范围为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$), 以 Fluke 数据采集仪将采集的温度数据输入计算机进行处理^[12]。

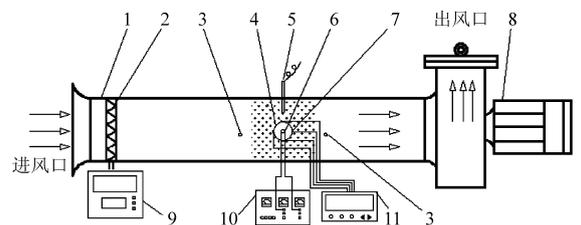


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measurement system

1. 风洞 2. 电加热器 3. 空气测温点 4. 果实样品 5. 热线风速仪 6. 电加热棒 7. T 型热电偶 8. 风机 9. 温控仪 10. 控制箱 11. Fluke 数据采集仪

实验采用功率可调的电加热棒对果实内部进行加热, 并用风机改变空气流速, 温控仪改变空气温度, 提供不同的换热效果, 以改变 T_w 、 T_f , 进而得到不同工况下的 h 。

其中, 电加热棒电阻丝产生的热流量 ϕ 以对流换热 ϕ_C 和辐射换热 ϕ_R 两种方式传出, 因此有

$$\phi = UI \quad (9)$$

$$\phi_C = \phi - \phi_R \quad (10)$$

式中 U ——电加热棒电阻丝的电压, V

I ——电加热棒电阻丝的电流, A

由辐射换热基本定律及对流换热公式^[9], 可得到果实表面的 ϕ_R 和 ϕ_C

$$\phi_R = \varepsilon\sigma A(T_w^4 - T_f^4) \quad (11)$$

$$\phi_C = hA(T_w - T_f) \quad (12)$$

式中 ε ——果实表面黑度

σ ——绝对黑体的辐射系数, $\sigma = 5.677 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

A ——果实表面积, m^2

由此,在不同的基本参数下,根据式(9)~(12),结合式(2)、(3)和(7),即可求出 C 、 n ,继而根据式(8)得到各种工况下的果实热空气处理表面对流换热系数。

3 结果与分析

3.1 标准样品表面对流换热系数测定

为检验上述测试装置的可行性,选用直径 32 mm、长度 450 mm 的铜管作为标准样品,对空气强制对流下铜管表面对流换热系数进行测定。在热流量为 39.05 W 时,分别以空气流速 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 和 4.0 m/s 进行实验,得到相应的 Re 和 Nu ,如表 1 所示。确定 C 、 n 值,并和文献计算值比较^[9],以验证测试系统的准确性。

表 1 铜管测定数据

Tab. 1 Experimental data of copper tube measurement

空气流速 /m·s ⁻¹	空气定性 温度 T_m /K	空气热导率 λ_m /W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	空气运动粘度 ν_m /m ² ·s ⁻¹	辐射换热 量 ϕ_R /W	对流换热系数 ϕ_C /W·m ⁻² ·K ⁻¹	雷诺 数 Re	努塞尔 数 Nu	lg Re	lg Nu
1.0	319.75	0.028 1	1.76×10^{-5}	8.23	22.28	1 816.80	25.40	3.26	1.40
1.5	318.30	0.028 0	1.75×10^{-5}	6.17	31.21	2 747.59	35.72	3.44	1.55
2.0	316.80	0.027 9	1.73×10^{-5}	5.93	32.27	3 694.86	37.07	3.57	1.57
2.5	317.35	0.027 9	1.74×10^{-5}	4.99	39.65	4 604.10	45.49	3.66	1.66
3.0	315.15	0.027 7	1.72×10^{-5}	4.83	40.25	5 595.06	46.44	3.75	1.67
3.5	314.95	0.027 7	1.71×10^{-5}	3.95	50.41	6 535.11	58.18	3.82	1.76
4.0	313.95	0.027 7	1.70×10^{-5}	4.06	48.36	7 512.09	55.95	3.88	1.75

将表 1 中 $\lg Re$ 和 $\lg Nu$ 代入式(7),可得: $C = 0.39$, $n = 0.56$ 。根据文献[11], C 、 n 值都在要求范围内,证明该测定系统可靠。

3.2 采后果实表面对流换热系数测定

利用 3.1 节同样的方法对实际生产中应用热处理方式较为普遍的苹果、黄瓜进行表面对流换热系

数测定,苹果和黄瓜的直径分别为 (61 ± 2) mm 和 (36 ± 1) mm,其中测定苹果时加热电压和电流分别为 55 V 和 0.71 A,测定黄瓜时选用加热电压和电流分别为 47 V 和 0.58 A,空气流速分别为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 和 4.0 m/s。实验测定值如表 2、3 所示。

表 2 苹果测定数据

Tab. 2 Experimental data of apple measurement

空气流速 /m·s ⁻¹	空气定性 温度 T_m /K	空气热导率 λ_m /W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	空气运动粘度 ν_m /m ² ·s ⁻¹	辐射换热 量 ϕ_R /W	对流换热系数 ϕ_C /W·m ⁻² ·K ⁻¹	雷诺 数 Re	努塞尔 数 Nu
1.0	316.15	0.027 8	1.73×10^{-5}	5.87	38.50	3 534.80	84.44
1.5	314.75	0.027 7	1.71×10^{-5}	4.05	58.00	5 345.13	127.68
2.0	313.50	0.027 6	1.70×10^{-5}	2.58	94.04	7 178.73	207.66
2.5	313.55	0.027 6	1.70×10^{-5}	2.52	96.32	8 970.80	212.68
3.0	313.30	0.027 6	1.70×10^{-5}	2.23	109.54	10 780.65	242.01
3.5	312.95	0.027 6	1.69×10^{-5}	1.71	144.41	12 603.16	319.34
4.0	312.90	0.027 6	1.69×10^{-5}	1.65	149.62	14 407.82	330.90

将表 2、3 中的雷诺数和努塞尔数取对数后,分别代入关系式(7)中,可得知,苹果: $C = 0.031$, $n = 0.974$; 黄瓜: $C = 0.023$, $n = 0.954$ 。

即苹果表面对流换热系数实验关联式为

$$Nu_a = 0.031 Re_a^{0.974} \quad (13)$$

或者

$$h_a = 0.031 \lambda_m \nu_m^{-0.974} d_a^{-0.026} u^{0.974} \quad (14)$$

黄瓜表面对流换热系数实验关联式为

$$Nu_c = 0.023 Re_c^{0.954} \quad (15)$$

或者

表 3 黄瓜测定数据

Tab. 3 Experimental data of cucumber measurement

空气流速 /m·s ⁻¹	空气定性 温度 T_m /K	空气热导率 λ_m /W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	空气运动粘 度 ν_m /m ² ·s ⁻¹	辐射换热 量 ϕ_R /W	对流换热系数 ϕ_C /W·m ⁻² ·K ⁻¹	雷诺 数 Re	努塞尔 数 Nu
1.0	313.25	0.027 6	1.70×10^{-5}	4.99	29.58	2 121.40	38.58
1.5	315.05	0.027 7	1.71×10^{-5}	4.66	32.66	3 149.04	42.40
2.0	310.70	0.027 4	1.67×10^{-5}	2.86	55.13	4 306.88	72.36
2.5	311.35	0.027 5	1.68×10^{-5}	2.51	64.01	5 362.95	83.87
3.0	310.75	0.027 4	1.67×10^{-5}	2.24	72.34	6 458.40	94.94
3.5	309.90	0.027 4	1.66×10^{-5}	1.79	91.02	7 572.91	119.71
4.0	309.45	0.027 3	1.66×10^{-5}	1.56	105.26	8 677.99	138.60

$$h_c = 0.023 \lambda_m \nu_m^{-0.954} d_c^{-0.046} u^{0.954} \quad (16)$$

下标 a 和 c 分别表示苹果和黄瓜的各参数值。

表 2、3 和关系式 (14)、(16) 表明, 果实热处理中 h 值随空气流速的增大而增加, 在实际热处理生产过程中, 可以通过提高空气流速来增强果实与外界换热效果; h 值随着果实径向尺寸的增大而减小。在空气温度和径向尺寸接近的情况下, 苹果、黄瓜果实的 h 值比铜管的大很多, 在流速分别为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 和 4.0 m/s 热空气处理下, 黄瓜的 h 值分别是铜管的 133%、105%、171%、161%、180%、181% 和 218%, 苹果的 h 值分别是铜管的 173%、186%、291%、243%、272%、286% 和 309%, 这可能是由于苹果、黄瓜等果实中含有大量水分, 在热空气作用下, 果实自身的蒸腾作用导致其表面和周围空气之间存在着蒸汽压差, 由于出现了流体的

相变, 进而导致换热效果的显著增强。

4 结束语

本文以苹果、黄瓜果实为实验对象, 设计测试系统并测量了采后果实空气热处理过程中表面对流换热系数。结果表明: 在相同的热空气温度环境下, 果实表面对流换热系数随空气流速的增大而增大; 随果实径向尺寸的增大而减小; 在相同工况下, 果实表面对流换热系数明显大于铜管表面对流换热系数, 这可能是由于采后果实作为生物体, 由于自身的蒸腾作用, 传热过程中出现了流体的相变, 进而导致换热效果显著增强; 通过对采后果实空气热处理表面对流换热系数的实验测定, 得到了苹果、黄瓜果实热空气过程中的换热实验关联式。研究结论可为实际果实贮藏加工业提供一定的理论参考。

参 考 文 献

- 茅林春, 王阳光, 张上隆. 热处理减缓桃果实的采后冷害[J]. 浙江大学学报, 2000, 26(2): 137 ~ 140.
Mao Linchun, Wang Yangguang, Zhang Shanglong. Warming treatments alleviating the occurrence of chilling injury in peaches during storage[J]. Journal of Zhejiang Agricultural University, 2000, 26(2): 137 ~ 140. (in Chinese)
- McDonald R E, McCollum T G, Baldwin E A. Temperature of water heat treatments influences tomato fruit quality following low-temperature storage [J]. Postharvest Biology and Technology, 1999, 16(2): 147 ~ 155.
- 屠康, 邵兴锋, 赵艺泽. 采后热空气处理对金冠苹果后熟衰老及病害的影响[J]. 果树学报, 2006, 23(4): 562 ~ 567.
Tu Kang, Shao Xingfeng, Zhao Yize. Warming treatments alleviating the occurrence of chilling injury in peaches during storage[J]. Journal of Fruit Science, 2006, 23(4): 562 ~ 567. (in Chinese)
- Shellie K C, Mangan R L. Tolerance of red-fleshed grapefruit to a constant or stepped temperature, forced-air quarantine heat treatment [J]. Postharvest Biology and Technology, 1996, 7(1): 151 ~ 159.
- Smith Karen J, Lay Y M. Response of 'Royal Gala' apples to hot water treatment for insect control [J]. Postharvest Biology and Technology, 2000, 19(2): 111 ~ 122.
- Jacobi K K, MacRae E A, Hetherington Susan E. Postharvest heat disinfestation treatments of mango fruit [J]. Scientia Horticulturae, 2001, 89(3): 171 ~ 193.
- 张敏, 赵惠忠, 谢晶, 等. 采后果蔬热导率测试系统的研究[J]. 农业机械学报, 2006, 37(1): 90 ~ 93.
Zhang Min, Zhao Huizhong, Xie Jing, et al. Study on measurement system of thermal conductivity of vegetables and fruits [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(1): 90 ~ 93. (in Chinese)

- Xu Songlin, Zheng Tao, Xu Shimin. The study of refining L-lactic acid by molecular distillation[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2004, 18(2): 246 ~ 249. (in Chinese)
- 3 应安国, 许松林, 王淑华. 分子蒸馏技术提纯胡椒基丁醚的工艺研究[J]. 化工进展, 2005, 24(1): 57 ~ 60.
Ying Anguo, Xu Songlin, Wang Shuhua. Separation for piperonyl butoxide by molecular distillation [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2005, 24(1): 57 ~ 60. (in Chinese)
- 4 许松林, 王淑华, 应安国. 对乙酰氨基苯乙酸酯同分异构体的分子蒸馏分离[J]. 天津大学学报, 2006, 39(1): 21 ~ 24.
Xu Songlin, Wang Shuhua, Ying Anguo. Separation for para-acetaminophenylacetate ethyl isomer by molecular distillation [J]. Journal of Tianjin University, 2006, 39(1): 21 ~ 24. (in Chinese)
- 5 应安国, 许松林, 王淑华. 分子蒸馏技术提纯帕罗西汀碱[J]. 化学工程, 2005, 33(6): 59 ~ 62.
Ying Anguo, Xu Songlin, Wang Shuhua. Purification of paroxetine base by molecular distillation technology[J]. Chemical Engineering, 2005, 33(6): 59 ~ 62. (in Chinese)
- 6 李国兵, 许春建, 周明. 刮膜分子蒸馏传质和传热的数学模型[J]. 天津大学学报, 2003, 36(3): 261 ~ 266.
Li Guobing, Xu Chunjian, Zhou Ming. Mathematic model of mass transfer and heat transfer of wiped film molecular distillation[J]. Journal of Tianjin University, 2003, 36(3): 261 ~ 266. (in Chinese)
- 7 Cvengros J, Lutisan J, Micov M, et al. Feed temperature influence on the efficiency of a molecular evaporator[J]. Chemical Engineering Journal, 2000, 78(1): 61 ~ 67.
- 8 郭凯, 员玫, 许松林. 刮膜式分子蒸馏中液体流动形态的研究[J]. 高校化学工程学报, 2009, 23(2): 187 ~ 192.
Guo Kai, Yuan Mei, Xu Songlin. Study on flow regime in wiped-film molecular distillation [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2009, 23(2): 187 ~ 192. (in Chinese)
- 9 程能林. 溶剂手册[M]. 4版. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- 10 Rasmussen C E, Williams C K I. Gaussian processes for machine learning[M]. London: MIT Press, 2006.
- 11 Zhang Haocui. Hydrodynamics and mass transfer of gas-liquid flow in a falling film microreactor[J]. Chinese Academy of Sciences, 2009, 55(5): 1110 ~ 1120.
- 12 Lan H, Wegene J Lr, Armaly B F, et al. Developing laminar gravity-driven thin liquid film flow down an inclined plane[J]. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, 2010, 32(8): 13 011 ~ 13 018.
- 13 Mi Y, Ishii M, Tsoukalas L H. Flow regime identification methodology with neural networks and two-phase flow models[J]. Nuclear Engineering and Design, 2001, 204(1): 87 ~ 100.
- 14 Cvengros J, Pollak S, Micov M, et al. Film wiping in the molecular evaporator[J]. Chemical Engineering Journal, 2001, 81(1 ~ 3): 9 ~ 14.

(上接第 153 页)

- 8 Wang S, Tang J, Cavalieri R P. Modeling fruit internal heating rates for hot air and hot water treatments [J]. Postharvest Biology and Technology, 2001, 22(3): 257 ~ 270.
- 9 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- 10 郭应时, 袁伟, 付锐. 实验法求解汽车鼓式制动器对流换热系数[J]. 长安大学学报, 2006, 26(4): 92 ~ 94.
Guo Yingshi, Yuan Wei, Fu Rui. Solution for heat convection coefficient of automotive drum brake with experiments [J]. Journal of Chang'an University, 2006, 26(4): 92 ~ 94. (in Chinese)
- 11 路倩倩, 杨德勇, 郎芝花, 等. 脉动燃烧干燥换热特性分析与实验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 123 ~ 127.
Lu Qianqian, Yang Deyong, Lang Zhihua, et al. Analysis and experiment of heat transfer in helmholtz pulse combustion dryer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 123 ~ 127. (in Chinese)
- 12 赵惠忠, 张敏, 张杰, 等. 多通道数据采集系统测试导热系数的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2008(10): 103 ~ 105.
Zhao Huizhong, Zhang Min, Zhang Jie, et al. Study on thermal conductivity using multimeter/data acquisition system [J]. Instrument Technique and Sensor, 2008(10): 103 ~ 105. (in Chinese)