

# 远红外与热风混合干燥香菇的质热特性研究

王 俊

(浙江大学)

**摘 要** 建立了远红外与热风混合干燥香菇时有关质热参数模型,分析了干燥中辐射强化系数  $K_1$ 、对流传质汽化系数  $K_i$ 、总换热系数  $\alpha_0$  和辐射换热系数  $\alpha_r$  等的变化规律。实验研究表明,因干燥温度和香菇含水率不同,  $K_1$ 、 $K_i$ 、 $\alpha_0$ 、 $\alpha_r$  等值也不同。

**关键词** 混合干燥 香菇 质热特性

近年来,远红外干燥农产品及天然植物的研究越来越得到重视,如干燥茶叶、咖啡豆、中药材、木材等常见报道<sup>[1,2]</sup>。其干燥过程中传热速度快、电热利用率高,易于实现自动控制。但由于有些农产品和天然植物的含水量很高,远红外干燥室中物料蒸发的水汽较多,常常未能及时排出<sup>[3]</sup>。相反,热风干燥时由于有一定速度气流穿过物料,所蒸发水汽能及时带走。因此远红外与热风混合干燥系集二优点为一起的干燥方式<sup>[4]</sup>。本文拟对这种混合干燥香菇的有关质热特性进行实验研究,以供参考。

## 1 质热模型

远红外与热风混合干燥香菇过程中质热传递是一个复杂的过程。混合干燥中因热风能及时带走所蒸发的水汽,故可忽略从湿蒸汽中获得的热量项,香菇仅从辐射和对流中获得热量,并用于物料升温和水分蒸发。微分表达式为

$$C_b \varphi \left( \frac{T_R}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_s}{100} \right)^4 \rho A d\tau + \alpha(t_a - t_s) A d\tau = C m dt + L dM \tag{1}$$

式中  $T_R$ ——辐射器表面绝对温度, K;  $T_s$ 、 $t_s$ ——香菇表面绝对温度和摄氏温度, K, °C;  $t_a$ ——干燥箱温, °C;  $C_b$ ——总辐射系数, W/(K<sup>4</sup>·m<sup>2</sup>);  $\varphi$ ——辐射角系数;  $\alpha$ ——对流换热系数, W/(m<sup>2</sup>·°C);  $A$ ——香菇表面面积, m<sup>2</sup>;  $C$ ——香菇比热, J/(g·°C);  $m$ ——香菇各时刻质量, g;  $t$ ——香菇平均温度, °C;  $\tau$ ——干燥时间, s;  $L$ ——与香菇表面温度相对应的水汽化潜热, J/g;  $M$ ——香菇内蒸发水分, g。

在既有辐射又有对流换热的复杂情况下,其换热形式可以表达成对流换热<sup>[5-7]</sup>

$$\text{令: } K_1 = \frac{C_b \varphi \left( \frac{T_R}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_s}{100} \right)^4}{\alpha(t_a - t_s)} + 1 \tag{2}$$

则式(1)可化简为

$$\frac{dM}{A d\tau} = K_1 K_i (t_a - t_s) - \frac{C m}{AL} \frac{dt}{d\tau} \tag{3}$$

其中,  $K_1 K_i = \frac{U + U}{(t_a - t_s)}$ ,  $U = (dM/d\tau)/A$ ,  $U = (C m/A L) (dt/d\tau)$

式中  $K_1$ ——辐射强化系数,反映了混合干燥过程中辐射换热对纯对流换热的强化强度,当只有对流而无辐射换热时,  $K_1 = 1$ ;  $K_i$ ——对流传质汽化系数,  $K_i = \alpha/L$ , g/(m<sup>2</sup>·s·°C)。

收稿日期: 1998-05-28

王 俊, 副教授, 杭州市华家池 浙江大学华家池校区农业工程学院, 310029



当只有对流而无辐射( $K_1 = 1$ )时:

$$K_t = \frac{U + U}{(t_a - t_s)} = \frac{\alpha}{L} \quad (4)$$

各含水率下辐射换热系数  $\alpha_e$  为

$$\alpha_e = \alpha_0 - \alpha \quad (5)$$

其中,  $\alpha_0$ ——总换热系数,  $\alpha_0 = K_1 \alpha$ 。

## 2 实验及结果分析

干燥实验分纯热风干燥和远红外与热风混合干燥(即同时进行)两种。纯热风干燥时干燥温度为热风干球温度。混合干燥时干燥温度为干燥室温度。实验条件、实验准备、测试方法见文献[4, 8]。热风风速为 0.1~0.3 m/s。

实验结果表明: 1) 辐射强化系数  $K_1$  随含水率不同而异。含水率高时(干燥前期)其值略低, 含水量低时(< 200% 左右, 干基),  $K_1$  值变大, 表明远红外辐射换热导致失水量增加。干燥温度(指远红外箱温和热风温度)高,  $K_1$  变大。干燥温度 70 时,  $K_1 > 2$ ; 2) 混合干燥中总失水过程随香菇含水率不同大致可分二个阶段, 即失水速率相对稳定和降速阶段, 以含水率 200% (干基) 左右为临界点。干燥温度高, 混合传质汽化系数值高。由于在降速阶段  $K_1$  值变大后仍保持基本稳定, 故  $K_t$  明显( $K_1 K_t$  下降明显)下降, 表明热风导致失水量是下降的, 以远红外辐射导致失水为主; 3) 随香菇含水率下降整个干燥过程的总换热系数值逐渐变小。在失水相对稳定阶段(含水率 > 200% 左右), 曲线下降缓慢些; 与降速阶段相对应的曲线下降陡些。相同含水率时, 干燥温度高, 总换热系数值大; 4) 辐射换热系数值随含水率下降先变大后变小。相同含水率时, 干燥温度高, 辐射换热系数略大。香菇含水率高时( $\alpha_0 - \alpha_e$ ) 值大, 可认为热风对流换热为主; 含水量低时( $\alpha_0 - \alpha_e$ ) 值小, 以远红外辐射换热为主。

## 3 结 论

- 1) 远红外与热风混合干燥中传质汽化系数和换热系数因干燥温度和香菇含水量而异。相同含水率时, 干燥温度高, 二系数值大。随含水率不同二系数值变化可分二个阶段。
- 2) 香菇含水率较高时, 热风和远红外辐射一并换热导致失水。含水率较低时, 远红外辐射导致失水为主。
- 3) 在干燥前期, 热风对流换热为主; 在干燥后期, 远红外辐射换热为主。

## 参 考 文 献

- 1 Sanchez S. Infrared Thermal Radiation Drying of Coffee Beans. Proceedings of the Fifth International Symposium on Drying. Dry '86, 1986: 475~ 483
- 2 孙中伟. 红外干燥技术进展. 南京林业大学学报, 1997, 21(增): 150~ 151
- 3 列别捷夫著. 红外线干燥. 李康明等译. 北京: 中国工业出版社, 1965: 90~ 93
- 4 王 俊, 许乃章. 远红外热风干燥香菇的研究. 农业工程学报, 1993, 9(2): 95~ 101
- 5 Chiang W. C. Experimental Measurement of Temperature and Moisture Profiles During Apple Drying. Dry '86, 1986(2): 489~ 496
- 6 王补宣. 工程传热传质学(上册). 北京: 科学出版社, 1982: 7, 26
- 7 褚治德, 邓京红, 孟宪玲等. 中药材红外辐射与对流干燥的实验研究. 天津大学学报, 1991, 28(4): 96~ 102
- 8 张 敏. 几种蔬菜的远红外干燥、预处理及复水性能试验研究: [学位论文]. 杭州, 浙江农业大学, 1989