

稻谷红外辐射与对流联合干燥过程的模型模拟*

汪喜波¹ 胡琼² 肖波² 杨德勇² 刘相东²

(1. 中国储备粮管理总公司, 北京 100044; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为了揭示红外辐射与对流联合干燥机理以及干燥过程的热质传递特性, 建立了联合干燥过程的数学模型; 数值模拟了稻谷干燥中的热质传递过程; 根据数值模拟的干燥条件, 搭建了红外辐射与对流联合干燥试验台; 通过红外辐射与对流联合干燥试验, 研究了不同操作条件对干燥过程的影响。结果显示数值模拟结果与试验数据吻合良好。

关键词: 稻谷干燥 红外辐射 对流 传热传质

中图分类号: S375; TQ028.6⁺76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)09-0145-07

Modeling Simulation of Combined Convective and Infrared Radiation in Rice Drying Process

Wang Xibo¹ Hu Qiong² Xiao Bo² Yang Deyong² Liu Xiangdong²

(1. China Grain Reserves Corporation, Beijing 100044, China

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to reveal the mechanism of combined convective and infrared radiation in rice drying process and analyze heat and mass transfer characteristics, a mathematical model of combined convective and infrared radiation was established. The heat and mass transfer process in rice drying was simulated. According to the drying conditions in numerical simulation, the test rig of combined convective and infrared radiation was built up to analyze the influence of the drying process under the different operating conditions. The results showed that there was high relativity between the numerical model curves and the experimental curves.

Key words: Rice drying Infrared radiation Convection Heat and mass transfer

引言

红外辐射加热干燥技术是一种以电磁波形式发射能量进行物料加热与干燥的技术^[1-3], 其原理是当红外线照射到某一物体时, 一部分被吸收, 另一部分被反射, 吸收的那一部分能量则转化为分子的热运动, 使物体温度升高, 从而达到加热干燥的目的。与传统干燥相比, 红外辐射加热干燥有受热均匀、干净卫生、节能省时、占地面积小等优点^[4-6]。此外, 除了用于节省能源的干燥领域外, 红外辐射加热干

燥也应用于常温领域, 如: 增加人体血液循环以及食品保鲜、病虫害杀虫菌等^[7-9]。

迄今, 国内红外辐射加热干燥技术在工业上应用有很多, 如油漆烘干、木材干燥、纺织行业、塑料工业、生物学、医学和光通讯等。但是它在农业领域内的研究却较少, 特别是对谷物红外辐射与对流联合干燥的传热传质的基础性研究还不多, 可综合考虑的辐射和对流的精确模型很少。因此, 在目前国内外对远红外辐射加热干燥研究的基础上, 本文以稻谷为对象进行红外辐射与对流加热联合干燥试验,

收稿日期: 2012-09-03 修回日期: 2012-12-21

* 国家自然科学基金资助项目(31171772)和中央高校基本科研业务费专项资助项目(2013YJ007)

作者简介: 汪喜波, 高级工程师, 博士, 主要从事粮食储藏与干燥研究, E-mail: xibo_wang@tom.com

通讯作者: 刘相东, 教授, 博士生导师, 主要从事干燥理论与设备研究, E-mail: xdliu@cau.edu.cn

深入研究红外辐射与对流加热联合干燥的传热传质机理,探讨稻谷辐射与对流联合干燥的影响因素及优化辐射对流联合干燥的工艺参数,建立并验证红外辐射与对流加热联合干燥的数学模型。

1 红外辐射与对流联合干燥的模型建立

在红外辐射与对流加热联合干燥的建模过程中,为了方便简化计算,本文进行了如下假设:稻谷按一维球体非稳态质扩散过程处理;有效扩散系数是稻谷湿含量的函数;在干燥过程中物料体积收缩可忽略不计;单个颗粒内的温度梯度可忽略不计;料盒为绝缘体,其热容量可略去不计;在短时间内,湿空气与物料的热容量恒定不变;假定湿空气能被快速移走,因此湿空气的辐射可忽略不计;不考虑水与物料的结合能;不考虑温度与水分的耦合效应。

1.1 红外辐射与对流联合干燥固定床模型

从热质平衡出发,本文考虑辐射、对流等因素,通过干燥床层微元体的衡算分析,建立了红外与对流固定床数学模型,即非稳态干燥动力学方程。单元层的体积如图1所示,其中物料吸收的能量包括:辐射器的辐射换热热量 Q_1 ;掠过物料表面的空气对流换热热量 Q_2 ;床层导热热量 Q_3 ;空气中湿蒸汽的辐射换热热量 Q_4 ,这些传递到床层颗粒的能量等于加热物料使其升温的热量 Q_5 ;从物料中蒸发水分吸热 Q_6 ;水分克服结合能消耗能量 Q_7 ;加热从物料中所蒸发的水气所需的热量 Q_8 。

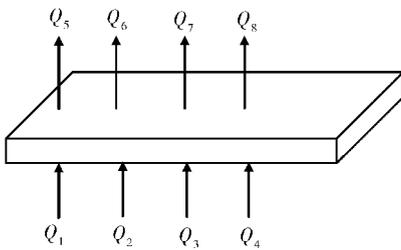


图1 单元床层

Fig. 1 Unit bed

1.1.1 对流介质空气的热含量衡算方程

不考虑辐射对空气的辐射作用,在床层内相对空气热含量变化率公式为

$$V_1 = (\rho_a v_a c_a + \rho_a v_a w c_v) F \frac{\partial T}{\partial x} dx d\tau \quad (1)$$

式中 ρ_a ——干空气密度, kg/m^3

v_a ——干空气容积, m^3

w ——空气绝对湿度, kg/kg

F ——单元层的表面积, m^2

c_a ——干空气比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

c_v ——水蒸气比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

T ——空气干球温度, K

dx ——位置, m $d\tau$ ——时间, s

在控制体内的空气显热,在相应时间的变化公式为

$$V_2 = (\rho_a c_a + \rho_a w c_v) \delta F dx \frac{\partial T}{\partial \tau} d\tau \quad (2)$$

式中 δ ——物料中的空隙率, %

因此在 $d\tau$ 时间内,空气显热的总变化为

$$V_3 = (\rho_a c_a + \rho_a w c_v) F dx \left(v_a \frac{\partial T}{\partial x} + \delta \frac{\partial T}{\partial \tau} \right) d\tau \quad (3)$$

在 $d\tau$ 时间内,控制体内热空气与物料间的对流换热热量计算公式为

$$Q = h_c (T - \theta) F dx d\tau \quad (4)$$

式中 h_c ——空气与物料对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

θ ——物料表面的温度, K

由于该部分热量全部由热空气提供,则空气显热的总变化与控制体内热空气与物料间的对流换热热量相等。而与 $v_a \frac{\partial T}{\partial x}$ 相比, $\delta \frac{\partial T}{\partial \tau}$ 的数量可忽略不计。联立式(3)、(4), $v_a \rho_a = G_a$, 因此空气的热含量恒算式变为

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{h_c}{G_a c_a + G_a c_v w} (T - \theta) \quad (5)$$

式中 G_a ——空气质量流率, $\text{kg}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$

1.1.2 物料的热含量恒算方程

根据图1,可得热平衡式

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 \quad (6)$$

其中 $Q_1 \sim Q_8$ 的计算式为

$$Q_1 = \varepsilon_s \sigma F \left[\left(\frac{T_{Ri}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta}{100} \right)^4 \right] dx d\tau$$

式中 T_{Ri} ——辐射器表面温度, K

σ ——黑体辐射系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$

ε_s ——辐射器与物料的系统黑度

$$Q_2 = h_c (T - \theta) F dx d\tau$$

$$Q_3 = \int_F \lambda (\theta - T_l) dF$$

式中 λ ——物料的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

T_l ——物料不同床层的温度, K

$$Q_4 = \int_F \sigma \left[\varepsilon_{gf} \left(\frac{T}{100} \right)^4 - \alpha_{gx} \left(\frac{\theta}{100} \right)^4 \right] dF$$

式中 ε_{gf} ——气体辐射率

α_{gx} ——气体吸收率

$$Q_5 = F dx (\rho_p c_p + \rho_p c_w M) \frac{\partial \theta}{\partial \tau} d\tau$$

式中 c_p ——绝干物料的比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

M ——干基含水率, %

ρ_p ——物料的密度, kg/m^3

c_w ——水分的比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

$$Q_6 = \bar{h}_{fg} G_a F \frac{\partial w}{\partial x} dx d\tau$$

式中 \bar{h}_{fg} ——对应不同物料表面温度水的气化潜热, J/kg

$$Q_7 = \Delta\gamma \frac{dm}{d\tau}$$

式中 $\Delta\gamma$ ——水同物料的结合能, J/kg
 dm ——脱去的水分质量, kg

$$Q_8 = c_v(T - \theta) G_a F \frac{dw}{dx} dx d\tau$$

代入 $Q_1 \sim Q_8$ 计算式后简化热恒算式, 可得

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{h_c}{\rho_p c_p + \rho_p c_w M} (T - \theta) - [\bar{h}_{fg} + c_v(T - \theta)] G_a \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\varepsilon_s \sigma}{(\rho_p c_p + \rho_p c_w M)} \left[\left(\frac{T_{Ri}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta}{100} \right)^4 \right] \quad (7)$$

1.1.3 空气湿度的恒算方程

在 $d\tau$ 时间内, 通过 x 与 $x + dx$ 平面的水蒸气总量, 分别等于

$$P_1 = G_a F w d\tau \quad (8)$$

$$P_2 = G_a F \left(w + \frac{\partial w}{\partial x} dx \right) d\tau \quad (9)$$

相对于 x 处, 空气湿度变化计算式为

$$P_3 = G_a F \frac{\partial w}{\partial \tau} dx d\tau \quad (10)$$

在相应时间内控制体中湿度的变化为

$$P_4 = \varepsilon F dx \rho_a \frac{\partial w}{\partial \tau} d\tau \quad (11)$$

在 $d\tau$ 时间内, 控制体中物料含水率变化为

$$P_5 = \rho_p F dx \frac{\partial M}{\partial \tau} d\tau \quad (12)$$

空气湿度恒算的结果为

$$\rho_p F dx \frac{\partial M}{\partial \tau} d\tau = G_a F w d\tau - G_a F \left(w + \frac{\partial w}{\partial x} dx \right) d\tau + \varepsilon F dx \rho_a \frac{\partial w}{\partial \tau} d\tau \quad (13)$$

略去 $\frac{\partial w}{\partial \tau}$ 项, 简化得

$$\frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{\rho_p}{G_a} \frac{\partial M}{\partial \tau} \quad (14)$$

1.2 物料颗粒内部水分扩散模型

本文采用 Luikov 提出的描述多孔物料干燥过程的耦合方程组来分析稻谷的水分扩散模型, 即

$$\frac{\partial M}{\partial \tau} = \nabla^2 k_{11} M + \nabla^2 k_{12} T + \nabla^2 k_{13} P$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla^2 k_{21} M + \nabla^2 k_{22} T + \nabla^2 k_{23} P$$

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = \nabla^2 k_{31} M + \nabla^2 k_{32} T + \nabla^2 k_{33} P$$

式中 P ——压强

由于压力梯度产生的水分流动, 只有当物料温度很高时才显著, 该温度大大超过谷物干燥所使用的温度, 则压力项可以忽略不计。另外由于谷物干燥中, 不需要考虑温度与水分的耦合效应; 稻谷内部水分转移主要是靠液态扩散或气态扩散, 则系数 k_{11} 可以用有效水分扩散系数 D 来表示。因此, 方程可简化为

$$\frac{\partial M}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(D \frac{\partial M}{\partial r} r^2 \right) \quad (15)$$

2 稻谷红外辐射与对流联合干燥过程试验

2.1 试验装置

本文自行设计并制作的是直热式、以电加热为热源的红外辐射与对流联合干燥试验台, 图2为试验台总示意图, 主要由加热器、红外辐射板、风机、温控器等组成。试验台采用的 $400 \sim 500^\circ\text{C}$ 中温 SiC 板式远红外辐射器是以电阻线夹在 SiC 板沟槽中间的旁热式辐射器, 其辐射波长约为 $4.0 \mu\text{m}$, 通过调压器来调节辐射温度。辐射器与物料表面距离在 $50 \sim 300 \text{ mm}$ 之间, 每挡间距 50 mm , 通过吊杆上的螺栓来调节辐射板与物料间辐照距离。干燥炉的形状采用外形尺寸为长 400 mm 、宽 300 mm 、高 600 mm 的方形固定式炉体。料盒做成抽屉式并直接挂在箱体的底板上, 为了保证物料不受外界环境的影响, 料盒为夹层式, 中间填上珍珠岩作隔热材料, 从而在分析物料的传热特性时, 不用考虑外界环境的影响。此外, 根据箱体所需的最大风速 (1 m/s) 来选择风机, 且电热管功率为 3 kW , 对流介质的温度和速度分别通过温控仪和节流阀来控制。

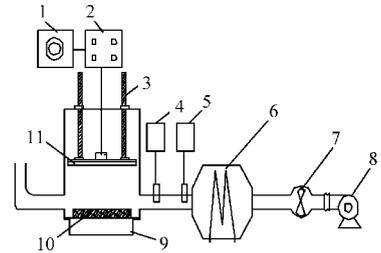


图2 红外与对流联合干燥试验台示意图

Fig.2 Test rig of combined infrared and convection drying

1. 电源 2. 调压器 3. 升降螺杆 4. 风速仪 5. 温控器 6. 加热器 7. 节流阀 8. 风机 9. 承料盒 10. 物料 11. 红外辐射板

为了研究红外辐射与对流联合干燥的工作性能及传热传质特性, 本试验需要对其运行过程中的一些参数进行测试。图3为测试系统的示意图, 其中: T1 测辐射板的温度; T2 可以测试物料多个点的温度, 温度显示在巡检仪 P 中; Tc 为温控仪, 一方面可控制对流通道的温度, 另一方面可直接测出通道的温

度;S1和S2分别测出对流通道加热前后的空气流速;G能够测出物料的质量,从而可换算出脱出水分量。

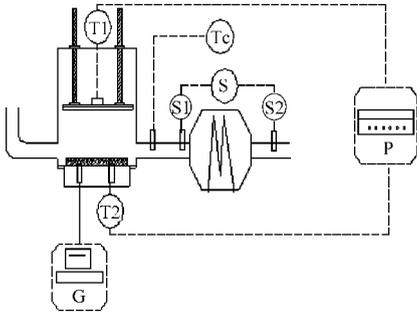


图3 红外辐射与对流联合干燥测试系统示意图

Fig.3 Schematic of test system of combined infrared and convection drying

2.2 试验设计

以稻谷为试验对象,考虑了辐射强度、对流风速、物料的初始含水率、对流风温、物料厚度以及辐射距离等因素对红外辐射与对流联合干燥系统的干燥速率、物料温度以及降水量等干燥动力学指标的影响。各因素及水平的变化范围如表1所示。

表1 红外与对流干燥试验因素及水平

Tab.1 Test factors and levels in combined convective and infrared radiation experiment

水平	辐射强度 /W·cm ⁻²	风速 /m·s ⁻¹	风温 /℃	含水率 /%	厚度 /cm	辐射距离 /cm
1	0.15	0.3	30	25	3	5
2	0.35	0.5	40	35	5	10
3	0.50	0.7	50	45	8	15

3 稻谷红外辐射与对流联合干燥过程模拟

将辐射强化对流换热系数和质量扩散系数等物性参数代入模型方程,本文采用有限差分法,并利用热平衡原理分别对稻谷球体的水分扩散模型方程和温度方程进行数值求解,同时使用计算值模拟了稻谷的红外辐射与对流联合干燥的脱水过程和温度变化过程。

3.1 模型边界条件

式(5)、(7)、(14)及(15)构成了谷物固定床辐射与对流联合干燥过程的四参数(T_a 、 T_s 、 w 、 M)模型,其边界条件为:

热风的进口温度

$$T_a(0, \tau) = T_a$$

谷物的初始温度

$$T_s(x, 0) = T_s$$

热风的进口湿度

$$w(0, \tau) = w$$

谷物的初始干基含水率

$$M(x, 0) = M$$

3.2 模型参数的确定

3.2.1 水分有效扩散系数

稻谷的有效水分扩散系数 D 可以通过试验获得的稻谷干燥动力学数据计算得出^[10],即

$$D = \left[\left(\frac{dM}{d\tau} \right)_{\text{exp}} / \left(\frac{dM}{dF_0} \right)_{\text{the}} \right] L^2 \quad (16)$$

其中 $F_0 = \frac{D\tau}{L^2}$

式中 F_0 ——傅里叶准数

L ——物料特征尺度

下标 exp 表示试验值;the 表示理论值。

3.2.2 平衡含水率

选用修正后 Henderson 模型来确定稻谷的平衡含水率^[10] M_e ,即

$$M_e = \frac{1}{100} \left[\frac{\ln(1 - R_H)}{-K(T + C)} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (17)$$

式中 R_H ——空气相对湿度, %

稻谷系数 $K = 1.9187$; $N = 2.4451$; $C = 51.161$ 。

3.2.3 有效对流换热系数

稻谷与热空气的床层容积有效对流换热系数采用 Barker 方程^[11]

$$h_c = A c_a G_a (2r_o G_a / \mu_a)^B a_s \quad (18)$$

式中 μ_a ——空气粘度, kg/(m·s)

A 、 B 为常数 ($A = 0.2755$; $B = -0.34$); $r_o = 0.00457$ m (对于长稻谷); $a_s = 2361$ m³/m² (对于长稻谷)。

3.2.4 对流传质系数的计算

Frossling 推荐求解对流质交换的经验公式为^[10]

$$Sh = 2.0 + 0.552 R_e^{0.53} Sc^{0.33} \quad (19)$$

其中

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D}$$

式中 Sh ——舍伍德数 Sc ——斯密特数

μ ——流体粘度 ρ ——流体密度

根据热质传递的比拟理论,传质过程的 Sh 数与对流传质系数可以建立关联式

$$Sh = \frac{h_m L}{D} \quad (20)$$

式中 h_m ——对流传质系数, kg/(m²·s)

因为式(19)和式(20)中的 D 为考虑辐射强度变化条件下的稻谷水分有效扩散系数,所以可以认为 h_m 的计算值为辐射强化的对流传质系数。

3.2.5 导热系数

Kunze 和 Watten 建议稻谷的导热系数计算式为^[10]

$$\lambda = \frac{0.0637 + 0.0958M(\tau)}{0.656 - 0.475 \frac{M(\tau)}{1 + M(\tau)}} \quad (21)$$

3.2.6 辐射器与物料的系统黑度

通过对红外辐射传热机理进行研究分析,可以得出辐射器与物料的系统黑度计算式^[10]为

$$\varepsilon_s = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} - 1} + \frac{1}{\varphi_{12}} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \quad (22)$$

其中 $\varphi_{12} = \arctan \left(\frac{x(y - \cos\theta)}{\sqrt{1 + x^2 + y^2 - 2y\cos\theta}} \right) + \arctan \left(\frac{x\cos\theta}{\sqrt{1 + x^2}} \right)$ (23)

且 $x = \frac{b}{c}$ $y = \frac{a}{c}$

式中 ε_1 ——辐射器的辐射系数
 ε_2 ——物料的吸收系数
 F_2 ——物料的表面积
 F_1 ——辐射器的辐射表面积
 φ_{12} ——辐射表面积对物料表面积的角度系数
 常数 a 和 b 分别是矩形辐射板的宽度和长度,常数 c 是物料与辐射板之间的距离。

4 试验结果及讨论

4.1 模型验证

为了验证数学模拟的正确性,将模拟结果与试验结果进行了比较。由图4表明,稻谷温度和干燥速率的计算值和试验值吻合得比较好。稻谷的温度在辐射强度增加时,随之增大,这与试验分析一致,同时也可看到当对流风速增大时,稻谷的温度将上升。因此,通过对稻谷辐射与对流联合干燥的模拟分析可以确定合理的干燥工艺,从而提高稻谷的干燥品质。

4.2 不同辐射强度的干燥试验

图5为稻谷在辐射强度分别为0.15、0.35和0.5 W/cm²,初始干基含水率为35%、对流风温为30℃、物料厚度为5 cm、辐照距离为10 cm、对流风速为0.7 m/s的条件下的辐射强度与干燥指标之间关系曲线。从图中可以看出,随着辐射强度的提高,被干燥物料的降水幅度、干燥速率和物料温度均增

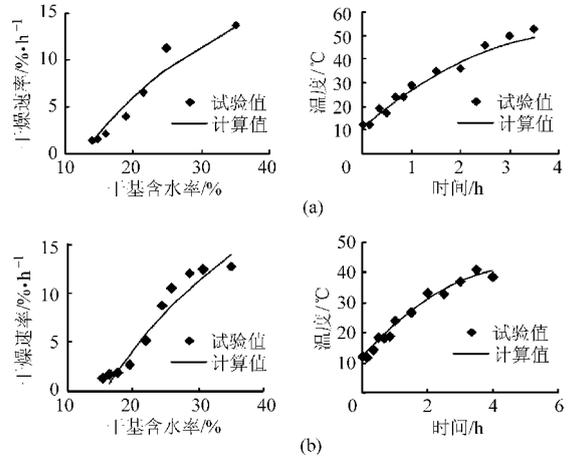


图4 模型计算值与试验值比较

Fig. 4 Comparison of computational results and test results

(a) 辐射强度0.5 W/cm², 对流风速0.7 m/s, 初始干基含水率35%
 (b) 辐射强度0.35 W/cm², 对流风速0.7 m/s, 初始干基含水率35%

加,这说明高辐射强度对物料的干燥脱水是有利的。

图5表明,稻谷由初始干基含水率35%降到终止干基含水率14%,当辐射强度为0.15 W/cm²时,干燥时间大约6 h;当辐射强度提高到0.35 W/cm²,干燥时间不到4 h;当辐射强度达到0.5 W/cm²时,干燥时间只需要2 h。从图5的温度曲线中也可以看出,辐射强度的变化对物料的温度变化有显著影响,这是因为辐射强度与温度的四次方成正比。当辐射强度提高时,物料的温度随之升高,因为辐射热流一部分使物料脱水,另一部分使物料的温度升高。从图5干燥速度曲线也可清晰地看出,辐射强度由0.15 W/cm²提高到0.5 W/cm²,稻谷的干燥速度明显增加,其中最大干燥速率提高近3倍。

4.3 不同对流介质温度的干燥试验

图6为辐射强度0.35 W/cm²,风速0.5 m/s,厚度5 cm,辐照距离10 cm,对流风温分别为30、40、50℃的稻谷干燥曲线。从图中可以得出,对流风温不同,稻谷的干燥速度几乎没有变化,因此可以认为在红外与对流联合干燥过程中对流介质的温度不起主要作用。这是因为像稻谷这些农产物料,为了保证干燥后的品质,干燥介质的温度不宜过高,属于中低温干燥,而辐射热流又是直接作用于物料上,不需要中间传递介质,并且红外辐射的能流密度远大于对流的热量密度,辐射对温度的影响与四次方成正

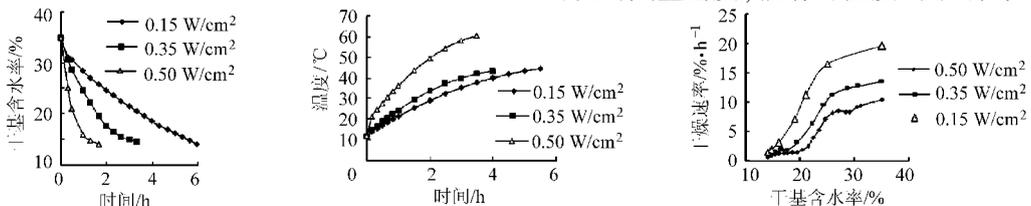


图5 不同辐射强度下的干燥曲线

Fig. 5 Drying performance curves under different radiation

比,只要辐射温度稍微增加,辐射热流就增加非常大,从某种程度上说,对流的热流与辐射热流相比可以忽略,所以在以后的分析过程中,稻谷干燥试验的热风温度都固定在40℃。

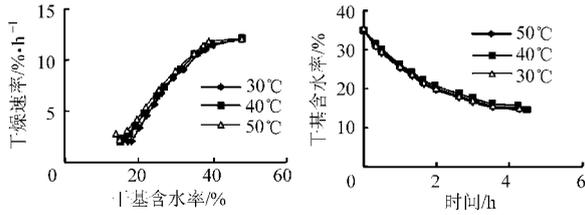


图6 不同对流介质温度的干燥曲线

Fig. 6 Drying performance curves under different air temperatures

4.4 不同初始含水率的干燥试验

图7为被干燥物料的初始含水率对干燥性能的影响。试验条件为:辐射强度为0.15 W/cm²,对流介质速度为0.3 m/s,对流风温40℃,厚度5 cm,辐照距离10 cm,初始干基含水率分别为25%、35%、45%。从图中可以看出物料的初始含水率对干燥速率没有显著的影响,这与其他干燥方法不同,例如对流干燥中初始干基含水率影响干燥速率;而脉动燃烧干燥中,初始干基含水率更加强烈地影响着干燥

速率、降水幅度和干燥强度等指标。

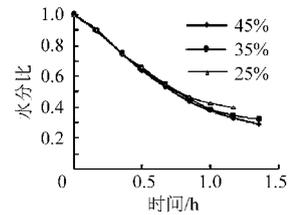


图7 含水率对干燥性能的影响

Fig. 7 Influence of moisture contents on drying performance

4.5 不同对流风速的干燥试验

图8为不同对流风速对稻谷联合干燥的影响。其试验条件为:辐射强度0.15 W/cm²,对流风温40℃,初始干基含水率45%,厚度5 cm,辐照距离10 cm,对流风速分别为0.3、0.5、0.7 m/s。从图中可以看出,随着对流风速的增加,物料干燥过程的降水幅度、干燥速率增大,且物料的温度随之上升,但是在开始阶段,物料的温度并没有表现出这个趋势,而是随着对流风速的升高,温度下降,这是因为对流风带走了物料蒸发的表面水,从而使温度降低。而后,物料的温度又随着对流风速的提高而增大,这是因为表面水蒸发后,对流介质传递给物料热量的缘故。

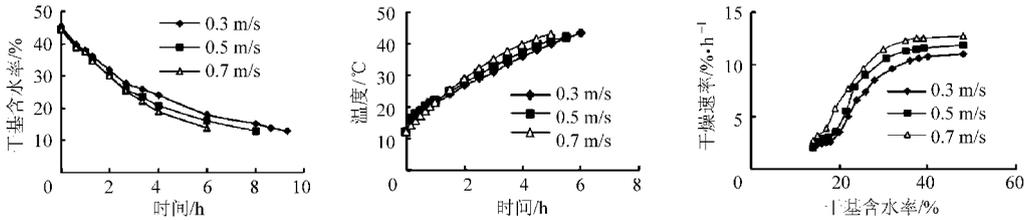


图8 不同对流风速的干燥曲线

Fig. 8 Drying performance curves under different wind velocities

4.6 不同辐照距离的干燥试验

图9a是试验条件为辐射强度0.15、0.35、0.50 W/cm²,对流风速0.7 m/s,物料厚度5 cm,初始干基含水率35%时不同辐照距离的稻谷干燥曲线。从图中可以看出当辐照距离减少时,稻谷的降水幅度增加,干燥速率也增快。而图9b为其他条件不变,对流风速变为0.5 m/s时不同辐照距离的物料温度变化曲线。由图可知辐照距离为5、10和

15 cm,分别干燥2 h后,物料的温度分别达到60、33和23℃,与图9a的相比,温度变化区别不大。可见当辐射强度一定时,不同的辐照距离对温度的影响与对流介质的风速关系不大。

4.7 不同料层厚度的干燥试验

图10a是初始干基含水率35%,辐照距离10 cm,辐射强度分别为0.15、0.35、0.50 W/cm²,对流风速0.7 m/s时,物料装载厚度的变化对降水幅

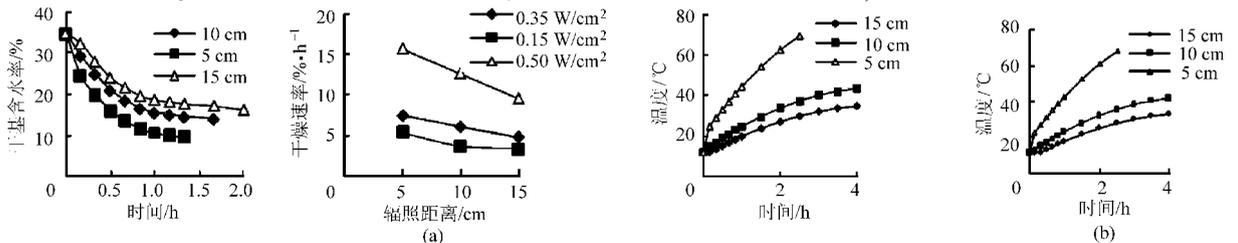


图9 不同辐照距离对干燥性能的影响

Fig. 9 Effects of radiation distance on drying kinetics

(a) 对流风速0.7 m/s (b) 对流风速0.5 m/s

度、干燥速率和物料温度的影响。由此知:料层越厚、物料的干燥时间越长、干燥速率越低、物料温度上升越慢。图 10a 表明辐射强度与厚度耦合作用使物料的降水和升温加快。图 10b 为其他条件不变,

对流风速由 0.7 m/s 减少为 0.5 m/s 时的干燥曲线。与图 10a 相比较,区别不明显。由此可得,对流风速与装载厚度耦合对干燥速率影响不大。

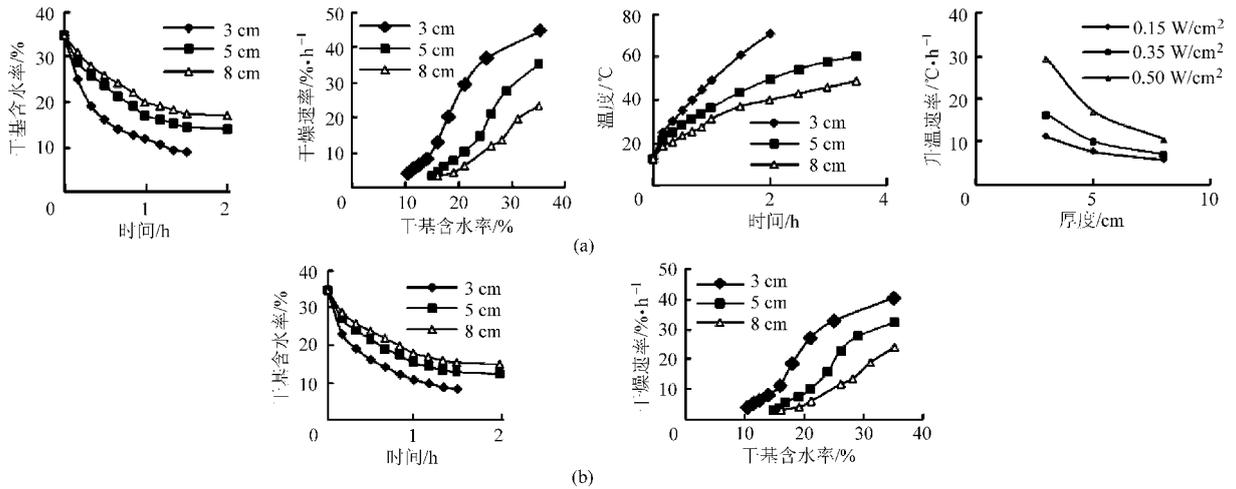


图 10 不同料层厚度的影响

Fig. 10 Effects of bed thickness on drying kinetics

(a) 对流风速 0.7 m/s (b) 对流风速 0.5 m/s

5 结论

(1)在假设稻谷为球型颗粒的基础上,利用热量和质量守恒定律,建立了稻谷在红外辐射与对流联合干燥过程中的水分扩散模型和稻谷温度场模型,并用计算值模拟了稻谷的脱水过程和温度变化过程,模拟曲线与试验曲线吻合良好。

(2)在自行研制的红外辐射与对流联合干燥试验台上,进行了稻谷干燥的试验研究。探讨了不同

参数对稻谷联合干燥特性的影响。试验结果表明:在红外辐射与对流联合干燥过程中,物料对流介质温度和初始含水率对稻谷干燥指标没有显著影响;辐射强度是影响稻谷干燥指标的最重要因素;红外辐射辐照距离的变化对物料的降水及温度影响较大;物料的装载厚度影响着物料的降水幅度、干燥速率和物料温度等干燥指标;对流风速对物料的降水幅度、干燥速率和温度有一定影响。

参 考 文 献

- 1 Plank M. Theory of heat radiation[M]. New York; Dover publications Inc., 1979.
- 2 Love T J. An investigation of radiant heat transfer in absorbing, emitting, and scattering media[R]. Aeronautical Research Laboratories Report ArL 63-3, 1963.
- 3 斯帕罗 E M. 辐射传热[M]. 顾传保,译. 北京:高等教育出版社,1982:2~10.
- 4 夏继余,王正深,胡仲寅,等. 论红外加热技术[J]. 红外技术,1983,5(5):8~15.
- 5 Skai N, Hanzawa T. Applications and advances in far-infrared heating in Japan[J]. Trends in Food Science and Technology, 1994,5(11):357~362.
- 6 Rosenthal I. Electromagnetic radiations in food science[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1992:162~180.
- 7 Rosenthal I, Rosen B, Bernstein S. Surface pasteurization of cottage cheese[J]. Milchwissenschaft-Milk Science International, 1996, 51(4):198~201.
- 8 傅玉颖,张卫斌. 辐射技术及其在食品中的应用[J]. 食品科学,1999(11):9~11.
- 9 徐松涛,徐永平. 红外辐射在生物学、医学、光通信中的应用及其检测[J]. 光电子技术与信息,1995,8(4):34~38.
- 10 汪喜波. 红外辐射与对流联合干燥的理论分析及试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2003.
- 11 Naghavi A, Moheb A, Ziaei-rad S. Numerical simulation of rough rice drying in a deep-bed dryer using non-equilibrium model [J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(2): 258~264.