



基于有限元方法的多孔介质射频干燥 建模及实验验证

张汝怡

上海海洋大学 食品学院

食品热加工工程技术研究中心

研究背景

传统干燥



缺点

物料内部温度梯度和湿度梯度方向相反

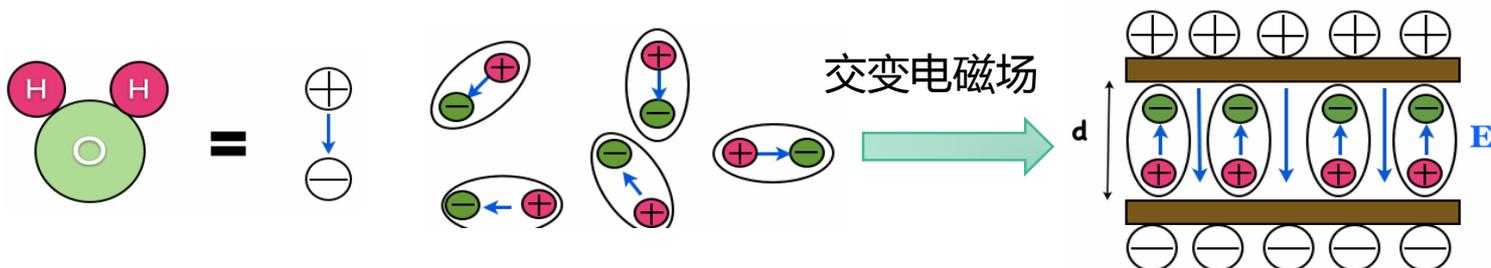
射频干燥

物料食品物料内部和外部同时加热；

射频的波长更长，穿透深度更大，使物料内外均匀受热。

射频加热机理

- 极性分子振荡
- 带电离子振荡

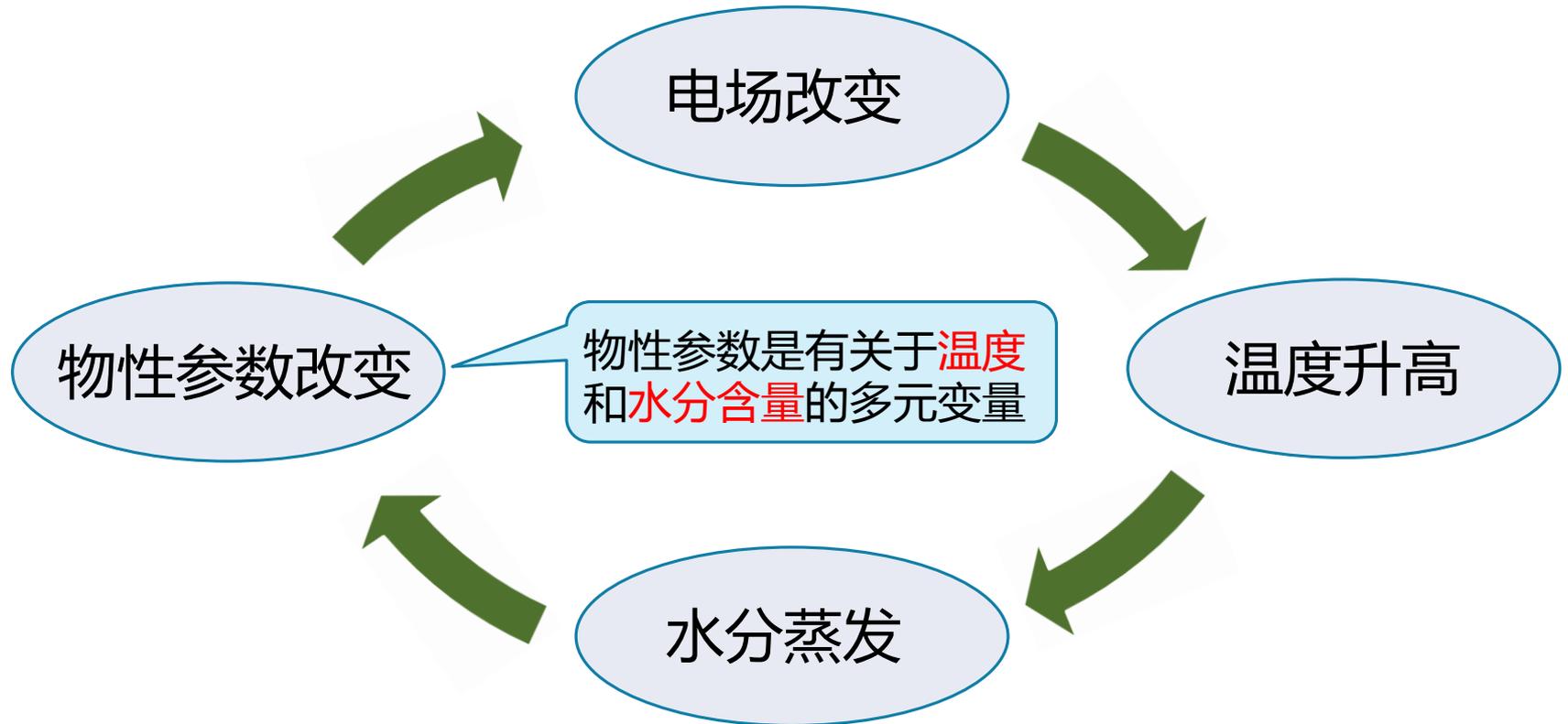


电磁能 -> 热能

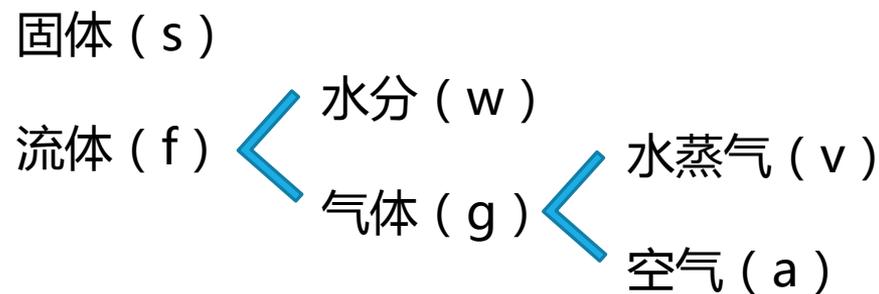
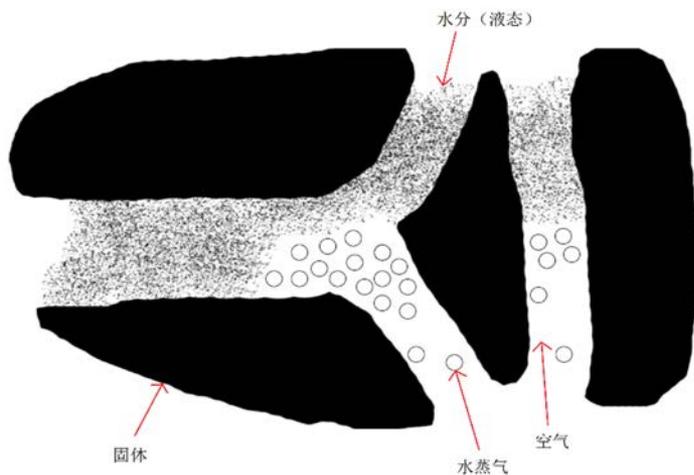
射频加热特点：

- 快速
- 选择性加热

射频干燥



多孔介质的组分



$$\Delta V = \Delta V_s + \Delta V_f$$

$$\Delta V_f = \Delta V_w + \Delta V_g$$

$$\Delta V_g = \Delta V_v + \Delta V_a$$

不同相的体积浓度与其饱和度有关：

$$S_i = \frac{\Delta V_i}{\Delta V_p} = \frac{\Delta V_i}{\emptyset \Delta V} \quad i = w, g$$

电磁场

拉普拉斯方程

$$-\nabla \cdot ((\sigma + j2\pi f \epsilon_0 \epsilon') \nabla V) = 0$$

σ : 电导率 (S/m)

f : 表示频率 (27.12MHz)

ϵ' : 介电常数

$\vec{E} = -\nabla V$, 电场强度

$$j = \sqrt{-1}$$

ϵ_0 : 真空介电率 (F/m)

V : 极板间的电压

介电特性

$$\epsilon^* = \epsilon_0 (\epsilon' - j\epsilon'')$$

ϵ^* : 相对介电常数

ϵ'' : 相对介电损耗

ϵ' : 相对介电常数

单位体积材料
获得的能量

$$Q(x, y, z, T) = \frac{1}{2} w \epsilon_0 \epsilon'' (E \cdot E^*)$$

质量传递

质量传递的计算：水的通量、气体的通量、水蒸气和相变

质量守恒 $\frac{\partial c_i}{\partial t} + \bar{\nabla} \bar{n}_i = -i \quad i = w, g, v$

水的通量

$$\begin{aligned} \bar{n}_w &= -\rho_w \frac{k_{in,w} k_{r,w}}{\mu_w} \nabla P_w \\ &= \rho_w \frac{k_{in,w} k_{r,w}}{\mu_w} \nabla P + D_{w,cap} \nabla c_w \end{aligned}$$



$$D_{w,cap} = \rho_w \frac{k_{in,w} k_{r,w}}{\mu_w} \cdot \frac{\partial P_c}{\partial c_w}$$

热能传递

热平衡方程

$$\rho_{eff} C_{p,eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \sum_{i=w,v,a} (n_i \nabla(C_{p,i} T)) = \nabla(k_{eff} \nabla T) - \lambda \dot{I} + Q_{mic}$$

↑
↑
↑

水、水蒸气和空气
离开时带走的热量
水蒸发与凝结

有效密度： $\rho_{eff} = (1 - \phi)\rho_s + \phi(S_w\rho_w + S_g\rho_g)$ (16)

有效比热容： $C_{p,eff} = m_s C_{p,s} + m_w C_{p,w} + m_g(m_a C_{p,a} + m_v C_{p,v})$ (17)

有效导热系数： $k_{eff} = (1 - \phi)k_s + \phi(S_w k_w + S_g(w_v k_v + w_a k_a))$ (18)

边界条件

电磁通量

$$E_{\text{壁切线}} = 0$$

水分通量

$$j_{\bar{n},w|surf} = h_m \phi S_w (p_v - p_{v,oven}) + c_w \bar{v}_{\bar{n},w}$$

↑
当 $S_w = 1$

水蒸气通量

$$j_{\bar{n},v|surf} = h_m \phi S_g (p_v - p_{v,oven}) + c_g \bar{v}_{\bar{n},g}$$

热通量

$$q|_{surf} = h_t (T_{surf} - T_{oven}) - \lambda j_{\bar{n},w|surf} - \sum_{i=w,v} (j_{\bar{n},i|surf}) C_{p,v} T_{surf} - c_w \bar{v}_{\bar{n},w} C_{p,w} T$$

↑
食品材料与外界空气
的对流传热项

↑
食品表面液态水蒸发
产生的热损失

↑
水蒸汽离开食品
表面带走的热量

↑
液态水滴流
带走的热量

介电特性

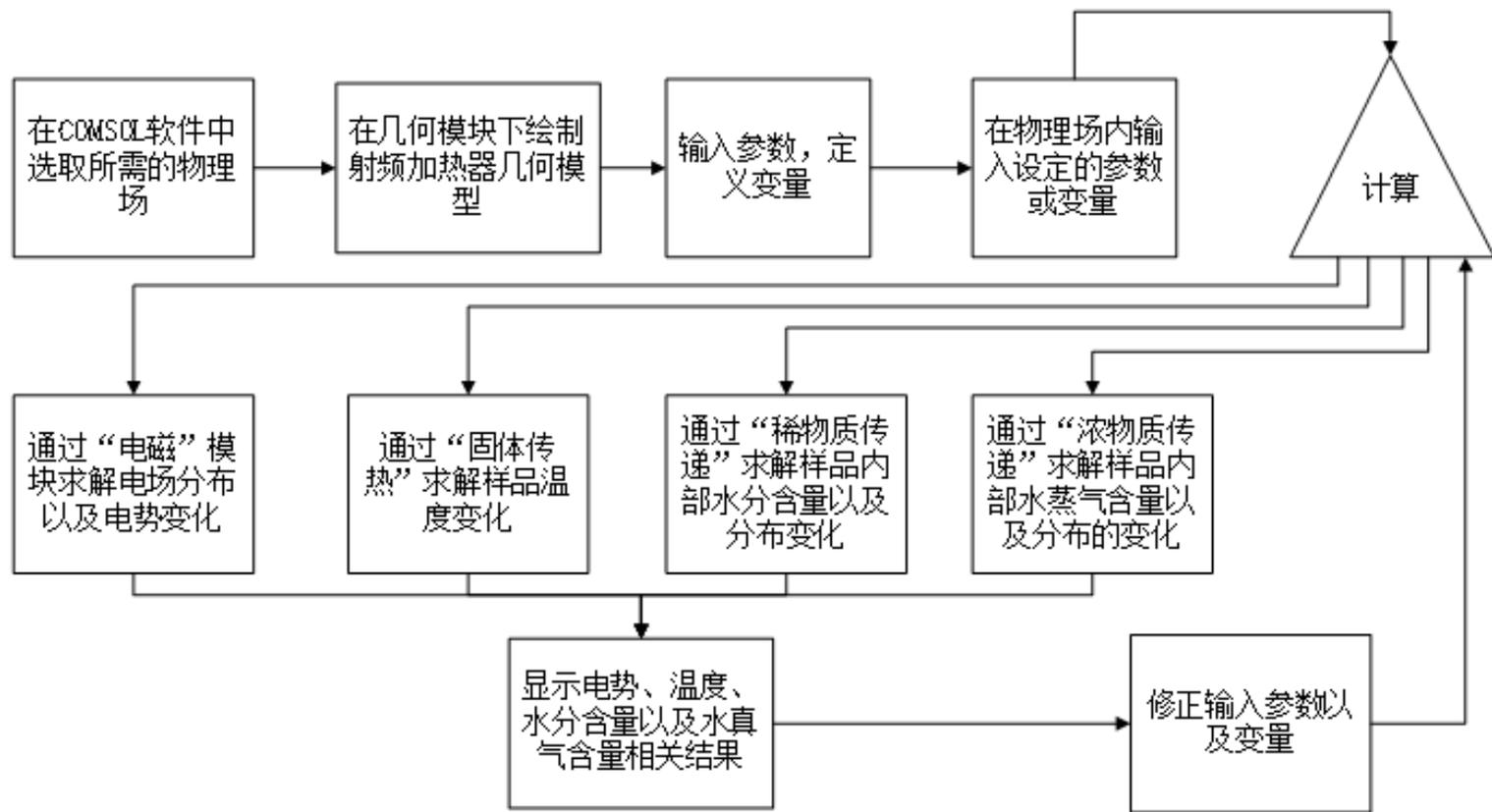
多种物质成分的多孔介质的平均介电性质采用“LLLE”进行计算：
(Landau and Lifshitz, Looyenga equation)

$$\varepsilon^{\frac{1}{3}} = \sum_{i=s,w,g} v_i \varepsilon_i^{\frac{1}{3}}$$

固体体积分数 $v_s = 1 - \phi$

水分体积分数 $v_w = S_w \phi$

气体体积分数 $v_g = S_g \phi$



射频干燥模拟操作流程图

实验过程

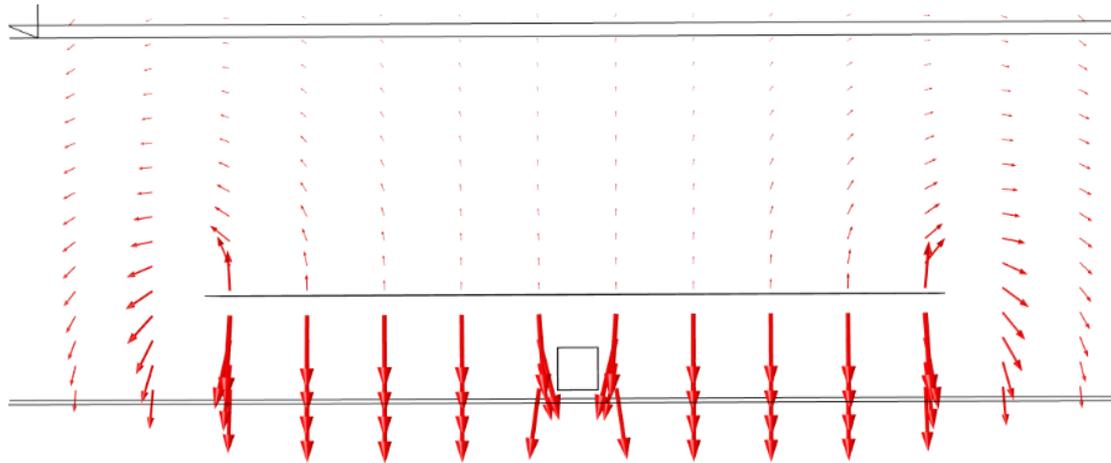
- 干燥实验开始前，用红外热像仪对土豆样品进行拍照测温，测得土豆表面温度分布，确认土豆样品的初温为 10°C ，记为 t_0 。
- 实验开始后，每隔5min，暂停射频能量，取出土豆样品用红外热像仪进行拍照测温，拍照时间不超过10秒，记为 t_n 。
- 将一根光纤温度传感器插入正方体土豆样品中心点，实时记录干燥过程中，土豆中心点温度变化。当需要对土豆样品进行拍照测温及测重时，拔出光纤温度传感器。

注：选择5min的时间间隔，尽量避免频繁测量土豆变化参数对射频干燥过程造成影响，又能保证精确获得土豆干燥特性曲线。

温度测量：红外热像仪（表面）、荧光光纤测温仪（内部多点）

电场分布

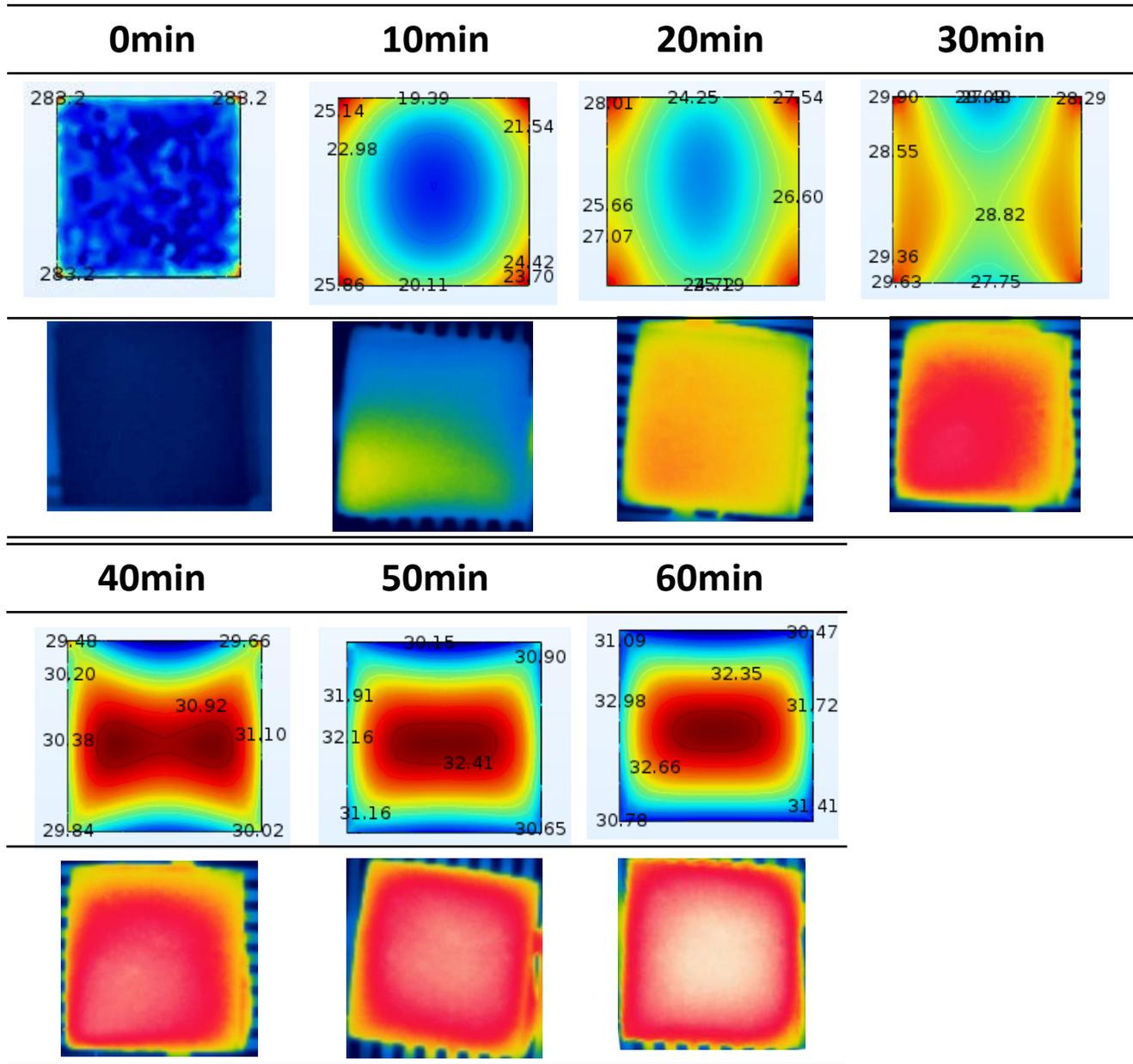
- 土豆样品周围的电场由于物料表面吸引，电场方向向物料发生偏转，造成物料表面吸收的能量高于中心部分，这种现象叫**边角效应**。
- 随着干燥的进行，物料表面水分含量低于中间部分，边角效应的影响效果减弱，然而物料四周电场**偏转的角度增大**。



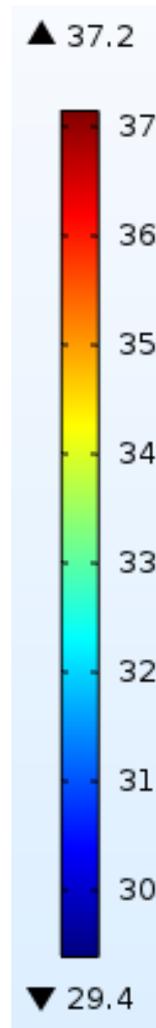
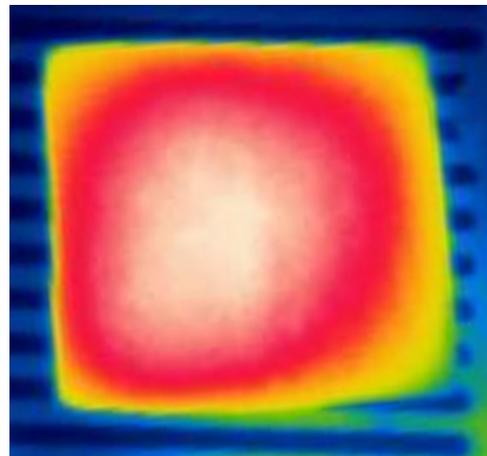
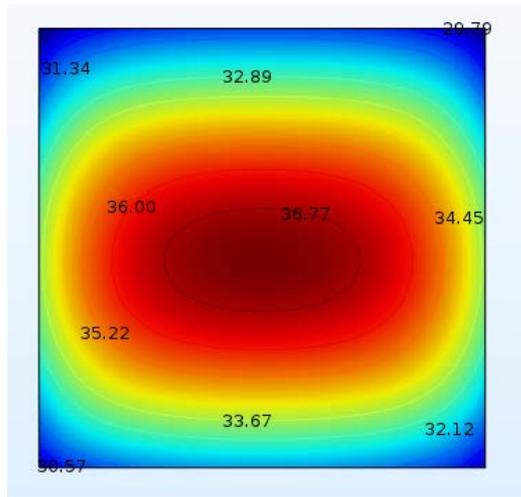
射频加热器内腔中心截面 ($x=0.3\text{m}$) 电场分布

温度分布

表面

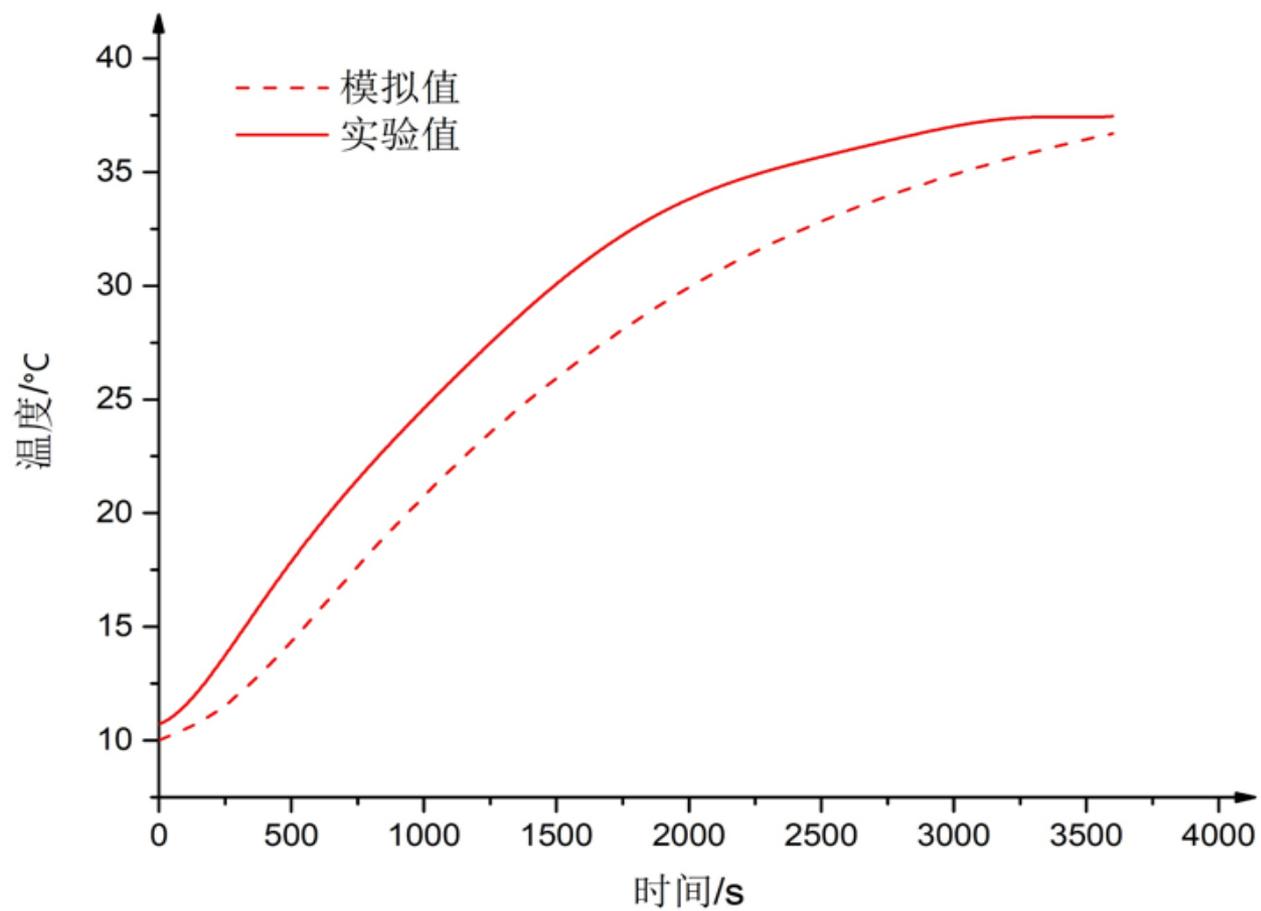


中心截面



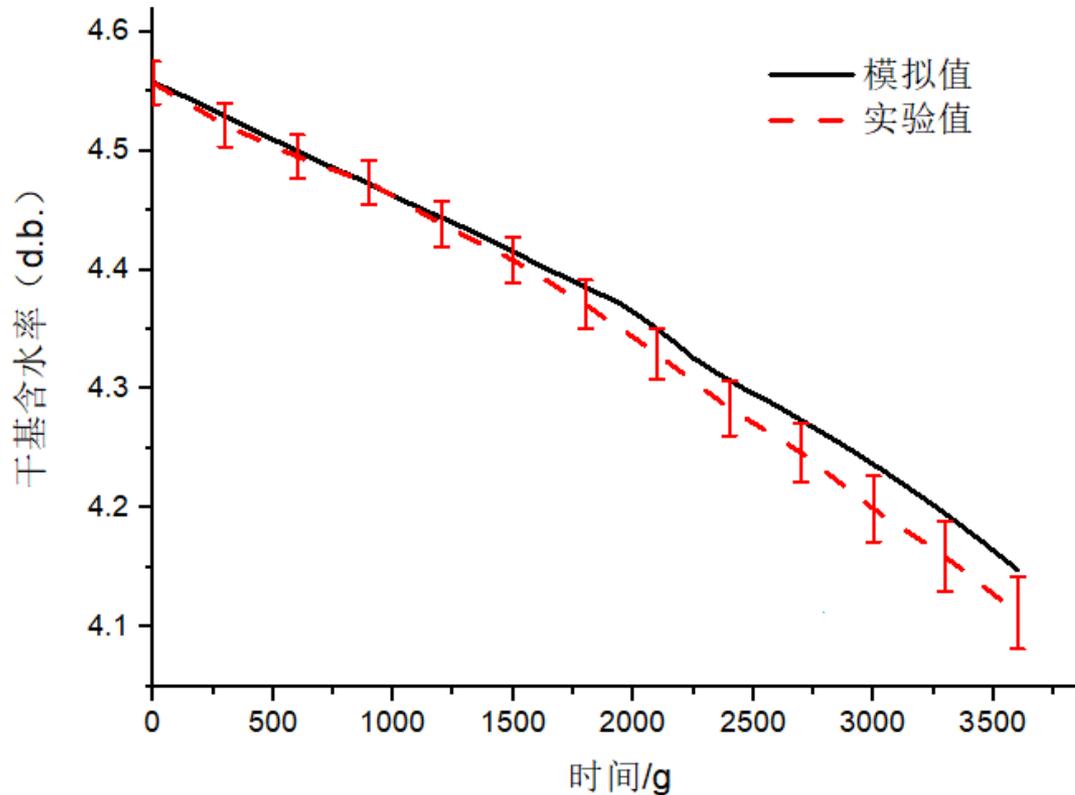
实验结束后，用刀快速将土豆样品一分为二，取其中心截面

中心点

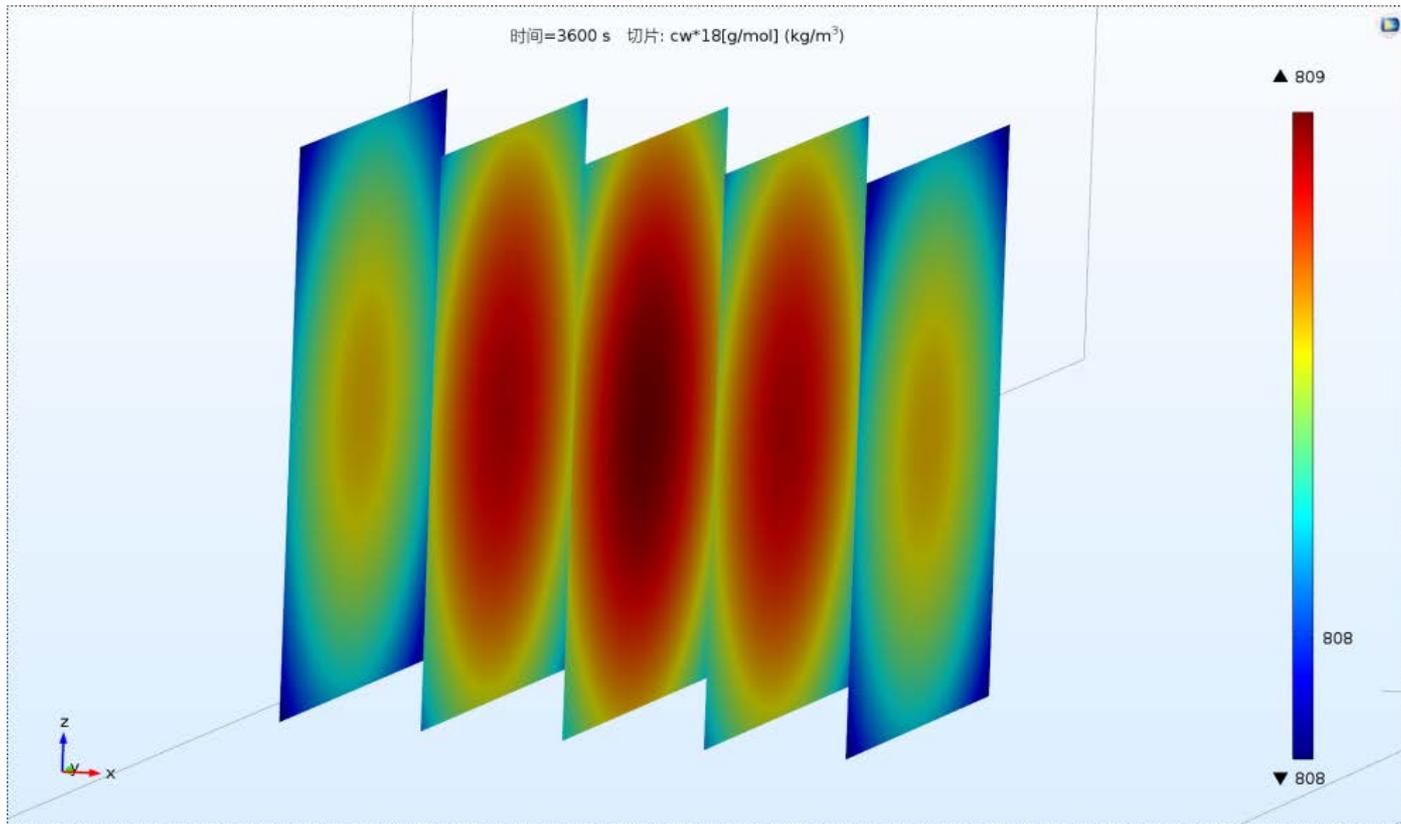


实验结果土豆中心点升温曲线与模拟结果土豆升温曲线

水分变化

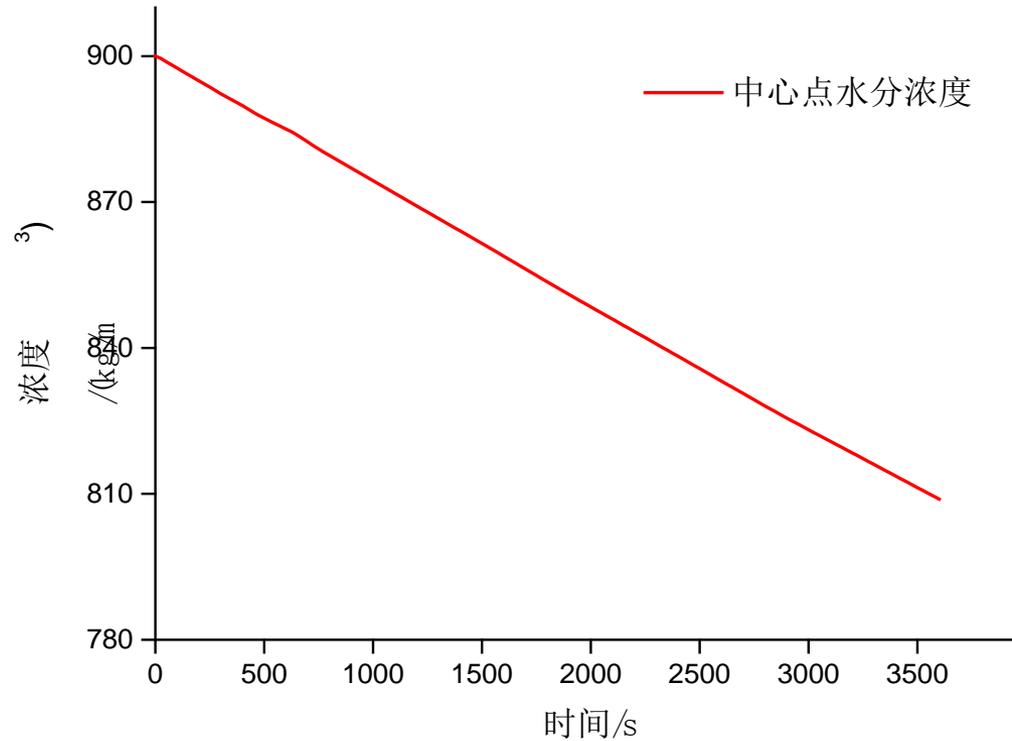


射频干燥1小时，土豆样品的质量减少量达到8.33%。
实验结果的干基含水率从4.56降至4.13，模拟结果从4.56降至4.16，干基含水率的计算误差仅为0.73%。



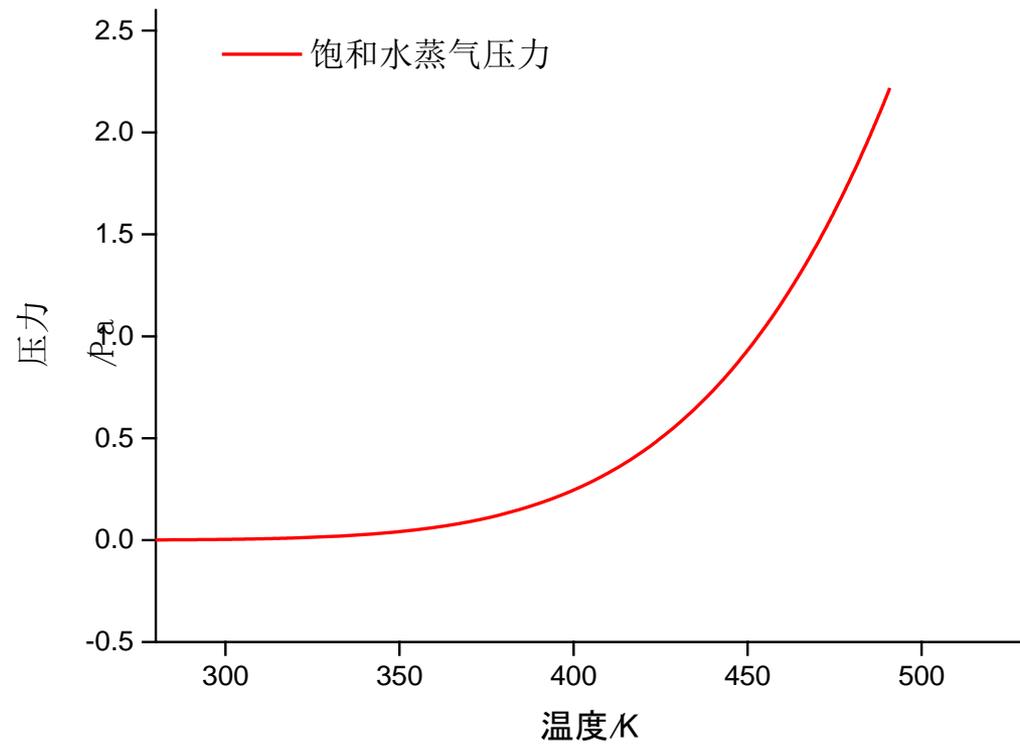
土豆内部的水分分布图 ($t=3600s$)

水蒸气

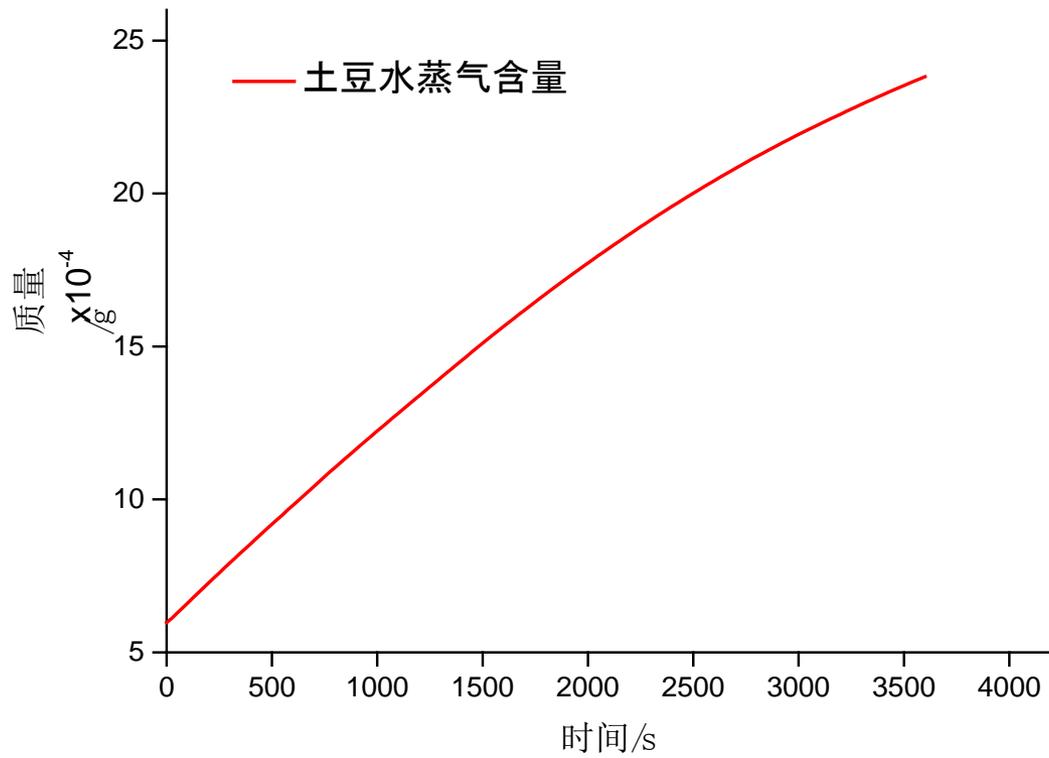


土豆样品内部水分含量随干燥时间的变化曲线

其他(一)



水蒸汽的饱和蒸汽压力随温度的变化趋势图



物料内水蒸气的质量随时间的变化图

结论及展望

结论

- 本文通过耦合电磁场，传热传质以及多孔介质建立射频干燥有限元模型，描述了射频干燥过程中的物理变化，采用土豆为物料，经过严谨的实验证明干燥模型可靠有效。
- 射频干燥土豆的结果表明，射频干燥过程中，干燥速率变化不大，可以作为传统干燥降速段的补充手段。

展望

- 本文通过有限元射频干燥物理模型探索射频干燥工艺的方法，为射频干燥挑选合适的干燥物料以及优化射频加热设备提供了新的方法。

食品热加工中心

射频实验室

研究方向

- ❖ 射频加热在食品工业中的应用: 灭菌、解冻、干燥、杀虫
- ❖ 新型食品热加工技术、工艺、装备研发
- ❖ 食品加工传热传质过程计算机模拟

成员

焦阳：副教授
李峰：工程师
6名硕士研究生





谢谢大家！

