

# 刺参热泵干燥过程热湿耦合传递研究

赵海波<sup>1</sup>, 戴家傲<sup>2</sup>

1. 海洋学院, 烟台大学, 山东, 烟台

2. 土木工程学院, 烟台大学, 山东, 烟台

**简介:** 为详细探究刺参在热泵干燥过程中各参数的瞬时变化, 建立了对流干燥传质传热过程中的刺参二维轴对称物理模型, 模型中耦合了速度场、温度场、稀物质传递等多个物理场, 用以研究干燥箱内刺参干燥过程中的热湿迁移规律。

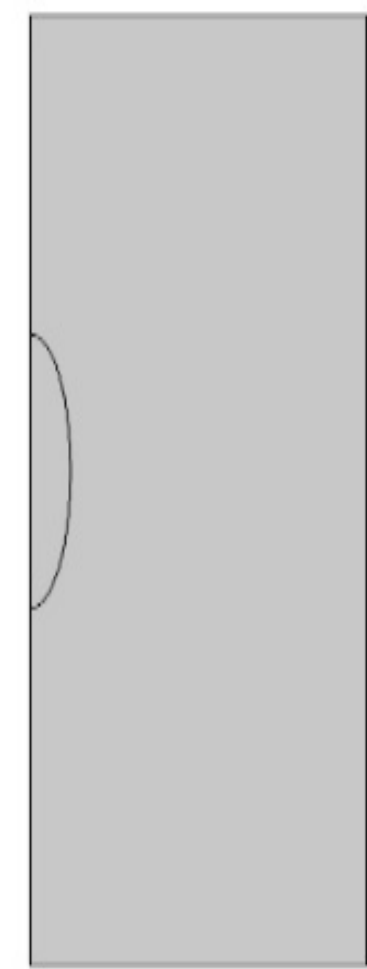


图 1. 干燥箱中的刺参二维轴对称建模

**计算方法:** 控制方程包括非等温流场动量守恒方程和瞬态过程导热方程以及表征水分传递的方程。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial T}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i$$

对流干燥过程中, 刺参内部及干燥介质中的热量传递符合傅立叶定律, 建立的非稳态热量传递方程为

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_0$$

其中,  $q_0$  为刺参折算出的体积热源,  $\rho$  为刺参材料的密度,  $c_p$  为刺参材料的比热,  $r$  为椭圆状刺参截面半径,  $\lambda$  为刺参导热系数。

内部及干燥介质中的水分传递符合菲克第二扩散定律, 建立的非稳态质量传递方程为

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \times (-D_{eff} \times \nabla \times C) = 0$$
$$\frac{\partial C_2}{\partial t} + \nabla \times (-D_a \times \nabla \times C_2) + \mathbf{u} \times \nabla \times C_2 = 0$$

其中,  $C$  为刺参切样中的水分摩尔浓度;  $D_{eff}$  为刺参切样中水分有效扩散系数;  $D_a$  为干燥介质中水分扩散系数;  $C_2$  为干燥介质中的水分摩尔浓度;  $\mathbf{u}$  为干燥介质速度

## 参考文献:

- [1] 母刚, 张国琛. 热泵干燥刺参的初步研究[J]. 渔业现代化, 2007(5): 47-50.
- [2] 孙妍, 薛长湖, 齐祥明, 等. 刺参最佳对流干燥温度的研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 205-209.
- [3] C.L. Hii, C.L. Law, M.C. Law. Simulation of heat and mass transfer of cocoa beans under step wise drying conditions in a heat pump dryer[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 54(1).
- [4] Sabarez H T. Computational modelling of the transport-phenomena occurring during convective drying of prunes [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111(2): 279-288.
- [5] 朱代根, 陈君若, 刘显茜. 食品对流干燥热质耦合传递的数值模拟[J]. 农机化研究, 2011, 33(01): 49-52.
- [6] 袁越锦, 杨彬彬, 刘相东. 多孔介质恒温缓慢干燥的孔道网络模型与模拟[J]. 农业机械学报, 2007(07): 62-66+70.
- [7] 许淑惠. 流体力学[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2013
- [8] 葛玉姣. 玉米种子干燥过程中皮层阻力影响的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.

**结果:** 通过热泵干燥实验对模型进行了验证, 刺参干基含水率和温度变化吻合程度较高。

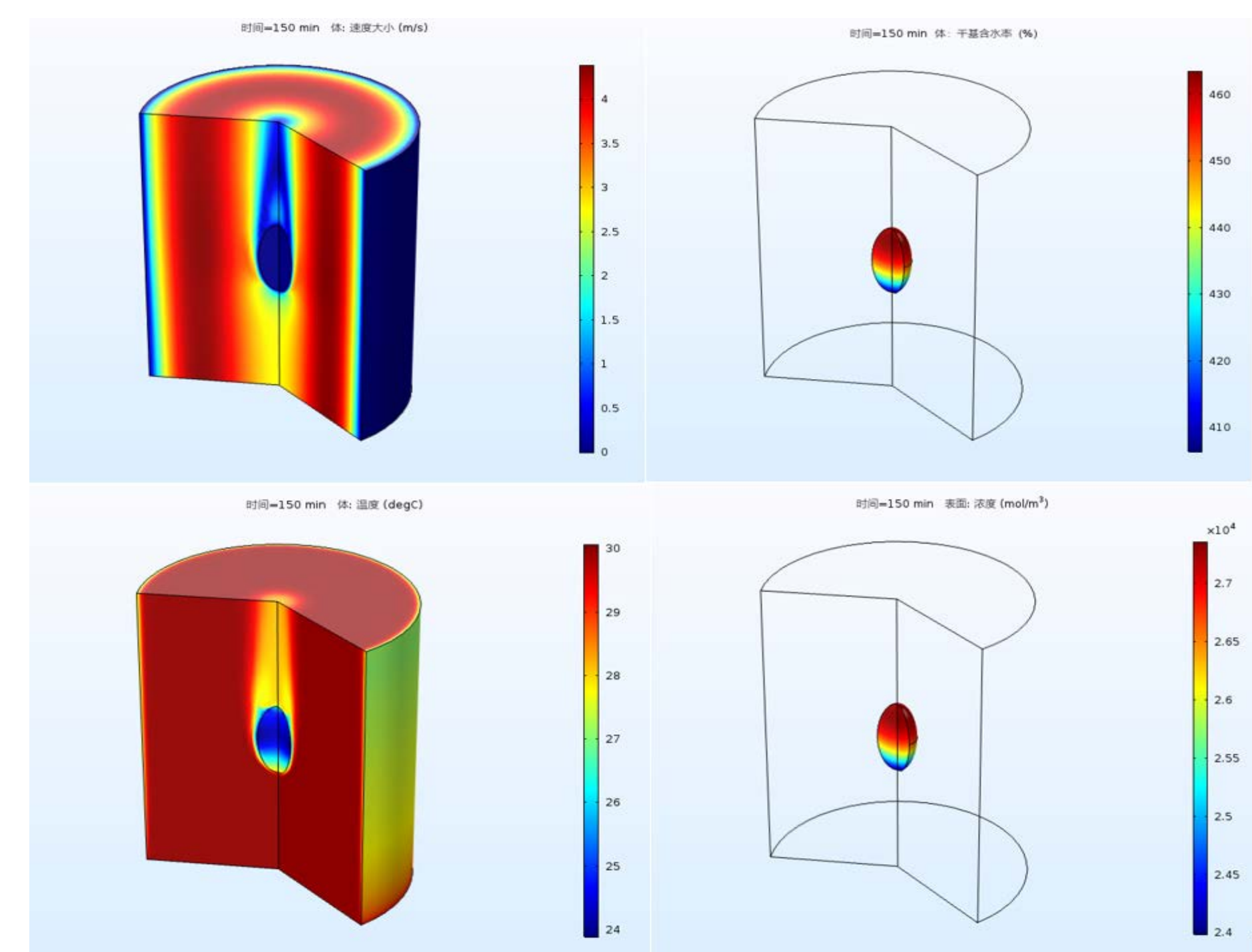


图 2. 干燥箱内速度、刺参干基含水率、温度、浓度变化图

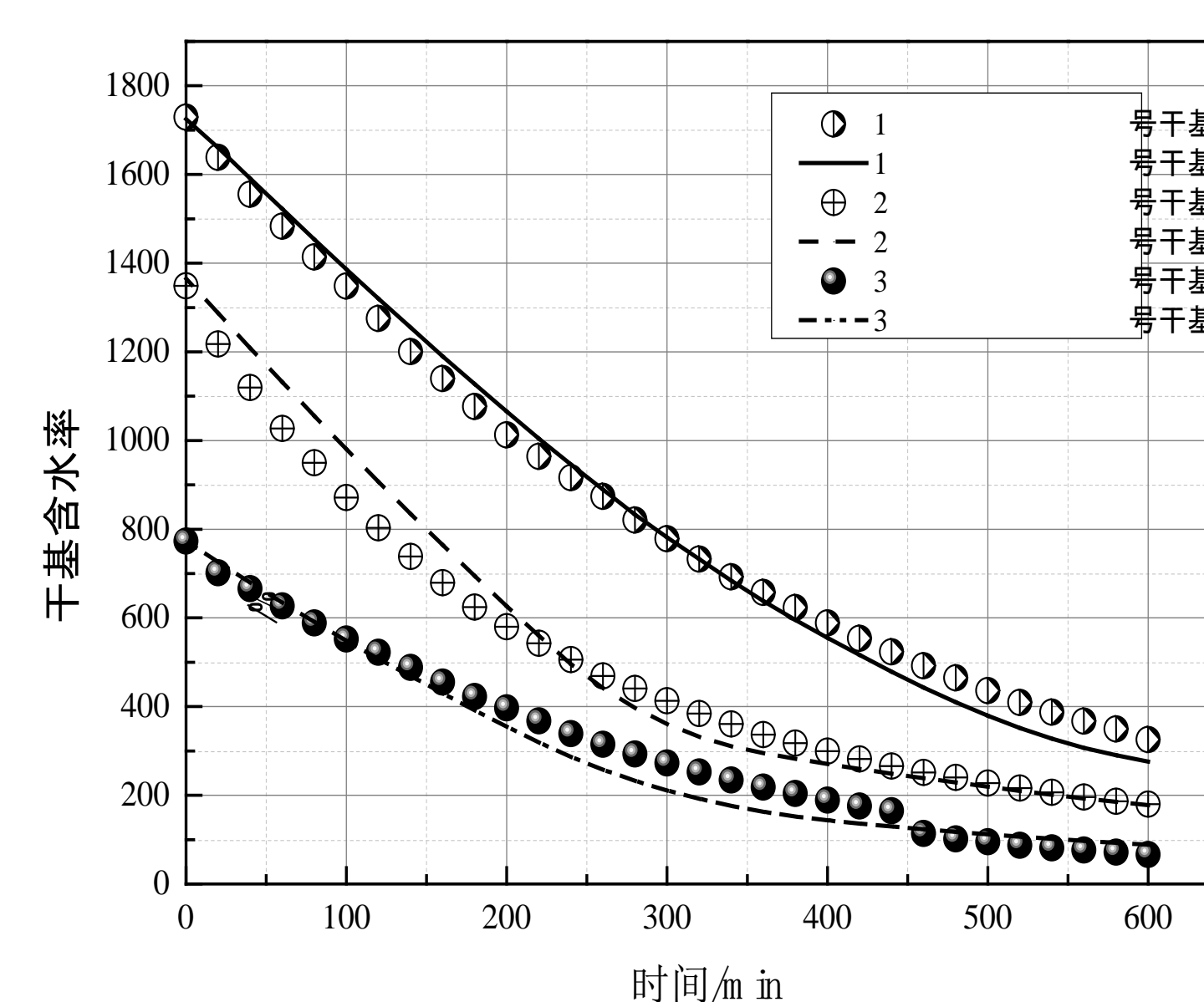


图 3. 模拟与实验过程含水率变化

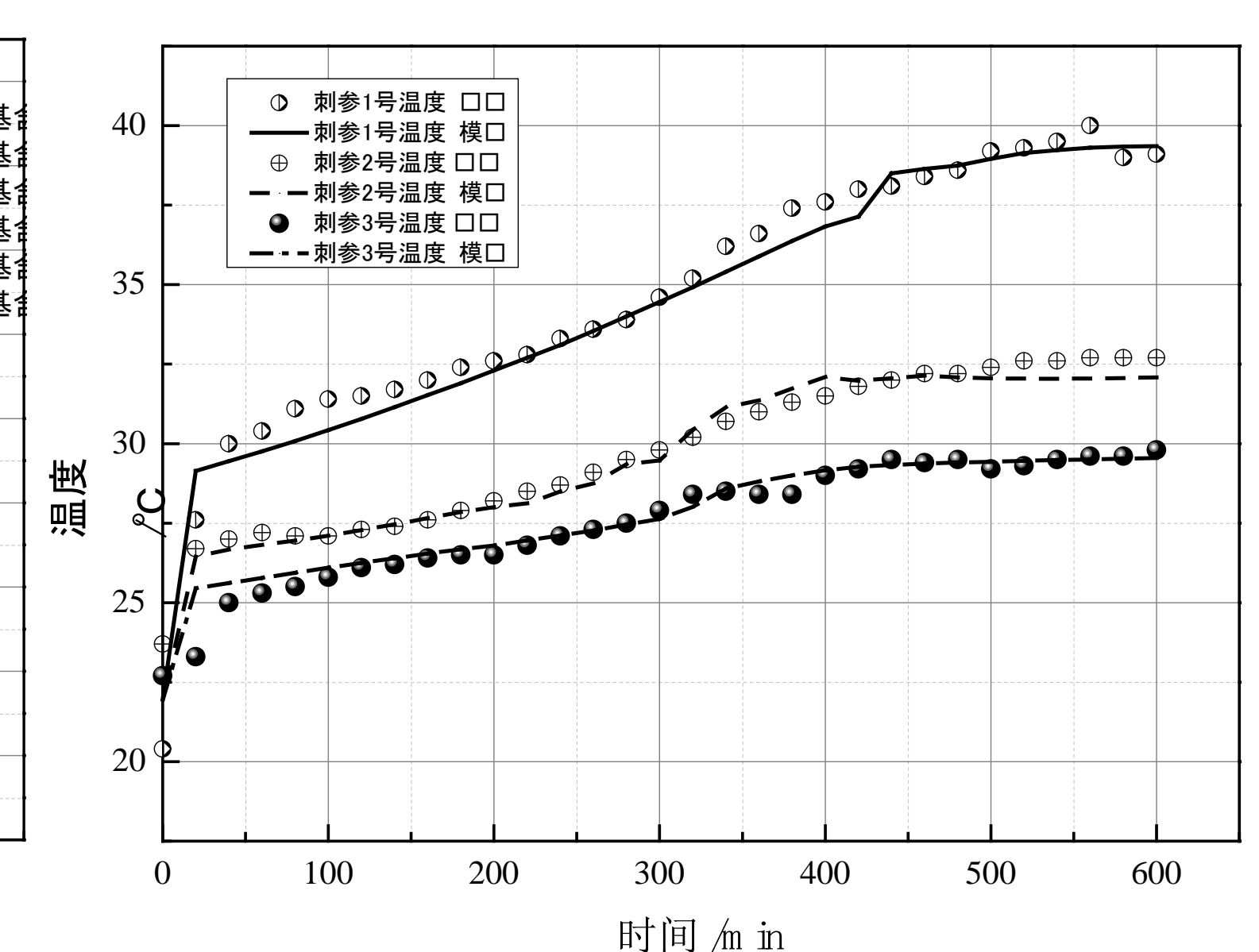


图 4. 模拟与实验过程温度变化

**结论:** 1) 由模拟结果可知物料内部的温度随干燥时间的增加逐渐升高, 直至平衡温度。越靠近进口方向越易达到平衡温度。干燥过程中, 物料到达平衡温度的时间随着进口风速的增大而缩短。

2) 干燥过程中, 物料先接触热风的一端内部水分浓度会有明显的变化, 可见该实验中干燥箱设计的单一的风向无法满足烘干物料内部水分均匀分布的要求。在实际工程中烘干大批量物料的情况下, 使用正反转功能的轴流风机可有效缩短干燥时间并保证水分分布均匀。

3) 模拟值中含水率变化在前期略低于实验值后期略高于实验值, 实际过程中刺参的尺寸收缩导致物料蒸发率减少以及孔隙率的变化是导致偏差的主要原因, 可在下一步的研究中考虑加入收缩模型, 使模拟结果更加准确。