

多孔介质干燥过程分形孔道网络模型与模拟： . 数值模拟与试验验证

袁越锦 杨彬彬 焦阳 刘相东
(中国农业大学 工学院, 北京 100083)

摘要 为验证笔者建立的自然多孔介质干燥分形孔道网络模型(袁越锦, 杨彬彬, 焦阳, 等. 多孔介质干燥过程分形孔道网络模型与模拟: I. 模型建立. 中国农业大学学报, 2007, 12(3): 65-69)的正确性, 采用新鲜土豆切片进行热风对流干燥试验, 并对干燥过程进行数值模拟。结果表明: 分形孔道网络模型模拟得到的多孔介质内部温度、水分含量的分布与响应较规则孔道网络模型的更接近试验结果; 分形孔道网络模型能合理地解释目前常用干燥理论所不能解释的湿斑和不规则干燥前沿等现象; 多孔介质的喉径分布对干燥有显著影响, 喉径分布不均匀程度越高, 干燥时间越长; 孔隙分形维数的大小与干燥时间无确定性关系。孔道网络模型考虑了多孔介质孔道微观结构对干燥过程的影响, 在预测多孔介质内部水分分布与响应方面更接近真实干燥过程。

关键词 多孔介质; 干燥; 模拟; 孔道网络; 分形

中图分类号 TQ 021.4

文章编号 1007-4333(2007)04-0055-06

文献标识码 A

Fractal pore network simulation on the drying of porous media : . Experimental study and numerical simulation

Yuan Yuejin, Yang Binbin, Jiao Yang, Liu Xiangdong
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract A drying experimental study of potato slices, as an example of a real porous body, was conducted and its numerical simulation was carried out under the same environmental condition. The drying dynamic character of potato slices was obtained by the simulations of both a fractal pore network model and a regular one. The experimental and simulation results indicate that the drying kinetics, as well as the distributions of moisture and temperature inside the porous body, from the fractal pore network model are more consistent with that obtained from the drying experiments than that from the regular one. The wet patch appeared during the simulation process and this similar contour was also observed on the potato slices in the experiments. The throat size distribution in pore network of the porous media affects the drying process dramatically during the simulations. The higher the uneven degree of the throat size distribution was, the longer the drying time. There was no certain correlation between the pore fractal dimension and the drying time.

Key words porous media; drying; simulation; pore network; fractal

文献[1]中笔者以已有研究结果^[2-8]为基础, 考虑多孔介质孔隙内的液相流动、汽相扩散、温度梯度和孔道微细结构特征等诸多因素对干燥过程的影响, 建立了自然多孔介质干燥的分形孔道网络模型和规则孔道网络模型。本研究以新鲜土豆为自然多孔介质干燥模拟研究对象, 进行热风干燥试验, 模拟

分析不同多孔介质结构参数对干燥过程的影响。

1 试验

1.1 材料及方法

为获得实际自然多孔介质干燥过程中的湿分场、温度场、干燥曲线等干燥特性, 验证模型的正确

收稿日期: 2006-12-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50676104)

作者简介: 袁越锦, 博士研究生, E-mail: yyjuan1@163.com; 刘相东, 教授, 博士生导师, 通讯作者, 主要从事农产品干燥技术与设备的研究, E-mail: xdliu@cau.edu.cn

性,选取具有典型多孔介质代表性的高含水率的新鲜土豆为模拟对象。

试验开始前,将品种、产地相同的土豆(市售)洗净,挑选一批含水率较为一致的土豆,切成尺寸约为50 mm ×50 mm ×10 mm 的薄片,正面^[1]均匀涂抹瞬间强力胶(万能胶)绝湿,以保证土豆切片内部仅以二维湿分传递,水分只能从4个侧面^[1]传递出去。

试验时,将制备好的20个土豆切片置于调试好的恒温烘箱中进行热风对流干燥。烘箱内热空气温度62,相对湿度5%,风速0.62 m/s;土豆切片初始温度18.5,初始平均质量30.189 g。干燥过程中土豆温度场、湿分场的测量方法为:每隔一段时间,从烘箱中迅速取出1片土豆,置于已画好5 ×5 网格的纸上(图1),采用 Raynger-ST6L 型红外测温

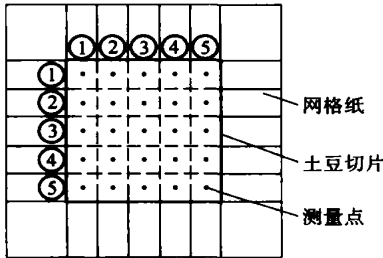


图1 土豆温度场和湿分场测量示意图
Fig. 1 Sketch of temperature and moisture distributions measuring potatoes

仪(美国 Raytek 公司产品)测量相应25处测温点的温度值;然后迅速将土豆片按图1中的虚线网格划分切成5 ×5 = 25 小块,采用烘干法分别测量各小块的湿含量。

1.2 土豆切片主要物理结构参数

将土豆试样真空冷冻干燥至绝干后,测量其物理结构参数(表1)。孔隙率、体积密度、骨架密度、孔隙大小分布曲线采用压汞法^[9-11],测量仪器为美国 Micromeritics 公司生产的 AutoPore 9510 型压汞仪;孔隙个数面密度用显微镜观测计数法获得;表面孔隙分形维数采用图像处理统计法^[12]获得。

表1 试验土豆的主要物理结构参数

Table 1 Main structural parameters of the potato slice				
孔隙率	体积密度	骨架密度	孔隙个数面密度	表面孔隙分形维数 D
	(kg/m^3)	(kg/m^3)	密度 / μm^{-2}	
0.528 6	0.752 8	1.596 7	$1.145 1 \times 10^{-6}$	1.723 5

为在模拟时再现土豆试样的孔隙大小分布,需将测得的土豆孔隙大小分布数据(图2中的原始数据

据)拟合为函数曲线。本研究采用多项式拟合得到10阶拟合多项式函数

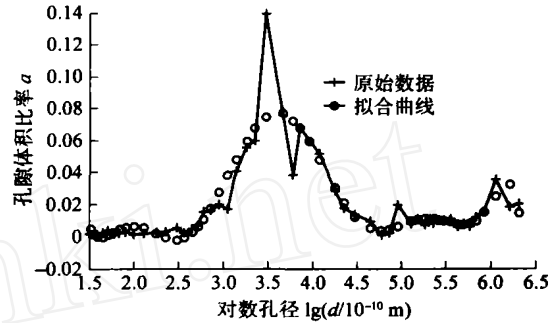


图2 土豆孔隙大小分布曲线

Fig. 2 Curve of potato pore size distribution

$= E[0]d^{10} + E[1]d^9 + \dots + E[9]d + E[10]$ (1)
式中: 为孔隙体积比率; d 为孔径, 10^{-10} m; E 为系数向量, $E = [-0.000 164, 0.005 551, -0.079 652, 0.626 880, -2.890 000, 7.459 100, -7.370 300, -12.582 000, 46.926 000, -53.954 000, 22.534 00]$ 。将拟合曲线与原始数据(图2)比较,二者吻合较好。

在进行土豆切片热风干燥模拟时,需要的其他主要参数为:蒸气扩散系数 $D_{AB} = 2.602 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$,骨架导热系数 $k_s = 0.472 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,骨架比热 $C = 1534.9 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,平均配位数 $\bar{c} = 3.02$,孔节点数为2863个,剖分数 $N = [4, 7, 7, 7]$ 。

2 结果分析与讨论

2.1 模拟结果与试验结果比较

2.1.1 干燥曲线 采用分形模型和规则模型模拟及试验得到的土豆切片干燥曲线(图3)。可见,分形模型得到的干燥曲线变化趋势与试验曲线基本一

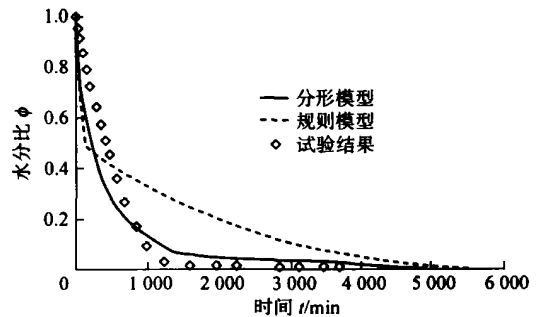


图3 分形模型和规则模型模拟及试验得到的土豆干燥曲线

Fig. 3 Drying curves comparison of experiment and simulation

致,而规则模型的干燥曲线与试验曲线有较大差异。随着干燥的进行,试验和分形模型的干燥曲线在 2 000 min 左右达到平衡湿含量,随后近似于水平直线;而规则模型的干燥曲线在干燥初期水分比下降很快,190 min 左右时干燥突转缓慢,未出现类似于试验曲线中的平直段,总干燥时间达 5 000 min 以上,为试验干燥时间的数倍。

分形模型干燥曲线与试验干燥曲线结束段(2 000 min 以后)存在一定差别。在这一阶段,试验干燥曲线保持平直,而分形模拟干燥曲线的走势仍为缓慢下降,接近 5 000 min 时水分比为 0。出现差异的原因是:试验中当土豆切片达到平衡湿含量后,湿分的吸附与解吸达到平衡,水分比保持恒定。在孔道网络模型中,所有湿分均以液相和气相形式存在于孔道空间中,骨架不含湿分。由于各孔道空间都是相互连通的,只要干燥继续进行,孔道内的液相总能蒸发,并通过气相扩散向外传递。这样,干燥结束时模型中不存在液相,模型中的湿分全部以孔道中的蒸气形式存在,且相对湿度与热空气相同。可以估算,当相对湿度为 5% 时,相同体积的水蒸气质量与液态水质量之比为 6.45×10^{-5} 。可见,模型中以蒸气形式存在的湿分所占比重极小,基本可以忽略,因此干燥完毕以后,模型中的水分比为 0。简而言之,假设骨架不吸湿,各孔道相互连通、无封闭孔道的孔道网络模型干燥最终水分比均为 0。虽然干燥结束段干燥曲线较为平缓,类似于试验干燥曲线,但其原因并非吸附-解吸平衡,而是干燥速率非常小,因而干燥曲线近似平直。

2.1.2 温度曲线 图 4 为采用分形模型和规则模型模拟及试验得到的土豆干燥温度曲线。可以看出,规则模型和分形模型的温度变化趋势与试验曲线都较接近。干燥开始段,规则模型与分形模型的温度上升较快。水分比 低于 0.8 时,升温速率逐渐变小。当水分比 低于 0.4 时,两模型的温度均达到 60 以上,接近于热风温度(62)。

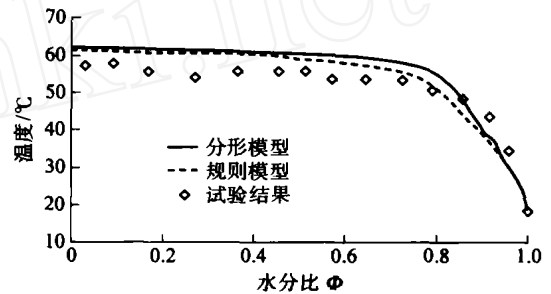


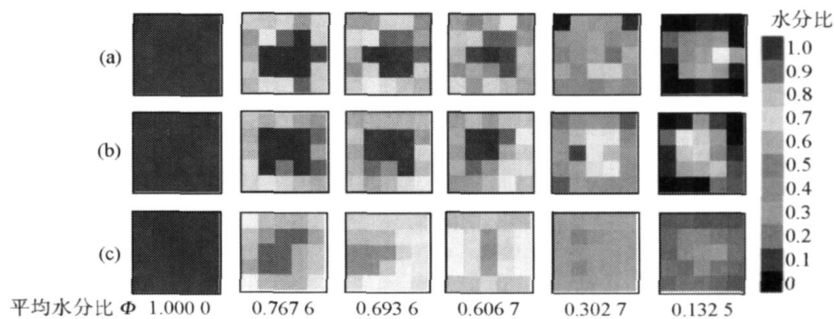
图 4 分形模型和规则模型模拟及试验得到的土豆干燥温度曲线

Fig. 4 Temperature curve comparison of simulation and experiment

除开始段以外,模拟得到的温度值普遍比试验值高,其原因在于:1) 试验测得的是土豆切片表面的温度;虽然切片较薄,但切片内部与外部仍存在一定温差。2) 由于无法在烘箱中测温,必须先将切片取出,此过程中温度有所降低。

2.1.3 湿分场及温度场 模拟和试验得到的湿分场和温度场见图 5 和 6,为与试验结果(文献[1]中的图 2)进行一一对应比较,图中对模拟结果作了 5×5 区域平均化处理,其实际模拟结果见图 7 和 8。

分形模型和规则模型得到的湿分场都反映了土



同一列各图所处时刻的平均水分比相同。图 6~8 同。

图 5 分形模型(a)和规则模型(b)及试验(c)得到的湿分场

Fig. 5 Moisture field comparison of simulation and experiment

豆切片的湿分场特征(图 5):中心部分湿分高,外围低。水分比相同时,模拟湿分场的最大湿分与最小湿分相差较大。原因在于,模型中忽略了喉道对湿

分的吸附作用,使得干区湿含量非常低。

采用分形模型和规则模型得到的温度场(图 6)基本相同,且均与试验测得的温度场基本相似。水

分比约为 0.91 和 0.8 时,模拟与试验温度场均具有中间区域温度低、四周温度高的特征;水分比约为

0.59、0.38 和 0.19 时,各温度场均则表现为中间区域温度高,四周温度低。

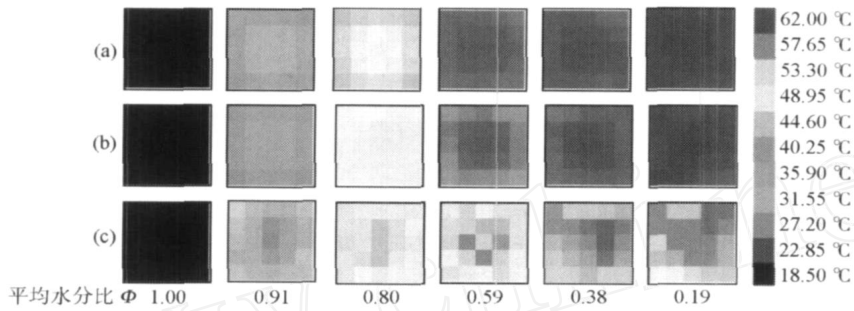
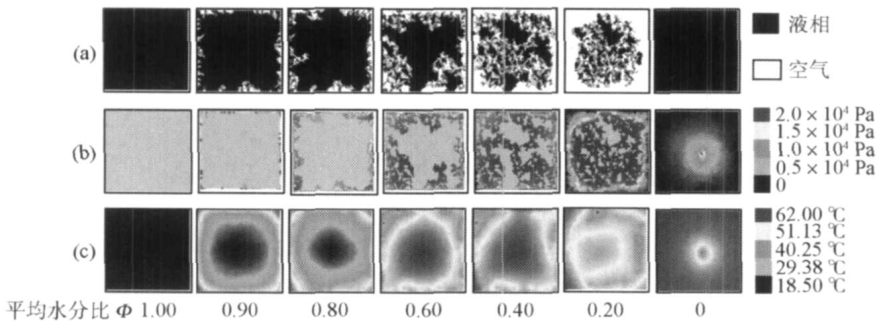


图 6 分形模型(a)和规则模型(b)及试验(c)得到的温度场

Fig. 6 Temperature field comparison of simulation and experiment

图 7 和 8 分别示出采用分形模型和规则模型模拟得到的湿分场、蒸气压力和温度场。可见,蒸气压力场中蒸发前沿处颜色变化大,说明该处蒸气压力梯度较大。蒸气压梯度较高时,蒸发速率较大。采用传统的连续介质方法模拟时,由于假设模型结构均匀,因此某点的蒸气压力值只与该点位置有关,

在模型各边界传热条件相同的情况下,必然形成中间高、四周低的对称的,规则的蒸气压力场。这种蒸气压力场中压力梯度也是对称、规则的。这种情况下干燥前沿将整齐地由外向里推进,因此模型任意时刻的相分布都是均匀的,也不会出现湿斑和不规则干燥前沿(这与实际干燥过程是不相符的)。



湿分场中色泽越浓,湿分越大;蒸气压力场中,灰色表示液相。图 8 同

图 7 分形模型得到的湿分场(a)、蒸气压力场(b)和温度场(c)

Fig. 7 Moisture, vapor-pressure, and temperature fields of fractal network model

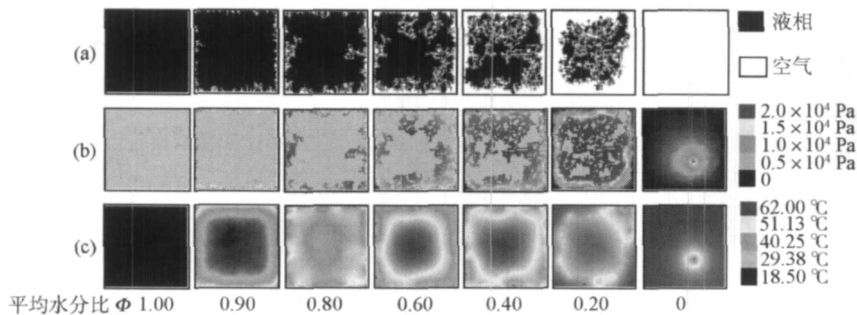


图 8 规则模型得到的湿分场(a)、蒸气压力场(b)和温度场(c)

Fig. 8 Moisture, vapor-pressute, and temperature fields of regular network model

与连续介质方法不同,分形模型和规则模型都考虑了模型结构的不均匀性(喉径不一致或模型孔道网络拓扑结构不规则)。干燥过程中,这种不均匀

性导致了相分布的不均匀性。例如,液相内部毛细流的作用使得某些离干燥前沿较远,所在区域蒸气压力梯度较小,但毛细力较小的喉道却率先干燥。

这将导致干燥前沿向液相区域局部突进, 形成不规则干燥前沿, 并将中心连通液相区域逐渐分割成许多大小不一的液团, 即湿斑(图 7(a) 和图 8(a))。

2.2 多孔介质结构参数对干燥过程影响的模拟分析

分形模型的一大优势就是能够将多孔介质微观结构特性对干燥过程的影响纳入考察范围。本研究分别针对喉径分布、孔隙分形维数 2 个参数进行模拟分析, 在针对某个参数模拟的过程中所采用的其他未说明参数均与 1.2 中叙述的试验条件相同。

2.2.1 喉径分布的影响

模拟时采用的喉径分布曲线见图 9, 另有一种同一喉径 ($d = 0.7 \text{ mm}$) 的类型。由模拟得到的干燥曲线(图 10)可见, 喉径分布对干燥时间有显著的影响。实际物料分布的干燥时

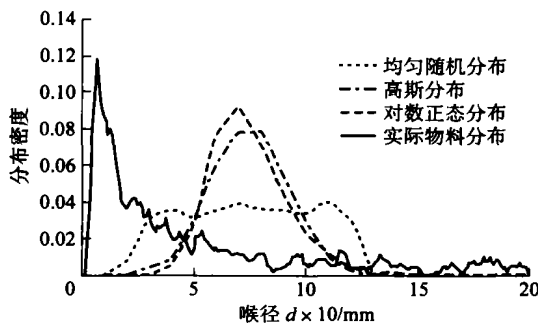


图 9 模型采用的喉径分布曲线

Fig. 9 Different throat size distribution curves

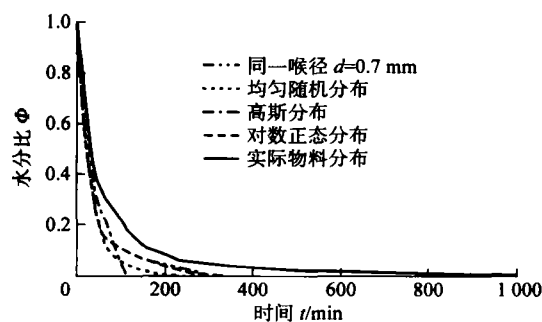


图 10 不同喉径分布模型模拟得到的干燥曲线

Fig. 10 Drying curves of the model with a different throat size distribution

间最长, 正态分布和对数正态分布其次, 均匀随机分布干燥时间较短, 而喉径相同的干燥时间最短, 约只为实际物料分布的 $1/7$ 。原因在于: 不同喉径分布的模型喉径不均匀程度有所不同, 当模型中喉径差别较大, 喉径分布不均匀程度较强时, 模型孔道网络的连通性降低, 使得模型内的湿分通过气相扩散向外传递的难度增大, 模型整体传质速率降低, 因而干燥速率较低。结合各模型喉径分布特点, 实际物料喉径分布的不均匀程度最强, 因此干燥时间最长;

正态分布和对数正态分布喉径不均匀程度较强, 因此干燥时间较长; 喉径均匀随机分布模型干燥时间较短, 而同一喉径模型的干燥时间最短。

2.2.2 孔隙分形维数的影响

采用孔隙分形维数分别为 1.708 4、1.716 7 和 1.780 3, 即剖分数分别为 $[6, 6]$ 、 $[7, 7]$ 和 $[8, 8]$ 模拟得到的干燥曲线见图 11。

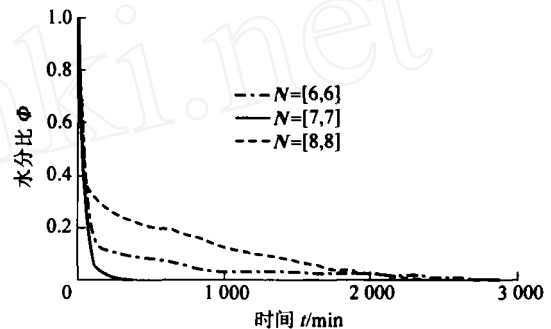


图 11 不同孔隙分维数模拟得到的干燥曲线

Fig. 11 Drying curves of the model with a different pore fractal dimension

分维数反映了模型结构的复杂程度, 分维不同, 模型拓扑结构也不相同。而不同拓扑结构对模型的干燥特性有重要影响。从图 11 可以看出, 模型剖分数不同, 模拟得到的干燥曲线差别很大。剖分数为 $[6, 6]$ 时的干燥时间最长, $[7, 7]$ 时时间最短。总的来说, 从干燥曲线中无法看出孔隙分维大小与干燥时间具有确定关系。

2.3 稳态和非稳态传热过程模拟分析

在干燥模拟中, 普遍认为多孔介质的传热可看作是准稳态过程^[13], 但本研究的模拟结果表明实际情况并非总是如此。模拟过程中, 模型采用 3 级分形, 剖分数 $N = [7, 7, 7]$, 其他未说明参数条件均与 1.2 中叙述的试验条件相同。

由图 12(a) 可以看出, 稳态与非稳态传热模拟得到的干燥时间差别较大, 非稳态传热的干燥时间更长。由图 12(b) 可知, 非稳态传热时, 温度从干燥前的初始温度上升, 升温速度随水分比的减小而减小, 当水分比小于 0.5 时, 温度曲线较为平缓, 最后达到热风温度。这与试验温度曲线变化趋势一致。稳态传热时, 干燥一开始, 温度上下振荡, 振幅最大为 15°C 。当水分比小于 0.9 时, 温度稳定于 57°C ; 此后温度缓慢上升; 当水分比小于 0.5 时, 升温速率有所增大。根据温度曲线不难解释稳态与非稳态传热模拟得到的干燥时间存在差异的原因: 稳态传热时, 模型从一开始就保持较高的平均温度(振荡的中值接近热风温度), 因而干燥速率较大。

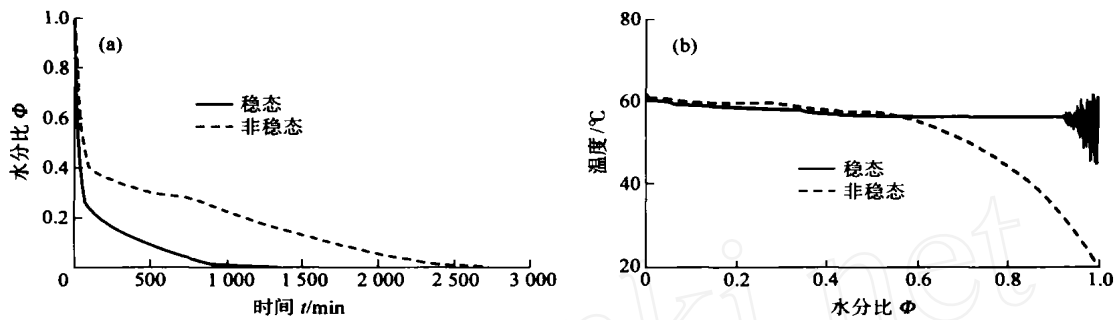


图 12 稳态和非稳态传热模拟得到的干燥曲线(a)和温度曲线(b)

Fig. 12 Drying and temperature curves comparison of steady and unsteady state heat transfer

由稳态与非稳态传热的模拟结果比较可知:对于热风干燥模拟,非稳态传热的模拟结果更符合实际。稳态传热时,能量方程中无非稳态项,某一时刻的温度场与上一时刻的温度场无关。对于非常缓慢的干燥过程而言,或许可以作此稳态假设,但对于干燥速率并非很缓慢的热风干燥过程,假设其为稳态传热则会导致模拟与实际过程不符。

3 结 论

1) 笔者建立的分形孔道网络模型^[1]可有效模拟自然多孔介质的干燥过程。采用该模型能较好地解释目前常用干燥理论不能解释的“湿斑”和“不规则干燥前沿”现象。分形孔道网络模型的模拟结果较规则孔道网络模型更接近试验结果,原因在于分形孔道网络考虑了自然多孔介质中客观存在的孔隙分形特征,而规则孔道网络进行了规则化处理,不可避免的会丢失许多多孔介质内部微观结构特征和传递特性。

2) 多孔介质的喉径分布对干燥有显著的影响,喉径分布不均匀程度越高,干燥时间越长;对于热风干燥而言,非稳态传热计算的模拟结果更符合实际;孔隙分形维数的大小与干燥时间无确定关系。

参 考 文 献

[1] 袁越锦, 杨彬彬, 焦阳, 等. 多孔介质干燥过程分形孔道网络模型与模拟: 模型建立[J]. 中国农业大学学报, 2007, 12(3): 65-69
 [2] Prat M. Percolation model of drying under isothermal conditions in porous media[J]. Int J Mult Flow, 1993, 19: 691-704
 [3] Laurindo J B, Prat M. Numerical and experimental network study of evaporation in capillary porous media, drying rates[J]. Chem Eng Sci, 1998, 53(12): 2257-2269

[4] Laurindo J B, Prat M. Numerical and experimental network study of evaporation in capillary porous media, phase distributions[J]. Chem Eng Sci, 1996, 51(23): 5171-5185
 [5] Prat M. Isothermal drying of non-hygroscopic capillary porous materials as an invasion percolation process[J]. Int J Mult Flow, 1995, 21: 875-892
 [6] Yiotis A G, Stubos A K, Yortsos Y C, et al. A pore network model for drying processes in porous media[C]. In Proceedings of 2001 ASME, International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York: 2001: 53-60
 [7] Prat M. Recent advances in pore-scale models for drying of porous media[C]. In IDS2000, Proceedings of the 12th International Drying Symposium. Netherlands: 2000:366
 [8] Segura L A, Toledo P G. Pore-level modeling of isothermal drying of pore networks accounting for evaporation, viscous flow and shrinking[J]. Int J Drying Technology, 2005, 23: 2007-2019
 [9] Jacob B. Dynamics of Fluids in Porous Media[M]. New York: American Elsevier Publishing Company, INC. 1972
 [10] Schrodinger A E. 多孔介质中的渗流物理[M]. 王鸿勋, 译. 北京:石油工业出版社, 1982
 [11] Pauli G J, Scheying C, M ügge A, et al. Determination of the pore widths of highly porous materials with NMR microscopy[J]. Fresenius J Anal Chem, 1997, 357: 508-513
 [12] 杨彬彬. 多孔介质干燥分形孔道网络模拟及试验研究[D]. 北京:中国农业大学, 2006
 [13] Plourde F, Prat M. Pore network simulations of drying of capillary porous media, Influence of thermal gradients[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46: 1293-1307