

仓内谷物通风干燥孔道网络数值模拟与验证^{*}

袁越锦¹ 徐英英¹ 刘相东²

(1. 陕西科技大学机电工程学院, 西安 710021; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

【摘要】 利用前已建立的仓内谷物通风干燥孔道网络模型,对玉米热风干燥实验过程进行了数值模拟,并将模拟结果与实验数据进行了比较。结果表明:该模型可有效模拟谷物的干燥过程;干燥时玉米颗粒平均温度与玉米堆孔隙气相平均温度之间存在明显的差别,后者始终比前者温度要高,故以往将谷物与孔隙气相温度不加区分,视为同一值的做法是不妥的;配位数对干燥的影响十分显著,其值越大,物料干燥越快;当物料含杂、配位数值较小时,干燥仓内会出现“湿团”现象。

关键词: 谷物 干燥 模拟 孔道网络

中图分类号: TQ021.4 文献标识码: A

Pore Network Numerical Simulation and Experiment on Drying of Corn Material in Bin

Yuan Yuejin¹ Xu Yingying¹ Liu Xiangdong²

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China

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

Abstract

In order to validate the model of reference, a corn drying experimental study was conducted, and numerical simulation was carried out under the same environmental condition. The experiment and simulation results indicated that the pore network model could explain the drying process of corn material well. There was a significant difference between the temperature of corn and of pore air, hence it was unreasonable to confuse the two kinds of temperature. The pore coordination number had a great effect on the drying process. The greater the pore coordination number was, the faster the material was dried. When the pore coordination number was small, a wet cluster phenomenon appeared in the drying bin.

Key words Corn, Drying, Simulation, Pore network

引言

以已有研究成果^[1~8]为基础,针对谷物堆在不同尺度下孔隙内热质传递机理的差别,文献[9]建立了考虑颗粒自身热质传递、孔隙气相对流、温度梯度和孔道结构特征等因素对干燥过程影响的仓内谷物双尺度孔道网络干燥模型。本研究以玉米为模拟研究对象,进行热风干燥实验验证,并模拟分析不同谷

物堆孔道结构参数对干燥过程的影响。

1 实验材料与方法

实验前,将品种、产地相同的同批次玉米洗净,去除杂质、干瘪等不良成分,经调质处理获得均匀一致的含水率。实验时,将制备好的玉米置于一干燥实验仓中进行热风干燥。干燥仓为厚约0.1 m的长方腔体(图1),仓底部中心处开一进风口,可安装各种

收稿日期: 2008-08-20 修回日期: 2008-12-17

^{*} 国家自然科学基金资助项目(50676104)和陕西科技大学科研启动基金资助项目(BJ07-06)

作者简介: 袁越锦,副教授,博士,主要从事干燥技术及设备研究,E-mail: yuanyj@sust.edu.cn

通讯作者: 刘相东,教授,博士生导师,主要从事干燥技术及设备研究,E-mail: xdliu@cau.edu.cn

形状的风网,如三角形、半弧形、矩形风网等;在正面仓壁上开14个测量孔;顶部敞开,与外界环境空气接触。干燥仓进风口热风温度 40.0°C ,热风相对湿度 6.86% ,热风静压 58.8 Pa ,环境温度 18.6°C ;玉米颗粒初始温度 16.0°C ,玉米颗粒初始干基含水率 43.88% 。

干燥过程中测量仓内玉米含水率分布、温度分布与玉米堆中孔隙气相的湿度、温度分布。测量时每隔一段时间拔开各测量孔的橡胶塞,首先用

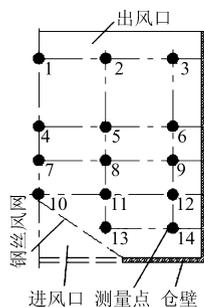


图1 干燥仓及仓内测量点分布

Fig.1 Drying bin and distribution of measuring points

表1 模拟过程中采用的参数值

Tab.1 Main parameters for simulation

孔隙率 ϵ	容积密度 $\rho_b/\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	玉米颗粒密度 $\rho_s/\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	颗粒绝干密度 $\rho_g/\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	孔隙个数面密度 $W/\text{个}\cdot\text{m}^{-2}$	骨架颗粒个数面密度 $U/\text{个}\cdot\text{m}^{-2}$	孔隙配位数 \bar{c}
0.465 8	0.672 6	1.444 1	1.004	17 504	17 289	4

3 结果分析与讨论

3.1 玉米干燥曲线和温度曲线

图2为玉米干燥曲线模拟与实验结果比较。从图中可以看出,在干燥开始阶段仓内玉米平均含水率下降较快,到干燥结束阶段(900 min以后),曲线趋于平缓,表明干燥速率下降,玉米含水率即将达到平衡含水率。仓内玉米平均含水率的模拟与实验变化曲线吻合较好,其最大相对误差约为 8.2% 。

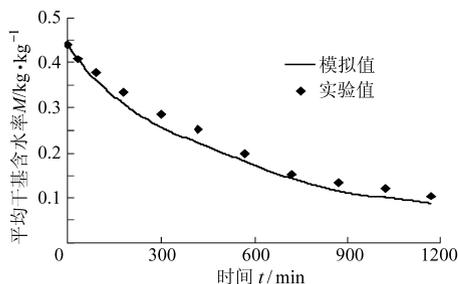


图2 玉米干燥曲线模拟与实验结果比较

Fig.2 Drying curves comparison of experiment and simulation

图3为温度曲线模拟与实验结果比较。从图中可以看出,无论是仓内玉米平均温度变化曲线还是玉米堆孔隙气相平均温度变化曲线,在干燥开始阶段,温度上升很快,其后随着干燥的进行,温度平稳上升,模拟与实验曲线变化趋势一致。其次还可发现,玉米平均温度与孔隙气相平均温度之间存在

Raynger-ST6L型红外测温仪测量各点玉米颗粒的表面温度;然后用扦样器从各测量孔中取出玉米样品14份,并采用烘干法测得各样品的含水率。仓内玉米堆中孔隙气相的温、湿度由埋入各测量点的温、湿度传感器测量。

2 计算机模拟

根据文献[8]中建立的孔道网络干燥模型,本文采用VC++与Matlab语言联合编程开发模拟程序。方程组采用有限差分法求解。干燥模拟过程中,玉米颗粒水分扩散系数 $D = 0.000\ 151\ 3 \cdot \exp((0.045T - 5.74)M - 2\ 513/T) \text{ m}^2/\text{s}$,式中 T 为玉米温度(K), M 为玉米干基含水率(kg/kg);玉米比热容 $c_g = (1.47 + 0.036M) \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ [9]。其他需要的主要参数值如表1所示。

明显的差别,后者始终比前者温度高,特别是在干燥开始阶段,玉米与其周围气流还远未达到湿-热动力学平衡,二者温度相差约 3 K 。这表明:以往将谷物与孔隙气相温度不加区分,视为同一值的做法是不妥的。

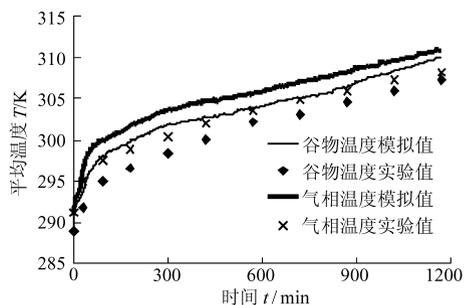


图3 温度曲线模拟与实验结果比较

Fig.3 Temperature curves comparison of simulation and experiment

3.2 含水率分布和温度分布

图4为模拟得到的仓内玉米颗粒含水率分布和温度分布,图中每个颜色点代表一个一定大小的玉米颗粒。从图4a可以看出,玉米含水率分布呈上侧部大、下中部小的趋势。在干燥开始阶段($t = 90\text{ min}$ 左右),靠近进风口处的玉米颗粒干燥较快,含水率明显降低,其他区域干燥较慢,含水率降低不明显,特别是上侧部区域,含水率几乎没下降。到干燥中期($t = 570\text{ min}$ 左右),仓内玉米水分已被干燥了大半部分,靠近进风口处的小颗粒玉米已干燥完

毕,接近平衡含水率,中部区域的玉米也已呈半干状态,只有上侧小角部区域玉米还较湿。到干燥结束阶段($t = 1\ 170\ \text{min}$ 左右),仓内大部分玉米已干燥完毕,只有一些颗粒较大或靠近上侧小角部区域的玉米尚未完全干燥。总之,干燥过程中仓内玉米颗粒含水率与该颗粒在仓中所处位置密切相关,其次颗粒本身的大小也影响干燥的快慢。

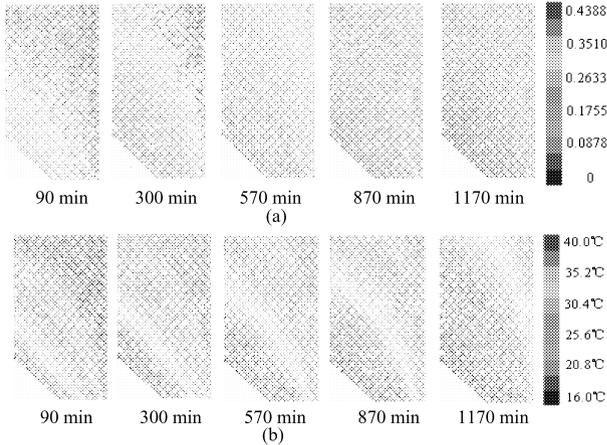


图 4 仓内玉米颗粒含水率分布和温度分布模拟结果

Fig. 4 Moisture and temperature distributions of the simulation for corn drying
(a) 含水率分布 (b) 温度分布

从图 4b 可以看出,玉米颗粒温度分布也具有类似的规律,温度以进风口为出发点,向上侧部区域辐射性单调减小。干燥开始时,进风口处的玉米温度上升很快,近似达到热风温度,而远端上侧角部区域玉米温度几乎没变化,中间区域则呈单调递减的规律。其后随着干燥的进行,进风口处的玉米高温区域扩大,上侧角部低温区域缩小,中间区域整体上移。干燥结束时,仓内大部分区域玉米温度已接近热风温度。总之,干燥过程中仓内玉米颗粒温度高低与该颗粒在仓中所处位置密切相关,与含水率分布不同的是,颗粒本身的大小几乎不影响温度分布。

为便于将以上模拟结果与实验结果进行对应比较验证分析,本研究对模拟得到的颗粒含水率和温度分布进行了区域平均化处理,即对应实验各测量点(图 1)的控制容积区域,将模拟值进行代数平均。图 5、6 分别为仓内玉米颗粒含水率分布和温度分布模拟与实验结果的比较。

从图 5 可以看出,模拟与实验结果都较好地反映了仓内玉米颗粒含水率的分布特征:含水率呈现上侧部大、下中部小的趋势。在干燥开始阶段,模拟与实验分布几乎相同;其后随着干燥的进行,模拟得到的含水率分布比实验结果稍低,这主要是因为建立的模型没有考虑实验过程中仓壁热损失等因素的影响。

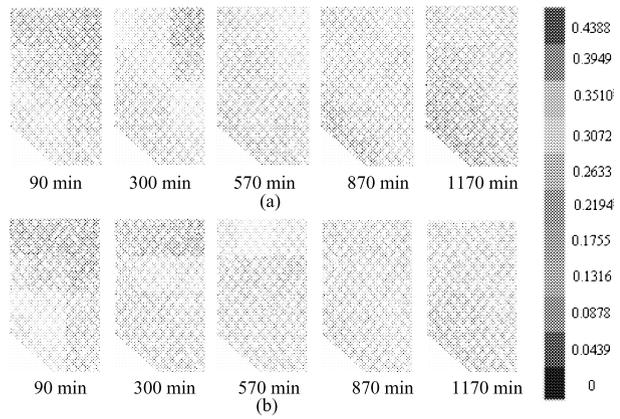


图 5 仓内玉米颗粒含水率分布模拟与实验结果的比较

Fig. 5 Moisture distribution comparison of simulation and experiment
(a) 模拟 (b) 实验

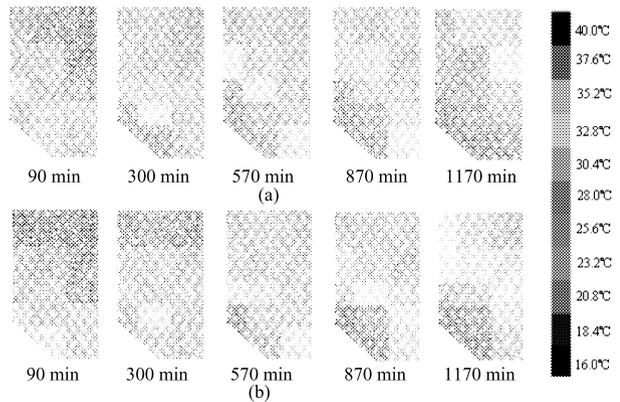


图 6 仓内玉米颗粒温度分布模拟与实验结果的比较

Fig. 6 Temperature distribution comparison of simulation and experiment
(a) 模拟 (b) 实验

从图 6 可以看出,温度分布的模拟结果与实验结果基本一致,仓内玉米温度上侧部较低、下中部进风口处较高。总的来看,模拟得到的温度比实验结果偏高,其原因同上。

3.3 配位数与“湿团”现象的模拟分析

将配位数值分别设定为 3.0、3.5、4.0,其余参数同实验值,进行干燥模拟,得到不同配位数下谷物干燥曲线如图 7 所示,谷物温度曲线如图 8 所示。

由图 7 可以看出,孔隙配位数对热风干燥过程中物料平均含水率的变化有较大影响,配位数越大,干燥越快,达到相同含水率干燥所需时间越短,反之亦反。其原因在于,配位数越大的物料孔隙结构连通性越好,热空气越易在孔隙中流动和均匀铺开,干燥进行得越快。

从图 8 可以看出,孔隙配位数对干燥过程中物料温度的变化也有一定影响。在干燥开始阶段,配位数越大的物料温度上升越快,但到干燥中后期,配位数越小的物料温度反而要稍高一些。这主要是因

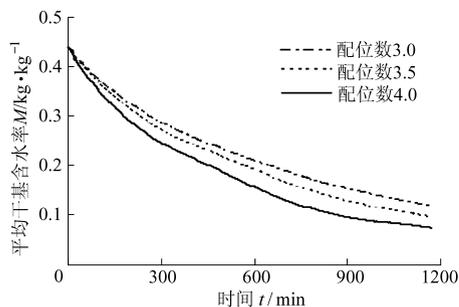


图7 不同配位数下谷物干燥曲线

Fig.7 Drying curves of simulation for different coordination number

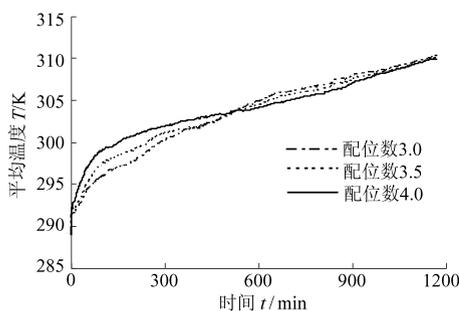


图8 不同配位数下谷物温度曲线

Fig.8 Temperature curves of simulation for different coordination number

为当物料温度上升得较高与热风温度相差不大时,干燥水分蒸发吸热成为影响物料温度高低的主要因素,热风传递给物料热量这一因素作用减弱,而此时期大孔隙配位数的物料干燥较快,单位时间内蒸发水分吸收的热量较多。干燥快结束时,物料内水分蒸发已很少,温度都近似接近于热风温度。

“湿团”现象在日常干燥过程中经常被观察到^[10]。对于谷物,若物料不净,孔隙中含有较多的灰分粘尘等杂质,则干燥过程中容易出现“湿团”现象。如图9a所示,当配位数为3.5时,干燥仓内有些地方的颗粒很难干燥,比周围正常颗粒干燥明显滞后,出现了“湿点”;配位数为3.0时,情况更明显,干燥仓内出现了“湿团”现象,即有成团的物料颗粒水明显偏高,不易被干燥。

以往人们对“湿团”现象发生的机理不是很清楚,传统的连续介质干燥理论也无法作出理论解释。就谷物热风干燥而言,出现该现象的主要原因是:物料中的灰分粘尘等杂质降低了多孔介质的孔隙连

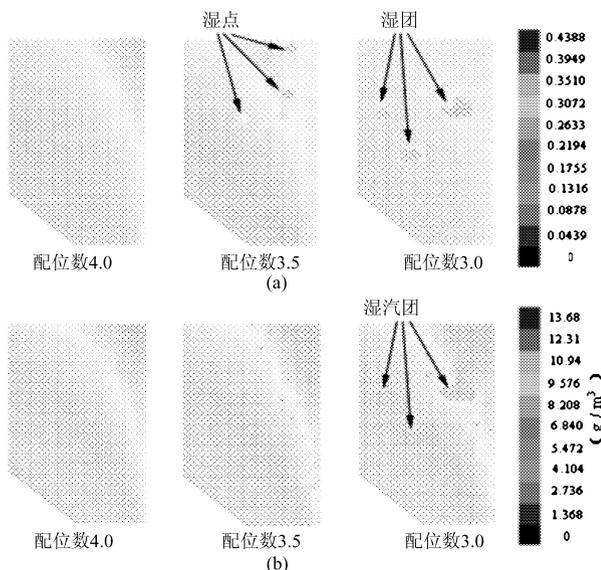


图9 不同配位数下含水率分布与孔隙蒸气质量浓度分布模拟结果

Fig.9 Moisture and vapor density distribution of simulation for different coordination number
(a) 含水率分布 (b) 孔隙蒸气质量浓度分布

通性,即配位数变小,热空气在孔隙中某些地方受阻不易流动,该处颗粒释放出来的蒸气较难被带走,形成“湿团”(图9b),这样该处的平衡含水率将大大高于正常值,自然该处的颗粒也就很难被干燥。

4 结束语

建立的仓内谷物孔道网络干燥模型可有效模拟谷物干燥过程,模拟得到的物料干燥曲线和温度曲线反映了玉米干燥过程的实际情况,含水率、温度分布模拟值与实验值一致。该模型优于传统的谷物干燥模型,可有效揭示谷物粮堆结构、尺度以及分布等对干燥过程的影响。模型虽是以玉米为研究对象而建立的,但对大部分农产品颗粒物料的热风干燥过程都适用。

干燥过程中,玉米颗粒平均温度与玉米堆孔隙气相平均温度之间存在明显的差别,后者始终比前者温度要高,故以往将谷物与孔隙气相温度不加区分,视为同一值的做法是不妥的。此外,配位数对干燥过程有重大影响,配位数越大,物料干燥越快;当物料孔隙内含有杂质,配位数值较小时,干燥仓内会出现明显的“湿团”现象。

参 考 文 献

- 1 Lenormand R, Touboul E, Zarcone C. Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1988, 189: 165~187.
- 2 Laurindo J B, Prat M. Numerical and experimental network study of evaporation in capillary porous media, drying rates[J]. Chemical Engineering Science, 1998, 53(12): 2 257~2 269.
- 3 Yiotis A G, Stubos A K, Yortsos Y C, et al. A pore network model for drying processes in porous media[C]//Proceedings of

- 2001 ASME, International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York, 2001: 53~60.
- 4 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(7): 1 293~1 307.
- 5 Segura L A, Toledo P G. Pore-level modeling of isothermal drying of pore networks accounting for evaporation, viscous flow and shrinking[J]. Drying Technology, 2005, 23(9~11): 2 007~2 019.
- 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, 38(7): 62~66. Yuan Yuejin, Yang Binbin, Liu Xiangdong. Pore network simulation of slow isothermal drying of porous media [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(7): 62~66. (in Chinese)
- 7 Surasani V K, Metzger T, Tsotsas E. Consideration of heat transfer in pore network modeling of convective drying[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(9~10): 2 506~2 518.
- 8 刘雪强, 陈晓光, 吴文福. 基于相似理论的谷物干燥过程经验模型[J]. 农业机械学报, 2007, 38(9): 75~77, 81. Liu Xueqiang, Chen Xiaoguang, Wu Wenfu. Empirical model for grain drying process based on similarity theory [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(9): 75~77, 81. (in Chinese)
- 9 袁越锦, 徐英英, 刘相东. 仓内谷物通风干燥过程的孔道网络模型[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 115~118. Yuan Yuejin, Xu Yingying, Liu Xiangdong. Pore network model for drying of corn material in bin [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 115~118. (in Chinese)
- 10 曹崇文, 朱文学. 农产品干燥工艺过程的计算机模拟[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- 11 Prat M. Recent advances in pore-scale models for drying of porous media[J]. Chemical Engineering Journal, 2002, 86(1~2): 153~164.
-

(上接第 77 页)

- 9 罗金耀. 节水灌溉技术指标与综合评价理论及应用研究[D]. 武汉: 武汉水利电力大学, 1997. Luo Jinyao. Study of techno-index and theory of comprehensive evaluation and application in water saving irrigation [D]. Wuhan: Wuhan University of Hydraulic & Electric Engineering, 1997. (in Chinese)
- 10 许一飞, Francis TESTA. 软管卷盘式自动喷灌机特性分析[J]. 节水灌溉, 1996(3): 39~45. Xu Yifei, Francis TESTA. Analysis on characteristic of hose capstan type self-motion sprinkler [J]. Water Saving Irrigation, 1996(3): 39~45. (in Chinese)
- 11 仵峰, 范永申, 宰松梅, 等. 低压可调幅式喷灌机研制[J]. 节水灌溉, 2004(4): 16~17. Wu Feng, Fan Yongshen, Zai Songmei, et al. Manufacture of sprinkling irrigation machine with low water pressure and adjustable spraying range [J]. Water Saving Irrigation, 2004(4): 16~17. (in Chinese)
- 12 American Society of Agricultural Engineers. ANSI/ASAE S436.1. Test procedure for determining the uniformity of water distribution of center pivot, corner pivot, and moving lateral irrigation machines equipped with spray or sprinkler nozzles [S]. 2001.