



不同送风湿度下 储粮机械通风效果的数值模拟研究*

曲安迪¹ 王远成¹ 魏 雷² 曹 阳² 石天玉² 尉尧方¹

(1 山东建筑大学热能工程学院 250101)

(2 国家粮食局科学研究院 100037)

摘 要 以多孔介质传热传质、计算流体动力学理论为基础,采用数值模拟方法,保持其他参数不变,改变送风的湿度,探究就仓通风时,送风相对湿度分别为 55%、60%、65% 的条件下,0.3 m、2.1 m、3.7 m 和 5.5 m 这四个粮层的温度和水分含量随时间的变化情况,得出送风湿度对粮堆各层温度和水分含量的影响,研究结果可以为储粮通风操作提供参考。

关键词 就仓通风 送风湿度 不同粮层 温度 水分

粮食是典型的多孔介质^[1],在其储藏过程中,对粮堆进行强制通风,可以干燥或冷却粮堆,从而调节粮堆各层的温度和水分含量。而相关的研究表明,精确预测和控制粮堆内的温度及水分含量是保证粮食高品质储藏的关键。因为粮堆内的温度和水分与粮堆的干物质损失、劣变速率和虫害、霉菌的控制有着密切的关联。对粮堆进行强制通风时,采取不同的送风湿度,会对粮堆内部的温度和水分产生不同的影响。因此,研究不同的送风湿度对粮堆温度和湿度的影响,对于保证粮食品质、降低储粮害虫和微生物的危害以及提高粮库的经济效益有着极为重要的意义。

迄今为止,相关的仓储研究人员进行了大量的测试工作,同时也设计出了许多的数学模型对通风过程中粮堆的热湿环境进行预测,这些模型能够较为精确地分析出平房仓粮堆的温度和湿度随时间变化的规律。Thorpe^[2]采用数值模拟的方法建立了通风条件下粮堆内部热湿耦合传递的模型,该模型能很好地反映粮堆内部温度和水分分布的特点。吕宗旺等^[3]利用 CFD 的相关原理进行了粮仓降温模拟

方面的研究。王远成等^[4-6]对大型房式仓地上笼通风系统的热湿耦合传递模型进行了一系列的数值模拟研究。张晓静等^[7]对静态粮堆通风的数学模型进行了相关的数值模拟研究。

然而,以往的研究大多集中于通风过程中风量和风温对通风效果的影响,较少关注送风湿度的影响。本文借助数值模拟的方法,模拟分析了相同通风量时三种送风湿度下对储粮垂直通风时,粮仓内各个粮层高度上的温度、水分变化规律,以及各种送风湿度下的通风效果,为储粮工作者提供理论依据。

1 平房仓物理模型

1.1 物理模型

本文的研究对象为大型平房仓,粮仓跨度 21 m,高 10 m,粮堆高 6 m,地上通风笼直径为 0.25 m,长度为 20 m。本文模拟的粮仓模型采用垂直上行式通风。

1.2 参数设置

该平房仓的吨粮通风量为 10 ($\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{t}$),通风

* 基金项目:国家重点专项(2016YFD0400100,2016YFD0401002);国家粮食公益专项(201513001);国家自然科学基金项目资助(51276102)

通讯地址:山东省济南市临港开发区凤鸣路 1000 号

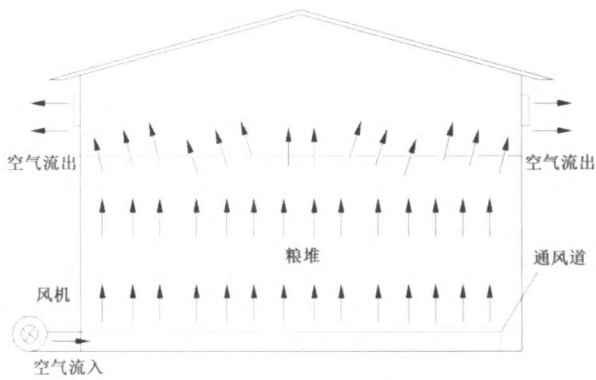


图 1 房式仓垂直上行通风示意图

时间为 3 d。控制其他的参数值不变，三种工况下的送风相对湿度分别为 55%、60% 和 65%。其他的通风参数见表 1。

表 1 三种送风湿度工况下的初始参数

工况类型	粮食初温(℃)	粮食初始水分(%)	进风温度(℃)	进风相对湿度(%)	吨粮通风量(m³/h·t)
工况一	30	12.75	22	55	10
工况二	30	12.75	22	60	10
工况三	30	12.75	22	65	10

2 数学模型

对粮堆进行通风的过程，其本质就是由小麦粮粒组成的多孔介质与周围的空气进行热湿交换和传热传质的过程。根据这一原理，可以通过多孔介质的质量守恒方程、空气流动的 N - S 方程和多孔介质的 Darcy - Brinkman 方程、水汽迁移方程、对流传热方程和干燥速率方程来预测和调控粮堆内的热湿环境参数。

2.1 质量守恒方程

$$\frac{\partial (\varepsilon \rho_a)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a u) = 0 \tag{1}$$

式中：ε 为孔隙率，ρ_a 是空气的密度，t 是时间，u 是气流的表观速度或达西速度。

2.2 N - S 方程和 Darcy - Brinkman 方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u = \frac{\nabla p}{\rho_a} + \nabla \cdot \left(\frac{\mu}{\rho_a} \nabla u \right) + S_i \tag{2}$$

式中：u 是气流的表观速度或达西速度，t 是时间，ρ_a 是空气密度，∇p 为压力差，S_i 为粮堆阻力项。

2.3 水汽迁移方程

$$\frac{\partial (\varepsilon \rho_a w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a u) = \nabla \cdot (\rho_a D_{eff} \nabla w) + S_w \tag{3}$$

式中：w 是粮粒间空气的含湿量，D_{eff} 是粮粒间空气中的水分通过粮堆的有效扩散系数，S_w 是粮粒吸湿或解吸湿的源项。

2.4 对流传热方程

$$\rho_a \varepsilon c_a + \rho_a (1 - \varepsilon) (c_g + c_w W) \frac{\partial T}{\partial t} + c_a \nabla \cdot (\rho_a u T) = k_{eff} \nabla^2 T + h_s (1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial W}{\partial t} \tag{4}$$

式中：c_a、c_g、c_w 分别是空气的比热、粮食的比热和水的比热，W 是粮食的含湿量，k_{eff} 是粮堆的有效导热系数，为 0.157 W/(m²·K)。

h_s (1 - ε) ρ_s $\frac{\partial W}{\partial t}$ 是热源项，即粮粒吸湿或解吸湿而产生的热量。

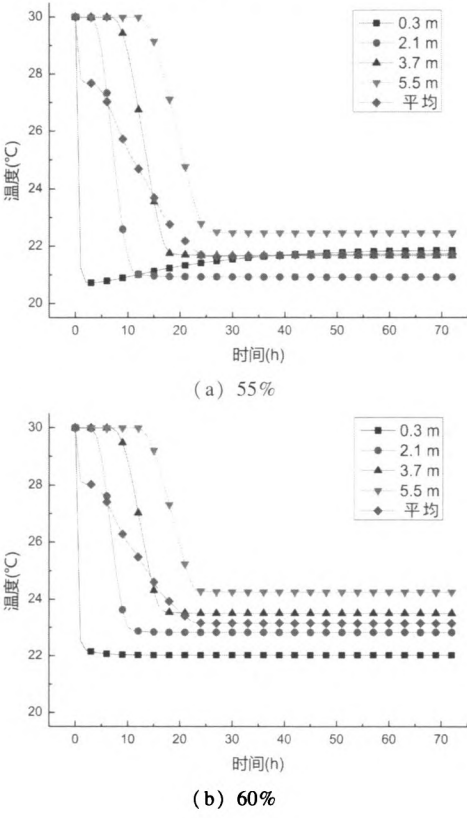
2.5 干燥速率方程

$$\frac{\partial W}{\partial t} = k \cdot (W - W_e) \tag{5}$$

式中：W 是粮粒的含湿量，t 是时间，k 是粮食的干燥速率，W_e 是粮粒中的平衡水分。

3 三种送风湿度下粮堆温度的变化规律

3.1 不同送风湿度时粮堆内各层温度随时间的变化



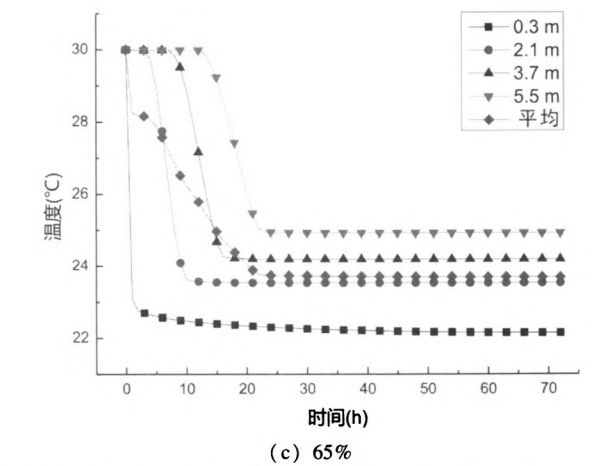


图 2 不同送风湿度时粮堆内各层温度随时间的变化

表 2 不同送风湿度四个粮层的温度稳定值 (单位:℃)

送风湿度 (%)	0.3 m	2.1 m	3.7 m	5.5 m	平均值
55	21.8	20.9	21.7	22.5	21.7
60	22.0	22.8	23.5	24.2	23.1
65	22.1	23.5	24.2	24.9	23.7

通过图 2 可以看出,当粮堆初温为 30℃,通风温度为 22℃时,各层粮堆内部温度都会下降。但是当湿度为 55% 时,在通风口处,温度先是急速下降,然后再缓慢上升,在 60 h 后达到稳定。当湿度为 60% 和 65% 时,温度都会下降。湿度为 65% 时,四个粮层内的温度分别下降到 22.1℃、23.5℃、24.2℃、24.9℃;湿度为 60% 时,四个粮层内的温度分别下降到 22.0℃、22.8℃、23.5℃、24.2℃。可以看出,湿度为 65% 时,温度下降的较少,湿度为 55% 时,温度下降较多。可以得出在通风湿度 55% ~ 65% 内时,通风湿度与下降温度成反比。

3.2 同一粮层在不同送风湿度下的粮堆温度对比研究

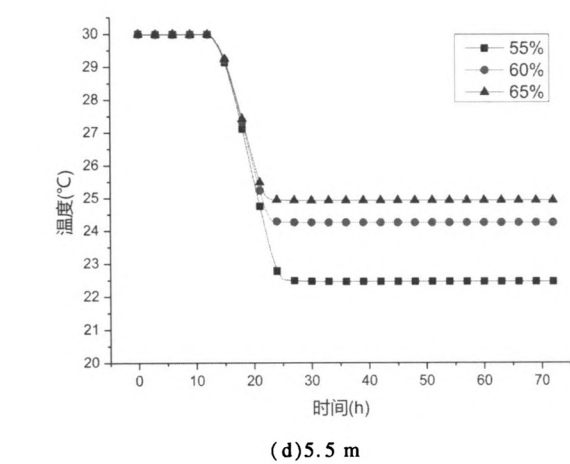
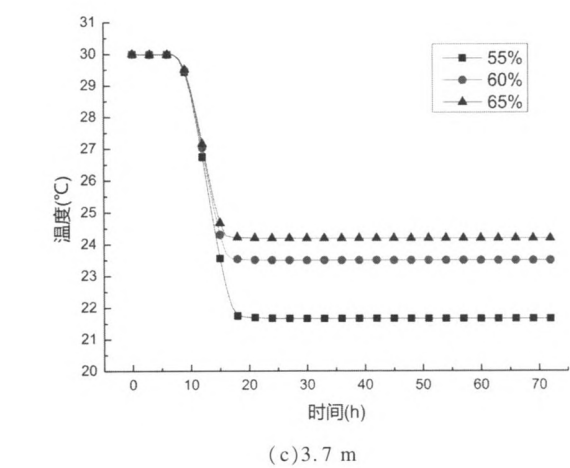
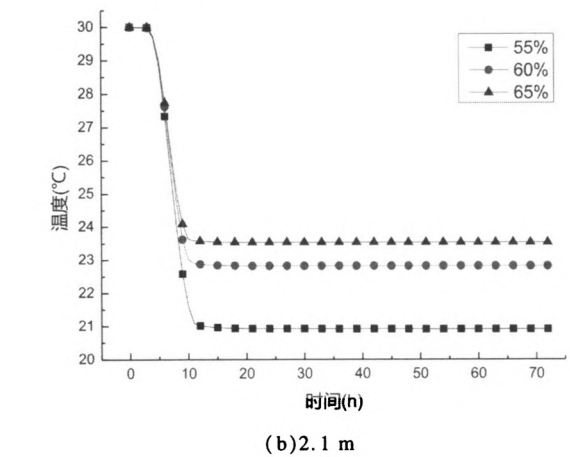
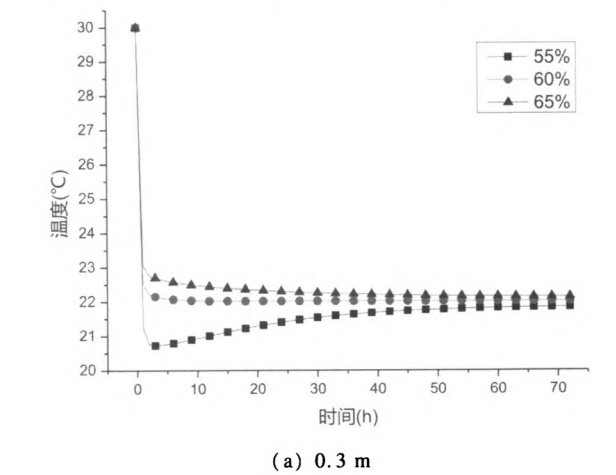


图 3 粮堆各层温度随时间变化对比图

由图 3 可以看出,在送风湿度不同时,达到稳定时的最终温度有所不同,送风湿度越低,达到稳定时的温度越低,送风湿度越高,达到稳定时的温度越高。在 0.3 m 粮层,送风湿度为 65% 时,比送风湿度为 55% 时达到稳定时的湿度高 0.3℃;而粮层为 5.5 m 时,送风湿度为 65% 时的稳定温度比送风湿度为 55% 时高 2.5℃。综合图 2 和图 3 可以看出,即使相同的送风量和温度,由于湿度不同,降

温速率还是有差别的。这也说明，湿度也会影响通风降温效果。

4 三种水分湿度下粮堆水分变化规律

4.1 不同送风湿度时粮堆内各层水分含量随时间的变化

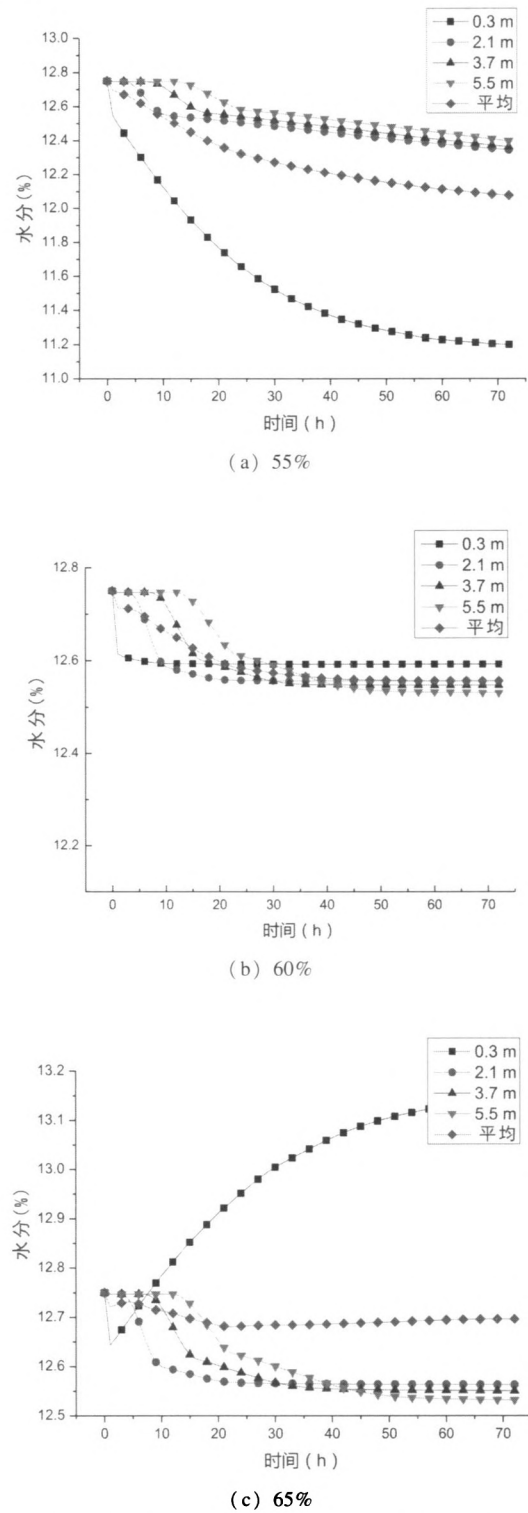


图4 不同送风湿度时粮堆内各层水分含量随时间的变化

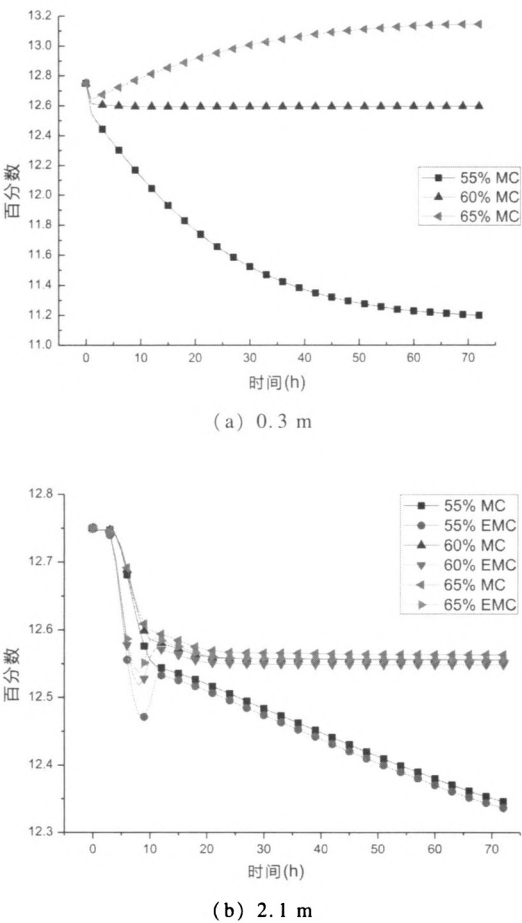
表3 不同送风湿度下四个粮层水分含量的最终稳定值

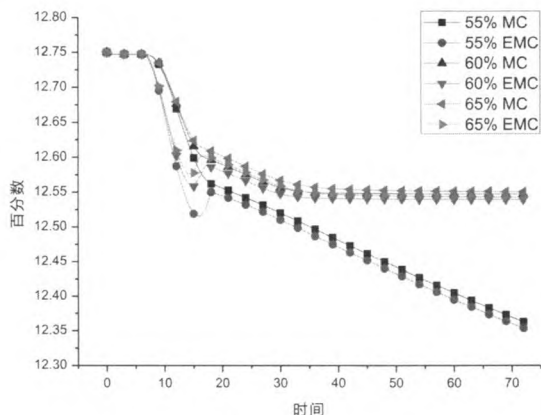
(单位:%)

送风湿度(%)	0.3 m	2.1 m	3.7 m	5.5 m	平均值
55	11.2	12.3	12.4	12.4	12.1
60	12.6	12.6	12.5	12.5	12.6
65	13.1	12.6	12.6	12.5	12.7

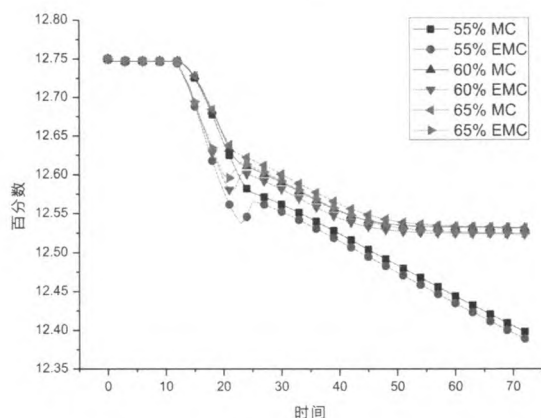
通过图4可以看出，在相同的通风湿度条件下，最底层的水分含量变化对通风湿度的响应较快，在一开始就有显著的变化，最高层的水分含量变化大约出现在15 h之后。在通风湿度为55%时，粮堆的水分含量下降的最为显著，平均水分含量下降了大约0.68%，其中，最底层水分含量下降得最快，下降了约1.5%。而通风湿度为65%时，粮堆的水分含量下降最不明显，平均水分含量下降量很少，不足0.1%，其中上面三层的粮堆水分含量下降均未超过0.3%，并且，最底层粮堆的水分含量还有明显的上升。

4.2 同一粮层在不同送风湿度下的粮堆水分含量对比研究





(c) 3.7 m



(d) 5.5 m

图 5 粮堆各层水分含量随时间变化对比图

通过图 5 可以看出, 在 0.3 m 粮堆处, 送风湿度为 60% 时, 粮堆的水分含量保持不变, 送风湿度为 55% 时, 粮堆水分含量下降较快, 在 60 h 后趋于稳定, 而通风湿度为 65% 时, 粮堆水分含量会有所上升, 48 h 以后粮堆水分含量趋于稳定; 2.1 m 处的粮堆在通风 5 h 后水分含量显著下降, 送风湿度为 60%、65% 时, 通风至 20 h 时, 水分含量会逐渐趋于稳定, 且水分含量相差不是很大; 但送风湿度为 55% 时, 由于湿度较低, 粮堆的水分含量会一直下降; 粮堆在 3.7 m 及 5.5 m 处也会出现类似的现象。可见当送风湿度低于 55% 时, 对粮食的干燥效果比较显著。

不难看出, 在相同的通风量和送风温度下, 进风湿度对粮堆内部的水分会明显的影响, 即空气的相对湿度是决定粮堆通风水分损失的关键因素, 因此, 要避免通风过程中的水分损耗, 就必须选择合适的进风湿度。

5 结论

通过数值模拟与实际相结合, 我们可以看出,

对于初始温度为 30℃ 的粮堆, 不同的送风湿度对于改变粮堆的温度环境有一定的影响, 尤其是在靠近送风口处的粮层, 送风湿度越低, 降温效果越显著, 送风湿度越高, 降温效果则会比较差。但是, 相同粮层温度的响应时间与送风湿度的关系极小, 比如, 尽管送风湿度有所不同, 靠近送风口处的温度很快就开始下降, 2.1 m 处的粮层都是在第 4 h 后开始下降, 3.7 m 处的粮层在 10 h 后开始下降, 而 5.5 m 处的粮层在 16 h 后开始下降。

对于初始水分含量为 12.75% 的粮堆, 不同的送风湿度对于改变粮堆各层的水分含量影响比较显著, 尤其是送风湿度越低, 粮堆的平均水分含量下降越快, 当送风湿度达到 65% 时, 粮堆的平均水分含量下降得就很慢了, 基本呈不变的趋势。而粮堆各层湿度的响应时间与温度的响应时间基本相似。

参 考 文 献

- 1 王远成, 魏雷, 刘伟, 等. 储粮保水降温通风关键技术研究 [J]. 中国粮油学报, 2008, 23 (5): 141~145
- 2 Thorpe G R. The application of computational fluid dynamics codes to simulate heat and moisture transfer in stored grains [J]. Journal of Stored Products Research, 2008, 44: 21~31
- 3 吕宗旺, 冯黎明, 孙福艳. 粮仓通风 CFD 技术研究 [J]. 河南工业大学学报 (自然科学版), 2013, 34 (6): 105~109
- 4 王远成, 张忠杰, 吴子丹, 等. 计算流体力学技术在小麦储藏中的应用 [J]. 中国粮油学报, 2008, 27 (5): 86~90
- 5 王远成, 元伟, 张中涛, 等. 圆筒仓内自然对流对粮堆热湿传递的影响研究 [J]. 水动力学研究与进展 A, 2015, 25 (4): 487~496
- 6 王远成, 白忠权, 张中涛, 等. 仓储粮堆内热湿耦合传递的数值模拟 [J]. 中国粮油学报, 2015 (11): 64~66
- 7 张晓静, 王远成, 杨君, 等. 静态粮仓就仓通风的数学模型及模拟研究 [J]. 河南工业大学学报 (自然科学版), 2016, 37 (5): 100~106
- 8 高帅, 王远成, 邱华禹, 等. 横向通风过程中粮堆内热湿耦合前沿规律研究 [J]. 粮食储藏, 2015 (4): 6~9
- 9 Abu - El - Hana N, Younis M A. Pressure drop thought shelled corn as affected by airflow rates, moisture content and air temperature [J]. Journal of Agriculture Engineer-

ing, 2008, 25 (3): 944 ~ 956

[J]. Agricultural Engineering, 1953, 34 (9): 616 ~ 619

10 Shedd C K. Resistance of grains and seeds to air flow

(收稿日期: 2017 05 20)

SIMULATION RESEARCH ON MECHANICAL VENTILATION EFFECTS OF GRAIN STORAGE UNDER DIFFERENT SUPPLYING AIR HUMIDITY

Qu Andi¹ Wang Yuancheng¹ Wei Lei² Cao Yang² Shi Tianyu² Yu Yaofang¹

(1 College of Thermal Energy Engineering, Shandong Jianzhu University 250101)

(2 Academy of the State Administration of Grains 100037)

During grain storage, drying or cooling is done by forcing air through the grains to remove high moisture and temperature gradients within the bulk grain. In present paper, based on the theory of heat transfer, mass transfer and computational fluid dynamics of porous media, keeping the other parameters unchanged and only changing the humidity of the supplying air, the numerical simulation method was used to study the temperature and moisture content effects at 0.3 m, 2.1 m, 3.7 m and 5.5 m grain layers under the relative humidity conditions of 55%, 60% and 65% supplying air. The research has obtained the influence of different supplying air humidity on temperature and moisture content of different grain layers, and the results can provide a reference for the ventilation operation of grain storage.

Keywords: aeration, air relative humidity, grain layers, temperature, moisture content

=====

欢迎订阅 《粮食与食品工业》

- CNKI 中国期刊全文数据库收录期刊
- 万方数据中国数字化期刊群收录期刊
- 中国核心期刊 (遴选) 数据库收录期刊
- 中文科技期刊数据库收录期刊

《粮食与食品工业》杂志是集粮油基础理论、实际应用于一体的综合科技期刊, 已成为米、面、油、食品、淀粉及深加工、仓储、检化验等行业发布新技术、新产品、新成果信息的良好载体, 工程技术人员交流技术、切磋技艺的合适平台, 是中国粮油学会食品分会、油脂分会和发酵面食分会会刊。主要设置专题综述、粮油工程、食品科技、生物工程、粮食流通技术、粮油建筑工程、粮油装备与自动控制、粮油市场、发酵面食、标准与检测、信息传递等栏目。国内外公开发行人, 双月 15 日出版, 大 16K 本。

订阅方法:

- 邮发代号: 28-197, 全国各邮局 (所) 均可订阅, 每期定价 8 元, 全年定价 48 元。
- 现金订阅: 直接通过邮局汇款至《粮食与食品工业》编辑部订阅, 全年定价 60 元 (包括平邮邮费), 本处常年办理订阅业务。
- 银行汇款:
帐户: 无锡中粮工程科技有限公司
开户行: 江苏银行无锡城郊支行
帐号: 881010188900000277

联系方式:

地址: 无锡市惠河路 186 号《粮食与食品工业》编辑部
邮编: 214035 电话: 0510-85867384, 85867515-660
传真: 0510-85867384 E-mail: lsyspgy@126.com

欢迎订阅 敬请赐稿 欢迎刊登广告