

文章编号:1673-2383(2019)04-0108-06

网络出版网址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1378.N.20190813.1446.038.html

网络出版时间:2019-8-13 14:47:00

浅圆仓不同装粮高度时径向与垂直通风 模拟对比研究

戚禹康,王远成*,俞晓静,王 艺,孔令今

(山东建筑大学 热能工程学院,山东 济南 250101)

摘要:为解决浅圆仓垂直通风产生的温度、水分分层明显的现象,基于多孔介质流动和传热传质理论,采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,CFD)的方法,探究了浅圆仓径向通风时,粮堆内部的空气流动和温度分布规律,得到浅圆仓不同储粮高度时径向通风的速度、温度分布以及通风阻力值,并分别与相同装粮高度时全孔板垂直通风的效果对比,分析对比了浅圆仓径向与垂直通风在不同装粮高度时的通风效果,研究结果可以为浅圆仓机械通风系统的选型提供理论支持。

关键词:浅圆仓;径向通风;数值模拟;不同装粮高度;降温效果

中图分类号:TS210.1

文献标志码:B

DOI:10.16433/j.cnki.issn1673-2383.2019.04.019

0 引言

浅圆仓作为我国近年大力发展的一种新仓型,在国外已有几十年的应用历史,多用于周转和短期储藏(6个月以内)。浅圆仓具有易于实施机械化操作的特点,同时其储容量大、造价低、施工期短,有利于解决我国仓容较为紧张的难题。然而,由于浅圆仓粮层高、单仓储量大,给通风降温带来了许多新问题。目前国内常用的浅圆仓通风方式为在仓底设置地槽风道的垂直通风。但由于装粮高度较高,大约为粮仓直径的1.5倍,所以垂直通风的空气流动距离较长、阻力大,在粮堆中会出现明显的温度、水分分层现象^[1-2],即顶部的粮食温度还未充分降低时,粮堆底部就已经过度干燥。目前,Thorpe^[3]对通风时粮堆内部温度变化建立的数学模型被广泛使用,该模型假设粮堆内满足“局部热平衡”,可以较好地反映粮堆内部温湿度分布。Khankari等^[4]通过研究粮食水分和空气水分之间的传输关系,构建了水分传输模型并进行了试验验证。

Gadton等^[5]通过建立粮堆热湿耦合模型来研究粮食内部温度变化。尉尧方等^[6]建立了仓储粮堆内部自然对流、热湿耦合传递的数学模型。李祥利等^[7]模拟研究了“圭”字形风道垂直通风状态下粮堆温度和水分变化规律。白忠权^[8]基于多孔介质局部热质平衡原理研究了浅圆仓中小麦粮堆在非人工干扰状态下温度、湿度分布及迁移变化规律。尹君等^[9]利用实测粮温数据,通过Matlab模拟软件和粮温拟合算法,重现了浅圆仓粮堆场分布并根据温湿度场耦合理论分析预测储粮状态的短期变化。王远成等^[10-11]建立了储粮通风模型,对粮堆内部空气流动及热湿耦合规律进行模拟研究,重点研究了房式仓垂直和径向通风过程中温度前沿的变化。陈桂香等^[12-14]运用CFD模拟技术,模拟分析了平房仓的准静态储藏和浅圆仓机械通风两种状态下粮堆温度场、介质流场的分布及变化趋势。

尽管国内外对浅圆仓垂直通风时温度变化的模拟计算和实仓测试研究已经取得了一定进展,但缺乏对径向尤其是不同装粮高度下的通风效果模拟对比。为此,作者基于多孔介质流动理论,提出了径向通风的解决方案,即通过竖直安装在壁面的支风道使空气沿半径方向流动至粮仓中心的集风管内,再排到粮仓上部的空气区域。基于数值模拟的方法,以小麦为研究对象,探究径向通风在不同装粮高度下,粮堆内温度、风速分布的变化情

收稿日期:2018-12-28

基金项目:国家重点专项(2016YFD0400100, 2016YFD0401002);国家粮食公益专项(201513001)

作者简介:戚禹康(1995—),男,山东济南人,硕士研究生,研究方向为多孔介质传热传湿。

*通信作者:王远成,教授,E-mail:wycjn1@163.com

况,并与相同装粮高度下垂直通风的通风效果进行模拟对比。通过对径向、垂直通风不同装粮高度下粮堆内部的温度、速度分布变化进行对比研究,分析不同装粮高度对两种通风方式的通风均匀性、温度降低的速率以及通风阻力的影响,得到的结果可以为浅圆仓不同装粮高度下通风方式的选择提供理论依据。

1 浅圆仓通风模型建立及条件设置

以浅圆仓为研究对象建立物理模型,直径 25 m,檐高 32 m,装粮高度分别为 15、30 m,仓顶倾斜 19°,仓顶有 4 个直径 1 m 的轴流风机出口。如图 1 所示,浅圆仓径向通风系统是由沿壁面上的 8 根支风道和中心集风管组成,支风道直径 0.6 m,中心集风管直径 1 m。通风时,空气由仓外的送风道进入垂直支风道,并沿着半径方向移动至粮仓中心的集风管,再排到粮仓上部的空气区域,然后通过仓顶的轴流风机口排入大气。

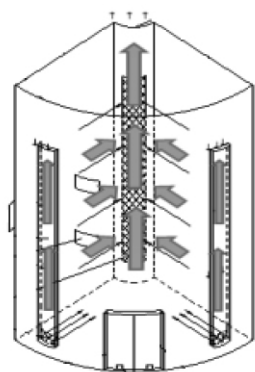


图1 浅圆仓径向通风示意

Fig.1 Schematic diagram of radial ventilation of squat silo

1.1 浅圆仓径向和垂直通风物理模型

建立了浅圆仓径向通风时装粮高度 30 m、支风管高度为 17.5 m,以及装粮高度 15 m、支风管高度为 5.5 m 的数值模拟的网格系统。粮面、支风管内侧面及集风管边界条件为 interior,支风道顶面边界条件为 wall,轴流风机出口边界条件为 pressure-outlet。使用 ICEM 进行网格划分,生成的网格数约为 30 万,如图 2 所示。同时,为了比较分析径向通风与垂直通风的效果,还建立了全孔板的垂直通风的网格系统,如图 3 所示。

1.2 通风过程数学模型

1.2.1 连续性方程

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

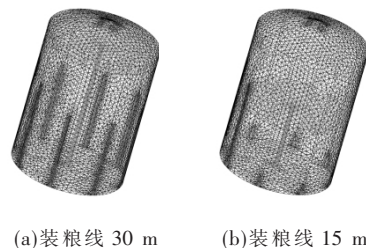


图2 浅圆仓径向通风网格

Fig.2 Squat silo ventilation grid

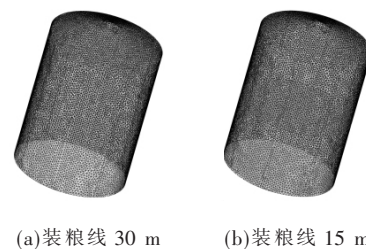


图3 浅圆仓垂直通风网格

Fig.3 Squat silo vertical ventilation grid

式中: ε 为孔隙率,%; ρ_a 为空气密度,1.225 kg/m³; t 为时间,s; u 为空气的表观速度或达西速度,m/s。

1.2.2 动量方程

$$\rho_a \frac{\partial u_i}{\partial t} = -\frac{\phi \mu u_i}{K} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \delta_{ij} \rho_a g \beta (T - T_0). \quad (2)$$

方程(2)描述的是自然储藏时粮堆内部自然对流流动及其阻力的动量方程,使用扩展的达西定律。 K 为渗透率,m²; β 为空气的热力膨胀系数; δ_{ij} 为粮粒空隙间距,m; T 为温度,K; ϕ 为粮粒当量直径; p 为压强,Pa; t 为时间,s; μ 为空气的动力黏度,Pa·s。

1.2.3 对流传热方程

$$\rho_a \varepsilon c_a + \rho_a (1 - \varepsilon) (c_g + c_w W) \frac{\partial T}{\partial t} + c_a \nabla \cdot (\rho_a u T) = k_{eff} \nabla^2 T + h_s (1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial W}{\partial t}, \quad (3)$$

式中: c_a 、 c_g 、 c_w 分别为空气、粮食和水的比热容,分别为 1.003 kJ/(kg·K)、1.871 kJ/(kg·K)、4.184 kJ/(kg·K); ρ_a 为空气密度; W 为粮食的水分含量,kg/kg; k_{eff} 为粮堆的有效导热系数,W/(m·℃); h_s 为谷物中水的吸附热,J/kg; $h_s (1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial W}{\partial t}$ 为热源项, ρ_s 为粮食颗粒的干基密度。

1.3 初始条件与边界条件

模拟研究对象为小麦。本研究吨粮通风量选用 5.2 m³/(t·h)。进口温度为 17℃,粮堆及空气区域初始温度为 25℃,温差为 8℃。

2 研究结果与分析

图 4(a)为装粮高度 30 m 时径向通风的速度分布,可以看出,径向通风时,粮仓下部的空气沿径向水平进入集风管,但随着高度上升,一部分气

流进入中心集风管,一部分气流垂直向上,直接进入粮面,粮堆内不存在通风死角。垂直通风模拟使用的是全孔板的理想情况,从图 4(b)中可以看出,通风较为均匀。

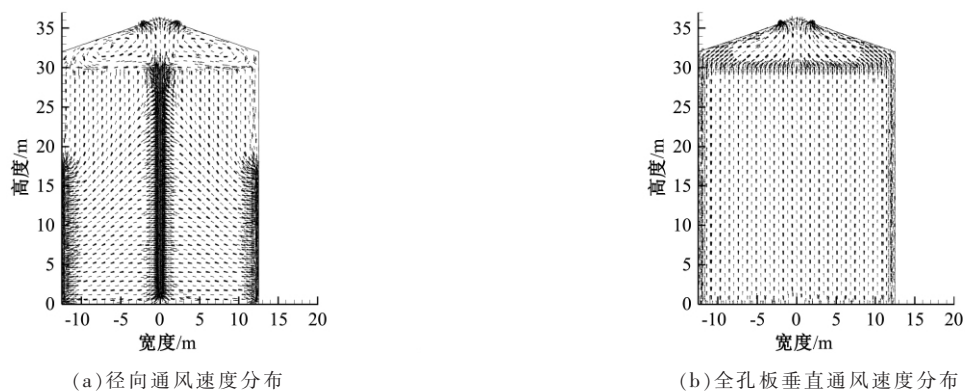


图 4 浅圆仓径向、垂直通风速度分布

Fig.4 Radial and vertical ventilation velocity distribution of shallow silo

图 5 和图 6 为装粮高度 30 m 时不同通风方式的温度分布,可以看出,径向通风时,在中上部会形成一小块高温区域,这是由于此处位于径向通风中空气最长流动路线的末端,同时该处阻力较大,风量较小,故温度降低会有延迟。由于径向

通风空气区域存在涡流,所以空气区域的温度也能均匀降低。从垂直通风温度分布可以看出,粮堆温度均匀降低,但由于本文模拟采用全孔板的理想通风方式,故温度变化会比实际情况更加均匀。

通风阻力计算方法为进口平均压强减去出口

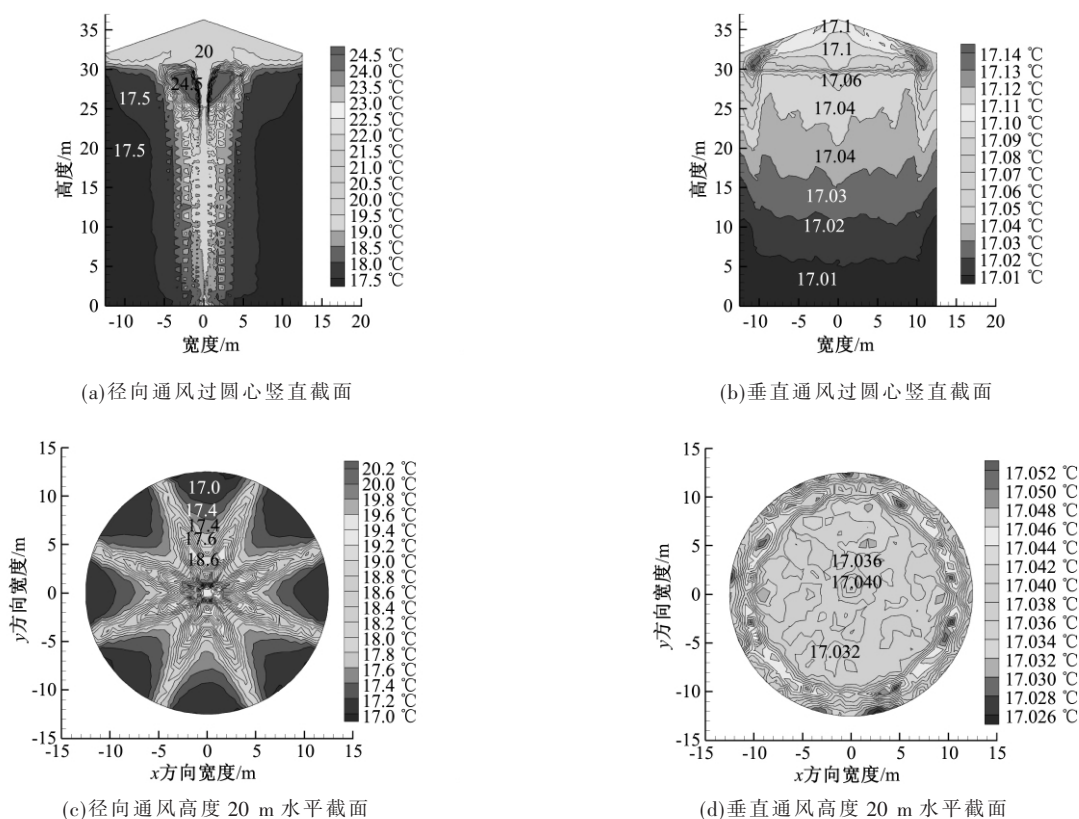


图 5 装粮高度 30 m 时第 7 天温度分布

Fig.5 Temperature distribution on the 7th day when the grain height was 30 m

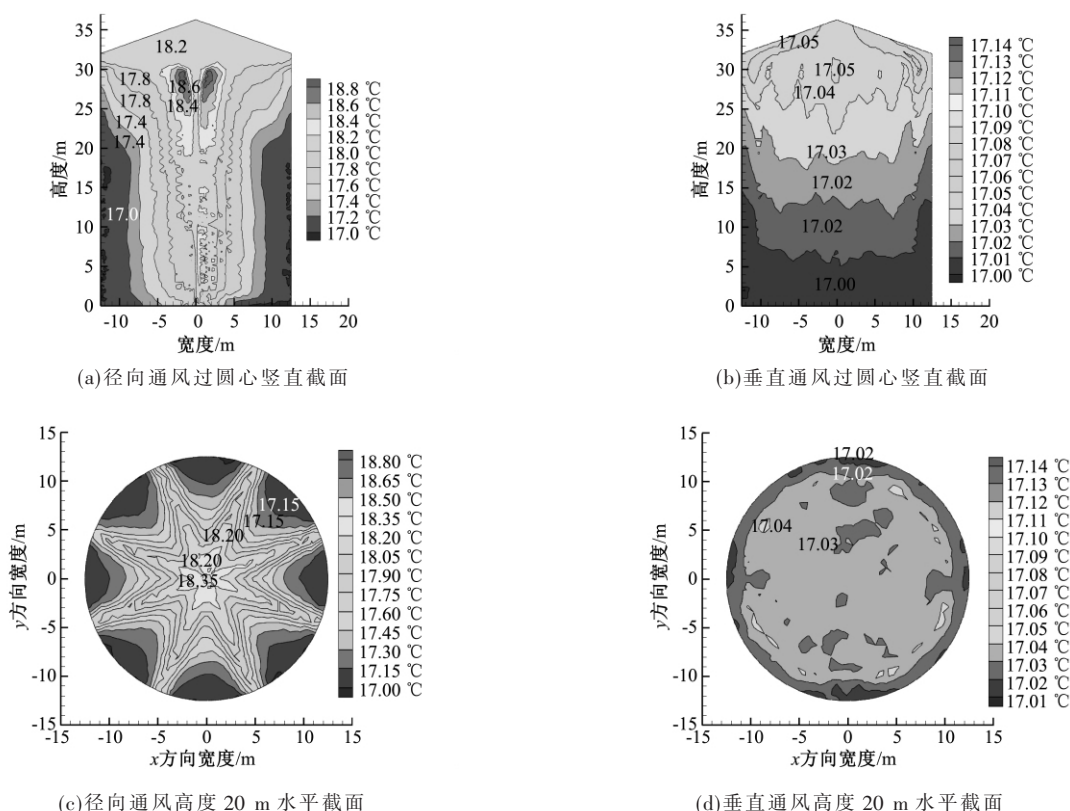


图 6 装粮高度 30 m 时第 14 天温度分布

Fig.6 Temperature distribution on the 14th day when the grain height was 30 m

平均压强,单位为 Pa。研究发现,垂直通风的通风阻力为 3 409.74 Pa,而径向通风的通风阻力仅为 1 614.96 Pa,这是因为垂直通风的空气流动距离为粮堆高度,而径向通风的空气流动距离为粮仓半径,仅为粮堆高度的 1/2。

图 7 为装粮高度 15 m 时不同通风方式第 10 天的温度分布,其情况与装粮高度 30 m 时基本相

同。由于装粮高度仅为 15 m,粮仓内空气区域更大,故与装粮高度 30 m 时相比,垂直通风空气区域会存在更大的温度梯度,而径向通风的空气区域温度仍比较均匀。垂直通风的通风阻力为 810.48 Pa,径向通风的通风阻力为 1 124.15 Pa。这是因为装粮高度较低,两种通风方式的空气流动距离比较相近,所以通风阻力差别也不大。

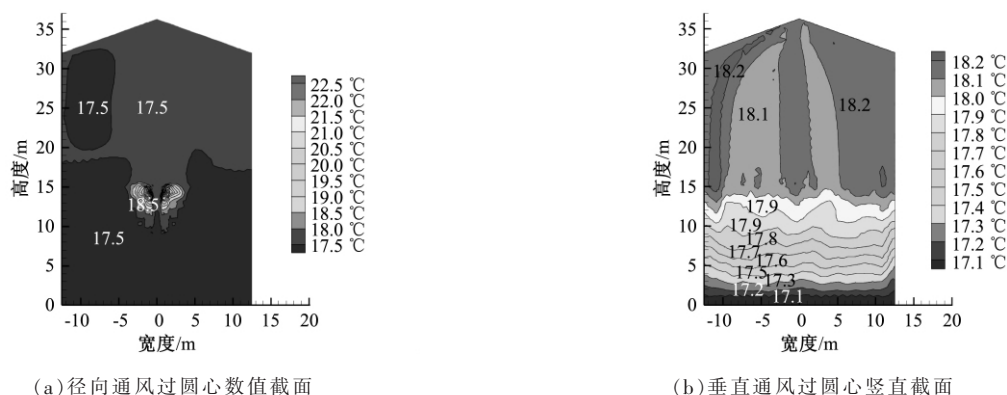


图 7 装粮高度 15 m 时第 10 天径向、垂直通风温度分布

Fig.7 Temperature distribution on the 10th day when the grain height was 15 m

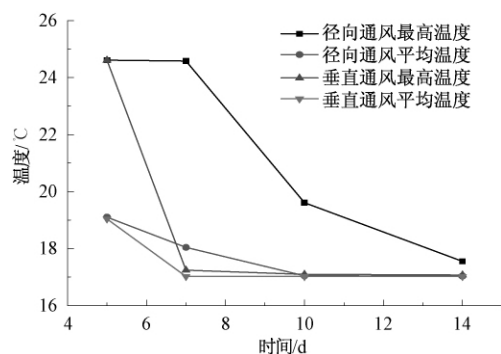
图 8 为垂直、径向通风的最高温度、平均温度在不同装粮高度时的变化曲线,可以看出,装粮高度的变化对粮堆温度变化趋势的影响很小。使用

不同通风方式时,平均温度的下降趋势基本一致,都在第 7 天降低到 18 °C 左右,且后续变化不大。但径向通风的最高温度降低延迟较大,在第 7 天

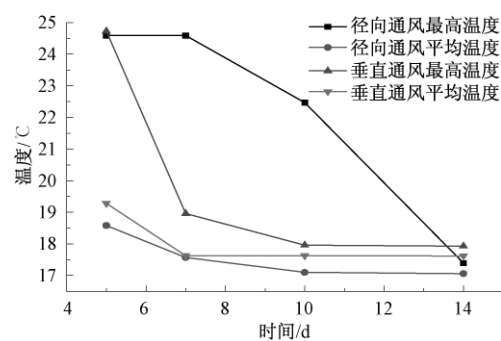
时开始降低,这主要是由径向通风时,粮堆内存在一小部分高温区域造成的,但该区域较小,无法对平均温度造成明显影响。

另一方面,装粮高度对垂直通风的通风阻力影响较大,空气流动距离随着装粮高度的增大而增

大,所以装粮高度越高,空气流动阻力也就是通风阻力也会越大。但径向通风的空气流动距离为半径,受装粮高度影响较小,所以通风阻力变化不大。



(a) 装粮高度 30 m



(b) 装粮高度 15 m

图 8 不同装粮高度下垂直、径向通风 5~14 d 最高温度、平均温度模拟值

Fig.8 Maximum and average temperature simulation values of vertical and radial ventilation for 5~14 days under different grain loading heights

3 结论

通过对浅圆仓不同装粮高度下的径向与垂直通风进行数值模拟对比研究,得出装粮高度对径向、垂直通风的通风降温效果都没有明显影响,且浅圆仓径向与垂直通风的通风效果比较接近。但由于空气流动方式的不同,径向通风有一小块区域温度降低有延迟,但其占粮堆的比重较小,对平均温度没有明显影响;随着装粮高度的升高,垂直通风的通风阻力会逐渐升高,所以当装粮高度较高时,径向通风会有明显优势。

参考文献:

- [1] 李伟,霍印君,王晓丽,等. 平房仓、浅圆仓和立筒仓储粮性能探讨 [J]. 粮食储藏, 2006 (5): 33-35.
- [2] 崔建,宋增刚,吴江. 浅圆仓与高大平房仓利弊之初探[J]. 粮油仓储科技通讯, 2003(6): 47-48.
- [3] THORPE G R. Modelling ecosystems in ventilated conical bottomed farm grain silos[J]. Ecological Modelling, 1997, 94: 255-286.
- [4] KHANKARI K K, PATANKAR S V, MOREY R V. A mathematical model for natural convection moisture migration in stored grain [J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(6): 1777-

1787.

- [5] GADTON A, ABALONE R, BATOSIK R E, et al. Mathematical modelling of heat and moisture transfer of wheat stored in plastic bags (silobags) [J]. Biosystems Engineering, 2009, 104 (1): 72-85.
- [6] 尉尧方,王远成,潘钰,等. 密闭储存粮堆内部自然对流和热量传递分析 [J]. 粮油食品科技, 2016, 24(6): 93-98.
- [7] 李祥利,王双凤,王远成. 房式仓粮堆温度和水分变化的模拟研究 [J]. 粮油食品科技, 2012, 20(3): 53-56.
- [8] 白忠权. 吸湿性仓储粮堆内热湿耦合传递规律的研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2013.
- [9] 尹君,吴子丹,吴晓明,等. 基于温湿度场耦合的粮堆离散测点温度场重现分析 [J]. 中国粮油学报, 2014, 29(12): 95-101.
- [10] 王远成,高帅,邱化禹,等. 横向谷冷通风过程的数值模拟研究 [J]. 中国粮油学报, 2016, 31(7): 103-106.
- [11] 高帅,王远成,赵会义,等. 平房仓横向谷冷通风小麦粮堆传热传质数值模拟 [J]. 粮油食品科技, 2015, 23(增刊): 15-19.
- [12] 陈桂香,岳龙飞,林森达. 基于计算流体力学的平房仓通风系统数值模拟 [J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2013, 34(5): 87-90.

[13] 王远成,张忠杰,吴子丹,等. 计算流体力学技术在粮食储藏中的应用[J]. 中国粮油学报,2012,27(5):86-91.

[14] 任广跃,彭威,张忠杰,等. 仓储粮堆机械通风时压力场的模拟研究[J]. 中国粮油学报,2012,27(9):90-95.

Comparative Study on Radial and Vertical Ventilation Simulation of Different Filling Heights in Squat Silos

QI Yukang, WANG Yuancheng, YU Xiaojing, WANG Yi, KONG Lingjin

(School of Thermal Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: In order to solve the obvious phenomenon of temperature and moisture stratification caused by vertical ventilation in squat silos, based on the theory of porous media flow and heat and mass transfer, the flow and temperature distribution in grain stacks under radial ventilation in squat silos were studied by using computational fluid dynamics (CFD). The velocity, temperature distribution and ventilation resistance of radial ventilation at different grain storage heights in squat silos were obtained. The ventilation effect of radial and vertical ventilation in squat silos at different grain storage heights were analyzed and compared with those of full-orifice panels at the same grain loading heights. The results of this study could provide a theoretical basis for the selection of mechanical ventilation systems in squat silos.

Key words: squat silo; radial ventilation; numerical simulation; different grain loading height; cooling effect

(上接第 101 页)

Transcriptome Sequencing and Functional Annotation Analysis of Grain Stored Pests, *Plodia interpunctella* (Hübener)

LI Hui¹, TU Bin¹, YU Yingwei², PENG Jun¹, WANG Dianxuan¹

(1. School of Food Science and Technology, Engineering Research Center of Grain Storage and Security of Ministry of Education, Grain Storage and Logistics National Engineering Laboratory, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Standards and Quality Center of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China)

Abstract: The Indian meal moth, *Plodia interpunctella* (Hübner) (Lepidoptera: Pyralidae) is a destructive polyphagous storage pest and causes infestations in a wide array of commodities. In order to establish a transcriptome database of the Indian meal moth, Illumina Hi Seq 2500 platform was used to sequence the transcriptome of *P. interpunctella*, and the raw sequence data reads were filtered and assembled, and bioinformatics analysis was also carried out. The results showed that 116 399 unigenes with the mean lengths of 1 079 bp was acquired. Through a similarity search against seven public databases, 63 799 unigenes were annotated. According to GO category, a total of 45, 225 unigenes divided into 55 subclass were mapped to three GO groups: biological process, cellular component, and molecular function; a total of 24 658 unigenes were classified to 26 KOG categories; 34 202 unigenes were divided into five KEGG functional categories. The microsatellite (SSR) analysis indicated that a total of 3 101 SSR markers were detected. This study obtained the transcriptome data of *P. interpunctella*, which can provide a foundation for the further study of gene functions, and functional analysis of olfactory genes and development of molecular markers in *P. interpunctella*.

Key words: *Plodia interpunctella* (Hübner); transcriptome; gene annotation; coding sequence; SSR