



林俊,刘伟,陆欣.分形通风系统对房式仓通风作用效果模拟研究[J].南京农业大学学报,2024,47(3):612-623.

LIN Jun, LIU Wei, LU Xin. Simulation study on the ventilation effect of fractal ventilation systems on room-type warehouse[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2024, 47(3): 612-623.

## 分形通风系统对房式仓通风作用效果模拟研究

林俊,刘伟,陆欣\*

(南京理工大学能源与动力工程学院,江苏 南京 210094)

**摘要:**[目的]为解决粮堆通风死角问题,探究分形结构在通风过程作用效果和对通风均匀性的影响。[方法]提出多孔介质(沙砾)填料包裹变截面通风管道通风系统;通过矩形单元体构形最小流阻优化方法得到分形结构相关参数,将根据优化参数设计的分形支管与变截面通风管结合,提出多孔介质填料包裹变截面管道加分形结构通风系统。粮食种类选用稻谷,填料层多孔介质材料选用沙砾,对2种通风系统进行通风降温仿真研究,模拟初温为300 K粮仓通入恒温为293 K的冷风降温过程,通风时间均持续7.5 d,对比2种通风系统的速度场和温度场。[结果]在非分形通风系统,通风死角区域绝大部分处在填料层,粮堆各区域通风强度得到保证,但强通风与强降温区域集中在通风管附近及其上方区域,降温均匀性不佳。在分形通风系统,通风死角区域被控制在通风管及分形支管下方位置,从速度场看粮堆各区域通风更加均匀,粮堆各区域降温均匀性较好,最大温差由2.8 K降低到1.3 K。从通风均匀性指数可知,分形通风系统整体通风均匀性较好,均匀性指数达0.919。[结论]沙砾填料层可帮助粮堆避开大部分通风死角,分形结构在通风弱区可有效增强通风强度,在提升降温均匀性方面效果优异。

**关键词:**通风系统;数值仿真;多孔介质填料;分形结构

中图分类号:S379

文献标志码:A

文章编号:1000-2030(2024)03-0612-12

## Simulation study on the ventilation effect of fractal ventilation systems on room-type warehouse

LIN Jun, LIU Wei, LU Xin\*

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** [Objectives] In order to solve the problem of poor ventilation areas of grain pile, the effect of the fractal structure on the ventilation uniformity in the ventilation process was explored. [Methods] A porous medium (sand) packing wrapped non-uniform section ventilation pipeline ventilation system was proposed. The relevant parameters of fractal structure were obtained by the minimum flow resistance optimization method of rectangular unit configuration. Combining the fractal branch pipelines designed according to the optimization parameters with the non-uniform section ventilation pipelines, a porous medium packing wrapped non-uniform section pipelines and fractal structure ventilation system was proposed. The grain type was selected as rice, and the porous medium material of the packing zone was selected as sand. The ventilation and cooling simulation of the two ventilation systems was carried out. The study simulated the cooling process of the granary with an initial temperature of 300 K and cold inlet air with a constant temperature of 293 K. The ventilation time lasted for 7.5 days. The ventilation velocity field, temperature field of the two ventilation systems were compared and verified. [Results] In the non-fractal ventilation system, most of the poor ventilation areas were in the packing zone, and the ventilation intensity of the grain pile was guaranteed. However, the strong ventilation and strong cooling areas were concentrated near and above the ventilation pipelines, and the cooling uniformity was not good. In the fractal ventilation system, the poor ventilation areas were suppressed under the ventilation pipelines and the fractal branch pipelines. From the velocity field, the ventilation uniformity and the cooling uniformity in the grain pile were better, and the maximum temperature difference was reduced from 2.8 K to 1.3 K. From the ventilation uniformity index, the ventilation uniformity of the fractal ventilation system was good, and exponent of uniformity was 0.919. [Conclusions] The sand packing zone could help the grain pile avoid most of the poor ventilation areas. The fractal structure could effectively enhance the ventilation intensity in the weak ventilation areas of the velocity field, and the temperature field had excellent effect in improving the uniformity of cooling.

**Keywords:** ventilation system; numerical simulation; porous media packing; fractal structure

收稿日期:2023-07-19

基金项目:江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2014004-11)

\*通信作者:陆欣,研究员,硕导,研究方向为瞬态高效传热, E-mail: luxin@njust.edu.cn。

中国每年进行巨量储粮,但储粮过程中粮食耗损量惊人,其中储存耗损占粮损的大部分<sup>[1]</sup>。籽粒呼吸作用在温湿环境下最为强烈,容易在粮堆内部形成温暖高湿环境,进而引发回潮<sup>[2]</sup>、霉变<sup>[3]</sup>问题,害虫在温暖潮湿环境繁殖速度与破坏性也最强<sup>[4]</sup>。利用机械通风技术和干燥工艺控制粮堆的温、湿度,提高储粮干燥品质可有效减少粮损,保证食用品质<sup>[5-6]</sup>,大幅延长安全存储期。

通风管道设计十分重要,对粮仓通风效果起决定性作用。传统通风如地下槽、地上笼结构,粮仓底层远离通风管道墙面角落或通风对冲抵消区域经常出现通风死角。经多年研发,通风管道从传统的平面式布置发展至三维空间式布置<sup>[7]</sup>,与传统平面式布置相比,空间式布置的管道通风可更快实现通风冷锋在粮堆的贯通,提升降温速率<sup>[8]</sup>。但是其不能解决通风死角难题,通风死角的存在会引发粮堆大面积变质腐败<sup>[9]</sup>。机械通风量存在规范选用值<sup>[10]</sup>,在该范围内机械通风可同时兼顾速率与经济性,空间式通风也选用该标准,但在进风量相同时,空间式管道对粮堆底层通风量较传统笼仓式少,会扩大通风死角区域。大部分平面式与空间式通风布置无法满足高质量通风要求,而圭形通风布置通风压损大,需要改进布置方式有效降低风阻。

现代计算流体动力学数值仿真模型,是解决粮堆高质量通风难题的一个有效方式。Thorpe<sup>[5,11-12]</sup>为研究小型粮仓内部粮堆与气流参量变化机理,建立一个完整全面的湿热耦合数值模型,通过 CFD (computational fluid dynamics) 方法得到不同工况下粮堆内部的温度分布及其随时间变化情况,该模型成功用于太阳能粮仓进风干燥装置预测。de Carvalho 等<sup>[13]</sup>使用 Thorpe 提出的模型对圆筒仓进行仿真试验,获得较好的仿真结果。随多孔介质数值模型逐渐成熟并编入商用流体仿真软件,学者方便对粮堆通风进行模拟研究,如:Olatunde 等<sup>[14]</sup>使用 FLUENT 研究粮堆形状差异对通风速度均匀性的影响;Zhang 等<sup>[15]</sup>使用 COMSOL 研究粮堆热核发展。传统平面式通风设计因其应用广泛且试验成熟特点,许多学者仍继续研究修正<sup>[16]</sup>。

多孔介质分形管道结构优化模型亦适用于粮仓通风管道设计。根据质量传递方程、达西定律获得多孔介质分形结构优化模型,优化目标通常为最小质量积耗散率或流体压降。常见优化模型有矩形单位体模型<sup>[17-19]</sup>、三角形单元体模型<sup>[19]</sup>、仿生叶形网络<sup>[20]</sup>、仿蜂巢分形微通道<sup>[21]</sup>等,优化结构平均传质压差可降至最大传质压差的 2/3,而且粮仓管道内通风压损越低,进风向粮堆渗透能力越强。

虽然目前粮仓传热传质研究取得充分的进展,但许多研究偏向增强通风降温,关于通风均匀性优化研究偏少。提升通风均匀性可提高通风质量,有效避免回潮、局部积湿。为降低粮仓底层通风死角对粮堆影响,提升通风对粮堆降温除湿效果,本文以沙砾在粮仓底部作为填料将粮堆抬升,储粮选择稻谷为研究对象,设计多孔介质(沙砾)填料包裹变截面通风管道通风系统及多孔介质填料包裹变截面管道加分形结构通风系统,采用计算流体动力学方法对粮仓通风速度场、温度场进行研究,为房式仓通风提供新型通风系统选择方案。

## 1 房式仓通风模型的建立及条件设置

### 1.1 物理模型

选择房式仓为研究对象,从上到下分别为仓顶空气层、粮堆、多孔介质填料层,如图 1-a 所示。仿真模型长、宽、高分别为 38.0、22.9、11.7 m,填料层高为 1.2 m,堆粮高为 6.0 m。用沙砾在粮仓底部作为填料将粮堆抬升的方案,选择稻谷为研究对象,设计多孔介质(沙砾)填料包裹变截面通风管道通风系统及多孔介质填料包裹变截面管道加分形结构通风系统[下文简称非分形通风系统(non-fractal ventilation system),分形通风系统(fractal ventilation system)]。模型中 8 组通风管道纵向等距排列布置,两侧共 16 个进风口;窗户等距布置在空气层前后两侧,共 12 个,为通风出口。变截面进风管道入口直径为 0.4 m,中间段直径为 0.6 m,管道纵向等距铺设在粮堆下沙砾填料内;其中一个模型在填料层前、后段局部区域加设分形结构,加强局部区域通风。每组通风管道,一级分形支管横向等距排列与主管连接,前后两侧各设置 2 组二级分形支管与主管平行,纵向排列,中心处连接一级支管末端,如图 1-b 所示。

### 1.2 数学模型及定解条件

**1.2.1 多孔介质数学模型** 模型粮堆由稻谷堆积成型,谷粒为近椭圆状,谷粒间存在大量孔隙,且空隙间相互连通,内部空气相互流动交换,构成一种连通式多孔介质,谷粒堆积构成其固态骨架结构,粮堆机械通风过程可等效于多孔介质与外界气流的强制对流传热传质。由于谷粒生物属性,研究还需考虑其呼吸

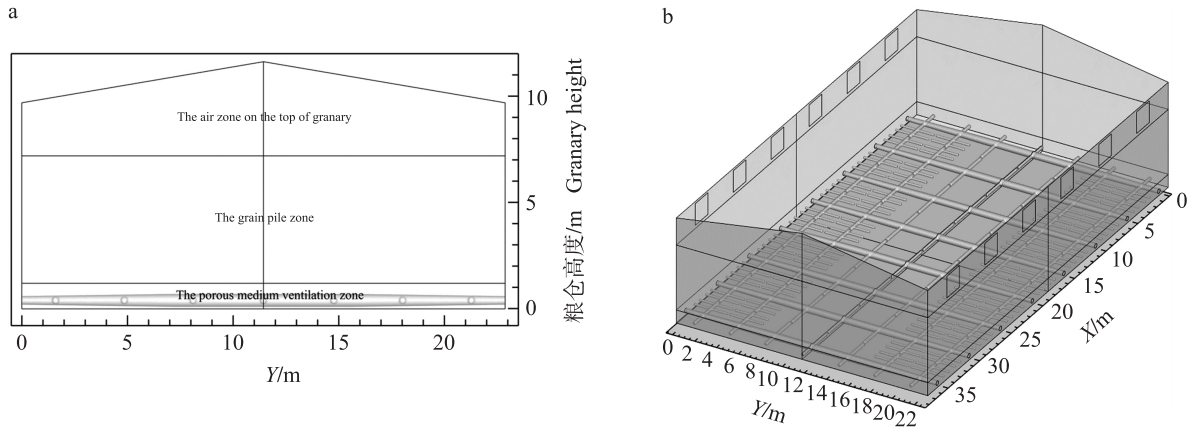


图1 房式仓物理模型计算域(a)和三维图(b)

Fig. 1 Calculation domain(a) and 3D drawing(b) of physical model of room-type warehouse

图中符号  $X$ 、 $Y$  分别为粮仓横向、纵向坐标值。

The symbols  $X$  and  $Y$  in the diagram are the horizontal and vertical coordinate values of the granary respectively.

作用时产热、增湿作用与其湿热耦合影响。沙砾物性稳定,无毒便宜,具有一定储冷性能,渗水性好,且具有吸湿特性,故选用沙砾作为多孔介质填料,沙堆与粮堆结构类似,同为连通式多孔介质。基于多孔介质的流动和传热传质理论,建立通风粮堆的热湿耦合传递数学模型与通风沙堆的传热传质数学模型,Wang等<sup>[22]</sup>根据前人理论进行整理,提出下面数学公式表达式,式(1)为水分守恒方程,式(2)为能量守恒方程,式(3)为连续性方程及动量方程。

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho_a w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a \vec{u} w) = \nabla \cdot (\rho_a D_{\text{eff}} \nabla w) + S_w \quad (1)$$

$$(\rho_a \varepsilon c_a + \rho_g (1-\varepsilon) c_g) \frac{\partial T}{\partial t} + c_a \nabla \cdot (\rho_a \vec{u} T) = K_{\text{eff}} \nabla^2 T + S_h \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho_a)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a \vec{u}) = 0, \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\frac{\nabla P}{\rho_a} + \nabla \cdot \left( \frac{\mu}{\rho_a} \nabla \vec{u} \right) + S_i \quad (3)$$

式中: $T$ 为温度; $w$ 为空气含湿量; $t$ 为时间; $\vec{u}$ 为空气表观速度; $\mu$ 为空气黏度; $\varepsilon$ 为多孔介质孔隙率; $\nabla$ 为哈密顿算子或求导符号; $\rho_a$ 为空气密度,值为 $1.225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ; $\rho_g$ 为粮堆密度; $c_a$ 、 $c_g$ 分别为空气、粮堆比热容; $D_{\text{eff}}$ 为水蒸气有效扩散系数; $K_{\text{eff}}$ 为有效导热系数,温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,其值为 $5.73 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ; $P$ 为多孔介质内压力; $S_w$ 、 $S_h$ 、 $S_i$ 分别为水蒸气源项、热量源项、动量源项。本文根据上述数学模型建模,对2种通风系统的机械通风效果进行对比研究。

**1.2.2 分形通道结构参数** 当渗透率增大至 $1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 量级时,多孔介质内流体渗透阻力微弱,当渗透率达到 $1 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ 时,多孔介质传热传质、等流线与纯流体近似,可被视为纯流体空间<sup>[23]</sup>。故分形优化计算时,各级分形管道空气渗透率值可取 $1 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ 。本文通风分形结构主要参考Bejan等<sup>[18,20,24]</sup>的最小流动阻力的复合介质分形结构与其数学推导模型,得到最优结构压降表达式,在一级分形单元与 $i$ 级分形体上的出口点总压降见公式(4)–(5)。

$$P_{\text{peak},i} = \dot{m}^m A_0 \frac{v}{K} \frac{1}{2} (\bar{K}_0 \varphi_0)^{-1/2} + \dot{m}'_i v \frac{L_i}{2K_i D_i} \quad (4)$$

$$P_{\text{peak},i} = P_{\text{peak},i-1} + \dot{m}'_i v \frac{L_i}{2K_i D_i} \quad (5)$$

式中: $P_{\text{peak},i}$ 为第 $i$ 级优化单元最大压降; $\dot{m}'_i$ 为第 $i$ 级单元流道内的质量流; $\dot{m}^m$ 为低渗透率材料内产生的单位面积质量流率; $A_i$  ( $i=0,1,2,\dots$ )为不同级别造构体占有区(如 $A_0, A_1, A_2, \dots$ )面积; $v$ 为平均面积流量;相对渗透率 $\bar{K}_i = K_i/K$ , $K_i$ 为第 $i$ 级单元流道材料渗透率, $K$ 为单元体低渗透性材料的渗透率;第 $i$ 级单元径宽比 $\varphi_i = D_i/W_i$ , $D_i$ 、 $W_i$ 、 $L_i$ 分别为第 $i$ 级单元的直径、宽、长。

根据公式(4)–(5)求得各级优化分形体几何参数,汇总得到表1。将相关参量代入表1,计算得到各级分形单元几何参数,如表2所示。

表 1 通道渗透率无限制时最小流阻分形单元体几何参数

Table 1 Geometric parameters of minimum flow resistance fractal element when channel permeability is unrestricted

第 $i$ 级单元 $i$ -level unit element	宽长比 Width length ratio	宽 Width	长 Length	邻级单元面积比 Area ratio of adjacent elements	降压 Pressure drop
0	$2C_0^{-1/2}$	$2^{1/2}C_0^{-1/4}$	$2^{-1/2}C_0^{1/4}$	—	$1/2C_0^{-1/2}$
1	$(2C_0/C_1)^{1/2}$	$2^{1/2}C_0^{1/4}$	$C_0^{-1/4}C_1^{1/2}$	$(2C_1)^{1/2}$	$(2C_0C_1)^{-1/2}$
2	$(2C_1/C_2)^{1/2}$	$2C_0^{-1/4}C_1^{1/2}$	$2^{1/2}C_0^{-1/4}C_2^{1/2}$	$2(C_2/C_0)^{1/2}$	$(2C_1C_2)^{-1/2}$
$i>2$	$(2C_{i-1}/C_i)^{1/2}$	$2^{i/2}C_0^{-1/4}C_{i-1}^{1/2}$	$2^{(i-1)/2}C_0^{-1/4}C_i^{1/2}$	$2(C_i/C_{i-2})^{1/2}$	$(2C_{i-1}C_i)^{-1/2}$

Note:  $C_i = \bar{K}_i \varphi_i$ .

表 2 分形单元几何参数

Table 2 Geometric parameters of fractal elements

单元名称 Element name	宽/m Width	长/m Length	管道直径/m Diameter
主管单元 Main pipeline elements	5.0	22.9	0.4~0.6
一级分形单元 First-order fractal elements	3.2	5.0	0.3
二级分形单元 Second-order fractal elements	0.80	3.20	0.15
最小分形单元 Minimum fractal elements	0.004 4	0.800 0	0.000 2

注:1)最小分形单元因管道大小与沙砾孔隙相近,可在分形结构布置省略;2)表中主管单元宽、长与非分形系统尺寸一致,不是分形优化尺寸。

Note:1)The minimum fractal unit can be omitted in the fractal structure because the size of the pipeline is similar to the sand pore;2)The width and length of the main pipeline in the table are consistent with the size of the non-fractal system,not the fractal optimization size.

**1.2.3 数值仿真参数设置** 数值仿真选用有限元法,粮食种类为稻谷,粮堆孔隙率  $\varepsilon_c$  为 0.48,密度  $\rho_c$  为  $580 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,渗透率  $K_c$  为  $2.45\times 10^{-8} \text{ m}^2$ ,稻谷比热容  $C_c$  为  $(1\ 269+34.89M)\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (其中  $M$  为谷粒湿基含水率);填料层填料为沙砾,根据文献[25]获得沙砾相关物性参数,沙堆孔隙率  $\varepsilon_s$  为 0.43,密度  $\rho_s$  为  $1\ 513 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,渗透率  $K_s$  为  $3.69\times 10^{-9} \text{ m}^2$ ,粮堆区域为恒定内热源  $S_h(0.019\ 46 \text{ W}\cdot\text{m}^{-3})$ ,沙砾比热容  $C_s$  为  $800 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。粮仓初始温度为 300 K。本文研究重点为通风系统对仓内速度场和温度场的影响,对边界条件进行一定简化,仓壁厚度设为 0.2 m,环境温度与仓外壁仓顶温度设为 298.15 K,地面温度恒为 294.15 K,各边界设置为无滑移边界条件,且不可渗透。入口采用速度进风,单位(吨粮)通风量为  $10 \text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ,通风时长 7.5 d(180 h),模拟条件设置进风口为变截面管口,其中降温通风进气空气为恒温恒湿空气,进风温度为 293 K,粮堆上方仓壁处前后各设置 6 个  $2 \text{ m}\times 2 \text{ m}$  窗户作为出风口,出口压力为大气压。因分形通风模型结构复杂,几何网格数较多,为节省计算成本,通风系统模型采用对称简化计算,简化后模型网格数为 134 万。经网格独立性验证,确定本研究结果准确可靠,满足计算精度要求。

**1.3 数值模型的验证**

为保证数值模型准确性,根据王振华<sup>[26]</sup>试验条件建立验证模型,通过模拟仿真对本文数学模型可靠性进行检验,将验证模型仿真值与文献值进行对比以验证本文模型求解精确性。从图 2 验证结果可见,仿真曲线与文献曲线趋势一致且两曲线高度重合,最大误差小于 2 °C,说明本文模型精确性高,计算结果具有较高可信度。

**2 仿真结果与分析**

通过后处理软件对模拟结果进行处理,得到粮仓截面速度和温度场图。本文重点分析粮仓纵向、横向多个代表性位置的通风速度分布与温度分布情况,并讨论通风速度分布对温度分布的影响,重点对均匀性进行分析;通过平均速度、平均温度折线图对非分形通风系统与分形通风系统的通风效果进行综合分析比较。因水分场与温度场具有较高物性变化相似度,受文章篇幅限制,不对水分场单独分析。

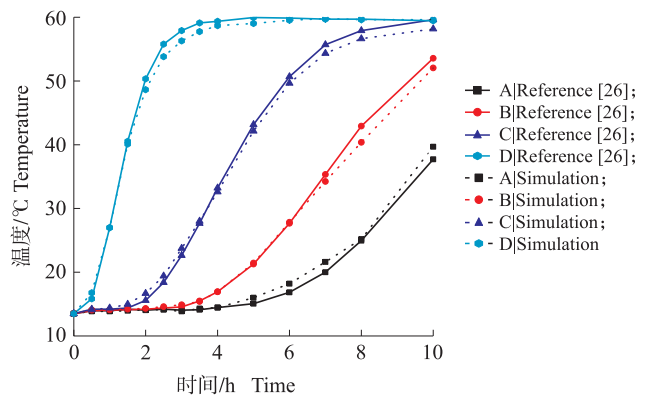


图 2 验证模型仿真值与文献值<sup>[26]</sup>对比

Fig. 2 Comparison between simulation value of validation model and literature value<sup>[26]</sup>

## 2.1 粮仓速度场分析

从纵向、横向各3个位置截面对粮仓非分形通风系统与分形通风系统通风质量进行分析,非分形与分形通风模型的通风管道布置方式和粮仓截面分析位置见图3。从图4—7的粮仓通风速度变化曲线可知,非分形通风系统与分形通风系统粮仓速度场分别经过约2与45 h才达到稳定,不再发生变化。在经过2.5 d(60 h)降温通风后,两模型温降进程到达一定程度,温降前沿接近粮堆上表面,故取通风2.5 d时速度云图进行分析,温度云图选取同一时刻。

**2.1.1 纵向截面速度场** 根据管道布置位置,选取 $X=12.7(X-12.7)$ 、 $X=16.5(X-16.5)$ 、 $X=19(X-19)$ 位置 $Y-Z$ 面速度云图进行分析,这3个位置分别对应为相邻两管道间横向距离四等分靠左竖直面、纵向管道中心竖直面、相邻两管道间等距竖直面,三截面距其最近管道中心轴横向距离不同,综合考虑三面速度场可更全面评价两系统通风质量(图3)。

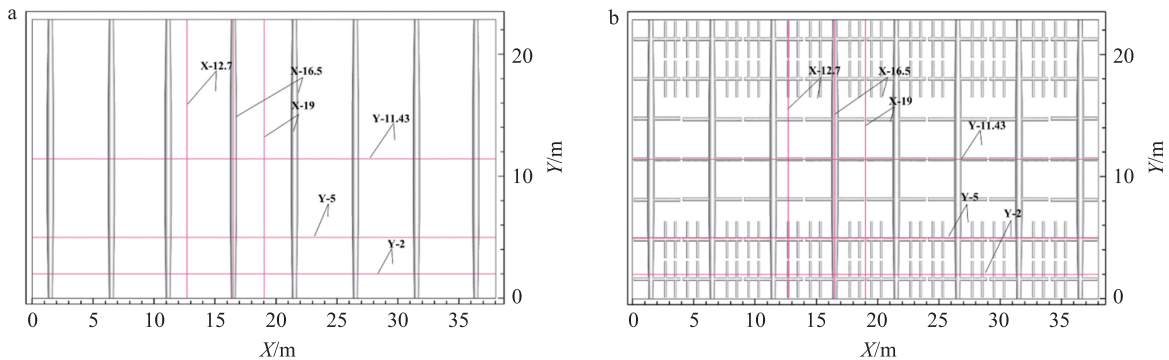


图3 非分形通风系统(a)和分形通风系统(b)的粮仓截面标识

Fig. 3 Cross-section of granary under non-fractal ventilation system(a) and fractal ventilation system(b)

在非分形通风系统,对相同截面速度云图进行分析。从图4-a可知,各纵向截面气流速度在极短时间内急升,2 h后达到稳定。因面 $X-16.5$ 为管道竖直中心面,该面受管道通风影响最大且管内气流速度远大于其余区域,故该面的通风均速远大于其余2面;面 $X-12.7$ 通风均速略大于面 $X-19$ ,原因是到达2面的气流经过填料距离不同,多孔介质填料流阻极大,在通道附近区间通风速度下降梯度极大,当通风速度降至一定值后速降则不再明显。

面 $X-12.7$ ,粮堆区域通风速度分布较为均匀,但两侧下方存在通风速度弱区,有可能出现通风死角,仓顶空气在两侧近壁处积聚,流向窗口位置(图4-b);面 $X-16.5$ ,管道附近区域通风速度大,但在与填料

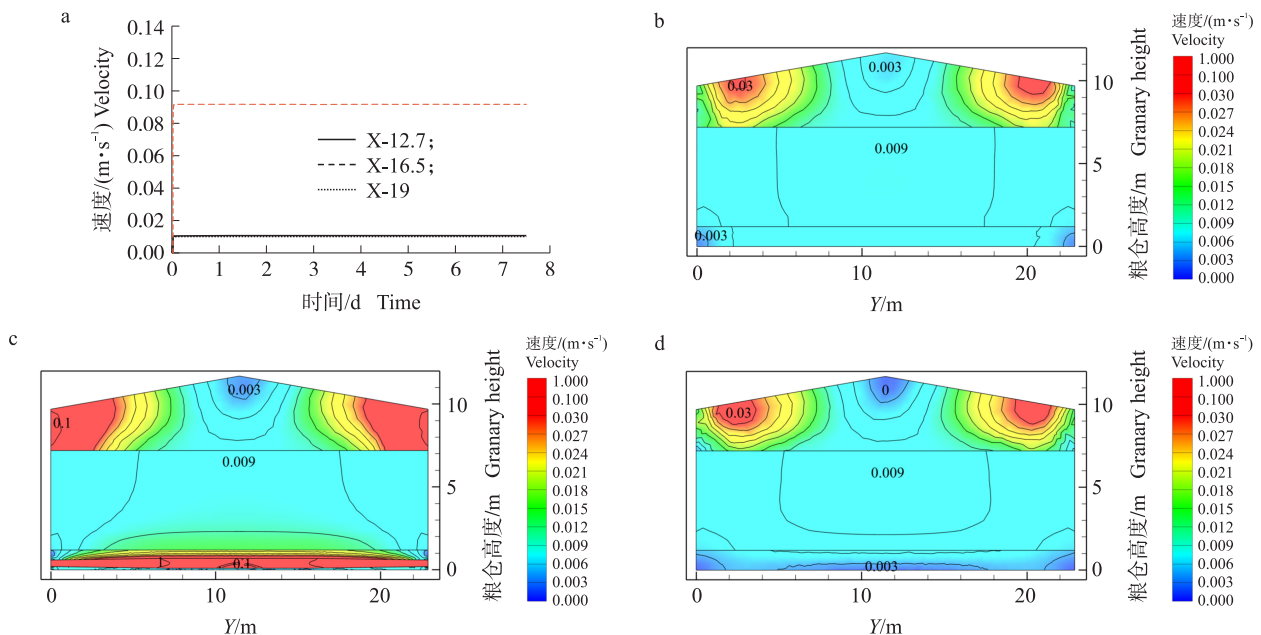


图4 非分形通风系统纵向截面均速变化(a)以及截面 $X-12.7$ (b)、 $X-16.5$ (c)和 $X-19$ (d)速度分布  
Fig. 4 Average velocity variation(a) and velocity distribution in longitudinal section of  $X-12.7$ (b),  $X-16.5$ (c) and  $X-19$ (d) under non-fractal ventilation system

层交界处粮堆通风速度却明显下降,原因是交界处处两多孔介质孔隙结构不一致,流阻在该处增大,气流难以流过,等速线在界面出现断层,其余位置的通风速度分布与面 X-12.7 相似,仓顶位置由于通风在窗口积聚流出,两侧上方通风速度大增(图 4-c);面 X-19,粮堆区域通风速度分布呈中间大两侧小,与面 X-12.7 相近,但填料层中心与两侧局部区域通风速度小于  $0.03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,原因是面 X-19 为两通风管横向等距面,通风横向速度在该面上相互抵消,而粮堆中横向速度为主速度,故该区域位置速度微弱(图 4-d)。

在分形通风系统,对相同截面速度云图进行分析。由图 5-a 可知,因分形通道复杂,短时间内通风难达到平衡,故分形通风系统粮仓的通风速度激增后继续缓慢变化,经约 45 h 后才达到稳定。与非分形通风系统相比,整体通风速度有所上升,原因是分形支管具有高效进风引导与扩散作用,提高粮仓整体通风效果。

分形支管可强化相关区域的通风效果,提升通风质量。面 X-12.7 速度分布呈中间大两侧小,等值线分布稀疏,说明区域通风速度均匀,两侧通风死角得到明显削弱,粮堆整体通风效果较好(图 5-b);面 X-16.5 中间速度为  $0.012 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的等值线所占区域较非分形通风系统小,说明管道进风被分形管道有效导流扩散(图 5-c);面 X-19 速度等值线分布与面 X-12.7 相似,在分形支管通风加强作用下,填料区的通风微弱区被压制在通风管下方,粮堆区域通风强度接近面 X-12.7(图 5-d)。总体上,分形通风结构对主管内进风进行引流,将进风有效引导至各区域,与非分形通风系统相比,极大提升粮仓区域通风质量。

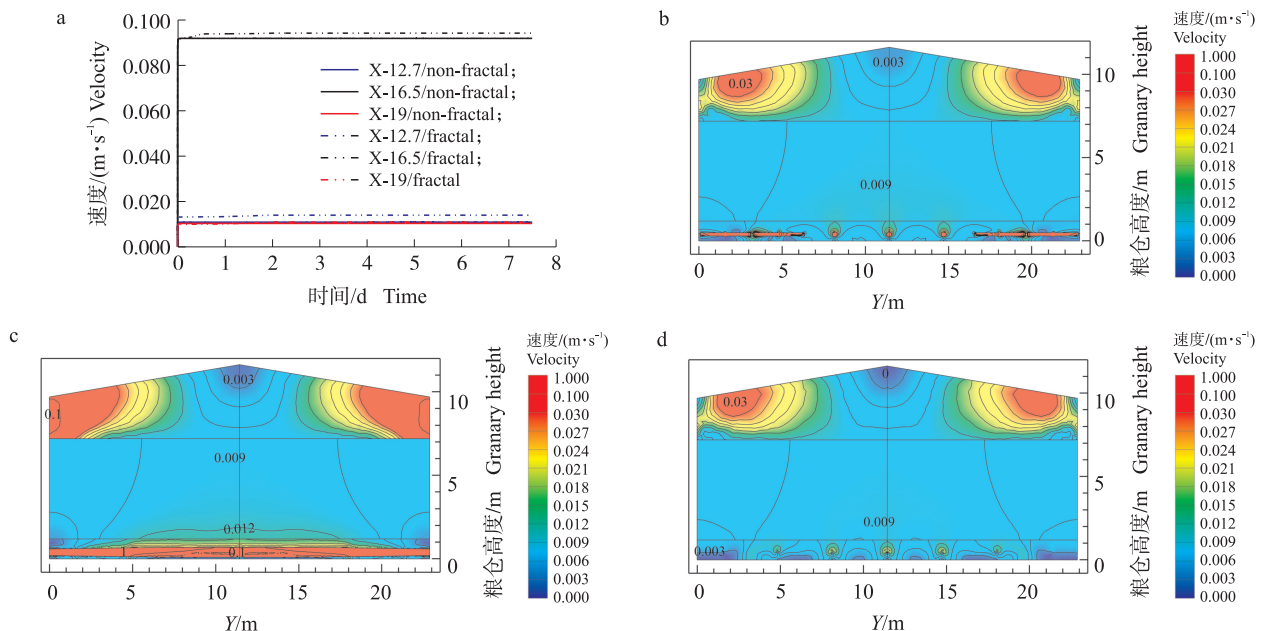


图5 分形通风系统纵向截面均速变化(a)以及截面 X-12.7(b)、X-16.5(c)和 X-19(d)速度分布

Fig.5 Average velocity variation(a) and velocity distribution in longitudinal section of X-12.7(b), X-16.5(c) and X-19(d) under fractal ventilation system

**2.1.2 横向截面速度场** 如图 6 所示,选  $Y=11.43$ (Y-11.43)、 $Y=5$ (Y-5)、 $Y=2$ (Y-2)位置 X-Z 截面速度云图进行分析,其分别对应粮仓横向中心面、横向通风速度过渡区、横向近壁面,由于通风管道通风特征为中间强、两端弱,三截面处受管道通风强度的影响存在差异,综合三截面速度场分布情况可更合理全面评估通风系统通风质量。

如图 6-a 所示,三面通风速度在约 2 h 达到稳定。面 Y-2 通风均速最大,面 Y-11.43 通风均速最小,三截面通风均速排列的原因是,出风口为窗户,位于上仓壁,大部分出风都要流经面 Y-2,进风向外扩散有限,管内气流速度较大,接近进风速度;面 Y-5 仓顶区域空气速度明显大于面 Y-11.43,面 Y-5 管道内气流速度也大于面 Y-11.43;面 Y-11.43 仓顶区域空气流向窗户,进风管内进风因对称对冲横向速度被抵消,仓顶空气速度与进风管内进风速度都是最小的,而三截面粮堆通风速度相近,故面 Y-11.43 通风均速最小。

从图 6-b 可知,面 Y-2 管道附近速度更大,但在粮仓下方两相邻管道中间区域出现速度微弱区,原因是从管道出来的反向等速通风抵消,形成微流区。粮堆区两侧速度稍高于其他区域,因近壁通风管中心距

壁纵向距离只有 1.5 m, 小于相邻 2 管中心距的一半 (2.5 m), 对近壁区域通风更强, 所以两侧通风速度更大; 又因面 Y-2 近窗户, 仓顶空气区域出现 6 个高速气流区。在图 6-c 中, 面 Y-5 通风管对外通风能力更强, 通风管附近较大速度等值线区域较面 Y-2 大; 仓顶空气区域离窗户更远些, 整体速度小于面 Y-2, 其余区域速度场与面 Y-2 相近。在图 6-d 中, 面 Y-11.43 管道气流速度虽小于面 Y-5, 但其对粮堆通风强度强于面 Y-5, 仓顶空气区域空气都流向两侧窗户, 使得该区域速度偏小。总体上, 面 Y-11.43 与面 Y-5 明显通风强度更高, 通风质量更好, 而面 Y-2 粮堆底部还存在通风弱区隐患, 说明管道进风口侧区域通风还需加强。

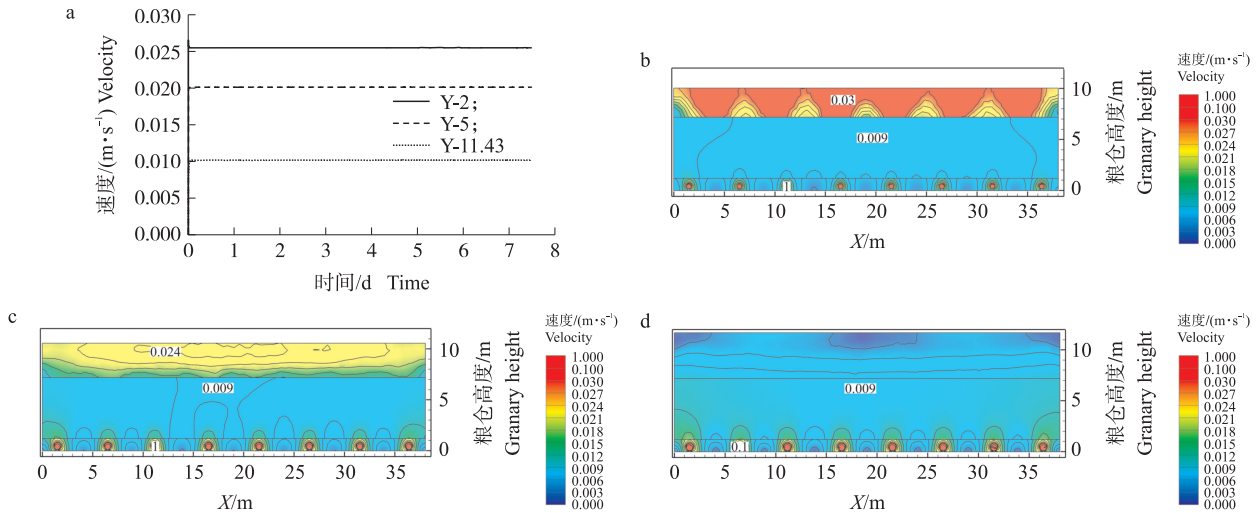


图 6 非分形通风系统横向截面均速变化 (a) 以及截面 Y-2 (b)、Y-5 (c) 和 Y-11.43 (d) 速度分布

Fig. 6 Average velocity variation (a) and velocity distribution in cross section of Y-2 (b), Y-5 (c) and Y-11.43 (d) under non-fractal ventilation system

在图 7-a 中, 分形三截面通风均速与非分形通风系统差异显著, 3 条通风均速曲线在激增后依旧出现明显变化, 面 Y-2 通风均速略微降低, 面 Y-5 通风均速轻微升高, 面 Y-11.43 通风均速则大幅升高, 最终分形通风系统的面 Y-2、Y-5、Y-11.43 均速分别较非分形略小、略大、大幅增加。因分形管道结构较非分形的复杂, 尤其是在二级分形单元, 进风在通道变化不定, 达到稳定需要更多时间。由图 7-b 可知, 截面 Y-11.43 经过一级分管中心, 在分管加强通风作用下, 面 Y-11.43 通风更强, 加上管道区域气流速度较大, 在分形系统面 Y-11.43 通风均速远远大于非分形系统。相邻一级分管, 面 Y-5 的通风强度得到一定增强。进风管入口处通风强度较弱, 且管道进风经一级分形单元分流后, 管内速度降低, 而二级分形单元增强通风提升有限, 故分形面 Y-2 均速小于非分形, 但有分形支管增强通风, 通风速度弱区控制在管道下

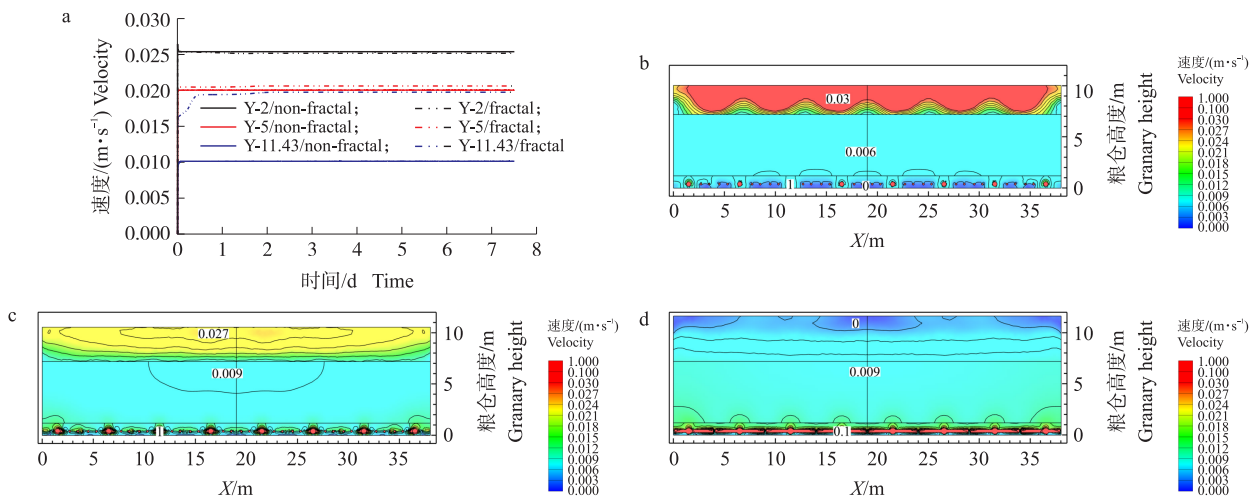


图 7 分形通风系统横向截面均速变化 (a) 以及截面 Y-2 (b)、Y-5 (c) 和 Y-11.43 (d) 速度分布

Fig. 7 Average velocity variation (a) and velocity distribution in cross section of Y-2 (b), Y-5 (c) and Y-11.43 (d) under fractal ventilation system

方,保证了粮堆通风质量。图7-c中,面Y-5填料区得益于分形支管,有效增强通风强度,消除填料区的速度弱区,粮堆通风速度均匀性明显增强,通风质量得到提升。图7-d中,面Y-11.43因分形支管通风增强,整体区域通风均匀性得到增强,有效提升降温质量。分形管道能有效增强局部通风强度,提升粮堆整体区域的通风均匀性,但也存在降低进风主管区域通风能力,尤其在进风入口侧区域,降低通风渗透速度的弊端。

## 2.2 粮仓温度场分析

在通风2.5 d后发现粮仓2种通风系统温度场发展充分,冷锋前沿到达或接近粮堆上表面,此时温度等值线整体发展程度较好,故采用通风2.5 d时温度云图作为分析对象进行研究。

**2.2.1 纵向截面温度场** 如图8-a所示,面X-16.5在通风初始就出现明显温降,面X-12.7的较快降温节点要延后0.5 d,面X-19则在通风约1.5 d后均温曲线下降速率才明显。面X-12.7和X-16.5温度场相似,冷锋前沿到达粮堆上表面,等值线呈倒U密集分布,说明两面区域通风速度大,降温速率快,但两侧近壁区域温降较差(图8-b、c);面X-19等值线在粮堆区域稀疏分布,冷锋前沿只达到粮堆中部,与面X-12.7、面X-16.5差距较大(图8-d)。虽然大部分区域降温效果较好,但是近壁区域与相邻管道中间区域降温较差,需要加强。

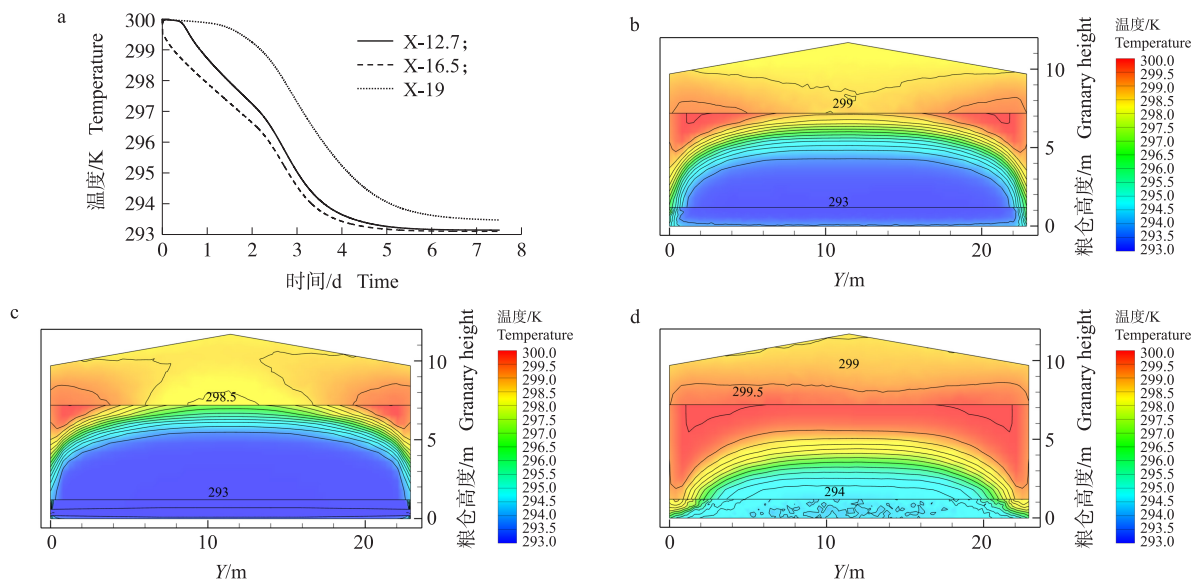


图8 非分形通风系统纵向截面均温变化(a)以及截面X-12.7(b)、X-16.5(c)、X-19(d)温度分布

Fig. 8 Average temperature variation(a) and temperature distribution in longitudinal section of X-12.7(b), X-16.5(c) and X-19(d) under non-fractal ventilation system

如图9-a所示,与非分形通风系统相比,分形通风系统的粮仓纵向温降均匀性明显改善。面X-19与面X-12.7降温曲线下降节点显著提前,其均温曲线接近,面X19与面X-16.5均温差有效减少,三面整体均温性表现较好。但分形系统整体降温速率较非分形系统小,分形系统到达稳定温度时间较非分形系统晚约1 d,原因是分形结构分流进风,削弱通风在多孔介质内渗透能力,在增强局部区域通风时降低整体通风降温速率。

与非分形通风系统相比,分形通风系统对温降均匀性有明显提升。面X-12.7与面X-19近壁区域温度明显下降,并且两侧冷锋未显著落后于中间冷锋,说明在2面区域整体降温均匀性较好;面X-19主要得到二级分形单元与一级支管末端通风增强,所以在支管对应位置温降效果更明显(图9-b、d)。面X-16.5温度场变化较小,只是降温速率有所降低(图9-c)。总体来看,分形结构提升了粮仓纵向温降均匀性,增强温降弱区的降温作用。

**2.2.2 横向截面温度场** 如图10-a所示,面Y-2均温曲线下降进程稍慢于面Y-5和Y-11.43,面Y-5与面Y-11.43温降曲线接近,其最大均温差小于0.3℃。

三截面温度场分布较为相似,低温区从通风管附近开始发展至长条状,冷锋前沿达到或接近粮堆上表面,但在相邻2个低温区之间区域温度尚高,温降效果不理想。面Y-2处管道通风强度较弱,冷锋前沿慢于其余2面(图10-b);面Y-5与面Y-11.43冷锋前沿都贯穿整个粮堆区域到达粮面(图10-c、d)。总体

而言,非分形通风系统冷却速率虽大,但冷却区域集中在通风管及附近的上方区域,不能对相邻管纵向中间区域有效通风降温,冷却区间的高温区容易引发局部回潮,需要改善通风对其消除。

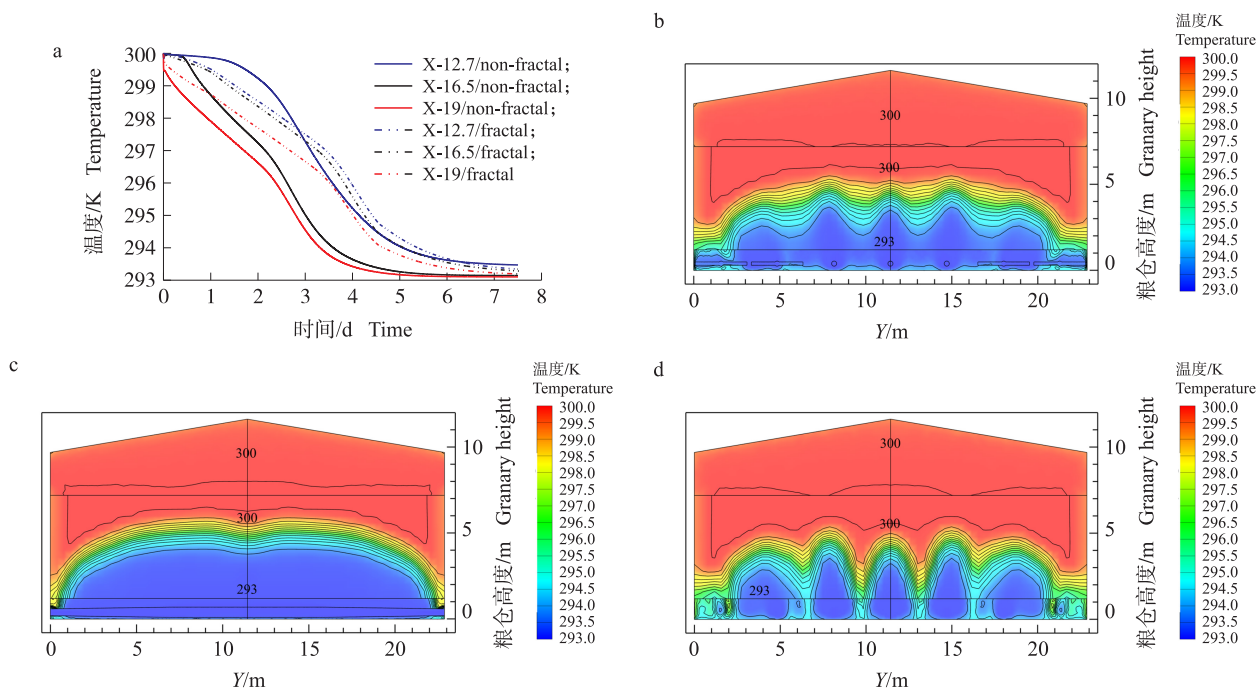


图 9 分形通风系统纵向截面均温变化 (a) 以及截面 X-12.7 (b)、X-16.5 (c) 和 X-19 (d) 温度分布

Fig. 9 Average temperature variation (a) and temperature distribution in longitudinal section of X-12.7 (b), X-16.5 (c) and X-19 (d) under fractal ventilation system

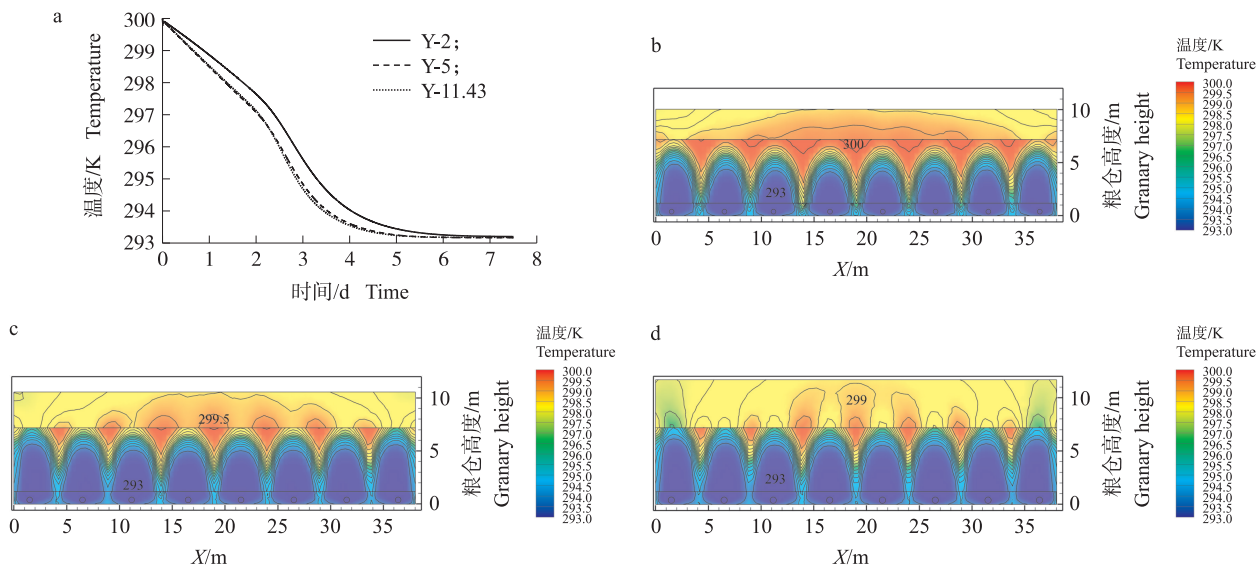


图 10 非分形通风系统横向截面均温变化 (a) 以及截面 Y-2 (b)、Y-5 (c) 和 Y-11.43 (d) 温度分布

Fig. 10 Average temperature variation (a) and temperature distribution in cross section of Y-2 (b), Y-5 (c) and Y-11.43 (d) under non-fractal ventilation system

如图 11-a 所示,分形通风系统三截面温降速率均小于非分形通风系统。面 Y-11.43 穿过通风较强的一级分管横向中心面,面 Y-5 与一级分管相邻,面 Y-2 与最近一级分管中心相距一定距离,故面 Y-2 与其余 2 面均温降差较大,但最大温差小于 0.7 °C,说明横向均温性保持较好。

图 11-b 中,面 Y-2 冷锋前沿下方大部分区域温度接近进风温度,温度等值线大致平行于 X 轴,通风管间高温区被有效消除;图 11-c 中,面 Y-5 温度等值线除在通风管上方出现轻微凸起,其余区域大致表现出平直状,粮仓下方区域温度都降至进风温度;图 11-d 中,面 Y-11.43 温降均温性优异,冷锋前沿呈水平平滑状,深“V”高温区完全消失。分形结构虽会减缓粮仓降温速率,但可高效提升粮仓横向均温性,提高粮仓通风降温质量。因粮仓外壁面温度恒为 298.15 K,粮仓贴壁区域温降速率更为缓慢。

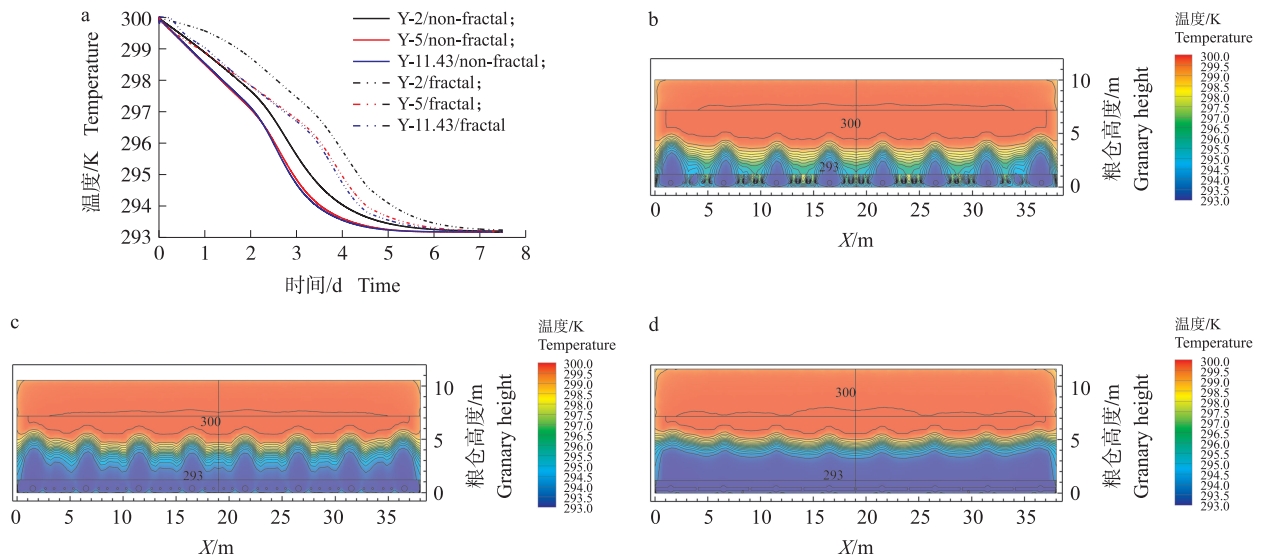


图 11 分形通风系统横向截面均温变化 (a) 以及截面 Y-2 (b)、Y-5 (c) 和 Y-11.43 (d) 温度分布  
 Fig. 11 Average temperature variation (a) and temperature distribution in cross section of Y-2 (b), Y-5 (c) and Y-11.43 (d) under fractal ventilation system

### 3 速度均匀性分析

为验证通风期间分形通风系统对粮堆通风速度分布的均匀性,在粮堆不同高度设 7 层监测点,最底层监测点位于粮堆底面,高度为 1.2 m,其余 6 层监测点高度分别为 2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、7.0 m,最上层监测点距粮堆上表面 0.2 m。每层监测点均为 13 个,分布均匀,共设置 91 个监测点,4 角落监测点距离墙壁的距离为 1.0 m,其余的等距离分布<sup>[27]</sup>,具体尺寸和分布见图 12。分形通风系统则通过对称拓展为完整体后再取样统计。

为更准确评估 2 种通风系统通风速度均匀性,选择 10 和 15 m<sup>3</sup>·t<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>进风量对 2 系统内部速度场分布进行模拟,评价分形通风系统在不同进风量下的通风速度均匀性。

因 2 通风系统速度场稳定所需时间分别为 2 和 45 h,也为保证与上文分析保持一致,选择通风 2.5 d (60 h) 的粮堆作为通风均匀性验证对象。

采用 Weltens 等<sup>[28]</sup>建立的均匀性指数(exponent of uniformity, EOU)计算公式,对粮堆通风速度均匀性进行量化,作为均匀性评价依据。

$$r = 1 - \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(v_i - \bar{v})^2}}{\bar{v}} \quad (6)$$

式中: $r$  为均匀性指数,在 0~1 范围内取值,越接近 1 说明粮堆内的速度均匀性越好; $v_i$  为各监测点的速度 (m·s<sup>-1</sup>); $\bar{v}$  为监测点所在层的面权重平均速度 (m·s<sup>-1</sup>); $n$  为监测点数。

为评估监测点取样可靠性,引入偏移度 (degree of deviation, DOD) 作为参考,取值范围为 0~1,越接近 0 说明取样值偏差越小,可信度越高,计算公式为:

$$p = \frac{\sqrt{(\bar{v} - \bar{v})^2}}{\bar{v}} \quad (7)$$

式中: $p$  为偏移度; $\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$  为某监测层取样速度求和平均值。

仿真结果如表 3 所示。粮堆在 1.2~2.0 m 高度区域,粮堆内部通风均匀性指数较低,说明此高度区域通风均匀性一般;在高度大于 2.0 m 后,通风均匀性指数明显提升,最小值大于 0.84,说明高度大于 2.0 m

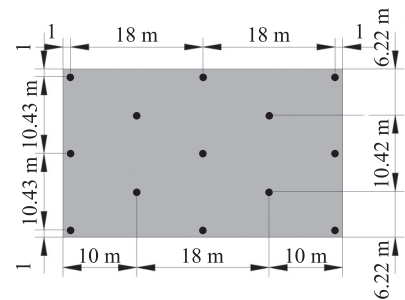


图 12 监测点布局图  
 Fig. 12 Layout of observation points

区域粮堆通风均匀性良好,通风质量优异。虽个别取样点位于分形支管上方,导致个别取样值偏大,使得分形系统通风均匀性指数下降,但不同进风量下分形通风系统通风均匀性指数依旧接近非分形通风系统值,显示分形通风系统依旧保持较高的通风均匀性,2个进风量下平均 EOU 分别达到 0.919、0.900。整体偏移度处在较低位值,最大偏移度与最大平均偏移度出现在  $15 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  进风量的分形系统,分别为 0.151 与 0.061,数值在误差允许范围之内,说明速度监测值取样可信度较高。

表 3 不同送风量粮堆通风速度均匀性计算结果

Table 3 Calculation results of uniformity of ventilation speed for grain piles with different air supply volumes

高度/m Height	非分形通风系统 Non-fractal ventilation system				分形通风系统 Fractal ventilation system			
	$10 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$		$15 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$		$10 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$		$15 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$	
	EOU	DOD	EOU	DOD	EOU	DOD	EOU	DOD
1.2	0.856	0.092	0.815	0.113	0.842	0.125	0.813	0.151
2.0	0.902	0.026	0.881	0.047	0.874	0.089	0.846	0.113
3.0	0.924	0.013	0.903	0.030	0.915	0.079	0.890	0.059
4.0	0.948	0.002	0.934	0.012	0.931	0.030	0.914	0.041
5.0	0.962	0.001	0.952	0.006	0.950	0.018	0.937	0.025
6.0	0.966	0.001	0.958	0.004	0.957	0.014	0.946	0.020
7.0	0.970	0.004	0.963	0.001	0.961	0.012	0.952	0.017
均值 Mean	0.933	0.020	0.915	0.030	0.919	0.052	0.900	0.061

注:EOU:均匀性指数 Exponent of uniformity;DOD:偏移度 Degree of deviation.

## 4 结论

本文提出新型多孔介质(沙砾)填料包裹变截面通风管道通风系统与新型多孔介质填料包裹变截面管道加分形结构通风系统,分形通风系统在变截面管道增加分形结构实现加强速度弱区通风,提升粮仓通风均匀性,提高粮仓通风质量;并通过计算流体动力学数值仿真方法对2种通风系统速度场、温度场进行对比分析,从粮仓速度分布、温度分布、通风均匀性方面综合研究2种通风系统通风降温效果。

1) 沙砾填料层可有效避免粮堆内出现通风弱区,改善通风质量;分形通风系统的分形结构按最小通风压降进行设计,降低进风在分形管中流阻,实现增强通风弱区通风的同时,最大程度保留通风对外渗透能力,改善通风条件,提升粮仓通风均匀性。但降低通风向上渗透速率,削弱了冷锋推进与通风在粮仓快速扩散能力。

2) 通风 2.5 d 时,非分形通风系统进风管入口区域及相邻通风管道交界区温降较慢,降温速率较小,区域温度仍接近初始温度;通风管道附近及上方区域温降速率较快,温度降至进风温度,粮仓温降均匀性不佳,最大温差达到 2.8 K,需提高。在分形通风系统粮仓,分形结构虽降低粮仓整体降温速率,但可有效提高高原温降弱区温降速率,最大温差为 1.3 K,纵向横向均温性均表现优异,分形结构在提升粮仓温降均匀性方面具有优异作用。

3) 在  $10$  和  $15 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  2 种进风量情况下,受分形结构对个别取样点干扰,分形通风系统通风均匀性指数分别为 0.919、0.900,较非分形通风系统稍小,但保持在较高水平,说明分形通风系统通风均匀性较好。偏移度较非分形通风系统稍大,分别为 0.052 和 0.061,但偏移度较低,说明取样数据依然具有较高的可信度。

### 参考文献 References:

- [1] 高利伟. 中国主要粮食作物供应链损失和浪费特征及其减损潜力研究[D]. 北京:中国农业科学院,2019.  
Gao L W. Characteristics and reduction potentials of losses and waste of major grains of the food supply chain in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [2] 王明旭,赵子炎. 平房仓储粮生态多场耦合系统水分迁移传递机理研究综述[J]. 中国粮油学报,2022,37(8):28-35.  
Wang M X, Zhao Z Y. Review of study on the mechanism of water transfer in the multi-field coupling system of grain ecology for grain storage in bungalow granary[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(8): 28-35 (in Chinese with English abstract).
- [3] 张俊东,鲁玉杰,王文敬,等. 粮食储藏环境中的多场耦合效应对粮食品质影响的研究进展[J]. 中国粮油学报,2022,37(11):38-45.  
Zhang J D, Lu Y J, Wang W J, et al. Research advances of multi-field coupling effect on grain quality in grain storage environment[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(11): 38-45 (in Chinese with English abstract).
- [4] 崔晋波. 高大平房仓主要储粮害虫种群生态学研究[D]. 重庆:西南大学,2006.  
Cui J B. Population ecology of major stored product insect pests in large warehouse[D]. Chongqing: Southwest University, 2006 (in Chinese with English abstract).

- [5] Thorpe G R. On the rate of cooling of aerated food grains[J]. *Biosystems Engineering*,2022,222:106-116.
- [6] 王洁,王文钰,陶冬冰,等. 变温干燥工艺对稻谷干燥特性和品质的影响[J]. *沈阳农业大学学报*,2022,53(2):239-247.  
Wang J,Wang W Y,Tao D B,et al. Effect of variable temperature on drying characteristics and quality of paddy rice[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*,2022,53(2):239-247(in Chinese with English abstract).
- [7] 刘淑玲,武增强. 粮仓通风系统和方法:CN105075546A[P]. 2017-03-29.  
Liu S L,Wu Z Q. Barn ventilating system and method:CN105075546A[P]. 2017-03-29(in Chinese).
- [8] 李加斌,王远成,刘家琦,等. 一种新型通风网络对房式仓通风效果影响的模拟研究[J]. *粮油食品科技*,2023,31(1):189-195.  
Li J B,Wang Y C,Liu J Q,et al. Simulation study on the ventilation effect of a new type of ventilation network on room-type warehouses[J]. *Science and Technology of Cereals,Oils and Foods*,2023,31(1):189-195(in Chinese with English abstract).
- [9] 熊涤生. 机械通风储粮中的粮堆结露及预防[J]. *粮食科技与经济*,1999(4):25-27.  
Xiong D S. Dew formation in grain piles with mechanical ventilation and its prevention[J]. *Grain Technology and Economy*,1999(4):25-27(in Chinese).
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 粮食平房仓设计规范:GB 50320—2014[S]. 北京:中国计划出版社,2014.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Code for design of grain storehouses:GB 50320-2014[S]. Beijing:Beijing China Planning Publishing House,2014(in Chinese).
- [11] 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(1):21-31.
- [12] Thorpe G R. The modelling and potential applications of a simple solar regenerated grain cooling device[J]. *Postharvest Biology and Technology*,1998,13(2):151-168.
- [13] de Carvalho L D,Martins J H,de Castro M E,et al. Aeration simulation of stored grain under variable air ambient conditions[J]. *Postharvest Biology and Technology*,2006,42(1):115-120.
- [14] Olatunde G,Atungulu G G,Sadaka S. CFD modeling of air flow distribution in rice Bin storage system with different grain mass configurations[J]. *Biosystems Engineering*,2016,151:286-297.
- [15] Zhang X X,Zhang H,Wang Z Q,et al. Research on the temperature field of grain piles in underground grain silos lined with plastic[J]. *Journal of Food Process Engineering*,2022(3):45.
- [16] 张宇. 仓储内生物质多孔介质呼吸过程热湿耦合特性研究[D]. 南京:南京理工大学,2018.  
Zhang Y. Research on heat and humidity coupling characteristics of biomass porous media in storage[D]. Nanjing:Nanjing University of Science and Technology,2018(in Chinese with English abstract).
- [17] 陈林根,田凤红,肖庆华,等. 基于恒截面流道矩形单元体的积耗散率最小传质构形优化[J]. *热科学与技术*,2012,11(2):136-141.  
Chen L G,Tian F H,Xiao Q H,et al. Constructal entransy dissipation rate minimization for mass transfer based on rectangular element with constant channel[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*,2012,11(2):136-141(in Chinese with English abstract).
- [18] Bejan A,Errera M R. Deterministic tree networks for fluid flow:geometry for minimal flow resistance between a volume and one point[J]. *Fractals*,1997,5(4):685-695.
- [19] Feng H J,Chen L G,Xie Z H,et al. "Volume-point" mass transfer constructal optimization based on triangular element[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*,2013,38(2):365-372.
- [20] Bejan A. Constructal theory:from thermodynamic and geometric optimization to predicting shape in nature[J]. *Energy Conversion and Management*,1998,39(16/17/18):1705-1718.
- [21] 刘晗. 多孔介质流体流动中的仿蜂巢分形网络[D]. 武汉:华中科技大学,2014.  
Liu H. Comby fractal microchannel network for fluid flow in porous media[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2014(in Chinese with English abstract).
- [22] Wang Y C,Duan H F,Zhang H,et al. Modeling on heat and mass transfer in stored wheat during forced cooling ventilation[J]. *Journal of Thermal Science*,2010,19(2):167-172.
- [23] 陈宝明,刘芳,云和明. 多孔介质自然对流传热传质[M]. 北京:科学出版社,2016.  
Chen B M,Liu F,Yun H M. Natural Convective Heat and Mass Transfer in Porous Media[M]. Beijing:Science Press,2016(in Chinese).
- [24] Bejan A. Constructal tree network for fluid flow between a finite-size volume and one source or sink[J]. *Revue Générale de Thermique*,1997,36(8):592-604.
- [25] 侯党员. 空气-沙子热交换器传热特性的实验研究[D]. 北京:华北电力大学,2021.  
Hou D Y. Experimental research on the heat transfer characteristics of air-sand heat exchanger[D]. Beijing:North China Electric Power University,2021(in Chinese with English abstract).
- [26] 王振华. 仓储粮堆湿热传递过程的数值模拟与试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2014.  
Wang Z H. Numerical simulation and experimental study on heat and mass transfer of stored grain pile[D]. Beijing:China Agricultural University,2014(in Chinese with English abstract).
- [27] 潘钰,王远成,邱化禹,等. 粮仓机械通风阻力和均匀性模拟研究[J]. *山东建筑大学学报*,2016,31(3):254-258.  
Pan Y,Wang Y C,Qiu H Y,et al. Numerical study on the ventilation resistance and uniformity of mechanical vertical ventilation on the grain storage[J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*,2016,31(3):254-258(in Chinese with English abstract).
- [28] Weltens H,Bressler H,Terres F,et al. Optimisation of catalytic converter gas flow distribution by CFD prediction[C]//SAE Technical Paper Series. Warrendale,PA,United States:SAE International,1993.