

密闭储存粮堆内部自然对流和热量传递分析

尉尧方¹,王远成¹,潘钰¹,魏雷²,石天玉²,尹君²

(1. 山东建筑大学热能工程学院, 山东 济南 250101; 2. 国家粮食局科学研究院, 北京 100037)

摘要:基于多孔介质流动和传热传质理论,建立了仓储粮堆内部自然对流、热湿耦合传递的数学模型。采用近似分析原理和数值模拟方法研究了仓储粮堆内的传热和自然对流过程及其影响因素。结果表明对于颗粒较小的谷物如小麦,储存过程中的温度主要受热传导的影响,但是对于颗粒较大的谷物如玉米,自然对流的影响会更大。通过理论分析和数值模拟证明了粮仓中低速的水分迁移对储粮温度变化影响很小。在“瘦高”型的圆筒仓中,自然对流的影响作用较强,自然对流作用会使粮仓内温度混合更加均匀。

关键词:粮食储藏;粮粒;传导;自然对流;水分输送

中图分类号:TS 379.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7561(2016)06-0093-06

Analysis of natural convection and heat transfer in grain bulk during sealed storage

YU Yao-fang¹, WANG Yuan-cheng¹, PAN Yu¹, WEI Lei², SHI Tian-yu², YIN Jun²

(1. Thermal Engineering school, Shandong Jianzhu University, Jinan Shandong 250101;

2. Academy of State Administration of Grain, Beijing 100037)

Abstract: Based on the theory of heat and mass transfer in porous medium the mathematical model of natural convection and coupled heat moisture transfer in grain bulk was established. The heat transfer and natural convection processes and their influence factors were studied by the method of approximate analysis and numerical simulation. The results showed that the temperature was mainly affected by the heat transfer in cereals of small kernel, such as wheat, while for cereals of larger kernel, such as corn, natural convection was the main effect. The theoretical analysis and numerical simulation proved that the effect of low moisture migration in grain bin on the temperature change of grain was very small, which could be neglected. In silos, the effect of natural convection was significant, which enabled the temperature in silo more uniformity.

Key words: grain storage; grain kernel; conduction; natural convection; moisture transfer

温度和水分是影响储粮质量的主要因素,准确预测粮仓中粮食的温度和水分是至关重要的。由于储粮的温度由周围的天气条件决定,所以周围天气的变化会影响到储粮的温度。同时,由于粮仓内存在温差引起了粮堆内部的自然对流,从而导致了粮堆中的水分分配不均。因此,仓储粮堆内部自然对流流动、热量传递和水分迁移是相互耦合的,而且耦合关系也非常复杂。

Yaciuk 等人^[1],Jiang 和 Jofriet^[2]建立了在粮堆内部以导热为主要热量传递的模型,忽略了自然对流的影响,并对仓储粮食内部的温度变化进行了模拟分析。该研究认为,粮食在储存过程中会发生自然对流,但对储粮的温度并没有太大的影响。Beukema 等人^[3]对矩形粮仓中的自然对流和传热过程进行了研究,结果表明,自然对流会影响粮堆内部的热量传递。自然对流作用会使传热率升高,最终使温度达到一个稳定状态;数学模型中不考虑自然对流项时,计算出的温度会比考虑自然对流时得到的温度值低 11%。Nguyen^[4]建立了描述粮堆内自然对流传热过程的方程,分析了粮堆内部热量传递及

收稿日期:2016-05-08

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

作者简介:尉尧方,1992年出生,女,在读硕士。

通讯作者:王远成,1963年出生,男,教授。

水分迁移的过程。研究发现,粮堆内部存在着自然对流运动,但粮堆内部空气的自然对流的速率是非常小的。

本文首先建立了仓储粮堆内部自然对流、热湿耦合传递的数学模型,对仓储粮堆内部热湿耦合传递过程进行了近似分析,得到了描述仓储粮堆自然对流强度的无量纲参数—瑞利数,探究了瑞利数对仓储粮堆内部热量传递及水分迁移的影响;同时分析了仓型、粮种、初始水分对仓储粮堆内部热量传递的影响,得到了圆筒仓内部小麦和玉米储藏过程中自然对流和热量传递的特征。

1 建立数学模型

在柱坐标系下,通过粮粒间的空气速度满足以下两个方程^[3]:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$v_r = -\frac{\kappa}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r}, \quad v_z = -\frac{\kappa}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} + \rho_a g [1 - \beta(T - T_a)] \quad (2)$$

且能量方程式(不考虑热源)^[3]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \gamma(u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z}) = \alpha \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3)$$

方程式中 $\gamma = C_p / (C_p)_m$, 是热容量的比值;其中粮粒的热容量是 $C_p = 1230 \text{ J}/(\text{m}^3 \text{K})$ ^[3];粮堆的热容量是 $(C_p)_m$; $\alpha = k / (C_p)_m$ 是粮堆的热扩散率, m^2/s , k 是粮堆的传热系数, $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 。 r 是柱坐标系中的径向坐标; h 是柱坐标系中的垂直坐标; v_r 是流体的径向速度; v_z 是流体的垂直速度; κ 是渗透率; μ 是空气的动力粘度, $\text{kg}/\text{s} \cdot \text{m}$; T 是粮堆的温度, $^\circ\text{C}$; T_a 是周围空气的平均温度, $^\circ\text{C}$; g 是重力加速度, m/s^2 ; p 是空气压力, Pa ; ρ_a 是温度 T_a 时的空气密度, kg/m^3 ; β 是空气的热膨胀系数, $1/\text{K}$ 。

在粮仓外大气的温度可以通过下式计算:

$$T = T_a + A \sin \left[\frac{2\pi}{360} (t_d - 70) \right] \quad (4)$$

其中, A 是粮仓周围空气温度变化幅度, K ; t_d 是计算的天数。

方程(1)和(2)可以用来计算压力 p 和速度 v , 将方程式写成流函数 χ 形式如下:

$$v_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \chi}{\partial z}, \quad v_z = -\frac{1}{r} \frac{\partial \chi}{\partial r} \quad (5)$$

这些方程式满足方程式(1),然后在方程式(2)中用 χ 代替 v ,因为在式(2)中使用了 Boussinesq 近似,所以 $\nabla \times \nabla p = 0$,最终整理得出:

$$0 = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \chi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \chi}{\partial z} \right) + \frac{Ra \alpha \partial T}{HA \partial r} \quad (6)$$

其中, H 是圆柱形仓的高度。方程中 Ra 是描述粮堆中自然对流强弱的无量纲数—瑞利数,其表达式如下^[5]:

$$Ra = \kappa \rho_a g \beta A H / (\mu \alpha) \quad (7)$$

它是描述自然对流的一个准则数,反映了自然对流流动强度对对流换热强度的影响。在纯粹的自然对流中,浮升力对流动强度的影响可用瑞利数 Ra 来判定。

通过方程式(3)和(6)求解 χ 和 T ,以及通过式(5)得到速度的值。以上的计算公式可以用于计算高度为 H ,半径为 R 的圆筒形仓内粮粒的温度。这些数学模型在二维的两坐标系 (r, h) 中关于中心线 $r=0$ 是对称的。同时在仓底部和中心线 $(r=0)$ 处,粮仓表面的温度梯度是零。固体表面或中心线处也没有气流通过。其边界条件是:

$$\text{在 } r=0 \text{ 处, } \frac{\partial T}{\partial r} = 0;$$

$$\text{在 } z=0 \text{ 处, } \frac{\partial T}{\partial z} = 0;$$

$$\text{且在 } r=0, r=R, z=0, z=H \text{ 处, } \chi = 0 \quad (8)$$

在初始条件 $\chi = 0, t_d = 0$ 时,通过方程式(4)可知,此时粮仓中的空气和粮食混合的温度与周围的温度相等。

在式(2)中使用了 Boussinesq 近似。在方程式(1)中假定空气密度 ρ_a 为常数,从方程式(2)中可以看出密度是温度的函数。

$$\rho = \rho_a [1 - \beta(T - T_a)] \quad (9)$$

式中, ρ_a 是温度 T_a 时的空气密度; T_a 是周围空气的平均温度, β 是空气膨胀系数值假定为常数。当 $T - T_a < 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,方程适用。

方程(2)是由达西定律表达式转化而来。Bird 等人^[6]的研究发现:由于自然对流的速度非常小,如果速度小于限制速度,达西定律就可以适用,即多孔介质的雷诺数应满足下式:

$$\frac{d \rho_a v}{\mu(1 - \varepsilon)} < 10 \quad (10)$$

所以限制速度通过计算可得满足条件为: $v < 3 \times 10^{-2} \text{ m}/\text{s}$

其中, d 是粮粒的颗粒直径; v 是空气的表面速度; ε 是孔隙率。这里采用的空气和粮食的 $d = 3 \times 10^{-3} \text{ m}$, $\mu/\rho_a = 1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ 以及 $\varepsilon = 0.4$ ^[6]。所以 $v < 3 \times 10^{-2} \text{ m}/\text{s}$ 。它表明,气流速度会随压力下降

而直线增加。

2 近似分析原理及自然对流和传热过程分析

2.1 近似分析原理

近似分析即数量级分析的方法,是指通过比较方程式中各项数量级的相对大小,把数量级较大的项保留下来,而舍去数量级较小的项,实现方程式的合理简化。比如:当传热对粮仓内的温度影响较大时,可以忽略方程式中的自然对流项;当自然对流显著的影响粮仓内的温度时,可以忽略方程式中的瞬变项将方程式简化处理,这样便于得到方程式中不同量之间的关系。

2.2 仓储粮堆内部自然对流和热量传递的近似分析

为了使传热显著影响能量方程式(3),根据近似分析原理,此时可以忽略自然对流项,而且考虑导热主要发生在径向,即垂直方向的导热远小于径向的导热,因此方程式简化为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} \sim \alpha \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

$$\text{即: } \frac{\Delta T}{\delta t} \sim \alpha \frac{\Delta T}{R^2};$$

$$\text{因此, } \delta t \sim R^2/\alpha \quad (11)$$

小麦的 $\alpha = 1.076 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[6],当柱形粮仓取 $R = 3 \text{ m}$ 时,此时 $\delta t \sim 8 \times 10^7 \text{ s}$ (约为两年半), δt 在这里代表温度变化明显的时间长度。这表明在一年的储存中周围的温度变化将会影响储粮的温度,但短时间内的变化,如昼夜变化,对温度变化的影响很小。Converse 等人^[7]后来通过实验也证明了当粮仓中储存小麦时,这个结论是正确的。

由连续性方程式(1)可得 $v_r/R \sim v_z/H$,并假设 $\Delta T \sim A$, A 是方程(6)中的空气温度变化幅度,再根据式(11)将(6)式整理化简,表明速度可以通过下式被估测。

$$v_z \left[\left(\frac{R}{H} \right)^2 + 1 \right] \sim Ra\alpha/H \quad (12)$$

如果自然对流项数量级非常大或者远大于传导项的数量级,那么由能量方程式(3)得到自然对流项和扩散项之间的关系如下式:

$$\gamma \left(v_r \frac{\Delta T}{R} + v_z \frac{\Delta T}{H} \right) \geq \alpha \left(\frac{\Delta T}{R^2} + \frac{\Delta T}{H^2} \right) \quad (13)$$

根据柱坐标系下的连续性方程式(1)可得: $v_r/R \sim v_z/H$,将 v_r 整理成关于 v_z 的关系式,代入上式整

理得:

$$2\gamma v_z/H \geq \alpha \left(\frac{1}{R^2} + \frac{1}{H^2} \right) \quad (14)$$

然后将上式代入方程式(12),约去 v_z 可以得到:

$$Ra \geq \left[2 + \left(\frac{H}{R} \right)^2 + \left(\frac{R}{H} \right)^2 \right] \frac{1}{2\gamma} \quad (15)$$

分析上式,如果粮仓满足 $H/R = 1$,当 $Ra \geq 2/\gamma$ 时,储粮的传热过程的关系式中自然对流项就是重要的。但是,如果 H/R 值比较大,这时 $R/H \sim 0$,将(15)式整理可得自然对流项重要的条件就变为 $Ra \geq (H/R)^2/2\gamma$ 。

因此,根据以上推导可知,当自然对流在储粮过程中占主导作用时,不仅取决于粮食种类、粮仓的尺寸,还有一部分取决于周围温度的变化幅度。因此,求出粮仓中谷物的 Ra/H 值,就可以判断自然对流在整个储粮过程中是否重要。

$Ra/H = \kappa \rho_a g \beta A / \mu \alpha$,通过表达式可以看出两种粮食的显著差异项是渗透率 κ 。虽然不同粮种间的 α 值略有一些差异,但其余项的值都是固定的, A 、 ρ_a 和 β 项也会受周围环境温度的影响。渗透率值可以由 Kozeny - Carman 公式估算^[8]:

$$\kappa = \frac{d^2 \varepsilon^3}{172.8 (1 - \varepsilon)^2} \quad (16)$$

它是根据 Bird 等人^[6]使用的公式修改而来。对于大多数粮种来说,孔隙率 ε 取常数值 0.4,那么由上式可知影响渗透率的主要项是粮粒的平均直径 d 。

对于小麦, $\mu/\kappa = 4 \times 10^3$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, $\alpha = 1.076 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $\beta = 3.47 \times 10^{-3}$, $\gamma = 8.5 \times 10^{-4}$, $\rho_a = 1.23$ 以及 $A = 15$ 时, $Ra/H = 1.4 \times 10^3$ ^[5]。那么对于圆筒形仓,通过计算可知:如果 $H > 1.7 \text{ m}$,当 $H/R = 1$ 时,粮储过程中自然对流项起主导作用;如果 $H/R = 10$,当 $H > 43 \text{ m}$ 时,才能说明粮仓中的温度主要受自然对流的影响。因此,对于常采用的圆筒仓的 H/R 值,自然对流对粮食温度产生的影响很小,即自然对流对粮仓内部热量传递的作用可以忽略。

但是当粮粒的尺寸较大时,自然对流会产生较大的影响。对于玉米,同理计算可得 $Ra/H \sim 5 \times 10^3$,所以,当 $H/R = 1$, $H > 0.5 \text{ m}$ 时;当 $H/R = 10$, $H > 12 \text{ m}$ 时,自然对流对粮食温度的影响就会很大。对于玉米,土豆,桔子和苹果, $Ra/H \sim 10^4$ 到 5×10^4 ,

自然对流在仓储过程中对温度的影响也是很重要的。

Ra/H 还取决于环境温度 T_a 和方程(6)中的空气温度变化幅度 A 。对这些值也进行近似计算,假定 $A = 15\text{ }^\circ\text{C}$ 。这是国内中部粮食产区的典型值,但该值也取决于地理位置和粮仓吸收的太阳辐射的热量。

3 近似分析结果的数值模拟验证

在 Converse 等人^[6]进行的实验中,小麦填充在 $H = 33.528\text{ m}$, $R = 2.743\text{ m}$ 的圆柱形仓中。实验条件是空气温度 $T_a = 14.20\text{ }^\circ\text{C}$, $A = 15.30\text{ }^\circ\text{C}$ 。粮食的初始温度为 $6.1\text{ }^\circ\text{C}$, 水分含量为 13.3% 湿基。热扩散的值是 $\alpha = 1.076 \times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$, 小麦和低速空气流的 μ/κ 值是 4×10^3 , 因此, $Ra \sim 5 \times 10^4$ 。利用上述近似分析可说明,自然对流不会显著影响粮仓内部的热量传递,影响粮食温度的主要是热传导作用。

当方程(6)中 $t_d = 180\text{ d}$ 时,在 $r = (7/8)R = 2.4\text{ m}$, $z = H/2 = 16.764\text{ m}$ 点上,速度 $v = 5.4 \times 10^{-5}\text{ m/s}$; 在 $r = (1/8)R = 0.3\text{ m}$, $z = H/2$ 点上,速度 $v = 1.0 \times 10^{-4}\text{ m/s}$ 。这些数据也说明了自然对流的速度是非常小的。

图1是数值模拟的半径为 1.524 m 粮仓内部粮食的平均温度与 Converse 的计算结果的比较,从图1可以看出,二者吻合较好,说明本文建立的数学模型是合理的,而且在求解温度场时,自然对流项是可以忽略的。

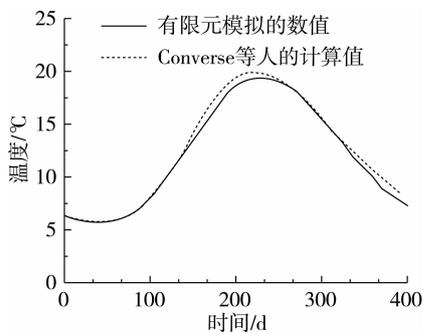


图1 半径为 1.524 m 的圆柱形粮仓中温度随时间的变化曲线

4 数值模拟仓储过程的结果分析

4.1 粮堆高度与圆筒仓半径对储粮温度变化的影响

图2是数值模拟的两种圆筒仓内储粮平均温度随着瑞利数变化的情况。当粮堆高度与圆筒仓半径不变时,粮种的温度变化主要随瑞利数改变而改变,而 Ra 体现了环境温度随时间的变化。如图2所

示,一年中的储粮平均温度的最大值,它总是出现在在每一年的第二十八周(夏季期间),恰好在环境温度最大值的最大值后。当 $Ra > 10^4$ 时,从图2可以看出, $H/R = 1$ 的仓的平均温度就开始随着 Ra 的增大而升高。同样,对于 $H/R = 10$ 的粮仓,当 $Ra > 10^5$ 时,温度就开始升高。

从图2中还可以看出: $H/R = 10$ 的粮仓的平均温度低于 $H/R = 1$ 的粮仓的值。说明柱形粮仓的不同尺寸对储粮温度变化也是有影响的。这是因为在 $H/R = 1$ 的粮仓内,热传导在水平和垂直方向都发生。但是当 $H/R = 10$ 时,只有水平方向的热传导作用是显著的。而且,在图2中可以看出,随着周围温度的增加, $H/R = 10$ 的粮仓受周围温度变化产生的影响将会滞后于 $H/R = 1$ 的粮仓。当 Ra 值较小时,在粮仓中心 ($r = 0, z = H/2$) 处,热传导控制着热量从周围的高温到中心低温传递。但是,随着 Ra 增加到大约 10^4 , 由于自然对流加速了能量的流动,使温度分配更加均匀,这时中心温度会接近于平均值。

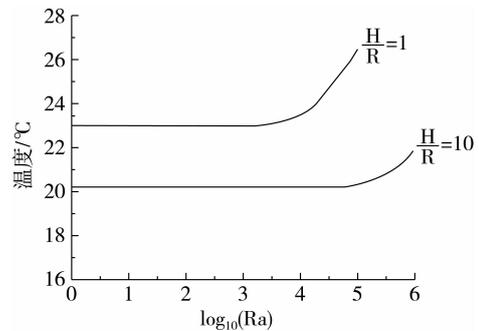


图2 不同仓型内粮堆平均温度随瑞利数的变化规律

4.2 储粮过程中空气流速的分析

图5是数值模拟的圆筒仓粮堆内部空气的速度分布。仓的尺寸是 $H = R = 3\text{ m}$, 初始水分含量为 10% 。当 $Ra = 10^2$ 和 $Ra = 10^5$ 时,流线形状相似,但是当 $Ra = 10^5$ 时,流线的梯度会更大些,说明此时粮堆内部自然对流的速度相当较大。分析图5可以得到,当 $Ra = 10^2$ 时, $r = R, z = H/2$ 处的空气流速是 $4.0 \times 10^{-6}\text{ m/s}$, 在 $r = R/8, z = H/2$ 处,空气流速是 $2.6 \times 10^{-7}\text{ m/s}$; 当 $Ra = 10^5$ 时, $r = R, z = H/2$ 处的空气流速是 $4.0 \times 10^{-3}\text{ m/s}$, $r = R/8, z = H/2$ 处的空气流速是 $1.8 \times 10^{-4}\text{ m/s}$ 。当 $Ra > 10^6$ 时,对于 $H/R = 1$ 的圆筒仓,气流速度将会超过 $3 \times 10^{-2}\text{ m/s}$, 根据速度计算公式(10), 利用 Darcy 定律方程计算,结果就不准确了。所以当前的分析不适用于较大的 Ra 值。

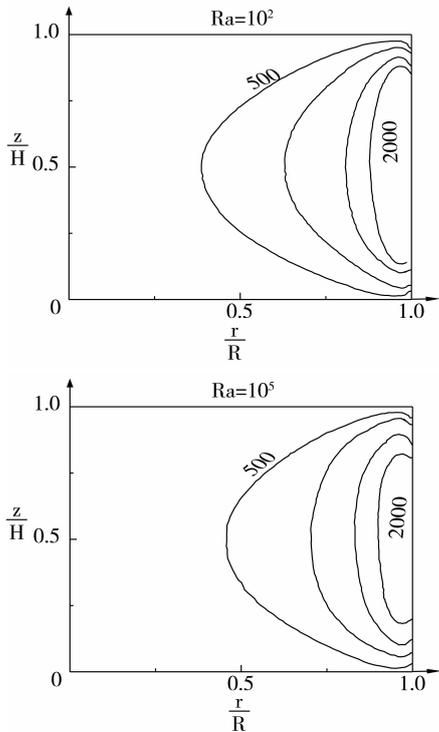


图5 不同瑞利数下粮堆内部的流函数(速度)分布

4.3 储粮水分对储粮温度变化的影响

4.3.1 初始水分不同对储粮温度变化的影响

为了深入分析水分对粮堆内部热量传递的影响,方程(3)改写成另外一种形式,对于整个传热过程,当包括水分含量变化项时,能量方程为:

$$(\rho_{\text{bulk}} C_{\text{bulk}}) \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho_{\text{air}} C_{\text{air}}) u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[k_{\text{bulk}} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + \rho_{\text{bulk}} h_{\text{fg}} \frac{\partial W_g}{\partial t} \quad (17)$$

其中: $k_{\text{bulk}} = 0.1170 + 0.0013M$; $C_{\text{bulk}} = 1.398 + 0.0409M$; $M = W_g / (1 + W_g) \times 100$ 。在上述各式中, k_{bulk} 是储粮的导热系数, $W/(m^2 \cdot K)$, C_{bulk} 是储粮的热容量, $J/(kg \cdot k)$, h_{fg} 是蒸发潜热, J/kg 。 M 是储粮的湿基水分,% W_g 是储粮的干基水分,%。1 kg粮食的水分含量数量级的变化 $\Delta W_g = 10^{-2}$,那么由 M 表达式可知对于 1 kg 作物粮堆水分的百分数变化是 $\Delta M = 10^{-2}$,进而由上述关系式可得 k_{bulk} 的数量级不变,对 C_{bulk} 的数量级也没有影响。可见,不同的初始水分含量对储粮的热量传递影响较小,粮仓温度的变化差异也就很小,王远成^[9,10]等人的数值模拟结果也验证了这个结论。

图3是近似夏季工况下两种初始水分情况下仓内温度分布,夏季工况下,小麦初始温度为0℃,外界的平均环境温度为20℃,初始水分分别为14%和18%。夏季工况时,粮堆初始温度小于外界大气

温度,由于热传导的作用,使得储粮温度从外到内逐渐升高,达到150 d时,粮堆右上半部的温度都超过了278 K(5℃)。比较图3中a和b可以看出,初始水分不同对粮堆的温度变化产生的影响差别很小。

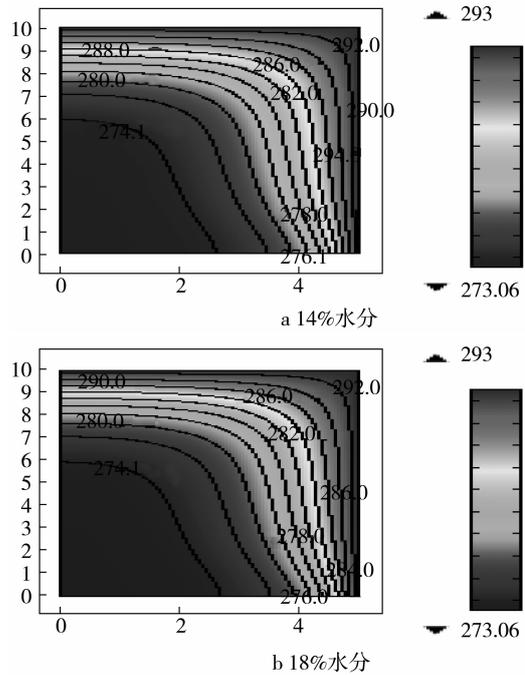


图3 水分为14%和18%近似夏季工况150 d时粮堆内部温度场

4.3.2 粮仓内部水分迁移对储粮温度的影响

众所周知,在整个储粮的过程中,由于水分的迁移会使某点处的水分变化量较大,同时,其它地方的储粮水分会相应减小,但是对于密封性较好的粮仓来说,尽管粮堆内部会发生水分迁移和再分配,但整体的水分变化量是非常小的,所以在研究粮仓温度的年变化中可以忽略水分的变化这一项,说明储粮的水分迁移对温度影响很小。

图4是发生在圆筒仓中心($R=0, Z=H/2$)的考虑和不考虑水分迁移影响时圆筒仓中心的储粮温度。从图4发现,与没有水分转移情况相比,有水分

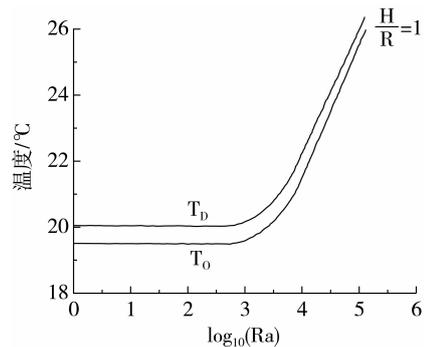


图4 当 $H/R=1$ 时, T_D 和 T_0 分别是考虑和不考虑水分迁移影响时圆筒仓中心的储粮温度

迁移时圆筒仓中心的储粮温度值约高 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。但随着自然对流的增加,即瑞利数 Ra 的增大,两者间差异是减少的。由此可得,平均温度不受水分迁移的影响。

5 结论

通过对圆筒仓建立一个完整方程的近似分析和数值模拟验证,圆筒仓内部如果满足 $Ra \geq \left[2 + \left(\frac{H}{R}\right)^2 + \left(\frac{R}{H}\right)^2\right]_{\frac{1}{27}}$,那么此时储粮的温度变化主要受空气的自然对流影响,反之,圆筒仓内的储粮温度变化主要受热传导的影响。

对于粒径较小的谷物,比如说小麦, Ra 通常都是小于这个值,所以来自自然对流的影响很小,但对于颗粒较大的作物,如玉米,自然对流的影响就不可忽略。而且,对于“瘦高”型的圆筒仓,其内部自然对流作用更强,此时的储粮温度变化更容易受自然对流的影响。同时,自然对流加快了粮堆内部的热量传递,使粮仓内部的温度更加均匀。初始水分以及粮堆内部的水分迁移对储粮温度变化影响也较小,可以忽略。

参考文献:

- [1] Yaciuk G, Muir W E, Sinha R N. A simulation model of temperatures in stored grain[J]. Agricultural Engineering Research, 1977, 20: 245 - 258.
- [2] Jiang S, Jofriet J C. Finite element prediction of silage temperature in tower silos [J]. Transactions of American Society Agricultural Engineering, 1987, 30(6): 1744 - 1750.
- [3] Beukema K J, Bruin S, Schenk J. Three - dimensional natural convection in a confined porous medium with internal heat generation [J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1983, 26: 451 - 458.
- [4] Nguyen T V. Natural convection effects in stored grains - a simulation study. Drying Technology, 1987, 5: 541 - 560.
- [5] Smith E A, Sokhansanj S. Natural convection and temperature of stored produce - a theoretical analysis [J]. Canadian Agricultural Engineering, 1989, 32: 91 - 97.
- [6] Bird R B, Stewart W E, Lightfoot E N. Transport phenomena [M]. New York: John Wiley & Sons, 1960.
- [7] Converse H H, Graves A H, Chung D S. Transient heat transfer within wheat stored in a cylindrical bin [J]. Transactions of American Society Agricultural Engineering, 1973, 16(1): 129 - 133.
- [8] Close D J, Peck M K. Experimental determination of the behaviour of wet beds in which natural convection occurs [J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1986, 29: 1531 - 1541.
- [9] 王远成, 白忠权, 张中涛, 元伟. 仓储粮堆内热湿耦合传递的数值模拟研究 [J]. 中国粮油学报, 2015, 30(11): 97 - 102.
- [10] Wang Y C, Yang K M, Zhang Z T, Qi W, Yang J. Natural convection heat and moisture transfer with thermal radiation in a cavity partially filled with hygroscopic porous medium [J]. Drying Technology, 2016, 34(3): 275 - 286. 

欢迎订阅 2017 年《中国粮油学报》

《中国粮油学报》是中国科学技术协会主管、中国粮油学会主办的全国食品工业类中文核心期刊。主要刊载谷物、油脂化学、工艺学等方面的研究成果。栏目包括:稻谷、小麦、玉米、大豆、杂粮、淀粉、蛋白、油脂、饲料、储藏、加工工艺、粮物流通、信息自动化、标准与检测方法及综述。

《中国粮油学报》是国内外公开发行的一级刊物,邮发代号:80 - 720,国内统一刊号:CN 11 - 2864/TS,国际标准连续出版物刊号:ISSN 1003 - 0174。月刊,每月 25 日出版,铜版印刷,大 16 开 146 页,每期定价 56.00 元,全年定价 672.00 元(含平刷邮费)。

地址:北京市西城区百万庄大街 11 号粮科大厦(100037)

银行汇款开户行:交通银行北京百万庄支行

户名:中国粮油学会

账号:110060774018010013416

电话:010 - 68357510 010 - 68357810

网址:www.lyxuebao.net

E-mail:lyxb@ccoonline.com, bjb@ccoonline.com