基于 CFD – EDEM 耦合的小区玉米帘式滚筒干燥箱数值模拟

石林榕,吴建民,赵武云,孙　伟,孙步功,张峰伟
(甘肃农业大学工学院, 甘肃 兰州 730070)

摘　要: 为解决通过现有技术模拟仿真干燥装置干燥物料过程困难的问题,基于 CFD – EDEM 气固耦合数学模型,采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流非稳态的欧拉 – 欧拉耦合算法对小区玉米帘式滚筒干燥箱干燥过程中气固传热、内流场动态分布进行分析研究。仿真前对气固耦合模型进行了以下前处理:借助三维造型软件建立了干燥箱模型,应用 Gambit 软件对其进行了网格划分,利用切片造型技术建立了玉米仿真模型,并对两种耦合模型进行了初始条件、边界条件和耦合参数等设定。仿真结果表明:在 1.5 s 的仿真过程中,玉米模型处于不同温度场数量符合正态分布,其中处于 373 K 的玉米模型数量为 735 个左右,大约 75 个玉米模型温度上升了 7.9 K;滚筒内的帘板的转动对热气流有扰动加速作用,使帘板附近的空气速度由 0.50 $m\cdot s^{-1}$上升至 0.63 $m\cdot s^{-1}$。

关键词: 帘式滚筒干燥箱;玉米;数值模拟;CFD – EDEM
中图分类号: S226.6　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-7601(2014)06-0273-06

The numerical simulation for corn curtain roller drying box based on CFD – EDEM coupling

SHI Lin-rong, WU Jian-ming, ZHAO Wu-yun, SUN Wei, SUN Bu-gong, ZHANG Feng-wei
(*College of Engineering*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*)

Abstract: In order to solve the problem of simulating difficulty for the process of drying material by drier through existing technology, based on the CFD – DEM gas-solid coupling mathematical model, using the standard $k-\varepsilon$ turbulence unsteady Euler-Euler coupling algorithm, has analyzed the heat transfer by the gas and solid and dynamic distribution of the internal flow field in the drying process of the curtain roller drying box. Before simulation has carried out the pre-treatment for the gas-solid coupling model: Has set up the dryin box model by the 3D modeling software and carried out the grid division by using the Gambit software. Using the slice modeling technology has set up the corn simulation model and the initial condition, boundary condition and coupling parameters for the two kinds of coupled models. The simulated results shown that: In the 1.5 s simulating process, the corn model be in different temperature field accorded with normal distribution. Among them, the number of corn model was 735 be in 373 K, the temperature has increased 7.9 K about 75 corn models; the rmove of the curtain in the roller will have the disturbance accelerate function for heat air flow, the air speed near the curtain plate was increased from 0.50 $m\cdot s^{-1}$ up to 0.63 $m\cdot s^{-1}$.

Keywords: curtain roller drying box; corn; numerical simulation; CFD – EDEM

玉米是世界上高产的种植作物之一[1]。玉米可作为粮食、饲料和工业原料[2]。由于玉米收获时水分含量较大(一般在 28% ~ 30%之间),贮藏稍有不慎,就会使粮食霉烂、变质。玉米干燥过程能把玉米中水分降低到安全点以下,来抑制其微生物的活性。然而由于玉米籽粒较大、单位比表面积(单位质量物料所具有的总面积)小、表皮结构紧密、表面毛细管较少等原因,造成水分不易从玉米中排出[3]。加之,中国主产区玉米具有含水率高和成熟度低等特点,使其热稳定性较差,且高温干燥时易造成热损伤。

目前,农村现有的晾晒设施受场地大小和天气变化等条件约束,远不能满足农村机械化集中收获

收稿日期: 2014-05-10
基金项目: "十二五"国家科技支撑项目农牧循环关键技术配套机具研发(2012BAD14B10 – 4)
作者简介: 石林榕,男,甘肃西和县人,硕士,研究方向为旱区农机具。E-mail: getmao@qq.com.
通信作者: 赵武云,甘肃兰州人,教授,博士,主要从事农业工程技术与装备研究。E-mail: zhaowy@gsau.edu.cn.

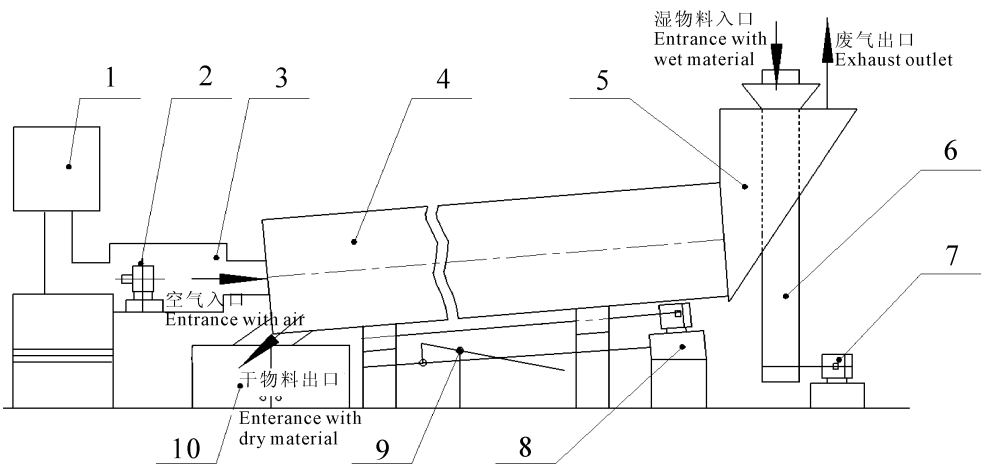
后对玉米干燥的要求。加之,干燥机械化是减少玉米产后损失的重要措施和必然趋势[4-5]。同时,成本投入较高的大中型塔式、循环式干燥机很难适应农村小区域集中烘干作业模式[6-7]。为保障农村小区玉米收获后安全贮藏和加快农村玉米的流通速度,在借鉴国内外成熟谷物干燥装置的基础上[8-9],设计了一种适合小区玉米干燥作业的帘式滚筒干燥机。本文重点通过 CFD - EDEM 耦合模块仿真模拟帘式滚筒干燥玉米过程中气固传热、内流场动态分布。

CFD - EDEM 耦合用于颗粒 - 流体系统的仿真,可用于玉米干燥气固耦合数值模拟,且物料干燥流固耦合数值模拟目前尚无报道。因此,开展玉米干燥的数值模拟对谷物干燥机设计研究具有指导意义。

1 小区谷物干燥箱

1.1 整体结构

如图 1 所示,小区谷物帘式滚筒干燥装置由燃油机 1、入口风机 2、燃烧室 3、帘式滚筒干燥箱 4、入料口 5、玉米输送带 6、输送电机 7、滚筒旋转电机 8、滚筒倾角调节机构 9、干玉米出口 10 等组成。其中帘式滚筒干燥箱 4 由玉米入口 4 - 1、玉米滑道 4 - 2、旋料板 4 - 3、滚筒 4 - 4、帘板 4 - 5、螺旋输送器 4 - 6 构成,如图 2 所示。其中帘式滚筒干燥箱的玉米入口 4 - 1 设有玉米滑道,可将进入的玉米导入干燥箱内,同时玉米入口处可排出干燥作业后的废气。在玉米干燥作业过程中可随时调节滚筒倾角调节机构 9 来改变帘式滚筒干燥箱 4 与水平面的角度来适应干燥过程不同时期的工艺流程。

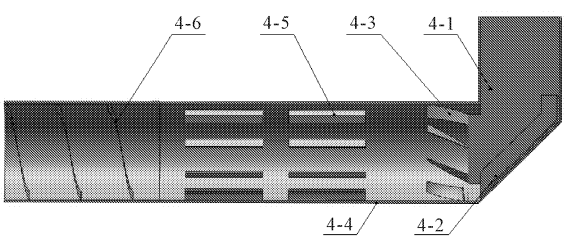


1.燃油机;2.入口风机;3.燃烧室;4.帘式滚筒干燥箱;5.入料口;6.玉米输送带;7.输送电机;8.滚筒旋转电机;9.滚筒倾角调节机构;10.干玉米出口

1. Fuel machine; 2. Inlet fan; 3. Combustion chamber; 4. Curtain roller drying box; 5. Feed inlet; 6. Corn belt; 7. Transport motor; 8. Rotation motor of drum; 9. Inclination regulatory agencies of drum; 10. Corn export

图 1 小区谷物帘式滚筒干燥机结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of grain curtain roller drying box



4 - 1.玉米入口; 4 - 2.玉米滑道; 4 - 3.旋料板; 4 - 4.滚筒; 4 - 5.帘板; 4 - 6.螺旋输送器

4 - 1. Corn entrance; 4 - 2. Corn chute; 4 - 3. Rotating plate; 4 - 4. Roller; 4 - 5. Curtain plate; 4 - 6. Augers

图 2 帘式滚筒干燥箱结构示意图

Fig.2 Structure diagram of the curtain roller drying box

1.2 工作原理

如图 1 所示,玉米在输送电机 7 带动下在湿物料入口进入干燥箱入料口 5,在滚筒旋转电机 8 带动下旋料板 4 - 3 按螺旋输送方式将玉米输送至干燥箱内。同时热风在入口风机 2 带动下从空气入口处进入帘式滚筒干燥箱 4 内对帘板 4 - 5 产生的玉米帘进行干燥,作业一定时间后,产生的废气在入料口 5 附近的废气出口排出。干燥完成的玉米通过螺旋输送器 4 - 6 输送出干燥箱。

2 数值模拟及分析

CFD - DEM 耦合方法的基本思路:通过 CFD 技

术求解流场,使用 DEM 方法计算颗粒系统的运动受力情况,二者以一定的模型进行质量、动量和能量等的传递,实现耦合。

2.1　欧拉耦合数学模型

本文基于 Fluent 和 EDEM 软件对小区谷物帘式滚筒干燥箱玉米干燥过程进行数值模拟。干燥仿真模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型非稳态的欧拉 – 欧拉耦合算法。欧拉模型不仅能实现固液两相之间的动量和能量交换,还能计算固体颗粒对流体相的影响。

2.1.1　CFD – DEM 阻力模型　CFD – DEM 耦合采用一种改进的自由流阻力来计算作用在颗粒球形上的力。所有的流体参数都来自于 CFD 的网格单元,这些单元包含了 EDEM 颗粒的中心。这种处理方法仅适合处理两种境况下的颗粒:那些大小相同或者是体积小于流体网格单元的颗粒,周围的流体参数(速度、密度和粘度等)的变化基本为常量。阻系数 F_d 取决于雷诺数 Re。

颗粒雷诺数方程:　$$Re = \frac{\alpha_{cell}\rho L \mid v \mid}{\eta} \tag{1}$$

自由流体阻力方程:$$F_d = 0.5 c_d \rho A \mid v \mid v \tag{2}$$

其中:

$$c_d = \begin{cases} 24/Re & Re \leqslant 0.5 \\ 24(1.0 + 0.25 Re^{0.687}/Re & 0.5 \leqslant Re \leqslant 1000 \\ 0.44 & Re > 1000 \end{cases}$$

式中,ρ 是流体密度;η 为流体的粘度;L 是颗粒球的直径;v 是颗粒与流体间的相对速度;α_{cell} 是 CFD 网格单元的自由体积;A 是颗粒的投影面积。

2.1.2　流体守恒定律

流体质量守恒:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_F \rho_F) + \nabla \cdot (\alpha_F \rho_F v_F = 0) \tag{3}$$

动量守恒:

$$\frac{\partial \varepsilon \rho \mu}{\partial t} + \nabla \cdot \varepsilon \rho \mu v_F = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \varepsilon \nabla u) + \rho \varepsilon g - s \tag{4}$$

式中,α_F 是流体网格单元的自由体积;ρ_F 为流体密度;v_F 是颗粒与流体间的相对速度;g 为重力;u 为粘性;s 为动量汇。阻力是由于两相之间的相对运动产生的。

2.1.3　热传递理论　热对流方程:

$$Q_{PF} = h_{PF} A_P \Delta T_{PF} \tag{5}$$

式中 $h_{PF} = \frac{K_F N H \mu_p}{d_p}$;$Q_{PF}$ 是热量;h_{PF} 是热传递系数;A_P 是颗粒表面系数;ΔT_{PF} 是温度差;P、F 分别表示流体相和固体相;K_F 是气体热传导系数;$N\mu_p$ 为努赛尔数,是流率与传导率的比值;d_p 为颗粒直径。它通常是雷诺数与普朗特数的函数。

努赛尔数由 Ranz & Marshall 的相关数来评估,评估方程如下式:

$$Nu = \begin{cases} 2 + 0.6\alpha_F^n Re_P^{1/2} Pr^{1/3} & Re_P < 200 \\ 2 + 0.5\alpha_F^n Re_P^{1/2} + 0.02\alpha_F^n Re_F^{0.8} Pr^{1/3} & 200 < Re_P < 1500 \\ 2 + 4.5e^{-5}\alpha_F^n Re_P^{1.8} & Re_P > 1500 \end{cases} \tag{6}$$

式中,Re_P 为颗粒雷诺数;Pr 为普朗特数,由流体物性参数组成的一个无量纲参数群,表明温度边界层和流动边界层的关系,反映流体物理性质对对流传热过程的影响。

2.1.4　质量分数计算采样点　为对每个样本点进行检验,并确认其位于流体网格单元内的位置。某个网格单元内的固体体积分数就是颗粒边界表面内的样本点在流体网格单元内的所有点中所占的比例,可由下式获得:

$$m_p(t) = \sum_{particles} \frac{\rho_p n_c V_p}{N} \tag{7}$$

式中,ρ_p 颗粒密度;n_c 是颗粒网格单元中样本点的数量;n 是颗粒内的样本点的数量;V_p 是颗粒的体积。

2.2　仿真模型的建立

2.2.1　模型建立与网格划分　工作时小区谷物帘式滚筒干燥箱使热气流流经颗粒换热进行干燥,考虑到整个干燥过程仿真的困难性,本文仅对干燥滚筒核心工作段进行干燥过程仿真。应用 Solidworks 软件建立干燥滚筒仿真模型,然后保存为.X_T 格式导入 GAMBIT 2.4 中进行网格划分,分别对滚筒进行自由网格划分,对内部流场通道进行映射网格划分。划分完共有 136851 个网格。

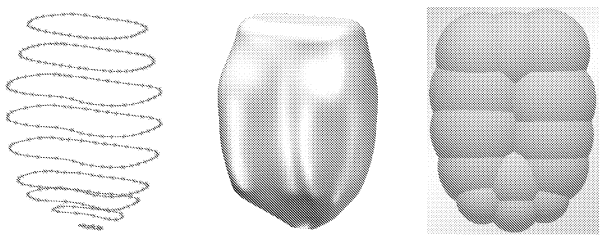
2.2.2　玉米仿真模型　在 Solidworks 中建立间距为 1mm 的基准面,将绘制的.dwg 文件按照玉米籽粒切片自顶向下的顺序逐个插入到对应的基准面上[8-10]。根据各邻近的草图上对应点将各个基准面上的草图进行对齐,所有截面导入后的效果如图 3(a)所示。扫描实体后玉米籽粒三维模型如图 3(b)所示。本文采用球颗粒聚合方法建立了玉米籽粒离散模型[11]。

2.3　初始条件及边界条件确定

湍动能方程:　$$k = \frac{3}{2}(v_{avg} D)^2 \tag{7}$$

湍流耗散率:　$$\varepsilon = C_\mu^{0.75} \frac{k^{1.5}}{D} \tag{8}$$

式中,D 为关联尺寸入口直径(m);v_{avg} 为平均流速($m \cdot s^{-1}$);$C_\mu = 0.09$。



(a) 截面轮廓 Section profile　(b) 玉米籽粒实体 Corn kernel entities　(c) 玉米仿真模型 Corn simulation model

图 3　玉米仿真模型

Fig.3　The corn simulation model

假定干燥单元内空气为不可压缩,采用 Velocity – inlet 速度入口条件,方向垂直于入风平面,据实测样机进风口平均风速设定为 0.5 $m \cdot s^{-1}$;考虑到帘式滚筒干燥箱的帘板在旋转过程中对流经的气场会有扰动,因此,气相选用湍流模型。设置为 $k-\varepsilon$ 标准模型,湍动能及耗损率根据公式(7)和(8)可得 $k = 1.215\ m^2 \cdot m^{-3}$, $\varepsilon = 0.1223\ m^2 \cdot s^{-2}$;在 Fluent 中设置空气温度为 441 K[12-13];玉米模型的比热值取 2 051 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$[14];废气出口面设置为 Outflow 边界条件;将干燥滚筒壁面设为绝热壁;在 EDEM 中设置颗粒与壁面之间采用 Hertz Mindlin(No Slip)碰撞模型;由于辐射模型不符合多相耦合,故采用热传递模型。其它参数设置详见表 1。

表 1　材料力学特性[13]

Table 1　The properties of the material mechanics

材料参数 Material parameters			
材料 Material	泊松比 Poisson's ratio	剪切模量 Shear modulus/MPa	密度 Density/($kg \cdot m^{-3}$)
玉米 Corn	0.4	2.6	1250
钢 Steel	0.28	3.5×10^4	7850
接触参数 Contact parameters			
碰撞形式 Collision form	恢复系数 Coefficient of Restitution	静摩擦系数 Coefficient of static friction	动摩擦系数 Dynamic friction coefficient
颗粒 – 颗粒 Particle – particle	0.5	0.4	0.05
颗粒 – 壁面 Particle – wall	0.5	0.4	0.05

2.4　耦合参数设置

在耦合参数设置时,阻力模型采用自由流方程阻力模型,样本点为 10,动量亚松驰因子、体积亚松驰因子和热源亚松驰因子均设为 0.7。

耦合时,Fluent 和 EDEM 之间在每个迭代步都会有大量的数据信息经由耦合模块进行交换,两者的时间步需满足以下要求:(1)Fluent 时间步要保证计算时稳定收敛;(2)EDEM 时间步一般是瑞利时间步的 5% ~ 30%;(3)两者的时间步长和数据保存频率须成整数倍匹配。Fluent 与 EDEM 时间步长匹配设置如表 2。

表 2　耦合时间步匹配

Table 2　Matching of the coupling time step

模型 Model	时间步/s Time step	保存频率/步 Save frequency	保存时间/s Save time
Fluent	0.002	50	0.1
EDEM	5.00×10^{-5}	200	0.01
倍数 Multiple	40		10

3　仿真过程及结果分析

3.1　仿真过程

图 4(a ~ f)为 0.04 ~ 0.24 s 期间干燥箱干燥玉米仿真过程。粒子工厂产生玉米模型至一定数量(图 4a 和图 4b);滚筒开始转动并通热空气(图 4c);玉米群在滚筒内壁安装的帘板推力和滚筒旋转离心力综合作用下沿滚筒内壁径向上升(图 4c 和图 4d);当滚筒转至 120°左右,玉米群在重力作用下克服滚筒离心力及帘板摩擦力掉落并产生玉米帘(图 4e 和图 4f)。玉米帘易与热空气换热,且玉米帘数越多越有利于玉米的干燥。

3.2　气固热传递

小区谷物帘式滚筒干燥箱工作原理是随滚筒转动时在帘板的作用下玉米群自上而下产生粒子帘,以利于热空气对玉米的干燥。图 5 所示为干燥箱内玉米模型和空气温度场分布图,由图 5 可知玉米经过空气热传递后其温度处于 371 ~ 377 K 之间,且在 1.5 s 的仿真过程中,玉米模型处于不同温度场,玉米数量分布符合正态分布,其中处于 373 K 的玉米模型数量为 735 个左右,大约 75 个玉米模型温度上升了 7.9 K。由图 5(b)热空气温度云图可看出空气温度区间处于 183.6 ~ 441 K。热空气从入口进入,颜色为红色,经过玉米粒子帘热交换后,排出的气体变成黄蓝色,温度下降。同时玉米从蓝颜色变成绿红色,说明玉米模型吸收热量。

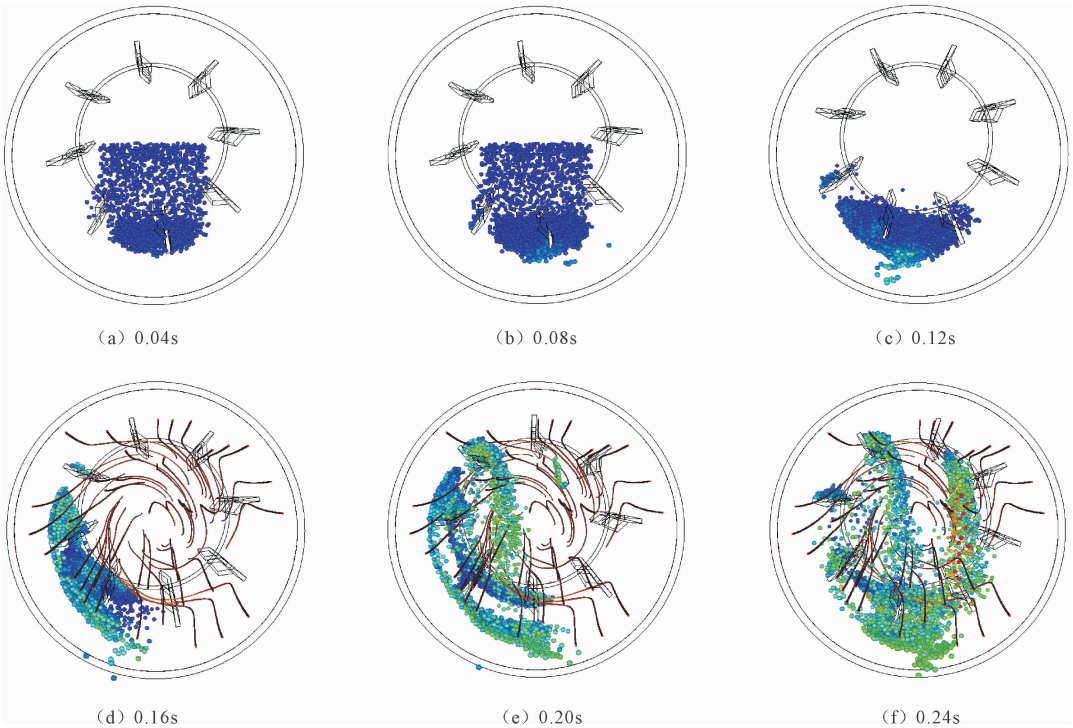
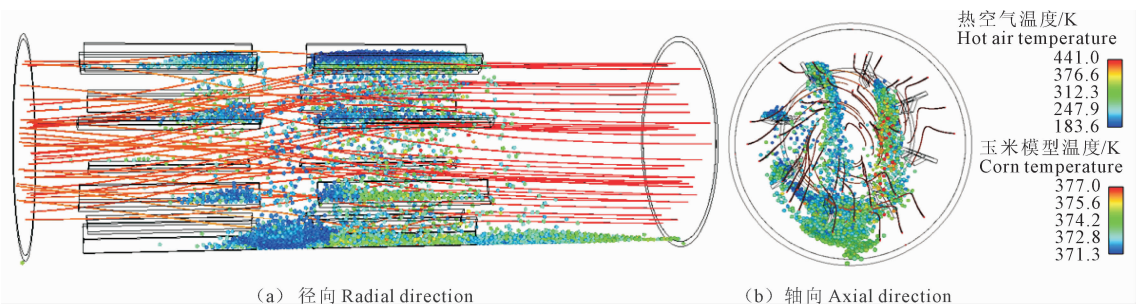


图 4　干燥箱干燥玉米仿真过程

Fig.4　Simulation process of drying box for drying corn

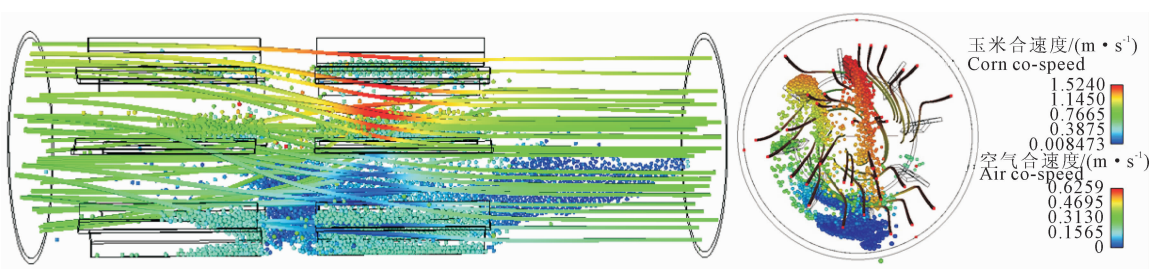


注:为计算统一,空气和玉米温度单位均为 K。

Note: To calculate the unity, the temperature unit of air and corn total was K.

图 5　干燥箱内玉米和空气温度场图

Fig.5　Temperature field of corn and air in drying box



注:为计算统一,空气和玉米合速度单位均为 $m \cdot s^{-1}$。

Note: To unified calculate , the air and corn co-speed unit was $m \cdot s^{-1}$.

图 7　干燥箱内速度流场云图

Fig.7　Flow field of air velocity in drying box

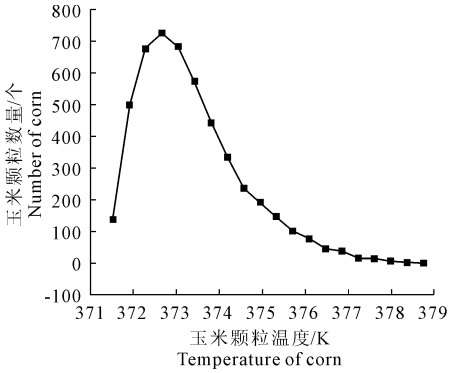


图 6 玉米处于不同温度场数量分布图

Fig.6 Distribution picture for corn be in different temperature field

3.2 气固合速度分布

图 7 所示(见 277 页彩图)为干燥箱内空气和玉米模型的速度分布云图,空气速率分布区间为 0 ~ 0.6259 $m \cdot s^{-1}$,其最大值 0.6259 $m \cdot s^{-1}$大于入风口空气速率 0.5 $m \cdot s^{-1}$,这是由于滚筒内置帘板的转动对空气进行了扰动加速,使处于粒子帘产生处的空气速率明显高于空气进出口处,这样更有利于玉米模型与气体之间的热交换效率。同时,从图 7 中看出滚筒内壁帘板对空气的扰动使空气行走路线发生改变。在此过程中热空气与玉米籽粒有热量和水分交换,产生的废气经干燥箱气体出口排出。

4 结 论

1) 通过 CFD – EDEM 耦合模块仿真模拟小区玉米帘式滚筒干燥箱内玉米干燥过程及气固耦合作用下气固热传递及气流场的分布状态。由仿真结果气固热传递云图可知:在 1.5 s 的仿真过程中,玉米模型处于不同温度场数量分布符合正态分布,其中处于 373 K 的玉米模型数量为 735 个左右,大约 75 个玉米模型温度上升了 7.9 K,说明气固热传递数值模拟的可行性。

2) 由速度云场分析可知,帘板附近空气速度由入口的 0.50 $m \cdot s^{-1}$上升至 0.63 $m \cdot s^{-1}$,滚筒内的帘板的转动对空气有扰动加速作用,有利于热空气将热量传导至玉米。

参 考 文 献:

[1] 中华报告网.2007—2008 年中国玉米及其种业发展研究报告[EB/OL].http://www.ccmnet.com/B7/200804/17669.asp.(2008 – 03 – 22)[2014 – 10 – 10].

[2] 石德权,郭庆法,汪黎明,等.我国玉米品质现状、问题及发展优质食用玉米对策[J].玉米科学,2001,9(2):3-7.

[3] 潘永康.现代干燥技术[M].北京:化学工业出版社,1998.

[4] 吴文福,刘春山,韩 峰,等.中国粮食产地干燥的发展现状及趋势[J].农业工程学报,2011,27(14):321-325.

[5] 师建芳,刘 清,谢奇珍,等.新型混流式粮食干燥机的应用[J].农业工程学报,2011,27(14):15-19.

[6] 黄正明,谭鹤群,陆 锐.大型立式干燥机械布料装置设计与试验[J].农业工程学报,2012,28(13):251-256.

[7] 李长友.粮食热风干燥系统㶲评价理论研究[J].农业工程学报,2012,28(12):1-6.

[8] 周 红,刘光蓉,管庶安.数字图像处理技术在玉米种子轮廓检测中的应用[J].种子,2004,23(9):90-92.

[9] 赵 工,宋晓明.SolidWorks 设计与应用教程[M].北京:清华大学出版社,2009.

[10] 池宁骏,赵立杉.SOLIDWORKS 2007 产品设计教程[M].西安:西北工业大学出版社,2008.

[11] 张玉荣,周显青.热风和真空干燥玉米的品质评价与指标筛选[J].农业工程学报,2010,26(3):346-352.

[12] 许 斌,孙相荣,靳钟江.干燥温度对玉米储存品质的影响[J].粮油食品科技,2009,17(3):4-6.

[13] 王红英,李倪薇,高 蕊,等.不同前处理对饲料玉米比热的影响[J].农业工程学报,2012,28(14):269-276.

[14] Resort G S, Nevada C R. Material and interaction properties of selected grains and oil seeds for modeling discrete particles[C]// ASABE Annual International Meeting, 2009:3-16.

(上接第 272 页)

[5] 李宝筏,刘安东,包文育,等.东北垄作滚动圆盘式耕播机[J].农业机械学报,2006,37(5):57-59.

[6] 林 静,刘安东,李宝筏,等.2BG – 2 型玉米垄作免耕播种机[J].农业机械学报,2011,42(6):43-46.

[7] 高焕文,李洪文,姚宗路.我国轻型免耕播种机研究[J].农业机械学报,2008,39(4):78-82.

[8] 宋殿香.精密播种机开沟深度稳定性研究[J].莱阳农学院学报,1995,12(4):311-315.

[9] 李 军,邢俊文,覃文浩.ADAMS 实例教程[M].北京:北京理工大学出版社,2002.

[10] 杜岳峰,毛恩荣,宋正河,等.基于 ADAMS 的玉米植株收获过程仿真[J].农业机械学报,2012,43(增):106-111.

[11] Gratton J, Chen Y, Tessier S. Design of a spring-loaded downforce system for a no-till seed opener [J]. Canadian Biosystems Engineering, 2003,45:229-235.

[12] Magalhaes P S, Bianchim A, Braunbeck O A. Simulated and experimental analyses of a toothed rolling coulter for cutting crop residues [J]. Biosystems Engineering,2007,96(2):193-200.

[13] 包文育.东北垄作免耕播种机关键部件研究与整机设计[D].沈阳:沈阳农业大学,2009.

[14] 王庆杰,李洪文,徐狄娟,等.大垄双行玉米免耕播种技术研究[J].干旱地区农业研究,2007,25(2):17-20.

[15] 彭 霞,徐为民,曹 杰.基于 ADAMS 的番茄翻秧机的仿真分析[J].农机化研究,2012,(2):157-159.

[16] 刘海柱,雷 秀,李 扬,等.基于 ADAMS 锻造操作机钳杆机构的优化设计[J].锻压技术,2008,33(3):106-108.