DOI:10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.80355 [文章编号] 1003-5788(2023)02-0073-08

红外喷动床数值模拟中两种湍流模型的适用性

Study on the applicability of two numerical models for simulation of infrared turbulent spouted bed

侯志昀[1] 段 续[1,2] 任广跃[1,2] 李琳琳[1] 徐一铭[1]

HOU Zhi-yun[1] *DUAN Xu*[1,2] *REN Guang-yue*[1,2] *LI Lin-lin*[1] *XU Yi-ming*[1]

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院,河南 洛阳 471023;
2. 粮食储藏安全河南省协同创新中心,河南 郑州 450001)

(1. *College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan* 471023, *China*; 2. *Collaorative Innovation Center of Grain Storage Security, Henan Province, Zhengzhou, Henan* 450001, *China*)

摘要:目的:得到适合红外联合喷动床数值模拟的湍流模型。**方法:**采用两方程模型(SST k-ε 与 Realizable k-ε)进行数值模拟,分析不同工况下红外喷动床的性能参数以及干燥室流场的流速、温度及颗粒浓度分布情况,并进行红外喷动床物料颗粒干燥试验。**结果:**在红外喷动床干燥室进气速度为 8 m/s,温度为 50 ℃的工况下,采用 Realizable k-ε 进行模拟得到的数值和 SST k-ε 的相近;采用两种湍流模型进行数值模拟得到的干燥室流体域中颗粒体积分数分布、速度分布及温度分布具有相似性,总体效果较好,说明这两种湍流模型应用于该设备均是可行的。但 Realizable k-ε 湍流模型的收敛速度更快,SST k-ε 稳定性更好。**结论:**选择 Realizable k-ε 湍流模型进行红外喷动床的三维流场描述更加合理。

关键词:红外喷动床;干燥;湍流模型;流体动力学性能;流场特性;数值模拟

Abstract: Objective: This study aimed to obtain suitable turbulence model for simulation infrared combined spouted bed numerical valued. **Methods:** Two equation models (SST k-ε and Realizable k-ε) were used for numerical simulation to obtain the performance parameters of the infrared spouted bed and the velocity, temperature and particle concentration distribution of the flow field in the drying chamber under different working conditions. The particle drying experiment of the infrared spouted bed was carried out. **Results:** When under the working conditions of air inlet velocity of infrared spouted bed drying chamber of 8 m/s and a temperature of 50 ℃, the values obtained by Realizable k-ε simulation are similar to those obtained by SST k-ε. The particle volume fraction distribution, velocity distribution and temperature distribution in the fluid domain of the drying chamber obtained by numerical simulation with the two turbulence models were similar, and the overall effect is good, which showed that the application of the two turbulence models to the equipment is feasible. The turbulence model of Realizable k-ε converged faster, but the stability of SST k-ε was better. **Conclusion:** The Realizable k-ε turbulence model is more reasonable to describe three-dimensional flow field of infrared spouted bed.

Keywords: infrared spouted bed; dry; turbulence model; hydrodynamic performance; flow field characteristics; numerical simulation

干燥是一个能源密集型过程,消耗了食品加工行业 20%~25%的能源。如何节约能耗和保持干燥产品质量是食品干燥过程中最值得关注的两个问题[1]。当前主流的热风干燥技术设备操作简单,但存在能源利用率较低,产品质量较差的问题[2]。真空冷冻干燥技术产品质量高,但能耗大、效率低的问题制约了其推广应用[3]。因此,食品干燥领域越来越注重利用新型的加热源与其他传热方式耦合的组合干燥技术,如以红外、微波、射频等为代表的新型加热方式的引入,极大地提高了食品干燥领域的能源利用率[4]。红外辐射在空气中传播时损失较小,可将热直接辐射到被加热体的表面,由于不存在传热界面,且具有穿透性,物料内部形成热量堆积,同时被干燥的物料水分不断蒸发带走热量,使得物料表面温度下

基金项目:"十三五"国家重点研发计划(编号:2017YFD0400901);河南省引进国外智力专项(外国专家项目)计划(编号:HNGD2021040)

作者简介:侯志昀,女,河南科技大学在读硕士研究生。

通信作者:段续(1973—),男,河南科技大学教授,博士。E-mail:duanxu _ dx @163.com

收稿日期:2022-05-24 **改回日期:**2022-12-07

降，物料内部温度远高于外部温度，所以在干燥过程中物料的湿度梯度和温度梯度保持一致，极大地提高了干燥速率[5-6]。但红外辐射干燥极易受到辐射距离、料层厚度、热源分布等因素影响，从而造成干燥不均匀的问题[7]。喷动床技术被用于小麦（流动性小、颗粒状）干燥，是由于其干燥过程中物料颗粒与热空气的良好接触和循环运动使得干燥均匀性和传热传质效率极高，非常适合散粒状热敏性食品的干燥[8-9]。但喷动床干燥技术最大的问题是需前置空气加热器，出风温度太高，设备的热效率低。结合红外干燥技术和喷动床干燥技术的优缺点，将红外加热方式用于喷动床，开发新型的红外喷动床干燥技术，可以利用红外辐射对喷泉区的物料进行高效直接加热，省去前置空气加热器，从而有效降低热损失，同时，又消除了单一红外干燥加热不均匀的缺点[10-13]。课题组[14]提出了红外喷动床的设计方法并进行了相关试验，证实了红外喷动床具有良好的节能干燥特性。

对红外喷动床的性能进行准确预测是其设计及应用的必要条件，然而其干燥过程对物料的质热传递过程及其影响因素的研究较复杂。与其他试验方法相比，使用计算流体力学（CFD）方法为研究和解决结构复杂，操作环境危险等流体力学问题建立了一种新的研究方法[15]。应用 CFD 分析研究各种干燥机理，有助于提高工艺效率[1]。然而在对红外喷动床干燥进行数值模拟及性能预测时，湍流模型的选取至关重要。Miltner 等[16]为选择合适湍流模型进行自由射流的模拟，对多种湍流模型（S-A、Standard k-ε、RNG、Realizable k-ε、Standard k-ε、SST k-ε、RSM）进行了试验验证及比较；Shives 等[17]在对潮流场驱动盘数值模拟中，比较了 Standard k-ε 模型与 SST k-ε 的适用性；于晓丽等[18]采用两方程模型（SST k-ε 与 Realizable k-ε）对潮流能水轮机进行了数值模拟适用性研究；李东耀[19]在流化床气固两相流模拟中对 Standard k-ε、RNG k-ε、Realizable k-ε 3 种湍流模型进行了模拟比较研究其适用性。近年来国内外学者用 Standard k-ε[20-22]、RNG k-ε[15]湍流模型对喷动床气固两相流动进行了数值模拟研究，但红外喷动床干燥青豆的数值模拟尚未见报道。

研究拟采用不同的湍流模型（Realizable k-ε 与 SST k-ε）对红外联合喷动床进行数值模拟，分析不同工况下红外联合喷动床干燥室流体域内的速度场、温度场与物料颗粒浓度分布以及气相和颗粒相速度分布变化情况，并进行红外联合喷动床试验验证，为选择合适的湍流模型对红外联合喷动床在特定的湍流条件下的三维流场进行描述提供依据。

1 湍流模型

1.1 Realizable k-ε 湍流模型

气相的湍流运输方程采用 Realizable k-ε 方程[23]。

k 湍流动能方程：

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t}+\frac{\partial(\rho \boldsymbol{u}_i k)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k-\rho\varepsilon, \quad (1)$$

ε 湍流动能耗散率方程：

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t}+\frac{\partial(\rho \boldsymbol{u}_i \varepsilon)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+\rho\varepsilon EC_1-\rho C_2\frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{\upsilon\varepsilon}}, \quad (2)$$

式中：

k——气相的湍动能，J/kg；

ε——气相湍动能的耗散率，m^2/s^3；

σ_k、σ_ε——k 和 ε 相应的普朗特数；

$\boldsymbol{u}_i$——气相速度矢量；

ρ——气相的密度，kg/m^3；

υ——气相的速度，m/s；

E——平均应变率张量的模量；

μ_t——气相湍流对应的黏性系数；

G_k——湍动能增量（由平均速度梯度产生）；

t——时间，s。

Realizable k-ε 模型是一个半经验模型。使用的 Realizable k-ε 经验常数[24]为：$C_1=1.44$，$C_2=1.92$，$\sigma_k=1.0$，$\sigma_\varepsilon=1.2$。

1.2 SST k-ε 湍流模型

Menter[25]综合近壁区 Standard k-ε 模型的稳定性及边界层外部 Standard k-ε 模型独立性的优点，提出了 BSL k-ε 湍流模型 φ_3，可用 Standard k-ε 模型 φ_1 与 Standard k-ε 模型 φ_2 的加权相加来表示，在此基础上又在湍流黏度定义中考虑了湍流剪切应力的传输形成了 SST k-ε 湍流模型。

$$\varphi_3=\varphi_1 f_1+\varphi_2(1-f_1), \quad (3)$$

式中：

f_1——混合函数。

SST k-ε 湍流模型方程[18,26]为

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t}+\frac{\partial(\rho \upsilon_j k)}{\partial x_j}=G_k-\beta^*\rho\omega k+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu+\sigma_k\mu_t)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right], \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t}+\frac{\partial(\rho \upsilon_j \omega)}{\partial x_j}=G_\omega-\beta\rho\omega^2+2(1-f_1)\frac{\rho\sigma_{\omega2}}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu+\sigma_\omega\mu_t)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right], \quad (5)$$

式中：

ω——比耗散率，s^{-1}；

k——湍动能，J/kg；

G_k——湍流动能 k 的生成项；

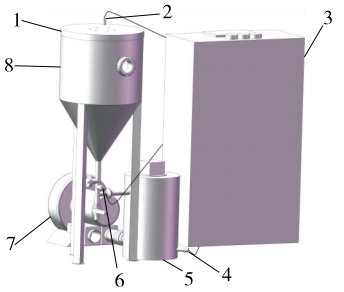
G_ω——比耗散率 ω 的生成项。

模型中常数[18,24,26]：$\beta^*=0.09$，$\sigma_\omega=2.0$，$\sigma_{\omega2}=0.856$。

2　红外喷动床算例描述

2.1　红外喷动床模型

采用的红外辅助热风喷动试验设备平台为研究室自主设计研制(见图 1)。该试验系统包括风机送风装置,入口气体加热装置,试验物料颗粒进、出料设施,试验数据测量、采集和控制设备等。对试验设备内所用红外板在试验进行前先设定波长(10 μm)和功率(500 W)。出口空气温度由位于喷动床盖子上的温度感应器测得,风速由风速感应器测得。



1. 喷动床顶盖　2. 温度感应器　3. 控制台　4. 温度感应器
5. 加热器　6. 风速感应器　7. 风机　8. 红外喷动床

图 1　红外喷动床的基本构造

Figure 1　Structural diagram of infrared spouted bed

结合红外喷动床具体的设备结构尺寸将其干燥室按照三维几何形状模型处理,满足连续介质模型在计算时耦合多个输运方程的需求,选择 Solidworks 软件构建三维立体几何模型,如图 2 所示。

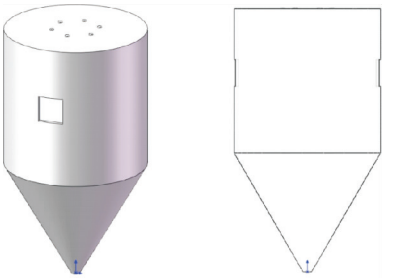


图 2　红外喷动床干燥室几何模型

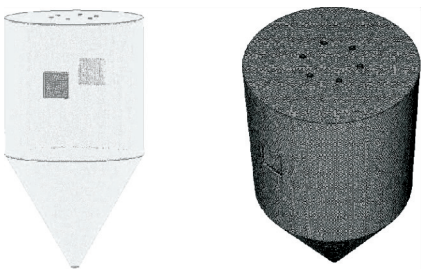
Figure 2　Infrared spouted bed drying chamber model

网格划分选择 ANSYS ICEM CFD(2019R1)商用软件,采用非结构化网格技术干燥室计算流体域整体生成四面体网格,然后将其通过 ANSYS Fluent(2019R1)软件再转变成多面体网格,经网格无关性验证最终确定的网格数量是 130 861。具体的网格划分如图 3 所示。

2.2　边界条件及初始条件设定

2.2.1　边界条件　依据红外喷动床干燥室几何模型计算流体域特点,边界条件主要考虑气流的进入、排出及干燥室固体壁面 3 个方面条件的设定。

(1) 喷动床入口:采用速度入口,气相速度为:$v_x=0$;



(a) ICEM CFD中划分的四面体网格　(b) 导入Fluent后转化的多面体网格

图 3　红外喷动床干燥室网格模型

Figure 3　Grid model of infraredspouted bed drying chamber

$v_y=v_g$;$v_z=0$。v_g 为给定值。

(2) 固体壁面:以无滑移考虑干燥室壁面的边界,不考虑速度因素。

(3) 喷动床出口:依据红外喷动床干燥设备的干燥室结构情况,将压力出口确定在干燥室上部盖子的圆形排气孔位置,表压为 0。

2.2.2　初始条件　根据红外喷动干燥设备结构特征,启动数值计算时必须设置初始条件才能进行,具体设置见表 1。红外喷动床干燥室壁面材料在 Fluent 中设置为铝。

模拟过程中 Fluent 开启能量方程,多相流模型选用双欧拉模型,湍流方程选择 Realizable k-ε 或 SST k-ε,辐射方程选择离散坐标模型(DO),曳力模型选择 Gidaspow 模型,颗粒体积黏度选择 Lun et al.模型,径向分布函数选择 Lun et al.模型,界面面积选择 Ia-symmetric,颗粒黏度选择 Syamlal-obrien。压力—速度求解选择 PRESTO 算法。

2.3　试验数据采集

选择青豆为试验物料,在风速 8 m/s、温度 50 ℃下进

表 1　初始条件设置

Table 1　Initial condition settings

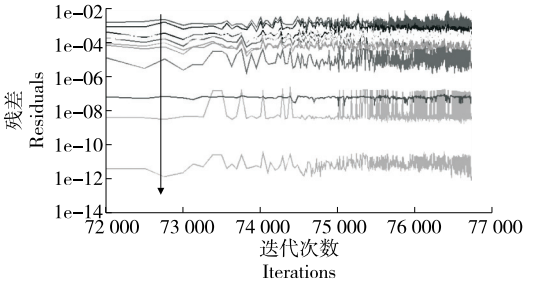
参数	数值	单位
红外喷动床干燥室圆柱段高	340	mm
红外喷动床干燥室圆锥段高	280	mm
红外喷动床干燥室圆锥倾角	60	(°)
红外喷动床干燥室圆柱段直径	345	mm
红外喷动床气体出口(6 个圆孔)每个直径	10	mm
红外喷动床气体入口直径	20	mm
初始床高	130	mm
青豆颗粒直径	9.045	mm
青豆颗粒比热	1.672 7	J/(kg·K)
青豆颗粒密度	1 099	kg/m^3
青豆颗粒导热系数	0.121	W/(m·K)
青豆颗粒空隙率	0.38	%

行干燥。依据试验监测所获得的数据，利用 ANSYS Fluent(2019R1)软件模拟两种湍流模型(Realizable k-ε 模型、SST k-ε 湍流模型)的适用性情况。

3　结果对比及分析

3.1　残差曲线对比

两湍流模型在运算时均设置时间步长为 0.001 s，时间步数为 10 000，每一时间步长最大迭代数为 20。由图 4、图 5 可知，Realizable k-ε 和 SST k-ε 最后均达到收敛，说明两种模型的运算结果均是可信的。运算过程中 Realizable k-ε 的波动整体上要比 SST k-ε 更大一些，而 Realizable k-ε 的总迭代数比 SST k-ε 小，运算时间短。



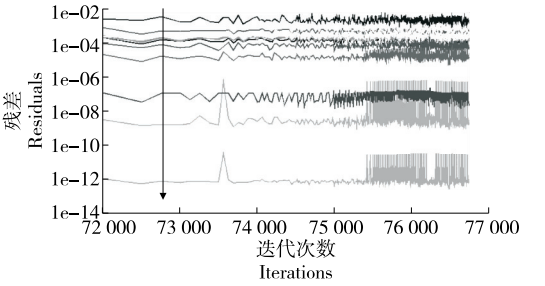
图中箭头处从上到下依次为连续性、u 方向空气相速度、u 方向颗粒相速度、v 方向空气相速度、v 方向颗粒相速度、w 方向空气相速度、w 方向颗粒相速度、空气相能量方程、颗粒相能量方程、k 方程、ε 方程、离散坐标模型、颗粒体积分数

图 4　Realizable k-ε 运算残差曲线图

Figure 4　Realizable k-ε operation residual curve

3.2　红外喷动床喷动过程对比

由图 6、图 7 可知，两模型从初始状态开始喷动到达稳定喷动状态运算用时相同。在 0.000～0.378 s 时两模型的图形有明显差别，SST k-ε 颗粒体积分数变化幅度比 Realizable k-ε 的更大；但在 0.252～0.378 s 时能看到喷



图中箭头处从上到下依次为连续性、u 方向空气相速度、u 方向颗粒相速度、v 方向空气相速度、v 方向颗粒相速度、w 方向空气相速度、w 方向颗粒相速度、空气相能量方程、颗粒相能量方程、k 方程、ε 方程、离散坐标模型、颗粒体积分数

图 5　SST k-ε 运算残差曲线图

Figure 5　SST k-ε operation residual curve

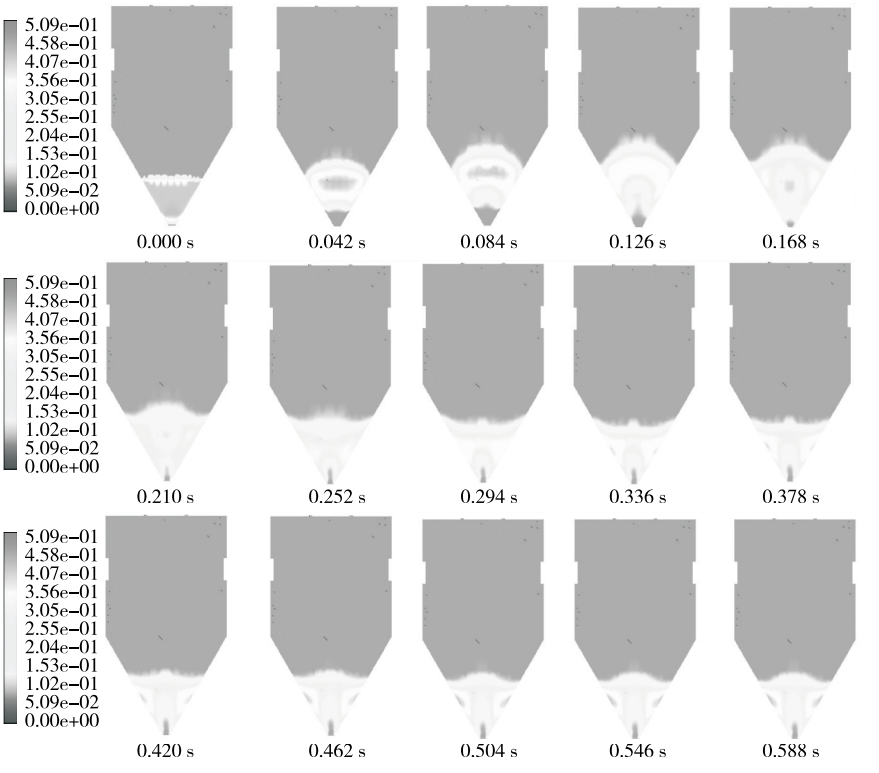


图 6　Realizable k-ε 喷动形成过程颗粒体积分数演变流程图

Figure 6　Flow chart of particle volume fraction evolution during spout formation of Realizable k-ε

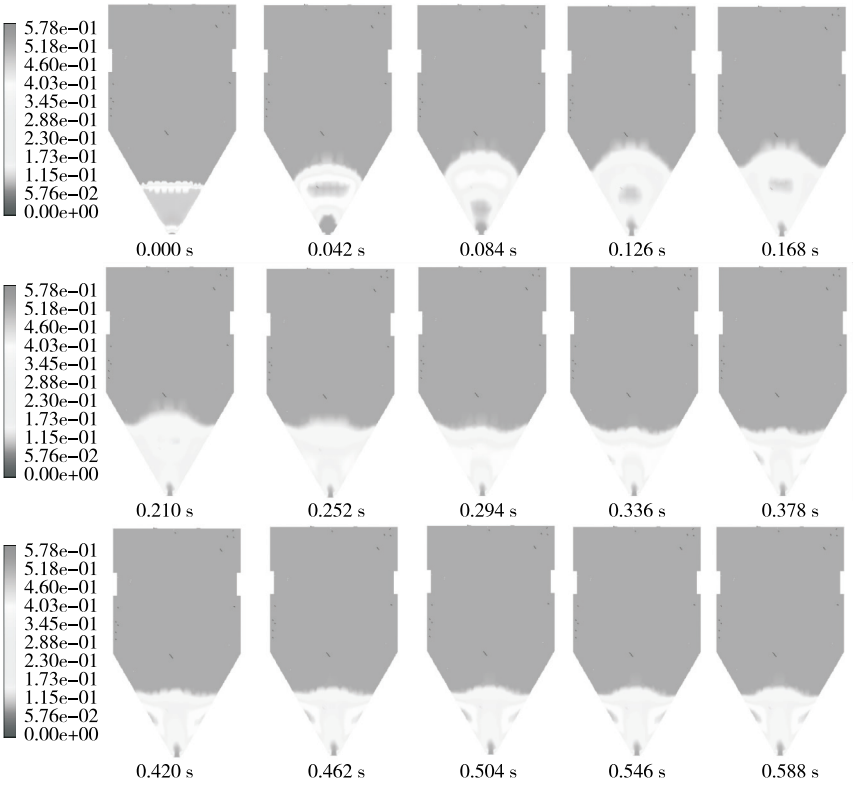


图 7　SST k-ε 喷动形成过程颗粒体积分数演变流程图

Figure 7　Flow chart of particle volume fraction evolution during spout formation of SST k-ε

动区左偏较明显,可能是不同模型的运算残差不同。

3.3　颗粒体积分数径向及轴向分布对比

由图 8、图 9 可知,由室内中心到近壁面处颗粒浓度逐渐增大,室中心位置为喷动区域颗粒浓度小,而近壁面环形空间区域浓度大,喷动和环形空间两区域的交界面附近形成了一个明显的过渡区域。在 40,70 mm 床高处,紧贴壁面处颗粒的体积分数略低,是由于颗粒运动快致使局部区域颗粒浓度降低,相互间空隙率增加。40 mm 处,两模型运算结果差异较大,70,100 mm 处两模型运算结果较接近。

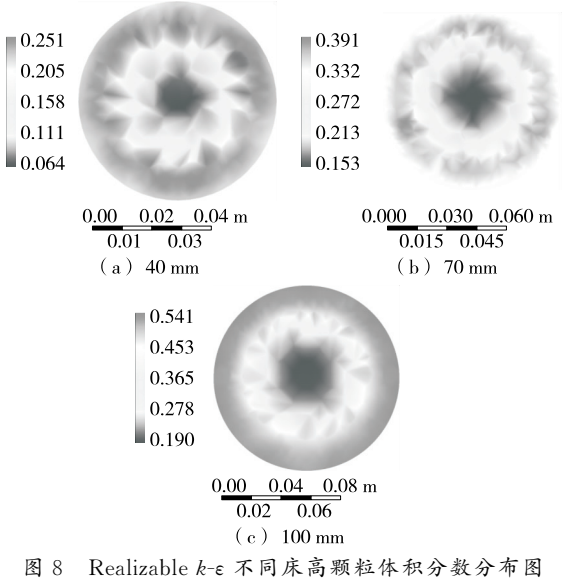


图 8　Realizable k-ε 不同床高颗粒体积分数分布图

Figure 8　Realizable k-ε distribution of particle volume fraction at different bed heights

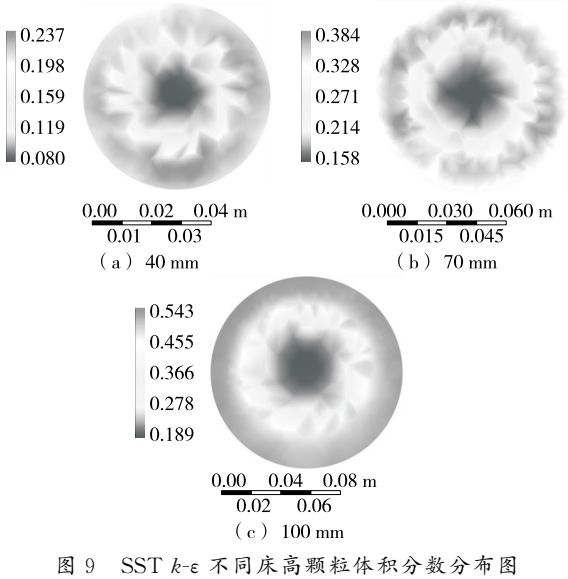


图 9　SST k-ε 不同床高颗粒体积分数分布图

Figure 9　SST k-ε distribution of particle volume fraction at different bed heights

3.4 轴向及径向颗粒速度大小分布对比

图 10、图 11 所示分别为同一温度(50 ℃)同一风速(8 m/s)下,Realizable k-ε 和 SST k-ε 在不同床高 40,70,100 mm 处的颗粒速度分布图。

图像显示速度最大的位置是在干燥室的纵轴附近,而速度最小的位于壁面附近。从图 10、图 11 可以看出,由干燥室中心处到近壁面处的过程中存在过渡区域,这是喷动区和环隙区之间的交界面。环形空间区域随着床高高度的上升颗粒速度呈现出由大到小的变化趋势,归因于喷动床干燥室由下向上(40 mm→70 mm→100 mm)堆积粒子增多,粒子下降流动受到阻碍更大速度减弱。

从图 10、图 11 可以看出,在 40 mm 处两模型运算结果差异略大,70,100 mm 处两模型运算结果较接近。

3.5 不同床层高度颗粒温度分布对比

由图 12、图 13 可知,干燥初期,床高 40,70 mm 处的颗粒层横截面的中心喷动区域温度最低,环隙区域温度最高。这是由于喷动区的气流速度高,传热传质速率高,热传递快,而环隙区颗粒密度大、气流渗透互穿量小,热传递慢,界面处则介于中间;此外,干燥室壁面上有红外辐射板,所以靠近红外辐射板的颗粒相温度和壁面温度

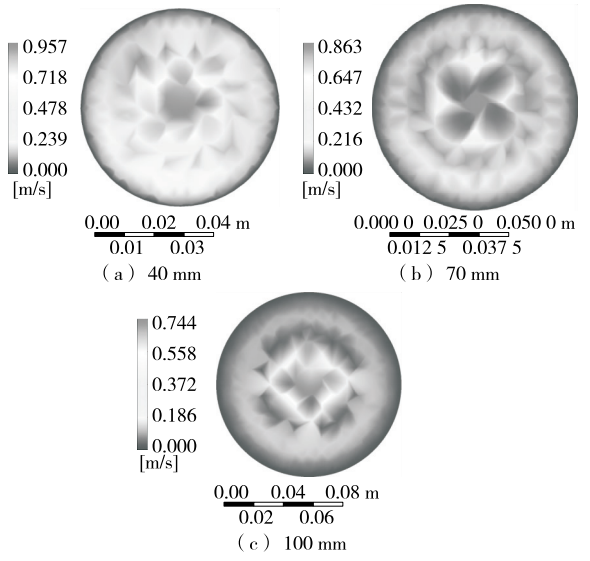


图 10 Realizable k-ε 不同床高颗粒速度分布图

Figure 10 Realizable k-ε particle velocity distribution at different bed heights

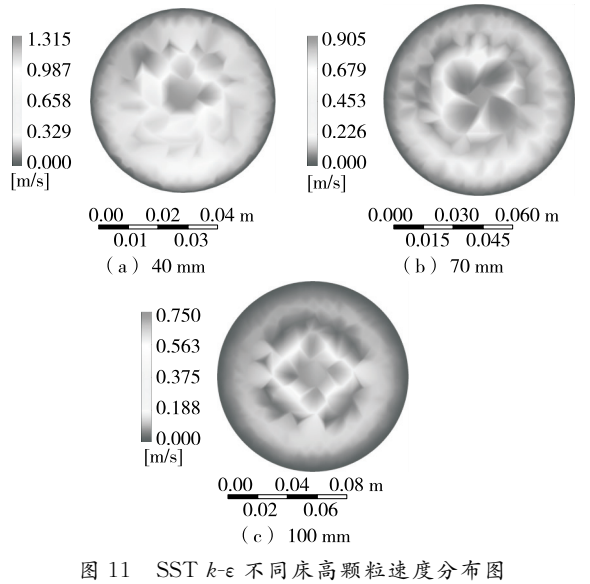


图 11 SST k-ε 不同床高颗粒速度分布图

Figure 11 SST k-ε particle velocity distribution at different bed heights

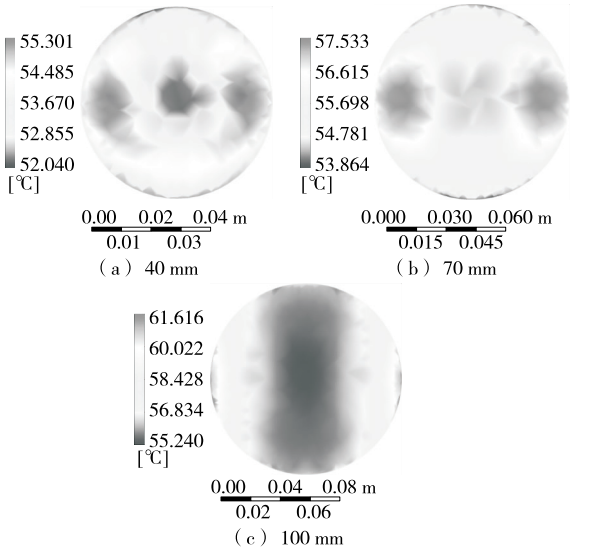


图 12 Realizable k-ε 不同床高颗粒温度分布图

Figure 12 Realizable k-ε temperature distribution of particles with different bed heights

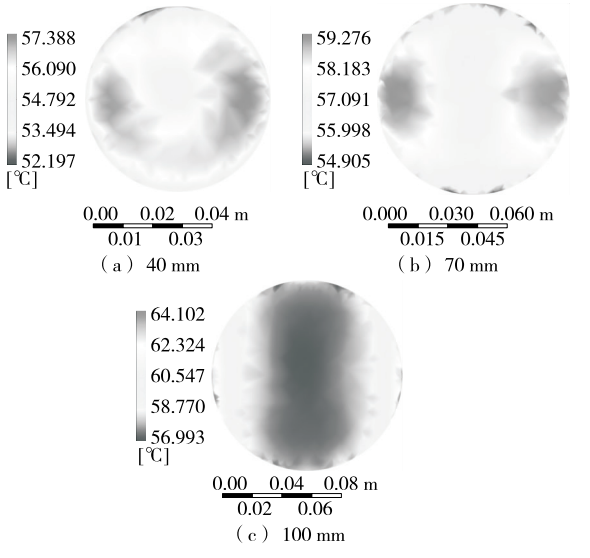


图 13 SST k-ε 不同床高颗粒温度分布图

Figure 13 SST k-ε temperature distribution of particles with different bed heights

总体比较高。红外辐射板沿 X 轴对称,均匀分布在干燥室两侧,不同床高处温度最高的区域分布在沿 Z 轴对称的两侧,是由于两个红外辐射板的热辐射在此处交汇。不同床高处温度最低区域在干燥室中心部分且随床高的增加该区域进一步扩大,这是由于中心部分是喷动区域相对于其周围的环形空间区域固体物料颗粒分布较少;在床高 70 mm 处颗粒相中心区域比床高 40 mm 处小,可能是当前时刻下喷动区裹挟的颗粒刚好到达这一高度的较多。

由图 12、图 13 可知,40,70,100 mm 处均有一定差异,其中 40,70 mm 处的差异较明显。

3.6 两模型与试验对比

由图 14 可知,Realizable k-ε 与 SST k-ε 分别与试验数据的误差都在合理范围内,而两模型的模拟数据略有差异。

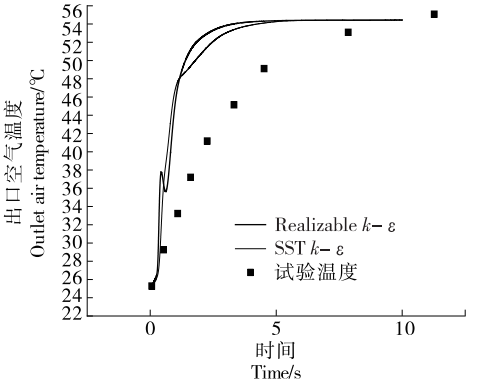


图 14　Realizable k-ε 与 SST k-ε 模拟数据和试验数据对比

Figure 14　Comparison of Realizable k-ε and SST k-ε simulation data and experimental data

4　结论

选取 Realizable k-ε 与 SST k-ε 两种湍流模型,对红外喷动床干燥青豆颗粒的干燥室流体域三维湍流情况进行了数值模拟,得到了红外喷动床干燥青豆颗粒的相应参数及流场(颗粒体积分数分布、颗粒速度分布和颗粒温度分布)情况,并进行了红外喷动床干燥青豆试验。结果表明,在红外喷动床干燥室进气速度为 8 m/s,温度为 50 ℃的工况下,采用两种湍流模型得到的干燥室流体域中颗粒体积分数分布、速度分布及温度分布具有相似性,总体效果较好,均可应用于该设备。考虑试验所用红外喷动床干燥设备的实际工况及运算耗时等因素,选择 Realizable k-ε 湍流模型进行描述更加合理。后续将进一步选择其他类型模型如曳力模型、传热模型等进行优化对比研究,以获得更加贴近红外喷动床实际干燥工况的模型。

参考文献

[1] CHANDAN K, KARIM M A, MOHAMMAD U H J. Intermittent drying of food products: A critical review[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 121(1): 48-57.

[2] 石晓微, 刘云宏. 超声—远红外辐射干燥对香蕉片品质的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(1): 204-209.
SHI X W, LIU Y H. Effect of ultrasonic far infrared radiation drying on the quality of banana slices[J]. Food & Machinery, 2021, 37(1): 204-209.

[3] LI L, CHEN J, ZHOU S, et al. Quality evaluation of probiotics enriched Chinese yam snacks produced using infrared-assisted spouted bed drying [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(4): 1-14.

[4] MOSES J A, NORTON T, ALAGUSUNDARAM K, et al. Novel drying techniques for the food industry[J]. Food Engineering Reviews, 2014, 6(3): 43-55.

[5] FENG L, ZHANG M, ADHIKARI B. Effect of water on the quality of dehydrated products: A review of novel characterization methods and hybrid drying technologies[J]. Drying Technology, 2014, 32(15): 1 872-1 884.

[6] 李晓芳, 刘云宏, 马丽婷, 等. 远红外辐射温度对金银花干燥特性及品质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(15): 69-76.
LI X F, LIU Y H, MA L T, et a1. Effect of far-infrared radiation temperature on drying characteristics and quality of Flos Lonicerae [J]. Food Science, 2017, 38(15): 69-76.

[7] 段续, 徐一铭, 任广跃, 等. 香菇分段变温红外喷动床干燥工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 293-302.
DUAN X, XU Y M, REN G Y, et al. Optimization of drying process parameters of lentinus edodes in segmented variable temperature infrared spouted bed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37 (19): 293-302.

[8] 朱凯阳, 任广跃, 段续, 等. 基于 BP 神经网络预测红外—喷动干燥带壳鲜花生水分比[J]. 食品科学, 2022, 43(11): 9-18.
ZHU K Y, REN G Y, DUAN X, et al. Backward Propagation (BP) neural network-based prediction of moisture ratio of fresh in-shell peanut during infrared-assisted spouted bed drying[J]. Food Science, 2022, 43(11): 9-18.

[9] 侯志昀, 段续. 任广跃, 等. 喷动床在农产品干燥中的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(4): 275-283.
HOU Z Y, DUAN X, REN G Y, et al. The progress of the utilization of spouted bed in drying of agricultural products[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(4): 275-283.

[10] DEHGHAN M A, PEIGHAMBARDOUST S H, AZADMARD D S, et al. Effect of infrared-assisted spouted bed drying of flaxseed on the quality characteristics of its oil extracted by different methods[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 100(1): 74-80.

[11] MORADI M, AZIZI S, NIAKOUSARI M, et al. Drying of green bell pepper slices using an IR-assisted Spouted Bed Dryer: An assessment of drying kinetics and energy consumption [J].

Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 60: 102280.

[12] 段续, 张萌, 任广跃, 等. 玫瑰花瓣红外喷动床干燥模型及品质变化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 238-245.
DUAN X, ZHANG M, REN G Y, et al. Drying models and quality changes of rose subjected to infrared assisted spouted bed drying [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(8): 238-245.

[13] 周四晴. 基于红外干燥的益生菌浸渍怀山药休闲食品制备技术研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2020: 5-7.
ZHOU S Q. Study on preparation technology of probiotic impregnated Chinese yam (*Dioscorea spp.*) leisure food based on infrared drying [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2020: 5-7.

[14] 马立, 段续, 任广跃, 等. 红外—喷动床联合干燥设备研制与分析[J]. 食品与机械, 2021, 37(2): 119-124.
MA L, DUAN X, REN G Y, et al. Development and analysis of infrared spouted bed combined drying equipment [J]. Food & Machinery, 2021, 37(2): 119-124.

[15] 柳鹏飞. 二维及三维矩形喷动床中大颗粒流场特性数值研究[D]. 西安: 西北大学, 2019: 1-3.
LIU P F. Numerical study on large particle flow field characteristics in 2D and 3D rectangular spouted bed [D]. Xi'an: Northwest University, 2019: 1-3.

[16] MILTNER M, JORDAN C, HARASEK M. CFD simulation of straight and slightly swirling turbulent free jets using different RANS-turbulence models[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 89: 1 117-1 126.

[17] SHIVES M, CRAWFORD C. Adapted two-equation turbulence closures for actuator disk RANS simulations of wind & tidal turbine wakes[J]. Renewable Energy, 2016, 92: 273-292.

[18] 于晓丽, 王树杰, 袁鹏, 等. 两种湍流模型在潮流能水轮机数值模拟中的适用性研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(2): 114-120.
YU X L, WANG S J, YUAN P, et al. Study on the applicability of two turbulence models in numerical simulation of tidal current turbine[J]. Journal of China Ocean University (Natural Science Edition), 2019, 49(2): 114-120.

[19] 李东耀. 基于 Fluent 软件的流化床的气固两相流模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009: 18-19.
LI D Y. Study on gas-solid flow model of fluidized bed based on fluent software[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009: 18-19.

[20] 王敬哲. 气流—喷动床气固两相流动与干燥特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017: 55-58.
WANG J Z. Study on gas solid two phase flow and drying characteristics in spouted bed with gas stream[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017: 55-58.

[21] WU Z H, ARUN S M. Simulation of the hydrodynamics and drying in a spouted bed dryer[J]. Drying Technology, 2007, 25(1): 62-63.

[22] ZHOU L, HAN C, BAI L, et al. CFD-DEM bidirectional coupling simulation and experimental investigation of particle ejections and energy conversion in a spouted bed[J]. Energy, 2020, 211: 118672.

[23] 谭朝尹. 喷射环流反应器的数值模拟[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012: 15-19.
TAN Z Y. Numerical simulation on the jet loop reactor [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012: 15-19.

[24] ANSYS, Inc. ANSYS fluent theory guide[EB/OL].(2018-08-01)[2022-05-22]. https://ansyshelp. ansys. com/account/secured?returnurl= /Views/Secured/prod_page.html? pn= Fluent&prodver = 4&lang= en.

[25] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1 598-1 605.

[26] MUSA O, ZHOU C, CHEN X, et al. Prediction of swirling cold flow in a solid-fuel ramjet engine with a modified rotation/curvature correction SST turbulence model[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 105: 737-754.

(上接第 67 页)

[16] FENG Y, YUAN Z R. Discrete element method modeling of granular flow characteristics transition in mixed flow [J]. Computational Particle Mechanics, 2020, 8(6): 21-34.

[17] Rocky DEM: Themost powerful particle simulation software[EB/OL]. [2022-08-11]. https://rocky.esss.co/.

[18] 王宪良, 钟晓康, 耿元乐, 等. 基于离散元非线性弹塑性接触模型的免耕土壤参数标定[J]. 农业工程学报, 2021, 37(23): 100-107.
WANG X L, ZHONG X K, GENG Y L, et al. Construction and parameter calibration of the nonlinear elastoplastic discrete element model for no-tillage soil compaction[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(23): 100-107.

[19] 金钊. 玉米秸秆捡拾制粒机输送除土装置的仿真与试验[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2021: 25-27.
JIN Z. Simulation and experiment of the conveying and removing device on corn stalk granulator [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2021: 25-27.

[20] 王豪东, 阮竞兰, 原富林. 基于 EDEM 的回转组合多层筛筛选过程的离散元分析[J]. 中国油脂, 2019, 44(6): 151-157.
WANG H D, RUAN J L, YUAN F L. Discrete element analysis of EDEM-based rotary combined multi-layer sieve screening process [J]. China Oils and Fats, 2019, 44(6): 151-157.

[21] 阮竞兰, 武文斌. 粮食机械原理及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 14.
RUAN J L, WU W B. Principles and application of grain processing machine[M]. Beijing: China Machine Press, 2017: 14.