

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.031

# 油菜籽流化床气体分布板结构参数优化

张健平<sup>1,2</sup> 卢玉斌<sup>2</sup> 王晓宏<sup>1</sup> 李星萍<sup>2</sup>

(1. 中国科技大学工程科学学院, 合肥 230026; 2. 西南科技大学制造过程测试技术教育部重点实验室, 绵阳 621010)

**摘要:** 为优化油菜籽流化床气体分布板的结构参数, 根据欧拉(Euler)方法的双流体模型和标准  $k-\varepsilon$  湍流模型, 采用计算流体力学(CFD)分析软件 Fluent, 对气体分布板的开孔率和布孔方式进行优化设计。结果表明: 开孔率为 15.84% 圆形不均匀布孔的气体分布板是油菜籽流化床干燥的最佳气体分布板, 增强了热空气的流通性, 减少了局部区域的热空气聚集, 实现了气粒两相流动的正常流态化, 达到了流化床内油菜籽颗粒均匀分布, 无沟流和死区的目的。通过实验, 对模拟结果进行了实验验证, 结果发现数值模拟与实验结果相吻合, 证明了所优化的最佳气体分布板是合理可行的, 为工程实践缩短油菜籽干燥时间提供了一种较理想的气体分布板。

**关键词:** 油菜籽; 流化床; 气体分布板; 开孔率; 布孔方式

**中图分类号:** TQ021.3; TQ026.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)02-0237-08

## Structure-parameter Optimization of Gas Distributor for Rapeseed Fluidized Bed Dryer

Zhang Jianping<sup>1,2</sup> Lu Yubin<sup>2</sup> Wang Xiaohong<sup>1</sup> Li Xingping<sup>2</sup>

(1. School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(2. Key Laboratory of Testing Technology for Manufacturing Process, Ministry of Education, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

**Abstract:** In order to optimize the structure-parameter of gas distributor for the rapeseed fluidized bed dryer, the open porosity ratio and the arrangement holes mode of gas distributor were optimized through numerical simulation software of Fluent based on Euler two-fluid model and standard  $k-\varepsilon$  turbulence model. The results showed that open porosity ratio of 15.84% and uneven circular holes arrangement were the optimized structure-parameters of gas distribution for the rapeseed fluidized bed drying, which enhanced liquidity of hot air, reduced hot air to gather in the local area, made gas-particle two phase flow normally fluidize, and achieved the homogenized distribution of rapeseed particle in fluidized bed without channeling phenomenon and dead zone. The simulation results were verified through the experiment. The drying kinetics curves of gas distributor of different open porosity ratios and arrangement holes modes were comparative analysis based on experiment data, which showed that the drying rate of gas distribution with open porosity ratio of 15.84% and uneven circular holes arrangement was the biggest compared with the other types. Therefore, the gas distribution with open porosity ratio of 15.84% and uneven circular holes arrangement was the optimum. The results of numerical simulation and experiment were consistent. The results testified that the optimized best gas distribution was reasonable and feasible. Therefore, the gas distribution is an ideal gas distribution to shorten the rapeseed drying time for the engineering application.

**Key words:** rapeseed; fluidized bed; gas distributor; open porosity ratio; arrangement holes mode

收稿日期: 2015-10-29 修回日期: 2015-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308480)和四川省高等教育人才培养质量和教学改革项目(249)

作者简介: 张健平(1978—), 女, 博士生, 西南科技大学讲师, 主要从事流体机械和化工过程机械研究, E-mail: jianping78722@163.com

## 引言

油菜在我国是仅次于大豆的第二大油料作物,菜籽油则是仅次于大豆油和棕榈油的世界第三大食用植物油,具有非常重要的经济地位,因而受到世界各国的普遍重视<sup>[1]</sup>。与玉米、小麦、水稻等粮食作物相比,油菜籽具有很多特殊性质,首先是含有较多的蛋白质,容易吸湿,其次是籽粒小,空隙度小,含油量高,不易散热,故在高温高湿环境下特别容易生长霉菌,导致高水分油菜籽霉变。因此,在油菜籽生产过程中需尽可能地在短期内将其干燥至安全储藏含水率范围内,此外,油菜籽在干燥过程中受热时间不能过长,也不能进行缓苏处理<sup>[2-3]</sup>。为此,油菜籽干燥需采用人工干燥,根据文献[4-6]可知热空气流化床干燥器具有适应性强,干燥时间短,干燥后粮食品质好,结构简单,易于制造,投资少,热耗低,操作维修方便等许多优点,可使油菜籽在高温热风干燥的条件下短时间内达到安全储藏含水率要求。

在流化床干燥器中,气体分布板是一个关键部件,主要作用是均匀分布气流,支撑固体颗粒物料,使固体颗粒物料受热均匀并处于流态化状态。因其结构和尺寸显著地影响着流化床干燥器的传质和传热性能<sup>[7-8]</sup>,故需合理地选择和设计气体分布板。目前,常用的气体分布板结构类型主要有直孔式分布板、弧形板、侧缝式锥帽分布板、侧孔式锥帽分布板、填充式分布板、泡帽分布板和锥形气体分布板等<sup>[9-11]</sup>,其中直孔式气体分布板具有流化性好、阻力适中,成本低等优点,在油菜籽流化床干燥器中被广泛应用,但应用中也存在干燥时间长、干燥效率低、难以确保良好油菜籽干燥品质的不足。因此,本文在直孔式气体分布板的基础上,通过理论分析、数值模拟和实验验证的研究方法,优化设计气体分布板开孔率、布孔方式和结构尺寸,以缩短油菜籽干燥所需时间。

## 1 数值计算模型

### 1.1 物理模型与计算网格

#### 1.1.1 物理模型

图1为流化床干燥器的几何模型示意图,其总高度为860.6 mm,主要包括3部分:第I部分为流化床床层部分,直径为138 mm,高度为676 mm,其中油菜籽静止床层高度为135 mm;第II部分为气体分布板部分,直径为138 mm,高度为8 mm,其小孔直径为6 mm,在分布板上方铺设2层300目不锈钢丝网,防止漏料;第III部分为热空气进口部分,高度为68 mm,直径为84 mm。其中气体分布板部分是

本文重点研究对象,其开孔率和布孔方式是影响气体分布板均布气流和提高固体颗粒流化速率的主要因素<sup>[12]</sup>,因此本文对气体分布板进行结构参数优化研究,以缩短油菜籽干燥时间,确保油菜籽获得良好的干燥品质。

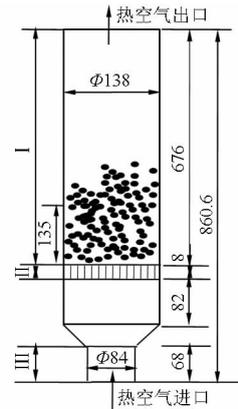


图1 流化床干燥器物理模型

Fig. 1 Physical model of fluidized bed dryer

#### 1.1.2 计算网格

相对于流化床层内部区域,气体分布板上小孔孔径较小,且介质对流强烈,基于此,采用了空间适应能力较强的四面体非结构化网格对流化床层内部的流体进行网格划分,同时对气体分布板上小孔区域的流体进行局部加密,以期更真实地显示流场内的细微结构。限于篇幅,此处仅展示了开孔率为15.84%、正三角形均匀布孔气体分布板的流化床干燥器网格划分结果,如图2所示。通过网格独立性检验后,在不同开孔率和布孔方式的情况下,最终采用的网格节点数和单元数如表1所示。

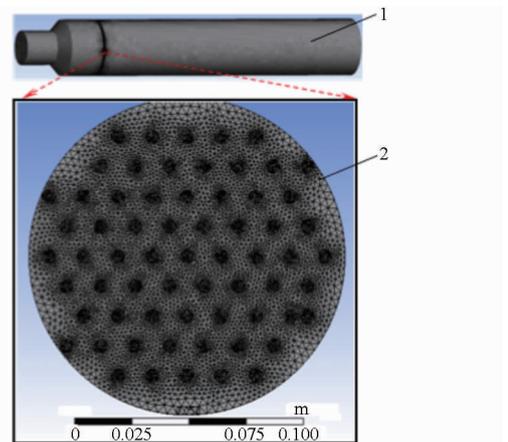


图2 整个计算区域的网格划分

Fig. 2 Computational mesh

1. 流化床干燥器 2. 气体分布板

## 1.2 数学模型

### 1.2.1 颗粒动力学理论

采用ANSYS 15.0中的流体动力学分析模块Fluent对流化床干燥器床层进行数值模拟,选取

表 1 网格划分节点数和单元数

Tab.1 Grid node number and unit number of mesh

流化床干燥器类别	网格节点数	单元数	
12. 27	221 365	1 212 526	
开孔率/%	14. 10	1 239 930	
15. 84	235 459	1 282 899	
正三角形均匀布孔	182 219	985 302	
布孔方式	正三角形不均匀布孔	180 379	975 847
	圆形不均匀布孔	180 365	975 447

Euler 双流体模型和气固两相流动的  $k-\varepsilon$  湍流模型,且采用一阶迎风格式的离散方法和压力-速度耦合的 SIMPLE 算法进行迭代求解。在 Fluent 软件求解颗粒多相流动时,需应用到颗粒动力学理论模型,包括气固两相的连续性方程、动量方程和能量方程,且由于本研究属于冷态实验,则不考虑能量传递,为此只需相应的连续性方程和动量方程。

### (1) 控制方程

连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla(\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) = 0 \quad (1)$$

其中

$$\sum_{q=1}^2 \alpha_q = 1$$

式中  $\alpha_q$ —— $q$  相体积分率, $q$  相是气相或固相

$\rho_q$ —— $q$  相密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$\mathbf{v}_q$ —— $q$  相平均速度,  $\text{m}/\text{s}$

气相动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \mathbf{v}_g) + \nabla(\alpha_g \rho_g \mathbf{v}_g \mathbf{v}_g) = -\alpha \nabla p + \nabla \bar{\tau}_g + \alpha_g \rho_g \mathbf{g} + K_{gs}(\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_s) \quad (2)$$

式中  $p$ ——总压, Pa

$\bar{\tau}_g$ ——颗粒剪切应力, N

$\mathbf{g}$ ——重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$

$K_{gs}$ ——相间交换系数

固相动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \mathbf{v}_s) + \nabla(\alpha_s \rho_s \mathbf{v}_s \mathbf{v}_s) = -\alpha_s \nabla p + \nabla \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \mathbf{g} + \alpha_s \rho_s (\mathbf{F}_s + \mathbf{F}_{lift,s} + \mathbf{F}_{vmt,s}) + K_{gs}(\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_s) \quad (3)$$

其中

$$K_{gs} = \frac{\alpha_s \rho_s f}{\tau_s} \quad (4)$$

$$\tau_s = \frac{\rho_s d_s}{18\mu_s} \quad (5)$$

式中  $\mathbf{F}_s$ ——外部体积力, N

$\mathbf{F}_{lift,s}$ ——颗粒升力, N

$\mathbf{F}_{vmt,s}$ ——颗粒虚拟质量力, N

$f$ ——包含基于相对雷诺数的曳力函数

$\tau_s$ ——颗粒弛豫时间, s

$d_s$ ——颗粒直径, mm

$\mu_s$ ——固相动力粘度,  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$

### (2) 气固曳力模型

气固两相间作用的曳力模型大致可分成以下 3 种类型:一种是理论模型,如 Koch-Hill 模型<sup>[13]</sup>;另一种是经验或半经验模型,如 Gidaspow 模型<sup>[14]</sup>, Syamlal-O'Brien 模型<sup>[15]</sup>;第 3 种是经验或半经验模型的修正模型,如修正的 Syamlal-O'Brien 模型<sup>[16]</sup>, McKeen 模型<sup>[17]</sup>。其中 Gidaspow 模型考虑了气相体积份额对气固两相间曳力系数的影响,分别给出了相应的表达式,在流化床中整个颗粒浓度范围内应用更合理,因此对于密集的气固流化床,相间曳力系数一般都采用 Gidaspow 模型,具体形式如下<sup>[18]</sup>:

当  $\alpha_g > 0.8$  时,气固两相间曳力函数  $f$  为

$$f = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_s |v_s - v_g|}{d_s} \alpha_g^{-2.65} \quad (6)$$

其中

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{\alpha_g Re_s} [1 + 0.15 (\alpha_g Re_s)^{0.687}] & (Re_s < 1000) \\ 0.44 & (Re_s \geq 1000) \end{cases} \quad (7)$$

$$Re_s = \frac{d_s \rho_g |v_g - v_s|}{\mu_g} \quad (8)$$

式中  $C_D$ ——曳力系数

$Re_s$ ——固相雷诺数

$\mu_g$ ——气相动力粘度,  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$

当  $\alpha_g \leq 0.8$  时,气固两相间曳力函数  $f$  为

$$f = 150 \frac{\alpha_s (1 - \alpha_g) v_g}{\alpha_g d_s^2} + 1.75 \frac{\rho_g \alpha_s |v_g - v_s|}{d_s} \quad (9)$$

### 1.2.2 湍流模型

在流化床干燥器的数值模拟中,当以气体分布板的小孔直径为定性尺寸,最小气速为定性流速时,相应的雷诺数已达 4 200,又由于在数值模拟中所用的表观流速均远大于最小气速,并且流化床中油菜籽颗粒对热空气还存在扰动作用,所以在数值模拟中应考虑湍流的影响。标准  $k-\varepsilon$  模型具有形式简单、精度高等优点,被广泛应用<sup>[19]</sup>,因此本文也采用标准  $k-\varepsilon$  模型。在流化床的两相流中存在着明显的连续相(热空气)和离散相(油菜籽),且两相流又相互影响,而湍流只是连续相所固有的特性,为此把湍流模型应于连续相中,然后再通过源项来描述离散相对连续相的扰动影响,其详细的数学模型为

$$\frac{\partial(\rho_g k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g k v_{gi})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_g + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho_g \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g \varepsilon v_{gi})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_g + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} S_\varepsilon \quad (11)$$

式中  $k$ ——湍动能,  $\text{m}^2/\text{s}^2$   
 $\varepsilon$ ——耗散率,  $\text{m}^2/\text{s}^3$   
 $v_{gi}$ ——气相中  $i$  组分的平均速度,  $\text{m}/\text{s}$   
 $G_k$ ——由平均速度梯度造成的湍流动能项  
 $\mu_t$ ——湍流黏度系数  
 $G_b$ ——由浮力产生的湍流动能项  
 $Y_M$ ——湍流马赫数  
 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ ——模型常数  
 $\sigma_k$ —— $k$  的湍流普朗特数  
 $\sigma_\varepsilon$ —— $\varepsilon$  的湍流普朗特数  
 $S_k$ 、 $S_\varepsilon$ ——由离散相对连续相扰动产生的湍流动能项

下标  $i$ 、 $j$  表示气相中的组分。标准  $k - \varepsilon$  模型中常数项的取值分别为  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ 、 $C_{2\varepsilon} = 1.92$ 、 $C_{3\varepsilon} = 0.09$ 。湍动能  $k$  与耗散率  $\varepsilon$  的湍流普朗特数分别为  $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

### 1.2.3 边界条件

(1) 进口边界: 对于热空气相, 只沿着轴向以轴向速度流入, 采用 velocity-inlet, 设置为  $1.25 \text{ m}/\text{s}$ , 而径向速度为零。

对于油菜籽颗粒相, 进口流入速度为零, 因而颗粒的各个变量在进口边界处都为零。

(2) 出口边界: 热空气相和油菜籽颗粒相在出口边界都取充分发展流条件, 各变量的轴向梯度都为零, 设置为 outflow。

(3) 壁面边界: 假定壁面材料为绝热体且壁面光滑, 油菜籽颗粒与壁面碰撞后的弹性恢复系数为  $0.9$ , 热空气相和颗粒相都采用无滑移壁面。油菜籽颗粒层高度为  $135 \text{ mm}$ , 体积分数为  $70\%$ 。

### 1.2.4 物性参数

根据油菜籽干燥的工艺要求, 热空气的进口温度设定为  $70^\circ\text{C}$ , 进口流速为  $1.25 \text{ m}/\text{s}$ , 则密度为  $1.029 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 黏度为  $2.06 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。油菜籽固体颗粒平均直径约为  $2 \text{ mm}$ , 形状为椭圆形, 球形度为  $0.8$ , 密度为  $1200 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 孔隙率为  $40\%$  [20]。

## 2 分布板结构参数优化与数值模拟

### 2.1 开孔率优选

#### 2.1.1 开孔率

分布板开孔率是孔内热空气的流速和通过分布板孔道阻力的主要影响因素, 其计算式为 [21]

$$\omega = \left( \frac{\xi \rho_g u^2}{2g(\Delta P_D)_{sc}} \right)^{1/2} \quad (12)$$

其中  $u = 2u_{mf}$  (13)

$$u_{mf} = \frac{9.0 \times 10^{-4} d_s^{1.8} [(\rho_s - \rho_g)g]^{0.94}}{\mu_g^{0.87} \rho_g^{0.066}} \quad (14)$$

$$(\Delta P_D)_{sc} = R_{sc} \Delta P_B \quad (15)$$

$$R_{sc} = 0.01 + 0.2[1 - \exp(-0.5D/L)] \quad (16)$$

$$\Delta P_B = L_{mf}(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g) \quad (17)$$

式中  $\omega$ ——分布板开孔率

$\xi$ ——分布板阻力系数

$u$ ——空塔气速,  $\text{m}/\text{s}$

$(\Delta P_D)_{sc}$ ——分布板临界压降,  $\text{Pa}$

$u_{mf}$ ——最小流化速度,  $\text{m}/\text{s}$

$L$ ——床层高,  $\text{m}$

$D$ ——床层直径,  $\text{m}$   $L_{mf}$ ——料高,  $\text{m}$

$\varepsilon_{mf}$ ——最小流化速度时的孔隙率

Wen 等 [22] 对固体颗粒物理特性做了大量的实验研究, 结果发现固体颗粒的球形度与孔隙率有关, 关系式为

$$\frac{1}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3} \approx 14 \quad (18)$$

式中  $\phi_s$ ——固体颗粒的球形度

$70^\circ\text{C}$  热空气的黏度为  $\mu = 2.06 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 油菜籽的球形度为  $0.8$ 。通过联立式 (12) ~ (18), 料高  $L_{mf} = 135 \text{ mm}$ , 取气体分布板阻力系数  $\xi$  为  $1.5 \sim 2.5$ , 可计算得到气体分布板开孔率  $\omega$  的取值范围为  $12.27\% \sim 15.84\%$ 。因此在开孔率取值范围内取 3 种开孔率 ( $12.27\%$ 、 $14.10\%$ 、 $15.84\%$ ) 进行研究, 以确定最佳的开孔率。如图 3 所示, 选择正三角形均匀分布气体分布板的小孔, 则 3 种开孔率  $12.27\%$ 、 $14.10\%$ 、 $15.84\%$  所对应的小孔数目分别为  $65$ 、 $75$  和  $85$  个, 小孔中心间距分别为  $15$ 、 $14.5$ 、 $14 \text{ mm}$ 。

### 2.1.2 结果与分析

针对 2.1.1 节优化设计的 3 种不同开孔率 ( $12.27\%$ 、 $14.10\%$ 、 $15.84\%$ ) 的气体分布板, 对整个流化床内热空气的流速进行了数值模拟分析, 其结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出, 开孔率越大, 热空气的速度分布均匀稳定性越好。当开孔率为  $12.27\%$  和  $14.10\%$  时, 热空气在上升的过程中, 大量热空气集中分布在床内的中心区域, 使得热空气流速在床内的壁面附近和中心区域产生了明显的分界线。这主要是由热空气通过气体分布板时气流分布不均匀造成的, 从而会使油菜籽颗粒难以均匀流化, 会出现偏流或沟流现象。但是, 当开孔率为  $15.84\%$  时, 热空气在整个上升过程中形成了充分发展的湍流形态, 减小了热空气流速在流化床内的差异, 从而在整个

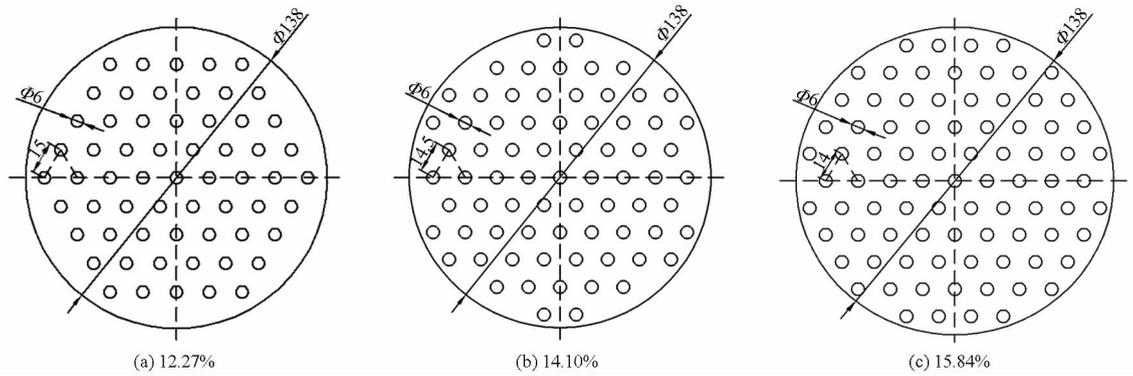


图 3 不同开孔率气体分布板结构示意图

Fig. 3 Structure diagrams of gas distributor with different porosities

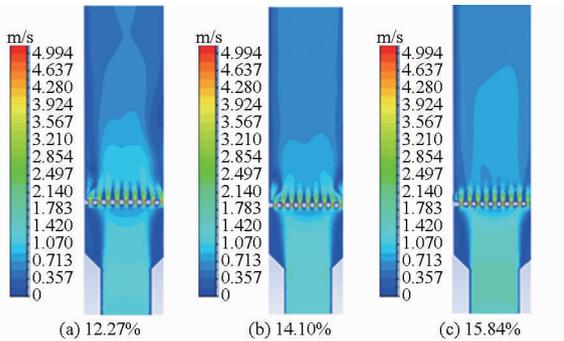


图 4 热空气的速度云图

Fig. 4 Velocity contours of hot air

空间内形成相对稳定均匀的气速。这主要是因为随着气体分布板开孔率的增加,热空气的流通性增强,局部区域的热空气聚集减少,减少了热空气的流动死区<sup>[23-24]</sup>。综上分析可知,15.84%是油菜籽干燥气体分布板的最佳开孔率。

## 2.2 布孔方式的优化

### 2.2.1 布孔方式

在 2.1 节确定的最佳开孔率 15.84% 的基础上,采用了 2 种气体分布板的不均匀布孔方式与正三角形均匀布孔方式(图 3c)进行对比研究,以确定最佳的布孔方式。第 1 种是正三角形不均匀布孔,采用气体分布板中间和边缘区域开孔率不同的方式进行布孔,中间区域采用边长为 18 mm 的正三角形

进行布孔,开孔率小,而边缘区域则采用边长为 12 mm 正三角形进行布孔,开孔率大,其示意图如图 5a 所示。第 2 种采用圆形不均匀布孔,小孔所分布的圆半径的增量从中心至边缘依次减小,圆半径依次为 9、25、39、51、61 mm,对应圆上的小孔个数分别为:4、8、14、28 和 32,具体结构示意图如图 5b 所示。

### 2.2.2 结果与分析

针对 3 种不同布孔方式的气体分布板,即 2.2.1 节优化设计的 2 种不均匀布孔方式(正三角形不均匀布孔和圆形不均匀布孔)和正三角形均匀布孔方式,通过对流化床内油菜籽固含率和固体颗粒速度进行比较分析,其结果分别如图 6 和图 7 所示。

由图 6a~6c 比较分析可以看出,气体分布板采用正三角形均匀布孔时,流化床内的油菜籽固含率不均匀,呈现出靠近边缘区域固含率很小,中心区域固含率很大的规律,且边缘区域很大一部分几乎没有油菜籽固体颗粒,产生了死区现象。而采用不均匀布孔时,流化床内的固含率分布较均匀,边缘处一小部分区域没有油菜籽固体颗粒。从图 6b 和图 6c 可以看出,相对正三角形不均匀布孔而言,圆形不均匀布孔的固含率更均匀。由图 7 也可以看出,当采用圆形不均匀布孔时,在流化床干燥过程的绝大部

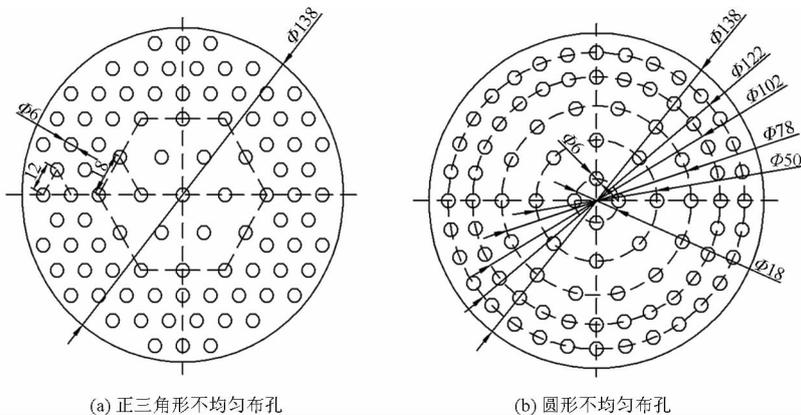


图 5 不同不均匀布孔方式气体分布板结构示意图

Fig. 5 Structure diagrams of gas distributor with different uneven arrangement holes

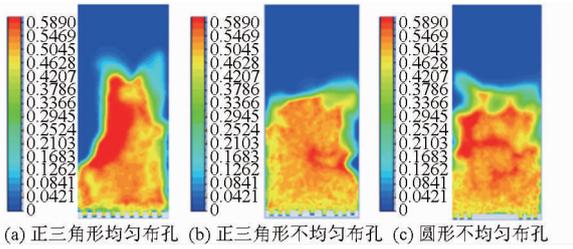


图6 固含率云图

Fig. 6 Contours of solid concentration

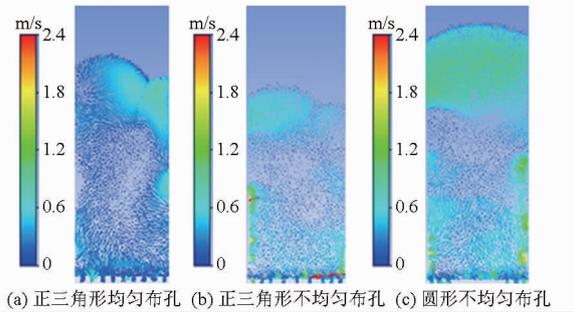


图7 固体颗粒速度矢量图

Fig. 7 Velocity vector graphs of solid particle

分时间,气粒两相流动实现了正常流态化,颗粒运动呈现脉动流动,局部颗粒浓度随时空而变,使流化床层内固体颗粒的速度分布更均匀,且作用范围大,无沟流和死区现象。这主要是因为热空气是从流化床中心部位进入,当采用中心稀疏边缘稠密的圆形不均匀布孔方式时,热空气在气体分布板通过所有小孔的时间相近,增加了热空气的均匀分布性,可使干燥室内气粒两相动量和热量交换强烈,因而可提高流化床干燥的热质传递系数<sup>[25-27]</sup>,缩短油菜籽的干燥时间。因此,圆形不均匀布孔是油菜籽干燥气体分布板的最佳布孔方式。

经2.1节和2.2节数值模拟分析发现,开孔率为15.84%圆形不均匀布孔是油菜籽干燥气体分布板的最佳结构,具体结构和尺寸如图5b所示。

### 3 实验验证

#### 3.1 实验装置

油菜籽流化床干燥动力学曲线测定实验装置如图8所示,主要由流化床干燥器、空气预热器、风机和空气流量与温度的测量与控制仪表等几个部分组成。其工艺流程如下:新鲜空气经过电加热管加热至70℃左右后,由干燥器底部通过气体分布板,进入床层将油菜籽流化并进行干燥,带有水蒸气的湿空气由干燥器顶部,经旋风分离器进行固气分离后放空;固体颗粒油菜籽采用间歇操作方式,由干燥器顶部加料口加入,从下部卸料口排出或取样。

油菜籽的初始含水率根据GB/T 5497—85标准测定,而后再根据测定结果,将其调湿至干基含水

率为28%,作为流化床干燥的实验样品。

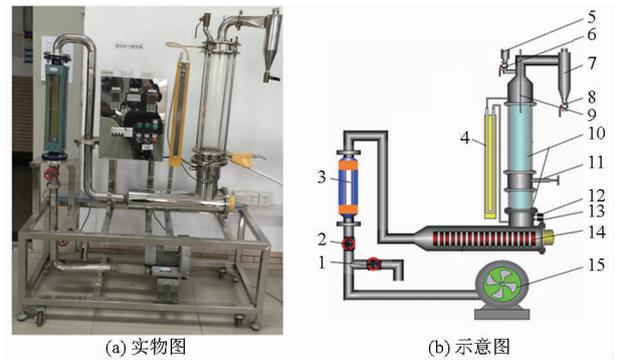


图8 流化床干燥动力学曲线测定实验装置

Fig. 8 Experiment equipment of drying rate curve measurement of fluidized bed

1. 旁路阀 2. 流量调节阀 3. 空气流量计 4. U型压差计
5. 加料口 6. 加料阀 7. 旋风分离器 8. 放渣阀 9. 加水口
10. 玻璃视桶(床层) 11. 取样口(卸料口) 12、13. 热电阻
14. 电加热管 15. 风机

#### 3.2 实验结果与分析

##### 3.2.1 开孔率

针对开孔率分别为12.27%、14.10%、15.84%的正三角形均匀布孔(图3)的气体分布板,通过油菜籽流化床干燥实验(实验装置见图8)测定得出的干燥动力学曲线如图9所示。可见,在油菜籽初始干基含水率和干燥时间相同的条件下,15.84%开孔率正三角形均匀布孔气体分布板的油菜籽干基含水率减少最多,14.10%开孔率次之,12.27%开孔率最少。这表明,15.84%开孔率的气体分布板干燥速率最大,14.10%开孔率次之,12.27%开孔率最小。由图9还可看出,开孔率增加,预热和恒速干燥阶段的干燥速率增加较快,而降速阶段则增加缓慢,最后趋于不变。上述分析表明,15.84%开孔率气体分布板的干燥速率最大,干燥时间最短,该开孔率是气体分布板的最佳开孔率,这与数值模拟结果相吻合,验证了数值模拟优化设计的15.84%开孔率是合理可靠的,有效地提高了油菜籽干燥效率。

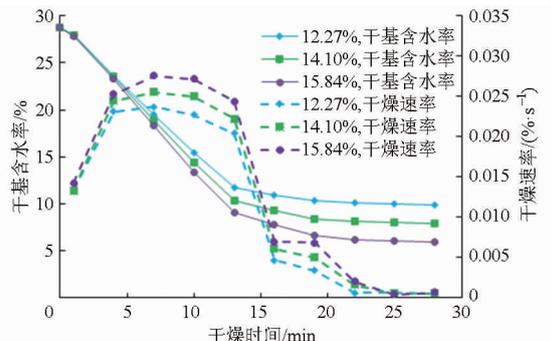


图9 不同开孔率分布板的干燥动力学曲线

Fig. 9 Drying kinetics curves of gas distributor with different open porosity ratios

### 3.2.2 布孔方式

图10为15.84%开孔率的不同布孔方式(图3c和图5)分布板的干燥动力学曲线,可以看出,在油菜籽初始干基含水率和干燥时间相同的条件下,圆形不均匀布孔气体分布板的油菜籽干基含水率减少最多,正三角形不均匀布孔次之,正三角形均匀布孔最少。这说明圆形不均匀布孔气体分布板的干燥速率最大,正三角形不均匀布孔次之,正三角形均匀布

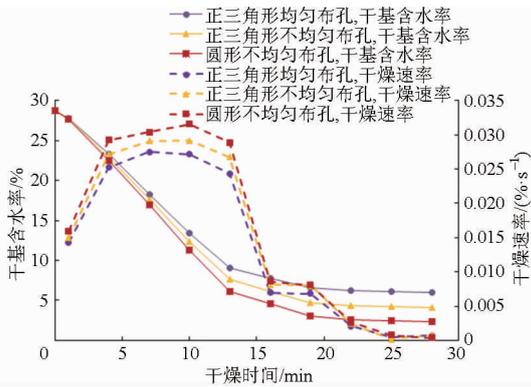


图10 不同布孔方式分布板干燥动力学曲线

Fig. 10 Drying kinetics curves of gas distributor with different arrangement holes modes

孔最小。可见,圆形不均匀布孔是气体分布板的最佳布孔方式,其干燥时间最短,这与数值模拟结果是一致的,验证了数值模拟优化设计的圆形不均匀布孔是合理可行的。

## 4 结论

(1)15.84%开孔率是油菜籽干燥气体分布板的最佳开孔率。热空气流经15.84%开孔率的气体分布板时,流通性增强,局部区域的热空气聚集减少,减少了热空气的流动死区。

(2)圆形不均匀布孔是油菜籽干燥气体分布板的最佳布孔方式。在干燥过程的绝大部分时间,圆形不均匀布孔可使气粒两相流动实现正常流态化,颗粒运动呈现脉动流动,局部颗粒浓度随时空而变,使流化床层内固体颗粒的速度分布更均匀,且作用范围大,无沟流和死区现象。

(3)通过实验,对数值模拟预测的结果进行验证发现,数值模拟与实验结果吻合,证明开孔率为15.84%、布孔方式为圆形不均匀布孔的气体分布板是合理可行的,为工程实践缩短油菜籽干燥时间提供了一种较理想的气体分布板。

## 参 考 文 献

- 刘伟民,张鹏程,徐圣言. 旋转导向管喷动床干燥油菜籽的工艺优化[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1): 56-59.  
Liu Weimin, Zhang Pengcheng, Xu Shengyan. Experimental study on drying of rapeseed in a spouted bed with rotating draft tube [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 56-59. (in Chinese)
- 杨玲,杨明金,陈建,等. 种用油菜籽干燥的现状与发展趋势[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊2): 309-315.  
Yang Ling, Yang Mingjin, Chen Jian, et al. Status and development trend of rapeseed drying for seeding purposes [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(Supp. 2): 309-315. (in Chinese)
- 杨国峰,和珊,丁超. 油菜籽热风干燥后储藏品质的研究[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(9): 97-102.  
Yang Guofeng, He Shan, Ding Chao. Study of the rapeseeds' quality during storage after hot-air drying [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(9): 97-102. (in Chinese)
- 和珊,丁超,杨国峰,等. 微波干燥对油菜籽品质及气味成分的影响[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(1): 48-54.  
He Shan, Ding Chao, Yang Guofeng, et al. Effect of microwave drying on quality and volatile profiles of rapeseeds [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(1): 48-54. (in Chinese)
- 杨玲,杨明金,郭孟报,等. 油菜籽热风干燥传热传质与优化的研究进展[J]. 现代食品科技, 2014, 30(7): 306-313.  
Yang Ling, Yang Mingjin, Guo Mengbao, et al. Research progress of heat and mass transfer and optimization of rapeseed hot-air drying [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(7): 306-313. (in Chinese)
- 陈军,史琳,张金龙,等. 高温除湿干燥机的试验研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(3): 376-378.  
Chen Jun, Shi Lin, Zhang Jinlong, et al. Experimental study of a high temperature heat pump dehumidification dryer [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(3): 376-378. (in Chinese)
- 范晓旭,贤建伟,初雷哲,等. 生物质鼓泡流化床和循环流化床气化对比试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 96-99.  
Fan Xiaoxu, Xian Jianwei, Chu Leizhe, et al. Comparison of bubbling fluidized bed and circulating fluidized bed in gasification of biomass [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 96-99. (in Chinese)
- Depypere F, Pieters J G, Dewettinck K. CFD analysis of air distribution in fluidised bed equipment [J]. Powder Technology, 2004, 145(3): 176-189.
- 赵思昆,刘巍,高文义,等. 波纹气分板流化床干燥玉米膏的热效率[J]. 南京理工大学学报, 2012, 36(1): 147-152.  
Zhao Sikun, Liu Wei, Gao Wenyi, et al. Heat efficiency of drying corn paste in fluidized bed with corrugated gas distributor [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2012, 36(1): 147-152. (in Chinese)
- 郑磊,刘建坤,李晓伟,等. 鼓泡流化床风室及分布板区域流动特性的数值模拟[J]. 化学反应工程与工艺, 2012, 28(4): 294-299.

- Zheng Lei, Liu Jiankun, Li Xiaowei, et al. Numerical simulation of flow characteristics of the wind chamber and distributor perforated area of a bubbling fluidized bed [J]. *Chemical Reaction Engineering and Technology*, 2012, 28(4): 294–299. (in Chinese)
- 11 陈鸿伟, 张志才, 李忠猛, 等. 锥形气体分布板双循环流化床颗粒循环流率研究及预测 [J]. *动力工程学报*, 2013, 33(12): 920–926.  
Chen Hongwei, Zhang Zhicai, Li Zhongmeng, et al. Study and prediction on solids circulation rate in dual circulating fluidized bed with cone air distributor [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2013, 33(12): 920–926. (in Chinese)
- 12 陈伟博, 程中虎, 房倚天. 气固流化床分布板区流动特性 [J]. *化学反应工程与工艺*, 2013, 29(6): 488–494.  
Chen Weibo, Cheng Zhonghu, Fang Yitian. The characterization of grid zone in the gas-solid fluidized bed [J]. *Chemical Reaction Engineering and Technology*, 2013, 29(6): 488–494. (in Chinese)
- 13 Koch D L, Hill R J. Inertial effects in suspension and porous-media flows [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2001, 33(1): 619–647.
- 14 Tsuo Y P, Gidaspow D. Computation of flow patterns in circulating fluidized beds [J]. *AIChE Journal*, 1990, 36(6): 885–896.
- 15 Syamlal M, O'Brien T J. Computer simulation of bubbles in a fluidized bed [J]. *AIChE Symposium Series*, 1989, 85(270): 22–31.
- 16 Zimmermann S, Taghipour F. CFD modeling of the hydrodynamics and reaction kinetics of FCC fluidized-bed reactors [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2005, 44(26): 9818–9827.
- 17 McKeen T, Pugsley T. Simulation and experimental validation of a freely bubbling bed of FCC catalyst [J]. *Powder Technology*, 2003, 129(1): 139–152.
- 18 吕友军, 董旭斌, 张天宇. 曳力和湍流对超临界水流化床传热特性的影响 [J]. *工程热物理学报*, 2014, 35(12): 2437–2441.  
Lü Youjun, Dong Xubin, Zhang Tianning. Effects of the turbulence and drag force on heat transfer characteristics in supercritical water fluidized bed [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, 35(12): 2437–2441. (in Chinese)
- 19 刘国栋, 沈志恒, 王帅, 等. 液固流化床中颗粒流动特性的数值模拟 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 31(4): 1108–1111.  
Liu Guodong, Shen Zhiheng, Wang Shuai, et al. Simulation of hydrodynamics of particles in a liquid-solid fluidized bed [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, 31(4): 1108–1111. (in Chinese)
- 20 李诗龙. 油菜籽的物理特性浅析 [J]. *中国油脂*, 2005, 30(2): 17–20.  
Li Shilong. Simple analysis of physical property of rapeseed [J]. *China Oils and Fats*, 2005, 30(2): 17–20. (in Chinese)
- 21 董淑芹. 气固流化床流动特性的实验研究与数值模拟 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2009.  
Dong Shuqin. The investigation of experiment and numerical simulation on flow characteristic in gas-fluidized bed [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- 22 Wen C Y, Yu U H. A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity [J]. *AIChE Journal*, 1966, 12(3): 610–612.
- 23 李占勇, 潘波, 高新源, 等. 脉动气流辅助流化下双组分颗粒的混合特性研究 [J]. *农业机械学报*, 2015, 46(3): 247–253.  
Li Zhanyong, Pan Bo, Gao Xinyuan, et al. Particle mixing and segregation of binary mixtures in fluidized beds with additional pulsating air flow [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(3): 247–253. (in Chinese)
- 24 肖志锋, 吴南星, 刘相东. 过热蒸汽流化床干燥流动特性实验 [J]. *农业机械学报*, 2013, 44(7): 183–186.  
Xiao Zhifeng, Wu Nanxing, Liu Xiangdong. Experiment on flow characteristics of fluidized bed drying with superheated steam [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(7): 183–186. (in Chinese)
- 25 Gao Jinsen, Lan Xingying, Fan Yiping, et al. CFD modeling and validation of the turbulent fluidized bed of FCC particles [J]. *AIChE Journal*, 2009, 55(7): 1680–1694.
- 26 吴诚, 高希, 成有为, 等. 湍动流化床过渡段固含率分布特征实验及数值模拟 [J]. *化工学报*, 2013, 64(3): 858–866.  
Wu Cheng, Gao Xi, Cheng Youwei, et al. Experimental and numerical study of solids concentration distribution in transition section of turbulent fluidized bed [J]. *CIESC Journal*, 2013, 64(3): 858–866. (in Chinese)
- 27 宫英振, 牛海霞, 肖志锋, 等. 油菜籽过热蒸汽流化床常压干燥过程的数学模拟 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(4): 351–356.  
Gong Yingzhen, Niu Haixia, Xiao Zhifeng, et al. Simulation on rapeseed drying in superheated steam fluidized bed at atmosphere pressure [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(4): 351–356. (in Chinese)