

10<sup>th</sup> Global Chinese Chemical Engineers Symposium  
第十届全国华人化工学者研讨会  
2018年8月，加拿大 大瀑布市



# 基于喷嘴进口气体旋流效应喷动床内气固 两相流动规律数值模拟

吴峰

马晓迅

教授 博导

仲英青年学者

西北大学 化工学院

# 目 录



引言



数学模型



模拟结果与分析



结论

# 1 引言

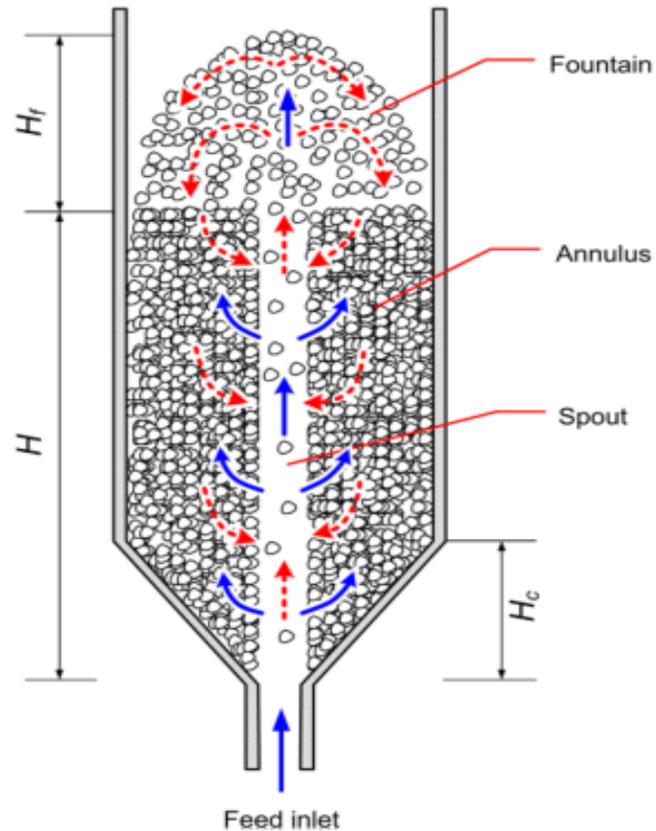


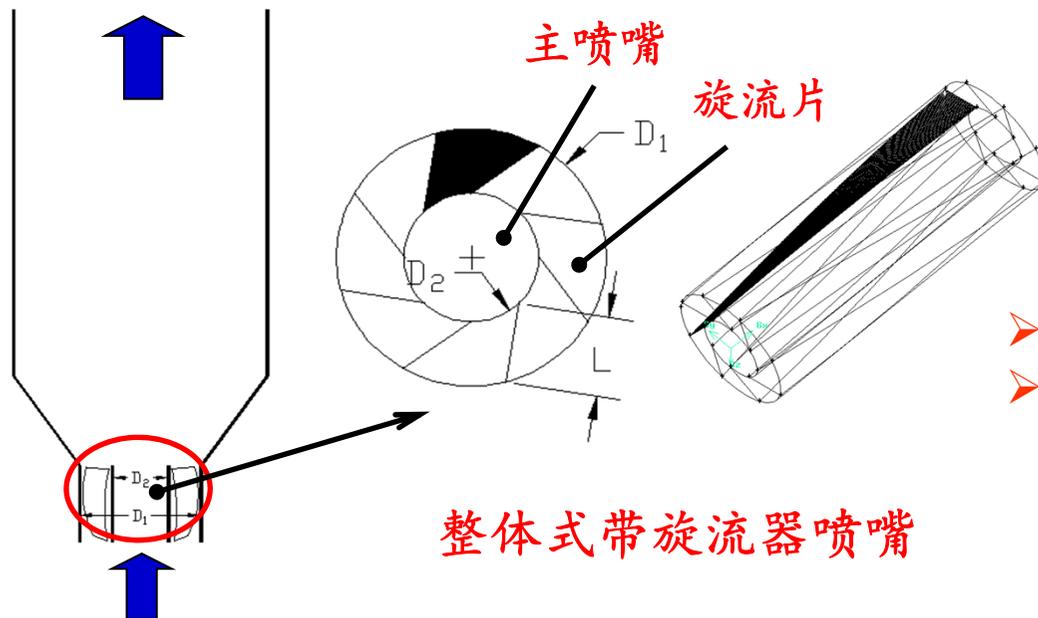
图1 喷动床三区流动结构示意图

## 主要应用

- 
- 
- 颗粒粉碎
- 低品质煤的燃烧和气化
- 燃煤烟气脱硫

# 1 引言

- 传统喷动床内环隙区颗粒浓度较大，颗粒缺少径向运动，严重影响了作为主要反应区域的环隙区处理物料的效率
- 针对喷动床的以上缺陷，本研究提出一种的**带旋流器喷嘴**喷动床结构来改善床内多相传递过程，通过进口旋流器产生的旋流效应来**局部流化喷动床环隙区颗粒，消除流动死区，改善喷动床内气固两相流动情况**



- 已申请发明专利
- 吴峰,等.一种带旋流器喷嘴及喷动床. 2018.3. 中国, 201810200850.4

图2 带旋流器喷嘴喷动床**结构示意**

## 2 数学物理模型

### 2.1 欧拉-欧拉双流体模型基本控制方程

质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{u}_q) = \sum_{p=1}^n \left( \dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp} \right) + S_q$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g \mathbf{v}_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \mathbf{v}_g \mathbf{v}_g) = -\varepsilon_g \nabla P_g + \varepsilon_g \rho_g \mathbf{g} + \beta_{gs} (\mathbf{v}_s - \mathbf{v}_g) + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_g$$

颗粒相动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s \mathbf{v}_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \mathbf{v}_s \mathbf{v}_s) = -\varepsilon_s \nabla P_g + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_s + \varepsilon_s \rho_s \mathbf{g} + \beta_{gs} (\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_s)$$



## ▶ 2.2 相间曳力系数模型

- Gidaspow 曳力系数模型—气相与颗粒相

$$\beta = \begin{cases} 150 \frac{\alpha_p (1 - \alpha_g) \mu_g}{\varepsilon_g d_p^2} + 1.75 \frac{\rho_g (1 - \alpha_g) |u_p - u_g|}{d_p} & \alpha_g < 0.8 \\ \frac{3}{4} C_D \frac{(1 - \alpha_g) \alpha_g}{d_p} \rho_g |u_p - u_g| \alpha_g^{-2.7} & \alpha_g \geq 0.8 \end{cases}$$

- 对称曳力系数模型—两个次相之间

$$\beta = \frac{\alpha_p (\alpha_p \rho_p + \alpha_q \rho_q) f}{\tau_{pq}}$$

- Syamlal-O'Brien 对称曳力系数模型—两种颗粒之间

$$\beta = \frac{3(1 + e_{pq}) \alpha_p \rho_p \alpha_q \rho_q (d_p + d_q)^2 g_{0,pq} |\vec{u}_p - \vec{u}_q|}{4(\rho_p d_p^3 + \rho_q d_q^3)}$$

## ▶ 2.3 分散式标准 $k$ - $w$ 湍流模型

- 湍动能  $k$  方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g k_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g k_g \vec{u}_g) = \nabla \cdot \left( \alpha_g \frac{\mu_{t,g}}{\sigma_k} \nabla k_g \right) + \alpha_g G_{k,g} - \alpha_g \rho_g \varepsilon_g + \alpha_g \rho_g \Pi_{k_g}$$

- 湍流频率  $w$  方程

$$\frac{\partial \rho_g \omega_g}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho_g \omega_g - (\mu + \sigma_t) \frac{\partial \omega_g}{\partial x_j} \right) = \alpha \frac{\omega_g}{k} \tau_{ij} S_{ij} - \beta \rho_g \omega_g^2$$

## ▶ 颗粒拟温度方程

$$\frac{3}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \Theta_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \Theta_s \vec{u}_s) \right] = \left( -p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s \right) : \nabla \vec{u}_s - \nabla \cdot (k_{\Theta_s} \nabla \Theta_s) - \gamma_{\Theta_s} - 3\beta \Theta_s$$

## 2.4 计算模型

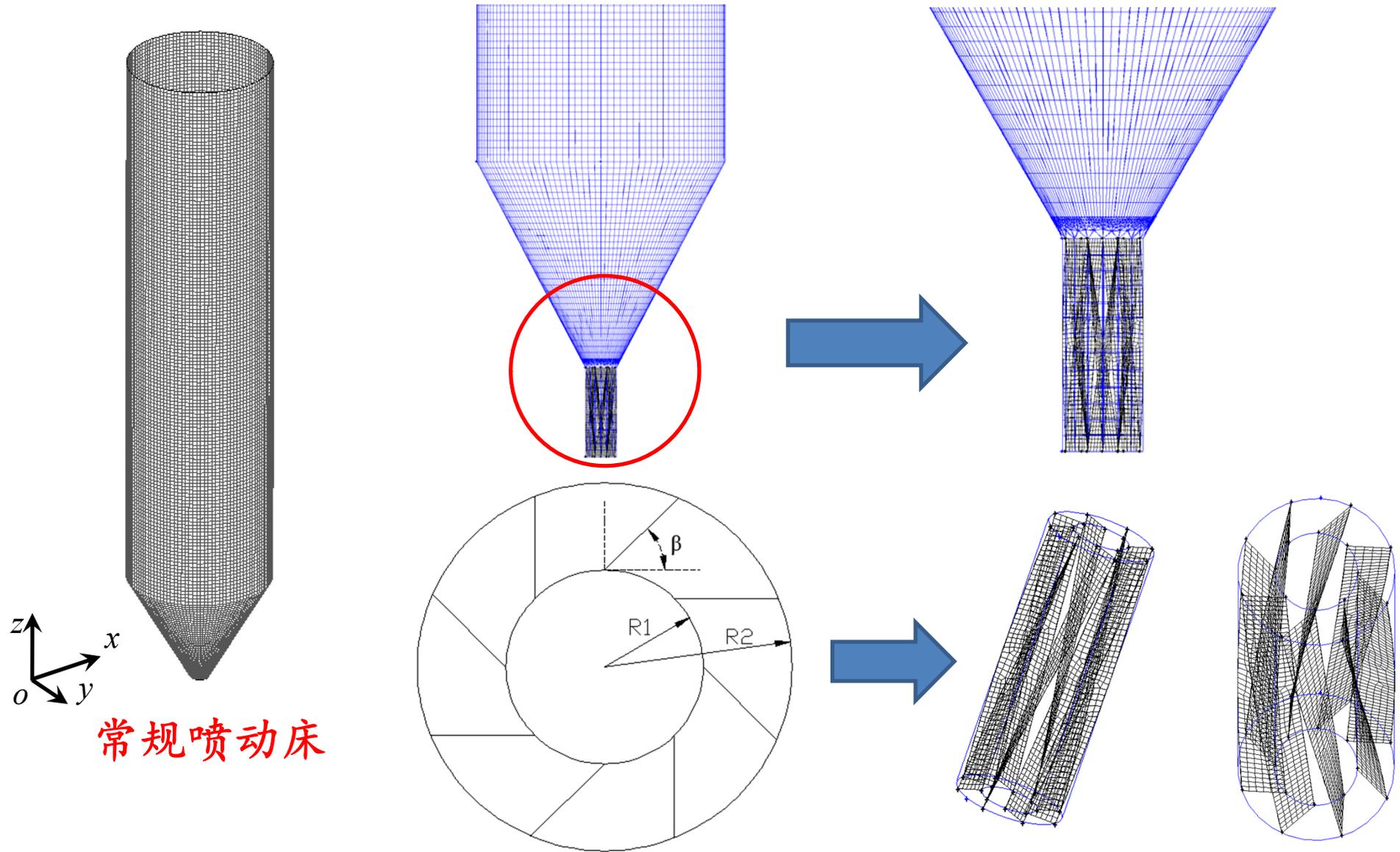


图3 带旋流器喷嘴喷动床网格示意

## 2.5 计算参数表

参数	常规喷动床(He et al., 1994)	旋流器喷动床
固体密度 $\rho_s(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2503	2503
气体密度 $\rho_g(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1.225	1.225
气体粘度 $\mu_g(\text{Pa}\cdot\text{s})$	1.7894E-05	1.7894E-05
颗粒直径 $d_s(\text{mm})$	1.41	1.41
颗粒最大填充浓度 $\alpha_{s,\text{max}}$	0.59	0.59
静止床高 $h(\text{mm})$	325	325
喷动床直径 $D(\text{mm})$	152	152
柱锥部分倒锥角 $\theta$	60°	60°
入口喷嘴直径 $D_i(\text{mm})$	19	19
最小表观气速 $u_{ms}(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.54	0.54
入口表观气速 $U(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.896(1.66 $u_{ms}$ )	0.896

➤ **Y.L. He, S.Z. Qin, C.J. Lim, Grace, J.R., Particle velocity profiles and solid flow patterns in spouted beds. Canadian Journal of Chemical Engineering, 72, 561-568 (1994).**

## 2.5 计算参数表

参数	常规喷动床	旋流器喷动床
喷动床高度 $H(\text{mm})$	700	700
旋流器长度 $L(\text{mm})$	-	50
旋流器外管直径 $D_2(\text{mm})$	-	19
旋流器内管直径 $D_1(\text{mm})$	-	10
旋流器叶片个数	-	8
旋流器叶片宽度 $L_i(\text{mm})$	-	6.4
旋流器叶片厚度 $L_{ii}(\text{mm})$	-	0.5
旋流叶片倾斜角	-	$86^\circ$
旋流叶片进口角 $\beta$	-	$45^\circ$

## 2.6 边界条件

边界条件	参数设置
气体入口	湍流速度分布，入口表观气速 $U=0.896\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，速度方向垂直入口边界，湍流强度为 2%
气体出口	Outflow 出口边界
壁面	无滑移边界条件

### 3 模拟结果与分析

### 模型验证 ✓

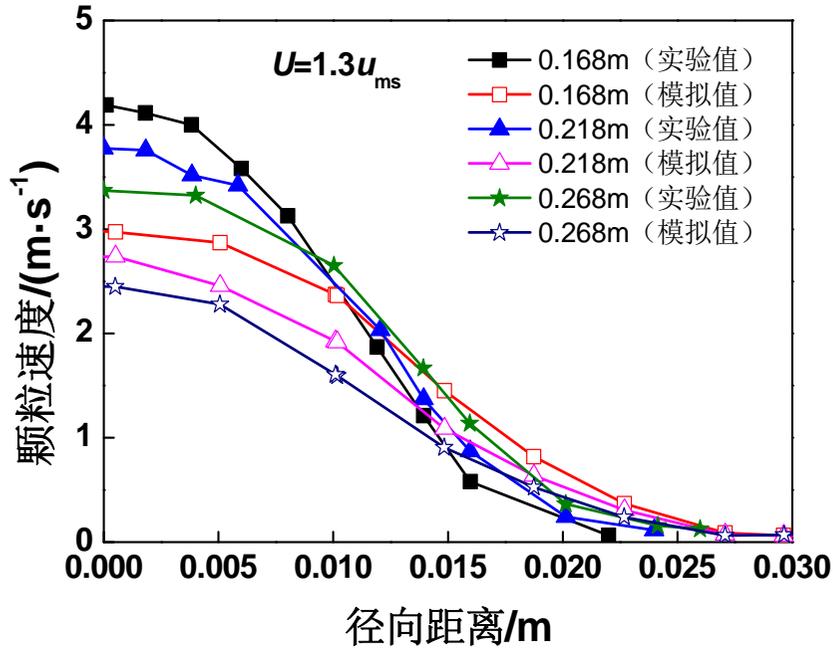


图4 不同床高下颗粒速度模拟值与实验值对比

- 将无旋流器三维喷动床的数值模拟进行网格无关性分析，获得合理的网格划分密度(45万数量级)。并将结果与经典文献实验数据进行对比分析
- 由图可知颗粒速度的模拟值与实验值变化趋势一致，最大偏差在22%以内，表明论文所采用喷动床数值模型具有一定的合理性
- 将此数值模型进一步应用到带旋流器喷嘴三维喷动床气固两相流动冷模进行模拟，获得颗粒浓度、速度、拟温度等

### 3. 1 颗粒浓度分布.

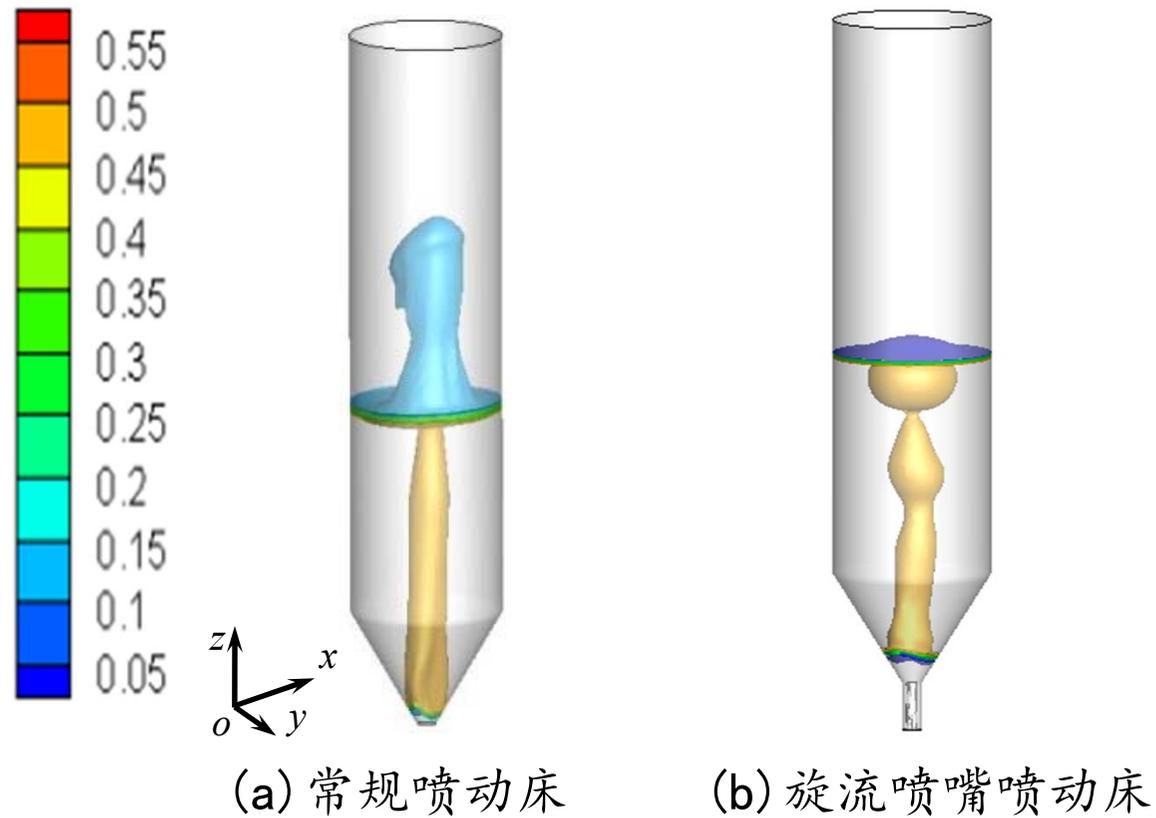


图5 喷动床内颗粒相**体积分数**云图 (t=6s)

### 3.1 颗粒浓度分布

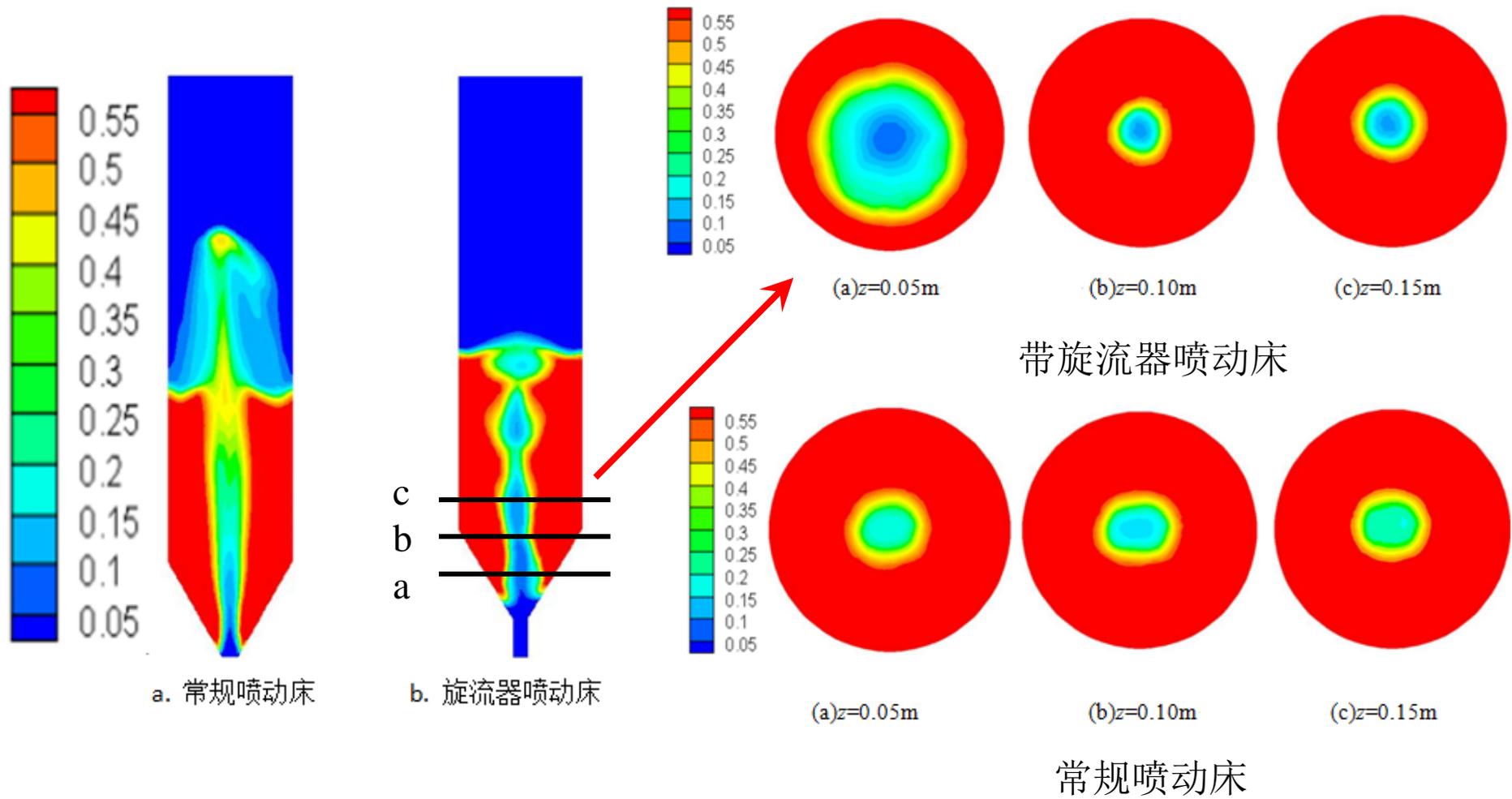


图6 喷动床纵截面及横截面颗粒相体积分分数云图

### 3.1 颗粒浓度分布

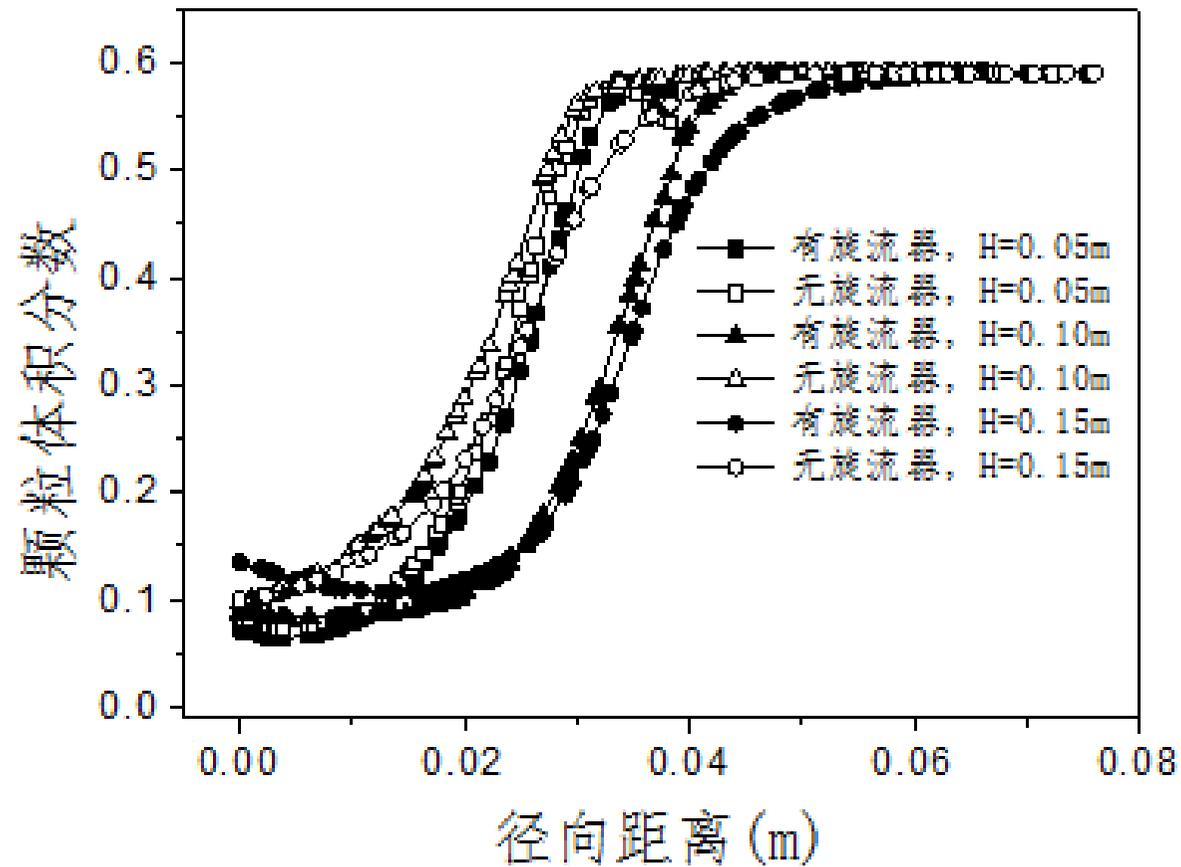


图7 不同床层高度下颗粒体积分数径向分布对比

### 3.1 颗粒浓度分布

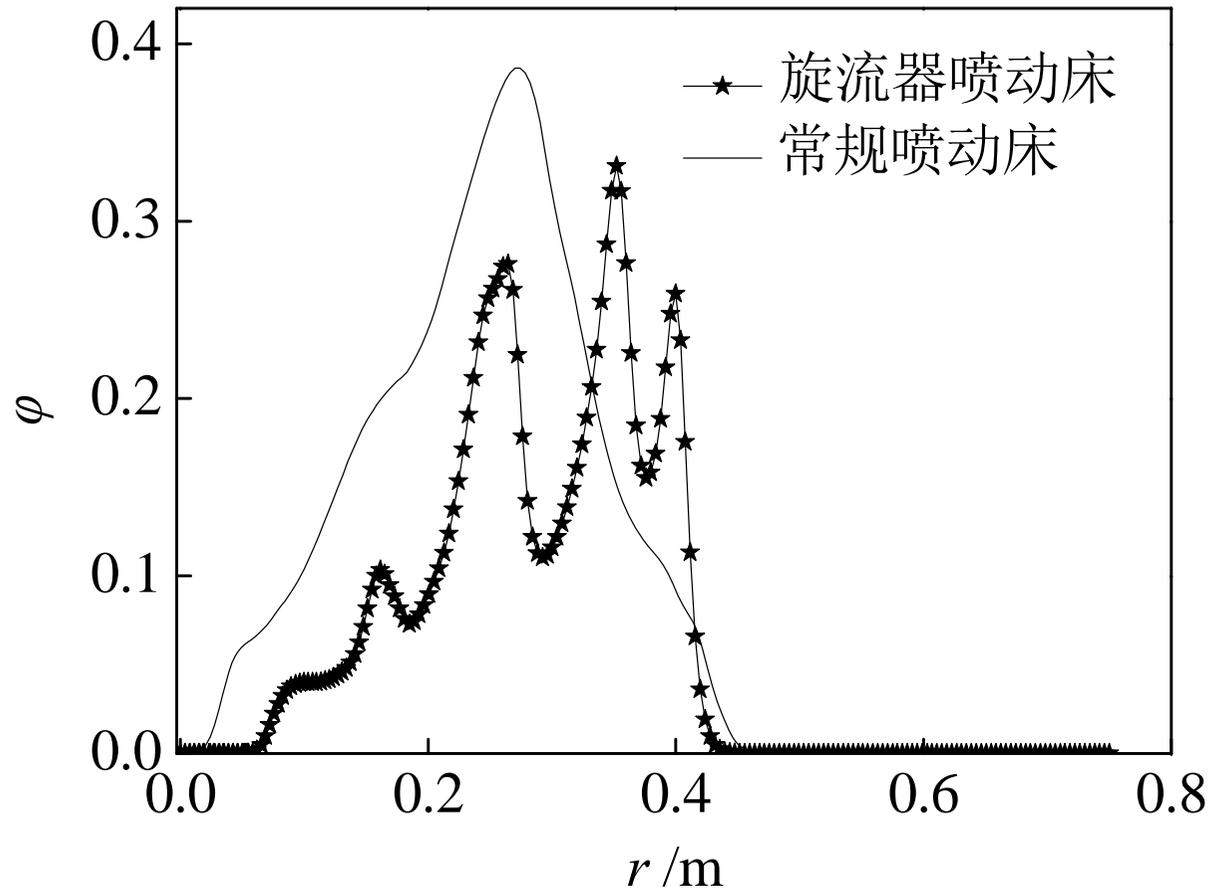


图8 不同床层高度下颗粒体积分分数轴向分布对比

### 3.2 颗粒径向速度分布

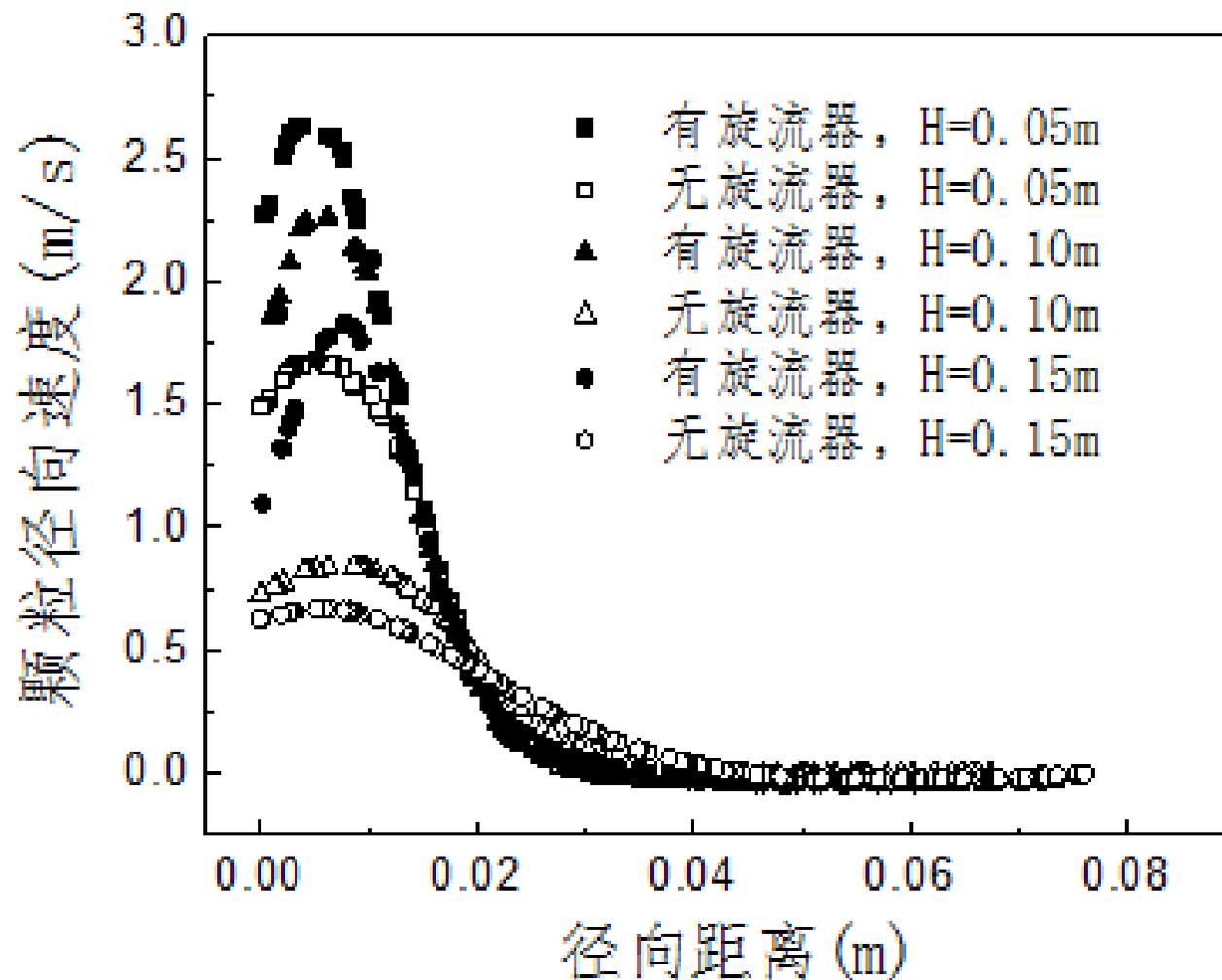


图9 不同床层高度下颗粒径向速度径向分布对比

### 3.3 气体湍动能分布

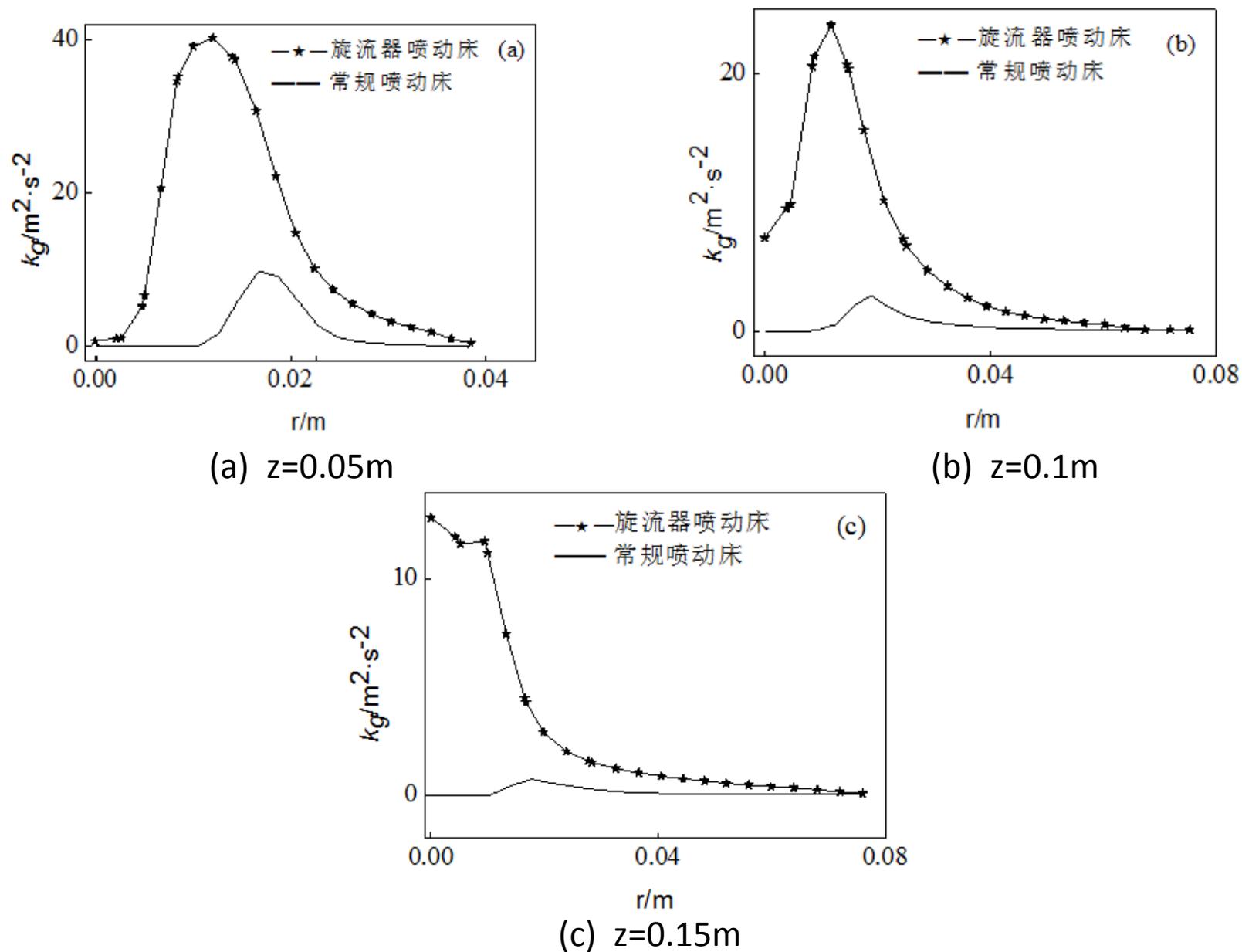


图10 不同床层高度下的气体湍动能径向分布对比

### 3.4 颗粒拟温度分布

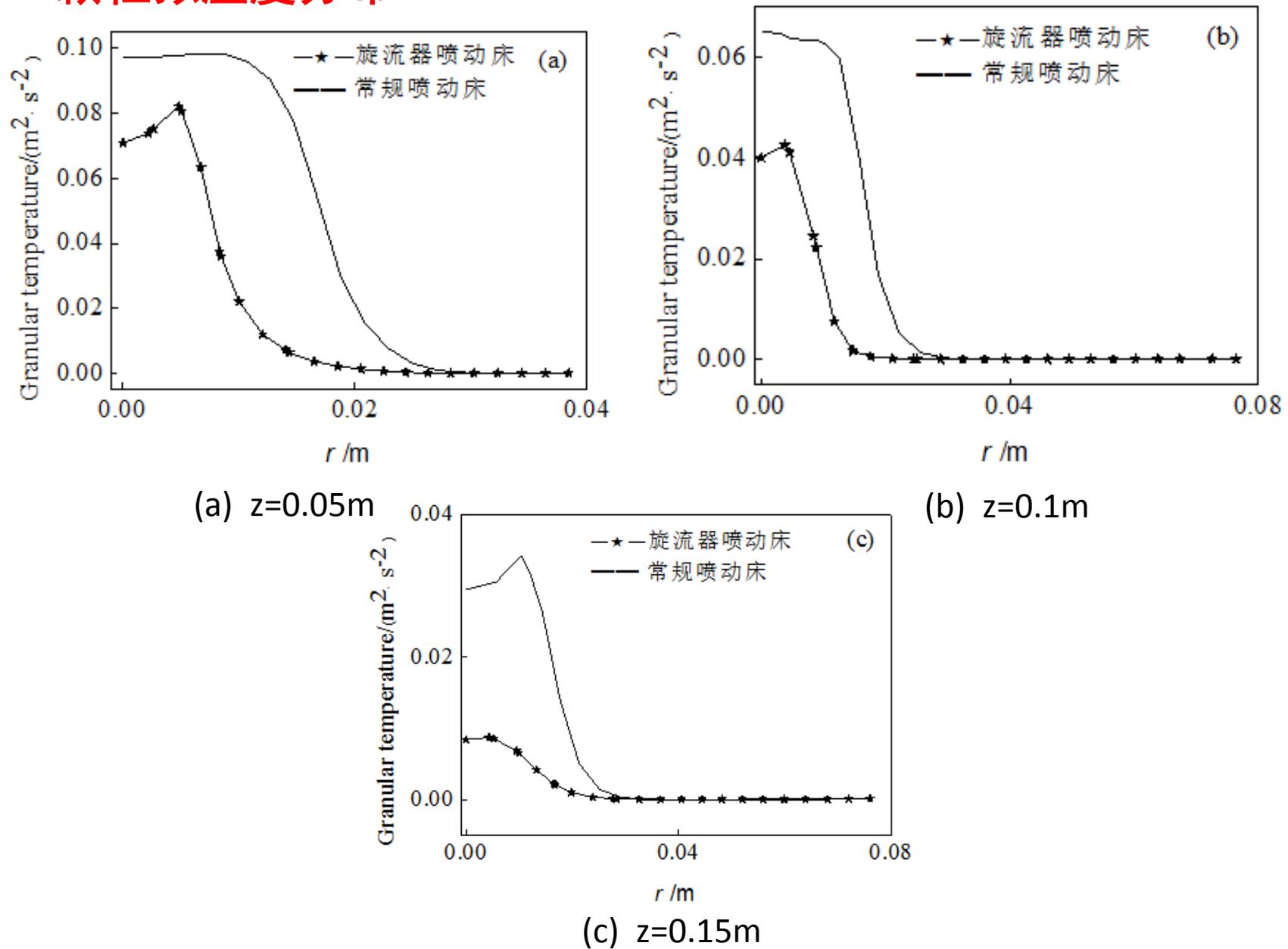


图11 不同床层高度下的颗粒拟温度径向分布对比

### 3.5 压力降对比

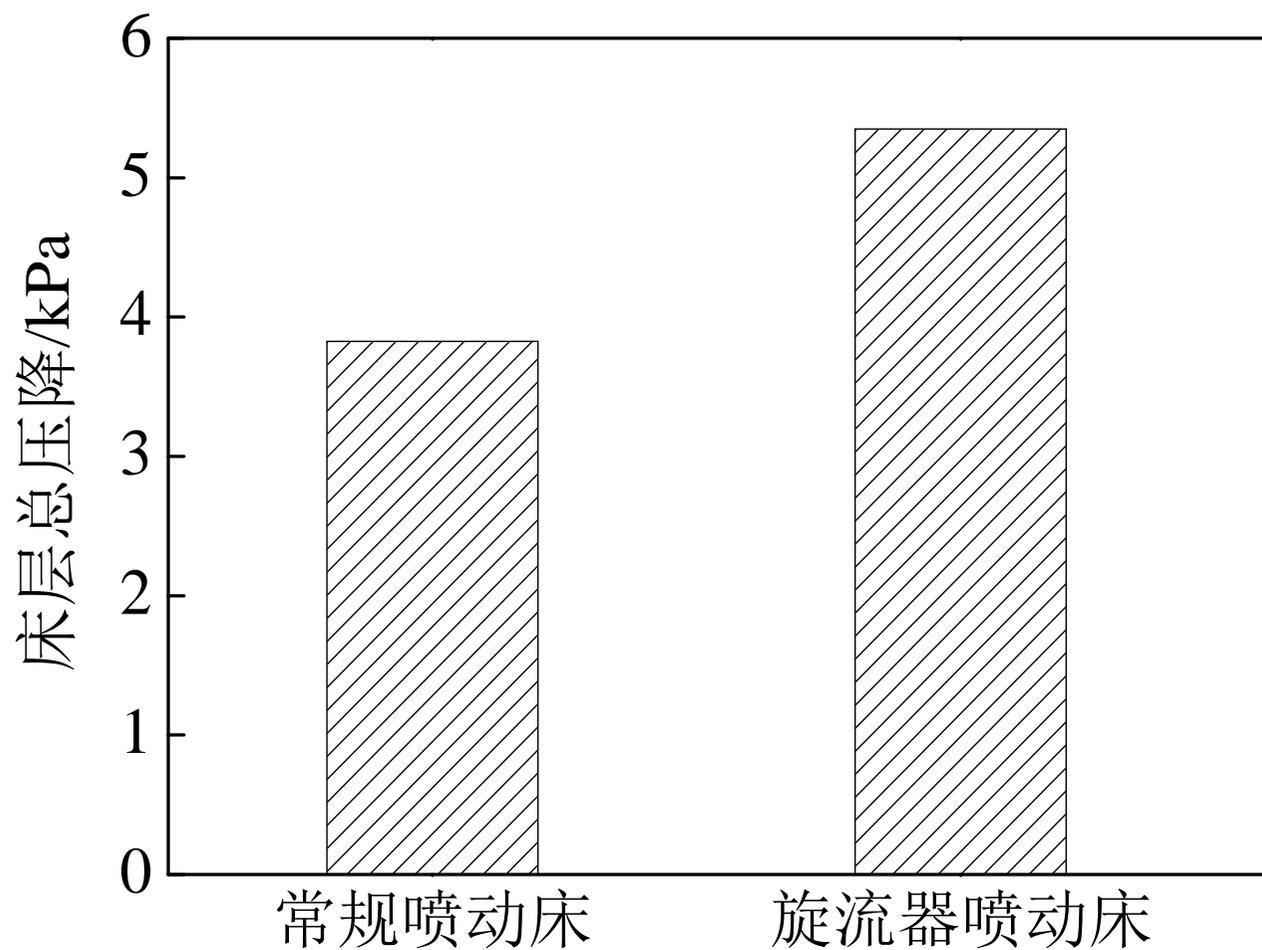


图12 床层总压降对比

**床层进出口总压降增加了39%**

## 4 结论

- 带旋流器喷嘴喷动床能够实现三区喷动结构，气体进口旋流作用能够有效降低环隙区颗粒浓度，增加颗粒径向速度，增强了气体、颗粒在柱锥区的径向混合作用
- 进口气体的旋流作用能够有效增加气体湍动能值，强化气体、颗粒的径向混合，进而导致颗粒拟温度值下降
- 进一步实验分析旋流喷嘴对喷动床内气固两相流动的影响，分析旋流片**倾斜角**、旋流通道**气体分配量**等参数的影响，**重点研究旋流效应对粉粒喷动床内水汽化脱硫效率的影响规律**

# 喷动床脱硫过程二维模拟



三维?

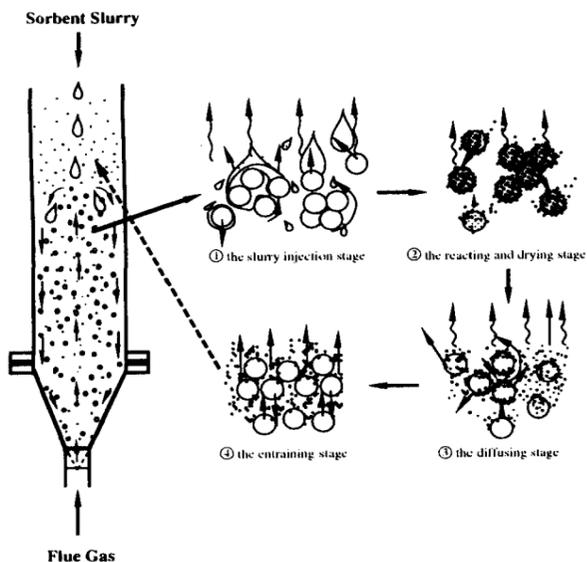
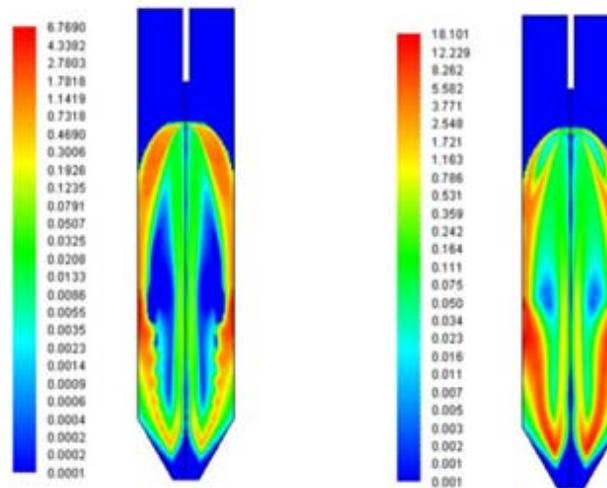


图12 粉-粒喷动床水汽化脱硫过程



(左: 水汽化速率(kg/m³s); 右: 水汽化传质速率(m/s))

图13 二维水汽化速率及水汽化传质系数分布图

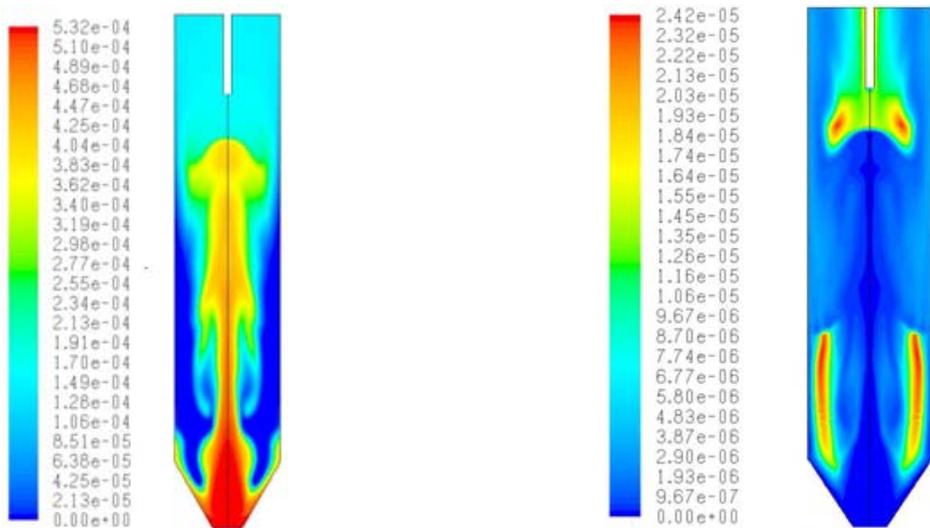


图14 二维喷动床内气相SO<sub>2</sub>组分体积分数分布图

图15 脱硫反应产物(CaSO<sub>3</sub>)体积分数分布云图

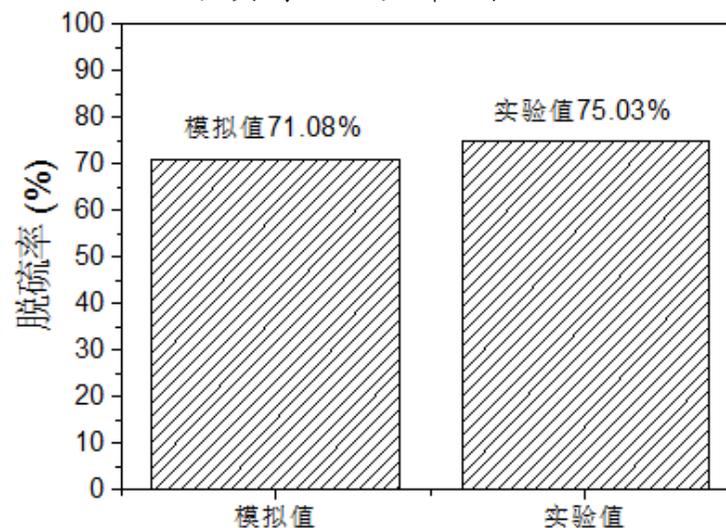


图16 脱硫效率模拟值与实验值对比图

# 团队人员介绍



马晓迅

教授，博导，日本群马大学博士



徐龙

教授，硕导，北京大学博士后



吴峰

教授、博导，西安交大博士



刘新宝

教授，博导，日本国家物质材料研究所博士后



褚雅志

教高工，硕导，大连理工大学硕士



陈斌

教授，硕导，华东理工大学博士



于秋硕

副教授，硕导，天津大学博士



陈汇勇

副教授，硕导，华南理工大学博士



杨斌

副教授，硕导，西安交大博士



孙鸣

副教授，西北大学博士



张建波

副教授，硕导，大连理工大学博士



焦林郁

副教授，德国柏林工大博士



代成义

副教授，大连理工大学博士



胡军

副教授，西安交通大学博士



韩小龙

副教授，清华大学博士



朱燕燕

副教授，中科院大连化物所博士



王晨

副教授，西北大学博士后



郝青青

副教授，陕西师范大学博士



赵彬然

副教授，天津大学博士



田斌

副教授，中国石油大学博士



李卓

讲师，西北大学博士



李晶莹

讲师，西北大学博士



聂艳

工程师，西北大学硕士

# 科研团队



科技部碳氢资源清洁利用  
国家国际科技合作基地

陕北能源先进化工利用技术  
教育部工程研究中心

陕西省洁净煤转化工程技术  
研究中心

陕北能源化工产业发展协  
同创新中心

感谢国家自然科学基金(21476181)  
希望各位专家指正