

金浩哲, 陈小平, 郑智剑, 等. 挡板倾斜角度对热高压分离器内颗粒漂移影响的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 2092–2096. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.1982

Jin Haozhe, Chen Xiaoping, Zheng Zhijian, et al. Numerical simulation on the effect of different baffle tilt angles on particle drifting in high temperature and high pressure separator[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(8): 2092–2096. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.1982

## 挡板倾斜角度对热高压分离器内颗粒漂移影响的数值模拟

金浩哲<sup>1</sup>, 陈小平<sup>1</sup>, 郑智剑<sup>1</sup>, 偶国富<sup>1</sup>, 舒歌平<sup>2</sup>, 王超<sup>1</sup>, 贺亮<sup>1</sup>

(1. 浙江理工大学 流动腐蚀研究所, 浙江 杭州 310018; 2. 神华集团有限责任公司 中国神华煤制油化工有限公司鄂尔多斯煤制油分公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

**摘 要:** 以煤直接液化工艺过程中热高压分离器(简称“热高分”)内的颗粒漂移为研究对象, 建立带静态分离挡板的“热高分”物理模型, 并采用VOF(Volume of Fluid)模型和DPM(Discrete Phase Model)模型, 数值分析静态分离挡板5种倾斜角度下热高分罐内部速度场、不同液位高度颗粒平均浓度及气相出口煤粉漂移率的分布规律。研究结果表明: 静态分离挡板的倾斜角度对速度场的影响明显, 在挡板附近区域形成小回流涡旋效应, 产生对颗粒随气流夹带提升的抑制作用; 颗粒平均浓度在气-液交界面区域最高, 随着热高分罐内高度的增加而逐渐降低; 与其余倾斜角度相比,  $\alpha = 45^\circ$ 时气相出口的颗粒漂移率达到最小, 较未设置分离挡板时, 颗粒漂移率降低50%以上。研究有望为热高压分离压力容器的设计和运行优化提供参考。

**关键词:** 热高压分离器; 静态分离挡板; 流动特性; 颗粒漂移; 数值预测

**中图分类号:** TQ529.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2016)08-2092-05

## Numerical simulation on the effect of different baffle tilt angles on particle drifting in high temperature and high pressure separator

JIN Hao-zhe<sup>1</sup>, CHEN Xiao-ping<sup>1</sup>, ZHENG Zhi-jian<sup>1</sup>, OU Guo-fu<sup>1</sup>, SHU Ge-ping<sup>2</sup>, WANG Chao<sup>1</sup>, HE Liang<sup>1</sup>

(1. Institute of Flow Induced Corrosion, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Ordos Coal Oil Company of China Shenhua Oil-coal to Liquid and Chemical Company Limited, Shenhua Group Corporation Limited, Ordos 017000, China)

**Abstract:** To study the pulverized coal drifting in high temperature and high pressure (HTHP) separator in coal liquefaction unit, the physical model of HTHP separator with static separation baffles was established. The volume of fluid (VOF) model and the discrete phase model (DPM) were used in this numerical simulation to analyze the distribution regularities of interior velocity field, the averaged particles concentration in different heights and the pulverized coal drifting ratio in gas phase outlet with five kinds of baffle tilt angles. The results show that the tilt angle of separation baffles has a great influence on the velocity field, the vortex effect occurs near the baffles; the mean particles concentration becomes maximum in the area of gas-liquid interface, then decreases gradually with the increase of height; the pulverized coal drifting ratio in gas phase outlet reaches minimum if the tilt angle is  $45^\circ$ , which can reduce more than 50% compared to no static separation baffles. The research results can provide a valuable reference for optimizing the design and operation in HTHP separator.

收稿日期: 2015-12-28 修回日期: 2016-01-22 责任编辑: 许书阁

基金项目: 国家自然科学基金委员会-神华集团有限公司煤炭联合基金资助项目(U1361107); 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题资助项目(20133318120004); 浙江理工大学 521 人才培养计划资助项目

作者简介: 金浩哲(1982—), 男, 河南周口人, 讲师, 博士。E-mail: haozhejin@zstu.edu.cn。通讯作者: 偶国富(1965—), 男, 江苏苏州人, 教授, 博士。E-mail: ougf@163.com

**Key words:** high temperature and high pressure separator; static separation baffles; flow characteristic; particles drifting; numerical prediction

热高压分离器(热高分)作为煤直接液化工艺的反应流出物分离器,其主要作用是分离含无机矿物质、催化剂颗粒及未完全反应的煤粉等颗粒的气-液-固多相流体。因缺少完善的设计标准可供借鉴,煤直接液化工艺放大过程中热高分设备的设计方法、操作运行等均缺少经验可循,部分设备采用石化行业的标准设计,设备的运行风险较高。作为世界首套百万吨级煤直接液化示范工程的重要组成部分,煤直接液化工艺反应分馏系统,即热高分下游的换热器、空冷器管束已经出现大面积的颗粒漂移引起的管束堵塞和冲蚀磨损等失效现象<sup>[1-3]</sup>,严重影响设备的分离效率、换热性能和满负荷生产。

因热高分设备属于高压容器(>18 MPa),未设置气相采样口,难以通过试验测定其气相出口的颗粒漂移规律,故采用数值模拟的方法研究煤粉颗粒的漂移特性。与之相关可借鉴的研究成果包括:高晖等<sup>[4]</sup>研究螺旋管内多相流的分离现象,运用马尔文粒度仪对气、水、砂三相流底部颗粒的浓度和粒度分布进行测量;Kim Y N等<sup>[5]</sup>运用颗粒动力学理论建立 $k_1 - \varepsilon_1 - k_2 - k_{12}$ 双流模型,引入 $k_{12}$ 用来描述颗粒与流体之间的能量交换,数值预测湍流影响下 $70\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒的运动规律,并与Cheng Y等<sup>[6]</sup>的实验结果进行对比验证;李德波等<sup>[7]</sup>采用欧拉-朗格朗日方法对气固两相流的流动特性进行数值求解;吴炬等<sup>[8]</sup>基于数值模拟方法研究水煤浆气化炉洗涤室内颗粒运动及其分布规律,揭示颗粒数密度分布特性;Bluemink J J等<sup>[9]</sup>通过PIV可视化平台及数值模拟方法对旋转流体中颗粒的运动问题进行研究,分析粒径、形状、流体黏度和旋流速度对颗粒分离特性的影响;Strandström K等<sup>[10]</sup>数值预测气流床反应器内 $75\sim 150\text{ }\mu\text{m}$ 和 $150\sim 250\text{ }\mu\text{m}$ 砂粒的分布情况,仿真与实验结果基本吻合。

本文针对热高分气相出口的颗粒漂移现象,建立带静态分离挡板的热高分几何模型,分析静态分离挡板的倾斜角度对热高分内部流动特性及气相出口颗粒相漂移特性的影响,揭示罐内部颗粒相的漂移规律,有望为下游换热器、空冷器堵塞及冲蚀磨损的定量风险预测评估提供数据支撑。

## 1 数值模拟

### 1.1 物理模型与控制方程

热高分的物理模型及多相流物性参数与笔者前

期开展的研究一致<sup>[11]</sup>,区别在于在 $y=4\ 635\text{ mm}$ 处增设5种不同倾斜角度的静态分离挡板,其目的是研究其对热高分出口颗粒相漂移率的影响。静态分离挡板的结构如图1所示,倾斜角度 $\alpha$ 选择 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$ 五种角度。

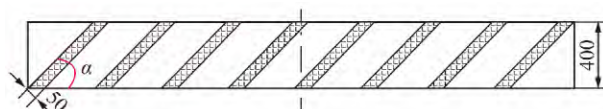


图1 静态分离挡板结构示意图

Fig.1 Schematic illustration of static separation baffles

因热高分内部存在气-液相自由界面,故采用基于有限体积的VOF方法求解N-S方程,用以追踪气-液相界面。数值计算基于N-S方程进行。

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu \nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2)$$

$$\rho = \alpha_g \rho_g + (1 - \alpha_g) \rho_l \quad (3)$$

$$\mu = \alpha_g \mu_g + (1 - \alpha_g) \mu_l \quad (4)$$

式中 $\mathbf{u}$ 为混合速度矢量; $\rho$ 为混合物密度; $\mathbf{g}$ 为重力加速度; $\mathbf{F}$ 为动量源项,包含连续表面张力源项 $\mathbf{F}_1$ 和气液相界面相互作用力源项 $\mathbf{F}_2$ ,公式与前文<sup>[11]</sup>一致; $\mu$ 为混合相的动力黏度; $\mu_g$ 、 $\mu_l$ 为气、液相的动力黏度。

VOF模型通过引入流体体积函数 $\alpha$ 进行两相流体积分数的计算,从而捕捉气-液相交界面。以气液两相流动为例, $\alpha_g=1$ ( $\alpha_l=0$ )表示控制体积内全部被气相所占据; $\alpha_g=0$ ( $\alpha_l=1$ )则表示控制体积内全部被液相所占据; $0<\alpha_g<1$ 表示气液相界面存在于该控制体积内。其中,体积函数 $\alpha$ 通过扩散方程(5)求解。

$$\frac{\partial \alpha_\lambda}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \alpha_\lambda = 0 \quad (\lambda = g, l) \quad (5)$$

界面曲率 $\kappa$ 可通过对相界面单位法向量 $\mathbf{n}$ 求散度获得<sup>[12]</sup>。

$$\kappa = \nabla \cdot \mathbf{n} \quad (6)$$

连续相采用RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,湍动能 $k$ 和耗散率 $\varepsilon$ 的输运方程分别与前文<sup>[11]</sup>一致;颗粒相离散单元通过求解牛顿第二定律<sup>[13]</sup>获得颗粒运动规律,固相颗粒在笛卡尔坐标系下的运动方程及定义的颗粒

漂移率  $\varphi$  均与前文<sup>[11]</sup>保持一致。

## 1.2 网格划分及近壁面处理

增加静态分离挡板后, 网格总数为  $148 \times 10^4$  个, 对挡板采用四面体非结构化网格划分, 其余网格的划分、局部加密、对计算流域网格的无关性验证方法均与前文方法<sup>[11]</sup>保持一致。

## 1.3 边界条件及数值方法

热高分入口采用速度进口, 气、液相出口分别采用自由流动出口、质量流量出口。气、液、固密度分别为  $62.57$ 、 $696.70$ 、 $1\,727.80 \text{ kg/m}^3$ ; 质量流量分别为  $1.96 \times 10^5$ 、 $4.76 \times 10^5$ 、 $4.18 \times 10^4 \text{ kg/h}$ ; 气、液相的黏度分别为  $2.46 \times 10^{-5}$ 、 $1.1 \times 10^{-4} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ 。

方程离散化时, 时间项采用隐式格式, 对流项等采用二阶迎风格式, 压力-速度的耦合求解采用 SIMPLE 算法, 对气液相界面的追踪采用分段线性重构方法<sup>[14-15]</sup>。

## 2 数值计算结果讨论

利用 Fluent 对热高分内流体流动与固相颗粒的漂移特性进行三维数值模拟。假设气、液、固多相流相间无化学反应; 进出口温度恒定 ( $415 \text{ }^\circ\text{C}$ ), 忽略传热传质影响; 进口固相质量分数  $5.9\%$ , 小于  $10\%$ , 忽略颗粒的碰撞效应。

### 2.1 热高压分离器内速度场分布

图 2 为不同挡板倾斜角度  $\alpha$  下的  $z=0$  截面处速度场分布云图。由图 2 可知, 气、液、固三相流介质经入口弯管进入罐内后, 由于导流板上、下表面及管壁是固定封闭面, 多相流介质经导流板两个侧面沿壁面旋流分离。通过对比分析  $\alpha=15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$  下  $z=0 \text{ mm}$  截面处速度分布云图可知, 各轴向位置上速度场分布均呈现沿  $y$  轴的非对称性, 且随周向位置变化而变化, 这是由于入口弯管结构形成的旋流中心和罐体的几何中心不重合, 引起多相流介质离开弯管出口后在罐内空间内形成的不对称运动。

宏观上, 罐内由于入口弯管的结构突变, 在其出口的导流板区域速度较高, 为  $4 \sim 5 \text{ m/s}$ , 气相出口由于缩径效应, 介质速度约为  $5 \text{ m/s}$ 。其中, 与导流板对应的右侧区域速度约为  $1.5 \text{ m/s}$ , 同时其面积随挡板倾斜角度  $\alpha$  的增加逐渐扩大。为分析该现象, 截取该区域局部的速度迹线图, 如图 3 所示。

图 3 为无挡板及增设挡板后不同倾斜角度下的局部速度迹线图。由图 3(a) 可知, 多相流体进入罐内空间后, 气流自下而上提升过程中因几何结构的非对称性, 在罐内左侧区域形成大小不一的回流涡旋, 左右两侧的速度迹线也不相同, 同时由于右侧流通面

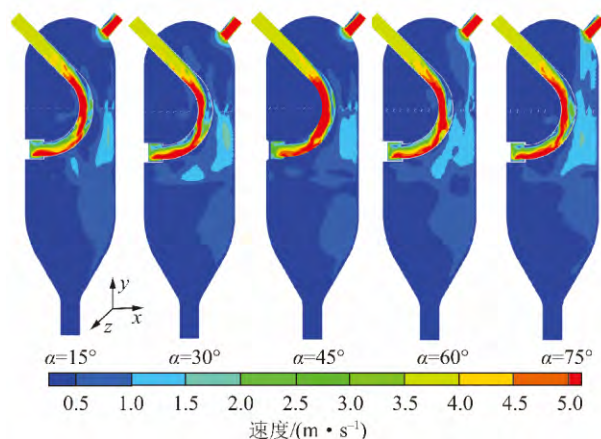


图 2 不同挡板倾斜角度下  $z=0$  截面处速度场分布

Fig. 2 Velocity contour in longitudinal section ( $z=0$ ) with different baffles' angles

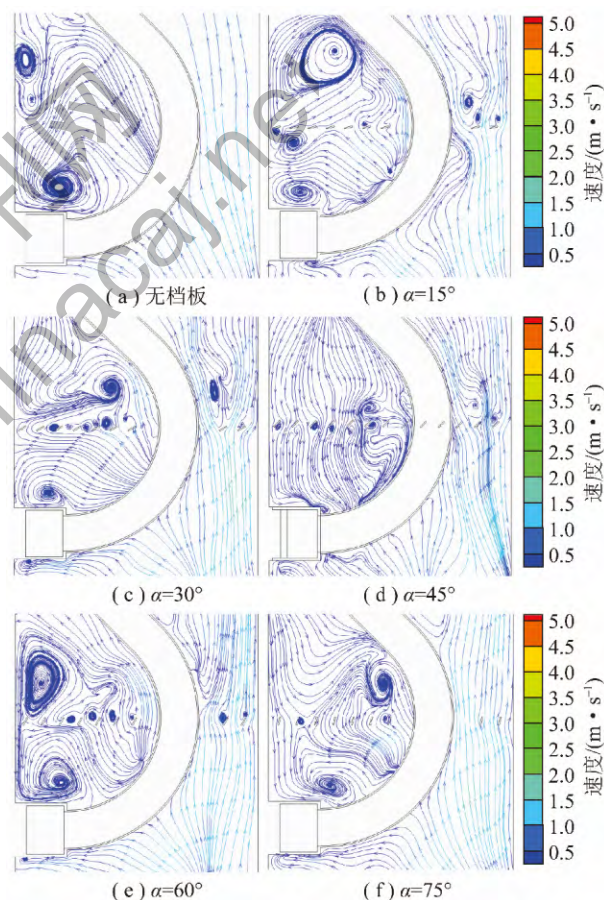


图 3 不同挡板倾斜角度下  $z=0$  局部截面速度迹线

Fig. 3 Velocity streamlines in local longitudinal section ( $z=0$ ) with different baffles' angles

积相对较小, 使速度增加至  $2.0 \text{ m/s}$ , 在相对较高流速的气相剪切作用下, 气相连同破碎的小液滴及部分颗粒一起往上提升。

对图 3(b) ~ (f) 进行对比分析, 发现靠近静态分离挡板的上、下区域出现了流场不稳定现象, 速度迹线在经过挡板前后出现了比较明显的回流小涡旋结



构,可以使部分颗粒滞留于挡板附近,伴随气流的回旋往下运动,阻止部分颗粒被气流继续夹带提升。当挡板倾斜角度 $\alpha=30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 时,挡板区域的回流涡旋效应较为明显;而在挡板倾斜角度为 $\alpha=15^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$ 时,挡板上、下区域的回流涡旋效应较为明显。因此,假设同一水平位置的颗粒平均浓度相同,多相流在流经分离挡板时的回流涡旋效应越明显,对于气-液混合固相颗粒的分离效果越好。其原因为:密度较大的固体颗粒相在静态分离挡板影响下对气流的跟随性减弱,部分颗粒在挡板附近的小回流涡环内停留时间延长,在自身重力及往下回旋气流的作用下逐渐进入罐内下部液相区域,相应地气相出口处颗粒漂移率将会有所降低。

## 2.2 气相空间颗粒平均浓度分布

图4为液位40%、颗粒直径 $60\text{ }\mu\text{m}$ 、进口固相质量分数5%时气相空间不同高度处颗粒平均浓度分布。其中 $y=1\text{ }350\text{ mm}$ 为气-液相交界面(图中位置A)、 $y=4\text{ }635\text{ mm}$ 为静态分离挡板位置(图中位置B)、 $y=7\text{ }570\text{ mm}$ 为靠近罐顶气相出口(图中位置C)。颗粒平均浓度具体是指对应横截面位置处颗粒的平均浓度,单位 $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

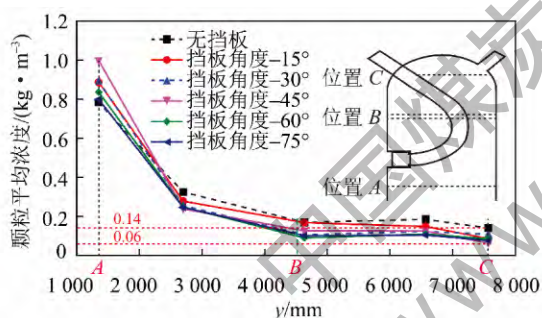


图4 液位以上不同高度处颗粒平均浓度分布( $d=60\text{ }\mu\text{m}$ )

Fig. 4 Variation of average particle concentration with different height above the liquid level ( $d=60\text{ }\mu\text{m}$ )

由图4可知,自气-液相交界面位置A至靠近罐顶气相出口位置C的气相空间内,随着高度的增加,颗粒平均浓度呈现逐渐下降的趋势。这是因为靠近气-液相交界面,相间质量和动量交换较为剧烈,由于液相黏度及表面张力的作用,颗粒进入该区域时速度降低并悬浮在液相表面,从而形成较高的颗粒平均浓度;颗粒随气流上升的过程中会受到自身重力及挡板的阻碍作用,使大部分颗粒不再继续被提升。同时,小部分颗粒被气流夹带提升至罐顶区域后聚集,随后该部分颗粒跟随气流飘出气相出口,最终形成气相出口颗粒漂移现象。

增设挡板后的速度迹线在挡板处小回流涡旋效应明显(图3),相较无挡板时的大回流涡旋而言,小

回流涡旋对颗粒相聚团提升的效应显著减弱,使得增设挡板后位置A处颗粒平均浓度增加,在入口颗粒总量不变的情况下,位置C处颗粒平均浓度必定下降。相应地,对比分析位置A处和C处的颗粒平均浓度分布可知,位置A处无挡板时的颗粒平均浓度最低,而挡板角度 $\alpha=45^\circ$ 对应的颗粒平均浓度最高。可以推论,进口固相颗粒总量不变的前提下,在位置C处无挡板的颗粒平均浓度要高于 $\alpha=45^\circ$ 的颗粒平均浓度。观察位置C处颗粒平均浓度,易知无挡板对应的颗粒平均浓度约为 $0.14\text{ kg}/\text{m}^3$ ,而 $\alpha=45^\circ$ 对应的颗粒平均浓度相对其他倾角更低,约为 $0.06\text{ kg}/\text{m}^3$ ,与之前的推论一致,说明对减少气相出口处的颗粒夹带量有一定效果。

## 2.3 挡板角度对颗粒漂移率的影响

受热高分的结构特性影响,气-液-固多相流体介质进入入口弯管后,再经导流板两侧面出口经壁面旋流进入罐体内。由于气液固相存在密度差异,经壁面旋流后达到旋流分离器的效果,气相经罐顶气相出口流出,液固相经罐底液相出口流出。在旋流分离过程中,颗粒的粒径仅为 $60\text{ }\mu\text{m}$ ,部分颗粒被小团聚气流夹带提升,上升过程中受到静态分离挡板的阻碍作用后大部分颗粒最终沉降至液相空间;小部分颗粒穿过挡板窄隙后在罐顶区域聚集,逐渐被气相拖曳出气相出口。为进一步分析挡板倾斜角度对颗粒漂移率的影响,选择液位40%、进口固相质量分数5%的工况,进行气相出口固相颗粒漂移率统计分析。

图5给出了不同挡板倾斜角度及未设置挡板时对应的气相出口颗粒漂移率。可以看出未设置静态分离挡板时颗粒漂移率最高,约为2.03%;设置静态分离挡板后,对应 $\alpha=15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 颗粒漂移率相对较低,分别为1.08%、1.07%、0.88%。结合图3(b)~(d)罐内局部速度迹线分布可知, $\alpha=45^\circ$ 时挡板处小回流涡旋效应较为明显,对气相出口颗粒漂移率的抑制作用与其余倾斜角度相比较强。

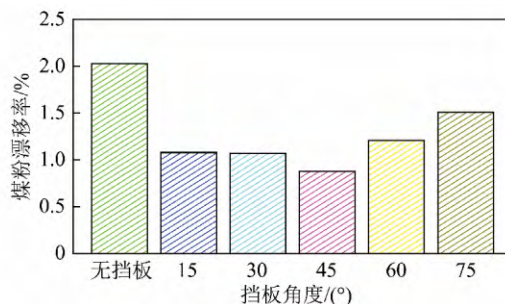


图5 不同挡板角度下气相出口颗粒漂移率

Fig. 5 Variation of pulverized coal drifting rate in gas outlet with different baffles' angles ( $d=60\text{ }\mu\text{m}$   $\varphi=5\%$ )

### 3 结 论

(1) 建立带挡板的热高压分离器内固相颗粒漂移数理模型,运用速度场、颗粒平均浓度及气相出口颗粒漂移率表征挡板倾角对罐内流动特性的影响。

(2) 静态分离挡板倾斜角度对速度场影响显著,挡板附近区域出现小回流涡旋效应, $\alpha=45^\circ$ 时对气相出口颗粒漂移率的抑制作用较其他倾斜角度明显。

(3) 液位以上颗粒平均浓度随高度的增加逐渐下降;对应挡板倾角为 $45^\circ$ 时,气相出口附近颗粒平均浓度最低。

(4) 静态分离挡板倾角为 $45^\circ$ 的气相出口固相漂移率最低,为 $0.88\%$ ,较未设置挡板时的颗粒漂移率下降 $56.7\%$ ,对减少气相出口的颗粒漂移率有一定效果。

### 参考文献:

- [1] Ren Xiangkun, Fang Dingye, Jin Jialu, et al. New proceed achieved in the direct coal liquefaction[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2010, 29(2): 198-204.
- [2] 邹雨时, 张士诚, 张劲, 等. 煤粉对裂缝导流能力的伤害机理[J]. 煤炭学报, 2012, 37(11): 1890-1894.  
Zou Yushi, Zhang Shicheng, Zhang Jin, et al. Damage mechanism of coal powder on fracture conductivity[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(11): 1890-1894.
- [3] 偶国富, 王宽心, 谢浩平, 等. 加氢空冷系统硫化铵结晶规律的数值模拟[J]. 高校化学工程学报, 2013, 27(2): 354-359.  
Ou Guofu, Wang Kuanxin, Xie Haoping, et al. Numerical simulation of ammonium hydrosulphides crystallization rules in hydrogenation air-cooling system[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2013, 27(2): 354-359.
- [4] 高晖, 郭烈锦, 张西民. 螺旋管内气液固三相流颗粒相分布规律[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(1): 69-72.  
Gao Hui, Guo Liejin, Zhang Ximin. Particle phase distribution in gas-liquid-solid three-phase flow through helically coiled tube[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(1): 69-72.
- [5] Kim Y N, Wu C, Cheng Y. CFD simulation of hydrodynamics of gas-solid multiphase flow in downer reactors: revisited[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(21): 5357-5365.
- [6] Cheng Y, Wu C, Zhu J, et al. Downer reactor: from fundamental study to industrial application[J]. Powder Technology, 2008, 183(3): 364-384.
- [7] 李德波, 樊建人, 罗坤, 等. 气固两相流动大规模并行直接数值模拟算法研究进展与展望[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(23): 107-117.  
Li Debo, Fan Jianren, Luo Kun, et al. Recent development and future research of large scale parallel computational algorithms of particle laden flows by the direct numerical simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(23): 107-117.
- [8] 吴晖, 李铁, 蔡杰, 等. 水煤浆气化炉洗涤室内气体穿越液池过程颗粒分布的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(20): 15-21.  
Wu Xuan, Li Tie, Cai Jie, et al. Numerical simulation of particles distribution in process of gas crossing cistern in scrubbing chamber in coal water slurry gasifier[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(20): 15-21.
- [9] Bluemink J J, Van Nierop E A, Luther S, et al. Asymmetry-induced particle drift in a rotating flow[J]. Physics of Fluids(1994-present), 2005, 17(7): 072106.
- [10] Strandström K, Mueller C, Hupa M. Development of an ash particle deposition model considering build-up and removal mechanisms[J]. Fuel Processing Technology, 2007, 88(11): 1053-1060.
- [11] 金浩哲, 陈小平, 郝智剑, 等. 煤液化热高压分离器煤粉漂移特性数值模拟与优化[J]. 煤炭学报, 2016, 41(4): 1004-1010.  
Jin Haozhe, Chen Xiaoping, Zhao Zhijian, et al. Numerical simulation and optimization on pulverized coal drifting characteristics in high temperature and high pressure separator[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(4): 1004-1010.
- [12] 王维萌, 马一萍, 陈斌. 十字交叉微通道内微液滴生成过程的数值模拟[J]. 化工学报, 2015, 66(5): 1633-1641.  
Wang Weimeng, Ma Yiping, Chen Bin. Numerical simulation of droplet generation in crossing micro-channel[J]. CIESC Journal(China), 2015, 66(5): 1633-1641.
- [13] 赵永志, 江茂强, 徐平, 等. 颗粒堆内微观力学结构的离散元模拟研究[J]. 物理学报, 2009, 58(3): 1819-1825.  
Zhao Yongzhi, Jiang Maoqiang, Xu Ping, et al. Discrete element simulation of the microscopic mechanical structure in sandpile[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(3): 1819-1825.
- [14] Končar B, Borut M. Wall function approach for boiling two-phase flows[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240(11): 3910-3918.
- [15] 杨魏, 刘树红, 吴玉林. 基于VOF方法的圆柱箱体中液体晃动阻尼计算[J]. 力学学报, 2009, 41(6): 936-940.  
Yang Wei, Liu Shuhong, Wu Yulin. Liquid sloshing damping computation in cylindrical container based on VOF method[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2009, 41(6): 936-940.