

底饲进料循环喷动床进料与回料混合特性及影响因素

陶 敏, 金保升, 杨亚平, 韩 伟

(东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 分别以石英砂和消石灰模拟进料和回料, 对一台 $\phi 0.6\text{ m} \times 15\text{ m}$ 底饲进料循环喷动床脱硫塔内颗粒混合特性进行了研究。利用石英砂和消石灰在水中溶解度的差异计算得到底饲进料与回料在不同位置的混合熵和不同高度上的混合指数, 并分析不同操作参数对塔内颗粒混合行为的影响。研究表明: 混合指数能够很好地反映塔内进料与回料颗粒的混合质量; 随着流化速度的提高, 塔内不同高度上的混合指数呈上升趋势; 喷射速度和循环倍率对塔内尤其是反应塔底部的颗粒分布特性有明显影响, 采用较高的喷射速度和循环倍率, 混合指数随之上升, 说明塔内颗粒的混合质量得到改善。

关键词: 底饲进料循环喷动床; 脱硫; 混合熵; 混合指数

中图分类号: X511 文献标识码: A

引 言

气固流化床的颗粒混合行为反映了床内颗粒轴向和径向运动及传递规律, 也是认识床内传质传热机理的关键^[1~2]。国内外很多学者通过实验及数值模拟等手段对颗粒混合行为进行了研究^[3~9]。张勇应用特征浓度标准差计算得到的混合指数系统考察了典型操作参数对床内颗粒整体混合的影响^[10], 揭示了颗粒混合的一些基本规律。Snolders and Baeyen 利用可溶盐作为示踪颗粒, 通过取样溶解并分析其电导率研究流化床内的颗粒停留时间及其分布^[11]。Ryan Gosse lin 通过混合熵、离散小波转换、灰度反馈矩阵、像素关联等手段分析了一台水平旋转罐中颗粒混合动力学行为^[12], 并取得了良好的效果。以上研究对于认识气固流化床中颗粒混合规律提供了重要的探索方法和手段。

本研究以底饲进料循环喷动床为研究对象, 利用流化性能相近, 溶解度差异较大的石英砂和消石灰颗粒分别通过底饲进料和回料系统加入, 通过颗粒取样、溶解过滤的方法得到塔内不同高度处进料

和回料颗粒的径向分布, 并应用混合熵计算得到的混合指数系统考察了不同操作参数对于颗粒混合效果的影响, 为底饲进料循环喷动床的优化运行和放大设计提供有益的参考。

1 试验装置和方法

1.1 试验装置

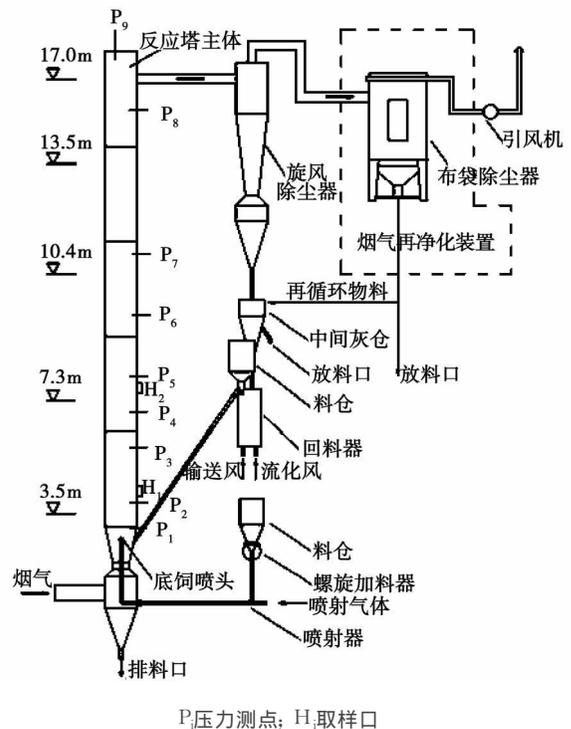


图 1 底饲进料循环喷动床烟气脱硫系统图

在一台循环流化床烟气脱硫模拟中试试验装置上增设了一套底饲进料系统。反应塔总高度 19 m, 有效高度为 15 m, 主体直径 0.6 m, 烟气入口直径为 0.27 m。改造后的底饲进料循环喷动床烟气脱硫工艺流程如图 1 所示。整个试验装置由脱硫反应塔主体, 雾化增湿系统, 气固分离系统, 底饲进料系统和

收稿日期: 2009-01-13 修订日期: 2009-05-06
作者简介: 陶 敏 (1982-), 男, 安徽池州人, 东南大学博士研究生。

回料系统,以及测量系统组成。增设的底饲系统主要有:料仓、立管、喷射器、底饲喷嘴和罗茨风机。运行时,料仓中的新鲜脱硫剂在螺旋给料器的输送下进入喷射器,在高速气流的推动下经气力输送管道由文丘里中心向上,最后从位于文丘里扩张段中心的底饲喷嘴进入脱硫塔内,与烟气及充分接触混合并发生脱硫反应。

底饲进料系统及采用的喷头结构如图 2 所示。喷射管道的直径为 20 mm,喷头四面均匀布置 4 个 $\Phi 10$ mm 的圆形喷嘴。喷头上端为 120°锥体,以防止颗粒堆积。喷头与文丘里收缩段之间采用套环支架固定,以保持其位于床层中心。喷头下端与气力输送管道之间采用焊接式直通管接头进行分段连接,可方便拆卸更换和调整喷嘴高度。本试验中喷嘴中心距离文丘里扩张段底部的高度为 0.4 m。

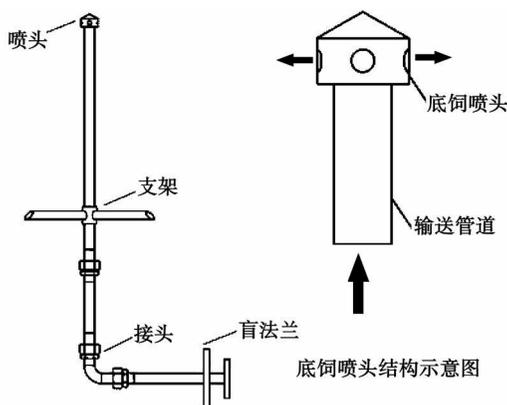


图 2 底饲进料系统及喷头结构

由于新鲜脱硫剂通过底饲喷头从各方向均匀喷入塔内,在底饲进料循环喷动床底部形成高湍动度、高颗粒浓度的气固混合,强烈的湍流混合不仅能够提高传质传热效率,而且能使回料颗粒的反应产物层磨损脱落,不断露出新鲜表面从而继续反应^[13],有利于提高进一步系统脱硫效率和钙利用率。

1.2 实验方法

按实验工况将消石灰通过与回料器连接的加料斗从回料管加入,代表循环物料,加料速度记为 M_2 ; 选用流化特性相近的石英砂颗粒由底饲系统加入,代表新鲜脱硫剂,加料速度记为 M_1 。石英砂和消石灰的物理特性如表 1 所示。运行时回料器上方的阀门保持关闭,被除尘器分离下的颗粒全部放料,运行稳定后采用等速取样在指定的截面上采样得到径向上各点的正向颗粒通量 (solid upflow flux)^[14~18],即颗粒在向上流中的质量流量。每个测点的取样时间为 4 min。

表 1 实验物料特性

	石英砂	消石灰
密度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2 600	2 300
平均粒径 / μm	75	80
最小流化速度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.004 8	0.004 8
终端速度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.360 6	0.360 7
带出速度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.605 2	0.594 9

由于消石灰与石英砂在水中溶解度相差很大,因此可以用溶解过滤的方法根据溶解率得到取样中底饲进料和回料的质量分数,分别记为 c_f 和 c_r 。与进料质量 m_f 和回料质量 m_r 的关系为:

$$c_f = m_f / (m_f + m_r)$$

$$c_r = 1 - c_f$$

则混合熵 S 可表达为:

$$S = c_f \ln(c_f) + c_r \ln(c_r)$$

应用混合指数 M 来描述径向上的混合程度:

$$M = \sum_i \frac{S_i}{S}$$

式中: S_i 由整个床内的颗粒质量分数计算得到:

$$S_i = c_{fi} \ln(c_{fi}) + c_{ri} \ln(c_{ri})$$

这样,混合指数越高,表明混合越充分^[12]。

床体沿轴向共布有两层取样口,距离文丘里扩张段底部的高度分别为 1.17 和 4.87 m。截面测点的径向位置分布及其相应的无因次半径如表 2 所示。

表 2 径向测点位置

测点	1	2	3	4	5
r	-0.250	-0.162	0	0.162	0.250
r/R	-0.833	-0.540	0	0.540	0.833

2 实验结果和讨论

2.1 表观气速的影响

图 3、图 4 描述了不同流化气速下底饲进料和回料颗粒在 $H=1.17$ m 和 $H=4.87$ m 截面上正向颗粒通量的径向分布,流化速度 V_f 和喷射速度 V_s 等操作参数如表 3 所示。从图中可以看到,随着流化速度的提高,进料与回料的分布规律有所变化,但截面上颗粒通量的总量变化不大,这是由于上述工况中底饲和回料系统的加料速度相同。在取样过程中,当流化速度上升时,虽然取样口处气体速度增加,但是单位体积空气中所含的颗粒质量也相应降

低, 因此颗粒的质量通量没有明显变化。

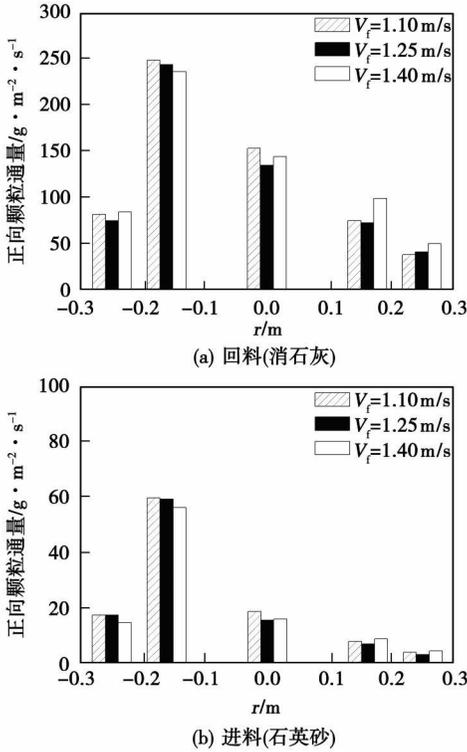


图 3 流化速度对 H=1.17 m 高度上颗粒分布的影响

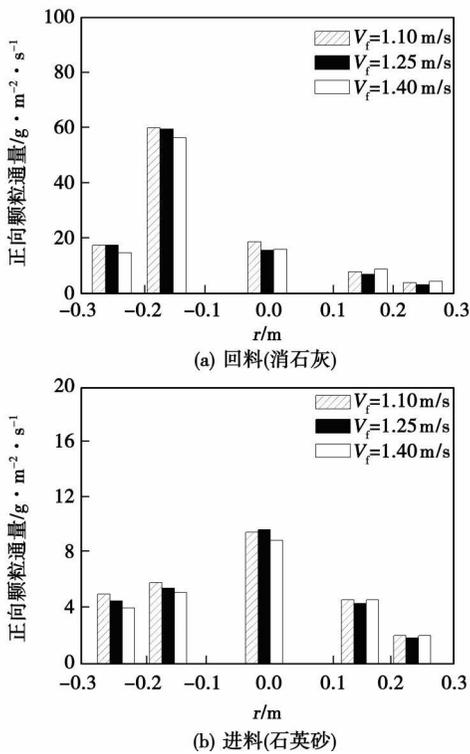


图 4 流化速度对 H=4.87 m 高度上颗粒分布的影响

表 3 表观气速对颗粒混合影响的试验工况

工况	$V_f/m \cdot s^{-1}$	$V_s/m \cdot s^{-1}$	$M_f/kg \cdot h^{-1}$	$M_r/kg \cdot h^{-1}$	$T/^\circ C$
1	1.10	17.5	7.2	60	15
2	1.25	17.5	7.2	60	15
3	1.40	17.5	7.2	60	15

在 H=1.17 m 截面上, 石英砂与消石灰的正向颗粒通量 G_f^+ 和 G_r^+ 均呈现明显的左高右低分布特征。这是由于消石灰颗粒通过回料管从塔底右侧加入, 与流化气体相遇并发生湍流扰动, 造成了上部一定区域范围内的气体流速出现左高右低的不均匀分布。由于实验中颗粒浓度较低, 因此气体速度对颗粒通量的影响相对于颗粒浓度的影响更加明显。随着高度进一步增加, 气体速度和颗粒浓度不断趋于均匀。在 H=4.87 m 截面上, G_f^+ 和 G_r^+ 均呈现中间高两边低的分布特点, 在径向上分布近于对称。

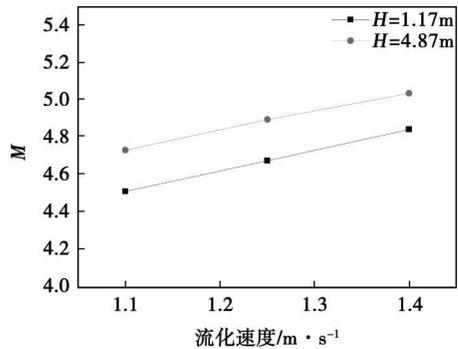


图 5 不同流化速度下的径向混合指数

根据图 3、图 4 中石英砂和消石灰正向颗粒通量 G_f^+ 和 G_r^+ 的径向分布, 计算得到不同高度上颗粒混合指数 M 随流化气速的变化趋势。由图 5 可知, 在喷射速度相同时, 随着流化速度的提高, 进料与回料的混合指数随之上升。从图 3 和图 4 中也可以看到, G_f^+ 和 G_r^+ 在径向上的均匀性随着流化速度的提高而有明显改善。这说明了气体速度越大, 塔内气固湍流越强烈, 颗粒分布更加均匀, 进料与回料颗粒的混合质量也越高。

2.2 喷射气速的影响

图 6、图 7 显示了不同喷射气速下正向颗粒通量的径向分布情况, 操作参数如表 4 所示。由于喷射气量与流化气体相比很小, 因此对塔内表观气速的影响可以忽略。从图中可以看到, 当喷射速度提高时, 不同高度截面上的颗粒通量总量没有明显变化。随着喷射速度的增加, 颗粒分布的径向分布均匀性增加, 尤其在 H=1.17 m 截面上, G_f^+ 和 G_r^+ 在径向上的差异程度明显随着喷射速度的增加而降低, 其最高值呈现明显的下降趋势。说明随着喷射

速度的提高,塔底颗粒的混合与碰撞更加激烈,喷射流对流场的优化作用更加显著。

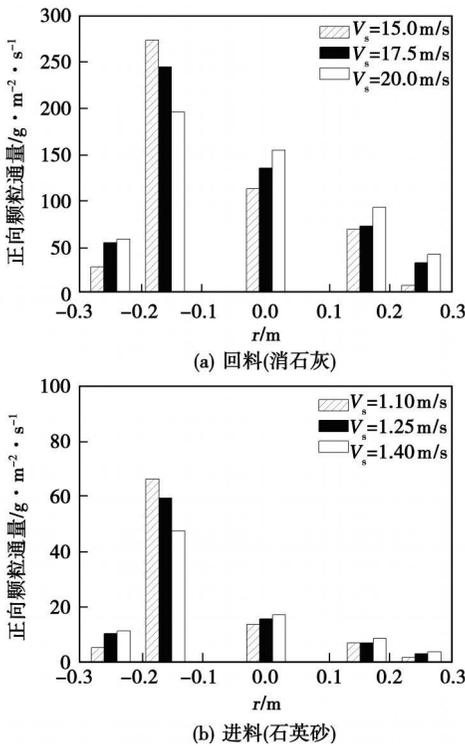


图 6 喷射速度对 H=1.17 m 高度上颗粒分布的影响

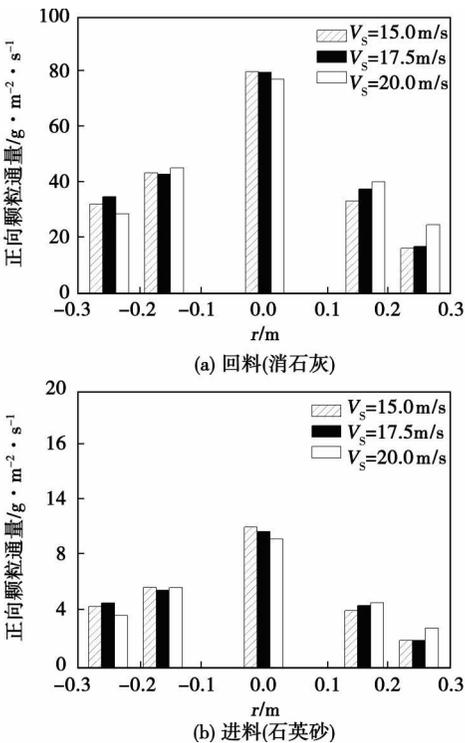


图 7 喷射速度对 H=4.87 m 高度上颗粒分布的影响

表 4 喷射气速对颗粒混合影响的试验工况

工况	$V_j/m \cdot s^{-1}$	$V_s/m \cdot s^{-1}$	$M_f/kg \cdot h^{-1}$	$M_r/kg \cdot h^{-1}$	$T/^\circ C$
1	1.25	15.0	7.2	60	15
2	1.25	17.5	7.2	60	15
3	1.25	20.0	7.2	60	15

图 8 为不同高度截面上进料与回料径向混合指数 M 随喷射气速的变化趋势。由图可知,底饲进料与回料颗粒之间的混质量随着喷射速度的上升而提高。这是由于底饲喷嘴附近高速喷射流的存在使反应塔底部形成了高颗粒浓度、高湍动度的气固混合。提高喷射速度可以使塔底颗粒的混合与碰撞更加激烈,从而有利于进一步提高进料与回料颗粒混合效果。

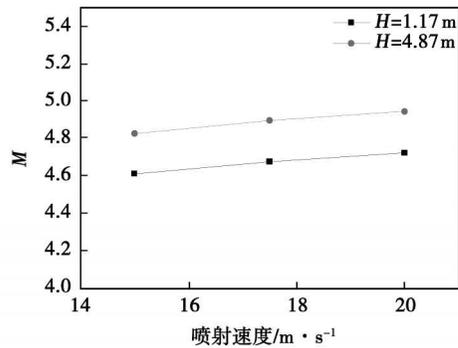


图 8 不同喷射速度下的径向混合指数

2.3 循环倍率的影响

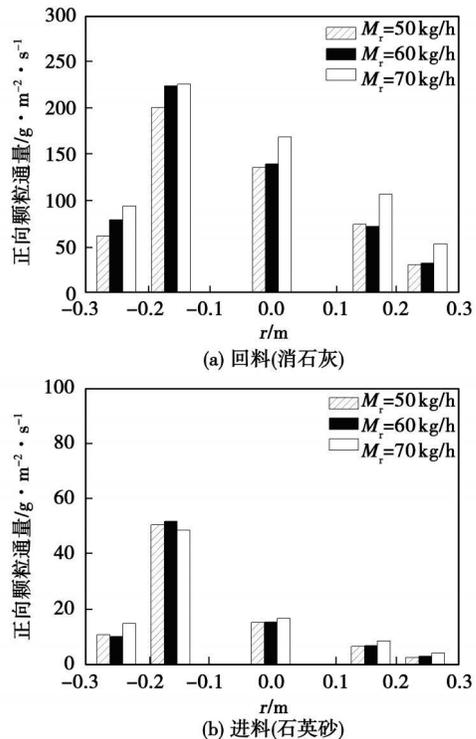


图 9 回料量对 H=1.17 m 高度上颗粒分布的影响

不同高度上正向颗粒通量径向分布随循环倍率的变化如图 9 图 10 所示, 操作参数如表 5 所示。由图可见, 当回料量增加时, G_r^+ 在径向上的平均值在不同高度上都出现了递增趋势, 说明塔内颗粒浓度明显上升。通过比较还可以发现, 随着回料量的提高, G_r^+ 在不同径向位置上均有一定程度的上升, 并且在上升过程中其差异程度有所减小; 这说明随着循环倍率的提高, 颗粒分布在截面上的对称性和均匀性也相应提高, 塔内流场得到优化。

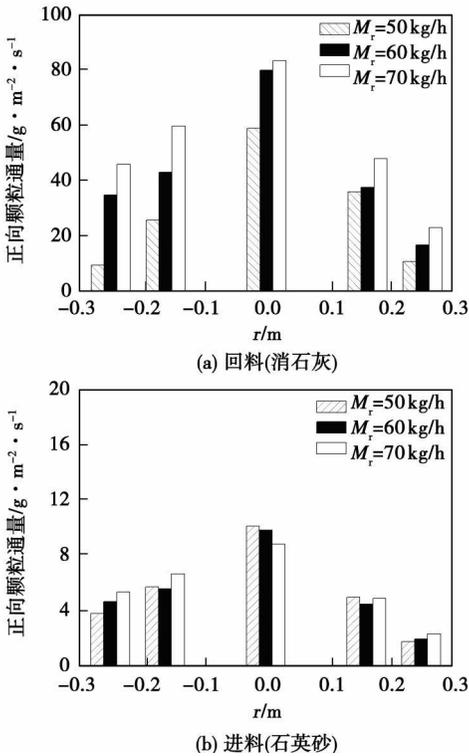


图 10 回料量对 H=4.87 m 高度上颗粒分布的影响

表 5 循环倍率对颗粒混合影响的试验工况

工况	$V_f/m^3 \cdot s^{-1}$	$V_s/m^3 \cdot s^{-1}$	$M_f/kg \cdot h^{-1}$	$M_r/kg \cdot h^{-1}$	$T/^\circ C$
1	1.25	17.5	7.2	50	15
2	1.25	17.5	7.2	60	15
3	1.25	17.5	7.2	70	15

不同高度截面上混合指数随循环倍率的变化规律如图 11 所示。从图中可以看到, 随着回料量的增加, 底饲进料与回料颗粒的混合指数明显上升, 且上升速度出现减缓的趋势。这说明了随着颗粒浓度的上升, 塔内气固湍流更加激烈, 颗粒之间混合碰撞也更为充分, 提高循环倍率有利于进一步提高塔内颗粒的混合质量。

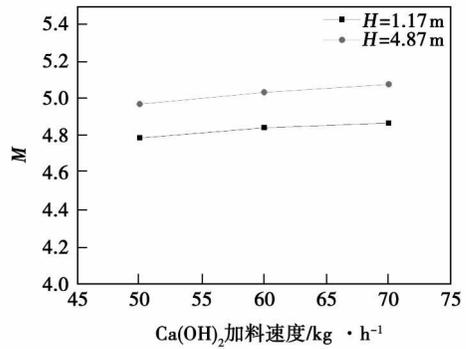


图 11 不同回料量下的径向混合指数

3 结 论

(1) 颗粒混合特性对于研究气固流化床内的传质传热具有十分重要的意义。通过进料与回料颗粒的质量分数计算得到的混合指数能够很好地反映塔内颗粒混合特性。应用混合指数不仅能够描述塔内进料与回料混合质量沿高度的变化, 而且对操作参数的改变也比较敏感, 为进一步建立操作参数与混合质量之间的联系提供了实现基础。

(2) 塔内的流化速度在 $1.10 \sim 1.40 \text{ m/s}$ 之间时, 由于进料与回料颗粒的加料速度保持一定, 截面上正向颗粒通量的平均值没有明显变化; 随着流化速度的提高, 反应塔内气固湍流增强, 底饲进料与回料颗粒之间的混合也更为充分, 其混合指数上升了 7% 左右。

(3) 提高喷射速度能够增强喷嘴附近高速喷射流对反应塔底部气固流场的优化效果, 使颗粒通量径向分布的差异程度明显减小, 并能促进颗粒之间的碰撞与混合, 当喷射速度从 15.0 m/s 提高至 20.0 m/s 时, 混合指数上升了约 2.5%。

(4) 提高循环倍率能使塔内颗粒浓度增加, 不同高度截面上的平均颗粒通量也随之上升。回料量从 50 kg/h 提高至 70.0 kg/h 时, 混合指数上升了 2% 左右, 说明提高循环倍率能使塔内气固湍流更加激烈, 促进颗粒之间充分混合。

参考文献:

[1] 黄群星, 马增益, 池涌, 等. 循环流化床内局部颗粒混合特性的研究[J]. 动力工程, 2004, 24(1): 13-17
 [2] 黄浩, 胡国新, 陈宏文, 等. 旋转播料对环形喷动床颗粒混合性能的影响[J]. 动力工程, 2007, 27(1): 54-57.
 [3] 张勇, 金保升, 钟文琪, 等. 喷动流化床颗粒混合特性的三维直接数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(2): 33-38.

- [4] 蔡杰, 凡凤仙, 袁竹林. 循环流化床气固两相流颗粒分布的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(20): 71-75.
- [5] 钟文琪, 章名耀. 喷动流化床流动结构的 SHANNON 信息熵模糊聚类分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 13-17.
- [6] 沈来宏, 吴家桦, 肖军, 等. 喷动流化床气固流动特想实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17): 88-93.
- [7] VELDEN M V, BAHEYENS J, SMOLDERS K. Solids mixing in the riser of a circulating fluidized bed[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(8): 2139-2153.
- [8] RHODES M J, SOLLAART M, WANG X S. Flow structure in a fast fluid bed[J]. Powder Technology, 1998, 99(2): 194-200.
- [9] WANG CUPING, LU ZI, LI DINGKAI. Experimental study of the effect of internal on circulating gas-solid flow in a circulating bed[J]. Power Technology, 2007, 184(3): 267-274.
- [10] 张勇, 金保升, 钟文琪. 喷动气固流化床颗粒混合规律的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(20): 8-14.
- [11] KATHLEEN SMOLDERS, JAN BAHEYENS. Overall solids movement and solids residence time distribution in a CFB-riser[J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55(19): 4101-4116.
- [12] RYAN GOSSELIN, CARL DUCHESNE, DENIS RODRIGUE. On the characterization of polymer powders mixing dynamics by texture analysis[J]. Power Technology, 2008, 183(2): 177-188.
- [13] CHU C Y, HWANG S J. Flue gas desulfurization in an internally circulating fluidized bed reactor[J]. Power technology, 2005, 154(1): 14-23.
- [14] 段钰锋, 赵长遂, 徐益谦. 风冷式颗粒取样装置在循环床锅炉上的应用[J]. 锅炉技术, 2001, 32(8): 1-4.
- [15] CORONELLA C, J DENG, JIANXUN. A novel method for isokinetic measurement of particle flux within the riser of a circulating fluidized bed[J]. Powder Technology, 1998, 99(3): 211-219.
- [16] AGULLON J, SHAKOURZADEH K, GUGON P. A new method for local solid concentration measurement in circulating fluidized bed[J]. Power Technology, 1996, 86(3): 251-255.
- [17] ZHANG W, JOHNSON F, LECKNER B. Momentum probe and sampling probe for measurement of particle flow properties in CFB boilers[J]. Chemical Engineering Science, 1997, 52(4): 497-509.
- [18] 钱震, 张明辉, 余皓, 等. 高密度气固两相流颗粒质量流量的自动测量方法[J]. 高校化学工程学报, 2004, 18(4): 506-509.

(本文责任编辑 单丽华)

新技术、新设计

GE 压缩机组被选用于中国第二条“西气东输”管线

据《Gas Turbine World》2009年3~4月号报道, GE Oil & Gas Technology (GE 油气技术公司) 已被指定为中国第二条“西气东输”管线西段压缩机组的主要供应商。该管线正由 Petro China (中石油)——中国最大的石油和天然气的生产者和供应商建造。

这是 GE 援建中国天然气管线的第三个主要合同。以前, GE 曾给第一条“西气东输”管线的扩展段以及目前管线工程包括第一站在内的两个压缩机站提供设备。

这条新的西气东输管线将构成 8 700 km 新的国家天然气管网, 完成以后总长约为 22 000 km。该管段将铺设 1 219 mm 直径的管道, 每年约输送 300 亿 m³ 天然气, 约为中国耗气量的一半。

该管线的压缩机站将于 2010 年下半年到 2011 年年底之间投入运行。

中国对增加天然气供应的迫切需要决定了管线建设的积极计划。为此, GE Oil & Gas 已经重新设计了它的透平压缩机组, 实现了简化安装和投运程序, 以便减少安装时间和现场的工作量。

(吉桂明 摘译)

底饲进料循环喷动床进料与回料混合特性及影响因素 = Feed and Return Material Mixing Characteristics of a Underfeed Circulating Spouted Bed and Their Influencing Factors 刊, 汉 1 / TAO Min JIN Bao sheng YANG Ya ping et al (College of Energy Source and Environment, Southeast University Nanjing, China, Post Code 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010 25(1). — 91 ~ 96

With quartz sand and calcium hydroxide serving as the feed and return material respectively studied were the particle mixing characteristics of a $\phi 0.6 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ underfeed circulating spouted bed in a desulfurization tower. The mixing entropies at various locations and its mixing indexes of the underfeed and return material at various elevations were calculated by utilizing the solubility difference of the quartz sand and calcium hydroxide in water and the influence of various operating parameters on the particle mixing behavior of particles in the tower was analyzed. The research results show that the mixing index can reflect very well the mixing quality of the feed and return material particles in the tower. With an increase of the fluidization speed, the mixing indexes at various elevations in the tower assume an ascending tendency. The spouting velocity and circulation ratio conspicuously affect the particle distribution characteristics in the tower, especially at its bottom. When a relatively high spouting speed and a comparatively high circulation ratio are adopted, the mixing index will go up accordingly, indicating that the mixing quality in the tower has been improved. Key words: underfeed circulating spouted bed, desulfurization, mixing entropy, mixing index

氧量对天然焦蒸汽气化特性的影响研究 = Study of the Influence of the Oxygen Quantity on Natural Coke Steam Gasification Characteristics 刊, 汉 1 / XIANG Wen guo ZHAO Chang sui (College of Energy Source and Environment, Southeast University Nanjing, China, Post Code 210096), PANG Ke lang (Research Center for National Power Plant Combustion Engineering Technology, Shenyang, China, Post Code 110034) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010 25(1). — 97 ~ 101

On a small sized fluidized bed (diameter $\phi 50 \text{ mm}$ and height 1 600 mm) test rig, an experimental study has been performed of Peicheng originated natural coke steam gasification reaction. The influence of the gasification medium steam, when mixed with oxygen, on the gas production capacity, carbon conversion rate, coal gas heating value and gas constituents etc. was investigated and compared with the simulation results of the gasification process obtained by using software ASPEN PLUS. During the test, the amount of natural coke sample has reached 0.2 kg/h, the steam flow rate was 1.05 kg/h and the gasification temperature was 900 °C. The test results show that the oxygen content in the gasification medium influences evidently the natural coke steam gasification characteristics. With an increase of the oxygen content (0 ~ 0.2 L/min) in the initial stage, the coal gas production capacity will increase by 1.76 times, and the carbon conversion rate by 1.94 times, both of which rise remarkably. With a further increase of the oxygen content (0.2 ~ 1 L/min), the growth margin will gradually decrease, the gas production capacity increase by 1.16 times and the carbon conversion rate will rise by 1.34 times. The volumetric fraction of effective gases ($\text{H}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4$) in the coal gas and its heating value will continue to go down. The effective gas proportion will descend from 76.9% to 54.3% and the heating value of the coal gas decrease from 9.01 MJ/m³ to 6.34 MJ/m³, but the volumetric fraction of CO₂ will increase obviously from 23.1% to 37.3%. The simulation results obtained by using software ASPEN basically correspond with the test ones. Therefore, the foregoing can offer guidance for practical engineering applications. Key words: natural coke, fluidized bed, simulation, steam gasification

氢含量对氢气/甲烷混合气扩散燃烧特性的影响研究 = Investigation of the Influence of the Hydrogen Content on the Diffusion Combustion Characteristics of Hydrogen/methane Hybrid Gas 刊, 汉 1 / WU Hui MU Ke jin WANG Yue et al (Key Laboratory on Advanced Energy and Power Engineering, Thermophysics Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code 100190) // Journal of Engineering for Ther