

活性焦颗粒在移动床中的传热特性

丁凯利 胡 晨 邓先和

(华南理工大学 化学与化工学院 广东 广州 510640)

摘要:为研究活性焦颗粒在移动床中的传热特性,以管壳式换热器为换热装置进行传热实验。空气经加热后与活性焦颗粒在换热器的壳程与管程中呈逆流流动,采用控制变量法,改变热空气流速 u_s 、开始卸料时热空气出口设定温度 T_{air} 以及活性焦颗粒卸料速度 v_p 等因素,测定不同实验工况下换热器的传热温差 ΔT_m 、传热负荷 Q 及总传热系数 K 并观察其变化规律。结果表明 u_s 对 ΔT_m 有很大影响,随着 u_s 增大, Q 和 K 逐渐增大,在 $T_{air}=40\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $u_s=16\text{ m/s}$ 、 $v_p=150\text{ kg/h}$ 时, K 高达 $9.32\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,且 K 与 u_s 的幂次方 $n=0.64$ 相关;随着 T_{air} 的升高, ΔT_m 无明显变化, Q 与 K 逐渐降低, T_{air} 达到 $70\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$ 后, K 几乎无变化;随着 v_p 增大, ΔT_m 增长非常缓慢, Q 和 K 呈线性增长, K 大于 $7.5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 时, v_p 每上升 50 kg/h , K 增加 $0.9\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

关键词:活性焦颗粒;管壳式换热器;移动床;总传热系数;卸料速度

中图分类号: X701.3 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2016)01-0048-06

Heat transport characteristics of activated coke particles in moving bed

DING Kaili, HU Chen, DENG Xianhe

(School of Chemistry and Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to investigate the heat transport characteristics of activated coke particles in moving bed, heat transfer experiment has been conducted using tube and shell heat exchanger as the main process. Heated air and activated coke particles showed in a countercurrent flow mode in the heat exchanger. According to variable-controlling approach, the temperature difference ΔT_m and heat load Q caused by heat transfer, total heat transfer coefficient K of different experimental conditions, such as different wind speed u_s , the outlet temperature of hot air when the activated coke particles began to unload T_{air} and speed of unloaded activated coke particles v_p were determined. The results indicated that u_s made a big difference on ΔT_m and the greater u_s , the bigger Q and K , closely related to the power of u_s with $n=0.64$. With the u_s reaching to 16 m/s , v_p becoming 150 kg/h and T_{air} turning into $40\text{ }^\circ\text{C}$, the total heat transfer coefficient highly reached to $9.32\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. With the rising T_{air} , there was no obvious change in ΔT_m , a smaller value in Q and K when negligible variation in K ranged from $70\text{ }^\circ\text{C}$ to $80\text{ }^\circ\text{C}$. Moreover, as v_p increased, ΔT_m slowly increased, at the same time Q and K increased linearly. Higher than $7.5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, K increased linearly by $0.9\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ with each 50 kg/h rises, which displayed an observable effect on totality.

Key words: activated coke particles; tube and shell heat exchanger; moving bed; total heat transfer coefficient; unloading speed

0 引 言

随着环保要求的日益提高,活性焦烟气脱硫技术引起越来越多国家的重视^[1-3]。目前常见的活性焦再生工艺很多^[4-7],最常用的是热再生法。吸附饱和的活性焦颗粒采用机械方式加入解吸塔,活性

焦颗粒靠重力向下移动的过程中与热空气换热,解吸出活性焦微孔中的 SO_2 。解吸后的活性焦经空气冷却后由再生反应器底部排出。可见,活性焦颗粒的再生过程是在移动床中进行,而且移动速度缓慢,粉化损失不大,应用广泛。因此,研究活性焦颗粒在移动床中的传热特性,对于提高 SO_2 脱附和活性焦

收稿日期: 2015-06-25; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2016.01.010

基金项目: 广东省重大科技专项资助项目(2011A080804012)

作者简介: 丁凯利(1992—),女,河南濮阳人,硕士研究生,研究方向为传热与节能。E-mail: d126023@163.com

引用格式: 丁凯利,胡 晨,邓先和.活性焦颗粒在移动床中的传热特性[J].洁净煤技术,2016,22(1):48-53.

DING Kaili, HU Chen, DENG Xianhe. Heat transport characteristics of activated coke particles in moving bed[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(1): 48-53.

再生效率都具有重要意义。传热系数是反应器设计及优化的基础数据,对工业反应器操作条件和生产能力的确定、反应器的稳定性、固定床催化剂的设计都至关重要。有关移动床中颗粒物料传热特性的报道大多集中在理论传热模型以及数值计算上,刘安源等^[8]、武锦涛等^[9-10]、卜昌盛等^[11]、朱立平等^[12]在这些方面颇有建树,此外还集中在研究颗粒物料的流动特性^[10,13],传热特性的报道也大多集中在固定床和流化床^[14-19]。罗贤芝等^[16]按工业生产条件对环柱状催化剂在固定床中的传热特性进行测定。吴建民等^[17]采用稳态法测定了气体处于静态时钴基催化剂在固定床的有效导热系数。刘玉兰等^[18]在研究固定床中内置圆管被冷却的错流传热过程中,得到了填充床低导热系数颗粒和高导热系数颗粒床层的传热关联式。傅月梅等^[20]研究不同抗流

气体流速下活性焦颗粒处于静止状态的径向有效导热系数及壁给热系数。工业应用的活性焦再生温度一般在400℃左右,由于在高温条件下辐射、对流与导热三者传热作用并存。为重点考察对流与导热的传热作用,分离辐射传热的影响,笔者研究了低温时移动床的传热特性,采用控制变量法,测定不同实验工况下的总传热系数,并观察其变化规律,得到总传热系数 K 与热空气流速 u_s 、开始卸料时热空气出口设定温度 T_{air} 以及活性焦颗粒卸料速度 v_p 等因素的关系。

1 实验

1.1 实验样品

实验用圆柱形活性焦颗粒作为传热研究介质,颗粒物性见表1。

表1 活性焦颗粒性质
Table 1 Properties of activated coke particle

直径/mm	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	堆积密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	空隙率	比热容/ ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	长度分布/%			
					≥ 12 mm	12~5 mm	5~2 mm	≤ 2 mm
8	400~600	550~700	0.33~0.38	0.95~1.00	≤ 5	≥ 90	≤ 4.9	≤ 0.1

1.2 实验装置

换热器的总传热系数测定实验装置与流程如图1所示。移动床实验装置主要由储物槽和换热器构成,储物槽长1.22 m;管壳式换热器为矩形结构,高 \times 宽 \times 厚为2.4 m \times 0.7 m \times 0.2 m,有效传热面积为12.6 m²;活性焦填充量约0.36 m³,约250 kg。

实验采用一次性装填的方法,实验最初将活性焦颗粒物料装填到移动床实验装置中,使之充满,以保证实验过程中有充足的卸料时间。活性焦颗粒在换热器的管程向下移动吸热,热空气在壳程中向上流动放热,最后绕过储物槽从出口排出,壳程空气流道横截面积为 5.4×10^{-3} m²。储物槽的作用是保证卸料过程中换热器管程始终充满活性焦颗粒。在换热器两端设置4个热电偶,分别用来记录活性焦颗粒物料的进出口温度、空气的进出口温度。

1.3 实验步骤

① 装填物料;② 将空气流速调至10 m/s,稳定后开启加热功率为10 kW的电加热器,空气经加热后自下而上进入换热器;③ 当空气出口温度达到特定值(如30℃)时,开始从出料口卸料,卸料过程中要控制好活性焦颗粒卸料速度;④ 记录活性焦颗粒

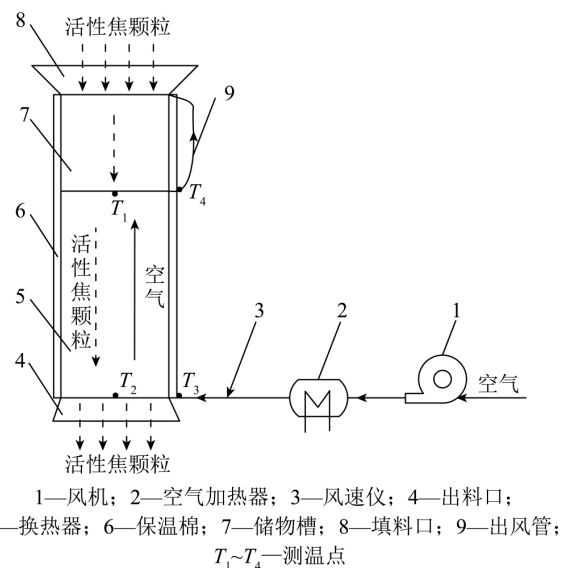


图1 实验装置与流程

Fig. 1 Flow sheet of experiment apparatus

物料和空气的进出口温度变化,并计算活性焦颗粒在移动床中的总传热系数;⑤ 改变开始卸料时热空气出口设定温度 T_{air} ,重复步骤①~④,并观察其变化规律;⑥ 改变换热器壳程热空气流速 u_s ,重复步骤①~④,并观察其变化规律;⑦ 改变管程活性焦

颗粒卸料速度 v_p , 重复步骤①~④, 并观察其变化规律; ③ 记录实验数据。

2 结果与分析

2.1 数据处理

实验装置中换热器的总传热系数 K 可由式(1)计算

$$K = \frac{Q}{\Delta T_m \cdot A} \quad (1)$$

$$\Delta T_m = \frac{(T_3 - T_2) - (T_4 - T_1)}{\ln [(T_3 - T_2) - (T_4 - T_1)]} \quad (2)$$

$$Q = u_s A' \rho C_p (T_4 - T_3) \quad (3)$$

式中, Q 为换热器的传热负荷, kW; ΔT_m 为传热温差, °C; A 为换热器的传热面积, 12.6 m²; T_1 为物料入口温度, °C; T_2 为停止卸料时物料出口温度, °C; T_3 为空气入口温度, °C; T_4 为停止卸料时空气出口温度, °C; u_s 为热空气流速, m/s; A' 为空气管道入口的横截面积 5.4×10^{-3} m²; ρ 、 C_p 分别为热空气密度、

比热容, kg/m³、kJ/(kg·K)。

空气物性随温度变化如图2所示。由图2可知, 空气物性随温度变化不大, 因此, 取空气进出口温度的平均值为物性温度, 约为80 °C, 故式(2)中取 $\rho = 1.0$ kg/m³, $C_p = 1.009$ kJ/(kg·K)。

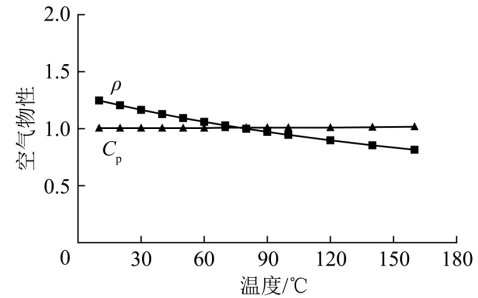


图2 空气物性随温度变化

Fig. 2 Properties of air with different temperature

分别在热空气流速 u_s 、开始卸料时热空气出口设定温度 T_{air} 以及活性焦颗粒卸料速度 v_p 等因素不同的工况下进行总传热系数测定实验, 结果见表2。

表2 不同实验工况下的实验数据及计算结果

Table 2 Experimental data and parameters in different conditions

实验工况		$T_{air}/$	$T_3/$	$T_4/$	$T_1/$	$T_2/$	$Q/$	$\Delta T_m/$	$K/$
$u_s/(m \cdot s^{-1})$	$v_p/(kg \cdot h^{-1})$	°C	°C	°C	°C	°C	kW	°C	($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
16.0	80	131.4	85.2	27.1	100.2	4.03	43.3	7.39	
		70	79.5	23.8	93.0	4.12	43.8	7.46	
	150	60	75.3	23.5	87.4	4.58	45.9	7.92	
		50	71.8	22.8	86.9	4.83	44.5	8.61	
		40	68.5	24.1	82.4	5.21	44.4	9.32	
	110	50	82.6	31.2	96.5	4.15	41.9	7.85	
		180	65.4	24.8	77.5	5.43	45.2	9.53	
10.2	230	135.3	68.0	29.0	80.4	5.86	46.5	10.01	
		70	75.2	20.8	107.1	4.23	49.2	6.83	
	150	60	67.0	17.7	97.7	4.50	49.8	7.18	
		50	64.2	17.9	93.3	4.66	50.4	7.34	
		40	58.4	18.3	83.9	4.91	50.6	7.70	
	30	51.5	15.0	73.0	5.57	53.9	8.20		
		70	76.1	17.4	102.3	3.87	50.7	6.06	
110	60	73.5	15.7	97.3	4.29	52.5	6.13		
	50	66.8	16.2	93.0	4.35	51.4	6.73		
	40	64.3	15.1	97.3	4.79	51.1	7.43		
35	57.9	13.6	87.2	4.87	51.0	7.58			
	7.8	150	57.6	19.6	91.2	4.18	50.2	6.61	
40	50.5	18.7	82.0	4.49	50.3	7.09			

2.2 热空气流速对移动床传热性能的影响

T_{air} 分别为 40、50 °C、卸料速度 v_p 为 50 kg/h 时, 研究热空气流速 u_s 对移动床传热性能的影响, 结果如图 3 所示。

由图 3 可知, u_s 相同时, 传热温差 ΔT_m 与开始卸料时热空气出口设定温度 T_{air} 无关, T_{air} 为 40 °C 时换热器的总传热系数明显高于 50 °C。在固-气换热系统中, 若忽略管壁热阻, 总传热系数与壳程空气传热热阻以及管程活性焦颗粒传热热阻相关, 因此总传热系数与热空气流速也相关联。由图 3 可知, 热空气流速 u_s 对传热温差 ΔT_m 有很大影响, 且随着 u_s 增大, 传热负荷 Q 增大, 总传热系数 K 也逐渐增

大, 在 $T_{air} = 40$ °C, $u_s = 16$ m/s, $v_p = 150$ kg/h 时, 总传热系数 K 高达 9.32 W/($m^2 \cdot K$)。通过实验数据关联分析, 总传热系数与热空气流速的幂次方 $n = 0.64$ 相关。

2.3 开始卸料时热空气出口设定温度对移动床传热性能的影响

换热器热空气流速 u_s 分别为 10.2、16 m/s, 卸料速度 v_p 为 150、110 kg/h 时, 研究开始卸料热空气出口设定温度对移动床传热性能的影响, 结果如图 4 所示。

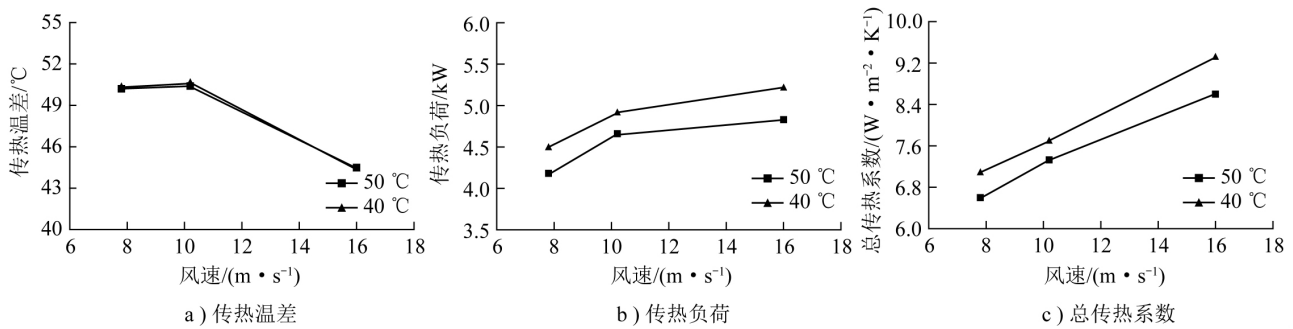


图 3 热空气风速与移动床传热性能的关系

Fig. 3 Relationship between wind speed and heat transport characteristics in moving bed

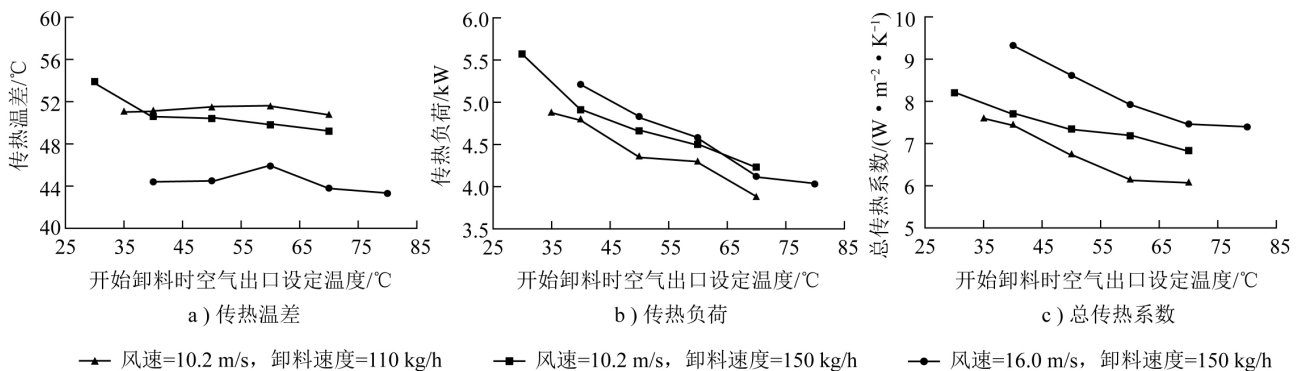


图 4 开始卸料热空气出口设定温度与移动床传热性能的关系

Fig. 4 Relationship between the outlet temperature of hot air with beginning unloading and heat transport characteristics in moving bed

实验过程中, 开始卸料前空气出口温度由室缓慢升高到设定值, 而开始卸料后, 由于之前换热时间的不同以及卸料过程中还在持续换热, 空气出口温度和活性焦颗粒的出口温度在卸料过程中均缓慢升高, 因此 T_{air} 对传热温差 ΔT_m 几乎无影响。由图 4a 可知, 随着 T_{air} 的升高, 传热温差 ΔT_m 无明显变化。当 $u_s = 16$ m/s、 $v_p = 150$ kg/h 时, ΔT_m 稳定在 44 °C; 当 $u_s = 10.2$ m/s、 $v_p = 110$ kg/h

时, ΔT_m 在 51 °C 上下浮动; 当 $u_s = 10.2$ m/s、 $v_p = 150$ kg/h 时, ΔT_m 的值稳定在 50 °C 左右。由此可见, 相比于活性焦颗粒卸料速度 v_p , 热空气流速 u_s 对 ΔT_m 有更大影响。由图 4b、4c 可知, 传热负荷 Q 与总传热系数 K 都随 T_{air} 的升高而降低。在热空气入口温度基本不变的情况下, 随着 T_{air} 的升高, 卸料前预热时间越长, 空气进出口温差会相应降低, 导致换热器的传热负荷 Q 变小, 总传热系数

K 也随之变小。 T_{air} 达到 $70 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 后,总传热系数 K 变化很小。

2.4 活性焦颗粒卸料速度对移动床传热性能影响

若活性焦颗粒卸料太快,则颗粒磨损严重,物料损失较多,而卸料太慢则影响传热和解吸效果。为

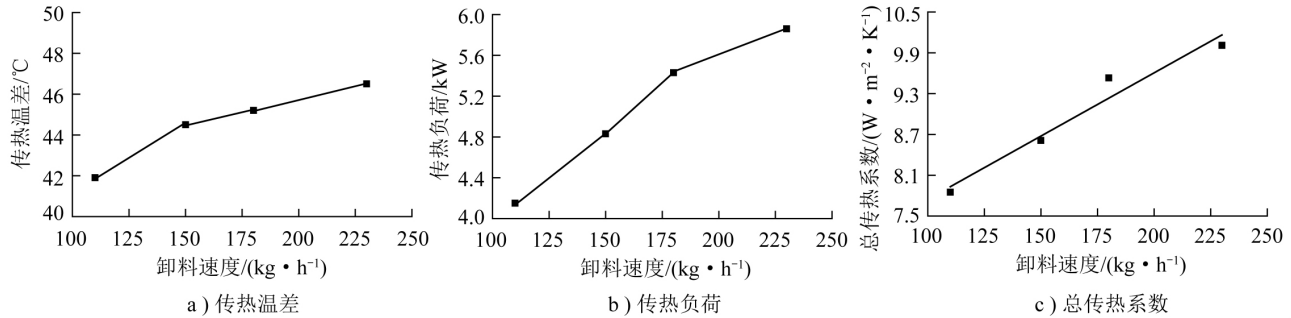


图5 卸料速度与移动床传热性能的关系

Fig. 5 Relationship between speed of unloaded activated coke particles and heat transport characteristics in moving bed

长非常缓慢,当 $v_p > 150 \text{ kg/h}$ 时 ΔT_m 的变化可以忽略。由图 5b、5c 可知,随着活性焦颗粒卸料速度 v_p 的增大,传热负荷 Q 和总传热系数 K 呈线性缓慢增长,总传热系数值都大于 $7.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,说明该固-气换热系统具有相当高的传热效果。卸料速度越大,从储槽槽流向换热器的活性焦颗粒越多,则空气出口温度缓慢升高,使传热负荷变大,总传热系数也随之增大。由图 5c 可知,卸料速度每上升 50 kg/h ,总传热系数增加 $0.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,这说明在移动床传热中,卸料速度对总传热系数的影响不可忽略。

3 结 论

本文以活性焦颗粒为研究对象,以管壳式换热器为换热装置进行传热实验。结果表明:换热器壳程热空气流速 u_s 越大,总传热系数 K 越大,根据数据关联分析 K 与 u_s 的幂次方 $n=0.64$ 相关;随着开始下料时热空气出口设定温度 T_{air} 的上升 ΔT_m 几乎无变化,传热负荷和总传热系数则变小, T_{air} 达到 $70 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 后,总传热系数 K 变化很小。随着活性焦颗粒卸料速度 v_p 增大,总传热系数 K 呈线性增长, v_p 每上升 50 kg/h ,总传热系数 K 增加 $0.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,因此卸料速度的影响不可忽略。通过分离辐射传热的影响,本文研究了低温时移动床的传热特性,重点考察移动床中活性焦颗粒与空气对流与导热的传热作用,为移动床中颗粒接触传热研究奠定了基础。

探究卸料速度对总传热系数的影响,在卸料速度 v_p 分别为 $110、150、180、230 \text{ kg/h}$ 的工况下分别进行实验,取热空气流速 $u_s = 16 \text{ m/s}$ 、 $T_{\text{air}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$,结果如图 5 所示。

由图 5a 可知,随着 v_p 的增大,传热温差 ΔT_m 增

参考文献:

- [1] 郝吉明,王书恩,陆永琪. 燃煤二氧化硫污染控制技术手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 359-363.
Hao Jiming, Wang Shuen, Lu Yongqi. Manual of SO₂ pollution control in coal fired [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001: 359-363.
- [2] 邢连中. 应用国家政策推动火电厂烟气脱硫工作的全面实施 [J]. 华东电力, 2004, 32(6): 11-13.
Xing Lianzhong. Promote full-scale implement of FGD environmental protection in power plants utilizing national fiscal policy [J]. East China Electric Power, 2004, 32(6): 11-13.
- [3] 李艳芳. 活性焦烟气联合脱硫脱硝技术 [J]. 煤质技术, 2009(1): 36-39.
Li Yanfang. Technology of simultaneous desulphurization and denitration using activity coke [J]. Coal Quality Technology, 2009(1): 36-39.
- [4] 张会平, 钟辉, 叶李艺. 不同化学方法再生活性炭的对比研究 [J]. 化工进展, 1999, 18(5): 31-35.
Zhang Huiping, Zhong Hui, Ye Liyi. The comparisons for regeneration of activated carbon by different chemical regeneration methods [J]. Technology Progress, 1999, 18(5): 31-35.
- [5] 陈皓, 向阳, 赵建夫. 超临界二氧化碳萃取再生活性炭技术研究进展 [J]. 上海环境科学, 1997, 16(12): 26-28.
Chen Hao, Xiang Yang, Zhao Jianfu. Progress on regeneration of activated carbon by supercritical carbon dioxide extraction [J]. Shanghai Environmental Sciences, 1997, 16(12): 26-28.
- [6] 傅大放, 邹宗柏, 曹鹏. 活性炭的微波辐照再生试 [J]. 中国给水排水, 1997, 13(5): 7-9.
Fu Dafang, Zou Zongbo, Cao Peng. A study on regeneration of activated carbon by means of microwave irradiation [J]. China Water and Wastewater, 1997, 13(5): 7-9.

- [7] 张会平,叶李芝,傅志鸿,等. 活性炭的电化学再生技术研究[J]. 化工进展 2001 20(10): 17-20.
Zhang Huiping, Ye Liyi, Fu Zhihong *et al.* Regeneration of spent activated carbon by electrochemical method [J]. Technology Progress 2001 20(10): 17-20.
- [8] 刘安源,刘石. 流化床内颗粒碰撞传热的理论研究[J]. 中国电机工程学报 2003 23(3): 161-165.
Liu Anyuan, Liu Shi. Theoretical study on impact heat transfer between particles in fluidized bed [J]. Progress of the Chinese Society for Electrical Engineering 2003 23(3): 161-165.
- [9] 武锦涛,陈纪忠,阳永荣. 移动床中颗粒接触传热的数学模型[J]. 化工学报 2006 57(4): 719-725.
Wu Jintao, Chen Jizhong, Yang Yongrong. Model of contact heat transfer in granular moving bed [J]. Journal of Chemistry Industry and Engineering (China) 2006 57(4): 719-725.
- [10] 武锦涛. 移动床中固体颗粒运动与传热的研究[D]. 杭州: 浙江大学 2005: 103-116.
Wu Jintao. Research on motion and heat transfer in granular moving bed [D]. Hangzhou: Zhejiang University 2005: 103-116.
- [11] 卜昌盛,陈晓平,刘道银,等. 基于颗粒尺度的离散颗粒传热模型[J]. 化工学报 2012 63(3): 698-704.
Bu Changsheng, Chen Xiaoping, Liu Daoyin, *et al.* Heat transfer model for particles with discrete element method [J]. Journal of Chemistry Industry and Engineering (China) 2012 63(3): 698-704.
- [12] 朱立平,袁竹林,闫亚明,等. 基于离散单元法的丝状颗粒传热数学模型[J]. 化工学报 2012 63(7): 2051-2058.
Zhu Liping, Yuan Zhulin, Yan Yaming *et al.* Model of heat transfer in filamentous granular materials based on discrete element method [J]. Journal of Chemistry Industry and Engineering (China) 2012 63(7): 2051-2058.
- [13] 傅巍. 移动床内颗粒物料流动的数值模拟与实验研究[M]. 沈阳: 东北大学 2006: 1-62.
Fu Wei. Simulation and experiments of particles flow in moving beds [M]. Shenyang: Northeastern University 2006: 1-62.
- [14] Wen C Y, Chang T M. Particle to particle heat transfer in air fluidized beds [C] // Proceedings of International Symposium on Fluidization. Eindhoven [s. n.]. 1967: 491-506.
- [15] Sun J, Chen M M. A theoretical analysis of heat transfer due to particle impact [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 1988 31(5): 969-975.
- [16] 罗贤艺,何文军,徐佩若,等. 醋酸乙烯合成环柱状催化剂固定床传热参数[J]. 华东理工大学学报 2000 26(3): 240-243.
Luo Xianyi, He Wenjun, Xu Peiruo *et al.* Heat transfer parameters of fixed bed of hollow cylindrical catalyst for ethylene acetoxylation to vinyl acetate reaction [J]. Journal of East China University of Science and Technology 2000 26(3): 240-243.
- [17] 吴建民,张海涛,应卫勇,等. 钴基催化剂固定床有效导热系数[J]. 过程工程学报 2010 10(1): 29-34.
Wu Jianmin, Zhang Haitao, Ying Weiyong *et al.* Effective thermal conductivity of fixed packing bed of cobalt-based catalyst [J]. The Chinese Journal of Progress Engineering 2010 10(1): 29-34.
- [18] 刘玉兰,吴勇强,朱子彬. 固定床冷却的错流传热[J]. 化学反应工程与工艺 2004 20(3): 260-264.
Liu Yulan, Wu Yongqiang, Zhu Zibin. Cross flow heat transfer in a cooled fixed bed [J]. Chemical Reaction Engineering and Technology 2004 20(3): 260-264.
- [19] 唐猷峰. 管内流体温度对给热系数影响的实验研究[J]. 攀枝花学院学报 2007 24(6): 113-121.
Tang Taifeng. The test and study of influence of the fluid temperature inside the tube in heat conveyance coefficient [J]. Journal of Panzhihua University 2007 24(6): 113-121.
- [20] 傅月梅,刘静,唐夕山. 活性焦传热系数的测定[J]. 洁净煤技术 2015 21(2): 56-63.
Fu Yue mei, Liu Jing, Tang Xishan. Measurement of heat transfer coefficient of activated coke [J]. Clean Coal Technology, 2015 21(2): 56-63.
- [21] 朱曦曦,王力. 双金属柱撑蒙脱石制备及应用研究进展[J]. 科技导报 2014 32(9): 67-70.
Zhu Xixi, Wang Li. Preparation and application of Bi-metal pillared montmorillonite [J]. Science & Technology Review 2014, 32(9): 67-70.
- [29] 丛兴顺,王力. 蒙脱石预处理对制备柱撑蒙脱石的促进作用研究[J]. 工业催化 2007 15(10): 60-63.
Cong Xingshun, Wang Li. Studies on the promotional effects of montmorillonite pretreatment on preparation of pillared montmorillonite [J]. Industrial Catalysis 2007 15(10): 60-63.
- [30] 刘晓文,毛小西,刘庄,等. 镍铝基柱撑蒙脱石的制备及孔道结构研究[J]. 矿物岩石 2010 30(4): 7-11.
Liu Xiaowen, Mao Xiaoxi, Liu Zhuang *et al.* Preparation and research on the channel structure of Ni-Al-pillared montmorillonite [J]. Mineral Petrol 2010 30(4): 7-11.
- [31] Zhu Xixi, Wang Li, Gao Weijia. Study on preparation and interlayer ion state of Fe/Ni pillared montmorillonite [J]. Advanced Materials Research 2014 873: 267-272.
- [32] 主曦曦,王力. 双金属柱撑蒙脱石制备及应用研究进展[J]. 科技导报 2014 32(9): 67-70.
Zhu Xixi, Wang Li. Preparation and application of Bi-metal pillared montmorillonite [J]. Science & Technology Review 2014, 32(9): 67-70.
- [33] Zhu Jianxi, He Hongping, Guo Jiugao *et al.* Arrangement models of alkylammonium cations in the interlayer of HDTMA⁺ pillared montmorillonites [J]. Chinese Science Bulletin, 2003 48(4): 368-372.
- [34] Yu Weihua, Ren Qianqian, Tong Dongshen *et al.* Clean production of CTAB-montmorillonite: formation mechanism and swelling behavior in xylene [J]. Applied Clay Science 2014 97/98: 222-234.
- [35] Xing Jian, Deng Bingyao, Liu Qingsheng. Preparation and thermal properties of polyphenylene sulfide/organic montmorillonite composites [J]. Fibers and Polymers 2014 15(8): 1685-1693.

(上接第47页)