

烧结矿余热回收竖罐内气体流态的实验研究

冯军胜, 董辉, 高建业, 梁凯

(东北大学 国家环境保护生态工业重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 采用对 Ergun 型方程无量纲化的方法对气体通过烧结矿床层的流态进行了研究, 考察气体表观流速、烧结矿颗粒直径和床层空隙率对床层内气体压力降的影响, 进而探讨床层内临界颗粒雷诺数随颗粒直径的变化规律。研究表明: 当颗粒直径一定时, 床层内单位料层高压力降随气体表观流速的增大呈二次方关系增大。当气体表观流速一定时, 单位料层高压力降随颗粒直径和空隙率的增大呈指数关系衰减。床层内临界颗粒雷诺数随床层几何因子的增大呈指数关系减小, 且临界颗粒雷诺数实验预测公式的平均计算误差在 5% 以内, 显示了良好的预测性能。

关键词: 烧结矿; 填充床; 压力降; 流态; 临界颗粒雷诺数

中图分类号: TK 11⁺⁵ **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2016)04-0517-05

Gas Flow Regime in Vertical Tank for Sinter Waste Heat Recovery

FENG Jun-sheng, DONG Hui, GAO Jian-ye, LIANG Kai

(SEPA Key Laboratory on Eco-industry, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: DONG Hui, E-mail: Dongh@smm.neu.edu.cn)

Abstract: The dimensionless method of Ergun's equation was used to investigate the flow regime of the gas flow through the sinter bed layer. The effects of the gas superficial velocity, sinter particle diameter and the bed layer voidage on the gas pressure drop in the sinter bed layer were studied, and the change law of particle Reynolds number with the changing of particle diameter was also discussed. The results showed that the pressure drop per unit bed layer height in the sinter bed layer increased as a quadratic relationship with the increase of the gas superficial velocity for a given particle diameter. For a given gas superficial velocity, the pressure drop per unit bed layer height decreased as an exponential relationship with the increase of particle diameter and voidage. The critical particle Reynolds number in the sinter bed layer decreased as an exponential relationship with the increase of the bed layer geometrical factor, and the mean calculation deviation of the experimental prediction formula for critical particle Reynolds number was within 5%, showing a good prediction by using the method.

Key words: sinter; packed bed; pressure drop; flow regime; critical particle Reynolds number

烧结过程余热资源高效回收与利用是降低烧结工序能耗的主要途径之一^[1]。烧结矿余热竖罐式回收是针对传统烧结余热回收系统的弊端^[2], 借鉴干熄焦炉的结构和工艺提出一种烧结矿显热高效回收方式^[3-4]。烧结矿余热回收竖罐的本质是一种气固逆流式移动床, 竖罐内烧结矿的填充结构类似于多孔介质。热烧结矿在竖罐内下移过

程中与逆流而来的冷却风进行热交换而达到被冷却的目的。基于此, 罐体内的气体流动是影响烧结矿冷却效果的主要因素之一, 而床层内气体流动状态是气体流动机理的主要研究方向, 是烧结矿竖罐的重要模拟设计参数。因此, 研究罐体内气体流动状态等流动规律, 对优化竖罐结构和操作参数均具有十分重要的意义。

收稿日期: 2015-03-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51274065)。

作者简介: 冯军胜(1988-), 男, 安徽蚌埠人, 东北大学博士研究生; 董辉(1969-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学教授, 博士生导师。

近年来,随着数值模拟研究在颗粒床层内流动和传热过程中的不断深入,已有许多学者对流体通过床层内的流动状态进行了研究^[5-11].文献[5-6]采用电化学探针技术方法确定了不同孔隙结构的多孔介质层流区间的具体划分点,同时考虑了颗粒直径和孔隙率的变化等因素对流体区间划分的影响.文献[7-8]采用电化学技术实验研究了不同结构填充床内的流动机理,得到了层流、过渡流和湍流间的临界雷诺数.文献[9]通过对 Ergun 型方程进行无量纲化,同时根据无量纲压降随雷诺数变化趋势的不同,得到了流态的分区,认为流体通过多孔介质时流态大致可分为达西流区、Forchheimer 流区及湍流区.文献[10]提出了对 Ergun 型方程无量纲化的新方法,给出了与文献[9]研究结果基本一致的流态划分区间.文献[11]实验研究了微球床多孔介质的阻力压降,并通过无量纲化 Ergun 型方程确定了非达西流的流区划分.但迄今为止,对流体流动状态的研究还主要集中于球体或者均匀颗粒的填充床内,关于烧结矿这种形状不均的大颗粒填充床内流体流动状态的研究还鲜有报道.基于此,本文在自制气固流动实验装置的基础上,采用对表征烧结矿床层压力降的 Ergun 型方程进行无量纲化的方法,考察了气体表观流速、烧结矿颗粒直径和空隙率对床层内气体压力降的影响,并在此基础上,探讨了床层内临界颗粒雷诺数随颗粒直径的变化规律,旨在为烧结矿余热竖罐的设计和 optimization 提供理论依据.

1 实验方法及装置

1.1 实验方法

由文献[9-11]可知,求解颗粒填充床内流体压力降的普通 Ergun 型方程为

$$\frac{\Delta P_{\text{Bed}}}{H} = k_1 \frac{\mu(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3(\Phi d_p)^2} u + k_2 \frac{\rho_f(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 \Phi d_p} u^2. \quad (1)$$

式中: $\Delta P_{\text{Bed}}/H$ 为单位床层高压降, Pa/m; k_1, k_2 为 Ergun 型方程系数; ε 为床层空隙率; μ 为气流动力黏度, kg/(m·s); ρ_f 为气体密度, kg/m³; Φ 为颗粒形状因子; d_p 为颗粒平均直径(以下为颗粒直径), m; u 为气体表观流速, m/s.

根据文献[9-11]的方法,对式(1)进行无量纲化,可得

$$f_p = \frac{\Delta P_{\text{Bed}}}{H} \frac{\varepsilon^3(\Phi d_p)^2}{\mu(1-\varepsilon)^2 u} = k_1 + k_2 \frac{Re}{1-\varepsilon}, \quad (2)$$

$$Re = \frac{\rho_f u \Phi d_p}{\mu}. \quad (3)$$

式中: f_p 为无量纲压力降; Re 为颗粒雷诺数.

由式(2)可知,对于某一特定的颗粒填充床,当填充床内流体的流态处于达西流区时,也就是此时流体流动处于低雷诺数时,式(2)右边第二项的值很小,可以忽略不计,即 f_p 的值近似为一恒定值 k_1 , 此时,式(2)可改写为

$$f_p = \frac{\Delta P_{\text{Bed}}}{H} \frac{\varepsilon^3(\Phi d_p)^2}{\mu(1-\varepsilon)^2 u} = k_1. \quad (4)$$

因此可以根据达西流区无量纲压力降恒定不变这一特点,确定出达西流区的分区范围.当雷诺数逐渐增加时,由式(2)可知,无量纲压力降随着雷诺数的增加而线性增加,因此可根据曲线斜率的变化来确定非达西区中 Forchheimer 区向湍流区转变的临界颗粒雷诺数.

1.2 实验装置

实验竖罐的内径和高度分别为 0.43 和 1.4 m,其内部截面为圆形.在竖罐外壁高度 0.4, 0.7 和 1.2 m 处各有一个测压孔,用来测量此处空气穿过料层的压力值.气固流动实验装置如图 1 所示,所有实验工况均在常温条件下进行.空气在鼓风机的驱动下,流过调节阀和孔板流量计后从竖罐底部进入料层内,最后从竖罐顶部流出.通过调节阀来控制进入竖罐内的空气流量,孔板流量计和压力数显表分别用来测量实验过程中的空气流量和不同位置处的压力值.实验所用烧结矿的颗粒筛分直径 d 、颗粒平均直径 d_p 、颗粒形状因子 Φ ^[12] 和床层空隙率 ε 的具体值如表 1 所示.

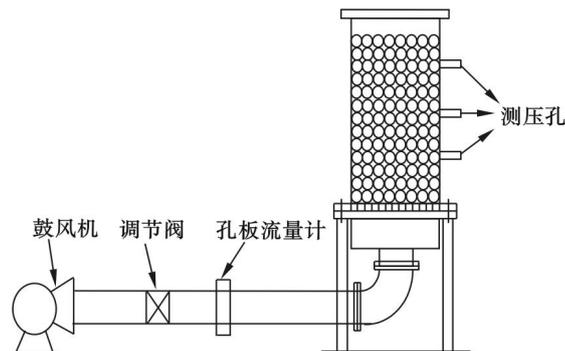


图 1 气固流动实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of air-solid flow experimental test set-up

表 1 烧结矿颗粒相关参数

Table 1 Related parameters of sinter particles

d/m	d_p/m	Φ	ε
0.002 ~ 0.010	0.006	0.63	0.423
0.010 ~ 0.018	0.014	0.69	0.440
0.018 ~ 0.030	0.024	0.72	0.490
0.030 ~ 0.040	0.035	0.89	0.530

影响烧结矿余热回收竖罐内气体流动状态的主要因素包括：烧结矿颗粒直径 d_p 、床层空隙率 ϵ (通过床层几何因子来反映) 和气体表观流速 u 。本文综合考虑了颗粒直径和气体表观流速对烧结矿床层内气体流动状态的影响。实验内容可分为两个方面：一方面，测量出不同实验工况下气体穿过烧结矿床层的压力降，考察气体表观流速、烧结矿颗粒直径和空隙率对压力降的影响；另一方面，采用对 Ergun 型方程无量纲化的方法确定不同流态区域间的临界颗粒雷诺数，探讨床层内临界颗粒雷诺数随颗粒直径的变化规律。

2 实验结果及分析

2.1 气体表观流速对床层压力降的影响

实验过程中自小到调节实验竖罐进口空气流量，测定不同实验工况下不同床层高度处的静压力差，然后取其平均值，得出不同实验工况下填充床内单位高度压力降随气体表观流速变化示意图，如图 2 所示。

由图 2 可知，对于特定烧结矿颗粒直径填充床，空气表观流速越大，空气穿过床层的单位高度压力降变化就越大。通过实验数据拟合，得出不同实验工况条件下床层内单位高度压力降随表观流速的变化关系式如表 2 所示。

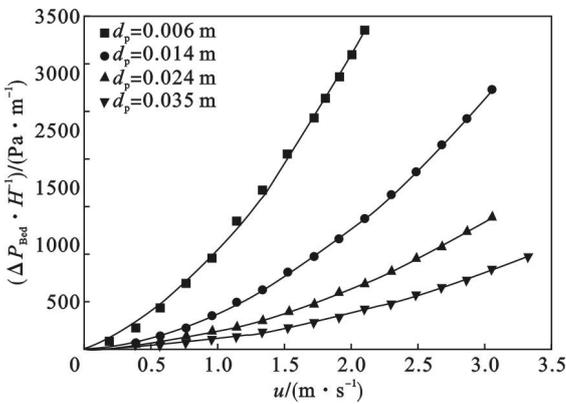


图 2 单位料层高压力降随空气表观流速变化示意图
Fig. 2 Change schematic of unit bed layer height pressure drop with air superficial velocity

表 2 不同实验工况下床层内压力降的变化
Table 2 Changes of pressure drop in bed layers under different experimental condition

d_p/m	压力降的变化关系式
0.006	$\Delta P_{\text{Bed}}/H = 533.99u + 503.86u^2$
0.014	$\Delta P_{\text{Bed}}/H = 136.06u + 247.35u^2$
0.024	$\Delta P_{\text{Bed}}/H = 53.11u + 130.95u^2$
0.035	$\Delta P_{\text{Bed}}/H = 32.02u + 78.21u^2$

由表 2 可知，单位料层高压力降与气体表观流速呈二次方关系，符合式 (1) 所描述的颗粒填充床内流体压力降与流体表观速度之间的变化关系。这一结论说明烧结矿填充床内描述空气压力降变化的关联式可以用 Ergun 型方程进行表示。另外，压力降变化关系式中气体表观速度的一次项和二次项系数均随颗粒直径的增大而减小。这是由于，当罐体内径一定时，随着颗粒直径的增加，床层空隙率也会随之增加，床层内颗粒的比表面积减小，导致气体通过床层的黏性阻力损失和惯性阻力损失均减小。

2.2 颗粒直径对床层压力降的影响

为了更清晰地描述颗粒直径对床层内空气压力降的影响，选取气体表观流速为 1.05, 1.4 和 1.75 m/s 工况下的实验数据作为参考，得出床层内单位料层高压力降随 d_p/D 变化示意图，如图 3 所示。

由图 3 可知，对于某一特定气体表观流速，当颗粒床层直径 D 一定时，烧结矿颗粒直径越小，床层内气体单位料层高压力降增加趋势就越大。以 $u = 1.4 \text{ m/s}$ 的气体表观流速为例，通过实验数据拟合，得出气体压力降随 d_p/D 的变化关系式：

$$\frac{\Delta P_{\text{Bed}}}{H} = 208.34 + 4161.23 \exp(-58.85d_p/D) \quad (5)$$

由式 (5) 可知，床层直径 D 一定时，床层内空气单位料层高压力降随颗粒直径的增大呈指数关系衰减。这是由于，颗粒直径的增大会导致床层空隙率的增大，同时描述空气压力降的关联式中气体表观速度的一次项和二次项系数均随颗粒直径增大而急剧减小。因此，当空气表观流速不变时，颗粒直径越大，空气单位料层高压力降减小得就越快。

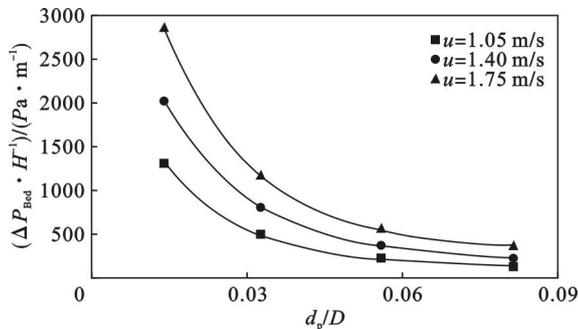


图 3 单位料层高压力降随 d_p/D 变化示意图
Fig. 3 Schematic diagram of pressure drops per unit bed layer height changing with d_p/D

2.3 空隙率对床层压力降的影响

同样选取气体表观流速为 1.05, 1.4 和

1.75 m/s 工况下的实验数据作为参考, 得出了床层内单位料层高压力降随空隙率变化示意图, 如图 4 所示.

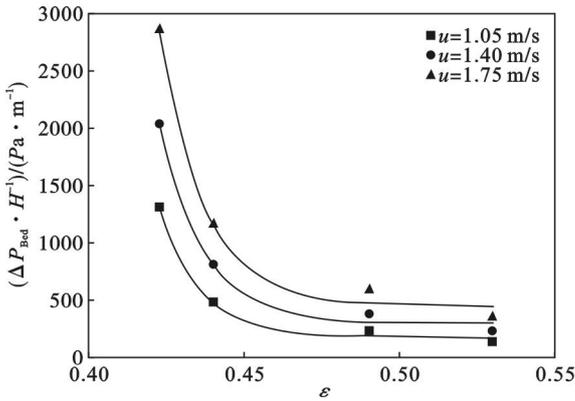


图 4 单位料层高压力降随空隙率变化示意图
Fig. 4 Schematic of unit bed layer height pressure drop changing with voidage

由图 4 可知, 床层空隙率越小, 床层内气体单位料层高压力降增加趋势就越大. 以 $u = 1.4 \text{ m/s}$

的气体表观流速为例, 通过实验数据拟合, 得出气体压力降随空隙率的变化关系式:

$$\frac{\Delta P_{\text{Bed}}}{H} = 296.9 + 1.83 \times 10^{16} \exp(-70.87\varepsilon) \quad (6)$$

由式(6)可得, 床层内空气单位料层高压力降随空隙率的增大而呈指数关系衰减. 这是由于, 床层空隙率的增大会导致床层内颗粒比表面积的减小, 导致气体通过床层的黏性阻力损失和惯性阻力损失均减小. 这种变化关系与颗粒直径的影响一致, 都呈指数关系变化. 说明当床层直径一定时, 床层空隙率 ε 和颗粒直径 d_p 之间存在着一定的数量关系, 也从侧面证明了床层空隙率随床层几何因子 $D/(\Phi d_p)$ 的增大而减小.

2.4 床层内临界颗粒雷诺数的确定

根据图 2 中给出的不同工况下床层内空气压力降的实验数据, 依据式(2)和式(3), 可得出不同烧结矿颗粒直径填充床内空气无量纲压力降 f_p 随颗粒雷诺数 Re 变化的关系示意图, 如图 5 所示.

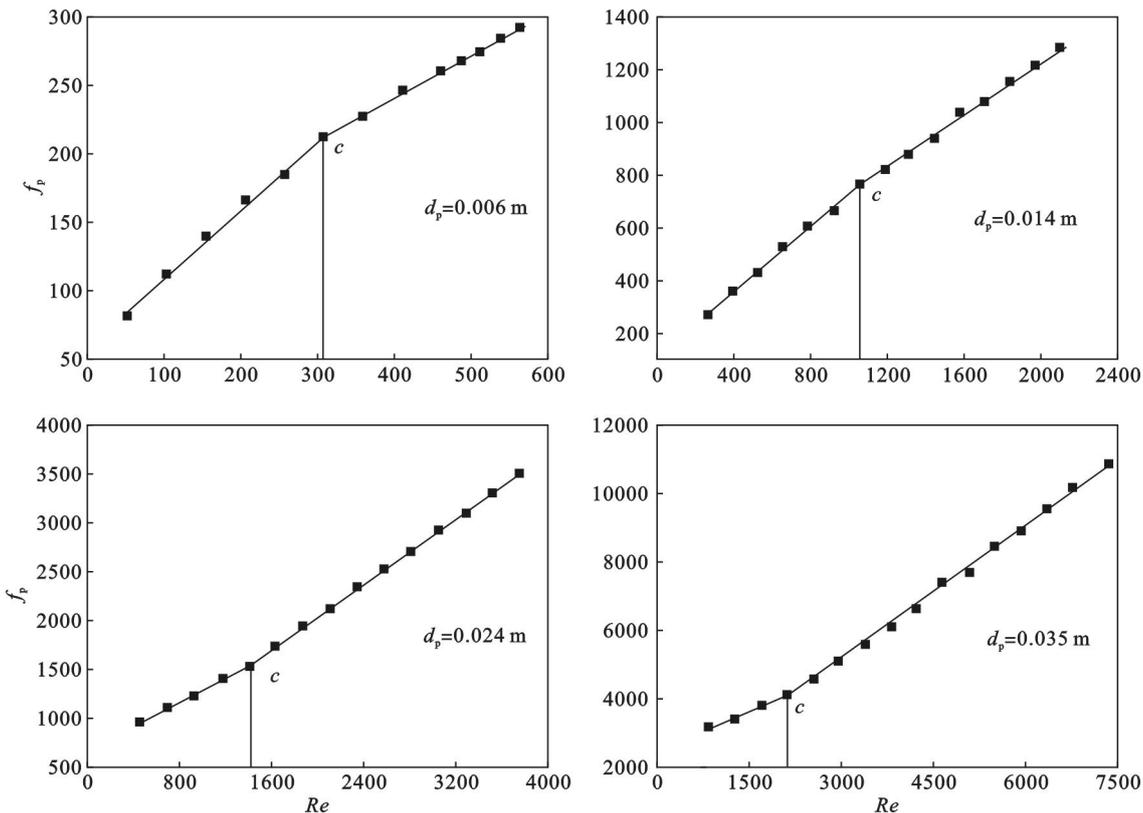


图 5 床层内空气无量纲压力降 f_p 随颗粒雷诺数 Re 变化示意图

Fig. 5 Schematic diagram of air dimensionless pressure drop f_p in bed layer changing with particle Reynolds numbers

由图 5 可知, 随着颗粒雷诺数 Re 的增加, 无量纲压力降 f_p 随颗粒雷诺数 Re 之间变化关系曲线, 以 c 点为分界点呈现不同的变化规律, 即曲线斜率发生变化. 而在低雷诺数段, 并没出现无量纲压力降 f_p 趋近平缓的现象. 由此可以说明, 当气

体表观流速 $u > 0.383 \text{ m/s}$ 时, 烧结矿填充床内空气流态已处于非达西流区. 在实际操作过程中, 考虑到烧结矿显热回收和冷却性能等问题, 烧结矿床层内不会出现气体表观流速低于 0.383 m/s 的情况. 为此, 在本实验条件下, 根据文献[9-11],

可将烧结床层内非达西流区划分为两个区域: Forchheimer 流动区域和 Turbulence 流动区域, 并且由图 5 即可以确定出 4 种烧结矿颗粒直径填充床内 Forchheimer 流区和湍流区转折点 c 所对应的临界颗粒雷诺数 Re_c 为 307.5, 1 047.9, 1 405.8, 2 111.9.

由图 6 可知, Re_c 随 $D/(\Phi d_p)$ 的增大而逐渐减小, 对 Re_c 实验值进行数据拟合, 即可得到床层内非达西流区转折点所对应的临界颗粒雷诺数 Re_c 随床层几何因子变化的关系式:

$$Re_c = 240.75 + 2758.92 \exp(-0.03037 \frac{D}{\Phi d_p}). \quad (7)$$

由式(7)可知, Re_c 与床层几何因子呈指数关系变化, 并且该实验关联式的平均计算误差在 5% 以内. 由于本实验中, 烧结填充床内颗粒当量直径的最小值为 0.00378 m, 因此, 颗粒当量直径小于 0.00378 m 的床层内临界颗粒雷诺数不能通过本实验的数据分析得出. 但基于本实验所围绕的烧结余热竖罐内颗粒的填充特点, 较小的颗粒当量直径可不作考虑.

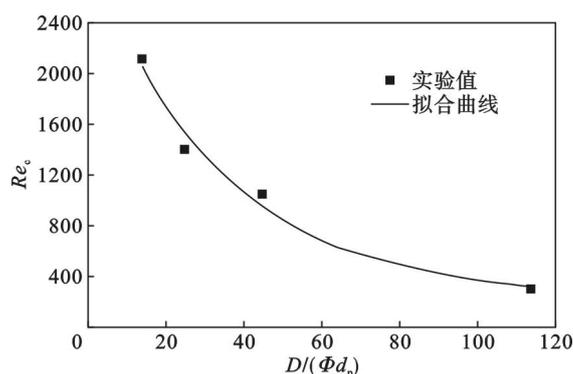


图 6 临界颗粒雷诺数随床层几何因子变化示意图

Fig. 6 Schematic diagram of critical particle Reynolds number changing with bed layer geometrical factors

3 结 论

1) 气体表观流速、颗粒直径和床层空隙率对床层内压力降有重要影响. 当颗粒直径一定时, 随着气体表观流速的增大, 床层内空气单位料层高压力降与气体表观流速呈二次方关系增大, 且描述颗粒床层内气体压力降变化关系式中的气体表观速度一次项和二次项系数均随颗粒直径的增大而减小.

2) 当气体表观流速一定时, 由于颗粒床层直径保持不变, 随着颗粒直径的增加, 床层空隙率会随之增加, 使得床层内颗粒的比表面积减小, 导致

床层内空气单位料层高压力降随颗粒直径和空隙率的增加而呈指数关系衰减.

3) 根据非达西流区无量纲压力降曲线斜率的变化, 得到了烧结矿床层内临界颗粒雷诺数随床层几何因子变化的实验预测关联式, 平均计算误差在 5% 以内. 由关联式可知, 床层内临界颗粒雷诺数随床层几何因子的增大呈指数关系减小.

参考文献:

- [1] 蔡九菊, 王建军, 陈春霞, 等. 钢铁工业余热资源的回收与利用[J]. 钢铁, 2007, 42(6): 1-7. (Cai Jiu-ju, Wang Jian-jun, Chen Chun-xia, et al. Waste heat recovery and utilization in iron and steel industry[J]. *Iron and Steel*, 2007, 42(6): 1-7.)
- [2] 董辉, 赵勇, 蔡九菊, 等. 烧结-冷却系统漏风问题研究[J]. 钢铁, 2012, 47(1): 95-99. (Dong Hui, Zhao Yong, Cai Jiu-ju, et al. On the air leakage problem in sintering cooling system[J]. *Iron and Steel*, 2012, 47(1): 95-99.)
- [3] 蔡九菊, 董辉. 烧结过程余热资源的竖罐式回收与利用方法及其装置: 中国 200910187381.8 [P]. 2009-09-15. (Cai Jiu-ju, Dong Hui. The method and device of sintering waste heat recovery and utilization with vertical tank; China 200910187381.8 [P]. 2009-09-15.)
- [4] 董辉, 李磊, 蔡九菊, 等. 烧结矿余热竖罐式回收利用工艺流程[J]. 中国冶金, 2012, 22(1): 6-11. (Dong Hui, Li Lei, Cai Jiu-ju, et al. Process of waste heat recovery and utilization for sinter in vertical tank [J]. *China Metallurgy*, 2012, 22(1): 6-11.)
- [5] Rode S, Midoux N, Latifi M A, et al. Hydrodynamics of liquid flow in packed beds: an experimental study using electrochemical shear rate sensors [J]. *Chemical Engineering Science*, 1994, 49(6): 889-900.
- [6] Seguin D, Montillet A, Comiti J. Experimental characterization of flow regimes in various porous media—I: limit of laminar flow regime [J]. *Chemical Engineering Science*, 1998, 53(21): 3751-3761.
- [7] Bu S S, Yang J, Dong Q T, et al. Experimental study of flow transitions in structured packed beds of spheres with electrochemical technique [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2015, 60: 106-114.
- [8] Bu S S, Yang J, Dong Q T, et al. Experimental study of transition flow in packed beds of spheres with different particle sizes based on electrochemical microelectrodes measurement [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 73(2): 1525-1532.
- [9] Fand R M, Kim B Y K, Lam A C C, et al. Resistance to the flow of fluids through simple and complex porous media whose matrices are composed of randomly packed spheres [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1987, 109(3): 268-273.
- [10] Kececioğlu I, Jiang Y X. Flow through porous media of packed spheres saturated with water [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1994, 116(1): 164-170.
- [11] 李振鹏, 孙中宁, 廖永浩. 非达西流区微球床多孔介质阻力特性研究[J]. 应用科技, 2009, 36(4): 61-64. (Li Zhen-peng, Sun Zhong-ning, Liao Yong-hao. The research on the resistance characteristics of microsphere packed bed porous media in non-Darcy regime [J]. *Applied Science and Technology*, 2009, 36(4): 61-64.)
- [12] Geldart D. Estimation of basic particle properties for use in fluid-particle process calculations [J]. *Powder Technology*, 1990, 60(1): 1-13.