

# 烧结矿余热回收竖罐内气体流动的数值计算

冯军胜<sup>1</sup>, 董辉<sup>1</sup>, 赵勇<sup>2</sup>

(1. 东北大学 国家环境保护生态工业重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中冶焦耐工程技术有限公司, 辽宁 大连 116000)

**摘 要:** 以多孔介质模型为基础, 运用气固填料床动力学理论建立了烧结竖罐内气体流动的数学模型, 确立了数学模型的边界条件. 以 FLUENT 软件为计算平台, 采用自定义函数(UDF)对罐体料层径向空隙率分布进行定义, 模拟研究竖罐内气体流动分布规律, 进而探讨影响竖罐内气流分布的主要因素及其影响规律. 研究表明, 冷却段区域, 气体流速沿径向由罐体中心至内壁逐渐增加, 最后在内壁附近突然增大; 影响竖罐内气流分布的主要因素为料层空隙率分布和罐体预存段内径. 空隙率径向偏析越严重, 预存段内径越大, 气流分布越不均匀.

**关 键 词:** 烧结矿; 余热回收; 空隙率; 气体流动; 数值模拟

中图分类号: TK 11+5

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)05-0660-05

## Numerical Investigation of Gas Flow in Vertical Tank for Recovering Sinter Waste Heat

FENG Jun-sheng<sup>1</sup>, DONG Hui<sup>1</sup>, ZHAO Yong<sup>2</sup>

(1. SEPA Key Laboratory on Eco-industry, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. ACRE Coking & Refractory Engineering Consulting Corporation, MCC, Dalian 116000, China. Corresponding author: DONG Hui, professor, E-mail: Dongh@smm.neu.edu.cn)

**Abstract:** Based on the porous media model, the mathematical model of the gas flow in sinter vertical tank was established according to the gas solid packed beds dynamic theory, and the boundary conditions of the mathematical model were determined. This model was conducted on the platform of FLUENT software. The radial voidage distribution of tank material layer was defined through the user defined functions (UDF). The basic law of the gas flow in vertical tank was studied and the main factors and influence rules influencing the gas flow distribution were discussed. The results showed that in the cooling section, the gas flow rate gradually increases from the tank center to the inner wall along the radial, and finally increases suddenly near the inner wall. The main factors that influence the gas flow distribution in vertical tank are the radial voidage distribution of bed layer and the pre-stored segment diameter. The more serious the voidage radial segregation is, and the larger the pre-stored segment diameter is, the more uneven the gas flow distribution in vertical tank is.

**Key words:** sinter; waste heat recovery; voidage; gas flow; numerical simulation

烧结余热资源的高效回收利用是目前降低烧结工序能耗乃至炼铁工序能耗的主要途径之一<sup>[1]</sup>. 针对传统余热回收方式存在着难以克服的弊端<sup>[2]</sup>, 借鉴干熄焦的结构工艺, 笔者及其所在研究小组提出了烧结竖罐式余热回收系统<sup>[3]</sup>. 余热回收罐体的本质是一种散料床式气固逆流热交换装置, 热烧结矿与冷却空气的热交换均在料层

空隙中进行, 气体流动是影响气固热交换的主要因素. 因此, 研究罐体内气流分布规律, 对强化罐体料层内气固热交换、提高烧结矿余热回收率都具有十分重要的意义.

由于烧结矿床层内气体流动机理的复杂性和不稳定性, 使得烧结矿层内的气固流动尚未形成较为系统的研究与分析, 进而使得烧结系统运行

更多是基于经验而缺乏理论上的指导. 目前, 有关立式烧结矿料层内气流运动和阻力计算的研究鲜有文献报道. 基于烧结矿层非结构化随机有限填充、床层几何因子(床层直径与颗粒当量直径之比)较大、颗粒尺寸范围广且形状因子较小等特点, 借鉴冶金、化工等领域中有关固定床流动的相关理论<sup>[4-7]</sup>来开展相关研究. 本文借助计算流体软件 FLUENT, 同时通过自定义函数 UDF 对料层径向空隙率分布及阻力分布函数进行定义, 计算罐体床层内速度场和压力场, 以此分析床层内气流分布规律及其影响规律, 为强化炉内气固热交换和提高余热回收率奠定理论基础.

## 1 模型的建立

### 1.1 物理模型及其假设条件

烧结余热回收罐体内, 冷却空气(即余热载体)分别自风帽口和罐体底部鼓入炉内, 与炉内炽热烧结矿进行热交换, 然后从斜道口排出; 来自于烧结机尾部的烧结矿自罐体顶部进入炉内, 自上往下缓慢下移, 与炉内的冷却空气进行热交换而得以冷却, 最后由罐体底部排出. 本文针对整个竖罐本体建立物理模型, 由于竖罐结构呈对称性, 故取竖罐的一半作为研究对象, 建立烧结竖罐二维几何模型, 生成非正交适体网格, 同时设置罐体内多孔介质区域为流体区域, 分为预存段、斜道区、冷却段, 网格系统如图 1 所示.

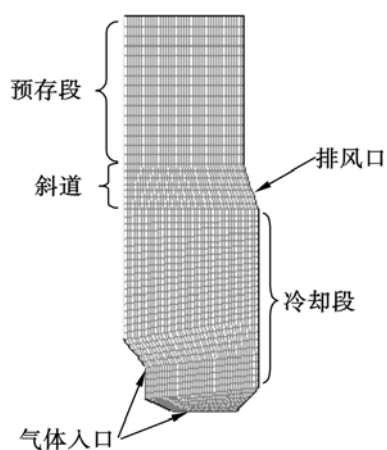


图 1 烧结竖罐网格系统

Fig. 1 Grid of sinter vertical tank

本质上而言, 床层内气体流动模型属移动床层内单相流动模型, 但考虑到移动床层内单相流动模型求解存在着较大难度, 故本研究将罐体内烧结矿层定义为连续的多孔介质区域. 同时, 竖罐结构及其流动现象均可近似为轴向对称, 且

近似为稳态流动. 为此, 对烧结竖罐的物理模型作以下基本假设: ①罐体内床层近似为各向同性的多孔介质, 忽略烧结矿本身的多孔性, 物性均匀; ②罐体内气体视为不可压缩流体, 忽略压力对密度变化的影响; ③床层空隙率仅考虑径向方向上的变化; ④忽略气固热交换对气体流动的影响, 即采用冷态模拟.

### 1.2 控制方程及边界条件

根据以上物理模型及基本假设, 基于 Darcy - Brinkman - Forchheimer 模型<sup>[8-9]</sup>的流体流动控制方程如下.

连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho_f u_f)}{\partial x} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(\rho_f r v_f)}{\partial r} = 0. \quad (1)$$

动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho_f u_f u_f}{\varepsilon} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\rho_f r v_f u_f}{\varepsilon} \right) &= - \frac{\partial(\varepsilon P)}{\partial x} + \varepsilon \rho_f g + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u_f}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \eta \mu \frac{\partial u_f}{\partial r} \right) &- \left[ \frac{\mu \varepsilon}{K} (u_f - u_s) + \right. \\ \left. \frac{\rho_f C_F \varepsilon}{\sqrt{K}} \sqrt{(u_f - u_s)^2 + v_f^2} (u_f - u_s) \right], & \quad (2) \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho_f u_f v_f}{\varepsilon} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\rho_f r v_f v_f}{\varepsilon} \right) &= - \frac{\partial(\varepsilon P)}{\partial r} + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v_f}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \eta \mu \frac{\partial v_f}{\partial r} \right) &- \left[ \frac{\mu \varepsilon}{K} v_f + \frac{\rho_f C_F \varepsilon}{\sqrt{K}} \times \right. \\ \left. \sqrt{(u_f - u_s)^2 + v_f^2} v_f \right]. & \quad (3) \end{aligned}$$

式中:  $u_f$  为气体沿  $x$  (轴向) 方向的流速分量,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $v_f$  为气体沿  $r$  (径向) 方向的流速分量,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\rho_f$  为气体密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $P$  为流体压力,  $\text{Pa}$ ;  $\mu$  为气体动力黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $\varepsilon$  为空隙率;  $C_F$  为惯性系数;  $K$  为渗透系数,  $\text{m}^{-2}$ ;  $g$  为重力加速度, 为  $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

惯性系数  $C_F$  和渗透系数  $K$  的表达式分别为

$$C_F = \frac{B}{\sqrt{A} \varepsilon^{3/2}}, \quad (4)$$

$$K = \frac{(\varphi d_p)^2 \varepsilon^3}{A(1 - \varepsilon)^2}. \quad (5)$$

式中:  $d_p$  为颗粒直径,  $\text{m}$ ;  $\varphi$  为颗粒形状系数, 实验测得;  $A, B$  为 Ergun 常数, 可由实验测得<sup>[10]</sup>.

上述控制方程的边界条件为

罐体底部:  $u_f = u_{f, \text{in}1}$ ,  $v_f = v_{f, \text{in}1}$ ; 风帽口:  $u_f = u_{f, \text{in}2}$ ,  $v_f = v_{f, \text{in}2}$ ; 斜道口:  $\frac{\partial u_f}{\partial n} = \frac{\partial v_f}{\partial n} = 0$ ,  $p = p_0$ ; 罐体

与风帽外壁:  $u_f = v_f = 0$ ; 对称轴线:  $\frac{\partial u_f}{\partial r} = 0, v_f = 0$ .

其中:  $u_{f,in1}, v_{f,in1}$  为罐体底部气体入口风速,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $u_{f,in2}, v_{f,in2}$  为风帽口处气体喷出速度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $n$  为边界面外法线方向.

### 1.3 自定义函数 UDF

料层空隙率是影响填充床内气固流动与传热的主要因素之一. 目前, 相当一部分数值计算中将床层的空隙率近似为一常数. 但在实际的床层结构中, 空隙率分布往往不是均匀的, 基于空隙率为常数的数值计算存在着较大的偏差. 基于此, 研究小组通过实验定量描述了空隙率  $\varepsilon$  沿着床层径向方向上的分布规律<sup>[11]</sup>.

此外, 惯性系数  $C_F$  和渗透系数  $K$  为动量方程中源项的系数, 两种系数的数值均随空隙率大小变化, 且两种系数是决定气体流动状态的决定

性因素. 因此, 采用自定义函数 UDF 将料层空隙率、惯性系数  $C_F$  和渗透系数  $K$  在罐体内空间上的变化编译到 FLUENT 软件内, 模拟计算不同空隙率空间分布下的气体流动规律.

### 1.4 模型验证

考虑到竖罐计算区域的网格数量会对计算精度产生影响, 在网格无关性验证满足条件之后, 再对模型的可靠性进行验证. 根据文献[10]中的阻力特性实验装置, 测得不同工况下的料层阻力损失, 然后, 采用本模型计算出此实验设备不同工况下的阻力损失. 通过模拟结果与实验结果的对比分析, 来验证模型的可靠性.

未筛分烧结矿、冷却风流量为  $1\,000\text{ m}^3/\text{h}$  (折合料层颗粒表观流速为  $1.92\text{ m/s}$ ) 时料层阻力损失模拟值与实验值的比较如表 1 所示.

表 1 单位料层阻力模拟值与实测结果比较

Table 1 Comparison between simulation and measuring values of per unit layer resistance

变量	0.5 m 料层单位阻力损失/Pa	0.3 m 料层单位阻力损失/Pa	0.8 m 料层单位阻力损失/Pa
实验值	1 339.33	1 117.20	1 200.50
模拟值	1 283.33	1 080.00	1 156.25
误差/%	4.18	3.33	3.69

从表 1 可以看出, 采用本模型所得单位料层阻力损失计算值与实验值基本吻合, 误差在 5% 以内, 因此本文所建立的模型是可靠的.

## 2 模拟结果与分析

影响床层内气体流动的主要因素有 3 方面: 物料填充特性, 如颗粒形状与尺寸等; 床层几何特性, 如床层几何因子、床层高径比、风帽位置等; 流体本身特性, 如气体表观流速、黏性等. 其中, 床层空隙率分布和边缘效应是床层几何特性和物料填充特性的综合表现特性; 冷却段高度和内径是决定床层几何因子和高径比的主要因素. 基于此, 本文拟讨论床层空隙率分布、罐体内径 (即冷却段和预存段内径的匹配)、风帽位置等因素对气体流动的影响.

模拟对象: 余热回收罐体, 预存段内径为  $7.94\text{ m}$ , 预存段高度为  $7\text{ m}$ ; 冷却段内径为  $8.99\text{ m}$ , 冷却段高度为  $7.1\text{ m}$ ; 风口斜道高度为  $1.5\text{ m}$ , 中心风道直径为  $3\text{ m}$ , 环形风道直径为  $1\text{ m}$ . 底部入口与中心风帽风量比为 3:1. 文中所

提气体流速皆为床层颗粒表观流速.

### 2.1 罐体内气体流动规律

图 2 为实际工况下罐体内气体流动的模拟结果. 从图 2 中可以看出: (1) 观察流线图可以发现, 大部分气流经过冷却段后进入斜道, 从斜道口直接排出, 少部分气流进入预存段后受到上部料层阻力折回, 而后经斜道口排出, 由于斜道出口的位置, 气体流动方向整体向内壁面偏移, 在斜道口处气流速度达到最大. (2) 罐体内气流分布沿径

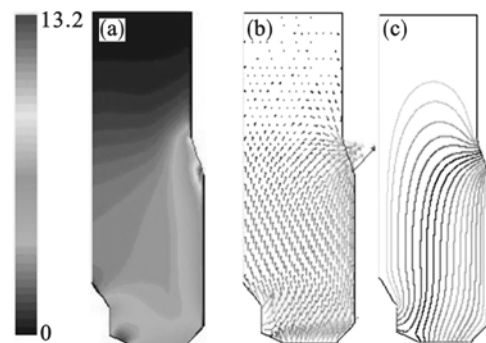


图 2 竖罐内气流分布

Fig. 2 Gas flow distribution in vertical tank

(a) —速度等值线云图; (b) —速度矢量图;  
(c) —流线云图.

向从对称轴心至内壁为先稀疏,后密集,气体流速逐渐变大,变化趋势为先平缓,后激增. 这种现象主要由于空隙率沿径向分布不均匀所导致. (3) 从速度等值线云图可以看出,从轴心到罐体内壁附近的范围内,速度增量非常小,观察速度矢量值,会发现这一部分速度增量可以忽略,基本保持恒定,之后速度增量逐渐变大,越接近罐体内壁,气

流速度增量越大,而且从流线图中等值线的疏密程度也可以看出气流的强弱,离内壁越近,气流通量越大,且在壁面处达到峰值.

## 2.2 料层空隙率分布对气体流动的影响

选取罐体高度方向上 1.5、3.5 和 6 m 3 个不同截面,观察不同粒径条件下其径向速度变化情况. 模拟计算结果如图 3 所示.

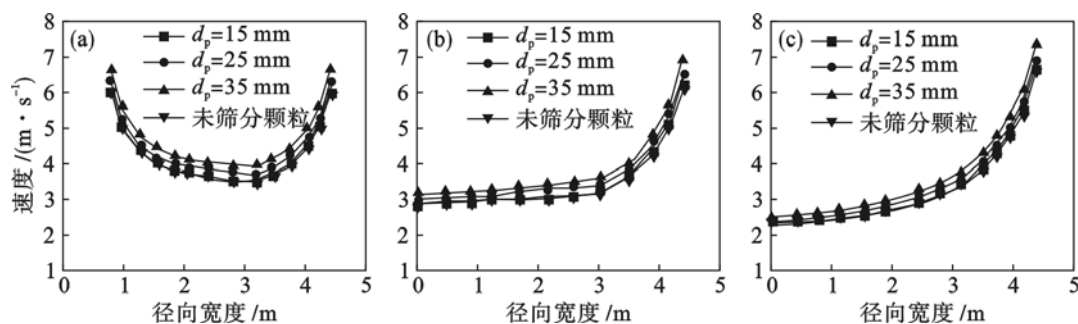


图3 不同罐高截面径向速度分布

Fig. 3 Radial velocity distribution at different high cross section

(a)—1.5 m; (b)—3.5 m; (c)—6 m.

从图 3 可以看出,对于 1.5 m 高的截面,由于其垂直于底部中心风帽处,气流在罐体径向宽度 3 m 之内的速度分布与其余两截面迥然不同;在径向宽度 3 m 之后,气流速度迅速增大,增长趋势与其他两截面基本相同. 由图 2 流线图可知,由于底部入口气流的作用,气体出中心风帽口后向罐体中心偏移,故而出现 1.5 m 高处气流速度过高的现象. 随着料层高度的增加,由于气体流动阻力不断增大和料层空隙率偏析的影响,气流开始向罐体内壁处偏移,导致罐体中心处的气流速度不断下降,越接近竖罐内壁处,气流速度越大. 另外,

对于 3 种不同高度截面,颗粒尺寸越大,在径向方向上其气流速度相对越大.

## 2.3 预存段内径对气体流动的影响

为了保证生产的连续性,烧结余热回收罐体必须设有预存段. 在斜道高度一定的情况下,预存段内径大小直接决定着斜道的长度与倾斜角度,从而影响气流的流向和大小. 实际罐体的预存段内径为 7.94 m,见图 4b. 保持预存段高度不变,将预存段内径依次减小至 5.94 m,增加至 8.99 m(等于冷却段内径),其计算结果分别见图 4a,图 4c.

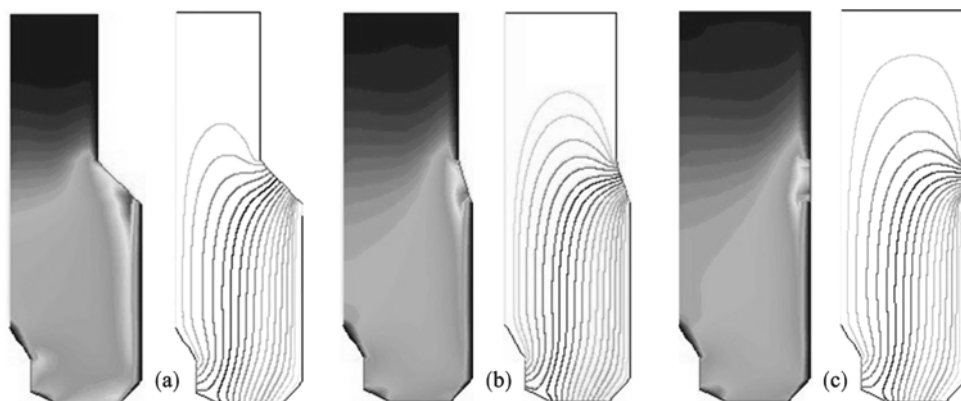


图4 不同预存段内径气体速度等值线云图和流线云图

Fig. 4 Velocity contour maps and vector maps of gas flow under different pre-chamber inner diameters

(a)—5.94 m; (b)—7.94 m; (c)—8.99 m.

从图 4 速度云图可以发现,冷却段内气流速度较为均匀,但随着预存段内径的增大,气流速度沿径向分布越来越不均匀,并且呈现出周边大,中

心小的现象,而且越接近斜道口,这种气流偏析的现象越严重. 图 4 的流线云图可以更加直观地观察斜道角度与宽度对气体流向的影响,斜道竖

直角度越小,气体流向偏析越严重.

从图 4 可以看出,预存段的内径越小,越有利于气流分布的均匀性,但预存段内径越小,大颗粒落入冷却室后更容易堆积到内壁处,造成空隙偏析现象更严重. 因此在设计罐体结构参数时,必须权衡好气体流动与布料方式两个关键问题,并通过改变布料方式来改善颗粒粒度的偏析.

## 2.4 风帽位置对气体流动的影响

在罐体中,风帽一般安装在冷却室下方的底锥斗中. 风帽位置对提高冷却效率和降低烧结矿出口温度波动起到很重要的作用. 为了考察风帽位置对气体流动的影响,将风帽位置在原来基础上提高 1m,模拟结果如图 5 所示.

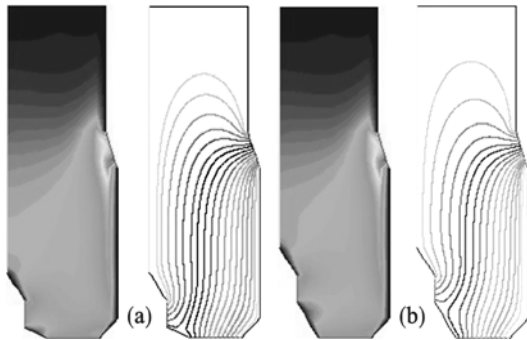


图 5 不同风帽位置气体速度等值线云图和流线云图

Fig. 5 Velocity contour maps and vector maps of gas flow under different wind cap position

(a)—低风帽; (b)—高风帽.

由图 5 可以看出,风帽的高低对罐体内整体气体流动影响不大,对烧结矿的冷却效果不会造成明显的影响.

## 3 结 论

1) 本文建立的模型能够说明烧结余热竖罐内气流分布的基本规律,并且模拟的结果与冷态实验结果基本相同.

2) 罐体内气体流动方向整体向内壁面偏移;除底部中心风帽处外,其余高度截面径向速度分布规律基本一致;罐体内气流分布沿径向从对称轴心至内壁为先稀疏,后密集,气体流速逐渐变大,变化趋势为先平缓,后激增,并且越接近罐体内壁,气流速度越大.

3) 影响竖罐内气体流动的主要因素为料层空隙率分布和预存段内径:空隙率径向偏析越严重,预存段内径越大,气流分布越不均匀;预存段内径越小,越有利于气流分布的均匀性,但会造成

空隙率径向偏析越来越严重,风帽位置高低对罐体截面径向方向上气体流速几乎没有影响.

## 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] Othman S H, Saleh M M, Demerdash M, et al. Mathematical model; retention of beryllium on flow-through fixed bed reactor of Amb-IR-120 [J]. *Chemical Engineering Journal*,2010,156(1):157-164.
- [5] Finn J, Apte S V. Relative performance of body fitted and fictitious domain simulations of flow through fixed packed beds of spheres [J]. *International Journal of Multiphase Flow*,2013,56:54-71.
- [6] Gao X, Zhu Y P, Luo Z H. CFD modeling of gas flow in porous medium and catalytic coupling reaction from carbon monoxide to diethyl oxalate in fixed-bed reactors [J]. *Chemical Engineering Science*,2011,66(23):6028-6038.
- [7] Natarajan S, Zhang C, Briens C. Numerical simulation and experimental verification of gas flow through packed beds [J]. *Powder Technology*,2005,152(1/2/3):31-40.
- [8] Yang D X, Yang Y P, Costa V A F. Numerical simulation of non-Darcian flow through a porous medium [J]. *Particuology*,2009,7(3):193-198.
- [9] Guo X Y, Dai R. Numerical simulation of flow and heat transfer in a random packed bed [J]. *Particuology*,2010,8(3):293-299.
- [10] 冯军胜,董辉,李明明,等. 烧结余热回收竖罐内固定床层的阻力特性[J]. 中南大学学报:自然科学版,2014,45(8):2566-2571.  
(Feng Jun-sheng, Dong Hui, Li Ming-ming, et al. Resistance characteristics of fixed bed layer in vertical tank for recovering sinter waste heat [J]. *Journal of Central South University: Natural Science*,2014,45(8):2566-2571.)
- [11] 曹峥. 烧结余热回收竖罐内料层空隙率分布规律的实验研究及应用简析[D]. 沈阳:东北大学,2012.  
(Cao Zheng. Experiment study on layer void fraction distribution in vertical tank and its application analysis [D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.)