

钒钛磁铁矿焙烧竖炉操作参数对传热过程的影响

骆旭峰¹, 张 晟¹, 孙用军², 董 辉¹

(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. 中航商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241)

摘 要: 以年产量 2×10^4 t 钒钛磁铁矿焙烧竖炉为研究对象, 建立竖炉内三维稳态传热数理模型. 通过 UDF(user defined functions) 将反应热以热源形式编译到固相能量方程中, 定义球团矿下移速度, 以竖炉内的焙烧时间和温度为判断指标, 研究操作参数对竖炉内传热过程的影响. 结果表明: 焙烧风流量、冷却风流量以及球团下移速度为 3 个主要影响因素, 其中球团下移速度对传热过程的影响更明显. 在球团直径为 38 mm, 焙烧时间为 4 ~ 6 h, 焙烧温度为 1 100 ~ 1 200 K 的条件下, 竖炉适宜的操作参数为: 冷却风流量 1 210 ~ 1 430 m³/h; 焙烧风流量 3 070 ~ 3 670 m³/h; 球团下移速度 0.258 ~ 0.290 m/h.

关 键 词: 钒钛磁铁矿; 焙烧竖炉; 传热; 数值模拟; 移动床

中图分类号: TK 11⁺2 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2019)01-0053-06

Effects of Operation Parameters on Heat Transfer in Shaft Furnace for Vanadium Titano-Magnetite Roasting

LUO Xu-feng¹, ZHANG Sheng¹, SUN Yong-jun², DONG Hui¹

(1. SEP Key Laboratory on Eco-Industry, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. AVIC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China. Corresponding author: DONG Hui, professor, E-mail: dongh@mail.neu.edu.cn)

Abstract: With a shaft furnace of 2×10^4 tons annual capacity for vanadium titano-magnetite roasting as the research object, a three-dimensional steady-state heat transfer mathematical model of shaft furnace was established. The reaction heat was compiled into solid phase energy equation in the form of internal heat source by UDF and the pellet velocity was defined. The roasting time and temperature were used as the evaluation indexes in order to study the effects of operation parameters on heat transfer performance. The results show that the roasting and cooling air volume rates and the pellets velocity are three main factors and the influence of the last one is the largest. Under the conditions of 38 mm pellet diameter, 4 ~ 6 h roasting time and 1 100 ~ 1 200 K roasting temperature, the suitable operating parameters are obtained as: the cooling air volume rate is 1 210 ~ 1 430 m³/h; the roasting air volume rate is 3 070 ~ 3 670 m³/h; and the moving down velocity of pellets is 0.258 ~ 0.290 m/h.

Key words: vanadium titano-magnetite; shaft furnace; heat transfer; numerical simulation; moving bed

焙烧竖炉是钒钛磁铁矿直接提钒工艺中的关键设备^[1-2], 具有能耗低、炉内气氛可控等特点. 焙烧过程在整个提钒工艺中至关重要, 其炉内的气固传热决定着钒钛磁铁矿焙烧的效果.

就床层本质而言, 钒钛磁铁矿焙烧竖炉属于大颗粒填充床的范畴. 可借鉴大颗粒填充床内的气固流动与传热的相关研究, Al-Sumaily 等^[3]分

别采用局部热力学平衡模型和非平衡模型分析了填充床内颗粒大小对流体流动和气固换热的影响. Pivem 等^[4]建立了逆流式移动床气固热力学非平衡传热模型, 讨论了基本物性参数、气固热当量等因素对传热过程的影响. Nijemeisland 等^[5]通过 CFD 模拟了圆柱形颗粒在竖管内的传热行为, 讨论了颗粒有无内热源对传热过程的影响. 蒋

鹭等^[6]以欧拉多向流模型为基础,建立了南钢球团竖炉的三维数理模型,探讨了不同操作参数对竖炉炉温及焙烧产物 Fe_2O_3 产率的影响规律. Mei 等^[7]基于平均 Re 的 $N-S$ 方程和 $\kappa-\varepsilon$ 模型的双能量方程,对球团竖炉整个均热段和冷却塔中共轭混合对流与三维湍流的热传递进行了数值模拟,并研究了气体 Re 和 Gr 对炉内温度场分布的影响.

综上所述,目前针对竖炉局部热力学非平衡的研究较少,模拟过程中通常将气固温度看作一致;而且气体动量方程阻力源项采用传统经验关联式,模拟结果与实际情况偏差较大;有关钒钛磁铁球团焙烧竖炉内气固传热过程及传热系数尚未进行针对性研究. 针对以往研究的不足,本文基于局部热力学非平衡模型,通过软件二次开发功能 UDF,实现钒钛磁铁矿竖炉数学模型的 2 点改进:1)将竖炉内化学反应热以内热源的形式编译到能量方程中;2)将在自制实验平台获得的料层压降公式定义到动量方程源项中. 并在将球团矿下移速度编译到模型中的前提下,建立了焙烧竖炉内气固逆流式气固传热过程三维稳态数值模型. 基于此,研究操作参数对传热过程的影响规律,获得中试焙烧竖炉适宜的操作参数,为后续的中试焙烧工艺的改进奠定基础.

1 模型的建立

1.1 物理模型

本文以辽西某地区中试竖炉为参照对象,建立竖炉的三维物理模型,其结构如图 1 所示. 该竖炉为双炉膛对称结构,因此探究单侧炉膛内的温

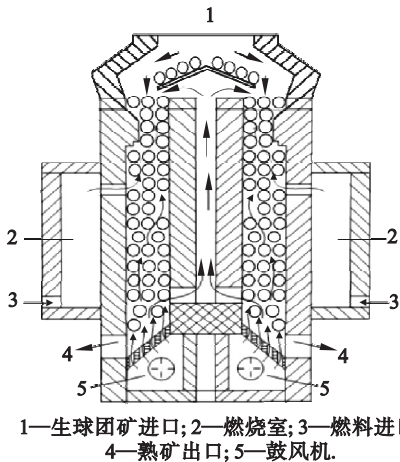


图 1 钒钛磁铁球团焙烧竖炉结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of shaft furnace for vanadium titano-magnetite roasting

度场和流场的分布就可以确定整座竖炉的热工行为. 图 2 为竖炉单侧的三维物理模型,竖炉炉高 6.2 m,炉膛宽度 1.1 m,长 4.2 m.

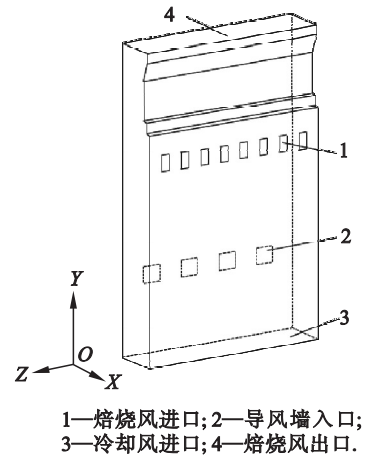


图 2 三维物理模型

Fig. 2 Three-dimensional physical model

竖炉多进口、多出口的特性导致炉内气固流动及传热过程非常复杂,在确保计算精度的要求下,对焙烧竖炉的物理模型进行如下简化:

- 1) 钒钛磁铁矿焙烧竖炉运行工况稳定,认为各参数在一定的范围内恒定;
- 2) 将焙烧竖炉内气体视为不可压缩流体,忽略压力对其密度的影响;
- 3) 钒钛磁铁矿球团体积随温度变化很小,忽略不计,将整个床层看作各向同性的多孔介质.

1.2 数学模型

本文所采用的气固传热与气体流动控制方程如下:

连续性方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_f u_j) = 0. \quad (1)$$

动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_f u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}(P_{ij}) + g_i - f_i + S_i. \quad (2)$$

式中: ρ_f 为空气密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; u_i, u_j 分别为气体在 i, j 方向上的速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; P_{ij} 为表面的压力矢量,包括静压力和气体黏性压力; g_i 为气体在 i 方向上的体积作用力, $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$; f_i 为作用在单位体积气体上的反方向阻力, $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$.

在动量守恒方程式(2)中增加动量损失源项 S_i ,用来描述气体流经竖炉内多孔介质时的动量输运过程:

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} u_i + \frac{1}{2} C_2 \rho_f |u| u_i \right). \quad (3)$$

式中: $1/\alpha$ 为黏性阻力系数; C_2 为惯性阻力系数;

μ 为气体动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; u 为气体流动速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

通过实验获得描述焙烧竖炉内气流阻力特性的修正 Ergun 方程^[8], 基于此得到多孔介质区域黏性阻力系数和惯性阻力系数.

$$\frac{\Delta p}{L} = 404 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu u}{d_p^2} + 2.4 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho u^2}{d_p}, \tag{4}$$

$$\frac{1}{\alpha} = 404 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3 d_p^2}, \tag{5}$$

$$C_2 = \frac{4.8(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3 d_p}. \tag{6}$$

式中: ε 为床层空隙率; d_p 为钒钛磁铁矿球团当量直径, m .

考虑到多孔介质计算域内, 流体和固体为不同的连续介质, 采用基于局部热力学非平衡状态的稳态双能量方程对其进行求解^[9-10], 对竖炉内的气体和钒钛磁铁矿球团分别建立能量方程.

气相能量方程为

$$\rho_f c_p u_f \cdot \nabla T_f = \varepsilon \nabla \cdot (\lambda_f \nabla T_f) + h_v (T_s - T_f). \tag{7}$$

固相能量方程为

$$(1 - \varepsilon) \rho_s c_s u_s \cdot \nabla T_s = (1 - \varepsilon) \nabla \cdot (\lambda_s \nabla T_s) - h_v (T_s - T_f) + \Phi. \tag{8}$$

式中: ρ_s 为钒钛磁铁矿球团的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; c_s 和 c_p 分别为钒钛磁铁矿球团和空气的比热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; u_s 和 u_f 分别为颗粒下移速度和气体表观流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; T_s 和 T_f 分别为钒钛磁铁矿球团和空气温度, K ; λ_s 和 λ_f 分别为钒钛磁铁矿球团和空气的导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; h_v 为钒钛磁铁矿球团与气体间的对流体积换热系数^[11], $\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$; Φ 为钒钛磁铁矿球团焙烧化学反应内热源项, $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$.

1.3 边界条件

竖炉下部冷却风入口采用速度入口边界条件, 将导风墙的下出口和竖炉上出口设为压力出口, 焙烧风入口采用速度入口边界条件. 其余壁面设为绝热面, 不考虑炉壁的散热损失.

1.4 模型验证

根据中试竖炉的产量计算得出, 单侧炉膛的球团下移速度为 0.322 m/h , 此标准工况下, 焙烧风的流量和温度分别为 $3456 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 1373 K , 冷却风流量和温度分别为 $3024 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 300 K . 由于钒钛磁铁矿在竖炉内的各部分发生不同化学反应, 经计算得出该工况条件下炉内的化学反应热为 665 W/m^3 ^[8]. 由于不同的焙烧温度所放出的反应热不同, 因此将化学反应热看作一个随高度变

化的函数.

表 1 为中试竖炉正常运行工况下不同高度位置空气温度测量值和数值模拟结果对比情况, 模拟结果的准确度是由实际测试结果与模拟结果的相对误差来衡量的. 由表 1 知, 测试值与模拟计算值存在一定的误差, 最大误差为 7.91% , 最小误差为 3.38% , 均在允许误差范围内. 由此可知数值计算模型符合计算要求, 可用于探究炉内气固传热过程的数值研究.

表 1 炉内空气温度测量值和数值模拟结果对比
Table 1 Comparison of measured temperature and numerical simulation of gas in furnace

编号	纵向高度/m	测试温度/K	模拟温度/K	相对误差/%
1	5.6	542	576	6.27
2	4.0	1 190	1 130	5.04
3	3.8	1 146	1 081	5.67
4	3.3	947	979	3.38
5	2.6	784	819	4.46
6	1.8	683	737	7.91

2 操作参数影响与分析

利用已建立的模型, 分别探究影响竖炉内气固传热过程的 3 个主要参数: 焙烧风流量 (Q_r)、冷却风流量 (Q_c) 和球团矿下移速度 (v_s) 对竖炉内气固传热过程的影响规律.

标准工况下竖炉内钒钛磁铁矿球团和气体温度分布如图 3 所示. 由图可知, 球团矿在焙烧段的温度分布不均匀, 靠近焙烧风入口的位置, 球团的温度较高, 而远离焙烧风入口的位置, 球团的温度较低.

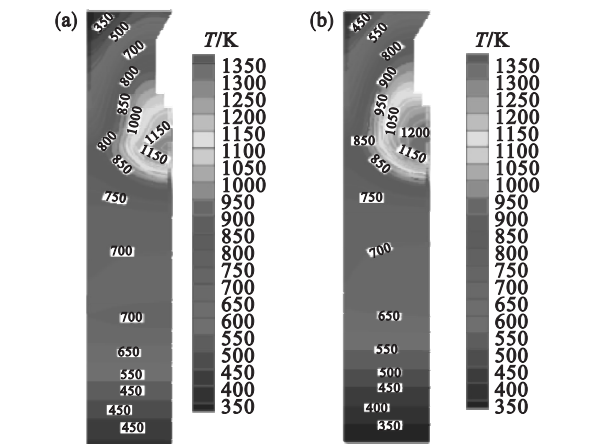


图 3 竖炉内球团与气体温度分布云图
Fig. 3 Pellets and gas temperature distributions in roasting shaft furnace
(a)—球团温度; (b)—气体温度.

根据已有研究,为了达到焙烧要求,球团矿在竖炉内应达到的焙烧时间为 4~6 h,辽西新型钒钛磁铁矿的适宜焙烧温度为 1 100~1 200 K^[12]. 针对均热温度过低及焙烧时间过短的情况,本文在此提出以焙烧时间为竖炉焙烧效果的评价指标,通过研究竖炉操作参数变化对竖炉焙烧时间的影响,确定适宜的操作参数. 焙烧时间 t 的计算公式为

$$t = H/v_s. \tag{9}$$

式中: t 为焙烧时间, h; H 为达到焙烧温度料层高度, m; v_s 为钒钛磁铁矿球团下移速度, m/h.

2.1 焙烧风流量的影响

当 v_s 和 Q_c 保持不变时,焙烧风的通入量会影响 t 和温度. 现有竖炉在实际生产中 Q_r 为 3 456 m³/h,在 Q_c 为 1 512 m³/h 的基础上逐渐改变 Q_r . 考察 Q_r 为 2 523, 2 765, 2 995, 3 214, 3 456, 3 698, 3 905, 4 147, 4 389 m³/h 时的温度分布,并计算 t ,如图 4 所示. 当 $Q_r = 2 523$ m³/h 时, $t = 3.65$ h, 平均焙烧温度为 1 010 K; 当 $Q_r = 2 995$ m³/h 时, $t = 4.6$ h, 平均焙烧温度为 1 087 K,此时满足保温要求; 当 $Q_r = 4 389$ m³/h 时,焙烧时间达到模拟最大值为 6.7 h,此时平均焙烧温度达到 1 195 K.

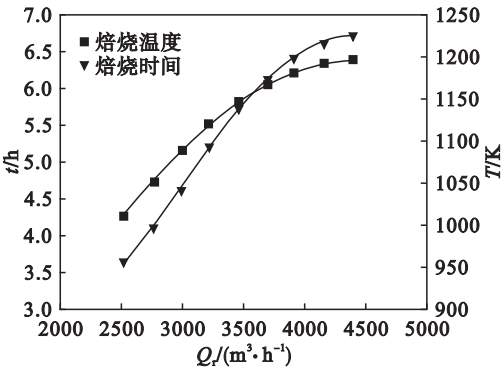


图 4 焙烧风量对球团焙烧时间及焙烧温度的影响
Fig. 4 Effect of roasting air volume rate on pellets roasting time and temperatures

随着 Q_r 的增加,焙烧时间和温度会随着增加,后两者与前者呈非线性关系. Q_r 在 2 523~3 214 m³/h 时, t 随着 Q_r 的增加变化速率逐渐增大;而当 Q_r 在 3 214~4 389 m³/h 时,此时 t 的变化速率逐渐减小,原因在于当球团下移速度和冷却风量保持不变时,增大 Q_r 会使钒钛磁铁矿球团温度升高,竖炉沿高度方向达到保温温度要求的区间更大, t 随之增长;而随着 Q_r 的增加,球团温度升高,焙烧风温度与球团温差减小,换热速率降低,球团焙烧温升速率降低. 考虑到在达到保温

要求的同时,避免炉内温度过高引起的固结现象以及能源浪费,应保持 Q_r 在 3 070~3 670 m³/h 时比较适宜.

2.2 冷却风流量的影响

在给定的初始冷却风流量条件下,模拟得到的结果显示竖炉焙烧段温度偏低, t 无法达到焙烧要求,这是由于 Q_c 过高造成的. 针对此问题,在实际生产 Q_c 为 3 024 m³/h 的基础上,逐渐减少 Q_c ,模拟 Q_c 为 3 024, 2 721.6, 2 419.2, 2 116.8, 1 814.4, 1 512, 1 210 m³/h 的温度分布,并计算 t ,拟合曲线图如图 5 所示. 从图 5 中可以看出,当 Q_c 为 1 210 m³/h 时, $t = 5.3$ h, 平均焙烧温度为 1 150 K,满足生产要求. 图 5 中, Q_c 与 t 和温度呈非线性关系,因为随着 Q_c 的增大,流速逐渐增大,换热速率加快,单位时间内换热量增多,钒钛磁铁矿球团沿高度方向的降温速率逐渐加快, t 缩短且变化速率加快. 而当温度降低时,球团和空气比热减小,温差减小导致换热速率降低,焙烧温度降低速率逐渐减小. 在满足保温要求的前提下, Q_c 应保持在 1 210~1 430 m³/h 比较合适.

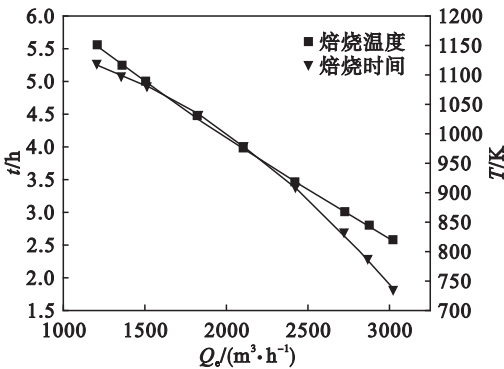


图 5 冷却风量对球团焙烧时间及焙烧温度的影响
Fig. 5 Effect of cooling air volume rate on pellets roasting time and temperatures

2.3 球团下移速度的影响

为了使现有竖炉的传热效果得到最大化提升,在确保钒钛磁铁矿球团在竖炉内的焙烧时间(4~6 h)充足和产量一定的前提下进行模拟,模拟过程中,通过改变竖炉的结构尺寸改变 v_s ,竖炉原长度为 4.2 m,表 2 为改变竖炉长度计算得到的下移速度 v_s .

现有竖炉的 v_s 为 0.322 m·h⁻¹,逐渐改变 v_s ,模拟 v_s 分别为 0.193, 0.225, 0.258, 0.29, 0.354, 0.386, 0.419, 0.451 m·h⁻¹ 时所得到的 t . 图 6 为 $Q_r = 3 160$ m³/h, $Q_c = 1 468$ m³/h 时的 t 和焙烧温度随 v_s 的变化关系曲线,并与实际工况作对比分

析,从图中可以看出:随着 v_s 的不断增大, t 逐渐缩短.模拟结果显示 t 与 v_s 呈非线性关系,说明 t 不仅受到 v_s 的影响,还与球团自身氧化反应放出化学反应热量有关. Q_r 和 Q_c 一定, v_s 越大,单位质量的球团矿化学反应热总量越低,达到焙烧要求的面积越小,焙烧段的高度会相应减小.球团经预热到一定温度后才发生化学反应.随着球团下移速度的不断增加,气固换热速率加快,而焙烧风提供的热量一定.所以焙烧段球团温度的升高速率随 v_s 的增加而降低,进而使 t 随 v_s 变化的变化量越来越小.

表 2 改变竖炉长度球团下移速度的变化

Table 2 Change of pellets velocity with the change of shaft furnace length

编号	长度变化量/%	竖炉长度/m	$v_s/(m\cdot h^{-1})$
1	+40	5.88	0.193
2	+30	5.46	0.225
3	+20	5.04	0.258
4	+10	4.62	0.29
5	-10	3.78	0.354
6	-20	3.36	0.386
7	-30	2.94	0.419
8	-40	2.52	0.451

由图 6 可知,当 $v_s=0.193\text{ m/h}$ 时,球团在炉内的 $t=8.02\text{ h}$,平均焙烧温度为 1170 K ,焙烧时间过长且 v_s 过小,不满足生产要求;当 $v_s=0.258\text{ m/h}$ 时, t 缩短至 6 h ,平均焙烧温度降低至 1115 K ,此时已经满足保温要求,说明 t 和 v_s 都比较合适;当 $v_s=0.322\text{ m/h}$ 时, $t=4.9\text{ h}$,平均焙烧温度为 1078 K ,基本满足保温要求; v_s 逐渐增大至 0.451 m/h 时, $t=3.43\text{ h}$,下移速度过大, t 不满足生产要求.经计算, v_s 应控制在 $0.258\sim0.29\text{ m/h}$ 较为适宜.

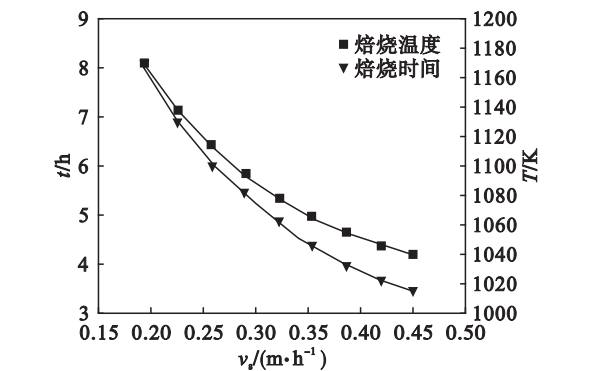


图 6 球团下移速度对球团焙烧时间及焙烧温度的影响

Fig. 6 Effect of pellets moving down velocity on roasting time and temperatures

3 结 论

1) 以局部热力学非平衡模型为基础,建立钒钛磁铁矿焙烧竖炉的三维稳态气固传热模型,计算竖炉在实际工况条件下炉内各段气体温度值与实际测量值的最大误差小于 7.91% ,验证了数值模型的可靠性.

2) 随着焙烧风流量的增加,钒钛磁铁矿的焙烧时间和温度逐渐增加,且焙烧时间增长速率先增大后减小,最后趋于定值;随着冷却风流量的减少,钒钛磁铁矿的焙烧时间和温度逐渐增加;随着球团下移速度的增加,竖炉内球团矿焙烧时间和温度逐渐减小,且变化速率逐渐降低,二者呈非线性关系.

3) 对于焙烧面积为 6.8 m^2 的中试竖炉,在要求焙烧时间为 $4\sim6\text{ h}$ 的情况下,其适宜的操作参数为:冷却风流量 $1\,210\sim1\,430\text{ m}^3/\text{h}$;焙烧风流量 $3\,070\sim3\,670\text{ m}^3/\text{h}$;竖炉球团下移速度 $0.258\sim0.29\text{ m/h}$.

参考文献:

[1] 张井凡,董辉,蔡九菊,等.一种竖炉式氧化钠化焙烧方法及装置;201110371297.9 [P].2012-04-11.
(Zhang Jing-fan, Dong Hui, Cai Jiu-ju, et al. Method and device of oxidation-sodium roasting with shaft furnace type: 201110371297.9 [P].2012-04-11.)

[2] 董辉,冯军胜,李鹏,等.一种新型钒氧化钠化焙烧竖炉的研究[J].工业炉,2012,34(6):5-8.
(Dong Hui, Feng Jun-sheng, Li Peng, et al. Research of a new-style roasting shaft furnace of vanadium oxide [J]. Industrial Furnace,2012,34(6):5-8.)

[3] Al-Sumaily G F, Nakayama A, Sheridan J, et al. The effect of porous media particle size on forced convection from a circular cylinder without assuming local thermal equilibrium between phases[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2012,55(13/14):3366-3378.

[4] Pivem A C, Lemos M J S D. Numerical simulation of a crossflow moving porous bed using a thermal non-equilibrium model [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013,67(4):311-325.

[5] Nijemeisland M, Dixon A G, Stitt E H. Catalyst design by CFD for heat transfer and reaction in steam reforming [J]. Chemical Engineering Science,2004,59(22):5185-5191.

[6] 蒋鹭,黄山,王天才,等.球团竖炉气固流动与焙烧过程耦合的三维数值模拟[J].东南大学学报(自然科学版),2012,42(2):301-307.
(Jiang Lu, Huang Shan, Wang Tian-cai, et al. Three-dimensional numerical simulation of gas-solid flow and roasting process coupling in pelletizing shaft furnace [J]. Journal of Southeast University (Natural Science),2012,42(2):301-307.)