

褐铁矿磁化焙烧过程回转窑内温度场数值模拟

王明华, 李双, 吕晓宏, 张朔达, 官振宇, 娄太平

(东北大学冶金学院, 沈阳 辽宁 110819)

摘要: 回转窑是一种重要的加热用工业大型设备, 测定和计算其内部的热量、温度分布对于合理设计转窑以及运行过程中物料的流量、加热温度等工艺参数的设定, 以期达到节省能源的目的具有重要意义。本文分析了褐铁矿在回转窑内部还原焙烧过程中热量、燃气温度、物料温度、窑壁温度随窑长的变化, 计算结果与测定结果较一致, 对于理解热量以及温度的分布规律, 合理安排烟气燃烧和物料分布的工艺参数具有一定意义。

关键词: 褐铁矿; 磁化焙烧; 回转窑; 温度场数值模拟

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.02.010

中图分类号: TD985 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2023)02-0052-04

褐铁矿成分主要是 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, 铁含量 TFe 一般在 30%~60% 范围内, 是以铁的氢氧化物为主, 包含纤铁矿、赤铁矿、石英、粘土等, 含吸附水及毛细管水等杂质的混合物, 因而成分变化很大。褐铁矿是含铁矿物经过氧化和分解而形成, 尤其是金属硫化物矿床的地表部分, 矿石遭受氧化后, 常形成褐铁矿。此外, 湖沼沉积成因的褐铁矿常成较大的聚积, 可成为炼铁的矿物原料。

褐铁矿铁品位不高, 而磨矿容易出现泥化现象, 采用常规选矿方法很难得到品位较高、回收率较高的铁精矿。采用磁化焙烧技术使褐铁矿等弱磁性铁矿物转化为强磁性铁矿物, 然后采用弱磁选选别获得铁精矿作为处理难选铁矿资源的有效工艺, 近年来取得了巨大进展。磁化焙烧是实现复杂难选铁矿高效分选的一种重要方法^[1]。

回转窑是很多冶金生产过程中加热煅烧的核心部件, 其通过旋转能使物料和热源充分接触, 提高了物料的加热效率。其处理的能力和能源的消耗共同决定了冶金工业发展的水平。回转窑设备的能量损失主要来源于其外壳表面对外散热以及窑内出口余热烟气, 相关研究表明其能量损失占原料加热煅烧生产线总能耗的 30%~40% 左右。因此, 减少或者回收回转窑设备的能量损失

对于冶金工业的节能减排具有重要意义。本文主要分析回转窑作为褐铁矿磁化焙烧过程中热量、热源温度、物料温度以及内壁温度随窑长变化, 为建立合理的磁化焙烧工艺条件, 提高能源利用效率提供数据支持。

1 回转窑传热过程

目前回转窑使用的燃料大多是天然气, 其优点是污染小、价格适中。燃料在一次风的携带下进入窑内迅速扩散, 在二次风旋转射流的带动下与高温气体接触, 迅速升温发生反应。燃料升温至火点的过程受高温烟气回流及二次风、回转窑内壁、火焰辐射等因素的影响, 该过程中燃料吸收的热量可以用以下公式计算:

$$Q_c = (c_{fuel}m_{fuel} + c_{pa}m_{pa})(T_f - T_0)$$

式中, Q_c -燃料着火点, J;

c_{fuel} -燃料定压比热容, J/(kg·K);

c_{pa} -一次风定压比热容, J/(kg·K);

m_{fuel} -燃烧器燃煤量, kg/s;

M_{pa} -一次风质量流量, kg/s;

T_f -燃料着火温度, K。

Beer 通过实验获得了适用于双通道燃烧器火焰长度估算的经验公式^[1]。

收稿日期: 2021-02-05

作者简介: 王明华 (1971-), 男, 博士, 副教授, 主要从事固体废弃物研究。

$$F_L = 6d_0(1 + AF) \left[\frac{\rho_c}{\rho_{cp}} \right]^{1/2} \left[\frac{\rho_c}{\rho_{sa}} \right]^{1/2}$$

式中, F_L -火焰长度, m;

d_0 -燃烧器当量直径, m;

AF -化学计算数之比;

G -动量流量, $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$;

ρ_e -当量气固密度, kg/m^3 ;

ρ_{cp} -燃烧产物密度, kg/m^3 ;

ρ_{sa} -当量二次风密度, kg/m^3 。

剩余燃烧量和火焰长度的关系采用经验公式进行分析:

$$w_{fuel} = \exp \left[-3.912 \frac{L_i^2}{L_f^2} \right]$$

式中, w_{fuel} -剩余燃料百分比;

L_i -距离喷嘴的距离, m;

L_f -火焰总长度, m。

将上式整理后可获得单个微元段内燃料燃烧反应的反应热为:

$$Q_{comb} = -3.912 \frac{2L_i}{L_f} m_{fuel} q_{fuel} \exp \left[-3.912 \frac{L_i^2}{L_f^2} \right] \quad (1)$$

回转窑的传热过程为首先燃气将热量传递给热风, 热风将热传递给物料内层和未被物料覆盖的窑内壁。未被覆盖的窑内壁的热量传递给窑外壁和覆盖且接触的物料外层。当传热温度较低时, 对流传热是主要形式, 温度高时, 辐射是主要传热方式。

回转窑与一般化工反应器的不同点之一是窑体绕轴线做回转运动, 这使得窑内对流传热过程与气体流经管道换热存在较大差别, 使用系统的经验关联式会有较大误差。Tscheng 利用实验装置研究了回转圆通内气体和物料、窑壁间的经验公式。该实验装置长 2.44 m, 直径 0.2 m, 采用预热空气加热物料, 因此气体黑度可近似为 0; 采用油封的热电偶测温, 测温点位于窑壁内 6.7 mm 处; 实验物料为平均直径为 0.73 mm 的细沙。经过多次实验进行数据分析, 得到气体与床层、气体与未覆盖壁面对流传热经验公式为^[2-3]:

$$h_{g-eb}^c = 0.46 \text{Re}^{0.535} R_w^{0.104} \eta^{-0.341} \text{kg}/De$$

$$\text{Re} = \rho_g u_g D_e / \mu_g$$

$$\text{Re}_w = \rho_g D_e^2 \omega / \mu_g$$

$$De = 0.5D(2\pi - \beta + \sin\beta) / (\pi - \beta/2 + \sin\beta/2)$$

$$h_{g-eb}^c = 0.46 * (\rho_g D_e)^{0.535} (\rho_g D_e^2 \omega / u_g)^{0.104} \eta^{-0.341} \text{kg}/De = 0.46 * \rho_g^{0.639} De^{-0.257} (\omega / u_g)^{0.104} \eta^{-0.341} k_g$$

式中, k_g -气体导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;

D_e -回转窑特征长度, m;

ρ_g -气体密度, kg/m^3 ;

η -回转窑填充率;

μ_g -气体运动粘度, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$;

ω -回转窑转动角速度, rad/s ;

D -回转窑内径, m。

由式可知, 窑体转动加强了气体的湍流程度, 提高了气体和物流的对流换热系数。此外, 回转窑填充率、转速等操作参数均对窑内壁、物料、烟气间的对流传热过程产生影响。对于要外壁和外界环境的对流传热过程, 考虑回转窑转动速度对换热系数的影响, 可使用旋转圆周对流传热经验公式:

$$h_{sh-e}^c = \frac{0.11[(0.5R w^2 + Gr)\text{Pr}]^{0.35} ke}{D_{sh}}$$

式中, k_{en} -外界空气的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;

D_{sh} -窑外壁直径, m。

回转窑作为一种常见的反应器, 自 19 世纪 80 年代出现以来, 经过多次优化改良, 现已是一种较为成熟的焙烧设备, 广泛应用于水泥生产、石油焦煅烧以及冶金生产等领域, 可以焙烧包括块料、粉料及浆料在内的多种物料。其具有易操作维护、生产连续性好等优点, 缺点在于质量不均匀、耗能高。根据焙烧物料的差异, 回转窑在结构尺寸以及内部构造上有较大的差异。例如用于水泥等浆料焙烧的湿窑, 窑长一般超过 100 m; 用于冶金领域的回转窑也基于物料特性的差异长达 15~80 m 不等。此外不同类型的回转窑所配备的燃烧器和余热回收设备也有很大不同。回转窑通过窑头鼓入热空气或者布置烧嘴对物料进行加热, 为防止物料过热或保证窑内气氛, 根据焙烧要求还可通入二次风、三次风辅助燃烧、换热。

由于假设回转窑稳态运行, 窑内外壁温度不随时间变化, 根据能量守恒定律, 物料和烟气传递给内壁的热量完全经由窑外壁散入到外界环境中^[4]。

$$q_{w-sh} = q_{g-ew} + q_{eb-ew} + q_{cb-cw} \quad (2)$$

$$q_{w-sh} = q_{sh-en} \quad (3)$$

综合考虑回转窑内各组元间的传热过程, 外

界向物料微元体内传递的热量主要包括：气体与物料的换热 (q_{g-eb})、覆盖窑壁与物料的换热 (q_{cw-eb})、未覆盖窑壁与物料的换热 (q_{ew-eb})。在不考虑因化学反应造成的质量亏损时，物料的能量守恒控制方程展开如下：

$$m_b C_b \frac{dT_b}{dx} = q_{g-eb} + q_{ew-eb} + q_{cw-eb} + \Delta H_{b,n} \quad (4)$$

式中， $\Delta H_{b,n}$ -磁化焙烧过程的反应热，单位为 J/kg。

类似于物料微元体能量守恒的建立方法，将火焰燃烧近似为化学反应热，得到气相的能量守恒方程如下：

$$m_g C_g \frac{dT_g}{dx} = q_{g-eb} + q_{g-ew} + \Delta H_{g,n} \quad (5)$$

式中， $\Delta H_{g,n}$ -气相空间燃烧过程反应热，J/kg；

C_g -气体定压比热容，单位 J/(kg·K)。

下标中，b-物料；eb-料床表面；g-气体；cw-被物料覆盖的窑内壁；ew-未被覆盖的窑内壁；sh-窑外壁；en-外界环境。

天然气燃烧释放的热量 35.588 MJ/Nm³，设流量为 2 L/min。D_{sh}=2；P_r=0.5/(5*10⁻⁵)=50000；封闭状态下，空气的导热系数为 0.023 W/m·k； $\alpha_g = 15/360 * 2 * 3.1416 = 0.2618$ ； $\psi = 0.1 - 0.5$ ；dp 当量直径 0.000048；k_g=λg；φ填充角 2/3pi，2.0944；kb=0.26-0.29；ρ4.9-5.3*1000；cb: 743；ω0.15；Cb = 0.743 kJ/(kg·°C)。

以 C 语言编程，先根据 (2)、(3) 式迭代计算 Tw，后用 R-K 四阶龙格-库塔法解微分方程组，最后给出数值解，计算流程见图 1。

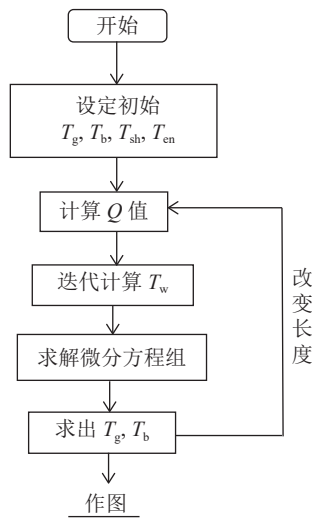


图 1 计算流程

Fig.1 Calculation flow chart

2 模型的验证

褐铁矿磁化焙烧的化学反应方程式为^[5]：

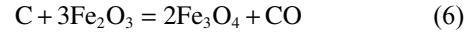


图 2 给出了反应的热力学数据。

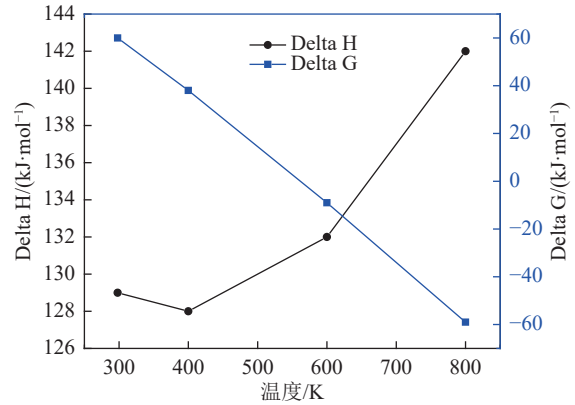


图 2 磁化焙烧反应的焓变、吉布斯自由能变和温度的关系

Fig.2 Relationship between the enthalpy change, Gibbs free energy change and temperature of the magnetization roasting reaction

由图 2 可知，只有当温度超过 560 K 时，ΔG 为负值，反应才能发生。反应的ΔH值一直为正，说明反应一直吸热，需要持续供给热量，具体吸热值随物料温度而变化，给出在方程 (4) 中。

图 3 给出了燃料燃烧热量随窑长的变化，该数值是由方程 1 计算得出。表明热量在随窑长先是在 0.5 m 处为 4951.33 J，而后逐渐上升至 3.5 m 处达到 21674.31 J，之后逐渐下降至 10 m 处为 2000.04 J。这种趋势是根据实际情况得到的模型计算而得，能很好的与实际情况一致。计算发现，热量值与传导、辐射以及反应热相比巨大，大了

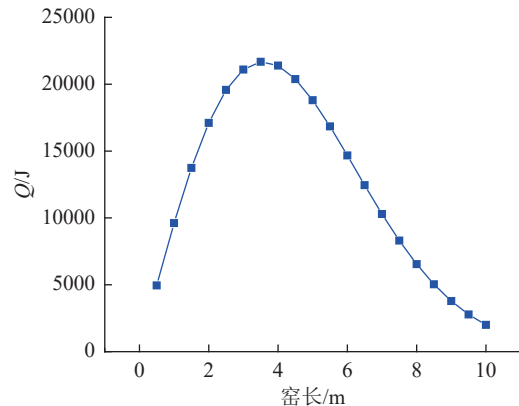


图 3 燃料燃烧热量随窑长的变化

Fig.3 Variation of fuel combustion heat with kiln length

2~3个数量级,起到了决定性作用。

图4给出了加热燃气温度随窑长的变化。由于这个模型是经验模型,所以计算点和测量点温度比较一致。燃气温度先是由800 K增加到1200 K,之后逐渐下降,在窑出口处下降至750 K。这种下降是由于燃气流量窑长逐渐下降同时向物料、窑壁传导热量引起的。

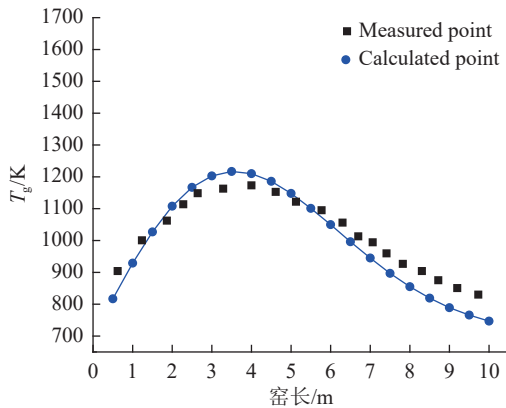


图4 加热燃气温度随窑长的变化

Fig.4 Variation of heating gas temperature with kiln length

图5给出了物料温度随窑长的变化情况。物料温度在1~5 m处温度由650~850 K稳步上升,到6 m处开始下降,物料在高温区能稳定保持30 min,这时反应能进行完全,之后温度迅速下降,能避免物料被二次氧化。

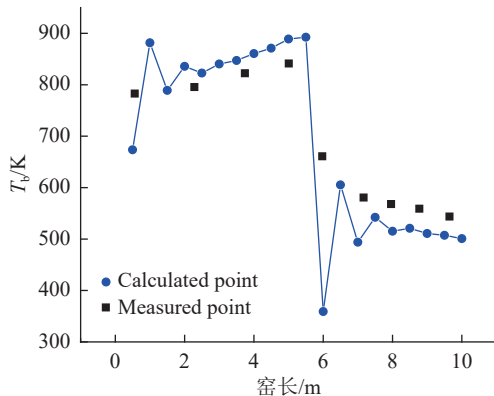


图5 物料温度随窑长的变化

Fig.5 Change of material temperature with kiln length

由图6可见,窑壁温度随窑长先是由600 K升高至860 K,而后在1~5 m范围内一直保持该温度,有利于在此恒温带完成磁化还原焙烧^[6]。而在6~10 m则迅速降至500 K并保持,有利于还原焙烧后的产物不被再次氧化,是比较理想的

情况。

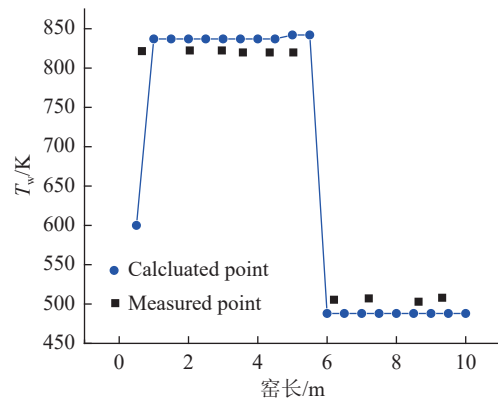


图6 窑壁温度随窑长的变化

Fig.6 Change of kiln wall temperature with kiln length

3 结论

通过设定模型,给出各种热力学参数,部分结合回转窑实际运行情况,对于热量、燃气温度、物料温度、窑壁温度随窑长的变化进行了计算。表明四者都随窑长先增加而后急剧降低,这对于褐铁矿磁化焙烧相当有利,可在高温还原之后迅速降至低温,避免了二次氧化。计算过程表明燃气流量即热量在过程中起到了决定性作用。

参考文献:

- [1] 肖敏, 邱小英, 蓝桥发. 高磷鲕状赤铁矿金属化还原焙烧-磁选-熔分新工艺研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(5):101-114. XIAO M, QIU X Y, LAN Q F. Study on the new technology of reduction roasting, magnetic separation and melting of high phosphorus oolitic hematite[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(5):101-114.
- [2] 张志霄, 池涌, 李水清, 等. 回转窑传热模型与数值模拟[J]. *化学工程*, 2003, 31(4):27-32. ZHANG Z X, CHI Y, LI S Q, et al. Heat transfer model and numerical simulation of rotary kiln[J]. *Chemical Engineering(China)*, 2003, 31(4):27-32.
- [3] 李晓光. 处理固体废物回转窑设计与数值模拟[M]. 天津: 天津大学出版社, 2016: 11. LI X G. Design and numerical simulation of rotary kiln for solid waste treatment[M]. Tianjin: Tianjin University Publishing House, 2016: 11.

(下转第80页)

Comparative Study on Beneficiation Test of a Low Grade Manganese Carbonate Ore

Yang Kaizhi, Hu Zhen, Wang Tai, Zou Jianjian, Yao Yanqing

(Institute of Resources Utilization and Rare Earth Development, Guangdong Academy of Sciences, State Key Laboratory of Rare Metal Separation and Comprehensive Utilization, Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Resources Development and Comprehensive Utilization, Guangzhou, Guangdong, China)

Abstract: According to characteristics of a low-grade manganese carbonate ore, it made a respective use of high gradient magnetic separation and shaker gravity separation, as well as experimental study on flotation process of the ore. Experimental results showed that wet high-intensity magnetic separation was the reasonable way to deal with the mine. The magnetic concentrate with Mn grade of 21.04% and Mn recovery of 75.55% could be obtained by adopting high intensity process of one-stage roughing, one-stage scavenging, two-stage cleaning, and regrinding magnetic separation of cleaning tailings. The experimental study provides a basis for the development of similar manganese ores.

Keywords: Low grade manganese carbonate; Magnetic separation; Gravity separation; Flotation; Comparison Test

(上接第 55 页)

[4] 石永彬. 回转窑混煤高效稳定燃烧数值模拟研究 [M]. 湘潭: 湘潭大学, 2014: 5.

SHI Y B. Numerical simulation study on high-efficiency and stable combustion of mixed coal in rotary kiln [M]. Xiangtan: Xiangtan University, 2014: 5.

[5] 孙朋, 胡宜斌. 山东某褐铁矿磁化焙烧-磁选试验研究[J]. 矿冶工程, 2019, 39(2):61-64.

SUN P, HU Y B. Experimental study on magnetic roasting-

magnetic separation of a limonite in Shandong[J]. [Mining and Metallurgical Engineering](#), 2019, 39(2):61-64.

[6] 柳林, 王威, 刘红召, 等. 磁化焙烧-磁选回收某褐铁矿中铁的试验研究 [J]. 矿产综合利用, 2019(4): 33-37.

LIU L, WANG W, LIU H Z, et al. Research on recovery of iron from limonite by magnetization roasting and magnetic separation. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources* [J]. 2019(4): 33-37.

Numerical Simulation of Temperature Field in Rotary Kiln during Limonite Magnetization Roasting

Wang Minghua, Li Shuang, Lv Xiaohong, Zhang Shuoda, Gong Zhenyu, Lou Taiping

(School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang, Liaoning, China)

Abstract: Rotary kiln is an important industrial large-scale heating equipment. Measuring and calculating its internal heat and temperature distribution is of great significance for the reasonable design of rotary kiln and the setting of process parameters such as material flow rate and heating temperature in the process of operation, so as to achieve the purpose of saving energy. This paper analyzes the variation of heat, gas temperature, material temperature and kiln wall temperature with kiln length in the process of limonite reduction roasting in rotary kiln. The calculated results are in good agreement with the measured results. It is of certain significance to understand the distribution law of heat and temperature and reasonably arrange the process parameters of flue gas combustion and material distribution.

Keywords: Limonite; Magnetization roasting; Rotary kiln; Numerical simulation of temperature field