Metallurgical Engineering 冶金工程, 2021, 8(4), 214-221
Published Online December 2021 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/meng
https://doi.org/10.12677/meng.2021.84028

锌精矿沸腾焙烧炉埋管综合换热系数的计算与分析

刘卫平[1]，刘俊达[2]，肖　康[1]，李成林[2]，赵晓朝[1]，刘　柳[2]，周　萍[2]

[1]株洲冶炼集团股份有限公司，湖南 株洲
[2]中南大学能源科学与工程学院，湖南 长沙

收稿日期：2021年11月9日；录用日期：2021年12月8日；发布日期：2021年12月15日

摘　要

为控制锌精矿焙烧炉床层温度、保障焙烧过程的顺利进行，常采用含水冷的埋管带走锌精矿氧化反应的部分热量，因此埋管面积的合理配置是沸腾焙烧炉结构设计与运行参数优化的关键。它主要取决于焙烧炉产能和综合传热系数，而综合传热系数影响因素多，变化范围大，难以准确获得所需埋管面积，显著延长了焙烧炉生产的调试时间。针对已有的锌精矿沸腾焙烧炉埋管换热系数计算中需假定埋管外壁温度的问题，本文基于埋管稳态传热过程以及传热机理，提出了埋管外壁温度的计算方法，并计算出了不同颗粒粒径和空隙率下的埋管换热系数，结果表明颗粒粒径与空隙率对埋管换热系数影响显著，且锌精矿颗粒粒径越小，影响越大。当颗粒粒径为40 μm、空隙率为0.53时，埋管换热系数可达到1740.28 W/(m²·K)。

关键词

沸腾焙烧炉，埋管，综合换热系数，粒径，空隙率

The Calculation and Analysis of the Heat Transfer Coefficient of the Cooling Tube in the Fluidized Roasting Furnace

Weiping Liu[1], Junda Liu[2], Kang Xiao[1], Chenglin Li[2], Xiaochao Zhao[1], Liu Liu[2], Ping Zhou[2]

[1]Zhuzhou Smelting Group Company Limited, Zhuzhou Hunan
[2]School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan

Received: Nov. 9th, 2021; accepted: Dec. 8th, 2021; published: Dec. 15th, 2021

文章引用: 刘卫平, 刘俊达, 肖康, 李成林, 赵晓朝, 刘柳, 周萍. 锌精矿沸腾焙烧炉埋管综合换热系数的计算与分析[J]. 冶金工程, 2021, 8(4): 214-221. DOI: 10.12677/meng.2021.84028

Abstract

In order to control the bed temperature and ensure the smooth process of the zinc concentrate fluidizing roaster, a water-cooled pipe (WCP) is often used to remove a part of the heat from the oxidation reaction of the zinc concentrate. Therefore, it is the key to set the appropriate area of the WCP for the structural design and optimal operating of the boiling roaster. The area of the WCP mainly depends on its comprehensive heat transfer coefficient (CHTC) and the production capacity of the roaster. However, the CHTC has many influencing factors and is of a wide range, which makes it difficult to determine the required area of the WCP. So, people often take a long time to test the running of the roaster. The outer wall temperature was assumed in the present calculating method of the CHTC of the WCP. To improve the accuracy of the CHTC, this paper proposes a method for calculating the outer wall temperature of the WCP, based on the steady-state heat transfer process and mechanism of the WCP. Moreover, the CHTC of the WCP in the case of different particle size and porosity were calculated. The results show that the particle size and porosity have a significant effect on the CHTC, and the smaller the zinc concentrate particle size, the greater the impact. With particle size 40 μm and porosity 0.53, the CHTC can reach 1740.28 W/(m²·K).

Keywords

Fluidized Roaster Furnace, Cooling Pipe, Heat Transfer Coefficient, Particle Size, Porosity

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

在锌冶炼工业中，全球 85%以上的锌是采用湿法炼锌工艺生产[1]，且以传统的沸腾焙烧和两段浸出工艺为主。沸腾焙烧工序是将硫化锌精矿进行氧化脱硫，生成氧化锌焙砂。在锌精矿的沸腾焙烧炉中，硫化锌氧化产生大量的热量，使床层温度升高，因此需要通过埋管带走部分热量，否则会出现锌精矿因温度过高而产生熔融与结块的现象[2]，致使锌精矿沸腾状况恶劣，缩短耐火砖的寿命[3]，严重影响生产顺行。但若埋管面积配置过大，带走的热量太多，床层温度偏低，不能满足锌精矿氧化焙烧的工艺要求。因此，埋管面积的合理配置是沸腾焙烧炉结构设计与运行参数优化的关键。

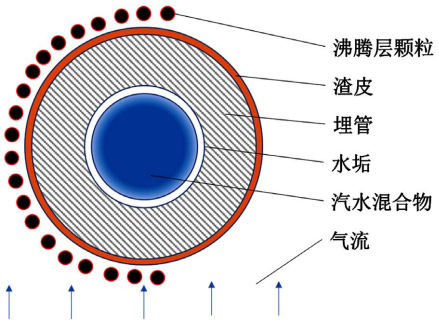
沸腾焙烧过程属于浓相气粒两相反应流，传热传质机理复杂，给焙烧炉参数的精细化控制带来了困难。随着计算流体力学技术的快速发展以及应用领域的广泛推广，研究者们应用基于欧拉－拉格朗日模型的 CPFD (Computational Particle Fluid Dynamics) [4] [5] [6]、CFD-DEM (Computational Fluid Dynamics-Discrete Element Method)耦合方法[7] [8]对浓相气粒两相反应流动传热过程进行了数值模拟研究，为揭示其传递过程机理提供了一定的理论指导。但目前仍受计算资源以及收敛性等问题的限制，难以将数值模拟方法直接应用于大型锌精矿沸腾焙烧炉的流动反应过程的研究。为此，Dash 等将等温下颗粒运动介观物理场的数值模拟与基于守恒定律的分区集总参数分析方法相结合，获得了锌精矿焙烧炉沿高度方向的一维温度分布[9]。因此，在工业生产实践中，技术人员根据炉料成分，主要依靠操作经验对鼓风量、投料量以及埋管面积等参数进行调节[10] [11]，为使炉况稳定并达到较好的经济技术指标，需要花费大量的调试时间。

埋管面积的合理配置主要取决于焙烧炉产能和综合传热系数，而综合传热系数变化范围大，给埋管

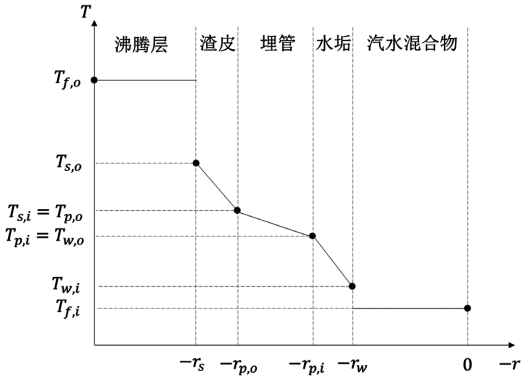
面积的确定带来了困难。本文针对已有的锌精矿沸腾焙烧炉埋管换热系数计算中需假定埋管外壁温度的问题，对埋管的传热过程进行研究，探索埋管外壁温度的计算方法，并对埋管综合换热系数的主要影响因素进行研究，获得不同参数下的埋管综合换热系数，为锌精矿焙烧炉的结构设计与操作参数优化提供理论指导。

2. 埋管的一维传热过程

埋管一般安装在锌精矿沸腾焙烧炉布风板上的沸腾层区域，管外的精矿颗粒在高速气流的作用下悬浮在布风板上部，同时发生氧化反应释放热量，使颗粒和气流温度处于高温状态。当沸腾焙烧炉运行一段时间后，部分熔融颗粒黏附在埋管外壁形成渣皮，循环水中的钙、镁质物质附着在埋管内侧形成水垢，此时埋管结构的一般形式可用图 1(a)表示。埋管的温度梯度主要集中在径向方向，可近似处理为一维传热，即高温颗粒与气流通过辐射和对流的方式将热量传向渣皮，通过导热的方式由渣皮、埋管传向水垢侧，再通过沸腾换热方式传向循环水，循环水将热量带离焙烧炉。埋管传热通道的温度分布如图 1(b)所示，其中 T 表示温度，下标 s、p、w 分别表示渣皮、埋管、水垢，下标 i、o 分别表示内侧、外侧，下标 f，o 表示沸腾层，f，i 表示汽水混合物。



(a) 埋管结构示意图



(b) 温度分布

Figure 1. Schematic diagram of buried pipe structure and temperature distribution

图 1. 埋管结构与温度分布示意图

3. 埋管传热量的计算

3.1. 经验关联式

根据埋管的结构以及传热方式，对沸腾层经埋管传递至循环水的热量分层进行计算。

(1) 沸腾层与埋管外壁渣皮之间的综合传热

沸腾层与埋管外壁渣皮发生对流换热及辐射换热，单位长度传热量为：

$$Q_{fs}=h_o\pi\left(d+2\delta_{渣}\right)\left(T_{f,o}-T_{s,o}\right)+C_0\varepsilon\pi\left(d+2\delta_{渣}\right)\left(\left(\frac{T_{f,o}}{100}\right)^4-\left(\frac{T_{s,o}}{100}\right)^4\right) \tag{1}$$

式中，Q_{fs} 为沸腾层向埋管外壁渣皮的单位长度传热量，W/m；h_o 为沸腾层与埋管外壁渣皮的对流换热系数，W/(m^2·K)；d 为埋管外径，m；$\delta_{渣}$ 为渣皮厚度，m；$T_{f,o}$ 为沸腾层温度，K；$T_{s,o}$ 为埋管外壁渣皮表面温度，K；C_0 为黑体辐射常数，W/(m^2·K^4)；ε 为埋管外壁渣皮的发射率。

h_o 计算公式如下所示：

$$Nu=\frac{h_o\cdot\left(d+2\delta_{渣}\right)}{\lambda_{流化介质}} \tag{2}$$

式中，Nu 为埋管外壁渣皮与沸腾层对流换热的准则数；$\lambda_{流化介质}$ 为流化介质的导热系数，W/(m·K)。

Nu 计算公式[12]为：

$$Nu=CC_sRe_{管}\left(\frac{1-\varepsilon_{层}}{\varepsilon_{层}}\right)^{1.2}\left(\frac{Pr\cdot c_{料}}{Ar\cdot c_{气}}\right)^n \tag{3}$$

式中，

$$\left(C,n\right)=\begin{cases}\left(2.56,0.3\right), & \dfrac{Pr\cdot c_{料}}{Ar\cdot c_{气}}<10^{-4}\\[2ex] \left(14.1,0.5\right), & \dfrac{Pr\cdot c_{料}}{Ar\cdot c_{气}}>10^{-4}\end{cases} \tag{4}$$

$$C_s=\min\left(\left(\frac{s_1}{6d}\right)^{0.3},1\right)\cdot\min\left(\left(\frac{s_2}{2d}\right)^{0.2},1\right) \tag{5}$$

$$Re_{管}=\frac{u\left(d+2\delta_{渣}\right)}{\upsilon} \tag{6}$$

$$Ar=\frac{\boldsymbol{g}d_{粒}^3}{\upsilon^2}\cdot\frac{\rho_{粒}-\rho_{气}}{\rho_{气}} \tag{7}$$

式中，s_1、s_2 分别为沿气流方向及垂直气流方向埋管的中心距(见图 2)，m；u 为流化介质速度，m/s；υ 为流化介质运动粘度，m^2/s；$\varepsilon_{层}$ 为沸腾层的空隙率；Pr 为流化气体的普朗特数；$c_{料}$ 为料层的比热容，J/(kg·K)；$\boldsymbol{g}$ 为重力加速度，m/s^2；$d_{粒}$ 为料层颗粒粒径，m；$\rho_{气}$ 为流化介质的密度，kg/m^3；$\rho_{粒}$ 为料层颗粒密度，kg/m^3；$c_{气}$ 为流化介质的比热容 J/(kg·K)。

(2) 渣皮－埋管－水垢多层圆筒壁导热

渣皮－埋管－水垢多层圆筒壁的导热过程可用以下传热方程描述：

$$Q_s=\frac{T_{s,o}-T_{w,i}}{R_{总}} \tag{8}$$

$$R_{总}=\frac{\ln\left(\left(d+2\delta_{渣}\right)/d\right)}{2\pi\lambda_s}+\frac{\ln\left(d/\left(d-2\delta_{管}\right)\right)}{2\pi\lambda_p}+\frac{\ln\left(\left(d-2\delta_{管}\right)/\left(d-2\delta_{管}-2\delta_{垢}\right)\right)}{2\pi\lambda_w} \tag{9}$$

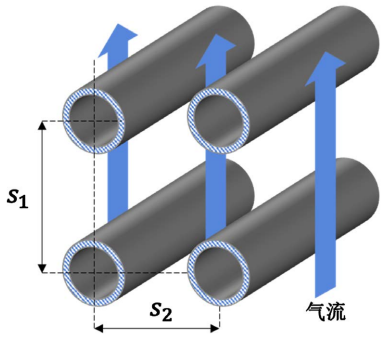


Figure 2. Schematic diagram of the center distance of cooling pipe
图 2. 埋管中心距示意图

式中，Q_s 为渣皮－埋管－水垢多层圆筒壁单位长度传热量，W/m；$\delta_{管}$、$\delta_{垢}$ 分别为埋管壁厚、水垢厚度，m；λ_s、λ_p、λ_w 分别为渣皮、埋管、水垢的导热系数，W/(m·K)；$T_{w,i}$ 为水垢在工质侧的温度，K。

(3) 循环水的沸腾传热

埋管内循环水主要发生沸腾换热，可用下式计算：

$$Q_b = h_i \pi \left(d - 2\delta_{管} - 2\delta_{垢}\right)\left(T_{f,i} - T_{w,i}\right) \tag{10}$$

式中，Q_b 为循环水在单位长度埋管的沸腾传热量，W/m；$T_{f,i}$ 为埋管内循环水温度，K；h_i 为埋管内沸腾传热的换热系数，W/(m^2·K)，由下式计算：

$$h_i = 143\Delta t^{2.33} p^{0.5} \tag{11}$$

式中，Δt 为沸腾传热的温差，$\Delta t = T_{f,i} - T_{w,i}$，K；$p$ 为埋管内循环水的饱和蒸汽压，MPa。

3.2. 求解方法

上述表达式中埋管各层的温度未知，无法直接计算出埋管传热量。但当埋管传热达到稳定状态时，通过埋管传递的热量恒定，则有：

$$Q_{fs} = Q_s = Q_b \tag{12}$$

根据该约束条件，可以获得埋管外壁温度关于埋管内的循环水温度的隐函数，并采用二分方法，对建立的传热方程进行求解，得到埋管外壁温度和埋管换热量，流程图如图 3 所示。

4. 结果分析

在生产初期，埋管内、外侧不存在水垢和渣皮。实际上，两年多的生产实践表明埋管外侧没有黏附的渣皮，因此本文不考虑水垢和渣皮。由于锌精矿粒径分布范围较宽，而空隙率与投料量、鼓风量密切相关，其值变化较大，故本文对不同粒径、不同孔隙率下的埋管综合换热系数进行了计算。结合某企业生产实践数据，粒径取值范围为 40~200 μm，沸腾层空隙率取值范围为 0.53~0.8，其他参数取值见表 1。

4.1. 颗粒粒径对埋管综合换热系数的影响

图 4 为不同粒径下埋管的综合换热系数。由图可知，埋管综合换热系数随锌精矿粒径的增加而减小，这主要是因为随着粒径的减小，颗粒的数密度呈指数式增加，与埋管壁面撞击的频率也呈指数式增加，从而更加有效破坏埋管外侧的气体边界层，改善换热性能。

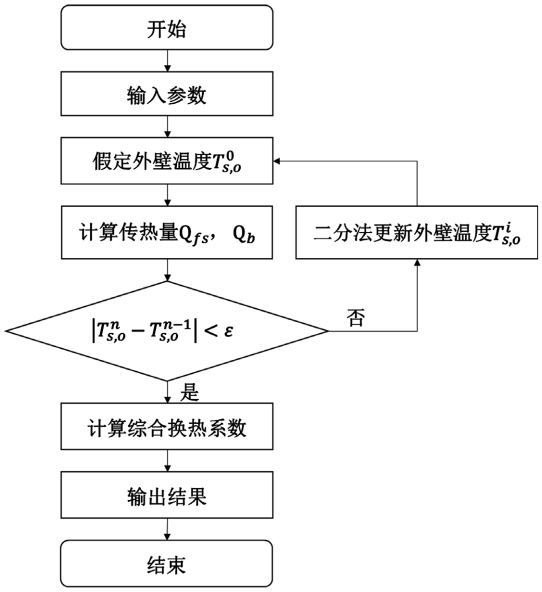


Figure 3. Schematic diagram of the solution algorithm
图 3. 求解算法流程图

Table 1. Calculation parameters of heat transfer coefficient of cooling pipe
表 1. 埋管综合换热系数计算参数

参数	数值	参数	数值
埋管表面积/m^2	23.49	埋管外径/m	0.076
沸腾层温度/℃	952.52	埋管壁厚/m	0.01
管壁导热系数/$W\cdot(m\cdot K)^{-1}$	43.75	颗粒密度/$kg\cdot m^{-3}$	4100
循环水温度/℃	235.56	气体黏度/$m^2\cdot s^{-1}$	1.50×10^{-4}
饱和蒸汽压/MPa	3.62	*Pr*	0.78
沿气流方向埋管的中心距/m	0.20	气体密度/$kg\cdot m^{-3}$	0.32
沿垂直气流方向埋管的中心距/m	0.22	气体比热/$J\cdot(kg\cdot K)^{-1}$	1172.47

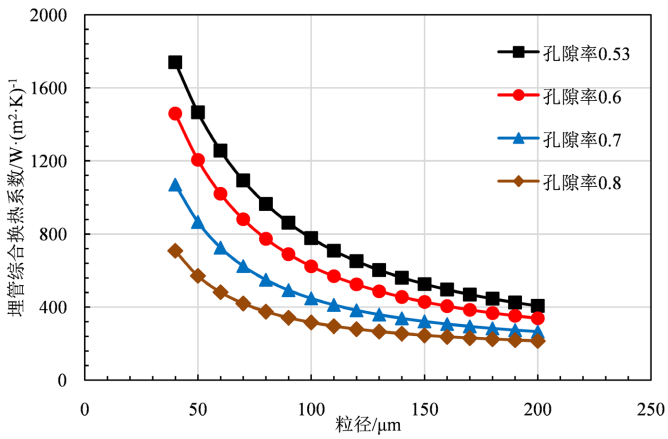


Figure 4. Variation of heat transfer coefficient with particle size of different porosity level
图 4. 不同沸腾层空隙率下换热系数随锌精矿粒径的变化

同时，随着沸腾层空隙率的降低，埋管综合换热系数对精矿粒径变化的敏感度增大，当空隙率达到 0.53 时，40 μm 粒径对应综合换热系数超过 1700 W/(m^2·K)。这主要是因为空隙率较低时，单位体积空间中颗粒的体积更大，质量更大，粒径变化导致的颗粒数量更大变化，对边界层的影响更加显著。

4.2. 沸腾层空隙率对埋管综合换热系数的影响

图 5 所示为不同沸腾层空隙率下的换热系数。由图可以看出，空隙率增大导致埋管综合换热系数降低，这是因为空隙率增大意味着单位空间颗粒体积减小，质量减小，在同一粒径下颗粒数密度线性降低，导致颗粒与埋管壁面的碰撞频率降低，同时还导致沸腾层比热容线性降低，致使综合换热系数线性减小。当颗粒粒径为 40 μm 时，空隙率从 0.53 增加到 0.8，埋管换热系数从 1740.28 W/(m^2·K)减小至 707.77 W/(m^2·K)，减小了 59.33%。

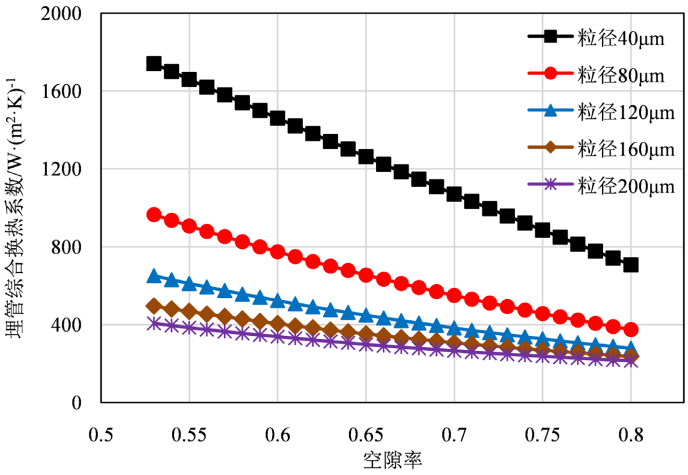


Figure 5. Variation of heat transfer coefficient with porosity of different particle size level
图 5. 不同精矿粒径下换热系数随沸腾层空隙率的变化

图中，直线斜率随着颗粒粒径的增加而减小。当粒径大于 120 mm 时，空隙率对综合传热系数的影响较小。在空隙率从 0.53 增加至 0.8 的条件下，当颗粒粒径增加至 200 μm 时，埋管换热系数减小了 47.22%；当颗粒粒径为 40 μm 时，埋管换热系数减小了 59.33%。

5. 结论

埋管换热过程对沸腾焙烧炉及余热锅炉的设计与顺产有重要影响。本文基于传热学理论，对沸腾焙烧炉内埋管换热过程进行分析，提出了埋管外壁温度、传热量及综合换热系数的计算方法，计算了不同精矿粒径与空隙率下的埋管综合换热系数，结果表明精矿粒径、空隙率对埋管综合换热系数有显著影响：

1) 埋管综合换热系数随粒径减小迅速增大，颗粒粒径为 40 μm、空隙率为 0.53 时，埋管换热系数可达到 1740.28 W/(m^2·K)；随着空隙率降低，埋管综合换热系数对粒径的敏感性进一步提高。

2) 埋管综合换热系数随孔隙率增大线性减小，颗粒粒径为 200 μm、空隙率为 0.8 时，综合换热系数可低至 214.51 W/(m^2·K)；随着精矿粒径缩小，埋管综合换热系数对空隙率的敏感性进一步提高。

参考文献

[1] 彭容秋. 铅锌冶金学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[2] 黄卫平. 浅谈沸腾炉焙烧的生产实践[J]. 新疆有色金属, 2014, 37(2): 77-78.

[3] 袁精华. 150 m^2 大型沸腾焙烧炉设计回顾与展望[J]. 硫酸工业, 2021(4): 6-9.

[4] Abbasi, A., Ege, P.E. and de Lasa, H.I. (2011) CPFD Simulation of a Fast Fluidized Bed Steam Coal Gasifier Feeding Section. *Chemical Engineering Journal*, **174**, 341-350. https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.07.085

[5] Snider, D.M., Clark, S.M. and O'Rourke, P.J. (2011) Eulerian-Lagrangian Method for Three-Dimensional Thermal Reacting Flow with Application to Coal Gasifiers. *Chemical Engineering Science*, **66**, 1285-1295. https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.12.042

[6] 张瑞卿, 杨海瑞, 吕俊复. 应用于循环流化床锅炉气固流动和燃烧的 CPFD 数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(23): 75-83.

[7] Wang, S., Luo, K., Hu, C.S., *et al*. (2019) CFD-DEM Simulation of Heat Transfer in Fluidized Beds: Model Verification, Validation, and Application. *Chemical Engineering Science*, **197**, 280-295. https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.12.031

[8] Deb, S. and Tafti, D. (2014) Investigation of Flat Bottomed Spouted Bed with Multiple Jets Using DEM-CFD Framework. *Powder Technology*, **254**, 387-402. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.01.045

[9] Dash, S., Mohanty, S. and Mishra, B.K. (2020) CFD Modelling and Simulation of an Industrial Scale Continuous Fluidized Bed Roaster. *Advanced Powder Technology*, **31**, 658-669. https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.11.021

[10] 谢华涛. 沸腾焙烧炉处理高杂锌精矿的生产实践[C]//中国有色金属学会. 中国首届熔池熔炼技术及装备专题研讨会论文集, 2007: 224-229.

[11] 彭幼林. 沸腾焙烧高铜锌精矿的工艺研究及生产实践[J]. 中国冶金, 2018, 28(8): 68-70+75.

[12] 梅炽, 周萍. 有色金属炉窑设计手册[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2019.