环冷机漏风率测量方法研究及计算程序开发

谢世冠
(中冶长天国际工程有限责任公司,湖南 长沙 410205)

摘要: 环冷机是影响烧结矿冷却过程热效应的一个重要设备。环冷机风量是计算烟气潜热回收中的一个重要参数,而漏风率的准确测量则是一个难点。本文通过分析烧结矿冷却过程中的物质和能量流动平衡关系,建立环冷机漏风率的计算模型,通过简单的热工测量获取实时数据,再结合烟气温度数据拟合的烟气分布函数,便可快速计算出环冷机的漏风率;最后开发出漏风率计算程序,实现离线自动计算;将某钢铁厂600 m^2 环冷机的漏风率计算结果与现场试验结果进行对比,验证了计算模型的准确性。本文研究成果为环冷机漏风率测量提供了一种既简单而又实用的估计方法,具有较大的应用价值。

关键词: 环冷机; 漏风率; 计算模型
中图分类号: TF046.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8764(2021)06-0049-06
doi: 10.13403/j.sjqt.2021.06.084

Research on measurement method and development of calculation program of air leakage rate in ring cooler

XIE Shiguan
(*Zhongye Changtian International Engineering Co.,Ltd.,Changsha* 410205,*Hunan*,*China*)

Abstract: Ring cooler is a kind of important equipment that affects the thermal effect of the ring cooler process. The air volume of the ring cooler is an important parameter in the calculation of the latent heat recovery of the flue gas, while the accurate measurement of the air leakage rate is a difficult task. In this paper, by analyzing the material and energy flow balance relationship in the ring cooler process and establishing the calculation model of air leakage rate of the ring cooler, the air leakage rate of the ring cooler can be quickly calculated by obtaining real-time data through simple thermal measurements, and then combining the flue gas distribution function fitted with the flue gas temperature data, the leakage rate of the ring cooler can be calculated quickly, the air leakage rate calculation program can be developed, and the offline automatic calculation can be realized. The accuracy of the calculation model is verified by comparing the results of the air leakage rate of a 600 m^2 ring cooler in a steel mill with the results of field tests. The results provide a simple and practical estimation method for the air leakage rate measurement of the ring cooler, which is of great application value.

Key words: ring cooler; air leakage rate; calculation model

近年来,随着钢铁行业淘汰落后产能的持续推进,烧结机的建设规模也越来越大,新型鼓风环式冷却机也基本取代了以往的抽风环式冷却机。环冷机余热回收方法主要包括动力型热风烧结工艺及低温余热发电技术[1-2]。① 动力型热风烧结工艺是将环冷机热废气引入到烧结机台车料面参与烧结,利用热废气中的显热和潜热,来降低固体燃料消耗量,并解决环冷机热废气无组织排放问题; ② 低温余热发电技术是将环冷机低温段的烟气引入锅炉岛进行热交换,回收低温余热并将其进一步转换为电能,该技术节能减排效果显著。上述两项技术的系统设计都需要根据工艺给出环冷机烟气流量和温度参数来进行下一步的计算,进而确定总图

收稿日期: 2020-08-23; 修回日期: 2021-03-04
作者简介: 谢世冠(1982—),男,高级工程师,从事冶金机械设计方面的工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

布置。环冷机是影响烧结矿冷却过程热效应的一个重要设备，其漏风率是一个重要的性能参数。漏风量的大小对烧结矿的冷却效果，热风烧结及余热发电效果有着直接的影响。在实际生产环境中，环冷机的烟气温度可直接测量获得，但要获取其烟气流量比较困难。这是由于大部分环冷机是一个开放式的系统，受制于现场条件，测量过程费时、费力。即使是密封性较好的环冷机设备，也不能将入料口、卸料口等的漏风考虑进来，测量也难以精确。目前获取环冷机烟气流量的方法有两种：① 通过环冷机烟囱来直接测量；② 先通过计算环冷机鼓风机的总风量，再加上余热回风管的回风总量，然后减去环冷机的漏风量，从而计算出烟气流量。

本文基于热力学平衡定律建立烧结矿冷却过程热模型，再通过现场采集的烟气温度、环冷机台车壁板温度等参数来计算环冷机的漏风率，以期可对环冷机的生产运行，以及热风烧结工艺、余热发电技术等的推广应用提供参考。

1 模型的分析与建立

1.1 模型分析

1.1.1 烧结矿的冷却原理

大块烧结矿从烧结机尾卸下后，经单辊破碎机破碎筛选，此时烧结矿的温度约为750～850 ℃，再经导料槽进入给料装置；通过阶梯布料装置，烧结矿被连续均匀地布在环冷机的回转台车上，再由驱动装置的摩擦轮驱动固定在回转框架上的回转台车做回转运动。烧结矿的冷却方法有很多种，如自然冷却、抽风、鼓风等，其基本原理都是利用冷却介质，通过传导、对流和辐射等换热方式将高温烧结矿的热量带走。目前钢铁厂普遍采用鼓风式环冷机进行冷却。冷却风通过鼓风机进入环冷机环形风道，通过风箱支管进入台车底部风箱，再穿过台车箅条的间隙进入到烧结矿层的孔隙结构中，由下而上逐渐把烧结矿的热量带走。冷却后的烧结矿通过卸料溜槽排出环冷机，其温度一般低于150 ℃。为了更好地利用环冷机废烟气中的显热和潜热，有效降低固体燃料消耗量，一般都会用烟气罩将烟气一部分引至烧结机进行热风烧结，一部分送往低温余热岛进行余热发电，剩余一部分直接通过排气烟囱排入大气或引入高温段风机，实现串级利用。

1.1.2 漏风测量原理及方法

国内外很多学者利用数值仿真对烧结矿的冷却过程进行了深入研究，并提出数学模型[5]，如：CAPUTO等[6]人提出了一维稳态数学模型，评估烧结矿床和冷却介质之间的换热；LEONG等[5]从另一个角度出发，以局部热平衡为基础，利用Fluent软件对气固换热进行模拟。赵斌[7]等利用非热力学平衡定律构建气体与烧结矿之间的双能量气固两相换热方程，研究烧和冷却介质之间的热交换平衡过程，但其并没有考虑环冷机漏风所导致的热量损失问题。烧结矿冷却过程中所释放的全部热量，在实际估算时可认为都被冷却空气、环冷机壁板及烟尘罩带走。在不考虑漏风的情况下，烧结矿释放的热量等于冷却空气带走的热量与表面散发的热量之和；将漏风因素考虑进来，则烧结矿释放的热量等于有效冷却空气带走的热量与表面散发的热量之和。烧结矿冷却过程的物质流动关系如图1所示。

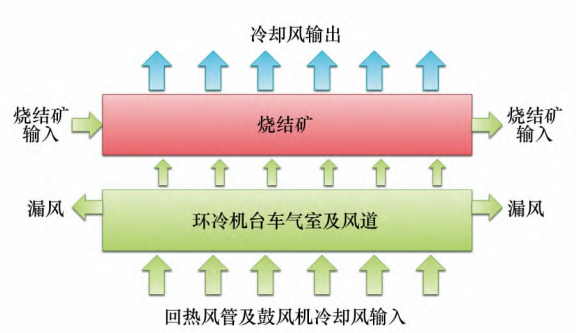


图1 烧结矿冷却过程物质流动关系模型

Fig. 1 Material flow relationship model of sinter cooling process

1.2 模型建立

1.2.1 基本假设

在回转台车移动过程中，冷却风从下往上垂直流动，并与热烧结矿进行热交换，将烧结矿的潜热转变为烟气的显热。烟气温度沿环冷机圆周方向分布，给矿区域烟气温度最高，为450 ℃左右，排矿区域温度最低，为150 ℃左

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

右。径向上烟气的排放温度差异可以忽略。为简化分析和计算，暂不考虑因漏风所带走的矿料和台车密封不严而散落的矿粉，将烧结矿的冷却过程看作一个连续的一维传热过程[6]。结合实际测量数据，作如下假设[7-8]：

(1) 环冷机在稳定工况下运行，单位时间内处理量恒定。

(2) 烧结矿在台车上分布均匀，在冷却过程中无损失，在台车上不存在二次燃烧。

(3) 冷却风风量在回收段和直排段沿环冷机圆周方向均匀分布。

(4) 环冷机漏风主要是台车底部气室和环形风道之间的漏风，不考虑环冷机圆周方向漏风量不等的问题，并假定漏风率一致。

(5) 忽略烧结矿之间的热传导、辐射的散热量。

(6) 入料口和卸料口的漏风量忽略不计。

1.2.2　环冷机漏风测量数学模型

烧结矿在环冷机上冷却所用的时间与块料的粒度、料层的厚度以及通过料层的风量等因素有关，即冷却时间与料块表面同空气热交换的速度以及块料中心部至表面热传导速度有关。冷却时间可以采用下列公式进行计算。

$$t=\frac{60\rho hA}{Q} \tag{1}$$

式中：t 为冷却时间，s；ρ 为烧结矿的堆积密度，t/m^3；h 为烧结矿的料层厚度，m；A 为环冷机的有效冷却面积，m^2；Q 为环冷机的设计生产能力，t/h。

鼓风环冷机的冷却时间大约为 60 min，稳定运行时，回转速度基本不变。为方便分析，将时间变量转化为台车运行方向的周长弧长，在沿环冷机的回转方向上，取一个台车微元内的烧结矿为研究对象，如图 2 所示。对任意第 n 个台车微元，根据热力学平衡定律，烧结矿释放的热量等于冷却空气带走的热量与表面散发的热量之和，热平衡方程如下。

$$Q_{ms}\times(H_{si}-H_{so})=\rho_g Q_{ao}(H_{go}-H_{gi})+\Delta Q_e \tag{2}$$

式中：Q_{ms} 为台车微元入口处的烧结矿流量，kg/h；

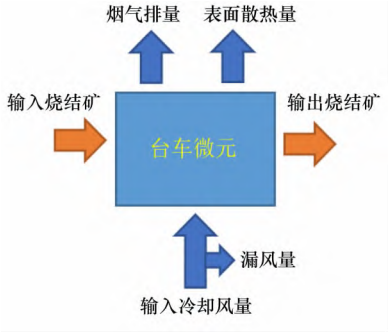


图 2　烧结矿微元模型

Fig. 2　Micro element model of sinter

ρ_g 为冷却风密度，20 ℃时取 1.205 kg/m^3；H_{si} 为台车微元入口处的烧结矿焓，kJ/kg；H_{so} 为台车微元出口处的烧结矿焓，kJ/kg；H_{gi} 为台车微元入口处的冷却风焓，J/kg；H_{go} 为台车微元出口处的烟气焓，kJ/kg；ΔQ_e 为表面散发的热量，kJ；Q_{ao} 为通过台车微元的冷却风流量，Nm^3/h。

将环冷机的漏风因素考虑进来，用 α 表示，则式(2)可以改写成：

$$Q_{ms}\times(H_{si}-H_{so})=(1-\alpha)\rho_g Q_{gi}(H_{go}-H_{gi})+\Delta Q_e \tag{3}$$

式中：Q_{gi} 为微元入口冷却风流量，Nm^3/h。

烧结矿冷却过程是一个连续的过程，式(2)的左边，由于第 n 个台车微元的输出烧结矿就是第 $n+1$ 个台车微元的输入烧结矿，将所有相邻的单元相加，中间项全部抵消，最后得到烧结矿释放的总热量：

$$Q_s=Q_{ms}(H_{sl}-H_{sx}) \tag{4}$$

式中：Q_s 为烧结矿释放的总热量流量，kJ/h；H_{sl} 为装料口烧结矿焓，kJ/kg；H_{sx} 为卸料口烧结矿焓，kJ/kg。

将式(2)的右边第一项沿环冷机周向进行积分，则得到冷却风带走的总热量：

$$Q_g=\int_0^l(1-\alpha)\rho_g Q_{gi}(H_{go}-H_{gi})\,dx \tag{5}$$

式中：Q_g 为冷却风带走的总热量，kJ；l 为环冷机的周长，m。

表面散发的总热量(Q_e，kJ)：

$$Q_e=\sum\Delta Q_e \tag{6}$$

由于烧结矿的平均比热容采用真比热计算比较麻烦，故采用经验公式[9]：

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$C_p = [0.115 + 0.257 \times 10^{-3} \times (T_s - 373) - 0.012\,5 \times 10^{-5}) \times (T_s - 373)^2] \times 4.186\,8 \quad (7)$$

式中：C_p为烧结矿的平均比热容，kJ/(kg·℃)；T_s为烧结矿的热力学温度，K。

热交换后的烟气和热空气性质近似，所以烟气的平均比热容可以写成[9]：

$$C_p = 0.000\,093 T_g + 0.995\,6 \quad (8)$$

式中：T_g为烧结烟气的热力学温度，K。

烧结矿的焓：

$$H_s = C_p T_s \quad (9)$$

式中：H_s为烧结矿焓，kJ/kg；T_s为烧结矿温度，℃。

烟气的焓：

$$H_g = C_p T_g \quad (10)$$

式中：H_g为烧结烟气焓，kJ/kg；T_g为烟气温度，℃。

环冷机台车上的烧结矿，与冷却风进行强制热交换，矿温随着台车的回转不断降低，烟气温度也不断降低。由于热烧结矿温度和冷烧结矿温度很容易在现场测得，只要测量出装载和卸载时的矿温，再通过计算便可得出烧结矿放出的总热量，但热交换后的烟气温度难以实时测量。假定沿环冷机回转方向烟气温度的分布存在某个函数关系，通过测量环冷机各个部位的烟气温度，分析烟气温度数据和卸料距离的关系，利用多点数据拟合，得到近似的烟气温度拟合曲线，进而构造出烟气温度随圆周方向的分布函数($T_g = f(x)$)，故出口烟气焓的表达式根据式(10)可改写为：

$$H_{go} = C_g T_g = C_g f(x) = [0.000\,093 f(x) + 0.995\,6] \times f(x) \quad (11)$$

由鼓风机出来的冷却风，首先进入环冷机风道，再经过风箱支管进入台车底部气室，穿过烧结矿层，对烧结热矿进行冷却。在无回热风的情况下，风温沿环冷机的圆周方向是不变的；在风道阀门打开的情况下，风压沿环冷机圆周方向也是处处相等的，冷却风温可测，这样可认为风机出口冷却风焓H_{gi}为常数。将式(11)代入式(5)，于是冷却风带走的总热量沿圆周积分可得：

$$Q_g = \int_0^1 (1-\alpha) \rho Q_{gi} (H_{go} - H_{gi})\,dx = (1-\alpha) \rho Q_{gi} \int_0^1 [0.000\,093 f(x) + 0.995\,6) \times f(x) - H_{gi}]\,dx \quad (12)$$

表面散发的热量流量Q_e可以分为两个部分，一部分是环冷机台车内外壁板散发的热量，另一部分是环冷机密封罩散发的热量。根据牛顿冷却定律：

$$Q_e = 3.6 \times Ah(T_w - T_f) = 3.6 \times (T_w - T_f) / \left(\frac{1}{Ah}\right) \quad (13)$$

式中：$\frac{1}{Ah}$为对流传热热阻；h为表面对流换热系数；A为散热面积，m^2；T_w为固体温度，℃；T_f为表面流体温度，℃。

由于烧结矿释放的总热量$Q_s = Q_g + Q_e$，则漏风率α可以简写成：

$$\alpha = 1 - \frac{Q_{ms}(H_{sl} - H_{sx}) - Q_e}{\rho Q_{gi} \int_0^1 [0.000\,093 f(x) + 0.995\,6) \times f(x) - H_{gi}]\,dx} \quad (14)$$

从上式可以看出，要保证漏风率准确性，烟气温度分布函数是关键。要尽可能测量多点烟气数据来拟合烟气温度分布函数，必要时可采用分段函数来计算。

2 模型验证

赵斌等[7]对唐钢北区1、2号两台190 m^2环冷机进行了热工测试，最终的实验结果及计算数据如表1所示。

表1 唐钢190 m^2环冷机部分测试数据

Table 1 Partial test data of 190 m^2 sintering cooler of Tangshan Iron and Steel Co.,Ltd.

总风量/($Nm^3 \cdot h^{-1}$)	有效风量/($Nm^3 \cdot h^{-1}$)	无效风量/($Nm^3 \cdot h^{-1}$)	漏风率/%
389 666	243 212	146 454	37.60

潘鹤[5]针对宝钢460 m^2环冷机进行了热工

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

测量，部分实验数据如表 2 所示。

漏风率等于无效风量与总风量的百分比值，根据表 1、2 的测试数据，得出唐钢 190 m^2 环冷机的漏风率为 37.6%，宝钢 460 m^2 环冷机的漏风率范围为 18.2%～28.48% [7]。从他们的实验结果可以看出，不同钢铁企业及不同规格的环冷机测量得到的漏风率不同，但其原理都是通过测量排放烟气的流量，故难以实现精准测量。本文所建立的漏风率测量模型只需要现场测量排放的烟气温度，避免了排放烟气流量测量不准的问题。

表 2　宝钢 460 m^2 环冷机部分测试数据

Table 2　Partial test data of 460 m^2 sintering cooler of Baosteel Co.,Ltd.

段号	总风量/($Nm^3 \cdot min^{-1}$)	有效风量/($Nm^3 \cdot min^{-1}$)	无效风量/($Nm^3 \cdot min^{-1}$)	漏风率/%
1	6 167.082	4 762.69	1 404.39	22.70
2	6 875.327	5 624.32	1 251.01	18.20
3	7 052.001	5 227.28	1 824.72	25.88
4	7 129.709	5 098.96	2 030.75	28.48

3　模型应用

3.1　现场数据采集

某钢铁厂 600 m^2 烧结机配有 600 m^2 环冷机，该烧结机台时产量为 940.14 t/h，利用系数为 1.49 t/($m^2 \cdot h$)，实地测试期间无回热风。为了保证采集数据稳定可靠，整个测试期间，保持铁原料和生石灰等的配比参数不变，烧结机工况正常，测试分上、下午两个时间段进行，环冷机连续运转 4 圈。环冷机入口及出口烧结矿温度通过在外栏板竖直方向安装的 4 个热电偶采集，同样采用热电偶测量靠近料层方向上部烟罩内的烟气温度。为保证样本可靠，尽量测量多组数据，去除异常数据，减少误差。测试期间采集的设备及运行参数如表 3 所示。

表 3　现场采集环冷机参数

Table 3　Real-time data of sintering cooler collected from the site

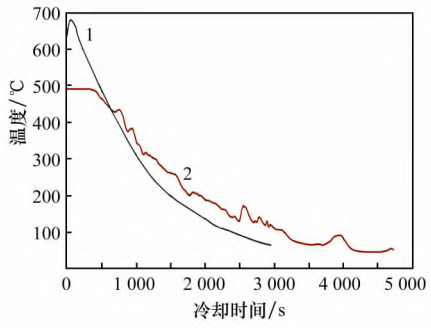
料层厚度/m	装料口烧结矿平均温度/℃	卸料口烧结矿平均温度/℃	台车内外栏板平均温度/℃	防烟尘罩平均温度/℃
~1.5	680	135	200	200
1 号风机进口风量/($Nm^3 \cdot h^{-1}$)	2 号风机进口风量/($Nm^3 \cdot h^{-1}$)	3 号风机进口风量/($Nm^3 \cdot h^{-1}$)	4 号风机进口风量/($Nm^3 \cdot h^{-1}$)	5 号风机进口风量/($Nm^3 \cdot h^{-1}$)
44.75	38.67	38.67	54.77	54.77

对在工况条件下采集到的环冷机圆周方向的排出烟气温度进行数学统计，将散点分布图拟合成烟气分布曲线，如图 3 所示。

根据烟气分布拟合曲线，利用多项式逼近，得出排烟温度拟合函数：

$$T_g(x) = -4E-05x^3 + 0.021x^2 - 4.8135x + 469.42 \quad (15)$$

将式(12)代入式(11)，通过简单的数学计算即可得出环冷机的漏风率。利用 Visual Studio 2019 编程实现漏风率计算过程，计算结果如图4所示。该计算程序可为烧结参数确定及余



1—烧结矿温度；2—料层上方风温度。

图 3　烟气温度拟合曲线

Fig. 3　Flue gas temperature fitting curve

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



图 4 环冷机漏风率计算程序

Fig. 4 Calculation program of air leakage rate of sintering cooler

热回收工程设计等应用提供简单而又实用的估计方法。

3.2 计算结果分析

在无回热风情况下，程序以将现场所测得工况数据为输入，计算所得漏风率结果为 25.8%。通过传统的流量测试法，使用环冷机全封闭门型烟尘罩，将所有通过台车的冷却风都从烟罩上的烟囱排出，采集烟气流量、回热风管和鼓风机风量等数据，将流量数据换算成标态值，经过计算后测得的漏风率为 32.8%。经过与现场试验数据比对，本文开发的漏风率测量模型的准确性较高。

4 结 论

(1) 本文从物质流动和热平衡的角度对环冷机的冷却过程进行了研究，将环冷漏风的因素考虑进来，建立烧结矿冷却过程的数学模型，并开发相应计算程序，再结合现场采集的数据，求解环冷机的漏风率。

(2) 与已有现场试验测试结果相比，本文假设的数学模型合理，漏风率计算结果可靠；同时只需采集沿环冷机圆周方向烟气的温度，避免了以往烟气流量测量精度低的问题。本文开发的计算程序简单易行、高效、可操作性强，具有较大的实际应用价值。

参考文献:

[1] 陈春霞. 钢铁生产过程余热资源的回收与利用[D]. 沈阳: 东北大学,2008.
CHEN Chunxia. Recovery of residual-heat resource in steel producing process [D]. Shenyang: Northeastern University,2008.

[2] 王兆鹏,胡晓民. 烧结余热回收发电现状及发展趋势[J]. 烧结球团,2008,33(1):31-34.
WANG Z P,Hu X M. About the status and development trend of sintering waste heat power generation [J]. Sintering and Pelletizing,2008,33(1):31-34.

[3] 张欣,温治,楼国锋. 高温烧结矿气-固换热过程数值模拟及参数分析[J]. 北京科技大学学报,2011,33(3):339-345.
ZHANG Xin,WEN Zhi,LOU Guofeng. Numerical simulation and parameters analysis on the gas-solid heat transfer process of high temperature sinter [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2011,33(3):339-345.

[4] CAPUTO A C,CARDARELLI G,PELAGAGGE P M. Analysis of heat recovery in gas-solid moving beds using a simulation approach [J]. Applied Thermal Engineering,1996,16(1):89-99.

[5] LEONG J C,JIN K W,SHIAU J S,et al. Effect of sinter layer porosity distribution on flow and temperature fields in a sinter cooler [J]. International Journal of Minerals,2009,16(3):265.

[6] 陶文铨. 数值传热学(第二版)[M]. 西安: 西安交通大学出版社,2001.
TAO Wenquan. Numerical heat transfer (Second Edition) [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press,2001.

(下转第 68 页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[4] 张超. 当代混合机的结构原理及发展趋势[J]. 矿山机械,2010,38(16):12-15.
ZHANG Chao. Structure principle and development trend of current drum mixers [J]. Mining Machinery,2010,38(16):12-15.

[5] 唐建波. 柳钢120万t/a球团生产卧式强力混合机设备作业率攻关[J]. 烧结球团,2012,37(6):57-59.
TANG Jianbo. TANG Jianbo. Brainstorming equipment availability of horizontal intensive mixer for liusteel 1.2 million t/a pellet production line [J]. Sintering and Pelletizing,2012,37(6):57-59.

[6] 夏建芳,邓佳欣. 立式强力混合机料仓旋转参数优化研究[J]. 设计与研究,2017(1):77-80.
XIA Jianfang,DENG Jiaxin. Study on optimization of silo rotation parameters of vertical intensive mixer [J]. Design and research,2017(1):77-80.

[7] ZUO Zhijian,GONG Shuguang,XIE Guilan. Analysis of blade erosion of intensive mixer based on DEM during wet particles mixing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2019,35(5):81-90.

[8] BEHJANI M A,MOTLAGH Y G,BAYLY A E,et al. Assessment of blending performance of pharmaceutical powder mixtures in a continuous mixer using Discrete Element Method (DEM) [J]. Powder Technology,2020,366:73-81.

[9] CUNDALL PA. A computer model for simulating progressive,large-scale movements in blocky rock systems [J]. Procintsympon Rock Fracture,1971,1(II-b):11-18.

[10] HERTZ H. Über die Berührung fester elastischer Körper [J]. Reine Angew Math,1882(92):156-171.

[11] MINDLIN R D,DERESIEWICZ H. Elastic Spheres in Contact Under Varying Oblique Forces [J]. J. APPL. MECH. ASME,1953,20(3):327-344.

(上接第54页)

[7] 赵斌,张玉柱,王子兵,等. 烧结环冷机热工测试及余热源参数确定[J]. 钢铁,2010,45(8):90-93.
ZHAO Bin,ZHANG Yuzhu,WANG Zibing,et al. Thermal test of sintering ring cooler and determination of residual heat source parameters [J]. Iron and steel,2010,45(8):90-93.

[8] 沈永兵,刘建虎,高杨. 基于热力学模型的烧结环冷机漏风率测算方法研究[J]. 热能动力工程,2016,31(1):87-91.
SHEN Yongbing,LIU Jianhu,GAO Yang. Study on calculation method of air leakage rate of sintering annular cooler based on thermodynamic model [J]. Thermal power engineering,2016,31(1):87-91.

[9] 汪用澎,张信. 大型烧结设备[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
WANG Yongpeng,ZHANG Xin. Large sintering equipment [M]. Beijing:Machinery Industry Press,1997.

(上接第61页)

[7] 武轶,李小静,余正伟. 低硅烧结矿的冶金性能及其优化配用研究[J]. 安徽冶金科技职业学院学报,2018,28(1):19-22.
WU Yi,LI Xiaojing,YU Zhengwei. Study on metallurgical properties of low silicon sinter and its optimum combination [J]. Journal of Anhui Metallurgical Science and Technology Vocational College,2018,28(1):19-22.

[8] 郭贺,沈峰满,柳明旭,等. MgO以及装料方式不同对烧结矿熔滴性能的影响[J]. 材料与冶金学报,2017,16(1):13-16.
GUO He,SHEN Fengman,LIU Mingxu,et al. Effects of MgO and charging methods on the properties of sinter droplet [J]. Journal of Materials and metallurgy,2017,16(1):13-16.

[9] 许满兴. 烧结矿冶金性能对其质量和高炉主要操作指标的影响[J]. 烧结球团,2014,39(3):1-11.
XU Manxing. Effect of metallurgical properties of sinter on its quality and main operation index of blast furnace [J]. Sintering and Pelletizing,2014,39(3):1-11.

[10] 丁智敏,姜鑫,魏国,等. 软熔带类型对高炉内未燃煤粉分布影响的数值模拟[J]. 东北大学学报,2018,39(9):1242-1245.
DING Zhimin,JIANG Xin,WEI Guo,et al. Numerical simulation of the influence of soft melt zone type on unburned pulverized coal distribution in blast furnace [J]. Journal of Northeastern University,2018,39(9):1242-1245.

[11] 王海涛,李光辉,范晓慧. 几种高炉炉料冶金性能的对比研究[J]. 钢铁,2006,41(1):23-27.
WANG Haitao,LI Guanghui,FAN Xiaohui. Comparative study on metallurgical properties of several BF burden [J]. Iron and Steel,2006,41(1):23-27.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net