双系统耦合平衡法在线计算烧结冷却机漏风率

丁 晖[1]，王宏元[1]，徐 冰[1]，李晓丽[2]，陈 光[2]，包向军[2]，王诗歌[2]
(1. 马鞍山钢铁股份有限公司，安徽 马鞍山 24300；2. 安徽工业大学 能源与环境学院，安徽 马鞍山 24300)

摘要： 针对目前烧结冷却机漏风率测量方法的实施过程复杂、时效性差等问题，本文提出双系统耦合平衡法用于测算烧结冷却机漏风率。具体方法：① 根据余热锅炉和冷却机相互耦合的特点，建立余热锅炉和冷却机双系统模型；② 利用余热锅炉热量平衡模型计算出进入锅炉烟气的流量，即耦合点流量，根据这一流量再利用冷却机系统质量平衡模型计算出漏风率。该方法应用于某钢铁厂 360 m^2 带冷机的漏风率测试，测试的平均漏风率为 47.5%。应用结果表明：新方法可在线计算漏风率，方便快捷，克服了传统方法测量难度大、时效性差的缺点。

关键词： 烧结冷却机；双系统耦合平衡法；漏风率；热量平衡
中图分类号： TF046.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2021)06－0043－06
doi： 10.13403/j.sjqt.2021.06.083

Online calculation of air leakage rate of sintering cooler with dual-system coupling balance method

DING Hui[1], WANG Hongyuan[1], XU Bing[1], LI Xiaoli[2], CHEN Guang[2], BAO Xiangjun[2], WANG Shige[2]
(1. *Ma'anshan Iron and Steel Co., Ltd., Ma'anshan* 24300, *Anhui, China*;
2. *School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Ma'anshan* 24300, *Anhui, China*)

Abstract: Aiming at the problems of complicated implementation process and poor timeliness of current sintering cooler air leakage rate measurement methods, the dual-system coupling balance method is provided to measure the air leakage rate of sintering cooler. Specific methods: 1) According to the characteristics of the mutual coupling of the waste heat boiler and the cooler, a dual-system model of the waste heat boiler and the cooler is established; 2) The heat balance model of the waste heat boiler is used to calculate the flow of flue gas into the boiler, that is, the flow at the coupling point, and then the air leakage rate is calculated by using the mass balance model of cooler system according to this flow. This method is applied to a 360 m^2 air leakage rate test with a cooler in a steel plant, and the average air leakage rate tested is 47.5%. The results show that the new method can calculate the online air leakage rate conveniently and fastly, which overcomes the shortcomings of the traditional method of measurement difficulty and poor timeliness.

Key words: sintering cooler; dual-system coupling balance method; air leakage rate; heat balance

烧结冷却工艺中冷却机的漏风率直接影响设备寿命以及烧结矿的产、质量和能耗等[1]。如果冷却机漏风严重，会导致烧结矿冷却效果差，难以达到需要的温度，使烧结矿在运输过程中对皮带产生很大的损害，加速皮带老化；由于烧结矿冷却不充分，锅炉回收的热量无法满足发电要求，导致余热回收利用率低；外漏严重的情况下，为了满足工艺生产要求，冷却

收稿日期： 2020－12－15；**修回日期：** 2021－03－07
基金项目： 安徽省重点研究与开发计划资助项目(812233552051)
作者简介： 丁 晖(1967—)，男，高级工程师，从事炼铁生产管理和节能减排技术研究。
通讯作者： 包向军(1972—)，男，副教授，从事冶金流程热工系统节能减排技术研究。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

风机必须处于满负荷运行状态，这将大大增加风机的电耗。因此，准确计算冷却机漏风率和掌握冷却设备运行规律，有利于保证烧结矿产、质量，降低冷却能耗、提高余热利用效率。

目前常规的烧结机漏风率测试方法有氧氮平衡法[2-3]、经验公式估算法[4]、料面风速法[5]、漏风点测风速法及风量平衡计算法[6]等。其中，大部分方法不适用于烧结冷却机，部分学者针对环冷机漏风率开展了建设性的研究工作，但并未解决漏风率测试中烟囱烟气流量测量难度大、带冷机漏风点分布较广、漏风率测算准确性低、漏风率在线监测等问题。沈永兵等[7]基于热力学模型研究了烧结环冷机漏风率测算方法，该方法沿长度方向将烧结冷却机微元化，并建立热平衡模型，再测试沿烧结冷却机长度方向上的多组温度数据，拟合成温度函数，并计算得出漏风率，该方法的数据获取和处理难度均较大；陈德敏等[8]根据漏风损失热量计算出漏风率，但其进入锅炉烟气量的测量有一定的误差；曾琦等[9]根据测出的环式冷却机矿层表面的风速和面积，计算出矿层表面的排出风量，进而求解出台车与风箱交接处的漏出风量，但因矿层厚度存在上下约120 mm波动，风速和面积的测量精度有待考究；夏建芳等[10]结合现场工况建立数学模型来测算漏风率，但建模过程工作量偏大；马洛文等[11-12]将环冷机分为若干段，分别根据测点处风箱出口与台车上部自由空间的风量差及热平衡方法计算漏风率，但因其风箱内部流场非常复杂，导致风速测量误差较大。此外，方田等[13-14]通过声音、频率、频谱等物理信号特征，建立环冷机漏风率计算模型实现漏风故障的检测和诊断，该方法能够获得漏风相对程度的测量，属于半定量研究。

上述测量方法大多数都需要在线和离线测量烟气流量、温度等参数，并经过复杂的数据处理，导致实际工况难以获得较为准确的数据。本文根据余热锅炉和冷却机的耦合点，利用锅炉热平衡和风量平衡原理，提出采用双系统耦合平衡法来计算冷却机的漏风率，并提出在线实时漏风率测量方案，为类似项目提供计算方法。

1 方法概述及计算过程

1.1 双系统耦合平衡法

余热锅炉和冷却机耦合系统如图1所示。由图1可知：左边余热锅炉系统主要通过回收烟气余热，产生蒸汽用于发电，与蒸汽换热后145 ℃左右的烟气经过循环风机进入冷却机系统；右边冷却机系统主要包括进入冷却机系统的常温空气和循环烟气，两者混合后用于冷却烧结矿，冷却后的烟气变成高温烟气，一部分从烟囱回收进入锅炉，另一部分从其余烟囱排出，还有部分从台车漏风口漏出。

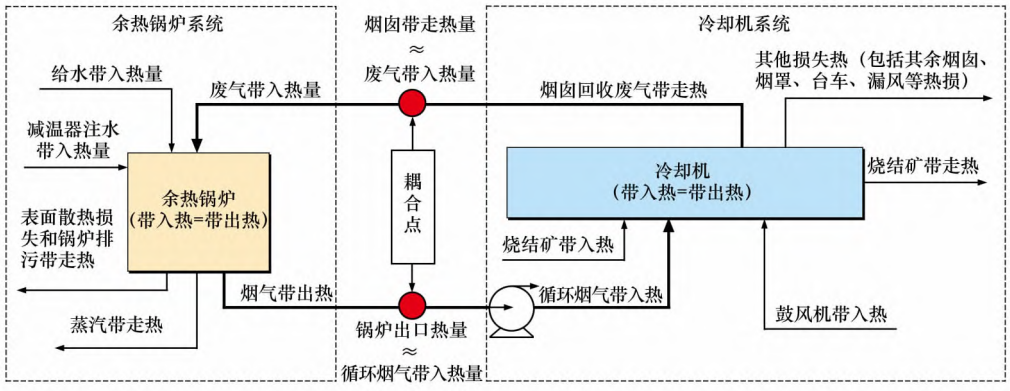


图1 余热锅炉和冷却机双回收系统耦合图

Fig. 1 Coupling diagram of double recovery system composed by waste heat boiler and cooling machine

余热锅炉和冷却机两个系统都存在质量平衡和能量平衡。双系统在质量和能量上耦合性很强，本文利用锅炉热量平衡计算出进入锅炉烟气的流量，即耦合点流量，利用蒸汽余热换

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

算因子修正不同生产状态和设备运行状态下的热平衡和风量平衡模型参数，根据系统的输入、输出和系统之间的平衡计算出漏风率。

1.2　计算过程

1.2.1　锅炉热平衡计算

由于生产运行的波动性，烟囱回收烟气量也是波动的，很难准确测量；且高温段烟气温度较高，在生产运行时测量难度较大，存在测量仪器被损坏、测量误差较大的问题。故采用锅炉热平衡原理进行反算求得此部分风量，即锅炉蒸汽吸热量等于回收至锅炉的烟气热量。产生蒸汽消耗的热量可由锅炉运行参数在线获得。余热锅炉热量平衡如图 2 所示。

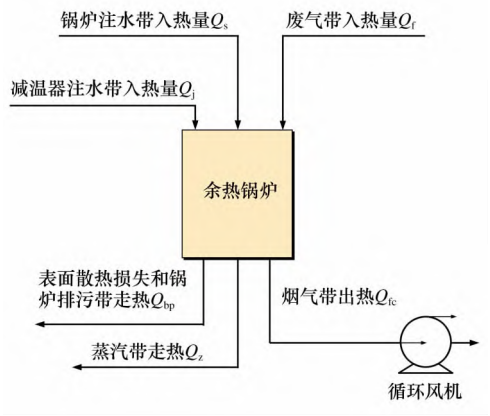


图 2　余热锅炉热量平衡

Fig. 2　Heat balance diagram of waste heat boiler

锅炉热量平衡分为热量收入项和支出项，计算过程如下。

（1）锅炉热量收入项计算。生产过程中锅炉的热量收入项共有 3 项，即：烧结冷却机低温烟气的热量、锅炉注水带入的热量、减温器注水带入的热量。

烧结冷却机低温烟气的热量：

$$Q_f = C_p \cdot L_v \cdot \Delta t \tag{1}$$

式中：Q_f 为烟气的热量，kJ/h；L_v 为烟气流量，kg/h；Δt 为烟气与环境的温差，℃（本文环境温度取 20 ℃）；C_p 为标准状况下烟气的平均比热容（0.955 6 + 0.000 093 t），kJ/（kg·K）。

锅炉注水带入热量：

$$Q_s = (h - h_0) \cdot L_{vs} \tag{2}$$

式中：Q_s 为锅炉注水所带进热量，kJ/h；h 为不同给水温度下水所具有的焓值，kJ/kg；h_0 为环境温度下水的焓值，kJ/kg；L_{vs} 为锅炉每小时的给水量，kg/h。

由于缺少部分生产数据，根据文献[4]确定减温器注水所带入热量 Q_j 占锅炉总收入热量的 0.028%，即：

$$Q_j = (Q_j + Q_s + Q_f) \times 0.028\% \tag{3}$$

（2）锅炉热支出项计算。生产过程中锅炉的热支出包括 3 项，即：锅炉产生的蒸汽带走的热量；锅炉出口低温烟气带走的热量；锅炉排污和表面损失带走的热量。

锅炉产生蒸汽带走的热量：

$$Q_z = h_z \cdot L_{zv} \tag{4}$$

式中：Q_z 为蒸汽所带走的热量，kJ/h；h_z 为蒸汽在不同温度、压力下的焓值，kJ/kg；L_{zv} 为蒸汽流量，kg/h。

锅炉出口烟气带走的热量：

$$Q_{fc} = c_p \cdot L_{vf} \cdot \Delta t \tag{5}$$

式中：Q_{fc} 为锅炉出口烟气所带走的热量，kJ/h；L_{vf} 为出口烟气流量，kg/h，锅炉出口烟气流量与进口烟气流量相等。

根据文献[4]确定锅炉排污和表面热损失的热量 Q_{bp} 占出口总热量的 0.46%。

根据锅炉热量平衡，得出如下公式。

$$Q_j + Q_s + Q_f = Q_z + Q_{fc} + Q_{bp} \tag{6}$$

（3）锅炉烟气流量计算。根据锅炉热量平衡关系式，其中进出口烟气温度、蒸汽流量温度都已知，可获得回收烟气热量 Q_f；又根据锅炉工作原理，锅炉进口烟气流量等于出口烟气流量，可求出烟气流量 L_v。

1.2.2　冷却机系统风量平衡计算

冷却机系统风量平衡计算可分为两部分：一是冷却机系统进入的总风量，此部分包括循环风机流量 L_v 和鼓风机鼓入风量 L_g 之和；二是冷却机系统出口风量，主要是烟囱排放，此部分分为烟气回收量 L_v 和烟气排散量 L_p。上述循环风机流量和烟气回收量均由锅炉热量平衡得出，鼓风机鼓入风量通过测试鼓入空气流速计算获得。冷却机系统风量平衡如图 3 所示。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

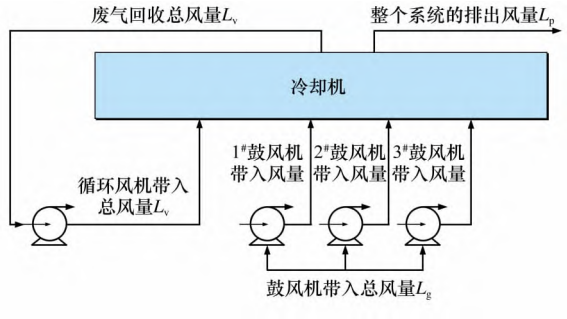


图3 冷却机系统风量平衡

Fig. 3 Air volume balance of cooling system

根据空气流速计算鼓风机带入风量公式如下。

$$L_g = 3\ 600\rho \sum_{i=1}^{n} v_i \cdot A_i \tag{7}$$

式中：L_g 为鼓风机带入风量，kg/h；v_i 为第 i 个风机处的空气流速，m/s；A_i 为第 i 个风机处的送风管道截面积，m^2；ρ 为空气密度，kg/m^3。

根据式(1)～(7)，得出漏风率(φ,%)的计算公式如下。

$$\varphi = (L_g - L_p)/(L_v + L_g) \times 100\% \tag{8}$$

2 测试及结果分析

2.1 测试对象

采用前述方法对某厂烧结冷却机漏风率进行测试。将带冷系统看为一个整体，按空间分布将其分为三大部分：上部为烟气排放的烟囱及烟气回收的余热锅炉，中部为烟气与烧结矿换热的台车，下部为提供冷却风的鼓风机与循环风机。

测试对象为A#烧结冷却机系统，该系统如图4所示。整个高温段系统的运行状况：烧结矿和冷空气换热后，烟气一部分经过0#、1#、2#烟囱进入余热锅炉，另一部分低温烟气经3#、4#号烟囱直接排放到环境中；进入余热锅炉的烟气和水换热后，通过循环风机分别引入第二、三节风管回收利用。1#～4#鼓风机分别为对应的第一节至第四节风管，并输送37 ℃左右的冷风。

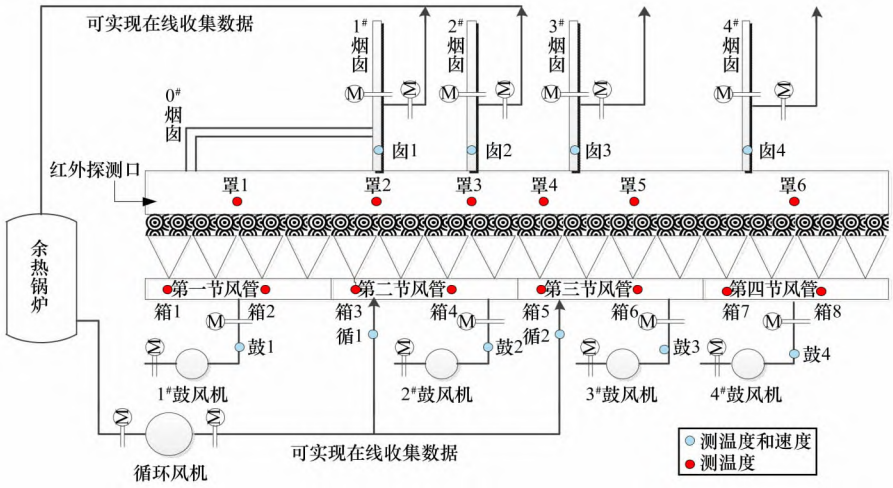


图4 烧结冷却机系统

Fig. 4 System of the sinter cooler

2.2 测试结果

保持测定时间段内配料成分基本不变，烧结生产条件稳定，设备连续正常运行。测试时间为12 h，以环境温度20 ℃为基准进行测量计算。测试与计算采用国际标准单位，统计风量时统一采用质量流量，即kg/h。某厂烧结冷却机系统运行参数测试值如表1、2所示。

由于烟囱管道进出口粉尘质量分数高、流速波动大，且温度高，造成气体流量测量困难，

表1 烧结冷却机系统运行参数(离线数据)

Table 1 Test value of operating parameters of a cooling machine system(offline)

测试序号	烟囱温度/℃				鼓入总风量/($kg \cdot h^{-1}$)
	1#	2#	3#	4#	
1	324.07	283.54	229.05	163.13	798 000
2	364.27	295.10	210.47	180.71	801 000
3	396.17	309.51	234.56	200.12	819 000
平均值	361.48	296.07	224.70	181.30	806 000

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　烧结冷却机系统运行参数(在线数据)

Table 1　Test value of operating parameters of a cooling machine system(online)

测试序号	焓值/(kJ·kg^{-1})			流量/(kg·h^{-1})			烟气出口温度/℃	
	低压蒸汽	中压蒸汽	冷凝水	低压蒸汽	中压蒸汽	冷凝水	入口	出口
1	2 910.67	3 042.08	201.04	5×10^3	11×10^3	63.4×10^3	320.12	138
2	2 910.67	3 042.08	201.04	5×10^3	13×10^3	59.3×10^3	350.10	149
3	2 910.67	3 042.08	201.04	5×10^3	15×10^3	65.1×10^3	330.79	148
平均值	2 910.67	3 042.08	201.04	5×10^3	13×10^3	62.6×10^3	333.67	145

且误差大，故采用余热锅炉在线数据对其进行反算，以提高数据精度。

2.3　计算结果及分析

2.3.1　锅炉热平衡分析

结合锅炉各项计算公式及表 1 所示的锅炉运行数据，得到锅炉的热量平衡如表 3 所示。由于热量收入于热量支出，可得烟气带入热 $Q_f=2.48$ $t_{标煤}/h$。根据式(1)，可计算得到烟气流量：$L_v=2.48\times2.917\ 6\times10^7/(0.969\times333.67)=2.2\times10^5$ kg/h。

表 3　余热锅炉的热量平衡

Table 2　Heat balance of the waste heat boiler　$t_{标煤}/h$

热量收入项	值	热量支出项	值
废气带入热量	2.48	烟气带走热量	1.06
给水带入热量	0.431	蒸汽带走热量	1.855
减温器带入热量	0.000 82	表面散热和锅炉排污带走热量	0.013 5
合计	2.915	合计	2.927

2.3.2　风量平衡分析

由上述可知，循环风机的带入风量为2.2×10^5 kg/h，夏秋季节风机开启台数为 4 台，由测试数据计算可得鼓风机鼓入的风量为 8.06×10^5 kg/h。烧结冷却机系统带入总风量等于鼓风机风量与循环风机风量之和，为 1.026×10^6kg/h。

根据质量平衡可知，进口系统总风量等于出口系统总风量，烧结冷却机进口系统总风量等于排出风量和漏风量之和，故由公式(8)可得该烧结冷却机的漏风率为 47.5%。

3　在线漏风监测

根据上述方法分析可知，漏风率的获得和余热锅炉回收烟气量、风机压力、料层厚度有关，风机压力直接决定了供风风量的大小，而料层厚度直接影响漏风口处的压力，决定漏出风量的大小。因而表征漏风率值是取决于如下主要因素的复杂函数，可表示为

$$\varphi=f(q,p,\delta) \tag{9}$$

式中：φ 为漏风率，%；q 为余热锅炉回收烟气量，kJ/h；p 为余热锅炉回收烟气量，kJ/h；δ 为料层厚度，m。

余热回收烟气量可根据在线测量数据获得，本文将风机压力及料层厚度对漏风率的影响规律转化为在线测量数据，最终实现漏风率在线计算，这样可根据漏风率的大小调节生产工艺。

4　结　论

(1) 本文提出双系统耦合平衡法：利用锅炉的热量平衡计算进入锅炉烟气的流量，即耦合点流量；并根据该流量值，利用冷却机系统的质量平衡计算出漏风率。新方法采用在线与离线相结合的方式计算漏风率，如：采用在线锅炉热平衡数据反算进入锅炉的烟气流量，避免了烟气高粉尘、高温度和波动流速等带来的误差；采用离线的带冷系统数据，包括烟囱烟气温度、鼓风机烟气流量等，并与在线数据同步更新，实现可持续监测。

(2) 经过测试，利用双系统耦合平衡法测得某钢厂 A$^{\#}$ 烧结冷却机系统的漏风率为 47.5%。新方法克服了烟气流量测量不准的缺点，测算精度较高，未来可实现在线动态监测。

参考文献：

[1]　唐先觉，李希超. 现代钢铁工业技术烧结[M]. 北京：冶金工业出版社，1984.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

TANG Xianjue, LI Xichao. Modern iron and steel industry technology sintering [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1984.

[2] 程翠花,范兰涛,甄常亮,等. 唐钢烧结机漏风率的测定与漏风治理 [J]. 河北冶金,2017(6):36-38.
CHENG Cuihua, FAN Lantao, ZHEN Changliang, et al. Determination of air leakage rate and air leakage treatment of tangang sintering machine [J]. Hebei Metallurgy, 2017(6):36-38.

[3] 郝永寿. 太钢烧结机漏风率检测与漏风治理实践 [J]. 山西冶金,2016,39(5):78-80.
HAO Yongshou. Air leakage rate detection and air leakage control practice of TISCO sintering machine [J]. Shanxi metallurgy, 2016, 39(5):78-80.

[4] 宋新义,李文辉. 烧结机系统漏风率测定技术的探究 [J]. 能源与节能,2013(8):51-53.
SONG Xinyi, LI Wenhui. Research on air leakage rate measurement technology of sintering machine system [J]. Energy and Energy Conservation, 2013(8):51-53.

[5] 王涛,王勇. 浅谈料面风速法则漏风的原理与方法 [J]. 酒钢科技,2004(2):36-40.
WANG Tao, WANG Yong. Discussion on the principle and method of air leakage based on the rule of material surface wind speed [J]. Jiusteel Science and Technology, 2004(2):36-40.

[6] 金永龙,徐南平,邬士英,等. 烧结机漏风测定新技术的研究和应用 [J]. 钢铁研究学报,1999(3):71-74.
JIN Yonglong, XU Nanping, Wu Shiying, et al. Research and application of new technology of air leakage measurement in sintering machine [J]. Journal of Iron and Steel Research, 1999(3):71-74.

[7] 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(3):87-91.
SHEN Yongbing, LIU Jianhu, GAO Yang. Calculation method of air leakage rate of sintering ring cooler based on the rmodynamic model [J]. Journal of thermal energy and power engineering, 2016, 31(3):87-91.

[8] 陈德敏,陈光,刘长青. 烧结带冷机烟气余热测试研究 [J]. 冶金能源,2009,28(1):61-64.
CHEN Demin, CHEN Guang, LIU Changqing. Study on the waste heat of sintering zone chiller flue gas [J]. Metallurgical energy, 2009, 28(1):61-64.

[9] 曾琦. 环式冷却机冷却功效数值分析与漏风率测试方法研究 [D]. 长沙:中南大学,2010.
ZENG Qi. Numerical analysis of cooling efficiency and test method of air leakage rate of ring cooling machine [D]. Changsha: Central South University, 2010.

[10] 夏建芳,陈锦,赵先琼. 烧结矿冷却过程数值仿真及环冷机漏风率研究 [J]. 计算机仿真,2015,32(7):208-212.
XIA Jianfang, CHEN Jin, ZHAO Xianqiong. Numerical simulation of sinter cooling process and air leakage rate of ring cooler [J]. Computer simulation, 2015, 32(7):208-212.

[11] 马洛文,姜伟忠,向家发,等. 一种烧结环冷机台车漏风率在线测试方法及装置:201610471208.0 [P]. 2016-11-16.
MA Luowen, JIANG Weizhong, XIANG Jiafa, et al. An online test method and device for air leakage rate of sintering ring cooling machine: 201610471208.0 [P]. 2016-11-16.

[12] 马洛文,金永龙,盛熔,等. 烧结环冷机漏风率的在线诊断方法:200710039545.3 [P]. 2008-10-22.
MA Luowen, JIN Yonglong, SHENG Rong, et al. Online diagnosis method of air leakage rate of sintering ring cooler: 200710039545.3 [P]. 2008-10-22.

[13] 方田,叶学农,石海军. 基于盲源分离单边检测法的环冷机漏风率检测方法:201810553950.5 [P]. 2018-10-09.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费,对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net