烧结漏风在线监测系统开发与应用

陆伟文[1]，余文瑶[2]，张德千[3]，余正伟[1]，吉建国[2]，陈良军[1]，龙红明[1]
（1. 安徽工业大学 冶金工程学院，安徽 马鞍山 243002；2. 江苏永钢集团有限公司 炼铁厂，江苏 张家港 215628；
3. 山东钢铁集团日照钢铁有限公司 炼铁事业部，山东 日照 276805）

摘要： 烧结机漏风严重影响着烧结生产过程的各项经济技术指标，其会导致通过料层的有效风量减少，造成烧结矿产、质量指标变差，风机电耗增大。为了实时监测烧结机漏风、为漏风治理提供及时指导，基于氧平衡法设计了一套烧结漏风在线监测系统。该系统通过氧化锆测氧仪采集不同烧结烟气监测点的氧体积分数，基于 Visual Studio 平台搭建了漏风率计算模型，实现了烧结系统不同区间的漏风率实时监测与异常告警。通过分析烧结机漏风的关键因素与部位，结合及时堵漏和系统检修，烧结全系统漏风率由 40.72% 降至 34.15%，降低了 6.57%，达到了国内先进水平，促进了烧结低碳绿色发展。

关键词： 烧结机；漏风率；在线监测；漏风治理
中图分类号： TF046.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)06－0164－09
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.06.098

Development and application of online monitoring system for sintering air leakage

LU Weiwen[1], YU Wenyao[2], ZHANG Deqian[3], YU Zhengwei[1], JI Jianguo[2], CHEN Liangjun[1], LONG Hongming[1]
(1. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, Anhui, China; 2. Jiangsu Yonggang Group Co., Ltd., Zhangjiagang 215628, Jiangsu, China; 3. Ironmaking Division, Shandong Iron and Steel Group Rizhao Co., Ltd., Rizhao 276805, Shandong, China)

Abstract: The air leakage of the sintering machine seriously affects the economic and technical indicators during the sintering production process, which will lead to the reduction of the effective air volume through the bed of material, the deterioration of the sintering minerals and quality indicators, and the increase of the fan power consumption. In order to monitor the air leakage of the sintering machine in real time and provide timely guidance for the air leakage control, an online monitoring system for sintering air leakage is designed based on the oxygen balance method. The oxygen content of different sintering fume monitoring points is collected through the zirconia oxygen meter, and a calculation model of the air leakage rate is built based on the Visual Studio platform, which realizes the real-time monitoring of the air leakage rate and abnormal alarm in different sections of the sintering system. By analyzing the key factors and parts of air leakage of the sintering machine, combined with timely leak plugging and system maintenance, the air leakage rate of the whole sintering system is decreased from 40.72% to 34.15%, a decrease of 6.57%, reaching the domestic advanced level and promoting the low-carbon and green development of sintering.

Key words: sintering machine; air leakage rate; online monitoring; air leakage control

收稿日期： 2023－11－08；**修回日期：** 2023－11－19
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(52204331)
作者简介： 陆伟文(1999—)，男，硕士研究生，从事冶金智能化方面的研究。
通信作者： 余正伟(1984—)，男，博士，副教授，从事冶金智能化与低碳冶金领域方面的研究。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

铁矿石烧结作为炼铁前的关键工序，生产的烧结矿是高炉冶炼的主要原料，开展烧结高效低碳技术工作对钢铁工业高质量发展具有重要支撑作用[1]。烧结漏风治理作为重要的低碳技术之一，关系到烧结矿的产、质量。一方面漏风会使抽风系统负压降低，单位面积内的有效抽风量减少，造成烧结矿产、质量下降。另一方面，设备缝隙处空气的漏入，会导致烧结烟气温度降低，影响烧结烟气余热回收与利用，也会导致除尘系统负荷增加，脱硫脱硝系统运行效率下降[2]。国内外烧结实践证明：烧结机漏风率每减少 10%，烧结矿可增产 6%，每吨烧结矿可减少电耗 2 kW·h、减少焦粉消耗 1 kg，烧结成品率提高 1.5%～2.0%[3]。目前国内先进烧结机的漏风率可以降至 30% 以下，但仍有大量烧结机漏风率为 40%～60%，节能减排空间巨大。在“双碳”目标和智能制造战略快速推进的背景下，以智能化手段赋能低碳冶金成为大势所趋，漏风智能化治理系统逐渐被冶金学者所关注[4]。

漏风治理的关键在于对烧结漏风的准确检测，大量学者对漏风检测方法进行了深入研究。目前主要的漏风检测方法有经验公式估计法、密封测量法、流量分析法、料面风速测量法、量热法、氧平衡法。刘波等[5]在密封法的基础上提出采用烧结机台车空载静态密封测试与烧结机台车额定负载动态测试相结合的方法检测烧结机漏风率。但是，采用密封法检测漏风率时，所测结果与正常生产条件下台车的漏风率有一定误差。曹欣川洲等[6]在料面风速法的基础上，考虑料面风量波动情况，使得有效风量计算值更接近实际值。但是，料面风速法将烧结过程产生烟气也纳入漏风，导致检测数据偏大。姜丽娟针对吴颖等的研究，采用量热法建立烧结漏风率软测量模型对烧结气体温度场进行分析，实现漏风产生原因与部位诊断，对烧结生产具有很好的指导作用[7-8]。但量热法需要基于风箱规格参数和物理模型建模，由于不同烧结机以及相同烧结机的不同位置风箱规格存在非标情况，物理模型参数获取难度较大[9]。张安煜[10]在可移动的台车上和固定的风箱下部安装氧体积分数传感器实现对炉箅下烟气中氧体积分数和各个风箱下部烟气氧体积分数的在线检测，在行业内较早实现了烧结漏风率在线监测，但需要解决移动台车上测氧仪长期稳定运行及数据传输问题。鉴于烧结烟气成分复杂、粉尘对检测设备磨蚀严重、温度、压力、烟气流量等基础参数检测点不全等情况，上述 5 种漏风率测定方法所需的计算基础数据难以完整获得，使得烧结漏风在线监测技术在实际生产中未获得广泛应用[11-12]。相对而言，氧平衡法具有操作便捷、测定结果可靠的优势，在实际生产中得到了较为广泛的应用。但由于设备成本原因，大部分都只用于小频次的离线检测，检测工作量大，对生产指导意义不强。

目前，随着检测技术的革新，氧化锆测氧仪逐渐普及和平价化，使得大规模应用成为可能。因此，本文将基于氧气平衡法，采用氧化锆测氧仪多点布控的方式，实现烧结机漏风率的在线监测和诊断。

1　烧结漏风在线监测系统

1.1　氧平衡法实现在线监测原理

氧平衡法是根据漏风率的不同使得烟气中氧体积分数不同的原理，利用平衡方式分析浓度变化来寻找规律，找出测量点漏风量的变化和烟气中氧体积分数变化的关系，从而计算出烧结机前后漏风率。计算方法是通过测得待测设备或工艺流程进口和出口烟气氧体积分数，计算得出该设备或工艺流程的漏风，在连续烧结生产过程中，计算关键区间漏风率，实现对烧结生产的漏风率实时监测，计算公式见式(1)。

$$K_i = \frac{\delta_{O_2(后)} - \delta_{O_2(后)}}{\delta_{O_2(大气)} - \delta_{O_2(后)}} \times 100\% \quad (1)$$

式中：K_i 为该特定区间的漏风率，$0 < K < 100\%$；$\delta_{O_2(后)}$ 为该特定区间的后端烟气氧体积分数，%；$\delta_{O_2(前)}$ 是该特定区间的前端烟气氧体积分数，%；$\delta_{O_2(大气)}$ 是大气氧体积分数，取 21%。

1.2　漏风率计算模型硬件设计

本文为获取烧结系统各区间前后端氧体积分数的数据，采用了氧化锆氧分析仪作为数据采集端。该仪表可检测的氧体积分数范围为 0～

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

20.6%，具有快速、准确，实用可靠的特点[13]。为了全面、实时监测烧结机漏风率与漏风部位，在烧结机风箱中部安装氧化锆测氧分析仪，每隔一个风箱安装一台，南北风箱交叉安装，检测台车底部的平均氧体积分数；在两个除尘器入口、除尘器出口各安装一台测氧仪，实时显示两处氧质量分数（图1）；然后，将检测所得的氧体积分数转化为4～20 mA的电流信号模拟量，通过光纤传输到二级PLC，并通过Modbus这一通讯协议采集到的各检测点压力、温度等数据一同传输至工控机进行漏风率的计算，并结合工艺数据，对氧体积分数、漏风率以及异常的漏风点进行分析，为烧结漏风治理提供依据。

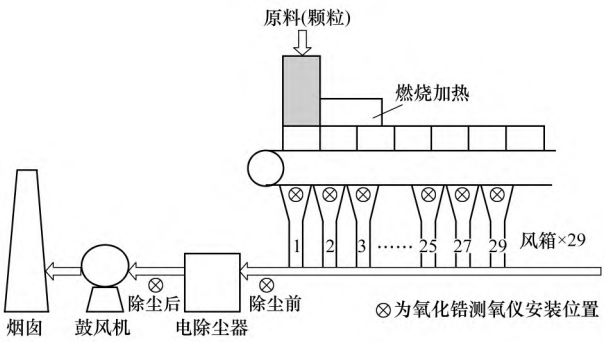


图1 监测点分布

Fig. 1 Distribution of monitoring points

1.3 漏风率计算模型的输入与输出

系统基于Visual Studio 2022开发平台，采用基于NETFramework的WinForm语言，利用Kepserver软件通过Modbus串行通信协议，将设备的IP地址固定，添加数据点位采集，实时采集各处氧质量分数数据和烧结过程工艺参数，并存入MySQL数据库作为模型输入量。同时，系统借助其高效的架构、便捷的界面设计和关键的测试工具等诸多优势，对烧结漏风率进行计算，输出烧结系统各区间的漏风率，详见表1。通过以上处理，系统极大减小了烧结机漏风率在线监测告警系统功能实现的难度，为该系统整体功能的实现奠定了基础。

1.4 漏风率计算算法设计

系统针对烧结风箱及烟道烟气温度、压力状态不一致，计算漏风率前需转化至标准态计算，例如：

$$\delta_{O_{2-标i}}=\frac{\delta_{O_{2-i}}\times(101\ 325-P_i)\times 298.15}{101\ 325\times(T_i+273.15)} \tag{2}$$

式中：$\delta_{O_{2-标i}}$为实测风箱或烟道检测点氧体积分数，%；P_i为检测点负压（取正值），kPa；T_i为检测点烟气温度，℃；$\delta_{O_{2-i}}$为折算成标准态（25 ℃，101.325 kPa）后的烟气氧体积分数，%。

表1 烧结过程工艺参数

Table 1 Parameters of sintering process

项目	备注
烟气氧体积分数/%	所涉风箱除尘器前后大烟道烟气氧体积分数
烟气温度/℃	所涉风箱、除尘器前后大烟道烟气温度及大气温度
烟气压力/kPa	所涉风箱、除尘器前后大烟道烟气压力及大气压力
烟气流量/($m^3\cdot h^{-1}$)	所涉风箱支管及大烟道烟气流量
烧结机速度/($m\cdot s^{-1}$)	
料层厚度/mm	
垂直烧结速度/($mm\cdot min^{-1}$)	
风箱及烟道烟气氧体积分数/%	
烧结系统漏风率/%	
电除尘器漏风率/%	电除尘器南、北漏风率
全系统漏风率/%	包括烧结机、风箱、电除尘器等全系统漏风率

注：表中“空白”代表无此项。

此外，因风箱风量不一样，在计算多个风箱平均氧体积分数时，需要加入风量权重系数，不同烧结机需根据实际风量分配情况赋予风量权重系数。

$$\overline{\delta_{O_{2箱标}}}=\sum_{i=1}^{12}\delta_{O_{2标-i}}\times B_i \tag{3}$$

式中：$\overline{\delta_{O_{2箱标}}}$为风箱标态加权平均氧体积分数，%；$\delta_{O_{2标-i}}$为第$i$号风箱标态氧体积分数，%；$B_i$为第$i$号风箱风量权重系数。

漏风率计算见式（4）：

$$Ki=\frac{\overline{\delta_{O_{2标前}}}-\overline{\delta_{O_{2标后}}}}{0.21-\overline{\delta_{O_{2标后}}}} \tag{4}$$

式中：Ki为检测区域漏风率，%；$\overline{\delta_{O_{2标前}}}$为检测区域前端检测点标态平均氧体积分数，%；$\overline{\delta_{O_{2标后}}}$为检测区域后端检测点标态平均氧体积分数，%。

1.5 漏风率计算模型软件开发

漏风率计算模型软件开发主要包括以下5个

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

部分。

（1）数据库表设计。涉及的数据库表包括采集类数据库表、人工录入类数据库表、中间类数据库表、模型类数据库表和配置类数据库表。

（2）系统逻辑设计。模型逻辑如图 2 所示。由图 2 可知，模型通过采集氧体积分数及烧结过程工艺参数，计算烧结漏风率，通过模型界面显示漏风率及氧体积分数；判断各区间或位置点氧体积分数是否正常。当显示为“是”时，则结束逻辑；当显示为“否”时，则给出相应的告警级别和建议操作内容。

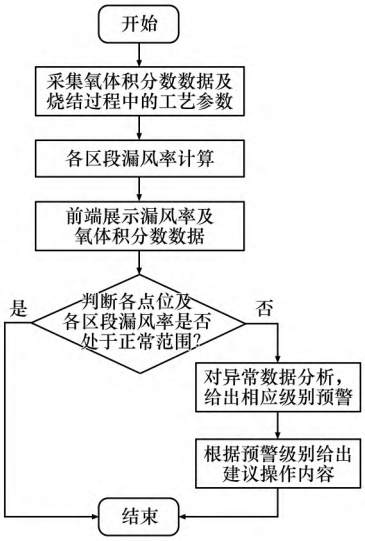


图 2　模型逻辑框架

Fig. 2　Framework of model logic

（3）功能设计。烧结漏风在线监测告警系统的功能主要包括数据获取、漏风率计算、数据保存、数据展示，漏风告警和历史数据查询等，具体功能详述如表 2 所示，程序流程如图 3 所示。

（4）数据异常处理设计。由于烧结流程处于高温、多尘的“黑箱”环境中，现场生产数据的采集、传输和存储会产生异常数据（异常值、重复值和空值），需要根据现场的实际生产经验和数据处理技术针对数据集进行异常值和重复值的剔除，对于空值常分为三种情况：点缺失，短时缺失，长时缺失。点缺失属于极短型缺失，数据在小范围内基本不会发生较大变化，可采取简单统计法或直接取最近邻值的均值；如果长时缺失超过有效性极限，可采取整周期删除，因为长时缺失本身就已经造成数据的有效性降低，对长时段的空值进行填补会再次降低数据的有效利用价值；根据时序性数据短时间变化的连续性特点，数据集中的短时缺失值处理采用线性插值法填补数据[14]。

表 2　系统界面功能汇总

Table 2　Summary of system interface functions

主体界面	功能
运行状态监控	显示烧结各风箱温度及氧体积分数，风箱支管烟气流量，以及烧结机或烧结系统的漏风率等关键信息展示
功能界面	风箱及烟道氧体积分数显示界面 烧结机漏风率显示界面 烧结机系统显示界面 除尘器漏风率显示界面 风箱温度显示界面
告警界面	风箱、大烟道氧体积分数及各漏风率异常告警及生产操作提示窗口
数据曲线查询	单个风箱氧体积分数历史趋势界面 烧结各个区间漏风率数据趋势界面 氧体积分数及漏风率信息查询界面
参数维护管理	模型计算参数维护界面

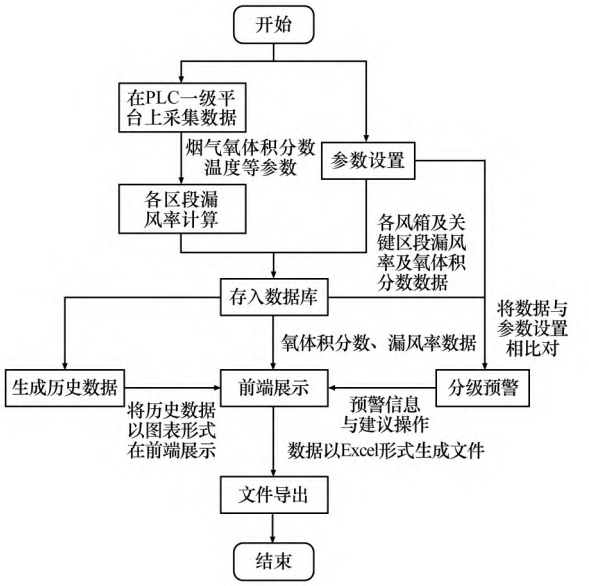


图 3　程序流程

Fig. 3　Flow of program

（5）异常告警设计。为了使主控室操作人员能够及时监测漏风情况，本文通过设定不同的区间和参数，建立了红、黄两个等级的预警系统，以实现对漏风的及时预警。根据现场数据的采集、分析及与生产单位专业技术人员交流确认，在参数设置中对风箱、电除尘器、关键区间氧体积分

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

数以及风箱温度进行上下限确定和设置。系统将采集到的实时数据与参数设置中各参数上下限设定值进行比对，从而判断烧结机漏风状态，并提供相应的运行提示，漏风预警分级情况如表 3 所示。

表 3 漏风预警分级汇总

Table 3 Classification summary of air leakage warning

预警级别	内容
黄色预警	单一风箱氧体积分数单日平均值较前一天上升 1%~3% 或超出黄色预警上下限设定值
	电除尘器氧体积分数单日平均值较前一天上升 0.5%~1% 或超出黄色预警上下限设定值
	关键区间漏风率单日平均值较前一天上升 3%~5% 或超出黄色预警上下限设定值
	风箱温度单日平均值较前一天上升 30 ~ 50 ℃ 或超出黄色预警上下限设定值
红色预警	单一风箱氧体积分数单日平均值较前一天上升超出 3% 或超出红色预警上下限设定值
	电除尘器氧体积分数单日平均值较前一天上升超过 1% 或超出红色预警上下限设定值
	关键区间漏风率单日平均值较前一天上升超过 5% 或超出红色预警上下限设定值
	风箱温度单日平均值较前一天上升超过 50 ℃ 或超出红色预警上下限设定值

主界面的告警功能主要包括：① 当参数超出预设范围时，系统会触发告警，告警信息会显示在二级画面上并给出相应的建议操作；② 如果单点氧体积分数在指定的时间范围内上升或下降幅度超过某一限值，系统将生成氧体积分数异常的分级告警信息，并提醒值班岗位进行巡查和处理；③ 当区域漏风率在某一时间段内上升或下降幅度超过设定限值时，系统将给出分级告警信息，并建议值班岗位进行巡查和处理；④ 若氧体积分数和区域漏风率出现其他非常规波动，系统同样会生成异常告警信息，并提醒值班岗位巡查、处理。

1.6 系统的应用情况

基于采集的各点氧体积分数数据，结合烧结过程工艺参数、料层厚度等，建立漏风率计算模型，监测烧结过程漏风率状态，根据漏风率变化趋势对烧结过程进行状态诊断，及时给出异常告警，及时提醒操作人员采取措施，从而减少无效风量，节约电耗，减轻烟气治理压力。

主界面展示了各检测点的实时数据以及计算得出的关键区段漏风率。数据在界面上以柱状图和曲线图的形式呈现，使得用户能够详细了解实时数据的波动情况，具体如图 4 所示。

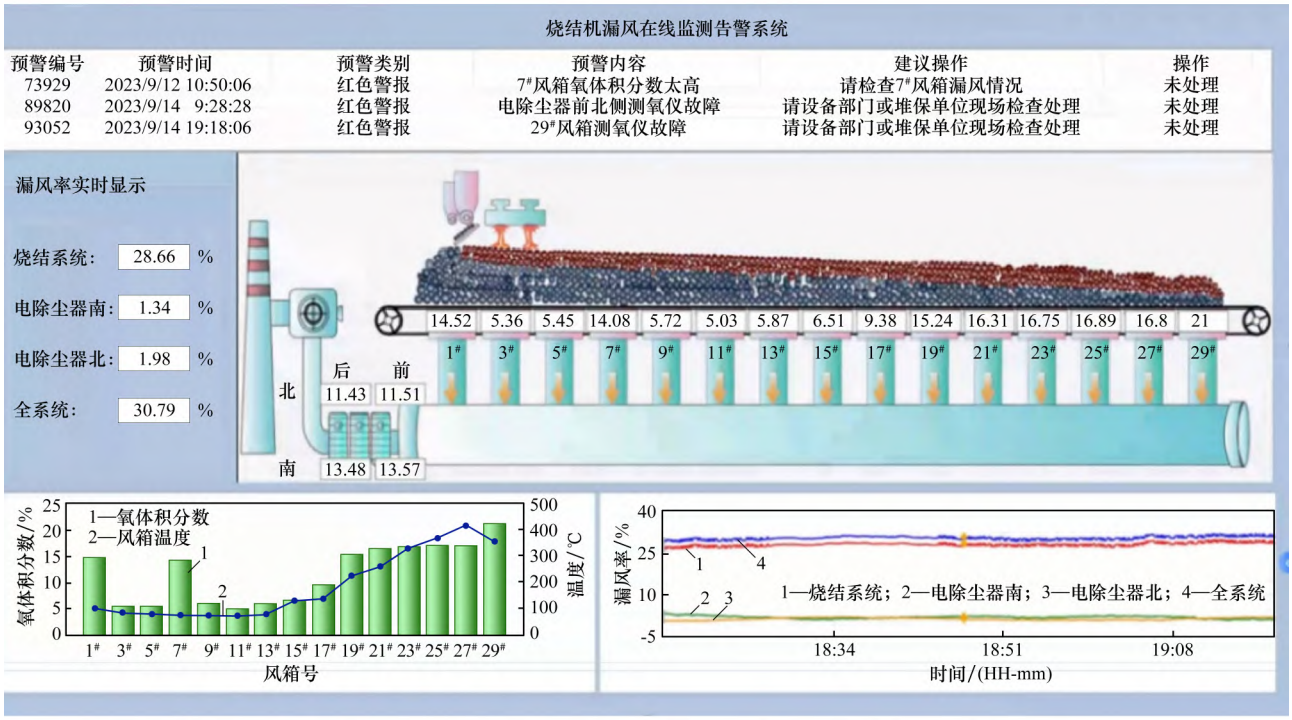


图 4 系统主界面

Fig. 4 Main interface of system

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为了确保漏风率监测告警的准确性，系统提供了参数设置功能。需要设置的主要参数：风箱氧体积分数的上下限(图 5)、电除尘器氧体积分数的上下限、关键区间漏风率的上下限、风箱温度的上下限。红黄告警的间隔值。

历史趋势功能主要有：① 历史数据查询与导出功能：在历史数据查询界面可查询漏风率、氧体积分数、温度历史数据曲线(图 6)，生产相关数据报表；② 氧体积分数与温度对比分析功能：在氧体积分数、温度对比查询界面可查询风箱氧体积分数、风箱温度历史数据曲线进行对比，并生成报表；③ 漏风率、温度对比分析功能：在漏风率、温度对比查询界面可查询漏风率、风箱温度历史数据曲线进行对比，并生成报表；④ 氧体积分数和漏风率日平均趋势：对氧体积分数检测点、区域漏风率的数趋势，并据此进行趋势变化分析和异常告警。



图 5　参数设置风箱氧体积分数

Fig. 5　Oxygen Volume fraction of parameter setting-bellows

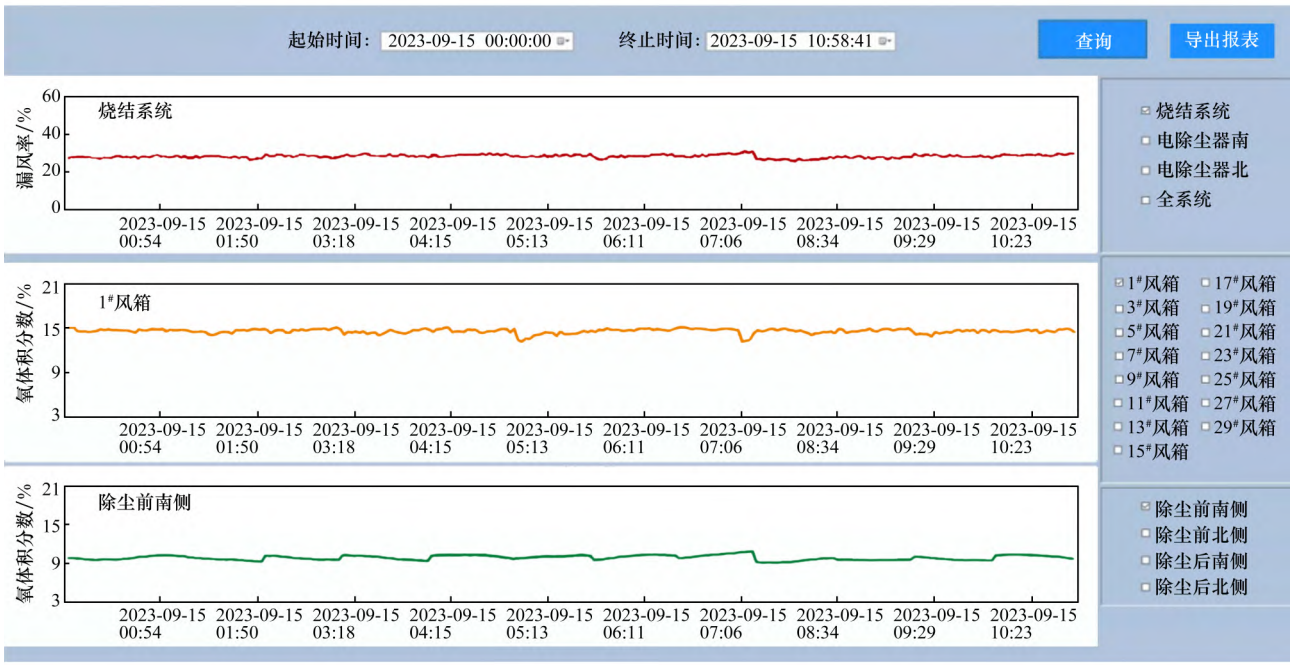


图 6　漏风率体积分数对比

Fig. 6　Comparison of oxygen volume fraction on air leakage rate

在某钢厂的实际生产过程中，该系统经过了一段时间的应用。为进一步分析各点漏风趋势及规律，将烧结漏风在线监测告警系统监测计算到的阶段性数据调取出来，得到历史数据如表 4 所示。由表 4 可知，风箱中氧体积分数从前到后呈现出两端高，中间低的趋势，说明烧结机机头和机尾漏风相对更加严重，与现场生产实际相符。通过对系统投用期间一个月内的漏风率数据进行分析，得到漏风率趋势如图 7 所示。由图 7 可知，在系统投用后，南北除尘器和烧结机本体的漏风率整体数据较为平稳，整个烧结系统漏风率未出现较大波动。

2　漏风分析与治理

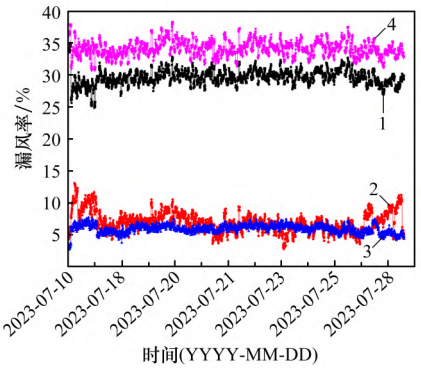
当前，烧结机由于缺乏有效的在线漏风监测手段和及时的漏风治理，其实际漏风率仍存在整

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 4 系统投用后数据分析表

Table 4 Data analysis after system operation

部位	烟气中氧体积分数/%	漏风率/%	部位	烟气中氧体积分数/%	漏风率/%
烧结系统	—	29.61	除尘前东	12.53	—
电除尘器南	—	6.99	除尘前西	11.05	—
电除尘器北	—	5.94	除尘后东	11.83	—
全系统	—	34.15	除尘后西	10.91	—
风箱 1	14.27	—	风箱 17	9.38	—
风箱 3	5.49	—	风箱 19	13.48	—
风箱 5	5.05	—	风箱 21	14.99	—
风箱 7	6.12	—	风箱 23	16.13	—
风箱 9	4.93	—	风箱 25	16.61	—
风箱 11	4.42	—	风箱 27	16.77	—
风箱 13	5.52	—	风箱 29	17.29	—
风箱 15	7.08	—	—	—	—



1—烧结机系统；2—电除尘器南；3—电除尘器北；4—全系统。

图 7 漏风率数据分析

Fig. 7 Data analysis of air leakage rate

体偏高的问题，造成的巨大能源浪费，影响了烧结生产。本文利用基于氧平衡法的烧结漏风监测系统，明确烧结漏风部位，结合及时堵漏措施，并指导烧结系统检修，有望准确、及时地定位漏风源头，实现高效烧结，达到提质、降本、增效的目的。

2.1 烧结系统漏风部位分析

在系统应用后，对于氧体积分数数据进行分析，再结合经验与检测结果，判断出烧结漏风主要集中于烧结机端部、台车与固定滑道之间、烧结机风箱及台车本体处。

(1) 烧结机端部。烧结机头、尾部是烧结机一个主要的漏风点，由于机头、机尾密封板长期处于高温粉尘的工作环境中，易受高温废气热冲击作用而发生变形，导致无法紧密的结合，从而影响密封效果，造成漏风[15]。

(2) 台车与固定滑道处。台车与固定滑道之间采用了弹压浮动游板式密封装置。其中螺旋弹簧易受温度波动与压力冲击发生变形、失效，端板也因频繁挤压发生形变，从而产生间隙。此外，台车在生产过程中存在跑偏现象，使得台车游板与台车密封槽两侧出现漏风。

(3) 烧结机风箱及大烟道。在高负压气流和酸性烟气的冲刷、腐蚀作用下，风箱和大烟道内壁易出现孔洞。另外，法兰连接处的密封垫长期处于高负压、高温及多尘的环境下，磨损也较为严重，易使得漏风率升高。

(4) 台车本体。烧结机的台车本体是烧结机系统漏风最关键的部位之一，漏风量约占烧结系统风量的 30%。台车栏板由于受热变形扭曲，造成台车与栏板间以及上下栏板排列不紧凑出现间隙漏风。为提高箅条拆装的便捷性，箅条销孔尺寸往往大于箅条插销尺寸，由于这一机械设计的局限性会导致销孔处漏风情况较为普遍。

2.2 漏风治理及效果

烧结漏风监测系统对烧结机的工作状态的实时监控有利于现场做好日常点检工作，将漏风治理从“临时堵漏”转变为长期“顶点根治”。现场对于发现的漏风部位及时进行维修处理，建立漏风台账，做到漏风问题零遗留，及时发现及时上报及时处理，支撑了烧结漏风治理的常态化管理。

当系统发出告警时，控制室人员根据系统给出氧体积分数异常的分级告警信息以及操作建议，及时安排当日值班人员巡查，能及时处理的问题及时处理。如果处理不了，将漏风发生的部位、时间等信息进入漏风台账，建立台账后，可以利用停机检修的机会，对问题进行处理。

另外，通过技术改进和升级，可对老旧的烧结系统部位和设备进行技术改造，降低漏风率。应用新材料、新技术，对台车栏板处增加新型密封结构，通过活动密封装置减少相邻台车栏板间的缝隙漏风；采用高强度、高耐磨新型材料的密

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

封板可以减少磨损造成的漏风；对烧结机的风箱、大烟道、阀门、接口等易发生漏风的部位进行材料更换或加强密封处理；箅条采用高铬铸铁材料，停机时对箅条进行紧固，以延长使用寿命和提高密封可靠性，防止箅条脱落后形成孔洞；对于台车本体磨损严重的部分台车进行更换、检修，从而降低设备维护更新的成本；对于台车的固定滑道，定期进行润滑处理，以保证其顺畅运行；加强对烟气腐蚀部位修复等。

在系统安装投用前，通过对该烧结机各区段数据采集，获取数据并计算得到烧结系统漏风率为 34.37%，南除尘器漏风率为 8.02%，北除尘器漏风率为 10.72%，再对全系统漏风率进行加权计算，得出全系统漏风率为 40.72%。随着系统的投入，逐步排查出严重漏风的部位，经过现场及时采取的堵漏措施，以及利用系统检修实施的柔性密封、故障排除等手段，烧结系统漏风率由 34.37% 降低至 29.61%，降低了 4.76%；南除尘器漏风率降低至 6.99%，降低了 1.03%；北除尘器漏风率降低至 5.94%，降低了 4.78%，烧结全系统通过加权计算后漏风率降低至 34.15%，降低了 6.57%，烧结机各区段漏风率明显降低，漏风治理效果较为显著。

表 5　系统投用前后漏风率

Table 5　Comparison of air leakage rate data before and after system operation

项目	投用前/%	投用后/%
烧结系统	34.37	29.61
南除尘器	8.02	6.99
北除尘器	10.72	5.94
全系统	40.72	34.15

3　结　论

通过对烧结机漏风率测定方法的分析，基于氧平衡法设计开发了烧结漏风在线监测系统。该系统通过氧化锆测氧仪获取监测点烟气氧体积分数，基于 VS2022 平台搭建烧结各区间的漏风率计算与分析模型，实现了对烧结生产过程中风箱以及电除尘器等部位漏风的可视化在线监测和异常告警，实时反映了烧结机各区段漏风率的变化，为烧结日常漏风治理和系统检修提供指导。在某钢厂烧结机上实施该烧结漏风监测系统，根据监测和分析结果，结合日常漏风治理和系统检修，烧结漏风治理水平明显提高，烧结机全系统漏风率由 40.72% 降低至 34.15%，有利于烧结矿产、质量指标的提高和固体燃料消耗、风机电能消耗的降低。

参考文献:

[1] 杜胜，吴敏，陈略峰，等. 基于粒度聚类的铁矿石烧结过程运行性能评价[J]. 自动化学报，2023，49(6)：1272－1282.
DU Sheng，WU Min，CHEN Luefeng，et al. Operating performance assessment based on granular clustering for iron ore sintering process[J]. Acta Automatica Sinica，2023，49(6)：1272－1282.

[2] FAN X H，JIANG L J，CHEN X L. Air leakage online monitoring and diagnosis model for sintering[C]//3rd International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. New Jersey：John Wiley & Sons，Inc.，2012.

[3] 姜涛. 烧结球团生产技术手册[M]. 北京：冶金工业出版社，2014.
JIANG Tao. Sintering pelletizing production technical manual[M]. Beijing：Metallurgical Industry Press，2014.

[4] 杜胜，陈聪，胡杰，等. 钢铁冶金过程铁前工序绿色智能制造的进展与展望[J]. 冶金自动化，2022，46(2)：3－18.
DU Sheng，CHEN Cong，HU Jie，et al. Progress and prospect of green intelligent manufacturing for process before ironmaking in iron and steel metallurgy process[J]. Metallurgical Industry Automation，2022，46(2)：3－18.

[5] 刘波，叶恒棣，卢兴福，等. 烧结机低漏风综合密封技术及其在宝钢湛江的应用[J]. 烧结球团，2018，43(2)：48－53.
LIU Bo，YE Hengdi，LU Xingfu，et al. Integrated low air leakage sealing technology of sintering machine and its application in Baosteel Zhanjiang[J]. Sintering and Pelletizing，2018，43(2)：48－53.

[6] 曹欣川洲，刘自民，周劲军，等. 料面有效风量和烧结机漏风率计算新方法[J]. 烧结球团，2020，45(4)：18－21；34.
CAO Xinchuanzhou，LIU Zimin，ZHOU Jinjun，et al. A new method for calculation effective air volume of materi-

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

al surface and air leakage rate of sintering machine [J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(4):18 – 21;34.

[7] 吴颖,金永龙. 烧结机本体漏风率在线测量技术及应用 [J]. 烧结球团,2008,33(4):9 – 12.
WU Ying,JIN Yonglong. The on-line measuring technology about the leakage ratio of sinterstrand body and its application [J]. Sintering and Pelletizing,2008,33(4):9 – 12.

[8] 姜丽娟. 烧结漏风率在线软测量模型及诊断专家系统的研究 [D]. 长沙:中南大学,2013.
JIANG Lijun. Research on on-line soft-sensing model and diagnostic expert system of air leakage rate during sintering [D]. Changsha: Central South University,2013.

[9] 何志军,李金莲,张立国,等. 烧结机系统漏风综合治理技术 [J]. 鞍钢技术,2016(5):1 – 7;25.
HE Zhijun, LI Jinlian, ZHANG Liguo, et al. Comprehensive improving technology for air leakage on sintering system [J]. Angang Technology,2016(5):1 – 7;25.

[10] 张安煜. 烧结机漏风控制技术研究 [D]. 山东:青岛大学,2020.
ZHANG Anyu. Research on air leakage control technology of sintering machine [D]. Shandong: Qingdao University,2020.

[11] 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. Leakage rate detection and governance of TISCO sintering machine [J]. Shanxi Metallurgy,2016,39(5):78 – 80.

[12] 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. Air leakage rate detection and air leakage treatment of sintering machine in Tangsteel [J]. Hebei Metallurgy,2017(6):36 – 38.

[13] 张士超,仪垂杰,郭健翔,等. 一种分布式监控系统的设计与实现 [J]. 微计算机信息,2007(7):98 – 100.
ZHANG Shichao, YI Chuijie, GUO Jianxiang, et al. Design and realization of distributed monitoring system [J]. Microcomputer Information,2007(7):98 – 100.

[14] 陈少飞,刘小杰,李宏扬,等. 高炉炼铁数据缺失处理研究初探 [J]. 中国冶金,2021,31(2):17 – 23.
CHEN Shaofei,LIU Xiaojie,LI Hongyang,et al. Preliminary study on missing data processing of blast furnace ironmaking [J]. China Metallurgy,2021,31(2):17 – 23.

[15] 张峰,申理仁,曹胜年,等. 降低烧结机漏风率的制造工艺研究 [J]. 烧结球团,2013,38(5):8 – 10.
ZHANG Feng,SHEN Liren,CAO Shengnian,et al. Study on manufacturing process for reducing sinter machine air leakage [J]. Sintering and Pelletizing,2013,38(5):8 – 10.

(上接第156页)

[8] THURLBY J A. Energy cost minimization in grate/kiln induration [J]. Metallurgical transactions B,1988,19:123 – 132.

[9] 刘丕亮,臧日浩,崔桂梅,等. 带式焙烧机焙烧温度分析研究 [J]. 烧结球团,2018,43(2):29 – 32;36.
LIU Piliang,ZANG Rihao,CUI Guimei,et al. Analysis and research on roasting temperature of travelling grate [J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(2):29 – 32;36.

[10] 周卫. 带式焙烧机生产过程中预热焙烧优化控制 [J]. 冶金自动化,2014,38(3):72 – 75.
ZHOU Wei. Optimal control of preheating and firing process of the traveling grate [J]. Metallurgical Industry Automation,2014,38(3):72 – 75.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net