烧结水密封环冷系统余热回收评价

包向军[1]，冯 云[1]，刘钟腾[1]，郦秀萍[2]，张晓萍[3]，熊德怀[3]，陈 光[1]
(1. 安徽工业大学 能源与环境学院，安徽 马鞍山 243002；2. 中国钢研科技集团有限公司 钢铁绿色智能化中心，北京 100812；3. 马鞍山钢铁股份有限公司，安徽 马鞍山 243003)

摘要： 烧结水密封环冷系统是烧结工序重要的余热回收设备。传统余热回收评价方法存在环冷机与余热锅炉分离、漏风率测算偏差大、余热利用效率分析不全面等问题，无法准确评价烧结工序的余热回收水平。本文采用环冷机和余热锅炉双系统耦合热量平衡计算方法，建立烧结水密封环冷系统的余热分析评价指标，通过将余热锅炉与环冷机关键参数进行耦合计算漏风率，量化烧结余热回收过程中的热损失。热工测试和热平衡计算结果表明：烧结环冷机漏风率为 19.41%，余热回收率为 60.03%；影响余热回收效率的主要因素为系统漏风率和后段排空废气热量。实践表明，采用相应优化方法和措施后，烧结环冷系统的余热回收利用率从 60.03% 提高到 66.73%。本文研究模型具有很好的精度和稳定性，可为余热回收影响因素分析和评价提供数据支持。

关键词： 烧结环冷机；水密封系统；余热回收；漏风率
中图分类号： TF046.4 **文献标志码：** A **文章编号：** 1000－8764(2025)06－0009－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2025.06.091

Evaluation on waste heat recovery in water-sealed circular cooler system for sintering

BAO Xiangjun[1], FENG Yun[1], LIU Zhongteng[1], LI Xiuping[2], ZHANG Xiaoping[3], XIONG Dehuai[3], CHEN Guang[1]
(1. School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, Anhui, China; 2. Iron & Steel Greening and Intelligent Technology Center, China Iron & Steel Research Institute Group Co., Ltd., Beijing 100812, China; 3. Ma'anshan Iron & Steel Co., Ltd., Ma'anshan 243003, Anhui, China)

Abstract: The water-sealed circular cooler system for sintering is a key waste heat recovery facility in the sintering process. In traditional waste heat recovery evaluation methods, there are problems such as the separation of the circular cooler and waste heat boiler, significant deviations in air leakage rate calculations, and incomplete analysis of waste heat utilization efficiency, therefore it is difficult to accurately evaluate the waste heat recovery performance of the sintering process. In this paper, a coupled heat balance calculation method for the dual system of circular cooler and waste heat boiler is used to establish the evaluation indicators for waste heat analysis in the water-sealed circular cooler system for sintering. The key parameters of the waste heat boiler and the circular cooler are coupled to calculate the air leakage rate, the heat losses during the waste heat recovery process of sintering are quantified. Thermal performance tests and heat balance calculations indicate that the air leakage rate of the circular cooler for sintering is 19.41% and the waste heat recovery rate is 60.03%. The primary factors affecting waste heat recovery efficiency are the system air leakage rate and

收稿日期： 2025－04－21；**修回日期：** 2025－08－08
基金项目： 安徽省重大产业创新计划资助项目(AHZDCYCX-LSDT2023－01)
作者简介： 包向军(1972—)，男，副教授，从事冶金过程节能环保方面的研究。
通信作者： 郦秀萍(1973—)，女，正高级工程师，从事钢铁制造流程优化、节能与能效提高及环境负荷评价等方面的研究和开发工作。

中国知网 https://www.cnki.net

the heat loss from exhausted gases in the latter sections. Practical applications show that after corresponding optimization methods and measures are taken, the waste heat recovery utilization rate of the circular cooler system for sintering increases from 60.03% to 66.73%. The model studied in this paper has high accuracy and stability, so it can provide data support for analyzing and evaluating the factors affecting waste heat recovery.

Key words: circular cooler for sintering; water-sealed system; waste heat recovery; air leakage rate

烧结工序在钢铁工业中扮演着至关重要的角色，它不仅直接影响着后续炼铁的质量与效率，而且对整个生产流程的能源消耗有着显著的影响。当前，我国烧结工序的余热回收水平还有显著提升空间，主要原因在于烧结及环冷过程中的余热资源未得到充分利用[1-2]。其中，环冷机是烧结工序实现烧结矿冷却工艺和余热回收的重要装置[3-4]。高效、准确的环冷机余热回收评价方法，对于挖掘环冷工艺余热回收潜力、提高烧结工艺余热回收效率具有重要作用[5]。

围绕烧结余热回收工艺和评价方法，研究人员开展了相关研究工作。田万一等[6]对集热罩内热烟气平均温度的影响因素进行了解析，构造了相关函数拟合模型，提出优化集热罩恒温布置方式来提高烧结矿余热回收。马洛文等[7]对宝钢三烧结环冷机余热锅炉生产数据进行了测试与收集，在此基础上进行热平衡计算，得出烧结环冷机余热锅炉热效率为52.70%。冯军胜等[8]建立了移动床层内流动和传热的仿真模型，分析了空气进口流量、空气进口温度以及冷却段高度对烧结床层内气固换热㶲传递特性的影响。董辉等[9]对鞍钢360 m^2烧结机进行了热平衡分析，研究了我国大型烧结机余热资源的产生、转化、回收与利用过程，以过程㶲损来评价烧结系统整体水平。他们对烧结系统余热资源进行了探究，以㶲指标来分析烧结过程余热资源能级，并给出改进建议。但这些指标侧重于烧结过程的余热分析，没有对烧结环冷系统的能源利用水平给出明确评价。王双等[10]提出双系统耦合平衡法测算烧结冷却机的系统漏风率，提出在加强系统密封的同时对循环热风接入点进行优化。该研究将环冷机及余热锅炉考虑为一个耦合系统进行漏风计算，可在线计算漏风率，克服了传统方法测量难度大、时效性差的缺点[11]。NIEL等[12]、JIANG等[13]、CHENG等[14]研究了烧结床冷却过程中的三维瞬态耦合传热过程和流体流动状态，分析了多孔介质与流体层之间的流体流动和换热界面条件，其研究结论对优化烧结过程具有指导意义。

当前研究未能全面考虑环冷机与余热锅炉耦合系统的综合评价，且针对新型水密封式烧结环冷系统的研究相对较少[15-20]，因此本文提出将环冷机与余热锅炉耦合为环冷系统，使用余热回收利用率作为评价指标来讨论环冷系统的余热利用水平，并以某烧结厂360 m^2水封式环冷机为研究对象，分析其余热回收利用的现状与水平，提出环冷机与余热锅炉耦合系统的余热回收利用率评价指标，以期为同行提供借鉴与参考。

1 环冷系统余热回收评价方法

1.1 水密封环冷系统

现代烧结环冷机多采用水密封来降低漏风率，特点在于使用水作为密封介质，其结构如图1所示。采用环形密封水槽和端部密封装置，能够有效地减少烟气泄漏，提高系统的密封性，从而提升余热回收效率；其次，水密封系统能够在高温和高压环境下保持稳定的密封效果，降低环境污染，减少能源损失，同时也能延长设备的使用寿命。新型水密封系统对降低烧结工序能耗具有重要意义，其在烧结环冷机余热回收系统中发挥着重要作用。

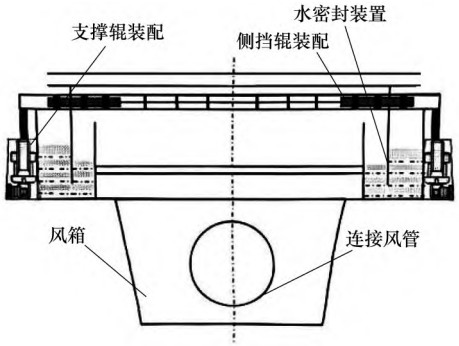


图1 水密封式环冷机结构示意

Fig. 1 Schematic diagram of water-sealed annular cooler

中国知网 https://www.cnki.net

1.2　双系统耦合方法

环冷机和余热锅炉的耦合系统如图 2 所示。由余热锅炉尾部排出的烟气被循环风机送入环冷机，与鼓风机鼓入的冷风混合后冷却上方台车内的高温烧结矿。经过气固换热后的高温废气在烟罩中汇集后通过烟囱送入余热锅炉进行回收利用，后段烟罩内的中低温废气则通过烟囱直接排放到大气中。余热锅炉利用回收来的高温废气加热锅炉给水从而产生高温蒸汽，经过换热利用后的低温废气作为循环热风重新输入到环冷机完成循环。

环冷机和余热锅炉都是利用气体与固体或液体进行换热的工业设备，气体流动是串联两个设备的关键耦合点。对环冷机进行余热余能分析时会因烟气高粉尘、烟气流速波动及温度波动等问题而产生较大误差。因为环冷机本身存在漏风问题，单独对环冷机进行热平衡分析不足以对烧结环冷系统的余热回收水平进行准确评价，因此，本文将环冷机和余热锅炉两个设备耦合从而建立整个环冷系统的余热分析评价指标。

1.3　评价指标

1.3.1　漏风率

漏风率是量化烧结余热回收过程中热损失的主要评价指标，为能源管理和成本控制提供数据支持。漏风通过稀释高温烟气浓度影响回收率。漏风率过大将导致烟气温度降低，使换热温差与工质能量转换效率呈非线性衰减，降低余热回收率；同时环冷机漏风会影响烧结矿的粒度和强度。漏风率的计算有助于优化烧结冷却工艺，提高烧结矿的产量和质量。采用双系统耦合分析方法计算漏风率时，需要将环冷机及余热锅炉看成一个耦合系统，反映的是环冷系统整体漏风率。

本文利用锅炉热量平衡计算进入锅炉烟气的流量，即耦合点流量 L_v。根据系统的输入、输出和系统之间的平衡计算漏风率。由于生产运行具有波动性，高温段烟囱回收的废气量也是波动的，很难被准确测量；且高温段废气温度较高，在生产运行时测量难度较大，存在测量仪器易损坏、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废气热量。

产生蒸汽消耗的热量由锅炉运行参数收集，余热锅炉热量平衡如图 3 所示。由图 3 可见：锅炉热量平衡分为热量收入项和支出项，生产过程中锅炉的热收入主要包括环冷机高温废气的热量 Q_f、锅炉注水带入的热量 Q_s、减温器注水带入的热量 Q_j；锅炉热支出项包括 3 项，即锅炉产生的蒸汽带走的热量 Q_{bp}、锅炉出口废气带走的热量 Q_{fc}、锅炉排污和表面损失带走的热量 Q_z。

根据锅炉热量平衡，锅炉热收支平衡关系式如下。

$$Q_j + Q_s + Q_f = Q_{bp} + Q_z + Q_{fc} \tag{1}$$

根据式(1)可计算得到锅炉出口循环热风热量 Q_{fc}。其中，已知进、出口烟气温度以及蒸汽流量和温度，可求出锅炉出口废气流量 L_v，即为环冷机至余热锅炉的耦合点流量。

由环冷系统风量平衡计算漏风率时需要明确系统进出口风量：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

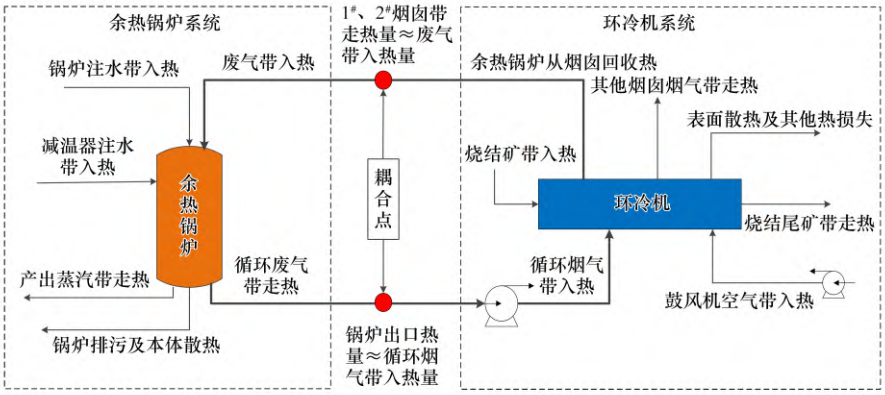


图 2　余热锅炉和环冷机耦合系统

Fig. 2　Schematic diagram of coupling between waste heat boiler and annular cooling system

中国知网　https://www.cnki.net

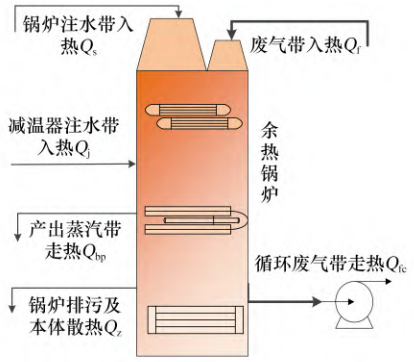


图 3 余热锅炉热平衡

Fig. 3 Heat balance of waste heat boiler

之和；二是冷却机系统出口风量，此部分包括烟气回收量 $L_{v'}$ 和烟气排散量 L_p。

系统输出风量与输入风量的差值即为系统漏风量，漏风量与系统输入风量之比为环冷系统漏风率(φ,%)，计算公式如下。

$$\varphi = [(L_v + L_g) - (L_{v'} + L_p)] / (L_v + L_g) \times 100\% \quad (2)$$

考虑到生产波动和数据采集延迟，通过滑动平均法对测试数据(L_i)进行平滑处理(反映统计期内数据的平均水平，采用 L_{avg} 表示)，抑制瞬时波动，提高模型对实际工况的动态适应性。处理模型如式(3)所示，其中 N 为统计期内数据采集组数。

$$L_{avg} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} L_i \quad (3)$$

1.3.2 余热回收利用率

余热回收利用率是指在工业生产或能源系统中，利用废热或余热产生的能量与原始能源输入之间的比例关系，是衡量能源利用效率的重要指标之一。具体而言，余热回收利用率描述了通过系统后利用余热获得的能量占该系统余热总量的比例，但大多数生产工序都涉及上下游工序的关联。上道工序最终产品携带的能量一般会作为下道工序的输入，即环冷机内产生的高温废气作为热源进入余热锅炉产汽。单一地对环冷机进行余热回收利用率的计算存在较大的局限性。因此对环冷机进行余热评价时应结合上下游工艺，将环冷机和余热锅炉考虑为一个环冷系统进行余热回收利用评价，可以极大程度地避免评价指标受到工序间波动而导致的误差，提高评价结果的整体性和全面性。

具体到实际烧结环冷系统，环冷机热收入由三部分组成，即烧结台车尾部烧结矿带进的热量 Q_{sr}、锅炉出口的循环风带入的热量 Q_{xr}、环冷机鼓风所具有的热量 Q_{kr}。环冷机的热支出包括烟囱废气带走的热量 Q_{fq}、冷床尾部烧结矿带走热量 Q_{sl} 以及其他耗散热 ΔQ。其中，1#、2#烟囱带走的热量 Q_{fq1} 被送往锅炉回收利用，而其余烟囱带走的热量 Q_{fq2} 直接排空；其他散热包括台车吸收及漏风损失热量、台车上部烟罩损失热量等。环冷机热平衡如图 4 所示。

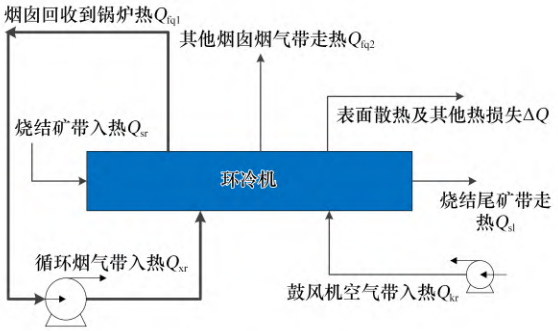


图 4 环冷机热平衡

Fig. 4 Thermal equilibrium of annular cooler

由环冷机热量平衡，可以得到各项热收支平衡公式如下。

$$Q_{sr} + Q_{xr} + Q_{kr} = Q_{fq} + Q_{sl} + \Delta Q \quad (4)$$

环冷系统余热回收利用率(η)为环冷系统回收的余热量($Q_{recovered}$)与环冷系统可回收的余热总量(Q_{total})之比，具体计算公式如下。

$$\eta = \frac{Q_{recovered}}{Q_{total}} = \frac{Q_{fq1} - Q_{xr}}{Q_{sr} + Q_{kr} - Q_{sl}} \times 100\% \quad (5)$$

2 实测分析及计算验证

2.1 测试对象及方法

测试对象为马钢某烧结厂的水密封环冷机及其配套的余热锅炉。因带冷机直线动态运行、密封区域长、工况波动大，采用水冷密封易出现失效和维护问题；而环冷机的环形静态密封结构、稳定运行轨迹及高温工况，使其更适合水冷密封。传统密封系统的下密封用胶皮、上密封用鱼鳞片。胶皮使用 2 个月左右就会硬化、变形，导致漏风率快速上升。水密封式环冷机采用水作为密封介质，密封性能好，有效解决了传统环冷机的漏风问题，可以控制粉尘污染，同时避免皮带烧损现

中国知网 https://www.cnki.net

象，延长皮带使用寿命[21]。通过测算得出带冷烧结机冷却漏风率达到 47.5%[10]，远高于现场环冷系统测算所得漏风率。

测试主要项目包括余热锅炉返回环冷机的循环热风温度及流量，环冷机各风箱连接风管内空气温度及压力，环冷机上部烟罩内出口空气的温度及压力，具体测点位置如图 5 所示。

采用开孔测温测压法进行测试，提前在测点位置开孔，将测试仪器固定在测孔中，引出塑胶软管和补偿导线，在正常生产期间将数据接入采集装置中。测试周期为连续 6 h，烧结机保持中负荷(450 t/h)生产。环境温度为 18～22 ℃，湿度≤70%。数据采样间隔为 5 s，共获取 4 320 组数据，剔除异常值后有效数据占比为 98.2%。测试期间需使烧结矿进入环冷机的温度保持在 600～800 ℃，出口处矿温降至 100 ℃以内，平均粒径符合生产要求，以确保热工参数准确性。

2.2　环冷系统风量平衡

根据生产及测试数据计算得到环冷系统风量平衡如图 6 所示。由图 6 可见，系统进口总风量等于出口总风量；将数据代入到式(5)中计算得到该环冷系统漏风率为19.41%。与针对不同工况

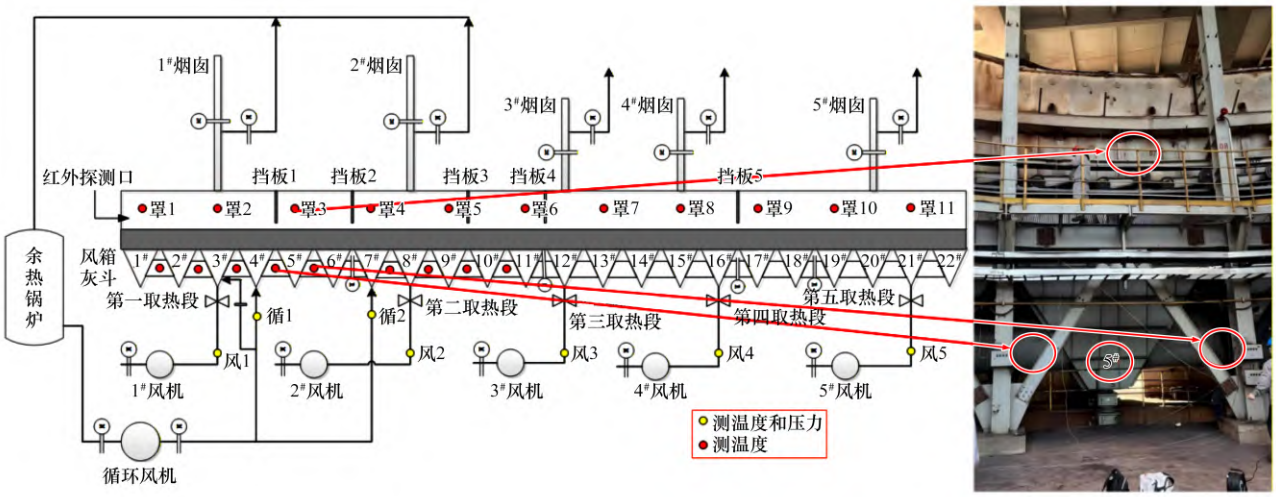


图 5　环冷机测点位置示意

Fig. 5　The schematic diagram of the measurement point locations of annular cooler

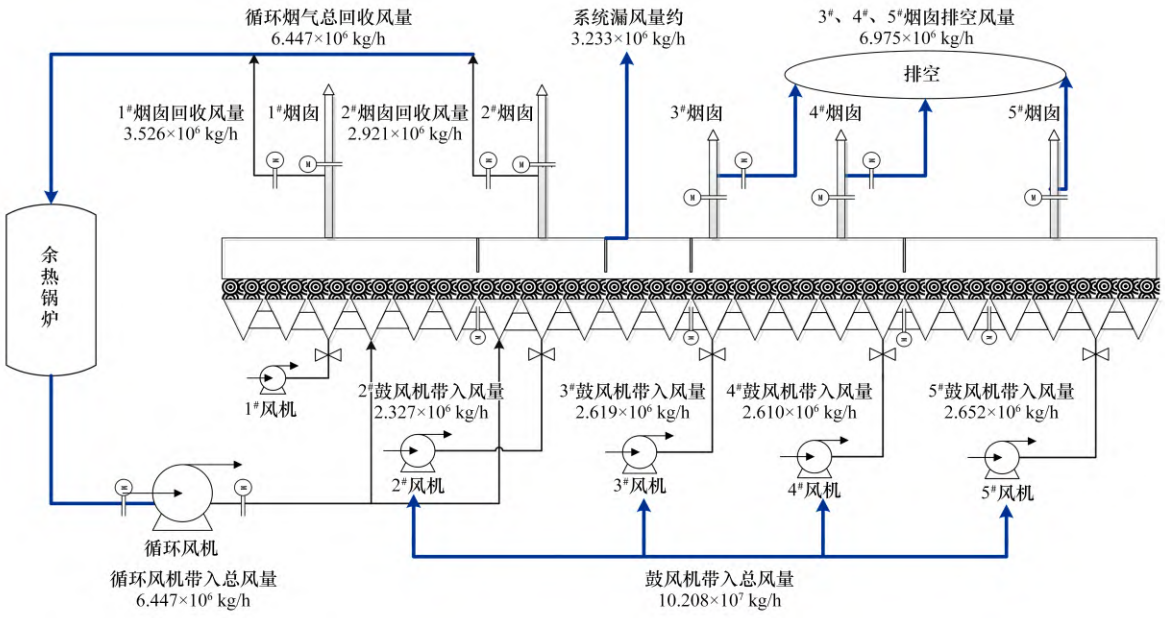


图 6　环冷系统风量平衡

Fig. 6　Airflow balance diagram of annular cooling system

中国知网　https://www.cnki.net

下传统方法测算得出的漏风率相比，该方法的偏差稳定在3%以内。可看出通过环冷机及余热锅炉耦合系统计算环冷系统漏风率是可行且可靠的，且计算过程可通过锅炉运行数据进行实时计算，避免了采用传统方法时气体流量测量困难、温度高、测点多等问题。

2.3 环冷系统热平衡

基于上述双系统耦合的环冷系统风量平衡，将系统内各部分风量的质量流量，代入上述公式进行求解，计算系统热收入与支出热量及占比，得到环冷系统的热平衡如表1所示。由表1可见，环冷机热收入中烧结矿带入热量占67.26%，循环热风占26.99%；热支出中1#、2#烟囱带走热量最高，占比达到68.29%。其中，1#烟囱废气出口温度达到410 ℃，带走热量占总热量的40.96%；2#烟囱废气出口温度为340 ℃，带走热量占总热量的27.33%。

表1 环冷系统热平衡

Table 1 Heat balance of annular cooling system

项目		热源	热量(折标煤)/(t·h^{-1})	占比/%
环冷机	热收入项	烧结矿	8.187 4	67.26
		循环风	3.285 2	26.99
		空气	0.700 9	5.75
	热支出项	1#~2#烟囱废气	8.313 8	68.29
		3#~5#烟囱废气	2.874 8	23.62
		尾部烧结矿	0.511 8	4.20
		其他损失	0.473 1	3.89
余热锅炉	热收入项	1#烟囱	4.986 8	57.54
		2#烟囱	3.327 0	38.39
		锅炉给水	0.350 6	4.04
		减温器	0.002 4	0.03
	热支出项	循环热风	3.285 2	37.90
		产汽	5.121 7	59.10
		表面散热及排污	0.260 0	3.00

计算得到该水密封式环冷系统的余热回收利用率为60.03%，导致余热回收利用率偏低主要有两个原因：一方面该水密封式环冷系统漏风率为19.41%，仍有大量冷却风由环冷机本体逸散，未从高温烟囱进入余热锅炉，系统整体利用的废气热量较低；另一方面目前该环冷系统对余热的回收方式主要为余热锅炉对环冷机前段高温废气的利用，但3#~5#低温段烟囱废气直接排入大气，这部分排气温度为80~220 ℃，排放热量占总热量的23.62%，环冷烟罩中后段仍有大量废气余热未得到有效利用。

2.4 应用案例

通过双系统耦合分析方法计算得出烧结厂环冷机组漏风率高达19.41%，环冷机余热回收利用率为60.03%，整体回收利用率较低[22]。根据计算结果，采用在环冷机前段集中供风和环冷机密封改造优化措施，同时在环冷机机头两侧安装密封膜刷，降低漏风率，提高送风温度，增加烟囱内废气热量；同时，在烟罩挡板安装柔性密封软帘，避免烟罩内高温段与低温段废气的窜风换热，减少热量损失。系列措施实施后，烧结环冷系统的余热回收利用率从60.03%提高到66.73%，余热回收利用率得到显著提升。

3 结 论

(1) 针对新型环冷水密封式系统，本文将环冷机送往余热锅炉的高温烟气与余热锅炉的循环热风作为耦合点，构建环冷机-余热锅炉的双系统热量耦合计算模型。模型避免了工序间生产波动引起的误差，提升了计算的实际指导性，为烧结环冷系统漏风率及余热回收率计算提供参考。

(2) 通过热工测试和热平衡计算，结合双系统耦合计算模型，得到烧结环冷水密封系统漏风率为19.41%，余热回收利用率为60.03%，为烧结工序的余热回收及节能潜力分析提供了支撑。

(3) 当前烧结余热回收领域的研究重点在于，突破传统余热锅炉的技术瓶颈，开发适用于80~220 ℃中低温废气的余热回收系统，同时探索在不影响烧结矿质量的前提下提升烟气温度的技术路径，以实现对直接排空废气中23.62%热量的有效回收。未来研究应着力解决中低温余热高效转换、热力系统优化及热品位提升等关键技术难题，这对推动烧结工序的节能降耗具有重要意义。

参考文献:

[1] 姜维，张永杰，李海峰. 中国钢铁极致能效降碳实践

中国知网 https://www.cnki.net

与基础研究[J]. 钢铁,2024,59(9):2-12.
JIANG Wei,ZHANG Yongjie,LI Haifeng. Practice and basic research on carbon reduction through ultimate energy efficiency project for iron and steel in China[J]. Iron and Steel,2024,59(9):2-12.

[2] 杜学强,郦秀萍,周继程,等. 铁前系统能耗分析与评价[J]. 钢铁,2023,58(10):163-171;182.
DU Xueqiang,LI Xiuping,ZHOU Jicheng,et al. Energy consumption analysis and energy efficiency evaluation of iron-making system[J]. Iron and Steel,2023,58(10):163-171;182.

[3] 周明顺,田勇,赵东明,等. 铁矿烧结系统漏风治理技术及评估综述[J]. 中国冶金,2024,34(1):1-9;26.
ZHOU Mingshun,TIAN Yong,ZHAO Dongming,et al. Summary of air leakage control technology and evaluation for iron ore sintering system[J]. China Metallurgy,2024,34(1):1-9;26.

[4] ALAZMI B,VAFAI K. Analysis of fluid flow and heat transfer interfacial conditions between a porous medium and a fluid layer[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2001,44(9):1735-1749.

[5] FAN X H,WONG G,GAN M,et al. Establishment of refined sintering flue gas recirculation patterns for gas pollutant reduction and waste heat recycling[J]. Journal of Cleaner Production,2019,235:1549-1558.

[6] 田万一,张家元,戴传德,等. 基于环冷机集热罩的烧结矿余热回收优化[J]. 东北大学学报(自然科学版),2015,36(8):1130-1135.
TIAN Wanyi,ZHANG Jiayuan,DAI Chuande,et al. Optimization of heat recovery of sinter ore with heat-collecting hood of circular cooler[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science),2015,36(8):1130-1135.

[7] 马洛文,何志军. 宝钢三烧结环冷机余热锅炉热工效率测试研究[J]. 烧结球团,2013:38(5):57-59.
MA Luowen,HE Zhijun. Test and research on waste heat boiler thermal efficiency for circular cooler of Baosteel No. 3 sinter machine[J]. Sintering and Pelletizing,2013,38(5):57-59.

[8] 冯军胜,张晟,赵亮,等. 烧结矿竖罐内气固换热烟传递特性[J]. 中南大学学报(自然科学版),2021,52(12):4443-4453.
FENG Junsheng,ZHANG Sheng,ZHAO Liang,et al. Exergy transfer characteristics of gas solid heat transfer in sinter vertical tank[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2021,52(12):4443-4453.

[9] 董辉,林贺勇,张浩浩,等. 烧结热工测试与分析[J]. 钢铁,2011,46(11):93-98.
DONG Hui,LIN Heyong,ZHANG Haohao,et al. Thermal test and analysis of sintering cooling system[J]. Iron and Steel,2011,46(11):93-98.

[10] 丁晖,王宏元,徐冰,等. 双系统耦合平衡法在线计算烧结冷却机漏风率[J]. 烧结球团,2021,46(6):43-48.
DING Hui,WANG Hongyuan,XU Bing,et al. Online calculation of air leakage rate of sintering cooler with dual-system coupling balance method[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(6):43-48.

[11] 王双,徐冰,陈光,等. 烧结冷却机循环热风接入点优化模拟研究[J]. 烧结球团,2022,47(4):83-91;98.
WANG Shuang,XU Bing,CHEN Guang,et al. Simulation research on optimization of circulating hot air access point of sintering cooler[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(4):83-91;98.

[12] NIEL J,WEISS B,WUKOVITS W. Model of an iron ore sinter plant with selective waste gas recirculation[J]. Carbon Resources Conversion,2022,5(1):71-83.

[13] JIANG H Y,HUO Y,ZHOU X J,et al. Optimization approach of sintering feature parameter based on fuzzy SVM[C]//2008 International Symposiums on Information Processing. Piscataway:IEEE,2008:412-416.

[14] CHENG Z L,TAN Z T,GUO Z G,et al. Recent progress in sustainable and energy-efficient technologies for sinter production in the iron and steel industry[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2020,131:110034.

[15] 陈思墨,周浩宇,朱蓉甲,等. 烧结热风循环罩数值模拟与结构优化[J]. 中国冶金,2022,32(3):119-124.
CHEN Simo,ZHOU Haoyu,ZHU Rongjia,et al. Numerical simulation and structural optimization of sintering hot air circulation hood[J]. China Metallurgy,2022,32(3):119-124.

[16] 胡玖林,周浩宇,刘前,等. 铁矿烧结工艺过程 CO 生成机理及减排关键技术[J]. 中国冶金,2025,35(2):94-101;113.
HU Jiulin,ZHOU Haoyu,LIU Qian,et al. Mechanism of CO generation in iron ore sintering process and key technologies for emission reduction[J]. China Metallurgy,2025,35(2):94-101;113.

(下转第 66 页)

中国知网　https://www.cnki.net

[13] 范晓慧,王祎,甘敏,等. 提高有机黏结剂氧化球团矿强度的措施[J]. 钢铁研究学报,2008,20(5):5-8;19.
FAN Xiaohui, WANG Yi, GAN Min, et al. Strength enhancement of oxide pellet with organic binder[J]. Journal of Iron and Steel Research,2008,20(5):5-8;19.

[14] 杨永斌,黄桂香,姜涛,等. 有机黏结剂替代膨润土制备氧化球团[J]. 中南大学学报(自然科学版),2007,38(5):850-856.
YANG Yongbin, HUANG Guixiang, JIANG Tao, et al. Preparation of oxidized pellets with organic binder instead of bentonite[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2007,38(5):850-856.

[15] CHEN W B, DONG Z Q, JIAO Y, et al. Preparation, sintering behavior and consolidation mechanism of vanadium-titanium magnetite pellets[J]. Crystals,2021,11(2):188.

[16] 路明,于洪军,王兴锋,等. SiO_2含量对铁矿球团性能影响的研究进展[J]. 鞍钢技术,2022(4):7-12.
LU Ming, YU Hongjun, WANG Xingfeng, et al. Research progress on effect of content of SiO_2 on properties of iron ore pellets[J]. Angang Technology,2022(4):7-12.

[17] 邱勇虎,罗果萍,任杰,等. 含铁黏结剂对磁铁矿球团氧化动力学的影响[J]. 中国冶金,2024,34(4):39-48.
QIU Yonghu, LUO Guoping, REN Jie, et al. Effect of iron-containing binder on oxidation kinetics of magnetite pellets[J]. China Metallurgy,2024,34(4):39-48.

[18] 王兴锋,路明,于洪军,等. 大孤山磁铁精粉微观结构与氧化焙烧性能[J]. 烧结球团,2021,46(6):75-81;88.
WANG Xingfeng, LU Ming, YU Hongjun, et al. Microstructure and oxidation roasting properties of Dagushan magnetite flavor powder[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(6):75-81;88.

[19] LÜ H, GAN M, WEN X P, et al. Promoting low-temperature consolidation of vanadium titano-magnetite pellets by high-pressure grinding roll: Mechanism of mechanical activation[J]. Journal of Materials Research and Technology,2024,30:2435-2445.

[20] TIAN H Y, CHU M S, PAN J, et al. Effect of manganese ore and basicity on the consolidation characteristic of nickel-chromium iron ore pellets[J]. Powder Technology,2024,435:119362.

(上接第15页)

[17] 刘文超,蔡九菊,董辉,等. 烧结过程余热资源高效回收与利用的热力学分析[J]. 中国冶金,2013,23(2):15-20.
LIU Wenchao, CAI Jiuju, DONG Hui, et al. Thermodynamic analysis on the effective recovery and utilization of sinter waste heat[J]. China Metallurgy,2013,23(2):15-20.

[18] 陈富松,袁亚强,康宏毅,等. 当前形势下烟气循环烧结工艺发展现状及展望[J]. 中国冶金,2024,34(2):21-34.
CHEN Fusong, YUAN Yaqiang, KANG Hongyi, et al. Development status and prospect of flue gas recirculation sintering process under current situation[J]. China Metallurgy,2024,34(2):21-34.

[19] CAPUTO A C, PELAGAGGE P M. Heat recovery from moving cooling beds: Transient modeling by dynamic simulation[J]. Applied Thermal Engineering, 1999, 19(1):21-35.

[20] ZHANG X H, CHEN Z, ZHANG J Y, et al. Simulation and optimization of waste heat recovery in sinter cooling process[J]. Applied Thermal Engineering,2013,54(1):7-15.

[21] 贺道山,朱旺,安乃鲜,等. 环冷机高效密封和冷却技术[J]. 河北冶金,2024(4):40-44.
HE Daoshan, ZHU Wang, AN Naixian, et al. Efficient sealing and cooling technology for annular cooler[J]. Hebei Metallurgy,2024(4):40-44.

[22] 耿新健. 新型高效烧结环冷机密封创新技术[J]. 冶金与材料,2025,17(3):91-93.
GENG Xinjian. Innovative sealing technology of new high-efficiency sintering ring cooler[J]. Metallurgical and Materials,2025,17(3):91-93.

中国知网 https://www.cnki.net