研究与开发

减排降碳均质烧结技术及应用

杜一鸣，孙丽丽，周志安，郑绥旭
（中冶北方（大连）工程技术有限公司，辽宁，大连 116600）

摘要： 针对烧结机烟气循环系统含氧量低，厚料层烧结上下层供热不均的问题，开发了减排降碳均质烧结技术。该技术应用后，烧结烟气循环量达到30×10⁴ m³/h以上，同步减少经主抽风机进入活性焦装置的烟气总量，烧结固体燃料消耗降低1.5 kg/t，烧结机利用系数提高0.08 t/(m²·h)，烧结矿转鼓指数（+6.3 mm）提高0.07%，增产幅度为6%，实现了烧结工序减排、降碳、增产、提质的综合目标。

关键词： 烧结烟气；减排；降碳；均质烧结；余热利用
中图分类号： TF046 **文献标志码：** A **文章编号：** 1006-4613(2026)03-0015-05
DOI：10.3969/j.issn.1006-4613. 2026. 03. 003

Homogeneous Sintering Technology for Reducing Emissions and Carbon Consumption and Its Application

DU Yiming, SUN Lili, ZHOU Zhian, ZHENG Suixu
(Northern Engineering & Technology Corporation, MCC, Dalian 116600, Liaonning, China)

Abstract: Aiming at the problems of low oxygen content in the flue gas circulation system of sintering machines and uneven heat supply between the upper and lower layers of thick material layer sintering, homogeneous sintering technology for reducing emissions and carbon consumption was developed. After the application of this technology, the circulation volume of sintering flue gas reached over 30×10⁴ m³/h, synchronously reducing the total amount of flue gas entering the activated coke device through the main exhaust fan. The consumption of sintering solid fuel was reduced by 1.5 kg/t, the productivity of sintering machine was increased by 0.08 t/(m²·h), the sintering drum index (+6.3 mm) was increased by 0.07%, and the output increase was increased by 6%. Thus, the comprehensive goals of emission reduction, carbon reduction, output increase, and quality improvement in the sintering process were achieved.

Key words: sintering flue gas; emission reduction; carbon consumption reduction; homogeneous sintering; waste heat utilization

钢铁工业作为国民经济的支柱产业，伴随的高能耗、高污染问题也日益凸显，其中铁矿烧结作为钢铁生产流程中烟气污染物排放量最大的工序，其污染负荷占比约40%，污染物主要包括NO_x、SO_2、重金属元素、二噁英以及颗粒物等[1]。2020年中国制定了《烧结烟气循环设计标准》行业标准，2022年由工信部等联合发布的《“十四五”原材料工业发展规划》要求钢铁企业提升能源的综合利用水平[2]。

烧结生产中，每生产1 t烧结矿大约产生4 000~6 000 m³烟气，烟气温度一般为120~

基金项目：中国五矿科技专项计划项目“绿色低碳氢冶金技术及关键装备研发”（2020ZXA01），“氢基燃料氧化球团制备关键技术与装备”（2021ZXA04）

杜一鸣，博士，工程师，2022年毕业于辽宁科技大学冶金工程专业。E-mail：kaiao@126. com

200 ℃,烟气粉尘含量较大,且含有SO_x、NO_x等酸性气态污染物,需要经过除尘、脱硫、脱硝工艺达到GB 28662—2012《钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准》才可排入大气[3-4]。同时这些烧结烟气温度较高,带走大量的热量,造成能量的浪费。因此,减少烧结烟气外排量是钢铁企业需要解决的重要问题。烧结烟气循环工艺是将烧结过程中产生的一部分载热气体返回到烧结机料面的热风罩内,代替环境空气参与烧结过程的一种烧结方法,目的是通过循环利用一部分热烟气减少烧结烟气排放总量,减轻除尘、脱硫脱硝系统负担,提高烧结过程的热利用率,降低固体燃料消耗[5]。根据烟气循环方式可分为外循环和内循环两类[6]。前者是被动接受主烟道的烟气进行循环,烟气循环量大,但是工艺简单粗放,对烧结过程产生的影响较大。相比之下,内循环工艺调控则更加灵活,通过有计划的主动选取进行循环的烟气以满足减排、节能、增产等多种需求。

实践证明[7-9],采用烧结烟气循环技术可减少20%以上的外排烟气量,同时还能有效利用循环烟气的显热及其可燃成分,降低颗粒物、SO_2、NO_x和二噁英的外排量。但是循环烟气具有低氧、高水分的特点,伴有烟气混匀效果不好导致热风罩内整体含氧量偏低等问题[10]。为解决以上问题,中冶北方(大连)工程技术有限公司(以下简称"中冶北方")研发了第二代烧结烟气循环技术即减排降碳均质烧结技术,取得较好的减排、降碳效果。本文对此做一介绍。

1 烧结烟气循环技术概况

烧结烟气循环技术是烟气单循环技术,即将烧结生产过程中产生的机头机尾热烟气返回烧结料面再次利用,也称第一代烧结烟气循环技术[11],流程图见图1。

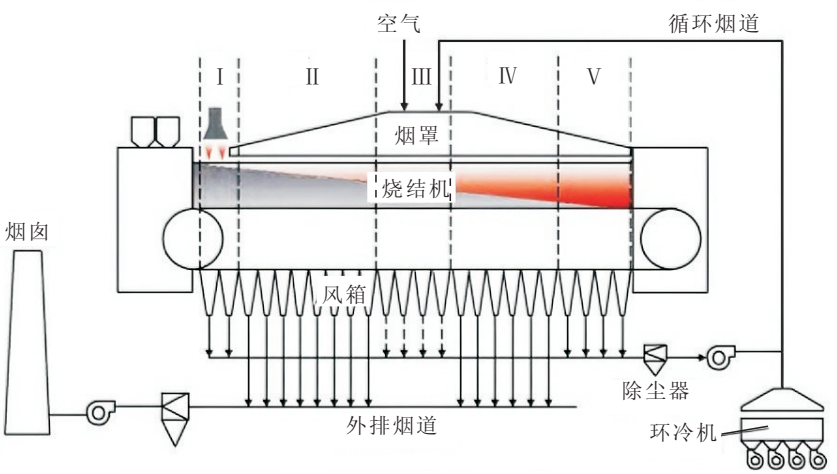


图1 第一代烧结烟气循环技术流程图

Fig. 1 Flow Chart of the First Generation Sintering Flue Gas Circulation Technology

该技术具有节能、减排两方面效益,一方面,热烟气再次通过烧结料层时,可以提供一部分热量,废气中的CO在烧结过程中可再次参加反应放热,从而降低固体燃耗[12];另一方面,由于烟气的循环利用,可以大幅度降低外排烟气量,热烟气再次通过烧结料层时,烟气中的二噁英能够通过热分解被部分破坏,减少有害物质排放。2013年5月,中冶北方设计的国内第一套烧结烟气循环系统在宁钢新烧结机(450 m^2)上顺利投运,投运近一年的结果表明[13],烟气循环使用不仅对烧结矿质量无影响,而且降低固体燃耗,废气总量减排18.5%左右,污染物排放总量降低,减少烟气脱硫装置投资及运行成本约20%。如果该项目按烟气全部外排来配置脱硫装置,一台450 m^2烧结机的脱硫装置投资将增加约900万元,脱硫装置耗电量每年将增加约100万kW·h。

烧结混合料从点火开始到最后形成烧结矿这一过程中,所产生的烧结烟气特征随着烧结过程的发展而不断变化。烧结烟气的主要成分包括N_2、O_2、CO、CO_2、H_2O(气态)、SO_2、NO_x等,存在氧含

量低，H_2O（气态）、SO_2、NO_x等气体浓度高的特点[14]。生产实践发现，第一代烧结烟气循环技术存在一些弊端，一方面体现在循环热废气后料层氧势降低，高温区液相减少，导致燃耗与烧结矿返矿量增加，低排优势难以发挥；另一方面未能针对不同料层热量需求做到差异化补热，从而造成余热资源利用效率低[15]。第一代烟气循环量通常在15%~20%，减排降碳效果有限，操作不当甚至可能导致烧结矿转鼓强度降低、返矿增加等风险[16-18]。

2 减排降碳均质烧结技术

减排降碳均质烧结技术是将一部分自然排放的环冷机中低温热废气（150~250 ℃）与烧结机烟气循环热废气混匀后，送至烧结机料面参与烧结，即第二代烧结烟气循环技术，流程图见图2所示。

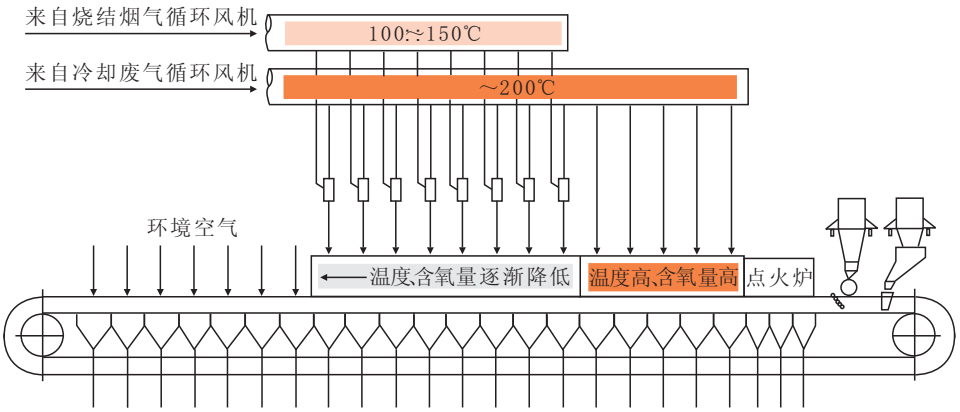


图2 减排降碳均质烧结技术流程图

Fig. 2 Flow Chart of Homogeneous Sintering Technology for Reducing Emissions and Carbon Consumption

该技术在回收利用烧结烟气和冷却废气的实施方式上进行了创新，在减排烟（废）气的基础上更合理地利用余热。通过“梯级控氧-分区控压”烧结烟气与冷却废气双循环，采用独特的循环气体分配和混风方式，既能解决循环烟气氧含量低影响生产的问题，又能调控烧结过程的供热强度，使得烧结台车横向供风性质均匀，同时实现了烟气减排、烧结矿产量和质量同步提升的效果。

减排降碳均质烧结技术通过优化气体流量、温度、含氧量的组合，循环烟（废）气余热、固体燃料燃烧放热与料层内部蓄热互补，使上、中、下层烧结过程的供热强度趋向一致，为实现减排、降碳、均质烧结创造条件。采用烟气与冷却废气双循环的同类技术无调质方法，无梯级控氧供热技术，固体燃料减低约为1 kg/t[19-21]。而减排降碳均质烧结技术烟气循环量达到30%以上，固体燃料降低1.5 kg/t以上。

2.1 烧结中段梯级供氧技术

将烟气循环区域分为烧结前段和烧结中段，每个区域循环烟罩相互独立。在烧结前段循环高温高氧（氧气浓度为21%）的热气，在烧结中段循环温度较低（氧气浓度为18%）的热气，形成梯级控氧供热的循环方式。

采用200 ℃循环热气，研究循环烟气氧含量对烧结指标的影响，实验结果如表1所示，随着循环烟气中氧含量的降低，烧结速度变慢，烧结矿成品率和转鼓强度降低，利用系数减小。当循环烟气氧含量达到18%以上时，烧结矿的成品率和转鼓强度优于基准，氧含量小于18%后，烧结速度下降幅度较大，各项烧结指标均有所下降。

表1 循环烟气氧含量对烧结指标的影响

Table 1 Influence of Oxygen Content in Circulating Flue Gas on Sintering Indicators

方案	烧结速度/（mm·min^{-1}）	成品率/%	转鼓强度/%	利用系数/（t·m^{-2}·h^{-1}）
基准	25.23	69.08	62.50	1.63
21%O_2	23.55	71.07	65.94	1.61
18%O_2	22.76	69.53	63.69	1.58
15%O_2	21.40	67.19	60.31	1.51
12%O_2	17.12	62.64	55.05	1.38

通过支管混风方式控制冷却废气(氧含量高)与烧结循环烟气(氧含量低)的混合比例,实现烧结中段用风氧含量的梯级减量供给。随着料层自动蓄热量的增加,减缓固体燃料燃烧供热强度,作为调控烧结过程供热强度的一种手段,避免料层中下部因热量过剩导致烧结温度过高,造成烧结矿质量下降。

2.2 梯级供热、分区控压烧结技术

通过控制不同温度气体流向和风箱压力,实现整个烧结过程的有效风量合理配置。随着料层蓄热量的增加,调节烧结用风温度和风量,使烧结用风携带的热量与固体燃料燃烧放热、料层内部蓄热互补。针对循环热气造成的料层气体阻力增大的问题,在高温循环区段采用高负压,在较低温循环区段采用高于/略高于常规烧结的抽风负压。通过料层上部供气+下部高负压的双驱动形式,使足量气体进入烧结料层,保证烧结的正常进行。作为调控烧结过程供热强度的另一种手段,配合梯级供氧技术,使烧结料层的上、中、下层供热强度趋于一致,降低固体燃耗,使整个烧结料层高度方向上的烧结矿质量差异减小,提高烧结矿质量,降低返矿率。

2.3 热风罩均匀供风装置

在有限的空间内将循环利用的冷却废气与烧结烟气充分混合均匀,使进入烧结机热风罩内两侧(台车宽度方向)的混合气体性质均匀,可为实现烧结机台车两侧均质烧结创造有利条件,还可以改善热风罩内流场分布,提高烧结过程消纳循环气体的能力,避免烟气外溢,减少环境空气漏入。

3 应用情况

兴澄特钢400 m²烧结机减排降碳均质烧结技术流程图见图3。

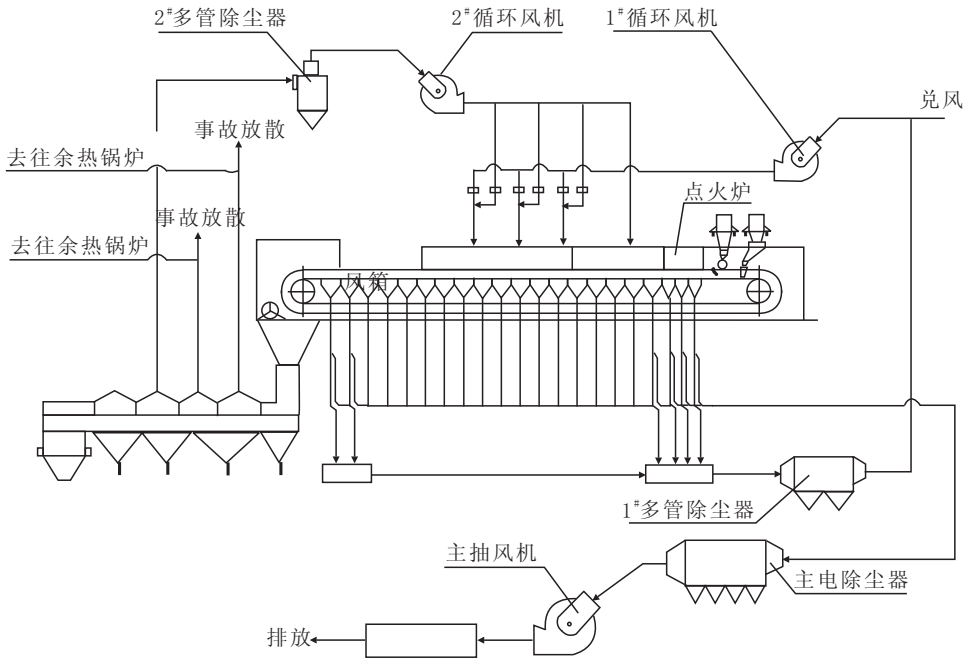


图3 兴澄特钢400 m²烧结机减排降碳均质烧结技术流程图

Fig. 3 Flow Chart of Homogeneous Sintering Technology for Reducing Emissions and Carbon Consumption for 400 m² Sintering Machine in Xingcheng Special Steel

整机共21个风箱,设计将前4个和后2个风箱支管上安装气流切换阀接入到烟气循环系统中,使其可在主抽风系统和烟气循环系统间切换,循环烟气汇集后进入烟气循环主管道,经过1#多管除尘器,通过1#循环风机送入烟气循环管道;环冷机中段废气经过2#多管除尘器,通过2#循环风机送入环冷废气循环管道。循环烟气和环冷废气在热风罩支管内按比例混合,进入热风罩内为烧结过程提供氧气和热量。

烟气循环量达到30×10⁴ m³/h以上时,主抽风机送入活性焦装置的烟气总量降低,主烟道内高温热烟气进入主抽风系统的风量降低,主抽风机

排出烟气温度降低，减少活性焦装置的处理量，降低脱硫脱硝系统的负荷。虽然外加风机电耗增加3.97（kW·h）/t，但是烧结固体燃料消耗降低1.5 kg/t，烧结机利用系数提高0.08 t/（m^2·h），烧结矿转鼓指数（+6.3 mm）提高0.07%，增产幅度为6%[21]。提高了烧结矿质量，减少返矿，有效降低了机头除尘、活性焦脱硫脱硝系统的负荷。减排降碳均质烧结技术已在福建大东海实业集团有限公司、河北太行钢铁和河北普阳钢铁等烧结项目中实现了工业化应用，均取得很好的效果，为钢铁企业铁前工序的绿色发展做出了突出贡献。

4 结语

针对循环烟气含氧量低，厚料层烧结上下层供热不均的问题，研发了减排降碳均质烧结技术，结合“梯级控氧-分区控压”烧结烟气与冷却废气双循环，优化气体流量、温度、含氧量组合，实现烧结过程风、热、氧按需分配，使烟（废）气余热、碳燃烧放热与料层蓄热互补，烧结过程竖向供热强度趋向一致，烧结台车横向供风性质均匀。烧结烟气循环量达到30×10^4 m^3/h以上时，烧结固体燃料消耗降低1.5 kg/t，烧结机利用系数提高0.08 t/（m^2·h），烧结矿转鼓指数（+6.3 mm）提高0.07%，增产幅度为6%。该技术能够有效降低机头除尘、活性焦脱硫脱硝系统的负荷，减少返矿，实现了烟气减排、烧结矿产量和质量同步提升的效果。

参考文献

[1] 张弛.浅谈烧结烟气循环应用及结构设计要点[J].中国设备工程,2023(10):158-160.
[2] 苏步新,张标,邵久刚.我国烧结烟气循环技术应用现状及分析[J].冶金设备,2016(6):55-59.
[3] 倪文杰,邹宗树,李海峰,等.烟气循环烧结工艺中富氧和焦炉煤气喷吹的优化[J].材料与冶金学报,2019,18(1):1-6.
[4] 范晓慧,甘敏,季志云,等.复合气体介质烧结的节能减排技术开发与应用[J].钢铁,2020,55(8):62-69,74.
[5] Fan X,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] 李光辉,姜涛,范振宇,等.烟气循环烧结新技术的研究[C]//2010年全国炼铁生产技术会议暨炼铁学术年会文集(下).北京:中国金属学会,中国金属学会炼铁分会,2009:501-504,509.
[7] 王新东,王冠翔,李超群,等.烧结烟气高比例循环技术研究进展与河钢实践[J].钢铁,2025,60(2):1-10.
[8] 李超群,徐文青,朱廷钰.烧结烟气循环技术研究现状与发展前景[J].河北冶金,2019(S1):1-6.
[9] 刘臣,王兆才,胡兵,等.烟气循环与富氧耦合烧结技术分析[C]//2023全国冶金烧结绿色低碳关键技术研讨会论文集.芜湖:中国金属学会,2023:67-71.
[10] 张志刚,郑绥旭,丁志伟.烧结烟气循环技术工业化应用概述[J].中国冶金,2016,26(7):54-57.
[11] Li C, Han Q, Zhu T, et al.Catalytic NO Reduction by CO over Ca-Fe Oxides in the Presence of O_2 with Sintering Flue Gas Circulation [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020,59(47):20624-20629.
[12] 贾秀凤,喻波.宁钢烧结烟气循环系统的节能减排效果[J].烧结球团,2015,40(4):55-58.
[13] 喻波,贾秀凤,李咸伟,等.宁钢烧结烟气循环系统及其生产效果[C]//2014年度全国烧结球团技术交流年会论文集.厦门:全国烧结球团信息网,2014:37-41.
[14] 裴元东,张俊杰,祁成林.适宜烧结烟气循环工艺的探讨[J].烧结球团,2019,44(2):74-77.
[15] 孙东,郭建,白冰冰.石横特钢烧结烟气循环工艺技术的应用与实践[J].山东冶金,2024,46(5):57-59.
[16] 陈许玲,郑如月,范晓慧,等.烟气循环烧结过程料层温度及NO_x排放模拟模型[J].钢铁,2020,55(2):23-30.
[17] Li C,Han Q,Zhu T,et al.Radical-dominated reaction of CO-NO on a $CaFe_2O_4$ surface in sintering flue gas recirculation[J].RSC Advances,2020,10(39):23491-23497.
[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.
[19] 李文林,刘臣.烟气循环与梯级富氧耦合烧结技术分析[J].烧结球团,2022,47(4):99-105.
[20] 彭坤乾,智谦,李文武.首钢矿业新建360m^2烧结机设计创新与应用[J].矿业工程,2022,20(3):43-45,50.
[21] 王延江,钟庭梁,王建芳,等.烧结烟气循环工艺含氧量控制及烟气成分变化研究[J].烧结球团,2022,47(5):69-74.

（编辑 许营）
修回日期:2025-12-27