烧结工序节能减排技术研究综述

李建军[1,2]，邵 雁[3]，熊 劲[3]，刘子豪[3]，汪 远[3]
(1. 钢铁研究总院 连铸技术国家工程研究中心，北京 100081；2. 中国冶金科工股份有限公司，北京 100028；
3. 中冶南方都市环保工程技术股份有限公司，湖北 武汉 430205)

摘要： 随着电力行业煤电超低排放的推进，中国大气污染防治重点已从电力行业向非电行业转变。钢铁行业已成为目前的减排重点，而作为其耗能和排污大户的烧结工序，节能减排的潜力巨大。本文重点介绍了烧结烟气的排放特点与烧结余热的利用现状，综述了厚料层烧结技术、烧结烟气循环技术和机械密封与水密封技术、烧结矿余热竖罐式回收利用技术等烧结矿余热高效回收利用技术，分析了各技术的优势及存在的关键问题，以期为烧结工序的节能减排改造提供技术参考。

关键词： 烧结；节能减排；厚料层烧结；烟气循环；竖罐式冷却；余热
中图分类号： X757；TF046.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2022)05－0095－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2022.05.077

Research review on energy saving and emission reduction technology in sintering process

LI Jianjun[1,2], SHAO Yan[3], XIONG Jin[3], LIU Zihao[3], WANG Yuan[3]
(1. *National Engineering and Research Center for Continuous Casting Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing* 100081, *China*; 2. *Metallurgical Corporation of China Co., Ltd., Beijing* 100028, *China*; 3. *WISDRI City Environment Protection Engineering Co., Ltd., Wuhan* 430205, *Hubei, China*)

Abstract: With the promotion of ultra-low emission of coal power in electricity industry, the focus of air pollution prevention in China has changed from electricity industry to non-electricity industry. Iron and steel industry has become the focus of emission reduction at present, and the sintering process, as a major energy consumer and polluter, has great potential for energy saving and emission reduction. In this paper, the emission characteristics of sintering flue gas and the utilization status of sintering afterheat are mainly introduced, the high-efficiency recycling technologies of sintering afterheat, such as thick bed sintering technology, sintering flue gas circulation technology, mechanical sealing and water sealing technology, vertical tank recycling technology of sintering afterheat, etc., are summarized. The advantages and key problems of each technology are analyzed to provide technical reference for energy saving and emission reduction transformation of sintering process.

Key words: sintering; energy saving and emission reduction; thick bed sintering; flue gas circulation; vertical tank cooling; waste heat

截至2020年底，中国电力行业煤电超低排放改造完成率高达88%，大气污染防治重点从电力行业向非电行业转变，钢铁行业已成为减排重点[1]。据测算，2017年钢铁行业颗粒物、SO_2和NO_x排放量分别为281万吨、106万吨和172万吨，分别占全国排放总量的20%、7%和10%左右，是工业部门最大的污染物排放源[2]。烧结工序是钢铁行业中仅次于高炉炼铁的能耗大户，能耗占钢铁生产总能耗的10%左右[3]；同时，烧结也是目前钢铁生产过程中烟气污染最严重的工序，其污染物排放量占比近40%[4]。因此，烧结工序节能减排潜力巨大。

收稿日期： 2021－10－09；**修回日期：** 2021－11－18
作者简介： 李建军(1983—)，男，博士，高级工程师，从事冶金工艺及相关节能环保研究。

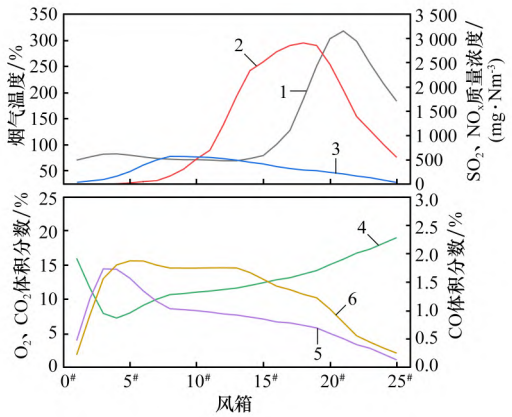
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为了更好地实现烧结工序的节能减排，本文重点介绍了烧结烟气的排放特点和烧结余热的利用现状，综述了厚料层烧结、烧结烟气循环、烧结矿余热高效回收利用等技术的优缺点，以期为现有烧结工序的节能改造提供依据。

1 烧结烟气排放特点

烧结烟气具有排放量大、参数波动大及组成复杂的特点。一吨烧结矿的烟气量高达4 000～6 000 Nm^3，烟气温度为80～180 ℃，O_2体积分数为14%～18%，H_2O体积分数为8%～13%，SO_2质量浓度为400～5 000 mg/Nm^3，NO_x质量浓度为200～400 mg/Nm^3，CO体积分数为1%左右，CO_2体积分数为7%左右，还含有氟化物和二噁英等多种污染物[5-7]。

以某烧结机为例，从烧结机头至机尾依次分布1#至25#风箱，烟气温度和各组分随风箱的分布曲线如图1所示[8]。由图1可知，沿烧结机长度方向，烟气温度呈现“火山型”分布；烟气中的SO_2在烧结机长度方向也呈现“火山型”分布[9]，这主要是因为SO_2主要由矿物和燃料中的硫化物在燃烧带中氧化生成，生成的SO_2被过湿带中的冷凝水吸收，随着过湿带的消失而被集中释放所致；NO_x随着燃烧带的发展先迅速上升然后趋于稳定，再逐步下降，直至在烧结终点处降为零，这主要是因为NO_x主要来源于燃料型NO_x[10]；O_2和CO_x分别是燃烧反应的反应物和产物，两者呈现相反的变化趋势。



1—温度；2—SO_2；3—NO_x；4—O_2；5—CO_2；6—CO。

图1 烧结机长度方向烟气温度和各组分分布[8]

Fig. 1 Distribution of flue gas temperature and components along the length of sintering machine

2 烧结余热利用现状

烧结过程产生的余热资源，占钢铁企业余热资源总量的12%左右，吨烧结矿产生余热约为0.94 G～1.02 GJ[11-12]，其中，烧结烟气显热和烧结矿显热分别占29%和71%[13]，因此，烧结余热回收主要是针对烧结矿显热。烧结矿显热的回收主要在环冷机部分，按烟气温度分为高、中、低三段。目前，高温段烟气余热回收利用较为充分，主要用于余热锅炉产生蒸汽，中、低温烟气余热一般用于余热混料或热风烧结等。

由于冷却工艺和环冷装置结构上的缺陷，烧结余热回收面临两大主要问题：漏风严重和热废气温度低。由于橡胶板的磨损、老化和撕裂，风箱和台车之间的动静胶皮密封不严，导致大量气体泄露至环境空气中；同时，环境冷空气也能通过台车栏板和集气罩之间的缝隙进入环冷机，导致其综合漏风率高达35%～45%[14]。环冷工艺的气固换热方式为交叉错流换热，料层薄且长，导致热废气量大且温度低，从集气罩与台车栏板间混入的冷空气进一步降低了热废气的温度，最终导致了热废气的低品位。这两个主要问题导致烧结余热回收利用率低。目前，我国烧结余热回收利用率仅为54%，与日本新日铁的92%相差甚远，提升空间巨大[15]。

3 烧结烟气节能减排技术

从烧结烟气排放特征和烧结余热利用现状可知，烧结烟气节能减排的主要途径是降低烧结固体燃料的消耗和提高烧结余热回收率。本文主要从厚料层烧结技术、烧结烟气循环技术和烧结矿余热高效利用技术等3方面进行了阐述。

3.1 厚料层烧结技术

“厚料层”指在约束条件下为满足烧结矿质

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

量优化指标而能耗最低时的料层高度，厚料层烧结技术是一种先进烧结技术，是基于料层自动蓄热作用开发出来的，其既可以节能减排，又可以提升烧结矿质量[16]。

烧结料层厚度的提高可以增加料层蓄热率，而蓄热率的提升可以降低固体燃料的用量。研究表明：料层每增加 10 mm，可节约焦粉 0.3 kg/t，从而降低了由燃料燃烧引起的 SO_2 和 NO_x 的排放量[17]。同时，燃料用量的降低增强了料层的氧化气氛，有利于降低成品矿中氧化亚铁的质量分数，从而使得烧结矿的还原性能得到改善。但料层厚度的提高会增加料层阻力，导致风速下降，垂直烧结速度也随之下降。这要求减慢机速，延长点火时间，从而使上部供热充足，表层生矿比例降低；同时厚料层烧结可适当降低点火温度，这有利于减小热应力，避免因表面温度突降引起的碎裂，改善表层烧结矿的转鼓强度，降低平均粉末质量分数。此外，整体烧结矿的高温保持时间也相应延长，从而使各种矿物质结晶充分，改善了烧结矿结构。

但是，烧结过程的自动蓄热现象会导致烧结料层的上部温度低而下部温度高，该问题会随着料层厚度的增加而加剧，最终导致底部过熔，从而降低烧结矿品质[18]。除此之外，垂直烧结速度下降，有可能降低烧结机的利用系数，使烧结矿产量下降。因此需要采取措施来改善料层温度分布及减小垂直烧结速度的下降幅度，达到烧结矿产、质量同步提升的目的。主要措施有：① 强化混合料制粒，改善料层透气性；② 匹配大功率风机，增大风量；③ 加强堵漏风工作，降低烧结机的漏风率；④ 调整燃料分布，防止下部过熔导致的透气性恶化[19]。

随着厚料层烧结技术的广泛应用和快速发展，烧结料层厚度逐年提高。据统计，在进入 21 世纪后，国内大中型烧结机料层厚度相继达到 600 mm 以上，截至 2020 年，部分钢铁企业的烧结机料层厚度可达到 900 mm 以上，其中天钢联合特钢的料层厚度更是长期稳定在 1 000 mm，达到国际先进水平[20]。

3.2　烧结烟气循环技术

烧结烟气循环技术是将烧结过程排出的一部分载热气体返回烧结台车上再循环使用的一种烧结技术，具有节能减排的双重效果[21]。当烧结烟气再次通过烧结料层时，烟气显热及烟气中 CO、CH 等化合物的二次燃烧放热降低了固体燃耗。循环烟气中的 CO、CH 等气体增强了料层内局部的还原气氛，加之铁酸钙等矿物的催化作用，使烟气中的部分 NO_x 被催化还原而脱除，而循环烟气中的二噁英则在高温的烧结料层中被热分解而脱除。此外，烟气循环降低了烟气处理量，同时烟气中的 SO_2 等污染物得到富集，使得后续污染物控制设备的效能均有不同程度的提升。

研究表明，循环烟气组分及温度显著影响烧结矿的产、质量[22]。主要体现：① 循环烟气中 O_2 体积分数低于 15% 后，烧结矿产、质量指标明显恶化；② 循环烟气中的部分 SO_2 富集在烧结矿中，增加了后续炼铁工序的脱硫负荷；③ 循环烟气中较高的 H_2O 体积分数将增加料层过湿现象，恶化料层的透气性；④ 循环烟气显热改善了烧结料层的温度分布，烧结矿产、质量提高，但在超过 250 ℃ 后，烧结矿产量随循环烟气温度升高而下降。基于上述原因，一般要求循环烟气中 O_2 体积分数不小于 15%，H_2O 体积分数不大于 8%，SO_2 质量浓度不大于 1 400 mg/Nm^3，温度控制在 150 ~ 250 ℃。

根据取气位置不同，将从烧结主抽风机后取气的方法称为外循环工艺，将从风箱直接取气的方法称为内循环工艺[7]。虽然外循环具有工艺简单、工程量小等优点，但由于循环烟气含水量高且含氧量低，导致烧结床层透气性变差，燃料燃烧不充分，烧结矿产、质量下降，因此该工艺在国内应用较少。内循环工艺可以通过从不同的风箱选取烟气来灵活调节循环烟气量、温度和组分，最终实现烟气减量、生产节能和污染物减排。因此，内循环工艺更具有推广价值。

烧结烟气内循环工艺的关键在于取气风箱和烟气循环率的选取。李超群等[7]开发应用了

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

烧结烟气选择性循环节能减排技术(图2)。该技术基于实测的烧结烟气组分随风箱的分布规律，选取机尾高温高氧风箱(20#～24#)烟气和机头高CO风箱(4#～6#)烟气混合后循环使用，在避开高硫烟气的同时保证含氧量，烟气循环率为25%～30%，对烧结矿质量基本无影响，实现吨矿烟气量减排21.5%，CO减排4.4 kg，固体燃料消耗降低10.8%，产量提升6.2%。随着中国钢铁行业超低排放改造的稳步推动，烧结烟气循环工艺在国内实现了快速发展，其中内循环工艺比外循环工艺更具应用前景。

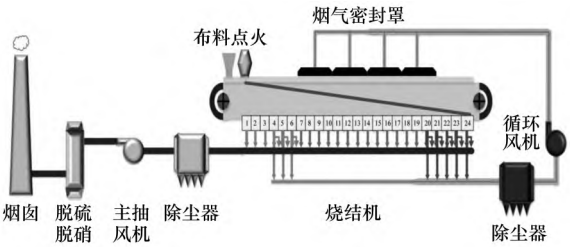


图2 烧结烟气选择性循环节能减排技术工艺流程[7]

Fig. 2 Technological process of selective circulation of sintering flue gas for energy conservation and emission reduction

3.3 烧结矿余热高效利用技术

经以上分析可知，提升热废气品位是提高烧结矿余热利用率的关键，而严重漏风和错流式换热是导致热废气综合品位不高的主要原因。因此，加强密封和改变换热方式是烧结矿余热高效利用技术的主要发展方向。

3.3.1 机械密封与水密封技术

针对橡胶板密封技术高漏风率的缺陷，技术人员开发了密封性更好的机械密封和水密封技术。

机械密封装置(图3)由焊接在台车下栏板底部的动密封板和安装在回转体水平梁上的弹性静密封装置组成，弹性静密封装置又包含底座、弹性机构、静密封板和导向装置[23]。弹性机构使动、静密封板紧密贴合在一起，保持良好的密封效果，限位杆则限定静密封板的垂直位移，保护弹性机构。机械密封装置具有的优势[24]：① 动、静密封板均为自润滑的耐磨金属材质，摩擦阻力小，使用寿命长，能确保密封性能始终良好；② 动、静密封板的水平接触面大，可以有效避免台车径向偏移造成的密封失效；③ 弹性机构可有效弥补环冷机轨道水平度的误差，在轨道存在较大误差时仍然可以提供较好的密封效果。宣钢1#(360 m^2)、2#(360 m^2)烧结环冷机在更改橡胶板密封为机械密封后漏风问题得到有效缓解，漏风率降低70%以上，电耗大幅下降[25]。

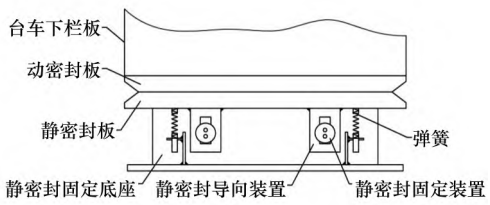


图3 机械密封装置示意

Fig. 3 Schematic diagram of mechanical sealing device

水密封装置的主体为环形水槽和隔板，安装在集气罩和台车栏板间的水密封装置(图4)，其隔板下端垂直插入水槽，通过隔板两侧的水位差保证密封压力，可实现绝对意义上的全密封[26]。转臂式液密封环冷机技术是该密封技术的典型，该技术可将漏风率降至5%以下，余热利用率达60%以上，用电量节约70%～80%，对新建和改造的环冷机均适用，已在国内30多家钢铁企业得以应用[27]。

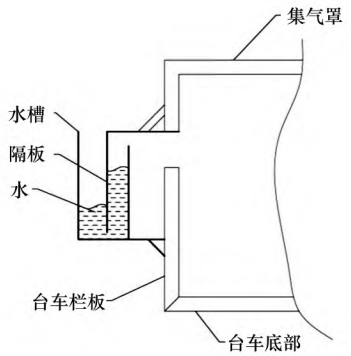


图4 水密封装置示意

Fig. 4 Schematic diagram of water sealing device

3.3.2 烧结矿余热竖罐式回收利用工艺

针对传统环式冷却机错流式换热导致的热废气品位低，进而导致余热利用率低的问题，蔡九菊等[28-29]借鉴干熄炉和高炉的结构与工艺，提出了烧结矿余热竖罐式回收利用工艺，如图5所示。图5中，烧结矿和冷却空气在竖

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

罐内沿着相反方向流动。炽热的烧结矿从竖罐顶部进入预存段进行保温，随后在冷却段与冷却空气进行换热而冷却，冷却后的烧结矿由罐体底部排出。冷却空气由循环风机从罐体底部鼓入，经换热后变成高温废气，再经过一次除尘后进入余热锅炉，同时高温废气被冷却，在经过二次除尘后再次被鼓入罐体内。

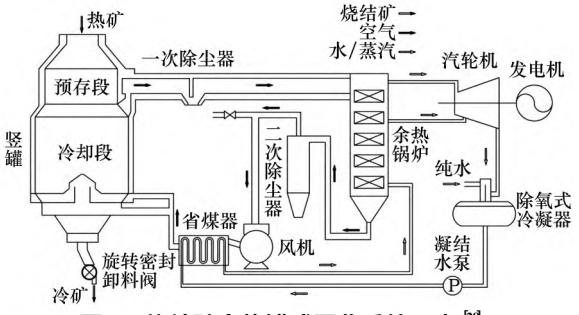


图 5　烧结矿余热罐式回收系统示意[28]

Fig. 5　Schematic diagram of tank type recovery system for sinter waste heat

相比于传统环冷机的余热回收工艺，烧结竖罐式余热回收工艺优点[28]：① 可实现烧结余热资源高效回收(废气出口温度高达 420 ~ 550 ℃，余热回收利用率提高 30% ~40%)；② 可提高烧结矿品质(预存段的保温作用提高了烧结矿的成熟度，生矿被基本消除)；③ 可减少粉尘的排放量(由于罐体良好的密闭性，以及采用了定位接矿方式，粉尘容易得到控制)。

烧结竖罐式余热回收工艺的关键在于气固高效换热，这要求烧结矿保持均匀地“整体流”流动，否则，就会出现“漏斗流”或“管状流”，从而降低气固换热效率。在实际生产中，受烧结矿流动和孔隙率等影响，竖罐式余热回收工艺的冷却风用量会偏离最佳值，一般为 1 000 m^3/t，但依旧仅为传统环式冷却工艺空气消耗量的 1/4[29]。该技术现已经在梅山钢铁、天丰钢铁和瑞丰钢铁等企业投产，与传统冷却方式相比，冷却风量减量 50% 以上，吨烧结矿发电量可提高 20 kW·h，经济效益显著，具有非常好的应用前景[30-31]。但在运行过程中也存在投资大、故障多、设备制造难、运行费用高、生产保证差、除尘系统要求高等问题，这些问题在一定程度上制约了该技术的推广[32]。随着国际能源价格的攀升和环境保护要求的提高，竖罐式余热回收利用技术的优点将进一步体现；同时随着对罐体内阻力特性和气固传热规律认识的深入，罐体结构和工艺参数将得到进一步优化，缺点问题将被逐一解决或弱化。因此，烧结矿余热竖罐式回收利用技术发展潜力较大。

4　结论与建议

(1) 厚料层烧结技术具有良好的节能减排效果，解决料层厚度与烧结利用系数和垂直烧结速度之间的矛盾，是应用和推广厚料层烧结技术的关键。

(2) 烧结烟气内循环工艺是未来实现清洁绿色烧结的重要发展方向之一，取气风箱和烟气循环率的选取是关键，需要根据实际烟气特征以及工艺目标来确定取气风箱和最佳烟气循环率。

(3) 机械密封和水密封技术在降低漏风率方面成效显著，但对热废气品位的提升效果有限；烧结矿余热竖罐式回收利用技术在减少废气排放和高效回收余热方面优势明显，但理论、工艺和装置结构均需进一步发展；现阶段，进行机械密封和水密封改造仍是主流。

参考文献:

[1] 能源情报研究中心. 中国能源大数据报告(2021)：电力篇[R/OL]. (2021 - 06 - 16)[2021 - 07 - 07]. https://mp.weixin.qq.com/s/WtI29qxR86iCiCkn5baATg
Energy Information Research Center. China Energy Big Data Report(2021): Power[R/OL]. (2021 - 06 - 16)[2021 - 07 - 07]. https://mp.weixin.qq.com/s/WtI29qxR86iCiCkn5baATg

[2] 贺克斌. 打赢蓝天保卫战需要加快钢铁行业超低排放改造[E/OL]. (2019 - 05 - 05)[2020 - 11 - 16]. http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk15/201905/W020190505657985649751.pdf
HE Kebin. To win the blue sky defense war, we need to speed up the transformation of ultra-low emission in the iron and steel industry. [E/OL]. (2019 - 05 - 05)[2020 - 11 - 16]. http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk15/201905/W020190505657985649751.pdf

[3] 顾尚军，雷仕江，杜东，等. 降低水钢烧结工序能耗的措施[J]. 能源与节能，2018(2)：63 - 64.

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

GU Shangjun, LEI Shijiang, DU Dong, et al. Measurements for reducing energy consumption of sintering process in Shuicheng Iron & Steel Co., Ltd. [J]. Energy and Energy Conservation, 2018(2): 63 – 64.

[4] 叶恒棣,王兆才,刘前,等. 烧结烟气及污染物减量化技术研究 [J]. 烧结球团,2019,44(6):60 – 67.
YE Hengdi, WANG Zhaocai, LIU Qian, et al. Study on reduction technology of sintering flue gas and pollutants [J]. Sintering and Pelleting, 2019, 44(6): 60 – 67.

[5] 许满兴,张天启. 烧结节能减排实用技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社,2018: 5 – 8.
XU Manxing, ZHANG Tianqi. Practical technology of energy conservation and emission reduction in sintering [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2018: 5 – 8.

[6] CHEN Xuling, HUANG Yunsong, GAN Min, et al. Effect of H_2O(g) content in circulating flue gas on lron ore sintering with flue gas recirculation [J]. Journal of Ionand Seel Research, International, 2015, 22(12): 1107 – 1112.

[7] 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,增刊(1):1 – 6.
LI Chaoqun, XU Wenqing, ZHU Tingyu. Research status and development prospect of sintering flue gas circulation technology [J]. Hebei metallurgy, 2019, Supplement(1): 1 – 6.

[8] FAN Xiaohui, YU Zhiyuan, GAN Min, et al. Appropriate technology parameters of iron ore sintering process with flue gas recirculation [J]. ISIJ International, 2014, 54(11): 2541 – 2550.

[9] YU Zhiyuan, FAN Xiaohui, GAN Min, et al. Reaction behavior of SO_2 in the sintering process with flue gas recirculation [J]. Journal of the Air & amp; Waste Management Association, 2016, 66(7): 687 – 697.

[10] 李东升,周峰,向小平,等. 烧结烟气 NO_x 生成机理及减排方法分析 [J]. 冶金与材料,2019,39(5):24 – 25; 27.
LI Dongsheng, ZHOU Feng, XIANG Xiaoping, et al. Analysis of NO_x generation mechanism and emission reduction methods in sintering flue gas [J]. Metallurgy and Materials, 2019, 39(5): 24 – 25; 27.

[11] 蔡九菊. 中国钢铁工业能源资源节约技术及其发展趋势 [J]. 世界钢铁,2009,(4):1 – 13.
CAI Jiuju. Energy and resource conservation technology and development trend of China's Iron and Steel Industry [J]. World Iron and Steel, 2009, (4): 1 – 13.

[12] 蔡九菊,王建军,陈春霞,等. 钢铁工业余热资源的回收与利用 [J]. 钢铁,2007,42(6):1 – 7.
CAI Jiuju, WANG Jianjun, CHEN Chunxia, et al. Recovery and utilization of waste heat resources in iron and steel industry [J]. Iron and Steel, 2007, 42(6): 1 – 7.

[13] 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. Sintering thermal test and analysis [J]. Iron and Steel, 2011, 46(11): 93 – 98.

[14] 董辉,赵勇,蔡九菊,等. 烧结 – 冷却系统的漏风问题 [J]. 钢铁,2012,47(1):95 – 99.
DONG Hui, ZHAO Yong, CAI Jiuju, et al. Air leakage of sintering cooling system [J]. Iron and Steel, 2012, 47(1): 95 – 99.

[15] 许满兴,张天启. 烧结节能减排实用技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社,2018: 2.
XU Manxing, ZHANG Tianqi. Practical technology of energy conservation and emission reduction in sintering [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2018: 2.

[16] 翟江南. 厚料层烧结优化技术综述及其实践 [J]. 烧结球团,2017,42(2):1 – 9.
ZHAI Jiangnan. Summary and practice of thick bed sintering optimization technology [J]. Sintering and Pelleting, 2017, 42(2): 1 – 9.

[17] 许斌. 铁矿石均热烧结基础与技术研究 [D]. 长沙: 中南大学,2011.
XU Bin. Basic and technical research on soaking sintering of iron ore [D]. Changsha: Central South University, 2011.

[18] 周志安,苏道,张思平,等. 烧结余能高效循环利用技术研究与应用 [J]. 烧结球团,2019,44(2):69 – 73.
ZHOU Zhian, SU Dao, ZHANG Siping, et al. Research and application of sintering residual energy efficient recycling technology [J]. Sintering and Pelleting, 2019, 44(2): 69 – 73.

[19] 贺先新. 浅析武钢厚料层烧结的发展 [J]. 烧结球团,2004,29(3):1 – 5.
HE Xianxin. Analysis on the development of thick bed sintering in WISCO [J]. Sintering and Pelleting, 2004, 29(3): 1 – 5.

[20] 阚永海. 超厚料层烧结技术应用研究 [J]. 河南冶金,2020,28(5):1 – 3; 43.
HAN Yonghai. Research on the application of super-thick material layer sintering technology [J]. Henan Metallurgy, 2020, 28(5): 1 – 3; 43.

[21] 李超群. 钢铁烧结烟气 CO 和 NO_x 协同减排技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学,2020.
LI Chaoqun. Research on synergistic emission reduction technology of CO and NO_x in steel sintering flue gas [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.

[22] 许满兴,张天启. 烧结节能减排实用技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社,2018: 132 – 134.
XU Manxing, ZHANG Tianqi. Practical technology of energy conservation and emission reduction in sintering [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2018: 132 – 134.

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

[23] 曹胜华. 415 m^2 环冷机漏风、打滑及跑偏治理[J]. 河北冶金,2019,10:69 - 74.
CAO Shenghua. Treatment of air leakage,slip and deviation of 415 m^2 annular cooler[J]. Hebei Metallurgy,2019,10:69 - 74.

[24] 李英魁,隋孝利,别威. 河钢承钢 2 号 415 m^2 环冷机密封改造的实践[J]. 冶金能源,2019,38(5):50 - 52.
LI Yingkui,SUI Xiaoli,BIE Wei. Practice of sealing transformation of No. 2 415 m^2 annular cooler of HBIS Group Chengsteel[J]. Metallurgical Energy,2019,38(5):50 - 52.

[25] 李忠. 宣钢烧结环冷机密封技术改造[J]. 科技创新导报,2017,22:87 - 88.
LI Zhong. Sealing technology transformation of sintering ring cooler in HBIS Group Xuansteel.[J]. Science and Technology Innovation Herald,2017,22:87 - 88.

[26] 郭清,高德亮. 液密封环冷机风道水密封镇波装置的研究与应用[J]. 烧结球团,2012,37(3):19 - 20;30.
GUO Qing,GAO Deliang. Research and application of water seal wave stabilizer in air duct of liquid seal ring cooler[J]. Sintering and Pelleting,2012,37(3):19 - 20;30.

[27] 湖南中冶长天重工科技有限公司. 由中冶长天、长天重工等联合研发推广的转臂式液密封环冷机荣获冶金科学技术奖[N/OL]. (2021 - 08 - 24)[2021 - 11 - 08]. https://mp.weixin.qq.com/s/6eRd0JhuJ4_LWQ1w6hgjIA
Hunan CIE Heavy Industry Technology Co.,Ltd. The rotary arm liquid seal ring cooler jointly developed and promoted by MCC Changtian and Changtian Heavy Industry won the Metallurgical Science and Technology Award[N/OL]. (2021 - 08 - 24)[2021 - 11 - 08]. https://mp.weixin.qq.com/s/6eRd0JhuJ4_LWQ1w6hgjIA

[28] 刘靖宇. 烧结矿竖式移动床层气固传热系数及㶲传递系数的实验研究[D]. 沈阳:东北大学,2016.
LIU Jingyu. Experimental research of gas-solid heat transfer coefficient and exergy transfer coefficient in sinter vertical moving bed[D]. Shengyang:Northeast University,2016.

[29] 黄健. 烧结矿竖式散料床气固换热研究:解析法[D]. 沈阳:东北大学,2016.
HUANG Jian. Gas-solid heat transfer of shaft sinter packed bed an analytical method[D]. Shengyang:Northeast University,2016.

[30] 毕传光,孙俊杰. 竖式冷却回收烧结矿显热工艺在梅钢的应用[J]. 烧结球团,2018,43(4):69 - 72.
BI Chuanguang,SUN Junjie. Application of process to recycle sensible heat of sinter using vertical cooling furnace in Meisteel[J]. Sintering and Pelleting,2018,43(4):69 - 72.

[31] 侯朝君,李雪松,齐超群. 烧结机竖罐式余热回收技术问题分析[J]. 山东冶金,2019,41(1):50 - 51.
HOU Chaojun,LI Xuesong,QI Chaoqun. Technical analysis of waste heat recovery in vertical tank of sintering machine[J]. Shandong Metallurgy,2019,41(1):50 - 51.

[32] 许满兴,张天启. 烧结节能减排实用技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2018:170 - 178.
XU Manxing,ZHANG Tianqi. Practical technology of energy conservation and emission reduction in sintering[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,2018:170 - 178.

(上接第 88 页)

[24] BAI Yuting,BIAN Xue,WU Wenyuan. Catalytic properties of CuO/CeO_2-Al_2O_3 catalysts for low concentration NO reduction with CO[J]. Applied Surface Science,2019,463:435 - 444.

[25] WANG Luyuan,CHENG Xingxing,WANG Zhiqiang,et al. Investigation on Fe-Co binary metal oxides supported on activated semi-coke for NO reduction by CO[J]. Applied Catalysis B:Environmental,2017,201:636 - 651.

[26] LI Chaoqun,YANG Yang,REN Wei,et al. Effect of Ce doping on catalytic performance of Cu/TiO_2 for CO oxidation[J]. Catalysis Letters,2020,150(7):2045 - 2055.

[27] DENG Yaqian,SHI Xiaobing,WEI Longqing,et al. Effect of intergrowth and coexistence CuO-CeO_2 catalyst by grinding method application in the catalytic reduction of NO_x by CO[J]. Journal of Alloys and Compounds,2021,869:159231.

[28] WON Park Jong,HYEOK Jeong Jin,YOON Wang Lai,et al. Selective oxidation of CO in hydrogen-rich stream over Cu-Ce catalyst promoted with transition metals[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2005,30(2):209 - 220.

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