太钢低碳低排放烧结技术研究与应用

王 强，王 玮，李 强，吴 明，贺淑珍，郝永寿
（太原钢铁（集团）有限公司，山西 太原 030003）

摘要：针对烧结原料以超细精矿粉为主而导致的烧结料层透气性差，返矿率高，工序能耗较高等问题，太钢进行了一系列低碳低排放技术研究与实践，主要包括细粒级燃料前置混匀造堆技术、强混烧结技术、热风富氧烧结技术、“活性炭+低温SCR”烟气净化技术、微负压点火气固分离技术、环冷机低排及高效余热回收技术等，取得了显著的效果，固体燃料消耗由45 kg/t以上降低到41 kg/t以下，工序能耗由42 kgce/t降低到35 kgce/t，烧结全系统环保指标达到国家A类企业标准。本研究将为以高比例铁精矿为主要原料的烧结厂提供重要的借鉴与参考。

关键词：低碳；低排放；烧结；强力混合；富氧烧结；烟气净化技术；余热回收
中图分类号：TF046.4；X757 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764（2022）01－0104－08
doi：10.13403/j.sjqt.2022.01.014

Research and application on low carbon and low emission sintering technology of TISCO

WANG Qiang，WANG Wei，LI Qiang，WU Ming，HE Shuzhen，HAO Yongshou
（*Taiyuan Iron & Steel（Group）Co.，Ltd.，Taiyuan* 030003，*Shanxi*，*China*）

Abstract：Aiming at the problems of poor permeability of the sinter bed，high return ratio，high solid fuel consumption and process energy consumption caused by TISCO taking the predominance of ultra-fine concentrate powder as the raw material for sintering，TISCO has conducted a series of research and practice on low-carbon and low-emission technologies，which mainly include the front homogenization stacking technology of fine-grained fuel，powerful mixing sintering technology，hot-air oxygen-enriched sintering technology，"activated carbon + low-temperature SCR" flue gas purification technology，micro-negative ignition gas-solid separation technology，low emission and high-efficiency waste heat recovery technology of the ring cooler. Therefore，the solid fuel consumption has been reduced from over 45 kg/t to less than 41 kg/t，the energy consumption of the process has been reduced from 42 kgce/t to 35 kgce/t，and the environmental protection index of the whole system of sintering has reached the national standard of Class A enterprise. Its related technologies are highlighted in order to provide reference for peers.

Key words：low carbon；low emission；sintering；powerful mixing；oxygen-enriched sintering；flue gas cleaning technology；waste heat recovery

相关统计结果表明，世界钢铁行业碳排放量约占全球碳排放总量的7%，而我国钢铁行业碳排放量占全国碳排放总量的15%左右。此外，我国电炉炼钢发展较慢，2020年电炉粗钢占比仅为10.4%，我国钢铁行业仍以长流程炼钢为主，其碳排放量占钢铁工业总排放量的85%以上[1－3]。而在长流程工艺中，烧结工序作为能耗大户，其碳排放量占总工序碳排放量的15%以上[4－5]。因此，在碳达峰、碳中和的目标任务下，烧结工序实现低碳排放势在必行。

收稿日期：2021－12－25；**修回日期**：2022－01－10
作者简介：王 强（1973—），男，高级工程师，从事工艺装备管理方面的工作。
通讯作者：李 强（1970—），男，正高级工程师，从事烧结工艺研究与生产管理方面的工作。

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

太钢烧结原料中自产精粉比例达到 85% 左右，且精粉粒度较细、－0.045 m 占比超过了 98%，导致制粒小球脱粉率高、料层透气性差、返矿率高、烧结矿(产、质量)指标差、碳耗较高且粉尘较大。随着国家超低排放、低碳要求的提出，太钢开展了从原料准备到烧结烟气治理的全流程低碳低排技术研究，对包括细粒级燃料前置混匀造堆技术、强混烧结技术、热风富氧烧结技术、“活性炭＋低温 SCR”烟气净化技术、微负压点火气固分离技术、环冷机低排及高效余热回收技术等进行了重点阐述，研发过程充分考虑各技术的协同、争取低碳减排效果最大化，以期为同行提供借鉴与参考。

1　细粒级燃料前置混匀造堆技术

细粒级燃料燃烧时间短，热利用率低，且极易被主抽风机抽入抽风系统，不仅使得燃料消耗升高，也导致机头电除尘内粉尘含碳量高、除尘效率降低，严重影响了除尘器的安全运行[6-8]。为此，进行了细粒级燃料合理利用技术的研发，即将干熄焦(Coke Dry Quenching，CDQ)除尘灰、烧结燃料除尘灰等通常在配料室配入混匀矿的细粒级燃料集中在原料场，按一定比例配入混匀矿料堆中，通过混匀矿造堆工艺提高燃料在烧结过程中的均匀性。同时，细粒级燃料与细精粉接触更加充分，能够强化烧结液相生成，也有利于降低烧结的燃料消耗。

1.1　实验室研究

基准期(混匀料未配入含 C 细粉)与试验期(混匀料中配入 2% 含 C 细粉)相关烧结参数见表 1，显微结构对比见图 1。由表 1 可知：烧结矿利用系数由 1.50 t/(m^2·h)增至 1.62 t/(m^2·h)，转鼓强度由 68.00% 增至 69.00%，成品率由 79.78% 增至 82.31%，－10 mm 粒级质量分数由 27.97% 降至 25.58%。由图 1 可知：相对于基准期，试验期烧结矿孔洞尺寸减小，主要以小孔厚壁结构为主，烧结矿微观结构更为致密，因此烧结矿质量更优。

表 1　烧结结果对比

Table 1　Comparison of sintering results

方案	垂直烧结速度/(mm·min^{-1})	利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})	转鼓强度/%	成品率/%	成品烧结矿平均粒度/mm	－10 mm 粒级占比/%
基准期	20.10	1.50	68.00	79.78	18.39	27.97
试验期	20.78	1.62	69.00	82.31	19.15	25.58

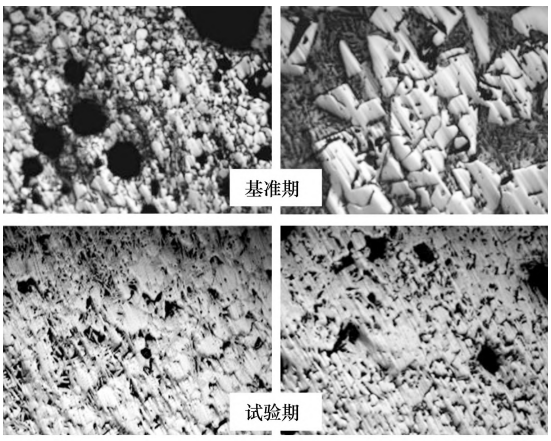


图 1　基准期和试验期烧结矿微观结构对比

Fig. 1　Comparison of microstructure of sinter products from base period and test period

1.2　工业性试验研究

基于实验室结果，在 450 m^2 烧结机上进行工业生产试验。其中，配料室焦粉配比由 4.2% 降低至 3.4%。烧结工艺参数及烧结矿质量变化情况分别见表 2 与表 3。由表 2 可知，在料场匀矿造堆过程中配加 2% 细粒级燃料后，烧结终点温度和负压升高，表明燃烧带厚度增加，细粒级燃料的燃烧速度得到合理控制，热利用率提高，燃料单耗降低 1.07 kg/t。烧结矿 FeO 均值降低 0.24%、FeO 标准差降低 0.298%，固结效果得以改善。如表 3 可知，在料场匀矿造堆过程中配加 2% 细焦粉后，转鼓强度略有提高，－5 mm 质量分数降低 0.30%，5～10 mm 质量分数降低 0.41%，平均粒径得以改善。整体看，在料场匀矿造堆过程中配加 2% 细粒级燃料后，烧结矿产、质量指标均有所提高。

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

表2 烧结工艺参数、固体燃料消耗和 w(FeO)对比

Table 2 Comparison of sintering process parameters, solid fuel rate and w(FeO) content

方案	终点温度/℃	废气温度/℃	负压/kPa	主抽转速/(r·min^{-1})	固体燃料消耗/(kg·t^{-1})	w(FeO)均值/%	w(FeO)标准差/%
应用前	388	127	12.1	842	45.13	10.05	0.906
应用后	403	125	12.5	841	44.06	9.81	0.608
对比	15	-2	0.4	-1	-1.07	-0.24	-0.298

表3 烧结矿转鼓强度和粒度对比

Table 3 Comparison of tumble index and size distributions of sinter

方案	质量分数/%			平均粒度/mm
	转鼓强度	-5 mm占比	5~10 mm占比	
应用前	78.55	4.57	16.92	22.61
应用后	79.44	4.27	16.51	22.96
对比	0.89	-0.30	-0.41	0.35

在试验取得成功的基础上，原料场预配料室增设了具有气力输送功能的密闭细粒级燃料储存仓，用于接收和存储细粒级燃料。根据工艺需求以及细粒级燃料供应量，按1.5%~2.0%的比例配加细粒级燃料参与混匀矿造堆。在料场取用已配加细粒级燃料的混匀矿时，通过热平衡计算确定烧结配料室燃料配比，以进行适当下调。当烧结工况或烧结矿质量发生变化，需要调整燃料配比时，通过调整烧结配料室燃料配比实现。

2 强力混合烧结技术

2.1 强混技术应用研究

与传统圆筒混合机相比，强力混合机具有混合及制粒效果好等特点，并具有烧结矿强度好、燃料消耗低等优势[9-12]。实验室进行了强力混合对烧结的影响及工艺流程优化相关试验，结合现场原有圆筒混料机的设备参数、高精粉率及高比例生石灰的原料特性，从强混位置、混匀时间、加水比例等方面开展了强力混合-制粒工艺方案研究，通过制粒效果、烧结矿物理指标、冶金性能、显微结构、成品率、燃料消耗的综合评价，确定了圆筒+强混+两段圆筒制粒工艺，如图2所示。

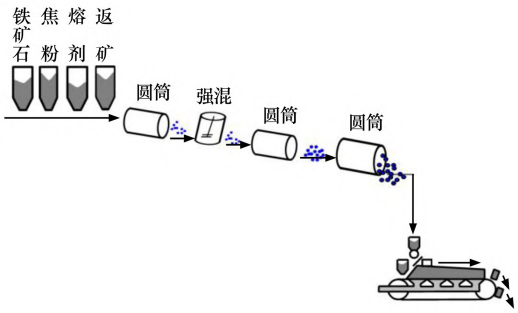


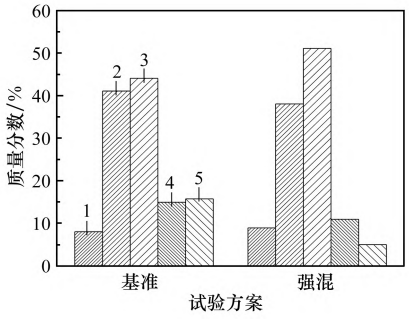
图2 圆筒+强混+两段圆筒制粒工艺流程

Fig. 2 Flow diagram of the new granulation process

2.2 强混工艺实施效果分析

2.2.1 制粒效果

混合料粒度检测结果见图3。由图3可知，强混混合料适宜水分降低0.2%，+8 mm大球质量分数降低4%，-3 mm粒级质量分数降低3%，脱粉率降低7.7%。混合料制粒效果的改善以及脱粉率的降低有利于改善烧结料层透气性，为烧结矿提质增产创造了条件，同时机头电除尘粉尘量降低约20%，为烟气脱硫脱硝工序的高效稳定运行创造了条件。



1—水分；2—-3 mm；3—3~8 mm；4—+8 mm；5—脱粉率。

图3 混合料制粒指标对比

Fig. 3 Comparison of granulation indices of sinter mixture

2.2.2 工艺参数及理化指标

不同工艺烧结指标如表4所示。由表4可

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

知，采用强混工艺后，在料层、机速基本持平的工况下，烧结矿日产量提高 128 t，转鼓强度升高 1.11%，平均粒径升高 0.06 mm，烧结返矿降低 0.18%，同时烧结固体燃料消耗减少 0.7 kg/t，烧结矿产、质量指标均改善。

表 4　不同工艺烧结指标对比

Table 4　Comparison of sinter indices of different sintering processes

方案	产量/（t·d^{-1}）	质量分数/%				平均粒度/mm	固体燃料消耗/（kg·t^{-1}）
		转鼓强度	0～5 mm	5～10 mm	返矿比		
常规圆筒工艺	13 624	79.38	3.36	20.28	17.12	22.07	42.08
强混工艺	13 752	80.49	3.47	19.83	16.94	22.13	41.38
对比	128	1.11	0.11	−0.45	−0.18	0.06	−0.70

3　热风富氧烧结技术

热风烧结可以改善表层烧结矿质量，降低烧结返矿率及烧结过程固体燃料消耗，助力低碳烧结[13-16]。同时，采用环冷机废气进行热风烧结可消除颗粒污染物无组织排放，太钢 450 m^2 烧结机将环冷机 200 ℃左右的热风鼓入烧结机料面，开发出了热风烧结梯级利用技术。

3.1　热风含氧量对烧结的影响

热风烧结技术投用后，环冷机热烟气取代常温空气，通过烧结机热风罩进入烧结料层，抽风温度由 20 ℃升高至 200 ℃，热风体积膨胀为原体积的 1.5 倍，单位体积的氧气浓度降低，使得烧结氧化受到较大影响，热风含氧量对烧结影响的实验室试验结果见表 5。由表 5 可知，当含氧量低于空气中的含氧量时，烧结矿的成品率与基准相差不大，但烧结速度减慢，不利于产能增加。随着含氧量由 21% 提高到 23%，垂直烧结速度、成品率、转鼓强度和利用系数均得到提高。当含氧量达 23% 时，烧结速度达到 23.43 mm/min，成品率为 78.97%，转鼓强度为 70.29%，利用系数达 1.71 t/(m^2·h^1)。当继续提升含氧量至 24%，烧结速度进一步加快，但成品率、利用系数略有下降。因此，对于热风烧结工艺来说，合适的含氧量为 23%。

表 5　热风含氧量对烧结工艺的影响

Fig. 5　Influence of oxygen content in hot air on sintering process

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(抽常温空气)	24.07	75.53	66.73	1.66
含氧量 20%	21.10	75.38	67.02	1.62
含氧量 21%	22.13	78.01	68.25	1.67
含氧量 22%	22.69	78.59	69.26	1.69
含氧量 23%	23.43	78.97	70.29	1.71
含氧量 24%	24.12	78.12	69.76	1.70

3.2　富氧热风烧结技术应用研究

为提高热风烧结的含氧量，在进入烧结机热风罩前的热风主管道内接入氧气管进行富氧操作，热风富氧烧结工艺流程见图4。生产过程调整含氧量至23%左右，氧气用量约为7 000 m^3/h。450 m^2 烧结机应用富氧热风烧结技术后，以热风的物理热代替部分固体燃料，使烧结料层上下热量和温度分布趋向均匀，避免了表层烧结矿因急冷造成强度降低，返矿率降低。此外，富氧烧结后烧结过程氧化气氛增强，燃料燃烧速度提升，燃料利用率提高，使得烧结固体燃料消耗和主要物理化学指标得到明显改善，具体数据见表6。由表6可知，富氧热风烧结技术的应用使烧结矿产量提升 13 t/h，转鼓强度提高 0.89%，FeO 降低 0.75%，返矿率降低 1.03%；同时，固体燃料单耗降低 1.18 kg/t，电能消耗降低 2.25 kW·h/t。富氧与热风烧结技术的有机结合，既解决了环冷机无组织排放问题，又降低了烧结固体燃料消耗，同时还改善了烧结矿产、质量指标，其有重要的推广应用价值。

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

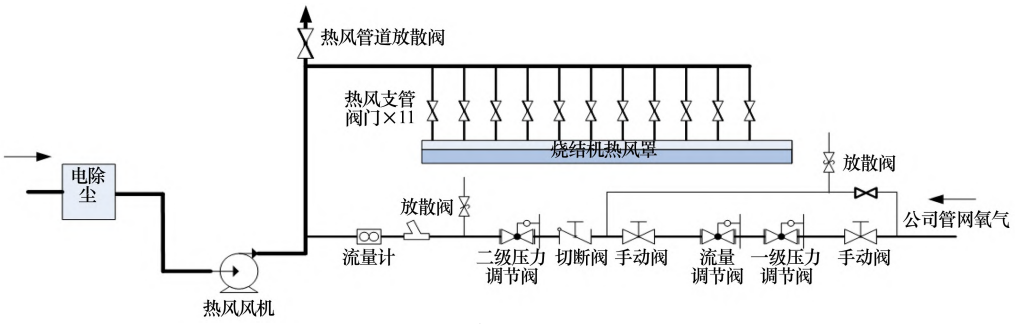


图4 热风富氧烧结工艺流程

Fig. 4 Flow diagram of hot oxygen-enriched air sintering process

表6 富氧热风烧结应用效果

Table 6 Positive influence of hot oxygen-enriched air sintering technology

方案	产量/($t \cdot h^{-1}$)	质量分数/%					平均粒度/mm	固体燃料消耗/($kg \cdot t^{-1}$)	电能消耗/($kW \cdot h \cdot t^{-1}$)
		转鼓强度	0~5 mm粒级占比	5~10 mm粒级占比	FeO	返矿率			
投用前	576	78.98	3.83	22.54	10.51	19.40	21.42	41.60	52.89
投用后	589	79.87	3.83	22.13	9.76	18.37	21.76	40.42	50.64
对比	13	0.89	0.00	−0.41	−0.75	−1.03	0.34	−1.18	−2.25

4 “活性炭+低温SCR”烟气净化技术

4.1 “活性炭+低温SCR”技术研发应用

太钢烧结烟气超低排放改造过程中，在成功应用活性炭脱硫脱硝工艺近10年的基础上实施了活性炭吸附及解析系统扩容50%改造，并增加了150 ℃低温脱硝装置，工艺流程如图5所示。太钢低温SCR脱硝工艺是在使用现场经烟气对催化剂及配套装备进行充分试验研究的基础上确立的，装置设计过程进行了详细的流场研究，采用了不增设增压风机的方案，起到了显著的节电效果。另外，系统未配置GGH换热器，采用加热炉直接将烟气由130 ℃升温至150 ℃的方案，降低了运行维护成本。

4.2 运行效果分析

太钢“活性炭+低温SCR”烟气净化系统投用两年来，系统运行稳定，SO_2、NO_x、粉尘排放指标分别为13.6、33.5、3.1 mg/Nm^3，排放指标稳定并达到超低排放标准，系统的脱硫效率、脱硝效率分别见表7、8。由表7、8可知，太钢烧结烟气净化系统的脱硫效率达到97%以上，脱硝效率达到84%以上，SO_2、NO_x和颗粒物排放符合超低排放要求。太钢采用的活性碳吸附单元扩容50%并联运行、新建低温SCR脱硝装置、不设脱硝塔引风风机、脱硝烟气补热

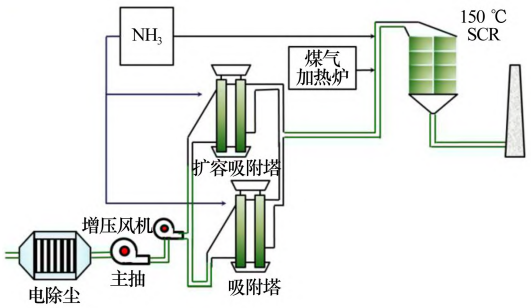


图5 烧结烟气脱硫脱硝工艺流程

Fig. 5 Flow diagram of sintering flue gas desulfurization and denitration process

表7 烟气脱硫效率分析表

Table 7 Analysis of the desulfurization efficiency of sintering flue gas

吸附塔入口SO_2质量浓度/($mg \cdot Nm^{-3}$)	SCR入口SO_2质量浓度/($mg \cdot Nm^{-3}$)	排放SO_2质量浓度/($mg \cdot Nm^{-3}$)	吸附塔脱硫效率/%	SCR脱硫效率/%	总脱硫效率/%
487.1	19.1	13.6	96.1	1.1	97.2

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

表 8　烟气脱硝效率分析表

Table 8　Analysis of the denitration efficiency of sintering flue gas

吸附塔入口 NO_x 质量浓度/(mg·Nm^{-3})	SCR 入口质量浓度/(mg·Nm^{-3})	排放 NO_x 质量浓度/(mg·Nm^{-3})	吸附塔脱硝效率/%	SCR 脱硝效率/%	总脱硝效率/%
219.1	182.4	33.5	16.7	68.0	84.7

采用热风炉直接加热及净烟气助燃超低排放等改造方案，运行效果良好，实现了全系统的高效、稳定、经济运行。

5　微负压点火及气固分离技术

适宜的点火炉膛负压是保证烧结点火质量和降低点火能耗的有效手段，原炉膛负压控制方式为双层翻板式蝶阀控制，存在控制精度低、翻板磨损大、翻板卡阻失效等问题，为此，太钢研发了气固两相分离微负压点火装置及配套控制技术，实现了微负压点火的精准、稳定控制。

5.1　气固两相分离技术原理

气、固两相分离技术原理如图 6 所示。气、固两相分离装备对高含尘气体通过风箱支管直接进入大烟道的抽风模式进行了革新，即从风箱侧方引出导气管，通过支管与大烟道相连实现抽风功能，通过管道上配置的调节阀控制风量及点火负压；粉尘在风箱内沉降后经双层卸灰阀、溜槽、散料收集皮带运输至粉尘仓，从而实现气、固两相分离。

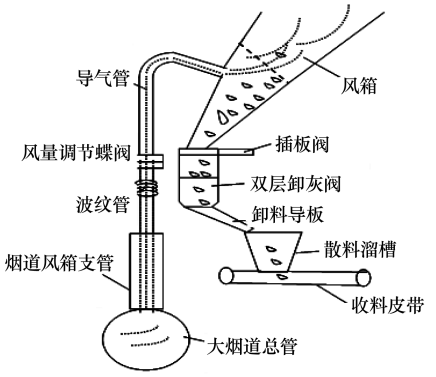


图 6　气固分离技术原理

Fig. 6　Principle of the gas-solid separation technology

5.2　微负压点火及气固分离实施

太钢 450 m^2 和 660 m^2 烧结机均实施了微负压点火与气固分离技术，点火炉炉膛负压降低约 5 ~ 10 Pa，且炉膛负压能够实现自动控制，可将负压稳定控制在 10 Pa 左右。烧结矿点火质量得到改善，点火煤气消耗从应用前的 0.072 GJ/t 降低至 0.048 GJ/t，煤气消耗年降本约 1 300万元。另外，气固两相双通道的抽风模式降低了风箱支管直径，减少了设备磨损，设备使用寿命延长 2 倍以上，维护工作量也显著降低。通过气固分离技术的实施应用，实现了点火炉炉膛微负压的精准控制，从根本上消除了风箱蝶阀磨损、卡阻及风箱堵塞等问题，达到灵活精准调节炉膛负压，降低点火炉煤气消耗和改善烧结点火质量的效果。

6　环冷机低排放及高效余热回收技术

太钢两台环冷机随着运行年限的增加，存在漏风率高、现场无组织排放、余热回收效率低、低温段热量未利用等诸多问题。为提高设备运行的稳定性并实现节能减排目标，2020 年对两台环冷机实施了改造，采用新型球团液密封环冷机方案，对全流程热量进行回收利用。

6.1　环冷机密封系统

2020 年利用大修对原 520 m^2 及 715 m^2 环冷机实施了改造，针对框架结构、台车型式、上下密封、温度控制、卸料系统、配风、余热收集等方面进行了全面升级和创新。新系统集冷却、余热回收、节能、环保多功能于一身，尤其是密封系统更具特色。

6.1.1　上部密封

上水槽密封用于台车栏板与热风罩之间，烧结矿料面扬起的物料极易落入上水槽导致上部水密封失效。环冷机具有冷热交变的特征，一旦水槽漏水，密封设施将很快失效，并造成后期维护困难。为有效解决以上问题，采取措施：① 热风罩内侧设置密实钢丝刷，用于阻挡物料进入水槽，在配合密封板共同作用下，钢

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

丝刷与密封板间形成死区，减少进入水槽的粉尘量；② 水槽单侧设置固定点，预留膨胀量。为了克服膨胀节局部应力过大，导致水槽焊口开裂，采用了不锈钢材质波纹圆弧底设计，提高了水槽的使用寿命。

6.1.2 下部密封

下部密封装置设置在回转框架与风箱之间，位于台车的正下方，由密封板、水槽、端部密封等组成。具体：① 水槽采用SUS304不锈钢压型板焊接，以解决水槽腐蚀导致密封不严的问题；② 密封板与回转框架之间的密封采用耐热250 ℃的特殊橡胶(双唇口橡胶密封)密封，配合外侧水密封，避免了内部气体与外界产生通道而造成磨损，促使风箱与密封板之间形成死区，大幅度延长了密封橡胶的使用寿命；③ 密封板下部设置刮灰板，密封板采用SUS304不锈钢材质，厚度为5 mm，密封板平均分布6处连接接口，采用法兰连接，其它竖向连接口采用焊接方式；④ 内、外水槽在圆周上均布沉降清淤槽，沉降槽下部设置排污系统，沉降槽下部及排污管采用电伴热。

6.1.3 端部密封

风箱内部与卸料端之间也是环冷机漏风的位置之一，对环冷机冷却风量有一定的不利影响。太钢环冷机水箱内端部密封采用固定式密封结构，固定密封顶板与台车之间预留可调间隙，保证台车顺利通过，并有效减少端部漏风。

6.2 余热高效利用系统

环冷机整圈设置热风罩，废气由高温段、中温段及低温段组成。高温段废气(300 ℃以上)用于余热回收发电，中温段引入烧结机热风罩内进行热风烧结，低温段废气作为循环冷却风供中温段环冷鼓风机使用。

通过一年多的运行，环冷机改造前后对比情况见表9。由表9可知，新型球团液密封环冷机高温废气温度提高了122 ℃，余热产汽量增加了53.2 kg/t，表明密封效果得到提升。中、低温段废气全部进行了利用，消除了无组织排放，现场漏灰撒料问题也得到了根本治理，同时系统运行总电耗(环鼓+余热循环风机)降低4 kW·h/t,取得了良好的节电效果。

表9 环冷机改造前后效果对比表

Table 9 Comparison of the status of annular cooler before and after transformation

项目	环冷鼓风机电能消耗/(kW·h·t^{-1})	余热循环风机电能消耗/(kW·h·t^{-1})	环冷鼓风机+余热循环风机总电量/(kW·h·t^{-1})	高温废气温度/℃	余热产汽量/(kg·t^{-1})	中低温段废气
改造前	8.1	4.2	12.3	351	63.5	直接排放
改造后	3.6	4.7	8.3	473	116.7	全部利用
对比	−4.5	0.5	−4.0	122	53.2	—

通过以上一系列低碳烧结技术的开发及应用，太钢烧结工序能耗(含烟气脱硫脱硝、原料加工)为34.75 kgce/t，其中电耗为50.40 kW·h/t,固体燃料消耗为40.35 kg/t，余热产蒸汽量为0.35 GJ/t，点火煤气消耗为0.051 GJ/t，总体节能水平在行业内处于领先水平，烧结全系统环保指标达到国家A类企业标准。

7 结 论

(1) 细粒燃料前置配入混匀料中，与细精矿粉接触更为充分，有利于促进烧结液相量的生成，改善烧结矿质量并降低烧结固体燃料消耗。强力混合技术在太钢烧结中的研究及应用，对于实现高比例精矿粉烧结提质、增产、降耗有着极大推动作用。

(2) “活性炭+低温SCR”技术的开发及应用，使SO_2、NO_x和颗粒物排放符合超低排放要求，实现了全系统的高效、稳定、经济运行。此外，低负压点火及气固分离技术的开发与应用研究，有助于煤气消耗和固体燃料消耗的降低。

(3) 新型球团液密封环冷机在太钢烧结的应用，促进了电耗的有效降低，低温废气用于热风烧结，则使烧结固体燃料消耗明显降低，这非常有利于碳减排技术的实现。

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

（4）通过一系列低碳烧结技术的研发应用，太钢烧结工序能耗（含烟气脱硫脱硝、原料加工）为 34.75 kgce/t，其中电耗为 50.40 kW·h/t，固体燃料消耗为 40.35 kg/t，余热产蒸汽量为 0.35 GJ/t，点火煤气消耗为 0.051 GJ/t，总体能耗在行业内处于领先水平。

参考文献：

[1] 董金池，汪旭颖，蔡博峰，等．中国钢铁行业 CO_2 减排技术及成本研究[J]．环境工程，2021，39(10)：23－31；40.
DONG Jinchi，WANG Xuying，CAI Bofeng，et al. Mitigation technologies and marginal abatement cost for iron and steel industry in China [J]. Environmental Engineering，2021，39(10)：23－31；40.

[2] ZHAO Jun，ZUO Haibin，WANG Yajie，et al. Review of green and low-carbon ironmaking technology [J]. 2020，47 (3)：296－306.

[3] 高建军，齐渊洪，严定鎏，等．中国低碳炼铁技术的发展路径与关键技术问题[J]．中国冶金，2021，31(9)：64－72.
GAO Jianjun，QI Yuanhong，YAN Dingliu，et al. Development path and key technical problems of low carbon ironmaking in China[J]. China Metallurgy，2021，31(9)：64－72.

[4] 张建良，刘征建，焦克新，等．炼铁新技术及基础理论研究进展[J]．工程科学学报，2021，43(12)：1630－1646.
ZHANG Jianliang，LIU Zhengjian，JIAO Kexin，et al. Progress of new technologies and fundamental theory about ironmaking [J]. Chinese Journal of Engineering，2021，43(12)：1630－1646.

[5] HE Kun，WANG Li，LI Xiaoyan. Review of the energy consumption and production structure of china′s steel industry：Current situation and future development [J]. Metals，2020，10(3)：302.

[6] 李法社，张小辉，张家元，等．基于料层最高温度控制的铁矿烧结燃料合理分布[J]．中南大学学报（自然科学版），2015，46(2)：386－393.
LI Fashe，ZHANG Xiaohui，ZHANG Jiayuan，et al. Fuel appropriate distribution based on the highest temperature control in iron ore sintering [J]. Journal of Central South University (Science and Technology)，2015，46(2)：386－393.

[7] 马贤国，刘杰，王小强，等．鞍钢鲅鱼圈厚料层烧结燃料和混合料分布特征研究与应用[J]．鞍钢技术，2020(4)：38－42.
MA Xianguo，LIU Jie，WANG Xiaoqiang，et al. Study on distribution characteristics of sintered fuels and mixture at thick bed in bayuquan branch of ansteel and their applications[J]. Angang Technology，2020(4)：38－42.

[8] 袁兵，马洛文，王跃飞，等．宝钢烧结固体燃料粒度控制探索与实践[J]．烧结球团，2010，35(1)：44－47.
YUAN Bing，MA Luowen，WANG Yuefei，et al. Exploration and practice on control of sintering solid fuels particle size in baosteel[J]. Sintering and Pelletizing，2010，35(1)：44－47.

[9] 刘文权．烧结强力混合与制粒新技术[J]．山东冶金，2013，35(1)：7－8.
LIU Wenquan. New intensive mixing and granulation technology for sintering[J]. Shandong Metallurgy，2013，35(1)：7－8.

[10] 范晓慧，张一雄，季志云，等．强力混合对高比例精矿烧结的影响及机制[J]．钢铁研究学报，2021，33(1)：25－31.
FAN Xiaohui，ZHANG Yixiong，JI Zhiyun，et al. Effect and mechanism of intensive mixing on sintering with high proportion iron ore concentrate [J]. Journal of Iron and Steel Research，2021，33(1)：25－31.

[11] 邱立运，曾小信，刘雁飞，等．立式强力混合机智能化关键技术[J]．冶金自动化，2017，41(5)：38－43.
QIU Liyun，ZENG Xiaoxin，LIU Yanfei，et al. Intelligent key technology of vertical strong mixer[J]. Metallurgical Industry Automation，2017，41(5)：38－43.

[12] 邱立运，邹蔓弘，曾小信．强力混合机料位平衡控制系统研究及应用[J]．机械工程与自动化，2017(2)：173－175.
QIU Liyun，ZOU Manhong，ZENG Xiaoxin. Study on intelligent control system of kneader mixer′s material level[J]. Mechanical Engineering & Automation，2017(2)：173－175.

[13] 景涛，周志安，黄后芳，等．唐山国丰 230 m^2 烧结机热风烧结新工艺的应用[J]．烧结球团，2016，41(4)：11－14.
JING Tao，ZHOU Zhian，HUANG Houfang，et al. Application of new hot gas sintering technology in the 230 m^2 sinter machine of Tangshan Guofeng Iron and Steel Co.，Ltd[J]. Sintering and Pelletizing，2016，41(4)：11－14.

[14] 汤乐云，赵改革，甘敏，等．烧结过程强化结晶的技术探讨及应用[J]．烧结球团，2021，46(4)：1－6.
TANG Leyun，ZHAO Gaige，GAN Min，et al. Discussion and application of enhanced crystallization technology in sintering process[J]. Sintering and Pelletizing，2021，46(4)：1－6.

[15] 潘文，焦光武，高新洲，等．烧结大烟道烟气循环利用合理的循环烧结面积控制研究[J]．烧结球团，2016，41(4)：49－53.
PAN Wen，JIAO Guangwu，Gao Xin zhou，et al. Research on reasonable control of recirculated sintering area for recycling of sintering windmain flue gas [J]. Sintering and Pelletizing，2016，41(4)：49－53.

[16] 王国遥．烧结环冷烟气余热梯级利用技术的探索[J]．烧结球团，2018，43(2)：72－77.
WANG Guoyao. Exploration of gradient utilization technology of waste heat in sintering flue gas of circular cooler[J]. Sintering and Pelletizing，2018，43(2)：72－77.

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