失效烧结炉箅条物化特性及其腐蚀调控技术

赵利明[1]，王晓龙[2]，季志云[2]，范晓慧[2]，李咸伟[3]，甘 敏[2]，周庆军[3]，匡朝辉[1]
（1. 宝钢湛江钢铁有限公司，广东 湛江 524072；2. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083；
3. 宝山钢铁股份有限公司，上海 200900）

摘要：我国烧结机炉箅条年耗损量大，其失效的重要原因为腐蚀。本文通过系统研究失效炉箅条的物化特性，解析其腐蚀失效的原因，并探讨废弃物回用对腐蚀性物质排放的影响。结果表明：依据主要化学组分以及结构特点，失效炉箅条从表层至内层可分为黏附层、腐蚀层、金属层，其中：黏附层主要成分为Fe、K、Cl、S、Ca元素，结构较为疏松；腐蚀层主要成分为Fe、O、Cr，其中Fe_2O_3结构疏松，Cr_2O_3结构致密；金属层主要成分为Fe、Cr，结构致密。箅条腐蚀的主要原因：在烟气高温、碱金属盐、SO_2等综合作用下，箅条发生氯腐蚀、硫酸盐腐蚀及高温氧化腐蚀。通过降低固废配加量、废水回用等方法有助于减少腐蚀性物质的产生和排放，其是调控箅条腐蚀的关键。

关键词：铁矿烧结；失效炉箅条；腐蚀原因；调控方法
中图分类号：TF046.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2023)04－0081－08
doi：10.13403/j.sjqt.2023.04.058

Physical and chemical characteristics of failed sintering grate bar and its corrosion control technology

ZHAO Liming[1], WANG Xiaolong[2], JI Zhiyun[2], FAN Xiaohui[2], LI Xianwei[3],
GAN Min[2], ZHOU Qingjun[3], KUANG Zhaohui[1]
(1. Baosteel Zhanjiang Iron and Steel Co., Ltd., Zhanjiang 524072, Guangdong, China;
2. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;
3. Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 200900, China)

Abstract: The annual consumption of the grate bar of sintering machine in China is large, and the important reason for its failure is corrosion. In this paper, the physical and chemical characteristics of failed grate bar are systematically studied, the causes of corrosion failure are analyzed, and the influence of waste reuse on corrosives emission is discussed. The results show that, according to the main chemical components and structural characteristics, the failed grate bar can be divided into adhesion layer, corrosion layer and metal layer from the surface layer to the inner layer, among which: the main components of the adhesion layer are Fe, K, Cl, S and Ca, and the structure is relatively loose. The main components of the corrosion layer are Fe, O and Cr, of which Fe_2O_3 has a loose structure and Cr_2O_3 has a dense structure; the main components of the metal layer are Fe and Cr, and the structure is dense. The main reasons for the corrosion of the grate bar: under the comprehensive action of fume high temperature, alkali metal salt, SO_2, etc., chlorine corrosion, sulfate corrosion and high temperature oxidation corrosion occur in the grate bar. Reducing solid waste elements with a high mass fraction and wastewater reuse is conducive to reducing the generation and discharge of corrosives, which is the key to control grate bar

收稿日期：2022－11－08；**修回日期**：2022－12－11
基金项目：国家自然科学基金面上项目(52274344)；湖南省自然科学基金资助项目(2022JJ30723)；中南大学研究生科研创新项目(2022ZZTS0482)
作者简介：赵利明(1982—)，男，高级工程师，从事烧结技术研究与生产管理工作。
通信作者：季志云(1987—)，男，副教授，从事铁矿烧结新技术方面的研究工作。

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

corrosion.

Key words: iron ore sintering; failed grate bar; causes of corrosion; controlling methods

2021年我国粗钢产量为10.33亿吨[1]。目前国内钢铁生产仍以高炉—转炉长流程为主，该流程中的重要设备之一为烧结机。烧结台车是铁矿烧结过程中的重要载体，其主要由台车本体、挡板和算条等部件组成，而算条则是按照一定顺序排列后与挡板构成用来容纳和承载烧结矿的空间[2]。在工作时，算条上部会起到承载烧结矿的支撑作用，底部则主要起支撑和固定作用，可以有效防止算条发生弯曲失效和脱落[3-4]。炉算条作为烧结机台车的关键部件及易损件，其使用寿命直接决定了烧结矿的生产成本及烧结机的生产效率[5]。

烧结烟气污染物成分极其复杂，含有碱(重)金属氯盐、硫酸盐颗粒物($PM_{2.5}$、PM_{10})及HCl、SO_2等腐蚀性气体。有研究表明，S、Cl、碱(重)金属是引起金属腐蚀的主要有害元素[6-7]。在烧结机台车运行过程中，算条会周期性地经受烟气冲刷，烟气中的颗粒物首先会黏附在算条表面，在高温废气的综合作用下进一步发生板结和腐蚀。随着国家对环境保护力度的加强，越来越多的钢铁企业选择将钢铁尘泥等回用到铁矿烧结工序中，该做法在导致烧结矿品质下降的同时，会引起烧结烟气污染物排放质量浓度进一步升高，明显加剧算条因腐蚀而发生失效的现象。2018年—2020年，湘钢在烧结工序使用的含铁粉尘量逐年增加，使得炉算条板结、腐蚀速度加快，炉算条检修更换数量明显增加，最多用量达到1万根/月[8]；2018年5月，太钢进行了配加中和站酸泥的工业试验，从2019年开始，炉算条检修作业次数激增，日均停机5.6次[9]。唐钢、京唐公司也有相关报道[10-11]。综上所述，腐蚀会使算条的结构强度变差、寿命变短，导致生产稳定性下降，会对烧结矿产、质量造成重大影响[12-13]。

目前国内外学者对于算条腐蚀相关的研究较少，本文通过分析失效炉算条腐蚀处物化特性，并结合烧结烟气污染物排放特征研究腐蚀机理，可以为算条腐蚀控制技术及新型炉算条的开发提供理论指导，对于烧结高效、稳定顺行具有重要现实意义。

1 试验原料与方法

1.1 试验材料及加工方法

失效炉算条来自国内某钢铁企业，材质为高铬合金铸铁算条。试验使用机械法将腐蚀处各层进行分离，对分离物进行后续分析检测。

烧结试验所用原料包括混匀矿、单种铁矿、熔剂、固废、废水、燃料及返矿，原料配比及其主要化学成分如表1所示，生产的烧结矿碱度(R)、SiO_2、MgO质量分数分别为2.13、4.62%、1.54%。

表1 配矿方案及各原料主要化学成分(质量分数)

Table 1 Matching schemes of different iron-bearing materials and chemical composition of raw materials %

物料名称	配比	TFe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	S	Cl	烧损
混匀矿	—	59.73	4.38	1.32	0.41	1.93	0.049	0.035 0	5.92
卡拉加斯粉矿	15.50	65.05	1.69	0.20	0.03	0.66	0.030	0.002 0	3.17
混合粉	1.19	58.32	5.86	0.17	0.11	2.26	0.141	0.148 0	7.92
巴西高硅粉	6.91	56.92	10.91	0.19	0.09	1.52	0.370	0.549 0	5.32
哈杨迪	25.97	57.22	5.35	0.12	0.10	1.18	0.008	0.003 0	10.16
杨迪粉矿	12.32	56.06	5.56	0.27	0.12	1.93	0.023	0.012 0	11.45
纽曼筛下粉	3.69	60.98	3.74	0.17	0.07	1.86	0.012	0.003 0	5.52
自产球团	1.43	63.93	4.07	2.15	0.23	1.14	0.138	0.058 0	0.18
固废	7.60	67.37	1.94	3.13	0.36	0.61	0.160	0.120 0	−2.36
白云石	3.82	0.49	0.15	31.66	20.02	0.09	0.007	0.034 0	45.95

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

表 1(续)

物料名称	配比	TFe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	S	Cl	烧损
石灰石	3.82	3.65	0.76	50.81	1.22	0.12	0.025	0.006 4	41.24
生石灰	4.78	0.12	0.99	76.84	2.07	0.14	0.054	0.004 5	17.99
返矿	8.60	56.59	5.45	9.10	1.43	1.24	0.037	0.009 8	−0.04
焦粉	4.34	0.53	5.14	0.54	0.14	3.66	0.830	0.018 0	87.21
焦化废水	—	—	—	—	—	—	0.099	0.200 0	—
制酸废水	—	—	—	—	—	—	0.682	3.397 0	—
混合料	100.00	49.80	4.05	8.04	1.13	1.39	0.066	0.014 2	13.22

1.2　烧结杯试验

本文采用尺寸为∅180 mm × 880 mm(高度可调至 1 000 mm)的烧结杯模拟烧结过程，料层高度为 880 mm。使用天然气进行点火、保温，点火参数：点火温度为(1 100 ± 50) ℃，点火时间为 100 s；保温温度为 900 ℃以上，保温时间为 1 min；点火负压为 5 kPa。点火完毕后，调节抽风负压为 12 kPa 进行烧结，达到烧结终点时将抽风负压调为 6 kPa，冷却 3 min 后卸料。

1.3　样品物化特性检测方法

在烧结过程中，采用 MGA6 型烟气分析仪检测烟气中的 SO_2 体积分数，采用崂应 −3072 型烟气采样器采集烟气中 HCl 的体积分数，并依据《环境空气和废气 氯化氢的测定 离子色谱法》(HJ 549—2016)，使用 ICS-600 型离子色谱仪进行 HCl 分析。

采用扫描式电子显微镜 − 能谱仪分析烧结烟气中颗粒物的形貌特征、化学成分。选取箅条腐蚀较为严重的区域进行研究，采用 XRF 分析失效箅条腐蚀处各层的化学组成，采用 ICP、离子色谱法分析样品中 Cl、Si、Ca、K、Na、Pb 等元素的质量分数。采用扫描式电子显微镜 − 能谱仪分析腐蚀处各层的微观形貌特征。采用扫描式电子显微镜 − 能谱仪分析腐蚀处各层的物相组成。

2　结果和讨论

2.1　失效箅条物化特征

按照组分的不同将腐蚀断面由外到里分为黏附层、腐蚀层、金属层三部分，具体如图 1 所示。

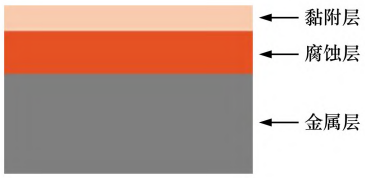


图 1　箅条腐蚀处截面

Fig. 1　Cross-section diagram of the grate bar's corrosion area

腐蚀处各层的主要元素质量分数如表 2 所示。由表 2 可知：从黏附层到金属层，Fe 元素质量分数逐渐升高，K、Cl、Ca、S 元素质量分数逐渐减少；其中，黏附层的 Fe、K、Cl 质量分数较高，占总质量分数的 55% 左右，Ca、S、Na、Pb 等质量分数相对较少；腐蚀层中 O、Fe、Cr 质量分数较高，占总质量分数的 99% 左右，其他元素质量分数极少；金属层中 Fe、Cr 质量分数高，占总质量分数的 90% 左右，其他元素质量分数较低。

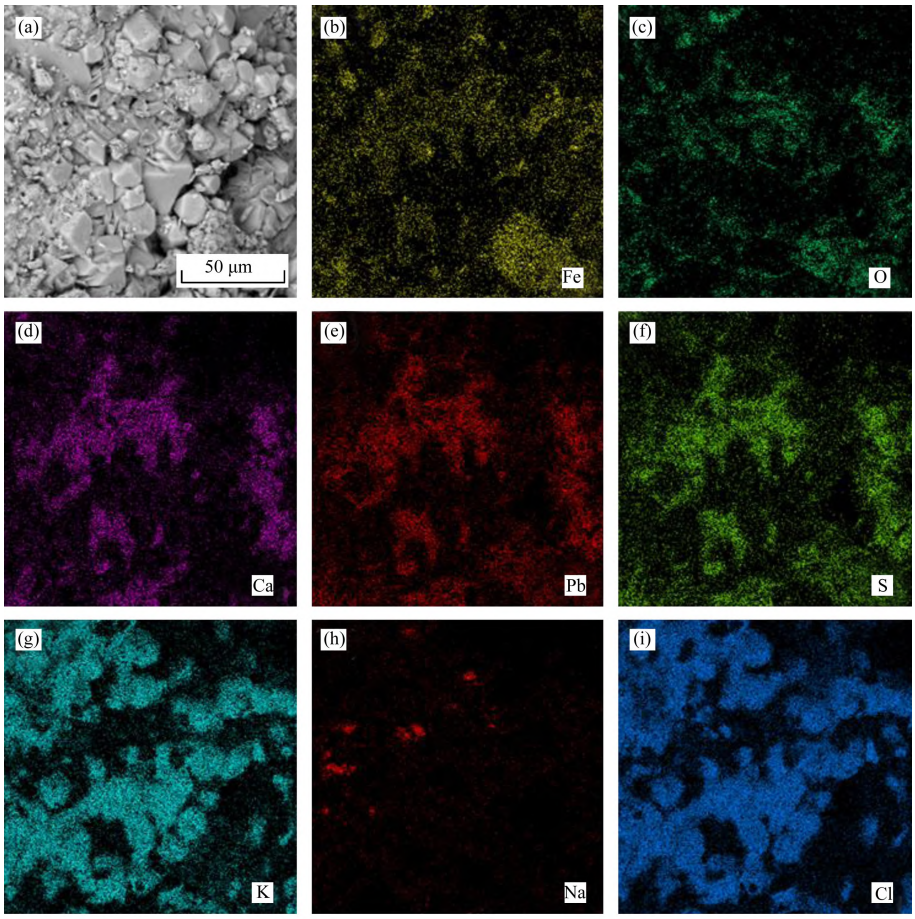
表 2　腐蚀处各层元素分布(质量分数)

Table 2　The element content of each layer at the corrosion area　　%

位置	O	Fe	Cr	Si	K	Na	Pb	S	Cl	Al	Ca
黏附层	31.23	25.81	0	1.62	15.33	0.22	1.06	3.17	15.8	0.39	2.15
腐蚀层	30.85	34.66	32.66	0.43	0	0	0.05	0.07	0.41	0	0
金属层	0	60.20	31.05	0.61	0	0	0	0	0	0	0

黏附层典型区域的面分布图如图 2 所示。由图 2 可知：Fe 与 O 的分布区域重叠性良好，表明 Fe 以金属氧化物的形式存在；Na 与 Cl 的分布区域重叠性良好，表明 Na 以氯化物的形式存在；K 与 Cl 的分布区域重叠性良好，表明 K 以氯化物的形式存在；4 种元素(Ca、Pb、S、O)的分布区域重叠性良好，表明 Ca、Pb 以硫酸盐的形式存在。

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



（a）黏附层的SEM图；（b）~（i）Fe、O、Ca、Pb、S、K、Na、Cl元素分布图

图2 黏附层典型区域面分布

Fig. 2 SEM and EDS mapping analyses of specific regions of the adhesion layer

腐蚀层截面扫描电镜面分布图如图3所示。由图3可知：O元素与Fe、Cr元素的分布区域重叠性较好，因此腐蚀层主要由铁氧化物和铬氧化物组成。其中，铁氧化物结构疏松，可为腐蚀性气体提供通道；铬氧化物结构致密，可以阻止或减缓箅条基体的氧化行为，具有较好的抗氧化性[14]。从Fe元素的面分布图中可以看出，在铬氧化物中，靠近铁氧化物的位置(即区域1)，基本不含Fe；在区域2中，Fe质量分数较多。

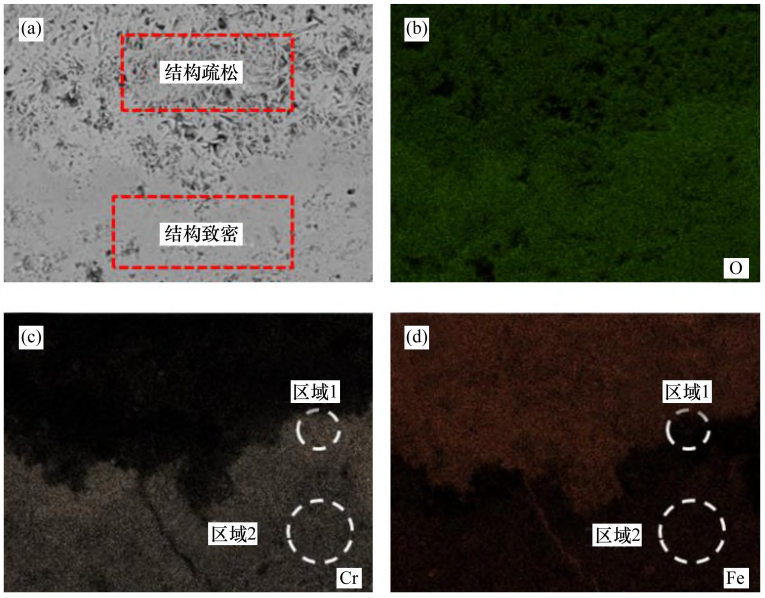
金属层面分布图如图4所示。由图4可知：金属层结构致密，孔洞很少。一部分Cr、Fe与C的分布区域重叠性良好，表明该区域物相为碳化物；另一部分Cr与Fe的分布区域重叠性良好，表明该区域为箅条基体合金部分。

2.2 箅条腐蚀原因

在不间断的烧结生产中，箅条会周期性地经受高温过程，最高可达1 000 ℃。烧结烟气中碱(重)金属氯盐(KCl、NaCl、$PbCl_2$)及硫酸盐(K_2SO_4、$PbSO_4$)颗粒物会黏附在箅条表面，并在HCl、SO_2等气体污染物综合作用下发生腐蚀[15-16]，最终使箅条失效。经总结，造成箅条腐蚀的原因包括氯腐蚀、硫酸盐腐蚀、高温氧化腐蚀等。

在烧结料层中，K、Na、Pb等碱(重)金属容易以氯化物的形态挥发脱除，黏附在箅条表面的碱(重)金属多为氯盐[17]。在氧化性气氛下，随着箅条温度升高，碱金属氯盐(以KCl为例)会与箅条氧化膜(以Fe_2O_3为例)发生反应生成氯气。产生的氯气会穿透氧化层，与箅条基材(以Fe为例)直接发生反应，生成固态的$FeCl_2$，在较高温度时，$FeCl_2$会由固态向气态转化，并向外扩散，在氧势高处被氧化，并释放出氯气。生成的氯气会重新与金属层发生反应，从而发生循环腐蚀[18-23]。由于铬的氯化物被氧化时所需的氧势比铁的氯化

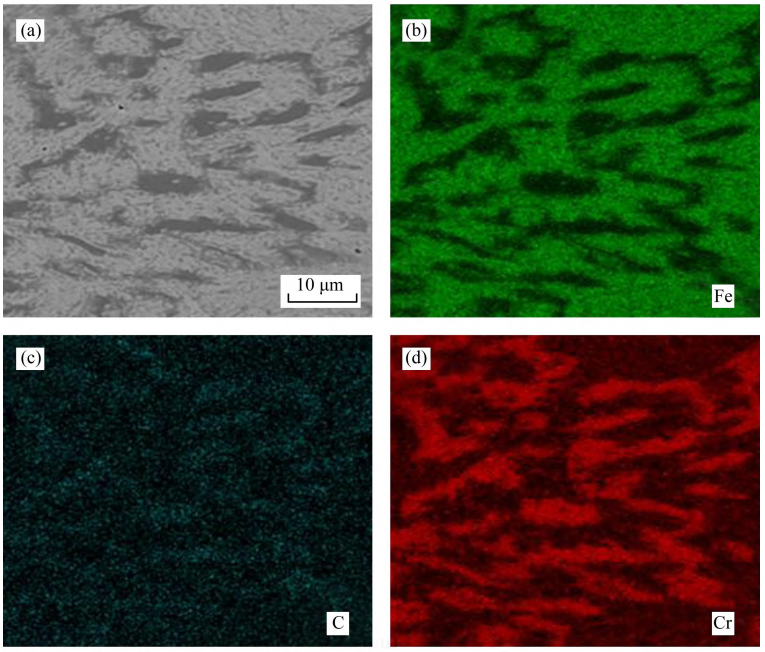
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



（a）腐蚀层的 SEM 图；（b）~（d）O、Cr、Fe 元素分布图

图 3　腐蚀层截面扫描电镜面分布

Fig. 3　SEM and EDS mapping analyses of the corrosion layer section



（a）金属层的 SEM 图；（b）~（d）Fe、C、Cr 元素分布图

图 4　金属层扫描电镜面分布

Fig. 4　SEM and EDS mapping analyses of the metal layer

物低，铬的氯化物会在腐蚀层靠内处被氧化，铁的氯化物会在腐蚀层靠外处被氧化，从而出现分层现象。化学反应如式(1)~(4)所示。

$$KCl + Fe_2O_3 + O_2(g) \rightarrow KFeO_2 + Cl_2(g) \quad (1)$$

$$Fe + Cl_2(g) \rightarrow FeCl_2(s) \quad (2)$$

$$FeCl_2(s) \rightarrow FeCl_2(g) \quad (3)$$

$$FeCl_2(g) + O_2(g) \rightarrow Fe_2O_3 + Cl_2(g) \quad (4)$$

黏附在箅条表面的还有少量硫酸盐，M_2SO_4 形式的硫酸盐在达到熔点后熔融。其溶解的 O^{2-} 与合金基材发生反应，使熔盐与合金基材界面 S 活度上升，渗透进金属层发生反应生成硫化物。熔盐 S 质量分数下降导致碱化，O^{2-} 活度增大，与

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

氧化膜反应形成 FeO_4^{2-}。FeO_4^{2-} 溶解在熔盐中并向外扩散，在 O^{2-} 活度低处析出 Fe_2O_3[24]。化学反应如式(5)~(6)所示。

$$Fe_2O_3 + O^{2-} \rightarrow FeO_4^{2-} \quad (5)$$

$$FeO_4^{2-} \rightarrow Fe_2O_3 + O^{2-} \quad (6)$$

当箅条氧化膜因腐蚀而变得疏松，烟气中的氧气可以穿过氧化膜直接与箅条基材接触，在高温时即可发生高温氧化腐蚀[25]。化学反应如式(7)所示。

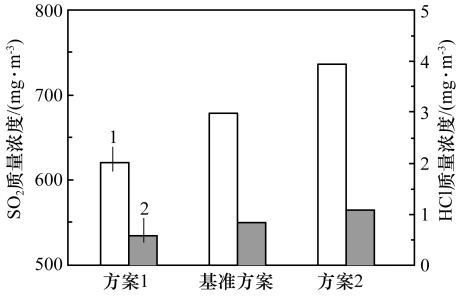
$$Fe + O_{2(g)} \rightarrow Fe_2O_3 \quad (7)$$

2.3 改善炉箅条腐蚀环境的烧结工艺优化

随着环保压力的逐步增大，国内越来越多的钢铁企业将固废和废水循环回用至烧结工序，导致烧结机生产过程箅条腐蚀及黏结现象加剧，使箅条更换较为频繁，箅条寿命问题更显突出，对烧结的稳定生产造成不利影响。本文在对失效箅条腐蚀处物化特性的研究基础上，研究固废回用、废水回用等对腐蚀性物质排放的影响规律；并通过控制有害元素质量分数等开展改善炉箅条腐蚀环境的烧结工艺优化控制技术的研究。

2.3.1 固废回用对腐蚀性物质排放的影响

通过调控固废配比，研究固废回用对腐蚀性物质排放的影响，设计针对固废回用的配矿方案，其中，基准方案固废配比为7.6%，方案1、2的固废配比分别为3.8%、11.4%。固废回用对腐蚀性物质排放的影响如图5所示。由图5可知，随着固废配比的增大，烧结烟气中 SO_2 及 HCl 质量浓度大幅升高；当固废配比为11.40%时，烧结烟气中 SO_2 质量浓度为735 mg/m³，HCl 质量浓度为1 mg/m³。



1—SO_2；2—HCl。

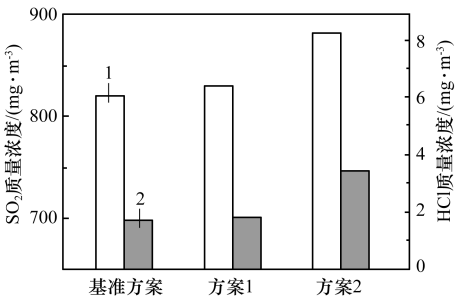
图5 固废回用对腐蚀性物质排放的影响

Fig. 5 Effects of solid waste reuse on the emissions of corrosive substances

2.3.2 废水回用对腐蚀性物质排放的影响

采用混匀矿代替单种铁矿及固废进行配料，熔剂、燃料及返矿占比不变。调整加入废水的种类与用量，设计针对废水回用的加水方案，研究废水回用对腐蚀性物质排放的影响。试验设定混合料水分质量分数与烧结现场保持一致，为7.5%。废水回用方案中，基准方案不配加废水，方案1、2分别配加50%的焦化废水和制酸废水。

废水回用对腐蚀性物质排放的影响如图6所示。由图6可知：与基准方案相比，配加焦化废水方案(方案1)的烧结烟气中 SO_2 及 HCl 质量浓度增幅较小；配加制酸废水方案(方案2)的烧结烟气中 SO_2 及 HCl 质量浓度增幅较大。当配加50%的制酸废水时，SO_2 质量浓度为881 mg/m³，HCl 质量浓度为3.4 mg/m³。这是因为焦化废水中S、Cl质量浓度较低，分别为990、2 000 mg/L，制酸废水中S、Cl质量浓度较高，分别为6 820、33 970 mg/L。



1—SO_2；2—HCl。

图6 废水回用对腐蚀性物质排放的影响

Fig. 6 Effect of wastewater reuse on the emissions of corrosive substances

3 结 论

(1) 本文查明了失效炉箅条的物化特性：箅条腐蚀处断面由表及内可分为三层，即黏附层、腐蚀层和金属层。黏附层结构疏松，其中 Fe、K、Cl、S、Ca 元素质量分数较高，主要物相为 Fe_xO_y、KCl、NaCl 和 $CaSO_4 \cdot K_2SO_4$。腐蚀层中 O、Fe、Cr 元素质量分数较高，主要物相为 Fe_2O_3、Cr_2O_3，其中 Fe_2O_3 结构疏松，Cr_2O_3 结构致密。金属层结构致密，其中 Fe、Cr 元素质量分数高。

(2) 揭示了炉箅条的腐蚀作用机制：箅条在

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

烟气污染物［碱（重）金属氯盐（KCl、NaCl、$PbCl_2$）颗粒物、HCl、SO_2 等］的综合作用下发生氯腐蚀、硫酸盐腐蚀及高温氧化腐蚀，经过长时间的腐蚀循环，箅条表面的腐蚀产物会不断脱落、生成，使得箅条逐渐变薄，最终断裂失效。

（3）开发了调控烧结炉箅条腐蚀的方法：烧结烟气中 SO_2 和 HCl 质量浓度随着固废的配比增加而增大。配加焦化废水和制酸废水后，烧结烟气中 SO_2 及 HCl 质量浓度随着废水用量增加而升高，且配加制酸废水的增幅较大。因此，在烧结过程中需控制固废和废水的配加量，来减轻烟气污染物对箅条的腐蚀作用。

参考文献：

［1］ 陈雨康．碳减排抑矿价一箭双雕 钢铁业将继续控制产量［N］．上海证券报，2022－02－23.
CHEN Y K. Carbon emission reduction and mining price reduction will kill two birds with one stone, the steel industry will continue to control production［N］. Shanghai Securities News, 2022－02－23.

［2］ 马玎．烧结台车箅条的失效研究与长效策略［D］．南宁：广西大学，2014.
MA D. Research on failure and long-term strategy of grate bar of sintering pallet［D］. Nanning: Guangxi University, 2014.

［3］ 陈政．镍钼含量对烧结机高铬铸铁箅条组织及性能的影响［D］．马鞍山：安徽工业大学，2020.
CHEN Z. Effect of nickel and molybdenum content on microstructure and properties of high chromium cast iron grate bars on sinter machine［D］. Ma'anshan: Anhui University of Technology, 2020.

［4］ CHEN Z R, XU L, ZHAO L W, et al. The casting process and high temperature oxidation resistance of high chromium cast iron grate bar［J］. Engineering Review, 2019, 39(1): 29－36.

［5］ PEI Y D, CHENG Z M, KANG H J, et al. Study on bonding mechanism of sinter grate bar［C］//9th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. Warrendale: TMS, 2018: 797－804.

［6］ 蒋旭光，刘晓博．垃圾焚烧锅炉关键受热面腐蚀研究进展及方向思考［J］．中国腐蚀与防护学报，2020，40(3)：205－214.
JIANG X G, LIU X B. Research progress and direction thinking on corrosion of key heat transfer components in waste incineration boilers［J］. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2020, 40(3): 205－214.

［7］ KAWAHARA Y. Controlling factors of localized corrosion in boiler combustion gas environments［J］. Oxidation of Metals, 2016, 85(1－2): 127－149.

［8］ 赵改革，汤乐云，梁高铭，等．烧结循环利用含铁粉尘过程炉箅条防板结防腐蚀技术［J］．烧结球团，2020，45(5)：19－24.
ZHAO G G, TANG L Y, LIANG G M, et al. Technology on anti-hardening and anti-corrosion of grate bar during the process of sintering recycling and using iron-bearing dust［J］. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(5): 19－24.

［9］ 冀岗，李强，吴明，等．烧结机箅条腐蚀损耗原因分析及改进措施［J］．烧结球团，2020，45(1)：25－28；49.
JI G, LI Q, WU M, et al. Cause analysis and improvement measures for corrosive burned-out of sinter machine grate bar［J］. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(1): 25－28; 49.

［10］ 康海军，石江山，裴元东，等．京唐烧结箅条黏结物分析［J］．河北冶金，2014(4)：4－7.
KANG H J, SHI J S, PEI Y D, et al. Analysis about adhesion on sintering grates［J］. Hebei Metallurgy, 2014(4): 4－7.

［11］ 曹东鹏，桂鉴侠．360 m^2 烧结机箅条糊堵原因及改进［J］．河北冶金，2017(3)：50－52.
CAO D P, GUI J X. Reason and improvement for grid blocking of 360 m^2 sintering machine［J］. Hebei Metallurgy, 2017(3): 50－52.

［12］ 裴元东，熊军，史凤奎，等．烧结箅条黏结机理研究及防治措施［J］．烧结球团，2018，43(2)：1－4；44.
PEI Y D, XIONG J, SHI F K, et al. Research on bonding mechanism of grate bars for sinter machine and prevention and control measures［J］. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(2): 1－4; 44.

［13］ LI A M, MA D, ZHENG Q F, et al. Failure analysis and study on heat treatment process of grate bars used in sintering trolley［J］. Advanced Materials Research, 2014, 1061－1062: 454－459.

［14］ MA H T, ZHOU C H, WANG L. High temperature corrosion of pure Fe, Cr and Fe-Cr binary alloys in O_2 containing trace KCl vapour at 750 degrees C［J］. Corrosion Science, 2009, 51(8): 1861－1867.

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

[15] GAN M, JI Z, FAN X, et al. Emission behavior and physicochemical properties of aerosol particulate matter ($PM_{10/2.5}$) from iron ore sintering process[J]. ISIJ International, 2015, 55(12): 2582 – 2588.

[16] FAN X H, WANG Y N, GAN M, et al. Thermodynamic analysis and reaction behaviors of alkali metal elements during iron ore sintering[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2018, 26(6): 558 – 66.

[17] JI Z, FAN X, GAN M, et al. Influence factors on $PM_{2.5}$ and PM_{10} emissions in iron ore sintering process[J]. ISIJ International, 2016, 56(9): 1580 – 1587.

[18] GRABKE H J, REESE E, SPIEGEL M. The effects of chlorides, hydrogen chloride, and sulfur dioxide in the oxidation of steels below deposits[J]. Corrosion Science, 1995, 37(7): 1023 – 1043.

[19] PAN T J, SANCHEZ-PASTEN M, LI Y S. Comparison of hot corrosion behaviour of Fe-Cr and Fe-Al alloys beneath chloride salt melt[J]. High Temperature Materials and Processes, 2009, 28(3): 147 – 153.

[20] BAI M, REDDY L, HUSSAIN T. Experimental and thermodynamic investigations on the chlorine-induced corrosion of HVOF thermal sprayed NiAl coatings and 304 stainless steels at 700 ℃[J]. Corrosion Science, 2018, 135(5): 147 – 157.

[21] LIU X, HU K, ZHANG S, et al. Study of KCl-induced hot corrosion behavior of high velocity oxy-fuel sprayed NiCrAlY and NiCrBSi coatings deposited on 12CrMoV boiler steel at 700 ℃[J]. Corrosion Science, 2022, 203: 110351.

[22] YANG Y Q, ZHAO Y C, WEN Z X, et al. Synergistic effect of multiple molten salts on hot corrosion behaviour of Ni-based single crystal superalloy[J]. Corrosion Science, 2022, 204: 110381.

[23] SCHMID A, MORI G, HÖNIG S, et al. Comparison of the high-temperature chloride-induced corrosion between duplex steel and Ni based alloy in presence of H_2S[J]. Corrosion Science, 2018, 139: 76 – 82.

[24] 付广艳,林立海,刘群,等. Fe-Cr 合金在 Na_2SO_4 盐膜下的热腐蚀行为[J]. 沈阳化工大学学报, 2014, 28(1): 69 – 75.
FU G Y, LIN L H, LIU Q, et al. Hot corrosion behavior of Fe-Cr alloys with Na_2SO_4[J]. Coating Journal of Shenyang University of Chemical Technology, 2014, 28(1): 69 – 75.

[25] CHO H K, AHN J H. Evaluation of high-temperature oxidation, corrosion and wear resistance of top-coated grate bar[J]. Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 2017, 34(12): 911 – 916.

(上接第 51 页)

GAO Yan, ME Zhankun, SUN Changzheng, et al. The technical scheme of sinter machine air-leakage control [J]. Sintering and Pelletizing, 2004, 29(1): 38 – 42.

[12] 金永龙,徐南平,邬士英,等. 烧结机漏风测定新技术的研究和应用[J]. 钢铁研究学报, 1999, 11(3): 67 – 70.
JIN Yonglong, XU Nanping, WU Shiying, et al. Study and application of a new technology for measuring the leakage ratio of sintering machine[J]. Journal of Iron and Steel Research, 1999, 11(3): 67 – 70.

[13] 张安煜,陈贺,仪垂杰,等. 烧结机漏风率在线监测系统的设计与实现[J]. 测控技术, 2019, 38(5): 109 – 114.
ZHANG Anyu, CHEN He, YI Chuijie, et al. Design and realization of on-line monitoring system for air leakage rate of sintering machine[J]. Measurement & Control Technology, 2019, 38(5): 109 – 114.

[14] 肖国强. 烧结机主烟道技术改进[J]. 湖南冶金, 2005, 33(4): 42 – 44.
XIAO Guoqiang. Technical improvement of main gas flue of sintering machine[J]. Hunan Metallurgy, 2005, 33(4): 42 – 44.

[15] 刘新健,吴同情,陈伟,等. 某电厂钢筋混凝土烟道结构检测与评价[J]. 建筑安全, 2018, 33(10): 68 – 70.
LIU Xinjian, WU Tongqing, CHEN Wei, et al. Inspection and evaluation of reinforced concrete flue structure in a power plant[J]. Construction Safety, 2018, 33(10): 68 – 70.

[16] 尹克进,白剑平,于咏春,等. 新型气密封式双层卸灰阀的设计与应用[J]. 冶金设备管理与维修, 2010, 28(4): 59 – 61.
YIN Kejin, BAI Jianping, YU Yongchun, et al. Design and application of a new air-sealed double layer ash discharge valve[J]. Metallurgical Equipment Management and Maintenance, 2010, 28(4): 59 – 61.

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