烧结

烧结篦条粘结机理研究及防治措施

裴元东[1,2,3]，熊 军[4]，史凤奎[4]，石江山[4]，罗尧升[4]，康海军[4]，吴胜利[1]
（1. 北京科技大学 冶金与生态工程学院，北京 100083；2. 首钢集团有限公司技术研究院，北京 100043；
3. 绿色可循环钢铁流程北京市重点实验室，北京 100043；4. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司，河北 曹妃甸 063200）

摘 要： 烧结篦条的粘结是造成其失效和寿命降低的重要原因，且对烧结过程和产、质量有负面影响。针对此问题，本文通过对京唐烧结篦条粘结物进行长期大量取样，并对样品进行成分和物相等微观结构的系统分析，确认了 KCl 是篦条粘结的必要非充分条件，KCl 促进篦条表层 Fe 和 Cr 氧化物的腐蚀是篦条寿命降低的直接原因。提出控制京唐烧结篦条不粘结的有效措施：烧结混匀矿 K_2O 和 Cl 含量分别控制 $<0.06\%$ 和 $<0.05\%$，混合料 K_2O 和 Cl 含量分别控制 $<0.09\%$ 和 $<0.05\%$。在各项措施实施后，最终有效地解决了京唐烧结篦条的粘结问题，篦条的使用周期从 12 个月提高到 22 个月。

关键词： 烧结；篦条；粘结；KCl；机理研究；防治措施
中图分类号： TF046.4　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1000－8764(2018)02－0001－04
doi： 10.13403/j.sjqt.2018.02.016

Research on bonding mechanism of grate bars for sinter machine and prevention and control measures

Pei Yuandong[1,2,3], Xiong Jun[4], Shi Fengkui[4], Shi Jiangshan[4], Luo Yaosheng[4], Kang Haijun[4], Wu Shengli[4]
(1. *School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing* 100083; 2. *Technology Research Institute of Shougang Group Co., Ltd., Beijing* 100043; 3. *Beijing key Laboratory of Green Recyclable Process for Iron & Steel Production Technology, Beijing* 100043; 4. *Shougang Jingtang United Iron & Steel Co., Ltd., Caofeidian* 063200, *Hebei*)

Abstract The bonding of sintering grate bars is the important cause of their failure and life reduction, and it has a negative influence on the sintering process, sinter output and the quality. In order to solve this problem, through sampling of large number of bonding materials of Jingtang sintering grate bars for a long period of time, systematic investigations of their composition and the microstructure are carried out, and it is confirmed that KCl is a necessary but not sufficient condition for the bonding of grate bars. KCl promotes the corrosion of Fe and Cr oxides in grate surface, which is the direct cause of the decrease of grate bar life. The effective measures for control of Jingtang sintering grate bars are proposed as follows: The K_2O and Cl content of blended ores are controlled as $<0.06\%$ and $<0.05\%$, and K_2O and Cl content of sintering mixture are controlled as $<0.09\%$ and $<0.05\%$. After the measures were implemented, the bonding problem of the grate bars in Jingtang sintering was finally and completely solved with service life increasing from 12 to 22 months.

Key words sintering; grate bar; bonding; KCl; mechanism research; prevention and control measures

1 前 言

篦条是烧结机的关键部件，在有害元素侵蚀和水、矿粉、粉尘等的作用下，篦条间通道有时会被粘结成块，封锁抽风通道的同时，也影响了篦条的使用寿命。更重要的是篦条粘结使烧结有

收稿日期： 2017－08－21
基金项目： 国家重点研发计划专项资助(2017YFB0304300&2017YFB0304302)
作者简介： 裴元东(1985－)，男，工程师，主要从事烧结配矿和工艺方面的研究。
通讯作者： 吴胜利(1955－)，男，博士，教授，博士生导师，主要从事烧结、高炉和炼铁新技术等方面的研究。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

效抽风面积减少，影响烧结的正常生产，造成负压不稳定，电耗升高，产、质量下滑。随着资源劣化带来有害元素负荷的增加、烧结机大型化和厚料层后篦条负荷的加重，篦条寿命问题更显突出。

前人从配料、工艺和设备等方面对影响烧结篦条粘结的因素进行分析并开展了一系列攻关，如控制固废配比、提高铺底料厚度、改进篦条结构等[1~4]。在有害元素影响方面，莱钢烧结篦条粘结物中 Cl 含量高达 35.42%[5]，邯钢烧结篦条粘结物中 K_2O 和 Cl 含量分别达 14.6% 和 14.57%[6]。作者前期通过化学成分结合 X 衍射半定量分析的方法，明确了 KCl 是引起烧结篦条粘结的重要表征[7]，这在曹东鹏、邹鹏飞等人的研究中也得到验证[8,9]。基于前人研究可以确认对烧结过程中高 K 和 Cl 含量物料的配比限制是消除篦条粘结的重要手段。然而，从量化 K 和 Cl 对篦条粘结影响及其比例控制，以及更深层次影响篦条粘结的机理则未被研究。本文通过长时期跟踪京唐烧结篦条粘结情况，并在检修时取样进行系统分析研究的方法，分析了烧结篦条粘结的机理，在此基础上采取了相应的防治措施进行应对，最终从根本上解决了京唐烧结篦条粘结的问题。

2 篦条粘结机理研究

2.1 京唐烧结篦条粘结物检测跟踪分析

对京唐烧结停机清理篦条时的篦条粘结物取样，并进行成分和物相分析。化学成分分析仅能给出 K 和 Cl 的含量，通过 X 衍射分析等才能确定出物质形态。从作者前期对篦条粘结物分析可知，篦条粘结物中 KCl 是主要成分，且篦条粘结程度和粘结物中的 KCl 含量有较强的相关性—粘结程度越严重，篦条粘结物中 KCl 含量越高[7]。可通过化学成分中测试 K（一般折算成 K_2O）和 Cl 来表征篦条中的 KCl 含量。通过长时期跟踪测试，可得到其随时间的推移图（见图 1）。

在 2013 年 2 ~ 4 月和 2014 年 2 ~ 3 月这两个时间阶段，京唐烧结篦条发生过两次粘结严重的情况。而由图 1 可知，在 2013 年 2 ~ 4 月和 2014 年 2 ~ 3 月两次篦条粘结严重期间，篦条粘结物中 K 和 Cl 含量很高；在其他篦条粘结少时，粘结物中的 K 和 Cl 含量整体不高且其它时间段，K 和 Cl 含量有高点时篦条却不一定粘结。基于此，分析认为 K 和 Cl 含量高是篦条粘结的必要非充分条件。

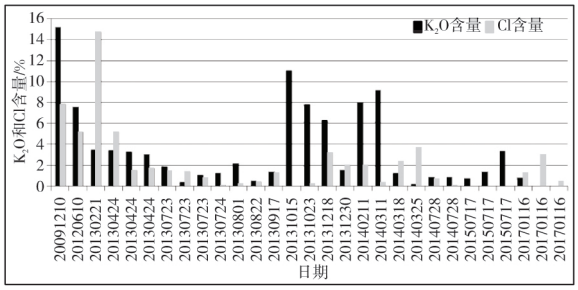


图 1 京唐烧结篦条粘结物成分跟踪测试分析

从表 1 所示 2013 年 4 月的烧结有害元素贡献看，碱金属带入量最大的是固废和液废（焦化废水）；Cl 带入量最大的是返矿和熔剂，其中返矿贡献高主要是由于高炉返矿经过了 $CaCl_2$ 溶液喷洒，且当时返矿比例较高，在 28% ~30% 水平。

表 1 2013 年 4 月烧结有害元素贡献比例(%)

项目	其他矿粉	秘鲁资源	固废 + 液废	熔剂	返矿
碱负荷比例	12.64	14.72	35.72	1.67	34.98
锌负荷比例	11.51	25.75	35.95	1.73	18.62
氯负荷比例	8.15	10.79	17.51	26.25	34.8

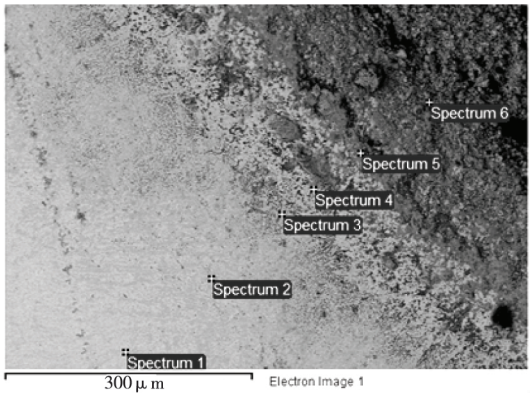
结合京唐实际，认为控制烧结中高 K 和 Cl 含量的固废和矿粉的使用比例是减轻篦条粘结最直接的措施。结合京唐烧结篦条粘结时所对应的混合料的 K 和 Cl 含量情况，建议混合料中 K 和 Cl 含量控制如表 2 所示。由于混匀矿是混合料中最主要的原料，且在一定条件下烧结过程中有害元素的脱除率基本稳定，故与此同时混匀矿和烧结矿的 K 和 Cl 含量控制也可作为预防篦

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

条粘结的有效手段。

表 2　京唐烧结大堆混匀矿 K 和 Cl 控制建议(%)

项目	混匀矿		混合料		烧结矿	
有害元素	K_2O	Cl	K_2O	Cl	K_2O	Cl
含量	<0.06	<0.05	<0.09	<0.05	<0.08	<0.03



Spectrum	O	Si	S	Cl	K	Cr	Fe	Ni
1		1.72				29.98	68.31	
2	2.81	1.21				49.92	46.06	
3	11.74	2.33	0.79	1.04	0.61	12.92	70.57	
4	16.07	5.84	0.62	5.30	0.92	14.18	57.08	
5	30.88	3.66	1.97	3.28	2.44	20.00	37.76	
6	32.45	2.07	1.09	14.80	13.61	5.68	28.14	2.16

图 2　篦条粘结物电镜和能谱分析

通过电镜结合能谱分析可见，随着逐步靠近粘结物里层(图 2 中从 Spectrum 6 到 Spectrum 1)，K 和 Cl 含量逐步降低。原始篦条本身并不含 K 和 Cl，这说明在烧结过程中 K 和 Cl 逐步侵蚀篦条的过程。在约 300 μm 的距离范围内，K 和 Cl 的侵蚀基本呈现指数形态(如图 3 所示)。显而易见，随着篦条的逐步粘结，粘结物中的 K 和 Cl 不断扩散进入篦条中，从而使得篦条不断被侵蚀，最终造成篦条强度降低而失效。

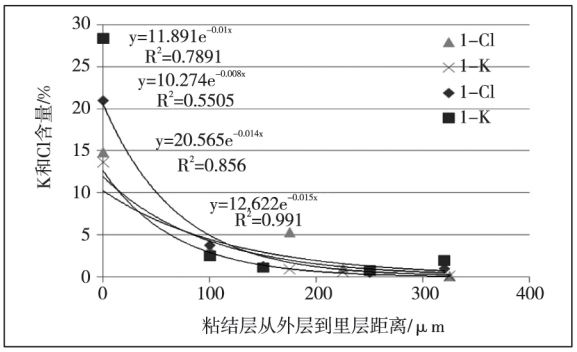


图 3　篦条粘结层中 K 和 Cl 元素分布与距离的关系

此外，除了 KCl 这一主因外，也存在如前人所述影响烧结篦条粘结的其他原因[1-6]。当烧结配加细粉比例增加或制粒效果不佳时，聚集到篦条上的物料增加，一定程度上会使篦条粘结程度加剧，如烧结电场灰和高炉干法灰等细物料在烧结配加时，既增加了 K 和 Cl 的贡献，又属于难制粒的细物料。适宜的铺底料粒度和厚度有利于减少细粉料、过湿层等接触篦条，从而保护篦条免受粘结。另外，篦条的材质和结构、是否采用篦条震打器、烧结矿 FeO 含量和水分、燃料粒度和烟道温度等也可能在一定程度上影响篦条粘结程度。因此，对于篦条的粘结，应结合生产配矿和工艺变化前后进行具体对比分析。

2.2　篦条粘结物电镜分析

对篦条粘结物进行了电镜和能谱分析，通过研究其微观形态以进一步分析其粘结机理，其分析结果如图 2 所示。

2.3　烧结篦条粘结机理分析

在上述研究的基础上，阐述了烧结篦条的粘结机理(如图 4 所示)。可见，篦条完全粘结过程分为四个步骤:

1 期: 小粒度烧结矿卡在篦条间隙中，台车往复运动中，有些小粒度烧结矿未被震落，仍在间隙存在，此时篦条活动范围有一定缩小。

2 期: 烧结料中的 K 和 Cl 形成 KCl，在抽风/过湿层作用下粘附在篦条和小粒烧结矿的表面，K 和 Cl 在 H_2O 的协助下电化学(熔盐)腐蚀篦条，细粉料和灰开始填充缝隙，出现了最初的粘结物。

3 期: 随着台车不停运转，小粒度烧结矿和细粉料卡在篦条间隙增多，KCl 大量地附着在篦条和小粒烧结矿的表面，粘结程度加剧。

4 期: 最终篦条间隙被烧结矿和粘结物粘成一块，尤其在经过机尾高温段反复焙烧后逐步硬化，使篦条间没有通风孔道。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

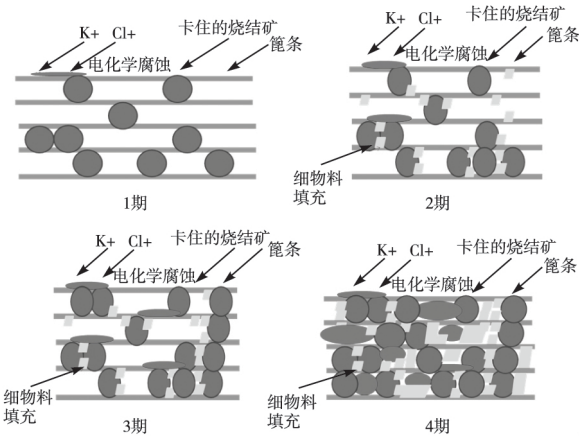


图4 烧结篦条粘结机理示意图

同时，参考金属材料的腐蚀机理[10~13]，篦条外层氧化物在KCl环境中会发生如下反应：

$$Cr_2O_3 + O^{2-} + 3O_2 = 4CrO_4^{2-} \quad \cdots\cdots (1)$$

$$Fe_2O_3 + 2KCl + 1/2O_2 = K_2Fe_2O_4 + Cl_2 \quad \cdots\cdots (2)$$

$$2Fe_2O_3 + 2KCl + 1/2O_2 = K_2Fe_4O_7 + Cl_2 \quad \cdots\cdots (3)$$

$$2Cr_2O_3 + 2KCl + 1/2O_2 = K_2Cr_4O_7 + Cl_2 \quad \cdots\cdots (4)$$

$$10Cr_2O_3 + 24KCl + 9O_2 = 12K_2CrO_4 + 8CrCl_3 \quad \cdots\cdots (5)$$

$$Cr_2O_3 + 4Cl^- + 3/2O_2 = 2CrO_2Cl_2 + 2O^{2-} \quad \cdots\cdots (6)$$

可见，烧结篦条赖以保护的Cr氧化物在有KCl存在的条件下很容易被腐蚀。失去保护层的篦条直接暴露在熔盐介质中将进一步反应，在氧的参与下不断被腐蚀和形成疏松的氧化物，可能存在如下反应。

$$10Fe + 24KCl + 9O_2 = 12K_2Fe_2O_4 + 8FeCl_3 \quad \cdots\cdots (7)$$

$$2Fe + 2KCl + 2O_2 = K_2Fe_2O_4 + Cl_2 \quad \cdots\cdots (8)$$

3 防治京唐烧结篦条粘结的措施

根据上述研究，在京唐烧结生产中采取了如下应对措施以解决篦条粘结问题。

3.1 配料调整

基于对烧结原料K和Cl进行控制的原则和根据京唐烧结原料的可控性，首先对京唐所用矿粉和固废的使用比例进行了调整，以控制K和Cl的带入量，具体采取的配矿调整措施有：①控制杂矿的配比，如将南非粉比例（K_2O和Cl含量分别为0.32%和0.24%）从6.5%降到3.5%，秘鲁原矿比例从9%降低到4.5%；②停配炼钢二次灰（烧结电场灰和高炉干法灰之前已不回用烧结）。

表3所示为近几年烧结混匀矿K和Cl控制水平。可见，自从2015年以来，混匀矿的K_2O和Cl分别控制在0.06%和0.04%以内。按此控制有害负荷后，至今京唐烧结篦条基本不再粘结。

表3 近几年京唐烧结大堆混匀矿K和Cl水平

项目	2013	2014	2015	2016	2017
K_2O	0.055	0.058	0.051	0.047	0.040
Cl	0.050	0.045	0.032	0.030	0.026

3.2 其它措施

此外，还采取了优化混合机制粒效果的措施，如将原先单排喷水改为双排喷水；将烧结铺底料厚度从30~50 mm提高至50~60 mm水平。篦条设备方面，采取了如图5所示的措施，将篦条安装间距从75 mm调整为85 mm，适当增加了篦条的活动空间。同时，在生产检修时，尽量组织安排清理篦条。

这些工艺和设备措施的实施，如前机理所述，一定程度上使篦条在形成粘结的四个步骤过程中，打断了某些环节，从而有利于避免形成最终的粘结。

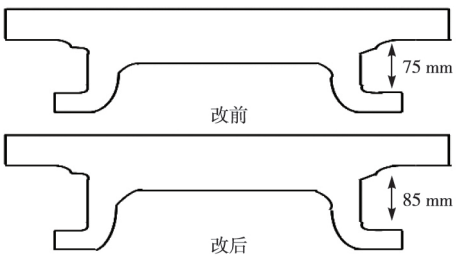


图5 改造前后篦条尺寸的变化

3.3 实施效果

2015年以来，京唐烧结篦条基本未有粘结现象，篦条的寿命也从12个月提高到22个月，这不仅减少了篦条消耗，同时对稳定烧结过程和烧结矿产、质量起到了积极的作用。

（下转第44页）

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

轮体晃动造成圆弧当面不均衡磨损而使部分点缝隙较大及圆弧挡料板钢性差、易变形而导致的漏料问题。采取的措施有:①增加圆弧挡料板刚性,使用衬板为NM400材质;②采用可调节形式,定期调整挡板与斗轮体间隙,防止漏料。

(3)解决斗轮链条脱落问题。为了解决斗轮振动和斗轮传动链条松动造成链条脱落故障频繁发生的问题,除上述解决斗轮体振动大的问题外,另将斗轮传动链条顶部支撑轮改为双支撑形式,提高了支撑轮的稳定性[2]。

(4)解决小车行走轮轴承座强度差,易损坏的问题。改造后,轴承座改为角形轴承座,轴承增大一个型号,轴承座壁厚加厚,提高了轴承座的承载能力。行走车轮采用锻件,提高车轮的使用寿命。

(5)解决小皮带跑偏撒料的问题。将下料斗沿皮带长度方向延长至1.5 m,皮带机纵向方向收窄至0.35 m,这样既保证了下料畅通,又保证了落料点居中的问题。

4 结束语

梅钢于2017年12月份对2#料场两台取料机进行技术改造,通过采取文中所提及的改造措施,成功解决了因振动大而带来的支撑轮、水平轮故障率高、斗轮体磨损严重、圆弧轨道使用寿命短、链条脱落、撒料严重等一系列问题,保证了生产的顺利运行,希望这些经验能为同行提供借鉴与参考。

参考文献

[1] 唐天新. 混匀取料机的设计缺陷及改进[J]. 起重运输机械,2010,50(12):85-86.

[2] 朱俊鹏,万芳. 滚筒式混匀取料机技术改造[J]. 起重运输机械,2003,43(11):44-46.

(上接第4页)

4 结 论

(1)K和Cl元素是造成烧结篦条粘结的重要表征,是烧结篦条粘结的必要非充分条件;KCl促进篦条表层Fe和Cr氧化物的腐蚀是篦条寿命降低的直接原因;控制原料中K和Cl含量是缓解篦条粘结的根本措施。

(2)京唐烧结混匀矿K_2O和Cl含量分别控制在<0.06%和<0.05%水平,混合料K_2O和Cl含量分别控制在<0.09%和<0.05%水平,在调整铺底料厚度和优化配水制粒等措施的配合下,解决了京唐烧结篦条的粘结问题。2015年以来,篦条基本不再粘结,篦条使用周期也从12个月提高到了22个月。

参考文献

[1] 李强,亓玉辉,查丽萍,等. 解决烧结机篦条糊堵问题的实践[J]. 烧结球团,2008,33(03):50-54.

[2] 高丙寅,陈伟,臧国军,等. 烧结机糊堵篦条现象的原因分析及预防措施[J]. 河南冶金,2010,18(06):33-35.

[3] 苏聪. 解决酒钢265 m^2烧结机篦条糊堵问题的实践[J]. 甘肃冶金,2017,39(02):82-84.

[4] 吕铮. 烧结过程中篦条粘、糊的主要原因分析及改进措施[C]//2013年河北省炼铁技术暨学术年会论文集,河北省冶金学会,2013:3.

[5] 李兴义. 配比制衡消除除尘灰对烧结机篦条糊堵的影响[J]. 山东冶金,2011,33(05):41-42+45.

[6] 裴风玉,高居安,王剑锋. 治理烧结机台车篦条粘料的攻关[C]//河北冶金学会炼铁技术暨2008学术年会论文集,河北冶金学会,2008:177-179.

[7] 康海军,石江山,裴元东,等. 京唐烧结篦条粘结物分析[J]. 河北冶金,2014,220(04):4-7.

[8] 曹东鹏,桂鉴侠. 360 m^2烧结机篦条糊堵原因及改进[J]. 河北冶金,2017,255(03):50-52.

[9] 邹鹏飞,邓有胜,赵改革,等. 湘钢炉条板结原因分析及对策[J]. 烧结球团,2016,41(06):21-25.

[10] 郭贵芬. Fe、Cr、Ni及其氧化物在NaCl、KCl熔盐中的腐蚀及机理[D]. 大连:大连理工大学,2005.

[11] 马海涛. 高温氯盐环境中金属材料的腐蚀[D]. 大连:大连理工大学,2003.

[12] 何玉武,李宇春,张宏亮,等. T91耐热钢在KCl·NaCl熔盐体系中的腐蚀电化学行为[J]. 材料保护,2016,49(05):18-22+7.

[13] 李远士,牛焱,吴维. Fe-Cr合金在450 ℃的KCl及KCl-ZnCl_2盐膜中的腐蚀[J]. 金属学报,2001,(09):961-964.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net