高氯固废返烧结对烧结全过程的影响

彭建宏[1a]，周东锋[2]，刘彦廷[1b]，杨本涛[1b]，刘 臣[1b]，贺志国[2]
（1. 中冶长天国际工程有限责任公司 a. 湖南中冶长天节能环保技术有限公司；b. 工程技术研究中心，湖南 长沙 410205；
2. 安阳钢铁股份有限公司，河南 安阳 455004）

摘要：随着新环保要求的实施，氯元素在钢铁烧结系统中逐步发生富集。为明确氯元素对烧结系统的危害，本文通过烧结杯试验模拟结合实际工程采样分析，研究分析高氯固废（主要是烧结电场除尘灰）返烧结对烧结污染物、烧结系统和烟气净化系统的影响。结果表明：高氯固废返烧结时，其对烧结矿产、质量指标及冶金性能影响不大，但会导致烧结烟气中氯碱粉尘、二噁英、氯化氢排放增多，加快烧结炉箅条及电除尘板结、腐蚀，降低电除尘器效率。氯碱粉尘、二噁英、氯化氢增加后会增加烟气净化系统的负担，引起氯的富集。

关键词：氯元素；烧结污染物；烧结系统；烟气净化系统；影响分析
中图分类号：X703.1；TF046.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)06－0123－09
doi：10.13403/j.sjqt.2022.06.093

Effect of high chlorine solid waste re-sintering on whole process of sintering

PENG Jianhong[1a], **ZHOU Dongfeng**[2], **LIU Yanting**[1b], **YANG Bentao**[1b], **LIU Chen**[1b], **HE Zhiguo**[2]
(1. *Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd. a. Hunan Zhongye Changtian Energy Conservation and Environmental Protection Technology Co., Ltd.; b. Engineering Technology Research Center, Changsha* 410205, *Hunan, China*; 2. *Anyang Iron& Steel Co., Ltd., Anyang* 455004, *Henan, China*)

Abstract: With the implementation of new environmental protection requirements, element chlorine is gradually enriched in iron and steel sintering system. In order to clarify the harm of element chlorine to sintering system, the effects of re-sintering of high-chlorine solid waste (mainly the dust removal ash in sintering electric field) on sintering pollutants, sintering system and flue gas purification system are studied and analyzed by sintering cup experimental simulation combined with actual engineering sampling analysis. The results show that when high chlorine solid waste returns to sintering, it has little influence on yield, quality indexes and metallurgical properties of the sintered ore, but it will lead to the increase of chlor-alkali dust, dioxin and hydrogen chloride emissions in sintering flue gas, accelerate the hardening and corrosion of the grate in sintering furnace and electric precipitator, and reduce the efficiency of electric precipitator. The increase of chlor-alkali dust, dioxin and hydrogen chloride will increase the burden of flue gas purification system, and result in the enrichment of chlorine.

Key words: element chlorine; sintering pollutants; sintering system; flue gas purification system; impact analysis

烧结中氯元素的主要来源为燃料和铁矿，以及其他杂辅料[1-2]。氯元素伴随着复杂的冶炼过程，最终以气态氯化氢、固态氯化物、液态氯化盐的形式存在于冶金三废中。在“烟气粉尘超低排放、固废不出厂、废水零排放”的新时期治理要求下，冶金三废中的 Fe、S、N、C 等

收稿日期：2022－10－16；**修回日期**：2022－11－17
基金项目：湖湘青年科技创新人才项目(2021RC3132)
作者简介：彭建宏(1977—)，男，高级工程师，从事钢铁环保治理方面的工作。
通信作者：杨本涛(1989—)，男，博士，高级工程师，从事工业三废治理及资源化方面的研究工作。

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

元素均实现了资源化或无害化，但氯元素一直未得到有效消纳和处理。含氯废料基本上通过简单的返回烧结配料进行消纳。

作为炼铁原料制备的重要环节，烧结工序承担着铁矿造块和杂质去除的作用。研究表明，由于氯化物挥发温度普遍在烧结反应温度下，大部分的氯会在烧结过程中挥发，最终以气态氯化氢或氯化物粉尘的形式进入烧结烟气中。周云花等[1]研究表明：烧结过程带入的氯主要来源于杂辅料中的低氯含铁尘泥，占氯引入量的84.93%；带入的氯主要进入到烟气中，特别是烧结电场除尘灰，占氯排出量的78.24%。在电场除尘灰中，氯的质量分数又随着电场级数的增加而增加，一般一电场机头灰中氯质量分数低于10%，而在三、四电场中的氯质量分数高达30%以上[3]。大量氯在烧结中挥发，势必会对烧结过程造成影响。龙红明等[4-5]系统分析了氯元素在烧结料层内的演化行为，指出氯元素在燃烧过程中可形成含氯化合物，并在500~800 ℃的温度带或者在340 ℃时有氧存在的情况下发生合成反应生成二噁英。吴鹏生等[6]报道了原料中的氯质量分数增加会提高烧结矿的粉化率。

随着新环保要求的实施，氯元素在烧结系统中发生富集，为明确氯元素对烧结系统的危害，本文从高氯固废(主要是烧结电场除尘灰)返烧结对烧结产物、烧结系统和烟气净化系统的影响等三方面进行系统研究和分析，为加强原料中氯元素的管控提供重要支撑。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验所用含铁原料包括褐铁矿、磁/赤精矿及少量杂料，熔剂为轻烧白云石和生石灰，燃料为焦粉。试验原料及其主要化学成分如表1所示。

表1 试验原料的主要化学成分和烧损(质量分数)

Table 1 The main chemical composition and burning loss of raw material %

原料名称	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	P	S	烧损
澳矿筛下粉	63.3	0.32	3.15	0.06370	0.075	0.43	0.083 0	0.017 0	4.80
PB粉	62.48	0.54	3.47	0.013 00	0.077	1.84	0.092 0	0.023 0	4.97
巴西62	63.71	0.67	3.30	0.00143	0.047	1.24	0.082 0	0.018 0	4.12
巴西65	65.02	1.64	1.76	0.057 00	0.049	1.15	0.088 0	0.020 0	3.83
南非63	64.03	0.25	5.52	0.220 00	0.041	1.44	0.055 0	0.022 0	0.85
混合粉	58.32	0.18	5.86	0.170 00	0.110	2.26	0.070 0	0.030 0	7.92
安徽精矿	65.78	5.18	1.90	1.920 00	0.360	0.23	0.185 0	0.016 0	1.89
南非精矿	63.45	27.75	1.47	0.740 00	4.030	1.40	0.140 0	0.042 0	1.38
澳洲造球精矿	65.12	26.80	8.03	0.140 00	0.420	0.33	0.019 0	0.010 0	0.41
德宏	61.52	23.46	10.02	0.480 00	0.510	1.54	0.079 0	0.160 0	1.26
加拿大精矿	65.66	1.02	5.36	0.088 00	0.055	0.36	0.011 0	0.006 2	0.21
混合矿	56.08	17.14	5.03	10.060 00	1.720	1.73	0.100 0	0.110 0	2.36
烧返	56.68	9.41	5.67	10.580 00	2.060	1.66	0.064 0	0.180 0	0.10
高返	57.00	8.54	5.17	10.520 00	2.110	1.59	0.051 0	0.020 0	0.48
生石灰	0.53	0.17	3.45	54.580 00	0.570	0.26	0.003 5	0.030 0	40.69
轻烧白云石	0.33	0.049	3.14	55.210 00	26.420	0.21	0.009 9	0.210 0	9.73
焦粉	1.40	0.048	6.03	0.800 00	0.183	3.94	0.220 0	—	86.24

烧结试验所用高氯和低氯固废的主要化学成分如表2所示。由表2可知：高氯和低氯固废中有害元素主要为Cl、K、Na，其中Cl质量分数分别为10.47%和4.13%。

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

表 2　固废的主要化学成分(质量分数)

Table 2　The main chemical composition of solid wastes　　%

固废名称	TFe	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	C	H_2O	灼减率
高氯固废	35.14	10.55	4.39	1.40	1.66	3.36	2.55	20.12
低氯固废	39.25	8.30	4.35	1.62	4.47	2.11	2.22	17.32
固废名称	K	Na	Cl	S	P	Zn	As	Pb
高氯固废	8.68	1.34	10.47	0.83	0.057	0.083	0.002 6	0.73
低氯固废	5.78	0.62	4.13	2.57	0.090	0.200	0.011 0	1.60

1.2　试验方法

采用烧结杯装置开展添加高氯固废的烧结试验，试验基本工艺参数如表 3 所示。高氯固废与含铁原料、熔剂、燃料共同经历配料、混匀、圆筒制粒、布料、烧结等步骤；烧结完成后，检测成品烧结矿的烧结速度、成品率、转鼓强度、利用系数、固体燃料消耗、还原度、低温还原粉化指数等产、质量指标。

表 3　烧结试验的基本工艺参数

Table 3　The basic technological parameters of sintering experiment

制粒时间/min	料层高度/mm	铺底料厚度/mm	点火温度/℃	点火时间/min	保温时间/min	点火负压/kPa	烧结负压/kPa
5	900	30	1 050 ± 50	1	1	7	13

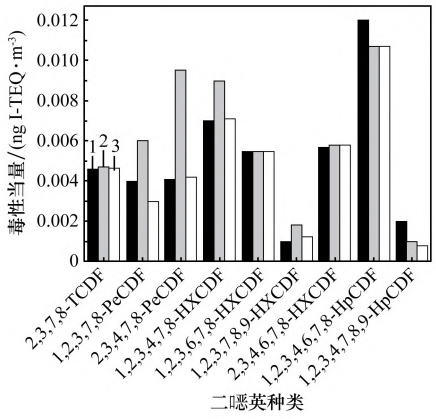
在烧结过程中，使用二噁英采样装置对烧结烟气中的颗粒物进行抽取，其主要由钛合金采样枪、滤筒、循环水冷气相吸附单元、电子质量流量计量和控制装置、烟气分析仪等组成。试验结束后，根据美国 EPA23 方法对烟气样品进行预处理与提取，然后采用高分辨气相色谱仪/高分辨率质谱仪，即 HRGC/HRMS(型号为 Auto Spec Premier)对二噁英毒性当量进行分析。

其他固相物质采用日本 Rigaku 公司生产的 TTR-Ⅲ型 X 射线衍射仪进行晶体结构表征，采用德国布鲁克公司所产的 S8 Tiger 型 X 射线荧光光谱分析仪进行元素组成表征。

2　高氯固废返烧结对污染物排放的影响

2.1　对二噁英排放的影响

研究表明，烧结过程是二噁英污染物的第二大来源，其二噁英的生成机理主要是从头合成，生成的二噁英主要为 PCDFs，而且其生成量与氯的质量分数有直接关系[7]。这主要由于在烧结过程中，当烧结料中混入含氯物质时，含氯物质挥发后会与固体燃料煤、焦粉燃烧产生的大分子碳氢化合物发生化合反应，从而生成二噁英。WIKSTROM 等[8]研究了氯形态对二噁英生成的影响，表明固相氯更会促进二噁英的形成。因此，本文研究配加 1% 含 10% 氯元素的高盐固废和含 4% 氯元素的低盐固废对烧结尾气中二噁英类物质的影响，结果如图 1 所示。



1—不添加固废；2—添加高盐固废；3—添加低盐固废。

图 1　添加含盐固废对烧结烟气二噁英排放的影响

Fig. 1　Effect of adding salt-containing solid waste on dioxin emission from sintering flue gas

由图 1 可知，即使不添加固废，烟气中仍会有二噁英类物质产生，这主要是由于烧结配料中本身就含有氯。进一步地，当添加高盐固废后，烟气中 PCDFs 的量会发生明显增加，从

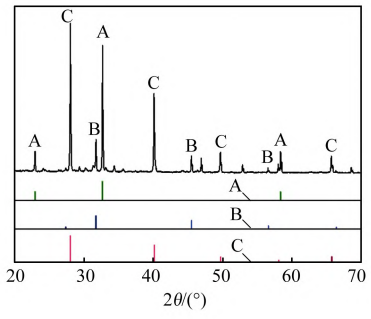
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

无固废添加时的 0.045 9 ng I-TEQ/m^3 增加到 0.054 ng I-TEQ/m^3，其中尤以 2,3,4,7,8-PeCDF 增加的量最多，增加了一倍多。而当添加低盐固废后，二噁英类物质整体均有增加，但增幅较高盐固废少。这与岳昌盛等[9]的研究结论一致。通过水洗降低固废中氯的质量分数，将其再返回烧结配料，可以显著降低二噁英类物质的产生。

但总的来说，向烧结中添加含氯的固废后，新引入的氯会与烧结过程中产生的有机前驱体氯苯和多氯联苯结合，从而导致二噁英类物质显著性增加。

2.2 对粉尘质量浓度的影响

采用外接布袋的方式，对烧结烟气电除尘器出口粉尘进行取样收集，并进行物相分析，结果如图 2 所示。由图 2 可知，KCl、NH_4Cl、NaCl 的总和质量分数大于 95%，这表明出口粉尘主要由氯化物组成。该结果与周云花等[1]的研究结果一致，氯元素会在除尘灰和排空气溶胶颗粒中发生富集，且富集程度随着颗粒物粒度的减小而升高。



A—NH_4Cl；B—NaCl；C—KCl。

图 2 电除尘器出口粉尘 XRD 分析图谱

Fig. 2 XRD pattern of the dust at outlet of electrostatic precipitator

由于烧结烟气电除尘器出口粉尘的粒径较小，去除难度较大，因此，其质量浓度直接影响最终烟气粉尘排放的质量浓度。岳昌盛等[9]研究了机头灰脱氯前后返烧结配料对烧结粉尘质量浓度的影响，并以机头灰中的钾为对比元素，发现该粉尘水洗后配入烧结可以显著降低烟气中钾的质量分数，其中又以 1.1 ~ 2.1 μm 粒度范围的颗粒物和钾的减排量最高。这表明将机头灰水洗脱氯后，可以减少烟气颗粒物的排放。

综上所述，烧结配料中氯质量分数的增加会直接影响到粉尘的排放质量浓度，使其发生明显增大。

2.3 对氯化氢排放的影响

研究表明，氯化物会在高温条件下发生熔融、气化分解，最终形成气态 HCl。兰臣臣等[10]采用热力学计算论证了 $CaCl_2$、$MgCl_2$、$FeCl_3$ 等氯化物在高温条件下与水蒸气反应，形成 HCl 的过程。涉及到的反应式如表 4 所示。

表 4 高温条件下 HCl 形成的主要反应式

Table 4 The main reaction formula of HCl formation at high temperature

反应方程式	反应温度/℃
$2FeCl_3 + 3H_2O \rightarrow Fe_2O_3 + 6HCl$	>130
$MgCl_2 + H_2O \rightarrow MgO + 2HCl$	>570
$CaCl_2 + H_2O \rightarrow CaO + 2HCl$	>1 000

气态 HCl 形成后会进一步与烧结矿及产物发生反应，主要有：① 与烧结矿发生化学吸附。通过 Fe 原子与 Cl 原子的化学吸附[11]，使 HCl 转化为稳定的状态，但其吸附量有限。② 反应形成氯化铵。在烧结燃料燃烧的过程中 NH_3 会被释放出来，其与烟气中的 HCl 结合形成氯化铵，最终以粉尘的形式进入烟气。而未发生反应的 HCl 会进入到烟气中。

由此可知，烧结配料中氯的质量分数增加会使 HCl 加速转化，最终使烟气中 HCl 的质量浓度增加。

3 高氯固废返烧结对烧结系统的影响

3.1 对烧结矿产、质量指标及冶金性能的影响

在混合水分质量分数为 8.5% 的条件下，采用烧结杯试验研究在混合原料中配加不同配比含氯 10% 的固废对烧结指标的影响，结果如表 5 所示。

由表 5 可知，随着含氯 10% 固废配比的逐渐增大，烧结矿成品率、转鼓强度整体呈下降的趋势。其中，烧结矿成品率从71.22% 降低到

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

表 5　含氯 10% 固废配比对烧结指标的影响

Table 5　Effect of solid waste containing 10% chlorine on sintering index

含氯 10% 固废配加量/%	烧结速度/(mm·min^{-1})	成品率/%	转鼓强度/%	利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})	固体能源消耗/(kg·t^{-1})
0.0	24.81	71.22	70.63	1.79	61.16
0.5	25.03	70.20	70.11	1.80	61.18
1.0	25.08	70.11	69.42	1.85	61.22
1.5	25.14	70.07	69.41	1.84	61.34
3.0	25.52	69.95	69.39	1.88	61.48

69.95%，烧结矿成品转鼓指数从 70.63% 下降到 69.39%。而添加固废后，烧结速度、烧结利用系数略有上升，烧结速度从 24.81 mm/min 提高到 25.52 mm/min，利用系数从 1.79 t/(m^2·h) 提高到 1.88 t/(m^2·h)。固体能源消耗变化不大，平均保持在 61.28% 左右。

此外，在配加 1.0% 高盐固废和不配加的条件下，烧结矿的还原性、低温还原粉化率的变化如表 6 所示。

表 6　两种条件下烧结矿的还原粉化率及还原度(质量分数)

Table 6　Reduction degradation rate and reduction degree of sinter under two conditions　%

项目	还原度指数	低温还原粉化率
配加 1.0% 高盐固废	71.9	80.0
不配加	72.3	81.5

由表 6 可知，添加高氯固废后，烧结矿的还原度指数、低温还原粉化率均有一定程度的降低，还原度指数从 72.3% 降低至 71.9%，低温还原粉化率从 81.5% 降低至 80.0%。这与添加飞灰返烧结的变化规律相反[12-13]，分析其原因主要为垃圾焚烧飞灰中的氯主要以 $CaCl_2$ 为主，而本文试验添加的氯主要为 KCl 为主。

综上可知，添加高氯固废后，烧结矿的产、质量指标及冶金性能会发生小幅的改变，但整体影响不大。

3.2　对烧结设备的影响

由前所述，烧结配料中氯元素的增加，会导致烧结烟气发生明显变化，特别是粉尘量也会增多。而炉箅条作为烧结烟气流通的重要通道，随着烟气成分的变化，其正常运行势必会发生改变。章苇玲等[14]、李强等[15]报道指出，当烧结配料中氯碱金属增加后，炉箅条会发生严重的糊堵。炉箅条糊堵现场及产物的主要化学成分如图 3、表 7 所示。



图 3　炉箅条糊堵的实际情况

Fig. 3　Actual situation of the grate bar sticking

表 7　炉箅条糊堵物的主要化学成分(质量分数)

Table 7　The main chemical composition of material of the grate bar sticking　%

Fe	Si	Ca	Mg	Na	K	Al	Zn	Cl
41.7	3.1	9.5	1.8	1.6	9.4	1.54	0.1	10.8

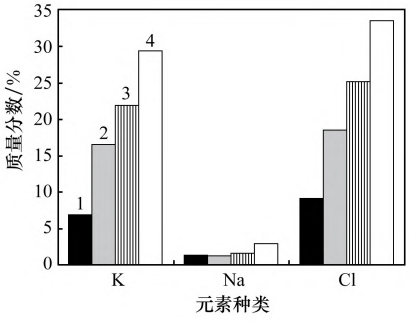
由表 8 可知：糊堵物除含有主要 Fe、Si、Ca 外，还含有大量的 K、Na、Cl 元素，其中 K 元素达到 9.4%。因此，推断主要为 KCl 和 NaCl 粉尘造成箅条糊堵。KCl 和 NaCl 为低熔点的物质，其从烧结过程中挥发出来后，如接触到炉箅条，其会与其他粉尘发生熔融结晶，慢慢累积，最终导致堵塞。此外，如此高的氯化物接触到炉箅条，长期以往，也会加剧其腐蚀[16]。

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

4 高氯固废返烧结对烟气净化系统的影响

4.1 对电除尘系统的影响

选取某钢厂的烧结电除尘灰进行检测，得到其中氯碱元素质量分数与电场位置的关系，结果如图4所示。



电场级数：1—一；2—二；3—三；4—四。

图4 电除尘灰中氯碱质量分数变化情况

Fig. 4 Variation of chlor-alkali content in dust removal ash of electrostatic precipitator

由图4可知，随着电场级数的增加，电除尘灰中氯碱金属的质量分数逐渐增加。这也就是说氯碱金属主要在电除尘系统的三、四级电场进行去除。周云花等[1]研究表明，烧结电场除尘灰的粒度是随着电场级数的增加而逐渐减少，且三、四级电场中粉尘粒径普遍小于10 μm。而王锦等[17]利用Fluent软件模拟了电除尘器对于不同粒径粉尘的去除效率，结果表明：电场对粒径小于10 μm粉尘的去除较难。结合段毅等[18]的研究结果可知，造成其去除难的主要原因：三、四级电场灰的比电阻会远远高于一、二级电场灰，比电阻的增加，会大幅降低电除尘器的捕集效率。

因此，可以推断，当在烧结配料中引入高氯固废时，会增加三、四级电场的细小粉尘量，但由于三、四级电场的粉尘比电阻较高而较难去除，进而会导致电除尘器除尘效率下降。除此之外，当电除尘器中累积了较多的高比电阻粉尘时，由于其不易释放电荷，会黏附于电除尘器及灰斗内，造成设备故障[19]。

4.2 对脱硫脱硝系统的影响

根据前述研究结果可知，当在烧结配料中引入高氯固废时，烟气中的二噁英、氯碱粉尘、氯化氢的质量浓度均会发生不同程度的增加。这些物质进入到烟气脱硫脱硝净化系统中，势必会对脱硫脱硝净化系统造成影响。目前主流的脱硫脱硝系统技术主要有湿法脱硫+SCR脱硝、半干法脱硫+SCR脱硝和双级活性炭法。下面主要论述高氯固废加入烧结后对各种系统的影响。

4.2.1 对湿法脱硫+SCR脱硝系统的影响

湿法脱硫+SCR脱硝系统是指脱硫段采用石灰石石膏法，脱硝段采用SCR技术的组合工艺。根据湿法脱硫的控制原理，为了防止脱硫系统的腐蚀，循环脱硫浆液中氯离子质量浓度一般控制低于20 g/L[20]。因此，当烧结烟气中氯化氢质量浓度增加后，脱硫废水的排放量势必会增加。由于氯碱粉尘易溶于水，随着粉尘质量浓度的增加，当粉尘进入湿法脱硫系统后，湿法脱硫循环浆液的成分将变得复杂，从而加大湿法脱硫废水的处理难度和降低石膏的品质[21]。而就该净化系统来说，二噁英的净化可通过SCR实现，但由于碱金属会降低SCR催化剂对二噁英催化反应的活性，使其需要在较高的反应温度下才能发生反应[22]，因此，该系统对于二噁英的去除能力有限。

4.2.2 对半干法脱硫+SCR脱硝系统的影响

半干法脱硫+SCR脱硝系统是指脱硫段采用氢氧化钙脱硫，脱硝段采用SCR技术的组合工艺。研究表明，针对烟气中氯化氢质量浓度特别高的焚烧尾气处理，氢氧化钙半干法对氯化氢具有一定的去除效果，但不能完全去除[23]。李传华等[24]研究表明：采用氢氧化钙去除氯化氢时，在半干法过量比为2时，效率为40%；当该比值提高到2.5时，效率能达到70%。考虑到烧结烟气中氯化氢质量浓度低于焚烧尾气，推断半干法对于烧结氯化氢的去除有一定作用，但不能做到100%去除。而如果氯化氢不能去除，其进入到SCR脱硝系统时，会在脱硝的同时发生氨气与氯化氢的反应，形成氯化铵颗粒，导致二次粉尘的生成，存在尾气粉尘不达标的风险。此外，脱除的氯化氢主

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

要与氢氧化钙形成氯化钙，而氯化钙具有较强的吸水性，会加剧半干法灰的潮湿度。与湿法脱硫 + SCR 脱硝系统脱除二噁英的缺点一致，该系统对于二噁英的去除能力有限。

4.2.3　对双级活性炭法的影响

双级活性炭法是指利用活性炭进行脱硫或脱硝，通过设置脱硫塔和脱硝塔来实现脱硫脱硝协同净化的工艺。研究表明，活性炭具有高效脱除单独氯化氢的功能。但利用活性炭进行酸性气体脱除时，烟气中的二氧化硫会与氯化氢发生竞争吸附，在竞争吸附过程中，二氧化硫会将吸附的氯化氢挤出[25]。这就使得一级活性炭脱硫塔仅能去除部分氯化氢，其余氯化氢会进入到二级脱硝塔中。在二级脱硝塔中，氯化氢与喷入的氨水发生反应，形成氯化铵颗粒，并被活性炭所拦截去除。但大量的氯被活性炭拦截去除后，其最终会进入到活性炭法烟气洗涤废水中，增加废水中的氯离子质量浓度[26]。而由于国内已有多个碳基催化法工艺有效脱除二噁英的应用案例报道[27]。因此，二噁英的增加不会对双级活性炭法造成影响。

5　结　语

（1）高氯固废（主要是烧结三、四级电场除尘灰）返烧结时，由于氯化物挥发温度较低，其会大量的进入烧结烟气，导致烧结烟气中氯碱粉尘增多、二噁英排放增大、氯化氢释放增加。

（2）高氯固废的添加，烧结矿的产、质量指标及冶金性能会发生小幅的改变，其中对冶金性能的影响趋势与添加氯化钙的现象相反，但整体影响不大。但由于氯碱粉尘的增多，会导致烧结炉箅条发生严重的糊堵及腐蚀，影响设备的正常运行。

（3）高氯固废的添加，会降低电除尘器的除尘效率以及可能引发除尘器燃烧。对于湿法脱硫 + SCR 脱硝系统，废水的排放量及污染负荷将增加，以及存在降低石膏品质和二噁英逃逸的风险；对于半干法脱硫 + SCR 脱硝系统，则脱硫的成本将增加，以及存在氯化铵逃逸，半干法灰受潮和二噁英逃逸的风险；对于双级活性炭系统，活性炭法烟气洗涤废水中氯离子质量浓度将增加。

参考文献：

[1] 周云花，王晓龙，甘敏，等. 铁矿烧结过程氯的反应行为及脱除规律[J]. 烧结球团，2022，47(4)：1－8.
ZHOU Yunhua，WANG Xiaolong，GAN Min，et al. Reaction behavior and removal rule of chlorine during iron ore sintering [J]. Sintering and Pelletizing，2022，47(4)：1－8.

[2] 胡宾生，余三友，贵永亮，等. 唐钢烧结工艺过程中氯元素平衡的研究[J]. 烧结球团，2013，38(3)：9－11；15.
HU Binsheng，YU Sanyou，GUI Yongliang，et al. Study on chlorine balance in sintering process of tangsteel[J]. Sintering and Pelletizing，2013，38(3)：9－11；15.

[3] 郭玉华，马忠民，王东锋，等. 烧结除尘灰资源化利用新进展[J]. 烧结球团，2014，39(1)：56－59.
GUO Yuhua，MA Zhongmin，WANG Dongfeng，et al. New progress in resources utilization of sintering dust[J]. Sintering and Pelletizing 2014，39(1)：56－59.

[4] 阙志刚，吴胜利，艾仙斌，等. 基于降解氯源活性的烧结过程二噁英生成抑制技术研究进展[J]. 能源研究与管理，2019(2)：18－23.
QUE Zhigang，WU Shengli，，Al Xianbin，el al. Research process on degradating activities of chlorine sources for inhibiting dioxin formation in sintering process[J]. Energy Research and Management，2019(2)：18－23.

[5] 张玉才，龙红明，春铁军，等. 原料铜和氯元素对二噁英排放的影响及抑制技术[J]. 钢铁，2015，50(12)：42－46.
ZHANG Yucai，LONG Hongming，CHUN Tiejun，et al. Influences of Cu and Cl elements from raw materials on theemission of PCDD/Fs and its emissionreduction technology [J]. Iron and Steel，2015，50(12)：42－46.

[6] 吴鹏生，张景智，周爱军. 氯对自熔性烧结矿粉化性能的影响[J]. 华东冶金学院学报，1990(4)：11－16.
WU Pengsheng，ZHANG Jingzhi，ZHOU Aijun，et al. The effect of chlorine on chalking character of self fluxing sinter [J]. Journal of East China Metallurgical Institute，1990(4)：11－16.

[7] 苍大强，魏汝飞，张玲玲，等. 钢铁工业烧结过程二噁英的产生机理与减排研究进展[J]. 钢铁，2014，49(8)：1－8.
CANG Daqiang，WEI Rufei，ZHANG Lingling，et al. Formation mechanism and emission reduction of PCDD/Fs in iron ore sintering[J]. Iron and Steel 2014，49(8)：1－8.

[8] WIKSTROM E，RYAN S，TOUATI A，et al. Importance of chlorine speciation on de novo formation of polychlorinated

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

dibenzo-pdioxins and polychlorinated dibenzofurans[J]. Environ Sci Technol,2003,37(6):1108.

[9] 岳昌盛,彭犇,王晟,等. 除尘灰水洗对烟气颗粒物组成和二噁英的影响[J]. 工程科学学报,2018,40(10):1208-1214.
YUE Changsheng,PENG Ben,WANG Sheng,et al. Impact of water washing precipitator dust on the particulate composition and dioxins in sintering flue gas[J]. Journal of Engineering Science 2018,40(10):1208-1214.

[10] 兰臣臣. 氯元素在高炉渣铁间的分配规律研究[D]. 唐山:华北理工大学,2016.
LAN chenchen. Study on distribution law of chlorine between iron and bf slag[D]. Tangshan:North China University of Science and Technology,2016.

[11] 张淑会,兰臣臣,吕庆,等. HCl气体在烧结矿表面的吸附机理及特性[J]. 工程科学学报,2016,38(5):617-622.
ZHANG Shuhui,LAN Chenchen,LU Qing,et al. Adsorption mechanism and characteristics of HCl gas on the sinter surface[J]. Chinese Journal of Engineering,2016,38(5):617-622.

[12] 范建峰. 城市垃圾焚烧飞灰添加到烧结工艺的影响[J]. 中国冶金,2020,30(10):84-86.
FAN Jianfeng. Effect on sintering process by adding fly ash from municipal solid waste incineration[J]. China Metallurgical,2020,30(10):84-86.

[13] 郑慧敏,刘清才,孟飞,等. 添加垃圾焚烧飞灰对烧结矿冶金性能的影响[J]. 环境工程学报,2015,9(8):3970-3974.
ZHENG Huimin,LIU Qingcai,MENG Fei,et al. Effect of addition of MSWI fly ash on metallurgical properties of sinter[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2015,9(8):3970-3974.

[14] 章苇玲,牛长胜,王纪元. 烧结机算条间隙堵塞原因研究分析[J]. 宝钢技术,2018(6):13-17.
ZHANG Weiling,NIU Changsheng,WANGJiyuan,et al. Research and analysis of the cause of the gap between the sintering machine[J]. Baosteel Technology,2018(6):13-17.

[15] 李强,亓玉辉,查丽萍,等. 解决烧结机算条糊堵问题的实践[J]. 烧结球团,2008,33(3):50-54.
LI Qiang,YUAN yuhui,CHA Liping,et al. About the prevention sticking of material on sintering machine grate[J]. Sintering and Pelletizing,2008,33(3):50-54.

[16] 季志云,范晓慧,王晓龙,等. 一种降低烧结过程炉算条腐蚀的方法:CN115305346A[P]. 2022-09-14.
JI Zhiyun,FAN Xiaohui,WANG Xiaolong,et al. A method to reduce the corrosion of the furnace of the sintering process[P]. CN 115305346 A. 2022-11-08.

[17] 王锦. 烧结烟气粉尘特性研究与除尘系统优化[D]. 唐山:华北理工大学,2018.
WANG Jin. Study on the characteristics of sintering flue gas dust and optimization of the dust rem oval system[D]. Tangshan:North China University of Science and Technology,2018.

[18] 段毅,包向军,徐俊超,等. 不同级数烧结电场除尘灰的理化特性分析[J]. 烧结球团,2022,47(2):96-100;109.
DUAN Yi,BAO Xiangjun,XU Junchao,et al. Analysis on physicochemical properties of sintered electric field fly ash with different stages[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(2):96-100;109.

[19] 居鹤鸣. 南京钢铁烧结厂4#、5#烧结机机头电除尘器除尘灰自燃原因分析及解决过程[J]. 冶金管理,2021(9):61-62.
JU Heming. Nanjing iron and sollebone boiling plant 4# and 5# soning machine terminal dust dust dust dust dust causes reason analysis and solutions[J]. Metallurgical Management,2021(9):61-62.

[20] 刘畅,赵虹,滕卫明,等. $n(Na^+)/n(Cl^-)$对烟气脱氯及脱硫废水零排放的影响[J]. 煤炭转化,2017,40(3):70-75.
LIU Chang,ZhAO Hong,TENG Weiming,et al. Effect of $n(Na^+)/n(Cl^-)$ on semi-dry dechlorination in coal-fired flue gas to realize lero emission of fgd waste water[J]. Coal Conversion,2017,40(3):70-75.

[21] 张昭文,靖汪建,申利芬. 氯离子浓度对湿法烟气脱硫工艺的影响[J]. 工业安全与环保,2009,35(11):28-29.
ZHANG Zhaowen,JING Wangjian,SHEN Lifen,et al. Ffect of chlorine ion concentration on wet limestone gypsum deslurfrization technology[J]. Industrial Safety and Environmental Protection,2009,35(11):28-29.

[22] 丁龙,杨涛,钱立新,等. 烧结烟气中含钾化合物对钒钨钛催化剂脱硝/二噁英性能的影响[J]. 工程科学学报,2022,44(12):2189-2199.
DING Long,YANG Tao,QIANLaxing,et al. Effect of potassium compounds in sintering flue gas on the removal of NO and dioxin performance over V_2O_5-WO_3/TiO_2 catalyst[J]. Chinese Journal of Engineering,2022,44(12):2189-2199.

[23] 傅立珩. 生活垃圾焚烧烟气污染物的控制与处理工艺[J]. 环境卫生工程,2005,13(2):55-58.
FU Lizhen. Control and treatment techniques of flue gas pollutants in MSW incineration[J]. Environmental Sanitation Engineering,2005,13(2):55-58.

[24] 李传华. 医疗废物焚烧高浓度氯化氢烟气净化工艺工程应用研究[J]. 环境卫生工程,2022,30(1):60-64.
LI Chuanhua. Engineering application study on purification

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

process of high concentration hydrogen chloride flue gas from incineration of medical waste[J]. Environmental Sanitation Engineering 2022,30(1):60 – 64.

[25] 周康. 活性炭纤维(ACF)吸附脱除废气中氯化氢(HCl)的实验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
ZHOU Kang. Experimental study on a dsorpt ion and removal of hydrogen chloride (HCl) from exhaust gases by activated carbon fiber (ACF)[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2013.

[26] 杨本涛,冯哲愚,叶恒棣,等. 钢铁工业高盐废水来源及零排放技术对比[J]. 烧结球团,2022,47(4):77 – 82.
YANG Bentao, FENG Zheyu, YE Hengdi, et al. High-salt wastewater sources in steel industry and comparison on zero-discharge technologies[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(4):77 – 82.

[27] 张乾,薛建明,吴春华,等. 碳基多孔材料脱除烟气中二噁英的研究进展[J]. 烧结球团,2021,46(5):65 – 72.
ZHANG Qian, XUE Jianming, WU Chunhua, et al. Research progress on desorption of dioxins in flue gas of carbon-based porous materials[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(5):65 – 72.

(上接第 83 页)

[11] 王少军,周朝刚,蒋朝敏,等. 基于干法除尘灰返回转炉的应用实践[J]. 中国冶金,2020,30(4):74 – 78.
WANG Shaojun, ZHOU Chaogang, JIANG Chaomin, et al. Application practice of dust returning to converter based on dry dedusting[J]. China Metallurgy,2020,30(4):74 – 78.

[12] 巨建涛,党要均. 钢铁厂含锌粉尘处理工艺的现状及发展[J]. 材料导报 A,2014,28(5):109 – 113.
JU Jiantao, DANG Yaojun. Present State and Development of Zinc-bearing Dust Treatment Process in Iron and Steel Plants[J]. Materials Reports A,2014,28(5):109 – 113.

[13] 刘超,张玉柱,王峰. 多源冶金粉尘资源化研究现状及展望[J]. 中国冶金,2022,32(10):38 – 44.
LIU Chao, ZHANG Yuzhu. Research status and prospect of multi-source metallurgical dust recycling[J]. China Metallurgy,2022,32(10):38 – 44.

[14] 高建军. 钒钛磁铁矿回转窑预热还原 – 全氧熔池熔炼基础研究[D]. 北京:钢铁研究总院,2018:32 – 33.
GAO Jianjun. Basic research for vanadium titano-magnetite extracted by rotary kiln pre-reduction and full oxygen bath smelting process[D]. Beijing:Central Iron & Steel Reasearch Institute,2018:32 – 33.

(上接第 105 页)

[11] 张强. 高炉冶炼炼铁技术工艺及应用探究[J]. 冶金管理,2021(7):9;30.
ZHANG Qiang. Study on the technology and application of Blast Furnace smelting Iron making[J]. China Steel Focus, 2021(7):9;30.

[12] 杨本涛,冯哲愚,叶恒棣,等. 钢铁工业高盐废水来源及零排放技术对比[J]. 烧结球团,2022,47(4):77 – 82.
YANG Bentao, FENG Zheyu, YE Hengdi, et al. High salt wastewater sources in steel industry and comparison on zero-discharge technologies[J]. Sintering and Pelletizing, 202, 47(4):77 – 82.

[13] CHIANG K Y,HU Y H. Water washing effects on metals emission reduction during municipal solid waste incinerator (MSWI) fly ash melting process[J]. Waste Management, 2010,30(5):831 – 838.

[14] 刘智勇. 氧化锌矿物在氨 – 铵盐 – 水体系中的浸出机理[D]. 长沙:中南大学,2012.
LIU Zhiyong. Leaching mechanism of zinc oxide ores in ammonia-ammonium aqueous solution[D]. Changsha:Central South University,2012.

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