铁矿烧结过程氯的反应行为及脱除规律

周云花[1]，王晓龙[2]，甘 敏[2]，范晓慧[2]，赵改革[1]，汤乐云[1]，何向宁[2]
(1. 湖南华菱湘潭钢铁有限公司，湖南 湘潭 411102；2. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083)

摘要：为查明 Cl 元素在烧结过程中的流向、物相转化规律和脱除特性，本文通过理论研究并结合烧结杯试验揭示 Cl 元素在烧结过程中的脱除行为及影响因素。研究结果表明：混合料中 Cl 元素主要由含铁尘泥带入，占比为 84.93%；烧结过程中，Cl 元素的脱除率高达 89.99%，焦粉配比、碱度对 Cl 元素的脱除率影响较大，Cl 脱除率随着焦粉配比提高而升高，随着碱度提高而降低；Cl 元素脱除后主要富集在除尘灰及排空颗粒物中，其中有 78.24% 的 Cl 元素进入到了机头灰中；机头灰和排空气溶胶颗粒中 Cl 元素的富集现象较为明显，且主要以金属氯化物的形式存在。

关键词：铁矿烧结； 烟气； Cl 脱除； 颗粒物
中图分类号：TF046.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)04－0001－08
doi：10.13403/j.sjqt.2022.04.047

Reaction behavior and removal rule of chlorine during iron ore sintering

ZHOU Yunhua[1], **WANG Xiaolong**[2], **GAN Min**[2], **FAN Xiaohui**[2], **ZHAO Gaige**[1], **TANG Leyun**[1], **HE Xiangning**[2]
(1. *Hunan Valin Xiangtan Iron & Steel Co., Ltd., Xiangtan* 411102, *Hunan*; *China*;
2. *School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha* 410083, *Hunan, China*)

Abstract: In order to find out the flow direction, phase transformation rule and removal characteristics of Cl element in the sintering process, the removal behavior and influencing factors of Cl element in the sintering process are revealed through theoretical research and combined with sintering cup experiments. The research results show that: The Cl element in the mixture is mainly brought in by the iron-bearing dust, accounting for 84.93%; the removal rate of Cl element is as high as 89.99%, and the coke ratio and alkalinity have a greater impact on the removal rate of Cl element, and the Cl removal rate increases with the increase of coke ratio and decreases with the increase of alkalinity. Cl elements are mainly enriched in dust removal ash and exhaust particulate matter after removal, of which 78.24% of Cl elements enter the head ash; the enrichment of Cl elements in the head ash and exhaust air sol particles is more obvious, and it is mainly in the form of metal chlorides.

Key words: iron ore sintering; flue gas; Cl removal; particulate matter

传统钢铁生产工艺中入炉料的 Cl 质量分数极低，主要来源是燃料中的氯化物，以及矿石在海运中浸入的海水，Cl 元素由于总量少，其对钢铁生产的影响较小[1]。近年来钢铁厂大量使用含铁尘泥等杂料以及为改善烧结矿低温还原粉化性能而喷洒含氯添加剂，导致入炉的 Cl 质量分数大幅增加[2]。这不仅对高炉生产造成了严重影响，由此生成的二噁英类剧毒物质还会破坏生态环境[3]。在钢铁生产中，高温下析出的 HCl 会破坏耐火材料的牢固性，缩短其寿

收稿日期：2022－04－16；**修回日期**：2022－04－30
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51974371)
作者简介：周云花(1969—)，女，高级工程师，从事烧结技术研究和配煤、配矿技术管理工作。
通信作者：甘 敏(1983—)，男，教授，从事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

命；生成的低熔点氯化物，在高炉风口低温处凝结，从而侵蚀高炉风口组合砖；金属氯化物及HCl可以劣化焦炭性能，会降低其反应后的强度；HCl气体进入高炉煤气，会腐蚀煤气管网及干法除尘设备。研究表明，Cl元素是高炉后续设备遭到腐蚀的根本原因[4]。同时，钢铁工业生产中对二噁英的污染控制也越来越受重视[5]。二噁英被认为是毒性最大的物质之一，具有高度的致畸、致癌、致突变性[6-8]。研究表明，烧结是二噁英污染物的第二大来源，烧结过程中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[9]。

分析烧结过程Cl元素平衡的相关文献发现：唐钢烧结工艺使用的进口铁矿粉中Cl的质量分数高于国内矿，碱性熔剂Cl的质量分数也比较高，配入烧结的烧结机尾除尘灰和重力灰的Cl的质量分数最高，含铁物料对烧结Cl负荷的贡献为63%，杂料和灰尘带入约18%的Cl，碱性熔剂带入约15%的Cl；烧结产物中，机头除尘灰和机尾灰中Cl质量分数较高，分别占Cl支出的21%和15%，烧结矿中Cl质量分数较低，但带走了烧结过程中60%左右的Cl[10]。在烧结过程中，白云石中的Cl可改变白云石分解的反应条件，抑制镁元素的作用，同时与钙、铁、硅、铝等元素一起形成易粉化的矿物，导致烧结矿粉化严重。Cl的脱除也多以碱金属、Pb、Ca等的氯化物为主[11]。

目前对于Cl元素在烧结过程中的流向、物相转化规律、脱除特性的研究较少。因此，本文通过对国内某钢铁企业烧结工序进行全流程取样，分析烧结原料和产物中Cl元素的质量分数及赋存状态，结合烧结杯试验，深入研究烧结过程中Cl元素的脱除行为及其在颗粒物中的富集规律。

1 原料性能与研究方法

1.1 原料性能

烧结试验所用原料包括混匀铁矿、熔剂、低氯含铁尘泥、循环水、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R(碱度)和其SiO_2、MgO质量分数分别为1.80、5.50%、2.03%。

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	K	Na	Cl	烧损
混匀矿	62.79	59.94	4.48	0.30	0.47	2.13	0.046	0.030	0.002	5.75
低氯含铁尘泥	18.88	53.83	4.80	7.29	1.38	2.08	0.340	0.141	0.148	8.50
高氯含铁尘泥	0	40.59	6.30	5.31	1.31	2.98	1.540	0.370	0.549	20.49
石灰石	0.99	0.60	0.83	53.90	1.57	0.52	0.062	0.008	0.003	42.73
白云石	8.05	0.40	0.70	34.29	18.80	0.34	0.024	0.023	0.012	45.85
生石灰	4.38	0.20	3.90	79.62	1.28	0.99	0.100	0.012	0.003	14.18
焦粉	3.62	2.32	6.20	0.90	0.20	4.34	0.172	0.138	0.058	83.20
循环水	1.36	0	0	0.01	0	0	0.011	0.013	0.022	0
混合料	100.00	47.93	4.18	8.38	2.15	1.96	0.107	0.053	0.033	12.96

由表1分析可知：各物料带入的Cl元素在混合料中的占比：低氯含铁尘泥带入的Cl最多，高达84.93%；熔剂及燃料、混匀矿、循环水带入的Cl分别为9.71%、4.44%、0.91%。

1.2 研究方法

1.2.1 Cl元素分析方法

本文采集的样品主要来源于国内某钢铁厂烧结现场，包括烧结混匀料、烧结矿、电场除尘灰(机头灰、机尾灰等)以及外排烟气颗粒物样品。混匀料、烧结矿、电除尘灰等固体样品分别采集10 kg，其经缩分后取1 kg样品供后续分析使用。

样品中Cl元素质量分数采用离子色谱法(Ion Chromatograph，IC)进行分析测定[12-13]；

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

采用 XRD 分析样品中各元素的物相。Cl 元素在烧结过程中的脱除率使用以下方法计算:

$$\eta_{脱除} = 1 - (C_{烧结矿} \times M_{烧结矿}) / (C_{混合料} \times M_{混合料}) \quad (1)$$

式中: $\eta_{脱除}$ 为某元素在烧结过程中的脱除效率,%; $C_{烧结矿}$ 为某元素在烧结矿中的质量分数,%; $C_{混合料}$ 为某元素在混合料中的质量分数,%; $M_{烧结矿}$ 为采样期间烧结矿总产量，t; $M_{混合料}$ 为采样期间混合料总量，t。

外排颗粒物采用 WY 型冲击式粉尘分级仪进行采集。对于颗粒物，使用精度为十万分之一克的电子天平称量捕集板上的采样滤膜质量，根据采样前、后的质量差计算收集到的颗粒物质量及浓度。使用扫描电镜 - 能谱(SEM-EDS) 分析颗粒物的形貌特征和化学元素组成。Cl 元素在除尘灰和颗粒物中的富集比使用以下方法计算:

$$i = \beta / \alpha \quad (2)$$

式中: i 为元素在除尘灰或颗粒物中的富集比; α 为元素在混匀料中的质量分数,%; β 为元素在除尘灰或颗粒物中的质量分数,%。

1.2.2　烧结杯试验方法

本文采用尺寸为∅180 mm × 700 mm(高度可调至 1 000 mm) 的烧结杯模拟烧结过程，料层高度为 700 mm，使用天然气进行点火、保温，点火参数: 点火温度为(1 050 ± 50) ℃，点火时间为 1.5 min; 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 10 kPa 进行烧结，达到烧结终点时将抽风负压调为 5 kPa，冷却 3 min 后进行卸料。烧结结束后，将单杯烧结矿由表层至底部均分为 5 层，每层厚度约为 140 mm，逐层分别取样，对混合料及成品烧结矿取样检测有害元素的质量分数。

2　结果与讨论

2.1　烧结过程 Cl 的平衡

依据采样期间的烧结生产物料平衡及各物料中 Cl 元素的质量分数，计算 Cl 元素的收支平衡，如表 2 所示。结合现场采样位置，绘制的现场 Cl 元素平衡如图 1 所示。由表 2、图 1 可知: 烧结过程中 10.01% 的 Cl 保留在烧结矿中; 在烧结过程中脱除的 Cl 元素主要进入到各类粉尘及颗粒物之中，机头灰中 Cl 元素质量分数最高，为 78.24%; 机尾灰中 Cl 元素质量分数为 9.97%; 排空颗粒物中的 Cl 元素质量分数较少，为 1.78%。

表 2　现场烧结过程 Cl 元素平衡(按每 t 烧结矿计)

Table 2　Chlorine element balance in sintering process(per ton sinter)

项目	种类	质量/kg	占比/%	Cl	
				质量分数/%	占比/%
收入	混合料	1 154.44	100.00	0.035	100.00
支出	烧结矿	1 000.00	86.62	0.003	10.01
	机尾灰	16.08	1.39	0.003	9.97
	机头灰	1.77	0.15	0.027	78.24
	排空颗粒物	0.02	0.00	0.001	1.78
	烧失量	136.57	11.84	—	—

注: 烧失量包括结晶水脱除、碳酸盐分解等。

2.2　烧结过程 Cl 的物相转化规律

Cl 元素在烧结各物料中的物相主要以金属氯化物、有机大分子中的 HCl 及游离的 Cl 离子状态存在，K、Na 等有害元素可溶于水的部分大多以氯化物的形态存在。由于金属氯化物在水中的溶解度大，为验证 Cl 是否以金属氯化物的形态存在于烧结物料中，本文对烧结原料中的混匀铁矿、高氯含铁尘泥及烧结产物中的机尾灰、机头灰进行水洗，具体方法: 称取各物料 500 g，置于 2 L 的去离子水中，搅拌 16 h 以保证其中可溶于水的组分充分溶解、过滤，将清液煮沸蒸发，对析出的结晶物进行 XRD 分析，结果如图 2 所示。由图 2 可知，Cl 元素在烧结物料及脱除产物中主要以金属氯化物即 KCl、NaCl、$CaCl_2$、$CuCl_2$ 等形态存在。

2.3　烧结过程 Cl 脱除的影响因素

采用烧结杯试验，在混合料水分为 7.5%、焦粉配比为 5.0%、制粒时间为 4.5 min、碱度为 1.72 的条件下，研究烧结工艺条件(混合料制粒水分、燃料配比、碱度以及高氯含铁尘泥配

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

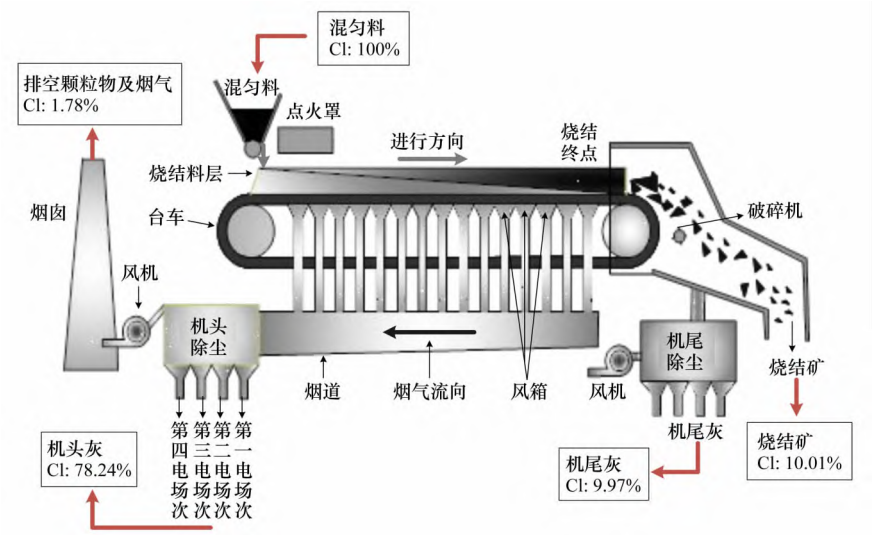
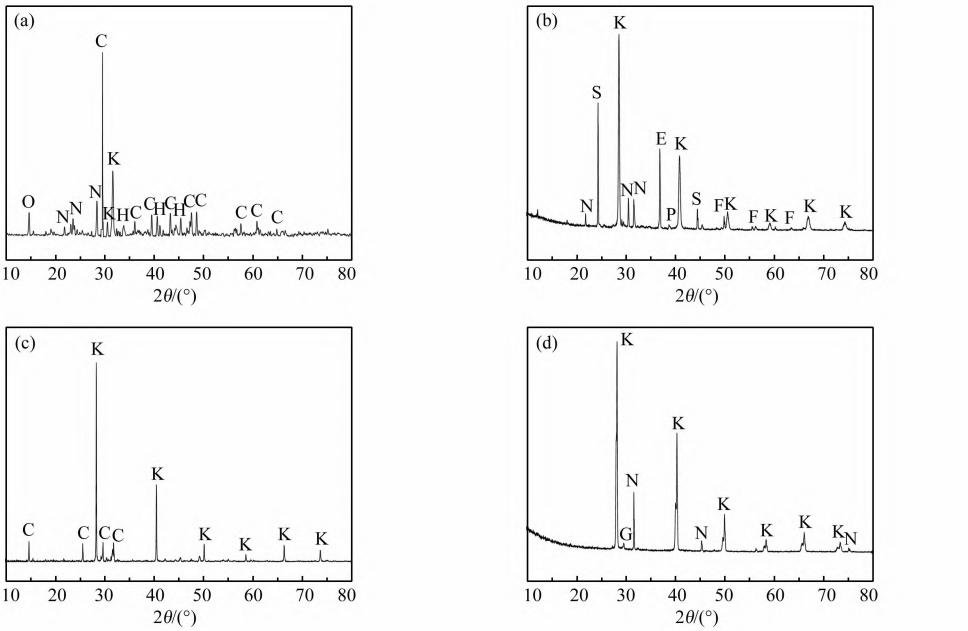


图 1 烧结现场 Cl 元素平衡

Fig. 1 Balance of chlorine element in sintering process



(a) 混匀铁矿; (b) 高氯含铁沉泥; (c) 机尾灰; (d) 机头灰

C—$CaSO_4$; H—NaCl; N—KNO_3; K—KCl; O—$Ca(OH)_2$; S—$Na_{0.1}K_{0.9}Cl$;

F—$CaCl_2$; E—K_2FeCl_5; G—$K_2Ca_5(SO_4)_6$。

图 2 各物料水洗结晶物的 XRD 分析

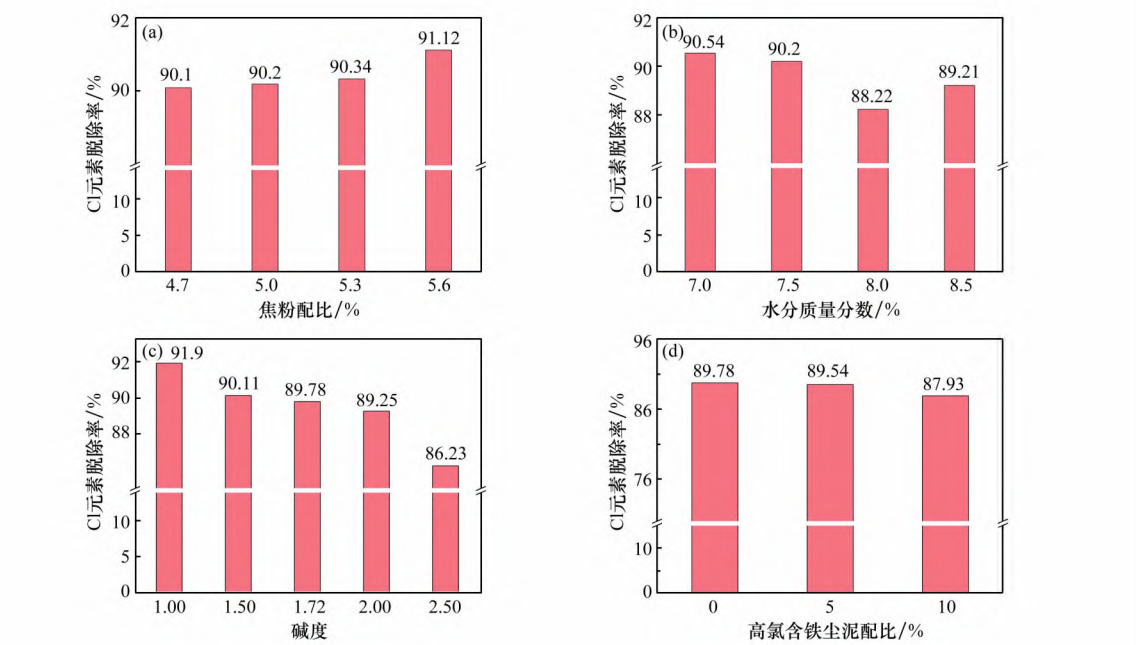
Fig. 2 XRD pattern of crystalline substance from different materials

比等因素) 对 Cl 元素脱除的影响，如图 3 所示。

由图 3 可知: 当混合料水分从 7% 提高到 8.5% 时，Cl 的脱除率随水分提高先降后升; 混合料水分为 7.5% 时料层透气性最佳，此时 Cl 的脱除率为 90.2%，总体上水分对有害元素的脱除率影响不显著。

Cl 的脱除率随着焦粉配比提高而升高，当焦粉配比为 5.6% 时，脱除率高达 91.12%，这表明增加燃料用量有利于 Cl 的脱除。根据碱金属在烧结过程的脱除规律可知，K、Na 元素在混合料中主要以氯化物、铝硅酸盐类化合物(长石、云母) 形式存在。碱金属化合物在燃烧带的高温作用下，可部分还原成 K、Na 的蒸汽，当燃料用量增加，烧结料层中还原势增强，会有

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



(a)　焦粉配比；(b)　水分质量分数；(c)　碱度；(d)　高氯含铁尘泥配比

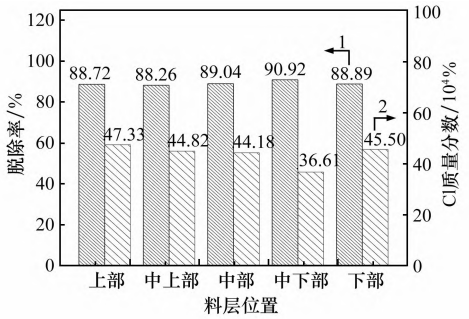
图 3　氯元素脱除率的影响因素

Fig. 3　Influence factors of the removal rate of chlorine element

更多的碱金属被还原出来，在有氯存在时，碱金属元素会与之生成沸点较低的氯化物，容易随着烟气脱除。

Cl 的脱除率随碱度的提高而降低，当碱度从 1.0 升高到 2.5 时，Cl 的脱除率从 91.90% 降到 86.23%。这是因为混合料碱度升高时，CaO 质量分数增多，烧结过程生成的 HCl、Cl_2 等会被碱性的 CaO、$Ca(OH)_2$ 吸收，使得 Cl 元素脱除率下降。配料时提高高氯含铁尘泥的配比，Cl 的脱除率无明显变化，维持在较高的水平。

为了深入研究 Cl 元素在料层中的迁移及脱除率的变化，在烧结杯试验中将烧结料层平均分为 5 层(0～140、140～280、280～420、420～560、560～680 mm)，研究 Cl 元素在不同高度料层中的质量分数和脱除率的变化，结果如图 4 所示。由图 4 可知，Cl 元素总量在烧结料层上部较高，这可能是由于烧结初始阶段料层温度低，Cl 元素的脱除并不明显所致。料层高度降低时，Cl 元素总量持续减少，在料层中下部达到最低，至烧结终点又有小幅增高。Cl 元素的脱除率在烧结料层中下部达到最大，原因可能是在料层中下部，由于蓄热作用而使得料层温度升高，促使 Cl 元素的脱除加剧，进入烟气的有害元素化合物也增多。而在烧结末期，由于高温燃烧带中生成的氯化物随气流向烧结料层下部迁移的过程中会被湿料层捕获、吸附，累积于料层的下部，所以脱除率下降。总体而言，Cl 在整个烧结料层中的脱除率变化不大。



1—脱除率；2—Cl 质量分数。

图 4　Cl 元素在不同料层中的质量分数及脱除率

Fig. 4　Mass fraction and removal rate of chlorine element at different bed height in sinter

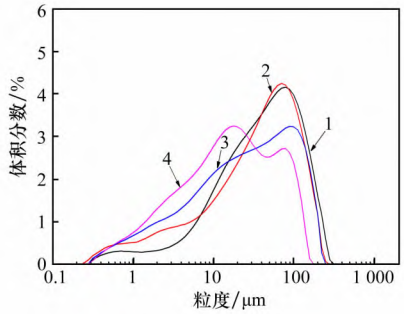
2.4　Cl 在脱除产物中的形态

2.4.1　Cl 在脱除产物中的富集特征

烧结过程中 Cl 元素被脱除之后，大多富集在除尘灰及排空颗粒物中。本文选择烧结机头除尘灰及其后面的气溶胶颗粒为研究对象，测

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

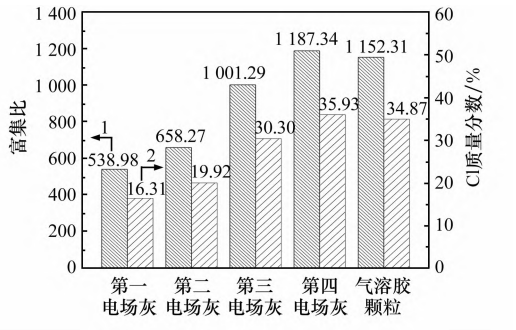
定各颗粒物的粒度组成、Cl 元素质量分数及赋存状态。各电场灰的粒度分布如图 5 所示。由图 5 可知：从 1#电场到 4#电场，其粒度逐渐减小，气溶胶颗粒粒径小于 10 μm。根据 Cl 元素在混合料及不同电场除尘灰、气溶胶颗粒中的质量分数，计算其在不同颗粒物中的富集比，机头各电场灰和气溶胶颗粒中 Cl 元素的质量分数及富集比如图 6 所示。由图 6 可知，从 1#电场到 4#电场，Cl 元素的质量分数逐渐增高，且随着粒度减小富集越明显。气溶胶颗粒的 Cl 元素质量分数水平稍低于第四电场灰，为 34.78%。Cl 在第四电场灰和气溶胶颗粒中的富集比分别为 1 187.34、1 152.31，富集程度极高。



1—第一电场灰；2—第二电场灰；
3—第三电场灰；4—第四电场灰。

图 5 机头电场灰的粒度分布

Fig. 5 Particle size distribution of head ESP dusts



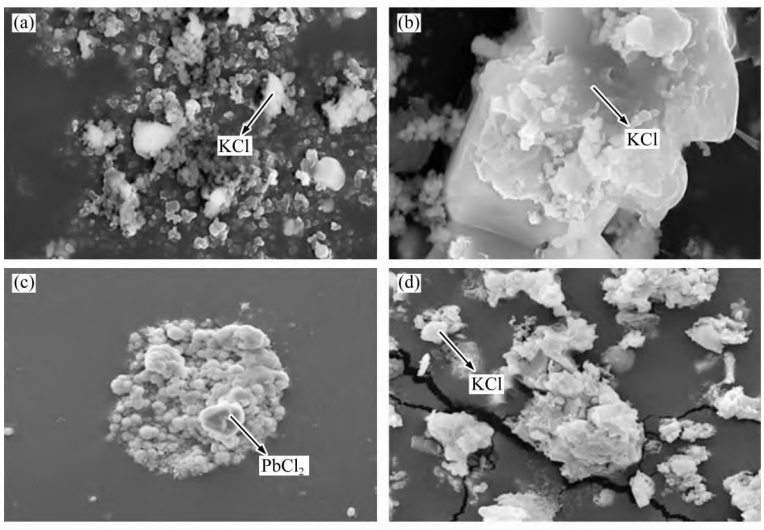
1—富集比；2—Cl 质量分数。

图 6 不同颗粒物中 Cl 元素的质量分数及富集比

Fig. 6 Enrichment ratio and mass fraction of chlorine element in different particles

2.4.2 Cl 在脱除产物中的赋存状态

对第四电场灰及排空颗粒物进行 SEM-EDS 分析，如图 7 所示。由图 7 可知，第四电场灰中的颗粒物形貌多样，多为团簇状，表面粗糙不平，黏附物较多，粒度不均匀，主要包含由 KCl 组成的块状颗粒物；气溶胶颗粒形状规则，表面光滑，主要为 KCl 组成的块状颗粒，以及少量由 $PbCl_2$ 组成的多面体颗粒。说明 Cl 元素主要与碱重金属结合形成氯化物，粒径均较小。结合已有的颗粒物产生机理[14-17]，这类颗粒物的形成主要是烧结原料的汽化－凝结所致，在燃烧后期 K、Cl 等元素大量脱除，较多 K、Cl 蒸汽进入烟气，在冷却过程中达到饱和而经由均相冷凝形成 KCl 颗粒。



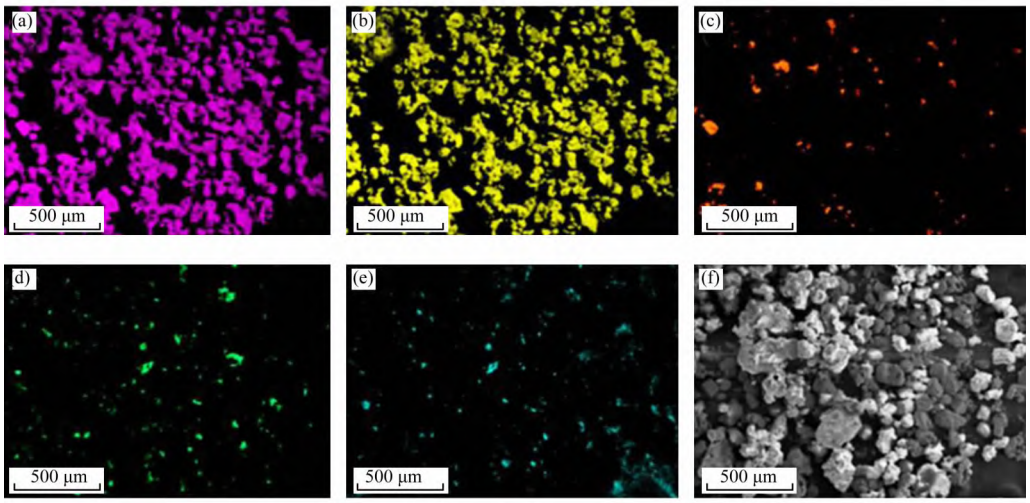
(a)、(b) 第四电场灰；(c)、(d) 气溶胶颗粒

图 7 不同颗粒物的 SEM-EDS 分析

Fig. 7 SEM-EDS image of different particles

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

对典型颗粒物进行面扫描分析，如图 8 所示。由图 8 可知，K 与 Cl 在规则方块状颗粒中的分布呈现很好的重叠性，说明 Cl 主要以金属氯化物的形式存在；Ca 主要与 O 的分布有良好的重叠性。



(a) Cl 元素分布；(b) K 元素分布；(c) Na 元素分布；(d) Ca 元素分布；(e) O 元素分布；(f) 颗粒物的 SEM 图

图 8　颗粒物面扫描分析

Fig. 8　SEM-EDS mapping of particles

3　结　论

(1) 混合料中的 Cl 元素主要由低氯含铁尘泥带入，占比为 84.93%。烧结过程中 10.01% 的 Cl 元素保留在烧结矿中。在烧结过程中脱除的 Cl 元素主要进入到各类粉尘及颗粒物之中，机头灰中 Cl 元素质量分数最高，为 78.24%；机尾灰和排空颗粒物中的 Cl 元素质量分数较少，分别为 9.97%、1.78%。

(2) Cl 元素在烧结原料中主要以金属氯化物(KCl、NaCl、$CaCl_2$、$CuCl_2$) 等形态存在，在脱除产物中主要以金属氯化物(KCl、NaCl) 等形态存在。

(3) 焦粉配比、碱度对 Cl 元素的脱除率影响较大，Cl 元素的脱除率随着焦粉配比提高而升高，随着碱度提高而降低。高氯含铁尘泥的配比对 Cl 的脱除率影响较小，总体维持在较高的水平。Cl 元素的脱除率在烧结料层中下部达到最大，为 90.92%。

(4) 除尘灰和排空气溶胶颗粒中 Cl 元素的富集现象较为明显，富集程度随着颗粒物粒度减小而升高。Cl 元素在第四电场灰和气溶胶颗粒中的富集比分别为 1 187.34、1 152.31，且主要以金属氯化物的形式存在。

参考文献:

[1] 程正霖，朱晓华，李鹏飞. 高炉生产过程中氯的来源、迁移转化及影响[J]. 环境工程，2021，39(4)：86－91.
CHENG Zhenglin，ZHU Xiaohua，LI Pengfei. The source，migration，transformation and influence of chlorine in blast furnace production[J]. Environmental Engineering，2021，39(4)：86－91.

[2] 杨艳艳，谢丹平，付建平，等. 钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子[J/OL]. 环境科学，2022：1－11[2022－02－08]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=HJKZ2022011900H&uniplatform=NZKPT&v=MFtDs09HUdA7tI7YhCNIlUy2hAXcJrfDHlZqfToFYFcJdCmu5DenJvR7r2UVaz85.
YANG Yanyan，XIE Danping，FU Jianping，et al. Pollution characteristics and emission factors of PCDD/Fs from iron and steel industry[J/OL]. Environmental Science，2022：1－11[2022－02－08]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=HJKZ2022011900H&uniplatform=NZKPT&v=MFtDs09HUdA7tI7YhCNIlUy2hAXcJrfDHlZqfToFYFcJdCmu5DenJvR7r2UVaz85.

[3] 田梦，曹彦涛，宋进轩. 烧结及炼钢生产过程二噁英类污染物控制技术及排放现状[J]. 宽厚板，2020，26(4)：31－33.

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

TIAN Meng, CAO Yantao, SONG Jinxuan. Control technology and emission status of dioxin-like pollutants in sintering and steelmaking[J]. Wide and Heavy Plate, 2020, 26 (4): 31 – 33.

[4] 邓彬,鄢晓忠,彭博,等. 高炉煤气管道腐蚀原因分析及防腐措施[J]. 冶金动力,2018(9):13 – 16;21.
DENG Bin, LUO Xiaozhong, PENG Bo, et al. Analysis of corrosion in blast furnace gas pipes and anticorrosion measures [J]. Metallurgical Power, 2018(9): 13 – 16; 21.

[5] BUEKENS A, STIEGLITZ L, HELL K, et al. Dioxins from thermal and metallurgical processes: recent studies for the iron and steel industry[J]. Chemosphere, 2001, 42(5 – 7): 729 – 735.

[6] 贾建廷. 钢铁生产二噁英减排技术探讨[J]. 山西化工,2018,38(2):179 – 181.
JIA Jianting. Discussion on dioxin reduction technology in iron and steel production [J]. Shanxi Chemical Industry, 2018, 38(2): 179 – 181.

[7] WANG T, ANDERSON D R, THOMPSON D, et al. Studies into the formation of dioxins in the sintering process used in the iron and steel industry [J]. Chemosphere, 2003, 51(7): 585 – 594.

[8] 刘晶晶,刘怡,李建萍,等. 铁矿石烧结工序二噁英减排技术分析[C]//中国环境科学学会2021年科学技术年会:环境工程技术创新与应用分会场论文集(四). 天津:中国环境科学学会环境工程分会,2021:451 – 454.
LIU Jingjing, LIU Yi, LI Jianping, et al. Analysis of dioxin reduction technologiesin iron ore sintering process[C]//Annual meeting of Science and Technology of Chinese Environmental Science Society in 2021: Proceedings of Environmental Engineering Technology Innovation and Application Sub-Conference(4). Tianjin: Environmental Engineering Branch of Chinese Environmental Science Society, 2021: 451 – 454.

[9] 徐帅玺. 典型钢铁生产过程二噁英生成机理及抑制研究[D]. 杭州:浙江大学,2018.
XU Shuaixi. Study on mechanism of PCDD/Fs formation and inhibition during steel manufacture process [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.

[10] 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.

[11] 郭占成,彭翠,张福利,等. 利用钢铁企业烧结电除尘灰生产氯化钾的方法:101234766A[P]. 2008 – 08 – 06.
GUO Zhancheng, PENG Cui, ZHANG Fuli, et al. The method of producing potassium chloride from sintering electrostatic precipitator ash in iron and steel enterprises: 101234766A [P]. 2008 – 08 – 06.

[12] MULIK J, PUCKETT R, WILLIAMS D, et al. Ion chromatographic analysis of sulfate and nitrate in ambient aerosols[J]. Analytical Letters, 1976, 9(7): 653 – 663.

[13] WEISS J. Handbook of Ion Chromatography [M]. Sunnyvale, CA: Dionex Corp., 1986: 115 – 150.

[14] SAITO M, SATO M, MURATA H, et al. Combustion behaviour of pulverized coal particles in a high temperature and high oxygen concentration atmosphere[J]. Fuel, 1991, 70(6): 709 – 712.

[15] DACOMBE P J, HAMPARTSOUMIAN E, POURKASHANIAN M. Fragmentation of large coal particles in a drop-tube furnace [J]. Fuel, 1994, 73(8): 1365 – 1367.

[16] ALONSO M J G, BORREGO A G, ALVAREZ D, et al. Pyrolysis behaviour of pulverized coals at different temperatures[J]. Fuel, 1999, 78(13): 1501 – 1513.

[17] WALL T, LIU Y, ELLIOTT L, et al. An overview on oxyfuel coal combustion-state of the art research and technology development[J]. Chemical Engineering Research & Design: Transactions of the Inst, 2009, 87: 1003 – 1016.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵,不再另行支付),对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明,如有异议请来稿说明,本刊将作适当处理。

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