不锈钢酸洗污泥对烧结性能及烟气成分的影响

刘文文[1,2]，齐渊洪[1]，李昊堃[2]
（1. 钢铁研究总院 先进钢铁流程及材料国家重点实验室，北京 100081；
2. 山西太钢不锈钢股份有限公司 技术中心，山西 太原 030003）

摘要：为探明不锈钢酸洗污泥对烧结性能及烟气成分的影响，本文在酸洗污泥基础性能分析前提下，首先开展配用酸洗污泥的烧结杯试验，掌握其烧结性能变化趋势，并对烧结矿的转鼓强度、矿相以及烟气成分进行了分析。研究表明，随着酸洗污泥配用量的增加，烧结利用系数和成品率呈下降趋势。当配用污泥质量分数为 5% 时，烧结矿强度降低 4.01%，烟气成分 SO_2 质量浓度升高 5.79 倍。酸洗污泥中 CaF_2 与 CaO、SiO_2 形成枪晶石，对烧结强度有较大影响，而 $CaSO_4$ 在烧结过程的弱氧化气氛下分解逸出大量 SO_2。在试验基础上开展配用酸洗污泥的工业试验，结果显示烧结混匀料中酸洗污泥配比的质量分数不宜超过 1%。

关键词：不锈钢酸洗污泥；烧结配料；烧结性能；转鼓强度；烟气成分；SO_2
中图分类号：TF046.4；X703 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)04－0121－09
doi：10.13403/j.sjqt.2024.04.067

Effect of stainless steel pickling sludge on sintering performance and flue gas component

LIU Wenwen[1,2], QI Yuanhong[1], LI Haokun[2]
(1. State Key Laboratory of Advanced Steel Processing and Products, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China; 2. Technology Center, Taiyuan Iron and Steel Group Co., Ltd., Taiyuan 030003, Shanxi, China)

Abstract: In order to reveal the effect of stainless steel pickling sludge on sintering performance and flue gas composition, under the premise of basic performance analysis of pickling sludge, the sintering cup test with pickling sludge was first carried out to grasp the change trend of junction performance, and drum strength, mineral phase and flue gas composition of sinter were analyzed. The results show that the dosage of pickling sludge increases, and the sintering utilization coefficient and yield show a downward trend. When the sludge content was 5%, the sinter strength decreased by 4.01%, and the SO_2 content of flue gas component increased by 5.79 times. CaF_2, CaO and SiO_2 form cuspidine, which has a great influence on the sintering strength, while $CaSO_4$ decomposes and escapes a large amount of SO_2 under the weak oxidation atmosphere of the sintering process. On this basis, the industrial test of using pickling sludge was carried out, and the results showed that the proportion of pickling sludge in the sintered mixture should not exceed 1%.

Key words: stainless steel pickling sludge; sinter proportioning; sintering performance; drum strength; flue gas composition; SO_2

不锈钢酸洗污泥属于典型固体危废品，若处置不当可能造成环境和生态的严重破坏[1-2]。目前，处理不锈钢酸洗污泥途径为无害化处理、固化稳定化和资源化[3]。其中，资源化是指通过一定的途径和方法回收利用固体废弃物中的有用物质和资源，主要在水泥生产[4]、制砖、烧制建筑

收稿日期：2023－04－21；**修回日期**：2023－06－26
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2019YFC1905702)
作者简介：刘文文(1983—)，男，高级工程师，从事烧结与炼铁工艺研究。

陶粒、制备微晶玻璃等方向开展许多的研究工作。冯琦等[5]提出不锈钢尘泥的资源化利用以直接返生产工序循环利用为重点研究和发展方向。那贤昭等[6]阐述了铬渣在钢铁冶金过程中综合利用的途径。杨聪聪等[7]认为低硫污泥可应用在制球/烧结-高炉工艺、转炉或电炉工序中。石磊等[8]研究球团配用不锈钢冷轧污泥后，其抗压强度及冶金性能仍满足高炉要求。张垒等[9]从铬平衡和工业水污染的角度研究，发现烧结工序中少量配加铬泥对烧结和炼铁的产品以及环保无显著影响。张燕云等[10]将铬渣配用至烧结生产中，取得较好的经济效益。李小明等[11-13]在酸洗污泥对烧结黏结相强度以及液相温度的影响研究中得到，随着酸洗污泥配加比例的增加，黏结相强度呈先增加后减小，且随着碱度的增加整体减小的规律；当不锈钢酸洗污泥配加比例小于10%时，可改善铁矿粉液相生成特征温度；同时分析了酸洗污泥热分解机理及其动力学特性和模型。上述研究结果表明了酸洗污泥作为烧结配料资源化利用的可行性。但是，对于铁矿粉配加酸洗污泥对烧结性能、烧结矿质量以及硫化物二次污染的影响有待进一步验证。因此，本文重点在酸洗污泥性能研究的基础上，开展铁矿粉配用酸洗污泥的烧结杯试验，研究酸洗污泥对烧结性能的影响规律，应用烟气分析仪探寻配用酸洗污泥过程中烟气成分的变化规律，并开展配用酸洗污泥的工业试验，以期为工业生产提供合理的酸洗污泥用量。

1 不锈钢酸洗污泥基础性能分析

1.1 化学成分

试验用3种不同产线的酸洗污泥主要化学成分如表1所示。由表1可知，Fe、Cr、Ni等金属质量分数可达20%以上，S、F、Cl等元素质量分数占比也较高，其中，S元素普遍存在酸洗污泥中。

1.2 微观形貌

通过场发射扫描电子显微镜(SEM)对1#~3#不锈钢酸洗污泥样品的微观形貌进行检测和分析。

由图1可以看出，污泥在图a、b、d、e中主要呈显微针状，在图c、f、g、h、i中呈块状，并伴有少量细小颗粒附着在表面。

1.3 矿相组成

在物相组成分析中，选取典型1#酸洗污泥试样开展分析。取1#试样500 g，在120 ℃条件下恒温2 h，将烘干后的试样一分为二。一份试样放置于马弗炉中升温加热至1 230 ℃，并保温30 min

表1 酸洗污泥主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical compositions analysis of pickling sludge %

试样	TFe	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	Cr	Ni	S	Cl	F
1#	23.19	1.61	29.03	0.67	0.72	2.25	0.50	5.27	0.31	8.28
2#	18.20	1.70	33.26	0.57	0.61	2.65	0.59	4.78	0.5	8.31
3#	17.24	1.85	35.77	0.65	0.64	2.43	0.63	5.25	0.16	—

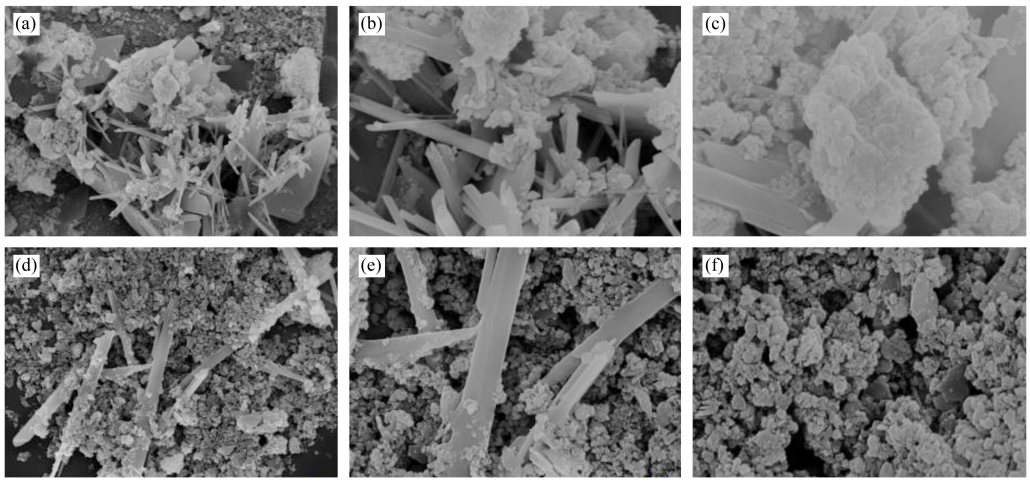
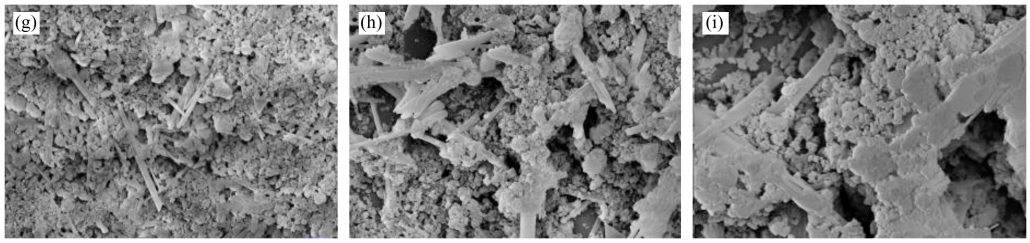


图 1（续）



（a）、（b）、（c）1#；（d）、（e）、（f）2#；（g）、（h）、（i）3#

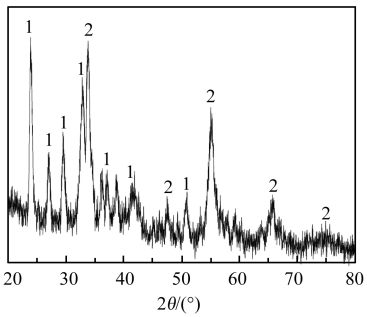
图 1　1# ~3#不锈钢酸洗污泥样品的 SEM 图谱

Fig. 1　SEM pattern of 1 # ~3 # pickling sludge samples

冷却后取出。对上述两份试样进行 XRD 分析，其结果分别见图 2 和图 3。由图 2 可知，在恒温 120 ℃条件时，试样 XRD 主要物相为 $CaSO_4$、CaF_2。实际上，污泥中的其他元素以非晶态的氢氧化物的形式存在，其结晶度不足导致衍射峰不明显，无法通过 XRD 表征。从图 3 中可知，试样 XRD 主要物相为 CaF_2、Fe_2O_3和 $CaSO_4$。其主要是因为 Cr 和 Ni 氧化物量少且过于细小，结晶度较低，无法被检测。

1.4　熔化性能分析

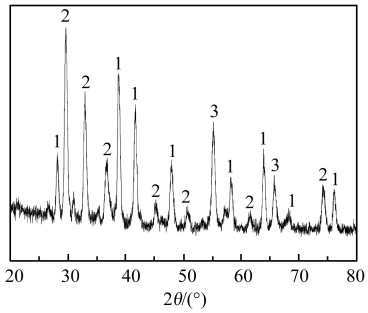
将充分干燥后粒度 < 75 μm 的酸洗污泥压制成标准样，基于半球点法，利用全自动炉渣熔点



1—$CaSO_4$；2—CaF_2。

图 2　酸洗污泥在 120 ℃条件下保温 2 h 所得样品的 XRD 图谱

Fig. 2　XRD pattern of the sample obtained by holding the pickling sludge at 120 ℃ for 2 h



1—Fe_2O_3；2—$CaSO_4$；3—CaF_2。

图 3　酸洗污泥在 1 230 ℃条件下保温 30 min 所得样品的 XRD 图谱

Fig. 3　XRD pattern of the sample obtained by holding the pickling sludge at 1 230 ℃ for 30 min

熔速测定仪测定其熔化性能，结果见图 4。

由图 4 可知：酸洗污泥变形温度约为 1 242 ℃，软化温度约为 1 281 ℃，半球温度约为 1 291 ℃，流动温度约为 1 300 ℃。酸洗污泥的流动温度低于 1 350 ℃，而烧结混料中铁矿粉的流动温度一般大于 1 500 ℃，有助于改善铁矿粉烧结的液相生成温度。

1.5　酸洗污泥的差热分析

酸洗污泥热解的 TG 和 DSC 曲线如图 5 所示。由图 5 可知，在 1 000 ~ 1 380 ℃温度范围内，酸洗污泥的失重率约为 28%，在此温度区间酸洗污泥中氢氧化物将发生热分解以及金属氧化物在高温条件下发生尖晶相的转变反应。

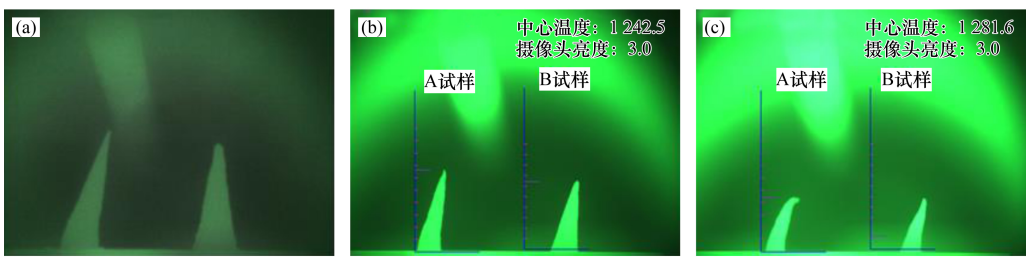
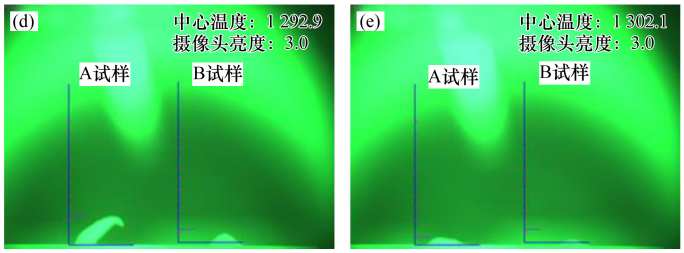


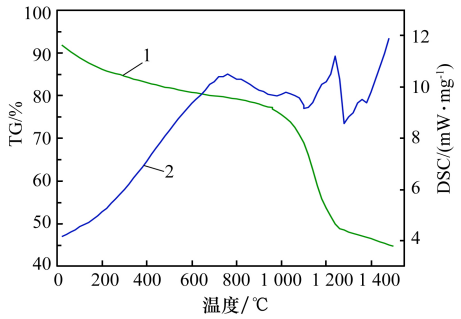
图 4（续）



（a）原型图片；（b）变形图片（DT）；（c）软化图片（ST）；（d）半球图片（HT）；（e）流动图片（FT）

图 4 酸洗污泥熔融性能

Fig. 4 Melting performance results of pickling sludge



1—TG；2—DSC。

图 5 酸洗污泥热解的 TG 和 DSC 曲线

Fig. 5 TG and DSC curves of pickling sludge pyrolysis

2 试验原料及方法

为研究不同酸洗污泥对烧结性能和废气成分的影响，本文结合烧结矿品位和质量等因素，选择烧结混匀矿中酸洗污泥比例控制在 5% 以下开展试验研究。

2.1 原料准备

试验原料主要包括铁矿粉 1# ~ 3#、烘干后酸洗污泥、高炉返矿、综合粉、白云石、白灰以及煤粉，各原料主要成分见表 2。

2.2 烧结配矿方案

试验配矿方案中分别采用 0、0.5%、1.0%、2.0%、5.0% 的酸泥量，碱度控制为 2.08，混匀矿配料如表 3 所示。

2.3 试验方法

本试验使用的设备主要包括烧结杯、混料机、破碎机、筛分机、ISO 转鼓机、还原炉等。烧结杯试验流程见图 6。

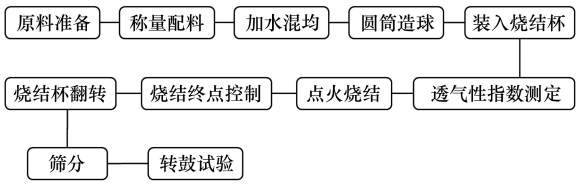


图 6 烧结杯试验流程

Fig. 6 Test process of sintering cup

还原度检测中使用破碎机及套筛将烧结矿破碎，得到 10 ~ 12.5 mm 试样，在烘干箱（105 ± 10）℃条件下将试样烘干 2 h，称取 500 g 试样，将试验炉炉温升到900 ℃，总气体流量为15 L/min

表 2 原料主要化学成分（质量分数）

Table 2 Main chemical compositions of raw materials %

原料名称	TFe	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	Cr	Ni	S	Cl	F
酸洗污泥	23.19	1.61	29.03	0.67	0.72	2.25	0.5	5.27	0.31	8.28
矿粉 1#	67.11	6.06	0.10	0.40	0.75	—	—	0.015	—	—
矿粉 2#	64.83	4.47	0.19	1.22	1.12	—	—	0.033	—	—
矿粉 3#	56.65	6.21	0.10	1.98	0.74	—	—	0.018	—	—
高炉返矿	57.63	5.4	11.10	0.65	1.50	—	—	0.023	—	—
综合粉	45.20	8.28	20.15	2.81	6.13	1.26	0.3	0.050	—	—
白云石	—	3.10	30.15	0.50	37.23	—	—	–	—	—
白灰	—	3.20	80.30	0.90	2.40	—	—	–	—	—
煤粉	—	6.51	0.25	2.31	–	—	—	0.420	—	—

（气体成分 CO：N_2 为 3∶7）。

对于烧结杯废气成分监测试验，采用在除尘器前端入口管道处安装烟气分析仪的方式监测烟气成分变化情况，具体位置见图 7。

表 3　烧结混匀料配矿方案（质量分数）

Table 3　Blending scheme of sintered mixture　%

试验编号	矿粉 1#	矿粉 2#	矿粉 3#	综合粉	酸洗污泥
1#（基准）	40.17	39.66	14.45	5.71	0.0
2#	40.03	39.37	14.41	5.70	0.5
3#	39.77	39.21	14.33	5.69	1.0
4#	39.15	38.99	14.21	5.65	2.0
5#	37.81	37.58	14.01	5.60	5.0

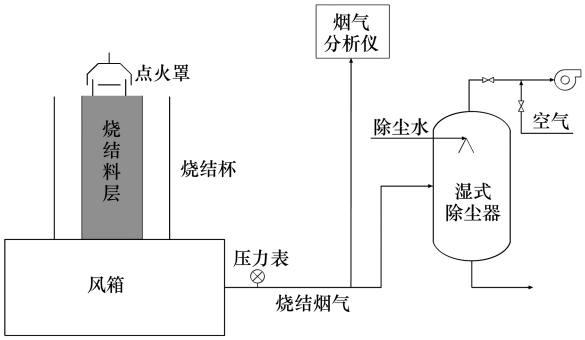


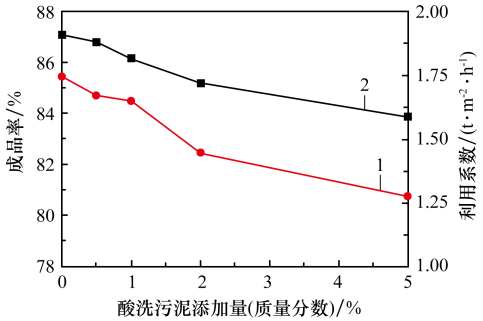
图 7　烟气仪安装位置

Fig. 7　Installation position of flue gas meter

3　试验结果及分析

3.1　烧结性能结果

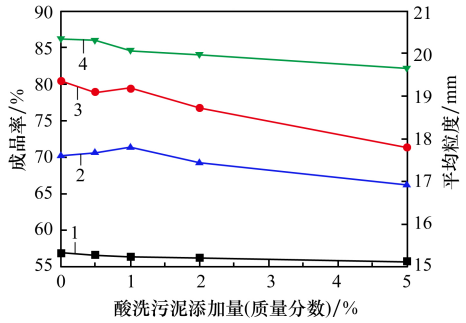
烧结杯试验结果分别见图 8 和图 9 所示。由图 8 可以看出，当酸洗污泥添加质量分数 < 1% 时，利用系数和成品率变化不显著。当酸洗污泥添加质量分数达到 5% 时，与基准（酸洗污泥为 0）



1—成品率；2—利用系数。

图 8　烧结利用系数及成品率变化

Fig. 8　Changes in sintering utilization coefficient and yield



1—TFe；2—转鼓强度；3—平均粒度；4—还原度。

图 9　烧结矿成分及性能变化

Fig. 9　Changes in sinter composition and properties

对比，利用系数和成品率分别降低了 0.32% 和 4.67%，下降幅度比较明显。

由图 9 可以看出，随着酸洗污泥含量的增加，烧结矿品位和还原度呈下降趋势。当酸洗污泥添加质量分数 < 1% 时，转鼓强度和平均粒度无较大差别，略有改善趋势，但当酸洗污泥添加质量分数达到 5% 时，与基准对比，转鼓强度降低 4.01%，平均粒度降低 1.55 mm。

3.2　烧结性能分析

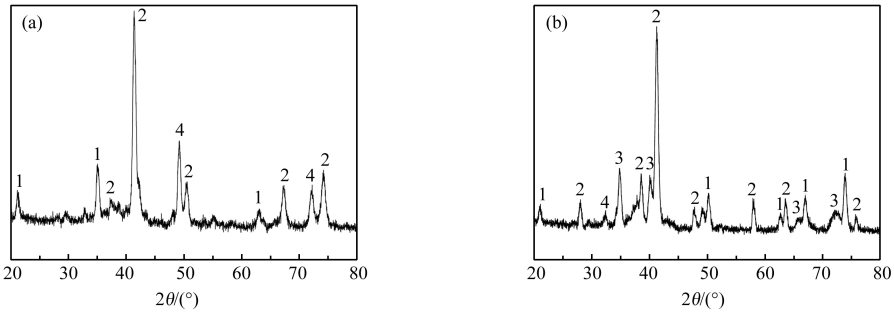
为了探明酸洗污泥对烧结性能的影响，对烧结矿进行化学成分分析，结果如表 4 所示。由表 4 可知，酸洗污泥中含有 S、F、Cr、Ni 等元素，烧结矿中 Cr、Ni 含量也随着酸洗污泥比例的增加而升高。当酸洗污泥添加质量分数为 5% 时，烧结矿 F 质量分数达到 0.47%。为此对酸洗污泥添加质量分数为 0 和 5% 的烧结矿试样进行 XRD 分析，其分析结果见图 10。

表 4　烧结矿主要化学组成（质量分数）

Table 4　Main Chemical compositions of sinter　%

试样	TFe	S	Cr	Ni	F
1#	56.92	0.015	—	—	—
2#	56.65	0.016	0.03	0.02	0.16
3#	56.43	0.023	0.07	0.04	0.29
4#	56.12	0.027	0.09	0.04	0.33
5#	55.70	0.032	0.12	0.05	0.47

由图 10 可知，配用酸洗污泥的烧结矿中含有枪晶石（$3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot CaF_2$），酸洗污泥中的氟以 CaF_2 形式存在。由于 $3CaO + 2SiO_2 + CaF_2 \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot CaF_2$ 开始反应温度为 900 ~ 950 ℃。因此，在烧结过程中易与 CaO、SiO_2 发生反应生成枪晶



1—Fe_3O_4—$CaO·Fe_2O_3$；2—Fe_2O_3；3—$3CaO·2SiO_2·CaF_2$；4—FeO。

（a）酸洗污泥 0%；（b）酸洗污泥 5%

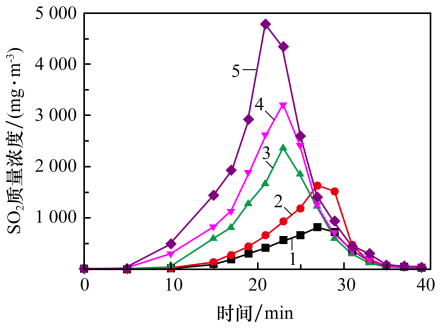
图 10 两种酸洗污泥烧结矿 XRD 图谱

Fig. 10 XRD patterns of two types of acid washed sludge sintered ore

石。随着 CaF_2 含量的增加，CaO 和 SiO_2 消耗也随之增多，SFCA 的生成量减少，液相生成量减少，液相流动性指数降低。同时，降低烧结矿胶结相黏度，易形成薄壁大孔结构，此外，枪晶石的抗压强度远低于 SFCA[14-16]，也对烧结矿强度有一定影响。

3.3 烟气成分分析

酸洗污泥中 $CaSO_4$ 质量分数比较高，通常情况下 $CaSO_4$ 分解需要在 1 650 ℃以上，但烧结过程中局部存在还原性气氛，$CaSO_4$ 分解温度可降低至 1 000 ℃以下[17]。烧结烟气中 SO_2 质量浓度的变化将直接影响烧结机超低排放状况。烧结杯烟气成分中 SO_2 质量浓度变化见图 11 所示。



酸洗污泥添加量/%：1—0；2—0.5；3—1.0；4—2.0；5—5.0。

图 11 烧结过程烟气成分中 SO_2 质量浓度变化

Fig. 11 Change of SO_2 mass concentration in flue gas composition during sintering

由图 11 可知，随着酸洗污泥配比的增加，烟气中 SO_2 质量浓度呈升高趋势。当污泥配比为 5% 时，SO_2 质量浓度峰值为 4 781 mg/m³，与基准对比，SO_2 质量浓度峰值增加了 5.79 倍。此外，SO_2 含量达到峰值的时间变短，对烧结机脱硫设备的冲击较大。烧结过程中，还原剂、Al_2O_3、Fe_2O_3、SiO_2 是普遍存在的，局部区域发生硫酸钙分解反应，烧结烟气 SO_2 质量浓度有一定升高。

4 工业试验

在某烧结作业区开展配加酸泥的工业性试验，试验分二个阶段进行。试验Ⅰ期：酸洗污泥配加量为 20 t/d(混匀矿中的质量分数为 0.2%)；试验Ⅱ期：酸洗污泥配加量为 50 t/d(混匀矿中的质量分数为 0.5%)。

4.1 烧结过程中工艺参数变化

烧结过程工艺参数见表 5。从表 5 可以看出，基准期与试验Ⅰ比较，在原料条件相同的情况下，烧结料层的透气性有所改善，烧结负压有所降低。试验Ⅱ，随着酸洗污泥消耗量的增加，低熔点液相量增多，烧结料层的透气性降低，烧结负压回升。

4.2 烧结矿质量变化

烧结矿关键质量指标见表 6。由表 6 可知，在原料条件相同时，基准期与试验Ⅰ相比，当酸洗污泥由 0 增加到 20 t/d，烧结矿品位降低 0.06%，烧结矿硫质量分数增加 0.002%，平均粒径降低 0.12 个百分点。试验Ⅰ与试验Ⅱ相比，酸洗污泥由 20 t/d 增加到 50 t/d，烧结矿品位降低 0.11%，烧结矿硫质量分数增加 0.003%，平均粒径降低 0.85 个百分点。平均粒径和转鼓强度变化规律与烧结杯试验规律相吻合。

表 5　烧结过程工艺参数

Table 5　Process parameters of sintering process

项目	料层厚度/mm	机速/(m·min^{-1})	点火温度/℃	烧结终点温度/℃	废气温度/℃		主抽压力/kPa		主抽转速/(r·min^{-1})	
					1#	2#	1#	2#	1#	2#
基准	728	2.23	1 134	374	125	129	12.2	13.5	884	881
试验Ⅰ	728	2.25	1 133	373	127	131	11.7	13.1	867	863
试验Ⅱ	733	2.21	1 126	353	121	124	12.1	13.2	870	869

表 6　烧结矿关键质量指标变化

Table 6　Changes in key quality indicators of sinter

项目	R^2	w(TFe)/%	w(SiO_2)/%	w(FeO)/%	w(S)/%	5～10 mm/%	<5 mm/%	平均粒度/mm	转鼓强度
基准	2.06	57.40	5.21	9.94	0.021	16.51	3.89	22.92	77.89
试验Ⅰ	2.05	57.34	5.21	9.49	0.023	16.04	3.83	22.84	77.58
试验Ⅱ	2.05	57.23	5.27	9.55	0.026	16.82	3.89	21.99	78.68

4.3　烧结工序烟气 SO_2 质量浓度变化

烟气中 SO_2 质量浓度见表 7。由表 7 可知，配加酸洗污泥后，由于酸洗污泥中硫质量分数较高，造成烧结烟气中 SO_2 质量浓度明显增大。基准期与试验Ⅰ相比，日配加20 t酸洗污泥，烟气入口 SO_2 质量浓度由 502 mg/m^3 增加到572 mg/m^3，增加了 70 mg/m^3，增幅为 13.9%。烟气出口 SO_2 质量浓度由 6.5 mg/m^3 增加到 17.7 mg/m^3，增加了 11.2 mg/m^3，增幅为 172%。日配加 50 t 时，烟气入口 SO_2 质量浓度增加到638 mg/m^3，最高值达到 866 mg/m^3，超设计值 815 mg/m^3 要求，烟气出口 SO_2 质量浓度增加到33.2 mg/m^3，最高排放 SO_2 质量浓度达到 60 mg/m^3。结合脱硫设备的能力，可适当提高酸洗污泥配用比例，但不宜超过 1%。

表 7　烟气中 SO_2 质量浓度

Table 7　Mass concentration of SO_2 in flue gas　　mg/m^3

项目	烟气入口			烟气出口		
	最大	最小	均值	最大	最小	均值
基准	635	350	502	17.0	4.0	6.5
试验Ⅰ	714	364	572	16.2	4.6	17.7
试验Ⅱ	866	393	638	60	17.9	33.2

4.4　设备腐蚀

烧结配用酸泥经过一段时间后，烧结机算条腐蚀情况较为严重，具体如图 12 与表 8 所示。依据图 12 中损坏的部位可能存在烧结机台车本体变形、烧损导致报废的严重风险。由表 8 可知，试验Ⅱ期算条损坏的数量为基准期近 3 倍。算条腐蚀一部分原因可能是 SO_2 与烧结炉算条的 Fe 基体形成硫化物，该硫化物消耗金属的能力较大，硫化层易发生破裂[18]。同时，在烧结过程酸洗污泥中的 CaF_2 与水可能发生反应产生 HF 气体，对设备有累积性的腐蚀。



图 12　算条腐蚀损坏情况

Fig. 12　Corrosion damage of grate

表 8　算条月均损耗量

Table 8　Average monthly loss of grate

项目	基准	试验Ⅰ	试验Ⅱ
月均损耗量(根/月)	727	1 165	2 178

5　结　论

（1）烧结杯试验中，随着酸洗污泥配比的增加，烧结利用系数和成品率呈下降趋势。当酸洗污泥配加质量分数达到 5%时，烧结矿转鼓强度降低幅度比较明显。

（2）酸洗污泥中 CaF_2 与 CaO、SiO_2 发生反应生成枪晶石的增多是烧结矿强度降低的原因之一。

（3）酸洗污泥配比增加，烧结烟气中 SO_2 质

量浓度呈升高趋势。当污泥比例为5%时，与基准对比，SO_2 质量浓度峰值增加5.79倍。此外，SO_2 含量达到峰值的间隔变短。

（4）酸洗污泥在烧结工序的资源化利用过程中，烧结配矿中污泥使用比例不宜超过1%。

参考文献：

[1] LI X M, XIE G, HOJAMBERDIEV M, et al. Characterization and recycling of nickel-and chromium-contained pickling sludge generated in production of stainless steel[J]. Journal of Central South University, 2014,21(8):3241－3246.

[2] 谭怀琴. 铬渣生物解毒工艺及解毒动力学研究[D]. 重庆:重庆大学,2006.
TAN Huaiqin. Study on detoxification technics and kinetics of chromium slag by microorganisms[D]. Chongqing:Chongqing University,2006.

[3] 房金乐,杨文涛. 不锈钢酸洗污泥的处理现状及展望[J]. 中国资源综合利用,2014,32(11):24－28.
FANG Jinle, YANG Wentao. Present situation and prospect of treatment of stainless steel pickling[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2014, 32(11): 24－28.

[4] SINGHAL A, TEWARI V K, PRAKASH S. Characterization of stainless steel pickling bath sludge and its solidification/stabilization[J]. Building and Environment,2008,43(6):1010－1015.

[5] 冯琦,王强,彭锋. 含镍、铬不锈钢尘泥资源化利用探讨[J]. 中国冶金,2018,28(6):71－74.
FENG Qi, WANG Qiang, PENG Feng. Investigation on resource utilization of stainless steel sludge containing nickel and chromium[J]. China Metallurgy, 2018, 28(6):71－74.

[6] 那贤昭,齐渊洪. 铬渣在钢铁冶金过程中的资源化利用[J]. 钢铁研究学报,2009,21(4):1－4.
NA Xianzhao, QI Yuanhong. Resourceful disposal of chromium-containing residues in ferrous metallurgical process[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2009, 21(4):1－4.

[7] YANG C C, PAN J, ZHU D Q, et al. Pyrometallurgical recycling of stainless steel pickling sludge:A review[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2019, 26(6):547－557.

[8] 石磊,陈荣欢,王如意. 不锈钢冷轧污泥配矿压球工艺及冶金性能研究[J]. 宝钢技术,2013(2):23－27.
SHI Lei, CHEN Ronghuan, WANG Ruyi. Study on metallurgical properties and pellet proportioning technology of stainless steel cold-rolling sludge[J]. Baosteel Technology,2013(2):23－27.

[9] 张垒,刘尚超,张道权,等. 烧结炼铁协同处置含铬污泥的应用研究[J]. 烧结球团,2018,43(5):61－64.
ZHANG Lei, LIU Shangchao, ZHANG Daoquan, et al. Application research on co-disposal of chromium-containing sludge in sintering and ironmaking[J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(5):61－64.

[10] 张燕云,杜来增. 济(南)钢二铁24 m^2 烧结机配加铬渣的生产实践[J]. 烧结球团,1999,24(3):37－38.
ZHANG Yanyun, DU Laizeng. Production practice of adding chromium slag to 24 m^2 sintering machine of Jinan Iron and Steel Co., Ltd[J]. Sintering and Pelletizing, 1999,24(3):37－38.

[11] 李小明,汪衍军,贾李锋,等. 不锈钢酸洗污泥对烧结黏结相与平衡相的影响[J]. 钢铁,2019,54(11):116－122.
LI Xiaoming, WANG Yanjun, JIA Lifeng, et al. Effect of stainless steel pickling sludge on bond phase and equilibrium phase of sinter[J]. Iron & Steel, 2019, 54(11):116－122.

[12] 李小明,王翀,邢相栋,等. 不锈钢酸洗污泥对铁矿粉烧结液相生成的影响[J]. 烧结球团,2018,43(5):12－19.
LI Xiaoming, WANG Chong, XING Xiangdong, et al. Influence of stainless steel pickling sludge on liquid phase formulation during iron ore fines sintering[J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(5):12－19.

[13] 李小明,杨文涛,李文锋,等. 镍铬不锈钢酸洗污泥焙烧动力学[J]. 过程工程学报,2013,13(6):1003－1007.
LI Xiaoming, YANG Wentao, LI Wenfeng, et al. Thermal decomposition kinetics of the sludge from pickling of nickel chromium stainless steel[J]. The Chinese Journal of Process Engineering,2013,13(6):1003－1007.

[14] 孙敬焘,郭兴敏. 含氟铁矿石烧结过程中枪晶石的生成及其与铁酸钙的作用[J]. 过程工程学报,2017,17(3):565－570.
SUN Jingtao, GUO Xingmin. Formation of cuspidine and action with calcium ferrite in sintering process of fluorine-containing iron ores[J]. The Chinese Journal of Process

Engineering,2017,17(3):565 – 570.

[15] 张继新,李秋菊,周仓,等. 不锈钢酸洗污泥碳还原过程中的物相变化及元素迁移行为[J]. 钢铁研究学报,2021,33(9):920 – 928.
ZHANG Jixin, LI Qiuju, ZHOU Cang, et al. Mineral phase change and element transfer behavior during stainless steel sludge reduction with carbon[J]. Journal of Iron and Steel Research,2021,33(9):920 – 928.

[16] 张芳,安胜利,罗果萍,等. 包钢低硅烧结矿铁酸钙生成特性的影响因素[J]. 钢铁研究学报,2012,24(2):24 – 28.
ZHANG Fang, AN Shengli, LUO Guoping, et al. Influencing factors in formation characteristics of SFCA for low silica sinters of Baogang[J]. Journal of Iron and Steel Research,2012,24(2):24 – 28.

[17] 肖海平,周俊虎,曹欣玉,等. $CaSO_4$ 在不同气氛下分解特性的实验研究[J]. 动力工程,2004,24(6):889 – 892.
XIAO Haiping, ZHOU Junhu, CAO Xinyu, et al. Experimental study of decomosition behavior of $CaSO_4$ in different atmospheres[J]. Power Engineering, 2004, 24(6):889 – 892.

[18] 冀岗,李强,吴明,等. 烧结机算条腐蚀损耗原因分析及改进措施[J]. 烧结球团,2020,45(1):25 – 28.
JI Gang, LI Qiang, WU Ming, et al. Cause analysis and improvement measures for corrosive bured-out of sinter machine grate bar[J]. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(1):25 – 28.

(上接第 120 页)

[16] 倪文,李颖,许成文,等. 矿渣 – 电炉还原渣全固废胶凝材料的水化机理[J]. 中南大学学报(自然科学版),2019,50(10):2342 – 2351.
NI Wen, LI Ying, XU Chengwen, et al. Hydration mechanism of blast furnace slag-reduction slag based solid waste cementing materials[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(10):2342 – 2351.

[17] 余中华,叶正茂,程新. 少熟料钢渣复合胶凝材料水化产物的特性[J]. 济南大学学报(自然科学版),2013,27(2):111 – 117.
YU Zhonghua, YE Zhengmao, CHENG Xin. Characteristics of hydration products of clinker-poor steel slag complex binding material[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology),2013,27(2):111 – 117.

[18] 汤青青,张丽娟,孙国文,等. 三乙醇胺 – 氢氧化钙对大掺量粉煤灰水泥胶凝体系早期活性激发[J]. 硅酸盐通报,2018,37(9):2737 – 2742.
TANG Qingqing, ZHANG Lijuan, SUN Guowen, et al. Early activity of triethanolamine-calcium hydroxide activates to high volume fly ash in cement-gel system [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(9):2737 – 2742.