

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180306

不锈钢酸洗污泥用作炼钢造渣剂的试验

李小明, 王建立, 吕明, 尹卫东, 崔雅茹, 赵俊学

(西安建筑科技大学冶金工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 酸洗污泥产量大、污染严重且难处理, 常规固化填埋占用土地且浪费资源, 将酸洗污泥配入电炉作为造渣剂使用, 在生产中回收其中金属铁、铬和镍, 并发挥 CaO 、 CaF_2 等辅料功能, 可实现污泥在冶金过程的资源化利用。通过 FactSage 热力学软件计算发现酸洗污泥中的金属铁、铬和镍绝大部分可回收进入金属液中, 且金属液硫质量分数最高为 0.014%, 不会使金属液增硫。在此基础上, 将酸洗污泥制成混合造渣剂, 通过静态试验与吹氧熔炼试验发现, 当造渣剂与酸洗污泥质量比为 1:1 时, 硫质量分数能够满足钢液要求, 铬、镍回收率分别为 66.04% 和 97.90%。

关键词: 不锈钢酸洗污泥; 炼钢; 造渣剂

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2019)03-0096-06

Experiment on stainless steel pickling sludge used as steelmaking slagging flux

LI Xiao-ming, WANG Jian-li, LÜ Ming, YIN Wei-dong, CUI Ya-ru, ZHAO Jun-xue

(School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology,
Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: The stainless steel pickling sludge has the characteristics of large yield, serious pollution and difficult disposal. Conventional solidified landfills occupy land and waste resources. The stainless steel pickling sludge is recycled in the steelmaking process as the slagging flux so as to recycle valuable metals of Fe, Cr, and Ni and play the functions of CaO and CaF_2 . Finally it will achieve the utilization of sludge resources. Thermodynamics calculation by FactSage showed that most valuable elements including Fe, Cr and Ni in the pickling sludge could be recycled into the molten metal, and the sulfur mass percent of the molten metal was up to 0.014%, which would not increase the sulfur mass percent in the molten steel. On this basis, the pickling sludge was made into a mixed slag-forming agent, and static experiments and oxygen blown experiments indicated that the sulfur mass percent could meet the requirement of molten steel, and the recovery rate of valuable metals such as Cr and Ni could reach 66.04% and 97.90% respectively when the ratio of the slagging agent and the pickling sludge was 1:1.

Key words: stainless steel pickling sludge; steelmaking; slagging flux

不锈钢生产工序中会产生酸洗废水, 经中和沉淀处理后的沉淀物即为酸洗污泥。2017年中国不锈钢产量为 2 727.43 万 t, 其中铬镍系列不锈钢占 50% 以上, 吨钢污泥按 2.5%~3.0%^[1-2] 计, 铬镍不锈钢酸洗污泥年产量达 34 万 t 以上。不锈钢酸洗污泥具有含水率高、成分复杂、组成波动大、粒度小、结构复杂等特点, 污泥中镍质量分数超过部分镍矿, 且含有一定量的铬和铁, 是重要的二次资源, 但因

其中含有 Cr^{6+} 及 F^- 而归为有毒固体废弃物^[3-4]。近年来, 国内外对酸洗污泥的研究主要包括无害化处理、固化稳定化技术和资源化利用^[5]。其中: 无害化处理费用较高, 污泥量较大时不易处理^[6]; 固化稳定化技术会造成大面积土地资源被占用, 同时也对环境产生潜在危害^[7-10]; 资源化利用回收工艺能耗高, 利用过程中未充分考虑辅料的综合利用^[11-14]。

有关酸洗污泥在钢铁冶金流程中的研究: 石磊

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51574189, 51774224, 51604210)

作者简介: 李小明(1974—), 男, 博士, 教授; **E-mail:** xmli88@126.com; **收稿日期:** 2018-07-30

通讯作者: 吕明(1986—), 男, 博士, 讲师; **E-mail:** lvmingsteel@163.com

等^[15]将酸洗污泥进行了配矿压球、高温焙烧试验,发现污泥掺量为 30% 时,球团的主要冶金性能满足高炉要求,按照污泥掺量为 10% 进行配料,对高炉顺行无影响;张景等^[16]将酸洗污泥与红土尾矿混配,利用还原-磁选工艺回收其中的铁、镍、铬等金属,使得最终产物可以安全排放。酸洗污泥中含有氟化钙、氧化钙等炼钢造渣剂的有用成分,将其返回应用于炼钢工序有望实现污泥闭路资源化利用,达到回收有价金属、节省造渣剂消耗的双重目标,是值得探索的重要应用方向^[17]。为此,本文对酸洗污泥用于电炉炼钢造渣剂进行了热力学分析,对元素回收效果进行了试验研究。

1 理论基础研究

1.1 试验材料物性分析

本文研究所用酸洗污泥取自国内某不锈钢企业。酸洗污泥外观如图 1 所示,呈板块状。酸洗污泥 XRD 分析结果如图 2 所示,其主要结晶相为 CaF_2 、 CaCO_3 、 SiO_2 、 CaSO_4 和 NiFe_2O_4 等,金属氧化物以非晶态形式存在,含少量石灰颗粒和氧化铁。酸洗污泥化学元素分析结果见表 1,其中全铁质量分数为 16.02%,铬质量分数为 3.725%,镍质量分数为 2.14%,具有较高的资源利用价值。

采用 FEI Quanta 200 扫描电镜在 3 000 倍下观察酸洗污泥微观形貌如图 3 所示。经分析可知区域 1 为 CaF_2 、 CaO 、 SiO_2 和 CaSO_4 ,区域 2 为 CaF_2 、 Cr_2O_3 和 NiFe_2O_4 等物质。结合酸洗流程实际工况,经计算各种物质存在形态及质量分数见表 2。试验所用废钢及炼钢造渣剂的成分分别见表 3 和表 4。

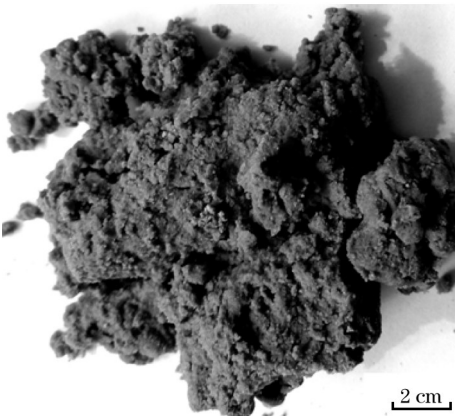


图 1 酸洗污泥
Fig. 1 Photo of pickling sludge

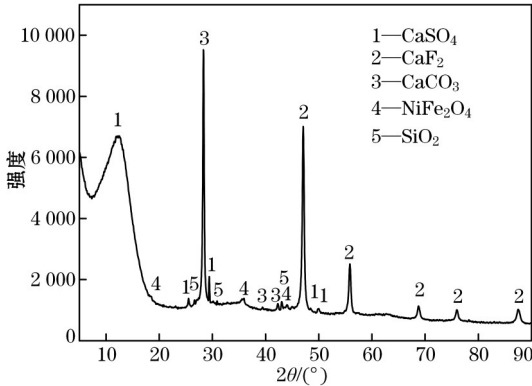
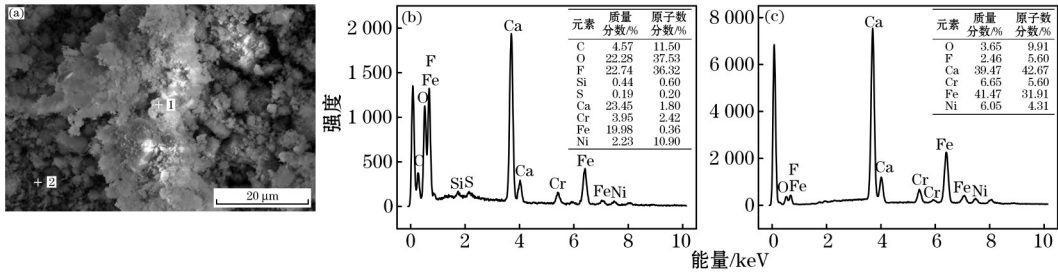


图 2 酸洗污泥 XRD 图
Fig. 2 XRD pattern of pickling sludge

表 1 酸洗污泥化学元素分析(质量分数)

Table 1 Chemical elements analysis of pickling sludge %

TFe	Cr	Ni	F	S	Si	Al	Ca	C
16.02	3.725	2.14	7.45	0.151	0.991	0.269	27.52	0.962



(a) 扫描电镜图; (b) 区域 1 的能谱图; (c) 区域 2 的能谱图。

图 3 酸洗污泥 SEM 及 EDS 图片

Fig. 3 SEM image and EDS spectra of pickling sludge

表 2 酸洗污泥成分(质量分数)

Table 2 Compositions of pickling sludge %

CaF_2	CaCO_3	CaSO_4	Fe_2O_3	NiO	Cr_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	CaO
15.31	8.017	0.812	22.9	2.72	5.44	2.12	0.508	22.75

表 3 废钢成分(质量分数)

Table 3 Compositions of scrap %

Fe	C	Si	Mn	S
98.52	0.035	0.001	1.31	0.018

表 4 造渣剂成分(质量分数)

Table 4 Compositions of slag forming material %			
CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃
73	15.6	2	9.4

采用 OMEC800 激光粒度仪对酸洗污泥进行分析,结果表明:酸洗污泥的粒度主要分布在 90~210 μm。酸洗污泥粒度较小,比表面积大,加入钢液中能与钢液充分反应并快速熔解,适合作为造渣剂使用。利用半球法,采用 CQKJ-II 型矿渣熔化温度特性测定仪测定酸洗污泥的熔化温度。经测定酸洗污泥的软化温度为 1 206 ℃,熔化温度为 1 223 ℃。对比分析了电炉造渣剂的软化温度为 1 380 ℃,熔化温度为 1 400 ℃,将酸洗污泥加入到不锈钢冶炼的电炉工序中作为造渣剂,将有助于降低炉渣温度,

促进炉渣快速熔化,提高炉渣流动性。

1.2 热力学计算

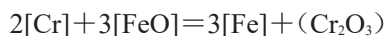
为了探究酸洗污泥作为造渣剂加入电炉后对金属液成分与渣性能的影响,采用 FactSage 热力学软件的 Equilib 模块研究了钢液中硫及金属的变化趋势,计算时将废钢与造渣剂混合直接加入。初始废钢与造渣剂成分分别见表 3 和表 4。将造渣剂与酸洗污泥按 4:1、3:1、2:1、1:1、1:2、1:3、1:4 等质量比混匀成混合造渣剂。计算时设定废钢与混合造渣剂的质量比为 10:1(取废钢 100 g、混合料 10 g),温度为 1 600 ℃,环境条件设定为标准大气压(10⁵ Pa),按照冶炼钢种标准,经计算全废钢冶炼 100 g 钢液需氧气 5.0 g。重点分析金属液中铁、铬、镍以及硫质量分数的变化。加入不同比例的酸洗污泥对钢液成分的影响见表 5。

表 5 吹氧时污泥比例对钢液成分影响

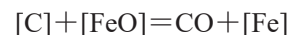
Table 5 Influences of sludge ratio on molten steel compositions during oxygen blowing

造渣剂与污泥质量比	铁液中元素质量分数/%							总质量/g
	Fe	C	Si	Mn	S	Cr	Ni	
4:1	99.428	0.003	微量	0.074	0.025	0.080	0.05	83.408
3:1	99.722	0.012	微量	0.037	0.011	0.004	0.06	84.631
2:1	99.695	0.012	微量	0.035	0.012	0.005	0.08	84.450
1:1	99.644	0.011	微量	0.034	0.013	0.012	0.13	84.074
1:2	99.591	0.011	微量	0.033	0.014	0.011	0.17	83.702
1:3	99.563	0.011	微量	0.033	0.014	0.011	0.19	83.517
1:4	99.544	0.010	微量	0.033	0.014	0.011	0.21	83.206

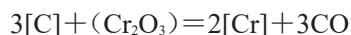
由表 5 可知,随着酸洗污泥加入量增加,钢液质量呈递减的趋势,主要是由于高温下碳质量分数在一定范围时,吹氧使钢液中铁、锰等元素被氧化成 FeO、Fe₂O₃、MnO 等金属氧化物进入渣中。碳质量分数基本上稳定在 0.01%。硫质量分数随着酸洗污泥加入量增加呈微增的趋势,但其质量分数均小于废钢中硫质量分数(0.018%)。当酸洗污泥加入量增加时,污泥中带入的硫质量分数增加,混合造渣剂的碱度也降低,硫质量分数因此升高。镍质量分数随酸洗污泥含量的增加而增加,因为镍元素在钢液中不易被氧化。铬质量分数随酸洗污泥含量的增加先增加,当铬质量分数增加到 0.012%后不再增加,因为在吹氧高温条件下,始终存在碳、铬元素的选择性氧化,其氧化反应见式(1)~式(3)。



$$\Delta G_{1600\text{ }^\circ\text{C}} = -207\,596.4\text{ J} \quad (1)$$



$$\Delta G_{1600\text{ }^\circ\text{C}} = -127\,194.6\text{ J} \quad (2)$$

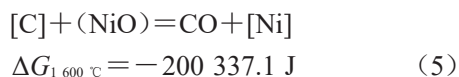
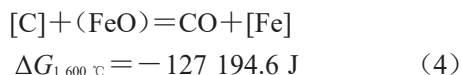


$$\Delta G_{1600\text{ }^\circ\text{C}} = -173\,987.4\text{ J} \quad (3)$$

钢液中碳和铬存在竞争性氧化,当碳质量分数降低到一定程度时,碳和氧的结合能力减弱,氧气开始氧化钢液中铬元素,大部分被氧化为 Cr₂O₃。因此,铬质量分数不会随污泥量比例增加持续增加。镍的回收率可由反应后钢液中镍质量分数与污泥中相应镍质量分数比值求得,其回收率如图 4 所示。

当造渣剂与酸洗污泥质量比为 1:1 时,镍回收率为 97.6%,金属回收率相对较高。FeO 与 NiO 被碳还原的反应分别见式(4)和式(5)。NiO 与碳反应吉布斯自由能较小,故大部分 NiO 易被还原为金属

镍进入钢液。



造渣剂与污泥不同比例时混合造渣剂的成分及总量变化见表6。由表6可知,随着酸洗污泥含量增加,混合造渣剂总量呈递减的趋势。当造渣剂与酸洗污泥质量比为4:1时,渣量最高,为29.42 g,随着酸洗污泥量配入比例提高后,酸洗污泥含量增加,越来越多的氟化物、硫化物挥发及产生气体物质被去除。

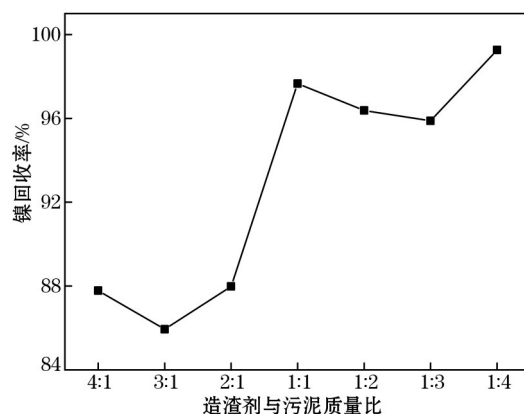


图4 钢中镍元素回收率

Fig. 4 Recovery rate of Ni element in steel

表6 不同比例污泥混合造渣剂成分

Table 6 Compositions of mixed slagforming materials with different proportions

造渣剂与 污泥质量比	混合造渣剂质量分数/%								总质量/g
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	MnO	Cr ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	
4:1	4.53	4.29	20.89	0.54	5.55	0.25	59.37	5.80	29.42
3:1	4.27	4.08	20.22	0.51	5.56	0.31	59.40	5.90	29.34
2:1	3.86	3.78	18.57	0.46	5.63	0.41	60.25	6.19	29.02
1:1	2.94	3.03	16.82	0.34	5.64	0.62	62.97	6.68	28.96
1:2	2.04	2.30	14.50	0.23	5.69	0.83	66.13	7.23	28.71
1:3	1.58	1.94	13.32	0.17	5.71	0.93	67.71	7.52	28.59
1:4	0.83	1.50	12.58	0.14	5.71	1.00	69.16	7.97	28.58

2 静态试验

2.1 试验方法

将酸洗污泥置于120℃下干燥5 h,然后破碎至小于74 μm(200目);造渣剂与酸洗污泥按3:1、2:1、1:1和1:2质量比制成混合造渣剂;称取200 g废钢,按照废钢与混合造渣剂质量比为10:1称取,即20 g混合造渣剂,与废钢混合均匀后加入刚玉坩埚中,放入高温箱式炉中以10℃/min的速度升温至1600℃,保温30 min,随炉冷却至室温,分析钢锭中金属及硫质量分数,得到酸洗污泥作为造渣剂中有价元素的迁移规律。

2.2 结果与分析

图5所示为全废钢配入酸洗污泥高温熔化静态试验钢中硫质量分数变化趋势。由图5看出,随着酸洗污泥含量增加,钢中硫质量分数呈递增的趋势。1600℃时发生的主要脱硫反应为 $[\text{S}] + (\text{CaO}) + \text{C} = (\text{CaS}) + \text{CO}$ 。在造渣剂与污泥质量比为1:1~3:1时,由于渣中具有较高的CaO质量分数,对钢中硫有脱除作用,因而,此时钢液中的硫质

量分数低于原钢种的硫质量分数。污泥中含有较高的硫质量分数,随着污泥配入量的增加,钢液中硫质量分数因污泥带入而有所增加,但其质量分数均小于原钢锭中硫质量分数(0.018%)。当造渣剂与污泥质量比为1:2时,污泥对钢液带入的硫质量分数大于CaO与硫平衡的量,钢液中出现少量增硫现象,硫质量分数为0.025%。

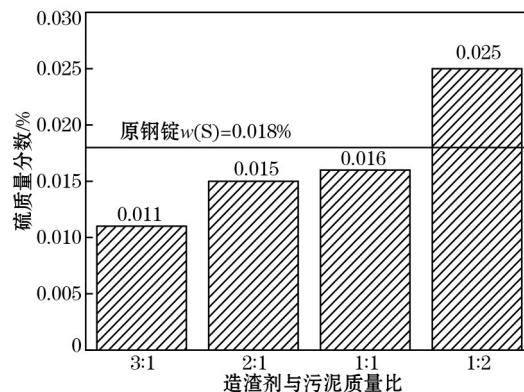


图5 静态试验硫质量分数变化

Fig. 5 Variation of sulphur mass percent in steel in static smelting experiments

图6所示为加入不同比例的造渣剂和污泥后,钢液中金属元素的变化趋势。由图6可以看出,铁质量分数在造渣剂与酸洗污泥质量比为2:1时略有降低,在其他比例时基本保持不变。当酸洗污泥含量增加时,镍质量分数呈递增的趋势。在造渣剂与污泥质量比为1:2时,镍质量分数最高,为0.086%。因为镍元素在钢液中不易被氧化,因此会随酸洗污泥含量的增加呈递增的趋势。铬质量分数随酸洗污泥含量的增加整体呈递增的趋势,在造渣剂与酸洗污泥质量比为1:2时,铬质量分数最高,为0.008%。由于体系没有吹氧,碳、铬元素基本不存在选择性氧化,污泥中加入的铬元素被还原进入钢液中,使钢液中铬质量分数增加。

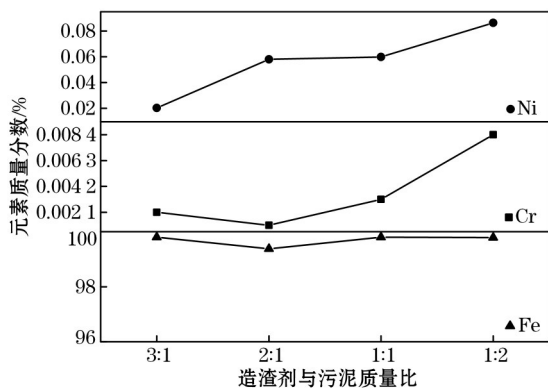


图6 静态试验钢中金属元素变化

Fig. 6 Variation of major metallic elements in static smelting experiments

3 吹氧熔炼试验

3.1 试验方法

按静态试验的方法取样、分组,将装有废钢与混合造渣剂的刚玉坩埚置于感应炉中,升温至1600℃,待废钢与酸洗污泥熔化,将感应炉功率调小,氧气以5 mL/min的流量吹入钢液中,吹氧2 min,然后停止加热,等钢液冷却凝固后取出坩埚,对钢锭中金属及硫元素质量分数进行分析,得到酸洗污泥作为造渣剂中有价元素的迁移规律。

3.2 结果与分析

图7所示为吹氧熔炼后钢中硫质量分数的变化。当酸洗污泥配入量增加时,钢液中硫质量分数整体呈递增趋势。硫质量分数在造渣剂与酸洗污泥质量比1:2时最高,为0.028%。对比静态试验发现,造渣剂与污泥质量比相同时,吹氧熔炼时硫质量分数更高,且变化趋势基本一致。由于低氧势更有利于脱硫,吹氧时混合造渣剂中氧势高,易产生钢液回硫,因此硫质量分数有所提高,需适当控制

酸洗污泥比例。

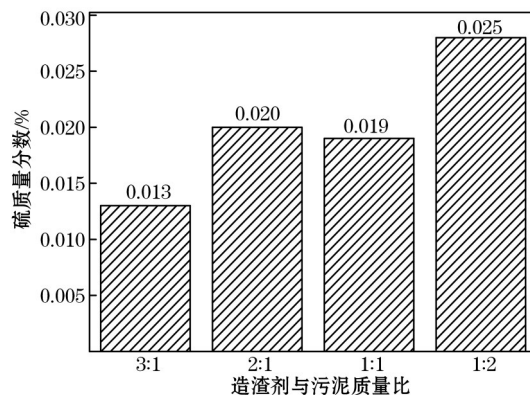


图7 吹氧熔炼后钢中硫质量分数变化

Fig. 7 Variation of sulphur mass percent in steel after oxygen blown experiments

图8所示为吹氧熔炼后钢中铁、镍、铬元素的变化。随着酸洗污泥配入比例增加,铁质量分数持续降低,当造渣剂与酸洗污泥质量比为1:2时,钢锭中铁质量分数最低,为99.42%。当酸洗污泥含量增加时,镍质量分数呈先增加后减少的趋势,当造渣剂与酸洗污泥质量比为2:1时,镍质量分数最大,为0.1318%。随着酸洗污泥比例的增加,由于钢液中碳质量分数的不足,污泥中氧化镍较难被还原,故镍质量分数在质量比为2:1后呈减少的趋势。当酸洗污泥含量增加时,铬质量分数呈先增加后减少的趋势,在造渣剂与酸洗污泥质量比为1:1时,铬质量分数最高,为0.124%。在吹氧熔炼条件下,始终存在碳、铬元素的选择性氧化。当酸洗污泥含量增加时,污泥为钢液带入更多的铬元素,因此铬质量分数提高。当增加至某一程度时,由于钢液中碳质量分数相对较低,污泥中多余的氧化铬无法被还原,因此铬不会随着污泥含量的增加持续增加。在造

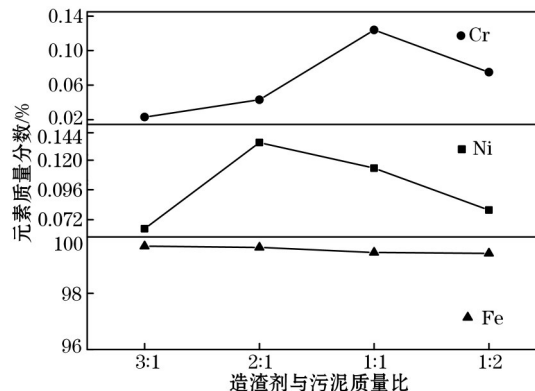


图8 吹氧时钢中金属元素变化

Fig. 8 Variation of major metallic elements in steel after oxygen blown experiments

渣剂与酸洗污泥质量比为 1:2 时, 铬质量分数降低。对比酸洗污泥静态试验数据发现, 在吹氧熔炼条件下, 铬、镍质量分数更高, 由于吹氧会大大改善反应的动力学, 反应进行完全。

综上可知, 酸洗污泥直接作为电炉造渣剂使用具有可行性, 在造渣剂与污泥质量比为 1:1 时, 硫质量分数满足钢种要求, 铁、铬、镍质量分数相对较高, 铬、镍回收率分别为 66.04% 和 97.90%。NiO 易被碳等还原为镍, Cr_2O_3 较难被还原为铬, 故镍元素回收率较高, 铬元素回收率较低。

4 结论

(1) 热力学计算表明: 酸洗污泥作为造渣剂加入电炉中, 造渣剂与酸洗污泥质量比为 1:1 时, 加入金属回收率相对较高, 钢液中硫质量分数为 0.013%, 低于原钢锭中硫质量分数, 满足生产要求。

(2) 酸洗污泥加入静态钢水中, 对钢中硫质量分数影响较小, 造渣剂与酸洗污泥质量比为 1:1 时, 钢液中硫质量分数为 0.016%, 低于原钢锭中硫质量分数; 铬、镍等元素回收量较低, 分别为铬质量分数小于 0.1%, 镍质量分数小于 0.1%。

(3) 酸洗污泥作为电炉造渣剂吹氧熔炼, 酸洗污泥对钢液增硫不明显, 造渣剂与酸洗污泥质量比为 1:1 时, 钢液中硫质量分数为 0.019%, 略高于原钢锭中硫质量分数, 镍、铬回收率相对较高, 分别为 97.90% 和 66.04%。

参考文献:

- [1] 李小明, 尹卫东, 沈苗, 等. 铬镍不锈钢酸洗污泥还原预处理脱硫动力学[J]. 钢铁, 2018, 53(2): 83. (LI Xiao-ming, YIN Weidong, SHEN Miao, et al. Desulfurization dynamics on reduction pre-treatment of sludge from pickling of chromium nickel stainless steel[J]. Iron and Steel, 2018, 53(2): 83.)
- [2] 李山青. 冷轧酸洗与轧制技术的发展现状[J]. 轧钢, 2017, 34(5): 1. (LI Shan-qing. Technology development of cold rolling and pickling[J]. Steel Rolling, 2017, 34(5): 1.)
- [3] Ito M, Tachibana R, Fukushima K, et al. Characteristics and production mechanism of sulfuric acid and nitric-hydrofluoric acid pickling sludge produced in manufacture of stainless steel[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2004, 31(4): 589.
- [4] Ma G, Garbers-Craig A M. Cr(VI) containing electric furnace dusts and filter cake from a stainless steel waste treatment plant part 1 characteristics and microstructure[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2006, 33(3): 229.
- [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. (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.)
- [6] LI Xiao-ming, XIE Geng, Mirabbos Hojamberdiev, et al. Characterization and recycling of nickel- and chromium-contained pickling sludge generated in production of stainless steel[J]. Journal of Central South University of Technology, 2014, 21(8): 3241.
- [7] ZHANG Hai-qing, YANG Yu-you, YI Yu-cheng. Effect of sulfate erosion on strength and leaching characteristic of stabilized heavy metal contaminated red clay[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(3): 666.
- [8] Aydın A A, Aydın A. Development of an immobilization process for heavy metal containing galvanic solid wastes by use of sodium silicate and sodium tetraborate[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 270(3): 35.
- [9] LI Xiao-ming, Mousa Elsayed, ZHAO Jun-xue, et al. Recycling of sludge generated from stainless steel pickling process[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2009, 16(5): 480.
- [10] 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.
- [11] YANG J, ZHANG S G, PAN D A, et al. Treatment method of hazardous pickling sludge by reusing as glass-ceramics nucleation agent[J]. Rare Metals, 2016, 35(3): 269.
- [12] 张宏华, 潘丽铭, 潘永智. 不锈钢行业铬镍污泥制砖的可行性研究[J]. 浙江工业大学学报, 2013, 41(3): 295. (ZHANG Hong-hua, PAN Li-ming, PAN Yong-zhi. The feasibility study on making bricks with Cr-Ni sludge from the stainless steel industry[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2013, 41(3): 295.)
- [13] Shih Pai-Huang, Chang Juu-En, Lu Hsing-Cheng, et al. Reuse of heavy metal-containing sludges in cement production[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(11): 2110.
- [14] 罗晔, 吴瑾, 王超. 韩国钢铁工业的固体废弃物回收再利用[J]. 中国冶金, 2017, 27(10): 76. (LUO Ye, WU Jin, WANG Chao. Discovery and reuse of solid waste in South Korean iron and steel industry[J]. China Metallurgy, 2017, 27(10): 76.)
- [15] 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. (SHI Lei, CHEN Rong-huan, WANG Ru-yi. Study on metallurgical properties and pellet proportioning technology of stainless steel cold-rolling sludge[J]. Baosteel Technology, 2013(2): 23.)
- [16] 张景, 孙映, 刘旭隆, 等. 还原-磁选不锈钢酸洗污泥中的金属[J]. 过程工程学报, 2014, 14(5): 782. (ZHANG Jing, SUN Ying, LIU Xu-long, et al. Recovery of metals from stainless steel pickling sludge by reduction and magnetic separation[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2014, 14(5): 782.)
- [17] 孙亮, 张立国, 郑志辉, 等. 冷却造渣剂的研究与应用实践[J]. 中国冶金, 2016, 26(12): 61. (SUN Liang, ZHANG Li-guo, ZHENG Zhi-hui, et al. Research and application of cooling slagging agent[J]. China Metallurgy, 2016, 26(12): 61.)