

钢渣对比对钒钛磁铁矿烧结质量的影响研究

张建良^{1*}, 王 琪², 刘陈新³, 曹朝真³, 李 震¹, 朱建秋², 郝良元²

(1. 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2. 河钢集团承德钒钛新材料有限公司, 河北 承德 067000; 3. 必和必拓中国铁矿市场战略与技术部, 上海 200131)

摘 要: 为优化钢渣的循环利用策略, 提升钢铁企业的经济效益与社会效益, 首先分析了钢渣中钛元素与磷元素的含量, 并基于不同钢渣配比进行烧结杯试验。基于系统研究可知, 在钒钛磁铁矿烧结过程中, 随钢渣配比增大, 烧结矿中钙钛矿相增加, 部分粘结相由复合铁酸钙相向钙钛矿相转变, 烧结矿整体矿相呈现不均匀化, 复杂性增强, 该矿相转变对烧结矿强度造成不利影响。基于磷元素富集效应, 随钢渣配比增大, 成品烧结矿中磷元素含量升高, 当钢渣配加量为 5% 时, 烧结杯试验烧损率最低为 15.42%。钢渣配比为 4% 时, 烧结矿成品率最高为 86.49%, 随钢渣配比继续增大成品率基本保持稳定。

关键词: 烧结; 钢渣; 配比; 冶金性能; 微观结构

中图分类号: TF046, X757

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)05-0123-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.05.016

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Effect of steel slag ratio on the sintering of vanadium-titanium magnetite ore

Zhang Jianliang^{1*}, Wang Qi², Liu Chenxin³, Cao Chaozhen³, Li Zhen¹, Zhu Jianqiu², Hao Liangyuan²

(1. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. HBIS Chengde Vanadium Titanium New Material Co., Ltd., Chengde 067000, Hebei, China; 3. BHP Billiton China, Shanghai 200131, China)

Abstract: To optimize the recycling strategy of steel slag and enhance the economic and social benefits of steel companies, the study first analyzed the content of titanium and phosphorus elements in steel slag and conducted sintering pot tests based on different steel slag ratios. In the vanadium-titanium magnetite sintering process, with the increase of steel slag ratio, the perovskite phase in sinter increases, and bonding phases transform from SFCA to perovskite phases. This transformation leads to an uneven mineral phase in sinter and increases its complexity, which has a detrimental effect on the strength of the sintered ore. Additionally, with the increase of steel slag ratio, the phosphorus content in the finished sintered ore also increases. When the steel slag addition amount reaches 5%, the lowest sintering loss rate in the sintering pot test is 15.42%. At a steel slag ratio of 4%, the maximum yield of sintered ore is 86.49%, as the ratio continues to increase, the yield remains relatively stable.

Key words: sintering, steel slag, ratio, metallurgical properties, microstructure

收稿日期: 2024-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52174291)。

* 通讯作者: 张建良, 1965 年出生, 北京人, 博士, 教授, 长期从事炼铁新技术相关研究, E-mail: zhang.jianliang@hotmail.com。

0 引言

钢渣用作烧结配料在许多中大型钢铁企业内部循环利用,已经取得了良好的经济效益和社会效益。转炉钢渣中通常存在 40%~50% 的氧化钙、6%~10% 的氧化镁等,1 t 钢渣经过粉磨处理后可以代替 0.7~0.75 t 石灰石作为烧结配料使用^[1-3]。在钢铁冶炼过程中,钢渣作为副产物,其资源化利用成为提升生产效益与环保水平的关键。安钢铁炼厂通过预配钢渣于含铁料中,发现适量(如 1.5%~5%)的钢渣配比能显著提升烧结矿品位至 58% 以上,但超过 8% 则影响生产稳定性,尤以对烧结矿碱度影响显著^[4]。首钢技术研究院进一步提出,结合优质白灰使用钢渣作为烧结熔剂,优化了液相流动性与生成量,减少了铁酸钙含量,增加了硅酸盐含量,不仅提高了烧结矿质量与产量,还降低了生产成本,推动了固体废弃物的循环利用^[5]。梅钢则强调钢渣的高含铁量及富含的 CaO、SiO₂ 成分,使其替代部分石灰石作为烧结熔剂使用,在适宜配比(如钢渣 1.5%、碳量 5.5%)下,其烧结成品矿具备良好的技术经济性能^[6-9]。Arcelor Mittal Temirtau 公司将转炉钢渣回配烧结工序后,烧结矿中含铁品位增加了 0.2%,同时每吨成品烧结矿所需焦粉的消耗量增加了 0.2 kg^[10]。J. M. Qie 等人的研究表明,配加转炉钢渣可显著增强烧结矿的转鼓强度,得益于钢渣的低熔化温度,其加入降低了液相形成温度,增厚了燃烧带,促进了液相的扩散与迁移,从而改善了烧结矿质

量^[11-12]。

然而,钢渣作为烧结配料循环使用时需要控制配料比例及钢渣粒度,当钢渣颗粒大小不均、成分不稳定时会严重影响烧结配料和烧结工艺控制^[13-15]。同时,降低烧结过程垂直烧结速度,在延长烧结时间的同时降低烧结过程的利用系数^[16-18]。在烧结过程中过量添加钢渣,可能导致产品含铁品位下降,对高炉炼铁工序产品质量产生不利影响^[19-23]。此外,在烧结过程中添加钢渣可能引发磷富集,因为钢渣中含有较高的磷元素,烧结配加钢渣时易造成磷元素进入铁水导致富集,使铁水磷含量升高^[24-30]。钢渣中的硫、磷、钛等杂质元素可能对烧结成品率及冶金性能产生不利影响。因此,基于钢渣中钒钛元素迁移规律研究,探索合理的钢渣配比对于优化烧结生产流程、提升经济技术指标具有重要意义。

该研究保持烧结混合料中铁品位及二元碱度一致,结合 X 射线衍射法和 SEM-EDS 电子显微镜,通过解析配加钢渣条件下钒钛磁铁矿烧结元素迁移规律,针对不同钢渣配比条件下烧结矿冶金性能和显微结构的变化规律进行研究,提出了钒钛磁铁矿烧结生产条件下钢渣配加优化方案,为钢渣回配钒钛磁铁矿烧结工序提供技术参考。

1 试验方法

该试验所需原燃料由企业现场提供,主要包括 5 种铁矿粉,2 种熔剂,2 种燃料,此外还包含高炉返矿、杂料以及钢渣,其化学成分如表 1 所示。

表 1 原燃料化学成分分析
Table 1 Chemical compositions of raw materials and fuels analysis

种类	TFe	FeO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	V	烧损
矿粉1	64.45	28.71	3.31	0.60	0.82	0.76	0.06	3.26	0.09	0.30	-2.46
矿粉2	66.64	26.56	6.15	0.25	0.29	0.39	0.09	0.06	0.02	0.01	-2.01
矿粉3	66.11	28.81	5.96	0.85	1.02	0.62	0.11	2.23	0.04	0.27	-2.45
矿粉4	60.77	4.58	3.94	0.10	2.63	0.08	0.11	0.12	0.30	0.01	6.13
矿粉5	60.27	28.71	7.62	4.08	2.45	0.82	0.22	0.66	0.18	0.03	4.61
高炉返矿	54.57	8.99	5.30	10.02	2.22	2.23	0.23	1.70	0.13	0.13	-0.70
杂料	44.15	19.08	7.66	10.67	3.02	2.22	1.59	5.22	0.31	0.39	7.65
钢渣	20.65	19.34	10.45	36.11	2.75	14.38	0.84	1.24	2.81	0.60	-0.60
熔剂1	0.00	0.00	0.44	68.62	0.98	6.69	0.00	0.09	0.06	0.00	22.32
熔剂2	0.00	0.00	2.07	44.26	0.42	32.76	0.00	0.04	0.02	0.00	19.63
燃料1	0.00	0.00	5.13	2.88	2.04	0.19	0.04	0.12	0.06	0.00	85.93
燃料2	0.00	0.00	17.11	2.26	7.61	0.80	0.22	0.44	0.19	0.05	65.57

由表 1 可知, 钢渣中氧化钙和氧化镁的质量分数较高, 分别为 36.11% 和 14.38%, 同时含有 SiO_2 , FeO 等有益化学成分, 在烧结试验中合理配加能够改善烧结矿质量, 因此钢渣可以替代部分熔剂用于烧结。基于优化烧结工艺指标, 探究最优钢渣配加

量目的, 设计了 2.10 碱度条件下的基准组(钢渣配比 0)及钢渣配比分别为 2%, 4%, 5%, 6% 的烧结杯试验共 5 组, 以确定钢渣在钒钛磁铁矿烧结过程中的作用及影响, 具体试验方案如表 2 所示。每组试验中烧结混合料的质量按照 120 kg 进行配料计算。

表 2 烧结杯试验方案
Table 2 Experimental protocol for sintering pot tests

试验方案	矿粉1	矿粉2	矿粉3	矿粉4	矿粉5	高炉返矿	杂料	外配返矿	钢渣配比	熔剂1	熔剂2	燃料1	燃料2
1	36.65	7.75	5.45	11.00	14.00	3.00	5.50	0.00	0.00	9.75	1.40	2.75	2.75
2	33.00	9.00	5.00	9.80	9.30	2.75	5.00	9.10	2.00	9.85	0.20	2.50	2.50
3	34.00	8.25	5.00	9.00	8.60	2.75	5.00	9.10	4.00	9.30	0.00	2.50	2.50
4	39.95	2.90	4.80	9.00	8.00	2.75	5.00	9.10	5.00	8.50	0.00	2.50	2.50
5	41.95	1.80	3.35	9.00	8.00	2.75	5.00	9.10	6.00	8.05	0.00	2.50	2.50

2 结果与讨论

2.1 钢渣配加量对钒钛烧结矿化学成分的影响

表 3 为 5 组试验方案下烧结杯试验成品矿实际检测化学成分。

由表 3 可知, 随着钢渣配加量增大, TFe 品位呈现逐渐下降趋势, 钢渣中含铁量为 20.56%, 配加钢渣导致精矿粉的添加量减少, 从而使烧结矿的全铁品位下降, 但整体优于基准组。此外, 烧结矿中磷含量随着钢渣的加入呈现上升的趋势。钢渣中磷含量较高, 达到 2.81%, 烧结过程中难以有效去除磷元素, 随着钢渣配入量的增加, 磷元素富集导致烧结矿中

的磷含量逐渐上升。尽管钢渣中硫元素含量较高, 达到 0.35%, 但随着钢渣配比增大, 烧结成品矿中硫元素含量没有明显升高。其主要原因在于绝大部分原料中的硫元素会在烧结过程中经高温燃烧生成 SO_2 挥发脱除, 控制试验组碱度基本保持在相同水平, 因此成品烧结矿中 S 含量相差较小。由于钢渣中 SiO_2 含量达到 10.45%, 随着钢渣配加量的增加, 成品烧结矿中 SiO_2 含量呈现出逐渐上升趋势。综上可知, 由于钢渣中所含磷元素会在烧结过程产生富集, 因此需结合烧结技术经济指标及烧结矿冶金性能进一步优化钢渣配加量, 以减小由于磷元素含量升高对烧结矿质量的影响。

表 3 不同钢渣配比条件下烧结矿化学成分
Table 3 Chemical compositions of sinter under different steel slag ratios

试验方案	w/%										R
	TFe	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	MnO	TiO_2	S	P_2O_5	V	
1	55.02	4.47	9.78	1.69	2.16	0.26	1.86	0.06	0.16	0.24	2.19
2	56.12	4.52	9.79	1.88	2.00	0.23	1.72	0.06	0.17	0.19	2.17
3	55.57	4.60	9.51	1.84	1.96	0.24	1.68	0.04	0.19	0.21	2.06
4	55.02	4.63	9.72	1.66	2.13	0.24	1.85	0.05	0.22	0.22	2.10
5	55.45	4.64	9.93	1.76	2.36	0.30	1.84	0.06	0.26	0.24	2.14

2.2 钢渣配加量对钒钛烧结矿微观结构的影响

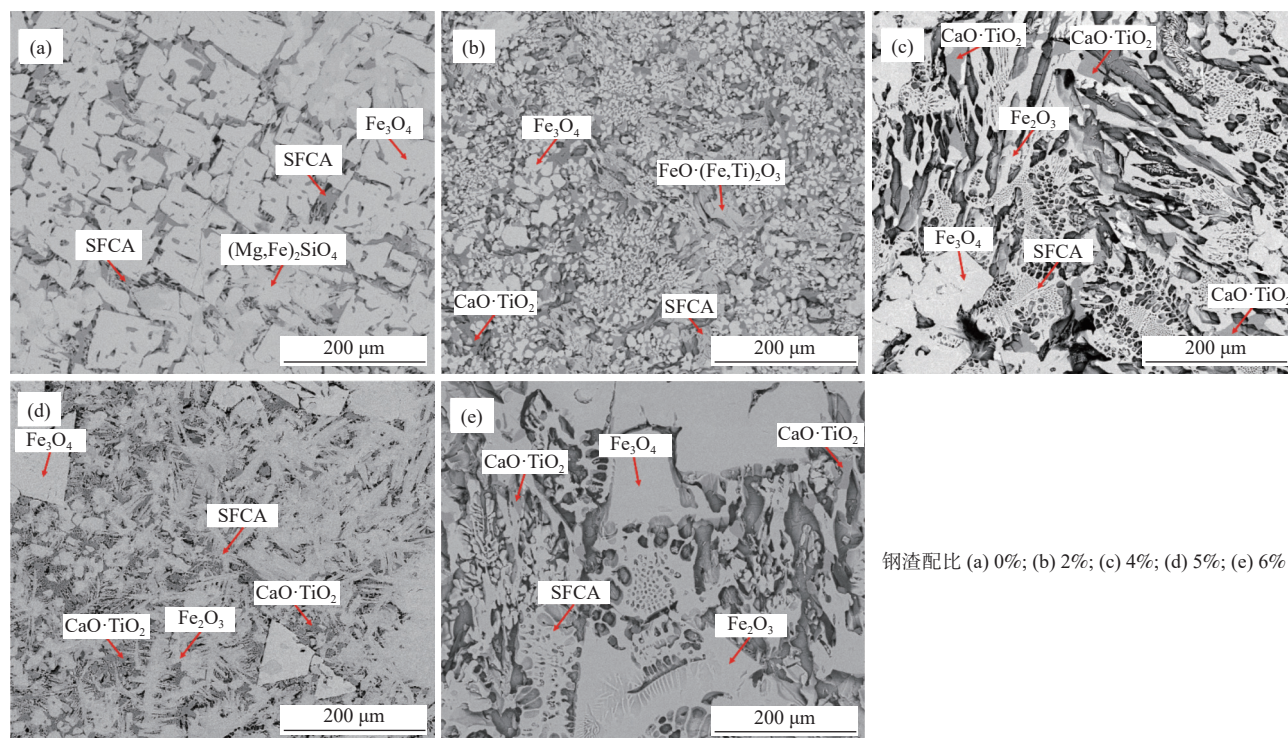
2.2.1 钢渣配加量对钒钛烧结矿矿相结构的影响

对不同钢渣配比条件下钒钛烧结矿进行扫描电镜分析, 其 SEM-EDS 图像如图 1 所示。当烧结原料中不配加钢渣时如图 1(a)所示, 样品中硅酸盐物相及复合铁酸钙物相较为明显, 同时样品中含有一定量的 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 物相, 且复合铁酸钙大多呈现针状结构赋存。随着钢渣加入, 由于钢渣中含有一定量 V、Ti 元素, 如图 1(b)~(e)所示, 烧结矿矿相

中钙钛矿 ($\text{CaO} \cdot \text{TiO}_2$) 及钛磁铁矿 ($\text{FeO} \cdot (\text{Fe}, \text{Ti})_2\text{O}_3$) 物相占比逐渐增加, 且当钢渣配加量为 2% 时, 钙钛矿部分晶体呈现出树枝状, 并有大量钙钛矿以无定形晶体及其他形态晶体存在于烧结矿内部, 而钛磁铁矿主要以自形和半自形晶体形态存在, 具有相对明显的晶体边界^[31]。基于 SEM 表征, 钛磁铁矿可形成与钙钛矿晶体紧密连接结构, 粘结相的含量较为有限。当钢渣配比为 4% 时, 钛元素主要以钙钛矿矿相存在于烧结矿中, 此时, 钙钛矿矿相仍然呈现出

不定形和他晶形,主要填充于与复合铁酸钙相伴生的 Fe_2O_3 矿相及 Fe_3O_4 矿相之间。当钢渣配比为 5% 时,由图 1(d)可知烧结矿的矿相结构表现出不均匀性,局部出现了熔蚀状晶体和颗粒状晶体交织的矿相结构,铁酸钙和钙钛矿是在该部分成为主要的粘结相。铁酸钙呈柱状和针状他形晶。钙钛矿部

分与复合铁酸钙物相交织分布,还有少量不定形晶体和他形晶填充在磁铁矿和赤铁矿晶粒之间。当钢渣配加量为 6% 时,钙钛矿主要充填在磁铁矿、钙铁矿相和赤铁矿晶体间,呈无定形和他晶形,这种结构在一定程度上阻碍了钙铁矿和赤铁矿相的进一步连晶。



钢渣配比 (a) 0%; (b) 2%; (c) 4%; (d) 5%; (e) 6%

图 1 不同钢渣配比条件下烧结矿 SEM 图像

Fig. 1 Scanning Electron Microscope (SEM) images under different steel slag ratios

随着钢渣配加量的增加,烧结矿中 TiO_2 含量逐渐提高,烧结矿中钛元素主要以钙钛矿的形式存在。随着烧结矿中钛的质量分数增加,少量钛迁移至铁酸钙液相中。因此,钙钛矿通常与磁铁矿、赤铁矿相以及复合铁酸钙矿相共存。随着烧结矿中钙钛矿相的增加,矿相不均匀性提升,主要的粘结矿相由复合铁酸钙相逐渐转变为铁酸钙和钙钛矿相。当钢渣配加比例增大至 6% 时,钙钛矿含量增加,阻碍了铁酸钙液相的连晶发展。

2.2.2 钢渣配加量对钒钛烧结矿矿物组成的影响

利用 XRD 对烧结后的五组样品的物相组成进行了鉴定,并利用 Rietveld 量化精修技术对不同钢渣配比条件下烧结矿样品进行物相精修。表 4 为各不同方案下样品的物相组成 XRD 鉴定结果,根据结果分析可知,烧结矿的主要相为磁铁矿、赤铁矿、钙钛矿、铁酸钙、少量钛铁矿以及微量三氧化二钒相。由于钒元素含量过低,其对于烧结过程物

相组成影响极小,且钒元素几乎未与其他金属元素结合形成新的物相,表明在烧结过程中,钒元素并未或极少与其他化学成分发生取代反应。在当前的试验条件下,随着烧结矿 TiO_2 含量的增加,磁铁矿含量减少,赤铁矿略有减少,钙钛矿呈现先减小后升高趋势,钛铁矿含量逐渐升高,铁酸钙相减少。

表 4 烧结矿样品 XRD 定量分析结果
Table 4 XRD quantitative analysis results for sinter samples %

物相	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5
Fe_2O_3	25.42	21.64	31.37	23.62	23.56
Fe_3O_4	28.15	24.37	23.45	24.63	24.20
SFCA	43.09	49.58	41.58	46.48	45.02
Fe_2TiO_4	0.25	0.51	0.86	1.63	1.79
CaTiO_3	2.14	2.04	1.78	1.73	3.64
V_2O_5	0.94	1.87	0.96	1.91	1.80

2.3 钢渣配加量对烧结经济技术指标的影响

2.3.1 钢渣配加量对转鼓强度的影响

烧结矿的转鼓强度是衡量烧结矿冷态强度的重要指标,其代表了烧结矿在转运过程中抗跌落碰撞的能力。针对烧结矿的转鼓强度,对不同钢渣配加量下烧结试验进行分析,如图 2 所示。

通过对 4 组烧结杯试验进行分析,随钢渣配加量增大,烧结矿转鼓强度逐渐升高。钢渣中的 CaO 和 SiO_2 通常以硅酸二钙及硅酸三钙矿物形式存在,铁矿石与钢渣反应形成低熔点液相化合物,增加烧结过程液相量,对烧结矿质量至关重要。液相增多进而融合矿相,改善结构,显著提升烧结矿强度。

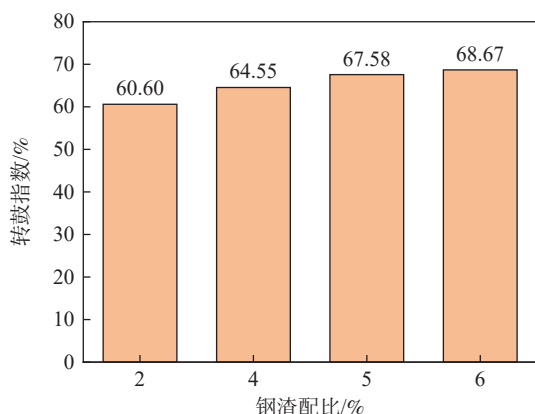


图 2 不同钢渣配比条件下烧结矿转鼓强度

Fig. 2 Tumble index under different steel slag ratios

2.3.2 钢渣配加量对成品率的影响

烧结矿成品率是衡量烧结生产效率的重要依据,针对烧结矿成品率,对不同钢渣配比下的烧结杯试验进行分析,见图 3。

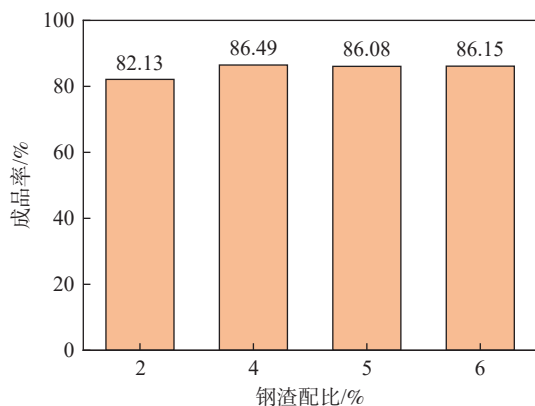


图 3 不同钢渣配比条件下烧结矿成品率

Fig. 3 Yield under different steel slag ratios

通过对 4 组烧结杯试验的成品率进行分析,在不同钢渣配比方案中整体烧结成品率较高,均在

82% 以上。其中,当钢渣配比为 2% 时,烧结杯试验成品率最低为 82.13%。随着钢渣配比增大,当钢渣配比为 4% 时,烧结矿成品率最高为 86.49%,当钢渣配比继续增大时成品率基本保持稳定,该趋势与烧结矿转鼓强度基本保持一致,钢渣配加对于提升钒钛磁铁矿烧结成品率具有一定优化作用。

2.4 钢渣配加量对钒钛烧结矿冶金性能的影响

2.4.1 钢渣配加量对钒钛烧结矿低温还原粉化性能的影响

不同钢渣配比下的烧结矿低温还原粉化指数,如图 4 所示。在相同碱度条件下,随着钢渣含量增加,烧结矿低温还原粉化指数呈现出先升高后降低趋势。整体来看,随着钢渣配加量提升至 5%, $\text{RDI}_{+3.15}$ 指数由 82.90% 升高至 88.82%。结合烧结经济技术指标分析可以看出,随着钢渣配加量的增大,烧结矿中 SiO_2 化学成分含量升高,较多的赤铁矿与 CaO , Al_2O_3 , SiO_2 形成了复合铁酸钙液相,进而有效避免了低温还原粉化过程中的晶格转变,导致烧结矿低温还原粉化性能随着钢渣配加量的增大而逐渐改善。因此根据试验结果分析,在烧结碱度为 2.10 条件下,钢渣配加量为 5% 时,烧结矿低温还原粉化性能最优。

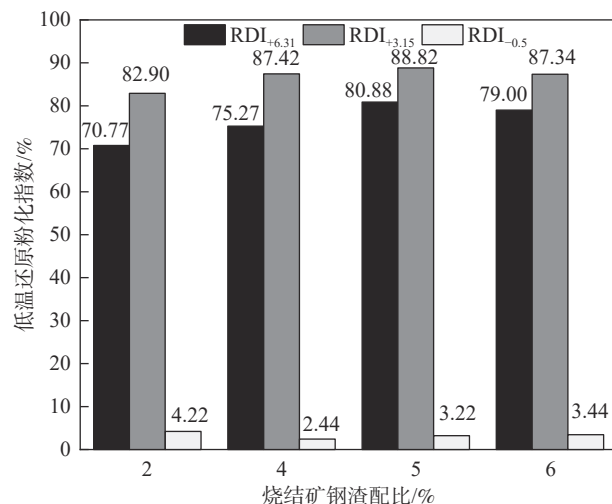


图 4 不同钢渣配比下烧结矿低温还原粉化指数(RDI)

Fig. 4 Low-temperature reduction degradation index (RDI) under different steel slag

2.4.2 钢渣配加量对钒钛烧结矿还原性的影响

如图 5 所示,在相同碱度条件下,钢渣配加量对于烧结矿还原性能的影响较为明显,烧结矿还原性整体呈现出先升高后降低的趋势。随着钢渣配加量增加,烧结矿还原性先由 84.78% 升高至 88.66%,当钢渣配加量为 5% 时出现还原性峰值,随后还原性

逐渐降低。在烧结矿还原性能检测过程中,对几组烧结矿样品进行FeO含量测定,测定结果表明,四组烧结矿FeO含量变化趋势为逐渐降低。随着烧结混合料中钢渣比例的增加,烧结矿石中的铁酸钙液相量增加,有效提高了烧结矿的还原性。然而,当钢渣加入过多时,硅含量的提升导致烧结矿中硅酸盐含量大幅提升,烧结矿石的还原性受到抑制。综上所述,钢渣对于烧结矿还原性有正向影响但存在峰值,当钢渣配加量超过5%后,则会抑制烧结矿的还原性能。

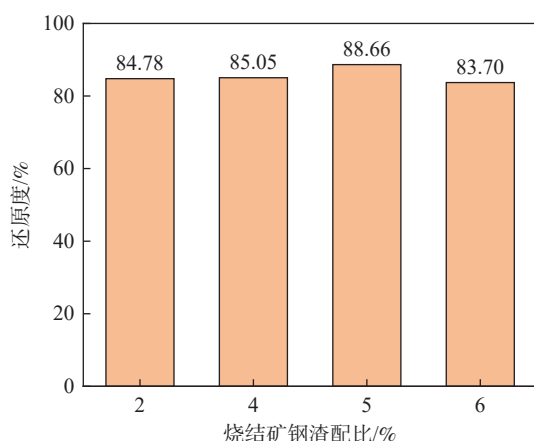


图5 不同钢渣配比下烧结矿还原度指数

Fig. 5 Reduction index (RI) of sintering pot tests under different steel slag ratios

3 结论

基于烧结杯试验结合X射线衍射法和SEM-EDS电子显微镜,研究了不同钢渣配比条件下烧结矿冶金性能和显微结构的变化规律,具体结论如下:

1)随着钢渣配加量的提升,烧结矿铁品位呈逐渐下降趋势。由于钢渣中的磷含量较高,达到2.81%,在烧结过程中难以有效去除,因此随着钢渣配料量的增加,烧结矿中的磷含量也会因磷的富集而逐渐增加。

2)随着烧结矿中钙钛矿相增加,烧结矿中矿相逐渐不均匀化,主要的粘结矿相由复合铁酸钙相转变为铁酸钙及钙钛矿相。当钢渣配加比例进一步增大时,钙钛矿含量进一步增大,对烧结矿强度产生不利影响。

3)钢渣中CaO及SiO₂含量较高,易与原料中赤铁矿、磁铁矿反应生成低熔点液相,随钢渣配加量增大,烧结矿转鼓强度逐渐升高。

4)钢渣配加量为5%时,烧结矿低温还原粉化性能最优。该配比条件下,烧结矿中复合铁酸钙含量较高,优化了烧结矿的还原性;钢渣配加量过大时,硅酸盐物相增加,烧结矿的还原性受到抑制。

参考文献

- [1] Qian Qiang. Experimental study on slag modification of converter steel slag in sinter pot[J]. Sintering and Pelletizing, 2019, 44(4): 67-69.
(钱强. 转炉钢渣烧结杯调渣改性试验研究[J]. 烧结球团, 2019, 44(4): 67-69.)
- [2] Wang Wenshan, Ren Gang, Sun Yanqin, *et al.* Effect of the carbon content on mineral compositions and mineral phase microscopy of vanadium-titanium sinter in Chenggang[J]. Iron and Steel, 2010 (10): 13-17.
(王文山, 任刚, 孙艳芹, 等. 配碳量对承钢钒钛烧结矿矿物组成及显微结构的影响[J]. 钢铁, 2010 (10): 13-17.)
- [3] Xie Yu, Ye Guohua, Zuo Qi, *et al.* New technology of vanadium extraction from vanadium-bearing steel slag[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2019, 40(1): 69-77.
(谢禹, 叶国华, 左琪, 等. 含钒钢渣提钒新工艺研究[J]. 钢铁钒钛, 2019, 40(1): 69-77.)
- [4] Wei Qun, Ma Xiaolan, Zhang Haimin, *et al.* Production practice of sinter operation blending with steel slag in Anyang steel[J]. Henan Metallurgy, 2011, 19(3): 32-34.
(魏群, 马小兰, 张海民, 等. 安钢烧结配用钢渣的生产实践[J]. 河南冶金, 2011, 19(3): 32-34.)
- [5] Cheng Zhengming, An Gang, Dai Feng, *et al.* Study on Shougang Jingtang sintering flux structure optimization and its application[J]. Sintering and Pelletizing, 2016, 41(4): 15-19.
(程峥明, 安钢, 戴峰, 等. 首钢京唐烧结熔剂结构优化研究及应用[J]. 烧结球团, 2016, 41(4): 15-19.)
- [6] Han Fengguang, Qiu Haiyu, Nie Huiyuan, *et al.* Experiment of proportioning bos in sintering production in meishan I & S Co[J]. Sintering and Pelletizing, 2006, 31(5): 15-18.
(韩风光, 邱海雨, 聂慧远, 等. 梅山烧结配加转炉钢渣的试验研究[J]. 烧结球团, 2006, 31(5): 15-18.)
- [7] O'Connor James, Nguyen Thi Bang Tuyen, Honeyands Tom, *et al.* Production, characterisation, utilisation, and beneficial soil application of steel slag: A review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 419: 126478.
- [8] Liu Zhengjian, Niu Lele, Zhang Jianliang, *et al.* Status quo and trend of technology and equipment optimization for sintering granulation in iron and steel enterprises[J]. Iron and Steel, 2021, 56(10): 28-35.
(刘征建, 牛乐乐, 张建良, 等. 钢铁企业烧结制粒工艺与设备优化进展及趋势[J]. 钢铁, 2021, 56(10): 28-35.)
- [9] Liu Peiqiu. Tests to increase the amount of steel slag used in sintering dosing[J]. Meishan Technology, 2012(5): 39-41.
(刘佩秋. 提高烧结配加钢渣用量的试验[J]. 梅山科技, 2012(5): 39-41.)
- [10] Kadyrov A S, Kunaev V A, Georgiadi I V. Prospects for processing of ferrous metallurgical waste based on ArcelorMittal Temirtau experience[J]. Metallurgist, 2018, 62(1-2): 22-28.

- [11] Guo Yuhua, Qie Junmao, Zhang Chunxia, *et al.* Material flow analysis of zinc during the manufacturing process in integrated steel mills in China[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2021, 25(4): 1009-1020.
- [12] Zhang Jianliang, Fu Hongyuan, Liu Yanxiang, *et al.* Review on biomass metallurgy: pretreatment technology, metallurgical mechanism and process design[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2022, 29(6): 1133-1149.
- [13] Wan Xinyuan, Wang Xitang, Wang Zhoufu, *et al.* Preparation of dolomite clinker with steel slag as sintering agent[J]. *Refractories*, 2019, 53(4): 298.
(万新源, 王玺堂, 王周福, 等. 以钢渣为烧结剂制备白云石熟料 [J]. *耐火材料*, 2019, 53(4): 298.)
- [14] Zhao Lijie, Zhang Fang. Comprehensive utilization and development prospect of steel slag resources[J]. *Materials Reports*, 2021, 34(Z2): 319-322.
(赵立杰, 张芳. 钢渣资源综合利用及发展前景展望 [J]. *材料导报*, 2021, 34(Z2): 319-322.)
- [15] Han Shiwan, Wang Luyuan, Zhang Xingyu, *et al.* Synergetic resource utilization of steel slag and sludge and it's research progress[J]. *Chemical Bulletin*, 2023, 86(1): 83-90.
(韩世旺, 王鲁元, 张兴宇, 等. 钢渣与污泥协同资源化研究进展 [J]. *化学通报*, 2023, 86(1): 83-90.)
- [16] Zhang Jianliang, Kan Yonghai, Zhang Shijun, *et al.* Application of full active lime intensified sintering technology in ultra thick layer[J]. *Iron and Steel*, 2020, 55(8): 56-61.
(张建良, 阚永海, 张士军, 等. 全活性石灰强化烧结技术在超厚料层中的应用 [J]. *钢铁*, 2020, 55(8): 56-61.)
- [17] Liu Zhengjian, Li Sida, Zhang Jianliang, *et al.* Production practice and development trend of iron ore sinter with ultra-high basicity[J]. *Iron and Steel*, 2022, 57(1): 39-47.
(刘征建, 李思达, 张建良, 等. 国内超高碱度烧结矿生产实践及发展趋势 [J]. *钢铁*, 2022, 57(1): 39-47.)
- [18] Ma Yunfei, Li Qing, Zhang Jianliang, *et al.* Synergistic optimization model of sintering ore allocation cost and energy consumption based on PSO-VIKOR[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(11): 1868-1877.
(马云飞, 李擎, 张建良, 等. 基于 PSO-VIKOR 的烧结配矿成本与能耗协同优化模型 [J]. *工程科学学报*, 2023, 45(11): 1868-1877.)
- [19] Cao Liu, Shen Weiguo, Huang Jiaqi, *et al.* Process to utilize crushed steel slag in cement industry directly: Multi-phased clinker sintering technology[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 217: 520-529.
- [20] Wang Yanan, Zhao Deqiang, Li Zhengwang, *et al.* Mineral phase transformation and properties of steel slag in process of melting and sintering[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 42(5): 1731-1739.
(王亚楠, 赵德强, 李正旺, 等. 钢渣烧结过程的矿物相转变及性能研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(5): 1731-1739.)
- [21] Zhang Zhaohui, Liao Jielong, Ju Jiantao, *et al.* Treatment process and utilization technology of steel slag in china and abroad[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2013, 25(7): 1-4.
(张朝晖, 廖杰龙, 巨建涛, 等. 钢渣处理工艺与国内外钢渣利用技术 [J]. *钢铁研究学报*, 2013, 25(7): 1-4.)
- [22] Li Bing, Tang Biao, Ma Zhen, *et al.* Physical and chemical properties of steel slag and utilization technology of steel slag at home and abroad[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 242(3): 32012.
- [23] Xie Hao, Li Gang, Lü Xuewei, *et al.* Effect of preformed calcium ferrite addition on sintering behavior of vanadium titanomagnetite[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2023, 44(4): 117-124.
(谢皓, 李刚, 吕学伟, 等. 预制铁酸钙技术对钒钛磁铁矿烧结行为的影响 [J]. *钢铁钒钛*, 2023, 44(4): 117-124.)
- [24] Du Chuanming, Yu Yaohui, Yuan Lei, *et al.* Research status and development trend of phosphorus separation and recovery from steelmaking slag[J]. *Iron and Steel*, 2020, 55(12): 1-9.
(杜传明, 于耀辉, 袁磊, 等. 钢渣中磷分离及回收的研究现状和发展趋势 [J]. *钢铁*, 2020, 55(12): 1-9.)
- [25] Zhou Chaogang, Yang Huize, Ai Liqun, *et al.* Research status and prospect of recycling technology of converter slag containing phosphorus[J]. *Iron and Steel*, 2021, 56(2): 22.
(周朝刚, 杨会泽, 艾立群, 等. 转炉含磷钢渣循环利用技术的研究现状及展望 [J]. *钢铁*, 2021, 56(2): 22.)
- [26] Hao Ning, Tian Zhihong, Jia Yanan, *et al.* Effect of CaO/SiO₂ on phase composition and content of steel slag[J]. *China Metallurgy*, 2021, 31(4): 84-90.
(郝宁, 田志红, 贾雅楠, 等. CaO/SiO₂ 对钢渣平衡物相的组成及含量的影响 [J]. *中国冶金*, 2021, 31(4): 84-90.)
- [27] Zhang Dayong. Discussion on the measures of comprehensive utilisation of iron-containing wastes in iron and steel smelting[J]. *Science, Technology and Innovation*, 2018(27): 195-196.
(张大勇. 钢铁冶炼中综合利用含铁废料的措施探讨 [J]. *科学技术创新*, 2018(27): 195-196.)
- [28] Hu Peiwei, Xie Zhicheng, Hu Bing, *et al.* Comprehensive utilization status and development of vanadium-bearing solid wastes[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2020, 40(5): 144-152.
(胡佩伟, 谢志诚, 胡兵, 等. 含钒固废综合利用现状及发展 [J]. *矿产保护与利用*, 2020, 40(5): 144-152.)
- [29] Liu Yang, Zhang Chunxia. Comprehensive utilization situation and development trend of iron and steel slag in china and abroad[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019, (2): 21-25.
(刘洋, 张春霞. 钢铁渣的综合利用现状及发展趋势 [J]. *矿产综合利用*, 2019, (2): 21-25.)
- [30] Qie Junmao, Zhang Chunxia, Li Xiuping, *et al.* Lower SiO₂ emissions in the sintering process utilizing the difference of sulphur contents of iron ores[J]. *ISIJ International*, The Iron and Steel Institute of Japan, 2017, 57(12): 2115-2123.
- [31] Han Xiuli, Wang Haifeng, Liu Lina, *et al.* Influence of basicity on microstructure of vanadium-titanium magnetite sinter[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2009, 30(3): 56-60.
(韩秀丽, 王海峰, 刘丽娜, 等. 碱度对钒钛烧结矿显微结构的影响 [J]. *钢铁钒钛*, 2009, 30(3): 56-60.)