

烧结配用钢渣尾渣的研究

周仙霖¹, 张 露¹, 陈铁军¹, 康凌晨², 刘 瑛², 万军营¹, 胡 钺¹, 罗艳红¹

(1. 武汉科技大学 a. 资源与环境工程学院; b. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430081; 2. 武钢有限技术中心, 湖北 武汉 430080)

摘要: 钢渣未列入最新水泥生产混合材备选原料,亟需寻找新的大宗利用方式。钢渣中 CaO 等碱性氧化物含量较高,可利用钢渣代替部分烧结熔剂,通过对烧结原材料和炉渣性质的研究,在实验室对配加不同比例的钢渣尾渣进行了烧结杯试验,并对其机理进行了分析。结果表明:当钢渣尾渣配入量由 0 提高到 2% 时,对烧结矿的软熔性能影响不大,还原度和低温粉化性能得到增强;并且铁酸钙的含量得到了进一步的改善,且具有较好的强度和较好的还原性能,在烧结过程中,铁酸钙和磁铁矿之间存在着相互交错的网状结构,可提高烧结矿的强度;钢渣尾渣中的 CaO 参与了液相反应,并且液相量优于 Ca(OH)₂ 组,由于钢渣尾渣含有 SiO₂,当 SiO₂ 含量增加,橄榄石类的低熔点化合物相应增加,进而导致流动性增强。根据烧结杯试验,确定最佳工艺参数:钢渣尾渣配比为 2%,粒度控制在 < 3 mm。

关键词: 钢渣尾渣; 烧结; 冶金性能; 液相流动性; 矿相结构

中图分类号: TF046.4; X757

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)05-0109-08

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.05.085

Research on utilization of steel slag tailings in sintering

ZHOU Xianlin¹, ZHANG Lu¹, CHEN Tiejun¹, KANG Lingchen², LIU Ying²,
WAN Junying¹, HU Yue¹, LUO Yanhong¹

(1. Wuhan University of Science and Technology a. School of Resources and Environmental Engineering; b. Hubei Province Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources, Wuhan 430081, Hubei, China; 2. Technology Center of Wuhan Iron and Steel Co., Ltd., Wuhan 430080, Hubei, China)

Abstract: Steel slag is not included in the latest alternative raw materials for cement production mixtures, and it is urgent to find a new way of bulk utilization. The content of alkaline oxides such as CaO in steel slag is high, and steel slag can be used to replace part of the sintering flux. Through the study of the properties of sintered raw materials and slag, the sintering cup test is carried out on the steel slag tailings with different proportions in the laboratory, and its mechanism is analyzed. The results show that when the amount of steel slag tailings is increased from 0 to 2%, it has little effect on the soft melting properties of sinter, and the reduction degree and low-temperature pulverization are enhanced. And the content of calcium ferrite has been further improved, and has good strength and good reducing performance. During the sintering process, there is an interlaced network structure between calcium ferrite and magnetite, which improves the strength of the sinter. The CaO in steel slag tailings participates in the liquid phase reaction, and the liquid phase amount is better than that of Ca(OH)₂ group, because the steel slag tailings contain SiO₂, when the SiO₂ content increases, the low melting point compounds of olivine increase accordingly, which leads to the enhancement of fluidity. According to the sintering cup test,

收稿日期: 2024-08-28; 修回日期: 2024-12-16

基金项目: 中国宝武低碳冶金创新基金资助项目(BWLCF202107); 湖北省教育厅科学研究计划指导性项目(B2022014)

作者简介: 张 露(1999—),女,硕士研究生,从事烧结球团方面的研究。

通信作者: 周仙霖(1986—),男,副教授,从事资源综合利用及铁矿造块方向的研究。

the optimal process parameters are determined to be that the steel slag tailings ratio is 2%, and the particle size of steel slag tailings is controlled at less than 3 mm, and the sintering performance reaches the best.

Key words: steel slag tailings; sintering; metallurgical properties; liquid phase fluidity; mineral phase structure

钢渣是钢铁生产过程中的副产物,通常包含大量的金属氧化物和其他成分。在传统的钢铁生产过程中,钢渣被直接排放或堆放,这样既浪费了大量的土地,又有可能引起环境的污染^[1-2]。随着 2023 年 11 月 27 日《通用硅酸盐水泥》(GB175—2023)(以下简称:2023 版)正式发布,将替代《通用硅酸盐水泥》(GB175—2007)版,于 2024 年 6 月 1 日起实施,2023 版中钢渣未列入水泥生产混合材备选原料,大量水泥生产企业不再将钢渣用于水泥粉磨加工,导致水泥行业对钢渣大宗消纳利用能力锐减,钢渣尾渣利用在全行业内问题突出。与此同时,钢铁企业在能源节约、减少排放以及环境保护等方面的需求日益增加的情况下,降低成本、提高效益的压力也越来越大,因此钢铁行业的发展形势也越来越严峻。其中,钢产量中的炼铁炉渣约占 25%~30%,炼钢炉渣约占 12%~15%^[3-5],钢铁企业对各种炉渣的利用情况各不相同。目前,高炉渣基本上都得到了充分的利用,利用率达到了 90%。但是,钢渣的利用率还很低,只有 30%~40%,大部分都是随意堆放和排放^[6-8]。如何合理地使用钢渣,对促进我国钢铁产业的健康发展具有重要意义。

钢渣中含有大量的 CaO 等碱性氧化物,用其替代部分冶金用烧结助熔剂,既能减少生石灰、石灰石、白云石和萤石等烧结熔剂的用量,又能从炉渣中提取出一些有用组分,如 FeO、MgO

等^[9-10]。这样不仅可以实现资源的充分利用,而且可以减少对环境的污染,同时也可以减少烧结的生产成本,并且由于钢渣本身就是一种熟料,所以大部分的钢铁企业都可以采用钢渣作为熔剂来使用。目前,国内首钢、武钢、安钢、太钢等钢厂已将钢渣回收利用,并获得了较好的经济效益。但是,由于国内各烧结厂对原料条件及生产过程的要求不尽相同,钢渣在烧结厂的使用情况及添加钢渣对烧结矿的冶金性能及烧结经济技术指标的影响也不尽相同^[11-15],而钢渣含 S、P 较高,加入烧结会使 P 在铁水中富集,难以去除,既限制了其应用,也影响后续冶炼^[16]。

因此,本课题结合尾渣尺寸,通过对钢渣尾渣的烧结试验,探讨掺入钢渣尾渣后的烧结技术经济指标,为优化其烧结配矿以及工业化高效利用提供了一定的理论依据。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验中所用滚筒钢渣尾渣取自某钢厂烧结车间滚筒法磁选后的尾渣,A~H 铁精矿均取自于某钢厂烧结车间。原料主要化学成分与烧损如表 1 所示。由表 1 可知:钢渣尾渣铁品位为 18.07%;SiO₂、CaO 质量分数较高,分别为 13.05% 与 44.87%;P 质量分数偏高,为 1.05%。对钢渣尾渣进行破碎筛分,各粒级主要化学成分见表 2。从

表 1 原料主要化学成分与烧损(质量分数)

Table 1 Main chemical composition and losses on ignition of raw materials

%

原料名称	TFe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P	烧损
A 矿	64.75	2.34	0.07	0.14	1.181	0.008	0.076	3.40
B 矿	64.41	4.16	0.02	0.11	1.450	0.012	0.049	1.50
C 矿	61.05	3.97	0.05	0.11	2.166	0.018	0.083	6.20
D 矿	57.19	5.48	0.07	0.11	1.739	0.008	0.073	11.10
E 矿	58.06	5.70	0.02	0.14	2.442	0.020	0.070	8.70
F 矿	65.82	4.64	0.08	0.06	0.362	0.009	0.017	0.50
G 矿	56.89	12.42	0.23	0.31	1.400	0.011	0.101	4.60
H 矿	61.96	6.60	0.31	0.11	1.030	—	0.060	3.00
钢渣尾渣	18.07	13.05	1.49	44.89	5.770	0.040	1.050	4.10

表2可知,钢渣尾渣破碎后, >3 mm粒级的铁品位和CaO质量分数均高于<3 mm以下粒级,并且略低于没有破碎之前的钢渣尾渣。

表2 钢渣尾渣各粒度主要化学成分(质量分数)

化学成分	>5 mm	[5,3] mm	[3,1] mm	(1,0] mm
TFe	17.08	17.29	16.66	15.31
CaO	44.55	43.87	43.13	43.24

1.2 试验设备

试验主要设备:圆筒混料机、点火装置、抽风系统、落下装置、振动筛及转鼓装置。烧结杯试验流程如图1所示。

1.3 试验方法

1.3.1 烧结试验

试验采用常规烧结方法,点火温度为 $(1\ 050 \pm 50)$ °C,点火时间为1.5 min,点火负压为-4.6 MPa,烧结负压为-12 MPa。

烧结配比参照某烧结厂现场生产数据,在保证烧结铁品位、碱度等不变的条件下配入钢渣尾渣,配比范围在0~2%,主要是因为P含量的限制,具体配比见表3。同时,根据该烧结杯试验结果,确定最佳钢渣尾渣配入量,进行钢渣尾渣粒度对烧结性能的影响试验。将每种原料在一混圆筒混料机中进行预混,然后加到二混圆筒混料机中进行混匀,混合制粒所需的时间为6 min,在搅拌期间喷入适量的水将其湿润,最后将其含水量控制在 $6.5\% \pm 0.5\%$;再把原料放入尺寸为

$\varnothing 250\text{ mm} \times 800\text{ mm}$ 的烧结杯里,把层厚控制在800 mm左右,再把事先在烧结杯底铺上大约1.5 kg的烧结矿作为铺底料,装料完毕后,按上述烧结参数进行烧结试验,试验过程中记录烧结相关技术参数^[17]。

烧结结束后,检测每组烧结矿粒度组成、烧结性能、冶金性能等指标,检测标准:①粒度及粒度组成测试参照标准ISO4701:2019;②落下强度测试参照标准YB/T 4606—2017;③转鼓强度测试参照标准GB/T 24531—2009;④还原性检测参照标准GB/T 13241—2017;⑤低温还原粉化性检测参照标准GB/T 13242—2017;⑥熔滴性能检测参照标准GB/T 34211—2017。

1.3.2 液相流动性试验方法

一般用液相流动性指数来表示铁矿石的液相流动性,流动性越强,说明液相流动性指数越大。将混匀矿粉分别与钢渣尾渣和分析纯 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 试剂($<0.075\text{ mm}$)按固定碱度 $R_2 = 3.0$ 配矿后称取0.8 g在一定的压力下压制成直径为8 mm的团块,焙烧温度设定为1 280 °C,具体操作参照文献[18]进行。

2 试验结果及分析

2.1 钢渣尾渣对制粒的影响

钢渣尾渣对比对混合料粒度组成、水分及透气性指数的影响如表4所示。由表4可知,当混合料水分在6.5%~7.0%范围内波动时,随着钢渣配

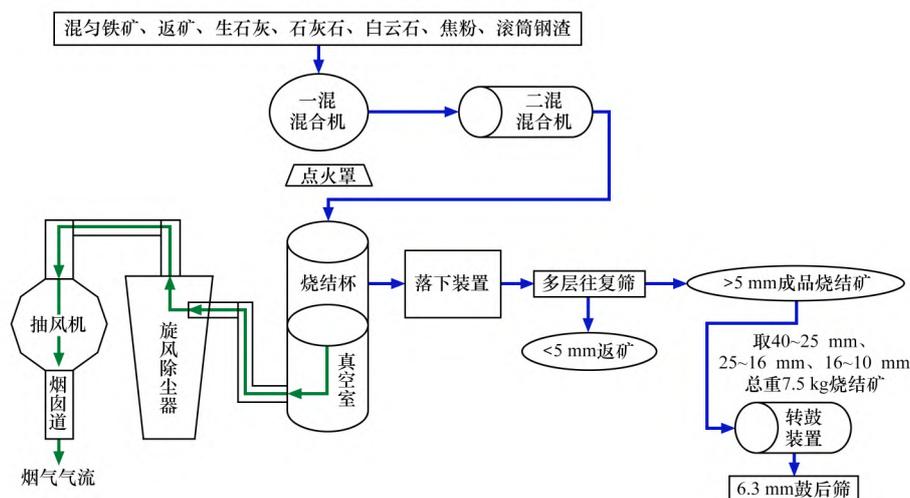


图1 烧结试验流程

Fig. 1 Sintering test flowchart

表 3 不同钢渣尾渣配比下的烧结配矿方案(质量分数)

Table 3 Sintering ore blending scheme under different steel slag tailings ratio

钢渣尾渣	A 矿	B 矿	C 矿	D 矿	E 矿	F 矿	G 矿	H 矿
0	9.6	9.0	19.0	25.0	13.7	8.0	5.7	10.0
0.5	9.6	9.0	19.2	25.0	13.7	8.0	5.0	10.0
1.0	9.6	9.0	19.4	25.0	13.7	8.0	4.3	10.0
1.5	9.6	9.0	19.6	25.0	13.7	8.0	3.6	10.0
2.0	9.6	9.0	19.8	25.0	13.7	8.0	2.9	10.0

表 4 钢渣尾渣比对混合料粒度组成、水分及透气性指数的影响

Table 4 Effect of steel slag tailings ratio on particle size composition, moisture and air permeability index of mixture

配比	质量分数/%			水分	透气性指数/ JPU
	>1.0 mm	[1.0,0.5] mm	(0.5,0] mm		
0	77.2	22.5	0.3	6.59	0.858
0.5	76.8	22.9	0.2	6.72	0.806
1.0	80.4	19.5	0.0	6.96	0.787
1.5	81.3	18.6	0.1	6.44	0.745
2.0	69.5	30.2	0.3	6.78	0.709

比从 0 提高至 2.0%，混合料透气性指数下降。

2.2 钢渣尾渣比对烧结性能的影响

钢渣尾渣比对烧结性能的影响如图 2 所示。从图 2 可以看出，随着钢渣尾渣配入量的增加，成品率和转鼓强度都呈上升趋势，在钢渣尾渣配入量为 2% 时达到最大。当钢渣尾渣配入量由 0 提高到 2% 时，烧结矿成品率由 67.9% 提高到 77.6%，转鼓强度由 56% 提高到 59.9%，利用系数由 1.06 t/(m²·h) 略微降低到 1.05 t/(m²·h)，垂直烧结速度由 18.46 mm/min 降低至 15.27 mm/min，固体燃料消耗由 78.36 kg/t 降低到 67.97 kg/t。钢渣尾渣因富含 CaO，其物相在烧结中易形成低熔点化合物，增加液相，改善结构，从而提升烧结矿强度与产量，但是过多的液相将加宽燃烧区、恶化透气性，导致垂直烧结速率与利用系数下降^[19]。同时，固体燃料消耗呈先增大后减小的趋势。其主要原因在于钢渣尾渣中铁的氧化释热，使得含碳盐类在烧结过程中的释热下降，从而降低了烧结过程中的固体燃料消耗^[16]。

为了验证滚筒钢渣中的成分是否能使液相增多，实验室设计了一组类似液相流动性的检测对比，分别用钢渣尾渣和 Ca(OH)₂ 调节混匀矿二元碱度(R=3)，试验结果如表 5 所示。由表 5 可以看出，钢渣尾渣中的 CaO 参与了液相反应，并且

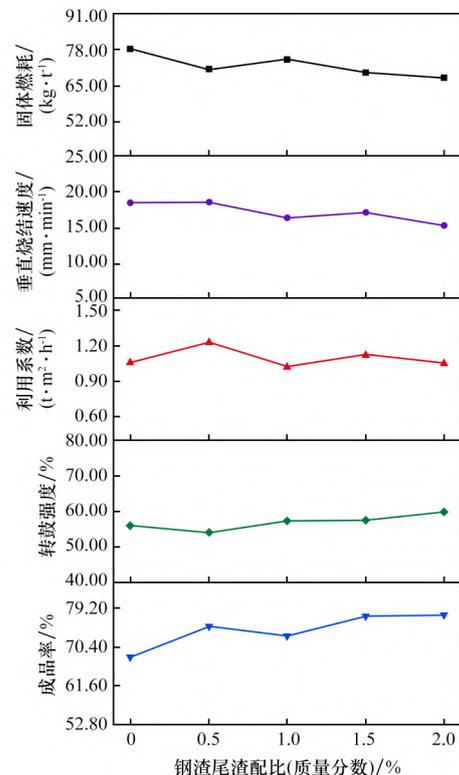


图 2 钢渣尾渣比对烧结性能的影响

Fig. 2 Effect of steel slag tailings ratio on sintering performance

优于 Ca(OH)₂。这是因为在相同条件下，利用滚筒钢渣调节碱度时，由于其含有 SiO₂，当 SiO₂ 含量增加，橄榄石中的低熔点成分也相应增多，从

而提高了流体的流动性;随着烧结温度的升高,液相过热度的增加,从而使液相黏度下降^[20],验证了烧结杯的试验结果。

表5 液相流动性指数

Table 5 Liquid phase fluidity index

试样	液相流动性指数(1 280 ℃)			
	1	2	3	均值
混匀铁矿+钢渣尾渣	7.20	6.85	6.40	6.82
混匀铁矿+Ca(OH) ₂	3.76	3.85	3.74	3.78

2.3 钢渣尾渣粒度对烧结性能的影响

钢渣尾渣粒度对烧结性能的影响见图3。从图3可以看出,随着钢渣粒度的增大,烧结矿成品率、利用系数、垂直烧结速度、转鼓强度均呈先增加后减少的趋势,在钢渣尾渣粒度<3 mm时,达最大值;固体燃料消耗整体变化不大,在钢渣尾渣<3 mm时,固体燃料最低。当钢渣尾渣粒度由<1 mm提高到<3 mm时,烧结矿成品率由81.1%提高到84.9%,转鼓强度由55.3%提高到64.0%,利用系数由1.16 t/(m²·h)增加到1.32 t/(m²·h),固体燃料消耗由58.74 kg/t降低

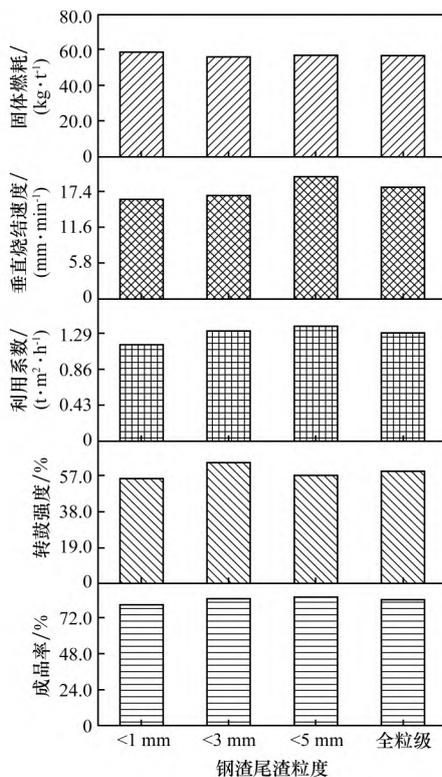


图3 钢渣尾渣粒度对烧结性能的影响

Fig. 3 Effect of particle size of steel slag tailings on sintering performance

到55.99 kg/t,垂直烧结速度由16.05 mm/min提高到16.80 mm/min。

2.4 烧结矿物相组成分析

添加不同配比钢渣尾渣烧结矿相图分析如图4所示。由图4可知,无钢渣尾渣的烧结矿以磁铁矿和硅酸二钙为主,铁酸钙以斑状为主,磁铁矿以自形晶、半自形晶为主,与铁酸钙有明显的界面[图4(a)、(b)];在烧结矿中加入1%的钢渣尾渣,其主要物相为赤铁矿、磁铁矿、硅酸二钙、铁酸钙[图4(c)、(d)],与图4(a)、(b)相比,铁酸钙的含量明显增多,且以板条状为主;随着钢渣尾渣掺量继续提高至1.5%,铁酸钙的数量进一步增多,以针状为主,并与Fe₃O₄形成交错的溶蚀型组织[图4(e)、(f)],从而提高了其强度;当钢渣加入量增加到2%时,铁酸钙的含量得到了进一步改善,且具有较好的强度和还原性能,在烧结过程中,铁酸钙和磁铁矿之间存在着相互交错的网状结构[图4(g)、(h)],可以有效地提高烧结矿的强度。

2.5 钢渣尾渣对烧结矿化学成分及冶金性能的影响

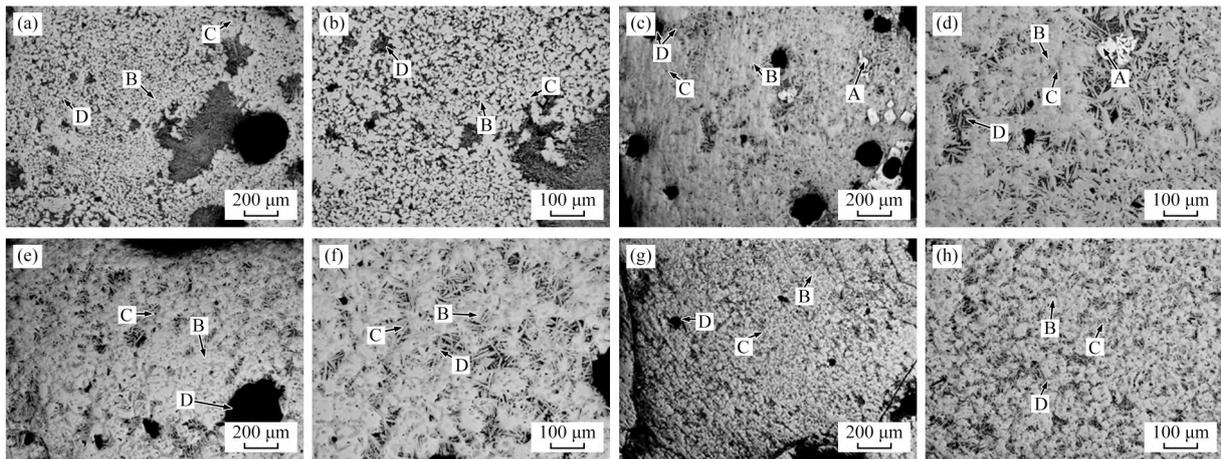
在钢渣尾渣配加量为0~2%的烧结杯试验中,综合分析表明,随着钢渣尾渣掺入比例的提高,烧结矿的成品率与转鼓强度均呈现上升趋势,其中,配加质量分数为2%的钢渣尾渣时,各项性能表现较优。受限于烧结矿中磷元素含量的要求,故本研究仅对钢渣尾渣配入量不超过2%的烧结条件进行了试验,并对比了添加2%钢渣尾渣对烧结矿成分和冶金性能的影响。

2.5.1 化学成分

不同钢渣尾渣配比烧结矿主要化学成分见表6。从表6可知:当钢渣尾渣配入量为0时,w(TFe)为56.44%,w(P)为0.10038%;当配入量为2%时,烧结矿w(TFe)降低到55.09%,w(P)增加到0.11848%。这是由于整体原料碱度保持不变,石灰石配入量减少,烧结后残存率增高,导致烧结矿铁品位降低^[21],而钢渣中的w(P)高达1.05%,在烧结过程中很难脱除,从而导致烧结矿中的w(P)增加。

2.5.2 冶金性能

钢渣尾渣对烧结矿还原性测定结果见表7。



钢渣尾渣配比(质量分数) 1%: (a)、(b) 0; (c)、(d) 1; (e)、(f) 1.5; (g)、(h) 2

A—赤铁矿; B—铁酸钙; C—磁铁矿; D—硅酸二钙、孔洞。

图 4 添加不同配比钢渣尾渣烧结矿相分析

Fig. 4 Sinter phase analysis of sinter with different proportions of drum tailings added

表 6 不同钢渣尾渣配比烧结矿主要化学成分(质量分数)

Table 6 Main chemical composition of sinter with varying proportions of steel slag tailings %

钢渣尾渣配比	TFe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Zn	Mn	P	S
0	56.44	8.04	5.706	2.023	9.77	1.44	0.15	0.246	0.100 38	0.015 6
2	55.09	7.90	5.683	2.049	9.97	1.47	0.15	0.268	0.118 48	0.016 2

由表 7 可知: 当钢渣尾渣配入量为 0 时, 烧结矿的还原度为 78.48%, 低温还原粉化指数 (>3.15 mm) 为 59.38%; 当配入量为 2% 时, 烧结矿的还原度提高至 81.19%, 低温还原粉化指数 (>3.15 mm) 提高到 61.38%。其原因在于, 在添加钢渣尾渣过程中, MgO 的添加能有效地抑制 Fe₃O₄ 对 Fe₂O₃ 的氧化, 从而减少 Fe₂O₃ 的含量, 抑制了由于还原过程中赤铁矿形貌转变造成的粉化^[22], 从而使烧结矿低温还原粉化指数 (>3.15 mm) 增大。

表 7 不同钢渣尾渣配比烧结矿还原性测定结果

Table 7 Determination results of sinter reducibility

钢渣配比 (质量分数) 1%	还原 度 1%	低温还原粉化(质量分数) 1%		
		>6.3 mm	>3.15 mm	<0.5 mm
0	78.48	28.47	59.38	9.99
2	81.19	28.15	61.38	9.27

钢渣尾渣成品烧结矿软熔滴落性能测定结果见表 8。从表 8 试验结果可知, 在烧结中配入 2% 的钢渣尾渣, 对成品烧结矿软熔滴落性能的影响不大, 软化区间基本都维持在 67~78℃。

表 8 不同钢渣尾渣配比成品烧结矿软熔滴落性能

Table 8 Soft melting dripping performance of finished sinter with different proportions of drum tailings added

钢渣配比 (质量分数) 1%	温度/℃			
	软化 开始温度	软化 终了温度	软化 区间	融滴 温度
0	1 230	1 300	70	>1 520
2.0	1 237	1 307	70	>1 520

3 结 论

(1) 在 0~2% 范围内配加钢渣尾渣返烧结进行利用, 不会对烧结性能指标造成不利影响, 反而会提高其成品率和转鼓强度。当钢渣尾渣配入质量分数由 0 提高到 2% 时, 烧结矿成品率由 67.9% 提高到 77.6%, 转鼓强度由 56% 提高到 59.9%。

(2) 在钢渣尾渣配比为 2% 时, 钢渣尾渣粒度控制在 <3 mm 时, 烧结矿成品率由 81.10% 提高到 84.90%, 转鼓强度由 55.30% 提高到 64.00%, 利用系数由 1.16 t/(m²·h) 增加到 1.32 t/(m²·h), 固

体燃料消耗由 58.74 kg/t 降低到 55.99 kg/t, 垂直烧结速度由 16.05 mm/min 提高到 16.80 mm/min。

(3) 烧结配入钢渣尾渣后, 铁酸钙含量进一步增加, 且以强度及还原性较好的针状形式存在, 烧结矿强度较高, 同时对还原度和低温还原粉化性能都有所改善。

参考文献:

- [1] 石建红. 冶金固废钢渣综合利用研究[J]. 节能与环保, 2023(4): 53-55.
SHI Jianhong. Study on comprehensive utilization of metallurgical solid steel slag [J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2023(4): 53-55.
- [2] GAO Wenhao, ZHOU Wentao, LÜ Xianjun, et al. Comprehensive utilization of steel slag: A review [J]. Powder Technology, 2023, 422: 118449.
- [3] 高艳杰, 郜建全, 彭军, 等. 钢渣的处理工艺和综合利用[J]. 中国铸造装备与技术, 2023, 58(5): 39-45.
GAO Yanjie, GAO Jianquan, PENG Jun, et al. Treatment process and comprehensive utilization of steel slag [J]. China Foundry Machinery & Technology, 2023, 58(5): 39-45.
- [4] 熊四川, 梁月华. 钢渣在土木工程中综合利用研究综述[J]. 四川建材, 2023, 49(2): 24-26.
XIONG Yunchuan, LIANG Yuehua. Review on comprehensive utilization of steel slag in civil engineering [J]. Sichuan Building Materials, 2023, 49(2): 24-26.
- [5] 任旭, 王会刚, 吴跃东, 等. “双碳”目标下钢渣处理及资源化利用探讨[J]. 环境工程, 2022, 40(8): 220-224.
REN Xu, WANG Huigang, WU Yuedong, et al. Discussion on steel slag treatment and resource utilization under carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(8): 220-224.
- [6] 陈振中. 钢渣利用现状及回收工艺研究[J]. 四川冶金, 2022, 44(3): 33-35.
CHEN Zhenzhong. Research on utilization status and recover process of steel slag [J]. Sichuan Metallurgy, 2022, 44(3): 33-35.
- [7] YU Yaohui, DU Chuanming. A review on the P enrichment and recovery from steelmaking slag: Towards a sustainable P supply and comprehensive utilization of industrial solid wastes [J]. Science of The Total Environment, 2023, 891: 164578.
- [8] 王新凤. 钢渣处理与综合利用探析[J]. 低碳世界, 2021, 11(6): 305-306.
WANG Xinfeng. Discussion on treatment and comprehensive utilization of steel slag [J]. Low Carbon World, 2021, 11(6): 305-306.
- [9] 袁洁, 姚嘉斌, 朱伟中, 等. 酒钢转炉钢渣用于烧结的试验研究[J]. 甘肃冶金, 2018, 40(1): 4-8.
YUAN Jie, YAO Jiabin, ZHU Weizhong, et al. Experiment study on converter steel slags of JISC used to sinter [J]. Gansu Metallurgy, 2018, 40(1): 4-8.
- [10] 孟飞, 刘清才, 朱广太, 等. 烧结中使用钢渣磁选尾渣替代部分烧结熔剂的实验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(1): 31-38.
MENG Fei, LIU Qingcai, ZHU Guangtai, et al. Experimental study on application of steel slag magnetic tailings replacing part of sintering flux during sintering [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(1): 31-38.
- [11] 钱强. 低品位钢渣磁选粉在烧结工艺中的应用[J]. 烧结球团, 2018, 43(3): 43-46.
QIAN Qiang. Application of low grade steel slag magnetic separation powder in sintering process [J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(3): 43-46.
- [12] 姚娜, 兴超. 转炉炉渣配比对烧结矿性能的影响[J]. 山西冶金, 2024, 47(3): 3-5.
YAO Na, XING Chao. Effect of converter slag ratio on sinter properties [J]. Shanxi Metallurgy, 2024, 47(3): 3-5.
- [13] 华旭军. 国内某钢厂烧结配加粒化钢渣的工业实践[J]. 中国冶金, 2016, 26(1): 35-38.
HUA Xujun. Industrial practice of sintering with addition of granulated slag at a steel plant [J]. China Metallurgy, 2016, 26(1): 35-38.
- [14] 于明兴, 孙莹, 刘敬东, 等. 钢渣返烧结使用生产实践[J]. 中国资源综合利用, 2011, 29(9): 25-26.
YU Mingxing, SUN Ying, LIU Jingdong, et al. Sintering production by proportioning of slag [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2011, 29(9): 25-26.
- [15] 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.
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.
- [16] 朱广太. 钢渣磁选分离及尾渣用于烧结工艺研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
ZHU Guangtai. Study on magnetic separation of steel slag and sintering process of tailings [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [17] 胡梦杰, 陈铁军, 潘料庭, 等. 分流制粒协同燃料分加强化红土镍矿烧结试验 [J]. 钢铁, 2022, 57(6): 12-21.
HU Mengjie, CHEN Tiejun, PAN Liaoting, et al. Experiment on strengthening sintering performance of laterite nickel ore by separated granulating and separate fuel adding [J]. Iron & Steel, 2022, 57(6): 12-21.
- [18] 张露, 周仙霖, 罗艳红, 等. 钢渣尾渣对烧结成矿的影响机制 [J]. 钢铁, 2025, 60(3): 178-186.
ZHANG Lu, ZHOU Xianlin, LUO Yanhong, et al. Influence mechanism of steel slag tailings on sintering mineralization [J]. Iron & Steel, 2025, 60(3): 178-186.
- [19] 许斌, 常亮亮, 姜涛, 等. 合理垂直烧结速度的研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2007, 38(2): 245-250.
XU Bin, CHANG Liangliang, JIANG Tao, et al. Research of rational vertical sintering speed [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2007, 38(2): 245-250.
- [20] 吴胜利, 贝纪承, 朱娟, 等. 化学成分对铁酸盐烧结液相流动性的影响 [J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(9): 7-13.
WU Shengli, BEI Jicheng, ZHU Juan, et al. Effects of chemical composition on the fluidity of liquid phase in ferrite sintering [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2015, 27(9): 7-13.
- [21] 李青松, 张念炳. 恒定碱度条件下生石灰配比对烧结矿强度的影响研究 [J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2009, 27(1): 102-105.
LI Qingsong, ZHANG Nianbing. Study on the factors influencing sinter strength through adding different quicklime under conditions of constant alkalinity [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2009, 27(1): 102-105.
- [22] 郭玉峰, 郭兴敏. MgO 对铁矿石烧结过程中二次赤铁矿形成的影响 [J]. 钢铁研究学报, 2017, 29(3): 185-190.
GUO Yufeng, GUO Xingmin. Effect of MgO on formation of secondary hematite in sintering process of iron ores [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2017, 29(3): 185-190.

广 告 目 次

封面	湖南中冶长天重工科技有限公司	前彩 18-19	湖南中冶长天重工科技有限公司
封二	襄阳中和机电技术有限公司	前彩 20-21	北京顺泰克科技有限公司
封三	《烧结球团》杂志征订启事	前彩 22-23	唐山助纲炉料有限公司
封底	河北同冶冶金科技有限责任公司	前彩 24	焦作市迈科冶金机械有限公司
前彩 1	湖南宏德陶瓷科技有限公司	前彩 25	成都利君实业股份有限公司
前彩 2-3	鞍山市昱昊机械设备有限公司	前彩 26-27	湖南中冶长天节能环保技术有限公司
前彩 4-5	湖南德尚源耐磨工业有限公司	前彩 28-29	北京金都泰拓冶金技术研究有限公司
前彩 6	秦皇岛秦冶重工有限公司	前彩 30	江阴市创裕机械有限公司
前彩 7	秦冶工程技术(北京)有限责任公司	前彩 31	江苏鑫华能环保工程股份有限公司
前彩 8	长沙天为华信环保装备有限公司	前彩 32	厦门川亿机械设备有限公司
前彩 9	罗迪格(北京)机械设备有限公司	前彩 33	SEW-传动设备(天津)有限公司
前彩 10-11	中冶长天(长沙)智能科技有限公司	前彩 34	湖南长重机器股份有限公司
前彩 12-13	朝阳重型机器有限公司	后彩 1	中冶长天炉窑工程技术公司
前彩 14-15	北京艾瑞机械有限公司	后彩 2	爱立许集团(中国)有限公司
前彩 16	南京三埃工控有限公司	后彩 3	鞍山市明阳金属材料有限公司
前彩 17	沈阳华泽单齿辊破碎机制造有限公司	后彩 4	湖北中船气体有限公司