

热轧污泥对烧结矿产质量指标的影响

耿 灿^{1,2}, 春铁军¹, 龙红明¹, 韩风光²

(1. 安徽工业大学 冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243032; 2. 上海梅山钢铁股份有限公司, 江苏 南京 210039)

摘要: 针对钢铁企业热轧工序产生的污泥处理成本高、利用率低等问题, 本文提出将热轧污泥以矿浆形式添加至烧结工序的技术思路, 研究了不同热轧污泥配比和矿浆浓度对烧结混合料制粒效果及烧结矿产质量指标的影响规律。结果表明: 当热轧污泥配比由 0 增至 0.5% 时, 混合料制粒后 >5 mm 和 3~5 mm 粒级占比显著提升, <1 mm 粒级比例相应下降, 料层透气性指数 (JPU) 升高, 粒度分布与透气性能优化; 当热轧污泥配比由 0 增至 0.35% 时, 烧结矿成品率、利用系数和固体能耗均呈现改善趋势, 但配比进一步提高至 0.5% 时, 质量指标有所降低。当热轧污泥矿浆浓度由 20% 提高至 50% 时, 烧结矿成品率、利用系数和转鼓指数呈降低趋势, 固体能耗有所上升。本文研究成果可为热轧污泥高效资源化利用提供实践参考。

关键词: 热轧污泥; 烧结; 粒度组成; 透气性; 产质量指标

中图分类号: TF046; X705

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2026)05-0016-06

doi: 10.13402/j.gcjs.2026.05.049

Effects of hot-rolled sludge on quality and yield indicators
of iron ore sinteringGENG Can^{1,2}, CHUN Tiejun¹, LONG Hongming¹, HAN Fengguang²

(1. School of Metallurgical and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, Anhui, China;

2. Shanghai Meishan Iron&Steel Stock Co., Ltd., Nanjing 210039, Jiangsu, China)

Abstract: In response to the issues of high treatment costs and low utilization rates of sludge generated in the hot rolling process of steel enterprises, the technical idea of adding hot-rolled sludge to the sintering process in the form of slurry is proposed, and the influence of different hot-rolled sludge ratios and slurry concentrations on the granulation effect of sintered mixture and the quality index of sinter is studied. The results indicate that when the proportion of hot-rolled sludge increases from 0 to 0.5%, the proportion of >5 mm and 3~5 mm particle sizes increases significantly after mixture granulation, the proportion of <1 mm particle size decreases accordingly, the air permeability index (JPU) of the material layer increases, and both the particle size distribution and air permeability performance are improved. As the proportion of hot-rolled sludge increases from 0 to 0.35%, the yield of sinter, the utilization coefficient, and the solid energy consumption all show an improving trend. However, when the proportion further increases to 0.5%, the quality indicators decline. When the concentration of hot-rolled sludge slurry increases from 20% to 50%, the yield of sinter, the utilization coefficient, and the drum index show a decreasing trend, while the solid energy consumption increases. The research results can provide practical references for the efficient resource utilization of hot-rolled sludge.

Key words: hot-rolled sludge; sintering; particle size composition; air permeability; quality and yield indicators

收稿日期: 2025-12-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52374315)

作者简介: 耿 灿(1984—), 男, 工程师, 从事钢铁冶金及含铁二次资源利用方面的研究及管理工作。

通信作者: 春铁军(1984—), 男, 教授, 从事冶金固废综合利用方面的研究。

钢铁行业作为国民经济的支柱产业，在推动工业化和现代化进程中发挥着不可替代的作用^[1-2]。烧结作为钢铁生产的关键环节，不仅消耗大量能源和矿产资源，还会产生成分复杂的各类污泥^[3]。这类污泥富含 Fe、CaO 等含量较高的有价元素，若不处理直接排放，将对大气、水体和土壤造成严重污染，危害生态环境及人体健康^[4-6]。

随着“无废城市”建设的推进，“固废不出厂”已成为钢铁行业共识^[7-8]。钢厂污泥在成分上与烧结所需的铁矿粉、燃料具有高度相似性，可回用于烧结工序实现再利用^[9-10]。在烧结过程中，通过高温分解污泥有机物并经矿相重构实现资源回收，是污泥资源化利用的高效途径^[11-12]。固体废弃物在烧结工艺中的资源化利用已得到大量研究证实，其在技术可行性与环境效益方面均表现突出。在钢铁行业固废领域，SINGH 等^[13]研究发现，转炉污泥经适当预处理后可高效返回烧结工艺再利用。针对炼钢污泥，郑安阳等^[14]研究表明，随着污泥中 TiO₂ 质量分数的增加，烧结矿的软化温度升高，有助于改善高炉软熔带透气性。在市政及工业固废协同处置方面，PING 等^[15]通过在烧结原料中掺入市政污泥发现，其不仅能替代部分燃料，还可显著改善烧结矿粒度组成。针对含毒性污泥处理，张垒等^[16]指出，当含铬污泥配入比例控制在较低水平（低于 0.05%）时，对烧结产品无显著负面影响。李小明等^[17]通过微观结构分析发现，酸洗污泥具有“双重功效”，在 10% 的最佳配比下，烧结矿微观结构更加均匀致密，气孔率降低。

本文以国内某钢铁企业烧结原料配比为基准，以热轧污泥为研究对象，研究不同热轧污泥配比和矿浆浓度对烧结混合料制粒效果及烧结产质量指标的影响，以期钢铁企业热轧污泥厂内返烧结处置提供技术指导和参考。

1 试验原料及研究方法

1.1 原料物化性能

烧结原料取自某钢铁厂烧结生产线所用原料，包括含铁原料、熔剂、燃料和热轧污泥。其化学成分及配比如表 1 所示。由表 1 可知：主要含铁原料铁品位在 55%~61%，混匀矿中 SiO₂ 质量分数为 4.89%，精矿粉 SiO₂ 质量分数较高（达 6.23%），热轧污泥中 Al₂O₃ 质量分数高达 12.70%。热轧污泥以外配料形式加入，通过不同配比的条件试验，确定其配比范围为 0.1%~0.5%。

1.2 研究方法

烧结杯试验工艺流程主要包括配料、混合、布料、点火、烧结、破碎、冷却、筛分及质量检测等工序。试验在直径为 200 mm 的烧结杯中进行，料层高度设定为 850 mm。点火前，将点火温度设定为(1 050 ± 50)℃，点火负压设定为 7 kPa，准备计时后，将点火罩移至烧结杯上方，启动点火并同步开始烧结计时。点火 2 min 后关闭点火罩，随即调整抽风负压至 14 kPa；当废气温度达到峰值并开始下降时，视为烧结结束，此时将抽风负压调至 7 kPa，待冷却至废气温度降至 250 ℃时关闭风机。烧结矿经单辊破碎机破碎后，依次进行落下试验、振动筛分分级及转鼓强度检测。

表 1 烧结原料化学成分及配比(质量分数) %

种类	TFe	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	S	P	烧损	配比
精矿粉	56.23	6.23	3.60	1.41	1.48	0.32	0.10	5.83	12.47
混匀矿	60.12	4.89	0.46	0.07	2.04	0.06	0.07	6.05	46.43
返矿	55.74	5.87	11.48	1.53	2.48	0.01	0.10	0.00	25.00
云屑	0.25	0.08	29.63	22.24	0.88	0.06	0.01	46.73	3.00
石灰石	0.26	2.23	53.18	0.61	0.73	0.12	0.01	42.67	5.03
生石灰	0.40	3.11	79.43	1.44	0.95	0.03	0.03	13.70	3.79
焦粉	0	6.85	0.59	0.11	4.37	0.75	0.06	85.91	4.28
热轧污泥	48.91	3.03	0.87	0.08	12.70	0.01	0.20	-3.51	0.1~0.5

2 试验结果与讨论

2.1 热轧污泥对比对混合料性能影响

不同热轧污泥对比对烧结混合料粒度组成和透气性指数(Japan Permeability Unit, JPU)的影响如表 2 所示。由表 2 可知:随着热轧污泥配比提高,混合料粒度组成显著改善。 $>5\text{ mm}$ 和 $3\sim 5\text{ mm}$ 粒级占比明显提高,对应 $<1\text{ mm}$ 粒级占比降低,料层透气性指数亦随之提升。基准条件(热轧污泥配比为 0)下,制粒后混合料 $>5\text{ mm}$ 占比为 23.25%, $<1\text{ mm}$ 占比为 16.23%,JPU 指数为 23.54;当配比为 0.1% 时, $>5\text{ mm}$ 和 $<1\text{ mm}$ 占比分别升至 23.32% 和 14.73%,JPU 指数提高至 24.12;继续提高配比至 0.5%, $>5\text{ mm}$ 占比增至 27.54%, $<1\text{ mm}$ 占比降至 12.80%,JPU 指数显著提升至 29.78。热轧污泥在此发挥“黏结剂”作用,通过物理黏结效应促进混合料团聚形成更

理想的粒级结构,从而改善气流通过条件^[18],最终使料层透气性和粒度组成进一步优化。

2.2 热轧污泥对比对烧结性能影响

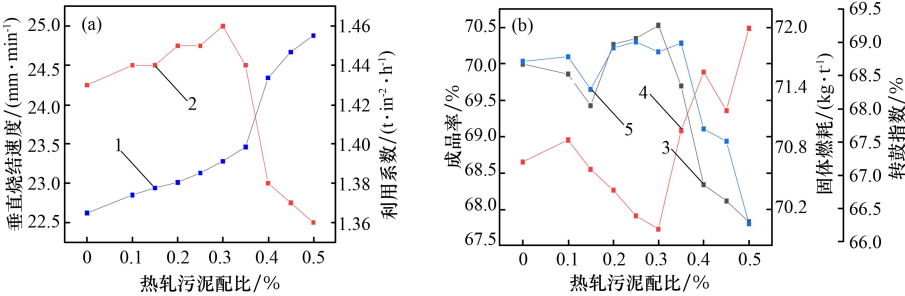
不同热轧污泥对比对烧结矿产质量指标的影响如图 1 所示。由图 1 可知:随着热轧污泥配比提高,垂直烧结速度同步提升。当配比由 0 增至 0.35% 时,烧结矿成品率、利用系数均有所提高,固体燃耗显著降低,转鼓强度变化不大。在该配比区间内,添加热轧污泥发挥了改善料层透气性和降低能耗的双重作用。继续提高配比至 0.5%,成品率、利用系数和转鼓强度均有所下降,固体能耗反而升高。因此,若仅考虑热轧污泥单一变量,其最适宜配比为 0.35%;超过该比例,不仅无法增效,反而会引发能耗上升和质量下降^[19]。

2.3 矿浆浓度对混合料性能影响

不同热轧污泥矿浆浓度对烧结混合料粒度组成和透气性指数的影响如表 3 所示。由表 3 可知:

表 2 不同热轧污泥对比对混合料粒度分布及透气性指数的影响(35%矿浆浓度) %

热轧污泥配比	混合料水分	透气性指数	粒度组成/mm			
			>5	(3,5]	(1,3]	<1
0(基准)	6.98	23.54	23.25	22.10	38.41	16.23
0.10	6.97	24.12	23.32	23.80	38.15	14.73
0.15	7.05	24.65	23.56	23.71	38.64	14.09
0.20	7.15	25.67	24.12	23.57	38.73	13.57
0.25	7.11	26.01	24.67	24.13	37.86	13.34
0.30	7.04	26.30	24.94	24.67	36.77	13.61
0.35	7.09	27.03	25.38	26.41	34.22	13.99
0.40	6.96	27.96	26.46	27.94	33.22	12.39
0.45	7.04	28.55	27.02	27.23	33.15	12.60
0.50	6.95	29.78	27.54	26.08	33.58	12.80



(a) 垂直烧结速度和利用系数; (b) 烧结成品率、固体能耗和转鼓指数
1—垂直烧结速度; 2—利用系数; 3—成品率; 4—固体能耗; 5—转鼓指数。

图 1 不同热轧污泥对比对烧结产质量指标的影响 (35%矿浆浓度)

表 3 不同矿浆浓度对混合料粒度分布及透气性指数的影响(0.35%配比)

热轧污泥配比	混合料水分	透气性指数	粒度组成/mm			
			>5	(3,5]	(1,3]	<1
0(基准)	6.98	23.54	23.25	22.10	38.41	16.23
20	7.12	30.12	27.56	26.60	33.52	12.31
25	7.06	29.50	26.82	26.43	33.87	12.88
30	6.95	28.75	26.14	26.29	34.20	13.37
35	7.09	27.03	25.38	26.41	34.22	13.99
40	7.03	26.16	25.58	25.45	35.48	13.49
45	7.15	24.78	24.77	26.32	35.51	13.40
50	6.97	25.34	24.21	26.79	35.69	13.31

基准条件下，制粒后混合料中 >5 mm 粒级占比为 23.25%、<1 mm 粒级占比为 16.23%，JPU 指数为 23.54；当矿浆浓度为 20% 时，>5 mm 占比升至 27.56%、<1 mm 占比降至 12.31%，JPU 指数提升至 30.12。矿浆浓度增至 35% 后，>5 mm 占比为 25.38%、<1 mm 占比为 13.99%，JPU 指数为 27.03；继续提高至 50% 时，>5 mm 和 <1 mm 占比分别降至 24.21% 和 13.31%，JPU 指数为 25.34。结果表明，与基准条件相比，添加热轧污泥可改善混合料粒度组成。但随着矿浆浓度由 20% 升至 50%，>5 mm 粒级占比呈下降趋势，主要因低浓度时污泥分散更均匀，利于制粒。综上，添加热轧污泥可以改善烧结混合料的制粒效果(透气性)，但存在最佳矿浆浓度范围。

2.4 矿浆浓度对烧结性能影响

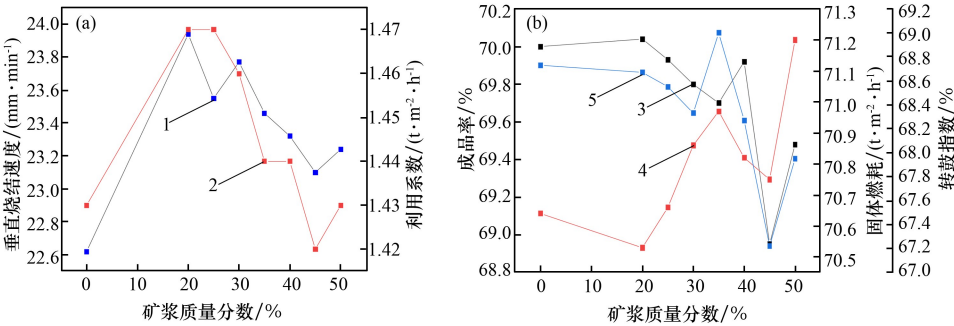
不同热轧污泥矿浆浓度对烧结产质量指标的影响如图 2 所示。由图 2 可知：随着热轧污泥矿浆浓度逐渐提高，垂直烧结速度呈降低趋势。当

热轧污泥矿浆质量分数由 20% 提高至 50% 时，烧结矿成品率、利用系数和转鼓强度呈降低趋势，固体能耗有所上升。从烧结产质量指标来看，20% 左右的低浓度对烧结产质量、降低能耗最有利，但在实际工厂应用中，不能无限制地降低浓度，需在“保证烧结指标优良”(低浓度)和“保证管道不堵塞、输送效率高、沉降池负荷小”(高浓度)之间寻找最佳平衡点^[20]。

2.5 烧结矿性能分析

基准条件和优化条件下的烧结矿化学成分对比如表 4 所示。由表 4 可知：添加 0.35% 热轧污泥对烧结矿成分影响较小。烧结矿铁品位略有降低，降低了 0.12 ~ 0.14 个品位，Al₂O₃ 质量分数略有升高，由基准条件下的 2.05% 升至 2.12% 左右。这主要是由于热轧污泥中 Al₂O₃ 质量分数较高导致。

基准条件(未添加热轧污泥)和优化条件(添加热轧污泥)下的烧结矿冶金性能如表 5 所示。由



(a) 垂直烧结速度和利用系数；(b) 烧结成品率、固体能耗和转鼓指数
1—垂直烧结速度；2—利用系数；3—成品率；4—固体能耗；5—转鼓指数。
图 2 不同矿浆配比对烧结矿产质量指标的影响 (0.35%污泥配比)

表 4 不同条件下烧结矿化学成分%

项目	Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	P	K ₂ O	Na ₂ O
基准	55.38	8.38	5.77	2.05	11.64	1.82	0.34	0.015	0.09	0.04	0.03
0.35% 热轧污泥	55.24	9.08	5.79	2.13	11.61	1.81	0.33	0.014	0.09	0.03	0.05

表 5 基准和优化条件烧结矿冶金性能

项目	还原度 指数/%	还原粉化 指数/%	软化温度/℃		化温度 区间/℃	压差陡升 温度/℃	滴落温 度/℃	熔滴温度 区间/℃	最大压 差/kPa
			开始	结束					
基准	83.59	66.01	1 123	1 231	108	1 305	1 521	216	20.34
0.35% 热轧污泥	83.68	67.60	1 113	1 225	112	1 295	1 509	214	19.43

表 5 可知：与基准烧结矿相比，优化条件（添加 0.35% 热轧污泥）下的烧结矿还原度变化不大，还原粉化指数略有提高；熔滴性能与基准烧结矿相当，无明显变化。

3 结 论

（1）随着热轧污泥配比提高，烧结混合料中 > 5 mm 和 3 ~ 5 mm 粒级占比明显提高，而 < 1 mm 粒级占比相应降低，JPU 指数持续增加，表明料层透气性改善，同时混合料粒度组成也得到明显优化，垂直烧结速度随之提高。

（2）当热轧污泥配比由 0 提高至 0.35% 时，烧结矿成品率、利用系数均得到改善，固体能耗有所降低，转鼓强度变化不大；当配比进一步增加至 0.5% 时，成品率、利用系数和转鼓指数均有所降低，固体燃耗升高。若仅考虑热轧污泥配加量这一变量，最佳配比为 0.35%。

（3）随着矿浆浓度由 20% 提高至 50%，> 5 mm 粒级占比有所降低，烧结矿成品率、利用系数和转鼓强度呈降低趋势，固体燃耗有所上升。从烧结产质量指标来看，较低矿浆浓度有利于生产，但需综合考虑其对污泥沉降性能及现场矿浆输送的影响。

参考文献：

[1] 何文波. 在中国式现代化新征程中汇聚磅礴钢铁力量: 新中国钢铁工业七十五年发展历程回顾与启示[J]. 中国钢铁业, 2024(9): 5-8; 13.

[2] 纪长洋. 硫酸渣在炼铁流程中的适宜使用方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.

[3] 王治飞, 储英健, 李宇, 等. 利用窑渣、尾泥和粉煤灰协同制备陶瓷的烧成机理[J]. 冶金能源, 2023, 42(2): 44-48; 58.

[4] 刘琼芳. 利用转炉污泥中的有价元素制备锂离子电池正极材料多元掺杂型 LiFePO₄[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2013.

[5] 常军, 邵延海, 李硕, 等. 赤泥中有价金属元素综合回收研究现状及进展[J]. 矿冶, 2017, 26(3): 59-63; 77.

[6] 李芸邑, 梁嘉良, 刘阳生. 从铁尾矿中回收铁的磁化技术研究[J]. 环境工程, 2014, 32(增刊 1): 634-638; 660.

[7] 韩风光, 杨涛, 赵贺喜, 等. 复合黏结剂对球团高温固结的影响及机理[J]. 工程科学学报, 2023, 45(9): 1450-1458.

[8] GUBS, ZHANG SD, GAO J, et al. A novel approach for resource utilization of stainless steel pickling sludge via nickel-iron blast furnace molten slag[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2025, 32(11): 4108-4118.

[9] 陈耿涛, 张海宝, 杨卫严. 含有价金属的再生资源综合回收技术与应用[J]. 有色冶金设计与研究, 2017, 38(6): 119-121.

[10] 魏汝飞, 龙红明, 丁冉, 等. 钢铁工业典型难处理固废资源化利用: 现状、挑战与突破路径[J]. 中国冶金, 2025, 35(7): 32-52; 76.

[11] 经文波, 李惟宗, 吴志宪. 赤泥提铁降低能耗研究[J]. 冶金能源, 2022, 41(6): 9-12; 40.

[12] 胡琰, 赵贺喜, 齐鹏宇, 等. 烧结配加钢铁厂污泥对烟气及产质量的影响[J]. 钢铁, 2024, 59(12): 152-161.

[13] SINGH A K, RAJU M T, JHA U, et al. Conservation of iron and lime bearing raw materials by recycling of basic oxygen furnace (BOF) sludge in iron ore sintering[J].

- International Journal of Environmental Technology and Management, 2012, 15(3/4/5/6): 220.
- [14] 郑安阳, 刘征建, 苍大强, 等. MgO 对含钛烧结矿矿相结构及软熔滴落性能的影响[J]. 工程科学学报, 2018, 40(2): 184 – 191.
- [15] PING X D, WANG F, PAN J L, et al. Effect of municipal sludge addition on the sinter process and sinter quality [J]. Ironmaking&Steelmaking, 2023, 50(8): 1037.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 王介超. 配加转炉污泥制备氧化球团的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [19] 韩健, 侯健, 邵久刚, 等. 炼钢污泥入烧行为的分析与研究[J]. 烧结球团, 2019, 44(6): 79 – 83.
- [20] 何木光. 炼钢污泥浆浓度对烧结的影响[J]. 矿业工程, 2016, 14(6): 40 – 42.

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、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”、学术中国 – 知识产权服务平台等第三方平台在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。