

钢铁尘泥不浪费：转炉冷压球团资源化利用

From Waste to Valuable Feedstock: Converter-based Resource Utilization of Cold-pressed Pellets Prepared from Steel Dust

供稿|夏晶晶¹, 王心雨¹, 魏汝飞¹, 龙红明¹, 朱海亚² / XIA Jingjing¹, WANG Xinyu¹, WEI Rufei¹, LONG Hongming¹, ZHU Haiya²

内容导读

炼钢污泥等冶金固废资源综合利用是我国钢铁行业实现可持续发展和节能减排的重要途径。以炼钢过程副产物炼钢污泥和钢渣磁选粉为原料制备冷压球团，可有效提高利用率，回收有价金属组分，实现资源循环利用。本文提出采用转炉资源化处理钢铁尘泥冷压球团，对冷压球团加入转炉后的物料平衡和热平衡进行理论计算，分析不同配比的炼钢污泥和钢渣磁选粉冷压球团对钢水冷却效果的影响，并通过实验探究其加入对钢水成分的影响规律。结果表明，当炼钢污泥和磁选粉质量比为 1:1 时，冷压球团进入钢水的比例为 41.2%，铁元素进入钢水的比例为 85.0%。

“固废不出厂”理念的提出使钢铁企业环保压力持续增大。冶金固体废物资源综合利用是我国钢铁行业实现可持续发展、降本增效、提高钢企竞争力的有效途径^[1]。2022 年，全球粗钢产量总计 18.32 亿 t，随之产生 1.47~2.2 亿 t 钢铁粉尘和污泥^[2]。针对除尘灰、含铁尘泥等冶金企业典型难处理固体废物，钢铁企业常采用返回烧结的方法，以达到回收铁资源和降低生产成本等目的。然而，由于含铁尘泥粒度极细、润湿性差，难以制粒，烧结料层透气性恶化，对烧结产量与质量指标产生负面影响；同时，粉尘中的锌、碱金属等会随烧结矿进入高炉系统，显著增加高炉锌负荷，并在烧结-高炉流程中循环富集，引发炉身结瘤，给高炉顺行与使用寿命带来不

利影响^[3]。

据统计，每生产 1 t 钢约产生 600 kg 固体废弃物^[4]，其中尘泥产生量占钢产量的 5%~8%，其他固体废弃物占 52%~55%^[5]。含锌尘泥的处理方法主要包括湿法冶金和火法冶金 2 类，其中湿法冶金通常采用酸碱浸出工艺^[6]，具有设备投资少、能耗低等优点，但存在对原料品位敏感^[7]、金属铁回收不彻底、生产效率低、难以规模化处理等问题，因此火法冶金仍是含锌泥尘的主流处理方法^[8]。

目前，污泥处理多采用长流程模式，炼钢污泥因含铁量较高，经挤压脱水后加入烧结配料。但转炉湿法除尘（OG）泥运输时易产生污水渗漏，炼钢除尘灰则易造成二次扬尘，污染钢厂环境。炼钢 OG

作者单位：1. 安徽工业大学冶金工程学院，安徽 马鞍山 243032；2. 江苏永钢集团有限公司，江苏 张家港 215628

泥含水量高、除尘灰粒度细,在烧结配料中会降低烧结料层透气性,减少料层有效通风量,影响垂直烧结速度与烧结矿品质。随着污泥脱水技术的发展,将炼钢污泥配加添加剂制成冷压球团,作为转炉化渣剂和冷却剂返回炼钢工序的技术已日趋成熟^[9]。

作为炼铁和炼钢过程的主要副产品,钢渣在我国的有效利用率不足 30%,易造成严重的环境问题^[10]。各类钢渣处理工艺各有优劣,实际运用中需结合炼钢工艺、钢渣温度和流动性、钢渣处理后的活性与稳定性、渣铁分离效果、低耗及环保要求等多方面因素综合选择^[11]。钢渣目前主要应用于建筑业、农业和玻璃、印染等行业,产品附加值较低,未能充分发挥其二次资源价值。转炉钢渣的综合利用难度高于高炉渣,其中钢渣磁选粉因含铁量低、产生量大,多通过湿式球磨回收金属铁,产生的球磨污泥难以有效利用^[12]。将钢渣在冶金体系内资源化再利用,不仅可大幅提高钢渣利用率、改善环境问题,还能节约冶金原料消耗,因此钢渣最便捷、经济的利用途径是作为冶金原料在钢铁厂内部循环回收^[13]。

冶金球团制备是冶金工艺的重要环节,既能改善物料的冶金物理化学性质,也是实现工业固体废

弃物资源化利用与循环经济的重要途径。冷压球团造块法因能耗低、管理方便、污染小等优点,在冶金领域应用广泛。对于粒度较细的物料,经冷压球团技术处理后入炉,不仅可改善炉况、增加炉料透气性,还起到节能降耗、降低生产成本的作用^[14]。冷压成型技术还可优化物料反应性能,并通过添加脱除剂减少污染物生成与排放^[15],是实现节能、环保与废弃资源利用的重要技术途径。

本文提出转炉资源化处理钢铁尘泥冷压球团,开展钢铁流程含铁尘泥资源化利用研究,有利于进一步降低钢铁行业碳排放,减少企业投资成本,助力钢铁企业进一步消纳冶金固废资源。

原料与方法

实验原料

本研究以江苏永钢集团有限公司(以下简称江苏永刚)产生的炼钢污泥和钢渣磁选粉为原料制备冷压球团,2种原料在球团中的质量分数各为 50%,原料主要化学成分及配比如表 1 所示。同时,以江苏永钢提供的钢屑为实验原料,将其熔化为钢水,钢水中原料(不含铁)的化学成分如表 2 所示。

表 1 原料主要化学成分及配比(质量分数)

名称	配比	C	TFe	MFe	FeO	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	ZnO	P ₂ O ₅
炼钢污泥	50	0.24	58.77	—	38.96	2.14	7.95	1.66	0.43	1.67	—
磁选粉	50	—	57.50	22.71	12.82	15.05	28.55	7.95	3.29	0.06	2.05
冷压球团	—	0.12	58.14	11.36	25.89	8.60	18.25	4.81	1.86	0.87	—

表 2 钢水成分(质量分数)

C	Si	Mn	Cr	Cu	P	S
0.1212	0.0027	0.0147	0.0114	0.0278	0.0141	0.0142

实验方法

实验在图 1 所示的感应加热装置上进行,冷压球团用量约 10 g,钢屑用量约 500 g。首先通过感应加热将钢屑熔化,温度控制在 1600 ℃;为满足反应中期条件,按钢屑质量的 2%~3% 加入石墨粉作为增碳剂,再将冷压球团加入熔融钢水,观察其熔化与反应行为;待反应与熔化结束后停止加热,样品自然冷却至室温,对钢块进行成分分析。

计算方法

具体计算条件与假设如下:

- (1) 出钢温度: 1650 ℃;
- (2) 反应前冷压球团温度: 25 ℃;
- (3) 冷压球团加入量: 每吨钢水加入 5~20 kg;
- (4) 所用原料均为熟料,不考虑冷压球团中渣元素的成渣热;
- (5) 假定冷压球团进入钢水后即刻发生反应,

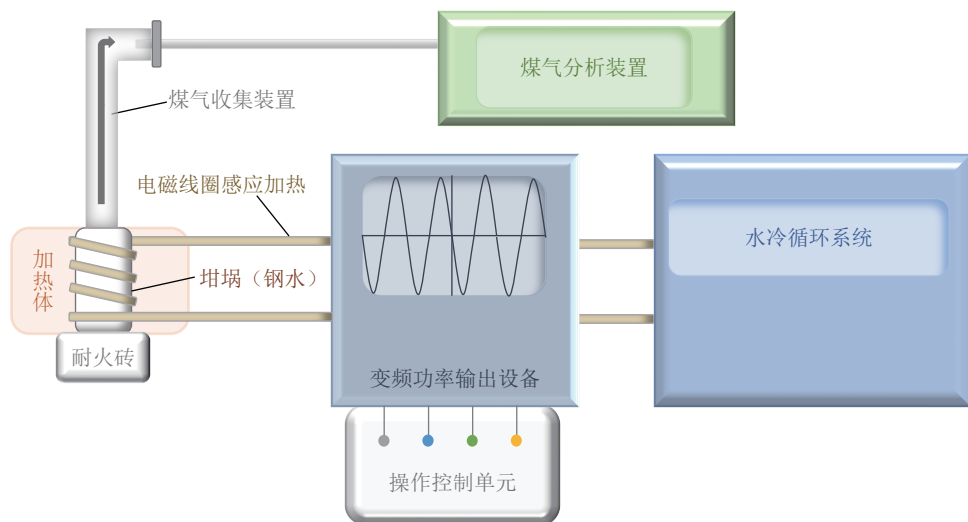


图1 感应加热装置

且不与空气中的氧发生反应；

(6) 转炉内冷压球团资源化利用后，所有产物温度相同。

采用热平衡法计算冷压球团加入后钢水的温度变化，转炉冷压球团资源化利用过程的热量计算项如表3所示。

表3 热量支出与收入

编号	热收入项	编号	热支出项
(1)	钢水带入的热量	(1)	冷压球团还原反应吸热
(2)	冷压球团带入的热量	(2)	反应后冷压球团中渣元素带走的热量
		(3)	出钢时钢水带走的热量
		(4)	冷压球团中铁熔化的热量
		(5)	反应后煤气带走的热量
		(6)	冷压球团中锌气化热
		(7)	锌蒸气带走的热量

➤ 热收入项

(1) 钢水带入的热量 Q_{Fe1}

$$Q_{Fe1} = T_{Fe} \cdot m_{Fe} \cdot \sum c_i \cdot \omega_i \quad (1)$$

式中： T_{Fe} 为不加冷压球时钢水的最终温度，℃； m_{Fe} 为钢水的质量，kg； c_i 为钢水中各成分的比热容，kJ/(kg·℃)； ω_i 为钢水中各成分的质量分数，%。

(2) 冷压球团带入的热量 Q_C

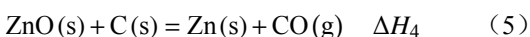
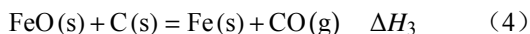
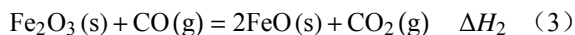
$$Q_C = T_Q \cdot m_{Fe} \cdot \varphi_Q \cdot \sum c_j \cdot \omega_j \quad (2)$$

式中： T_Q 为冷压球团的初始温度，℃； φ_Q 为冷压球团添加量占铁水的质量分数，%； c_j 为冷压球团中各成分的比热容，kJ/(kg·℃)； ω_j 为冷压球团中各成分的质量分数，%。

➤ 热支出项

(1) 冷压球团还原反应吸热 Q_E ，还原反应如

式(3)~(5)所示，吸热表达式见式(6)：



$$Q_E = \frac{1000}{M_{Fe_2O_3}} \cdot \Delta H_2 \cdot \omega_{Fe_2O_3} + \frac{1000}{M_{FeO}} \cdot \Delta H_3 \cdot \omega_{FeO} + \frac{1000}{M_{ZnO}} \cdot \Delta H_4 \cdot \omega_{ZnO} \quad (6)$$

式中： $M_{Fe_2O_3}$ 、 M_{FeO} 和 M_{ZnO} 分别为 Fe_2O_3 、 FeO 和 ZnO 的摩尔质量，g/mol； $\omega_{Fe_2O_3}$ 、 ω_{FeO} 和 ω_{ZnO} 分别为冷压球团中 Fe_2O_3 、 FeO 和 ZnO 的质量分数，%； ΔH_2 、 ΔH_3 、 ΔH_4 代表不同反应过程焓变。

(2) 反应后冷压球团中渣元素带走的热量 Q_U

$$Q_U = T_Z \cdot m_{Fe} \cdot \varphi_Q \cdot \sum c_j \cdot \omega_j \quad (7)$$

式中: T_Z 为钢水的出钢温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 出钢时钢水带走的热量 Q_{Fe_2}

$$Q_{\text{Fe}_2} = T_Z \cdot \sum c_{\text{TS}_i} \cdot \omega_{\text{TS}_i} + \frac{m_{\text{Fe}} \cdot \varphi_Q \cdot \omega_{\text{Fe}_2\text{O}_3}}{M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}} 2M_{\text{Fe}} \cdot c_{\text{Fe}} \quad (8)$$

式中: c_{TS_i} 为出钢时钢水中各成分的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; ω_{TS_i} 为出钢时钢水中各成分的质量分数, %; M_{Fe} 为 Fe 的摩尔质量, g/mol ; c_{Fe} 为 Fe 的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

(4) 冷压球团中铁熔化的热量 Q_F

$$Q_F = \frac{R_{\text{Fe}} \cdot \omega_{\text{Fe}_2\text{O}_3} \cdot m_{\text{Fe}} \cdot \varphi_Q}{M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}} \times 2M_{\text{Fe}} \quad (9)$$

式中: R_{Fe} 为 Fe 的熔化热, kJ/kg ; M_{Fe} 为 Fe 的摩尔质量, g/mol 。

(5) 反应后煤气带走的热量 Q_M

$$Q_M = T_Z \cdot \left(m_{\text{CO}} \cdot c_{\text{CO}} + c_{\text{CO}_2} \frac{\omega_{\text{Fe}_2\text{O}_3} \cdot m_{\text{Fe}} \cdot \varphi_Q}{M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}} M_{\text{CO}_2} \right) \cdot \varphi_Q \quad (10)$$

式中: c_{CO} 为 CO 的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; c_{CO_2} 为 CO_2 的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; M_{CO_2} 为 CO_2 的摩尔质量, g/mol ; m_{CO} 为 CO 的质量, g。

(6) 冷压球团中锌气化热 Q_{Zn}

$$Q_{\text{Zn}} = R_{\text{Zn}} \cdot \omega_{\text{ZnO}} \cdot m_{\text{Fe}} \cdot \varphi_Q \quad (11)$$

式中: R_{Zn} 为理论上 Zn 的气化热, kJ/kg 。

(7) 锌蒸气带走的热量 $Q_{\text{Zn(q)}}$

$$Q_{\text{Zn(q)}} = \frac{m_{\text{Fe}} \cdot \varphi_Q}{M_{\text{ZnO}}} M_{\text{Zn}} \cdot c_{\text{Zn}} \cdot T_Z \quad (12)$$

式中: M_{Zn} 为 Zn 的摩尔质量, g/mol ; c_{Zn} 为 Zn 的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

转炉处理冷压球的理论分析

平衡计算结果

对转炉处理冷压球团进行物料平衡计算, 计算条件如下: 冷压球团添加质量分数为 1.5%, 炼钢污泥和磁选粉质量比为 1:1, 物料平衡如表 4 所示。由表 4 可知, 转炉资源化利用冷压球团过程中, 钢水为主要物料收入项和支出项, 分别占总质量的 98.52% 和 99.21%; 冷压球团入炉后主要转化为钢水、煤气、炉渣和锌蒸气。

表 5 为转炉处理冷压球团的热平衡计算结果, 可见转炉资源化利用冷压球团过程中, 钢水为主要热收入项和热支出项, 分别占总质量的 99.99% 和 97.27%。在热支出中, 除了反应后钢水带走的热量, 还有冷压球团还原反应吸热、反应后冷压球团中渣元素带走热量和煤气带走的热量; 锌蒸气排放量较小, 带走热量 $< 0.001\%$, 可忽略不计。

冷压球团加入转炉后理论去向分布

冷压球团加入转炉后转化为钢水、煤气、炉渣和锌蒸气, 其理论转化比例分别为 56%、16%、27% 和 1%, 如图 2 所示。

表 4 物料平衡

物料收入项	质量/kg	占比/%	物料支出项	质量/kg	占比/%
冷压球团	15.00	1.48	钢水	1008.34	99.21
钢水	1001.42	98.52	煤气	3.87	0.38
总计	1016.42	100.00	炉渣	4.11	0.40
—	—	—	锌蒸气	0.10	0.01
			总计	1016.42	100.00

表 5 热平衡计算

热收入项	能量/(MJ/t)	占比/%	热支出项	能量/(MJ/t)	占比/%
钢水带入的热量	1324.34	99.99	冷压球团还原反应吸热	19.50	1.47
冷压球团带入的热量	0.18	0.01	反应后冷压球团中渣元素带走的热量	5.84	0.44
总计	1324.52	100.00	出钢时钢水带走的热量	1288.34	97.27
—	—	—	冷压球团中铁熔化热	2.25	0.17
			反应后煤气带走的热量	8.36	0.63
			冷压球团中锌气化热	0.18	0.01
			锌蒸气带走的热量	0.05	0.01
			总计	1324.52	100.00

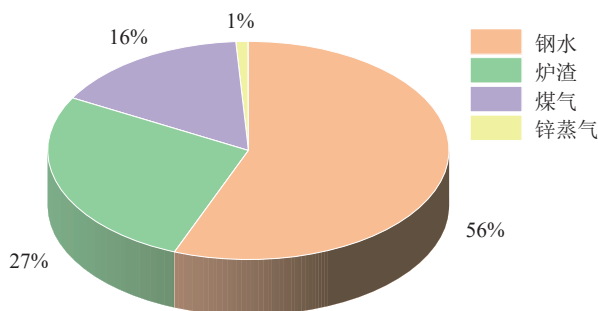


图2 冷压球团加入转炉后理论去向分布

冷压球团对钢水冷却效果的理论分析

冷压球团添加量和原料比例对钢水温降的影响分别如图3所示。随着冷压球团添加比例的提升，钢水温降幅度增大；同时，吨钢球团添加量与温降呈线性关系，添加量越大，温降越显著，当添加量从5 kg增至20 kg时，温降从约20℃升至约70℃，且不同球团占比带来的温降差异随添加量增大而逐渐扩大。炼钢污泥的冷却效果优于磁选粉，当原料中全部为污泥或磁选粉时，两者冷压球团加入量均为20 kg/t时，钢水温降分别为75.2和67.6℃。

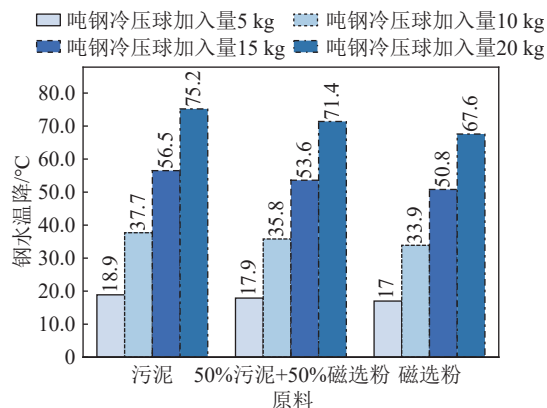


图3 不同原料比例（污泥：磁选粉）及加入量对冷却效果的影响

冷压球团在钢水中的反应行为及结果分析

由理论分析可知，炼钢污泥冷压球团与磁选粉冷压球团的添加比例对钢水温降的影响并不显著，因此本研究选择1:1的配比开展实验，以实现两种冶金固废的协同资源化利用。

冷压球团在钢水中的熔化规律和煤气分析

冷压球团在钢水中的熔化规律和煤气分析分别如图4和图5所示。

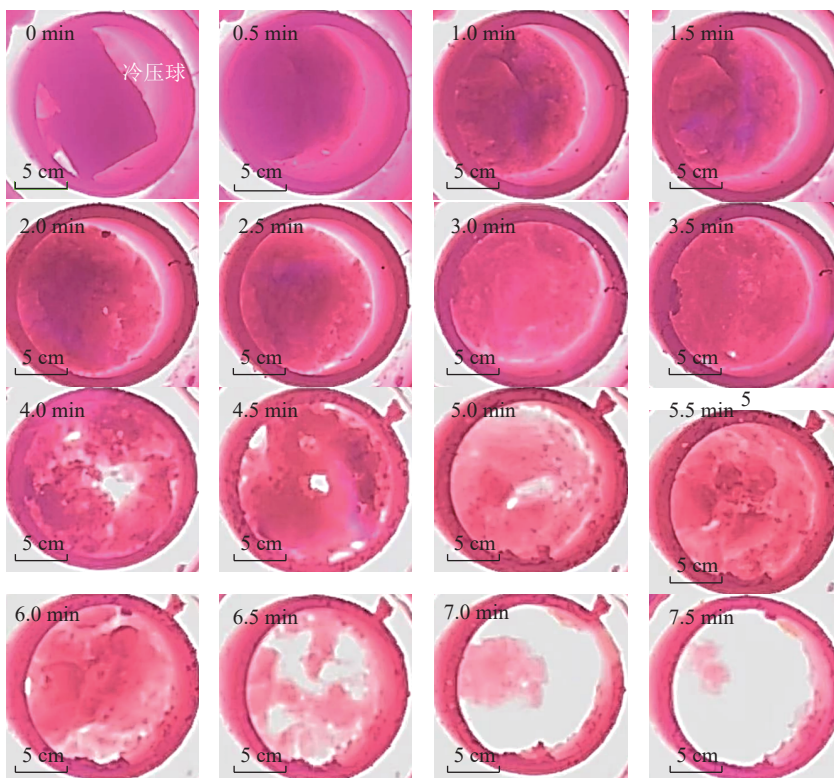


图4 不同熔化时间下冷压球团在钢水中的形态

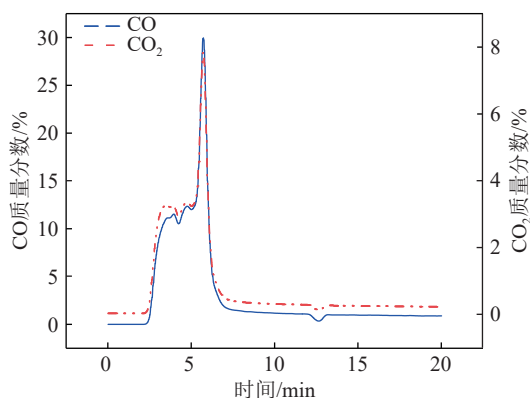


图5 冷压球团加入转炉后的煤气分析

在钢水温度稳定于 1600℃ 左右时,按钢屑质量的 2% 加入增碳剂并搅拌,然后加入冷压球团,球团迅速熔化并发生反应。由图 4 可知,反应进行至 3.0 min 时冷压球团基本熔化;由图 5 可知,2.5 min 后 CO 和 CO₂ 含量快速上升,表明冷压球团在钢水中开始剧烈反应;随着反应时间的延长,浮渣逐渐进入钢水并形成少量黑色漂浮液;反应进行至 7 min 时,CO 和 CO₂ 含量急剧下降并逐渐趋于平稳,反应基本结束。

实验结果及分析

冷压球团加入转炉后去向分布

冷压球团加入转炉后发生剧烈反应与熔化,产物分别进入钢水、炉渣、煤气和灰尘,其中进入钢水的比例为 41.2%,进入炉渣为 27.4%,进入煤气、灰尘、喷溅物等其他相为 31.4%,如图 6 所示。

冷压球团加入转炉后去向分布的实验值与理论值存在一定差异。理论上冷压球团转化为钢水、炉渣、其他产物(煤气和锌蒸气)的比例分别为 56%、27% 和 17%,而实验测得进入钢水的比例为 41.2%,低于理论值。主要原因在于实验所用坩埚尺寸较小,冷压球团无法充分熔化,渣铁分离不完全,且实验过程存在部分熔体喷溅,造成一定质量损失。由图 6(b) 可知,冷压球团中铁元

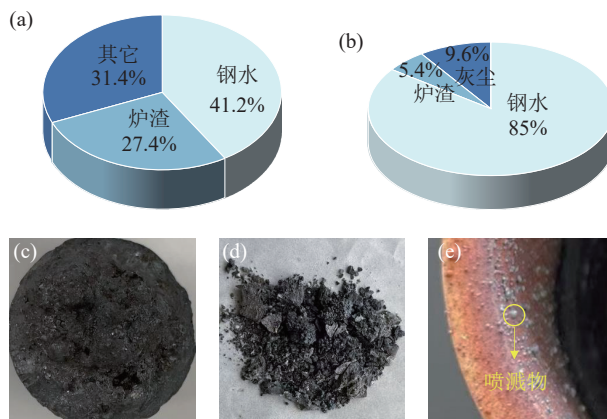


图6 (a) 冷压球团的去向分布; (b) 铁元素在产物中的去向分布; (c) 钢样; (d) 炉渣; (e) 喷溅物

素进入钢水的比例为 85.0%,进入炉渣为 5.4%,进入灰尘为 9.6%。在实际应用中,由于钢水量较大,冷压球团转化为钢水的比例将高于实验值(>41.2%),铁元素进入钢水的比例也将大幅提升(>85.0%)。

冷压球团对钢水成分变化的影响

增碳和加入冷压球团前后的钢水成分变化如表 6 所示,可见加入增碳剂后,钢水中各元素的质量分数均略有上升,其中 C 质量分数增幅最显著,从 0.1212% 升至 1.7620%;加入冷压球团后,C 质量分数从 1.7620% 降至 0.1830%,Si 含量从 0.3010% 降至 0.0010%,Mn 含量从 0.0494% 降至 0.0153%,其他元素含量无明显变化。

炉渣收集与分析

钢屑单独熔融实验表明其产渣量极少,因此实验炉渣主要来源于冷压球团。冷压球团中含有的 CaO 虽可能对原钢水中的 P、S 元素产生一定影响,但因其含量极低,实际影响可忽略不计。对实验所得炉渣进行 X 射线荧光(XRF)分析,其主要成分如表 7 所示。由表 7 可知,炉渣主要成分为 SiO₂ 和 CaO,质量分数为 27.04% 和 23.76%,同时含有 Fe₂O₃ 和 MgO 等组分。

表6 增碳和添加冷压球团前后的钢水成分变化(质量分数)

名称	C	Si	Mn	Cr	Cu	P	S
原钢水	0.1212	0.0027	0.0147	0.0114	0.0278	0.0141	0.0142
增碳后	1.7620	0.3010	0.0494	0.0116	0.0480	0.0270	0.0090
加球后	0.1830	0.0010	0.0153	0.0119	0.0460	0.0260	0.0090

表 7 炉渣的主要化学成分 (质量分数)

SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	TiO ₂	其他
27.04	23.76	7.43	6.41	13.28	7.65	6.80	1.69	0.81	5.13

结束语

(1) 转炉资源化利用冷压球团时, 随着球团添加量的增加, 钢水温降增大; 冷压球团原料配比对冷却效果具有一定影响, 炼钢污泥冷却效果优于磁选粉。当原料中仅为污泥或磁选粉, 两者冷压球团加入量均为 20 kg/t 钢水时, 钢水温降分别为 75.2 和 67.6 °C。冷压球团加入转炉后转化为钢水、煤气、炉渣和锌蒸气, 在污泥和磁选粉质量比为 1:1 的条件下, 冷压球团进入钢水的比例为 41.2%, 铁元素进入钢水的比例为 85.0%。

(2) 当钢水温度为 1600 °C 时, 冷压球团于 2.5 min 后开始反应, 3.0 min 时基本熔化, 7.0 min 后完全熔化。2.5 min 后, 转炉内 CO 和 CO₂ 含量快速升高, 表明冷压球团在钢水中发生剧烈反应; 随着反应时间的延长, 浮渣逐渐进入钢水并形成少量黑色漂浮液; 反应进行至 7.0 min 时, CO 和 CO₂ 含量急剧下降并逐渐趋于平稳。冷压球团的加入对钢水成分影响较小, 不会引入有害元素。

(3) 由于实验室规模较小, 渣铁分离不充分, 熔体喷溅较严重, 造成铁元素损失。在实际应用中, 熔体热容量较大, 喷溅量大幅减少, 冷压球团转化为钢水的比例将高于实验值 (>41.2%), 铁元素进入钢水的比例也将大幅提高 (>85.0%)。

参考文献

- [1] 尚海霞, 李海铭, 魏汝飞, 等. 钢铁尘泥的利用技术现状及展望. 钢铁, 2019, 54(3): 9
- [2] Lin X L, Peng Z W, Yan J X, et al. Pyrometallurgical recycling of electric arc furnace dust. *J Cleaner Prod*, 2017, 149: 1079
- [3] 杨涛, 雷杰, 任晓健, 等. 转底炉用含碳球团制备及生产工艺优化. 钢铁, 2023, 58(4): 157
- [4] 刘自民, 饶磊, 桂满城, 等. 马钢含铁尘泥综合利用研究与实

践. 中国冶金, 2018, 28(9): 71

- [5] 伍强, 刘梦茹, 沈海峰, 等. 转炉 OG 泥资源化利用研究进展. 化工矿物与加工, 2023, 52(7): 21
- [6] Bakkar A, Neubert V. Recycling of cupola furnace dust: Extraction and electrodeposition of zinc in deep eutectic solvents. *J Alloys Compd*, 2019, 771: 424
- [7] 魏汝飞, 张飞虎, 孟东祥, 等. 生物污泥还原钢铁厂含锌粉尘规律. 钢铁, 2023, 58(6): 134
- [8] Zhang D C, Ling H B, Yang T Z, et al. Selective leaching of zinc from electric arc furnace dust by a hydrothermal reduction method in a sodium hydroxide system. *J Cleaner Prod*, 2019, 224: 536
- [9] 曾庆伟, 张永旭. 通钢转炉含铁尘泥的回收利用. 工业安全与环保, 2020, 46(9): 104
- [10] Shu K Q, Sasaki K. Occurrence of steel converter slag and its high value-added conversion for environmental restoration in China: A review. *J Cleaner Prod*, 2022, 373: Art No. 133876
- [11] 高本恒, 郝以党, 张淑苓, 等. 转炉钢渣资源化处理及热闷生产工艺应用实例研究. 环境工程, 2016, 34(11): 99
- [12] 钱强. 低品位钢渣磁选粉在烧结工艺中的应用. 烧结球团, 2018, 43(3): 43
- [13] 韩宏亮, 姜曦. 钢渣磁选粉生产直接还原铁的新方法. 中国钢铁业, 2017(3): 28
- [14] 甘胤, 王吉坤, 包崇军, 等. 冷压球团技术在冶金中的应用研究进展. 矿产综合利用, 2014(1): 10
- [15] 宋昕, 杨建平, 赵志成, 等. 冷压球团—节能减排的重要手段. 铁合金, 2008(5):

基金项目: 国家重点研发计划重点专项资助项目 (2022YFC3901405); 安徽省自然科学基金杰青资助项目 (2208085J19); 安徽省自然科学基金资助项目 (2208085ME121)。

作者简介: 夏晶晶 (2000—), 女, 安徽铜陵人, 硕士。主要研究方向: 冶金固废资源利用。通信地址: 安徽省马鞍山市马向路 1530 号; E-mail: 483941328@qq.com。

通信作者: 龙红明 (1979—), 男, 博士, 教授。主要研究方向: 冶金固废资源利用。通信地址: 安徽省马鞍山市马向路 1530 号; E-mail: yaflhm@126.com。