

电炉钢渣的辊压破碎余热有压热焖处理与应用

Treatment and Application of EAF Slag Roll-in Cracking and Residual Heat Low Pressure Self-pyrolytic Slaking

供稿|于春强 / YU Chunqiang

内容导读

电炉钢渣是电炉冶炼过程中的产物，与转炉炼钢过程相比，电炉冶炼过程渣量更大，渣中全铁含量更高，平均渣中全铁质量分数超过 20%，部分钢厂甚至超过 30%，具有很高的回收利用价值。本文分析了张宣科技原钢渣处理工艺存在的缺点和不足，介绍了现有工艺（辊压破碎余热有压热焖）流程，阐述该工艺处理过程中的物理化学变化和基本原理，并对工艺处理的生产实践情况进行了总结。张宣科技使用辊压破碎余热有压热焖工艺处理电炉钢渣时钢渣处理率达 100%，且处理后钢渣指标良好，该钢渣经二次处理后所得的渣钢、磁选粉和尾渣都可二次利用，生产过程无废水排放，无噪声、无粉尘污染，生产用水可循环使用，实现了生产过程“近零排放”，提高了经济效益，保护了生态环境。

电炉炼钢是“短流程”炼钢的主要手段。电炉炼钢在环保、投资以及效率上占据诸多优势，电炉冶炼能够明显降低 CO₂ 排放，电炉全废钢冶炼过程 CO₂ 排放量约为高炉-转炉长流程的 1/3，“注重短流程电炉炼钢发展”是实现钢铁工业可持续发展的重大战略决策之一^[1-4]。随着“双碳”目标的提出，电炉炼钢在中国也迎来了更加快速的发展。目前电炉短流程炼钢成本普遍高于高炉-转炉长流程炼钢成本，故应更加注重资源的循环利用^[5]。电炉钢渣是电炉炼钢过程的副产品之一，平均渣中全铁质量分数超过 20%，部分钢厂甚至超过 30%，具有很高的回收利

用价值^[6]。

目前，国内外通常采用热焖法、热泼法、水淬法、风粹法、滚筒法等处理方法使钢渣中渣铁有效分离。河钢张宣科技在转型升级改造过程中，建成了 2 座 120 t 电炉，其电炉钢渣采用辊压破碎余热有压热焖工艺处理。目前已稳定生产，并取得了良好的使用效果。

原工艺存在不足

河钢张宣科技在转型升级改造过程中，将 2 座 150 t 顶底复吹转炉改为 2 座 120 t 电炉，原计划电炉

钢渣处理方案仍沿用以前转炉的钢渣处理方案，即热泼水淬工艺。但考虑到采用热泼水淬工艺存在一些缺陷，主要包括：（1）电炉钢渣没有溅渣冷却环节，钢渣温度高，基本呈液态，热泼遇水很容易“放炮”，存在重大安全隐患。（2）热泼水淬法处理后钢渣未经消化陈解，钢渣中游离氧化钙和氧化镁不能充分反应，钢渣不能有效膨胀降解，钢渣块度较大，有的很难进行钢渣深加工。渣铁分离不充分，渣中金属流失，造成资源浪费，并产生大量固体垃圾，钢渣无法得到充分利用。（3）现场产生的大量蒸汽，对厂房及现场设备腐蚀严重，导致作业现场容易积水。再加上现场装载车辆及下水布局不合理，下水通道极易堵塞，作业现场常出现跑水现象，现场作业环境较差。（4）现场的钢渣温度高，电炉钢渣渣量远高于转炉，冷却不能及时进行，钢渣无法及时加工，造成钢渣堆积过多，影响正常的炼钢生产。因此，采用辊压破碎余热有压热焖工艺替代热泼水淬工艺，新建 2 套钢渣有压热焖处理系

统及相匹配的储料下料系统、除尘系统、给排水系统、供配电系统等，图 1 为钢渣辊压破碎余热有压热焖处理装置。

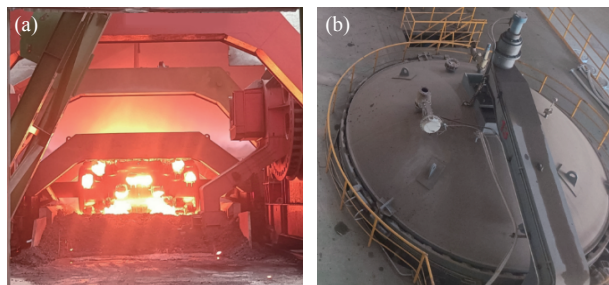


图 1 钢渣辊压破碎余热有压热焖处理装置：(a) 碾压破碎装置；(b) 有压热焖装置

不同钢渣处理工艺对比

不同钢渣处理工艺对比情况如表 1 所示，其中辊压破碎余热有压热焖工艺凭借其经济、安全系数高、时效快、效率高、环保、钢渣的循环再利用率高等优势已成为钢渣处理领域的发展主流^[7-10]。

表 1 不同钢渣处理工艺对比

处理工艺	工艺简介	优点	缺点
弃渣	高温液态渣放入渣罐后直接转运到渣场堆弃	投资少，工艺简单	占用土地，污染环境，不利于后续加工
热泼	将高温液态渣直接泼倒渣坑内进行喷水，使渣急冷碎裂	技术成熟，投资少，冷却速度快	作业环境差，易“放炮”，综合利用率低
风淬	将高温液态渣倾倒入风淬装置中，用空气吹散、破碎成微粒	工艺简单，投资少，处理能力大	对钢渣的流动性要求高，适应性差
滚筒	将液态渣直接倾倒入装有钢球且运转的滚筒中，进行喷水，钢渣发生冷却、粉化、研磨后流入粒化轮被抛出，同时利用高压水进行冷却继续粉化	工艺简单，渣、钢分离较彻底，运行成本低	工艺稳定性差，对钢渣的流动性要求高，金属料损失大
水淬	将液态渣装入底部带孔的渣罐后送入水淬池，利用高压水击碎从渣孔流出的钢渣后落入渣池继续冷却粉化	占地少，处理后的钢渣便于后续加工和利用	对钢渣的流动性要求高，劳动强度大，作业环境差
本研究	将高温液态渣进行辊压破碎后，装入热焖罐中进行喷水继续冷却，使钢渣冷却粉化，实现渣钢分离	技术进步快，适应性强，安全系数高、时效快、钢渣粉化效果好，循环利用率高，节能环保	工艺比较复杂

辊压破碎余热有压热焖工艺

工艺流程

钢渣处理工艺流程如图 2 所示。电炉炼钢车间出渣后由渣罐车将渣罐运至一次渣处理车间，由天车吊起渣罐将热熔钢渣吊至倾翻工位，利用倾翻台车倾翻渣罐，将液态钢渣倒入碾压破碎渣床。碾压

破碎车通过行走对铺好的液态渣进行破碎，同时上部喷淋机构在碾压过程中对钢渣进行冷却降温处理，从而使高温熔融钢渣冷却并粒化。碾压后的钢渣通过接渣车运出坑道，吊运固态渣罐进热焖罐，进行闷渣，热焖处理后的钢渣由天车吊起，倒至料仓暂存。料仓下配有振动给料机和挡边带式输送机，定期将钢渣送入汽车运至钢渣二次处理区进

行破碎、筛分、磁选等，最终产出可供回收利用的渣钢、磁选粉和作为水泥、砖等原料的合格尾渣。

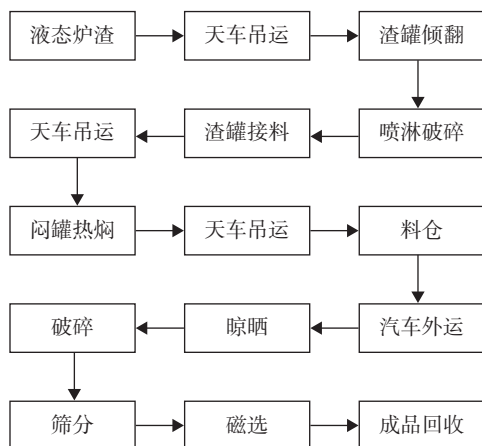
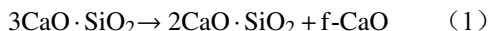


图2 钢渣处理工艺流程图

工艺原理

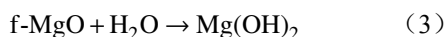
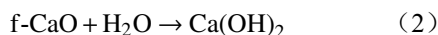
钢渣辊压破碎余热有压热焖处理过程主要分为2个阶段：第1阶段主要完成对高温熔融钢渣的初期冷却和破碎；第2阶段充分利用钢渣余热，通过有压自解，完成对钢渣中游离氧化钙和氧化镁的快速消解任务，提高钢渣的稳定性^[11]。钢渣处理过程中发生物理化学变化，受化学反应、膨胀应力、相变应力以及收缩应力的共同作用，钢渣粉化，游离氧化钙和氧化镁含量大幅度降低，实现钢渣分离^[12-13]。

第1阶段主要在碾压破碎渣床上进行，高温钢渣遇水急速冷却，由于钢与渣的膨胀系数不同，钢渣不同部位产生收缩量不同，致使渣壳爆裂分开。当温度降低到1250℃以下时，发生如式(1)所示分解反应，此时钢渣体积会发生膨胀，引起钢渣粉化^[13-14]。同时，在碾压辊破碎作用下，未粉化和粉化程度低的大尺寸钢渣被进一步破碎为小尺寸颗粒状。以上变化是钢渣热焖工艺实现渣钢分离的基础。



第2阶段主要在闷罐中进行，通过向固态渣罐中喷水使钢渣温度继续降低，当温度冷却至525℃时，钢渣中的硅酸二钙由 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ ($\beta\text{-2CaO} \cdot \text{SiO}_2$) 转变为 $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ ($\gamma\text{-2CaO} \cdot \text{SiO}_2$)，这一过程导致钢渣体积膨胀10%，引起钢渣进一步粉化^[11]。同时钢渣所含的余热将水变成蒸汽，并产生饱和蒸汽压，蒸汽在一

定的压力下与钢渣充分接触，钢渣中游离的氧化钙和氧化镁遇水蒸气发生如式(2)和式(3)所示的水解反应，游离氧化钙水解后体积膨胀98%，游离氧化镁水解后体积膨胀148%，水解反应消除了钢渣的不稳定性，是钢渣资源化利用的基础^[15-16]。根据渗透理论，随着水蒸气分压变大，传质系数增大，所以在钢渣热焖过程中，水解反应时间将随着热焖罐水蒸气浓度增加而缩短，利用热焖罐中钢渣余热，借助自解技术产生过饱和蒸汽进行热焖，可快速消解掉钢渣中游离的氧化钙和氧化镁^[17-18]。



应用效果

自张宣科技电炉投产以来，在严格按照生产操作规程的正常生产条件下，钢渣辊压破碎余热有压热焖处理过程安全稳定。在碾压破碎处理过程中，通过控制喷淋水量可避免放炮现象发生，同时处理后的钢渣指标良好，能够循环利用，实现了“近零排放”，有利于环境保护。

使用钢渣辊压破碎余热有压热焖工艺处理时对钢渣的流动性无要求，即使是渣壳也可进行热焖处理，钢渣处理率达100%。电炉钢渣经辊压破碎余热有压热焖工艺处理后浸水膨胀率低于2%，处理后的钢渣基本实现自动分离，小于20mm的粉化钢渣比例超过60%，图3为经辊压破碎余热有压热焖工艺处理后的钢渣形貌图片。经过该工艺处理后的钢渣其游离氧化钙质量分数不足1%（实测值为0.5%~0.8%），具有较好的易磨性和稳定性，该工艺能满足尾渣中游离氧化钙质量分数≤2.5%的制砖、磨粉的技术要求，尾渣非常适合后继的尾渣资源化利用。

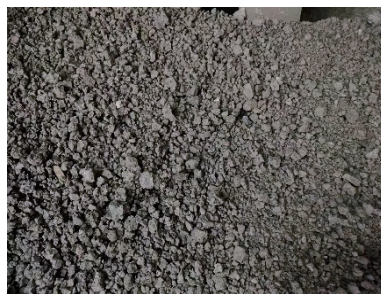


图3 经辊压破碎余热有压热焖工艺处理后钢渣形貌图片

和市场开拓。

辊压破碎余热有压热焖工艺处理的钢渣经二次处理后所得产品指标如表 2 所示, 经二次处理后所得产品中渣钢和磁选粉占比较高, 两者之和约为 35%, 原因为电炉原始炉渣钢渣中 Fe 质量分数较高, 一般超过 20%, 部分炉次甚至超过 30%, 接近 40%。

表 2 电炉钢渣二次处理后所得产品及指标

所得产品	粒度/mm	Fe 质量分数/%	质量比例/%
渣钢	>80	~75	10
	30~80	~65	
	8~30	~55	
磁选粉	0~8	~45	25
尾渣	0~8	≤1	65

使用辊压破碎余热有压热焖工艺能够有效地减少炼钢厂现场污染, 实现钢渣处理车间的干净整洁, 生产过程无废水排放, 无噪声, 无粉尘污染, 生产用水循环利用, 每吨渣新水耗量不足 0.3 m³。同时可以充分回收钢渣中的含铁物料, 降低炼钢成本, 在回收含铁物料的同时, 尾渣也得到了综合利用。处理后得到的尾渣中游离氧化钙和氧化镁含量很低, 消除了钢渣的不稳定因素, 可用于道路材料、建筑材料和水泥生料配料等, 尾渣的利用率达到 100%, 满足国家节能减排及可持续发展要求, 也符合企业的实际情况。120 t 电炉每炉次产生的钢渣经辊压破碎余热有压热焖处理后回收得到的金属物料渣钢、磁选粉和尾渣分别约为 1.5、3.5 和 10 t, 处理后的钢渣渣铁分离效果好, 稳定性好, 渣钢、磁选粉可循环利用, 尾渣直接外销, 根据实际生产情况平均每月收益达到 270~300 万。

结束语

河钢张宣科技进行项目改造后使用辊压破碎余热有压热焖工艺处理电炉钢渣, 应用该工艺生产过程安全稳定, 使用效果较好。钢渣处理率达 100%, 且处理后钢渣指标良好, 经二次处理后所得的渣钢和磁选粉可进行二次冶炼应用, 尾渣也可循环利用。同时生产过程无废水排放, 无噪声, 无粉尘污

染, 生产用水循环利用, 实现了生产过程“近零排放”, 提高了企业的效益, 保护了环境和生态。

参考文献

- [1] 姜周华, 姚聪林, 朱红春, 等. 电弧炉炼钢技术的发展趋势. 钢铁, 2020, 55(7): 1
- [2] Kirschen M, Badr K, Pfeifer H. Influence of direct reduced iron on the energy balance of the electric arc furnace in steel industry. Energy, 2011, 36(10): 6146
- [3] Bhaskar A, Assadi M, Somehsaraei H N. Decarbonization of the iron and steel industry with direct reduction of iron ore with green hydrogen. Energies, 2020, 13(3): 758
- [4] Harada T, Tanaka H. Future steelmaking model by direct reduction technologies. ISIJ Int, 2011, 51(8): 1301
- [5] 王国军, 朱清得, 魏国立. 电炉钢与转炉钢成本比较. 甘肃冶金, 2019, 41(5): 74
- [6] Kirschen M, Hay T, Echtwerhof T. Process improvements for direct reduced iron melting in the electric arc furnace with emphasis on slag operation. Processes, 2021, 9(2): 402
- [7] 张延平, 赵红军, 王东, 等. 钢渣热闷余热回收技术与供暖(发电)应用. 冶金能源, 2023, 42(1): 49
- [8] 周晓龙, 张兴龙, 光辉. 转炉渣综合处理与利用分析. 河北冶金, 2014(8): 81
- [9] 刘佩忠, 张建良. 钢渣风碎粒化技术. 金属世界, 1997(1): 12
- [10] 王会刚, 吴龙, 彭霖, 等. 中外钢渣一次处理技术特点及进展. 科学技术与工程, 2020, 20(13): 5025
- [11] 田广银, 张凌燕. 钢渣热闷技术分析与应用实践. 环境工程, 2016, 34(12): 126
- [12] 许建雄, 范永明, 李泽平, 等. 钢渣热闷工艺及装备研究. 包钢科技, 2019, 45(1): 37
- [13] 邓志豪. 转炉钢渣相演变和自粉化规律研究 [学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2014
- [14] 王连其, 刘志海, 任起坡, 等. 钢渣热闷工艺技术改造实践. 山西冶金, 2021, 44(5): 227
- [15] 张海华, 胡显堂, 高德斌. 钢渣有压热焖水冷控制技术的应用. 河北冶金, 2020(9): 75
- [16] 吕杨. 钢渣中 f-CaO 膨胀性研究 [学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2017
- [17] 郭文斌, 刘志远, 王重君, 等. 转炉钢渣辊压破碎-有压热焖处理工艺的应用实践. 宽厚板, 2023, 29(1): 17
- [18] 饶磊, 董元麓, 王珏, 等. 风碎和热闷组合技术在线处理转炉钢渣实践. 炼钢, 2018, 34(1): 65

作者简介: 于春强 (1985—), 男, 高级工程师, 2012 年毕业于河北联合大学冶金工程专业, 现在河钢集团张宣科技主要从事炼钢方面的研究, 通信地址: 河北省张家口市宣化区胜利路 26 号, E-mail: yuchunqiang@hbisco.com。