

钢渣—脱硫渣固废协同处置减碳工艺及效益分析

崔宝松

北京资源循环科技有限公司, 河北 迁安 064400

DOI:10.61369/EAE.2026040020

摘 要 : 钢铁流程每一年都产出数亿吨的钢渣以及脱硫渣, 要是开展单一的治理工作, 那就难以为继, 而协同处置正从设想得以实现变为现实情况, 本文鉴于两类渣的物化特性以及处置困境来开展工作, 梳理了进行预处理协同、开展全固废胶凝材料制备以及进行建材化利用这三条工艺主线, 并且讨论钢渣碳酸化固碳与矿化养护在减碳链条当中的位置以及可行性, 并且务实地去开展对环境、经济以及社会这三重效益的评估工作。

关 键 词 : 钢渣; 脱硫渣; 协同处置; 固废资源化; 减碳

Carbon Reduction Process and Benefit Analysis of Collaborative Disposal of Steel Slag Desulfurization Slag Solid Waste

Cui Baosong

Beijing Resource Recycling Technology Co., Ltd., Qian'an, Hebei 064400

Abstract : The steel process produces hundreds of millions of tons of steel slag and desulfurization slag every year. If a single treatment work is carried out, it will be difficult to continue. Collaborative disposal is becoming a reality, and the physical and chemical characteristics of the two types of slag and the disposal difficulties are taken into account to carry out the work. This article summarizes the three main processes of pre-treatment collaboration, the preparation of solid waste cementitious materials, and the utilization of building materials. It also discusses the position and feasibility of steel slag carbonation carbon fixation and mineralization maintenance in the carbon reduction chain, and pragmatically carries out the evaluation of the triple benefits of environment, economy, and society.

Keywords : steel slag; desulfurization slag; collaborative disposal; solid waste resource utilization; carbon reduction

一、问题的提出

钢铁行业属于典型的流程制造业, 在长流程炼钢产出钢材的时候, 同时也会产出大量的冶金渣, 转炉钢渣所具有的碱度高、游离氧化钙含量大等特性, 使得它安定性不良, 而这方面的问题一直都是开展转炉钢渣建材化利用工作的难题; 铁水预处理以及烧结烟气治理所产生的脱硫渣、脱硫灰, 也就是硫含量偏高的这些渣和灰, 长期以来只能进行堆存, 或者是低价向外售卖。两类渣是从同一个厂区出来的, 不过它们的成分有所不同, 一个是偏钙的, 另一个是偏硫的。长期以来都是各自排放、各自治理, 这样就导致处置线出现了重复建设的情况, 同时也浪费了资源互补的潜力^[1]。

这样的割裂所带来的代价正在逐渐显现出来, 堆存占地以及扬尘污染属于显性成本, 而隐性成本会更高。这主要是因为钢渣当中的硅酸钙矿物没有得到利用, 也就意味着上游要开展更多石灰石的烧制工作, 并且会排放更多的二氧化碳。在双碳目标的约束之下, 钢铁企业进行碳排放核算时会覆盖固废处置这个环节, 碳市场履约的压力会逐年增大, 把钢渣以及脱硫渣放在同工艺线当中来统筹去处理, 这既是资源方面的问题, 也是碳账方面的问题。

二、两类渣的处置困境与协同基础

(一) 钢渣: 活性有, 但激发难

钢渣所具有的胶凝活性是源于硅酸三钙以及硅酸二钙, 它和水泥熟料的来源相同, 不过其生成温度要高于水泥烧成温度, 并且矿物结晶粗大且致密, 从而导致水化非常缓慢。游离氧化钙以及氧化镁遇到水会发生膨胀, 把它们掺入到建材当中之后, 安定性方面的风险比较大。在多数建材应用当中, 钢渣粉的掺量较低, 其消纳速度远远比不上产出速度, 预处理这个环节开展起来可不轻松, 热闷、热泼以及风淬这些方式各有各的利弊。热闷处理也就是去处理热闷方面的工作, 它发展得稳定且成熟, 不过能耗、水耗以及周期会受到限制, 压蒸环节所存在的防爆安全问题也困扰着各个厂^[2]。综合来看呢, 钢渣并不是没有出路, 而是在单打独斗的情况下, 每一条出路走起来都会很费劲。

(二) 脱硫渣: 成分杂, 出路窄

脱硫渣的处境那就更加尴尬了, KR法脱硫渣当中含有大量的金属铁以及脱硫剂残留, 烧结半干法脱硫灰主要是以亚硫酸钙为主, 硫、氯这些杂质会让它难以进入常规的建材体系。实践当中的改进大多集中在回收这个方面, 对脱硫渣开展二次焖渣工

作，它的含水量极大程度上低于首次焖渣的，这样就可以满足上生产线的要求；配合进行翻条筛改造以及除铁器调整，开展渣铁分级回收工作，让铁资源回到炼铁炼钢流程，而剩余尾渣的去向还需要确定^[3]。也就是说，即便去开展脱硫渣金属回收的工作再精细，还是会有一大块低值尾渣的问题悬而未决，而这也就是协同处置需要去承接的方面。

（三）成分互补：协同的化学依据

这样把两类渣放在一块儿，它们当中的互补关系就会很清晰，钢渣当中富含钙元素，但缺乏硫元素，在水化过程当中会生成氢氧化钙，进而提供碱性环境；脱硫渣当中富含硫元素，它的硫酸盐是大家公认的碱性胶凝材料的激发组分。矿渣添加进去之后，这三者进行水化从而形成接力的状况：在硫酸盐的激发之下，矿渣会先进行水解，使得浆体的碱度得以提升，进而加速钢渣当中硅酸盐矿物的水化，让液相到固相反应的转变提前了。协同并不是进行简单的物理混堆，而是有明确反应路径所支撑的化学配合，这也就是近年来钢渣、矿渣、脱硫石膏体系研究升温的缘由。

三、协同处置的工艺路线

（一）预处理协同：一条线吃两类渣

预处理也就是协同处置这方面所开展的首道工序，热闷线完成改造之后，就可以在同一渣线先去处理脱硫渣，然后再去处理转炉渣，借助脱硫渣焖渣余水的碱度以及温度，同时来改善钢渣粉化的效果；把脱硫渣回收的渣铁返回进行炼铁，KR脱硫渣开展热态循环利用之后，铁水的温降相对减少了大概10℃，脱硫剂的消耗降低了大约四成，这样节能也就是减碳。热态循环还有常被忽略的意义：要是脱硫渣携带的显热随着堆存而散失，那么再加热到工作温度就需要补充燃料；而要是把热量保留在流程内，那就可以减少一部分碳排放。

预处理协同的要点是开展调度方面的工作，而并非设备方面，对于渣罐进行配置、开展打水制度的制定以及焖渣周期的设定，会根据两类渣也就是脱硫渣和转炉渣的特性分别来开展。鉴于脱硫渣量比较小，可以把罐攒起来集中去处理；转炉渣则要马上趁热进坑。这两种处理节奏会被并入到一张排产表中，采用一套人马以及一条主线，将投资进行摊薄，来开展集中管理工作。脱硫渣在进行二次焖渣之后，它的含水率会变得更低，这样就可以直接满足后续粉磨以及配料环节的入料要求，这一点决定了它能不能顺畅地接入胶凝材料线，并且不需要再增加烘干工序。烘干虽然看起来是一件小事，但实际上是能耗的大户。要是在协同线路上存在需要另外燃烧燃料来补充热量的环节，那就会对整体的减碳收益造成侵蚀。在进行工艺设计的时候，应当优先把流程余热利用起来去控制水分。

（二）全国废胶凝材料：协同的主战场

胶凝材料是钢渣以及脱硫渣开展协同工作价值最高的出口方面，把钢渣粉以及烧结烟气脱硫灰复配起来形成全固废胶凝材料，同时借助粉煤灰来调整硅铝相，添加少量有机胺类激发

剂，净浆强度能够获得数量级的提升，单一掺入20%的粉煤灰就会明显促进水化硅酸钙的生成，让十四天抗压强度得以提高将近两倍^[4]。要是把体系弄得更复杂一些，往里面加入矿渣，也就是选用钢渣30%、矿渣60%、脱硫石膏10%的配合比来开展配置，二十八天的抗压强度能够达到四十兆帕出头，各项性能可以契合现行标准的要求，微观方面，钙矾石以及水化硅酸钙凝胶持续地生成，这证明了各组分之间存在着协同反应，而并非是简单的叠加^[5]。

胶凝材料在减排方面的逻辑是双向性的，一方面，把钢渣、脱硫渣当作水泥熟料来使用，开展替代工作，这样就省掉了熟料煅烧过程当中碳酸钙分解排碳以及燃煤排碳的情况；另一方面，尾矿以及废石等固体废弃物骨料也就有了开展胶结的出路，全固废混凝土这一情况得以实现。借助钢渣、水渣以及脱硫石膏当作原料开展复合胶凝材料的制作工作，把它用来替代水泥制作混凝土，全替代的时候，二十八天抗压强度能够达到水泥对照组的近乎八成，契合C30工程的需求，减少碳排放以及性能这两个方面当中的平衡点能够很明显地看到^[6]。对于年产达到千万吨级钢渣的头部企业而言，这条线把固废不出厂这个口号转变为了排产计划。

（三）建材化利用的边界

除了胶凝材料以外，路基料、免烧砖以及回填材料等低值产品的出口，仍然需要保留下来，全固废胶凝材料的早期强度与凝结时间对配合比高度敏感，质量波动是批量应用的现实风险，掺合料与骨料中的氯、硫杂质也需要在入厂检验中卡住。建材化利用的边界应当由产品标准以及工程验收来进行划定，而并非是消纳压力。要是为了消纳固废而放宽标准，那就会把全固废材料的口碑给砸了。

四、减碳工艺与效益分析

（一）碳酸化固碳：把渣变成碳汇

借助钢渣碳酸化这个反应过程，也就是让渣中的游离氧化钙、硅酸钙以及二氧化碳展开反应来生成稳定的碳酸钙，这个反应会放热，并且产物比较稳定，矿化每吨钢渣的时候，理论上能够固定的二氧化碳固碳量可达数百千克。基于钢渣来开展的矿物碳酸化工艺和钢铁行业天然契合，二氧化碳排放源以及碱性固废都在同一个厂区，这样就省去了长距离运输，得以实现减排以及固废高值化双重收益的叠加^[7]。经济性是决定这项技术能不能走出实验室的关键因素。钢渣固碳方面的原料成本比较低、容量又大，鉴于经济以及环境方面的考量，其前景是比较可观的，不过大部分工艺还停留在实验室以及小试阶段，气固反应动力学较慢以及矿化装备放大存在困难是主要的拦路虎^[8]。

在矿化路径方面，直接矿化以及间接矿化分别有着各自的优势和劣势，直接矿化会把二氧化碳直接和渣进行接触反应，从而省去了中间步骤。湿法矿化的效率要比干法的好，反应的温度、时间、渣的粒径以及液固比会影响钙镁离子的扩散以及转化速度，提升效率的思路基本上是推动反应朝着生成碳酸钙的方面推

进；间接矿化先着手去开展钙镁离子的浸出工作，然后再进行固碳，其效率会取决于浸出率。把酸浸环境进行选择、开展浸出液的净化工作以及对碳酸钙沉淀分级加以利用，这些构成了更长的工艺链，从而换来产品的纯度以及附加值。完善热力学以及动力学的理论体系、开展大规模的工业化试点工作、开发固碳后钢渣方面的高值化出路，是该线产业化的三个前置条件^[9]。

（二）矿化与胶凝材料的耦合

那么真正具备工程想象力的方面，是把耦合碳酸化固碳与全固废胶凝材料这一操作开展起来，运用钢渣以及粉煤灰来制作复合碱激发胶凝材料，并且开展二氧化碳矿化养护，氧化钙的掺量和固碳率是成正比的，矿化产物也就是方解石会填充孔隙，这样能同时实现固碳以及增强的效果，进行的经济性分析方面同样给出了正面的结论^[10]。这就意味着矿化养护可以在制品这个环节来完成，养护窑当中二氧化碳的浓度、压力以及时长是可以控制的，固碳率能够测量、减排量可以核证，这样就契合了碳交易市场对于可计量方面的要求拥有可以进行报告、可以去进行核查的要求。制品养护相较于散体渣直接矿化，对反应界面的利用效率会更高，并且避开了大规模气固反应装备放大这个难题，是现阶段更为适宜的减碳切入点。

（三）三重效益的务实核算

环境效益的核算开展的是三笔账的核算工作，第一笔也就是替代账，把每吨全固废胶凝材料用来替代水泥熟料，按照熟料碳排放强度来进行折算，减排量能够达到数百千克二氧化碳，这是最大并且最确定的一笔；第二笔也就是矿化账，碳酸化封存二氧化碳的数量是由固碳率来决定的，能够进行核证，不过量级较为有限；第三笔也就是处置账，开展堆存占地、扬尘以及碱性渗滤液的环境风险消除工作，虽然这方面难以实现货币化，但是风险是真实存在的。经济方面的账得面对现实情况：全固废胶凝材料

的成本优势是由熟料替代以及固废零售价带来的，要是处置费以及产品价格随着市场发生波动，那么账面利润马上就会被摊薄；碳交易收入目前还难以覆盖开展矿化装备投入的成本，指望碳价一下子就达到理想水平是不现实的。在社会效益方面，通过让固废不出厂，得以释放堆存土地、空出处置线岗位，以及实现区域环境的改善，这对于企业以及地方政府而言是有吸引力的，也是各地示范项目进行立项的底层缘由。

综合起来进行判断，在现阶段，协同处置效益结构需要把替代减排当作基本盘，将建材产品收入作为现金流，并且把碳汇以及碳交易视为增量，这三个方面缺一不可，任何只计算环保方面的账、不计算经济方面的账的方案，都很难在钢厂成本考核体系当中挺过两个预算年度。

五、结论

钢渣以及脱硫渣进行协同处置，本质上就是用流程思维来替代末端思维，也就是预处理一条线对这两类渣开展统筹工作，借助胶凝材料让钙硫相互补充从而形成强度，并且通过碳酸化让富钙组分变成碳汇，三条工艺线在同一个厂区当中实现了闭合。它的效益不是用单一环节的盈亏来进行衡量的，而是凭借以替代减排当作基本盘、产品收入当作现金流、碳汇当作增量的结构来取得胜利，现阶段所面临的瓶颈大多集中在标准、核算以及考核机制这些方面，并非是反应机理。鉴于技术路线已经明确，需要把实验室以及示范线的数据转换成为标准条文以及碳市场所认可的凭证。那么，固废协同处置的减碳成效，最终并非取决于论文当中所说的固碳率，而是取决于钢厂年度采购计划当中全固废胶凝材料占的百分点。

参考文献

- [1] 王吉凤，付恒毅，闫晓彤，等. 钢渣综合利用研究现状 [J]. 中国有色冶金，2021，50（6）：77-82.
- [2] 黄丽，徐杰. 浅谈钢渣热闷的现状与发展 [J]. 工业加热，2016，45（4）：68-70.
- [3] 陈虎，王少军，乔爽，等. 脱硫渣综合回收利用技术研究 [J]. 江西冶金，2022，42（3）：16-23.
- [4] 孙睿，王栋民，房中华，等. 钢渣-脱硫灰基全固废胶凝材料及其砂浆界面过渡区的研究 [J]. 金属矿山，2022，51（1）：41-52.
- [5] 栗东平，平浩岩，张凯帆，等. 钢渣-矿渣-脱硫石膏复合胶凝材料的制备及水化机理 [J]. 科学技术与工程，2023，23（6）：2558-2566.
- [6] 杨志强，赛音巴特尔，时朝昆，等. 多固废耦合水泥制备 C30 混凝土性能研究 [J]. 环境工程，2023，41（3）：143-147.
- [7] 王瑞，颜峰，郭荣鑫，等. 钢渣矿物碳酸化及生命周期评估研究进展 [J]. 材料导报，2023，37（增刊2）：282-289.
- [8] 刘文昊，陈庆彩，徐腾飞，“双碳”战略背景下的钢渣固碳技术研究进展 [J]. 环境工程，2024，42（5）：172-182.
- [9] 谢元涛，封孝信. 钢渣矿化固定二氧化碳研究现状及展望 [J]. 金属矿山，2023（11）：45-54.
- [10] 宋夏，赵传文，宋雨佳，等. 钢渣-粉煤灰固废复合碱激发胶凝材料矿化养护 [J]. 洁净煤技术，2024，30（10）：88-99.