

LF 精炼液态渣循环利用 降低精炼成本实践

LF Refining Liquid Slag Recycling to Reduce the Refining Cost Practice

供稿|王文辉, 张福利, 张万庆, 张文祥, 王子然, 李硕, 武晓阳, 温巨文 / WANG Wenhui, ZHANG Fuli, ZHANG Wanqing, ZHANG Wenxiang, WANG Ziran, LI Shuo, WU Xiaoyang, WEN Juwen

内容导读

唐山钢铁集团长材事业部通过提升转炉品种钢冶炼的控制水平与稳定性, 减少钢水条件波动对精炼工序的影响、调整精炼倒渣比例、LF 精炼液态渣循环利用等措施有效地控制精炼生产成本, 其中 LF 精炼液态渣循环利用吨钢降低精炼石灰用量 2.45~3.11 kg, 循环利用次数在 4 次以内, 在保证循环炉渣冶金效果的同时, 累计降低品种钢精炼成本 7.28 元/t, 年可节约 218 万元以上。

唐山钢铁集团长材事业部炼钢厂主要生产设备有 1 套 KR 铁水预处理系统, 3 座 100 t 氧气顶吹转炉, 2 座 100 t LF 精炼站, 3 台方坯连铸机, 1 台矩形坯连铸机, 目前通过 LF 精炼的产品主要有 ER70S-6、ER50-6、ER60-2、EH12、H08AJ 焊丝焊条品种以及部分 400 系列钢筋钢、角钢等产品, 每月平均 550 炉以上经过精炼升温造渣, 其中焊丝焊条等品种占比 50% 以上, 精炼冶炼成本占炼钢工序成本的比例为 8% 左右, 品种钢在精炼工序的冶炼降本需要进一步挖掘, 为此唐钢公司长材事业部进行了精炼液态渣循环利用的研究, 并投入到精炼生产实践中。

精炼渣系组成

精炼站渣系和技术参数

LF 主要特点为还原性气氛、氩气搅拌、电极埋弧加热、白渣精炼或灰白渣精炼; 主要功能为加热

升温并准确控制钢水温度, 进行钢水成分微调及精确控制, 脱氧、脱硫、喂线改变夹杂物形态、去除夹杂物、微合金化(钛、硼等)。

精炼过程中, 通过调整炉渣的碱度、炉内还原性以及喂 Ca 线处理的方式, 使钢水中的夹杂物变形和上浮, 达到净化钢水、提高钢水可浇性的目的。为取得最佳的精炼操作效果, 要求精炼渣具备合成渣的特点。根据客户需求和生产实际, 目前焊丝、焊条钢 LF 生产工序时: 采用少渣量、低碱度、灰白渣精炼工艺。精炼渣碱度 $R=1.6\sim1.8$, 渣中 FeO 和 MnO 总质量分数控制目标 1.0%~2.0%。稀薄渣操作配合全程弱吹氩, 保证焊丝、焊条钢 LF 出站硫质量分数稳定控制在 0.008%~0.015%, 精炼脱硫率为 30%~40%^[1], 满足用户的使用要求。

炉渣来源

ER70S-6 气保焊丝或 H08AJ 焊条钢浇次开始

后, 钢水由转炉炉后吊运至 LF 精炼站, 精炼过程中加入造渣剂用以造渣埋弧, 进行给电升温 and 脱硫操作。造渣剂以及冶炼形成产物和侵蚀的耐材形成精炼渣, 连铸浇铸结束后, 在下个炉次钢水进精炼站之前, 指挥天车组织将上一炉次浇注结束后的炉渣折回到本包钢水内, 这个操作成为回浇余操作, 后文简称为回浇余, 并且由于浇注结束后, 钢包内会剩余一定量的钢水, 如果将这部分液态钢水进行返回再利用, 也可提高钢水收得率^[2], 精炼渣组成主要由 CaO 、 Al_2O_3 、 SiO_2 等氧化物和脱磷脱硫产物以及 CaF_2 等卤化物组成; 由于渣本身为液态且含氧化物, 回浇余操作后, 可使本炉次的渣碱度和流动性增加。

液态渣循环利用实践

精炼渣热用原理

由冶金原理的基础知识可知, 脱硫反应为多相反应, 在钢-渣界面进行, 脱硫反应能否正常进行与精炼渣的熔化温度密切相关。在一定的炉温下, 精炼渣的熔化温度越低, 过热度越高, 流动性越好, 脱硫反应进行的就越快^[3], 其中, 渣量的控制是保证脱硫正常和稳定的主要因素, 渣量的多少对脱 S 效率、脱 S 速度、冶炼电耗、钢水增碳等的影响很大。一般情况下, 在预定的 LF 冶炼周期内将 S 脱至控制范围内, 渣量越少越好, 但是为了能充分埋弧必须有一最少渣量即基本渣量。基本渣量的确定是渣层厚度 $\geq$ 电弧长度, 实际生产中根据观察渣层厚度 (大于 80 mm) 和电极给电声音 (噪音) 来判断是否达到要求。

目前长材部钢水平均初始 S 质量分数为 0.025%~0.035%, 理论脱硫加渣量约为 10 kg/t。生产中为了满足埋弧加热, 焊丝焊条等精炼渣的脱硫量都未达到饱和, 还具有脱硫能力, 因此, 首次经 LF 处理后的精炼炉渣具有脱硫能力不饱和、碱度高、氧化性低、熔点低的特性, 在本炉精炼埋弧造渣之前, 将上一炉次热态流动性的浇余渣折入本炉钢包内, 使炉渣碱度和流动性增加, 渣中的自由氧化钙有效分数增加, 炉渣脱硫效果提高, 可以有效降低精炼石灰、改质剂等造渣料用量。

回浇余前, 精炼石灰、改质剂等均为固体渣料, 在熔化时需要一定的电耗, 回浇余渣为液态

渣, 具有一定的温度 (1500 °C 左右), 倒入钢包后成渣速度快, 能在短时间内将渣化透、化好, 埋弧效果有所提高, 送电时可立即产生埋弧, 减少电极弧光对包衬的损坏, 降低生产时的噪音和扬尘, 升温速率提高, 缩短升温时间和化渣时间, 降低精炼电耗^[4]。

精炼渣热用数据

在实践数据中, 随着精炼渣循环次数的增多, 渣量增加, 炉渣的有效成分发生变化, 渣循环利用的有效作用会有所降低^[5], 跟踪多次循环精炼渣成分 (表 1) 可知, 多次循环后渣中 Al_2O_3 含量不断升高, CaO 含量降低, 在 4 次利用后, 不利于脱硫反应进行, 因此我部目前要求热渣循环利用 4 次后, 钢渣失去再利用价值, 应将循环渣倒出, 精炼重新造渣, 其原理是受曼内斯曼指数 (M) 原理影响: $M=w(\text{CaO})/[w(\text{SiO}_2) \cdot w(\text{Al}_2\text{O}_3)]$, 当浇余渣开始循环后, 精炼炉渣碱度较高, 回浇余后配合转炉炉后出钢所加顶渣, 进一步提升炉渣碱度, 但由于精炼处理过程中需要加入少部分铝线、铝粒等用于脱氧, 导致渣中 Al_2O_3 含量逐渐升高, 同时由于渣中 Al_2O_3 含量的升高比炉渣碱度升高的幅度相对要大, 所以炉渣的曼内斯曼指数逐渐下降, 脱硫效果降低。

表 1 精炼渣循环使用成分数据

循环次数	碱度, R	质量分数/%		
		SiO_2	Al_2O_3	CaO
0	1.61	11.13	25.24	52.73
1	1.55	8.96	28.67	50.72
2	1.56	9.21	28.82	50.21
3	1.47	9.97	29.95	49.15
4	1.48	8.83	31.21	47.11

回浇余渣量对精炼造渣工艺的影响

连铸钢包返回热渣循环利用后, 随循环次数增加, 脱硫率降低^[6], 由表 2 可知, 热渣循环利用 1 次, 较未回浇炉次化渣至成品脱硫率增加 1.12 个

表 2 精炼渣循环利用 1 次脱硫情况

循环次数	S 质量分数/ 10^{-6}			脱硫率/%	
	化渣	出站	成品	化渣至出站	化渣至成品
无	15.43	12.61	11.55	18.28	25.15
1	16.14	13.02	11.90	19.33	26.27

百分点, 脱硫效果有增强, 由表 3 可知循环利用 4 次则较未回浇炉次化渣至成品脱硫率降低 2.87 个百分点, 结果表明初次利用的浇余渣对比正常炉次

脱硫效果强, 循环利用次数增加后, 脱硫率有降低趋势, 故精炼渣渣循环利用 4 次后停止回浇余, 本炉精炼站进行重新造渣。

表 3 精炼渣循环利用 4 次脱硫情况

循环次数	质量分数/%							脱硫率/%
	化渣S	化渣P	成品S	成品P	成品Si	成品Al	成品N	
无	0.017	0.013	0.0129	0.013	0.846	0.002	0.004	24.12
4	0.016	0.012	0.0126	0.012	0.847	0.002	0.004	21.25

回浇余对夹杂物的影响

对回浇余 (4 次) 炉次与未回浇余炉次取样进行

电镜分析 (图 1), 选取较有代表性结果分析回浇余后对夹杂物的影响。

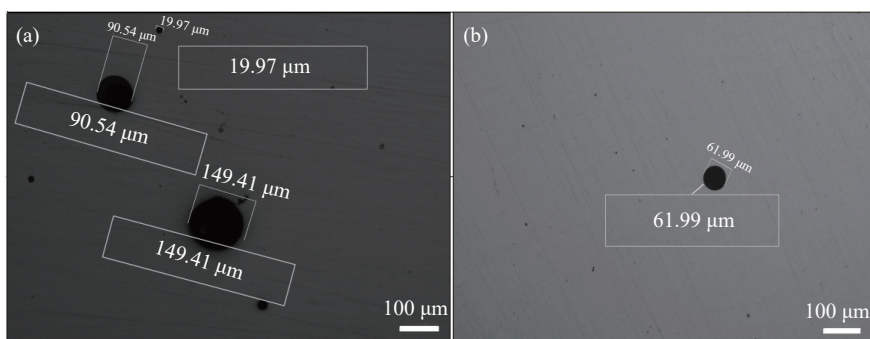


图 1 精炼进站化渣工序不同炉次电镜结果: (a) 回浇余; (b) 未回浇余

根据各阶段取样电镜结果对夹杂物按个数和直径进行分类, 得出以下数据 (表 4)。

表 4 2 种工艺炉次不同尺寸夹杂物数量

取样环节	>50 μm		20~50 μm		10~20 μm		2~10 μm	
	未回	回浇余	未回	回浇余	未回	回浇余	未回	回浇余
进站	3	15	8	11	23	23	107	156
化渣	2	7	9	9	17	17	45	67
软吹前	2	1	0	0	5	5	35	31
软吹 7 min	0	2	1	1	3	3	15	15
出站	1	0	1	1	8	8	13	13
中包	0	0	0	1	9	8	0	14
铸坯	0	0	2	2	1	6	13	11

由上表数据可以明显得出结论: 进站及化渣时, 回浇余炉次大颗粒夹杂物尺寸和数量均明显高于未回浇余炉次, 根据图 1 电镜结果, 回浇余炉次化渣样夹杂物颗粒直径最大达到 149.41 μm, 远高于未回渣炉次同一阶段的最大值 61.99 μm, 大颗粒夹杂物数量较多。另外进站、化渣环节直径 >50 μm 和 2~10 μm 的夹杂物个数均高于未回浇余炉次; 且回

浇余炉次夹杂物分布较为集中, 2~10 μm 的夹杂物数量较未回浇余炉次高出 30%。

软吹前至软吹 7 min 工序下的 20~50 μm 以及大于 50 μm 的大颗粒非金属夹杂已降低至稳定水平, 说明无论回浇余与否, 夹杂物在精炼埋弧给电过程中均能有效去除, 但回浇余工艺下的精炼过程对夹杂物的吸附和去除效率更明显。

回浇余对精炼成本的影响

连铸钢包返回热渣具有一定热量，且 4 次（回浇余）利用炉渣，热渣在循环利用过程中不加精炼

石灰和萤石等造渣剂，减少了渣料熔化造成的热量损失，缩短了精炼时间，降低了精炼电耗，回浇余数据见表 5

表 5 回浇余周期数据

工艺	温度/℃			时间/min		单炉电耗/(kW·h)
	精炼进站	精炼出站	中包	给电	冶炼周期	
未回	1584.0	1590.5	1558.2	14.5	52.4	3542.0
回浇余	1565.3	1587.7	1553.9	11.3	47.0	3453.3
差值	-18.7	-2.8	-4.3	-3.2	-5.4	-88.7

虽然回浇余炉次精炼进站温度较未回浇余渣炉次降低 18.7℃，但因精炼站未加石灰、萤石等造渣物料，一次给电前期埋弧更加稳定，减少了渣料熔化造成的热量损失，给电时间缩短 3.2 min，精炼出站温度达到要求；由于未加造渣物料，石灰和萤石 2 种物料成本降低较为明显，见表 6，生石灰降低 2.53 元/t，萤石降低 3.36 元/t，碳化硅加铝粒合计降低 0.12 元/t，能源降低 0.71 元/t，总计精炼降低成本 6.72 元/t。

表 6 造渣料成本对比 元/t

工艺	生石灰	萤石	碳化硅	铝粒	能源	总成本
未回	2.53	3.36	1.16	3.17	28.34	38.56
回浇余	0.00	0.00	0.73	3.48	27.63	31.84
差值	-2.53	-3.36	-0.43	0.31	-0.71	-6.72

结束语

（1）回浇余工艺需关注钢包净空，根据钢包净空确定回浇余渣量；理论上循环回浇余渣不影响生产时间，但有时在生产节奏紧张时钢水衔接上有时难以配合，具体表现在连铸已浇完，转炉未出钢而精炼炉只有 1 包钢水正在精炼，此时无法回收，若将钢包浇余渣倒入正在精炼的钢包或精炼完的钢包内则起不到加快造渣的效果，甚至还会污染钢液，所以回浇余对生产节奏有一定影响，需要安排 2 台天车协同工作，且生产调度高度关注生产节奏，合理安排生产顺序。

（2）精炼站回浇余工艺，通过天车操作直接倒入转炉出钢后的钢包内。进入 LF 炉只需补充少量的造渣料即可进行精炼，操作相对简单，且不需增加

新的设备，为实现精炼渣循环利用工艺在其它精炼炉次钢种上批量推广提供参考。

（3）唐钢公司长材事业部进行精炼液态渣循环利用后，精炼站吨钢成本降低 6.72 元/吨。精炼站给电时间缩短 3.2 min，单炉次电耗平均降低 88.7 kW·h，折合成本降低 0.56 元/t（平峰电能单价 0.7 元/kW·h，平均单炉出钢量 110 t），累计降低品种钢精炼成本 7.28 元/t，按 2022 年全年总产量 300 万 t 计算，焊丝焊条钢品种比例 10%，年可创效 218 万元以上，有效地控制焊丝焊条等品种精炼生产成本；精炼渣量明显降低，减轻了对环境的影响，节约了加工成本。

参考文献

- [1] 郝华强，张朝发，张宝景，等. 焊丝用钢硫含量精确控制. *金属世界*，2016(2): 9
- [2] 黄康乐，孙江波，窦为学，等. LF 炉热态钢渣的循环利用技术. *河北冶金*，2012(5): 64
- [3] 曹余良，袁守谦，邱兵，等. 预熔精炼渣的冶金性能及研究进展. *金属世界*，2009(3): 57
- [4] 徐志成，刘界鹏. 精炼热态渣循环应用实践. *山东冶金*，2012，34(3): 49
- [5] 彭情亮，唐萍，文广华，等. LF 热态钢渣循环利用炉渣成分控制. *钢铁*，2013，48(7): 84
- [6] 郭猛，王晓峰，张越，等. 优化 LF 精炼造渣工艺. *鞍钢技术*，2014(1): 50

作者简介：王文辉（1984—），男，河北省唐山市人，炼钢技术管理员。2008 年毕业于河北科技大学冶金工程专业，主要研究方向：微合金化技术、转炉精炼新工艺；多次组织唐钢公司 QC 课题等。通信地址：河北省唐山市路南区。E-mail: 1613943053@qq.com。