

65Mn 钢 LF-RH 精炼双联 生产实践

Practice of LF-RH Duplex Process for 65Mn Steel

供稿|刘冠华, 贾军艳, 高燕, 董继亮, 花竞争 / LIU Guanhua, JIA Junyan, GAO Yan, DONG Jiliang, HUA Jingzheng

内
容
导
读

为满足 65Mn 钢高洁净度要求, 某钢厂提出精炼双联解决方案, 制定转炉 (BOF) — 钢包精炼 (LF) — 真空循环脱气精炼 (RH) — 连铸 (CC) 双联工艺路线。转炉终点 O 质量分数控制 0.05% 以下, LF 不进行钙处理, RH 真空度小于 270 Pa, 纯脱气时间大于 6 min, 连铸过热度设定 15~30 °C, 目标拉速 1.1 m/min, 加热炉空燃比控制在 0.7 以下, 终轧温度设定为 900 °C, 卷取温度设定为 700 °C。结果表明, 热轧成品卷夹杂物评级为 B 类细系 0.5 级, 满足客户性能指标。生产实践表明, 精炼双联工艺有效降低了 65Mn 钢中非金属夹杂物含量, 也为其他高碳钢精炼双联提供了借鉴经验。

金刚石焊接锯片基体用 65Mn 钢对钢水洁净度要求较高, 即钢中非金属夹杂物含量要低, 目前 65Mn 钢普遍生产工艺流程为转炉 (BOF) — 钢包精炼 (LF) — 连铸 (CC) [1-3]。在提高钢水洁净度的生产实践中, 车轮钢和高级别管线钢已普遍采用 LF-RH (真空循环脱气精炼) 精炼双联工艺。为满足链条企业高洁净度要求, 国内某钢厂基于自身设备情况提出精炼双联工艺的解决方案, 为该链条企业建立了 BOF—LF—RH—CC 双联工艺路线[4], 遵循去除夹杂物的最佳热力学和动力学条件, 制定双联工艺控制计划。首次组织生产 3 炉, 成品规格主要为 2.3 mm×1245 mm, 轧制成品 30 卷, 客户使用后反馈各项指标均满足设计要求。

方案制定

65Mn 钢化学成分

通过与客户对接了解客户需求, 对比本钢厂 65Mn 钢以往性能数据, 客户接受按企标成分设计出厂。为保证性能稳定性, 采用窄成分控制方式, 企标成分设计见表 1。

表 1 65Mn 钢化学成分 (质量分数) %

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr
企标	0.62~0.70	0.17~0.37	0.90~1.20	≤0.025	≤0.025	≤0.30
内控	0.65~0.70	0.25~0.35	1.10~1.20	≤0.020	≤0.015	0.22~0.30
目标	0.68	0.30	1.15			0.25

作者单位: 唐山钢铁集团有限责任公司, 河北 唐山 063016

双联工艺路线

将原有单精炼路线 KR (铁水脱硫)—BOF—LF—CC 改为 KR—BOF—LF—RH—CC 双精炼路线: 铁水预处理→脱碳转炉→LF 精炼→RH 精炼→直弧连铸→热装加热→高压除磷→粗轧→高压除磷→精轧→层流冷却→卷取→入缓冷坑→平整→检验出厂。首次生产冶炼了 3 炉, 炉号分别为 A、B、C, 共计 630 t。

钢区工艺

转炉

铁水经 KR 脱硫出站 S 质量分数 $\leq 0.005\%$, 废钢加入比 8%, 所选钢包内不得含有 Cu、Nb、Ti、Mo 等微量元素。转炉吹炼加入白云石块、生石灰块、轻烧白云石块造渣, 同时加入球团矿降温和泡沫渣抑制剂。转炉终点成分 (质量分数) C、P、S 和 O 分别为 0.052%、0.0126%、0.0078% 和 0.0425%, 温度为 1655 °C。出钢过程中使用钢砂铝脱氧、锰铁和硅铁合金化、低碳铬铁配铬、锻煤增碳剂增碳, 转炉终渣 TFe 质量分数为 14.87%、MgO 质量分数为 9.42%、碱度 3.35。转炉终点成分见表 2。

表 2 转炉终点成分 (质量分数) %

炉号	C	Si	Mn	P	S	Cr
A	0.534	0.228	1.009	0.0122	0.007	0.213
B	0.605	0.233	1.035	0.0123	0.007	0.213
C	0.579	0.231	1.021	0.0121	0.007	0.212

LF 精炼

LF 精炼的目的是成分微调、夹杂物去除, 进行化学成分的精确定控制, 此次精炼双联 LF 工序取消净吹, 不进行钙处理。加合金期间, 增大搅拌强度到 400~800 L/min, 钢水裸露直径 40~50 cm, 以渣面波动不发生飞溅为准, 强搅拌 1~2 min, 此后再以流量 400~800 L/min 搅拌 3~4 min, 使夹杂充分上浮。LF 出站成分见表 3。

表 3 LF 出站钢水成分 (质量分数) %

炉号	C	Si	Mn	P	S	Cr
A	0.654	0.295	1.138	0.0137	0.002	0.246
B	0.661	0.291	1.136	0.0131	0.002	0.245
C	0.668	0.292	1.135	0.0129	0.002	0.243

RH 精炼

RH 精炼的目的是脱氧合金化和去除夹杂物, 处理前测真空槽, 真空度 ≤ 270 Pa, 低真空时间 10~30 min, 目标 15 min。纯脱气时间 ≥ 6 min, 环流气流量 > 90 m³/h。RH 破真空后使用定氢仪测氢, 要求钢水 H 质量分数 $\leq 2 \times 10^{-6}$ 。破空后取样化验全成分, 出站后添加铝粒、高碳锰铁、低碳硅铁。RH 进站温度控制目标 1564 °C, 结束温度控制目标 1529 °C。整体冶炼过程第一炉温控较差, 全部超出设计上限, 经过调整 2、3 炉温控符合率良好。冶炼周期驻炉减少, 整体把控仍需提高。冶炼时长情况见表 4。

表 4 RH 冶炼时长 min

炉号	RH 冶炼周期	静置时间	真空时间	高真空时间	纯脱气时间
A	53	24	30	26	6.5
B	48	28	27	22	9.1
C	47	25	26	22	9.4

连铸

连铸中间包使用无碳低硅覆盖剂, 当中间包质量达到 15 t 时开始加入覆盖剂, 换包完成后和浇钢过程中, 根据中间包液面情况及时在冲击区补加覆盖剂, 保证中间包液面不漏红, 过热度设定 15~30 °C, 结晶器使用高碳钢专用保护渣, 液面波动控制 ± 3 mm, 目标拉速 1.1 m/min^[5-6]。3 炉次连铸中间包温度处于设计上限, 浇次过热度分别为 32、30 和 31 °C。钢区全流程温度控制情况由第 1 炉全部超出设计上限到第 3 炉基本处于设计区间, 后续按设计目标值进行改进。

每炉产出 10 块板坯, 板坯厚度 230 mm, 板坯宽度 1300 mm。实际拉速保持在 1.2 m/min, 浇次液面、杆位控制平稳正常。在线检查热坯表面质量情况, 铸坯表面良好, 未发现异常情况。铸坯低倍检验结果均为中心偏析 C 类 0.5 级, 无中心分层、疏松和内部裂纹等缺陷, 铸坯内部质量良好。检验报告见表 5、冷酸洗照片见图 1。

钢区小结

各工序成分符合设计要求, 主要元素变化情况

表 5 低倍组织检验报告

炉号	中心疏松	中心偏析	中间裂纹	角部裂纹	三角区裂纹	Al ₂ O ₃ 夹杂	蜂窝气泡	白亮带
A	1.0	C类 0.5	0	0	0	无	0	无
B	0.5	C类 0.5	0	0	0.5	无	0	无
C	0.5	C类 0.5	0	0	0.5	无	0	无

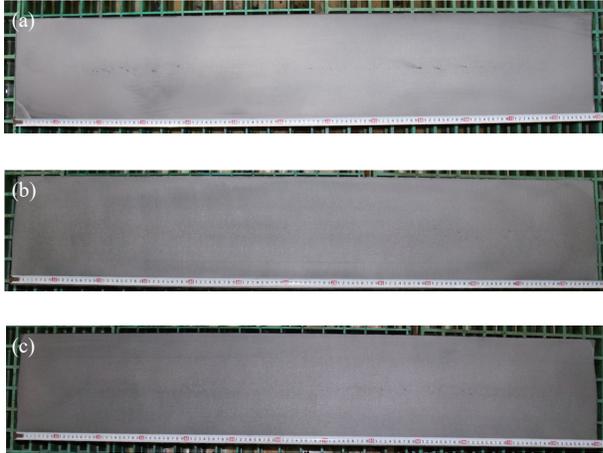


图 1 铸坯冷酸洗照片: (a) A 炉; (b) B 炉; (c) C 炉

见图 2。各工序冶炼周期较长, RH 冶炼高碳钢参数设定方面还需进一步摸索优化, 钢区全流程温度控制方面从第 1 炉全超上限到第 3 炉基本处于设计区间, 温控方面有所提高, 整体来说在冶炼周期和温度控制还存着不足。温度控制情况见图 3。

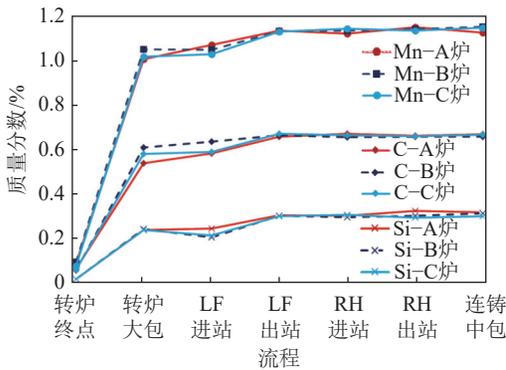


图 2 全流程 C、Mn、Si 元素

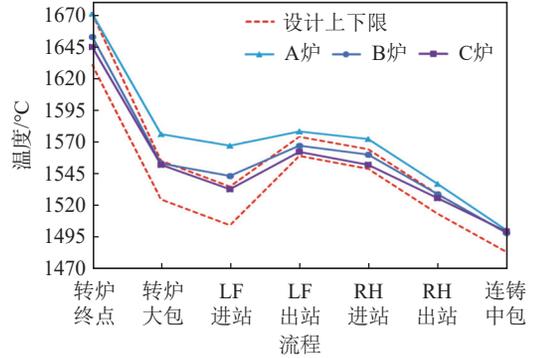


图 3 钢区全流程温降

轧区工艺

加热工艺

板坯下线后全部热装入炉, 出炉温度目标值为 1260 °C, 为控制高碳钢脱碳层厚度, 空燃比设定值较低, 计划要求为 0.62~0.65^[7]。本次生产空燃比符合率较低, 在空燃比控制方面还需改进。加热炉运行参数见表 6。

轧制工艺

板坯出炉后经高压除磷进入粗轧区, 采用 R1 粗轧机 3 道次、R2 粗轧机 3 道次轧制模式, 中间坯厚度 34.6 mm, 累计压下率 84.9%, 减宽量由 R1 前定宽机和 E2 立棍控制, 粗轧奇数道次除磷。精轧入口温度 1030 °C, 经 7 架精轧机连轧, 热卷成品厚度 2.3 mm, 终轧抛钢温度 900 °C, 经层流冷却卷取温度 700 °C^[8], 热轧卷下线后入缓冷坑存放 48 h 进行缓冷, 缓冷出坑空冷至 40 °C 以下进平整机平整矫直。终轧温度符合率和卷取温度符合率均在 90% 以上, 符合内控要求。精轧机轧制参数见表 7。

表 6 加热炉工艺参数

炉号	温度/°C					空燃比				
	预热区	一加区	二加区	三加区	均热区	预热区	一加区	二加区	三加区	均热区
A	900	1070	1235	1290	1280	0.68	0.73	0.76	0.67	0.71
B	913	1066	1230	1296	1279	0.69	0.69	0.78	0.66	0.79
C	924	1077	1238	1296	1278	0.69	0.76	0.65	0.66	0.73

表 7 精轧机轧制参数

机架编号	轧制力/MN	辊缝/mm	工作辊辊径/mm	支撑辊辊径/cm
F1	24.590	19.043	832	158.1
F2	26.227	9.820	846	158.1
F3	21.679	6.260	795	157.8
F4	19.173	4.122	763	158.1
F5	13.242	2.929	642	157.9
F6	11.877	2.579	649	157.7
F7	9.066	2.606	673	157.8

成品检验

按照组批原则每炉次取一卷性能试样，拉伸实

验和硬度实验结果见表 8，力学性能满足企标要求，对比之前 LF 单精炼性能数据无明显波动。非金属夹杂物检测结果见表 9，夹杂物显微照片见图 4，未出现 1.5 级及以上评级，这表明经过 LF-RH 精炼双联对减少夹杂物是很有效的。

表 8 力学性能

炉号	抗拉强度, R_m /MPa	屈服强度, R_{eL} /MPa	伸长率, A /%	硬度, HBW
A	920	580	19.0	282
B	926	590	18.5	281
C	923	586	19.0	276

表 9 夹杂物评级

项目	A类(硫化物类)		B类(氧化铝类)		C类(硅酸盐类)		D类(球状氧化物类)	
	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系
企标	≤2.0	≤2.5	≤2.0	≤2.5	≤1.5	≤2.0	≤1.5	≤2.0
A炉	—	—	—	1	—	—	—	—
B炉	—	—	—	0.5	—	—	—	—
C炉	—	—	—	—	—	—	—	0.5

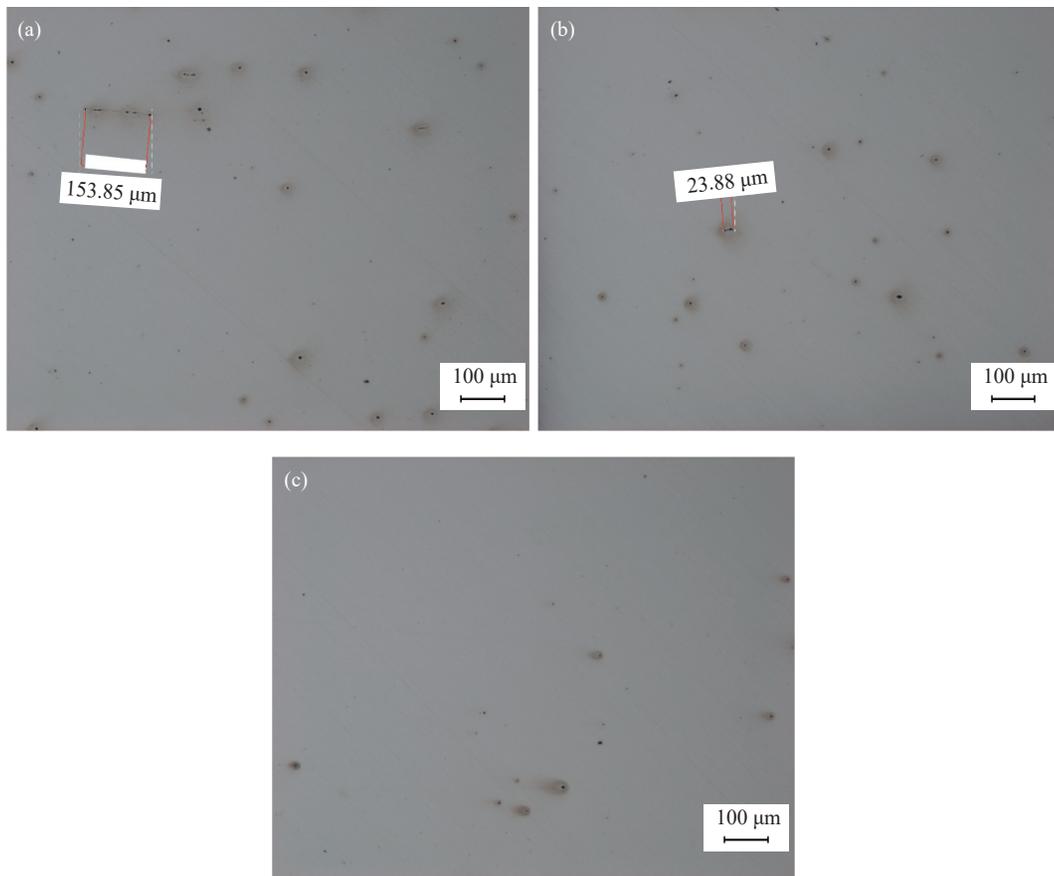


图 4 夹杂物显微照片：(a) A 炉；(b) B 炉；(c) C 炉

结束语

采用 LF-RH 精炼双联工艺成功生产出满足客户高质量要求的 65Mn 钢，精炼双联有助于提高钢水洁净度，降低非金属夹杂物含量。冶炼过程中成分符合设计要求，冶炼周期和温度把控方面还需进一步改进，控轧控冷符合率在 90% 以上，全流程质量稳定受控。65Mn 钢的精炼双联成功试制也为其他高碳钢双联路线提供了借鉴经验，在竞争日益激烈的市场环境下发挥装备技术优势，提高钢水洁净度，有助于提升客户满意度，助力公司转型升级与高质量发展。

参考文献

- [1] 孙岭, 王全利, 蒋建军, 等. 65Mn 热轧卷板的开发. *河北冶金*, 2015 (3): 22
- [2] 庄娜, 胡泽明, 范众维. 65Mn 高线盘条的开发. *金属世界*, 2011 (2): 74
- [3] 杨晓江. 唐钢薄板坯连铸高碳钢 65Mn 的质量控制. *中国冶金*, 2016, 26 (12): 36
- [4] 王新东, 杨晓江, 张倩. 河钢唐钢新区品牌化工厂的设计与建设. *河北冶金*, 2021 (9): 1
- [5] 杨文, 杨小刚, 张立峰, 等. 钢中 MnS 夹杂物控制综述. *炼钢*, 2013, 29 (6): 71
- [6] 刘国梁, 倪有金, 马文俊, 等. 迁钢板坯连铸高碳钢的生产技术. *连铸*, 2017, 42 (2): 72
- [7] 田亚强, 杨子旋, 宋进英, 等. 加热工艺参数对冶金锯片用 65Mn 钢脱碳行为的影响. *金属热处理*, 2013, 38 (7): 104
- [8] 田亚强, 杨子旋, 宋进英, 等. 控轧控冷工艺对冶金锯片用 65Mn 钢表面氧化皮的影响. *热加工工艺*, 2013, 42 (7): 1

作者简介: 刘冠华 (1990—), 男, 工程师, 河北省迁安市人, 2012 年本科毕业于合肥工业大学, 现从事热轧产品质量管理工作, 通信地址: 河北省唐山市乐亭县海港经济开发区盛世景苑 315 号楼, 邮编: 063000; E-mail: 987636452@qq.com。