

EAF-LF(VD)-CC 流程开发工程机械轮体用钢 40Mn2H-S 生产实践

杨振国^{1,2} 李法兴² 孙永喜² 杜国强² 刘永昌²

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 莱芜钢铁集团股份有限公司,莱芜 271105)

摘要 莱钢特钢通过 50 t EAF-LF(VD)-260 mm × 300 mm 方坯连铸-轧制工艺生产轮体用钢 40Mn2H-S(% : 0.39 ~ 0.41C, 0.21 ~ 0.26Si, 1.55 ~ 1.60Mn, 0.025 ~ 0.035Al) Φ80 ~ 130 mm 棒材。EAF 炉料为 50% 铁水 + 废钢, 出钢过程加 1.5 ~ 2.5 kg/t_钢 钢芯铝, LF 出钢喂 Al 线调整 [Al] 为 0.020% ~ 0.040%, 连铸全保护浇铸, (M + F) EMS 电磁搅拌, 使该钢中 [O]、[N] 平均值达 14.5 × 10⁻⁶、72 × 10⁻⁶, 低倍组织 ≤ 1.0 级, 非金属夹杂物 A、B ≤ 1.5 级、C、D ≤ 1.0 级, 晶粒度 ≥ 7 级、末端淬透性及力学性能等指标均满足用户要求。

关键词 EAF-LF(VD)-CC 流程 轮体用钢 40Mn2H-S 生产实践

Production Practice of Wheel Body Steel 40Mn2H-S for Engineering Machinery by EAF-LF (VD)-CC Flow Sheet

Yang Zhenguo^{1,2}, Li Faxing², Sun Yongxi², Du Guoqiang² and Liu Yongchang²

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Laiwu Iron and Steel Group Co Ltd, Laiwu 271105)

Abstract The Φ80 ~ 130 mm round bar products of wheel body steel 40Mn2H-S (% : 0.39 ~ 0.41C, 0.21 ~ 0.26Si, 1.55 ~ 1.60Mn, 0.025 ~ 0.035Al) are produced by 50t EAF-LF (VD)-260 mm × 300 mm continuous casting-rolling process at Laiwu Special Steel. With EAF charging-50% hot metal + scrap, adding 1.5 ~ 2.5 kg/t steel aluminium cladding steel during taping, adjusting [Al] in 0.020% ~ 0.040% during LF taping by feeding Al wire, whole casting process with shielding atmosphere and casting with (M + F) EMS, the average of [O] and [N] are respectively lowered to 14.5 × 10⁻⁶ and 72 × 10⁻⁶, the rating of macrostructure of steel ≤ 1.0, rating of nonmetallic inclusions A and B ≤ 1.5, C and D ≤ 1.0, grain size rating ≥ 7, the terminal hardenability and mechanical properties of steel all meet the requirement of user.

Material Index EAF-LF (VD)-CC Flow Sheet, Wheel Body Steel 40Mn2H-S, Production Practice

近年来,莱钢特钢注重产品结构调整,在稳固国内齿轮钢市场占有率的基础上,着力推进工程机械用钢的研发和市场开拓。合金钢 40Mn2H-S 因具有较高的硬度、耐磨性、良好的强韧性和较高的抗疲劳性能等特性,能够满足推土机、挖掘机等工程机械支重轮轮体作业区条件苛刻,以及优良的综合机械性能的用钢要求。因此研制开发工程机械轮体用钢 40Mn2H-S 对于加强与工程机械生产企业及零部件配套加工企业的合作,优化产品结构,提高企业经济效益等具有重要意义。

1 生产工艺流程及主要设备参数

40Mn2H-S 钢的生产工艺流程为:50 t UHP 电弧炉-50 t LF 精炼-60 t VD-R11 m 合金钢连铸机-铸坯入坑缓冷-轧制-检验-判定-计量-入库。

主要设备技术参数见表 1 ~ 表 3。

2 工艺及控制要点

2.1 电弧炉冶炼

电弧炉冶炼通过利用炉料结构优化、强化用氧、

表 1 电弧炉主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of electric arc furnace

| 项目 | 参数 |
|--|---------|
| 冶炼周期/min | 42 |
| 日平均炉数 | 34 |
| 平均容量/t | 52 |
| 炉料构成 | 废钢 + 铁水 |
| 变压器容量/MVA | 35 |
| 电极直径/mm | 500 |
| 电耗/(kWh · h ⁻¹) | 249 |
| 电极消耗/(kg · t ⁻¹) | 1.30 |
| 氧耗/(m ³ · t ⁻¹) | 53 |
| 产量/(万 t · a ⁻¹) | 60 |

表 2 LF 主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of ladle furnace

| 项目 | 参数 |
|-------------------------------|-------|
| 钢包处理量/t | 52 |
| 钢包直径/mm | 2 618 |
| 自由空间/mm | 400 |
| 电极直径/mm | 300 |
| 变压器容量/MVA | 15 |
| 升温速度/(℃ · min ⁻¹) | 3 |

泡沫渣、电弧炉终点控制等多项现代电弧炉炼钢技

表3 合金钢连铸机主要技术参数

Table 3 Main technical parameters of caster for alloy steel

| 项目 | 参数 |
|-----------------------------------|---|
| 机型 | 全弧型 |
| 中间包容量/t | 19 |
| 铸坯断面/mm | 260 × 300/180 × 220/Φ280 |
| 弧形半径/m | 12 |
| 机数 × 流数 | 3 × 3 |
| 流间距/mm | 1 600 |
| 铸坯拉速/ (m · min ⁻¹) | 260 mm × 300 mm 180 mm × 220 mm Φ280 mm |
| | 0.6 ~ 0.75 1.0 ~ 1.30 0.7 ~ 0.95 |
| 铸坯定尺长度/m | 2.7 ~ 6 |
| 结晶器振动方式 | 液压 |
| 结晶器形式 | 弧形管式 |
| 铜管长度/mm | 800 |
| 振幅/mm | 2.5 |
| 二冷方式 | 气-雾冷却 |
| 电磁搅拌 | M-EMS + F-EMS |
| 矫直方式 | 嵌式, 四机架三点矫直 |
| 平均作业率/% | ≥90 |
| 连烧炉数 | ≥60 |
| 平均浇铸时间/min | 42 |

术,提高了初始配碳量、熔清碳量及氧气的利用率,加强熔池的搅拌,促进 C-O 反应,提高传热效率,减少辐射热损失,避免了钢液裸露,减少钢液的吸气。出钢过程中加铝质脱氧剂预脱氧可降低钢水及渣的氧化性、合金及脱氧剂的消耗量,降低钢水的最终氧含量、提高钢水的纯洁度,为下一步精炼工序创造良好的条件。

具体控制要点如下:炉料结构为废钢 + 铁水,铁水比例 ≥ 50%。全熔分析温度 ≥ 1 540 °C,熔清碳 ≥ 0.30%、熔清磷 ≤ 0.015%;终点 C ≥ 0.10%, P ≤ 0.015%,残余元素含量符合标准要求;出钢温度 1 620 ~ 1 640 °C;出钢过程中适时加入 1.5 ~ 2.5 kg/t_钢 的钢芯铝,加入增碳剂及其它相应合金,将 C、Si、Mn 等主要成分调整至规格下限;出钢过程严禁下渣,合成渣料按 15 kg/t_钢 左右加入。

2.2 精炼(LF + VD)

LF 采用碳粉 + 碳化硅扩散脱氧迅速调白渣,控制炉渣稳定性,降低炉渣的氧化性, (FeO) + (MnO) ≤ 1.50%、(SiO₂) ≤ 15%、碱度 ≥ 3.0。白渣后喂入铝线 1.2 ~ 1.5 m/t_钢 强脱氧后取样分析,根据分析结果,按内控调整成分。LF 出钢前喂铝线调整钢中 [Al]_s 含量在 0.020% ~ 0.040%;按 1.8 ~ 2.0 m/t_钢 喂入硅钙线(Φ13 mm),对夹杂物做变质处理并深脱氧。

根据生产节奏控制出钢温度,保证 VD 真空处理后,上连铸平台的钢液温度符合要求。LF 出钢后入 VD 前,扒除 1/2 左右还原渣,VD 真空度小于 67

表4 LF 精炼渣主要成分/%

Table 4 Ingredient of LF refining slag / %

| CaO | SiO ₂ | MgO | Al ₂ O ₃ |
|---------|------------------|--------|--------------------------------|
| 45 ~ 50 | 10 ~ 13 | 8 ~ 10 | 10 ~ 12 |

Pa 保持时间 ≥ 12 min,软吹时间 ≥ 10 min。软吹后连铸第 1 炉温度 1 570 ~ 1 580 °C,其余炉次温度 1 560 ~ 1 570 °C。LF 精炼渣成分见表 4。

2.3 连铸

结晶器保护渣采用专用保护渣,实行“恒液面、恒温度、恒拉速”的三恒操作;采用低过热度、弱冷、全保护浇铸、组合式(M + F)EMS 电磁搅拌等技术;保证铸坯进拉矫机温度,优化连铸坯切头、切尾,提高连铸坯质量;铸坯不能在冷床停留,必须及时入坑盖罩缓冷。

具体控制参数如下:40Mn2H-S 液相线温度 1 492 °C,中间包过热度按 20 ~ 30 °C 控制;采用 45# 连铸保护渣,保护渣厚度保持在 25 ~ 35 mm;结晶器液面控制保持稳定,液面波动范围 ± 2 mm;正常浇铸过程中,中间包液面高度保持(700 ± 50) mm;结晶器电磁搅拌参数:200 A/3.0 Hz;末端电磁搅拌参数:100 A/12 Hz;二冷比水量 0.25 L/kg 左右,拉速控制见表 5,铸坯进拉矫机温度 ≥ 920 °C;连铸坯缓冷时间 ≥ 24 h。

表5 连铸 40Mn2H-S 拉速控制参数

Table 5 Parameters for casting speed control for steel 40Mn2H-S

| 过热度/°C | 拉速/(m · min ⁻¹) |
|---------|-----------------------------|
| < 20 | 0.70 |
| 20 ~ 25 | 0.65 |
| > 25 | 0.60 |

2.4 轧制

钢坯加热温度:1 130 ~ 1 200 °C,允许温差 ≤ 40 °C,加热时间 ≥ 2.5 h,既要保证钢坯加热均匀,又要防止脱碳和粘炉。采用 Φ650 × 1/Φ550 × 1/Φ550 × 4 半连轧轧制,轧制规格 Φ80 ~ 130 mm,定尺 4 ~ 6 m。开轧温度 1 100 ~ 1 180 °C,终轧温度 ≥ 850 °C。轧前认真检查轧辊、导卫、滚道等,避免损伤轧件表面。轧后钢材要进行精整修磨,修磨后钢材表面不允许存在折叠、结疤、耳子、裂纹等缺陷,钢材端部要锯切整齐、毛刺飞边要清除干净。轧制过程中严格控制各道次料型尺寸,不得扭转;轧件不得有划伤、拉丝、折叠等轧制缺陷。

3 钢材实物质量分析

工程机械轮体用钢 40Mn2H-S 化学成分检验值见表 6。从表 6 可以看出,在生产过程中能够按照内控成分要求,严格控制钢中各元素含量,化学成分控制稳定,O、N 含量低,为钢材综合性能的提高提

供质量保证。C、Si、Mn 等主元素含量基本实现窄成分控制,P、S 及残余元素控制在较低水平;钢中铝含量在 0.025% ~ 0.035%,钢中 O、N 含量分别达 $(13 \sim 17) \times 10^{-6}$ 、 $(55 \sim 90) \times 10^{-6}$,平均为 14.5×10^{-6} 、 72×10^{-6} 。

表 6 40Mn2H-S 钢的化学成分、气体含量和力学性能
Table 6 Chemical composition, gas content and mechanical properties of steel 40Mn2H-S

| 成分 | 化学成分/% | | | | | | | | | 气体/ 10^{-6} | | 力学性能 | | | | |
|-----|-------------|-------------|-------------|---------|---------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------|---------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------|------------------|
| | C | Si | Mn | P | S | Cr | Cu | Ni | Al | [O] | [N] | σ_s / MPa | σ_b / MPa | δ_5 / % | Φ / % | A_{KUZ} / J |
| 协议 | 0.37 ~ 0.44 | 0.17 ~ 0.37 | 1.30 ~ 1.70 | ≤ 0.030 | ≤ 0.030 | ≤ 0.20 | ≤ 0.20 | ≤ 0.30 | - | ≤ 20 | - | ≥ 735 | ≥ 885 | ≥ 12 | ≥ 45 | ≥ 55 |
| 内控 | 0.38 ~ 0.42 | 0.20 ~ 0.30 | 1.50 ~ 1.70 | ≤ 0.030 | ≤ 0.030 | 0.10 ~ 0.18 | ≤ 0.20 | ≤ 0.30 | 0.020 ~ 0.040 | ≤ 18 | | | | | | |
| 检验值 | 0.39 ~ 0.41 | 0.21 ~ 0.26 | 1.55 ~ 1.60 | ≤ 0.020 | ≤ 0.010 | 0.10 ~ 0.15 | 0.02 ~ 0.05 | 0.03 ~ 0.05 | 0.025 ~ 0.035 | 13 ~ 17 | 55 ~ 90 | ≥ 760 | ≥ 930 | ≥ 14 | ≥ 48 | ≥ 100 |

钢材的横截面酸浸低倍组织试片上无目视可见的缩孔、气泡、裂纹、夹杂、翻皮、白点、晶间裂纹。酸浸低倍组织一般疏松、中心疏松、中心偏析和一般点状偏析均 ≤ 1.0 级。钢中非金属夹杂物的检验级别见表 7。

从表 7 可见,该钢非金属夹杂物 A、B 类控制在 1.5 级以下,C、D 类在 1.0 级以下,钢材组织的致密性、均匀性较好,洁净度较高。

钢材检验奥氏体晶粒度,协议要求晶粒度级别 ≥ 5 级,实际生产钢材晶粒度级别 ≥ 7 级。

用预备热处理过的毛坯制成 Φ25 mm 标准试样测定钢材的淬透性,热处理制度:正火(870 ± 10 °C

空冷) + 端淬(845 ± 5 °C 水淬),钢的末端淬透性 HRC 硬度值为 $J_{1.5} 55 \sim 59$ 、 $J_8 47 \sim 53$ 、 $J_{14} 34 \sim 43$ 、 $J_{35} 25 \sim 30$,钢材力学性能见表 6。

可以看出,末端淬透性值完全符合协议要求,淬透性带窄,淬透性稳定。钢材具有较高的强度和冲击韧性,力学性能满足协议要求。

4 结论

生产实践表明,莱钢特钢电弧炉流程生产线生产工程机械轮体用钢 40Mn2H-S,其化学成分控制合理、稳定,生产工艺及控制要点得当,钢材的组织致密、均匀,洁净度较高,晶粒细小,末端淬透性稳定,具有较高综合力学性能,主要性能指标完全符合用户要求。

杨振国(1973-),男,博士生,高级工程师,1995 年黄石理工学院毕业,轧钢工艺研究。

收稿日期:2010-11-23

表 7 40Mn2H-S 钢材非金属夹杂物的级别
Table 7 Rating of nonmetallic inclusions in steel 40Mn2H-S

| 夹杂物类型 | A | B | C | D | |
|-------|----|-------|-------|-------|-------|
| 协议 | 细系 | ≤ 3.0 | ≤ 2.5 | ≤ 2.5 | ≤ 2.5 |
| | 粗系 | ≤ 3.0 | ≤ 2.5 | ≤ 2.5 | ≤ 2.5 |
| 检验值 | 细系 | ≤ 1.5 | ≤ 1.5 | ≤ 0.5 | ≤ 1.0 |
| | 粗系 | ≤ 1.0 | ≤ 1.0 | ≤ 0.5 | ≤ 0.5 |

下 期 要 目

| | |
|---------------------------------------|------|
| 大圆坯连铸二冷配水设计模型的开发 | 曾 智等 |
| 1.9 t 扁钢锭浇铸 D2 冷作模具钢凝固过程及内部缺陷预报 | 李 英等 |
| RH 真空精炼过程循环流量的水模型研究 | 欧洪林等 |
| 立式板坯连铸机结晶器内液面波动的物理模拟 | 赵志刚等 |
| 连铸结晶器内钢液流场的水模型研究 | 郑 艳等 |
| 电渣重熔预熔渣的开发和应用 | 姜周华等 |
| 不锈钢表面钝化膜特性的研究进展 | 桂 艳等 |