

100 t EAF-LF-VD-CC 流程冶炼非调质钢 49MnVS3 的工艺实践

代 刚 朱志红

(江苏苏钢集团苏信特钢有限公司电炉厂, 苏州 215151)

摘 要 10 炉非调质钢 49MnVS3 (/% : 0.46 ~ 0.48C, 0.30 ~ 0.40Si, 0.88 ~ 0.92Mn, 0.001 ~ 0.014P, 0.004 ~ 0.005S, 0.09 ~ 0.10V, 0.19 ~ 0.22Cr) 由 100 t EBT DC EAF-LF-VD-260 mm × 340 mm 坯连铸-Φ140 ~ 150 mm 材轧制流程生产。采用兑入 75% 铁水, EAF 前期脱磷至 ≤ 0.015% P, 出钢前 [C] 为 0.20% ~ 0.30%, 精炼时加 150 ~ 200 kg 碳化硅, 控制 LF 精炼渣碱度 2.80 ~ 2.95, (CaO)/(Al₂O₃) = 1.2 ~ 1.6, VD 后喂 1.5 m/t 钙铁线, 软吹时间 ≥ 15 min 等工艺措施, 49MnVS3 钢中 [N]、[H] 和 [O] 分别为 130 × 10⁻⁶ ~ 220 × 10⁻⁶, 1.2 × 10⁻⁶ ~ 1.5 × 10⁻⁶ 和 5 × 10⁻⁶ ~ 11 × 10⁻⁶, 成品材晶粒度 ≥ 5 级, 非金属夹杂物和低倍组织均 ≤ 1.5 级, 组织 (带状 ≤ 1 级) 和力学性能 (R_m 803 ~ 883 MPa, R_{eL} 517 ~ 590 MPa, A 16% ~ 21%, A_{KU} 39 ~ 99 J) 均满足标准要求。

关键词 100 t DC EAF-LF-VD-CC 流程 非调质钢 49MnVS3 工艺实践

Process Practice of Non-Quenched-Tempered Steel 49MnVS3 Steelmaking by 100 t EAF-LF-VD-CC Flowsheet

Dai Gang and Zhu Zhihong

(Electric Arc Furnace Works, Suxin Special Steel Co Ltd, Jiangsu Susteel Group, Suzhou 215151)

Abstract 10 heats of non-quenched-tempered steel 49MnVS3 (/% : 0.46 ~ 0.48C, 0.30 ~ 0.40Si, 0.88 ~ 0.92Mn, 0.001 ~ 0.014P, 0.004 ~ 0.005S, 0.09 ~ 0.10V, 0.19 ~ 0.22Cr) are produced by 100 t EBT DC EAF-LF-VD-260 mm × 340 mm bloom casting-Φ140 ~ 150 mm round bar rolling process flowsheet. With using the process measures including charging 75% hot metal, in EAF earlier period dephosphorizing to ≤ 0.015% P, before tapping controlling 0.20% ~ 0.30% [C], in refining adding 150 ~ 200 kg silicon carbide, controlling LF refining slag basicity 2.80 ~ 2.95 and (CaO)/(Al₂O₃) = 1.2 ~ 1.6, after VD feeding 1.5 m/t calcium-iron wire and soft argon blowing for ≥ 15 min, the [N], [H] and [O] of steel 49MnVS3 are respectively 130 × 10⁻⁶ ~ 220 × 10⁻⁶, 1.2 × 10⁻⁶ ~ 1.5 × 10⁻⁶ and 5 × 10⁻⁶ ~ 11 × 10⁻⁶, finished products grain size is ≥ 5 rating, nonmetallic inclusions and macrostructure are all ≤ 1.5 rating, the structure (banded orientation ≤ 1 rating) and the mechanical properties (R_m 803 ~ 883 MPa, R_{eL} 517 ~ 590 MPa, A 16% ~ 21%, A_{KU} 39 ~ 59 J) all meet the requirement of standard.

Material Index 100 t DC EAF-LF-VD-CC Flowsheet, Non-Quenched and Tempered Steel 49MnVS3, Process Practice

非调质钢是通过轧后或锻后冷却过程中析出细小合金碳化物或氮化物, 达到弥散的目的从而提高钢的抗拉强度。含氮非调质钢以其性能优良、高效节能、应用成本较低, 并且有利于环境保护等突出优点, 而深受冶金和机械行业重视^[1], 被广泛应用于汽车、机床、工程机械等制造行业^[2,3]。随着我国经济的高速发展, 对非调质钢的需求与日俱增, 在此大环境下, 苏信特钢有限公司采用了 EAF→LF→VD→CCM 的生产工艺流程开展对非调质钢的生产研发。

体 + 珠光体, 铁素体与珠光体的比例直接影响到其力学性能^[4], 铁素体偏高: 韧性较好, 强度偏低; 珠光体偏高: 强度较好, 韧性偏低, 只有合适的铁素体与珠光体配合才能有好的综合机械性能, 故必须严格控制 C 含量, 以保证其铁素体与珠光体的合适比例。在析出相强化方面主要是向钢中加入微合金元素钒、氮, 依靠细小的碳氮化钒的析出来强化铁素体-珠光体组织, 进而达到与传统调质钢相匹敌的综

1 非调质钢 49MnVS3 成分设计

非调质钢 49MnVS3 的标准成分要求见表 1。

非调质钢的性能主要取决于基体组织与析出相, 而非调质钢 49MnVS3 的基体组织是铁素

表 1 49MnVS3 钢标准和内控化学成分 / %

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Ni	Cu	Mo
标准	0.44 ~ 0.50	0.15 ~ 0.50	0.70 ~ 1.00	≤ 0.030	0.040 ~ 0.065	≤ 0.30	0.08 ~ 0.13	≤ 0.40	≤ 0.30	≤ 0.080
内控	0.46 ~ 0.49	0.25 ~ 0.40	0.85 ~ 0.95	≤ 0.025	0.040 ~ 0.060	0.15 ~ 0.30	0.09 ~ 0.12	≤ 0.20	≤ 0.20	≤ 0.08
成品目标	0.47	0.35	0.90	≤ 0.020	0.045	0.20	0.10	≤ 0.20	≤ 0.20	≤ 0.08

注: [O] ≤ 0.002 0%, 0.008% ≤ [N] ≤ 0.015%。

合力学性能。综上非调质钢 49MnVS3 的内控成分如表 1 所示。

2 非调质钢 49MnVS3 生产工艺流程

苏信特钢非调质钢 49MnVS3 的冶炼工艺流程: EAF→LF→VD→CCM。

2.1 原料准备

由于微量残余元素影响到非调质钢的性能,故炼钢原料必须保证铁水比例达到 70% 以上,并严格控制入炉废钢以保证成品钢中残余元素的稳定,减少因残余元素的波动导致成品钢性能的波动。

2.2 工艺设备

(1) 超高功率直流电弧炉 (DCEAF) 公称容量 100 t, 采用偏心炉底方式做到无渣出钢; 变压器额定功率 100 MVA; 电极直径 711 mm; 配备水冷炉门碳氧喷枪和超音速炉壁水冷氧枪; 冶炼周期平均 45 min。

(2) 钢包精炼炉 (LF) 公称容量 100 t, 变压器额定功率 18 MVA, 加热速率 4 ~ 6 °C/min, 电极直径 400 mm; 精炼过程钢包底吹氩采用双管双阀单独控制; 配备 2 台双管双线喂丝机。

(3) 真空脱气精炼炉 (VD) 公称容量 100 t, 采用 5 级蒸汽喷射泵 + 启动辅助泵, 极限真空度达到 20 Pa, 工作真空度 67 Pa; 主泵抽气量 450 kg/h; 蒸汽消耗 13 t/h。

(4) 5 机 5 流大方坯合金钢连铸机弧形半径 10 m, 浇铸断面 (mm) 195 × 195、240 × 240、260 × 340, 中间包容量 30 t, 采用液面自动控制技术、结晶器电磁搅拌和凝固末端电磁搅拌技术、二冷自动配水技术等。

3 冶炼过程工艺控制重点

3.1 电弧炉高拉碳技术使用

苏信特钢有限公司采用铁水比较高的模式进行生产, 铁水入炉温度在 1 500 °C 左右, 90 t 铁水, 30 t 废钢, 前期速脱磷达到 0.015% 以下, 中期增加侧壁氧枪用量, 流量控制为 1 500 ~ 2 000 m³/h, 炉内温度上升后, 加大侧壁氧枪流量, 流量控制在 2 500 m³/h, 保持 2 ~ 3 min, 取样分析结果 C 成分在 0.20% ~ 0.30% 开始出钢 (因分析需 1.5 min, 后续仍保持大流量吹氧)。

因苏信特钢采用的是偏心炉底出钢的方式, 出钢可以做到留渣操作, 无下渣现象。

3.2 高碱度渣系和 CaO/Al₂O₃ 比

精炼渣系碱度 (R) 在 2.80 ~ 2.95, 且关注 CaO/

Al₂O₃ = 1.2 ~ 1.6。出钢加入合成渣和石灰, 合成渣成分如表 2。

采用加入碳化硅脱氧剂, 每炉加入量在 150 ~ 200 kg。因采用高拉碳冶炼, 钢液氧含量相对较低, 出钢加入铝制品的量可控制在 150 ~ 200 kg, 此后精炼过程严禁加入铝制品。选取 3 炉精炼终渣样取样分析, 渣样结果如表 3。

3.3 钙处理和软吹氩控制

设备正常运行情况, 加入合金经过预烘烤, VD 真空处理的钢液能保证氢含量 ≤ 0.000 2%。对于夹杂物的控制, 通过控制碱度和 CaO/Al₂O₃, 可保证渣系的吸附性, 采用喂入钙铁线进行球化钢液中的氧化铝, 并要求 VD 后吊钢包软吹氩时间 ≥ 15 min。钙铁线吨钢喂入为 1.5 m/t, 钙铁线成分要求如表 4。

氮元素的波动范围比较大, 主要原因是成分分析时, 暂时不能提供准确的氮含量, 完全由经验去调整氮含量, 故很难把握, 但是经分析 VD 处理钢的以往数据能把氮含量控制在内控范围内, 满足非调质钢 49MnVS3 对氮元素的要求^[5]。

4 试验结果与分析

本次试验生产了 10 炉 49MnVS3 非调质曲轴钢连铸坯, 分别进行了检验和分析。

4.1 化学成分控制

49MnVS3 的实际化学成分、气体含量如表 5。

由表 5 可以看出, C、Si、Mn、V 等主要成分均在内控范围内波动, 且波动幅度很小, 这就确保了非调质钢力学性能的稳定, Ni、Cu 等残余元素控制得

表 2 合成渣组成 / %

Table 2 Ingredient of synthetic slag / %

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	H ₂ O
1.38	51.33	33.60	4.12	0.03	0.03

表 3 LF 精炼渣组成和碱度

Table 3 Ingredient and basicity of Lf refining slag / %

组成 / %						碱度 (R)	
SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	(CaO)	(Al ₂ O ₃)
16.01	46.28	3.51	33.25	0.89	0.80	2.89	1.39
15.94	46.43	3.53	31.99	1.21	0.95	2.91	1.45
16.63	48.27	3.55	31.39	0.66	0.38	2.90	1.54

表 4 钙铁线成分和参数

Table 4 Ingredient and parameters of calcium-iron wire

成分 / %		粉 / (g · m ⁻¹)	皮 / (g · m ⁻¹)	直径 / mm	H ₂ O / %
Ca	Fe				
25 ~ 28	(Ca + Fe) ≥ 90	≥ 240	≤ 175	13 + 0.8	≤ 0.5

表5 49MnVS3 钢实际分析成分和气体含量
Table 5 Actual analysis of element and gas content in steel 49MnVS3

项目	化学成分/%									气体含量/ 10^{-6}		
	C	Si	Mn	P	S	V	Cr	Ni	Cu	[N]	[H]	[O]
波动范围	0.46 ~ 0.48	0.30 ~ 0.40	0.88 ~ 0.92	0.001 ~ 0.014	0.004 ~ 0.005	0.09 ~ 0.10	0.19 ~ 0.22	0.01 ~ 0.02	0.02 ~ 0.04	130 ~ 220	1.2 ~ 1.5	5 ~ 11
众数	0.47	0.35	0.90	0.013	0.004 8	0.10	0.20	0.02	0.02			

表6 49MnVS3 钢 $\Phi 140$ mm 圆棒中心非金属夹杂物和低倍组织/级
Table 6 Nonmetallic inclusions and macrostructure of $\Phi 140$ mm round bar of steel 49MnVS3 /rating

项目	Ae	A	Be	B	Ce	C	De	D	一般疏松	中心疏松	锭型疏松	中心偏析
标准	≤ 3.0	≤ 3.0	≤ 2.0	≤ 2.0	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2
波动范围	0.5 ~ 1.0	0.5 ~ 1.5	0	0.5 ~ 1.0	0	0	0.5	0.5 ~ 1.0	0.5 ~ 1.0	1.5	0.5	0.5

也很低,这主要是得益于对电弧炉原料的严格控制。

4.2 低倍组织及非金属夹杂物

在 260 mm \times 340 mm 的连铸坯轧成 $\Phi 140$ mm 的热轧棒材上取样做非金属夹杂物检验的结果如表 6 所示。

从表 6 可以看出,非金属夹杂的等级比较低,而且等级波动较小,说明夹杂物控制比较稳定,这主要得益于严格的生产过程控制,电弧炉出钢温度控制在 1 630 ~ 1 650 $^{\circ}\text{C}$ 、LF 精炼开始后不得添加 Al 元素脱氧和合理控制 CaO/Al₂O₃ 保证冶炼过程中渣的吸附性,连铸过程必须避免钢水与空气接触,采用中间包开浇吹氩和长水口吹氩保护以及整体水口浇注防止钢水二次氧化。

非调质钢 49MnVS3 的低倍检验结果如表 6 所示,低倍检验指标都达到了标准的要求,且一般疏松、锭型疏松、中心偏析等级别都满足标准要求。

4.3 力学性能及其他检测

将 260 mm \times 340 mm 的连铸坯轧成 $\Phi 150$ mm 的圆棒,经 880 $^{\circ}\text{C}$ 保温 120 min 正火风冷,再加热到 580 $^{\circ}\text{C}$ 保温 240 min 回火空冷,力学性能测试结果如表 7 所示。力学性能检测表明,49MnVS3 钢的强度、塑性均满足标准要求,且各性能的波动范围都

较小。

根据国标 GB/T4162-2008 中的 A 级规定进行钢材超声探伤,钢材的探伤合格率达到 99%。带状组织和晶粒度检测均满足标准要求,带状为 0 ~ 1 级,晶粒度 ≥ 5 级。

5 结论

(1) 苏信特钢采用 EAF \rightarrow LF \rightarrow VD \rightarrow CCM 进行高拉碳、控制精炼渣碱度和渣的 CaO/Al₂O₃ 比例充分吸附夹杂的工艺生产非调质钢 49MnVS3 能满足客户产品质量要求。

(2) 49MnVS3 轧材气体含量、低倍组织及夹杂物要求、力学性能完全满足 GB/T4162-2008 的要求及技术协议的要求。

参考文献

- [1] 王开远. 汽车发动机曲轴技术条件标准新旧版本对比[J]. 汽车标准化, 2006(9): 6-9.
- [2] 于天忱, 宋满堂, 范连明. 非调质钢 S38MnSiV 采用转炉-矩形坯连铸工艺的生产实践[J]. 中国冶金, 2011, 21(6): 27-30.
- [3] 范连明. 转炉矩形坯生产曲轴钢 S38MnSiV 工艺实践[J]. 本钢技术, 2010(4): 12-14, 41.
- [4] 刘麒麟, 顾文兵, 刘俊江, 等. 电炉冶炼非调质钢 38Mn6V 工艺探究[J]. 宝钢技术, 2004(S1): 47-50.
- [5] 陆利明, 李宏, 壮云乾, 等. 氮气加压熔炼高氮钢若干理论问题探究[J]. 钢铁研究学报, 1996, 8(1): 6-10.

代刚(1980-),男,炼钢工艺工程师,2004年武汉科技大学毕业,非调质钢的生产工艺研究。

E-mail: daigang@sugang.com.cn

表7 49MnVS3 钢 $\Phi 150$ mm 圆棒的力学性能
Table 7 Mechanical properties of $\Phi 150$ mm round bar of steel 49MnVS3

项目	R_m /MPa	R_{el} /MPa	A/%	Z/%	A_{kt} /J
标准	$780 \leq R_m \leq 900$	≥ 450	≥ 8	≥ 20	≥ 39
波动范围	803 ~ 883	517 ~ 590	16 ~ 21	38 ~ 49	39 ~ 59
平均数	848	554	18.5	45	45

收稿日期: 2015-02-07