

50 t EBT EAF-LF(VD)-CC 流程生产 G55SiMoVA 轴承钢的工艺实践

杨密平

(山东钢铁股份有限公司莱芜分公司特钢事业部, 莱芜 271105)

摘要 石油钻具用轴承钢 G55SiMoVA (/% : 0.52 ~ 0.55C, 0.90 ~ 1.10Si, 0.30 ~ 0.50Mn, 0.40 ~ 0.60Mo, 0.20 ~ 0.30V, ≤0.015P, ≤0.015S) 的工艺流程为废钢 + 60% ~ 70% 铁水-50 t UHP EBT EAF-60 t LF-VD-260 mm × 300 mm 连铸。通过采用电弧炉全程泡沫渣埋弧操作, EBT 出钢合金化, 控制 LF 二次精炼渣 (/% : 46 ~ 54CaO, 10 ~ 16SiO₂, 11 ~ 13Al₂O₃, 4.5 ~ 7.0MgO) 碱度 3.2 ~ 4.5, SiC 扩散脱氧和 60 ~ 80 L/min 流量氩气搅拌, VD 67 Pa 真空状态下保持 20 min, 连铸全程保护浇铸, 所生产 G55SiMoVA 轴承钢轧材中氧含量为 9 × 10⁻⁶ ~ 10 × 10⁻⁶。

关键词 G55SiMoVA 轴承钢 50 t EAF-LF(VD)-CC 流程 总氧含量 夹杂物

Process Practice of Bearing Steel G55SiMoVA Produced by 50 t EBT EAF-LF (VD)-CC Flow Sheet

Yang Miping

(Special Steel Division, Laiwu Branch, Shandong Iron and Steel Corp Ltd, Laiwu 271105)

Abstract The flow sheet for bearing steel G55SiMoVA for oil drilling tool (/% : 0.52 ~ 0.55C, 0.90 ~ 1.10Si, 0.30 ~ 0.50Mn, 0.40 ~ 0.60Mo, 0.20 ~ 0.30V, ≤0.015P, ≤0.015S) is scrap + 60% ~ 70% hot metal-50 t UHP EBT EAF-60 t LF-VD-260 mm × 300 mm CC process. With using foaming slag submerged arc operation in whole period of arc furnace steelmaking, EBT tapping and alloying, controlling basicity 3.2 ~ 4.5 of LF secondary refining slag (/% : 46 ~ 54CaO, 10 ~ 16SiO₂, 11 ~ 13Al₂O₃, 4.5 ~ 7.0MgO), diffusion-deoxidizing by SiC with 60 ~ 80 L/min Argon stirring, VD for 20 min in vacuum below 67 Pa, and shielding casting in whole period, the oxygen content in bearing steel G55SiMoA rolled products is 9 × 10⁻⁶ ~ 10 × 10⁻⁶.

Material Index Bearing Steel G55SiMoVA, 50 t EAF-LF (VD)-CC Flow Sheet, Total Oxygen Content, Inclusion

G55SiMoVA 轴承钢用于石油钻具轴承, 其工作环境恶劣, 冲击载荷较大, 要求 G55SiMoVA 钢具有较高的综合力学性能, 组织均匀, 耐冲击性能好。G55SiMoVA 轴承工件具有变形小, 尺寸稳定性好的优点。

1 主要技术要求

1.1 化学成分

G55SiMoVA 钢的标准化学成分, 如表 1 规定。

1.2 气体含量和低倍组织

在坯或钢材上取样分析, 要求氧含量 ≤ 15 × 10⁻⁶。

钢材试样经酸浸后, 应无缩孔、裂纹、皮下气泡、白点、过烧裂纹及有害夹杂物。低倍组织和高倍 (夹杂物级别, 脱碳层, 奥氏体晶粒度) 检验均按 GB/T18254-2002 评定, 合格级别符合表 2 规定。

Φ51 ~ 80 mm G55SiMoVA 热轧圆钢的总脱碳层深度应 ≤ 0.80 mm。

奥氏体晶粒度按 GB/T6394 系列图片 I 进行评

表 1 G55SiMoVA 轴承钢的化学成分和总氧含量 / %

Table 1 Chemical composition and total oxygen content of bearing steel G55SiMoVA / %

炉号	C	Si	Mn	Mo	V	P	S	Al	Cr	Ni	Cu	T[O]	
												VD 前	轧材
5300	0.53	1.01	0.39	0.48	0.25	0.014	0.005	0.031	0.04	0.01	0.04	0.001 9	0.001 0
5301	0.52	1.00	0.36	0.51	0.25	0.012	0.002	0.023	0.04	0.01	0.04	0.001 5	0.001 0
5302	0.53	0.99	0.36	0.52	0.25	0.010	0.001	0.029	0.03	0.01	0.04	0.001 6	0.001 0
5303	0.52	1.03	0.35	0.51	0.25	0.010	0.002	0.039	0.03	0.01	0.04	0.001 8	0.001 0
5304	0.53	0.97	0.36	0.49	0.23	0.010	0.001	0.015	0.03	0.01	0.03	0.001 6	0.000 9
标准	0.52 ~ 0.55	0.90 ~ 1.10	0.30 ~ 0.50	0.40 ~ 0.60	0.20 ~ 0.30	≤ 0.015	≤ 0.015	-	≤ 0.20	≤ 0.20	≤ 0.20	-	≤ 0.001 5
内控	0.52 ~ 0.55	0.98 ~ 1.05	0.35 ~ 0.40	0.50 ~ 0.55	0.24 ~ 0.28	≤ 0.015	≤ 0.015	0.015 ~ 0.060	≤ 0.20	≤ 0.20	≤ 0.20		

表 2 G55SiMoVA 轴承钢材的低倍组织, 非金属夹杂物, 晶粒度和脱碳层

Table 2 Macrostructure, nonmetallic inclusions, grain size and depth of decarburization layer of G55SiMoVA bearing steel hot rolled products

项目	低倍组织/级			A		B		C		D		晶粒度/ 级	Φ51~80 mm 圆钢 脱碳层/mm
	一般疏松	中心疏松	偏析	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗		
标准	≤0.5	≤1.5	≤1.0	≤2.0	≤1.5	≤2.0	≤1.0	≤0.5	≤0.5	≤1.0	≤1.0	≥6	≤0.8
Φ65~75 mm 材检验值	0~0.5	0.5~1.5	0~0.5	0~1.0	0~0.5	0~1.0	0~0.5	0	0	0~0.5	0~0.5	7~8	0.6~0.8

级, 晶粒度级别应 ≥6 级。

1.3 工艺流程

G55SiMoVA 轴承钢生产工艺流程: 废钢 + 60% ~ 70% 铁水 → 50 t UHP EAF (EBT) → 60 t LF → 60 t VD → 矩形坯连铸 (260 mm × 300 mm) → 入坑缓冷 → 轧材 → 精整 → 检验 → 入库。主要工艺设备参数见表 3、表 4。

2 生产技术要点

2.1 电弧炉冶炼

入炉钢铁料为 67% ~ 69% 的铁水和优质废钢, 钢铁料中一次性配加石灰 3.2 t/炉。为确保低磷、低钛含量, 生产时调配使用磷含量在 0.090% ~ 0.110%、铁水中钛含量在 0.027% ~ 0.060%。留钢留渣总量控制在 8 ~ 10 t, 有利于前期快速造渣、脱磷^[1]。采用全程泡沫渣埋弧冶炼操作方式。

因铁水比例大, 只配一次料。加料完毕后, 送电和吹氧同时进行, 送电 2 min, 停止供电, 保持吹氧,

表 3 电弧炉、LF (钢包炉) 主要工艺技术参数

Table 3 Main technical parameters of electric arc furnace and ladle furnace

项目	技术参数
电弧炉公称容量/t	50
电弧炉电极直径/mm	500
炉壁氧枪/支	4
冶炼周期/min	44
LF 公称容量/t	60
LF 处理时间/min	≥32
钢包自由空间高度/mm	800
LF 加热速度/(°C · min ⁻¹)	3

表 4 连铸机主要工艺技术参数

Table 4 Main technical parameters of concaster

项目	技术参数
机型	全弧型
机数 × 流数	3 × 3
弧型半径/m	R = 12.4/16.8/25.8/56
铸坯断面/(mm × mm)	260 × 300, 180 × 220
拉速控制范围/(m · min ⁻¹)	0.50 ~ 0.80 (260 × 300)
结晶器振动方式	液压非正弦振动
二冷方式	动态配水, 气-雾冷却
电磁搅拌方式	M-EMS + F-EMS
拉矫机型式	钳式拉矫机, 四点矫直

氧气压力 1.20 ~ 1.50 MPa, 前期强化用氧, 有利于前期氧化脱硅去锰, 提高熔池钢水温度, 氧气压力流量大, 搅拌熔池, 促进热量传递。根据烟气和炉渣情况, 决定大压力吹氧时间, 烟气浓, 炉渣稠, 吹氧时间可适当延长; 烟气淡, 炉渣流动性良好, 吹氧时间可适当缩短。

前期硅、锰的去除, 为后期稳定脱碳创造了条件, 钢水中稳定的碳含量可以确保炉渣中稳定的 (FeO)。对于一定碱度和温度的氧化渣来说, 合适的 (FeO) 是确保炉渣良好的流动性、有效脱磷和喷粉泡沫化实现供电埋弧操作的重要条件。

冶炼过程中控制熔清碳含量在 0.85% ~ 1.65%, 熔清磷含量可达到 0.005% ~ 0.018%; 出钢温度控制在 1 646 ~ 1 661 °C。

2.2 出钢合金化

电弧炉出钢用合金全部进行烘烤, 造渣用石灰和萤石保持干燥。冶炼末期控制渣量, 杜绝出钢后下渣。出钢时将钢芯铝、硅锰、硅铁、钼铁及造渣料等按一定的顺序加入钢包, 进行合金化及造精炼渣, 到精炼位渣况均为黄渣或白渣。

实践表明, 冶炼 G55SiMoVA 时, 出钢后钢水温降在 90 ~ 130 °C, 电弧炉出钢终点磷含量在 0.003% ~ 0.007%, 到位碳含量在 0.35% ~ 0.40%, 到位温度在 1 515 ~ 1 570 °C, 这样为精炼炉提供了有利的初炼条件, 有利于控制精炼温度和进行脱氧、脱硫等操作。

2.3 LF 二次精炼

适当提高轴承钢炉渣碱度可降低钢中氧含量, 有利于脱硫, 但过高的炉渣碱度又会增加 D 类夹杂物含量, 也有学者研究得出在高碱度渣 (CaO/SiO₂ = 3.0 ~ 4.5) 的精炼条件下, 轴承钢中并未发现单独存在的铝酸钙型球状夹杂物^[2]。LF 工位控制精炼渣碱度在 3.2 ~ 4.5, G55SiMoVA 轴承钢精炼渣系主要成分见表 5 所示。

钢包到 LF 工位后首先采用 SiC 进行扩散脱氧, 并根据渣况补加适量石灰或萤石。将钢包顶渣调成白渣后, 一次性喂入足够的铝线, 后期不喂铝线, 避

表5 G55SiMoVA 轴承钢精炼渣系主要成分/%
Table 5 Main ingredient of refining slag for G55SiMoVA bearing steel/%

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO
46 ~ 54	10 ~ 16	11 ~ 13	4.5 ~ 7.0

免生成的 Al₂O₃ 在后期没有充足的上浮时间。分析 LF 工位第一次样铝含量在 0.050% ~ 0.079%。前期大电流埋弧操作,保证炉渣发泡效果好,使得钢水温度和炉渣温度能够迅速提升,有利于脱氧脱硫反应的进行和夹杂物的去除,送电时控制氩气流量 60 ~ 80 L/min;根据一次样钢水成分补加合金及配碳,然后保证钢液不裸露,控制氩气流量 100 ~ 150 L/min,取 LF 工位第二次样后保持白渣操作。根据 LF 工位第二次样钢水成分,进行钢水成分微调,以满足 G55SiMoVA 钢种钢水窄成分的控制要求,有利于钢种性能的稳定。根据 VD 温降情况进行适度提温,出钢后加入炭化稻壳进行保温。

2.4 VD 真空处理

进 VD 前,将精炼顶渣量扒出 1/3 ~ 1/2。快速抽真空,使真空度快速达到 67 Pa 以下,最低真空度可达到 20 Pa,并保持 20 min,VD 过程平均温降 2.2 °C/min。前期采取小氩气流量控制措施,前期真空罐内还残留空气,若大氩气流量,易使钢水裸露,造成钢水吸气。王文军等人研究得出^[3],80 ~ 100 L/min 的软吹氩气流量可以有效去除钢液中的非金属夹杂物,而软吹氩气流量小于 60 L/min 或大于 120 L/min 时,夹杂物洁净度指数都较低;而软吹氩时间保持在 15 min 以上时,有利于降低钢水中夹杂物含量及总氧含量。

实践表明,VD 炉前期、后期冶炼阶段小氩气流量控制在 60 ~ 80 L/min,中期控制氩气流量 90 ~ 100 L/min,可使钢水的氢含量 $\leq 1.5 \times 10^{-6}$ 。上钢前软吹 13 ~ 16 min 后加入钢包覆盖剂和炭化稻壳进行双重保温,控制 G55SiMoVA 轴承钢的上钢温度在 1 538 ~ 1 542 °C。

2.5 连铸

连铸浇注过程采用全程保护浇注,第 1 炉开浇前向中间包内充入氩气将空气排出。钢包加包盖,减少因钢水液面下降时裸露的钢包内衬向外散热,并减少钢水后期温降的幅度;钢包长水口采用氩气加密封垫双重保护措施;中间包采用加盖、中间包覆盖剂和炭化稻壳配合使用的保温方式,保温效果良好。钢水过热度控制在 22 ~ 30 °C,5 炉钢包钢水温度为 1 540 ~ 1 544 °C,中间包钢水温度为 1 499 ~

1 509 °C,为控制连铸平稳拉速创造了条件,G55SiMoVA 轴承钢拉速控制在 0.50 ~ 0.65 m/min。

中间包与结晶器之间采用浸入式水口保护浇注,结晶器保护渣采用 G55SiMoVA 轴承钢专用保护渣,整个浇注过程,减少了钢液的二次氧化。

结晶器液面采用自动控制方式,二冷配水采用 G55SiMoVA 专用动态配水模型,控制二冷区比水量为 0.33 L/kg,在拉速 0.50 ~ 0.65 m/min 的条件下,测得进拉矫机的温度在 904 ~ 976 °C。

结晶器电磁搅拌能大幅降低钢液的过热度,缩短凝固时间,均匀凝固坯壳^[4],从而产生宽且细的等轴晶区;而凝固末端电磁搅拌可进一步细化等轴晶并能保持粘稠区的流动以及温度与成分的均匀。因此可以明显减轻宏观偏析。电磁搅拌采用结晶器电磁搅拌(M-EMS) + 末端电磁搅拌(F-EMS)的方式。M-EMS 工作电流为 200 A,频率为 3.0 Hz;F-EMS 工作电流为 100 A,频率为 12.0 Hz。

G55SiMoVA 260 mm × 300 mm 连铸坯全部落地入坑缓冷处理,缓冷前用热坯垫底烘烤缓冷坑。

2.6 轧制

连铸坯进入轧钢区加热炉内时,控制加热温度在 1 180 ~ 1 220 °C,铸坯允许温差 < 30 °C。加热时间 ≥ 2.5 h,高温扩散时间 ≥ 2.0 h,保证钢坯加热均匀。共轧制 $\Phi 65$ mm、 $\Phi 75$ mm 两个规格,均采用 260 mm × 300 mm 大方连铸坯。

控制进入初轧机温度 $\geq 1 100$ °C,轧前认真检查轧辊、导位、辊道等,避免损伤轧件表面。轧制过程中,密切注意各道次料型情况,防止出现划伤、折叠、耳子等缺陷。控制轧制节奏,保证终轧温度 ≥ 850 °C,轧后钢材采取缓冷方式。

3 结果与分析

目前莱钢已经能够批量生产 G55SiMoVA 轴承钢,主要采用大方(260 mm × 300 mm)连铸坯轧制规格 $\Phi 65$ ~ $\Phi 100$ mm 的钢材。

3.1 化学成分

VD 破空后取成品样,G55SiMoVA 成品成分见表 1。由表 1 可以看出钢水成分控制比较理想,通过与 LF 第二次样对比,得出 VD 后全铝含量降低,在 0.018% ~ 0.030%。

3.2 氧含量

VD 前取钢水样进行全氧分析,并取轧材后钢材进行全氧分析结果如表 1 所示。由表 1 可见,VD 前钢液全氧含量较低,在 15×10^{-6} ~ 19×10^{-6} ,轧

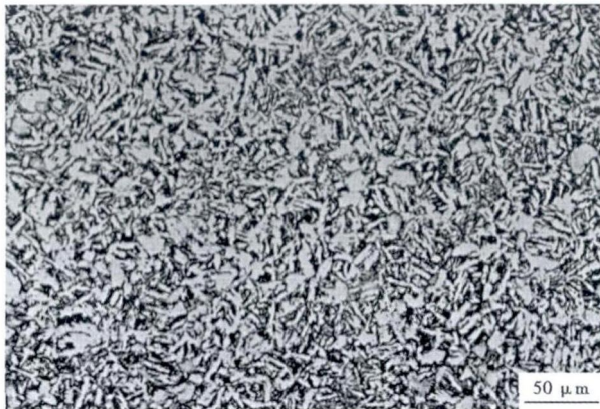


图 1 G55SiMoVA 轴承钢 Φ65 ~ Φ75 mm 轧材的组织形貌
Fig. 1 Morphology of structure of G55SiMoVA bearing steel Φ65 ~ Φ75 mm rolled products

材全氧含量有所降低,在 $9 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$ 。由此可见,从 VD 真空处理前到连铸坯,钢液全氧含量能够减低 $5 \times 10^{-6} \sim 9 \times 10^{-6}$,说明 VD 真空处理效果较好,且破空后软吹时间保证了部分夹杂物的上浮去除^[5];另一方面说明连铸保护浇注效果好,耐火材料对钢液污染程度很小。

3.3 铸坯

抽取第 1 炉连铸坯试样,车削酸洗后可见 G55SiMoVA 轴承钢连铸坯低倍组织检验良好,未发现缩孔、中心疏松、夹渣、皮下气泡等铸坯缺陷。铸坯心部质量较好,整体铸坯组织致密;铸坯急冷层厚度为 2 ~ 3 mm,内弧、外弧柱状晶区厚度为 45 ~ 46 mm;侧弧柱状晶区厚度为 52 ~ 53 mm,中心区域为等轴晶区域,由此可计算出铸坯等轴晶比例约为 40%。

3.4 轧材

检验 Φ65 mm、Φ75 mm 两个规格的轧材各项指标,如表 2 可见:轧材低倍组织检验均符合要求;A

和 B 类粗系夹杂物级别均小于 0.5, A 和 B 类细系夹杂物级别均小于 1.0, C 类夹杂物级别为 0, D 类夹杂物级别均小于 0.5;晶粒度级别为 7 ~ 8;脱碳层深度在 0.6 ~ 0.8 mm。G55SiMoVA 轧材高倍金相组织为贝氏体 + 铁素体,见图 1。

4 结论

(1) 经检测,莱钢特钢事业部采用 260 mm × 300 mm 连铸坯试制的 G55SiMoVA 轴承钢,各项性能指标完全满足技术标准要求,钢材性能良好。

(2) G55SiMoVA 轴承钢成分均匀,纯净度高,各类夹杂物的级别低,分布均匀。A 和 B 类粗系夹杂物级别均小于 0.5, A 和 B 类细系夹杂物级别均小于 1.0, C 类夹杂物级别为 0, D 类夹杂物级别均小于 0.5。

(3) G55SiMoVA 轴承钢氧含量在 $9 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$ 。

参考文献

[1] 上海燕, 姬健营, 彭家清. 100 t EAF-LF-CCM 流程生产 SWRH82B 的工艺实践[J]. 中国冶金, 2008, 18(3): 5-7.
 [2] 于平, 陈伟庆, 冯军, 等. 高碱度渣精炼的轴承钢中夹杂物研究[J]. 钢铁, 2004, 39(7): 22-23.
 [3] 王文军, 刘金刚, 李战军, 等. 钢包软吹氩对钢中夹杂物去除效果的研究[J]. 钢铁, 2010, 45(9): 30-31.
 [4] 吴存有, 周月明, 侯晓光. 电磁搅拌技术的发展[J]. 世界钢铁, 2010, 10(2): 37-38.
 [5] 岳强, 陈怀昊, 姚成虎, 等. 钢液中非金属夹杂物碰撞、长大的研究进展[J]. 钢铁研究学报, 2012, 24(9): 1-5.

杨密平(1979-), 男, 硕士(北京科技大学), 安徽工业大学(本科)毕业, 工程师, 炼钢和连铸工艺技术监督和管理。
E-mail: yangmiping@126.com

收稿日期: 2013-10-09

下 期 要 目

GCr15 轴承钢棒材连轧过程的有限元模拟	冯富春等
热轧 U 型钢板桩切深孔型宽展模型的研究	周庆鹏等
RH-MFB 精炼时钢水温度预报模型的开发	吴扬等
180 t 转炉聚合射流流场的水力学模型的实验研究	包丽明等
3Cr13Mo 钢板多参数 YAG 激光焊接残余应力和形变的仿真研究	刘升等
电渣重熔冶金用含氟渣系界面性质的研究进展	曹玉龙等
热轧 304 不锈钢带表面亮斑缺陷的形成因素和预防工艺措施	韦成贵等
45 t AOD 精炼高氮奥氏体不锈钢 10Cr21Mn16NiN 的工艺实践	范新智
Fe-20Cr-5Al 不锈钢加稀土元素 La 合金化工艺对 La 收得率的影响	余晓艳等