

150 t BOF-LF-RH-CC-CR 工艺试制石油钻杆连接套用钢 SAE4137M

卢秉军 董学涛

(本钢板材股份有限公司技术中心, 本溪 117000)

摘要 本钢采用铁水预处理-150 t 复吹转炉-LF-RH-350 mm × 470 mm 连铸、M-EMS-连轧工艺生产 Φ130 ~ 170 mm 石油钻杆连接套用钢 SAE4137M (C: 0.35 ~ 0.38, Si: 0.15 ~ 0.35, Mn: 0.85 ~ 1.00, P ≤ 0.015, S ≤ 0.008, Cr: 0.90 ~ 1.20, Mo: 0.28 ~ 0.33, Ca ≤ 0.005, N ≤ 0.009)。通过转炉出钢过程加复合脱氧剂, LF 扩散脱氧全程吹氩搅拌, RH“软吹氩”, 严格控制喂钙线量, 控制连铸钢水过热度 20 ~ 30 °C, 使钢材中氧含量为 $(13 \sim 15) \times 10^{-6}$, 氢含量 $(0.4 \sim 0.5) \times 10^{-6}$, 氮含量为 $(35 \sim 44) \times 10^{-6}$, 残余钙含量 $(12 \sim 18) \times 10^{-6}$, 并保证钢中 Al/N ≥ 2, 满足石油用钢的要求。

关键词 150 t BOF-LF-RH-CC 流程 石油钻杆连接套用钢 SAE4137M 试制

Pilot Production of Steel SAE4137M for Petroleum Drill Pipe Connecting Sleeve by 150 t BOF-LF-RH-CC-CR Process

Lu Bingjun and Dong Xuetao

(Technology Center, Bengang Steel Plates Co Ltd, Benxi 117000)

Abstract The Φ130 ~ 170 mm bar of steel SAE4137M for petroleum drill pipe connecting sleeve (C: 0.35 ~ 0.38, Si: 0.15 ~ 0.35, Mn: 0.85 ~ 1.00, P ≤ 0.015, S ≤ 0.008, Cr: 0.90 ~ 1.20, Mo: 0.28 ~ 0.33, Ca ≤ 0.005, N ≤ 0.009) has been pilot-produced by hot metal pretreatment-150 t top and bottom combined blown converter-LF-RH-350 mm × 470 mm casting with M-EMS-continuous rolling process at Bengang. With adding compound deoxidizer during converter tapping, diffusion deoxidizing with argon stirring in LF refining, soft argon blowing and strict-controlling feeding calcium wire amount in RH refining, and controlling liquid overheating extent within 20 ~ 30 °C, in steel products the oxygen content is $(13 \sim 15) \times 10^{-6}$, hydrogen content $(0.4 \sim 0.5) \times 10^{-6}$, nitrogen content $(35 \sim 44) \times 10^{-6}$, residual calcium content $(12 \sim 18) \times 10^{-6}$ and Al/N is ensured ≥ 2, that all meet the requirement for petroleum steels.

Material Index 150 t BOF-LF-RH-CC Flow Sheet, Steel SAE4137M for Petroleum Drill Pipe Connecting Sleeve, Pilot Production

SAE4137M 钢主要用于生产石油钻杆连接套, 在钻探过程中既要承受较大的扭转力, 还要受到多种腐蚀介质的侵蚀, 同时还要保证在恶劣的自然、地质条件下安全工作。本钢采用“转炉冶炼-LF 精炼-RH 真空循环脱气-矩形连铸-连轧”工艺成功进行了试制, 并对连铸工艺条件下 SAE4137M 钢的 T[O]、T[N]、[H]、非金属夹杂、钢材的工艺性能及铸坯质量的控制进行了研究。

1 标准成分要求与实际成分控制

SAE4137M 钢的技术难点: (1) 钢的碳含量要求控制范围较窄; (2) 为保证连接套的热加工性能, 钢

中要求 Al/N ≥ 2; (3) 要求检测钢材低温状态下的横向、纵向冲击; (4) 石油钻杆连接套装配前须进行磁粉探伤和超声波探伤。

参照美国 ASTM 标准和石油钻杆连接套石油要求, 制定本钢标准, SAE4137M 钢的标准化学成分和实际成分如表 1、表 2 所示。

2 工艺设备特点

工艺路线为: 铁水预处理 → 150 t 转炉 → LF → RH → 连铸 350 mm × 470 mm 矩形坯 → 热送 → 加热 → 800 棒材连轧机组 → 保温 → 探伤 → 修磨 → 检验 → 包装缴库 → 发货。

表 1 SAE4137M 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of steel SAE4137M / %

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ca	Al	Al/N
标准	0.35 ~ 0.38	0.15 ~ 0.35	0.85 ~ 1.00	≤ 0.015	≤ 0.008	0.90 ~ 1.20	0.28 ~ 0.33	≤ 0.005	-	≥ 2
实际	0.36 ~ 0.37	0.26 ~ 0.28	0.94 ~ 0.95	0.008 ~ 0.010	0.002 ~ 0.005	1.10 ~ 1.11	0.30	0.001 ~ 0.002	≥ 0.005	5.68 ~ 7.32

表2 SAE4137M 钢的残余、有害元素和气体含量/%
Table 2 Residual, deleterious element and gas content in steel SAE4137M / %

项目	Ni	Cu	As	Sn	Sb	Pb	Bi	O	H	N
标准	≤ 0.25	≤ 0.25	≤ 0.020	≤ 0.020	≤ 0.020	-	-	-	-	≤ 0.009
实际	0~ 0.01	0.02~ 0.03	0.000 1~ 0.000 3	0.000 1~ 0.000 3	0.000 1~ 0.000 3	0.000 1~ 0.000 3	0.000 1~ 0.000 3	0.001 3~ 0.001 5	0.000 04~ 0.000 05	0.003 5~ 0.004 4

铁水预处理使用镁作为脱硫剂。转炉为150 t 氧气顶-底复吹方式,底部气体采用氮气或氩气供气,配合顶部喷吹氧枪、底部采用6支供气元件。转炉采用全铁水冶炼,石灰为活性灰,转炉本身通过一级计算机控制、二级计算机实现静态模型并用副枪校正完成动态模型,实现转炉炼钢的自动化。LF 通过电弧加热制造高碱度还原渣,钢包底部吹入惰性气体进行钢液搅拌,配备喂丝设备,终脱氧采用夹杂物变性钙处理。RH-TB 真空设备从德国 TM 公司引进。连续铸机采用达涅利设备,一机四流,全过程保护浇注,结晶器安装电磁搅拌器,在液芯最后阶段投入机械轻压下技术。800 棒材连轧机组采用的是 VIA POMINI 轧机设备。轧制过程自动化控制,采用定径技术和低温精轧工艺。

2.1 铁水预处理

铁水温度 $\geq 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $[\text{P}] \leq 0.060\%$ 、 $0.30\% \sim 0.60\%$ Si。采用镁基脱硫剂进行喷粉深脱硫处理,要求处理后 $[\text{S}] \leq 0.005\%$,脱硫后进行扒渣处理。

2.2 转炉冶炼

采用150 t 顶底复吹转炉铁水法及单渣法,辅加活性石灰、轻烧白云石及精料废钢进行转炉冶炼。转炉复吹全程吹氩,转炉吹炼控制终点碳 $\geq 0.10\%$ 。出钢采用挡渣标挡渣,控制钢包渣层厚度保证钢包净空。出钢过程中加复合脱氧剂脱氧,采用增碳剂增碳,并对钢包顶渣进行改质处理。

2.3 LF 精炼

150 t LF 为电极旋转式双工位,变压器容量35 MVA,升温速度 $1 \sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。钢包到位后进行测温定氧,根据定氧值加铝球调 $[\text{Al}]_s$,然后进行升温化渣。造渣材料采用活性石灰,造渣过程加铝球、硅铁粉进行扩散脱氧,要造出“白渣”。造还原渣对钢水脱氧脱硫,在还原渣下保持时间 $\geq 15\text{ min}$,全过程钢包底吹氩搅拌。LF 顶渣成分见表3。

2.4 RH 真空处理

RH 为单工位 RH-TB,6 级真空泵,67 Pa 时抽气能力为600 kg/h,钢液循环速度130 t/min。工艺设定真空度 $\leq 100\text{ Pa}$,脱气时间 $\geq 15\text{ min}$ 。RH“复压”

表3 LF 精炼顶渣成分/%

Table 3 Ingredient of LF refining slag / %

过程渣样	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	FeO	P ₂ O ₅	S
No1	6.912	31.37	51.26	7.676	0.102	0.586	<0.005	0.310
No2	6.823	30.78	56.52	5.389	0.049	0.352	<0.005	0.501
No3	5.755	30.92	55.96	5.180	0.052	0.352	<0.005	0.551

后进行钢包“软吹氩”操作,“软吹氩”搅拌时间 $\geq 15\text{ min}$ 。控制钙处理用量,钢水成分和温度按规程目标值控制,合格后方可上台浇铸。要求不得在 RH 站进行升温操作。离站前采用喂丝技术进行钙处理。严格控制钙线加入量,保证成品 $\text{Ca} \leq 0.005\%$ 。

2.5 矩形坯连铸

矩形坯连铸机为弧形连铸机,4 机 4 流。中间包钢水温度过高,则铸坯中心疏松加重,严重时出现缩孔;温度过低钢水流动性差,不利于保护渣的熔化和钢中夹杂物的去除。为此,将 SAE4137M 钢的中间包钢水过热度定为 $20 \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。采取浸入式保护浇注,采用定氢仪标定氢含量。控制开浇吨位,严格按中间包过热度控制拉速,保证拉速恒定,拉速范围 $0.50 \sim 0.55\text{ m}/\text{min}$ 。开启结晶器电磁搅拌器(M-EMS),电磁搅拌电流480 A。

2.6 热送及轧制

连铸坯保温车红送,连铸坯热装温度 $\geq 650\text{ }^{\circ}\text{C}$,不能热装则入保温坑进行坯保温。连铸坯加热时采用3段式加热,初轧机开轧温度 $\geq 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。800 大棒线连轧机组采用了先进的高压水除鳞技术。钢材冷却到 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上入保温坑保温,保温时间 $\geq 48\text{ h}$ 。轧材后经抛丸机表面处理,倒棱机倒棱。

3 试验及结果

根据制定的 SAE4137M 石油钢标准,对已生产的一个浇次的3炉钢进行了检验。从表1和表2中的实际化学成分看出,试验炉次的化学成分全部满足试制标准的要求。几个主要的参数 C、P、S 以及气体 O、N 和 H 控制准确,残余元素 Ni、Cu、As、Sn、Sb、Bi 和 Pb 等含量极低,充分显示了本钢本地矿石资源的优势。

根据 GB/T226-1991 采取冷酸腐蚀方法进行显示,参照 YB/T153-1999《优质碳素结构钢和合金结构钢连铸方坯低倍组织缺陷评级图》评级,其中等轴晶率按照面积法计算评级。表 4 是试验 3 炉次的铸坯低倍检验结果。

表 4 SAE4137M 钢铸坯低倍检验结果

Table 4 Examination results of macrostructure of steel SAE4137M casting bloom

实际宽边/mm	实际窄边/mm	低倍/级				等轴晶比例/%
		中心疏松	中心偏析	缩孔	裂纹	
470 ~ 473	350 ~ 352	0.5 ~ 1.0	0	0	0	24.92 ~ 29.27

从表 4 可以看出,通过结晶器电磁搅拌、二冷水强度控制、拉速的合理优化、过热度的有效控制等工艺措施,经矩形坯连铸后的铸坯中心疏松稳定在 1 级以下,无缩孔、内部裂纹及皮下气泡、皮下夹杂等缺陷。尺寸精度合格,连铸坯激冷层在 60 ~ 100 mm,柱状晶形态明显,等轴晶细小均匀,等轴晶比例控制在 25% ~ 30%,满足了铸坯标准要求。

经 800 棒材生产线进行轧制,生产规格为 $\Phi 170$ mm、 $\Phi 130$ mm,检验结果见表 5。

从表 5 可以看出,在铸坯低倍质量控制较好的基础上,钢材的一般疏松和中心偏析全部是 0 级,中心疏松仅为 1 级,钢材的宏观纯净度达到了很高的

表 5 SAE4137M 钢 $\Phi 130$ mm 和 $\Phi 170$ mm 成品材的检验结果

Table 5 Examination results of $\Phi 130$ mm and $\Phi 170$ mm finished products of steel SAE4137M

项目	低倍组织/级			夹杂物/级								力学性能 870 ± 10 °C 油淬 650 ± 50 °C 回火						淬透性 (HRC) 870 ± 10 °C J25	晶粒度/级	探伤/级
	一般疏松	中心疏松	方框偏析	A		B		C		D		R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A_4 /%	Z/%	$A_{KV}/J(-20^\circ C)$				
标准	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 1.5	≤ 1.5	≤ 1.5	≤ 1.5	≤ 1.5	≤ 1.5	≤ 1.5	≤ 1.5	965 ~ 1 103	828 ~ 1 000	≥ 13	≥ 54	≥ 54	≥ 69	≥ 44	≥ 5	B
实验值	0	0 ~ 0.5	1	0.5 ~ 1.0	0.5 ~ 1.0	0.5	0.5	0	0	0	0	1 040 ~ 1 080	915 ~ 945	19.5 ~ 21	61 ~ 67.5	90 ~ 110	125 ~ 172	47 ~ 51.5	7	合格

注:本钢标准。

水平。试制中加强了冶炼过程气体和炉渣成分控制,夹杂物进行了变质处理,非金属夹杂按照 GB10561-2005 中 JK 图评级^[1],高倍夹杂物 A 类和 B 类满足标准要求,C 类和 D 类夹杂物均为 0 级。

4 碳偏析分析

在成品钢材上取样进行化学分析,研究碳在钢材上的分布规律。沿钢材横截面中心至边缘,依次钻取试样,对全部试样采用管式炉内燃烧气体含量

的分析法进行碳含量测定,以距中心距离作为横坐标,以碳含量作为纵坐标,绘制碳含量分布图(图 3)。

从成品钢材碳偏析分析结果看,目前工艺状态下 C 偏析仍然不理想,改善成分偏析需要进一步工艺攻关。

5 结论

(1) 根据钢材碳偏析分析结果,连铸工艺存在较大的成分偏析,改善结晶器电磁搅拌效果,增加末端电磁搅拌等可进一步减小钢材上的偏析。

(2) 采用本地矿石资源作为原料,可有效控制 Ni、Cu、As、Sn、Sb、Bi 和 Pb 等残余元素含量,保证了石油机械零件的机械性能。

参考文献

1 朱学仪,陈训浩. 钢的检验. 北京:冶金工业出版社,1992

卢秉军(1972-),男,高级工程师,1993 年辽宁工学院毕业,特殊钢产品研究和开发。

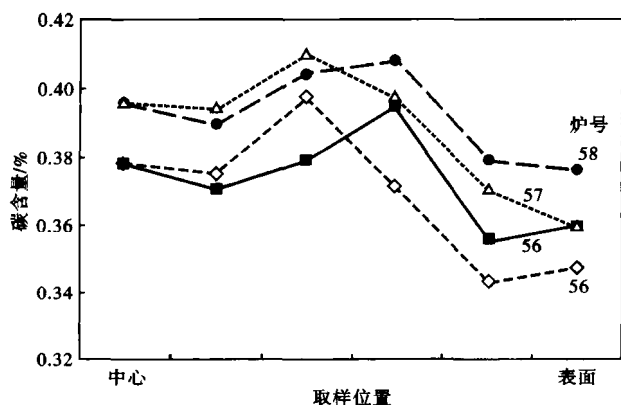


图 1 SAE4137M 钢 $\Phi 170$ mm 和 $\Phi 130$ mm 成品材横断面中心至表面的碳含量

Fig. 1 Carbon content in steel SAE4137M $\Phi 130$ mm and $\Phi 170$ mm finished products at cross section from center to surface

收稿日期:2011-10-31