

Φ300 mm S53 马氏体时效强化钢环状花样低倍组织分析及工艺改进

董晓亮¹ 张秀丽¹ 许广鹏¹ 阮 栋¹ 费三林¹ 曹 广² 廖 凯³(1 大冶特殊钢有限公司特冶产品研究所,黄石 435001; 2 高品质特殊钢湖北省重点实验室,
黄石 435001; 3 黄石市产品质量监督检验所,黄石 435000)

摘 要 6 t 真空自耗炉冶炼的 S53 钢在 Φ300 mm 锻材低倍组织检测时发现了环状花样组织,组织及扫描电镜能谱分析表明: Cr、Mo 等元素的偏析是造成环状花样组织的原因。通过调整真空自耗熔炼参数,熔滴短路时间由平均 0.8 s 降低到 0.3 s,电压值由平均 26 V 降低到 25 V,熔速由平均 6 kg/min 降低到 4.8 kg/min,电流值由平均 11 500 A 降低到 7 500 A,氦气压力由平均 600 Pa 降低到 300 Pa,消除了 S53 钢环状花样组织。

关键词 S53 马氏体时效钢 真空自耗 环状花样 偏析

Analysis on Ring Pattern Macrostructure of Φ300 mm S53 Ageing Strengthening Martensitic Steel and Process Improvement

Dong Xiaoliang¹, Zhang Xiuli¹, Xu Guangpeng¹, Ruan Dong¹, Fei Sanlin¹, Cao Guang² and Liao Kai³

(1 Daye Special Steel Co Ltd. Special Metallurgical Products Research Institute, Huangshi 435001;

2 Hubei Provincial Key Laboratory of High Quality Special Steel, Huangshi 435001;

3 Huangshi Product Quality Supervision and Inspection Institution, Huangshi 435000)

Abstract A ring-shaped pattern macro-structure in Φ300 mm forged bar of S53 steel melting by a 6 t vacuum consumable electrode furnace is found, analysis by structure and SEM shows that segregation of Cr, Mo and other elements is the cause of ring pattern formation. By vacuum consumable smelting parameters adjusted, the droplet short circuit time reducing from 0.8 s to 0.3 s on average, the voltage value decreasing from an average of 26 V to 25 V, the melting rate decreasing from an average of 6 kg/min to 4.8 kg/min, the current value decreasing from an average of 11 500 A to 7 500 A, helium pressure reducing from an average of 600 Pa to 300 Pa, the ring pattern structure of S53 steel is eliminated.

Material Index S53 Ageing Martensitic Steel, Vacuum Consumable, Ring Pattern, Segregation

S53 钢为美国在 20 世纪研制的马氏体型时效强化钢,具有良好的疲劳性能、优异的强韧性匹配及耐蚀性等,主要用于航空航天、舰船等领域的重要零部件^[1]。由于 S53 钢中含有 Cr、Mo、Co 等诸多合金元素,所以对合金元素和组织的均匀化控制显得尤为重要。目前工厂实验室在按 ASTM A604-2012 标准检验低倍组织时,发现了环状花样偏析组织,并对环状花样偏析组织的试片进行了化学成分及金相组织分析。

1 检验

S53 钢主要化学成分见表 1 所示。

对 S53 钢 6 t (Φ660 mm) 钢锭采用 1 180 ℃ 保温 3 h,在 45 MN 快锻机锻造成材。开锻温度

1 030 ℃,终锻温度 800 ℃,锻造 Φ300 mm 直径钢材后空冷到室温,而后进行退火,退火温度 620 ℃,保温时间 30 h。退火出炉后取低倍试片,对 S53 钢的低倍试片车抛后,采用盐酸、硝酸的水溶液进行热腐蚀,低倍图片如图 1 所示。

通过低倍组织观察发现钢材的中心部位存在环状花样偏析组织,该组织在钢材心部呈向外放射状分布,把低倍环状花样组织试片切割成 15 mm × 15 mm 试块,磨抛后采用苦味酸、盐酸的酒精溶液进行浸蚀,进行高倍分析,具体图片如图 2 所示。

对 S53 钢高倍组织分析,发现钢材的基体组织为马氏体回火组织,在马氏体回火组织基体上分布着偏析条带,该条带在横向呈放射状,与低倍观察到

表 1 S53 钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of S53 steel / %

项目	C	Cr	Ni	Ti	Mo	Co	W	S	P	Si	Mn
标准	0.18~0.25	9.0~11.5	5.0~6.0	≤0.02	1.5~2.5	13.0~15.0	0.5~1.5	≤0.010	≤0.010	≤0.10	≤0.10
实测值	0.23	9.5	5.3	0.04	2.3	13.5	1.0	0.002	0.004	0.06	0.03

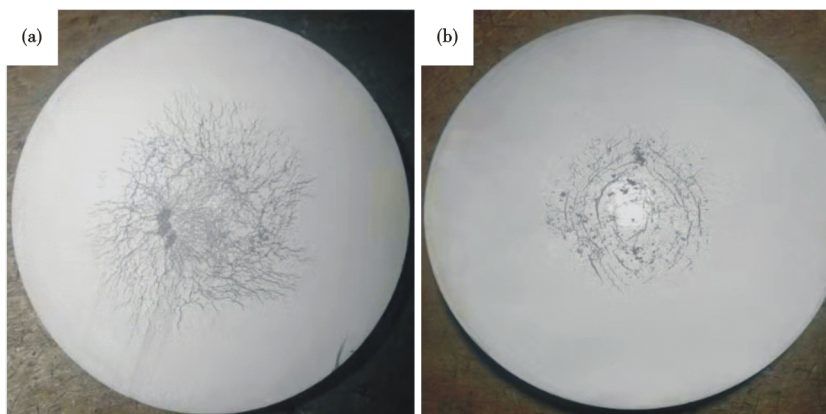


图 1 自耗锭轧制的 Φ300 mm 的 S53 钢低倍环状花样形貌: (a) 头部, (b) 尾部
Fig. 1 Ring pattern morphology of macrostructure of Φ300 mm S53 steel rolled VAR ingot: (a) top; (b) bottom

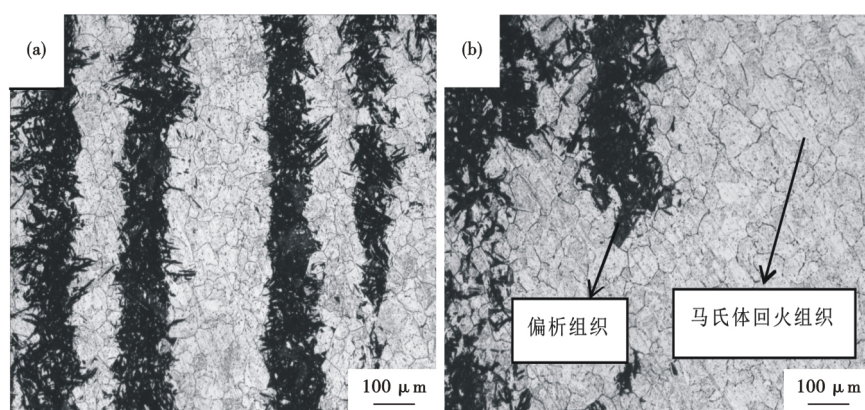


图 2 S53 钢低倍环状花样高倍组织形貌: (a) 纵向, (b) 横向
Fig. 2 Microstructure morphology of macro ring pattern of S53 steel: (a) longitudinal; (b) cross section

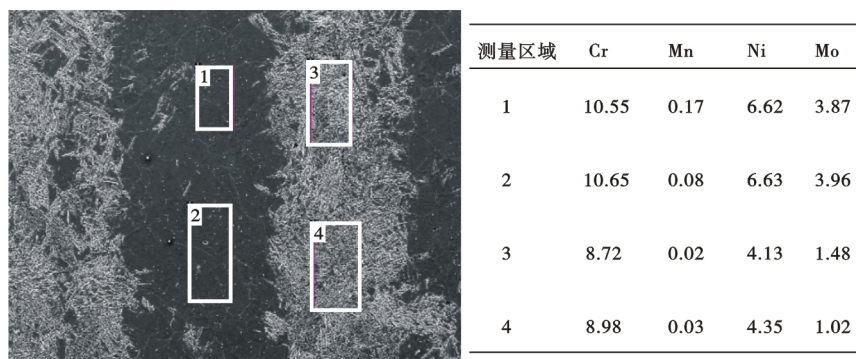


图 3 S53 钢环状花样组织能谱分析, SEM
Fig. 3 S53 steel ring pattern structure energy spectrum analysis, SEM

的偏析组织相吻合。对该类组织进行了扫描电镜及能谱分析,具体如图 3 所示。

通过扫描电镜及能谱分析发现钢材偏析组织的 Cr、Mo 等合金元素明显高于基体的马氏体回火组织,因此判断,偏析组织是由 Cr、Mo 等合金元素偏

析导致的。

2 环状花样组织影响及分析

S53 钢为马氏体型时效强化钢,其高强高韧的机理为马氏体在时效过程中,基体中均匀析出 Fe_2Mo 、 Ni_3Al 等金属间化合物,该类金属间化合物与基体发生共格效应最终使钢材获得优良的性能^[9],而 Cr、Mo 等元素的偏析将使 Fe_2Mo 、 Ni_3Al 等金属间化合物出现不均匀的析出分布,最终会使钢材的性能指标出现不均匀的现象。

经过查阅相关资料得知, Cr、Mo 等偏析元素在钢锭凝固过程中,熔池心部易形成聚集的富集溶质^[9],该类溶质最终呈聚集态保留在凝固的铸态钢锭组织中,形成偏析组织。该类组织在钢锭的锻造过程中不能消除,最终使成品钢材在低倍组织检测上呈现为环状花样偏析组织。而 S53 钢采用真空感应 + 真空自耗重熔工艺冶炼,其中真空自耗重熔为钢锭最终凝固的冶炼工序,所以 S53 钢低倍环状花样组织形成在钢锭的真空自耗重熔过程中。

3 工艺改进

S53 钢的生产流程为 6 t 真空感应炉-熔炼 Φ580 mm 电极-6 t 真空自耗炉-重熔熔炼 Φ660 mm 钢锭-锻造成材-退火-检验;其中电极的生产工艺流程为:真空感应炉化料-真空感应炉精炼-真空感应炉调整化学成分-真空感应炉取成品气体-上注法浇铸 Φ580 mm 电极。通过上述分析得出,S53 钢中低倍环状花样组织是在钢锭的真空自耗重熔过程中形成的,而 S53 钢真空自耗熔炼工艺为参考美国工程师给出的相近品种得出的,所以需要对原真空自耗工

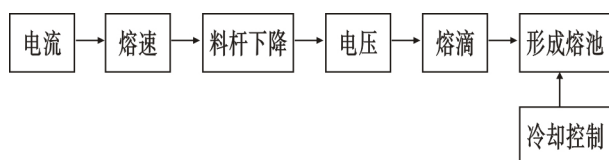


图 4 真空自耗冶炼流程控制图

Fig. 4 Flow sheet control diagram for vacuum consumable electrode melting

艺进行改进,具体如下。

3.1 熔炼工艺改进

真空自耗炉冶炼流程控制如图 4 所示:

由图 4 可以看出,在真空自耗过程中熔池(自耗电极熔化形成液滴下落而形成)主要与熔滴(自耗电极熔化下落的金属液滴)、熔速(真空自耗电极的熔化速度)等参数和后期的冷却(水和氦气冷却)有关^[4],所以为了消除 S53 钢熔池心部 Cr、Mo 等偏析的富集溶质存在,调整相关熔炼参数来降低熔池的深度,使熔池心部的 Cr、Mo 等偏析均匀稳定在平

表 2 6 t 真空自耗炉原工艺与改进工艺熔炼参数值
Tabal 2 Original process and improved process smelting parameter values of 6 t vacuum consumable electrode furnace

工艺	电流/ A	熔速/ ($\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$)	电压/ V	熔滴时 间/s	出水温 度/ $^{\circ}\text{C}$	氦气压 力/Pa
原工艺	11500	6.0	26	0.8	32	600
改进工艺	7500	4.8	25	0.3	32	300

衡凝固。目前真空自耗炉均采用熔速(对应电流)和熔滴(对应电压)控制系统,由图 4 可以看出,降低熔池的深度首先要降低自耗电极的熔化速度(熔速)即减少熔化电极的能量,根据 $W = I^2 RT$ 可以得知降低熔速前提为电流值的降低,熔速和电流降低后必定会导致料杆的下降速度减慢,而为了保证冶炼过程获得合适的熔滴数,则需要缩短熔滴短路时间(两个金属液滴的形成时间间隔),熔滴短路时间缩短后电压值随之降低^[4]。另熔池深度降低后,为了保证熔池的均匀冷却,需要在原工艺基础上降低熔池的冷却强度,即减少氦气压力。基于上述思路,

基于相似产品的生产经验,对 S53 钢的熔炼参数进行了改进,具体见表 2 所示。

为了验证改进工艺的可行性,对工艺改进前后的熔池深度进行了热模拟分析,具体见图 5 所示。

由图 5 可以看出,原工艺熔池的深度为 0.28 m,改进工艺后熔池的深度为 0.25 m,熔池深度降低了 0.03 m,进一步说明采用改进工艺的合理性。

3.2 改进效果及分析

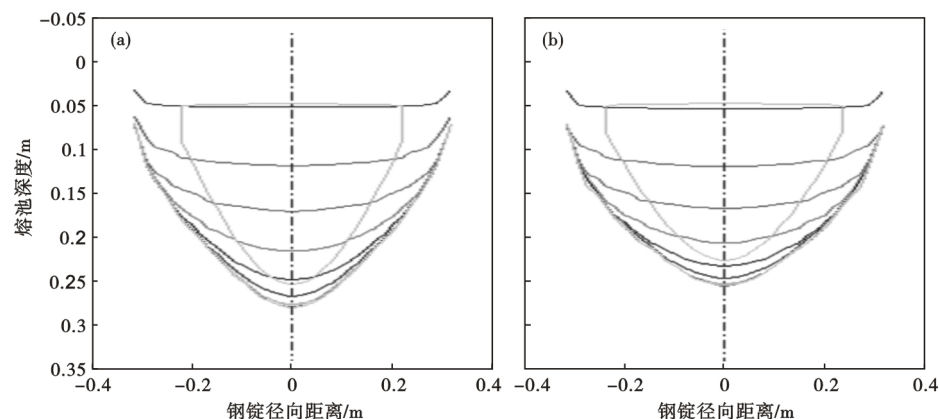


图 5 6 t 真空自耗炉模拟金属熔池剖面图: (a) 原工艺, (b) 改进工艺

Fig. 5 Sectional drawing of simulate metal bath for 6 t vacuum consumable electrode furnace: (a) original process, (b) improved process

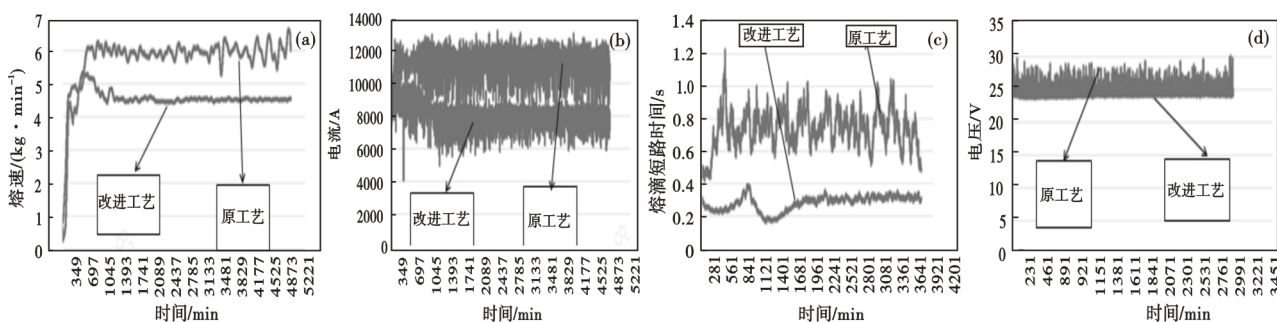


图 6 6 t 真空自耗炉原工艺与改进工艺过程参数: (a) 熔速; (b) 电流; (c) 熔滴短路时间; (d) 电压

Fig. 6 Original process and improved process parameters for 6 t vacuum consumable electrode furnace: (a) melting rate; (b) current; (c) melting drop short-circuit time; (d) voltage

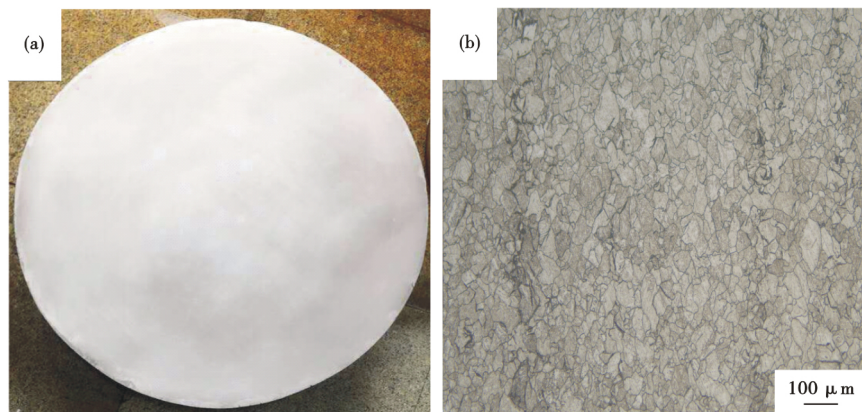


图 7 改进工艺的 S53 钢 Φ300 mm 锻材: (a) 低倍和 (b) 高倍组织形貌

Fig. 7 Morphology of macro-structure (a) and micro-structure (b) of S53 steel Φ300 mm forging product by improved process

采用上述改进的工艺冶炼 S53 钢,具体熔炼过程参数见图 6 所示。

由表 2 和图 6 可以看出,改进工艺的参数与原工艺相比,熔速由 5.5 ~ 6.6 kg/min 降低到 4 ~ 5 kg/min,而熔速直接影响着电流值的变化,所以电流值由 9 500 ~ 12 500 A 降低到 6 000 ~ 8 500 A,为了获得合适的熔滴数,熔滴短路时间由 0.6 ~ 1.1 s 降低到 0.2 ~ 0.4 s,熔滴短路时间缩短的同时电压值由 24 ~ 28 V 降低到 24 ~ 26 V,另外由前面热模拟得出随着熔速的降低,熔池深度也会降低,为了获得更加均匀平衡的凝固组织,氩气压力也由 500 ~ 700 Pa 降低到 200 ~ 400 Pa,另由图 6 可以看出,改进工艺后各熔炼参数的稳定性明显优于原工艺的,这也说明改进工艺的合理性。改进工艺后的 S53 钢锭经锻造成 Φ300 mm 的钢材后检验高低倍组织见图 7 所示。

由图 7 可以看出,改进工艺后 S53 钢的高低倍组织均匀、致密未出现低倍环状花样组织和高倍偏析组织。

4 结论

(1) Φ300 mm S53 圆钢低倍环状花样组织的形成原因为 Cr、Mo 等易偏析元素在真空自耗钢锭凝固过程中,熔池心部形成了富集的溶质所导致。

(2) 在原工艺的基础上对真空自耗熔炼参数进行了调整,具体为熔滴时间由平均 0.8 s 降低到 0.3 s,电压值由平均 26 V 降低到 25 V,熔速由平均 6 kg/min 降低到 4.8 kg/min,电流值由平均 11 500 A 降低到 7 500 A,氩气压力由平均 600 Pa 降低到 300 Pa,消除了 Cr、Mo 等易偏析元素在熔池心部形成富集溶质的聚集。

(3) 改进工艺后,S53 钢的高低倍组织中未出现环状花样和偏析组织。

参考文献

- [1] 曲敬龙,杨树峰. 真空自耗冶炼过程数值仿真研究进展 [J]. 中国冶金,2020,30(1):1-9.
- [2] 马开道,马 琨. 稀有金属真空熔铸技术及其设备设计 [M]. 北京:冶金工业出版社,2011.
- [3] 王资兴,王 磊,孙文儒. 熔速对 IN718 合金真空自耗铸锭组织的影响 [J]. 材料热处理学报,2019,40(1):91-97.
- [4] 王 慧. 金属材料冶炼工艺学 [M]. 北京:冶金工业出版社,1995.
- [5] 姜周华,董艳伍,李花冰,等. 特殊钢特种冶金技术的新发展 [J]. 中国冶金,2011,21(12):1-10.

董晓亮(1988-),男,工程师,2009 年辽宁科技大学(本科)毕业,高强度不锈钢产品研究和开发。

E-mail: 15904138194@126.com

收稿日期: 2021-05-15