

汽车轮毂用 S55C 中碳轴承钢的开发与生产实践

李永超 杨玉丹 卢彩玲 吴豪明
(河南济源钢铁(集团)有限公司, 济源 459000)

摘要 采用 120 t BOF 冶炼→LF 精炼→RH 真空处理→CCM 连铸(240 mm×240 mm)→Φ55 mm 和 Φ60 mm 棒材轧制工艺流程生产汽车轮毂用 S55C 中碳轴承钢(0.54%~0.56% C)。转炉高拉碳, 终点 [C] ≥ 0.10%, 并配备下渣红外检测系统; LF 精炼渣碱度控制在 4.0~6.5; RH 精炼在 ≤66.7 Pa 的高真空下循环脱气, 脱气后软吹时间 ≥40 min; 连铸全程保护浇铸, 采用结晶器电磁搅拌(M-EMS)和末端电磁搅拌(F-EMS)以及轻压下技术, 轧钢终轧温度 880~950 °C 的控制轧制等。检验结果表明, 成品材中氧含量 ≤0.001 0%, 钛含量 ≤0.001 5%。钢材内部质量满足超声 A 级, 并且经水浸超声探伤无宏观缺陷及大型夹杂物。纵向疲劳试验结果表明材料疲劳寿命超过 10⁷ 次。

关键词 轮毂用 S55C 轴承钢 洁净度 疲劳寿命

Development and Production Practice of S55C Medium Carbon Bearing Steel for Automobile Wheel Hub

Li Yongchao, Yang Yudan, Lu Cailing and Wu Haoming
(Henan Jiyuan Iron & Steel (Group) Co Ltd, Jiyuan 459000)

Abstract The following process is used to produce wheel medium carbon bearing steel S55C: 120 t BOF smelting→LF refining→RH vacuum treatment→240 mm×240 mm continuous casting billet→Φ55 mm and Φ60 mm bar rolling. Catch carbon practice is used in BOF smelting to control end [C] ≥ 0.10%, and the slagging-off detection system is equipped. The basicity of slag is controlled within 4.0~6.5 during LF refining. The cyclic degassing in RH is carried out under the condition of high vacuum degree ≤66.7 Pa, and the soft blowing time after degassing is not less than 40 min. Protective casting is carried out in the whole casting process, and M-EMS and F-EMS as well as light reduction technology is applied, the control rolling and control cooling technology are adopted in the rolling process to control finishing rolling at 880~950 °C. The measuring results show that the oxygen content in product is ≤0.001 0%, and the titanium content is ≤0.001 5%. The internal quality of the bars meets the ultrasonic grade A; and there are no macro defects and large inclusions; and the longitudinal material fatigue life exceeds 10⁷ times.

Material Index S55C Bearing Steel for Wheel Hub, Cleanliness, Fatigue Life

汽车轮毂轴承钢是应用于汽车轮轴处, 用来承重和为轮毂的转动提供精确引导的核心零部件, 主要承载汽车悬挂系统传递的径向载荷, 汽车转向产生的轴向载荷, 并传递变速箱和驱动轴传来的扭矩, 是汽车重要的安全部件^[1-2]。因此, 对轮毂轴承用钢的质量有着严格要求。济源钢铁公司(济钢)采用 BOF 转炉冶炼-LF 精炼-RH 真空脱气-连铸-轧制的生产工艺流程, 开发了高品质汽车轮毂用 S55C 轴承钢, 满足了高端产品用户需求。

1 产品设计与开发

1.1 化学成分

作为轮毂轴承用钢, S55C 钢对成分要求严格。为了保证产品性能的稳定性, 减少成分波动, 在满足企业标准的基础上, 在生产过程中对 S55C 钢进行窄成分控制。S55C 钢的企业标准及内控成分如表 1 所示。

1.2 工艺流程

济钢轮毂 S55C 轴承钢的生产依靠其配置合理的冶炼工序和轧制设备, 进行钢液的洁净冶炼和钢材的精确轧制。生产工艺流程为: 120 t BOF 转炉冶炼→LF 精炼→RH 真空处理→CCM 连铸(240 mm×240 mm)→钢坯入坑缓冷→棒材轧制

表 1 S55C 钢的化学成分/%
Table 1 Chemical composition of S55C steel / %

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	O	Al
企标	0.53~0.57	0.15~0.35	0.80~0.90	≤0.020	≤0.015	0.12~0.20	≤0.003 0	≤0.001 20	0.008~0.040
内控	0.54~0.56	0.23~0.27	0.83~0.87	≤0.015	≤0.008	0.16±0.02	≤0.001 5	≤0.001 00	0.010~0.020

($\Phi 55$ mm、 $\Phi 60$ mm)→钢材检验→打包入库。

1.3 工艺控制

转炉总装入量为 120 t。要求铁水 P 含量 $\leq 0.011\%$, 从源头减少 P 含量有助于吹炼过程快速脱 P。铁水经过 KR 预处理控制有害元素 S 的含量。转炉出钢温度为 1 580 ~ 1 680 $^{\circ}\text{C}$, 吹炼终点 C 含量控制在 0.10% ~ 0.40%, 避免钢水过度氧化, 减少氧化物夹杂的产生。转炉出钢采用滑板加挡渣塞进行挡渣, 并辅以红外下渣自动检测系统, 减少下渣回磷, 挡渣效果稳定。在出钢过程中向钢包中加入石灰、硅灰石、渣洗剂或钙渣球专用合成渣进行渣洗, 采用铝粒进行预脱氧, 提前造渣, 减轻 LF 精炼负担, 使夹杂物有充分时间上浮。

LF 精炼过程采用碳粉加碳化硅作为脱氧剂进行扩散脱氧, 视情况加入石灰、渣洗剂或钙渣球专用合成渣、萤石进行造渣, 终渣碱度控制在 4.0 ~ 6.5, 精炼渣成分如表 2 所示。为保证夹杂物去除效率, LF 过程白渣保持时间 ≥ 20 min, 进一步提高钢水的洁净度。为促进夹杂物上浮, 保证两个底吹透气砖透气性良好。LF 终点钢水成分达内控要求, 随后的真空脱气过程中禁止进行成分调整。

表 2 S55C 钢的精炼渣成分和碱度

Table 2 Refining slag ingredient and basicity of S55C steel

精炼渣成分/%				二元碱度
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	
48 ~ 54	6 ~ 10	30 ~ 35	4 ~ 6	4 ~ 6.5

Al 在钢水中是良好的脱氧剂, 但钢水中 Al 元素含量过高, 形成的 Al₂O₃ 夹杂不仅影响材料性能, 在浇铸时附着于水口内壁, 使水口结瘤, 影响浇铸过程^[34]。因此, LF 精炼终点钢水中酸溶铝含量控制在 0.020% ~ 0.030%。

LF 精炼结束后进行 RH 真空循环脱气和去夹杂。RH 过程中不再进行成分调整, 使钢水有充分时间进行成分均匀化。RH 脱气后钢水中的 [H] $\leq 0.0001\%$ 。RH 破空之后软吹氩气对钢液进行弱搅拌, 保证夹杂物快速上浮的同时均匀钢水温度。软吹时氩气流量不宜过大, 不得使钢水暴露, 避免钢水二次氧化。

连铸开始前对中间包进行吹氩, 置换出中间包内的空气, 钢包长水口采用氩封保护浇注, 中间包添加高碱度中间包覆盖剂及炭化稻壳, 杜绝钢水与空气的接触产生二次氧化。浇注时采用低过热度浇注, 以改善铸坯的中心偏析。钢包采用下渣检测, 余

钢渣量控制在 4 ~ 5 t; 中间包液面不得低于 400 mm, 降低卷渣风险; 结晶器采用液面自动监测系统, 液面波动控制在 ± 3 mm 以内, 中间包采用整体浸入式水口, 并保持恒拉速, 避免结晶器卷渣。铸坯凝固过程中, 采用结晶器与凝固末端电磁搅拌, 配合轻压下技术进一步降低偏析, 改善组织。

轧钢方面, 采用高温扩散加热, 均热段温度为 1 160 ~ 1 200 $^{\circ}\text{C}$, 改善铸坯中心偏析。加热过程严格控制加热时间在 200 ~ 300 min, 避免因加热时间过长造成表面脱碳层厚度增加, 影响后续轧制以及成品材质量。终轧采用 KOCKS 三辊减定径机组实现高尺寸精度轧制及控温轧制, 终轧温度为 880 ~ 950 $^{\circ}\text{C}$, 轧制后成品材在步进式冷床空冷后剪切改尺。由于客户对产品表面及内部质量要求严格, 出厂前对钢材进行了 100% 的超声和漏磁探伤, 产品内部质量满足 GB/T 4162-2008 中 A 级要求, 保证出厂产品零缺陷。

2 开发结果

2.1 成分控制

从开发结果看, S55C 钢的元素指标均满足客户的技术标准。通过制定严格的工艺内控, 规范冶炼过程的操作要点, 将成分波动控制较窄的范围内。如 C 元素的波动控制在 $\pm 0.01\%$, Si、Mn 元素的波动控制在 $\pm 0.02\%$, 保证了产品成分的稳定性。

2.2 洁净度控制

轴承材料的洁净度是影响轴承疲劳寿命的关键因素。轴承服役过程中, 非金属夹杂物周围容易出现应力集中, 进而成为疲劳断裂的裂纹源, 造成轴承断裂失效, 因此轴承用钢对非金属夹杂物有严格要求^[5]。生产过程中通过控制铁水 P 含量、转炉高拉碳以及保护浇注等技术, 将钢中氧含量控制在 0.001 0% 以下, 减少氧化物夹杂产生。Ti 是形成 D_s 类夹杂物的主要有害元素, 有研究表明, 钢中 [Ti] 从 0.004% 降低到 0.001%, 可使轴承钢寿命提高约 2 倍, 当 [Ti] $\leq 0.0015\%$ 时能显著降低轴承运转过程中的噪声^[6-7]。为避免 D_s 类夹杂物产生, 炼钢过程中严禁使用含 Ti 钢包, 以及合金化过程选用低 Ti 铁合金等手段将钢水 Ti 元素控制在 0.001 5% 以下。按照国标 GB/T 10561-2005 对成品材的非金属夹杂物进行评级, 结果如表 3 所示, 其中 D_s 类夹杂物评级为 0, 微观非金属夹杂物要求完全满足客户技术要求。

此外, 按照标准 SEP 1927-2010 对成品材中的宏观夹杂物进行水浸超声波探伤检测, 结果表明, 经

水浸超声检测未发现宏观缺陷。测试总体积 $\geq 5 \text{ dm}^3$, 钢材洁净度值(缺陷总长度/测试体积)为 0, 满足客户对钢材纯净度的要求。

2.3 材料均匀性

高端轮毂轴承钢对组织均匀性、成分偏析十分敏感, 特别是中心碳偏析, 它会导致轴承组织不均匀, 严重影响产品性能^[8]。通过优化连铸工艺参数, 拉速为 0.80 m/min, 比水量为 0.22 ~ 0.24 L/kg, 配合结晶器电磁搅拌(440 A/3 Hz)、

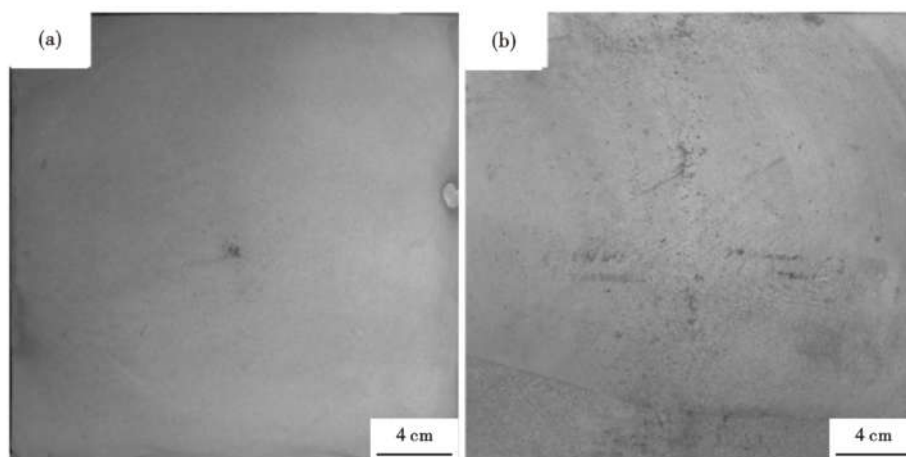


图 1 S55C 铸坯低倍组织形貌(240 mm × 240 mm): (a)横剖; (b)纵剖
Fig.1 Morphology of macrostructure of S55C steel cast bloom (240 mm × 240 mm): (a) transverse section; (b) longitudinal section

表 3 S55C 钢轧材非金属夹杂物级别/级
Table 3 Rating of non-metallic inclusion in S55C steel rolled products /rating

成品材规格/mm	A系		B系		C系		D系		Ds
	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗	
Φ55	0.5	0	0.5	0	0	0	1.0	0.5	0
Φ60	1.0	0	0	0	0	0	1.0	0	0

末端电磁搅拌(400 A/10 Hz)以及轻压下技术(轻压下量为 1# 辊 3 mm, 2# 辊 7 mm, 3# ~ 7# 辊各为 12 mm), 极大改善了铸坯的凝固组织和中心偏析, 铸坯酸洗后的低倍组织如图 1 所示。图 1(a)为铸坯横剖低倍照片, 图 1(b)为铸坯纵剖低倍照片。从图 1 中可以看出, 铸坯组织较为均匀, 无明显的锭形

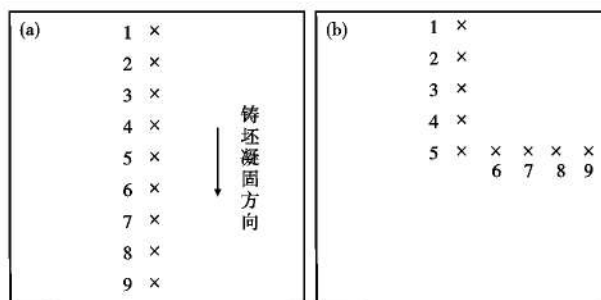


图 2 240 mm × 240 mm 铸坯碳偏析取样位置示意图: (a)纵剖面; (b)横剖面
Fig.2 Schematic diagram of sampling location in 240 mm × 240 mm bloom for carbon segregation measuring: (a) longitudinal section; (b) cross section

表 4 S55C 钢 240 mm × 240 mm 铸坯碳偏析测试结果
Table 4 Carbon segregation measuring result of S55C steel 240 mm × 240 mm bloom

铸坯剖面	编号	铸坯取样位置(图 2)	铸坯取样位置(图 2)								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
纵剖	01	C/%	0.547	0.512	0.563	0.496	0.500	0.619	0.579	0.538	0.507
		偏析率	1.00	0.94	1.03	0.91	1.04	1.13	1.06	0.98	0.93
	02	C/%	0.568	0.597	0.580	0.583	0.588	0.590	0.583	0.534	0.591
		偏析率	1.04	1.09	1.06	1.07	1.07	1.08	1.07	0.98	1.08
	03	C/%	0.586	0.577	0.575	0.591	0.569	0.508	0.520	0.555	0.615
		偏析率	1.07	1.05	1.05	1.08	1.04	0.93	0.95	1.01	1.12
	04	C 含量	0.510	0.565	0.547	0.494	0.504	0.552	0.545	0.528	0.565
		偏析率	0.93	1.03	1.00	0.90	0.92	1.01	1.00	0.97	1.03
横剖	01	C 含量	0.556	0.584	0.543	0.555	0.583	0.567	0.553	0.569	0.546
		偏析率	1.02	1.07	0.99	1.01	1.07	1.04	1.01	1.04	1.00
	02	C 含量	0.511	0.557	0.579	0.552	0.598	0.549	0.578	0.556	0.535
		偏析率	0.93	1.02	1.06	1.01	1.09	1.00	1.06	1.02	0.98
	03	C 含量	0.583	0.593	0.556	0.568	0.590	0.555	0.549	0.585	0.564
		偏析率	1.07	1.08	1.02	1.04	1.08	1.01	1.00	1.07	1.03
	04	C 含量	0.563	0.542	0.577	0.554	0.584	0.562	0.569	0.573	0.547
		偏析率	1.03	0.99	1.05	1.01	1.07	1.03	1.04	1.05	1.00

表 5 S55C 钢热轧材力学性能
Table 5 Mechanical properties of S55C steel hot-rolled products

项目	抗拉强度 (R_m)/MPa	屈服强度 (R_{e1})/MPa	断后伸长率 (A)/%	断面收缩率 (Z)/%	冲击吸收功 (K_{U2})/J	热轧 HBW 硬度值
标准	≥ 780	≥ 590	≥ 14	≥ 35	59	229 ~ 285
实测值	870	720	20	56	66	240

偏析和中心偏析,仅在横截面中心有极小缩孔存在。将铸坯沿凝固中心剖开[如图 1(b)所示],并未发现明显缩孔,仅存在少量疏松,且此种疏松可通过后续轧制过程焊合,不会对钢材质量产生影响。

铸坯凝固时,碳偏析最严重区域一般存在于凝固中心,因此沿铸坯纵剖面中心部位和铸坯横断面中心至边缘分别取样检测碳含量,取样点间距离 20 mm,取样位置如图 2 所示。碳偏析率为各点碳含量除以对应炉次熔炼成分的碳含量(该炉次为熔炼成分碳含量 0.547%),结果如表 4 所示。从表 4 中分析可知,碳偏析控制水平良好,偏析率基本在 0.92 ~ 1.08,与钢坯低倍组织结果吻合。

2.4 材料力学性能

对热轧材进行力学性能检测,结果如表 5 所示,从表 5 中可以看出,各项力学性能均符合技术要求,表明济钢生产的 S55C 轮毂轴承钢产品可满足用户需求。

2.5 钢材疲劳性能

采用 QBJ-100 高频疲劳试验机对生产的 S55C 钢进行疲劳性能检测。为模拟轮毂轴承的服役条件,将 S55C 钢试样进行感应淬火后在 180 °C 进行低温回火。试样直径 $\Phi 10$ mm,标距 80 mm,试验采用室温轴向拉-压模式,应力幅为 -1,频率为 110 Hz,试验载荷为 250 MPa。

经试验,样品总循环次数达到 10^7 以上,试样未发生断裂且试样表面未出现裂纹,表明新开发材料

S55C 钢可满足轮毂轴承疲劳性能需求。

3 结束语

通过合理的成分设计和工艺控制,成功开发汽车轮毂轴承用 S55C 中碳轴承钢。钢中 O、

Ti 等有害元素控制达到国内先进水平,材料组织均匀,力学性能良好,其抗拉强度 ≥ 800 MPa,屈服强度 ≥ 600 MPa,断后伸长率 $\geq 15\%$,断面收缩率 $\geq 45\%$,冲击吸收功 ≥ 60 J,完全满足用户使用要求。实践表明,S55C 钢生产工艺流程稳定可行。

参考文献

- [1] 张灵通. 汽车轮毂轴承钢新产品的研制与开发[Z]. 山东省, 西王金属科技有限公司, 2019-12-15.
- [2] 刘汝卫, 张 钢, 殷庆振, 等. 汽车轮毂轴承的发展现状及趋势[J]. 现代机械, 2009, 36(6): 78-80.
- [3] 丰 年. 120 t 转炉生产 42CrMoA 合结钢水口结瘤分析及改善措施[J]. 特殊钢, 2018, 39(5): 36-39.
- [4] Zhang Lifeng and Brian G. Thomas. State of the art in the Control of Inclusions during Steel Ingot Casting[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2006, 37(5): 733-761.
- [5] 曹文全, 俞 峰, 王存宇, 等. 高端装备用轴承钢冶金质量性能现状及未来发展方向[J]. 特殊钢, 2021, 42(1): 1-10.
- [6] 傅 杰, 王 平, 徐君浩, 等. 轴承钢中微量元素氧-氮-钛-钙的作用与控制[J]. 特殊钢, 1998, 19(6): 31-34.
- [7] 虞明全, 王治政, 徐明华, 等. 超纯轴承钢的精炼工艺[J]. 钢铁, 2006, 41(9): 26-29.
- [8] 陈 敏. 碳素轮毂轴承用钢 G55 的开发[J]. 现代冶金, 2016, 44(5): 17-20.

李永超(1989-),男,硕士(2015年东北大学),工程师,2013年重庆科技学院(本科)毕业,轴承钢、弹簧钢产品研发及开发。E-mail:lychao1989@163.com

收稿日期:2021-07-12