

圆坯连铸 GCr15SiMn 的成分偏析和接触疲劳寿命研究

俞峰^{1,2}, 陈兴品¹, 杜松林³, 王存宇², 汪开忠³, 曹文全²

(1 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044; 2 钢铁研究总院有限公司, 北京 100081;

3 马鞍山钢铁股份有限公司, 马鞍山 243003)

摘要:利用金属原位分析技术和钻孔化学分析方法对高淬透性轴承钢 GCr15SiMn 的 $\Phi 450$ mm 连铸圆坯和 $\Phi 130$ mm 圆钢的 C、Si、Mn、Cr 元素横截面的分布情况进行分析。采用推力片式接触疲劳试验机进行了材料的接触疲劳寿命测试。结果表明:GCr15SiMn 连铸圆坯 C 元素的偏析倾向较大, 易产生中心正偏析, 而 Cr、Si、Mn 元素的偏析倾向较小。通过采取稳定低过热度浇铸、三段强电磁搅拌等措施, 铸坯的中心碳偏析得以改善。采用 $(1\ 240 \pm 20)$ °C $\times 5$ h 高温扩散、初轧首道次变形量 ≥ 90 mm 大变形轧制的 $\Phi 130$ mm 圆钢的碳偏析可以得到进一步的改善, 试验钢在 5.3 GPa 高应力负载下的接触疲劳额定寿命 L_{10} 达到 3.58×10^6 次, 接近电渣重熔钢的水平。

关键词:圆坯连铸; 高淬透性轴承钢; GCr15SiMn; 成分偏析; 接触疲劳寿命

Composition Segregation and Contact Fatigue Life of GCr15SiMn Fabricated by Round Billet Continuous Casting

Yu Feng^{1,2}, Chen Xingpin¹, Du Songlin³, Wang Cunyu², Wang Kaizhong³, Cao Wenquan²

(1 College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044; 2 Central Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081; 3 Ma'anshan Iron and Steel Co., Ltd., Ma'anshan 243003)

Abstract: The distribution of C, Si, Mn and Cr elements in cross sections of $\Phi 450$ mm continuous casting round billet and $\Phi 130$ mm round steel of high hardenability bearing steel GCr15SiMn was analyzed by original position statistic distribution analysis (OPA) and borehole chemical analysis. The contact fatigue life of the material was tested by the thrust plate contact fatigue testing machine. The results show that the segregation tendency of C element in bearing steel GCr15SiMn continuous casting round billet is large, and it is easy to produce center positive segregation, while the segregation tendency of Cr, Si and Mn element is small. The central carbon segregation in casting bloom was improved by adopting stable low superheat casting and three-stage strong electromagnetic stirring. After $(1\ 240 \pm 20)$ °C $\times 5$ h high temperature diffusion and large deformation rolling with primary pass deformation ≥ 90 mm, the carbon segregation of $\Phi 130$ mm round steel can be further improved. The rated contact fatigue life L_{10} of the test steel under 5.3 GPa high stress load reaches 3.58×10^6 times, which is close to the level of ESR steel.

Key Words: Round Billet Continuous Casting; High Hardenability Bearing Steel; GCr15SiMn; Composition Segregation; Contact Fatigue Life

随着高端装备的发展, 轴承作为关键基础件, 对其寿命和可靠性要求不断提高。对于风力发电、高铁动车组及新能源汽车等新兴产业领域用主轴轴承、增速器轴承、轴箱轴承、高速电机轴承等, 轴承材料的冶金质量和疲劳寿命的优劣是决定其使用性能和可靠性的关键因素之一^[1]。国内上述关键轴承的研发和生产多采用电渣重熔钢, 电渣重熔钢的纯净度、组织均匀性、接触疲劳寿命和可靠性较高, 但电渣钢的能耗大, 成本高。而采用 EAF 电弧炉

(BOF 转炉) + LF 精炼 + RH(VD) 真空脱气 + CC 连铸(真空脱气)工艺生产的高碳铬轴承钢 GCr15 的冶金质量和接触疲劳寿命不断提高, 达到 $[O] \leq 5 \times 10^{-6}$ 、 $[Ti] \leq 10 \times 10^{-6}$ 、单颗粒球形夹杂物(DS) ≤ 0.5 级, 4.5 GPa 下的接触疲劳寿命 $L_{10} \geq 1 \times 10^7$ 次^[2]。但是真空脱气连铸钢的组织 and 碳化物不均匀性较电渣钢仍存在差距, 这与连铸坯的质量, 特别是成分偏析有直接的关系。目前, 高碳铬轴承钢多使用大方坯连铸工艺生产, 通过过热度、拉速、二冷、

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB0311001); 自然科学基金(NSFC51871062)

作者简介: 俞峰(1970-), 男, 重庆大学, 博士生; E-mail: yufeng@necast.com; 收稿日期: 2022-09-16

通讯作者: 曹文全(1969-), 男, 正高级工程师; E-mail: caowenquan@necast.com

电磁搅拌、轻压下等工艺控制,以获得高组织均匀性,减少中心偏析与疏松等问题^[3-8]。而圆坯连铸生产工艺具备优良的几何对称性,从而广泛用于中低碳钢材的生产,特别是铁路车轮、车轴、齿轮,风电偏航、变桨转盘轴承等用钢的生产制造^[9-13]。圆坯连铸生产高碳铬轴承钢也有相关报道^[14-16],但在高端轴承领域的应用较少,主要原因在于连铸圆坯的中心碳偏析问题。但圆坯除中心部位以外,具有良好的等向性,对于环状零件,特别是大型轴承的内外圈采用圆坯或大尺寸圆棒热碾扩成型制造是十分有利的。为此本文通过对采用真空脱气工艺生产的圆坯连铸高淬透性轴承钢 GCr15SiMn 的成分偏析和接触疲劳寿命进行研究,探讨其在风电、高铁和新能源汽车等关键轴承中应用的可行性。

1 试验材料和方法

试验材料的生产工艺流程为:110 t EAF→LF→RH→连铸Φ450 mm圆坯→轧制Φ130 mm和Φ60 mm圆棒。圆坯连铸机采用五机五流浇铸、三段电磁搅拌、二冷段弱冷,并通过过热度、拉速、电磁搅拌等工艺参数控制以获得低偏析和高接触疲劳寿命的试验材料。

Φ450 mm 连铸圆坯成分偏析试样是在沿圆坯径向截取 245 mm × 50 mm × 15 mm 的条形试样,如图 1 所示。通过铣床加工出无明显纹路的平整面,利用 OPA-100 型金属原位分析系统进行成分偏析分析,受设备及试验条件的限制,扫描区域为试样中

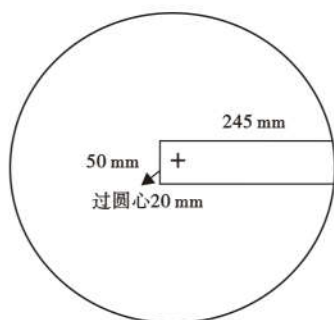


图 1 取样示意图

Fig. 1 A schematic diagram of sampling

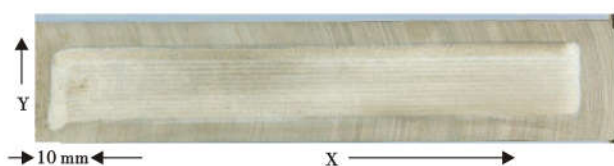


图 2 分析部位

Fig. 2 Location of analysis

间 220 mm × 18 mm 面积,如图 2 所示。由于 X 方向扫描起点距试样左端面 10 mm,而取样时试样左端过铸坯圆心 20 mm,因此铸坯中心在 X = 10 mm 处。

Φ450 mm 连铸圆坯和 Φ130 mm 圆棒的碳偏析试样采用 Φ5 mm 钻头在特定位置上钻取铁屑,测定各位置点的碳含量。取样位置和数量如图 3 所示:碳含量偏析指数定义为 C_m/C_0 , C_m 为试验材料特定部位碳含量, C_0 为钢液成分,其中 C_m 为试验材料中心点碳含量时, C_m/C_0 又称为碳含量中心偏析指数(中心碳偏析指数)。碳含量极差定义为 $C_{max}-C_{min}$,其中 C_{max} 为半径方向上试样的最高碳含量值, C_{min} 为半径方向上的最低碳含量值(不包含圆坯心部碳含量值,相应位置的平均值作为其有效值)。

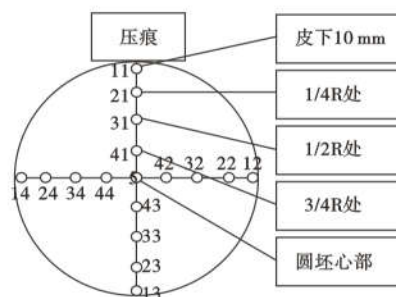


图 3 碳偏析取样示意图

Fig. 3 Schematics of carbon segregation sampling

试验材料的接触疲劳寿命试验机为 TRF-1000/5-H,模拟滚动轴承工作原理(见图 4),在滚动接触测试的试样表面加载恒定的载荷,通过主轴的旋转,使试样接触面受到循环接触应力的作用,测定试样的接触疲劳寿命^[17]。参照《JB/T10510-2005 滚动轴承材料接触疲劳试验方法》进行试验,试验采用完全失效方式。试验数据采用两参数威布尔分布函数进行计算,其参数估算采用最佳线性不变估计(BLIE)方法。试验条件为:试验载荷4.0kN(最大

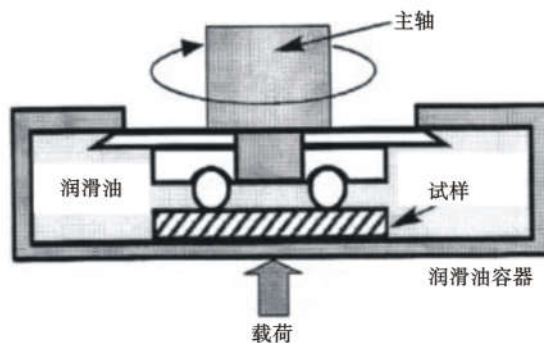


图 4 平垫圈滚动接触疲劳试验原理图

Fig. 4 Schematics of rolling contact fatigue test for flat washers

接触应力 5.3GPa); 转速 1 500 r/min; 润滑介质 4010 润滑油; 试验钢球 GCr15。

2 试验结果及分析

2.1 连铸圆坯成分偏析特点

利用金属原位分析系统分析的 $\Phi 450$ mm 连铸圆坯试样横剖面成分三维分布见图 5。x,y 代表了

图 2 所示的扫描分析的位置,铸坯中心在 $X = 10$ mm 处。由图 5 可见,碳元素在靠近中心的位置出现尖锐的“山峰”,这一现象表明碳元素的中心偏析程度较大。Si、Mn、Cr 元素未呈现明显的“山峰”分布,说明上述元素的偏析程度较轻。

试样横剖面成分二维等高图见图 6。由图 6 可

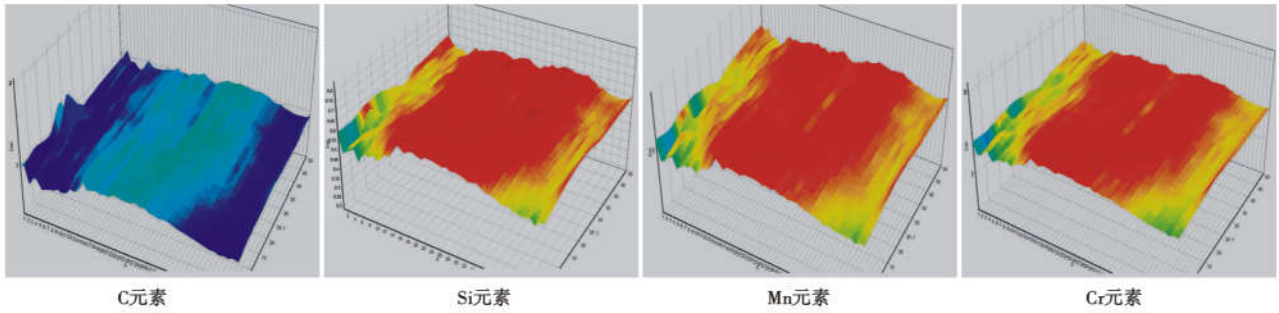


图 5 圆坯试样成分三维分布图

Fig. 5 Three-dimensional distribution of round billet sample composition

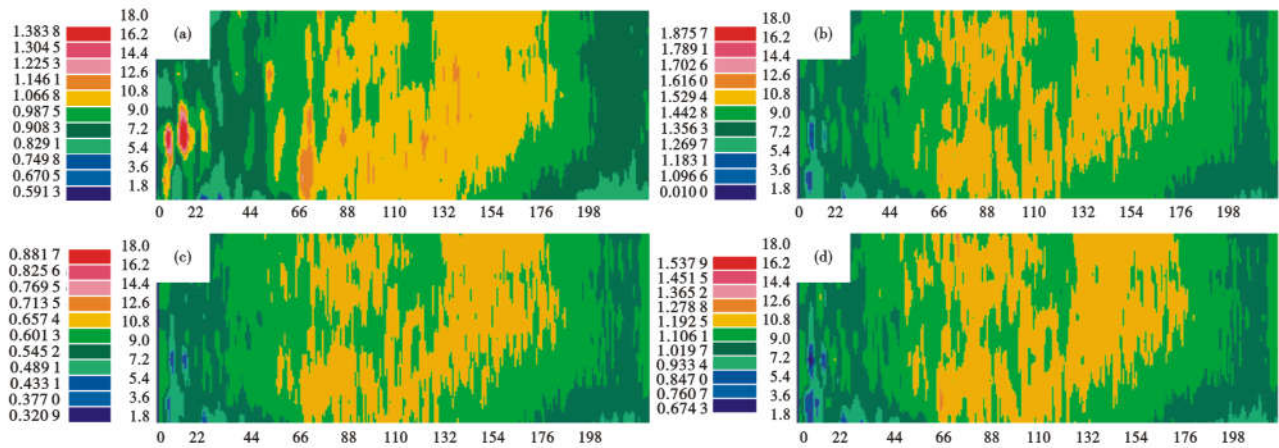


图 6 圆坯试样成分分布二维等高图: (a) C; (b) Cr; (c) Si; (d) Mn

Fig. 6 Two-dimensional contour map of the round billet sample composition distribution: (a) C; (b) Cr; (c) Si; (d) Mn

见,C、Cr、Si、Mn 元素在 X 方向 66 ~ 176 mm(即试样的 $1/4R \sim 3/4R$) 范围内存在不同程度的正偏析,而元素在铸坯边部和心部存在一定程度的负偏析。C 在 $X = 11 \sim 12$ mm 处(即铸坯的几何中心)存在较严重的正偏析。

整理图 6 中的信息,可得到表 1 的结果,其中,最大偏析度为某特定位置元素最高含量与总体位置平均含量的比值。分析可知,C 元素偏析倾向较大, Cr、Si、Mn 元素偏析倾向小。另外 C 的最大偏析位置在铸坯的中心附近,而 Cr、Si、Mn 的最大偏析发生在铸坯的 $3/4R$ 处。

表 2 是各元素在试样中含量分布的统计结果。其中,某元素在 95% 置信度下,以含量中位值为中

表 1 连铸圆坯试样中各元素的最大偏析度

Table 1 Maximum degree of segregation of the elements in the CC round billet sample

元素	平均含量 $C_0/\%$	最大偏析位 置(x,y)/mm	最大偏析 度(C/C_0)
C	0.988	(12.47,6.00)	1.618
Cr	1.443	(65.27,1.98)	1.075
Si	0.601	(65.27,1.98)	1.088
Mn	1.106	(65.27,1.98)	1.117

心的含量置信区间为 $[C_1, C_2]$ 的统计偏析度 S 定义为: $S = C_1 - C_2/2C_0$ 。其中, C_0 为含量中位值, C_1 和 C_2 分别为含量置信区间的上限值和下限值。无偏析时的统计偏析度值为 0; 统计偏析度值越大, 元素分布偏析越严重^[18]。由表 2 可知, 连铸圆坯各元素

表 2 各元素在试样中的统计结果
Table 2 Statistical results of each element in the samples

项目	C	Cr	Si	Mn
含量置信区间/%	[0.96, 1.00]	[1.40, 1.45]	[0.60, 0.65]	[1.10, 1.15]
统计偏析度	0.035 9	0.027 0	0.041 4	0.045 7

的统计偏析度较小,优于高碳铬轴承钢连铸方坯,与电渣重熔钢锭相近^[15]。

目前,高碳钢连铸坯中元素宏观偏析的形成机制多种观点不一,主要有凝固桥理论、坯壳鼓肚理论、中心等轴晶滑移流动理论等多种解释^[19]。分析总结这些观点可知,其根本原因在于凝固过程中,不同相中各组元化学位不同,促使固液界面两侧发生溶质再分配,而导致固液界面位置富集溶质元素产生流动,这是发生宏观偏析的必要条件^[20]。一般以某合金元素在固相与液相中的浓度之比即分配系数 K 来衡量该元素偏析倾向的尺度, K 越小,偏析倾向越显著。可知 C 元素的分配系数 K 值较小,偏析倾向较大,而 Cr、Si、Mn 元素的 K 值较大,偏析倾向较小,实验结果与此规律相符。

关于连铸圆坯试样边部和心部的元素负偏析可能是由于以下原因造成的:由于连铸坯的凝固是一个选分结晶的过程,一方面,边部由于激冷作用先凝固,其合金元素含量较低,于是边部出现负偏析;另一方面,由于电磁搅拌旋流的作用,部分先结晶的树枝晶将被折断,一部分折断的枝晶被过热的钢水融化,剩余部分枝晶将被搅拌旋流逐渐旋至中心附近,形成晶核,导致该部分钢水先凝固,形成中心负偏析。而试样中间部分的正偏析可能是为了平衡两侧负偏析而产生的。

C 的中心正偏析现象可由“小钢锭凝固模型”来解释。连铸时由于二冷区喷水冷却不均匀,局部区域柱状晶生长突出,造成与相对面的树枝晶搭桥,

阻止了液相穴上部的钢液向下部中空区补缩;当下部钢液继续凝固时,残余钢液凝固收缩,得不到上部钢液的补充而形成缩孔或疏松;同时由于凝固收缩的作用,中心两侧树枝晶间富集溶质的残余液体被吸到枝晶桥下,形成严重的中心偏析^[21]。

2.2 连铸圆坯的碳偏析

该钢种每次连浇三炉,进行了三轮试验,通过稳定低过热度以及采用三段(结晶器、二冷、末端)电磁搅拌,加强电磁搅拌强度等工艺试验,其试验关键工艺区别见表 3,对第一轮头尾炉中间段,第二、三轮每炉中间段在同一流中取 $\Phi 450$ mm 连铸圆坯试样,采用钻孔分析方法测得的中心碳偏析指数和碳含量极差的统计结果见表 3。从表 3 可见,通过工艺优化,第三轮连铸圆坯的中心碳偏析指数达到 1.03 ~ 1.09,研究结果表明:低过热度且连浇温度波动低有利于连铸圆坯的碳偏析改善;电磁搅拌较弱时,中心碳偏析指数较高,且不稳定;而电磁搅拌加强时,中心碳偏析指数降低,碳含量极差有所增加。

第三轮试验钢的圆坯试样径向各等效位置碳含量的四点平均值作为该位置有效碳含量(中心位置有效碳含量就是该点的测量值),铸坯上不同位置的碳含量分布如图 7 所示。第三轮试验钢的熔炼成分,碳含量为 0.98%,对比可知,C 在铸坯的中心和半径 1/2 半径处存在一定的正偏析,而在边部、半径 1/4 及 3/4 处有轻微负偏析。边部取样点位于铸坯激冷层,1/2 半径取样点位于柱状晶与等轴晶交界处,而心部正偏析则是“小钢锭凝固”模式的结果。

表 3 连铸圆坯工艺参数及碳偏析测定结果
Table 3 Processing parameters and carbon segregation test results of continuous casting round billet

试验轮次	过热度/波动范围/°C	电磁搅拌	试样编号	熔炼 C 含量/%	中心碳偏析指数	碳含量极差/%
第一轮	23 ~ 47/24	结晶器:低电流、低频 二冷和末端:较高电流、高频	1-1	1.00	1.67	0.03
			1-2	0.98	1.33	0.02
			2-1	0.97	1.28	0.04
第二轮	28 ~ 46/18	结晶器:高电流、低频 二冷和末端:较第一轮提高 电流、降低频率	2-2	0.97	1.07	0.04
			2-3	0.97	1.29	0.03
			2-4	0.97	1.50	0.02
			2-5	0.97	1.32	0.06
			2-6	0.97	1.14	0.02
第三轮	24 ~ 41/17	结晶器:高电流、低频 二冷和末端:较第二轮提高 电流、降低频率	3-1	0.97	1.03	0.06
			3-2	0.98	1.09	0.04
			3-3	0.97	1.07	0.04

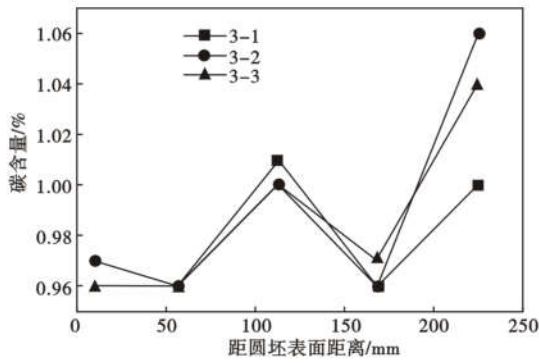


图 7 铸坯截面的碳含量分布

Fig. 7 Distribution of the carbon content in the cross-section of the cast billet

一般认为^[22], 1/4 半径处也正是“白亮带”出现的位置,“白亮带”是指铸坯低倍腐蚀后出现的不易腐蚀的、呈现白色带状分布的区域。白亮带的成因是由于强电磁搅拌产生的流股沿着凝固前沿流动,把两相区树枝晶间富聚溶质母液冲刷出去而造成的,是成分的负偏析带。合理控制电磁搅拌强度、三段有效匹配,可得到中心低偏析及小极差铸坯。试验钢由于此处的负偏析程度较小,没有观察到“白亮带”。

任取一直径方向上 9 个点的碳含量,将其转换成碳偏析指数,获得铸坯的碳偏析指数分布,如图 8

所示。可见,铸坯断面上碳偏指数呈现良好的对称性,计算得不同位置碳偏析指数分布的标准偏差为 1.64%。为客观评价本试验钢圆坯连铸坯碳偏析控制水平,将其与国内某厂 180 mm × 180 mm GCr15 连铸方坯进行对比^[8]。图 9(a)、(b)分别是方坯横截面径向和对角线方向的碳偏析指数分布,其碳偏析指数分布的标准偏差分别为 6.56% 和 4.04%。可见,本产品的碳含量分布呈周期性上下波动,且波动幅度相对较小,这说明连铸坯碳含量分布整体相对均匀,中心碳偏析得到明显改善。

2.3 轧制圆钢的碳偏析

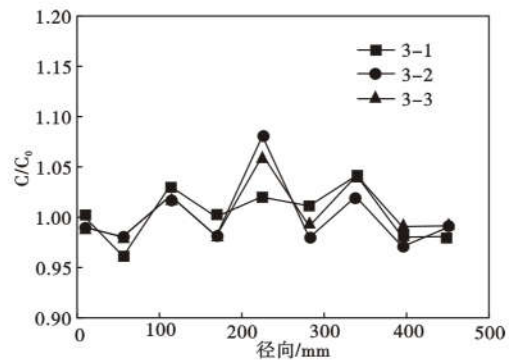


图 8 铸坯碳偏析指数分布

Fig. 8 Distribution of carbon segregation index of the cast billet

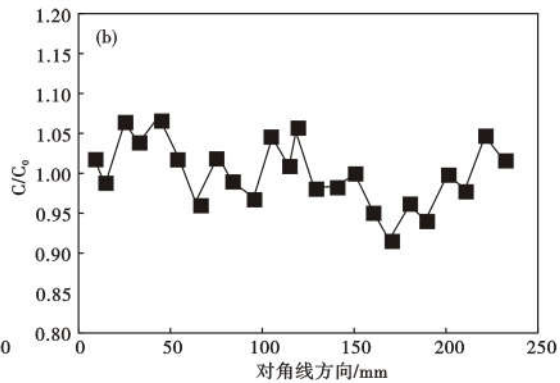
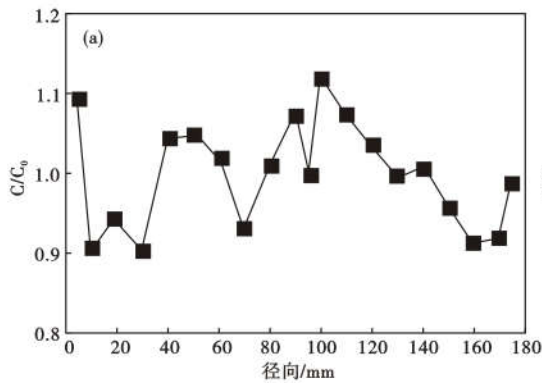


图 9 180 mm 方 GCr15 连铸坯碳偏析指数分布: (a) 径向; (b) 对角线方向^[2]

Fig. 9 Distribution of carbon segregation index of 180 mm square billet of GCr15 bearing steel (a) radial direction; (b) diagonal direction^[2]

将第二轮试验圆坯采用高温扩散(1 240 ± 20) °C 保温 5 h、大压下变形工艺(初轧首道次压下量 ≥ 90 mm) 轧制一火材 Φ130 mm 圆棒,取不同炉任意位置试样钻孔分析得到的中心碳偏析指数和碳含量极差见表 4。由表 4 可见,轧制圆钢的碳含量中心偏析指数为 1.22 ~ 1.00,对比表 3 所示的连铸圆坯的碳含量中心偏析指数 1.07 ~ 1.50 有明显的

表 4 轧制圆棒碳偏析检验结果
Table 4 Carbon segregation test results of rolled round bar

编号	碳含量中心偏析指数	碳含量极差/%
1#	1.22	0.04
2#	1.09	0.04
3#	1.00	0.04

降低,碳含量极差则稳定在 0.04%。试验结果表明

通过高温扩散、大变形比轧制等热加工工艺可以进一步改善高淬透轴承钢的碳偏析。

Φ130 mm 圆棒沿直径方向碳含量偏析指数分布见图 10(每炉轧材试样任取一个直径方向进行分析)。由图 10 可见,碳含量沿直径方向呈波浪形分布,中心点(65 mm 位置)偏差较大(1[#]和 2[#]试样),中心点两侧呈左右对称,偏差较小。3[#]试样最大偏差出现在距离中心点大约 32.5 mm(半径 1/2 处),直径方向碳含量分布接近直线分布,碳偏差较小。

通过合适的电磁搅拌、高温扩散等连铸和轧制工艺控制,改善中心碳偏析以后,圆棒(圆坯)的碳含量分布可以表现出良好的均匀性,这也为圆棒性能的各向同性创造了有利条件。轴承的内外套圈制造,多采用中心冲孔后碾扩的工艺生产,这样圆棒中心碳偏析较严重的中心部位被去掉以后,其他各个位置的碳偏析均较轻,具有良好的对称性和均匀性,有利于轴承内外套圈性能的各向同性,进而提高轴承的疲劳寿命以及可靠性。

2.4 轧制圆钢的接触疲劳寿命

将第三轮试验连铸圆坯轧制成 Φ130 mm 圆棒后再二火轧制成 Φ60 mm 圆棒,在不同炉任意位置取样,与电渣钢生产的同规格材取样制备成接触疲

劳试样,经淬回火热处理后,研磨抛光后制成 Φ52 mm × 5 mm 的环形试样。圆坯连铸钢和对比所用的电渣 GCr15SiMn 试验钢的化学成分见表 5,数据处理后的接触疲劳寿命试验结果见表 6。由表 6 可见:圆坯连铸高淬透性轴承钢 GCr15SiMn 在 5.3GPa 高接触应力下的额定接触疲劳寿命 L₁₀和中值疲劳寿命 L₅₀分别达到 3.58 × 10⁶ 次和 8.38 × 10⁶ 次,与电渣重熔钢 GCr15SiMn 的额定寿命和中值寿命非常接近,分别只相差约为 1% 和 2%。

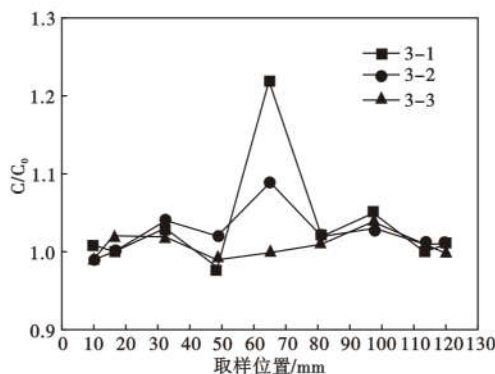


图 10 轧制圆棒碳偏析指数分布
Fig. 10 Distribution of carbon segregation index of the rolled round bar

表 5 两种试验钢的化学成分/%
Table 5 Chemical composition of two test steel/%

试验钢	C	Cr	Si	Mn	S	P	O	Ti
圆坯连铸钢	0.98	1.45	0.61	1.12	0.001	0.006	0.000 6	0.001 9
电渣钢	0.95	1.57	0.58	1.10	0.005	0.014	0.001 6	0.002 0

表 6 接触疲劳试验数据处理结果
Table 6 Data processing results of contact fatigue test

试验钢	额定寿命 L ₁₀ × 10 ⁶	中值寿命 L ₅₀ × 10 ⁶
圆坯连铸钢	3.58	8.38
电渣钢	3.60	8.54

轴承钢中的非金属夹杂物及组织和碳化物对接触疲劳寿命有较大的影响^[23]。为此采用 Aspex 夹杂物分析仪对两种试验钢的接触疲劳试样的夹杂物进行分析研究,扫描面积为 48.6 mm²,夹杂物起扫尺寸 2 μm。两种试样夹杂物的分析结果见表 7。由表 7 可知,圆坯连铸钢试样的洁净度指数较电渣

试验钢明显要低,夹杂物的数量少,最大夹杂物的尺寸也小。表 7 没有考虑到夹杂物类型的影响,研究表明脆性夹杂的危害性要大于塑性夹杂物^[24],为此只统计两种试验钢的脆性夹杂物,其结果见表 8。由表 8 可见,两种试验钢含 Al 和氧化物类夹杂均比较细小,夹杂物最大颗粒尺寸 < 15 μm,数量上仍为圆坯连铸钢少。但对疲劳危害最大的含 Ti 类型夹杂^[17],电渣钢不仅在数量上还是尺寸上均明显优于圆坯连铸试验钢。能谱分析如图 11 所示,圆坯连铸试验钢存在的大颗粒含 Ti 夹杂为 Ti(C,N)夹杂,大

表 7 两种试验钢夹杂物统计结果
Table 7 Statistical results of inclusions in two test steels

试验钢	洁净度指数	夹杂物总量/个	最大夹杂物		主要夹杂物	
			尺寸/μm	类型	类型	数量/个
圆坯连铸钢	1.8	143	18.7	Ti	Al-Mg	47
电渣钢	6.4	366	40.0	MnS	MnS	142

表8 两种试验钢脆性夹杂统计
Table 8 Statistical results of brittle inclusions in two test steels

夹杂物类型	试验钢	总量/个	平均直径/ μm	最大直径/ μm	1~2/ μm	<2~5/ μm	<5~10/ μm	<10~15/ μm	>15~20/ μm
Al-Mg	圆坯连铸钢	47	3.6	9.0	0	40	7	0	
	电渣钢	11	2.9	5.6	0	10	1		
Al/Ca	电渣钢	2	3.4	4.6	0	2	0		
Alumina	电渣钢	67	4.0	11.4	0	52	14	1	
Oxides	圆坯连铸钢	8	4.4	7.2	0	6	2		
	电渣钢	50	3.8	7.9	0	41	9		
Ti	圆坯连铸钢	34	5.1	18.7	0	22	11	0	1
	电渣钢	19	4.5	9.0	0	11	8		
Ti-Al	圆坯连铸钢	3	3.5	4.9	0	3	0		
	电渣钢	5	5.1	6.3	0	2	3		

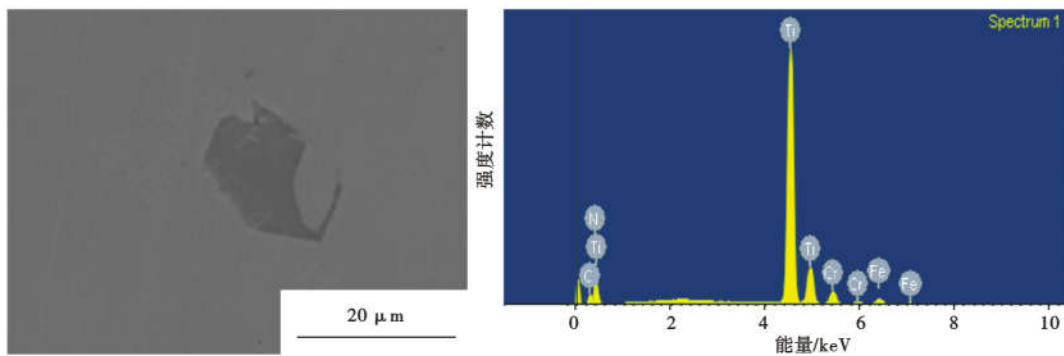


图11 Ti(C,N)夹杂形貌和能谱图

Fig. 11 Morphology and energy spectrum of Ti(C,N) inclusion

颗粒 Ti(C,N) 夹杂的存在可能是导致圆坯连铸钢的接触疲劳寿命低于电渣钢的原因。

疲劳试样试验面的组织和碳化物在放大 500 倍下的形貌图像见图 12, 由图 12 可见, 1# 和 2# 试验钢的组织与碳化物均比较均匀细小, 无明显的网状碳化物存在。钢中碳化物分布不均匀, 可造成基体成分的不均匀, 大颗粒或网状碳化物周围出现贫碳区, 交变应力集中在这些贫碳区, 造成基体开裂, 形成疲劳裂纹源, 降低接触疲劳寿命。连铸圆坯钢试样通过连铸圆坯工艺的优化, 连铸圆坯成分偏析的改善, 热处理及热变形技术的研究改进^[25-26], 从而使圆坯连铸

的高淬透性轴承钢的组织与碳化物不均性达到电渣钢的水平, 使其疲劳寿命接近电渣钢的水平。

3 结论

(1) 高淬透性轴承钢 GCr15SiMn 连铸圆坯试样 C 偏析倾向较大, 其最大偏析比为 1.618, Cr、Si、Mn 由于平衡分配系数接近于 1 而偏析程度较轻。

(2) 通过采取结晶器、二冷、末端三段组合大电流中低频率的强电磁搅拌、钢水稳定低过热度控制等措施, 可有效改善铸坯碳偏析, 碳含量中心偏析指数可控制在 1.10 以下。

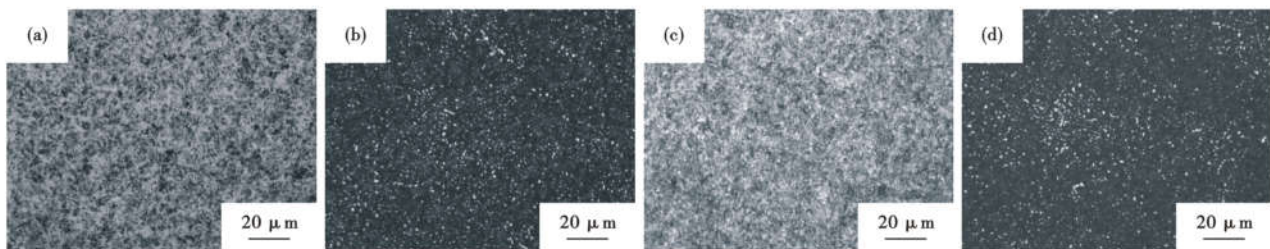


图12 疲劳试样的组织和碳化物形貌: (a) 圆坯连铸钢的组织; (b) 圆坯连铸钢的碳化物; (c) 电渣钢的组织; (d) 电渣钢的碳化物

Fig. 12 Microstructure and carbide morphology of fatigue samples; (a) microstructure of round billet continuous cast steel; (b) carbide of round billet continuous cast steel; (c) microstructure of electroslag steel; (d) carbide of electroslag steel

(3) 采用连铸圆坯轧制的大规格圆钢, 通过 $(1\ 240 \pm 20) \text{ }^\circ\text{C} \times 5 \text{ h}$ 高温扩散及初轧首道次变形量 $\geq 90 \text{ mm}$ 的大变形比轧制等热加工工艺, 可以进一步改善材料的碳含量中心偏析。

(4) 接触疲劳寿命试验表明, 圆坯连铸高淬透

性轴承钢 GCr15SiMn 在 5.3GPa 高应力负荷条件下的接触疲劳额定寿命 L_{10} 达到 3.58×10^6 次, 接近电渣钢的水平。其高纯净度, 以及连铸坯和圆钢成分偏析的改善, 使钢的组织 and 碳化物均匀细小, 是获得高接触疲劳寿命的关键。

参考文献

[1] 李昭昆, 雷建中, 徐海峰等. 国内外轴承钢的现状与发展趋势[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(3): 1-12.

[2] 俞峰, 陈兴品, 徐海峰等. 滚动轴承钢冶金质量与疲劳性能现状及高端轴承钢的发展方向[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 513-522.

[3] 祁猛, 李亮, 铁占鹏, 等. 轻压下对 GCr15 轴承钢大方坯内部质量的影响[J]. 中国冶金, 2020, 30(9): 67-74.

[4] 左晓剑, 刘洋, 成国光, 等. GCr15 轴承钢连铸方坯与电渣重熔铸锭的原位统计分布分析[J]. 冶金分析, 2018, 38(10): 1-6.

[5] 秦志强, 康智清, 兰楚慧. GCr15 连铸方坯中心碳偏析原位分析研究[J]. 现代冶金, 2017, 45(1): 10-13.

[6] 刘博, 窦坤, 杨振国, 等. GCr15 轴承钢大方坯宏观碳偏析形成机理及二次冷却调控机制研究[J]. 连铸, 2015, 40(5): 7-14.

[7] 钟晓丹, 宋满堂, 刘军, 等. 350 mm \times 470 mm 矩形坯连铸生产轴承钢的凝固末端[J]. 中国冶金, 2015, 25(2): 10-14.

[8] 勒同红, 孙红英, 张瑞军, 等. GCr15 轴承钢连铸坯宏观碳偏析的基本规律[J]. 中国冶金, 2008, 18(7): 19-24.

[9] 左小坦, 陈永峰, 张洪彪, 等. 连铸工艺参数对 40Cr 圆坯碳偏析的影响[J]. 中国冶金, 2020, 30(6): 97-102.

[10] 吴明洋, 陈良. $\Phi 800 \text{ mm}$ 圆坯连铸机 45 钢生产工艺优化[J]. 中国冶金, 2018, 28(4): 53-56.

[11] 刘鹏. 100t EAF-LF-VD-圆坯连铸流程生产石油钻铤用钢 AISI4145HM 的工艺实践[J]. 特殊钢, 2018, 39(4): 28-30.

[12] 刘兵, 吕安明, 刘利, 等. 锅炉管用钢 12Cr1MoV 生产实践[J]. 中国冶金, 2015, 25(4): 49-51.

[13] 吴耀光, 龚志翔, 张建平, 等. 圆坯连铸工艺优化试验研究[J]. 钢铁, 2008, 43(8): 31-34.

[14] 孙彪, 梁军. 马钢特钢公司 $\Phi 600 \text{ mm}$ 圆坯中心碳偏析分析及控制措施[J]. 连铸, 2016, 41(1): 40-43.

[15] 王强, 祖峰, 张梁等. GCr15SiMn 轴承钢 $\Phi 400 \text{ mm}$ 铸坯工艺实践[J]. 天津冶金, 2014, (2): 41-43.

[16] 王国才, 龚志翔. 100 t UHP EAF-LF-RH-CC 流程生产 GCr15 轴承钢的工艺实践[J]. 特殊钢, 2013, 34(6): 39-41.

[17] Hanwei Fu, Jakub Jelita Rydel, Adam M. Gola, et al. The relationship between 100Cr6 steelmaking, inclusion microstructure and rolling contact fatigue performance[J]. International Journal of Fatigue, 129(2019) 104899.

[18] GB/T 24213-2009. 金属原位统计分布分析方法通则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[19] 安航航. 高碳钢大方坯凝固机理与宏观偏析关键控制技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.

[20] 周德光, 傅杰, 王平. 工艺参数对连铸轴承钢坯碳偏析的影响[J]. 钢铁, 1999, 34(6): 22-26.

[21] 范植金, 罗国华, 朱玉秀, 等. GCr15 轴承钢连铸坯的中心偏析研究[C]. 第九届中国钢铁年会论文集, 2013: 1-7.

[22] 陈远清. 连铸大圆坯宏观碳偏析的控制研究[D]. 北京: 钢铁研究总院, 2019.

[23] 孙飞龙, 耿克, 俞峰, 等. 超洁净轴承钢中夹杂物与滚动接触疲劳寿命的关系[J]. 金属学报, 2020, 56(5): 693-703.

[24] 史智越, 徐海峰, 许达, 等. 冶金工艺对 GCr15 高周旋转弯曲疲劳性能的影响[J]. 钢铁, 2018, 53(11): 85-92.

[25] 周旺松, 华建社, 俞峰, 等. 形变温度对 GCr15SiMn 钢网状碳化物演化行为的影响[J]. 钢铁, 2015, 50(6): 87-93.

[26] 杨方亮, 周旺松, 曹文全. 快速循环相变对 GCr15SiMn 钢组织和性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(7): 68-72.

欢迎订阅 2023 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号: 38-183 定价: 25.00 元/期、150.00 元/年 邮编: 435001

地址: 湖北省黄石市黄石大道316号、大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社

电话: 0714-6297386 6297313 6292935