

· 应用与服役 ·



高洁净轴承钢 GCr15 滚动接触疲劳机制研究

尹青¹, 曹文全², 吴小林¹, 王存宇², 王辉², 俞峰²

(1 江阴兴澄特种钢铁有限公司, 江阴 214429; 2 钢铁研究总院有限公司特殊钢研究院, 北京 100081)

摘要:通过对真空脱气工艺制备的高洁净轴承钢的化学成分、低倍组织、碳化物不均匀性、非金属夹杂物等冶金质量进行标准检测及评级, 并利用 Aspex 扫描分析仪对钢中的非金属夹杂物的数量、类型、尺寸及洁净度指数等进行定量分析, 结合滚动接触疲劳寿命试验结果, 建立了非金属夹杂物与轴承钢接触疲劳寿命的关系。研究结果表明, 高洁净轴承钢的 $w[\text{O}] \leq 0.0005\%$, $w[\text{Ti}] \leq 0.0008\%$, 大颗粒夹杂物 $\text{DS} \leq 0.5$ 级, 但仍是以夹杂物为主导的接触疲劳破坏机制, 其中, 氧化物类夹杂尺寸较大, 并在夹杂物周围存在孔洞缺陷, 易于造成应力集中形成疲劳裂纹。高洁净轴承钢中氧化物类夹杂的最大尺寸控制在 $10 \mu\text{m}$ 以下, 4.5 GPa 高接触应力下的额定寿命 L_{10} 达到 1×10^7 次以上, 有望取代电渣重熔轴承钢用于高铁、高速机床主轴、风电主轴等高端装备领域。

关键词:高洁净轴承钢 GCr15; 非金属夹杂物; 滚动接触疲劳寿命; 破坏机制; 高端装备

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00092 **中图分类号:**TG142.4

Research on Rolling Contact Fatigue Mechanism of High Clean Bearing Steel GCr15

Yin Qing¹, Cao Wenquan², Wu Xiaolin¹, Wang Cunyu², Wang Hui², Yu Feng²

(1 Jiangyin Xingcheng Special Steel Works Co., Ltd., Jiangyin 214429, China; 2 Research Institute of Special Steels, Central Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: Through the standard detection and rating the metallurgical quality of the high clean bearing steel prepared by vacuum degassing process, such as chemical composition, macrostructure, carbide inhomogeneity and non-metallic inclusions, and quantitative analysis of the quantity, type, size and cleanliness index of non-metallic inclusions in the steel is carried out by Aspex scanning analyzer. Based on the rolling contact fatigue life test results, the relationship between non-metallic inclusions and bearing steel contact fatigue life was established. The results show that the oxygen content of high clean bearing steel is not more than 0.0005% , the titanium content is not more than 0.0008% and the large particle inclusions DS is not more than 0.5 , however it is still a contact fatigue failure mechanism dominated by inclusions, among which the size of oxide inclusions are large and there are holes around the inclusions, which is easy to cause stress concentration and fatigue cracks. The maximum size of oxide inclusions in high clean bearing steel is controlled below $10 \mu\text{m}$, and the rated life L_{10} under 4.5 GPa high contact stress is more than 1×10^7 times, which is expected to replace electroslag remelting bearing steel for high-speed rail, high-speed machine tool spindle, wind power spindle and other high-end equipment fields.

Key Words: High Clean Bearing Steel GCr15; Nonmetallic Inclusion; Rolling Contact Fatigue; Failure Mechanism; High-end Equipment

国内高速铁路轴箱轴承、风力发电主轴轴承、高速精密机床和新能源汽车电主轴轴承等高端装备关键部位所用的轴承, 要求长寿命和高可靠性的工作, 这就需要轴承钢具有高洁净度和长接触疲劳寿命, 因此, 多采用电渣重熔轴承钢加工制造。电渣钢优点是具有均匀细小的夹杂物、碳化物和基体组织, 以及较长的接触疲劳寿命。但电渣钢批量小、能耗高、成本高, 不适合国内特殊钢绿色高效的

发展战略^[1-2]。近年来, 随着冶金装备和工艺技术的进步, 国外相继开发出超高洁净真空脱气轴承钢, 如日本山阳特殊钢公司开发的 EP 钢和瑞典 Ovako 公司开发的 IQ 钢, 钢中 $w[\text{O}] \leq 0.0005\%$ 、 $w[\text{Ti}] \leq 0.0011\%$ 、最大夹杂物尺寸 $\leq 11 \mu\text{m}$, 其接触疲劳额定寿命 L_{10} 优于电渣重熔轴承钢而接近真空自耗重熔轴承钢的水平^[3]。国内以高碳铬轴承钢 GCr15 为代表的真空脱气轴承钢年产量达到 400 万 t 左右, 冶

基金项目: 事 20T61200ZD《新一代轴承钢长寿命理论与工程化突破性技术》, 51871062《高应变速率和高超塑性低中碳钢的合金化设计、超细晶组织调控及超塑性机制研究》

作者简介: 尹青(1984—), 男, 博士研究生; **E-mail:** yinqing@citicsteel.com; **收稿日期:** 2023-05-26

通信作者: 俞峰(1970—), 男, 硕士, 正高级工程师; **E-mail:** yufeng@nercast.com

金质量水平也在不断的提高,但在冶金质量的稳定性方面与国外仍存在一定的差距,因此,限制其在高端装备领域的应用^[4]。轴承钢冶金质量水平与生产装备及工艺水平密切相关,同时与轴承钢冶金质量的检测方法也密切相关。国内轴承钢的冶金质量检测,如夹杂物、碳化物和基体组织等多采用图谱法等半定量的方法检测,无法有效的对高洁净及超高洁净轴承钢的冶金质量进行有效判定^[5]。国内外通过对轴承钢非金属夹杂物进行定量表征及极值预测,建立夹杂物与疲劳寿命关系的研究已有相关的报道^[6-10],但对转炉或电弧炉等不同真空脱气工艺生产的高洁净轴承钢中夹杂物定量对比分析,以及高洁净度下轴承钢的滚动接触疲劳破坏机制尚不清晰^[11-14]。试验采用定量和半定量相结合的方法,对不同真空脱气工艺制备的高洁净轴承钢 GCr15 的低倍组织、夹杂物、碳化物等冶金质量进行研究,探讨高洁净轴承钢的滚动接触疲劳破坏机制,提出轴承钢冶金质量的发展方向和控制措施,推动高洁净真空脱气轴承钢在高端装备领域的应用。

1 试验材料及方法

针对目前高碳铬轴承钢主流的转炉和电弧炉生产工艺流程,以及探讨不同连铸坯及中间坯尺寸对高碳铬轴承钢组织和性能的影响。试验材料选自 3 种不同冶炼-连铸-轧制工艺制备的 GCr15 高碳铬轴承钢 $\phi 60$ mm 棒材,见表 1,其中有 2 种规格中间坯的 100 t 转炉 \rightarrow 炉外精炼 \rightarrow 真空脱气(BOF \rightarrow LF \rightarrow RH)工艺和一种 100 t 电弧炉 \rightarrow 炉外精炼 \rightarrow 真空脱气(EAF \rightarrow LF \rightarrow VD)工艺。3 种试验材料的化学成分(质量分数)见表 2,其中 P \leq 0.015%、S \leq 0.002%、Ti \leq 0.000 8%、O \leq 0.000 5%,其有害元素含量很低,具有较高的洁净度。同时,对其冶金质量进行分析,按照 GB/T 1979—2001 标准,对试验材料的低倍组织进行评定,按照 GB/T 18254—2016 标准,对试

验材料的碳化物不均匀性进行评定,按照 GB/T 10561—2005 标准,对试验材料的非金属夹杂物进行评定。然后,采用 ASPEX 扫描夹杂物分析仪,对钢中夹杂物进行定量分析^[15]。对 3 种试验钢棒材的纵截面和横截面的夹杂物进行定量分析,扫描区域位置及大小,如图 1 所示,纵截面夹杂物的扫描区域位于棒材半径的 1/2 处;横截面的扫描区域位于接触疲劳环状试样的断面圆环中心附近(疲劳测试面)。

表 1 试验材料的编号、工艺和尺寸
Table 1 Number, process and size of the test material

试样编号	冶炼工艺流程	连铸坯、中间坯和成品尺寸/mm
1 [#]	BOF \rightarrow LF \rightarrow RH	\rightarrow 390 \times 510 \rightarrow 300 \times 300 \rightarrow ϕ 60
2 [#]	EAF \rightarrow LF \rightarrow VD	\rightarrow 300 \times 300 \rightarrow 140 \times 140 \rightarrow ϕ 60
3 [#]	BOF \rightarrow LF \rightarrow RH	\rightarrow 390 \times 510 \rightarrow 200 \times 200 \rightarrow ϕ 60

为了进一步分析夹杂物等冶金质量对疲劳性能的影响,在 TRF-1000/5-H 型接触疲劳试验机对 3 种试验材料进行接触疲劳寿命测试^[15]。接触疲劳试样取自 $\phi 60$ mm 球化退火态棒材,试样尺寸为 $\phi 52$ mm \times 5 mm,如图 1(b)所示。热处理工艺采用在 840 °C 保温 30 min 油冷,然后在 170 °C 保温 3 h 回火处理。按照 JB/T10510—2005 标准进行接触疲劳性能试验,试验采用定数截尾方式。试验条件为:最大接触应力 4.5 GPa,转速 1 500 r/min,试验温度为常温,润滑介质为 4010 润滑油,试验钢球为 GCr15 钢球,试样数量 16 个/组。试验数据采用两参数威布尔分布函数处理,其参数估计采用最佳线性不变估计(BLIE)方法。

接触疲劳试样试验前后的典型照片如图 2 所示。将试样表面抛光后采用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀,在光学显微镜下观察组织和碳化物;疲劳试样表面不抛光,只是用丙酮进行清洗后通过扫描电镜观察疲劳试样的疲劳坑和疲劳轨道的形貌;疲劳试

表 2 试验材料的化学成分(质量分数)
Table 2 Chemical composition of the test material

试样编号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
1 [#]	0.99	0.27	0.36	0.015	0.002	1.45	0.06	0.08	0.02
2 [#]	0.95	0.27	0.41	0.013	0.002	1.50	0.02	0.02	0.01
3 [#]	1.05	0.29	0.31	0.014	0.001	1.44	0.02	0.06	0.01
试样编号	Al	Ti	Ca	Pb	Sn	As	Sb	N	O
1 [#]	0.015	0.000 8	0.000 5	0.001 0	0.007 9	0.005 2	0.003 1	0.004 6	0.000 5
2 [#]	0.025	0.000 6	0.000 2	0.001 6	0.001 0	0.002 0	0.001 0	0.002 0	0.000 5
3 [#]	0.025	0.000 6	0.000 6	0.000 1	0.000 4	0.001 7	0.000 4	0.002 6	0.000 5

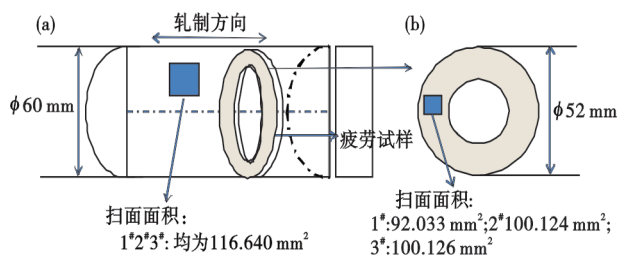


图 1 非金属夹杂物 ASPEX 定量分析示意图:(a)纵截面, (b)横截面

Fig. 1 Diagrammatic sketch of ASPEX quantitative analysis of nonmetallic inclusions : (a) longitudinal section , (b) transverse section

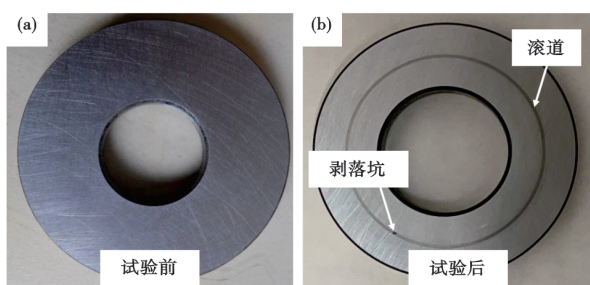


图 2 接触疲劳试样试验前后照片:(a)试验前,(b)试验后
Fig. 2 Photos of contact fatigue specimen before and after test : (a) before the test , (b) after the test

样在剥落处开 V 型槽,槽底部与轨道表面预留 1 mm 的距离,将试样在开槽处折断,如图 3 所示,折断后的试样用丙酮清洗后,在扫描电镜下观察。

2 试验结果与分析

2.1 低倍组织和碳化物不均匀性

试验材料低倍组织和碳化物不均匀性检验结果见表 3,其中一般疏松、中心疏松和锭型偏析均为 0.5 级,未发现其它低倍缺陷,试验材料低倍组织均匀致密;液析和网状的级别相同,分别为 0 级和 2.0 级;带状评级结果有一定的差别,1# 试样级别最差为 2.5 级,2# 试样级别最低为 1.0 级,3# 试样级别则为 2.0 级。3 种试验钢棒材典型的碳化物不均匀性金相照片如图 4 所示。

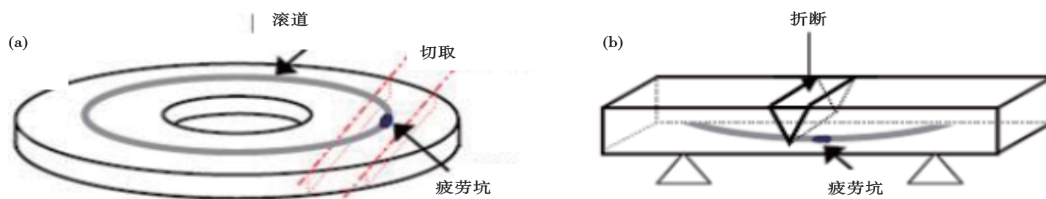


图 3 剥落坑的断面观察位置示意图:(a)疲劳试样,(b)断面位置

Fig. 3 Schematic diagram of the section observation location of the spalling pit : (a) fatigue specimen , (b) section location

表 3 试验材料的低倍组织和碳化物不均匀性检验结果
Table 3 Detection results of macrostructure and carbide inhomogeneity of the test material

试样编号	低倍组织/级				碳化物不均匀性/级		
	一般疏松	中心疏松	锭型偏析	其它	液析	带状	网状
1#	0.5	0.5	0.5	未发现	0	2.5	2.0
2#	0.5	0.5	0.5	未发现	0	1.0	2.0
3#	0.5	0.5	0.5	未发现	0	2.0	2.0

2.2 非金属夹杂物

2.2.1 非金属夹杂物的图谱评级

非金属夹杂物评定结果见表 4,3 种试验材料的非金属夹杂物级别均较低,洁净度高,图谱评级结果的差别不大。3 种试验材料相比较而言,1# 试样的硫化物级别略高,2# 和 3# 试样的氧化物夹杂级别稍高,1# 和 2# 试样的点状不变形夹杂较 3# 试样略高。由表 5 可以看出,对于高洁净轴承钢,采用图谱评级方法已经很难准确判定钢中非金属夹杂物的质量状况,因此,尝试采用其它的方法,如 ASPEX 扫描夹杂物分析仪,对上述试验材料进行进一步的分析^[16]。

表 4 试验材料的非金属夹杂物检验结果

Table 4 Test results of nonmetallic inclusion of experimental material

试样编号	A		B		C		D		DS
	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	
1#	1.0	0.5	1.0	0	0	0	0.5	0	0.5
2#	1.0	0	1.5	0	0	0	0.5	0.5	0
3#	1.0	0	1.0	0	0	0	0.5	0	0

2.2.2 ASPEX 夹杂物定量检测

3 种试验材料纵截面和横截面非金属夹杂物的洁净度指数如图 5 所示,2 μm 以上的夹杂物粒度分布如图 6 所示,各类型最大夹杂物统计结果见表 6 和表 7。由图 5 可知,2# 和 3# 试验材料的洁净度明显好于 1# 试验材料;而 2# 和 3# 试验材料的纵截面和横截面稍有差异,2# 横截面好,3# 则纵截面好。由图 6

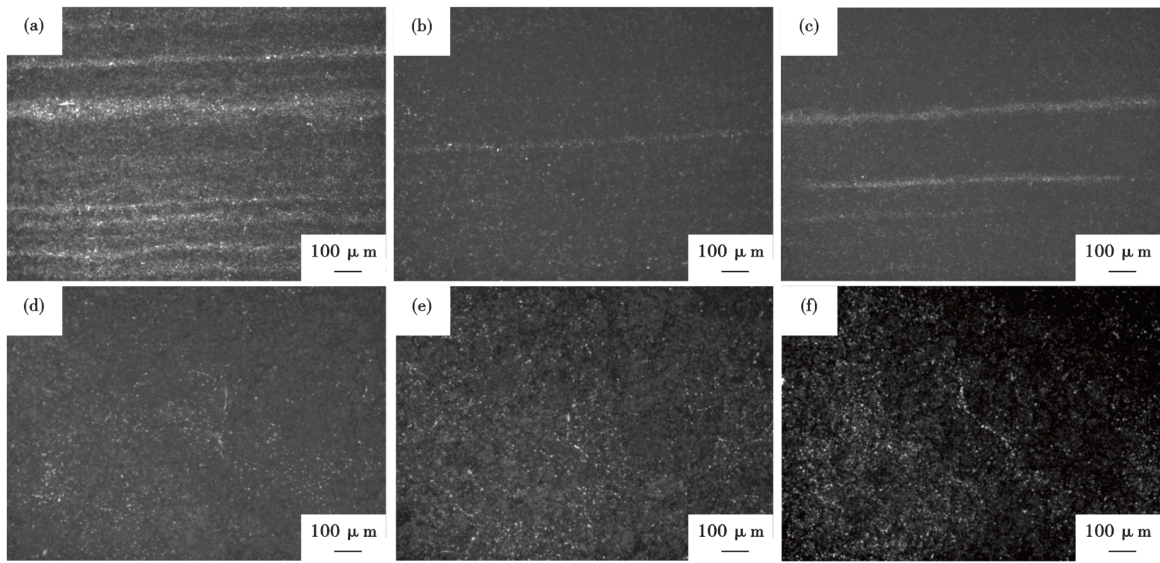


图 4 3 种试验钢带状碳化物不均匀图像:(a)1[#], (b)2[#], (c)3[#]; 3 种试验钢网状碳化物不均匀图像:(d)1[#], (e)2[#], (f)3[#]
 Fig. 4 Uneven images of banded carbide of three test steels: (a) 1[#], (b) 2[#], (c) 3[#]; Uneven images of network carbide of three test steels: (d) 1[#], (e) 2[#], (f) 3[#]

表 5 试验材料夹杂物最大颗粒统计 ($D_{1\max} = \sqrt{\text{area}_{\max}}$)

Table 5 Maximum inclusion particle statistics of test materials ($D_{1\max} = \sqrt{\text{area}_{\max}}$)

试样编号	氧化物		硫化物		氮化钛类	
	纵截面	横截面	纵截面	横截面	纵截面	横截面
	μm					
1 [#]	8.4	7.2	7.3	8.2	8.0	6.2
2 [#]	4.2	8.5	14.0	10.2	4.4	5.2
3 [#]	12.0	7.3	14.8	4.5	4.5	2.5

可知, 3 种试验钢的大颗粒夹杂物 ($>2 \mu\text{m}$ 细系) 尺寸主要集中在 $2 \sim 8 \mu\text{m}$, $>8 \mu\text{m}$ (粗系) 夹杂物已很少, $13 \mu\text{m}$ 以上 (DS) 纵截面几乎没有, 横截面也很少出现。从图 6 中可明显看到 1[#] 试验钢的大颗粒夹杂物 ($>8 \mu\text{m}$) 明显多于 2[#] 和 3[#] 试验钢。

以夹杂物面积的平方根作为其尺寸进行统计的结果见表 5。从表 5 可知, 硫化物夹杂纵截面尺寸

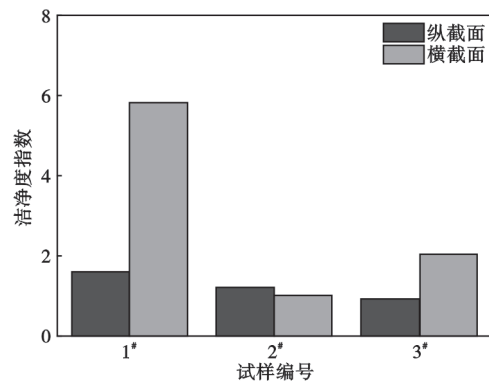


图 5 试验材料的洁净度指数
 Fig. 5 Cleanliness index of test materials

大于横截面, 这是由于硫化物夹杂可沿轧制方向拉长, 而氧化物和氮化钛类夹杂为不可变形夹杂, 因此两个方向无明显规律, 1[#] 试验钢纵横向夹杂物最

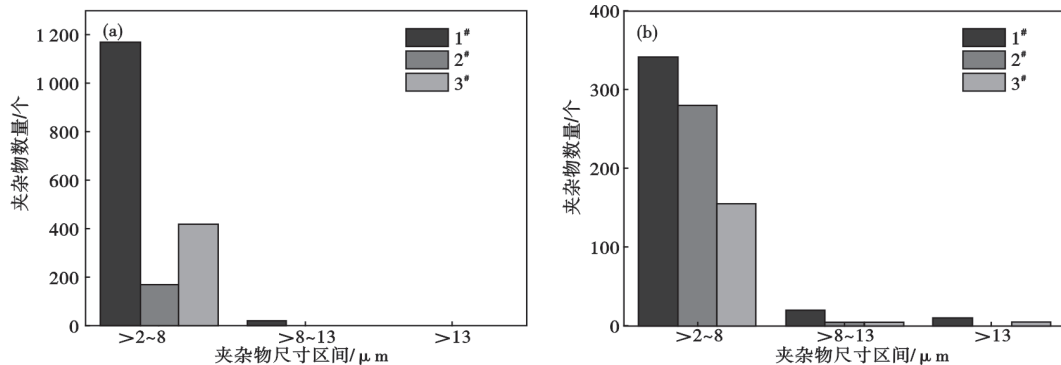


图 6 试验材料的夹杂物尺寸分布:(a)纵截面, (b)横截面
 Fig. 6 Inclusion size distribution of the test material: (a) longitudinal section, (b) transverse section

大尺寸相差最小,表现出最佳的等向性。表 5 中纵截面最大夹杂物的统计结果表明,氧化物夹杂 2[#] 试验钢最小为 4.2 μm, 3[#] 试验钢最大为 12 μm; 硫化物夹杂 1[#] 试验钢最小为 7.3 μm, 2[#] 和 3[#] 试验钢较大均为 14 μm 左右; 氮化钛类夹杂则 2[#] 和 3[#] 试验钢较小为 4 μm 左右, 1[#] 试验钢最大为 8 μm, 综上所述, 2[#] 试验钢纵截面最大夹杂物尺寸较小。横截面最大夹杂物的统计结果与纵截面有所不同, 氧化物夹杂 1[#] 和 3[#] 试验钢最小为 7 μm 左右, 2[#] 试验钢最大为 8.5 μm; 硫化物夹杂 3[#] 试验钢最小为 4.5 μm, 2[#] 试验钢较大为 10.2 μm; 氮化钛类夹杂则 3[#] 试验钢较小为 2.5 μm 左右, 1[#] 和 2[#] 试验钢较大为 5 ~ 6 μm, 综上所述 3[#] 试验钢横截面的夹杂物最大尺寸为最小。

以夹杂物的最长边作为其尺寸进行统计的结果见表 6。从表 6 可知, 纵截面和横截面最大夹杂物尺寸的差异较表 5 有明显的增加, 除了 2[#] 试验材料的氧化物和氮化钛类夹杂以外, 纵截面夹杂物尺寸明显大于横截面尺寸, 这同样是由于轧制对变形和不可变形夹杂物影响的结果。表 6 中纵截面最大夹杂物的统计结果表明, 氧化物夹杂 2[#] 试验钢最小为 6.4 μm, 3[#] 试验材料最大为 16.1 μm; 硫化物夹杂 2[#] 试验材料最小为 19.3 μm, 1[#] 和 3[#] 试验材料较大为 20 μm 左右; 氮化钛类夹杂则 2[#] 试验材料较小为 6.6 μm 左右, 1[#] 试验钢最大为 16.1 μm, 综上所述与表 5 相同 2[#] 试验材料纵截面的夹杂物最大尺寸最小。横截面最大夹杂物的统计结果则不同, 氧化物夹杂 3[#] 试验材料最小为 9.1 μm, 2[#] 试验材料最大为 12.2 μm; 硫化物夹杂 3[#] 试验材料最小为 7.3 μm, 2[#] 试验材料较大为 14.0 μm; 氮化钛类夹杂则 3[#] 试验材料较小为 6.5 μm, 2[#] 试验材料较大为 12.0 μm, 综上所述与表 5 相同 3[#] 试验材料横截面的夹杂物最大尺寸为最小。可以看出, 两种最大夹杂物的统计方法所得到的结果基本相同, 均可作为最大夹杂物的统计方法使用。

2.3 接触疲劳寿命

2.3.1 疲劳试验结果

3 种试验钢接触疲劳数据处理结果见表 7,

表 6 试验材料夹杂物最大颗粒统计 ($D_{2max} = L_{max}$)

试样编号	μm					
	氧化物		硫化物		氮化钛类	
	纵截面	横截面	纵截面	横截面	纵截面	横截面
1 [#]	14.1	10.8	21.7	10.4	16.1	9.8
2 [#]	6.4	12.2	19.3	14.0	6.6	12.0
3 [#]	16.1	9.1	23.7	7.3	8.5	6.9

Weibull 分布如图 7 所示。接触疲劳试验结果表明, 3[#] 试验钢的接触疲劳额定寿命 L_{10} 和 L_{50} 最佳, 分别为 10.73×10^6 和 3.34×10^7 , 同时其斜率参数也最大为 1.66, 表现出更高的可靠性。由图 7 可知, 2[#] 试样的接触疲劳寿命试验数据最小值最低, 只有 3.33×10^6 次; 其最大值则最高 (有 4 个试样在 1.0×10^8 次截尾时未破坏), 其接触疲劳额定寿命 L_{10} 最低为 5.35×10^6 次, 说明早期失效对高碳铬轴承钢的接触疲劳额定寿命的影响很大。通过非金属夹杂物类型和尺寸的控制, 延缓高碳铬轴承钢的早期失效, 从而有利于接触疲劳寿命的提高。

表 7 接触疲劳试验数据处理结果

Table 7 Results of Contact fatigue test data

试样编号	额定寿命/次 $L_{10} \times 10^6$	中值寿命/次 $L_{50} \times 10^7$	斜率参数 b
1 [#]	6.98	2.41	1.52
2 [#]	5.35	3.26	1.04
3 [#]	10.73	3.34	1.66

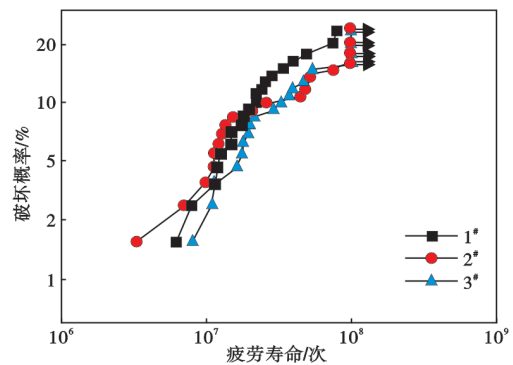


图 7 试验材料的接触疲劳寿命 Weibull 分布图

Fig. 7 Weibull distribution curve of contact fatigue life of test materials

2.3.2 疲劳试样的组织和形貌

3 种试验材料制成的疲劳试样试验面的淬回火马氏体组织和残留碳化物形貌如图 8 所示。由图 8 可知, 1[#] 和 3[#] 试验材料的组织和碳化物均匀细小, 无明显的网状碳化物存在; 而 2[#] 试验材料虽然组织也比较均匀细小, 但存在部分较粗大的网状碳化物。1[#] 试样从连铸坯到中间坯的变形比为 2.21, 总变形比为 70; 2[#] 试样从连铸坯到中间坯的变形比为 4.59, 总变形比为 32; 3[#] 试样从连铸坯到中间坯的变形比为 4.97, 总变形比为 70; 由此可知, 大截面连铸坯在轧制相同尺寸棒材时总变形比大, 有利于组织细化均匀化; 而总变形比相同的情况下, 从连铸坯到中间坯采用大变形量 (≥ 4), 也有利于组织和碳化物的

细化均匀化。

接触疲劳试样试验后滚道面与疲劳剥落坑形貌如图9(a)所示。由图9(a)可知,疲劳滚道形貌呈橘皮状,分布着许多凹坑和麻点;疲劳坑断口的特征是层状的瞬断断口和以韧窝为主的准解理断口相结合,并且可以明显看出一次剥落区和二次剥落区。一次剥落区横截面断口扫描照片如图9(b)所示,其特征是以韧窝为主的准解理断口,未发现大颗粒夹杂物(大颗粒碳化物)的存在^[16]。

3 讨论

3.1 组织(碳化物)与接触疲劳寿命的关系

由接触疲劳试样测试面组织(如图8所示)与接触疲劳寿命测试结果分析表明,通过总变形比和道次变形比控制,细化均匀化组织(碳化物)对接触疲劳寿命有利,但高洁净轴承钢的早期疲劳破坏仍是

以非金属夹杂物为主导的疲劳失效机制^[17-20]。

3.2 洁净度指数与疲劳寿命的关系

3种试验材料洁净度指数与疲劳寿命的关系如图10所示。众所周知,轴承钢的氧含量越低,非金属夹杂物数量越少,洁净度指数越高,接触疲劳寿命就越长^[21-22]。如图10所示,在高洁净钢中,纵截面夹杂物的洁净度指数基本符合前述规律,但横截面夹杂物的统计结果表明,随着洁净度指数的增加,钢的接触疲劳寿命基本没变。因此,在高洁净度钢中,不能仅仅考虑洁净度指标的大小,还要考虑非金属夹杂物的类型、尺寸等因素的影响^[23-30]。

3.3 夹杂物尺寸与疲劳寿命的关系

3种试验材料中非金属夹杂物的类型和最大尺寸与接触疲劳寿命的关系如图11所示,不论是采用平方根还是最长边尺寸表示钢中非金属夹杂物的最大尺寸值,均可发现试验钢的接触疲劳寿命随着夹杂物颗粒尺寸的增大而降低,其中硫化物类的夹

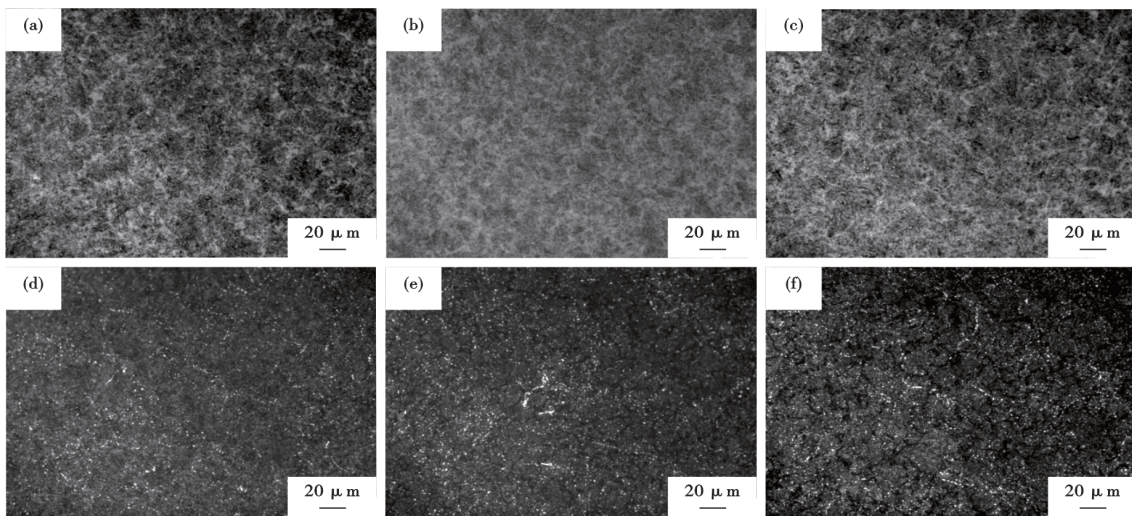


图8 3种试验钢疲劳试样的组织形貌:(a)1#, (b)2#, (c)3#; 3种试验钢疲劳试样的碳化物形貌:(d)1#, (e)2#, (f)3#
Fig. 8 Microstructure of fatigue specimens of three test steels : (a) 1# , (b) 2# , (c) 3# ; Carbide morphology of fatigue specimens of three test steels : (d) 1# , (e) 2# , (f) 3#

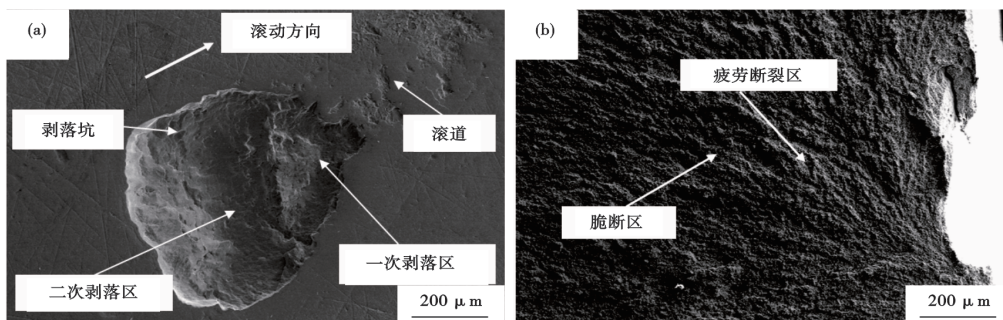


图9 疲劳试样试验后表面工作区与横断面形貌 SEM
Fig. 9 Surface work area and cross-sectional fracture morphology SEM after fatigue sample test

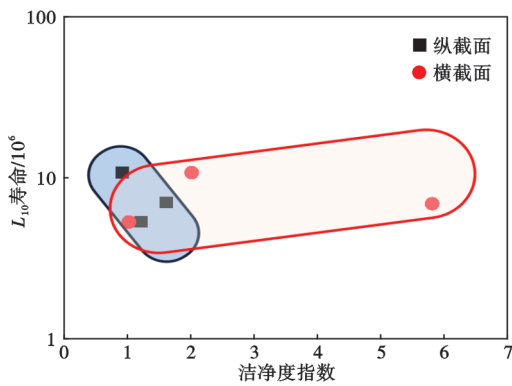


图 10 洁净度指数与疲劳寿命的关系

Fig. 10 Relation between cleanliness index and fatigue life

杂物影响最小,其次是氮化钛类的夹杂物,而氧化物类夹杂对接触疲劳额定寿命的影响最大(斜率最大)^[31-32]。这是由于硫化物夹杂虽然尺寸较大,但其在应力作用下可变形,不易产生应力集中,以及与基体界面的孔隙或裂纹等缺陷,如图 12(a)所示,因此,对接触疲劳寿命的影响最小。氮化钛夹杂物为脆性夹杂物,易造成应力集中,但其尺寸较小,与基体的结合也较为紧密,如图 12(b)所示,很少发现有孔隙或裂纹存在,因此其对接触疲劳寿命的影响也较小。氧化物类夹杂为脆性夹杂,

如图 12(c)所示,其尺寸较大,而且在与基体结合面上经常发现存在孔洞缺陷,易在集中应力作用下开裂,因此对接触疲劳寿命的影响较大^[33-34]。

4 结论

(1) 转炉或电弧炉+炉外精炼生产的高碳铬轴承钢 GCr15 均可达 $w [O] \leq 0.0005\%$, $w [Ti] \leq 0.0008\%$, DS 类大颗粒夹杂物 ≤ 0.5 级的高洁净度水平。

(2) 大截面连铸坯可保证轴承钢具有足够的变形比,以保证组织的致密和细小均匀,连铸坯到中间坯比中间坯到成品材采用更大的变形比(≥ 4),有利于改善钢中的碳化物不均匀性。

(3) 高洁净轴承钢的洁净度指数 ≤ 2.0 ,氧化物类夹杂最大尺寸 $\leq 16 \mu m$,硫化物类夹杂最大尺寸 $\leq 24 \mu m$,氮化钛类夹杂最大尺寸 $\leq 16 \mu m$,超低氧钛含量的控制有利于大颗粒夹杂物的控制。

(4) 高洁净轴承钢仍是以夹杂物为主导的接触疲劳破坏机制,夹杂物的类型和尺寸是主要的影响因素,其中氧化物类夹杂尺寸较大,并在夹杂物周围存在孔洞缺陷,在应力集中作用下易形成疲劳裂纹。高洁净轴承钢的氧化物类夹杂最大尺寸控制

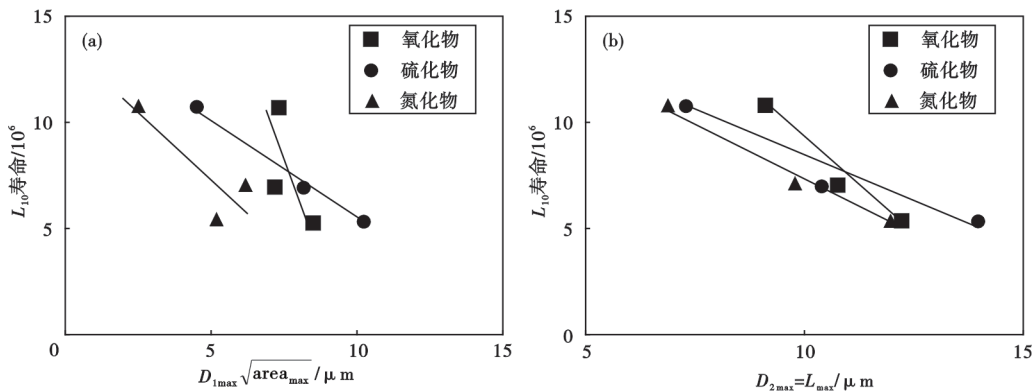


图 11 夹杂物类型和最大尺寸与疲劳寿命的关系:(a) $D_{1max} = \sqrt{area_{max}}$, (b) $D_{2max} = L_{max}$

Fig. 11 Relation between inclusion type and maximum size on fatigue life: (a) $D_{1max} = \sqrt{area_{max}}$, (b) $D_{2max} = L_{max}$

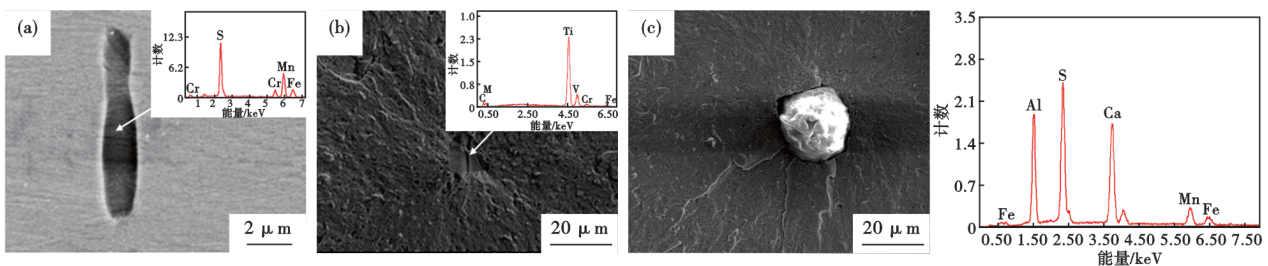


图 12 非金属夹杂物与基体组织形貌 SEM:(a) MnS, (b) TiN, (c) CaO·Al₂O₃·MnS

Fig. 12 SEM microstructure morphology of the matrix and nonmetallic inclusions: (a) MnS, (b) TiN, (c) CaO·Al₂O₃·MnS

在 10 μm 以下, 4.5 GPa 高接触应力下的额定寿命 L_{10} 可达到 1×10^7 次以上。

(5) 高洁净真空脱气连铸轴承钢夹杂物数量

少, 尺寸细小, 接触疲劳寿命高, 有望取代电渣重熔轴承钢用于高铁、高速机床主轴、风电主轴等高端装备领域。

参考文献

- [1] 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发展方向[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 513-522.
- [2] 肖爱平, 张洲, 李德胜, 等. 电渣重熔渣系对 GCr15 轴承钢洁净度的影响[J]. 特殊钢, 2022, 43(6): 34-37.
- [3] 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.
- [4] 王昆鹏, 王海洋, 徐建飞, 等. 120 t BOF-LF-RH-CC 流程 GCr15 轴承钢洁净度研究[J]. 特殊钢, 2021, 42(2): 14-17.
- [5] 张林, 刘海, 官跃辉, 等. 高碳铬轴承钢碳化物带状评定方法探究[J]. 特殊钢, 2022, 43(6): 42-45.
- [6] 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.
- [7] 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, :2019(129): 104899.
- [8] Cao Z X, Shi Z Y, Yu F, et al. A new proposed Weibull distribution of inclusion size and its correlation with rolling contact fatigue life of an extra clean bearing steel [J]. International Journal of Fatigue, 2019(126): 1-5.
- [9] 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.
- [10] 田超, 刘剑辉, 范建文, 等. 采用统计极值法评价超低氧轴承钢夹杂物[J]. 钢铁研究学报, 2018, 30(2): 127-131.
- [11] Hashimoto K, Fujimatsu T, Tsunekage N, et al. Study of rolling contact fatigue of bearing steels in relation to various oxide inclusions[J]. Materials & Design, 2011, 32(3): 1605-1611.
- [12] Kato Y, Sato K, Hiraoka K, et al. Recent evaluation procedures of nonmetallic inclusions in bearing steels (statistics of extreme value method and development of higher frequency ultrasonic testing method) [M]. Bearing Steel Technology. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, 2009: 176.
- [13] Ne'lias D, Dumont M L, Champiot F, et al. Role of inclusions, surface roughness and operating conditions on rolling contact fatigue[J]. Journal of Tribology, 1999, 121(2): 240-251.
- [14] Vander Voort G F. Inclusion ratings: Past, present, and future [M]. Hoo J, Green W B., Eds. Bearing Steels: Into the 21 st Century. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, 2009: 13.
- [15] 史智越, 徐海峰, 许达, 等. 采用 ASPEX 和旋弯疲劳法表征 GCr15 轴承钢夹杂物[J]. 钢铁, 2019, 54(4): 55-62.
- [16] 雷家柳, 杨玲, 廖凯, 等. GCr15 轴承钢 120 t LF 精炼终点 CaO-MgO-Al₂O₃ 夹杂的特性研究[J]. 特殊钢, 2021, 42(5): 11-15.
- [17] 俞峰, 陈兴品, 杜松林, 等. 圆坯连铸 GCr15SiMn 的成分偏析和接触疲劳寿命研究[J]. 特殊钢, 2022, 43(6): 13-20.
- [18] Misaki Nagao Kazuhiko Hiraoka, Yasukazu Unigame. Influence of nonmetallic inclusion size on rolling contact fatigue life in bearing steel[J]. Sanyo Technical Report, 2005, 12(1): 38-45.
- [19] Guetard, G I. Toda C, Rivera-Díaz-del-Castillo P E J. Damage evolution around primary carbides under rolling contact fatigue in VIM-VAR M50 [J]. International Journal of Fatigue, 2016, 91: 59-67.
- [20] Hideyuki Uyama. The Mechanism of White Structure Flaking in Rolling Bearings [R]. Wind Turbine Tribology Seminar, 2011.
- [21] 蒋鲤平, 徐建飞, 王昆鹏, 等. 高碳铬 GCr15 轴承钢中镁铝夹杂物形成与控制工艺实践[J]. 特殊钢, 2022, 43(4): 41-45.
- [22] 车晓健, 杨卯生, 唐海燕, 等. 高性能 GCr15 轴承钢中夹杂物控制与疲劳性能[J]. 钢铁, 2018, 53(5): 76-85.
- [23] Cao Z X, Shi Z Y, Yu F, et al. A new proposed Weibull distribution of inclusion size and its correlation with rolling contact fatigue life of an extra clean bearing steel [J]. International Journal of Fatigue, 2019, 126: 1-5.
- [24] 王东跃, 夏佃秀, 何毅, 等. GCr15 轴承钢滚动接触疲劳失效分析[J]. 特钢技术, 2022, 28(1): 57-60+56.
- [25] 罗敏, 汪久根, 冯毅雄, 等. 含夹杂物轴承钢中裂纹的萌生与扩展[J]. 轴承, 2022(2): 11-16+22.
- [26] 吕皓天, 杨亮, 陈浩, 等. 轴承钢的长寿命化设计[J]. 轴承, 2022(2): 11-16, 22.
- [27] 付悍巍, 崔一南, 张弛, 等. 轴承钢滚动接触疲劳研究进展[J]. 中国冶金, 2020, 30(9): 11-23.
- [28] 刘焯, 尹青, 李锋, 等. 超长疲劳寿命轴承钢的质量评价[J]. 中国冶金, 2020, 30(9): 37-40.
- [29] 罗敏, 王久根. 非金属夹杂物对滚动接触疲劳裂纹萌生及扩展的影响[J]. 中国冶金, 2020, (6): 58-66.
- [30] 郭浩, 雷建中, 扈林庄, 等. 滚动轴承接触疲劳失效的影响因素及其研究现状[J]. 失效分析与预防, 2019, 14(3): 206-211.
- [31] Shi Z Y, Li J J, Zhang X D, et al. Influence mechanisms of inclusion types on rotating bending fatigue properties of SAE52100 bearing steel [J]. Materials, 2022, 15(14): 5037.
- [32] 陈金华, 李淑欣, 鲁思渊, 等. 轴承钢滚动接触疲劳亚表面夹杂处损伤分析[J]. 摩擦学学报, 2023, 30(9): 37-40.
- [33] Takeshi FUJIMATSU, Ryota MANABE. Advancement of research for quantitative prediction of rolling contact fatigue life [J]. Sanyo Technical Report, 2019, 26(1): 41-50.
- [34] 刘吉刚, 许晓红. 以抗疲劳性能提升为目标的高碳轴承钢质量改善[J]. 中国冶金, 2020, 30(9): 75-82.