

高碳轴承钢的纯净度控制及疲劳性能评价研究

江阴兴澄特种钢铁有限公司 华刘开,尹青,杨延辉,李锋,许晓红

【摘要】轴承钢纯净度控制主要是控制钢液中的夹杂物，本文研究了炉渣组成微调对于LF终点钢液中夹杂物的影响，确保了轴承钢的纯净和稳定。但目前普遍用来评价轴承钢纯净度和均质化程度的方法难以满足对超长疲劳寿命轴承钢的质量评估，本文提出了一种更科学直观地评判轴承钢的质量水平的方法。本文采用旋转弯曲疲劳、SEM+EDS、面扫等方法，研究了试验用100Cr6轴承钢的高周及超高周疲劳性能，以及传统疲劳极限附近的失效概率分布，并统计了夹杂物的成分、尺寸等信息。

【关键词】轴承钢，扫描电子显微镜，旋转弯曲疲劳、疲劳寿命

轴承钢是钢铁材料中的高技术产品，具有较高的疲劳强度和抗压强度，纯净并且均匀的组织使得其拥有高而均匀的硬度，是重大装备制造和国家重点工程建设所需要的关键材料。虽然轴承钢技术已经取得了较大的进步，冶金设备、工艺和生产流程与国外先进的轴承钢厂也基本一致，但由于各个钢厂在冶炼工艺、轧制控制工艺、自动化能力及操作水平等方面存在较大差距，导致在纯净度控制（氧含量、钛含量、有害元素含量及夹杂物尺寸与分布）、碳化物控制（网状碳化物、带状组织、碳化物尺寸及其分布）及低倍组织（中心疏松缩孔和成分偏析）等方面相差较大，而且目前常规的轴承钢质量的评估方法，很难满足对超高疲劳寿命轴承钢的质量评价。近年来的研究表明，钢铁材料，尤其是高强钢在传统疲劳极限之下，通过千万（ 10^7 ）循环周次后，仍会发生断裂失效。随着科技进步，如飞机、高铁、汽车等现代工业装备在服役期内的疲劳循环周次达到亿（ 10^8 ）次，甚至更高。而当前大部分零部件的疲劳设计是在千万（ 10^7 ）循环周次的基础上建立的，这会对装备的服役安全性产生很大的隐患。因此，今后很有必要开展零部件用高强钢在亿（ 10^8 ）循环次及以上条件下的疲劳性能研究工作，为未来更严格的疲劳设计提供试验数据。

1 轴承钢纯净度控制

对于需要长时间使用、单次核心零件更换间隔时间长，容易发生失效风险的往往是需要承受周期性重型载荷、长期旋转工作的零部件，如轴承、齿轴件等，而材料中的夹杂物是引起零件疲劳的重要原因之一。因此，必须在坯料生产阶段就要采取有效措施降低钢中夹杂物的含量。为了有效的检测并反馈产品的纯净度情况，并杜绝不满足要求的产品交付，兴澄特钢采用了金相显微镜夹杂物评级、扫描电镜-能谱 (SEM-EDS)、面分布扫描电镜、超声波探伤、夹杂物萃取、全氧分析等检测手段，定性-定量分析夹杂物的尺寸、数量、成分种类，进而结合冶炼工艺特点，追踪其来源，制定相应的改善措施。

图1所示为高碳轴承用钢GCr15试样经过一定压缩比热锻造后，材料试样电解得到的单个颗粒夹杂物，其主要组成为CaS，伴随少量其它Mg-Si质氧化物，结合其三维形貌特点和冶炼过程追溯，推断其形成机理和原因：

- 1) LF 精炼初始钢水S含量高于普通炉次；
- 2) LF 精炼前期钢水搅拌不充分，脱硫动力学条件不良；
- 3) LF 中后期脱硫产物CaS虽然尺寸达到 $30\ \mu\text{m}$ 以上，但钢液流动条件不良，在钢包-中间包-结晶器内此夹杂物颗粒未完全上浮去除；
- 4) LF顶渣对于钢中夹杂物的吸附能力不足，是可能的原因之一。

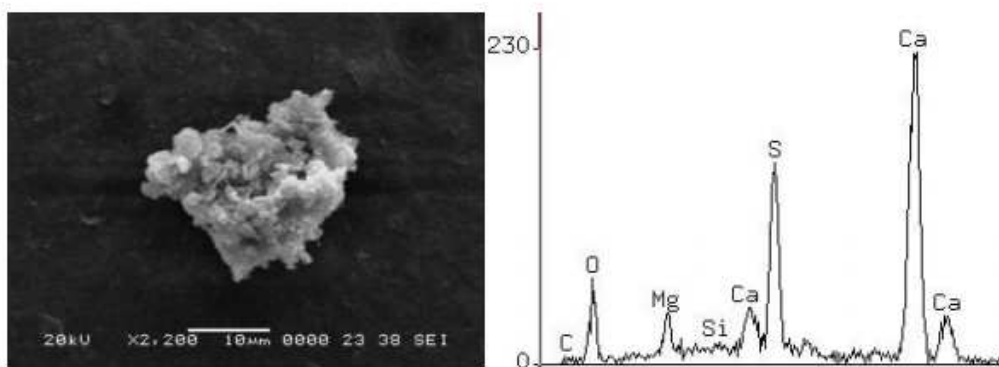


图 1 电解萃取后的 CaS 夹杂物
Fig. 1 CaS inclusion found with extraction

为了提高钢的纯净度，减少上述类型夹杂物的出现，冶炼部门进行了两组因素试验，考察炉渣组成微调对于LF终点钢液中夹杂物的影响。其中方案2为当时

正常使用的炉渣组成，用作试验比较，方案1、3为调整后的两组炉渣组成，在LF冶炼终点应用取样器在钢水中取饼状试样，分别编号1-4、2-4和3-4（4代表LF冶炼终点时刻）。试样经过自动制样、电镜面扫（50mm²）统计夹杂物的成分分布（图2-a示意图）、数量、尺寸（图2-b）和平均成分组成（图2-c）。由图2-c可知，LF炉渣调整后无论是方案1或方案3，夹杂物中S含量较方案2均有所下降，方案3中Ca含量较方案1高约12%；从夹杂物尺寸（图2-b）分布来看，方案1夹杂物无论是尺寸还是数量，明显优于方案2，方案3夹杂物数量少于方案2，但试样中检出了较方案2试样中更大的夹杂物（30~40 μm）。综合而言从钢的纯净度控制方面方案1炉渣优于方案3炉渣，较原用炉渣（方案3）效果更好，经过多炉试验反复验证，最终工艺调整炉渣微调至方案1组分，减少了图1类似夹杂物的出现率。在LF炉渣成分微调之后，对钢包吹氩所涉及的全过程进行系统梳理，稳定钢水在钢包内的流动、减少异常情况，确保了轴承钢的纯净和稳定（如图3所示全氧含量）。

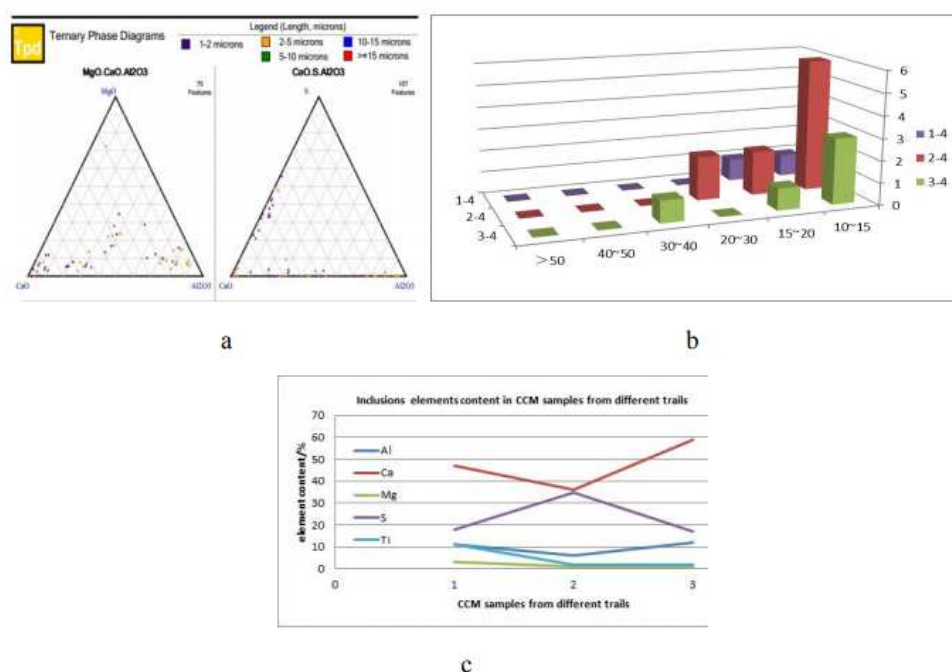


Fig. 2 试验夹杂物面扫结果 a.三元相图, b.夹杂物尺寸分布, c.夹杂物平均组分
Fig.2 Results from PSEM analysis a. ternary diagram, b. size distribution, c. overall composition

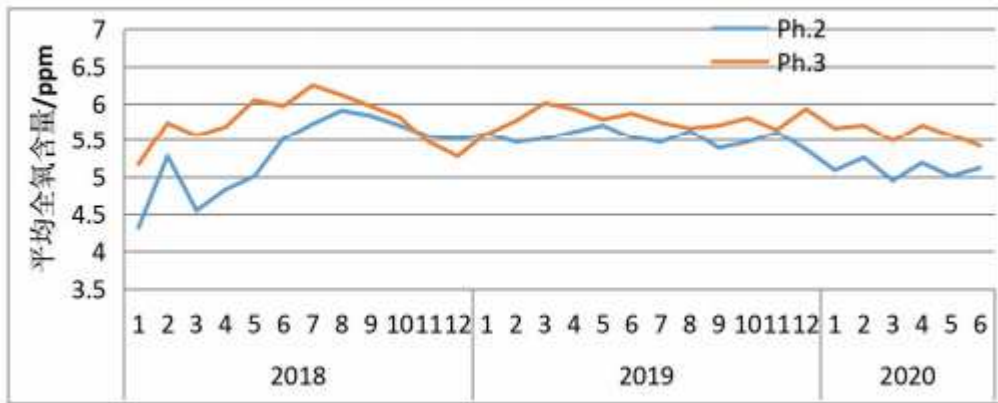


图 3 轴承钢分月平均全氧含量

Fig. 3 Monthly average total oxygen content of bearing steel

2 超长疲劳寿命轴承钢质量

前期的研究表明,在传统疲劳极限下,试样通过千万循环周次后,仍会断裂,且起裂源大多为内部夹杂物,只有极少数试样起裂源为表面划痕引起的晶体滑移带或表面夹杂物。所以钢材的纯净度是影响其疲劳寿命的主要因素。不过,从目前来看,未看到国内钢厂对轴承等关键零部件用钢的超高周疲劳性能研究的公开报道。本次研究了兴澄钢厂100Cr6轴承钢批量材的超高周疲劳性能,及在传统疲劳极限附近的失效概率分布情况。

2.1 旋转弯曲疲劳性能

2.1.1 试验材料与方法

试验用 100Cr6 轴承钢为 BOF+LF+RH 冶炼, $200 \times 200\text{mm}^2$ 连铸机成型,轧制成 $\phi 35\text{mm}$ 的圆棒。成品化学成分如表 1 所示。

表 1 试验钢的化学成分 /%

钢种	C	Si	Mn	P	S	Cr
100Cr6	0.98	0.36	0.45	0.021	0.010	1.58

试验用圆棒经球化退化后,掏取中心材加工成疲劳试样毛坯,再经淬回火后,精磨至最终尺寸,表面粗糙度 Ra 优于 $0.2 \mu\text{m}$ 。

旋转弯曲试验按照 GB/T4337-2015 标准进行,采用岛津 H7 型旋转弯曲疲劳

试验机，四点加力式，转速为 3000r/min，应力比 $R=-1$ 。将失效试样断口密封保存，切割后放置在乙醇溶液中超声波震荡，冲洗杂质，吹干后在 IT300 型扫描电镜下观察断口形貌，统计裂纹源成分及尺寸。在疲劳试样的夹持段切取 $\phi 15 \times 10\text{mm}$ （高），经镶嵌、磨抛后作为面扫试样，放入全自动夹杂物分析仪，检测横截面中夹杂物信息。

2.1.2 试验结果

图 4 为试验钢 100Cr6 经热处理后的微观组织，由表及里，组织类似，可见针状回火马氏体和弥散分布的碳化物。表面洛氏硬度为 62HRC。

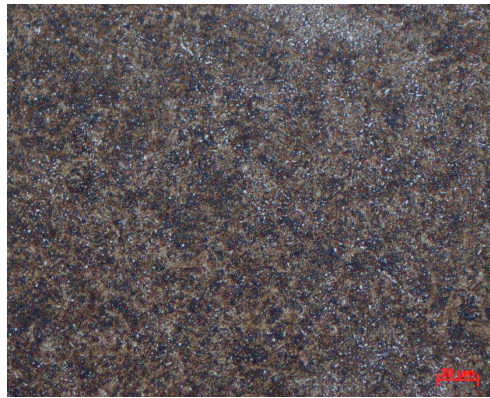


图 4 试验钢的微观组织

图 5 为试验钢 100Cr6 的非金属夹杂物的评级图，生产检验时 6 个试样的各类夹杂物最严重级别分别为 A 细：0.5；A 粗：0.5；D 细：0.5；D 粗：0.5，其余都为 0 级。可见，通过金相检验法，判定试验钢的纯净度较高。



图 5 试验钢中的夹杂物

图 6 为试验在 10^7 条件下的升降图，按照 GB/T24176-2009 计算传统的疲劳极限， $\sigma_{-1}=967\text{MPa}$ 。

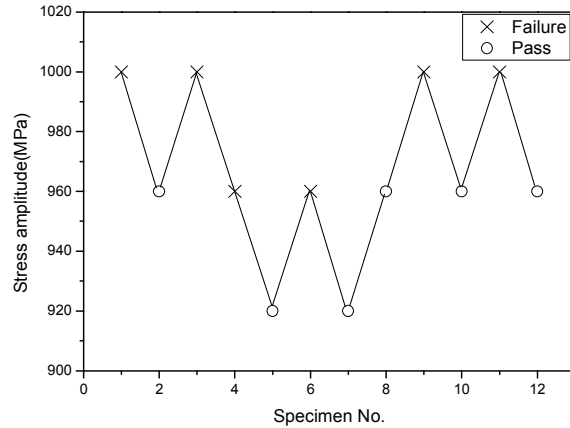


图 6 在 10^7 循环周次条件下的升降图

图 7 为试验钢 100Cr6 的旋转弯曲疲劳试验的 S-N 曲线。图中所采用的因夹杂物起裂数据，已剔除在同一应力幅值级别下由格布拉斯准则法判定为异常数据。可见，在传统疲劳极限上下的 980MPa 及 960MPa 应力幅值级别，有部分试样通过 10^7 循环周次后仍发生疲劳断裂。

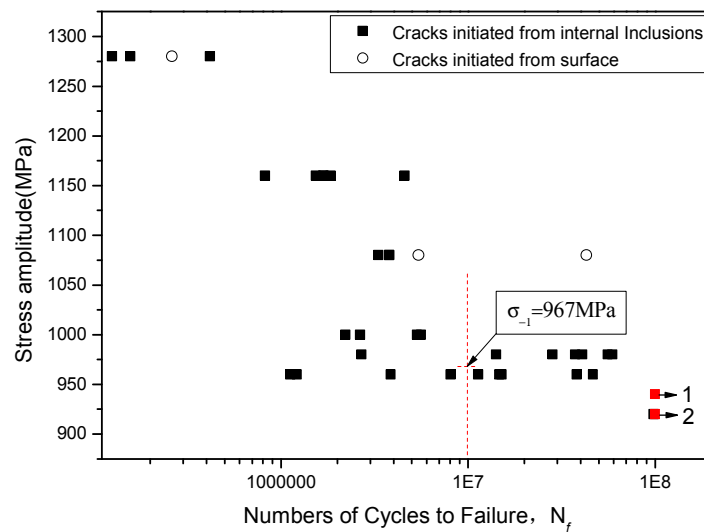


图 7 在 10^8 循环周次条件下的中值 S-N 曲线

2.1.3 分析与讨论

从图 7 可以发现，试样大多从内部夹杂物起裂，只有少量试样在高应力幅值下起裂于表面，这与疲劳试样高质量的表面处理有关，其经细砂轮磨削后，再经 2000 目砂纸纵向打磨，及绒布旋转抛光。另外，在传统疲劳极限附近，全部试样

从内部（含近表面）夹杂物处起裂。这可能是应力降至传统疲劳极限附近时，试样表面因滑移而造成的挤入挤出机制受到抑制。因而，由内部夹杂物引起的应力集中成为裂纹起源的主要原因。

当前共识，夹杂物的控制水平直接影响特种钢材的使用寿命和疲劳性能。即夹杂物尺寸越小，试样使用寿命越长，疲劳性能越好。通过统计失效断口中的起裂源夹杂物的尺寸信息，也验证了这点，如图 8 所示。试验钢 100Cr6 呈现疲劳寿命随着夹杂物尺寸增大而降低的大致趋势。

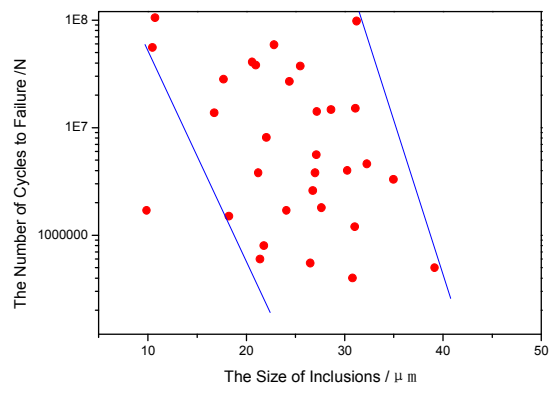


图 8 疲劳寿命与夹杂物尺寸的关系

起裂源夹杂物的尺寸分布如图 9 所示，显示尺寸大小主要分布在 20~35 μm 区间，按 D_s 类夹杂物评级属于 1~2 级，其代表了在试样平行段内较大夹杂物的尺寸大小。通过扫描电镜所配能谱仪 EDS 分析起裂源夹杂物成分，主要为 Al-Ca-Mg 复合氧化物，及少量的 Mg-Al 夹杂物、Al-Ca 铝酸钙、含 Ti 析出物。其属于 D 和 D_s 类夹杂物，质地较硬，其典型形貌如图 10 所示。

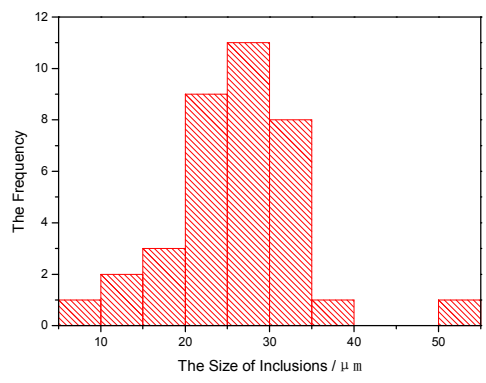
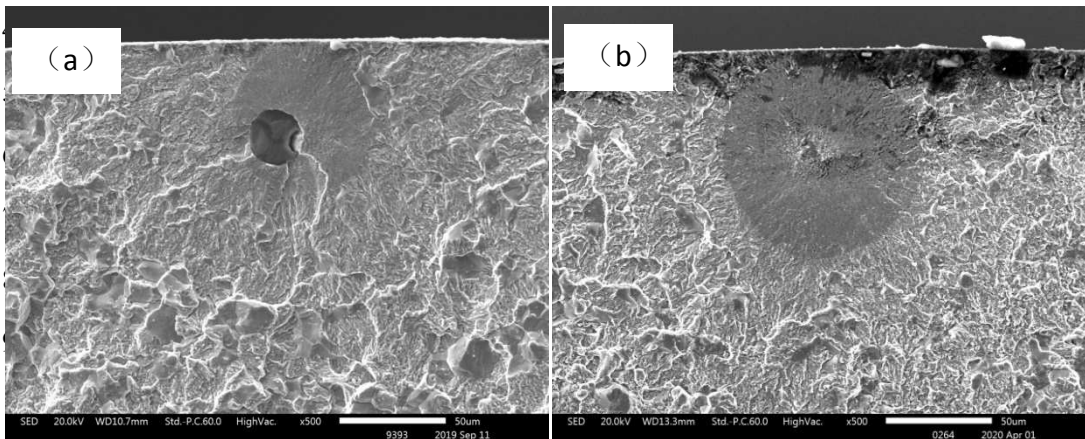


图 9 夹杂物尺寸分布图



(a) Al-Ca-Mg 复合氧化物 (b) 含 Ti 析出物

图 10 夹杂物形貌

疲劳试样夹持段横截面的面扫结果显示：MnS，CaS，硅酸盐等压缩比较大的夹杂物占比 80.5%，其余为 Al-Ca-Mg 复合氧化物等刚性夹杂物，如表 2 所示。横向视角下，尺寸 $\leq 10\mu\text{m}$ 的夹杂物占比 99.1%。可以发现，即使金相检验和 SEM 面扫分析显示试验钢 100Cr6 纯净度较高，但是通过旋转弯曲疲劳方法仍能发现尺寸较大且不易变形的刚性夹杂物，其对疲劳强度有较大的降低作用。

表 2 夹杂物类别占比汇总

检测方法	夹杂物类别占比/%				
	高压缩比的 MnS, 硅酸盐等	Al-Ca-Mg 复合氧化物	Mg-Al 夹杂物	Ca-Al 铝酸钙	含 Ti 析出物
疲劳+EDS	-	83.2	5.6	5.6	5.6
SEM 面扫	82.1	8.4	5.7	0.5	3.3

在研究疲劳寿命的随机分布规律时，过去常采用对数正态分布模型。但在传统疲劳极限附近，一些试样可能失效，而另一些试样不失效，分布的形状常会是不对称的，这时对数正态分布已不适合。标准 GB/T24176-2009 指出：对于具有长寿命特征的样本，有时可采用威布尔分布。只有确定了样本疲劳寿命符合何种分布，才能较准确地预测在给定失效概率 P 下的疲劳寿命，工件才能更安全地服役。

试验钢 100Cr6 的传统中值疲劳极限为 967MPa，其在 960MPa 和 980MPa 应力幅值级别下的失效概率分布如图 11 所示。可见，在同一应力幅值下，疲劳寿命

更符合二参数威布尔分布。相比于 980MPa 应力幅值，960MPa 应力幅值下的拟合曲线斜率较小，代表数据较分散。因此，要保证结果的可靠性，选取的应力幅值越小，选用的试验样本数就该越大。

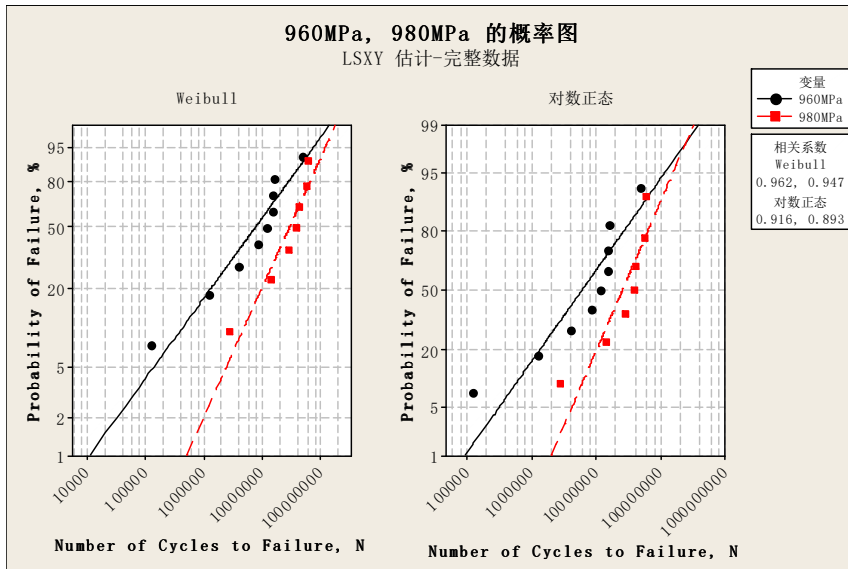


图 11 各条件下失效概率分布图

2.2 滚动接触疲劳性能

兴澄公司滚动接触疲劳采用推力接触条件，按照JB/T 10510《滚动轴承零件接触疲劳试验方法》规定进行试验，试验载荷选用4.5 GPa，试验机转速 $\geq 2000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ，润滑介质为N32机油。图12为不同时期兴澄公司生产轴承钢接触疲劳寿命的对比试验，不仅反映了项目进展过程中轴承钢滚动接触疲劳性能的逐步提升（滚动接触疲劳性能L10从2009年约 0.5×10^7 次提高到了2019年的全面大于 2×10^7 次），也证明了材料纯净度和均质化程度的提升能够较大地提升轴承钢疲劳性能。

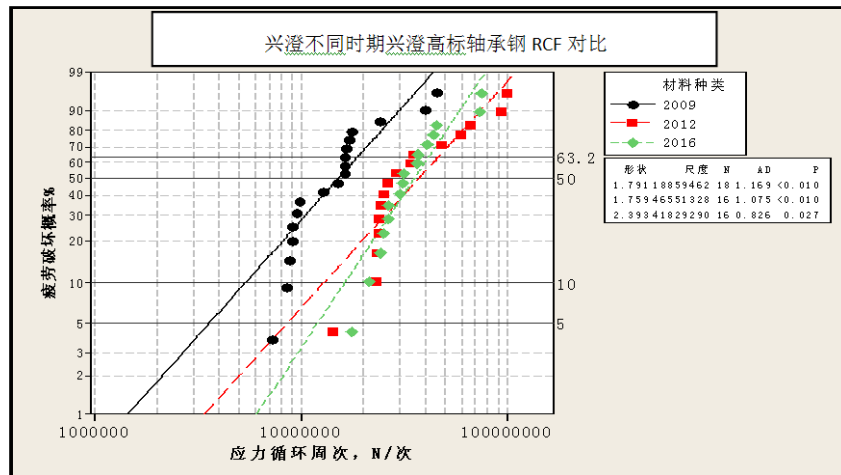


图12 不同时期兴澄公司轴承钢疲劳寿命对照

3 结论

1) 对 LF 炉渣成分进行合理的微调，可以有效的提高轴承钢的纯净度和稳定性；

2) 试验钢 100Cr6 在传统疲劳极限下，通过 107 循环周次后，仍会出现疲劳断裂失效，而非无限寿命；

3) 在整个应力幅值范围，试验钢 100Cr6 只在中高应力幅值下，出现部分试样因表面晶体滑移而起裂的情况；在传统疲劳极限附近，全部为内部夹杂物起裂；

4) 试验钢 100Cr6 经旋转弯曲疲劳试验断裂后，经 SEM+EDS 检测分析发现，起裂源夹杂物主要为 Al-Ca-Mg 复合氧化物，及少量的 Mg-Al 夹杂物、Al-Ca 铝酸钙、含 Ti 析出物，属于 D 和 Ds 类夹杂物，都为刚性夹杂物；

5) 传统疲劳极限 $\sigma_{-1}=967\text{MPa}$ ，在其上下的应力幅值 980MPa 和 960MPa 的条件下，相比于正态分布，疲劳寿命更符合二参数威布尔分布。而且，相比于 980MPa 应力幅值条件下，在 960MPa 应力幅值下的拟合曲线斜率较小，即疲劳寿命数据较分散。为了获得更高的可靠度，需要更多的试样样本。

【参考文献】

- [1]张继明, 杨振国, 张建锋, 李广义, 李守新, 惠卫军, 翁宇庆. 金属学报, 2005; 41: 145.
- [2] 洪友士, 赵爱国, 钱桂安. 合金材料超高周疲劳行为的基本特征和影响因素[J]. 金属学报, 2009, 45(7):769-780.
- [3] 李永德, 张莉莉, 张冲, 等. SUJ2 轴承钢超长寿命疲劳行为研究[J]. 材料工程, 2016, 44(8):85-92.
- [4] 周超, 张永健, 惠卫军, 等. 氢对 42CrMoVNb 钢超高周疲劳性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2013, 25(12):52-57.
- [5]史智越, 许海峰, 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.
- [6] Murakami Y, Yokoyama N N, Nagata J. Mechanism of fatigue failure in ultra-long life regime [J]. Fatigue Fracture Engineering Materials Structure, 2002, 25(8-9): 735-746.
- [7] Stanzi S E, Tschegg E K, Mayer H. Lifetime measurements for random loading in the very high cycle fatigue range [J]. International Journal of Fatigue, 1986, 8(4): 195-200.