



机器人谐波减速机柔性轴承用钢的超高 旋转弯曲疲劳强度的研究

刘 焯, 桂煜琳, 尹 青, 吴小林, 缪新德
(江阴兴澄特种钢铁有限公司研究院, 江阴 214429)

摘 要: 采用电弧炉生产工艺, 控制废钢/铁水比为 80% 以上, 开发出长寿命机器人谐波减速机柔性轴承用钢, 从非金属夹杂物、奥氏体晶粒度、碳化物带状组织方面对比柔性轴承用和传统滚动轴承用钢的冶金质量, 并利用旋转弯曲疲劳试验的方法测试柔性轴承用和传统滚动轴承用钢在 10^7 循环周次条件下的疲劳强度。机器人谐波减速机柔性轴承用钢的 $w[\text{O}] < 0.0004\%$, $w[\text{Ti}] < 0.001\%$, A 类硫化物类非金属夹杂物 ≤ 1.0 级, B 类和 D 类氧化物类非金属夹杂物 ≤ 0.5 级, 极值统计法预测最大球状夹杂物的尺寸 $< 30 \mu\text{m}$, 检验结果表明柔性轴承用钢具备超高纯净度。通过在冶炼过程增加 Al 和 N 的元素含量, 柔性轴承用钢具有 10 级的奥氏体晶粒度, 远高于传统滚动轴承用钢的 8.5 级晶粒度。通过延长高温扩散时间, 7.1 和 7.2 级别的碳化物带状组织占比要高于传统滚动轴承用钢, 超高晶粒度和碳化物带状组织的带宽减小表明柔性轴承用钢具备超高组织均匀性。柔性轴承用钢在 10^7 循环周次条件下具有超高旋转弯曲疲劳强度为 1 016 MPa, 疲劳寿命略高于传统滚动轴承用钢。

关键词: 谐波减速机; 柔性轴承; 晶粒度; 非金属夹杂物; 旋转弯曲疲劳; 超高周疲劳性能

DOI: 10.20057/j.1003-8620.2023-00142 **中图分类号:** TG142.1

Research on Ultra-high Rotary Bending Fatigue Strength of Flexible Bearing Steels for Robot Harmonic Speed Reducer

Liu Ye, Gui Yulin, Yin Qing, Wu Xiaolin, Miao Xinde
(R&D Institute, Jiangyin Xingcheng Special Steel Works Co., Ltd., Jiangyin 214429, China)

Abstract: The flexible bearing steel with long fatigue life using for robot harmonic speed reducer has been successfully developed by applying EAF process technology. The ratio of scrap to hot metal was controlled more than 80%. This paper compared the metallurgical quality of flexible bearings and traditional rolling bearings in terms of non-metallic inclusions, austenite grain size and carbide banding structure, the fatigue strength of steel used for flexible bearing and traditional rolling bearing under 10^7 cycles was tested by the method of rotary bending fatigue test. The O content of steel used for flexible bearings of robot harmonic reducer was less than 0.0004%, the Ti content was much less than 0.001%, non-metal inclusions of class A sulfide ≤ 1.0 grade, non-metal inclusions of class B and D oxide ≤ 0.5 grade. The size of the maximum spherical inclusion was less than 30 μm . The test results show that the flexible bearings have ultra-high purity. By increasing Al and N chemical composition in the smelting process, the austenite grain size was 10 grade in the flexible bearing steel, much higher than 8.5 grade in the traditional rolling bearing steel. The proportion of carbide banding structure of 7.1 and 7.2 grade was higher than that of traditional bearing steel in the means of extending the high temperature diffusion time. The ultra-high austenite grain size and the decrease of the width of carbide banding structure showed that the flexible bearing steel had an ultra-high structure uniformity. In addition, the rotary bending fatigue strength of the flexible bearing steels was 1 016 MPa, its fatigue life was slightly higher than that of the traditional rolling bearing steels.

Key Words: Harmonic Speed Reducer; Flexible Bearing Steel; Grain Size; Non-metallic Inclusions; Rotary Bending Fatigue; Ultra-high Cycle Fatigue

工业机器人智能制造具有高稳定性、高可靠性、可以代替重复机械式的人工操作等优势, 已经成为制造业发展的新趋势。工业机器人依靠减速机的传动技术将输入端的高功率转变为输出端的低功率, 以保证制造过程的平稳运行, 因此, 减速机是决定机器人质量的最关键核心部件。与 RV 减速机的传统齿轮传动技术相比, 谐波传动是在弹性薄

壳理论上形成的一种具有突破性的柔性传动新技术^[1], 谐波减速机也因其高精度、大传动比、传动效率高、体积小、重量轻等特点, 广泛应用于汽车制造、精密数控机床、半导体生产设备、航空航天等高端制造领域。

谐波减速机由凸轮、柔性轴承、柔轮和钢轮组成, 如图 1 所示。虽然组成简单, 但是这四个零部件

的设计较为复杂,凸轮和柔性轴承构成减速机中固定的传动发生器,柔轮和钢轮分别作为主动件和从动件,柔性轴承、柔轮和钢轮在非受力状态下截面形状均为圆形,柔轮的内径略小于柔性轴承的外径,钢轮的内齿数略大于柔轮的外齿数,一般为2左右^[2],钢轮和柔轮的齿数差为谐波减速机输入轴与输出轴之间的传动减速比。凸轮装配在柔性轴承的内圈,由于凸轮的椭圆形形状,导致柔性轴承具有长、短轴。在长轴一端,柔轮的外齿与钢轮的内齿完全啮合,而在短轴一端,柔轮的外齿与钢轮的内齿完全分离,其他部分处于部分啮合状态,在运转过程中柔轮始终在弹性变形范围内做椭圆形形变,通过柔轮的外齿和钢轮的内齿之间的啮合状态不断改变实现动力的传递^[3-4]。

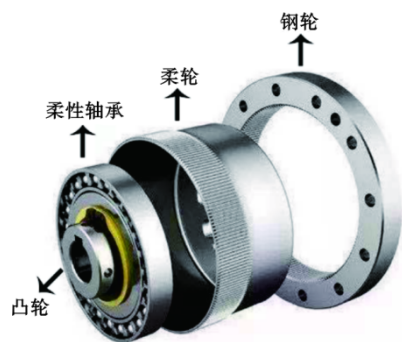


图1 谐波减速机的组成

Fig. 1 Composition of the harmonic speed reducer

传统滚动轴承的服役条件恶劣,不仅需要承受连续的静载荷作用力,还要承受循环的动载荷作用力^[5],为保证“长寿命”的要求,对高端轴承钢提出低氧含量、高纯净度、高的组织均匀性等要求^[6]。由于凸轮具有长、短轴的特征,导致柔性轴承在运行过程中发生一定的形变,使得柔轮的内齿在长轴方向上与钢轮的外齿完全啮合,造成柔性轴承在运转过程中受力的方向不断发生变化,容易产生应力集中,发生疲劳失效。因此,柔性轴承除必须要满足传统滚动轴承的高强度、高硬度、高耐磨性的要求外,还必须具备超高的纯净度、较高的碳化物组织均匀性、较高的奥氏体晶粒度和较长的疲劳寿命,疲劳性能是评价柔性轴承质量高低的最关键因素。

随着全球气候的变化和环境污染问题的日益严重,绿色、低碳已经成为全球关注的热点,兴澄特种钢铁有限公司开发的传统滚动轴承用100Cr6超纯净轴承钢已绝大部分取代了电渣重熔、模铸产

品,提高了生产效率并降低了生产成本。在传统滚动轴承用超纯净轴承钢的开发基础上,从初炼过程开始优化真空冶炼工艺,通过提高废钢/铁水比来减少碳排放,成功开发出采用电弧炉(EAF)+炉外精炼炉(LF)+真空脱气炉(VD)+连铸(CCM)+轧制工艺生产的机器人谐波减速机柔性轴承用钢。采用旋转变形的试验方法研究柔性轴承用钢和传统滚动轴承用100Cr6超纯净轴承钢在 10^7 循环周次的条件下的疲劳强度,从非金属夹杂物、晶粒度、碳化物带状组织和疲劳性能的角度表征谐波减速机柔性轴承用钢的冶金质量,并与传统滚动轴承用100Cr6超纯净轴承钢进行冶金质量的对比。

1 试验材料及方法

研究对象为机器人谐波减速机柔性轴承用钢和传统滚动轴承用超纯净轴承钢,两种轴承钢的钢牌号均为100Cr6,1#柔性轴承用钢的生产工艺为EAF(100 t)+LF(100 t)+VD(100 t)+CCM(连铸坯尺寸为300 mm×340 mm)+轧制成材,2#传统滚动轴承用钢的生产工艺为铁水预处理+转炉(BOF, 100 t)+LF(100 t)+真空脱气炉(RH, 100 t)+CCM(连铸坯尺寸为390 mm×510 mm)+轧制成材,两种100Cr6轴承钢的成品尺寸均为 $\phi 120$ mm。1#柔性轴承用钢在EAF采用80%以上的废钢/铁水比,2#传统滚动轴承用钢采用兴澄的转炉超纯净轴承钢的冶炼工艺,两种100Cr6轴承钢在轧制前均进行高温扩散过程,高温扩散温度均为 $(1\ 240\pm 20)^\circ\text{C}$,1#柔性轴承和2#传统滚动轴承用钢的高温扩散时间分别为10 h和8 h左右。传统超纯净轴承钢冶炼,采用优质铁水并且废钢/铁水比低于10%,因为废钢中有害元素可能会引起轴承钢中残余有害元素的含量偏高,且废钢中的杂质可能在冶炼过程中去除不干净,产生大颗粒非金属夹杂物,影响轴承钢的疲劳寿命。1#柔性轴承和2#传统滚动轴承用100Cr6钢的化学成分见表1,化学成分的检验方法依据GB/T 4336—2016,0含量的检测依据GB/T 11261—2006。

1#柔性轴承和2#传统滚动轴承用100Cr6轴承钢的冶炼过程均采用超低S含量控制,熔炼的 $w[\text{S}]\leq 0.000\ 5\%$,熔炼的 $w[\text{Ti}]\leq 0.001\ 0\%$,且成品 $w[\text{O}]\leq 0.000\ 5\%$,化学成分的特性已达超高洁净度水平,满足GB/T 38885—2020中对超高洁净高碳铬轴承钢的要求。在传统超纯净轴承钢的冶炼中,为控制轴承钢中非金属夹杂物的数量和尺寸,Al元素含量一定低控,不会

表1 1#柔性轴承和2#传统滚动轴承用钢的化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of 1# flexible and 2# traditional rolling bearing steels

材料	用途	生产工艺	C	Si	Mn	S	P	Cr	Al	N	Ti	O
1#	柔性轴承	EAF-LF-VD-CCM-轧制	0.97	0.31	0.35	0.000 5	0.012	1.51	0.021	0.005 8	0.000 5	0.000 35
2#	传统滚动轴承	BOF+LF+RH-CCM-轧制	0.99	0.31	0.34	0.000 3	0.013	1.46	0.016	0.002 2	0.001 0	0.000 46

额外添加 Al 含量。

在两种 100Cr6 轴承钢棒材的 1/2R 半径处检验非金属夹杂物、奥氏体晶粒度和碳化物不均匀性。首先按照 GB/T 10561—2005 标准进行非金属夹杂物的评级,检验样品数量为 6 个,其次采用 ASTM E 2283—2019 标准中极值统计法(Extreme value analysis, EVA)方法^[7]评价两种轴承钢中非金属夹杂物,EVA 的方法是基于 Gumbel 函数分布,预测钢中最大非金属夹杂物的尺寸,从而评价微观纯净度,检测样品数量为 24 个,检测面积(S_0)为 30 mm²,若检验数据可以满足一定的线性关系,则在 95% 置信区间中的数值能较好代表钢中最大非金属夹杂物的尺寸。奥氏体晶粒度和碳化物不均匀性的检验标准分别遵循 GB/T 6394—2017 和 SEP 1520—1998 标准。

为验证轴承钢冶金质量对旋转弯曲疲劳强度的影响,在轴承钢棒材的 1/2R 半径处加工旋转弯曲疲劳试样,采用岛津 H7 型旋转弯曲疲劳试验机,按照 GB/T 4337—2015《金属材料 疲劳试验 旋转弯曲方法》标准进行旋转弯曲疲劳试验^[8],在 IT300 型扫描电镜下进行失效分析。

2 试验结果与分析

2.1 非金属夹杂物

1#柔性轴承和2#传统滚动轴承用钢的非金属夹杂物的评级见表2,评级方法依据GB/T 10561—2005,评级结果显示:1#和2#轴承钢中均以塑性硫化物和氧化物型非金属夹杂物为主,A类细型夹杂物的尺寸控制 ≤ 1.0 级,未发现A类粗型夹杂物,B类细型夹杂物 ≤ 0.5 级,未发现B类粗型夹杂物,D类和DS类夹杂物 ≤ 0.5 级,均未发现硅酸盐类夹杂物。1#和2#轴承钢均具有超高纯净度水平,夹杂物评级方面未有明显差异。

采用EVA的方法预测1#柔性轴承和2#传统滚动轴承用钢中最大球状夹杂物的尺寸,如图2所示。检测的24个样品中,1#柔性轴承和2#传统滚动轴承用钢中球状夹杂物的尺寸均小于19 μm ,符合表2中1#和2#轴承钢的DS非金属夹杂物 ≤ 0.5 级,并且试

表2 1#柔性轴承和2#传统滚动轴承用钢的非金属夹杂物评级/级

Table 2 Rating of non-metallic inclusions in 1# flexible and 2# traditional rolling bearing steels / rating

材料	A		B		C		D		DS
	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	
1#	0	0.5	0	0.5	0	0	0.5	0.5	0.5
	0	0.5	0	0.5	0	0	0	0.5	0
	0	1.0	0	0	0	0	0	0.5	0
	0	0.5	0	0	0	0	0.5	0.5	0.5
	0	1.0	0	0	0	0	0.5	0.5	0
	0	0.5	0	0.5	0	0	0.5	0.5	0.5
2#	0	1.0	0	0	0	0	0.5	0.5	0
	0	1.0	0	0.5	0	0	0.5	0.5	0.5
	0	0.5	0	0.5	0	0	0.5	0.5	0.5
	0	0.5	0	0.5	0	0	0.5	0.5	0.5
	0	1.0	0	0	0	0	0.5	0.5	0
	0	0.5	0	0.5	0	0	0.5	0.5	0

验采集的球状夹杂物的尺寸数据满足线性分布,所有数据均在95%的置信区间中,EVA方法预测的1#柔性轴承和2#传统滚动轴承用钢中最大球状夹杂物的尺寸均在30 μm 左右,柔性轴承用钢中最大球状夹杂物尺寸的预测值稍小。

2.2 奥氏体晶粒度

1#柔性轴承和2#传统滚动轴承用钢的奥氏体晶粒度的对比如图3所示,均采用GB/T 6394—2017中检验高碳铬轴承钢奥氏体晶粒度的直接淬硬法。图3(a)中柔性轴承用钢的奥氏体晶粒度可以达到10级,图3(b)为传统滚动轴承用钢的奥氏体晶粒度,可以达到8.5级,柔性轴承用钢的晶粒度较高,完全满足谐波减速机柔性轴承的要求。

扫描电镜下观察1#柔性轴承和2#传统滚动轴承用钢中AlN析出物的对比,如图4所示。1#柔性轴承用钢可以明显观察到纳米级的AlN析出物,呈弥散状分布,AlN析出相的尺寸为85 nm左右。2#传统滚动轴承用钢中也能发现AlN析出物,但是AlN析出物的尺寸在200 nm左右,且数量较少。

2.3 碳化物不均匀性

金相显微镜下轴承钢中典型的碳化物带状组

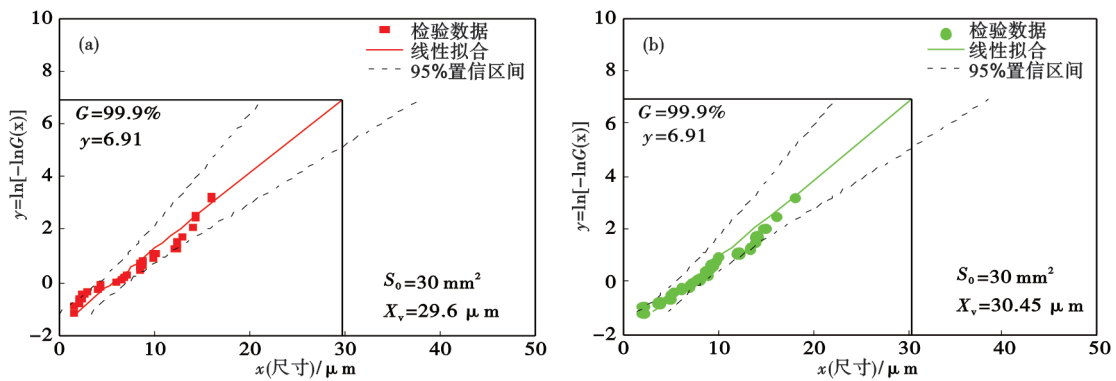


图2 EVA方法预测轴承用钢中最大球状夹杂物的尺寸:(a)1#柔性轴承,(b)2#传统滚动轴承

Fig. 2 The size of maximum spherical inclusions in bearing steel is predicted by EVA method: (a) 1# flexible bearing, (b) 2# traditional I rolling bearing

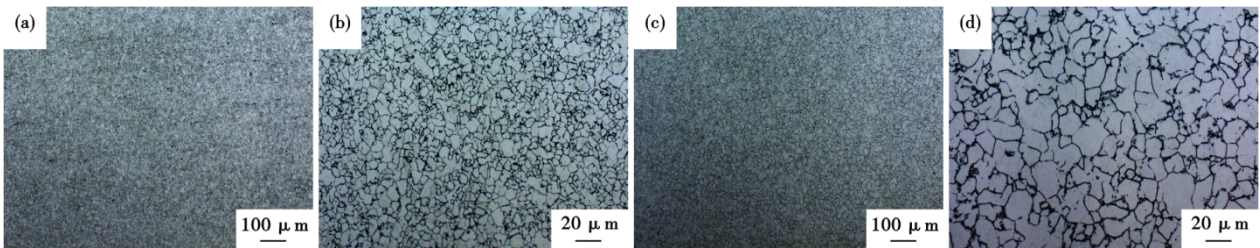


图3 轴承用钢的奥氏体晶粒度:(a,b)1#柔性轴承;(c,d)2#传统滚动轴承

Fig. 3 Austenitic grain size of bearing steel: (a, b) 1# flexible bearing; (c, d) 2# traditional rolling bearing

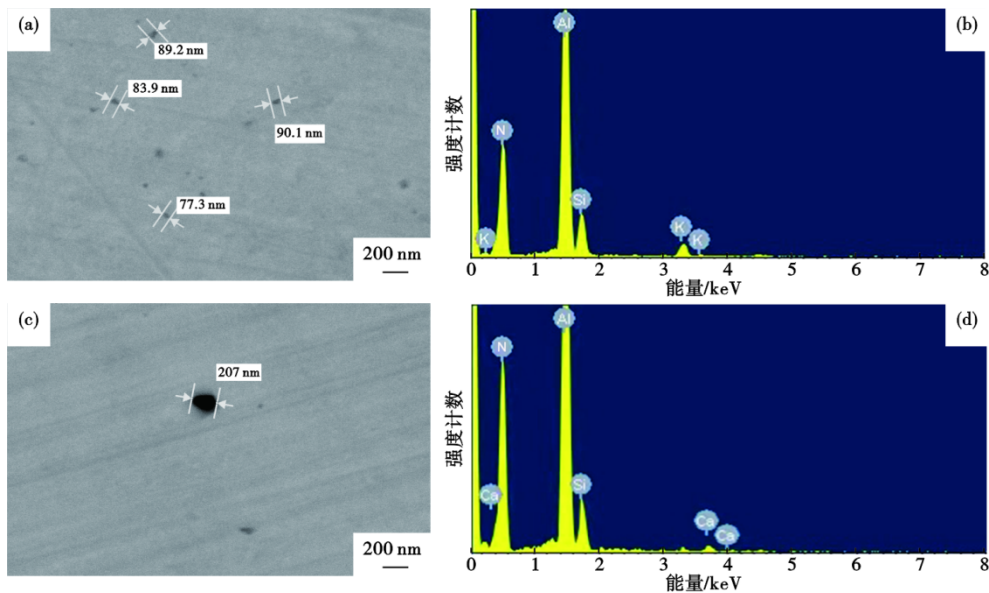


图4 轴承用钢中的AlN析出物:(a,b)1#柔性轴承;(c,d)2#传统滚动轴承

Fig. 4 AlN precipitates of bearing steel: (a, b) 1# flexible bearing; (c, d) 2# traditional rolling bearing

织形貌如图5所示,图5(a)中碳化物带状评级为7.2级,图5(b)中碳化物带状的评级为7.4级。1#柔性轴承和2#传统滚动轴承用钢关于碳化物带状的100炉检验数据对比如图6所示,柔性轴承用钢中7.1~7.4级别的碳化物带状组织在100炉中的占比分别为

10%、30%、55%和5%,而传统滚动轴承用钢中各级别的占比为2%、18%、68%和12%。对比柔性轴承和传统滚动轴承用钢碳化物带状组织的检验数据,可以明显看出:柔性轴承和传统滚动轴承用钢的碳化物带状组织均 ≤ 7.4 级,评级结果集中在7.3级,由

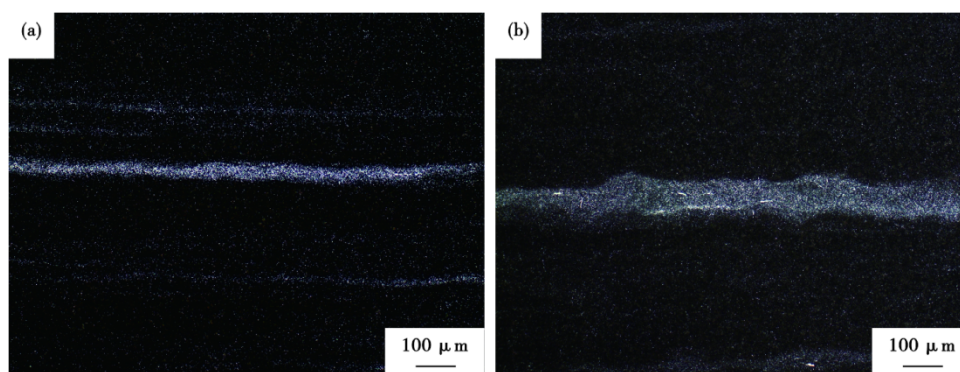


图5 轴承钢中典型碳化物带状的显微组织:(a)7.2级,(b)7.4级

Fig. 5 Typical carbide banding microstructure in the bearing steels: (a) 7.2 grade, (b) 7.4 grade

于柔性轴承经过 ≥ 10 h的高温扩散,高温扩散时间较长,100炉碳化物带状评级结果中7.1和7.2级别的占比增加,明显高于传统滚动轴承用钢,7.4级别的占比减少了7%。说明柔性轴承用钢经过长时间的高温扩散过程,碳化物带状组织的带宽有一定减小。

2.4 旋转弯曲疲劳

1#柔性轴承和2#传统滚动轴承的旋转弯曲疲

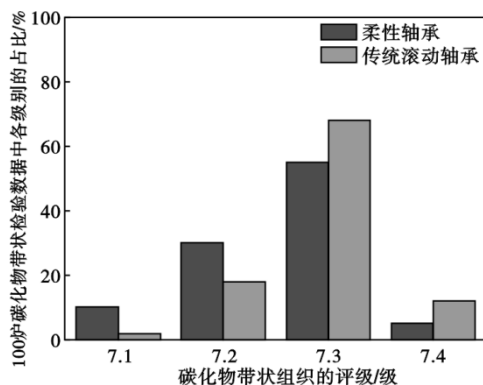


图6 1#柔性轴承和2#传统滚动轴承用钢的碳化物带状的100炉检验数据对比

Fig. 6 Comparison of 100 heats test data of carbide banding structure in the 1# flexible and 2# traditional rolling bearing steels.

劳试样的微观组织形貌如图7所示,经过淬火和回火热处理后,淬火工艺为:850 °C保温30 min,油冷,回火工艺为:200 °C保温3 h,空冷。微观组织由回火马氏体和粒状碳化物弥散分布,组织中含有少量残余奥氏体,1#柔性轴承用钢的洛氏硬度为63.8HRC,2#传统滚动轴承用钢的洛氏硬度为62.5HRC,完全满足滚动轴承对轴承钢的硬度要求,1#柔性轴承用钢因具有10级奥氏体晶粒度,因此,具有稍高的硬度,从侧面反应柔性轴承的耐磨性更高。

在 10^7 循环周次条件下1#柔性轴承和2#传统滚动轴承用钢的旋转弯曲疲劳试验的升降图如图8所示,根据升降图可以初步粗略估计两种超纯净轴承钢的疲劳极限均为1 000 MPa左右。图9为1#柔性轴承和2#传统滚动轴承用钢的S-N曲线图,其中水平直线代表疲劳极限,根据在低应力区间的升降曲线(图8)获得。图9中右下角箭头所指代的数字含义为:在该应力级别下,通过规定的循环周次(10^7)的样品数量;斜线由成组法在高应力区间获得。最后按照GB/T 24176—2009计算的两种超纯净轴承钢的疲劳极限 σ_{-1} ,采用EAF生产、VD真空脱气的1#柔性轴承用钢的疲劳极限为1 016 MPa,采用BOF生产、RH真空脱气的2#传统滚动轴承用钢的疲劳极

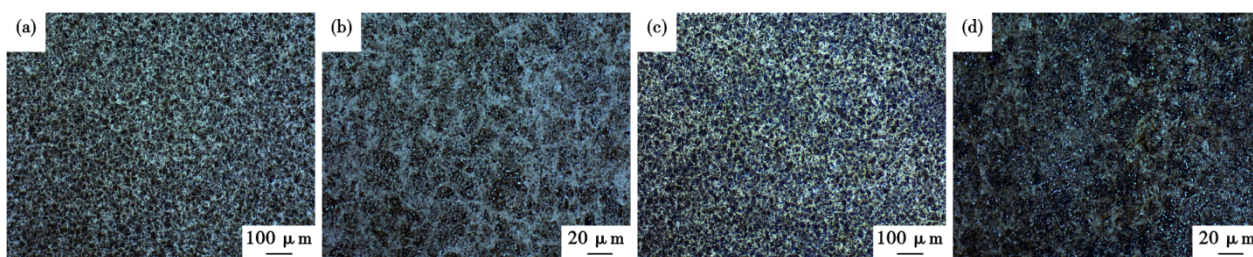


图7 轴承用钢的金相显微组织:(a,b)1#柔性轴承;(c,d)2#传统滚动轴承

Fig. 7 Metallurgical microstructure of bearing steel: (a, b) 1# flexible bearing; (c, d) 2# traditional rolling bearing

限略低,为 1 004 MPa。

2.5 旋转弯曲疲劳的失效分析

1#柔性轴承和 2#传统滚动轴承用钢的 S-N 曲线如图 9 所示,只有极其个别试样是在高应力级别下起裂于表面,如图 9 中箭头标识,断裂源处未发现非金属夹杂物,大部分均是由于表面和近表面的夹杂物造成的旋转弯曲疲劳失效。

经过扫描电镜观察,夹杂物从形态上可以分为块状夹杂物和球状夹杂物,块状夹杂物主要有 TiN 和 MnS,球状夹杂物主要分为纯氧化物和氧硫化物,纯氧化物一般为铝酸钙成分,由 Al₂O₃ 和 CaO 组成,并含有少量的 MgO,可能还有微量的 SiO₂,氧硫化物为复合型夹杂物,成分上在常规的铝酸钙的基础上,含有 CaS,可能还有少量的 MnS。图 10 统计了造成 1#柔性轴承和 2#传统滚动轴承用钢发生疲劳断裂的夹杂物类型、形态、尺寸和距表面距离,图 11(a) 为柔性轴承用钢中发现的块状 MnS 夹杂,在传统滚动轴承用钢中发现 TiN 夹杂,如图 11(b) 所示,多数轴承钢的旋弯疲劳断口处以球状夹杂物为主,形貌

和类型如图 12 所示。图 13 可以明显看出柔性轴承用钢中球状夹杂物的尺寸略小于传统滚动轴承用钢中球状夹杂物的尺寸。

3 讨论

通过铁水预处理的工艺,采用优质铁水,严格控制废钢质量并降低废钢/铁水比,开发出采用铁水预处理+BOF+LF+RH+CCM+轧制工艺生产传统滚动轴承用超纯净 100Cr6 轴承钢, w[O] < 0.000 5%, 采用极值统计法预测轴承钢中最大球状夹杂物的尺寸小于 31 μm, 在 10⁷ 循环周次条件下,超纯净轴承钢具有超过 1 000 MPa 的超高疲劳强度。在超纯净轴承钢冶炼工艺的基础上,通过提高废钢/铁水比、化学成分的改进、电炉真空冶炼工艺的优化、以及长时间高温扩散等方法,形成以电炉超高废钢/铁水比为特色的超纯净冶炼工艺,生产出的机器人谐波减速机柔性轴承用钢满足较高纯净度、较高晶粒度、较高组织均匀性和长寿命的使用特性。

由于渗碳钢通常需要控制 Al/N 比和进行高温轧制来控制奥氏体晶粒度^[11-12],轧制温度一般高于

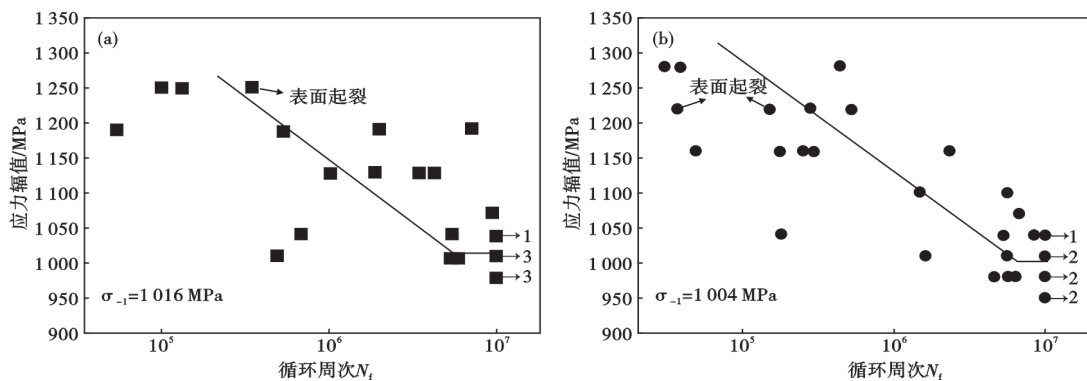


图 8 在 10⁷ 循环周次条件下轴承用钢的升降图: (a) 1# 柔性轴承, (b) 2# 传统滚动轴承

Fig. 8 Up-and-down curve of bearing steel under condition of 10⁷ cycles: (a) 1# flexible bearing, (b) 2# traditional rolling bearing

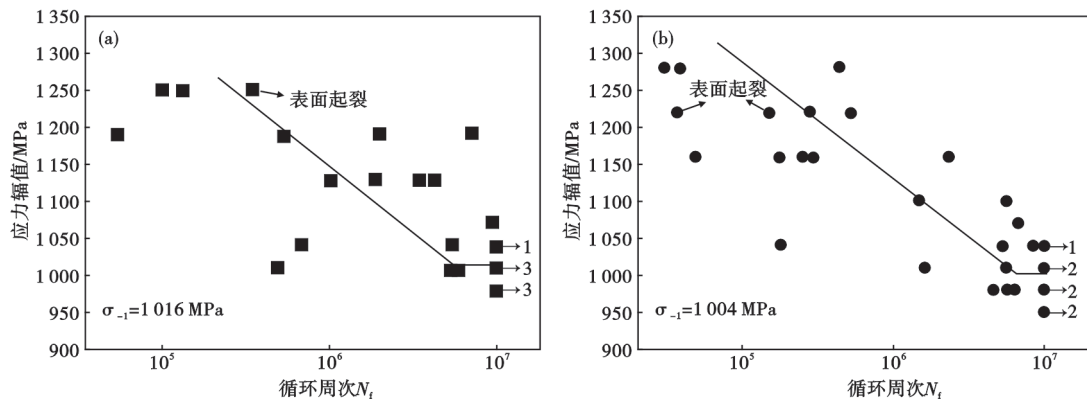


图 9 轴承用钢的旋转弯曲疲劳 S-N 曲线: (a) 1# 柔性轴承, (b) 2# 传统滚动轴承

Fig. 9 S-N curve of bearing steel under RBF test: (a) 1# flexible bearing, (b) 2# traditional rolling bearing

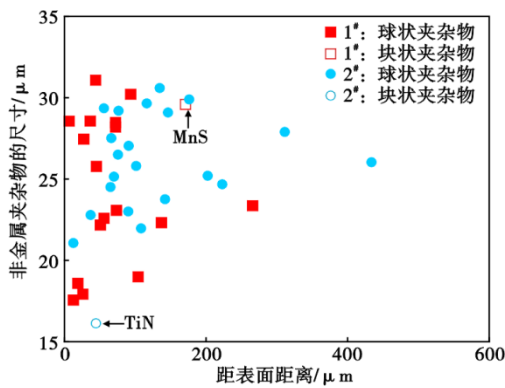


图 10 1#柔性轴承和2#传统滚动轴承用钢旋转弯曲疲劳失效的夹杂物种类统计

Fig. 10 Statistics of inclusions types of the rotary bending fatigue failure 1# flexible and 2# traditional rolling bearing steels

1 200 °C, 然而高碳铬轴承钢属于本质细晶钢, 不会存在混晶, 奥氏体晶粒度一般均高于 8 级, 因此不需要进行高温轧制。为改善碳化物带状, 轧制前通常需要进行高温扩散。为满足谐波减速机柔性轴承的高晶粒度要求, 借鉴渗碳轴承钢在高温轧制过程中通过 AlN 析出钉扎晶界来抑制奥氏体晶粒长大的方法, 在柔性轴承用钢的成分设计上添加一定的 Al 含量和 N 含量。从图 3 的扫描电镜结果分析, 由于柔性轴承中提高了 Al/N 比, 在高温扩散过程中会产生纳米级的 AlN 析出物, 产生钉扎晶界的作用, 能抑制奥氏体的长大, 奥氏体晶粒度能达到 10 级, 完全满足柔性轴承用钢的高晶粒度要求。相比于

传统滚动轴承, 在高温扩散过程中产生的 AlN 析出物的尺寸较为粗大, 在 200 nm 左右, 由于在轴承钢的冶炼过程中通过降低 Al 含量来减少钢中非金属夹杂物的数量和尺寸, 钢中 Al/N 比较低, 因此, 在传统滚动轴承中 AlN 析出物较少, 不利于细化奥氏体晶粒。轴承钢的疲劳性能与材料的纯净度和组织均匀性密切相关^[9-10], 奥氏体晶粒度的细化会使得轴承钢在调质处理后的硬度变高, 有利于增加轴承的耐磨性, 在相同的调质处理工艺下, 柔性轴承的硬度要高于传统滚动轴承, 得益于柔性轴承的高晶粒度, 但是在相同调质处理工艺下, 回火马氏体和粒状碳化物没有得到明显的细化, 但是研究表明奥氏体晶粒度的细化可以明显提高轴承钢在球化退火和调质处理后碳化物的均匀性^[13], 提高高温扩散时间有利于获得细小、弥散分布的碳化物颗粒^[14-15], 本研究通过添加 Al 和 N 元素含量, 提高奥氏体晶粒度, 通过延长高温扩散时间提高碳化物的均匀性, 因此柔性轴承用钢的疲劳性能要稍高于传统滚动轴承。

为满足滚动轴承用钢的超高纯净度要求, 在真空冶炼过程中严格控制 Al 含量和 O 含量, 但是为保证柔性轴承的高晶粒度, 额外添加了一定的 Al 含量, 与常规轴承钢的超纯洁冶炼理念冲突, 因此在柔性轴承的冶炼过程中进一步降低氧含量, 来控制轴承钢的纯净度。虽然柔性轴承用钢在 A、B、C、D 各类非金属夹杂物的评级上没有明显区别, 但是极

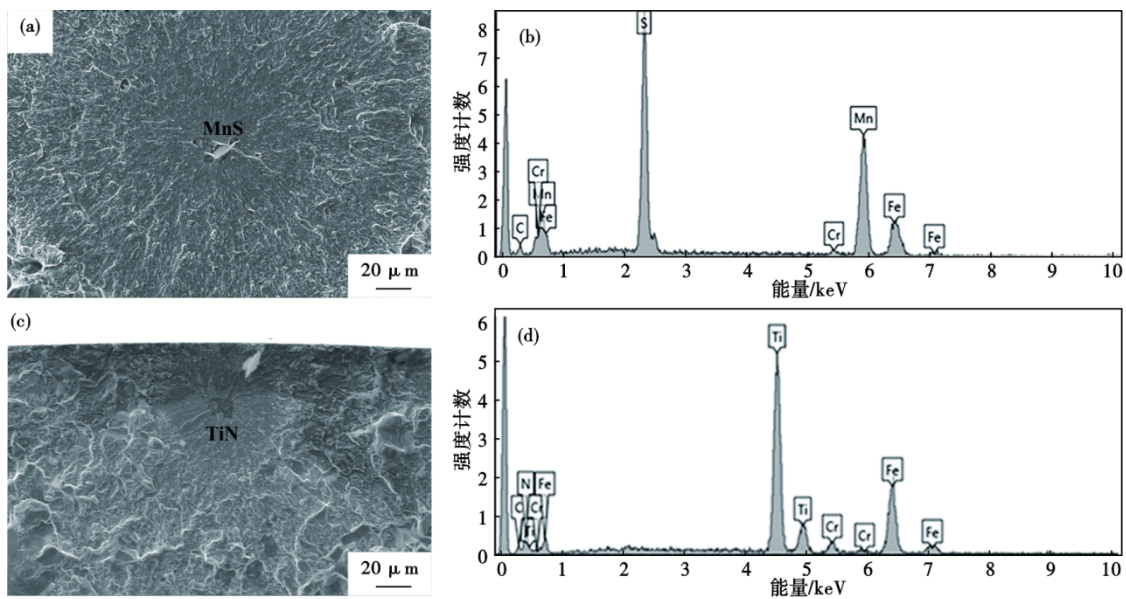


图 11 轴承用钢疲劳断裂处的夹杂分析: (a, b) 1#柔性轴承中的块状 MnS 夹杂; (c, d) 2#传统滚动性轴承中的块状 TiN 夹杂
Fig. 11 Inclusion analysis at the fatigue fracture of bearing steel: (a , b) blocky MnS inclusion in 1# flexible bearings ; (c , d) blocky TiN inclusion in 2# traditional rolling bearings

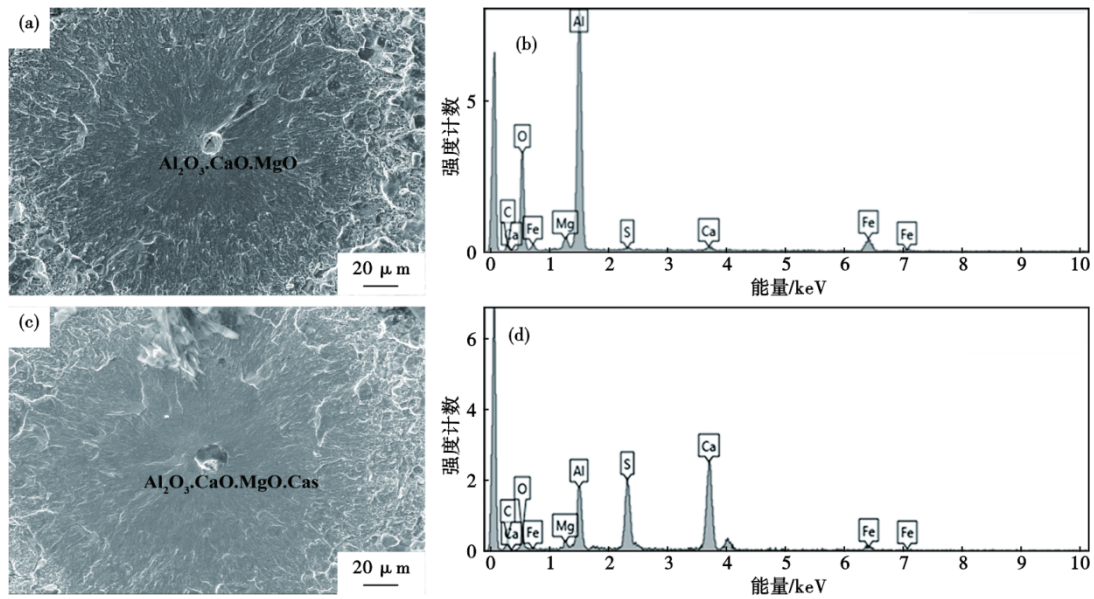


图 12 疲劳断口处的典型球状夹杂物:(a,b)Al₂O₃·CaO·MgO 氧化物;(c,d)Al₂O₃·CaO·MgO·CaS 氧硫化物

Fig. 12 Typical spherical inclusions at the fatigue fracture site: (a, b) Al₂O₃·CaO·MgO oxide; (c, d) Al₂O₃·CaO·MgO·CaS oxy-sulfide

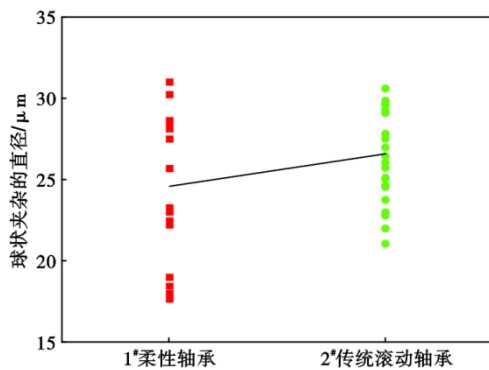


图 13 1#柔性轴承和 2#传统滚动轴承用 100Cr6 轴承钢的疲劳断口处的球状夹杂物的尺寸对比

Fig. 13 The size compassion of globular inclusions at fatigue fracture site of 100Cr6 bearing steels between the 1# flexible bearings and 2# traditional rolling bearings

值统计法的预测结果和旋转弯曲疲劳试验均验证了柔性轴承用钢和传统滚动轴承用钢均具有超高纯净度。

柔性轴承用和传统滚动轴承用钢中均以球状氧化物和氧硫化物为主,这些夹杂物一般硬度较高并且不会发生变形,在疲劳过程中极易形成裂纹源^[16-17],EVA 结果和旋转弯曲疲劳试验均显示柔性轴承用钢中球状夹杂物的尺寸更小,因此谐波减速机柔性轴承用钢的旋转弯曲疲劳强度稍高。研究^[18]表明,不易变形、具有尖锐棱角的 TiN 型夹杂物极易成为开裂源,严重危害疲劳寿命,虽然在超纯净轴承钢的真空冶炼过程中,严格降低 Ti 含量,但

是在传统滚动轴承用钢的旋弯疲劳断口处依旧检测到 TiN 夹杂物,虽然尺寸仅仅为 16 μm,但是严重降低轴承钢的疲劳强度。虽然在柔性轴承用钢的旋弯疲劳断口处也检测到块状夹杂物,但是从成分上判定属于 MnS 夹杂物,这种塑性夹杂物一般不会产生应力集中^[19],但由于其“有棱角”、“长宽比较小”的特殊形貌,应力会在棱角部位集中,产生裂纹源,但是相较于 TiN, MnS 块状夹杂对轴承钢疲劳性能的危害较小。

4 结论

在传统滚动轴承用超纯净轴承钢的真空冶炼基础上,采用电弧炉冶炼和连铸连轧的生产工艺,通过控制废钢/铁水比在 80% 以上,开发出机器人谐波减速机柔性轴承用钢,在纯净度、组织均匀性和旋转弯曲疲劳强度方面表征了柔性轴承用钢的冶金质量。

(1) 柔性轴承用钢的 $w[O] < 4 \times 10^{-6}$, $w[Ti] < 10 \times 10^{-6}$ 。非金属夹杂物以氧化物和硫化物为主, A 类硫化物 ≤ 1.0 级, B 类和 D 类氧化物 ≤ 0.5 级,通过极值统计法预测柔性轴承用钢中最大球状夹杂物的尺寸 $< 30 \mu m$,具超高纯净度。

(2) 在冶炼过程中,通过增加 Al 和 N 元素的含量,柔性轴承用钢具有 10 级的超高奥氏体晶粒度,远高于传统滚动轴承用钢的 8.5 级晶粒度。并且在 100 炉碳化物带状检验数据中,柔性轴承用钢

中7.1和7.2级别的碳化物带状组织的占比比传统滚动轴承用钢增加了10%左右,7.4级别的占比减少了7%,表明经过 ≥ 10 h的高温扩散过程有利于减小碳化物带状组织的带宽。

(3) 通过降低Ti含量,控制在0.001%以内,柔

性轴承用钢并未发现导致疲劳失效的块状TiN类夹杂物,且球状夹杂物的尺寸略小于传统滚动轴承用钢,因此柔性轴承在 10^7 循环周次下的具有101的超高旋转弯曲疲劳强度,高于传统滚动轴承用钢的旋转弯曲疲劳强度。

参考文献

- [1] 阳 培,张立勇,王长路,等. 谐波齿轮传动技术发展概述[J]. 机械传动,2005,29(3):69-72.
- [2] 黄胜栋. 一种机器人用高精度谐波减速机:202310676644.1 [P]. 2023-06-08.
- [3] 马长安,胡满红. 谐波齿轮的工作原理及在减速器中的应用[J]. 山西冶金,2005,28(2):42-43.
- [4] 王瑞锋,张立勇,张建伟,等. 谐波齿轮传动概述[J]. 机械传动,2019,43(1):171-176.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 杨延辉,余道军,白 云,等. 渗碳齿轮钢的疲劳性能及寿命概率分布研究[J]. 现代冶金,2020,48(2):11-14.
- [9] 杨晓蔚. 高端轴承制造的关键技术[J]. 金属加工(冷加工),2013(16):16-18.
- [10] 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.
- [11] 杨飞飞,徐海卫,耿 豪,等. AlN和Zr微合金化对齿轮钢热塑性及渗碳处理晶粒度的影响[J]. 特殊钢,2023,44(4):94-101.
- [12] 刘正才,王海龄,陈名浩,等. 氮化铝形态对结构钢奥氏体晶粒度的影响[J]. 特殊钢,1982,3(6):14-23.
- [13] 左锦中,何 西,赵 阳,等. 热变形工艺对100Cr6轴承线材网状碳化物的影响[J]. 特殊钢,2022,43(6):60-65.
- [14] 官跃辉,张 林,张剑锋,等. GCr15轴承钢碳化物控制及其对压碎负荷的影响[J]. 特殊钢,2022,43(6):38-41.
- [15] 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.
- [16] Lai J, Lund T, Rydén K, et al. The fatigue limit of bearing steels-Part I: A pragmatic approach to predict very high cycle fatigue strength [J]. International Journal of Fatigue, 2012, 37: 155-168.
- [17] Hashimoto K, Fujimatsu T, Tsunekage N, et al. Study of rolling contact fatigue of bearing steels in relation to various oxide inclusions [J]. Materials and Design, 2011, 32(3):1605-1611.
- [18] Fu H, Rydel JJ, Gola AM, et al. The relationship between 100Crteelmaking, inclusion microstructure and rolling contact fatigue performance [J]. International Journal of Fatigue, 2019, 129(11):104899.
- [19] 马惠霞,李文竹,黄 磊,等. 轴承钢中硫化物夹杂诱发疲劳裂纹的微观分析[J]. 金属热处理,2012,37(3):119-121.