

· 应用与服役 ·



稀土对 20CrMnTi 齿轮钢夹杂物和疲劳性能的影响

王 利¹, 刘成宝¹, 李浩秋², 王 毅¹, 孙宗辉¹, 刘春伟², 杨超云³, 付志豪³

(1 山东钢铁股份有限公司山钢研究院, 济南 271104; 2 山东钢铁股份有限公司莱芜分公司, 济南 271105;

3 中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家实验室, 沈阳 110016)

摘 要: 为深入探究稀土(La/Ce)对 20CrMnTi 齿轮钢中夹杂物和疲劳性能的影响, 采取多种分析测试方法对 20CrMnTi 和加入 0.002 7% 稀土处理后的 20CrMnTi-RE 齿轮钢中的夹杂物进行分析和表征, 并进行超高周疲劳试验, 对比分析疲劳性能变化。结果表明, 稀土可与齿轮钢中的 O 反应, 形成稀土氧化物, 并与其他 CaS、MgAl₂O₄ 等夹杂物复合共生, 成为 TiN 的形核核心, 由 CaS-MgAl₂O₄-(MnS)-TiN 的复合相转变为 CaS-MgAl₂O₄-(MnS)-RE₂O₃-TiN 复合相。加入稀土后, 20CrMnTi 钢中夹杂物数量显著降低, 尺寸 > 30 μm 的夹杂物基本消失。此外, 稀土改善了齿轮钢的抗疲劳性能, 在 10⁷ 周次, 50% 的失效概率条件下, 加稀土的齿轮钢的疲劳极限比未加稀土的齿轮钢高 26.6 MPa, 具有更优的抗疲劳性能。

关键词: 20CrMnTi 齿轮钢; 稀土; 夹杂物变性; 疲劳性能

DOI: 10. 20057/j. 1003-8620. 2024-00047 **中图分类号:** TF4

Effect of Rare Earth on Inclusions and Fatigue Properties of 20CrMnTi Gear Steel

Wang Li¹, Liu Chengbao¹, Li Haoqiu², Wang Yi¹, Sun Zonghui¹,
Liu Chunwei², Yang Chaoyun³, Fu Zhihao³

(1 Research Institute of SD Steel, Shandong Iron and Steel Co., Ltd., Jinan 271104, China; 2 Laiwu Branch of Shandong Iron and Steel Co., Ltd., Jinan 271105, China; 3 Shenyang National Laboratory for Materials Sciences, Institute of Metal REsearch, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: To deeply investigate the effect of rare earth (La/Ce) on inclusions and fatigue properties of 20CrMnTi gear steel, the inclusions in 20CrMnTi and 20CrMnTi-RE gear steel treated with 0.002 7% rare earth were analyzed and characterized by various analytical and testing methods, the change of fatigue property was compared and analyzed. The ultra-high weekly fatigue test was carried out and analyzed the change of fatigue properties. The results show that rare earth can react with O element in gear steel to form rare earth oxides, and co-exist with other inclusions such as CaS and MgAl₂O₄, which become the core of TiN, the complex phase of CaS-MgAl₂O₄-(MnS)-TiN is transformed into the complex phase of CaS-MgAl₂O₄-(MnS)-RE₂O₃-TiN. After addition of rare earth, the amount of inclusions in 20CrMnTi steel decreased significantly, and the inclusions with size over 30 μm basically disappeared. In addition, rare earth improves the anti-fatigue property of gear steel. The fatigue limit of gear steel with rare earth is 26.6 MPa higher than that of gear steel without rare earth at the condition of 50% failure probability for 10⁷ cycles, with better anti-fatigue performance.

Key Words: 20CrMnTi Gear Steel; Rare Earth; Denaturation of Inclusions; Fatigue Property

齿轮钢是一种特殊合金钢, 在汽车、铁路、船舶、石油机械及工程机械等领域得到广泛应用。它通常被用于制作保证设备安全运行的关键部件, 并且考虑到齿轮钢的服役环境, 一般要求其具备良好的抗疲劳强度^[1-4], 因为在齿轮工作过程中, 齿根受弯曲应力较大将会导致其发生断裂失效。而齿轮钢中夹杂物形态是导致齿轮钢疲劳失效的重要原因之一。因此, 严格控制钢中各类夹杂物的大小、尺寸及形貌等是生产高品质齿轮钢时的重要保

证^[5-9]。目前, 低成本、高洁净、易加工、高性能是高品质齿轮钢研究的重点方向。

在钢铁产品生产过程中加入稀土, 可以起到减小夹杂物尺寸、微合金化以及净化钢液的作用, 进而有利于改善钢的力学性能和疲劳寿命等。基于此, 国内外学者对稀土处理高性能钢材产品展开了广泛研究。其中, 加入钢中最常见的稀土元素为 La 和 Ce^[10-14]。本研究选用 20CrMnTi 齿轮钢为目标材料, 采用扫描电镜 (SEM)、能谱分析 (EDS)、聚焦离

子束切割(FIB)、全自动非金属夹杂物分析系统(OTS)、夹杂物无损提取等测试检测手段分析了试验钢中夹杂物。并对加入稀土前后的 20CrMnTi 齿轮钢进行了超高周疲劳试验,从稀土改质夹杂物、净化钢液等角度,深入研究探讨了加入稀土前后,20CrMnTi 齿轮钢中夹杂物和疲劳性能的变化,进而为齿轮钢的性能提升提供数据支撑。

1 试验材料及方法

齿轮钢的生产工艺流程为:配料→100 t 电弧炉→LF 炉精炼+VD/RH 真空脱气处理→圆坯连铸(电磁搅拌)→轧制成材,化学成分见表 1。其中 20CrMnTi-RE 中所加稀土为 La 和 Ce 的混合稀土金属,其质量比例约为 1:2,在 VD 真空冶炼破空前加入,加入量为 0.004%(质量分数)。轧制过程中控制开轧温度为 1 110~1 170 °C,终轧温度为 920~1 020 °C。将直径 $\phi 650$ mm 的连铸圆坯轧制成规格 $\phi 65$ mm 的圆棒。钢材正火工艺以 50~70 °C/h 的加热速度升温至 900~930 °C,保温 2~10 h,进行空冷。

夹杂物分析试样制备:将齿轮钢轧材钢样加工成 10 mm × 10 mm × 10 mm 的金相样,对平行于钢材纵轴方向的平面进行磨抛处理,用于夹杂物的统计分析。采用 12%~18% 丙酮,8%~12% 三乙醇胺,1%~2% 四甲基氯化铵,加无水甲醇组成的电解液进行夹杂物无损提取。具体方法为:将试样表面做清洁处理,然后放于电解槽中,连接钢样,通入氩气,开始电解,电解时间约 7 h 后进行超声波清洗。夹杂物与无水乙醇中的碳化物利用强磁铁进行分离后使其沉于容器底部,干燥后均匀平铺到导电胶上,运用扫描电镜对其进行观察统计分析。

拉压疲劳试样制备:将齿轮钢 20CrMnTi 和 20CrMnTi-RE 进行渗碳处理,930 °C 渗碳 18 h(碳势 0.9%~1.3%),降温至 850 °C 扩散 3 h,油淬,170~180 °C 回火 2 h。在 $\phi 65$ mm 圆棒的直径 1/4 处纵向切取拉压疲劳试样,尺寸为 $\phi 20$ mm × 150 mm 的圆柱,试样各部位尺寸如图 1 所示,试样表面光洁度 R_a

优于 0.2 μm 。疲劳试验结束后,利用线切割将疲劳断口切下用于疲劳断口分析。

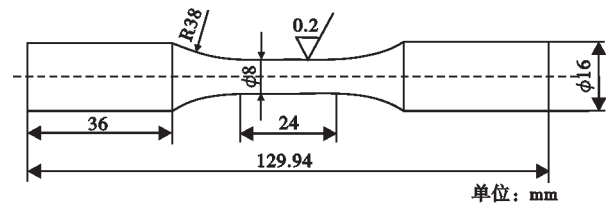


图 1 疲劳试样尺寸示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fatigue sample size

采用无损提取、聚焦离子束-扫描电镜(FIB-SEM)分析技术以及全自动非金属夹杂物分析系统(OTS)等技术对齿轮钢中夹杂物形态、数量和类型进行了表征,对比分析加入稀土前后,20CrMnTi 齿轮钢中夹杂物的变化。

用于疲劳试验测试的液压疲劳试验机型号为 INSTRON8801,最大载荷为 50kN。试验条件为:正弦波轴向加载、室温、 R (应力比)=-1、频率 15~25 Hz、条件寿命 10^7 。参照试验标准 GB/T 24176—2009 中的试验方法进行疲劳试验并获得疲劳试样寿命。通过升降法获得疲劳极限,共做出相邻应力水平的高应力断裂而低应力不断裂的 2 对数据点。经数据处理得到失效概率 $P=50\%$ 的疲劳极限、S-N 曲线及 S-N 曲线斜线部分的表达式。

2 结果与讨论

2.1 钢中夹杂物分析

2.1.1 齿轮钢中夹杂物类型

20CrMnTi 齿轮钢中夹杂物类型及状态通过夹杂物无损提取技术结合 EDS 来获得,如图 2 所示,各类夹杂物的成分分析见表 2。图 2(a)中夹杂物尺寸较大,大都在 20 μm 以上,并且形态各异。结合表 2 可以看出,图 2(a)中大型夹杂物为 CaO 和 CaS 夹杂物及其复合型夹杂物;或者长条形的 MnS 与 CaO 的复合夹杂物。图 2(b)中提取的夹杂物尺寸较小,大都在 20 μm 以下。图 2(b)中的夹杂物结合表 2 分析可以看出,基本为 MgAl_2O_4 、CaO 和 MnS 的复合夹杂物以及 TiN 和 CaO 组成的复合夹杂物。

表 1 试验钢种的化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of test steels

试验钢	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Nb	Ti	V	B	O	Ca	RE
20CrMnTi	0.21	0.244	1.144	0.027 7	0.020 3	1.245	0.018 2	0.002 74	0.053 8	0.005	0.001 33	0.001 2	0.000 6	0
20CrMnTi-RE	0.20	0.245	1.142	0.027 5	0.020 2	1.244	0.018 5	0.002 76	0.053 5	0.005	0.001 34	0.001 0	0.000 5	0.001 0

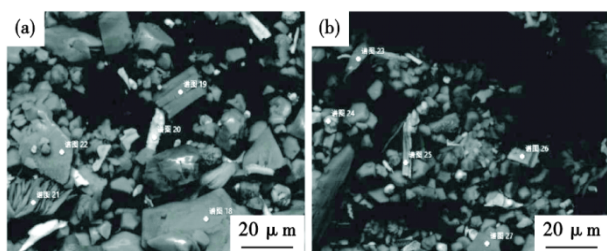


图2 无损提取 20CrMnTi 齿轮钢中夹杂物: (a) 20 μm 以上夹杂物, (b) 20 μm 以下夹杂物

Fig. 2 Non-destructive extraction of inclusions in 20CrMnTi gear steel: (a) inclusions above 20 μm, (b) inclusions below 20 μm

利用扫描电镜对 20CrMnTi 齿轮钢中个体夹杂物的构成与形貌进行观察, 结果如图 3 所示。根据元素构成及形貌可知, 图 3(a) 为棱角分明的 TiN 颗粒。

图 3(b) 为齿轮钢中复合夹杂物的外观形貌, 颜色衬度对比明显, 是属于 Ca、S、Al、Mg、O、Ti、Mn 等元素富集的复合相。20CrMnTi 齿轮钢中以这类复合夹杂物居多, 大多呈球形或椭球形, 尺寸较大, 一般在 5 μm 以上。除此之外还可以发现, 20CrMnTi 样品中不仅存在较多的单一 TiN 颗粒, 有的 TiN 夹杂物甚至沿晶界呈链状分布, 尺寸在 20 μm 以上, 如图 3(c) 所示。研究表明, 当析出 TiN 颗粒的尺寸 > 1 μm 时, 由于其能够作为裂纹的起始位置、降低脆性转变温度, 从而对钢材的机械性能产生危害^[15]。因此, 改性变质 TiN 夹杂物是改善 Cr-Mn-Ti 系齿轮钢性能的重要措施之一。

为进一步分析齿轮钢中夹杂物构成, 采用 FIB-SEM 对齿轮钢中复合夹杂物进行剖析和表征, 如图

表 2 无损提取 20CrMnTi 齿轮钢中夹杂物 EDS 分析 (质量分数)

Table 2 Non-destructive extraction of inclusions in 20CrMnTi gear steel by EDS analysis

谱图	C	O	S	Al	Mg	Ca	Mn	Ti	Fe	总量
18	-	50.97	21.62	-	-	26.88	-	-	0.53	100
19	-	51.48	21.08	-	-	26.44	-	-	1.00	100
20	16.54	4.32	28.24	-	-	0.73	47.9	-	2.27	100
21	7.20	55.59	16.48	-	-	20.25	-	-	0.48	100
22	6.74	49.26	19.44	-	-	24.08	-	-	0.48	100
24	3.79	32.44	14.63	13.26	7.13	18.56	2.78	2.26	5.15	100
26	0.69	10.50	1.54	-	-	34.22	-	39.98	11.97	100

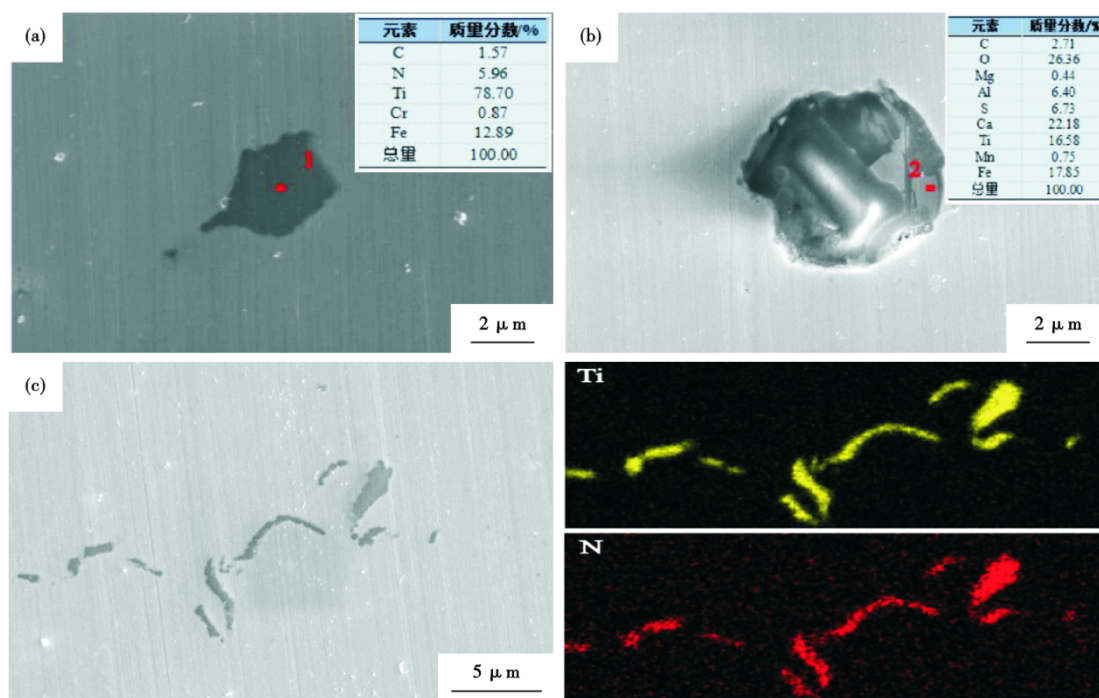


图 3 20CrMnTi 齿轮钢中夹杂物 SEM 观察与分析: (a) TiN 夹杂物, (b) 复合夹杂物, (c) 沿晶界分布的 TiN 夹杂物

Fig. 3 SEM observation and analysis of inclusions in 20CrMnTi gear steel: (a) TiN inclusions, (b) composite inclusions, (c) TiN inclusions distributed along grain boundaries

4 所示。对图 4(a)所示 20CrMnTi 钢中椭球形复合夹杂物元素面扫描分析可知,该夹杂物主要构成是 CaS-MnS-MgAl₂O₄ 的复合相,外围包裹了一层 TiN。采用聚焦离子束(FIB)对 20CrMnTi 齿轮钢中球形复合夹杂物(图 4(b))进行切割剖析,如图 4(c)所示。由 EDS 分析可知,该夹杂物的核心为 CaS-MgAl₂O₄,外层包裹较多的 Ti 元素,推测为 TiN 的球形复合夹杂物,但 N 元素未曾显示。由此可以看出,在 20CrMnTi 齿轮钢中,TiN 以异质形核的方式而长大,生成 CaS-MgAl₂O₄-(MnS)-TiN 的复合相。尽管图 4(b)中夹杂物看起来外缘较为平缓,近似于球形,但从 FIB 切割后的剖面来看,TiN 夹杂物的棱角特征依旧非常明显。

检测结果分析可知,20CrMnTi 齿轮钢中存在较多复合型夹杂物及 TiN 颗粒。TiN 颗粒的聚集长大,会严重危害齿轮钢的力学性能和疲劳性能。此外,TiN 会以 CaS-MnS-MgAl₂O₄ 或 CaS-MgAl₂O₄ 等复合相为形核核心长大,异质形核改善了 TiN 的不规则性,但棱角依旧明显。

2.1.2 稀土齿轮钢中夹杂物类型

采用 FIB-SEM 对稀土齿轮钢中复合夹杂物进行剖析和表征,如图 5 所示。图 5(a)为齿轮钢中夹杂物的元素面分布图,由图 5 可知,加入稀土后,20CrMnTi-RE 齿轮钢中形成了 Ca、Mg、S、Ti、O、La、Ce、Al、N 元素富集的复合相。图 5(b)是利用 FIB 切

割后的夹杂物剖面图,可以看出,该复合相外形为球形或者椭球形状。经过 EDS 分析,可以推测加入稀土后,La、Ce 与 O 发生反应生成稀土氧化物 RE₂O₃,与 CaS、MnS 和 MgAl₂O₄ 复合共生,外围生成少量 TiN,成为 CaS-MgAl₂O₄-(MnS)-RE₂O₃-TiN 复合夹杂物。该夹杂物相较于 20CrMnTi 齿轮钢中的复合夹杂物,外围棱角有所收缩。

与 20CrMnTi 齿轮钢相比,20CrMnTi-RE 中观察到的单相 TiN 颗粒明显减少。未观察到链状分布的 TiN 夹杂物。此外,TiN 会以 CaS-MgAl₂O₄-(MnS)-RE₂O₃ 等复合相为形核核心长大,形成外围包裹 TiN 的复合夹杂物,相较于 20CrMnTi 齿轮钢中的异质形核夹杂物,棱角趋于平缓,有效改善了 TiN 夹杂物的形状。

2.1.3 齿轮钢和稀土齿轮钢中夹杂物的数量统计对比分析

采用 OTS 面扫描统计软件对 20CrMnTi 和 20CrMnTi-RE 齿轮钢中夹杂物数量进行对比分析。20CrMnTi 和 20CrMnTi-RE 齿轮钢样品中不同尺寸夹杂物个数统计如图 6 所示,检测面积 102.7 mm²。其中,20CrMnTi 齿轮钢样品中 >5 μm 夹杂物总数 708 个,其中夹杂物长度 5~10 μm 的 663 个,长度 >10 μm 的 45 个(其中长度 >10~20 μm 的 39 个,长度 >20~30 μm 的 4 个,长度 >30 μm 的 2 个)。20CrMnTi-RE 齿轮钢样品中 >5 μm 夹杂物总数 239

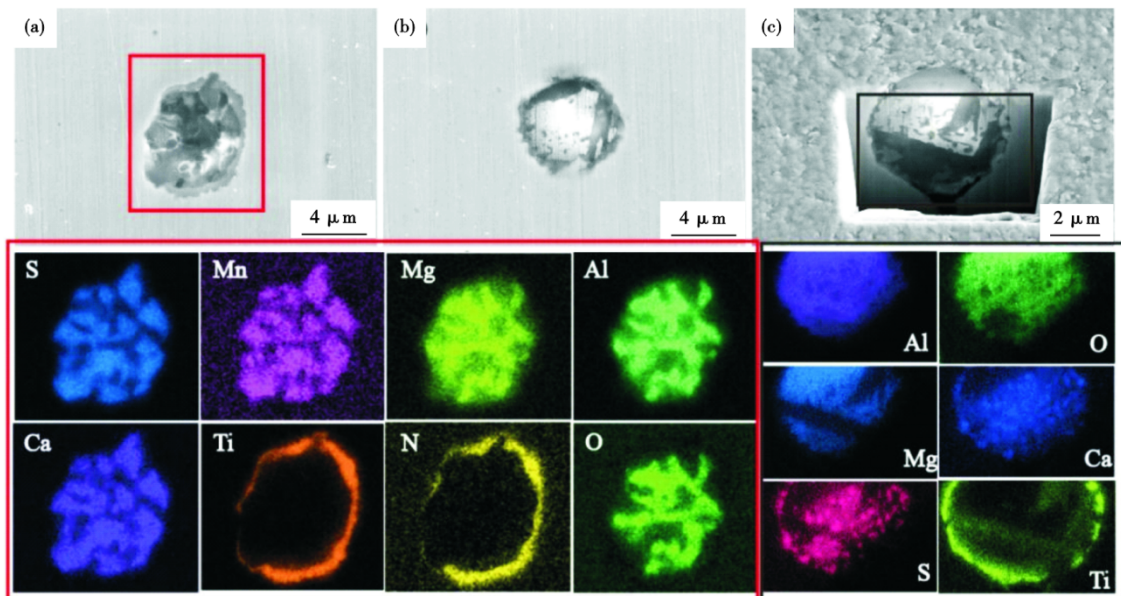


图 4 20CrMnTi 齿轮钢中复合夹杂物 FIB-SEM 分析和表征:(a) 椭球形复合夹杂物,(b) FIB 切割前的球形复合夹杂物,(c) FIB 切割后的球形复合夹杂物

Fig. 4 FIB-SEM analysis and characterization of complex inclusions in 20CrMnTi gear steel: (a) ellipsoidal complex inclusions; (b) spherical complex inclusions before FIB cutting; (c) spherical complex inclusions after FIB cutting

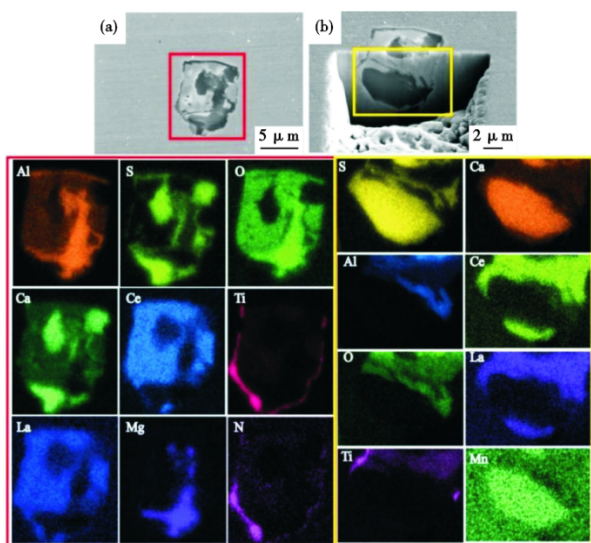


图 5 20CrMnTi-RE 稀土齿轮钢中复合夹杂物 FIB-SEM 分析和表征:(a) FIB 切割前的复合夹杂物,(b) FIB 切割后的复合夹杂物

Fig. 5 FIB-SEM analysis and characterization of complex inclusions in 20CrMnTi-RE rare earth gear steel: (a) complex inclusions before FIB cutting, (b) complex inclusions after FIB cutting

个,其中夹杂物长度 >5~10 μm 的 228 个,夹杂物长度 >10 μm 的 11 个(其中,长度 >10~20 μm 的 8 个,长度 >20~30 μm 的 3 个)。由此可知,齿轮钢中夹杂物尺寸分布范围主要集中在 5~10 μm。

通过对 20CrMnTi 和 20CrMnTi-RE 齿轮钢样品对比扫描发现,稀土加入后,5~10 μm 夹杂物数量由 663 个减到 228 个。>10~30 μm 夹杂物数量由 43 个减到 11 个。>30 μm 以上夹杂物数量由 2 个减到 0 个。加入稀土后,齿轮钢中夹杂物数量减少趋势明显。

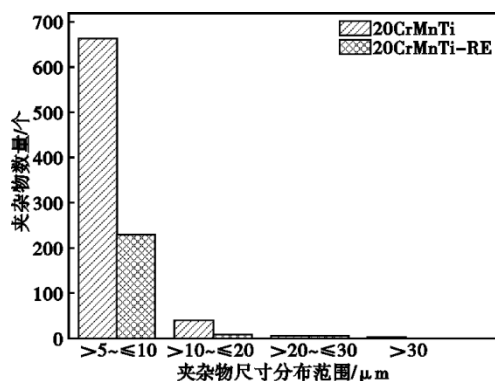


图 6 20CrMnTi 和 20CrMnTi-RE 齿轮钢中夹杂物数量统计
Fig. 6 Inclusion quantity statistics of 20CrMnTi and 20CrMnTi-RE gear steels

20CrMnTi 齿轮钢样品中不同类型夹杂物个数统计如图 7 所示,其中,硫化物 60 个,主要是铝酸盐硫化物、CaO-MnS、MnS、氧化物-MnS 以及尖晶石-MnS;氧化物夹杂 90 个,主要是 SiO₂、CaO、Al₂O₃ 夹杂,部分复合 MnS 夹杂;铝酸盐类夹杂 49 个;硅酸盐类夹杂 24 个;含 TiN 的夹杂物 114 个。20CrMnTi-RE 齿轮钢样品不同类型夹杂物个数统计如图 8 所示,硫化物 68 个,主要是铝酸盐硫化物、MnS、尖晶石-MnS;氧化物夹杂 24 个,主要是 SiO₂、CaO、Al₂O₃ 夹杂;铝酸盐类夹杂 39 个;硅酸盐类夹杂 21 个;含 TiN 的夹杂物 42 个。

分析结果表明,稀土的加入能够有效降低夹杂物尺寸,使其弥散分布于齿轮钢中,30 μm 以上的夹杂物基本消失。与此同时,加入稀土后,齿轮钢中各类夹杂物个数都有所减少,其中 TiN 夹杂物的个数减少趋势最为显著。向钢中加入稀土元素以后,与钢液中其他夹杂物复合,形成了稀土复合夹杂

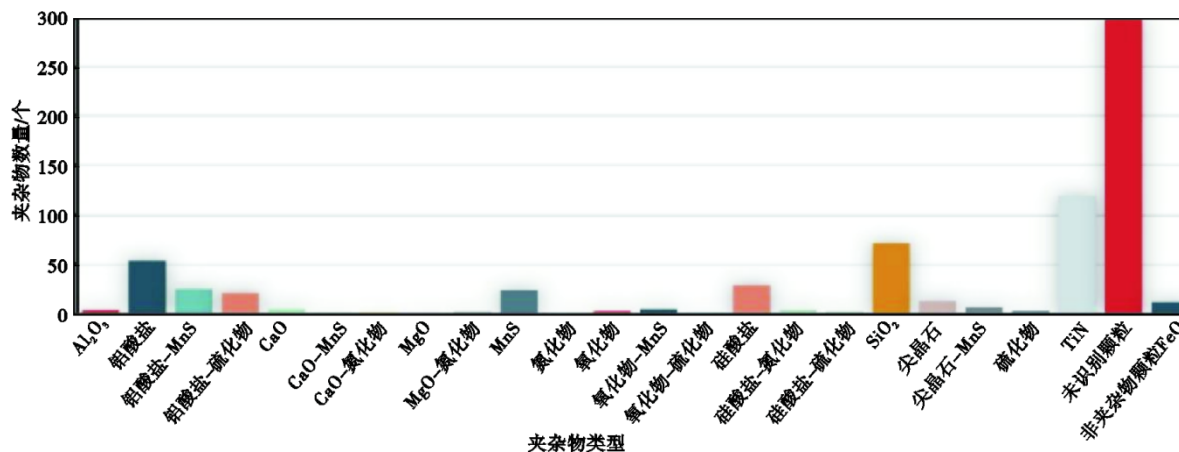


图 7 20CrMnTi 齿轮钢中不同类型夹杂物数量统计
Fig. 7 Statistics of different types inclusions in 20CrMnTi gear steel

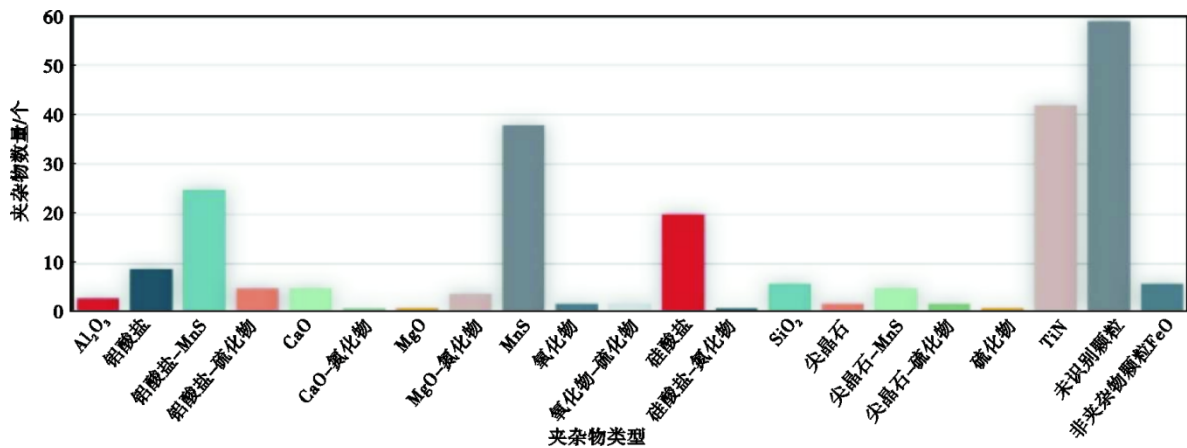


图 8 20CrMnTi-RE 齿轮钢中不同类型夹杂物数量统计

Fig. 8 Statistics of different types inclusions in 20CrMnTi-RE gear steel

物,阻断了夹杂物碰撞长大。同时,稀土氧化物与钢液的界面能低,润湿性好,在钢液中不易长大,因此,有效减小了钢中夹杂物尺寸。在VD真空过程中,钢液与钢渣充分接触,钢液中的稀土夹杂物更容易与钢渣黏合,进入钢渣,导致钢液中的夹杂物数量得到明显降低。这也是稀土收得率较低(大约为25%)的原因^[16]。

2.2 齿轮钢疲劳试验

通过升降法测试 20CrMnTi 和 20CrMnTi-RE 齿轮钢的条件疲劳极限。应力比 R=-1、条件寿命 N_f = 10⁷、失效概率 P=50%,求疲劳极限的升降图如图 9 所示。图 9 中的红色虚线椭圆表示,在试验过程中,两个试样分别得到在相邻应力水平下低应力不断裂而高应力断裂的 3 组数据点。

对图 9(a)和(b)中红色虚线椭圆所标记的 6 个试样的最大应力取平均值,获得 20CrMnTi 和 20CrMnTi-RE 钢的条件疲劳极限。20CrMnTi 疲劳极限对应的最大应力为:

$$\frac{460 \times 1 + 440 \times 3 + 420 \times 2}{6} = 436.7 \text{ MPa.}$$

20CrMnTi-RE 钢疲劳极限对应的最大应力值为:

$$\frac{500 \times 1 + 480 \times 2 + 460 \times 1 + 440 \times 1 + 420 \times 1}{6},$$

$$= 463.3 \text{ MPa}$$

相较于 20CrMnTi 钢,提高了 26.6 MPa。

按照 S-N 曲线的统计分析方法进行分析,以计算在 P=50% 时各应力的寿命值及 S-N 曲线斜线部分的表达式。20CrMnTi 钢(五个高应力水平)和 20CrMnTi-RE 钢(四个高应力水平)在 P=50% 时对应的疲劳寿命,见表 3。

20CrMnTi 和 20CrMnTi-RE 试样在 P=50% 下的室温超高周疲劳 S-N 曲线如图 10 所示。基于 S-N 斜线部分和水平部分的分析计算得到的斜线部分表达式及疲劳极限,见表 4。通过对两条 S-N 曲线的观察,图 10(a)(b)中的 S-N 数据点相互分散。其中,右下角带有小箭头的的数据点表示在各自的极限疲劳寿命下未断裂失效的数据点,由表 4 可知,

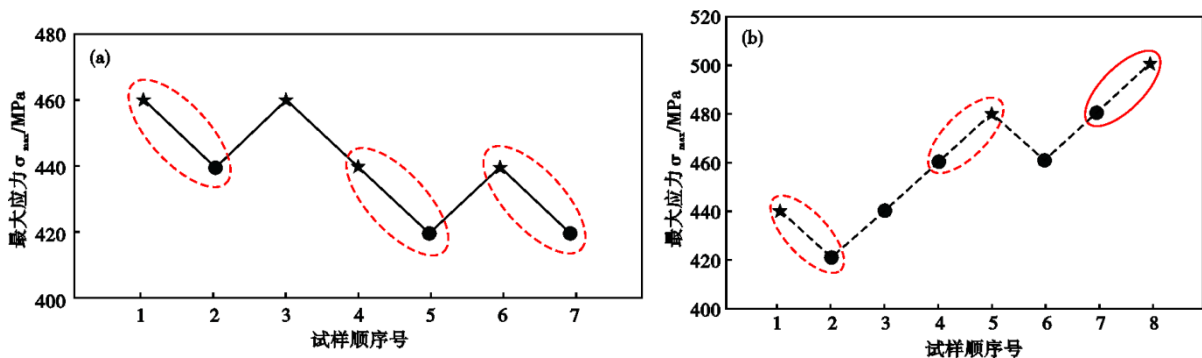


图 9 求条件疲劳极限的升降图:(a)20CrMnTi 钢,(b)20CrMnTi-RE 钢

Fig. 9 The rise and fall diagram of the conditional fatigue limit : (a)20CrMnTi steel, (b)20CrMnTi-RE steel

表 3 20CrMnTi 和 20CrMnTi-RE 齿轮钢在 P=50% 下的疲劳寿命

Table 3 Fatigue life of 20CrMnTi and 20CrMnTi-RE gear steels at P = 50%

试验钢	Σ_{max}/MPa	疲劳寿命/次
20CrMnTi	600	70 288
	550	143 988
	500	315 850
	480	442 180
	460	627 968
20CrMnTi-RE	650	40 557
	600	92 810
	550	228 259
	500	611 697

表 4 20CrMnTi 和 20CrMnTi-RE 试样室温高周疲劳 S-N 斜线部分表达式及疲劳极限

Table 4 The partial slant S-N expression and fatigue limit of 20CrMnTi and 20CrMnTi-RE specimens under high cycle fatigue at room temperature

试验钢	条件	S-N 斜线部分表达式	疲劳极限/MPa
20CrMnTi	P=50%	$\sigma_{max} = 2\,324.0 \times N_f^{-0.121}$	436.7
20CrMnTi-RE	P=50%	$\sigma_{max} = 1\,813.2 \times N_f^{-0.0967}$	463.3

20CrMnTi-RE 在相同的疲劳寿命下可承受更高的应力,或在相同的循环应力下具有更长的疲劳寿命。即在相同的试验条件下,20CrMnTi-RE 齿轮钢具有更优异的疲劳性能。

2.3 齿轮钢疲劳断口分析

对 20CrMnTi 和 20CrMnTi-RE 齿轮钢的疲劳断口形貌和夹杂物观察与分析。从断口形貌可以观察到齿轮钢疲劳断口的起裂源都是从表面向内部延伸的小裂纹,如图 11(a)(b)中的 A、B 点所示,20CrMnTi-RE 齿轮钢中的裂纹较为平整、细小。由断口整体形貌来看,裂纹沿着晶界向内扩展,最终

发生了韧性断裂,呈韧窝形貌。在两个样品的韧窝中均观察到少量的夹杂物。总体来看,加入稀土后的齿轮钢疲劳断口中可观察到的夹杂物数量明显较少。综上所述,加入稀土后的 20CrMnTi 齿轮钢由于夹杂物尺寸、数量和类型均得到显著改善,显著提高了齿轮钢的超高周疲劳寿命。

3 结论

采用配料→100 t 电炉→LF 炉精炼+VD/RH 真空脱气处理→圆坯连铸(电磁搅拌)→轧制成材的工艺生产齿轮钢和稀土齿轮钢。对比分析加入稀土后齿轮钢中夹杂物的变化,并对两类齿轮钢进行超高周疲劳试验。主要得到以下结论。

(1)未添加稀土的 20CrMnTi 齿轮钢中主要含有大量 TiN 高硬脆性夹杂物,有的呈链状沿晶界分布。此外,钢中还含有 CaO、CaS、MnS、MgAl₂O₄ 等夹杂物,这些夹杂物可单独存在或复合共生。TiN 会以异质形核的方式,包裹在 CaS-MgAl₂O₄-(MnS) 等复合夹杂物的外围,生成 CaS-MgAl₂O₄-(MnS)-TiN 等复合相。

(2)加入 20CrMnTi 齿轮钢中的稀土能够与钢中的氧发生反应,形成稀土氧化物,与其他夹杂物复合共生,形成 CaS-MgAl₂O₄-(MnS)-RE₂O₃-TiN 等复合相。20CrMnTi-RE 齿轮钢中夹杂物数量显著减少,未观察到 30 μm 以上的夹杂物,TiN 夹杂物数量减少最为明显。且外围包裹 TiN 的复合夹杂物棱角趋于平缓,改善了硬质 TiN 夹杂物的不规则性。

(3)加入稀土元素 La/Ce 后,在 10⁷ 周次,50% 的失效概率条件下加稀土的 20CrMnTi-RE 齿轮钢的疲劳极限为 463.3 MPa,比未加稀土的 20CrMnTi 齿轮钢高 26.6 MPa,S-N 曲线显示其具有更优的抗疲劳

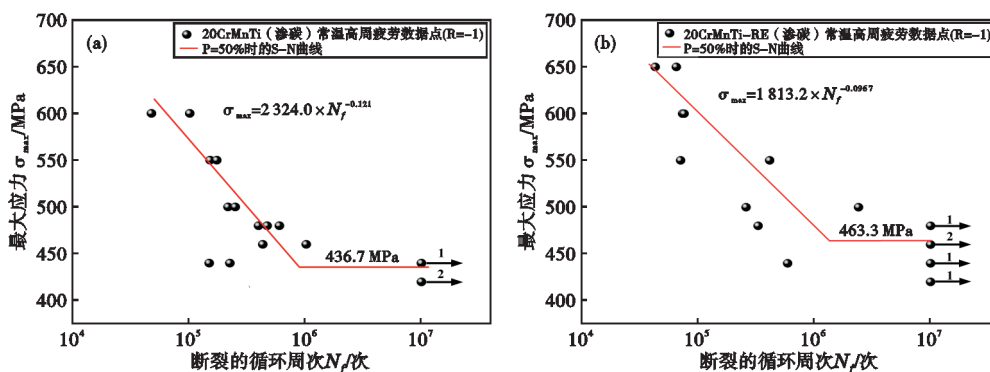


图 10 试样在 P=50% 下的室温超高周疲劳 S-N 曲线:(a)20CrMnTi 钢,(b)20CrMnTi-RE 钢

Fig. 10 S-N curve of very high cycle fatigue at room temperature at P = 50% : (a)20CrMnTi steel, (b)20CrMnTi-RE steel

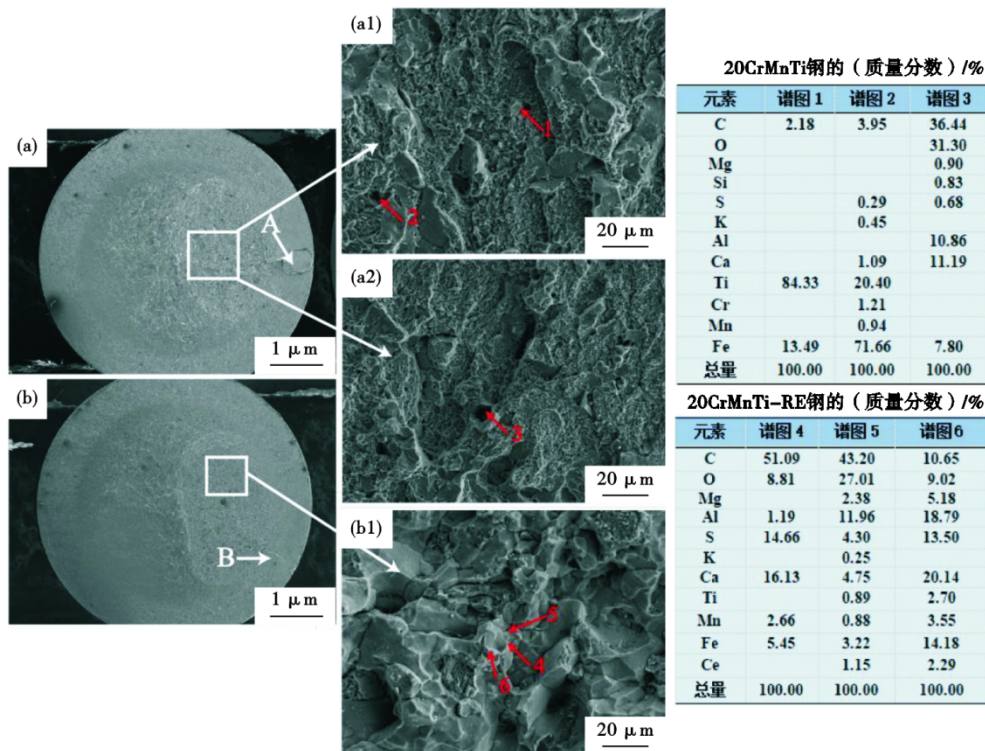


图 11 疲劳断口形貌和夹杂物 EDS 分析: (a) 20CrMnTi 钢, (b) 20CrMnTi-RE 钢

Fig. 11 Fatigue fracture morphology and inclusion analysis by EDS : (a) 20CrMnTi steel, (b) 20CrMnTi-RE steel

性能。20CrMnTi-RE 齿轮钢的疲劳断口起裂处的裂纹较为平整、细小,且相较于 20CrMnTi 的疲劳断口,观察到的夹杂物数量显著减少。

(4) 加入稀土后的 20CrMnTi 齿轮钢由于夹杂物尺寸、数量和类型均得到显著改善,显著提高了齿轮钢的超高周疲劳寿命。

参考文献

[1] 杨延辉. 高温渗碳齿轮钢的组织及疲劳性能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.

[2] 洪友士, 孙成奇, 刘小龙. 合金材料超高周疲劳的机理与模型综述[J]. 力学进展, 2018, 48(1): 1-65.

[3] 刘鹏飞. 高强度渗碳齿轮及材料的超高周疲劳特性及可靠度评估[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.

[4] 曹红福, 王毛球, 孙鸿平, 等. 20MnCr5 齿轮钢氧含量控制及其对钢的疲劳性能影响[J]. 特殊钢, 2023, 44(1): 1-4.

[5] 张晓宇, 赵梦豪, 朱强斌, 等. 20MnCr5 齿轮钢连铸坯中硫化物三维形貌的解析[J]. 冶金分析, 2022, 42(8): 13-19.

[6] 许国方, 张雪良, 杨树峰, 等. 20CrMnTi 齿轮钢冶炼全流程的夹杂物分析[J]. 中国冶金, 2020, 30(11): 23-28+40.

[7] 康旭. 钙处理及造渣工艺对齿轮钢 20CrMnTi 夹杂物的影响[D]. 沈阳: 东北大学, 2020.

[8] 巨银军, 吕子宇, 邢立东, 等. 20CrMnTiH 冶炼全流程夹杂物演变分析[J]. 有色金属科学与工程, 2022, 13(4): 20-27.

[9] 方宇荣, 陈正权. 120 t BOF-LF-VD-CC 流程冶炼的 20CrMnTi 齿轮钢氧含量和夹杂物特性[J]. 特殊钢, 2020, 41(6): 64-67.

[10] 杨超云. 稀土对高碳铬轴承钢夹杂物-组织-性能的影响机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.

[11] 王利, 韩杰, 刘成宝, 等. 稀土对 GCr15 轴承钢夹杂物和疲劳性能的影响[J]. 中国冶金, 2023, 33(9): 52-62.

[12] 陈正权. LF-VD 工艺冶炼 20CrMnTi 齿轮钢全氧和夹杂物控制研究[J]. 山西冶金, 2019, 42(6): 24-27.

[13] 李尧, 成国光, 鲁金龙, 等. 20CrMnTi 齿轮钢中 TiN 夹杂物的特征与分布[J]. 中国冶金, 2020, 30(12): 28-34.

[14] 韩杰, 王毅, 刘成宝, 等. 稀土对 GCr15 轴承钢夹杂物的变质行为分析[J]. 连铸, 2023, 48(2): 70-77.

[15] 王健, 彭军, 张芳, 等. 稀土钪对 20CrMnTi 钢中 TiN 相析出热力学计算及分析[J]. 钢铁, 2024, 59(4): 66-73+84.

[16] Zheng L C, Malfliet A, Yan B Q, et al. Role of interfacial properties in the evolution of non-metallic inclusions in liquid steel[J]. ISIJ International, 2022, 62(8): 1573-1585.