

摩擦学学报

TRIBOLOGY



G13Cr4Mo4Ni4V轴承钢重载滚动接触疲劳损伤演化及失效行为研究

林飞虎, 王黎钦, 李臻, 吴继强, 魏帅帅, 束坤, 刘永宝

Fatigue Damage Evolution and Failure of G13Cr4Mo4Ni4V Bearing Steel under Heavy Load Rolling Contact

LIN Feihu, WANG Liqin, LI Zhen, WU Jiqiang, WEI Shuaishuai, SHU Kun, LIU Yongbao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2023104>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Cr4Mo4V轴承钢滚动接触疲劳和磨损性能研究

Rolling Contact Fatigue and Wear Characteristics of Cr4Mo4V Bearing Steel

摩擦学学报. 2017, 37(2): 155 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.02.003>

列车车轮滚动接触疲劳裂纹评价研究

Evaluation of Rolling Contact Fatigue Crack of Train Wheels

摩擦学学报. 2020, 40(3): 305 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019210>

钢轨打磨磨痕粗糙度与交叉磨痕对滚动接触疲劳损伤的影响

Influences of Grinding Mark Roughness and Cross Marks on Rolling Contact Fatigue Damage of Rail

摩擦学学报. 2021, 41(6): 813 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020247>

原始组织对ER9车轮钢滚动接触疲劳性能的影响

Influence of Original Microstructure on Rolling Contact Fatigue Properties of ER9 Wheel Steel

摩擦学学报. 2021, 41(6): 902 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020213>

不均匀组织ER8车轮滚动接触疲劳性能研究

Rolling Contact Fatigue Performance of ER8 Wheel Steel with Non-Uniform Microstructure

摩擦学学报. 2021, 41(4): 553 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020154>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

林飞虎, 王黎钦, 李臻, 吴继强, 魏帅帅, 束坤, 刘永宝. G13Cr4Mo4Ni4V轴承钢重载滚动接触疲劳损伤演化及失效行为研究[J]. 摩擦学学报(中英文), 2024, 44(9): 1219–1229. LIN Feihu, WANG Liqin, LI Zhen, WU Jiqiang, WEI Shuaishuai, SHU Kun, LIU Yongbao. Fatigue Damage Evolution and Failure of G13Cr4Mo4Ni4V Bearing Steel under Heavy Load Rolling Contact[J]. Tribology, 2024, 44(9): 1219–1229. DOI: 10.16078/j.tribology.2023104

G13Cr4Mo4Ni4V轴承钢重载滚动接触疲劳损伤演化及失效行为研究

林飞虎¹, 王黎钦^{1,2*}, 李臻¹, 吴继强¹, 魏帅帅¹, 束坤^{1,3*}, 刘永宝⁴

(1. 哈尔滨工业大学 航空航天轴承技术及装备工信部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

3. 哈尔滨工业大学 郑州研究院, 河南 郑州 450046;

4. 中国航发哈尔滨轴承有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150025)

摘要: G13Cr4Mo4Ni4V高温轴承钢在航发主轴轴承中广泛应用, 具有优异的接触疲劳强度. 采用球棒式疲劳试验机研究其在重载润滑条件下的滚动接触疲劳(RCF)损伤演化及失效行为. 通过对测试棒接触轨迹三维形貌的测量, 结合混合弹流润滑分析, 获取了接触区润滑行为的演变规律及其对表层和近表层疲劳失效行为的影响. 通过对次表层材料微观结构组分和组织形貌的分析, 研究了材料组织结构的累积损伤行为, 探讨了微区润滑行为与近表层夹杂和次表层材料累积损伤之间的映射关系. 研究表明: 接触轨迹表面磨损、微点蚀和塑性变形造成接触表面润滑状态变化, 润滑状态变化、近表层夹杂和次表层材料组织结构累积损伤之间的竞争机制和相互作用是造成不同疲劳失效形式的主要因素. 该研究中首次对G13Cr4Mo4Ni4V轴承钢疲劳损伤演化及失效行为进行了详细分析, 为轴承制造筛选材料和工艺提供数据.

关键词: 轴承钢; 滚动接触疲劳; 损伤演化; 混合弹流润滑; 塑性变形

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2024)09-1219-11

Fatigue Damage Evolution and Failure of G13Cr4Mo4Ni4V Bearing Steel under Heavy Load Rolling Contact

LIN Feihu¹, WANG Liqin^{1,2*}, LI Zhen¹, WU Jiqiang¹, WEI Shuaishuai¹, SHU Kun^{1,3*}, LIU Yongbao⁴

(1. MIIT Key Laboratory of Aerospace Bearing Technology and Equipment,

Harbin Institute of Technology, Heilongjiang Harbin 150001, China;

2. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Heilongjiang Harbin 150080, China;

3. Zhengzhou Research Institute, Harbin Institute of Technology, Henan Zhengzhou 450046, China;

4. AECC Harbin Bearing Corporation Ltd, Heilongjiang Harbin 150025, China)

Abstract: As one of the important basic components of aeroengines, bearings can provide structural support and reduce friction torque for the rotary shaft system. G13Cr4Mo4Ni4V high-temperature bearing steel is widely used in aeroengine main shaft bearings, and has excellent contact fatigue strength. The rolling contact fatigue (RCF) test is an important

Received 13 June 2023, revised 14 October 2023, accepted 16 October 2023, available online 2 April 2024.

*Corresponding author. E-mail: lqwang@hit.edu.cn, Tel: +86-13895755121; E-mail: shukun8162@163.com.

This project was supported by the Basic Research Project (2020-JCJQ-ZD-155-12) and the National Natural Science Foundation of China (52205191).

基础研究项目(2020-JCJQ-ZD-155-12)和国家自然科学基金项目(52205191)资助.

indicator to measure the performance of bearing steel. Compared with basic material performance experiments, such as tension and compression fatigue experiments and rotational tensile fatigue experiments, because it is similar to the real load conditions of the bearing, the test is more suitable as a guide for material heat treatment and processing process optimization in bearing processing. In order to obtain the RCF damage characteristics of G13Cr4Mo4Ni4V high-temperature bearing steel under heavy-load lubrication, the ball-on-rod RCF testing machine was used to study the fatigue damage evolution and failure behavior of the bearing steel, and its failure mechanism was preliminarily analyzed. The three-dimensional topography of the contact track of the rod was measured with a white light interferometer, combined with the analysis of mixed elastohydrodynamic lubrication, the evolution law of the lubrication behavior in the contact area and its influence on the fatigue failure behavior of the surface layer and the near-surface layer were obtained. The microstructural components and organizational topography of the material in the subsurface layer and its crack source area were analyzed through OA, SEM and EDS, and the cumulative damage and failure behavior of the material organizational structure were studied. By analyzing the lubrication behavior of the contact area, the material microstructural components, microstructure topography of the near-surface and sub-surface layers and their crack source areas, the mapping relationship between the evolution of the lubrication state and the cumulative damage of near-surface inclusions and sub-surface materials were explored. The research results showed that the lubrication state of the contact track of the test rod changed with the change of the contact surface topography at different operating stages, and the changes in the lubrication state would affect surface damage behaviors such as surface wear and micropitting. Inclusions in the near-surface layer caused the Von Mises stress to exceed the yield limit of the material, causing cracks to initiate and promoting RCF in the near-surface layer. The cumulative damage to the subsurface material structure was the main factor causing the RCF of the subsurface layer. The competition mechanism and interaction between changes in lubrication state, near-surface inclusions, and cumulative damage to the subsurface material structure were the main factors causing different RCF failure forms. This study provided the first detailed analysis of the fatigue damage evolution and failure behavior of G13Cr4Mo4Ni4V bearing steel, providing data for screening materials and processes in bearing manufacturing.

Key words: bearing steel; rolling contact fatigue; damage evolution; mixed elastohydrodynamic lubrication; plastic deformation

随着工况极限边界的逐步扩展和服役性能要求的大幅提升,苛刻工况下的滚动轴承损伤失效已经成为阻碍我国航空轴承技术发展的重要瓶颈问题之一.以新一代航空发动机主轴轴承为例,其所需 DN (内径 \times 转速)值超过 3.5×10^6 (mm·r)/min,最大接触应力可以高达2 GPa以上^[1].相关统计结果表明,滚动接触疲劳失效在我国航空轴承失效形式中占比接近40%^[2].因此,开展苛刻工况下轴承钢的疲劳损伤失效分析,揭示其损伤演化控制机理,对于优化航空轴承的运行稳定性和可靠性具有重要意义.

目前,8Cr4Mo4V与G13Cr4Mo4Ni4V轴承钢是我国航空发动机主轴轴承最为常用的2种第二代高温轴承钢.其中,Guan等^[3]发现8Cr4Mo4V轴承钢次表层最大应力处含有的大尺寸夹杂物大幅降低材料的疲劳寿命.与8Cr4Mo4V钢相比,G13Cr4Mo4Ni4V钢具有较小的夹杂物尺寸和较高的芯部位韧性,其疲劳损伤行为可能存在显著的差异.

相比拉压疲劳性能和旋转拉伸等材料基础性能疲劳试验,滚动接触疲劳(RCF)试验的测试承载条件更接近轴承真实运行工况,测试分析结果也更适用

于指导相关轴承热处理及加工工艺.采用球棒式疲劳试验机,郭军等^[4-6]系统地研究了8Cr4Mo4V的疲劳损伤特性,初步分析了材料微观组织的变化.程胜等^[7]研究了GCr15钢滚动轴承疲劳剥落失效过程中1种针状相的微观特征及形成机理,分析了这种针状相的形成及其与表面裂纹的相互作用.李林龙等^[8]研究了稀土对GCr15轴承钢滚动接触疲劳中微点蚀的影响,分析了稀土对GCr15轴承钢中碳化物的析出和大量网状碳化物形成的抑制作用.Kang等^[9]通过对次表层裂纹扩展行为进行统计,分析截面硬度的变化与裂纹类型的关系.Arakere等^[10-11]开展了M50NiL轴承钢在不同应力水平和工作温度下的疲劳试验,获得了塑性变形区微观结构的演化规律.

现有研究已经对轴承钢疲劳损伤和累积损伤演化规律有着较为深入的研究,但是不同影响因素耦合下对疲劳损伤演化规律和失效形式之间关系尚不明确,制约了相关理论在轴承上的应用.本文中在考虑表面形貌演化对润滑状态的影响下,研究了G13Cr4Mo4Ni4V轴承钢在RCF过程中次表层材料组织累积损伤及夹杂物等影响因素相互作用下对疲劳失效行为的影响.

1 试验部分

1.1 材料准备

本文中采用的测试棒材料为G13Cr4Mo4Ni4V, 对偶球为8Cr4Mo4V, 均由中国航发哈尔滨轴承有限公司提供. 其中, 棒试样材料毛坯采用真空感应熔炼和真空电弧重熔, 经过高温锻轧后成材, 其化学元素组成列于表1中. 上述试验材料的渗碳、热处理及加工工艺均与实际轴承套圈和滚动体保持一致. RCF试验中所使用的润滑剂为中石化石油化工科学研究院有限公司生产的4050高温合成航空润滑油, 流经接触区的润滑油油温为40 °C, 所采用标准为GLB1263-1991^[12-13].

1.2 试验设计

滚动接触疲劳试验机核心接触区域示意图如图1所示, 测试棒使用电主轴驱动旋转, 通过对加载环施加940 N轴向加载力, 力传递到球并对试棒施加循环接触应力, 采用加速度传感器监测试验机运行及测试棒疲劳失效情况. 其中 D 为试样直径, D_1 为球直径, D_2 为球在加载环上的接触直径, D_3 为球和加载环的节圆直径, D_4 为加载环与球的接触直径. 2种接触副分别为球与加载环构成的平面点接触摩擦副和测试棒与球构成弧面点接触摩擦副, 两接触副分别如图1(b)中I和II区域所示.

通过ASTM STP771标准中Glover^[14]提出的计算方法简化可得每转1周的应力循环次数 $K=2.27$, 结合Hertz理论, 获得的试验条件列于表2中.

2 结果与分析

2.1 疲劳寿命及累积损伤试验

采用两参数Weibull分布法对16组有效寿命数据进行处理, 分布函数如式(1)所示.

$$F(x) = 1 - \exp[-(x/\eta)^\beta] \quad (1)$$

式中, β 为形状参数, η 为尺度参数. 通过最大似然估计法求解分布函数的2个参数并列于表3中, 对疲劳寿命数据进行拟合, 结果如图2所示, L_{10} 和 L_{50} 表示失效概率分别低于10%和50%时的循环次数.

材料的疲劳累积损伤过程可分为安定、稳态响应和不稳定阶段, 通过寿命试验获取 L_{10} 寿命以及仿真所得塑性变形量, 结合国外相关结果^[10-11]对该试验进行分段, 分段情况列于表4中. 对试验后的测试棒进行切割, 保留完整接触痕迹, 获取检测试样, 试样沿径向剖切后分为2组, 对硬度试样沿矩形面抛光, 对金相分析试样半圆面打磨抛光至接触痕迹中心截面处, 使用体积分数为4%的硝酸酒精溶液腐蚀, 试样制备流程如图3所示.

2.2 应力-应变分析

G13Cr4Mo4Ni4V轴承钢表层的屈服强度极限为2 778 MPa^[15], 根据赫兹接触理论可知在4.8 GPa的应力作用下, 材料次表层最大Von Mises应力超过屈服极限, 通过弹塑性接触有限元模型获得塑性变形量和应力分布. 式(2)体现了G13Cr4Mo4Ni4V轴承钢的宏观弹塑性变形规律, 弹塑性本构关系基于Voce模型^[15], 如式(3)所示.

表1 G13Cr4Mo4Ni4V轴承钢化学成分
Table 1 Chemical composition of G13Cr4Mo4Ni4V bearing steel

Materials	Mass fraction/%									
	C	Cr	Mo	Ni	V	Mn	Si	P	S	W
G13Cr4Mo4Ni4V	0.12	4.00	4.30	3.50	1.30	0.35	0.25	<0.03	<0.01	<0.15

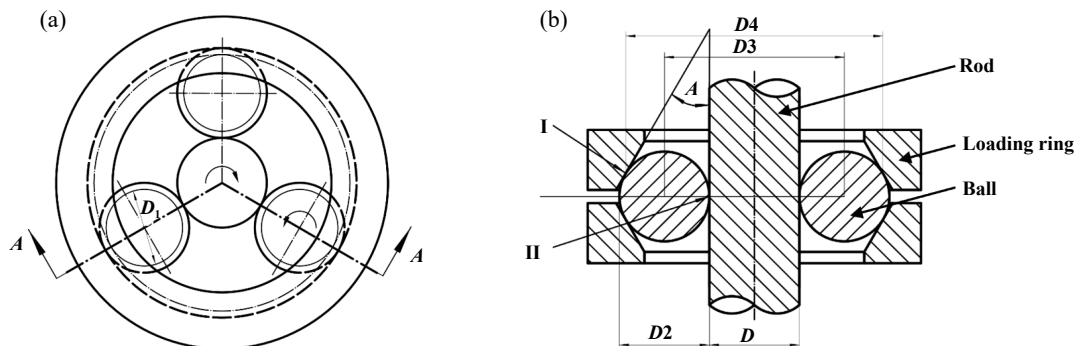


Fig. 1 Schematic diagram of the ball-on-rod rolling contact fatigue testing machine: (a) top view structure of the contact area; (b) cross-sectional structure

图1 滚动接触疲劳试验机原理图: (a)接触区俯视结构; (b)剖视结构

表 2 滚动接触疲劳试验条件

Table 2 Conditions for the ball-on-rod rolling contact fatigue test in the test

Parameter	Specifications
Maximum Hertzian contact stress	4.8 GPa
Speed	10 000 r/min
Chamber temperature	40 °C
Lubrication feed rate	2 mL/min
Number of life test groups	16

表 3 G13Cr4Mo4Ni4V钢疲劳寿命Weibull分布参数

Table 3 Weibull distribution parameters of fatigue life of G13Cr4Mo4Ni4V steel

Parameters	Shape parameter, β	Size parameter, η	$L_{10}/10^8$ cycles	$L_{50}/10^8$ cycles
Specifications	2.39	2.65	1.41	1.96

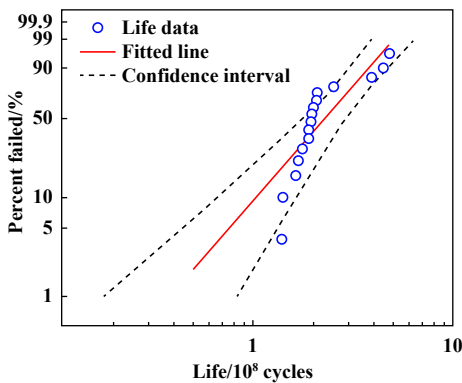


Fig. 2 Weibull distribution curve of fatigue life of G13Cr4Mo4Ni4V steel (4.8 GPa)

图 2 G13Cr4Mo4Ni4V钢疲劳寿命Weibull分布曲线(4.8 GPa)

表 4 疲劳累积损伤试验

Table 4 Fatigue cumulative damage test

Track	RCF loading cycles
1	22 700
2	1.63×10^7
3	3.27×10^7
4	9.81×10^7

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (2)$$

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \sigma < \sigma_y \\ 1930 + 1380\{1 - e^{-(455 \times \varepsilon)^{0.480}}\} & \sigma \geq \sigma_y \end{cases} \quad (3)$$

式中, ε 为总应变, ε_e 为弹性应变, ε_p 为塑性应变, σ 为应力, σ_y 为屈服强度, E 为弹性模量。

通过有限元对接触区进行静力学分析, 图4(a)所示为1/4对称接触区域的网格划分, 对接触区附近进行网格加密; 图4(b)所示为接触区接触应力分布, 在4.8 GPa接触应力下, 接触半长为0.38 mm, Von Mises应力分

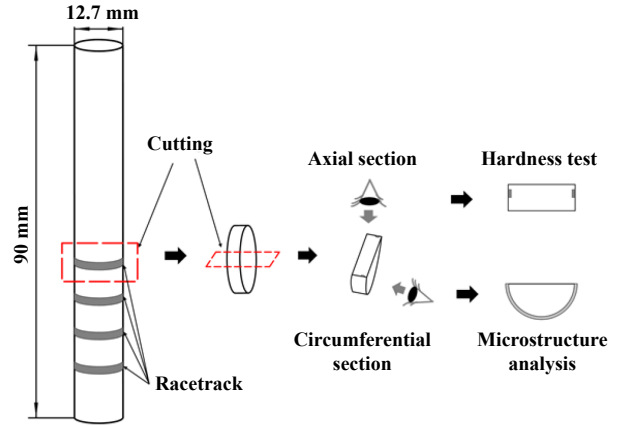


Fig. 3 Sample preparation process

图 3 试样制备流程

布如图4(c)所示, 塑性变形量为0.32 mm, 变形区域为灰色区域, 深度为0.09~0.21 mm, 最大Von Mises值为2.89 GPa, 深度为0.14 mm。

2.3 表面形貌及润滑状态演化

2.3.1 表面形貌演化

为分析接触轨迹表面形貌在不同损伤阶段的变化, 使用白光干涉仪对其特征形貌进行提取, 并通过高斯滤波法去除表面几何形貌, 其特征参数列于表5中。图5(a~c)所示为接触区在不同阶段的表面形貌照片, 图5(d)所示为接触轨迹在不同阶段的截面轮廓变化, 图5(e)所示为对应配副接触轨迹的表面形貌照片。

在安定阶段的22 300次循环下, 算数平均高度(S_a)、偏态(S_{sk})和峰度(S_{ku})与初始加工表面(0次循环)几乎没有变化, 接触轨迹表面质量较好, 出现了明显塑性变形, 如图5(a)和(d)所示。在稳态响应阶段的 $1.66 \times 10^7 \sim 9.63 \times 10^7$ 次循环下, 由于表面磨损逐渐增多导致表面粗糙度上升, S_a 从0.018 μm 升高至0.072 μm 左右, 材料组织累积损伤造成塑形变形加剧导致加工凹痕逐渐消失, S_{sk} 从-2.23上升到5.92, 在 9.63×10^7 次循环下接触轨迹塑性变形加剧, 粗糙峰增多且发生较明显的磨损, 如图5(b)和(d)所示。在不稳定阶段的 3.88×10^8 次循环时, 接触区较难发生磨损, S_a 相对于稳态响应, 后期无明显变化, 材料次表层微观组织失稳发生软化现象, 轨迹发生明显塑性变形, 深度增大至2 μm , 表面形貌剧变导致 S_{sk} 迅速增大至1 867.13, 点蚀现象加剧深度达2 μm 以上, 如图5(d)所示。

2.3.2 表面润滑状态变化

为分析测试棒表面接触轨迹在不同阶段的润滑状态变化, 使用Wu等^[12]提出的热混合润滑模型分析不同运行阶段表面的润滑状态, 在整个润滑求解域内压力由Reynolds方程控制。

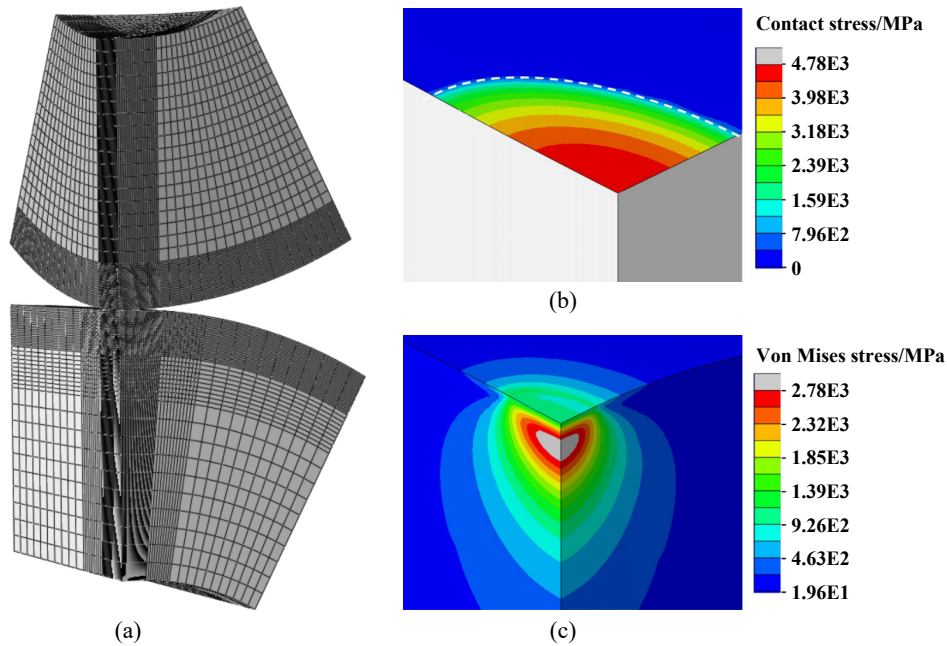


Fig. 4 A FEA contact model: (a) quarter-symmetrical contact model and its mesh distribution; (b) contact stress distribution; (c) Von Mises stress distribution

图 4 有限元接触模型: (a) 1/4 对称的接触模型及其网格分布; (b) 接触应力分布; (c) Von Mises 应力分布

表 5 轨迹表面特征参数

Table 5 Track surface characteristic parameters

RCF loading cycles	$S_a/\mu\text{m}$	S_{sk}	S_{ku}
0	0.014	-2.23	8.83
22 300	0.018	-2.07	6.86
1.66×10^7	0.041	1.72	11.30
3.17×10^7	0.054	6.93	4.60
9.63×10^7	0.072	5.92	4.02
3.88×10^8	0.071	1867.13	6.21

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta^*} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta^*} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = u_e \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} \quad (4)$$

式中, p 和 h 分别为油膜压力和油膜厚度; η^* 和 ρ 分别为润滑剂的等效黏度和密度; u_e 为球和试棒沿 x 方向的卷吸速度。

油膜方程为

$$h(x, y, t) = h_0(t) + \frac{x^2}{2R_x} + \frac{y^2}{2R_y} + \delta_1(x, y, t) + \delta_2(x, y, t) + v_e(x, y, t) \quad (5)$$

式中, $h_0(t)$ 为刚体中心膜厚; R_x 和 R_y 分别为球和试棒沿 x 和 y 方向的等效曲率半径; $\delta_1(x, y, t)$ 和 $\delta_2(x, y, t)$ 分别为两表面随时间变化的粗糙度高度, $v_e(x, y, t)$ 为表面弹性变形。

图 6(a) 所示为安定阶段 22 300 次循环下的润滑状态, 接触区域处于弹流润滑状态, 其中 x 为沿滚动方向的轴, a 为接触半宽, x/a 表示接触区无量纲宽度; 图 6(b) 所

示为稳态响应阶段 9.63×10^7 次循环下的润滑状态, 由于表面粗糙度显著上升且粗糙凸峰比例增多, 该阶段下接触区局部逐渐演化为混合润滑甚至干摩擦状态, 局部接触应力突增至远超材料屈服应力, 导致接触表面产生微点蚀和剥落现象; 图 6(c) 所示为不稳定阶段 3.88×10^8 次循环时的润滑状态, 接触表面粗糙度变化不大, 但由于塑性变形量的大幅上升导致接触区接触应力显著下降, 整体又转变为弹流润滑状态, 降低了表面剥落发生的概率。因此表面起源的疲劳损伤主要发生在稳态响应阶段后期, 而在不稳定阶段反而不易产生表面疲劳损伤。

2.4 次表层材料组织演化

在轴承钢疲劳损伤寿命分析中, 按次表层材料组织演化规律, 可分为安定阶段、稳态响应阶段和不稳定阶段^[16], 第 1 阶段涉及局部流动、加工硬化和塑性安定; 第 2 阶段涉及材料次表层形成暗蚀和白蚀层以及纹理强化; 第 3 阶段涉及材料软化, 导致屈服应力降低、塑性变形增加和微观纹理发展^[17-18]。

2.4.1 材料组织演化

图 7 所示为接触轨迹中心沿周向截面的材料组织演化的扫描电子显微镜 (SEM) 照片。在安定阶段, 22 300 次循环下的材料组织结构较基体无明显变化, 如图 7(a) 所示, 对 $140 \mu\text{m}$ 截面深度处红框所示区域放大, 发现在残留的奥氏体组织晶界内生长着以板条状

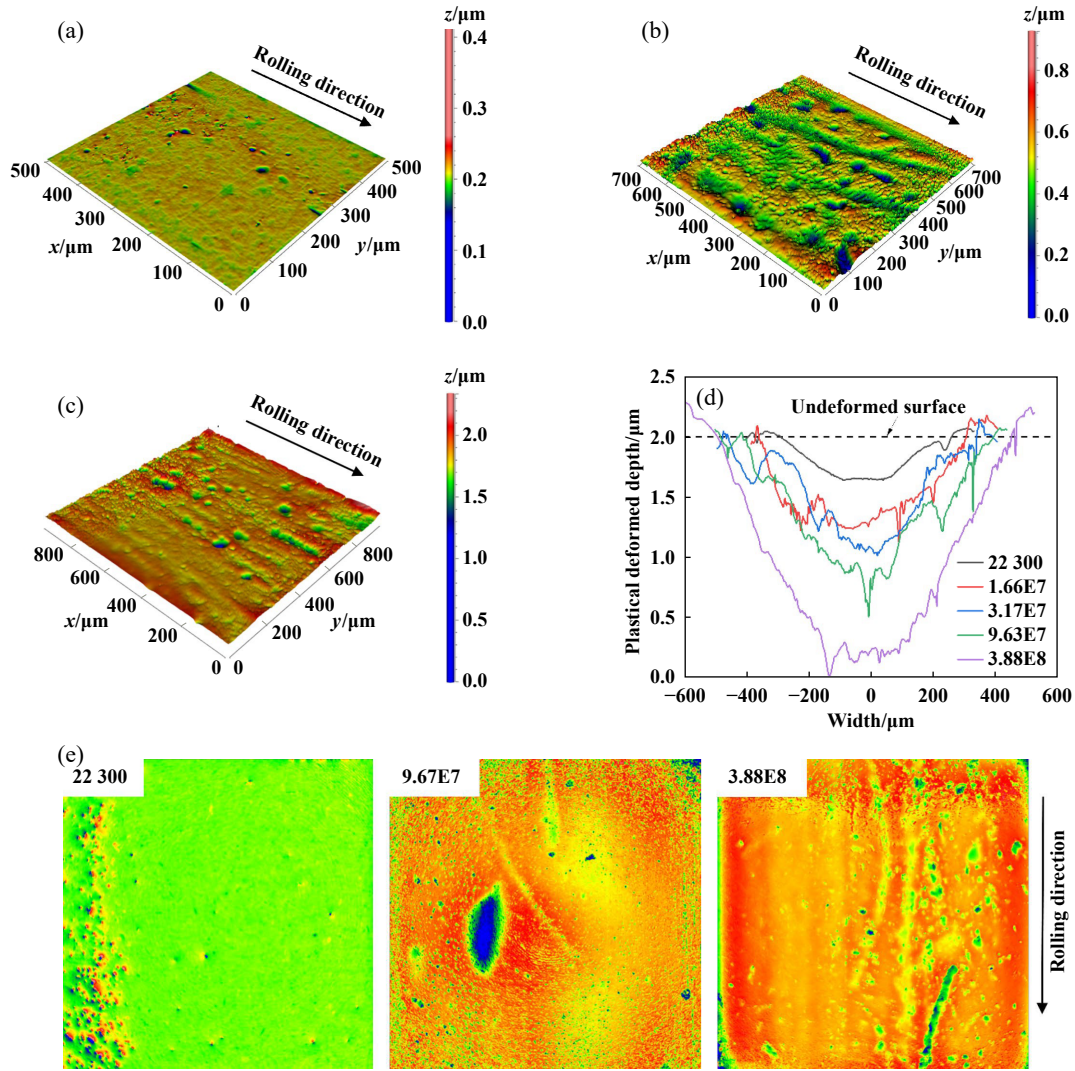


Fig. 5 Surface morphology of contact tracks at different stages: (a) 22 300 cycles, (b) 9.63×10^7 cycles and (c) 3.88×10^8 cycles tracks morphology, (d) cross-section profile evolution and (e) corresponding pairs morphology

图 5 不同阶段的接触轨迹表面形貌照片: (a) 22 300次循环, (b) 9.63×10^7 次循环和(c) 3.88×10^8 次循环轨迹形貌照片及 (d)截面轮廓演化和(e)对应配副形貌照片

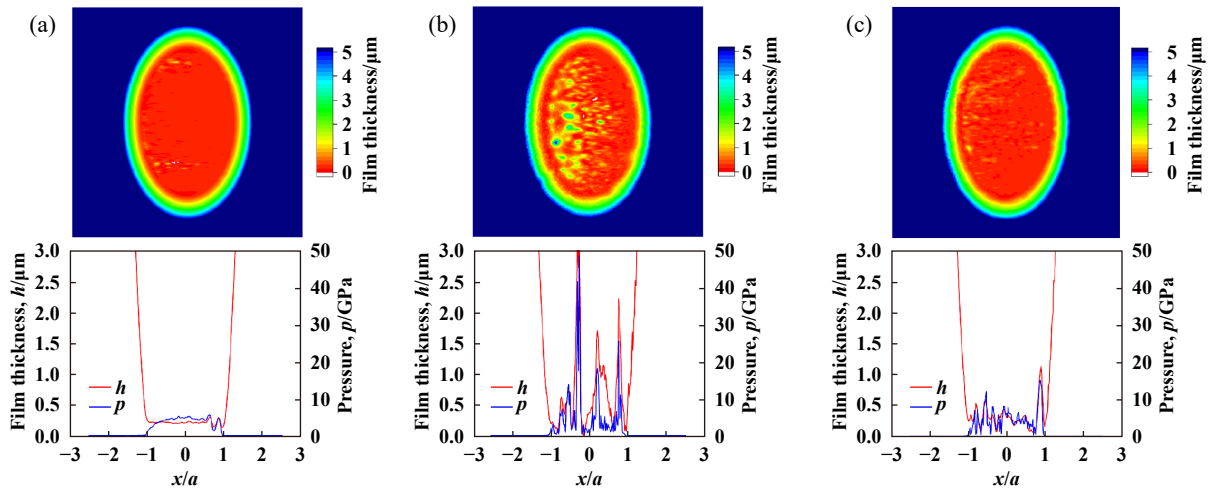


Fig. 6 Lubrication state of contact track in different operating stages: (a) 22 300 cycles; (b) 9.63×10^7 cycles; (c) 3.88×10^8 cycles

图 6 不同运行阶段接触轨迹的润滑状态: (a) 22 300次循环; (b) 9.63×10^7 次循环; (c) 3.88×10^8 次循环

马氏体组织为主的组织结构,同时嵌有大量碳化物颗粒.在稳态响应阶段,在 3.17×10^7 次循环应力作用下100~180 μm 深度处开始出现明显的白色刻蚀层(White etching layer, WEL),晶界进一步细化并伴有纳米晶颗粒,如图7(b)所示.马氏体晶粒在最大切应力作用下发生晶界滑移,过饱和碳元素溢出,晶界破碎形成纳米晶结构.在不稳定阶段, 3.88×10^8 次循环时白蚀层更加明显并沿深度方向延伸至80~200 μm ,细化晶粒现象更为明显,如图7(c)所示.位错驱动的碳迁移导致材料微观结构退化,材料软化造成塑性变形加剧和屈服强度降低,在棘轮效应的影响下产生明显的塑性硬化现象,硬度持续升高直至材料出现裂纹^[11].高合金含量和二次硬化导致材料损伤轻微,夹杂周围的应力变化不足以形成“蝶形组织”^[19].

2.4.2 材料硬度分布

图8(a)所示为接触轨迹轴向截面沿深度方向的维氏硬度测试方案,蓝色点为待测点.图8(b)所示为测试棒接触轨迹轴向截面次表层硬度分布,塑性安定阶段硬

度变化不明显;稳态响应阶段初期($\leq 3.17 \times 10^7$ 次)100~180 μm 深度处维氏硬度(HV0.3)缓慢增加约10HV0.3~50HV0.3,至 9.63×10^7 次循环时HV0.3在120 μm 深度附近达到最高接近870HV0.3,出现了明显的塑性硬化现象;不稳定阶段的 3.88×10^8 次循环时,30~180 μm 深度处的HV0.3值显著升高.

2.4.3 次表层裂纹萌生

图9所示为 2.08×10^8 次循环时接触轨迹在140 μm 深度附近的次表层裂纹及其夹杂成分分析,图9(a)所示为夹杂物内部裂纹的SEM照片,对其分析发现其C、Mo和O元素含量明显偏高,为富Mo碳化物或氧化物夹杂.虽然在高应力作用下次表层夹杂物内部萌生裂纹,但裂纹并未继续向基体扩展并引发剥落,这与G13Cr4Mo4Ni4V轴承钢渗碳和热处理工艺导致芯部韧性高且几乎无大于10 μm 的碳化物夹杂有关,从而抑制了次表层100~200 μm 深度处萌生裂纹的进一步扩展.

2.5 疲劳损伤形式

轴承钢的RCF失效是由多种因素共同影响的,主要

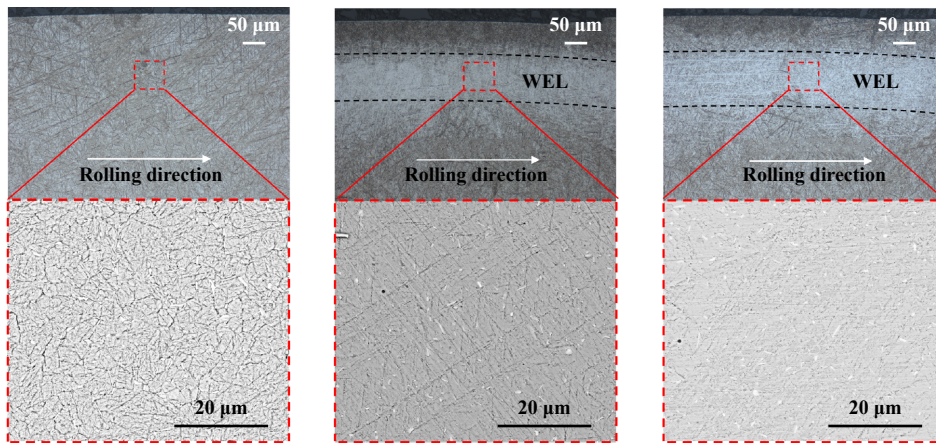


Fig. 7 Microstructure evolution of the circumferential section of the contact track: (a) 22 300 cycles; (b) 3.17×10^7 cycles; (c) 3.88×10^8 cycles

图7 接触轨迹周向截面组织演化的显微照片:(a) 22 300次循环;(b) 3.17×10^7 次循环;(c) 3.88×10^8 次循环

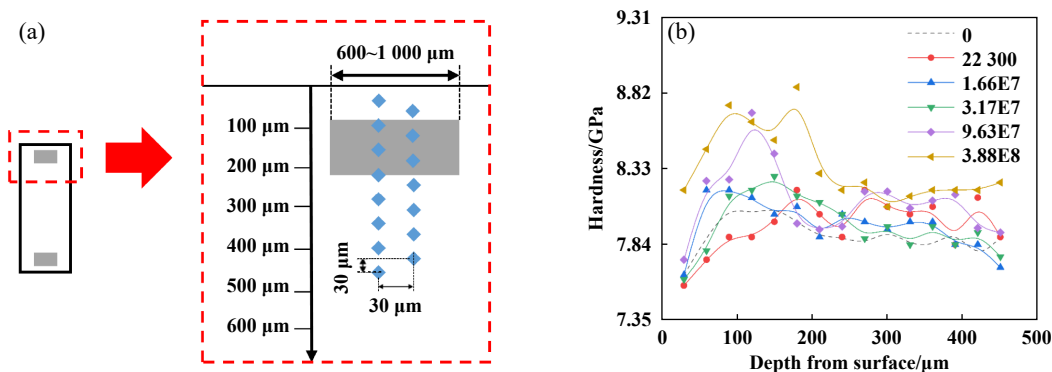


Fig. 8 Subsurface Vickers hardness distribution in the axial section: (a) test scheme; (b) hardness distribution

图8 截面次表层维氏硬度分布:(a)测试方案;(b)硬度分布

可以分为表层失效和次表层失效. 表层失效由表层加工缺陷、油液污染颗粒以及润滑不良等因素的作用下产生, 次表层失效则在内部夹杂物诱导或材料损伤退化作用下形成^[20-21].

2.5.1 表层剥落

图10(a)所示为 2.08×10^8 次循环下表层剥落坑形貌的SEM照片, 滚动方向虚线为接触轨迹. 根据剥落坑弧线的走向和形貌可区分为疲劳源区、裂纹扩展区和

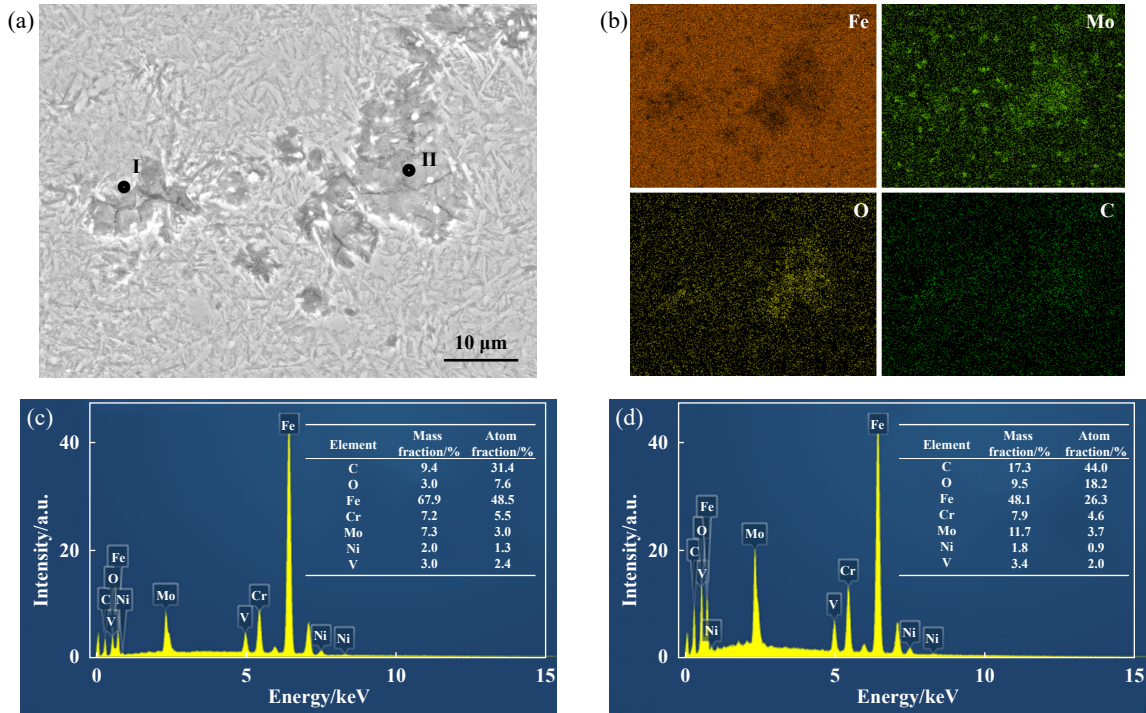


Fig. 9 Subsurface crack initiation during 2.08×10^8 cycles: (a) SEM micrographs of cracks area; (b) element distribution; (c) element content at point I and (d) point II

图 9 2.08×10^8 次循环时次表层裂纹萌生: (a)裂纹区域的SEM照片; (b)元素分布图; (c) I 点元素和(d) II 点元素含量

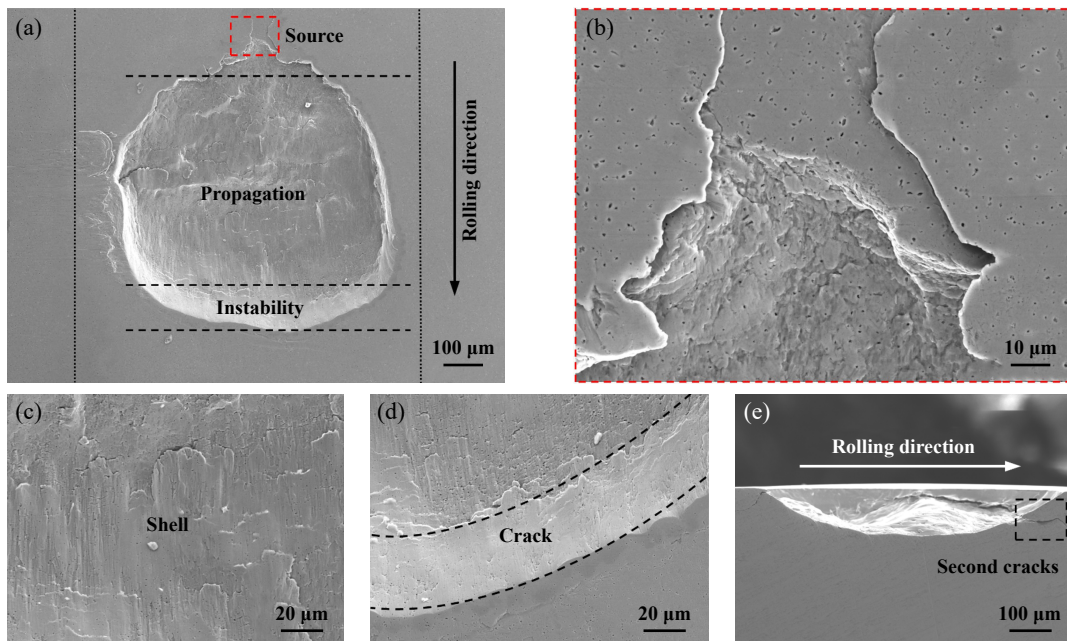


Fig. 10 SEM micrographs of of the spalling on the surface under 2.08×10^8 cycles: (a) the overall morphology of the spalling; (b) fatigue source; (c) crack propagation area; (d) instantaneous fault area; (e) the spalling cross section morphology

图 10 2.08×10^8 次循环时表层剥落坑形貌的SEM照片: (a)剥落坑整体; (b)疲劳源区; (c)裂纹扩展区; (d)瞬断区; (e)剥落坑截面

瞬断区, 疲劳源区存在致密波纹状皱纹, 为裂纹初始扩展阶段, 以微塑性变形为主, 裂纹形成缓慢, 如图10(b)所示. 裂纹扩展区大面积光滑的贝纹线延伸至剥落坑边缘, 如图10(c)所示, 为裂纹扩展的主要阶段, 在较高局部应力的作用下微塑性及脆性断裂交替产生. 图10(d)所示的剥落坑边缘瞬断区断口齐平且细腻, 为无规则的粗糙表面, 在高局部应力的作用下发生脆性断裂. 剥落坑边缘沿滚动方向有明显的裂纹延伸, 滚动体接触剥落坑边缘产生应力集中, 促使剥落沿滚动方向扩展, 如图10(e)所示. 表层剥落大多从接触轨迹中心起源, 由于稳态响应阶段后期局部出现混合润滑状态产生微点蚀现象, 如图5(b)和图6(b)所示, 在接触区微滑和最大接触应力的共同作用下轨迹中心微点蚀边缘

产生应力集中, 点蚀萌生表面微裂纹并相互连接, 沿最大剪切应力方向扩展直至产生表面疲劳剥落.

2.5.2 近表层剥落

图11(a)所示为 1.1×10^8 次循环下沿滚动方向的近表层剥落截面形貌的SEM照片. I区为一次剥落区域, 裂纹由近表层源区扩展至表层产生缺陷, 产生应力集中造成表面裂纹并沿最大剪应力方向扩展, 产生一次剥落; II区为二次剥落区, 一次剥落边缘应力集中造成沿最大剪应力方向的裂纹扩展后产生二次剥落.

图11(b)所示为近表层疲劳源区形貌的SEM照片, 其中III区为扩展裂纹附近区域. 如图11(c)所示为疲劳源区的元素分布, 图11(d)和(e)所示分别为图11(a)中I点和II点处的元素组成, I点裂纹萌生处C、O和Si

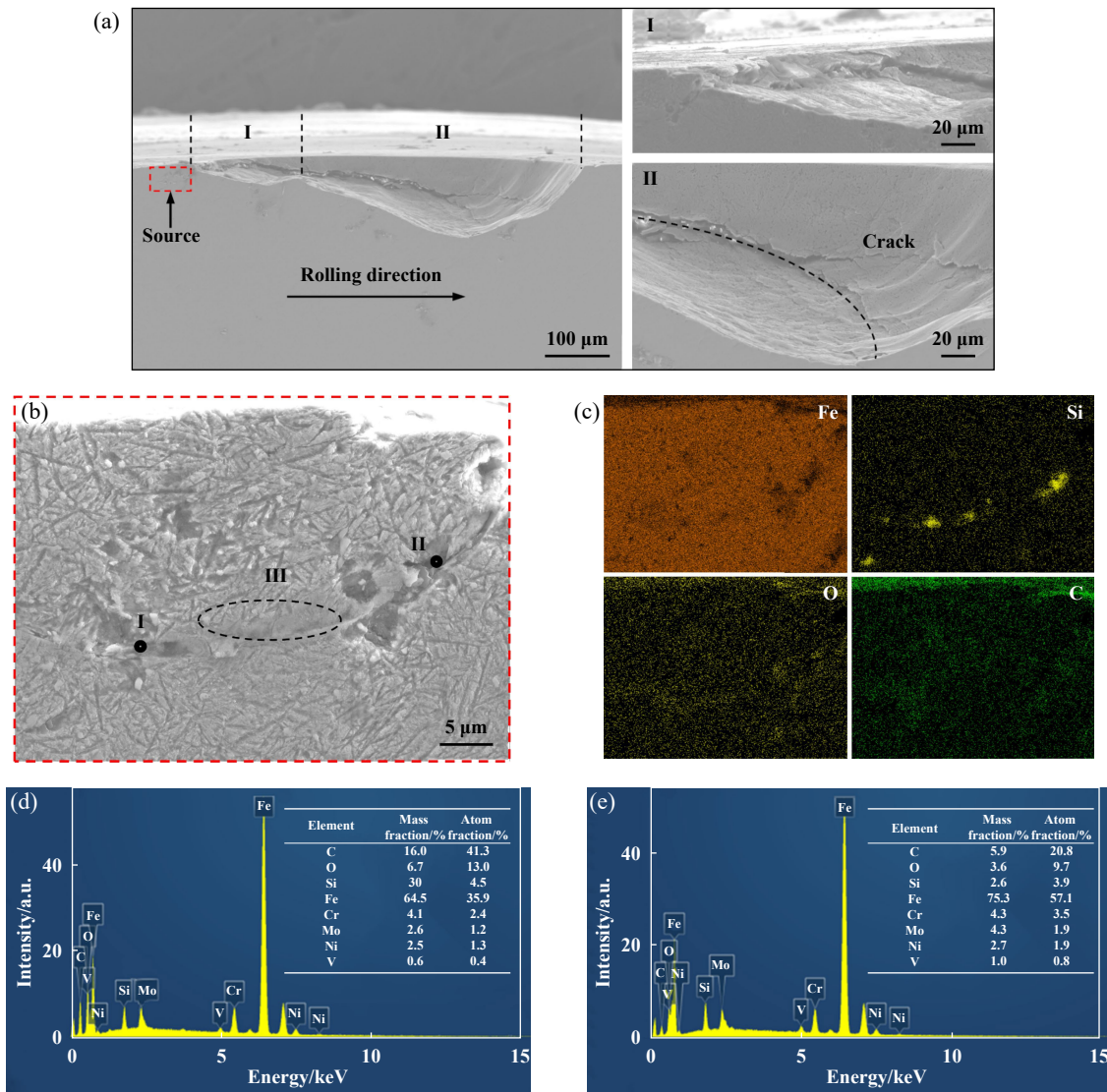


Fig. 11 The near-surface spalling under 1.1×10^8 cycles: (a) SEM micrographs of spalling cross section; (b) SEM micrographs of crack source area; (c) element distribution of fatigue source area, (d) element content in point II; (e) element content in point I

图 11 1.1×10^8 次循环时近表层剥落坑形貌和元素组成: (a) 剥落区域截面的 SEM 照片; (b) 裂纹源区的 SEM 照片; (c) 疲劳源区的元素分布照片; (d) I 点元素含量; (e) II 点元素含量

元素含量明显偏高,为碳化物和氧化硅夹杂,此类夹杂较基体具有更高的硬度和脆性,易产生裂纹.裂纹在最大剪应力作用下沿夹杂物富集方向扩展,直至出现表层微剥落,III区裂纹两侧出现白蚀区(White etching area, WEA).该类型剥落由于表面润滑状态的改变,局部区域接触应力和拖动力升高,导致10~30 μm 深度处的近表层非金属夹杂局部应力超过屈服极限萌生裂纹,在最大剪切应力作用下产生30 μm 深度的浅层剥落.在稳态响应阶段后期,接触轨迹表面粗糙度增大且在部分接触区域出现混合润滑现象,这导致接触表面微区产生应力集中,部分区域接触应力远超材料屈服极限数倍,如图6(b)所示,导致近表层非金属夹杂处应力集中超过屈服极限产生裂纹,在最大剪切应力的作用下扩展至轨迹表面产生剥落.

2.5.3 次表层剥落

图12(a)所示为 3.88×10^8 次循环下次表层起源的剥落坑形貌的SEM照片,裂纹从底部中心处向表层扩展,底部呈致密状波纹的疲劳源区;向四周扩展过程中呈贝壳状纹路,为裂纹扩展区;在剥落坑边缘断口整齐,呈无规则粗糙表面,为瞬断区.图12(b)所示为经源区沿滚动方向截取截面的SEM照片及局部放大的金相图,发现多条裂纹均始于次表层140 μm 深度最大Von Mises应力区附近,裂纹源区附近出现WEA但并未发现明显非金属夹杂,说明裂纹产生是由材料性能退化所致.

3 结论

在本文试验中,G13Cr4Mo4Ni4V轴承钢在4.8 GPa重载下的接触疲劳演化规律和失效形式同时受到表面形貌、近表层夹杂物和次表层材料组织变化等多种因素的影响,其分析结果如下:

a. 在不同运行阶段,润滑状态随接触表面形貌的变化而改变.在稳态响应阶段后期,次表层材料累积损伤造成接触痕迹塑性变形,接触区局部出现混合润滑状态,在微滑作用下发生磨损并形成微点蚀,这是引起表层疲劳失效的主要原因.同时,接触微区局部接触应力升高导致近表层($<30 \mu\text{m}$)非金属夹杂的Von Mises应力超过屈服极限产生裂纹,这是引起近表层疲劳失效的主要原因.

b. 随着接触周次的升高,在稳态响应阶段的初期($\leq 3.17 \times 10^7$ 次),接触轨迹次表层高Von Mises应力区域(100~180 μm)开始出现白蚀层并逐渐加深,材料组织结构从晶体向纳米晶结构演变,塑性变形量增大,硬度在最大Von Mises处(140 μm)明显升高,直至不稳定阶段($>1.34 \times 10^8$ 次)白蚀层进一步加深,晶间产生大量位错滑移,材料软化导致塑性变形量显著增大,硬度在深度为30~180 μm 范围大幅升高,材料最大Von Mises区域产生次表层裂纹并最终造成次表层疲劳失效.

c. G13Cr4Mo4Ni4V轴承钢接触疲劳失效形式为

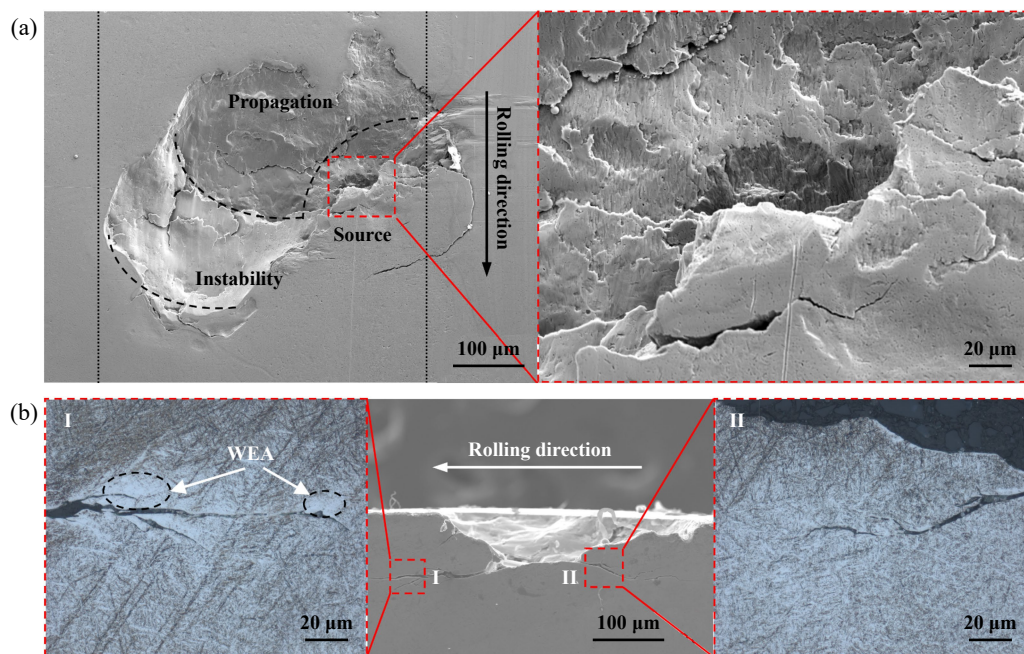


Fig. 12 The subsurface spalling under 3.88×10^8 cycles: (a) SEM micrographs of the overall morphology of the spalling; (b) SEM micrographs and Localized enlarged metallographic micrographs of the fatigue source

图 12 3.88×10^8 次循环时次表层剥落坑的形貌照片:(a)剥落坑整体的SEM照片;
(b)疲劳源区形貌的SEM照片及局部放大的金相图

表面润滑状态改变引起的表层疲劳剥落、非金属夹杂引起的近表层疲劳剥落和材料结构损伤演化引起的次表层疲劳剥落。表层和近表层疲劳损伤多发生于 L_{10} ~ L_{50} 寿命之间,而次表层疲劳剥落的寿命相对较长,基本高于 L_{50} 寿命。

参考文献

- [1] China Bearing Industry Association Association. High-end bearings technology roadmaps[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2018 (in Chinese) [中国轴承工业协会. 高端轴承技术路线图[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2018].
- [2] Liu Delin, Jiang Tao, He Yuhuai, et al. Discussion on failure problems of aero-bearing[J]. Failure Analysis and Prevention, 2015, 10(5): 324-330 (in Chinese) [刘德林, 姜涛, 何玉怀, 等. 浅论国内航空轴承的失效问题[J]. 失效分析与预防, 2015, 10(5): 324-330]. doi: 10.3969/j.issn.1673-6214.2015.05.012.
- [3] Guan Jian, Wang Liqin, Zhang Chuanwei, et al. Effects of non-metallic inclusions on the crack propagation in bearing steel[J]. Tribology International, 2017, 106: 123-131. doi: 10.1016/j.triboint.2016.10.030.
- [4] Guo Jun, Yang Maosheng, Lu Dehong, et al. Rolling contact fatigue and wear characteristics of Cr_4Mo_4V bearing steel[J]. Tribology, 2017, 37(2): 155-166 (in Chinese) [郭军, 杨卯生, 卢德宏, 等. Cr_4Mo_4V 轴承钢滚动接触疲劳和磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(2): 155-166]. doi: 10.16078/j.tribology.2017.02.003.
- [5] Guo Jun, Yang Maosheng, Lu Dehong, et al. Rotational bending fatigue life and fatigue crack initiation mechanism of Cr_4Mo_4V bearing steel[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(7): 134-143 (in Chinese) [郭军, 杨卯生, 卢德宏, 等. Cr_4Mo_4V 轴承钢旋转弯曲疲劳寿命及疲劳裂纹萌生机理[J]. 材料工程, 2019, 47(7): 134-143].
- [6] He Chunshuang, Luo Zhiqiang, Guo Jun, et al. Rolling contact fatigue and surface characteristics of high temperature bearing steel Cr_4Mo_4V [J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43(2): 1-7 (in Chinese) [何春双, 罗志强, 郭军, 等. Cr_4Mo_4V 高温轴承钢滚动接触表面特征与疲劳损伤机制[J]. 金属热处理, 2018, 43(2): 1-7]. doi: 10.13251/j.issn.0254-6051.2018.02.001.
- [7] Cheng Sheng, Sun Yang, Zhao Wenhui, et al. A needle-like structure formed in the occurrence of surface flaking during rolling contact fatigue of a GCr15 bearing[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2024, 60(04): 425-433 (in Chinese) [程胜, 孙阳, 赵文辉, 等. GCr15钢滚动轴承疲劳剥落失效过程中一种针状相的形成[J]. 金属学报, 2024, 60(04): 425-433].
- [8] Li Linlong, Wu Bi, Xue Weihai, et al. Effect of rare earth on the micro-pitting behavior in rolling contact fatigue of GCr15 bearing steel[J]. Tribology, 2023, 43(9): 995-1005 (in Chinese) [李林龙, 吴彼, 薛伟海, 等. 稀土对GCr15轴承钢滚动接触疲劳中微点蚀的影响[J]. 摩擦学学报, 2023, 43(9): 995-1005]. doi: 10.16078/j.tribology.2022155.
- [9] Kang J H, Vegter R H, Rivera-Díaz-del-Castillo P E J. Rolling contact fatigue in martensitic 100Cr6: subsurface hardening and crack formation[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 607: 328-333. doi: 10.1016/j.msea.2014.03.143.
- [10] Arakere N K, Subhash G. Work hardening response of M50-NiL case hardened bearing steel during shakedown in rolling contact fatigue[J]. Materials Science and Technology, 2013, 28(1): 34-38. doi: 10.1179/1743284711y.0000000060.
- [11] Bhattacharyya A, Subhash G, Arakere N. Evolution of subsurface plastic zone due to rolling contact fatigue of M-50 NiL case hardened bearing steel[J]. International Journal of Fatigue, 2014, 59: 102-113. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2013.09.010.
- [12] Wu Jiqiang, Wang Liqin, Li Zhen, et al. Thermal analysis of lubricated three-dimensional contact bodies considering interface roughness[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2022, 17(2): 16. doi: 10.1007/s11465-022-0672-8.
- [13] China aeronautical materials handbook editorial board. China aeronautical materials handbook[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002 (in Chinese) [中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002].
- [14] Glove D. A ball-rod rolling contact fatigue tester[J]. ASTM Special Technical Publications, 1982, 771: 107-124. doi: 10.1520/stp36135s.
- [15] Nélias D, Jacq C, Lormand G, et al. New methodology to evaluate the rolling contact fatigue performance of bearing steels with surface dents: application to 32CrMoV13 (nitrided) and M50 steels[J]. Journal of Tribology, 2005, 127(3): 611-622. doi: 10.1115/1.1924462.
- [16] Österlund R, Vingsbo O. Phase changes in fatigued ball bearings[J]. Metallurgical Transactions A, 1980, 11(5): 701-707. doi: 10.1007/BF02661199.
- [17] Voskamp A P, Mittemeijer E J. State of residual stress induced by cyclic rolling contact loading[J]. Materials Science and Technology, 1997, 13(5): 430-438. doi: 10.1179/mst.1997.13.5.430.
- [18] Voskamp A P, Mittemeijer E J. Crystallographic preferred orientation induced by cyclic rolling contact loading[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1996, 27(11): 3445-3465. doi: 10.1007/BF02595437.
- [19] Braza J F, Pearson P K, Hannigan C J. The performance of 52100, M-50, and M-50 NiL steels in radial bearings[C]//International Off-Highway & Powerplant Congress & Exposition, Warrendale, 1993. doi: 10.4271/932470.
- [20] Murakami Y. Inclusion rating by statistics of extreme values and its application to fatigue strength prediction and quality control of materials[J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 1994, 99(4): 345. doi: 10.6028/jres.099.032.
- [21] Bohmer H J. A new approach to determine the effect of nonmetallic inclusions on material behavior in rolling-contact[J]. ASTM Special Technical Publication, 1993, 211-221. doi: 10.1520/STP24836S