

# 42CrMo 钢激光-感应复合淬火滚动磨损与疲劳损伤行为研究

张群莉<sup>1,2</sup>, 黄华<sup>1,2</sup>, 唐泽浩<sup>1,2</sup>, 李国昌<sup>1,2</sup>, 牛庆安<sup>1,2</sup>, 陈智君<sup>1,2</sup>, 杜杨琼<sup>3</sup>, 姚建华<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>浙江工业大学激光先进制造研究院, 浙江 杭州 310023;

<sup>2</sup>高端激光制造装备省部共建协同创新中心, 浙江 杭州 310023;

<sup>3</sup>中浙高铁轴承有限公司, 浙江 衢州 324407

**摘要** 为了突破单一激光淬火硬化层深度较浅的局限性,采用激光和电磁感应双热源耦合方法进行复合淬火,以提高重载工况下 42CrMo 钢的硬化层深度。设计了滚动体-圆盘线接触滚动疲劳试验装置,分析了硬化层深度对 42CrMo 钢滚动接触疲劳性能的影响。使用扫描电镜、显微硬度计、激光共聚焦等设备分析了不同深度硬化层在模拟风电主轴轴承套圈与滚动体配合使用下的滚动疲劳损伤机理。结果表明:在相同的疲劳试验条件下,当硬化层深度达到 6.3 mm 时,磨损表面损伤程度有所减轻,磨痕深度降低到 23.61  $\mu\text{m}$ ,表层裂纹扩展角度下降到 15°,裂纹长度减小到 400  $\mu\text{m}$ ,同时扩展受到阻碍。硬化层深度为 6.3 mm 的试样沿 X 和 Y 方向的最大压应力分别达 440.3 MPa 和 395.3 MPa,并且一定的残余压应力可以提高材料的接触疲劳性能。该研究结果可为重载轴承的深层强化提供参考。

**关键词** 激光技术; 复合淬火; 42CrMo 钢; 滚动疲劳; 硬化层深度; 裂纹

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0802023

## 1 引言

重载轴承可起到支撑旋转体的作用,是保证重载机械设备正常运行的重要零部件,在能源动力、工程机械、轨道交通等领域的重载设备中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。在“十四五”规划中,为了与碳中和目标实现起步衔接,需要在风电领域设定与碳中和国家战略相适应的发展空间,即保证年均新增装机 5000 万千瓦以上<sup>[2]</sup>。大型风电主轴轴承由于长期处于重载、对磨等极端恶劣的工作条件下,极易出现表面失效,其中比较常见的失效形式是疲劳损伤,其破坏是由滚动体与主轴轴承套圈配合时在长期的循环高接触应力作用下产生的,从而导致风力发电机组发生故障的概率较高。因此,风电领域的快速发展对风电主轴轴承套圈滚道的表面接触疲劳性能提出了很高的要求。

大型风电机组中套圈与大直径滚动体配合使用时,要求主轴轴承套圈滚道具有一定深度的硬化层<sup>[3]</sup>,以延长机组在高负荷、对磨等极端恶劣工况下的使用寿命。国内外学者已对不同轴承钢材料进行了重载工况下的滚动接触疲劳性能研究,如:张强等<sup>[4]</sup>对采用双真空熔炼技术制备的 32Cr3MoVE 轴承钢进行表面渗氮处理,在 4.5 GPa 高接触应力下研究其滚动接触疲劳性能,分析其滚动接触疲劳破坏机制;郭军等<sup>[5]</sup>研究了 Cr4Mo4V 轴承钢在 0.18 滑滚比条件下的滚动接触疲劳和磨损性能;为了研究残余奥氏体含量对轴承钢滚动接触疲劳性能的影响,余丽<sup>[6]</sup>在油润滑状态下,对含有不同残余奥氏体的贝氏体 GCr15Si1Mo 轴承钢试样进行滚动疲劳试验,发现热处理状态下 GCr15Si1Mo 轴承钢的滚动疲劳性能优于常规 GCr15 轴承钢,而且特征疲劳寿命延长了 1.84 倍,中值疲劳寿命延长了 2.14 倍;Morsdorf

收稿日期: 2021-11-29; 修回日期: 2021-12-18; 录用日期: 2022-01-10

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0407301)、浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划(2022C03021)、浙江省属高校基本科研业务费项目(RF-C2019003)

通信作者: \*laser@zjut.edu.cn

等<sup>[7]</sup>提出了一种移动白色蚀刻裂纹扩展机制,同时验证了在 AISI 52100 轴承钢循环加载过程中,裂纹位置不断改变,并产生由铁素体纳米晶粒组成的严重塑性变形区域;Oezel 等<sup>[8]</sup>发现非金属夹杂物对 AISI 52100 轴承钢的疲劳性能有显著影响,在贝氏体热处理条件下同等硬度的洁净钢疲劳寿命延长了 16%;Liang 等<sup>[9]</sup>提出了富氢滚动体的失效机理,证实了晶界是空隙形成和裂纹扩展的优先位置;Paladugu 等<sup>[10]</sup>通过改变热处理参数在钢中产生不同的微观结构,所得到的表面渗碳的 AISI 3310 钢比由马氏体完全硬化的 52100 钢具有更长的疲劳寿命。也有学者利用激光淬火强化技术提高材料的接触疲劳寿命,如朱宝平等<sup>[11]</sup>使用 CO<sub>2</sub> 激光器对 GCr15 轴承钢推力片试样进行了激光淬火强化处理,在 4410 MPa 最大接触应力下,接触疲劳寿命  $L_{10}$  (服从威布尔分布,破坏概率为 10% 时子样的滚动接触疲劳寿命) 提高了 2.2 倍,  $L_{50}$  (服从威布尔分布,破坏概率为 50% 时子样的滚动接触疲劳寿命) 提高了 1.6 倍。但是,单一激光淬火硬化层深度一般不超过 2 mm<sup>[12-14]</sup>,不能满足重载轴承的工况需求。传统的感应淬火方法利用电磁感应在工件内产生涡流,以加热工件,实现淬火,加热范围较大,输入热量也较大,容易引起工件变形,

且能耗高。基于此,本课题组提出一种激光-感应复合淬火方法<sup>[3,15]</sup>,通过感应热源的复合,实现重载轴承材料的深层强化,但复合强化后硬化层的滚动磨损与疲劳损伤行为尚需深入研究。

本文采用激光和电磁感应双热源复合淬火技术对 42CrMo 钢进行强化处理,以显著提高 42CrMo 钢硬化层的深度,研究其在重载工况下的滚动接触疲劳性能。通过控制工艺参数得到不同深度的硬化层,并搭建滚动体-圆盘线接触滚动疲劳实验装置进行滚动磨损试验,比较分析磨痕表面形貌、三维形貌与裂纹角度的变化,研究其滚动磨损与疲劳损伤行为,探讨硬化层深度对滚动接触疲劳性能的影响,为重载轴承的深层强化提供参考。

## 2 实验与模拟

### 2.1 实验材料与方法

以风电轴承中的主轴轴承套圈常用材料 42CrMo 钢为研究对象,所用基体为调质态 42CrMo 钢,基体尺寸为 110 mm × 55 mm × 50 mm,其化学成分如表 1 所示,基体组织为回火索氏体,其显微组织如图 1 所示。试板表面粗糙度为 1.6 μm,实验前去除锈斑并用无水乙醇溶液清洁待强化表面。

表 1 42CrMo 钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of 42CrMo steel

Element	C	Si	Mn	Cr	Mo	S	P	Ni	Fe
Mass fraction / %	0.42	0.2	0.5-0.8	0.9-1.2	0.2	≤0.035	≤0.035	0.03	Bal.

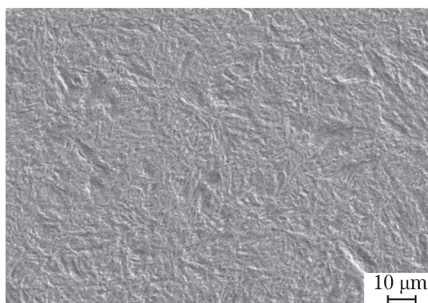


图 1 基体 42CrMo 钢的显微组织

Fig. 1 Microstructure of 42CrMo steel matrix

激光-感应复合淬火过程如图 2 所示,激光-感应复合淬火技术的本质是在激光淬火的基础上,耦合了电磁感应热源,以激光加热为主,以感应加热为辅,从而减缓试样沿深度方向的温度梯度,有利于热量往更深处传递,达到深层强化的目的。

采用德国 Laserline 公司的 LDF 系列连续输出光纤传导半导体激光器,其最大输出功率为 6 kW,激光波长范围为 940~1060 nm,近平顶分布矩形光

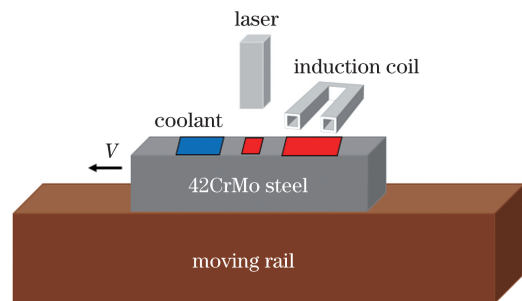


图 2 42CrMo 钢激光-感应复合淬火示意图

Fig. 2 Schematic of laser-induction hybrid quenching on 42CrMo steel

斑的可调区域为 15~64 mm。使用超声波感应加热设备,其工作电源为三相 380 V 电源,最大输出功率为 80 kW,频率可调范围为 3~40 kHz。感应线圈由铜管线圈和导磁体组成,可以满足各类形状试样表面的连续感应淬火要求。在激光-感应复合淬火过程中,试样从右向左移动,激光光斑和感应线圈保持固定。

采用线切割机将激光-感应复合淬火后的试样沿激光扫描方向切割,制备金相试样,使用磨抛机打磨、抛光,采用型号为 HVM-2 的全自动维氏硬度计对硬化层的显微硬度进行测试,试验载荷为 2.94 N,加载时间为 10 s。使用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液对试样进行腐蚀,再利用 Zeiss 光学显微镜(型号:Axio Imager2)对硬化层的显微组织进行分析。

为了研究不同硬化层深度下的滚动磨损与疲劳损伤,通过控制工艺参数获得 3 种不同深度的硬化层。频率选用 10 kHz,输出电流分别为 31, 34, 45 A,激光能量密度为 5.5 W/mm<sup>2</sup>。为判定硬化层深度,从试样表面向深处测试硬度值,通过 Origin 软件绘制硬度曲线图,以 480 HV<sub>0.3</sub> 为硬化层深度的临界硬度值,所得结果如图 3 所示。可以看到:试样 1、试样 2、试样 3 的硬化层深度分别为 3.5, 4.5, 6.3 mm,在其他工艺参数不变的条件下,在一定的趋肤深度范围内,随着电磁感应输出电流的增加,电磁感应的热输入增大,可以将更多的热量往材料更深处传递,从而导致硬化层的深度加深。

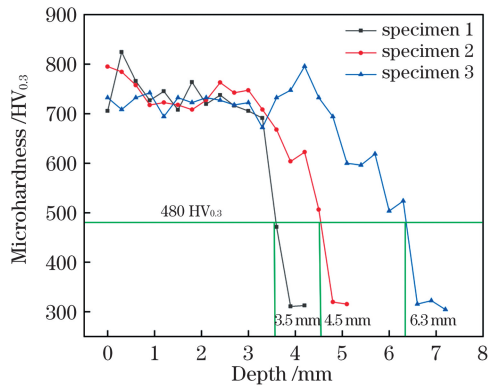


图 3 激光-感应复合淬火硬化层显微硬度曲线  
Fig. 3 Microhardness curves of laser-induction hybrid quenching hardened layers

## 2.2 残余应力的数值模拟

MSC. Marc 有限元仿真软件具有模拟磁-热-结构耦合场的能力。为了研究激光-感应复合淬火过程残留的应力情况,使用 MSC. Marc 软件模拟激光-感应复合淬火过程的残余应力场分布。该模型建立在本课题组前期研究<sup>[15]</sup>的基础上,其物理模型如图 4 所示。综合复合淬火过程中特征点的温度历史变化曲线、硬化层形貌和应力变化的对比,可以判断数值模型的准确性。为了便于分析,以矩形激光光斑沿扫描方向所在的对称面将整个模型分为两部分,取其中一半获得残余应力分布图。

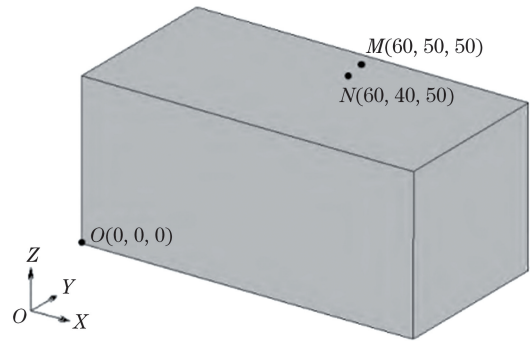


图 4 物理模型及特征点位置  
Fig. 4 Physical model and locations of feature points

## 2.3 滚动磨损试验

为了研究 42CrMo 钢深层淬火后的滚动接触疲劳性能,采用型号为 MUG-5Z 的磨损试验机,试验力范围为 10~5000 N,主轴转速为 1~3000 r/min。为了模拟风电主轴轴承套圈与滚动体的配合使用,对该试验机的夹具进行改装设计。图 5 为滚动磨损试验装置示意图,接触形式采用滚动体-圆盘式。将主试样圆盘作为上试样,材料为激光-感应复合淬火 42CrMo 钢。陪试样材料是供货态 GCr15SiMn 钢,硬度为 62~65 HRC。将陪试样加工成表面粗糙度为 0.8 μm、直径为 6 mm 的滚动体。3 个滚动体被均匀嵌在圆盘中,作为下试样。

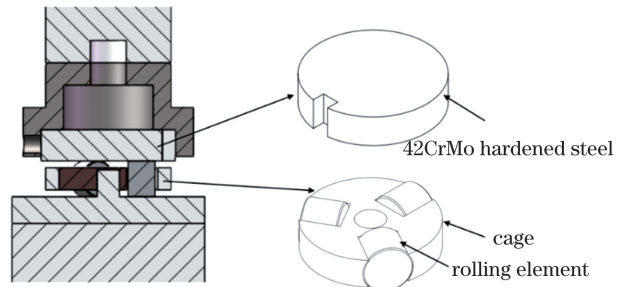


图 5 滚动磨损试验装置示意图  
Fig. 5 Schematic of rolling wear test device

滚动试验通过闭环加载方式让主试样与陪试样进行滚动摩擦。根据赫兹模拟准则<sup>[16]</sup>,接触应力的表达式为

$$\delta_{\max} = \sqrt{F(\Sigma\rho) / \left[ \pi L \left( \frac{1-u_1^2}{E_1} + \frac{1-u_2^2}{E_2} \right) \right]}, \quad (1)$$

$$\Sigma\rho = \frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{21}} + \frac{1}{R_{22}}, \quad (2)$$

式中: $\delta_{\max}$  为最大接触应力; $F$  为施加于主试样的载荷; $L$  为主试样与陪试样的实际接触长度(本试验中滚动体与圆盘试样的实际接触长度为 7 mm); $u_1$  和  $u_2$  分别为主试样和陪试样的泊松比,当主试样与陪试样的材料均为钢时, $u_1$  和  $u_2$  均取 0.3; $E_1$  和  $E_2$



分别为主试样和陪试样的弹性模量,取值均为  $2.05 \times 10^5$  MPa;  $\Sigma\rho$  为主试样、陪试样的主曲率之和;  $R_{11}$ 、 $R_{12}$ 、 $R_{21}$ 、 $R_{22}$  分别为主试样垂直于滚动方向的曲率半径、主试样沿滚动方向的曲率半径、陪试样垂直于滚动方向的曲率半径、陪试样沿滚动方向的曲率半径。因此,可将(1)式和(2)式简化为

$$\delta_{\max} = 0.418 \sqrt{FE/L} \quad (3)$$

通过主试样与陪试样的滑滚形式来模拟风电机组中主轴轴承套圈与滚动体的接触状态,试验力设为 3646 N,因此施加于陪试样上的平均载荷  $F$  为 1215.3 N,经(3)式计算得到的最大接触应力  $\delta_{\max}$  为 2.5 GPa。为了分析硬化层深度对激光-感应复合淬火 42CrMo 钢滚动接触疲劳性能的影响,采用硬化层深度分别为 3.5 mm、4.5 mm 和 6.3 mm 的 3 组试样进行滚动磨损试验,接触形式都采用线接触,  $\delta_{\max}$  为 2.5 GPa,转速设为 2500 r/min,试验周期为  $1.08 \times 10^7$ 。根据 GB/T 10510—2005,采用 N32 润滑油,每个试样在每组试验条件下重复 3 次试验。

为了评价激光-感应复合淬火 42CrMo 钢试样的疲劳性能,利用型号为 EVO18 的扫描电子显微镜(SEM)和型号为 DSX1000 的超景深显微镜分别观察滚动接触疲劳试样的表面形貌、三维形貌及其截面的二维轮廓,并使用 X 射线能谱仪(EDS)对裂纹开裂处进行扫描,分析其元素分布,探究其疲劳损伤机理。

## 3 结果与分析

### 3.1 组织与应力分析

在 3 种不同工艺下激光-感应复合淬火的硬化层组织都是马氏体,差别不大。试样 3 硬化层的显微组织如图 6 所示,硬化层主要由板条状马氏体组成。在复合淬火过程中,耦合了电磁感应和激光两种热源,其中:电磁感应以体热源形式输入热量,对材料表面有辅助加热和保温作用,促进了碳原子的扩散和迁移,加速了奥氏体组织均匀化;激光以面热源形式输入热量,在淬火过程中起主导作用。

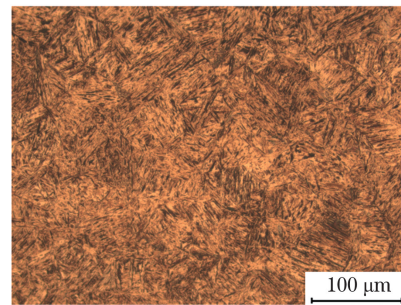


图 6 激光-感应复合淬火硬化层显微组织

Fig. 6 Microstructure of laser-induction hybrid quenching hardened layer

使用 MSC. Marc 有限元软件对 42CrMo 钢在激光-感应复合淬火过程中的应力场进行模拟,该模型在本课题组前期工作<sup>[15]</sup>中已获得验证。不同深度硬化层试样沿 X 方向和 Y 方向的应力分布如图 7 所示,其中上图对应左侧图例,下图对应右侧图

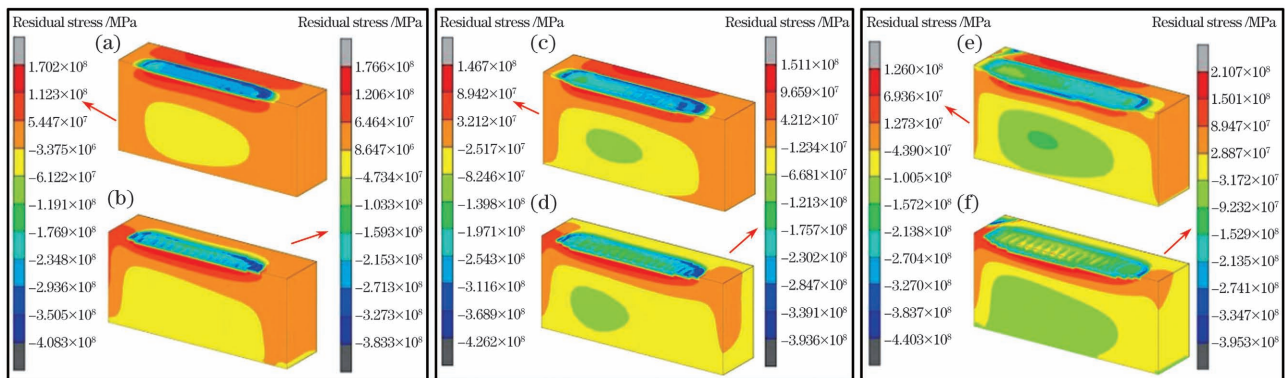


图 7 不同深度硬化层试样的残余应力分布。(a) 3.5 mm 深度时试样沿 X 方向的应力分布;(b) 3.5 mm 深度时试样沿 Y 方向的应力分布;(c) 4.5 mm 深度时试样沿 X 方向的应力分布;(d) 4.5 mm 深度时试样沿 Y 方向的应力分布;(e) 6.3 mm 深度时试样沿 X 方向的应力分布;(f) 6.3 mm 深度时试样沿 Y 方向的应力分布

Fig. 7 Residual stress distributions of hardened layer samples with different depths. (a) Residual stress distribution of 3.5 mm depth specimen along X direction; (b) residual stress distribution of 3.5 mm depth specimen along Y direction; (c) residual stress distribution of 4.5 mm depth specimen along X direction; (d) residual stress distribution of 4.5 mm depth specimen along Y direction; (e) residual stress distribution of 6.3 mm depth specimen along X direction; (f) residual stress distribution of 6.3 mm depth specimen along Y direction

例。当深度为 3.5 mm 时,在 X 方向的最大压应力为 408.3 MPa,在 Y 方向的最大压应力为 383.3 MPa,可见最大残余压应力位于表层附近;当深度为 4.5 mm 时,在 X 方向的最大压应力为 426.2 MPa,在 Y 方向的最大压应力为 393.6 MPa,可见最大残余压应力位置出现在表层区域;当深度为 6.3 mm 时,在 X 方向的最大压应力可达 440.3 MPa,在 Y 方向的最大压应力为 395.3 MPa。

由此可见:在激光-感应复合淬火后,在不同深度硬化层试样的纵截面方向,硬化层区域内的应力均为压应力,应力沿着深度方向从压应力转变为拉应力再转回为压应力,试样心部的局部高应力是因为试样在冷却一段时间后,心部还有一定的温度,受到热胀冷缩的影响;在激光-感应复合淬火开始前,试样整体处于无应力状态,通过电磁感应和激光束同步加热试样表面,试样表层扫描区域迅速达到奥氏体化温度,试样受热体积膨胀,然后对淬火后的试样进行局部强制冷却。在此过程中,材料快速冷却导致试样体积收缩,但其体积的变化会受到周围材料的约束,引起热应力变化,从而产生沿 X 和 Y 方向的拉应力。同时,在快速冷却过程中,大量奥氏体发生非扩散固态相变转化为马氏体<sup>[17]</sup>。由于奥氏体的比热容比马氏体小,硬化区体积膨胀,其体积的改变同样受到周围材料的约束,引起组织应力变化,从而使马氏体相变区域在 X 和 Y 方向均产生压应力。由于在激光-感应复合淬火过程伴随着复杂的传热和组织转变,残余应力场的形成主要是因为组织应力与热应力的交互作用。模拟结果显示,硬化层区域内产生较大的残余压应力,表明在激光-感应复合淬火过程中影响残余应力场分布的主要因素是奥氏体相变产生的组织应力<sup>[18]</sup>。可见,随着硬化层深度的增大,对应表层附近残余压应力的增加较为显著,而主试样与陪试样配对位置对应于最大残余压应力区域。

### 3.2 不同深度硬化层的疲劳损伤分析

#### 3.2.1 不同深度硬化层疲劳试样表面损伤分析

不同深度硬化层的形貌如图 8 和图 9 所示。3.5 mm 硬化层深度的试样在经过  $1.08 \times 10^7$  次碾压和磨损后,疲劳试样的磨损表面形貌及其轮廓如图 8(a) 和图 9(a) 所示。可以看到,试样表面出现大量的剥落坑和裂纹,同时产生严重的二次剥落现象,表面磨痕深度达到  $32.58 \mu\text{m}$ ,表面损伤较严重。4.5 mm 硬化层深度的试样在滚动接触疲劳过程中经过  $1.08 \times 10^7$  次碾压和磨损,疲劳试样的磨损表面形貌及其轮廓分别如图 8(b) 和图 9(b) 所示。可以看到,表面损伤有所减轻,表面磨痕深度达到  $32.09 \mu\text{m}$ ,试样表面伴有裂纹扩展现象,并出现裂纹分支。随着硬化层深度增加到 6.3 mm,试样表面损伤进一步减轻,如图 8(c)、图 9(c) 所示,疲劳试样表面出现裂纹、浅层剥落的现象,同时萌生出微裂纹,表面磨痕深度降低到  $23.61 \mu\text{m}$ 。

#### 3.2.2 不同深度硬化层疲劳裂纹分析

利用 SEM 观察了不同深度硬化层疲劳试样的裂纹形貌,结果如图 10 ~ 12 所示。图 10 为 3.5 mm 厚度硬化层疲劳损伤试样的裂纹区域与其放大图,剥落坑由三个部分组成: I 为疲劳源区, II 为扩展区, III 为瞬断区。可以看到,在应力场的循环作用下,裂纹在表面萌生后,垂直往心部扩展。随着滚动周次的增加,试样表面出现了横向裂纹,其扩展方向与试样滚动方向垂直<sup>[19-20]</sup>,表面裂纹扩展角度接近  $90^\circ$ ,造成这种裂纹的原因可能是材料表面受到剪切应力的作用,产生棘轮塑性应变累积<sup>[21]</sup>,最终在表面附近形成“碗”状剥落坑,裂纹深度较大,疲劳损伤较严重。同时,在主裂纹扩展过程中,裂纹的两个面在应力场的作用下互相摩擦,比较明显的特征是层状结构被分解成小碎片<sup>[22]</sup>,主要是因为随着反复剪切变形和摩擦运动,这些碎片会被研磨成更小的颗粒,最终形成磨屑,使得周围组织发生严重的塑性变形。

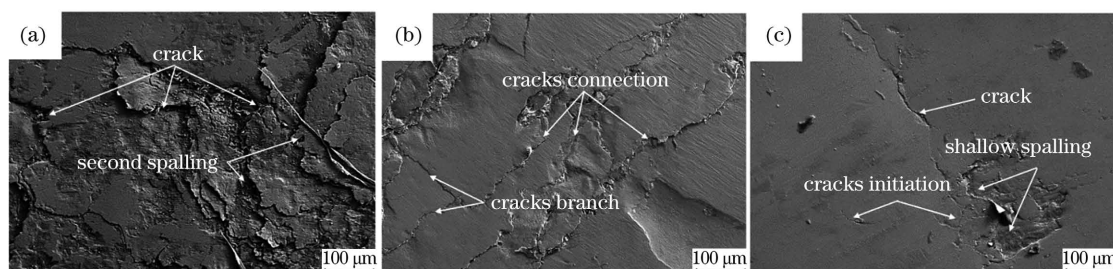


图 8 不同深度硬化层疲劳试样的表面损伤形貌。(a) 3.5 mm 深度试样;(b) 4.5 mm 深度试样;(c) 6.3 mm 深度试样  
Fig. 8 Surface damage morphologies of fatigue specimens with different depths of hardened layers. (a) Specimen with 3.5 mm depth; (b) specimen with 4.5 mm depth; (c) specimen with 6.3 mm depth



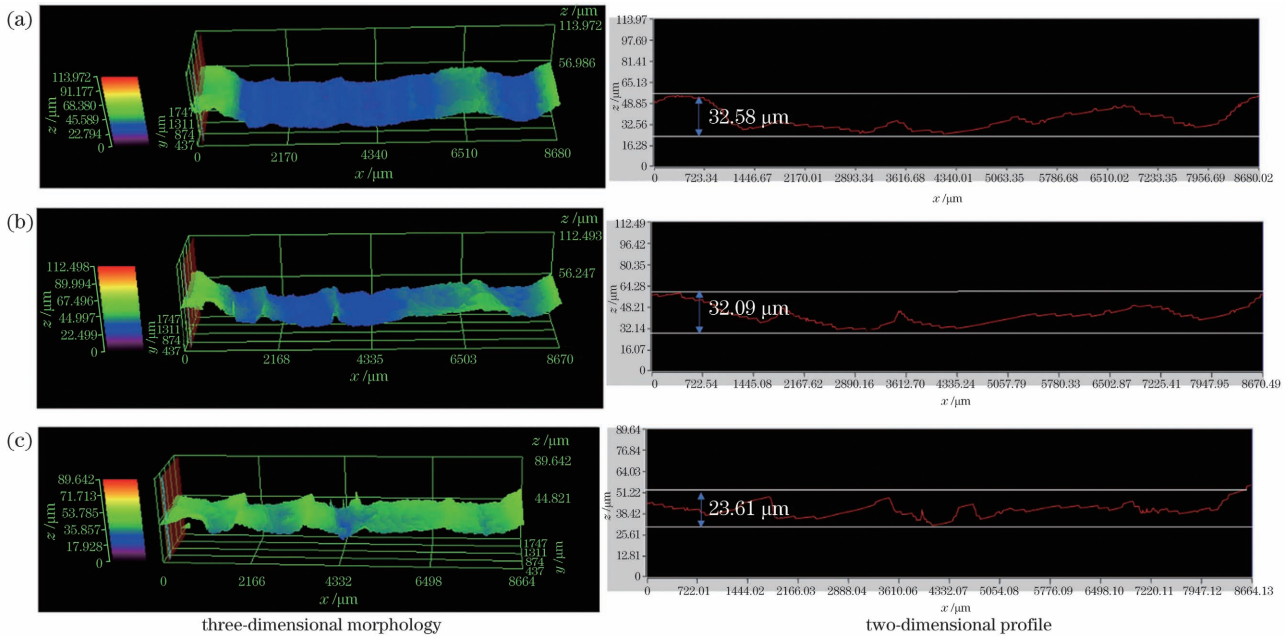


图 9 不同深度硬化层疲劳试样的表面三维形貌及截面的二维轮廓。(a) 3.5 mm 深度试样;(b) 4.5 mm 深度试样;  
(c) 6.3 mm 深度试样

Fig. 9 Three-dimensional morphologies and two-dimensional profiles of cross-section for fatigue specimens with different depths of hardened layers. (a) Specimen with 3.5 mm depth; (b) specimen with 4.5 mm depth; (c) specimen with 6.3 mm depth

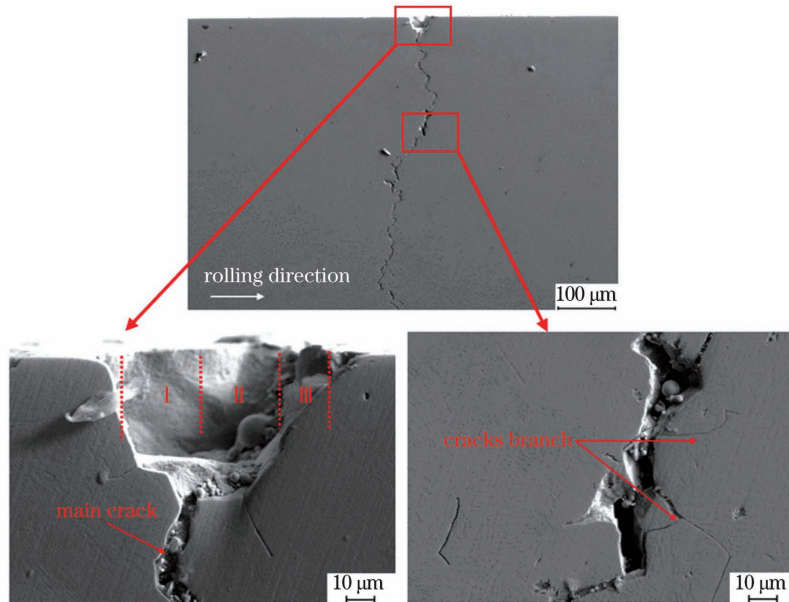


图 10 3.5 mm 硬化层厚度的疲劳试样截面裂纹形貌

Fig. 10 Sectional crack morphology of fatigue specimen with hardened layer depth of 3.5 mm

图 11 为 4.5 mm 硬化层厚度疲劳损伤试样的裂纹区域与其放大图,与 3.5 mm 硬化层厚度疲劳损伤试样的现象类似,但滚动损伤程度有所减轻,表面裂纹扩展角度降低至近  $50^\circ$ ,表面形成的剥落坑由 3 个部分组成:I 为疲劳源区,II 为扩展区,III 为瞬断区。上述结果表明试样 1 与试样 2 的疲劳失效机理相似。

当硬化层深度增加到 6.3 mm 时,疲劳损伤试样截面并没有出现较大的剥落坑,表面裂纹扩展角度为  $15^\circ$  左右,截面裂纹长度最短,减小到  $400 \mu\text{m}$ ,如图 12 所示。同时对位置 A 进行 EDS 成分分析,质量归一化结果如表 2 所示。在 A 区域发现了大量的 O、Al 和 S 元素,推测是  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和硫化物等非

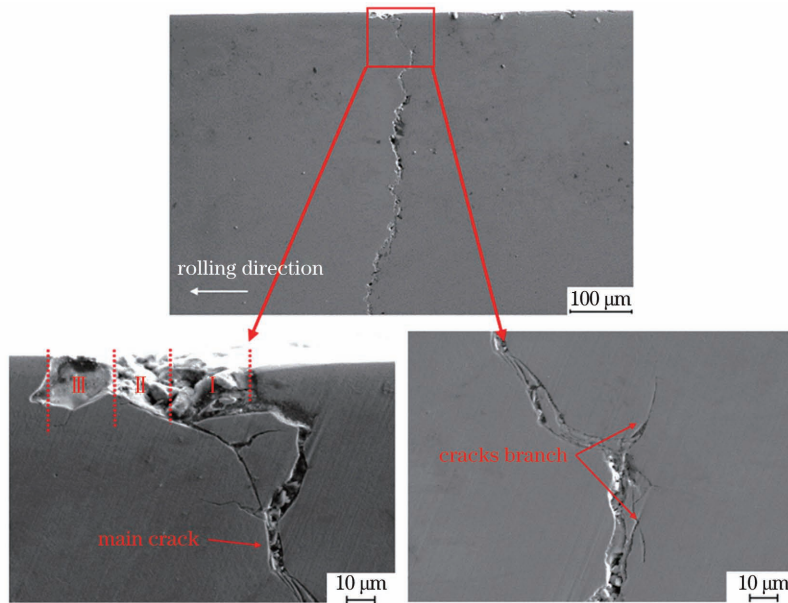


图 11 4.5 mm 硬化层厚度的疲劳试样截面裂纹形貌

Fig. 11 Sectional crack morphology of fatigue specimen with hardened layer depth of 4.5 mm

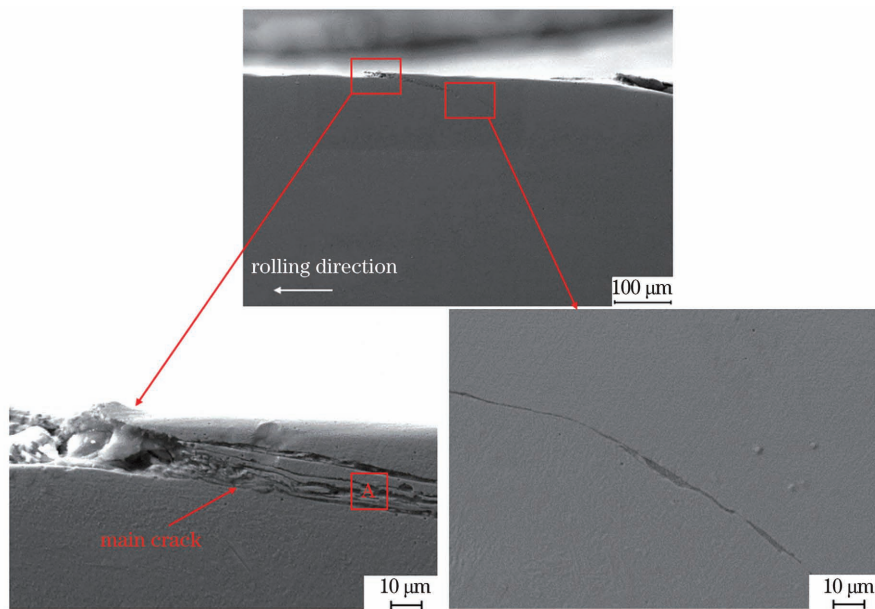


图 12 6.3 mm 硬化层厚度的疲劳试样截面裂纹形貌

Fig. 12 Sectional crack morphology of fatigue specimen with hardened layer depth of 6.3 mm

表 2 图 12 中 A 区域的元素分布

Table 2 Element distribution in area A in Fig. 12

Element	C	O	Fe	Cr	Mn	Si	Ni	Cu	Al	S
Mass fraction / %	5.173	19.720	71.890	1.120	1.314	0.363	0.127	0.184	0.022	0.086

金属夹杂物<sup>[23]</sup>。次表层的夹杂物在应力场的循环作用下,容易在内部产生微裂纹<sup>[24]</sup>,即内部萌生裂纹。同时在表层附近,主裂纹在应力场作用下往复摩擦运动形成片状结构,如图 12 放大区域所示。

### 3.3 激光-感应复合淬火强化机理

随着硬化层深度的增加,裂纹扩展角度与裂纹长度均较小,表面损伤呈现减小的趋势,表明激光-感应复合淬火有效提高了材料的滚动接触疲劳性

能,其强化机理为激光光束和感应热源同时作用于试样表面,将基体迅速加热升温至奥氏体化温度以上并保温一段时间,随后通过强制冷却迅速降温,获得淬火所需的马氏体组织。复合淬火试样硬化层中高强度马氏体相对于基体组织回火索氏体对塑性变形的抵抗力更大。激光-感应复合淬火过程中产生较大的残余压应力,可抵消试样在滚动接触运动中由于微观塑性变形所产生的拉应力,增加其抑制裂纹扩展的能力<sup>[25]</sup>,在一定程度上阻止了裂纹的萌生与扩展,延长材料的疲劳寿命。同时,在激光-感应复合淬火完成后,试样中残留的奥氏体一方面可以缓解裂纹尖端的应力集中,从而使裂纹在扩展过程中经过残余奥氏体时需要吸收更多的能量;另一方面,随着滚动接触持续进行,硬化层中残留的奥氏体会转化成马氏体,导致硬化层硬度增大<sup>[26]</sup>,同时相变过程中会产生额外的残余压应力,可抵消一部分在应力场作用下由塑性变形产生的拉应力,导致最大剪切应力在试样中的分布发生变化,从而延长疲

劳寿命,改善材料的滚动疲劳损伤性能。

### 3.4 疲劳损伤失效机理

利用激光-感应复合淬火方法得到的 42CrMo 钢在重载工况下的滚动疲劳失效机理如图 13 和图 14 所示,其疲劳失效类型主要分为表面和内部起裂剥落两种。表面起裂失效机理如图 13 所示,可以看出:在高接触应力作用下,表面的接触发生在高的峰元上,即表面微凸体的接触产生黏着;随着滚动摩擦副的持续运动,试样受到循环接触应力和剪切应力的作用,形成微观折叠,即形成塑性变形层;随着滚动周次的增加,受挤压区域的尖端容易产生应力集中<sup>[27-28]</sup>,在反复剪切应力和摩擦力的作用下,局部发生塑性变形导致脱落,并初步在表面萌生裂纹;表面萌生裂纹后,润滑油快速进入裂纹内部并形成高压<sup>[29]</sup>,增加了裂纹尖端的应力<sup>[30]</sup>,加速了裂纹垂直于滚动方向向心部扩展,最终在表面形成较大的剥落坑,同时裂纹深度较长,在裂纹扩展过程中出现了分支。

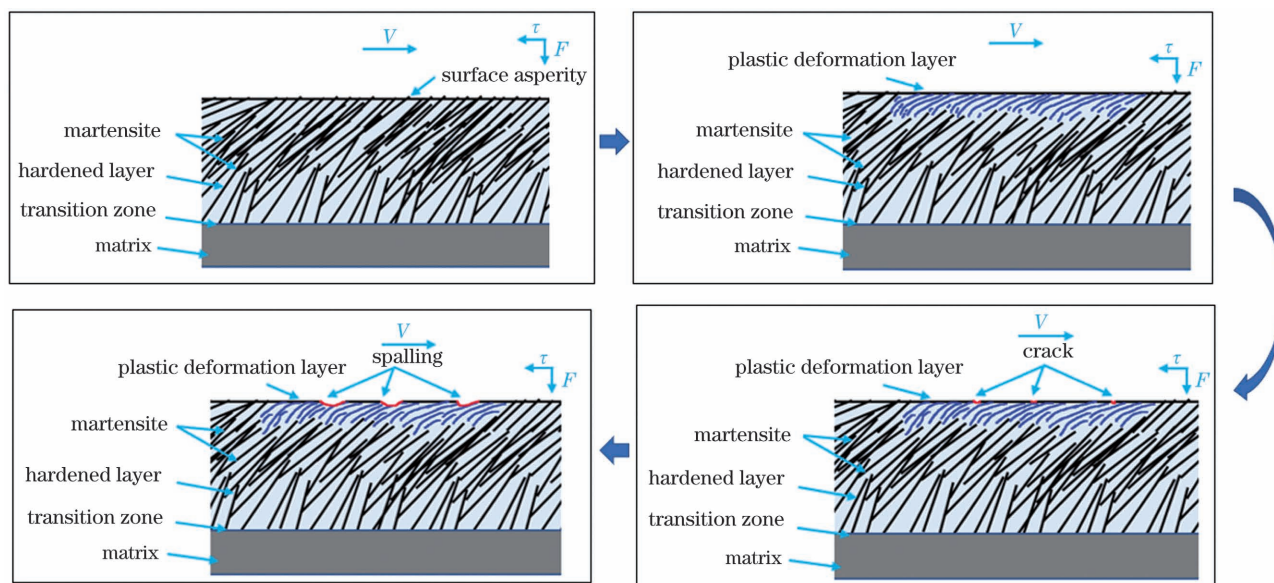


图 13 重载工况下的表面起裂示意图

Fig. 13 Schematic of surface cracking under heavy load condition

内部起裂失效机理如图 14 所示。在载荷的作用下,接触面处的材料内部会产生剪切应力,根据赫兹接触应力模型,最大剪切应力发生在次表层,当剪切应力的幅值不断增大时,位于应力场内的微区材料发生位错运动,产生微观塑性变形<sup>[31]</sup>。随着应力循环次数的增加,所积累的微观塑性变形越来越多,达到一定程度后在材料中产生微裂纹,即疲劳源<sup>[32]</sup>。在应力场的往复作用下,这些微裂纹形成与接触表面平行的主裂纹,主裂纹在最大剪切应力的

循环作用下不断扩展,并且沿着材料的软相产生二次裂纹。这些二次裂纹的分支往两个方向扩展,一个是沿着试样表层扩展,一个是往材料心部方向扩展,扩展方向与表面的夹角为  $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ <sup>[33]</sup>。随着接触运动的继续进行,主裂纹逐渐扩展到表层,导致试样表面发生剥落。在另外一个扩展方向上,当裂纹扩展到一定深度后,在距离表面较远的地方,裂纹扩展缺少驱动力,脱离了赫兹接触应力场的保护,导致深处的裂纹无法继续向心部扩展<sup>[34]</sup>。



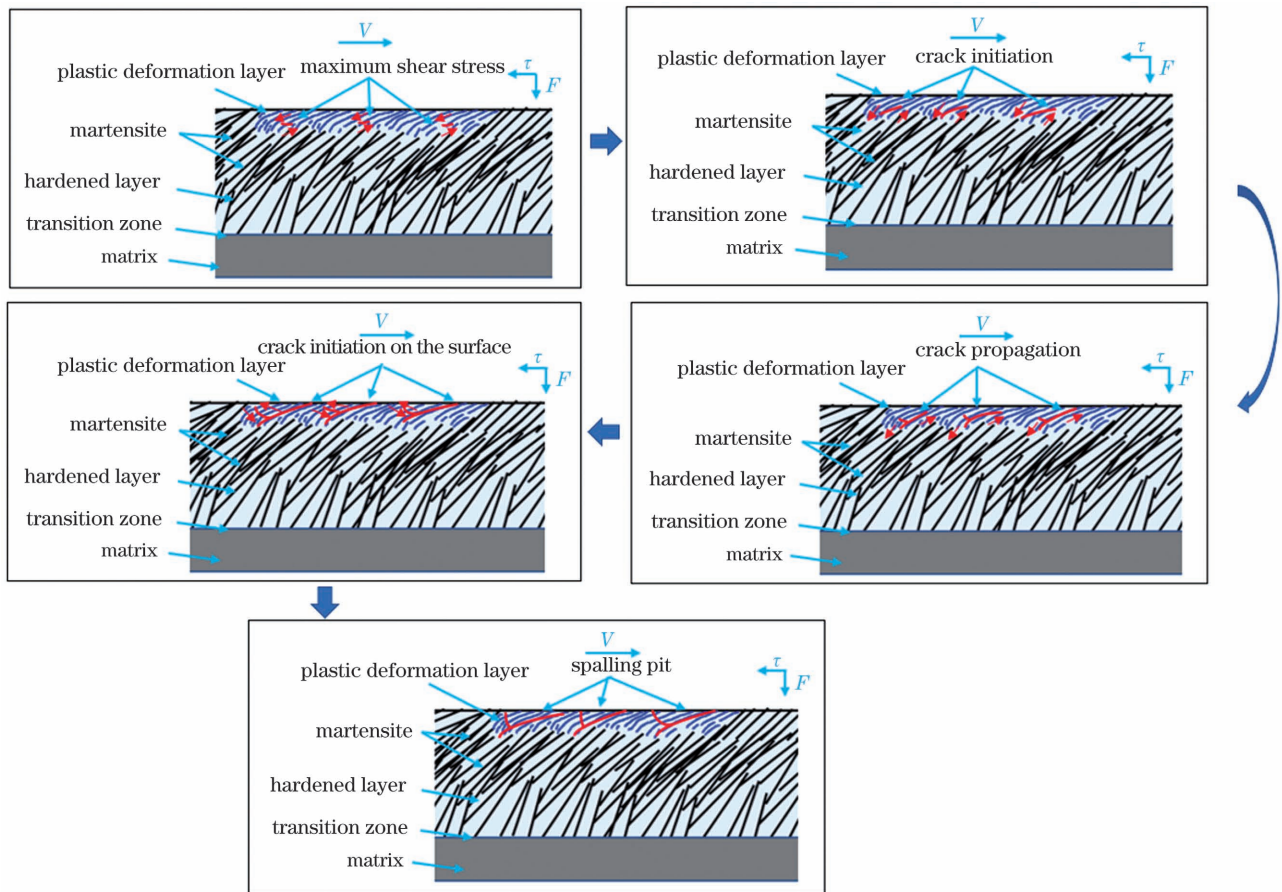


图 14 重载工况下的内部起裂示意图

Fig. 14 Schematic of internal cracking under heavy load condition

## 4 结 论

对 42CrMo 钢进行激光-感应复合淬火,可获得最深达 6.3 mm 的硬化层。该工艺结合了激光淬火和感应淬火的优点,可显著增加硬化层深度,突破单一激光淬火硬化层深度较浅的局限性,满足重载轴承的工况需求。探究了硬化层深度分别为 3.5 mm、4.5 mm、6.3 mm 的试样在相同试验条件下的滚动磨损与疲劳损伤,结果表明,硬化层深度为 6.3 mm 的试样表面损伤最少、表面磨痕深度最浅、截面裂纹长度最短,具有更好的滚动接触疲劳性能。激光-感应复合淬火后,试样表层存在一定的残余压应力,可提高材料的滚动接触疲劳性能。随着硬化层深度的增加,利用激光-感应复合淬火方法得到的 42CrMo 钢在重载工况下的疲劳失效类型由外部起裂转变为内部起裂剥落,裂纹与表面的夹角从  $90^\circ$  降低至  $15^\circ$ ,不仅减小了裂纹扩展角度,使得裂纹延伸变得更平缓,还减缓了试样滚动磨损和疲劳损伤。

## 参 考 文 献

- [1] Wu Z. Test analysis and research on fatigue life of heavy-duty bearing[J]. Coal Mine Machinery, 2020, 41(10): 57-59.  
吴宗. 重载轴承疲劳寿命的测试分析与研究[J]. 煤矿机械, 2020, 41(10): 57-59.
- [2] Wind Energy Beijing Declaration: develop 3 billion wind power, lead green development, and implement the "30·60" goal[J]. Wind Energy, 2020(11): 34-35.  
风能北京宣言: 开发 30 亿风电, 引领绿色发展, 落实 "30·60" 目标[J]. 风能, 2020(11): 34-35.
- [3] Zhang Q L, Tong W H, Chen Z J, et al. Effect of spot size on geometrical characteristics of laser deep quenching hardened layer of 42CrMo steel [J]. Surface Technology, 2020, 49(1): 254-261.  
张群莉, 童文华, 陈智君, 等. 光斑尺寸对 42CrMo 钢激光深层淬火硬化层几何特征的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(1): 254-261.
- [4] Zhang Q, Sun S Q, Yang M S. High stress rolling contact fatigue properties of 32Cr3MoVE nitrided bearing steel [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43(9): 38-42, 77.

- 张强, 孙世清, 杨卯生. 32Cr3MoVE 渗氮轴承钢的高应力滚动接触疲劳性能[J]. 机械工程材料, 2019, 43(9): 38-42, 77.
- [5] Guo J, Yang M S, Lu D H, et al. Rolling contact fatigue and wear characteristics of Cr4Mo4V bearing steel[J]. Tribology, 2017, 37(2): 155-166.
- 郭军, 杨卯生, 卢德宏, 等. Cr4Mo4V 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.
- [6] She L. Study on contact fatigue property of bainitic bearing steels[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015.
- 余丽. 贝氏体轴承钢滚动接触疲劳性能的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- [7] Morsdorf L, Mayweg D, Li Y, et al. Moving cracks form white etching areas during rolling contact fatigue in bearings [J]. Materials Science and Engineering A, 2020, 771: 138659.
- [8] Oezel M, Janitzky T, Beiss P, et al. Influence of steel cleanliness and heat treatment conditions on rolling contact fatigue of 100Cr6 [J]. Wear, 2019, 430/431: 272-279.
- [9] Liang X Z, Zhao G H, Owens J, et al. Hydrogen-assisted microcrack formation in bearing steels under rolling contact fatigue [J]. International Journal of Fatigue, 2020, 134: 105485.
- [10] Paladugu M, Hyde R S. Material composition and heat treatment related influences in resisting rolling contact fatigue under WEC damage conditions [J]. International Journal of Fatigue, 2020, 134: 105476.
- [11] Zhu B P, Zheng L, Qin S. Improvement on contact fatigue life of GCr15 bearing steel by laser surface transformation hardening [J]. Central Iron and Steel Research Institute Technical Bulletin, 1987(S1): 55-62.
- 朱宝平, 郑鲁, 秦森. 激光表面相变硬化处理提高 GCr15 轴承钢接触疲劳寿命 [J]. 钢铁研究总院学报, 1987(S1): 55-62.
- [12] Tan W D, Pang M, Jiang G Y, et al. Numerical simulation of temperature field in laser phase-transformation hardening of highly-enhanced diesel engine valve seats [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 111601.
- 谭雯丹, 庞铭, 江国业, 等. 高强度柴油机气门座激光相变硬化温度场的数值模拟 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 111601.
- [13] Chen S X, Lei W N, Ren W B, et al. Microstructures and performance of laser cladding and quenching remanufactured cladding layer on QT700 ductile cast iron gear surface [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0514003.
- 陈世鑫, 雷卫宁, 任维彬, 等. 激光熔覆与淬火再制造 QT700 球墨铸铁齿轮熔覆层的组织与性能 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0514003.
- [14] Chen Z W, Li C, Gao X, et al. Numerical simulation on laser quenching of stainless steels with grain heterogeneity [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(10): 1002109.
- 陈正威, 李昌, 高兴, 等. 考虑晶粒不均匀性的不锈钢激光淬火数值模拟 [J]. 中国激光, 2021, 48(10): 1002109.
- [15] Zhang Q L, Lin J, Chen Z J, et al. Phase transformation process of electromagnetic induction assisted laser quenching based on MSC.Marc software [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(11): 1103002.
- 张群莉, 林坚, 陈智君, 等. 基于 MSC.Marc 软件的电磁感应复合激光淬火相变研究 [J]. 中国激光, 2021, 48(11): 1103002.
- [16] Guan J. Research on rolling contact fatigue damage behavior of M50 bearing steel in aeroengine rolling bearing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- 关键. 航空滚动轴承用 M50 钢的接触疲劳损伤行为研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [17] Yang Z, Fan X F, Qiu C J, et al. Microstructure and properties of 40CrNiMoA steel surface after laser quenching [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 011405.
- 杨振, 樊湘芳, 邱长军, 等. 40CrNiMoA 钢表面激光淬火后的组织和性能 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 011405.
- [18] Chen J F, Zhou J Y, Sun L Y, et al. Strengthening effect and residual stress of 40Cr steel quenched with fiber laser [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(11): 95-100.
- 陈菊芳, 周金宇, 孙凌燕, 等. 40Cr 钢光纤激光淬火强化效果与残余应力 [J]. 材料热处理学报, 2015, 36(11): 95-100.
- [19] Li Y G, Kang G Z, Wang C G, et al. Vertical short-crack behavior and its application in rolling contact fatigue [J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(7): 804-811.
- [20] Nakai Y, Shiozawa D, Kikuchi S, et al. Effects of inclusion size and orientation on rolling contact fatigue crack initiation observed by laminography using ultra-bright synchrotron radiation [J]. Procedia Structural Integrity, 2016, 2: 3117-3124.
- [21] Ji Y L. Study on rolling contact fatigue and wear behavior of G23Cr2Ni2Si1Mo nanostructured bainitic bearing steel [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018.
- 纪云龙. G23Cr2Ni2Si1Mo 纳米贝氏体轴承钢的滚动接触疲劳及磨损行为研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
- [22] Su Y S. Research on subsurface damage mechanism

- of GCr15 contact fatigue [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.
- 苏云帅. GCr15 接触疲劳亚表面损伤机制研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
- [23] Luo M, Wang J G. Effects of nonmetallic inclusions on initiation and propagation of rolling contact fatigue cracks[J]. *Bearing*, 2020(6): 58-66.
- 罗敏, 汪久根. 非金属夹杂物对滚动接触疲劳裂纹萌生及扩展的影响[J]. *轴承*, 2020(6): 58-66.
- [24] Zhang Z H. The study on microstructure evolution and fatigue behavior of high nitrogen bearing steel [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2018.
- 张志慧. 高氮轴承钢组织演变与疲劳行为的研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2018.
- [25] Zhang G Z, Ren R M, Wu S, et al. Rolling contact fatigue performance of ER8 wheel steel with non-uniform microstructure[J]. *Tribology*, 2021, 41(4): 553-563.
- 张关震, 任瑞铭, 吴斯, 等. 不均匀组织 ER8 车轮滚动接触疲劳性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2021, 41(4): 553-563.
- [26] Zheng C L, Zhang F C, Lü B, et al. Rolling contact fatigue wear behavior of carbide-free bainitic steel [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(4): 176-185.
- 郑春雷, 张福成, 吕博, 等. 无碳化物贝氏体钢的滚动接触疲劳磨损行为[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(4): 176-185.
- [27] 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.
- [28] Ringsberg J W, Bergkvist A. On propagation of short rolling contact fatigue cracks [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2003, 26(10): 969-983.
- [29] Liu X D, Liu P T, Zhao X J, et al. Influence of original microstructure on rolling contact fatigue properties of ER9 wheel steel[J]. *Tribology*, 2021, 41(6): 902-912.
- 刘旭东, 刘鹏涛, 赵秀娟, 等. 原始组织对 ER9 车轮钢滚动接触疲劳性能的影响[J]. *摩擦学学报*, 2021, 41(6): 902-912.
- [30] Tanaka K, Mura T. A dislocation model for fatigue crack initiation [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1981, 48(1): 97-103.
- [31] Xing X H, Li Z Y, Yang M J, et al. Rolling wear properties of CL60 steel after pulsed Nd : YAG laser surface melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(3): 0303006.
- 邢旭辉, 李正阳, 杨明江, 等. CL60 车轮材料表面激光离散熔凝的滚动磨损形貌[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0303006.
- [32] Liu Y Z, Zhang X, Yang L. Microscopic mechanisms and influencing factors for contact fatigue of rolling bearings[J]. *Bearing*, 2015(10): 53-57.
- 刘耀中, 张旭, 杨柳. 滚动轴承的接触疲劳微观机理及影响因素[J]. *轴承*, 2015(10): 53-57.
- [33] Li W. Study on microstructure and properties of nanobainite in surface layer of carburized bearing steel [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2020.
- 李伟. 渗碳纳米贝氏体轴承钢表层组织与性能演变的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.
- [34] Wu Z W, Yang M S, Zhao K Y. Study on rolling contact fatigue behavior of high-alloy case-hardened bearing steel [J]. *Surface Technology*, 2021, 50(7): 283-294, 309.
- 吴志伟, 杨卯生, 赵昆谕. 高合金表面硬化轴承钢的滚动接触疲劳行为研究[J]. *表面技术*, 2021, 50(7): 283-294, 309.

## Rolling Wear and Fatigue Damage Behavior of Laser-Induction Hybrid Quenching on 42CrMo Steel

Zhang Qunli<sup>1,2</sup>, Huang Hua<sup>1,2</sup>, Tang Zehao<sup>1,2</sup>, Li Guochang<sup>1,2</sup>, Niu Qing'an<sup>1,2</sup>,  
Chen Zhijun<sup>1,2</sup>, Du Yangqiong<sup>3</sup>, Yao Jianhua<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Laser Advanced Manufacturing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;

<sup>2</sup> Collaborative Innovation Center of High-End Laser Manufacturing Equipment (National "2011 Plan"),  
Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;

<sup>3</sup> Zhongzhe High-Speed Railway Bearing Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang 324407, China

### Abstract

**Objective** The rapid development in the field of wind power presents high requirements on the surface contact fatigue performance of the raceways of wind-power main-shaft bearing rings. The commonly used material for the



raceway of wind-turbine main-shaft bearing ring is 42CrMo steel. Therefore, to overcome the limitation of the hardened layer depth through laser quenching, dual heat sources coupled with electromagnetic induction and laser are used for hybrid quenching to increase the hardened layer depth on 42CrMo steel, obtain excellent rolling contact fatigue performance for the bearing ring under heavy load conditions, and prolong its service life. This study also provides a reference for the deep strengthening of heavy-duty bearings.

**Methods** To simulate the use of wind-turbine main-shaft bearing rings and rolling elements, the fixture of a MUG-5Z testing machine was modified and designed. The contact form of a rolling wear test device was rolling element-disc type (Fig. 5). The test force was set to 3646 N; therefore, the average load  $F$  applied to the specimen was 1215.3 N, whereas the maximum contact stress calculated using formula (3) was 2.5 GPa. To analyze the effect of different hardened layer depths on the rolling contact fatigue performance of laser-induction hybrid quenched 42CrMo steel, three groups of specimens with the hardened layer depths of 3.5, 4.5, and 6.3 mm were prepared for a rolling wear test (Fig. 3). The contact forms were all line contact. Moreover, the rotation speed was set to 2500 r/min, whereas the test period was  $1.08 \times 10^7$ . According to GB/T 10510—2005, N32 oil was used for lubrication, and the test was repeated three times on each specimen under each set of test conditions. To evaluate the fatigue performance of the laser-induction hybrid quenched specimen, the surface morphology, three-dimensional morphology, and two-dimensional profile of the rolling contact fatigue specimen were observed using EVO18 scanning electron microscope (SEM) and DSX1000 ultra-depth-of-field microscope. Furthermore, the X-ray energy dispersive spectrometer (EDS) was used to scan the cracking area to analyze the element distribution and explore the fatigue damage mechanism.

**Results and Discussions** Herein, the deep hardening of a heavy-duty bearing material is realized using the laser-induction hybrid quenching process (Fig. 2). With an increase in the hardened layer depth, the residual compressive stress near the corresponding surface layer increases significantly (Fig. 7), and the paired position of the main and companion specimens corresponds to the maximum residual compressive stress region. The residual compressive stress can offset the tensile stress caused by the microplastic deformation of the specimen in rolling contact motion, increasing its ability to inhibit crack propagation, preventing effectively crack initiation and propagation to a certain extent, and improving the fatigue life of the material. When the hardened layer depth increases to 6.3 mm, the surface damage of the specimen is further alleviated, and the phenomena of cracking and shallow spalling occur on the surface. Further, the surface wear scar depth reduces to  $23.61 \mu\text{m}$  (Fig. 8, Fig. 9). Simultaneously, there are no large spalling pits in the section, the crack propagation angle is approximately  $15^\circ$ , and the cross-sectional crack length is the shortest (Fig. 12). The experimental results show that when the hardened layer depth increases, the crack propagation angle and crack length become smaller and the surface damage shows a decreasing trend, which indicates that the laser-induction hybrid quenching can effectively improve the rolling contact fatigue performance of the material. The rolling fatigue failure mechanism of the laser-induction hybrid quenched on 42CrMo steel under heavy load conditions is obtained by analyzing the surface damage and cross-sectional crack propagation. The fatigue failure mainly results from the surface and internal spalling (Fig. 13, Fig. 14).

**Conclusions** The maximum-hardened layer depth of 6.3 mm can be obtained from the laser-induction hybrid quenched process on 42CrMo steel. The results show that the specimen with the hardened layer depth of 6.3 mm has the lowest surface damage, shallowest surface wear scar depth, shortest cross-sectional crack length, and best rolling contact fatigue performance among three specimens. After laser-induction hybrid quenching, a certain residual compressive stress exists on the specimen surface, which can improve the rolling contact fatigue performance of the material. As the depth of the hardened layer increases, the fatigue failure type of laser-induction hybrid quenched 42CrMo steel under heavy load conditions changes from external cracking to internal cracking and spalling. The angle between the cracks and surface decreases from  $90^\circ$  to  $15^\circ$ . While the crack propagation angle reduces, the crack extension becomes smoother and the rolling wear and fatigue damage of the specimen are alleviated.

**Key words** laser technique; hybrid quenching; 42CrMo steel; rolling fatigue; hardened layer depth; crack