

激光冲击对海洋工程用 E690 钢微观组织及性能的影响

杨青天^{1a}, 张永康^{1b}, 池元清^{1b}, 刘江文^{1a}, 王铀²,
勾俊峰^{1b*}, 莫兆溢^{1c}, 谭桂斌^{1b}, 李顺利^{1b}

(1. 广东工业大学 a. 机电工程学院 b. 广东省海洋能源装备先进制造技术重点实验室 c. 实验教学部, 广州 510006; 2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: **目的** 提高 E690 钢的耐磨损性能。**方法** 将 E690 钢基体经磨床打磨后进行超声清洗, 利用 PROCUDO[®] 200 激光冲击系统, 对其表面施加冲击强化处理。利用光学显微镜、扫描电子显微镜和 X 射线衍射仪分析激光冲击 (LSP) 对 E690 钢微观组织结构的影响。通过显微硬度测试、纳米压痕测试、干滑动摩擦磨损试验, 评价未冲击处理和 LSP 处理 E690 钢试样的硬度、弹塑性性质和耐磨损性能。**结果** LSP 作用下, E690 钢基体表层晶粒尺寸细化, 形成明显的梯度结构, 试样的相组成仍然为 α 相和 γ 相, 但 α 相最强衍射峰的半高宽由 0.218° 增大到 0.266° 。LSP 处理后, E690 钢基体表层残余应力转变为较大的残余压应力, 最大残余应力达到 -268 MPa。LSP 处理 E690 钢的影响层深度约为 $700\text{ }\mu\text{m}$, 表面硬度为 $(302.5 \pm 12.2)\text{HV}100$, 与未冲击处理试样相比, 提高了 8.7%。LSP 处理 E690 钢试样的弹性模量为 (419.80 ± 8.79) GPa, 提高了 21.4%, 弹性恢复功略有提高。LSP 处理使得 E690 钢的摩擦系数由 0.59 ± 0.03 减小为 0.55 ± 0.03 , 同时使其磨损率降低了 32%。未冲击处理和 LSP 处理 E690 钢试样的磨损机制为黏着磨损、氧化磨损和磨粒磨损。**结论** LSP 处理可有效改善 E690 钢基体表层的微观组织, 形成明显的冲击影响层深度, 有效提高 E690 钢基体的硬度和弹性模量, 降低其滑动摩擦系数。此外, LSP 处理有效提高了 E690 钢的耐干滑动磨损性能。

关键词: 激光冲击; 微观组织; 纳米压痕; 摩擦系数; 耐磨损性能; 磨损机制

中图分类号: TG176 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)11-0439-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.11.038

Effect of Laser Peening on the Microstructure and Properties of E690 Offshore Steel

YANG Qing-tian^{1a}, ZHANG Yong-kang^{1b}, CHI Yuan-qing^{1b}, LIU Jiang-wen^{1a}, WANG You²,
GOU Jun-feng^{1b*}, MO Zhao-yi^{1c}, TAN Gui-bin^{1b}, LI Shun-li^{1b}

(1. a. School of Electromechanical Engineering, b. Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology for Marine Energy Facilities, c. Department of Experimental Education, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Department of Materials Science, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

收稿日期: 2022-09-15; 修订日期: 2022-11-22

Received: 2022-09-15; Revised: 2022-11-22

基金项目: 广东省自然科学基金面上项目 (2021A1515012133); 佛山市科技创新项目 (2018IT100112); 广东省基础与应用基础研究基金 (2022A1515240004)

Fund: The Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (2021A1515012133); the Science and Technology Innovation Program of Foshan (2018IT100112); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2022A1515240004)

引文格式: 杨青天, 张永康, 池元清, 等. 激光冲击对海洋工程用 E690 钢微观组织及性能的影响[J]. 表面技术, 2023, 52(11): 439-447.

YANG Qing-tian, ZHANG Yong-kang, CHI Yuan-qing, et al. Effect of Laser Peening on the Microstructure and Properties of E690 Offshore Steel[J]. Surface Technology, 2023, 52(11): 439-447.

*通信作者 (Corresponding author)

ABSTRACT: It is an advanced surface strengthening method to construct gradient structure by laser shock peening, which can improve the performances of metallic materials without changing their internal microstructure, such as fatigue strength, corrosion resistance, wear resistance and other properties. The gradient structure and residual stress have an obvious effect on the failure mechanism of the materials. The refined grain and high residual compressive stress are favorable to the improvement of mechanical properties, which affects the friction and wear behavior of the matrix. The work aims to study the microstructure, mechanical properties and wear behavior of E690 steel treated with and without LSP.

The commercial E690 steel plate was cut into long squares of 75 mm×75 mm×15 mm as the base materials and polished by milling and cleaned ultrasonically. Black 3M tape was pasted on the surface of the base materials to absorb laser power. Flowing deionized water was used as confinement layer. A PROCUDO® 200 laser peening system was used to perform the LSP treatment. The spot size was 2 mm. The pulse width was 20 ns. The frequency was 5 Hz. The laser pulse energy was fixed as 6 J. Both of the overlap rates of the scanning paths along X and Y axes were 30%. The specimens used for microstructure observation were ground with sandpaper, polished with diamond polishing agent and etched with 4% natal. An optical microscope and a scanning electron microscope (SU8010) were used to observe the microstructure. The phase of the specimens was studied by an X-ray diffractometer (D8 ADVANCE). The residual stress was measured by an X-ray stress analyzer (XL-640). The mechanical properties were measured by a micro-hardness tester (HV-1000) and a nano-indenter (TI 950). The friction and wear tests were performed on a ball-on-disc tribometer (MFT-3000). The cross-sectional area of wear tracks was measured with a laser confocal microscope (OLS4100) to calculate the wear volume loss. The morphology of wear tracks was observed to reveal the wear mechanism.

The superficial layer of E690 steel matrix is refined obviously to form gradient structure. The E690 steel specimens treated with and without LSP are composed of α and γ phases. The full width at half maximum of the highest peak of α phase of the specimen after LSP treatment increases from 0.218° to 0.266° . Besides, relatively large residual stress forms in the E690 steel specimen surface after LSP treatment, the highest value of which is -268 MPa. The influence depth of LSP is about 700 μm . The surface micro-hardness and Young's modulus of the E690 steel specimen after LSP treatment are $302.5 \pm 12.2 \text{ HV}_{100}$ and $419.80 \pm 8.79 \text{ GPa}$, which increase by 8.7% and 21.4% compared with those of the specimen without LSP treatment. The elastic recovery ratio of the E690 steel specimen after LSP treatment increases slightly. The coefficient of friction of the untreated and LSP treated E690 steel specimens are 0.59 ± 0.03 and 0.55 ± 0.03 . The wear rate of the E690 steel specimen after LSP treatment decreases by 32% compared with that of the E690 steel specimen without LSP treatment. The wear mechanisms of the untreated and LSP treated specimens are adhesion wear, abrasion wear and oxidation wear.

LSP treatment can improve the mechanical properties and wear resistance of E690 steel. The improved hardness, Young's modulus and high compressive stress are the important factors leading to the improvement of dry sliding wear resistance and decrease of coefficient of friction for E690 steel after LSP treatment. Besides, the lubrication role played by oxidative layer is also an important reason.

KEY WORDS: laser shock peening; microstructure; nano-indentation; coefficient of friction; wear resistance; wear mechanism

开发利用化石能源对自然环境产生的负面影响以及化石能源枯竭的问题日益受到人们的重视。风能是一种重要的可再生清洁能源,风能的开发利用可避免化石能源利用中存在的问题。与陆上风电相比,海上风电的储量大,发展海上风电的优势更为明显^[1]。风电安装平台是开发利用海上风电的重要支撑装备。E690 钢被广泛用于海上风电安装平台桩腿、齿条、升降系统的电动齿轮、弦管等关键部件的制造^[2]。桩腿保证了安装平台的高安装精度和高稳定性。在安装平台升降过程中,桩腿和齿轮的相对移动导致桩腿和齿轮发生严重的磨损^[3]。磨损导致桩腿和齿轮的尺寸偏离原尺寸,最终影响到平台在风机安装过程中的稳定性和安装精度,甚至可能引发安装事故。海上风电

安装平台的停机维修将造成巨大的经济损失,较高的运维费用也是限制海上风电发展的重要因素^[4]。因此,改善风电安装平台等设备大尺寸部件的使用寿命,对于促进海上风电发展具有重要现实意义。

科研人员提出并采用了不同的方法来提高 E690 钢的性能。杜晓洁等^[5]的研究发现,提高回火温度,促进了 E690 钢中碳化物的析出,缩短了回火时间。采用优化的热处理及轧制工艺可显著提高 E690 钢板的力学性能^[6]。刘智军等^[7]研究了 Nb 合金化和 V/Ti 合金化 E690 钢的组织 and 性能,发现 Nb 提高了 E690 钢的强度,V/Ti 则提高了 E690 钢的伸长性和冲击韧性。对 E690 钢进行微合金化,虽然可以有效提高钢的使用性能,但是却增加了材料研发的费用。王建波

等^[8]采用等离子增强磁控溅射技术在 E690 钢基体上制备了 TiN 和 TiAlN 涂层, 提高了其耐滑动磨损性能。使用涂层的方法虽然有效, 但是会使得 E690 钢桩腿的制备过程变得更加复杂。通过机械作用, 比如表面机械辊压处理 (SMRT)、机械研磨处理 (SMAT)、表面机械碾磨处理 (SMGT) 等, 在金属表面形成梯度结构, 不仅细化了表层晶粒尺寸, 而且可形成明显的残余压应力, 有效提高金属基体的力学性能^[9]。除此之外, 超声辊压^[10]和激光冲击 (Laser Shocks Peening, LSP)^[11]也同样能够起到细化表层晶粒尺寸, 提高金属基体性能的作用。

LSP 强化是一种重要的表面工程技术, 广泛用于改善叶片等重要零部件的疲劳寿命。在 LSP 强化过程中, 金属基体受到高能量密度、短脉冲激光束照射, 其上的吸收层吸收激光能量产生高压冲击波^[12]。在高压冲击波作用下, 金属基体表面发生高应变速率的塑性变形。金属基体表面严重的塑性变形伴随着微观组织的细化和较大残余压应力的形成。微观组织细化和残余压应力改善了金属基体的使用性能。曹宇鹏等^[13-14]对 E690 钢的 LSP 处理做了专门研究, 分析了 LSP 作用下 E690 钢表面的塑性变形, 建立了激光冲击作用下 E690 钢表面应变模型。现有研究表明, LSP 对金属基体的摩擦磨损行为有明显的影[15]。钟金杉等^[16]研究发现, LSP 处理改善了 304 不锈钢的耐干滑动磨损性能。陈春伦等^[17]和崔通等^[18]研究发现, LSP 处理可提高 40CrNiMo 结构钢和 GCr15 轴承钢的抗干滑动磨损性能。耐磨性能的改善主要归因于 LSP 处理以后高的表面硬度和残余压应力。尽管 LSP 处理在改善钢耐磨性能方面有显著效果, 然而有关 LSP 处理对于 E690 海工钢摩擦学行为的影响尚未阐明。

本文采用固定脉冲能量对 E690 钢桩腿基体进行 LSP 处理, 研究了 LSP 对其微观结构和力学性能的影响。采用干滑动磨损实验研究了 LSP 处理 E690 钢试样和未处理 E690 钢试样的摩擦磨损行为, 讨论了 LSP 处理改善 E690 钢耐磨性能的机理。

1 试验

1.1 材料及处理方法

本文采用可直接用于桩腿制造的 E690 钢作为研究对象, 来源于南通中远海运重工装备有限公司。利用线切割的方法在 E690 钢板材上切取尺寸为 75 mm×75 mm×15 mm 的小块试样, 用于后续 LSP 处理。利用磨床对 E690 钢试样块进行打磨, 降低表面粗糙度。然后, 将试样块在酒精中超声清洗。在试样块清洗以后, 将黑色的 3M 胶带粘贴在基体表面作为吸收层, 用于吸收激光能量。以去离子水作为约束层。最后, 利用 PROCUDO[®] 200 激光冲击系统进行 LSP 处理, LSP 处理过程如图 1 所示。LSP 处理工艺参数: 光斑

尺寸为 2 mm, 脉宽为 20 ns, 频率为 5 Hz, 脉冲能量为 6 J。在试样表面 X 方向和 Y 方向的光斑重叠率均为 30%。在 LSP 处理 E690 钢板和未处理 E690 钢板上切取相同尺寸的试样, 用于微观组织和性能的研究。

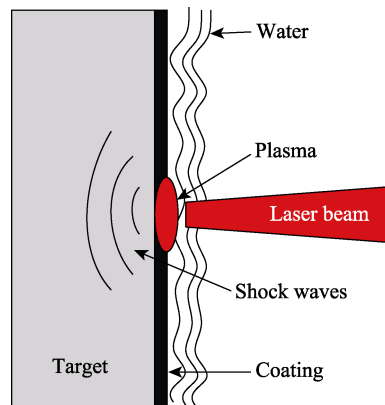


图 1 LSP 处理示意图
Fig.1 Schematic diagram of LSP treatment

1.2 微观组织观察及性能测试

采用光学显微镜 (OM) 和扫描电子显微镜 (SEM, SU8010, Japan) 观察 LSP 处理 E690 钢试样和未冲击处理 E690 钢试样的微观形貌。利用 X 射线衍射仪 (XRD, D8 ADVANCE, Germany) 分析试样物相组成, 扫描范围为 10°~90°, 扫描速率为 8 (°)/min。利用 X 射线应力测定仪 (XL-640, 邯郸市爱斯特应力技术有限公司) 测试试样表层不同位置处的残余应力状态。

采用显微维氏硬度计 (HV-1000, 莱州华银试验仪器有限公司) 测试试样表面和截面硬度的变化, 加载载荷为 100 g, 加载时间和保载时间均为 15 s。对于试样截面硬度的测试, 从表面开始, 垂直表面方向的点间距为 60 μm, 在距离表面相同位置处测试 3 个点, 取平均值。对于试样表面硬度的测试, 测试区域为 20 行×20 列的矩阵, 点间距为 60 μm。利用纳米压痕仪 (TI 950, Hysitron) 测试试样表层弹性模量, 计算弹性回复比, 分析弹塑性变化。最大载荷为 50 mN, 加载速率为 0.25 mN/s。

采用球-盘滑动磨损试验机 (MFT-3000, Rtec) 进行干滑动磨损试验。试验过程中, 记录摩擦系数随着滑动时间的变化。摩擦磨损实验条件: 载荷为 10 N, 时间为 60 min, 滑动半径为 5 mm, 滑动速度为 0.105 m/s, 对磨件为 GCr15 钢球。利用激光共聚焦显微镜 (OLS4100, Olympus, Japan) 测试磨痕截面积, 计算磨损体积, 利用式 (1) 计算磨损率。LSP 处理试样和未处理试样均测试 3 个, 最终结果为 3 次测试的平均值。利用 SEM 观察磨痕形貌, 分析磨损机制。

$$W = \frac{\Delta V}{F \cdot L} \quad (1)$$

式中: W 为磨损率, $\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$; ΔV 为磨损体积, mm^3 ; F 为载荷, N ; L 为滑动路程, m 。

2 结果及分析

2.1 微观组织结构

未处理 E690 钢试样和 LSP 处理 E690 钢试样的截面微观组织照片如图 2 所示。可以看出, 未 LSP 处理 E690 钢试样的微观组织为板条状贝氏体, LSP 对 E690 钢由表及里的晶粒尺寸有显著影响。LSP 处理试样截面微观组织由表及里形成较为明显的梯度层结构 (见图 2b), 表层区为细晶粒组织 (1 区), 靠近表层区的晶粒尺寸开始增大 (2 区)。从图 2c 可以看出, 未经 LSP 处理 E690 钢试样表层晶粒较为粗大, 晶粒不存在明显的塑性变形。与未 LSP 处理试样相比, LSP 处理试样表层除了晶粒尺寸明显细化以外, 还存在较为明显的塑性变形。在 $1.98 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 激光能量冲击作用下, 部分铁素体会转变为马氏体, 同时会有渗碳体分布在马氏体晶界处, 更高的激光冲击能量将导致渗碳体的溶解^[19]。随着激光冲击波能量的降低, 靠近表层区溶解的渗碳体量降低。

未冲击处理 E690 钢试样和 LSP 处理 E690 钢试样的 XRD 图如图 3 所示。E690 钢主要由 α 相和 γ 相组成, 其中 α 相为主要组成相。LSP 处理 E690 钢试

样表层主要相仍为 α 相。利用 XRD 积分强度计算得到未冲击处理试样中存在的残余奥氏体的质量分数约为 3%, LSP 处理试样中, 残余奥氏体含量与未处理试样中残余奥氏体的含量相近, 但是 LSP 处理试样中的 α 相在 $44^\circ\sim 45^\circ$ 的衍射峰向右发生偏移。这主要是由表层残余应力变化和物相转变引起的。一方面, LSP 处理可以在试样表层形成明显的残余压应力, 残余压应力的作用使得衍射峰的位置发生偏移^[20]。另一方面, LSP 处理导致部分 α 相转变为马氏体相, 相比于 α 相, 马氏体的衍射峰会向右偏移。依据 XRD 结果, 很难将 α 相和马氏体相区分开^[21]。马氏体相和 α 相衍射峰的叠加导致峰位偏移。此外, 未冲击处理试样中的 α 相的最强衍射峰的半高宽为 0.218° , 经过 LSP 处理后, α 相最强衍射峰的半高宽增大到 0.266° 。这主要是由表层晶粒的细化导致的。

未冲击处理 E690 钢试样和 LSP 处理 E690 钢试样表面残余应力的测试结果如图 4 所示。在 2 种试样表面上多个位置处测试残余应力, 测试点的分布如图 4a 所示, 不同位置处的残余应力大小如图 4b 所示。可以看出, 未冲击处理试样表面残余应力的分布是不均匀的, 既有残余拉应力, 又有较小的残余压应力, 残余应力绝对值相对较小。经过 LSP 处理, E690 钢试样表面的残余应力明显转变为较大的残余压应力, 表面残余应力最大值为 -268 MPa 。

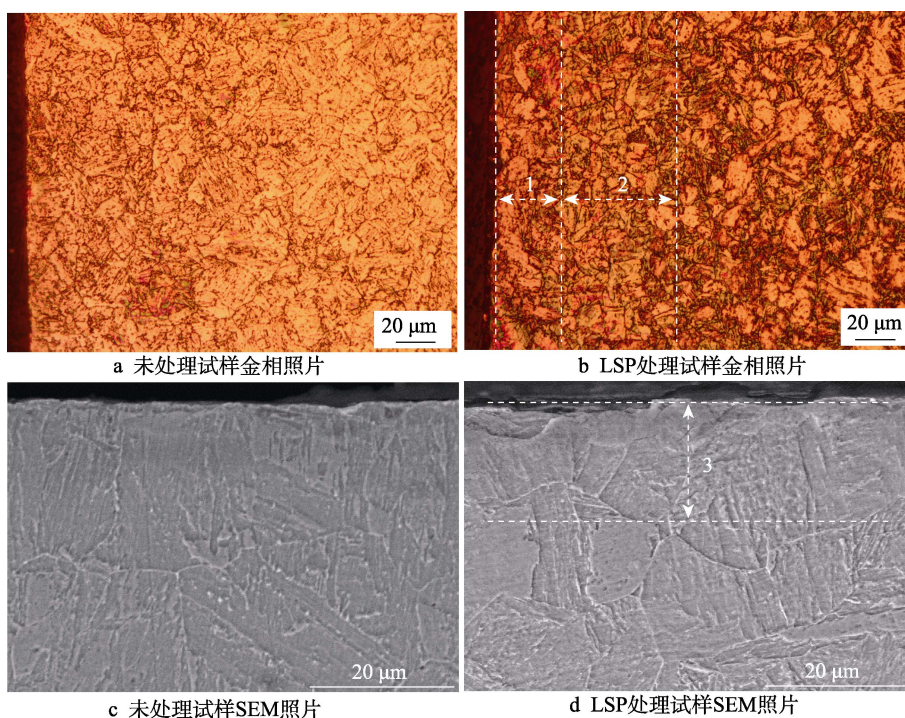


图 2 未冲击处理 E690 钢试样和 LSP 处理 E690 钢试样的截面微观组织
Fig.2 Cross-sectional morphology of E690 steel specimens treated with and without LSP:
a) OM images of the untreated specimen; b) OM images of the specimen treated by LSP;
c) SEM images of untreated specimen; d) SEM images of specimen treated by LSP

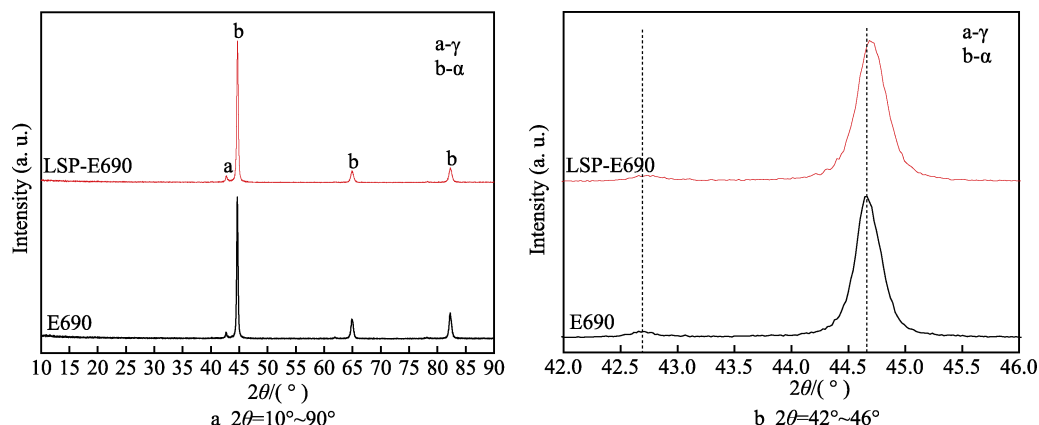


图 3 未冲击处理 E690 钢试样和 LSP 处理 E690 钢试样的 XRD 图

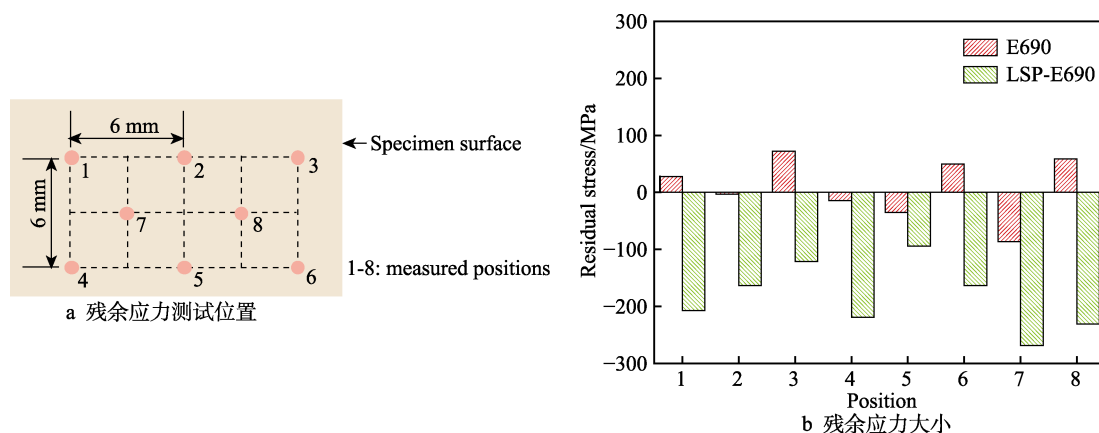
Fig.3 XRD pattern of E690 steel specimens treated with and without LSP: a) $2\theta=10^{\circ}\sim90^{\circ}$; b) $2\theta=42^{\circ}\sim46^{\circ}$ 

图 4 未冲击处理 E690 钢试样和 LSP 处理 E690 钢试样表层残余应力测试位置及残余应力大小

Fig.4 Measured position and value of residual stress of E690 steel specimens treated with and without LSP: a) measured position; b) residual stress value

2.2 力学性能

LSP 处理 E690 钢试样和未冲击处理 E690 钢试样纵截面硬度和表面硬度分布如图 5 所示。图 5a 是试样纵截面硬度变化, 可发现 LSP 处理提高了 E690 钢在较大深度范围内的硬度, LSP 的影响层深度可以

达到 700 μm 左右。从图 5b 中可以看出, LSP 处理试样的表面硬度明显高于未冲击处理试样的表面硬度。未冲击处理试样和 LSP 处理试样的表面硬度分别为 278.5HV100 和 302.5HV100 \pm 12.2HV100, LSP 处理使得 E690 钢表面硬度提高了 8.7%。LSP 处理后, E690 钢表层发生加工硬化和细晶强化, 位错密度的增加和

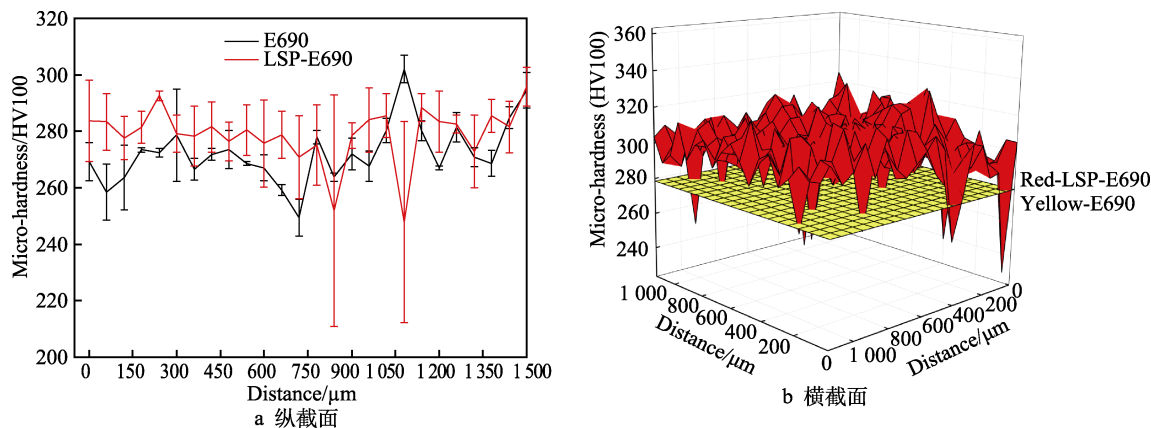


图 5 未冲击处理 E690 钢试样和 LSP 处理 E690 钢试样纵截面和表面硬度分布

Fig.5 Micro-hardness distribution on the longitudinal section and surface of E690 steel specimens treated with and without LSP: a) longitudinal section; b) cross section

晶粒抵抗塑性变形能力的增强是 E690 钢硬度提高的主要原因^[18]。LSP 处理并没有显著提高基体的硬度,这与 E690 钢微观组织的变化是相关的。LSP 导致部分铁素体转变为马氏体,这是其硬度提高的主要原因。然而,较低的冲击能量密度不能有效促使铁素体转变为马氏体^[19]。残余奥氏体的量较低,因而 LSP 作用下,应力诱导马氏体相变程度是非常有限的。

LSP 处理试样表面硬度的标准差明显高于未冲击处理试样表面硬度的标准差。LSP 光斑尺寸为 2 mm,光斑沿着 X 方向和 Y 方向的重叠率是 30%。LSP 应力波作用程度不同,这必然导致基体表面受到的作用力存在不均匀性(如图 6 所示),那么表层微观组织的演变就会存在差异。光斑重叠区域基体受到的 LSP 作用强于未重叠区域基体受到的冲击作用,最终导致硬度分布表现出较为明显的波动^[22]。此外,微观组织中晶粒大小是不同的,因而加工硬化程度和细晶强化作用不同,这进一步使得试样表面硬度的起伏增大。

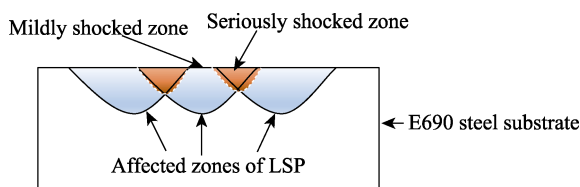


图6 LSP处理E690钢试样表面不同程度冲击作用影响区
Fig.6 Affected zones in the E690 steel specimens subject to LSP treatment to different degrees

采用纳米压痕测试得到的具有代表性的未处理 E690 钢试样和 LSP 处理 E690 钢试样的载荷-位移曲线,如图 7 所示。未处理 E690 钢试样的硬度和弹性模量分别为 (6.36 ± 0.28) GPa 和 (345.78 ± 35.19) GPa。LSP 处理 E690 钢试样的硬度和弹性模量分别为 (7.16 ± 0.18) GPa 和 (419.80 ± 8.79) GPa。LSP 处理试样的硬度高于未处理试样的硬度,这与显微硬度的测试结果是一致的。此外,LSP 处理显著提高了试样的弹性模量,

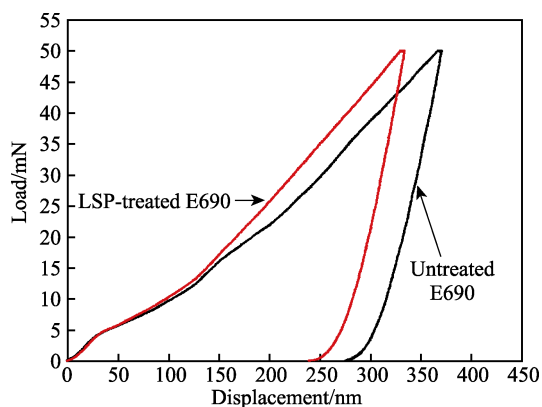


图7 未处理 E690 钢试样和 LSP 处理 E690 钢试样的载荷-位移曲线

Fig.7 Load-displacement curves of E690 steel specimens treated with and without LSP

提高幅度为 21.4%。弹性模量的增大有助于抑制裂纹的扩展。从图 7 可以发现,未处理试样的最大位移大于 LSP 处理试样的最大位移,这是由于未处理试样具有相对较低的硬度造成的。此外,利用文献[23]中的方法计算得到未处理试样和 LSP 处理试样的弹性回复比分别为 $22.7\% \pm 1.7\%$ 和 $23.7\% \pm 0.4\%$,后者的弹性回复比略有提高。综合可得,LSP 处理提高了 E690 钢的弹塑性性质。

2.3 滑动摩擦磨损行为

LSP 处理 E690 钢试样和未处理 E690 钢试样的摩擦系数随着滑动时间的变化曲线如图 8 所示。摩擦系数曲线表明,试样摩擦过程中存在磨合期和稳定期。在磨合期,摩擦系数存在明显的起伏,这种起伏与摩擦副表面粗糙度的变化有关。磨合期阶段摩擦副表面接触面积增大,形成了大量的凸起,凸起的增多导致摩擦系数的快速增大^[24]。稳定期的摩擦系数呈现出较小的波动,这种波动与摩擦副表面局部断裂、磨屑的集聚及去除有关^[25]。未冲击处理 E690 钢试样和 LSP 处理 E690 钢试样的平均摩擦系数分别为 0.59 ± 0.03 和 0.55 ± 0.03 。LSP 处理降低了 E690 钢的平均摩擦系数。这是由 LSP 处理 E690 钢试样高的强度、硬度和残余压应力导致的^[26]。特别地,在摩擦系数变化曲线上存在一些较大的起伏,这与摩擦副磨痕之间由磨屑和氧化层形成的机械混合层的形成和破坏有关^[27]。

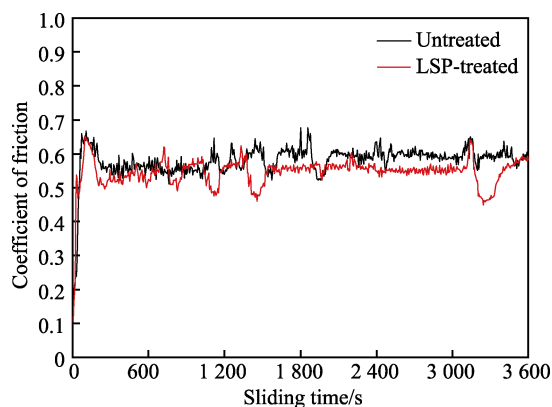


图8 未冲击处理 E690 钢试样和 LSP 处理 E690 钢试样的摩擦系数随着滑动时间的变化曲线

Fig.8 Coefficient of friction variation curve with slipping time of E690 steel specimens treated with and without LSP

LSP 处理 E690 钢试样和未冲击处理 E690 钢试样的磨损体积和磨损率如图 9 所示。LPS 处理有效改善了 E690 钢的耐磨损性能,LSP 处理试样的磨损体积和磨损率明显低于未冲击处理试样的磨损体积和磨损率。未处理试样的磨损体积和磨损率分别为 (0.55 ± 0.02) mm³和 $(1.45 \pm 0.07) \times 10^{-4}$ mm³/(N·m)。与未冲击处理试样相比,LSP 处理试样的磨损率降低了 32%。依据 Hall-Petch 公示,晶粒细化可以提高 E690 钢的强度^[28]。相同磨损载荷条件下,高的强度和硬度

有效抑制了剪切剥落的发生。E690 钢基体表层微观晶粒细化导致的基体强化和高硬度是其磨损率降低的重要原因^[18,22]。另一方面, 表面残余压应力和较大的弹性模量抑制了裂纹的萌生和扩展, 有助于钢基体耐磨损性能的提高^[29]。

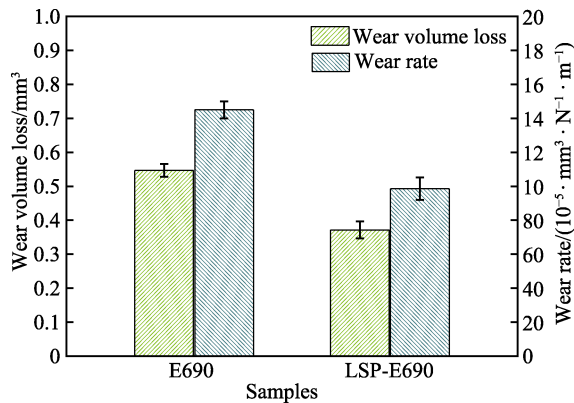


图 9 未冲击处理 E690 钢试样和 LSP 处理 E690 钢试样的磨损体积和磨损率
Fig.9 Wear volume loss and wear rate of E690 steel specimens treated with and without LSP

LSP 处理 E690 钢试样和未冲击处理 E690 钢试样磨痕的低倍和高倍 SEM 照片如图 10 所示。从试样磨痕形貌判断, 2 种试样的磨损机制是相同的。在磨痕表面可以观察到明显的剥落痕迹, 这表明试样磨损过程中存在着黏着磨损机制。除此之外, 在磨痕表面还可以观察到微犁削产生的沟槽, 这表明试样磨损过程中存在轻微的磨粒磨损。然而, LSP 处理 E690 钢试样磨痕上的犁削沟槽明显少于未处理试样磨痕上

的沟槽, 这与 LSP 处理试样强度、硬度和弹性模量的增大有关^[30]。2 种试样磨痕表面不同位置处的化学成分见表 1。未冲击处理试样和 LSP 处理试样磨痕不同位置处的化学成分是不同的, 在 2 种试样剥落位置 A 和 D 处未检测到氧, 在剥落位置 B 和 E 处检测到较少的氧, 而在未剥落位置 C 和 F 处检测到较多的氧。磨痕表面不同程度氧化区的存在表明, 氧化磨损机制发挥了关键作用。滑动摩擦过程中试样表面发生氧化, 在摩擦副之间黏着力作用下, 较厚的氧化层转移或者剥落, 形成凹坑。当氧化层下的基体裸露时, 相应位置处的氧含量为 0。但是, 随着往复滑动的进行, 裸露的基体会被重新氧化, 表面氧含量增加。特别地, LSP 处理试样磨痕表面的氧含量明显高于未冲击处理试样磨痕表面的氧含量。LSP 处理导致钢基体表层晶粒细化, 晶界增多, 氧的扩散通道增多, 有利于增大磨痕表面的氧含量^[29]。此外, LSP 处理导致位错密度增大, 同样有利于氧化层的形成^[31]。从图 10 中可以看到, 未处理试样磨痕表面的剥落程度明显高于 LSP 处理试样, 即 LSP 处理试样表面的氧化层覆盖面积更大。高的残余压应力, 抑制了裂纹的萌生, 抑制了氧化膜层的脱落^[32]。这也是 LSP 处理试样磨痕氧含量高的主要原因。氧化物膜层存在于摩擦副之间, 作为润滑膜层有效地减轻了 LSP 处理试样的磨损^[33-34]。

LSP 处理 E690 钢试样表层晶粒细化, 强度、硬度和弹性模量均高于未处理 E690 钢试样。高的强度和弹性模量有效降低了摩擦副之间的实际接触面积, 降低了黏着效应, 从而降低了摩擦系数^[35]。此外, 摩

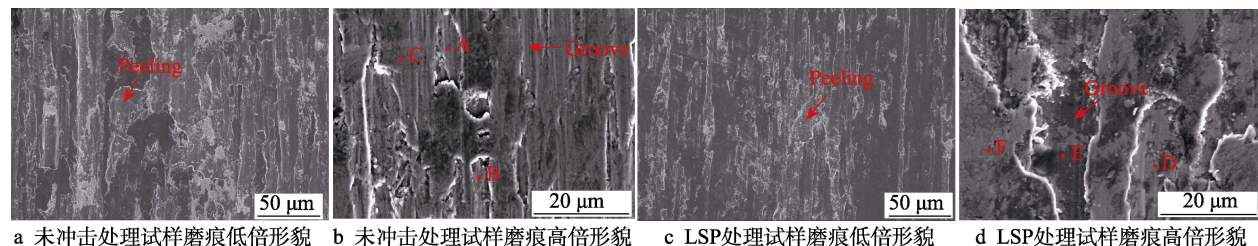


图 10 未冲击处理 E690 钢试样和 LSP 处理 E690 钢试样的磨痕形貌
Fig.10 Wear track morphology of E690 steel specimens treated with and without LSP:
a) specimen treated without LSP; b) specimen treated with LSP

表 1 未冲击处理 E690 钢试样和 LSP 处理 E690 钢试样的磨痕成分
Tab.1 Composition of the wear tracks of E690 steel specimens treated with and without LSP

		wt.%						
Samples	Position	O	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo
E690	A	0	0.457	0.505	0.884	96.620	0.865	0.669
	B	1.239	0.313	0.659	1.652	94.706	0.855	0.542
	C	2.889	0.267	0.536	1.221	95.6	0.828	0.703
LSP-E690	D	0	0.397	0.264	1.007	96.502	1.446	0.385
	E	0.931	0.289	0.518	0.809	95.861	0.649	0.943
	F	9.518	0.459	0.558	0.704	87.531	0.56	0.67

擦副之间的氧化物润滑层不仅有助于摩擦系数的降低,而且减轻了试样的磨损^[34]。高的强度、残余压应力和弹性模量有效抑制了断裂的发生。因此,滑动摩擦过程中,尽管 LSP 处理试样的氧化严重,但是其黏着转移程度相对较低。另外,高的硬度意味着亚表面的塑性变形程度轻,形成的裂纹深度浅,这也是其黏着剥落程度相对较轻的重要原因^[36]。对于未冲击处理试样,硬度低意味着滑动摩擦过程中亚表面塑性变形严重,形成的裂纹深,进而导致较大程度的剥落,这也是其耐磨损性能差的重要原因。

3 结论

1) LSP 处理可以有效细化 E690 钢基体表层晶粒尺寸,提高钢基体的硬度和弹性模量。但是, LSP 处理试样的弹性回复比略有增大。

2) LSP 处理有效改善了 E690 钢的耐磨损性能。LSP 处理 E690 钢试样具有比未处理 E690 钢试样低的摩擦系数和磨损率。

3) 未处理 E690 钢试样和 LSP 处理 E690 钢试样的磨损机制均为黏着磨损、氧化磨损和磨粒磨损。LSP 处理 E690 钢磨痕表层的氧含量更高。

4) LSP 处理 E690 钢试样表层晶粒尺寸细化、硬度高、较大残余压应力和高的弹性模量是其摩擦系数降低、耐磨损性能改善的重要原因。此外,磨痕表面氧化物膜层的减磨润滑作用也发挥了重要作用。

参考文献:

- [1] LIU Qian, SUN Yan, WU Meng-cheng. Decision-Making Methodologies in Offshore Wind Power Investments: A Review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 295: 126459.
- [2] 帅勇, 孙乐飞, 闫博, 等. 回火工艺对海洋工程用钢 E690 组织与性能的影响[J]. *金属热处理*, 2016, 41(12): 97-101.
SHUAI Yong, SUN Le-fei, YAN Bo, et al. Effect of Tempering on Microstructure and Mechanical Properties of Marine Engineering Steel E690[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2016, 41(12): 97-101.
- [3] 杜仕忠, 杜高峰, 吴正峰, 等. 自升式风电安装平台齿条修补工艺[J]. *金属加工(热加工)*, 2017(6): 28-30.
DU Shi-zhong, DU Gao-feng, WU Zheng-feng, et al. Repair Technology of Rack of Jack-up Wind Power Installation Platform[J]. *MW Metal Forming*, 2017(6): 28-30.
- [4] RINALDI G, THIES P R, JOHANNING L. Current Status and Future Trends in the Operation and Maintenance of Offshore Wind Turbines: A Review[J]. *Energies*, 2021, 14(9): 2484.
- [5] 杜晓洁, 何宜柱, 杨磊. 回火温度对 E690 钢碳化物析出量的影响[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(4): 226-229.
- [6] DU Xiao-jie, HE Yi-zhu, YANG Lei. Effect of Tempering Temperature on Carbide Precipitation Mount of E690 Steel[J]. *Hot Working Technology*, 2015, 44(4): 226-229.
- [7] 刘敏, 冯小明, 赖朝彬, 等. 热轧工艺对海洋平台用钢 E690 再结晶的影响[J]. *金属热处理*, 2015, 40(10): 64-67.
LIU Min, FENG Xiao-ming, LAI Chao-bin, et al. Influence of Hot Rolling Parameters on Recrystallization of Steel E690 for Sea Platform[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2015, 40(10): 64-67.
- [8] XIONG Wen-ming, SONG Ren-bo, HUO Wei-feng, et al. Microstructure Characteristics and Impact Fracture Mechanisms of Nb and V-Ti Micro-Alloyed Offshore Platform Steels[J]. *Vacuum*, 2022, 195: 110709.
- [9] 王建波, 王润宇, 张明恩, 等. TiN 和 TiAlN 涂层改善 E690 钢摩擦磨损性能的研究[J]. *热加工工艺*, 2022, 51(14): 116-120.
WANG Jian-bo, WANG Run-yu, ZHANG Ming-en, et al. Study on Improvement of Friction and Wear Properties of E690 Steel by TiN and TiAlN Coatings[J]. *Hot Working Technology*, 2022, 51(14): 116-120.
- [10] LI Xiao-yan, LU Lei, LI Jian-guo, et al. Mechanical Properties and Deformation Mechanisms of Gradient Nanostructured Metals and Alloys[J]. *Nature Reviews Materials*, 2020, 5(9): 706-723.
- [11] LIU Yi-xin, CHEN Hao, WANG Run-zi, et al. Fatigue Behaviors of 2205 Duplex Stainless Steel with Gradient Nanostructured Surface Layer[J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 147: 106170.
- [12] LI Run-guang, WANG You-kang, XU Ning, et al. Unveiling the Origins of Work-Hardening Enhancement and Mechanical Instability in Laser Shock Peened Titanium[J]. *Acta Materialia*, 2022, 229: 117810.
- [13] DWIVEDI P K, VINJAMURI R, RAI A K, et al. Effect of Laser Shock Peening on Ratcheting Strain Accumulation, Fatigue Life and Bulk Texture Evolution in HSLA Steel[J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 163: 107033.
- [14] 王志敏, 黄春玲, 曹宇鹏. 激光冲击波传播特性对 E690 钢表面微凹坑动态塑性变形的影响[J]. *金属热处理*, 2022, 47(6): 253-259.
WANG Zhi-min, HUANG Chun-ling, CAO Yu-peng. Influence of Laser Shock Wave Propagation Characteristics on Dynamic Plastic Deformation of Micro-Dimple on E690 Steel Surface[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2022, 47(6): 253-259.
- [15] 王帅, 杨阳, 花国然, 等. 激光冲击 E690 高强钢表面应变预测模型的建立[J]. *金属热处理*, 2020, 45(10): 225-230.
WANG Shuai, YANG Yang, HUA Guo-ran, et al. Establishment of Surface Strain Prediction Model of E690 High Strength Steel by Laser Shock Processing[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2020, 45(10): 225-230.
- [16] LU H F, XUE K N, XU X, et al. Effects of Laser Shock Peening on Microstructural Evolution and Wear Property

- of Laser Hybrid Remanufactured Ni25/Fe104 Coating on H13 Tool Steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 291: 117016.
- [16] 钟金杉, 鲁金忠, 罗开玉, 等. 激光冲击对 AISI304 不锈钢拉伸性能和摩擦磨损性能的影响[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 67-73.
- ZHONG Jin-shan, LU Jin-zhong, LUO Kai-yu, et al. Influence of Laser Shock Processing on Tensile Properties and Tribological Behaviors of AISI304 Stainless Steel[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(5): 67-73.
- [17] 陈春伦, 冯爱新, 危亚城, 等. 无涂层激光冲击强化对 40CrNiMo 结构钢摩擦磨损性能的影响[J]. *表面技术*, 2023, 52(5): 356-363.
- CHEN Chun-lun, FENG Ai-xin, WEI Ya-cheng, et al. Effect of Laser Shock Peening without Coating on Friction and Wear Properties of 40CrNiMo Structural Steel[J]. *Surface Technology*, 2023, 52(5): 356-363.
- [18] 崔通, 贺甜甜, 杜三明, 等. 激光冲击强化对 GCr15 轴承钢微观组织和摩擦学行为的影响[J]. *表面技术*, 2022, 51(7): 353-362.
- CUI Tong, HE Tian-tian, DU San-ming, et al. Effect of Laser Shock Strengthening on Microstructure and Tribological Behavior of GCr15 Bearing Steel[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(7): 353-362.
- [19] 解朋朋, 曹宇鹏, 花国然, 等. 激光冲击 E690 高强度钢 Ostwald 熟化现象的试验研究[J]. *表面技术*, 2022, 51(9): 371-378.
- XIE Peng-peng, CAO Yu-peng, HUA Guo-ran, et al. Experimental Study on Ostwald Ripening of E690 High Strength Steel Treated by Laser Shock Peening[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(9): 371-378.
- [20] NOYAN I C, HUANG T C, YORK B R. Residual Stress/Strain Analysis in Thin Films by X-Ray Diffraction[J]. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 1995, 20(2): 125-177.
- [21] BERRAHMOUNE M R, BERVEILLER S, INAL K, et al. Analysis of the Martensitic Transformation at Various Scales in TRIP Steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 378(1/2): 304-307.
- [22] REN Yun-peng, WAN Han-yu, CHEN Yan, et al. Effect of Laser Shock Peening and Carbonitriding on Tribological Properties of 20Cr₂Mn₂Mo Steel Alloy under Dry Sliding Conditions[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 417: 127215.
- [23] BAO Y W, WANG W, ZHOU Y C. Investigation of the Relationship between Elastic Modulus and Hardness Based on Depth-Sensing Indentation Measurements[J]. *Acta Materialia*, 2004, 52(18): 5397-5404.
- [24] LIAO Ling-yi, GAO R, YANG Z H, et al. A Study on the Wear and Corrosion Resistance of High-Entropy Alloy Treated with Laser Shock Peening and PVD Coating[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2022, 437: 128281.
- [25] WU J M, LIN S J, YEH J W, et al. Adhesive Wear Behavior of Al_xCoCrCuFeNi High-Entropy Alloys as a Function of Aluminum Content[J]. *Wear*, 2006, 261(5/6): 513-519.
- [26] REN Xu-dong, TONG Zhao-peng, ZHOU Wang-fan, et al. High Temperature Wear Performance of Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si Alloy Subjected to Laser Shock Peening[J]. *Materials Science and Technology*, 2018, 34(18): 2294-2304.
- [27] ZHANG L, HE X B, QU X H, et al. Dry Sliding Wear Properties of High Volume Fraction SiC_p/Cu Composites Produced by Pressureless Infiltration[J]. *Wear*, 2008, 265(11/12): 1848-1856.
- [28] YUAN Qian, CHAI Lin-jiang, SHEN Jing, et al. Microstructural Characteristics, Hardness and Wear Resistance of a Typical Ferritic/Martensitic Steel Surface-Treated by Pulsed Laser[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 418: 127261.
- [29] TONG Zhao-peng, PAN Xu-yang, ZHOU Wang-fan, et al. Achieving Excellent Wear and Corrosion Properties in Laser Additive Manufactured CrMnFeCoNi High-Entropy Alloy by Laser Shock Peening[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 422: 127504.
- [30] ELHEFNAWEY M, SHUAI G L, LI Z, et al. On Dry Sliding Wear of ECAPed Al-Mg-Zn Alloy: Wear Rate and Coefficient of Friction Relationship[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2021, 60(1): 927-939.
- [31] AVCU E. The Influences of ECAP on the Dry Sliding Wear Behaviour of AA7075 Aluminium Alloy[J]. *Tribology International*, 2017, 110: 173-184.
- [32] HAN Xue, ZHANG Zhen-pu, WANG Bai-shu, et al. Microstructures, Compressive Residual Stress, Friction Behavior, and Wear Mechanism of Quenched and Tempered Shot Peened Medium Carbon Steel[J]. *Wear*, 2022, 488-489: 204131.
- [33] KUMAR S, BHATTACHARYYA A, MONDAL D K, et al. Dry Sliding Wear Behaviour of Medium Carbon Steel Against an Alumina Disk[J]. *Wear*, 2011, 270(5/6): 413-421.
- [34] KAUL R, GANESH P, TIWARI P, et al. Characterization of Dry Sliding Wear Resistance of Laser Surface Hardened En 8 Steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 167(1): 83-90.
- [35] GÅÅRD A, HALLBÄCK N, KRAKHMALEV P, et al. Temperature Effects on Adhesive Wear in Dry Sliding Contacts[J]. *Wear*, 2010, 268(7/8): 968-975.
- [36] WANG S Q, WEI M X, ZHAO Y T. Effects of the Tribo-Oxide and Matrix on Dry Sliding Wear Characteristics and Mechanisms of a Cast Steel[J]. *Wear*, 2010, 269(5/6): 424-434.

责任编辑: 刘世忠