

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.07.003

高强机械轴承的表面加工与性能研究

王丽博^{1*}, 罗志强², 金胜然²

(1. 河南机电职业学院, 河南 郑州 451192; 2. 郑州大学 材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对机械轴承在复杂服役环境下出现局部磨损、疲劳开裂和腐蚀等问题, 对GCr15SiMn轴承钢进行了深冷处理和激光冲击强化处理, 研究了深冷处理时间、激光冲击强化次数和深冷-激光冲击复合强化对轴承钢显微组织、力学性能和耐磨性能的影响。结果表明: 未处理和激光冲击强化后轴承钢试样都主要由马氏体和奥氏体组成; 随着激光冲击强化次数增加, 轴承钢的平均晶粒尺寸先增加后减小, 在激光冲击强化3次时取得最小值; 深冷处理和激光冲击强化都有助于降低轴承钢中残余奥氏体含量, 且深冷处理时间越长残余奥氏体含量越低, 深冷处理8 h时轴承钢中残余奥氏体含量为0.81%。深冷处理和激光冲击强化处理都有助于提高轴承钢的纳米硬度、弹性模量, 降低磨损损失, 且深冷处理8 h和激光冲击强化3次时, 轴承钢的纳米硬度和弹性模量最大、磨损损失最小, 这主要与此时轴承钢中晶粒尺寸较小、碳化物尺寸细小且均匀等有关。

关键词: 轴承钢; 深冷处理; 激光冲击强化; 组织; 耐磨性

中图分类号: TG174.44

文献标识码: A

Study on surface processing and properties of high strength mechanical bearings

Wang Libo^{1*}, Luo Zhiqiang², Jin Shengran²

(1. Henan Mechanical & Electrical Vocational College, Zhengzhou 451192, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Aiming at the problems of local wear, fatigue cracking and corrosion of mechanical bearings in complex service environment, GCr15SiMn bearing steel was subjected to cryogenic treatment and laser shock strengthening treatment, and the effects of cryogenic treatment time, laser shock strengthening times and cryogenic laser shock composite strengthening on the microstructure, mechanical properties and wear resistance of bearing steel were studied. The results showed that, both untreated and laser shock strengthened bearing steel samples are mainly composed of martensite and austenite. With the increase of laser shock strengthening times, the average grain size of bearing steel increases first and then decreases, and the minimum value is obtained when the laser shock strengthening times is 3. Both cryogenic treatment and laser shock strengthening can reduce the content of retained austenite in bearing steel, the longer the cryogenic treatment time, the lower the content of retained austenite, and the content of retained austenite in bearing steel is 0.81% when the cryogenic treatment is 8 h. Both cryogenic treatment and laser shock strengthening treatment help improve the nano-hardness, elastic modulus of bearing steel, and wear loss was reduced. When cryogenic treatment is 8 h and laser shock strengthening is performed for 3 times, the nano-hardness and elastic modulus of bearing steel are the

收稿日期: 2022-09-01

修回日期: 2022-09-15

作者简介: 著者简介: 王丽博(1984—), 女, 硕士, 副教授, email: 18203690695@139.com

基金项目: 郑州市科技攻关项目(173SGZG23115), 中国博士后基金项目(20171520986)

largest, and the wear loss is the smallest, which is mainly related to the smaller grain size, or the smaller and uniform carbide size in the bearing steel.

Keywords: bearing steel; cryogenic treatment; laser shock strengthening; structure; wear resistance

轴承钢具有高且均匀的硬度、良好的耐磨性、高的弹性极限等,可以承受服役过程中较大的压力、摩擦力和冲击力等^[1],然而随着航空航天、机械等工业的快速发展和技术进步,对机械轴承的可靠性、安全性和长寿命提出了更高的要求,这就需要现代机械轴承克服在高速、重载、强冲击、高摩擦等复杂服役环境下易于出现局部磨损、疲劳开裂和腐蚀^[2],严重情况下甚至会造成整体结构件的失效和产生工程事故等问题,较为可行的方法是通过对轴承进行表面改性处理以提高其表面硬度、耐磨性能等^[3]。传统的轴承表面改性技术主要包括化学热处理(渗氮、渗碳等)、表面机械强化(喷丸、滚压等)和表面高能处理(激光熔覆)等^[4-5],如对GCr15轴承钢进行等离子渗氮可以提高其抗摩擦磨损能力,对GCr15SiMn轴承座圈进行滚压可以提高其表面抗接触疲劳能力,在轴承钢表面激光熔覆FeCoCrNi涂层可以提高其抗冲蚀磨损能力等,但是化学热处理轴承表面会出现受热不均、改性层深度等难以控制的问题,表面机械强化处理得到的改性层通常硬而脆并影响使用寿命,激光熔覆处理得到的改性层易于产生裂纹且需要对熔覆金属进行成分优化等问题^[6-8]。

深冷处理作为一种在低于-130 °C温度下对金属工件进行整体处理的工艺手段,已证实在钛合金刀具、硬质合金钻头等方面具有良好改性效果,可起

到提高尺寸稳定性、提升耐磨性、改善韧性等效果;激光冲击强化(简称LSP)作为一种利用高能脉冲激光对钛合金、镁合金等金属进行表面冲击塑性变形的改性技术,具有操作简单、无热输入和非接触等特点,在金属结构件表面强化领域具有良好的应用前景。如何充分发挥深冷处理和激光冲击强化处理各自的优势,既能够通过深冷处理增加尺寸稳定性和韧性,又能通过激光冲击强化在轴承钢表面形成压应力并提高表层硬度、耐磨性等是值得研究的课题^[9-10],而目前这方面的研究报道较少,具体深冷+激光冲击耦合作用机理也不清楚。本文以GCr15SiMn轴承钢为试验材料,研究了基于PLC控制工艺参数的深冷处理时间、激光冲击强化次数和深冷+激光冲击复合强化对轴承钢显微组织、力学性能和耐磨性能的影响,结果将有助于高性能轴承钢的表面改性技术开发并推动其在轴承表面改性等领域的应用。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选用GCr15SiMn轴承钢为试验材料,化学组成如表1。采用线切割方法将轴承钢加工成45 mm×30 mm×5 mm,砂纸打磨、金刚石研磨膏抛光、清水冲洗和酒精超声清洗后烘干,密封保存待用。

表1 试验轴承钢的化学组成

Table 1 Chemical composition of test bearing steel

元素	C	Cr	Si	Mn	Mo	P	S	Ni	Cu	Fe
含量/wt.%	0.98	1.56	0.49	1.02	0.03	0.009	0.001	0.07	0.02	余量

1.2 表面改性处理

采用深冷处理、激光冲击强化和深冷处理-激光冲击复合强化的方法对轴承钢进行了基于PLC控制工艺参数的表面强化处理。(1)激光冲击强化:采用SIA-LSP-11型激光冲击强化设备对轴承钢试样进行冲击强化处理,设备自带PLC控制系统对激光参数进行精确控制,光斑直径为3 mm,冲击能量设定为12 J,搭接率为50%,激光冲击次数为1~4次,激光冲击试样简称为LSPx,其中x表示激光冲击次

数(次)。(2)深冷处理:将预先处理的轴承钢试样取出,置于泡沫箱中并加入液氮,-196 °C温度下保温不同时间,深冷处理试样简称为SLy,其中y表示深冷时间(h)。(3)深冷+激光冲击复合强化(SL+LSP):首先对经过预处理的轴承钢试样进行深冷处理,温度-196 °C、时间0~9 h,深冷处理后空冷至室温并对试样进行进一步基于PLC控制的激光冲击强化处理,激光冲击强化工序参数不变,冲击次数选择为优化后的激光冲击强化次数,处理后的试样简

称为SL_y+LSP_x,如SL₂+LSP₃表示深冷处理2 h+激光冲击强化3次,依此类推。

1.3 测试方法

选用荷兰帕纳科Empyrean锐影X射线衍射仪测试不同试样的物相,Rietveld精修定量分析残余奥氏体含量^[11],靶材为Cu靶,管压30 V,管流20 mA,扫描角度为20~90°,扫描速度为2°/min;使用TESCAN VEGA3型钨灯丝扫描电子显微镜对轴承钢的显微形貌进行观察,并用附带能谱仪测试微区成分;使用美国威尔逊402MVD显微维氏硬度计进行显微硬度测试,载荷100 g,保持载荷时间为10 s,结果取5点平均值;使用Nano Indenter G200纳米压痕仪测试纳米硬度,保压时间设定为10 s,结果取8点平均值;透射电镜试样线切割成0.6 mm薄片,机械研磨至60 μm后进行双喷离子减薄,在JEOL 2100型透射电子显微镜上观察;选用T50型万能摩擦磨损试验机对轴承钢进行室温摩擦磨损试验,对磨球为Φ4 mm E52100轴承钢球(硬度64 HRC),载荷10 N,摩擦磨损时间设定为0.5 h,并记录摩擦系数曲线和计算磨损失重^[12]。

2 结果与分析

2.1 激光冲击强化

图1为激光冲击强化轴承钢的X射线衍射分析结果。对比分析可知,未处理和激光冲击强化后轴承钢试样都主要由马氏体(M)和奥氏体(A)组成,激光冲击强化处理后轴承钢中并不会出现新的物相,但是衍射峰宽度相较未处理试样发生宽化。根据谢乐公式计算轴承钢的平均晶粒尺寸 D ^[13]:

$$D = K\lambda/\beta\cos\theta \quad (1)$$

式中:K为Scherrer常数(取0.89); λ 为X射线波长; β 为衍射峰半峰宽值; θ 为衍射角。计算结果表明,未处理、SLP1、SLP2、SLP3和SLP4轴承钢的平均晶粒尺寸分别为44.12 nm、37.85 nm、36.71 nm、36.25 nm和37.68 nm,可见,相较于未处理处理轴承钢试样,激光冲击强化处理后晶粒尺寸减小,且随着激光冲击强化次数增加,轴承钢的平均晶粒尺寸先增加后减小,在激光冲击强化3次时取得最小值。这主要是因为激光冲击强化过程中,轴承钢表面会发生一定程度的塑性变形,并诱导晶粒细化^[14],但是激光冲击强化次数过大(4次)时,塑性变形程度变小的同时晶粒会发生粗化与长大,因此激光冲击强化4次

时晶粒尺寸反而增大。

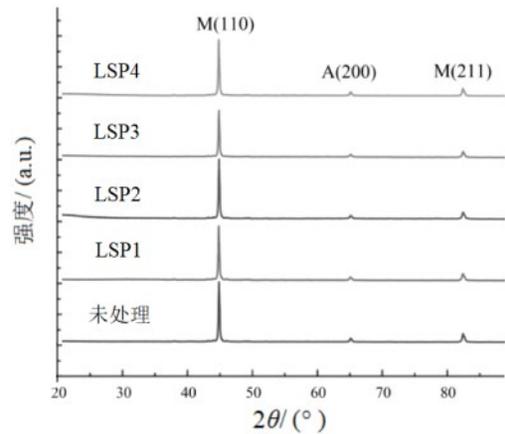


图1 激光冲击强化轴承钢的XRD谱图

Fig. 1 XRD patterns of laser shock strengthened bearing steels

图2为激光冲击强化轴承钢的显微组织。对于未处理轴承钢,组织中可见尺寸较大的亮白色碳化物颗粒,且碳化物颗粒存在分布不均的现象;对轴承钢进行1次冲击强化处理后,碳化物颗粒尺寸有所减小,分布更加均匀;继续增加激光冲击强化次数,碳化物颗粒尺寸不断减小,在冲击强化3次后碳化物尺寸最小,而继续增加冲击强化次数至4次时,碳化物颗粒尺寸反而增大且出现分布不均现象。这主要是因为对轴承钢进行激光冲击强化处理,冲击波作用下轴承钢中的碳化物会发生塑性变形和碎化,但是当冲击强化次数过大时(4次),塑性变形作用减弱,激光冲击作用下局部出现了碳化物分布不均且尺寸较大的现象^[15]。

2.2 深冷处理

图3为深冷处理前后轴承钢的XRD图谱定量精修图,表2中给出了马氏体和残余奥氏体定量分析结果。对于原始轴承钢(SL0),马氏体和残余奥氏体含量分别为91.62%和1.50%;经过深冷处理后,轴承钢中残余奥氏体含量减少,且深冷处理时间越长,轴承钢中残余奥氏体含量越低,SL8试样的残余奥氏体含量为0.81%。对SL0、SL2、SL4和SL8试样进行进一步激光冲击强化处理,轴承钢中残余奥氏体含量进一步降低,SL0-LSP3、SL2-LSP3、SL0-LSP4和SL8-LSP3轴承钢中残余奥氏体含量分别为1.08%、0.89%、0.66%和0.42%。可见,对轴承钢进行深冷处理以及进一步激光冲击强化处理都有助于降低轴承钢中残余奥氏体含量,这主要是因为由于

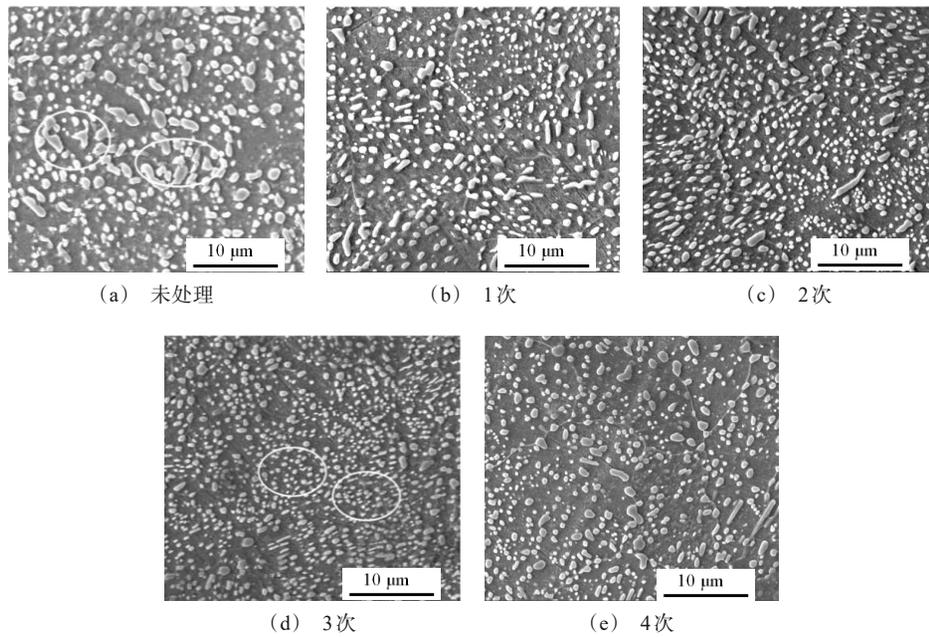


图2 激光冲击强化轴承钢的显微组织

Fig. 2 Microstructure of laser shock strengthened bearing steels

奥氏体不稳定,在受到外力或环境温度变化时,残余奥氏体会转变为马氏体,且深冷时间延长会转变为更多的马氏体,残余奥氏体含量减少;但是复合强化处理过程中马氏体转变时会发生体积膨胀而产生压应力,轴承钢中残余奥氏体转变需要克服这种压应力而使得其不会完全消除^[16]。进一步对深冷处理前后轴承钢的显微硬度进行测试,结果列于表2。SL0、SL2、SL4 和 SL8 轴承钢的硬度分别为 205.5 HV、272.7 HV、224.6 HV 和 288.4 HV,可见深冷处理有助于提高轴承钢的显微硬度;进一步对深冷处理轴承钢进行3次的激光冲击强化处理,无论是否进行深冷处理,激光冲击强化处理后轴承钢的硬度都会有所提高,SL8-LSP3 轴承钢的硬度最大。

图4为深冷处理前后轴承钢的透射电镜显微形貌。对于未经过深冷处理和激光冲击强化处理的试样(SL0),轴承钢中可见少量在加工过程中形成的位错线和椭球形碳化物颗粒;经过深冷-激光冲击强化处理后,SL8-LSP3 轴承钢中可见位错墙和高密度位错缠结,局部可见位错胞和亚晶界,选区电子衍射花样分析表明轴承钢中形成了纳米晶结构。这主要是因为轴承钢在深冷处理过程中会发生体积收缩,激光冲击强化处理过程中,轴承钢会发生塑性变形并产生位错和位错缠结,并会随着冲击强化次数增

加而形成位错胞并在局部产生亚晶^[17]。

2.3 深冷+激光冲击强化

为了对比分析深冷处理、激光冲击强化和深冷+激光冲击复合强化对轴承钢力学性能和耐磨性能的影响,对 SL0、SL8、SLP3 和 SL8+SLP3 轴承钢进行了纳米硬度、弹性模量和耐磨性能测试。图5为轴承钢的纳米压痕加载曲线,硬度值列于表3。SL0、SL8、SLP3 和 SL8+SLP3 轴承钢的纳米硬度分别为 3.20 GPa、3.60 GPa、4.99 GPa 和 6.66 GPa,可见深冷处理和激光冲击强化处理都有助于高轴承钢的纳米硬度,且深冷+激光冲击复合强化效果最好。此外,表3中还列出了弹性模量测试结果,SL0、SL8、SLP3 和 SL8+SLP3 轴承钢的弹性模量分别为 167.48 GPa、188.40 GPa、205.64 GPa 和 222.06 GPa,可见深冷处理和激光冲击强化处理都有助于提高轴承钢的弹性模量,且深冷+激光冲击复合强化试样的弹性模量最大,抗变形能力最强。

图6为轴承钢的摩擦系数曲线。可见,4种不同工艺下轴承钢的摩擦系数(f)随着时间(t)的变化趋势基本一致,即开始摩擦磨损阶段,摩擦系数减小且会随着摩擦磨损时间延长显著增加,当摩擦磨损到达一定时间后摩擦系数逐渐趋于稳定。这主要是因为摩擦磨损初始阶段的轴承钢表面由于氧化膜的

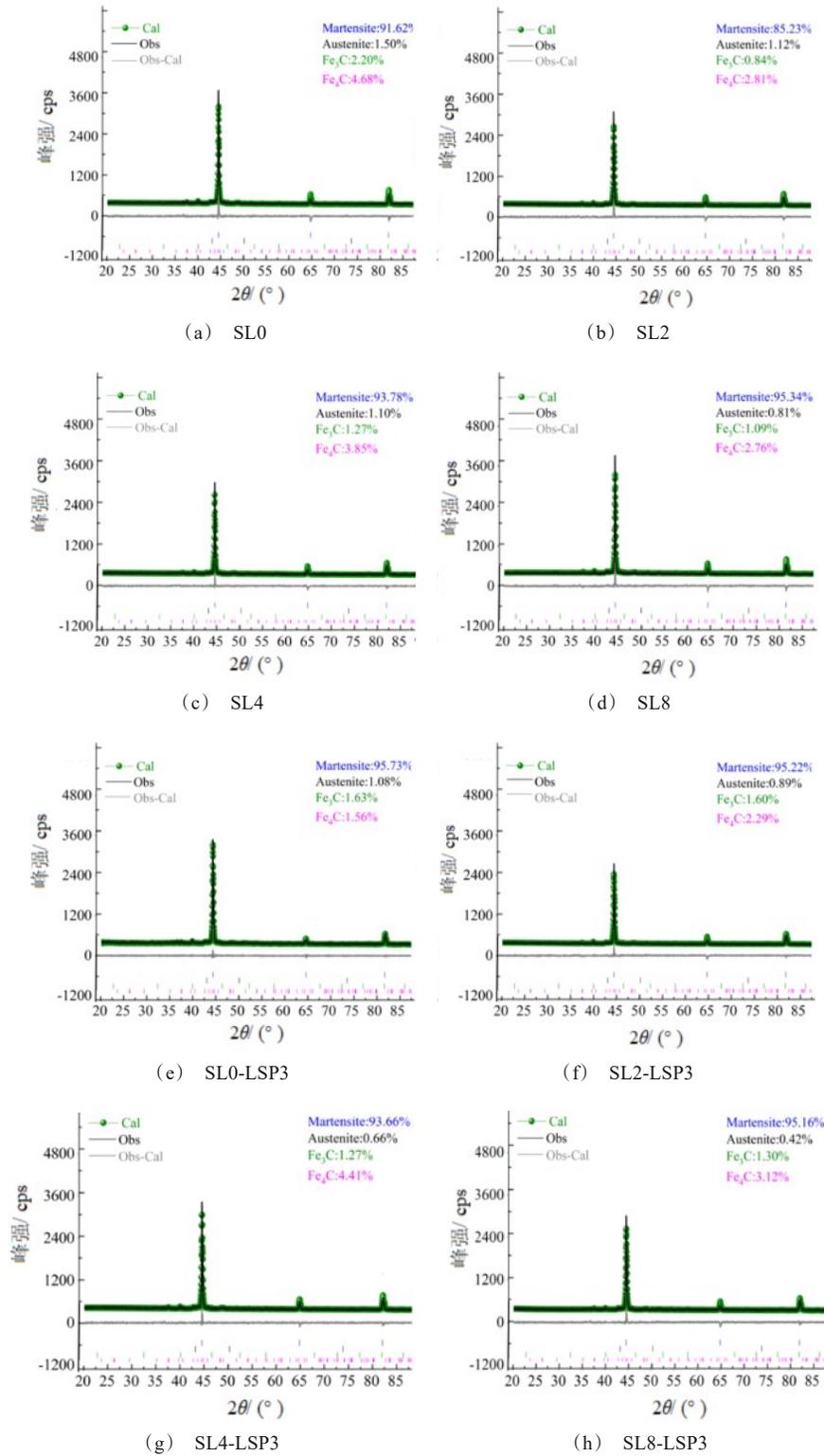


图3 深冷处理前后轴承钢的XRD图谱定量精修图

Fig. 3 Quantitative refined diagrams of XRD patterns of bearing steels before and after cryogenic treatment

表2 深冷处理前后轴承钢的马氏体/残余奥氏体含量和显微硬度

Tab.2 Martensite/retained austenite content and micro-hardness of bearing steels before and after cryogenic treatment

轴承钢	马氏体含量/%	奥氏体含量/%	显微硬度/HV
SL0	91.62	1.50	205.5
SL2	95.23	1.12	272.7
SL4	93.78	1.10	224.6
SL8	95.34	1.09	288.4
SL0-LSP3	95.73	1.08	244.5
SL2-LSP3	95.22	0.89	295.7
SL4-LSP3	93.66	0.66	279.4
SL8-LSP3	95.16	0.42	307.4

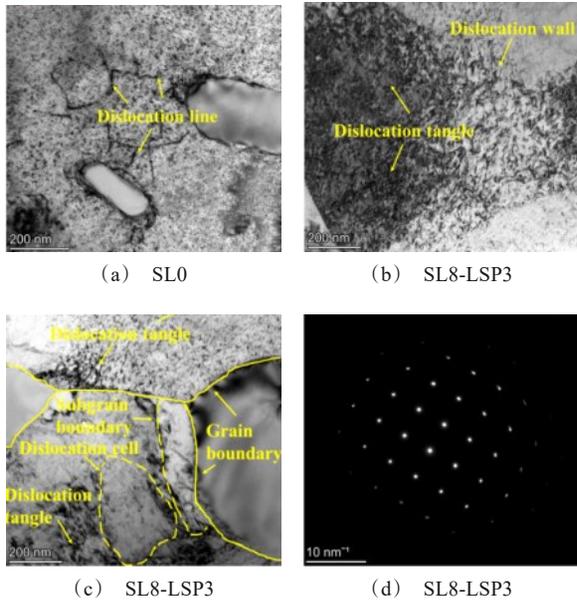


图4 深冷处理前后轴承钢的TEM形貌

Fig. 4 TEM morphology of bearing steel before and after cryogenic treatment

存在而避免了基体与摩擦副直接接触^[18],摩擦系数在初始阶段摩擦阶段较小,而随着摩擦磨损试验进行,轴承钢表面氧化膜破裂,基体与摩擦副直接接触并产生磨损,短时间内摩擦系数会显著增加,而继续延长摩擦磨损时间,基体与摩擦副的接触面积增加,摩擦磨损逐渐趋于稳定。SL0、SL8、SLP3和SL8+SLP3轴承钢的平均摩擦系数分别为0.830、0.803、0.795和0.765,可见,深冷处理和激光冲击强化处理都有助于降低轴承钢的平均摩擦系数,且深冷+激

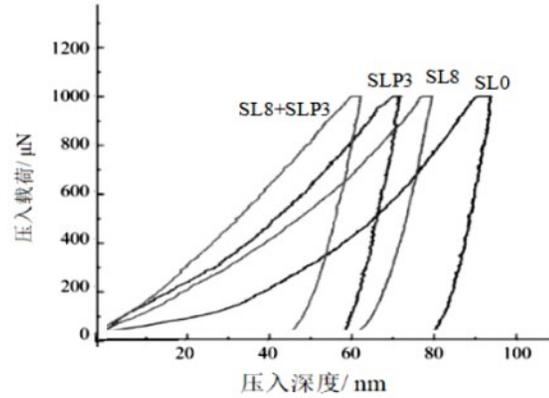


图5 轴承钢的纳米压痕加载曲线

Fig. 5 Nanoindentation loading curves of bearing steels

表3 轴承钢的力学性能和耐磨性能

Tab.3 Mechanical properties and wear resistance of bearing steels

轴承钢	纳米硬度/GPa	弹性模量/GPa	磨损失重/mg
SL0	3.20	167.48	203
SL8	3.60	188.40	171
SLP3	4.99	205.64	154
SL8-LSP3	6.66	222.06	97

光冲击复合强化试样的平均摩擦系数最小,稳定摩擦磨损阶段的摩擦系数波动性小,这主要与此时轴承钢中碳化物分布均匀、平均晶粒尺寸减小、硬度较大等有关^[19]。低的摩擦系数和高的硬度会导致低的磨损失重(见表3)。

图7为轴承钢的表面摩擦磨损形貌,表3中列出了磨损失重测试结果。SL0、SL8、SLP3和SL8+SLP3轴承钢的磨损失重分别为203 mg、171 mg、154 mg和97 mg,可见,深冷处理和激光冲击强化处理都有助于降低轴承钢的磨损失重,且深冷+激光冲击复合强化试样的磨损失重最小,耐磨性能最好。从图7(a)的表面摩擦磨损形貌中可见,未处理的SL0试样表面磨损较为严重,可见宽且深的犁沟、大块片状剥落、凹坑和粘结碎片存在,磨损机理为粘着磨损+磨粒磨损;对于深冷处理(SL8)和激光冲击强化处理(SLP3)试样,表面可见较浅的犁沟、尺寸减小的粘结碎片和显微凹坑,未见大面积剥落,磨损程度相较于SL0试样明显较轻;经过深冷-激光冲击复合强化处理后,SL8+SLP3试样的磨损表面较为平整,局部可见粘结碎片和浅且窄的犁沟,耐磨性能

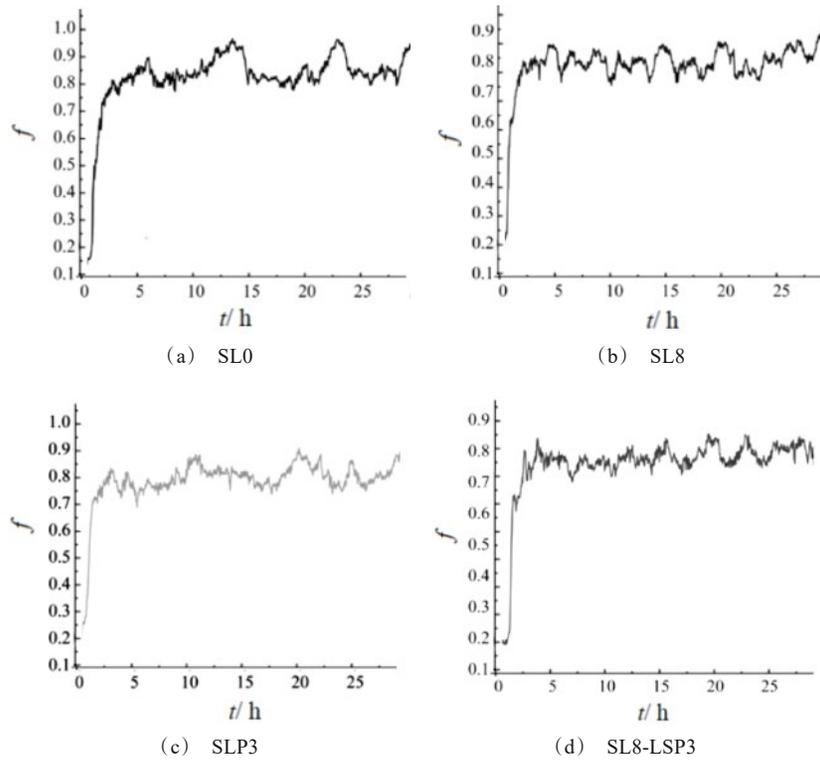


图 6 轴承钢的摩擦系数曲线

Fig. 6 Friction coefficient curves of bearing steels

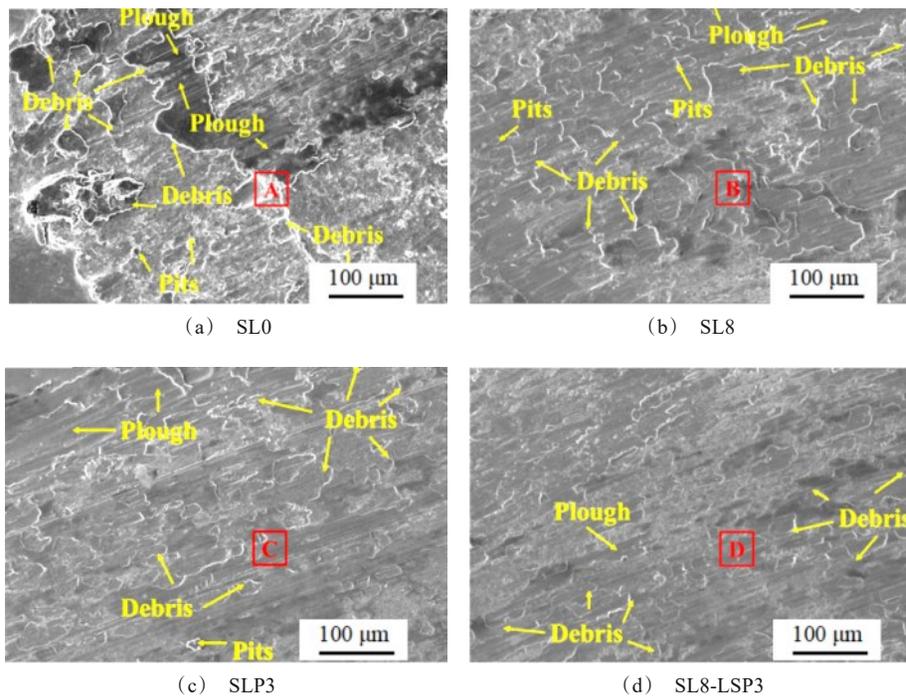


图 7 轴承钢的表面摩擦磨损形貌

Fig. 7 Surface friction and wear morphology of bearing steels

相对较好,这与摩擦系数曲线和磨损失重结果相吻合。此外,分别对4种试样的磨损表面进行微区能谱分析,区域A、区域B、区域C和区域D的O元素含量分别为28.79 wt.%、27.29 wt.%、26.20 wt.%和2.71 wt.%,可见,轴承钢的磨损机理除粘着磨损、磨粒磨损外,还包含氧化磨损,且深冷+激光冲击复合强化轴承钢由于碳化物尺寸细小且均匀,晶粒较为细小和硬度较高等原因导致磨损程度较低^[20],耐磨性较好。

3 结论

(1)未处理和激光冲击强化后轴承钢试样都主要由马氏体和奥氏体组成;未处理、SLP1、SLP2、SLP3和SLP4轴承钢的平均晶粒尺寸分别为44.12 nm、37.85 nm、36.71 nm、36.25 nm和37.68 nm;随着激光冲击强化次数增加,轴承钢的平均晶粒尺寸先增加后减小,在激光冲击强化3次时取得最小值。

(2)SL0轴承钢的残余奥氏体为1.50%,深冷处理后轴承钢中残余奥氏体含量减少,且深冷处理时间越长残余奥氏体含量越低,SL8试样的残余奥氏体含量为0.81%;SL0-LSP3、SL2-LSP3、SL0-LSP4和SL8-LSP3轴承钢中残余奥氏体含量分别为1.08%、0.89%、0.66%和0.42%;对轴承钢进行深冷处理以及进一步激光冲击强化处理都有助于降低轴承钢中残余奥氏体含量。

(3)SL0、SL8、SLP3和SL8+SLP3轴承钢的纳米硬度分别为3.20 GPa、3.60、4.99和6.66 GPa,弹性模量分别为167.48、188.40、205.64和222.06 GPa,磨损失重分别为203、171、154和97 mg;深冷处理和激光冲击强化处理都有助于提高轴承钢的纳米硬度、弹性模量,降低磨损失重,且深冷+激光冲击复合强化试样(SL8+SLP3)的纳米硬度和弹性模量最大、磨损失重最小。

参考文献

[1] 朱祖昌,杨弋涛,朱闻炜.第一、二、三代轴承钢及其热处理技术的研究进展(十八)[J]. 热处理技术与装备, 2022, 43(2): 63-70.
 [2] 郑凯,曹文全,俞峰,等.高温不锈钢渗碳轴承钢的研发现状与进展[J]. 钢铁, 2022, 57(7): 125-136.
 [3] 高春月,郭武明,王海新,等.8Cr4Mo4V钢表面减摩耐蚀涂层研究[J]. 材料保护, 2021, 54(9): 20-24.

[4] 周丽娜,杨晓峰,刘明,等.8Cr4Mo4V高温轴承钢热处理及表面改性技术的研究进展[J]. 轴承, 2021, 8: 1-10.
 [5] 张群莉,黄华,唐泽浩,等.42CrMo钢激光-感应复合淬火滚动磨损与疲劳损伤行为研究[J]. 中国激光, 2022, 49(8): 250-261.
 [6] 尹嵩,陆海峰,潘晨阳,等.面向轴件应用的激光熔覆修复强化试验研究[J]. 材料保护, 2021, 54(2): 86-92.
 [7] Anusha E, Kumar A, Shariff S M. Diode laser surface treatment of bearing steel for improved sliding wear performance[J]. Optik, 2020, 206: 163357-163364.
 [8] Kam M, Saruhan H. Vibration damping capacity of deep cryogenic treated AISI 4140 steel shaft supported by rolling element bearings[J]. Materials Testing, 2021, 63(8): 742-747.
 [9] Cao Y P, Wang Z M, Shi W D, et al. Formation mechanism and weights analysis of residual stress holes in E690 high-strength steel by laser shock peening[J]. Coatings, 2022, 12(2): 285-285.
 [10] Chen X, Song M, Liu T, et al. Effect of cryogenic-tempering treatment on the performance of high Ni gear steel [J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2020, 892: 12015-12023.
 [11] Li S, Xiao M, Ye G, et al. Effects of deep cryogenic treatment on microstructural evolution and alloy phases precipitation of a new low carbon martensitic stainless bearing steel during aging[J]. Materials Science and Engineering A, 2018, 732(8): 167-177.
 [12] Song M K, Kim J D, Lee M Y. Improvement of surface characteristics of mold steel using laser cladding and shock peening[J]. Modern Physics Letters B, 2022, 36 (18): 2037-2046.
 [13] Li D H, He W C, Zhang X, et al. Effects of traditional heat treatment and a novel deep cryogenic treatment on microstructure and mechanical properties of low-carbon high-alloy martensitic bearing steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2021, 28(3): 370-382.
 [14] Yang Y, Lian X, Zhou K, et al. Effects of laser shock peening on microstructures and properties of 2195 Al-Li alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 781: 330-336.
 [15] 易超,黄巍,靳广虎,等.Ni-PTFE复合镀层的制备及其摩擦学性能研究[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(7): 1-7.
 [16] 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.
 [17] Zhou G, Deng S, Wei W, et al. Effect of multiple deep

- cryo-treating and tempering on microstructure and property evolution of high carbon bearing steel[J]. *Materials Research Express*, 2020, 7(6):66529-66538.
- [18] Satish K, Mohan N, Keshaorao K N, et al. Influence of deep cryogenic treatment on dry sliding wear behaviour of AISI D3 die steel[J]. *Materials Research Express*, 2018, 11(5): 116525-116534.
- [19] Li C S, Li B Z, Jin X, et al. Microstructure and mechanical properties in core of a carburizing 20CrNi2MoV bearing steel subjected to cryogenic treatment[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2021, 28(3): 360-369.
- [20] 孔丹, 罗志强, 金胜然. 铜合金的表面化学镀层制备与摩擦学性能研究[J]. *电镀与精饰*, 2022, 44(8): 23-30.