排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2022 年 1 月 Jan. 2022 | 第 40 卷 第 1 期 Vol.40 No.1

激光冲击强化 316 不锈钢的滚动接触疲劳性能


牛建新

牛建新[1]，戴峰泽[2*]，裴智鹏[2]，郑越洋[2]，高惠明[3]
（1. 托伦斯精密机械（上海）有限公司，上海 200120；2. 江苏大学机械工程学院，江苏 镇江 212013；3. 国家模具质量监督检验中心，江苏 昆山 215300）

摘要：对 316 不锈钢进行激光冲击处理，研究 LSP 后试样表面的力学性能，包括显微硬度、表面粗糙度和残余应力，同时进行滚动接触疲劳试验，比较了 LSP 前后试样接触疲劳的 $S-N$ 曲线.结果表明：LSP 能显著提高表面显微硬度，当激光单脉冲能量为 6 J 时，显微硬度增大 20%；激光冲击影响层深度随着激光能量的增大而增大，激光能量为 6 J 时影响层深度约为 0.9 mm；随着激光能量的增大，表面粗糙度呈上升趋势，从 0.41 μm 增大到 1.91 μm；LSP 在 316 不锈钢表面产生高达 280 MPa 的残余压应力幅值.滚动接触疲劳试验表明：LSP 能有效改善 316 不锈钢的接触疲劳性能，未冲击的试样在接触应力为 848 MPa 和 708 MPa 时，疲劳寿命约为 4.72×10^4 次和 1.08×10^5 次，激光冲击后，在相同应力条件下试样的疲劳寿命分别提高了 2.1%和 15.0%.

关键词：316 不锈钢；激光冲击；滚动接触疲劳；疲劳试验
中图分类号：TH117.1　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2022)01-0097-05
Doi：10.3969/j.issn.1674-8530.19.0306

牛建新，戴峰泽，裴智鹏，等.激光冲击强化 316 不锈钢的滚动接触疲劳性能[J].排灌机械工程学报，2022，40(1)：97-101.

NIU Jianxin，DAI Fengze，PEI Zhipeng，et al.Rolling contact fatigue performance of 316 stainless steel treated by laser shock processing[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2022，40(1)：97-101.(in Chinese)

Rolling contact fatigue performance of 316 stainless steel treated by laser shock processing

NIU Jianxin[1]，*DAI Fengze*[2*]，*PEI Zhipeng*[2]，*ZHENG Yueyang*[2]，*GAO Huiming*[3]
（1. Torrance Precision Machinery (Shanghai) Co. Ltd., Shanghai 200120, China; 2. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 3. National Die Quality Supervision and Inspection Center, Kunshan, Jiangsu 215300, China）

Abstract: The 316 stainless steel was subjected to laser shock processing (LSP), and the mechanical properties including the microhardness, surface roughness and residual stress were investigated. The rolling contact fatigue test was also conducted to compare the $S-N$ curve with and without LSP. The results show that LSP can significantly improve the surface microhardness. When the single laser pulse energy is 6 J, the microhardness increases by 20%. The depth of the affected layer increases with the increase of laser energy. When the laser energy is 6 J, the depth of the affected layer is about 0.9 mm. With the increases of laser energy, the surface roughness also shows an upward trend, rising from 0.41 μm to 1.91 μm. In addition, LSP generates a residual compressive stress amplitude of 280 MPa on the surface of 316 stainless steel. The rolling contact fatigue experiment shows that LSP can effectively improve the contact fatigue performance of 316 stainless steel. The fatigue life of the untreated

收稿日期：2019-11-19；**修回日期**：2019-12-16；**网络出版时间**：2021-12-20
网络出版地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20211217.0850.006.html
基金项目：国家自然科学基金面上资助项目(51675237)
第一作者简介：牛建新(1976—)，男，江苏太仓人，工程师(steve_niu@tlstech.com.cn)，主要从事机械制造工艺研究.
通信作者简介：戴峰泽(1976—)，男，江苏宜兴人，副教授，博士(dfz@ujs.edu.cn)，主要从事激光冲击表面改性研究.

specimen is about 4.72×10^4 and 1.08×10^5 times when the contact stress is 848 MPa and 708 MPa, respectively. While after LSP, the fatigue life of the specimen is increased by 2.1% and 15.0%, respectively, under the same stress conditions.

Key words: 316 stainless steel; laser shock processing; rolling contact fatigue; fatigue test

在工业生产中,很多机械设备的零件以接触的方式进行作业,例如汽车、机床等机械以及交通运输业中用途广泛的齿轮、铁轨和滚动轴承等.这类零件的表面长期受交变压应力作用,发生疲劳破坏,这种疲劳称为接触疲劳[1-3].与普通轴承相比,工作过程中不锈钢轴承工作稳定,噪声小,耐腐蚀[4-6].目前不锈钢轴承的材料主要以 440 不锈钢、316 不锈钢和 304 不锈钢为主[7].

残余压应力对改善接触疲劳寿命有重要作用.REGO 等[8]的研究表明残余应力水平和接触疲劳寿命具有较强的相关性,残余拉应力会加剧疲劳裂纹的扩展,因此降低残余拉应力能够提高接触疲劳性能;文献[9-11]的研究表明喷丸可以在试样表层产生残余压应力,能降低接触运动中的残余拉应力值,提高疲劳性能.激光冲击强化(laser shock peening,LSP)技术是一种新型的表面改性技术,与喷丸类似,能在金属表面引入残余压应力,促使晶粒细化,提高金属材料表面的机械性能[12-13]、疲劳性能[14-15]和抗腐蚀性能[16].与机械喷丸相比,激光冲击能强化诱导幅值更大、深度更深的残余压应力层[17],且具有加工参数方便控制、灵活性较高等优点,已成为一种极具应用前景的表面强化方式.LUONG 等[18]分别对喷丸和激光冲击强化后的 7075-T 7451 铝合金进行了高周疲劳试验,发现在中等应力水平和高应力水平下,激光冲击强化处理后的试样的疲劳表现性能均高于喷丸后的试样,这都显示了激光冲击强化相比传统喷丸的优越性.

316 不锈钢属于奥氏体不锈钢,因添加了 Mo 元素,其耐蚀性和高温强度有较大的提高.文中以 316 不锈钢为研究对象,对其进行 LSP 试验,对冲击后的试样表面进行机械性能测试,并进行滚动接触疲劳试验,分析疲劳破坏原理.

1 激光冲击及试样表征

1.1 激光冲击试验

试验用 316 不锈钢的化学成分主要包括 C,Si,Mn,P,S,Ni,Cr,Mo 等,其相应的质量分数分别为 0.080%,1.000%,2.000%,0.045%,0.030%,10.00%~18.00%,16.00%~18.00%,2.00%~3.00%.根据 YB/T 5345—2006《金属材料滚动接触疲劳试验方法》中规定的标准,进行滚动接触疲劳试验时使用 2 个试样相对滚动,主要研究主试样.本次试验采用线接触,主试样主体部分直径为 54 mm,试验区域圆面直径为 60 mm,试验区域宽度为 5 mm,陪试样外径为 60 mm.

LSP 强化方案设计如图 1 所示,其中图 1a 为整体方案简图,表示主试样主视图,黑色矩形为试验区域的圆弧面,宽度为 5 mm,小写字母“a”“b”表示冲击区域,大写字母“A”表示未冲击区域,数字标志表示冲击区域的激光能量,每个主试样冲击 4 个区域,能量按顺序依次为 3,4,5,6 J;图 1b 为冲击参数;图 1c 为主试样实物图,光斑直径为 3 mm,冲击路径轴向搭接率为 50%,切向搭接率为 25%,冲击路径的移动方式按照图示的“S”型,光斑数量依次为 4 个和 3 个交替,共有 5 列,矩形区域长为 3×4=12 mm,冲击区域为 12 mm×5 mm 的矩形,每块主试样上一共有 4 块这样的区域;图 1d 为主试样激光冲击之后的试样表面.

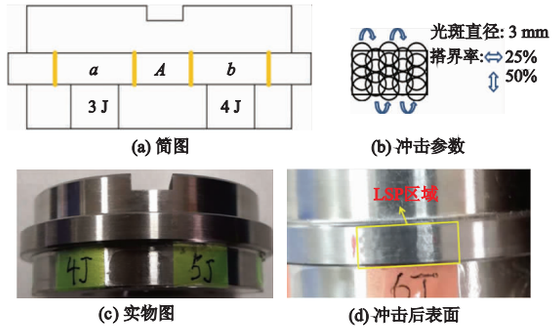


图 1 激光冲击方案设计

Fig.1 Strategy of LSP

1.2 机械性能测试

1.2.1 表面粗糙度测量

沿着试样冲击区域表面的切线方向取一条长约 200 μm 的直线路径,在该路径上大约每 0.5 μm 取 1 点测量其相对于基体的高度.表 1 为计算后不同能量激光冲击处理后试样的表面粗糙度参数,表中 R_z 为微观不平度十点高度,R_a 为轮廓算术平均偏差,R_y 为轮廓最大高度.可以看出,激光冲击能使 316 不锈钢试样表面粗糙增大,且激光能量越大,粗糙度也越大.

表 1　不同激光能量处理的试样表面粗糙度性能参数
Tab.1　Surface roughness parameters of specimen under different energy of LSP

试样	R_z/μm	R_a/μm	R_y/μm
未处理	−0.16	0.41	2.07
LSP−3 J	−0.38	1.08	5.01
LSP−4 J	−0.52	1.36	6.86
LSP−5 J	−0.92	1.80	8.37
LSP−6 J	−1.13	1.91	8.86

1.2.2　显微硬度测试

图 2 为激光冲击后的试样和基体表面显微硬度 *HV* 的分布，其中横坐标 *P* 表示测量点序号.可以看出，LSP 能够有效提高 316 不锈钢试样表面的显微硬度，显微硬度随激光能量的增大而增大.

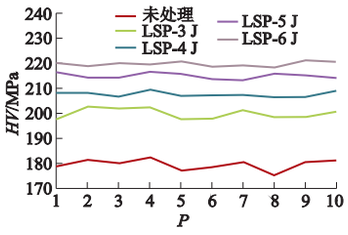


图 2　激光冲击后表面显微硬度
Fig.2　Surface micro-hardness distribution after LSP

图 3 为 316 不锈钢试样沿深度方向的显微硬度分布，其中横坐标 *l* 为沿深度方向距离.可以看出：未受激光冲击的试样显微硬度 *HV* 在深度方向上基本保持一致，约为 179.34 MPa；LSP 试样的显微硬度在深度方向均呈梯度下降，随着深度的增大，显微硬度逐步减小，最终与基体一致.

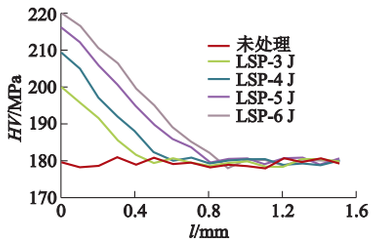


图 3　激光冲击后深度方向显微硬度图
Fig.3　Surface micro-hardness along depth direction diagram after LSP

1.2.3　残余应力测试

在不同处理区域上随机选择 6 个测量点，分别沿切向和轴向测量残余应力 σ，结果如表 2 所示，其中左侧为切向测量值，右侧为轴向测量值.可以看出：激光冲击前和冲击后的试样基体表面残余应力在切向和轴向方向的差值都很小；冲击前的试样基体表面残余应力值为正，表明试样原来表面为残余拉应力，而经过 LSP 后应力值为负，说明 LSP 使试样表面产生残余压应力.

表 2　激光冲击后的残余应力测试
Tab.2　Residual stress after LSP

测量点	σ/MPa									
	未处理		LSP−3 J		LSP−4 J		LSP−5 J		LSP−6 J	
	切向	轴向	切向	轴向	切向	轴向	切向	轴向	切向	轴向
1	111.1	113.3	−221.3	−222.2	−247.2	−246.0	−265.4	−267.3	−283.8	−280.6
2	114.2	108.6	−226.9	−226.7	−243.7	−247.1	−264.1	−261.5	−279.5	−279.0
3	112.7	107.1	−222.2	−224.8	−248.6	−242.9	−266.6	−264.1	−282.9	−279.6
4	113.0	106.6	−223.3	−222.7	−245.3	−242.5	−262.8	−267.6	−281.5	−279.5
5	114.4	107.9	−221.5	−226.9	−244.3	−244.6	−266.0	−261.4	−285.5	−281.6
6	107.2	114.3	−226.7	−220.4	−248.1	−248.8	−263.2	−261.3	−280.8	−283.3
平均值	112.1	109.6	−223.8	−223.9	−246.2	−245.3	−264.7	−264.0	−282.3	−280.6

图 4 为根据表 2 绘制的激光冲击后的平均残余应力曲线，可以看出，激光冲击能量 *e* 为 3~6 J 时，残余压应力与激光能量基本成正比.

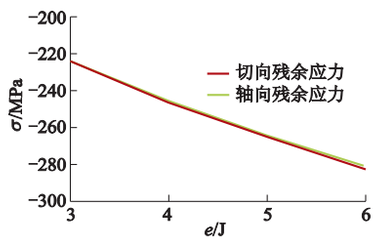


图 4　激光冲击后的平均残余应力
Fig.4　Average residual stress after LSP

2　接触疲劳试验

滚动接触疲劳试验机型号为 MJP−40，试验条件为无润滑，滑差率 5%，径向力加载，主试样转速为 1 500 r/min.对 7 对试样设置不同的疲劳应力值，考虑研究金属材料 *S*−*N* 曲线在高应力时疲劳寿命区别较小，低应力时疲劳寿命区别较大的规律[19-20]，将预设的疲劳应力偏向较低的应力，设置的加载力分别为 1 500，1 300，1 200，1 150，1 100，1 065，1 045 N.待 7 对试样全部达到预设的疲劳状

态后,记录滚动接触疲劳寿命.由于试验设置为加载压力值,绘制 $S-N$ 曲线需要换算为相应应力值,可根据式(1)进行换算,换算结果如表 3 所示,表中 N 为循环次数.

$$S = K\sqrt{\frac{FE}{b\rho}}, \tag{1}$$

其中

$$\rho = \frac{\rho_1\rho_2}{\rho_1 + \rho_2}, \tag{2}$$

式中:S 为所需应力值;K 为换算系数,取 0.418;F 为所施加的力;E 为材料的杨氏模量.

表 3 疲劳寿命测试试验结果
Tab.3 Results of rolling contact fatigue life

试样	F/N	S/MPa	N
1	1 500	848	47 164
2	1 300	790	50 426
3	1 200	759	54 081
4	1 150	742	61 044
5	1 100	727	73 800
6	1 065	715	87 800
7	1 045	708	107 800

为了掌握激光冲击引起的表面粗糙度变化对接触疲劳性能的影响,对另外相同的 14 个区域进行激光冲击,而采取的冲击方案与图 1 中的冲击方案有所不同:将激光能量全部改成 5 J,同时增加 4 个冲击区域,共有 8 个冲击区域,均布在接触面的周围,冲击区域与冲击区域之间相隔较小,几乎将整个接触面包覆.将这 14 个区域分成 2 组,每组 7 个,其中一组 7 个试样进行抛光,然后 2 组试样再次进行滚动接触疲劳试验,试验条件一致,预设加速度传感器使 2 次试验达到相同程度疲劳破坏.表 4 为此次试验的结果,可以看出,有无抛光对接触疲劳寿命几乎没有影响.

表 4 激光冲击后的疲劳寿命测试试验结果
Tab.4 Experimental results of fatigue life testing after LSP

试样	S/MPa	N	
		未抛光	抛光
1	848	48 156	48 139
2	790	52 467	52 483
3	759	57 134	57 129
4	742	66 548	66 558
5	727	84 524	84 531
6	715	102 270	102 249
7	708	126 790	126 799

根据表 4 中的结果,将其与表 3 中的疲劳寿命做差可得表 5,表中 ΔN 为循环次数差,ε 为增量百分率.可以看出,激光冲击强化对 316 不锈钢的滚动接触疲劳寿命所提升.

表 5 激光冲击前后滚动接触疲劳寿命差值
Tab.5 Difference of rolling contact fatigue life before and after LSP

试样	S/MPa	ΔN	ε/%
1	848	992	+2.1
2	790	2 041	+3.9
3	759	3 053	+5.3
4	742	5 504	+8.3
5	727	10 724	+12.7
6	715	14 470	+14.1
7	708	18 990	+15.0

将表 5 中的数据绘制成如图 5 所示的 $S-N$ 曲线,图中蓝色虚线表示同一应力载荷下,激光冲击与未进行激光冲击的试样的接触疲劳寿命的差值,其长度越长,差值越大.

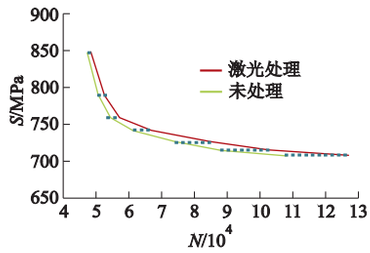


图 5 试样激光冲击前后的 $S-N$ 曲线对比
Fig.5 Comparison of $S-N$ curves between samples before and after LSP

由图 5 可以看出:激光冲击强化能够提高 316 不锈钢的滚动接触疲劳寿命,当接触应力值较小时,接触疲劳寿命增量越多,且增量随着应力值的减小而提高;激光冲击对滚动接触疲劳寿命的百分比随着接触应力值的减小而增大,即激光冲击处理对应力较小时的滚动接触疲劳寿命的增强作用最为显著.

3 结 论

对 316 不锈钢进行了激光冲击强化,测试了激光冲击后材料的机械性能和滚动接触疲劳试验,并对比了有无激光冲击处理下试样接触疲劳试验的 $S-N$ 曲线,得到结论如下:

1) LSP 使 316 不锈钢表面产生塑性变形,粗糙度随激光单脉冲能量的增大而变大.

2) LSP 能够有效提高 316 不锈钢试样表面的显微硬度,单脉冲能量越大,显微硬度的提升量也越大,当激光能量为 6 J 时硬度提升了 20%,激光能

量为 6 J 时可产生最大的 0.9 mm 影响层.

3) LSP 能有效提高 316 不锈钢的接触疲劳寿命，应力值较小时，接触疲劳寿命提升较为显著.

参考文献(References)

[1] NELSON T G, HERDER J L. Developable compliant-aided rolling-contact mechanisms[J]. Mechanism and machine theory, 2018, 126: 225-242.

[2] RYCERZ P, OLVER A, KADIRIC A. Propagation of surface initiated rolling contact fatigue cracks in bearing steel[J]. International journal of fatigue, 2017, 97: 29-38.

[3] GALBATO A T. Methods of testing for rolling contact fatigue of bearing steel, rolling contact fatigue of bearing steels[C]//Proceedings of the American Society for Testing of Materials, 1982: 169-189.

[4] SPANGENBERG U, FRHLING R D, ELSP S, et al. The effect of rolling contact fatigue mitigation measures on wheel wear and rail fatigue[J]. Wear, 2018, 398/399: 56-58.

[5] STEWART S, AHMED R. Rolling contact fatigue of surface coatings: a review[J]. Wear, 2002, 253: 1132-1444.

[6] 王玉金，叶健熠，李红，等. 9Cr18 不锈钢轴承的加工[J]. 轴承，2005(3): 6-10.
WANG Yujin, YE Jianyi, LI Hong, et al. Processing of 9Cr18 stainless steel bearings[J]. Bearing, 2005(3): 6-10.(in Chinese)

[7] 王玉金，叶健熠，谭曙光，等. 不锈钢轴承技术现状及设计与工艺技术研究[C]//中国轴承工业协会技术委员会年会论文集，2003.

[8] REGO R, LOPENHAUS C, GOMES J, et al. Residual stress interaction on gear manufacturing[J]. Journal of materials processing technology, 2017, 252: 249-258.

[9] MAHMOUDI A H, GHASEMI A, FARRAHI G H, et al. A comprehensive experimental and numerical study on redistribution of residual stresses by shot peening[J]. Materials & design, 2016, 90: 478-487.

[10] WANG Cheng, WANG Long, WANG Xiaogui, et al. Numerical study of grain refinement induced by severe shot peening[J]. International journal of mechanical sciences, 2018, 146/147: 280-294.

[11] LI W, LIU B. Experimental investigation on the effect of shot peening on contact fatigue strength for carburized and quenched gears[J]. International journal of fatigue, 2017, 206: 106-118.

[12] 张青来，赵博，张冰昕，等. 多次激光冲击强化对ЭП866 马氏体不锈钢组织及残余应力的影响[J]. 中国激光，2016，43(11)：127-134.
ZHANG Qinglai, ZHAO Bo, ZHANG Bingxin, et al. Effects of multiple laser shock peening on microstructure and residual stress of ЭП866 martensitic stainless steel[J]. China laser, 2016, 43(11): 127-134.(in Chinese)

[13] 罗开玉，周阳，鲁金忠，等. 激光冲击强化对 316L 不锈钢熔覆层微观结构和性能的影响[J]. 中国激光，2017，44(4)：67-74.
LUO Kaiyu, ZHOU Yang, LU Jinzhong, et al. Effect of laser shock strengthening on microstructure and properties of 316L stainless steel cladding layer[J]. China laser, 2017, 44(4): 67-74.(in Chinese)

[14] ZHOU J Z, HUANG S, ZUO L D, et al. Effects of laser peening on residual stresses and fatigue crack growth properties of Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. Optics & lasers in engineering, 2014, 52: 189-194.

[15] ZHANG L, LU J Z, ZHANG Y K, et al. Effects of different shocked paths on fatigue property of 7050-T7451 aluminum alloy during two-sided laser shock processing[J]. Materials and design, 2011, 32(2): 480-486.

[16] 孙昀杰，周建忠，黄舒，等. 激光喷丸医用 Ti6Al4V 合金的耐生物腐蚀性能研究[J]. 中国激光，2017，44(7)：295-301.
SUN Yunjie, ZHOU Jianzhong, HUANG Shu, et al. Study on biocorrosion resistance of laser shot peening medical Ti6Al4V alloy[J]. China laser, 2017, 44(7): 295-301.(in Chinese)

[17] PANT B K, PAVAN A H V, PRAKASH R V, et al. Effect of laser peening and shot peening on fatigue striations during FCGR study of Ti6Al4V[J]. International journal of fatigue, 2016, 93: 38-50.

[18] LUONG H, HILL M R. The effects of laser peening and shot peening on high cycle fatigue in 7050-T7451 aluminum alloy[J]. Materials science & engineering, 2010, 527(3): 699-707.

[19] 熊志鑫. 基于强度稳定综合理论的金属疲劳寿命研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2011.

[20] 任锡庚. 金属材料的循环应力-应变特性和低周疲劳寿命[J]. 机械强度，1988，10(1)：76-82.
REN Xigeng. Cyclic stress and strain characteristics of metallic materials[J]. Mechanical strength, 1988, 10(1): 76-82.(in Chinese)

(责任编辑　陈建华)