

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0078-04

球铁曲轴零件的激光冲击强化

杨建风, 周建忠, 冯爱新

(江苏大学工业中心, 江苏 镇江 212013)

摘要 采用具有五轴联动数控工作台的高功率钕玻璃激光冲击强化系统,对球铁曲轴主轴颈和连杆轴颈的圆角部位实施冲击强化处理。实验中采用的激光波长为 $1.06\ \mu\text{m}$,脉宽为 23 ns,脉冲能量为 25~40 J。用流动的水帘作为激光冲击的约束层材料,硅酸乙酯作能量吸收层。对冲击后试件的残余压应力、硬度和耐磨性等进行了测量分析。结果表明,球铁曲轴经激光冲击强化后,受冲击部位没有明显的宏观变形,获得了较高的表面硬度和残余压应力,耐磨性比未冲击强化处理提高 1.4 倍,有效地提高和改善了曲轴的使用寿命。

关键词 激光技术; 激光冲击强化; 球墨铸铁; 曲轴

中图分类号 TG156.99; TN249 **文献标识码** A

Laser Shock Processing for a Crankshaft of Nodular Iron

YANG Jian-feng, ZHOU Jian-zhong, FENG Ai-xin

(Center of Industry, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract The high power density, Nd:Glass laser shocking system with five-axes NC worktable was used to shock the fillet of main and rod surface of crankshafts. In the experiment, the parameters of laser shock processing are as follow: laser wavelength was $1.06\ \mu\text{m}$, pulse duration was 23 ns and output power ranged from 25~40 J. Flowing water and the ethyl silicate materials was used as confinement layer and absorbing medium respectively. Residual stress, hardness and wearability of the laser shocked surface were investigated as functions of laser processing parameters. The results show that the shocked zone has no obvious macro deformation, but the hardness and compressive stress of the laser processed surface was significantly enhanced, the wearability was increased about 1.4 times compared with those without LSP, which is favorable for the fatigue properties of crankshafts.

Key words laser technique; laser shock processing; nodular iron; crankshaft

1 引 言

激光冲击强化技术(LSP)是利用高功率密度(GW/cm^2),短脉冲(ns)激光对金属材料进行冲击,在金属材料或零件的表层形成数百兆帕的残余压应力,从而改善零件性能的一项技术。具有高效、灵活、非接触式等特点,可以快速且高效地对金属零部件进行表面强化处理^[1~4]。

目前,激光冲击强化较多用于航空、航天、汽车、能源、医药等领域。球铁曲轴是发动机的一个关键零件,长期以来发动机制造业为了提高球铁曲轴的耐磨、耐疲劳等性能,广泛采用正火、中频淬火、等温

淬火、气体软氮化以及附加圆角滚压等多种热处理工艺。这些传统的表面强化工艺对提高曲轴的疲劳寿命起到了一定的作用,但也存在曲轴变形大、工艺稳定性差等缺陷,且在某些应力集中区,上述工艺无法有效处理。本文将激光冲击强化技术用于曲轴主轴颈和连杆轴颈的圆角部位处理,具有实际的工程应用价值^[4,5]。

2 实验设计

2.1 激光冲击强化系统

采用江苏大学激光技术研究所的高重复率钕玻

基金项目: 国家自然科学基金(50675090,50475167)资助课题。

作者简介: 杨建风(1969—),女,江苏高淳人,硕士研究生,主要从事激光冲击应用方面的研究。

E-mail: xiajr@ujs.edu.cn

导师简介: 周建忠(1964—),男,江苏无锡人,教授、博士生导师,主要从事激光加工机理及其应用方面的研究。

E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

璃(Nd:Glass)激光冲击强化系统,进行冲击强化实验,系统的主要技术性能指标为:激光脉冲能量: ≥ 35 J;激光脉冲宽度: ≤ 25 ns;激光脉冲峰值功率: $\geq 1.2 \times 10^9$ W;激光脉冲能量输出不稳定性: $\leq \pm 10\%$;放大自发辐射(ASE)能量: ≤ 1 J;工作重复频率: ≤ 0.5 Hz。

为了实现复杂形状工件的激光冲击处理,必须有一个能实现多轴运动的工作平台,目前普通机床的五坐标工作台一般都是龙门式或立柱式的,不能满足激光冲击运动的特殊要求,为此自行研制了五轴联动工作台,工作台有五个自由度,可沿 X, Y, Z 方向移动以及绕 Y, Z 方向转动。

为了实现激光参数和冲击轨迹的有效控制,必须将激光器、五坐标工作台、反馈检测与控制等进行系统集成,编制相应的控制软件,形成一套完整的激光冲击处理系统。集成系统可以在界面中编辑冲击程序,也可以用外部计算机编辑,通过网络传输加载处理程序。

2.2 实验试样

曲轴材料为 QT700-2 球墨铸铁,其化学成分(质量分数)为 C:3.40%~3.90%, Si:2.20%~3.0%, Mn:0.50%~0.80%, P: $< 0.10\%$, S: $< 0.03\%$, Mg:0.03%~0.06%, Re:0.02%~0.05%, Cu, Mo, Sb: $< 0.50\%$ 。其机械性能: $\sigma_{0.2} = 400$ MPa, $\sigma_b = 700$ MPa, $\delta = 2\%$, $HB = 220 \sim 320$ 。耐磨性试样采用标准样件 8 mm×19.5 mm×10 mm。

2.3 冲击强化工艺参数

曲轴圆角处激光冲击强化的实验参数为:激光波长 1.06 μm ,脉宽 23 ns,光斑尺寸为 $\phi 7$ mm,涂层为硅酸已酯,厚度约为 0.025 mm,用水作为激光冲击的约束层材料,脉冲激光能量为 25~40 J。激光冲击形成的冲击波峰压大于 QT700-2 的动态屈服强度 1.055 GPa,以保证对被冲击材料产生一定的塑性变形。

2.4 曲轴圆角冲击强化

曲轴主轴颈和连杆轴颈进行圆角激光冲击强化是为了使圆角处形成残余压应力,提高疲劳强度。

在曲轴圆角处需接受激光冲击的部位涂上硅酸已酯(能量吸收涂层),由于该部位表面形状较为复杂,是非规则的平面,无法使用玻璃作为约束层,因此使用流水作约束层。实验中用夹具将曲轴固定在工作台上,喷嘴将产生一定压力的水柱喷射在受冲击部位的上方,使受冲击部位表面形成一定厚度的水帘,以其作为约束层,然后实施冲击。

3 实验结果与分析

3.1 残余应力

激光冲击后曲轴圆角处的残余应力测量选择 7 个点,每隔 2 mm 的弧长取一个点,如图 1。

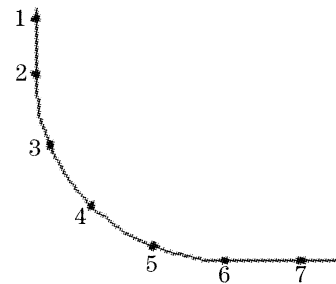


图 1 残余应力测试位置示意图

Fig. 1 Diagram sketch of residual stress measure

试样表面残余应力测试,采用邯郸爱斯特研究所研制的新型 X-350A X 射线应力测定仪,测量结果分析见图 2。分析数据结论如下:

1) 图 2(a)中,激光冲击前未氮化曲轴圆角处的残余应力分布比较杂乱,残余应力的值比较小,残余压应力和残余拉应力的分布相交替。冲击后形成的压应力数值都比冲击前的压应力数值大,如图 2(b)。说明激光冲击没有副作用,激光冲击后残余压应力分布较为均匀,从 $(-155.3 \pm 21.5) \sim (-342.4 \pm 10.1)$,数据分散小^[4,6];

2) 曲轴经氮化处理后,单次激光冲击前,测量 7 点,残余应力平均值为 -241.96 [图 2(c)],单次冲击后残余应力为 $(-223.1 \pm 76.9) \sim (-489.6 \pm 45.4)$,平均值为 -396.1 [图 2(d)],提高幅度为 63.7%;

3) 曲轴经氮化处理后,进行两次激光冲击后,残余压应力分布较为均匀,为 $(-291.9 \pm 32.8) \sim (-537.3 \pm 66.3)$,平均值为 -423.61 [图 2(f)],与氮化后两次冲击处理前相比[图 2(e)],提高幅度为 79%。

结果表明,氮化后进行激光冲击强化,效果更明显,如进行两次冲击强化,残余压应力明显提高。

3.2 显微硬度

激光冲击强化 QT700-2 的表面显微硬度分布如图 3 所示。采用 HVS-1000 型数字显微硬度计测量激光冲击强化区表面,保压时间为 15 s,负荷为 100 g,每隔 0.5 mm 测量一次。基体的硬度平均值为 238 HV,冲击区的显微硬度变化范围为 294~420 HV,平均值为 374 HV,提高了 57.1%左右。从以上结果看出,在激光冲击光斑区内,硬度分布不均匀,这是由于激光能量分布不均匀等因素所造成的^[6]。但在总体上,冲击区中心部位的硬度高于冲击区边缘,硬度的提高意味着位错密度的增加。

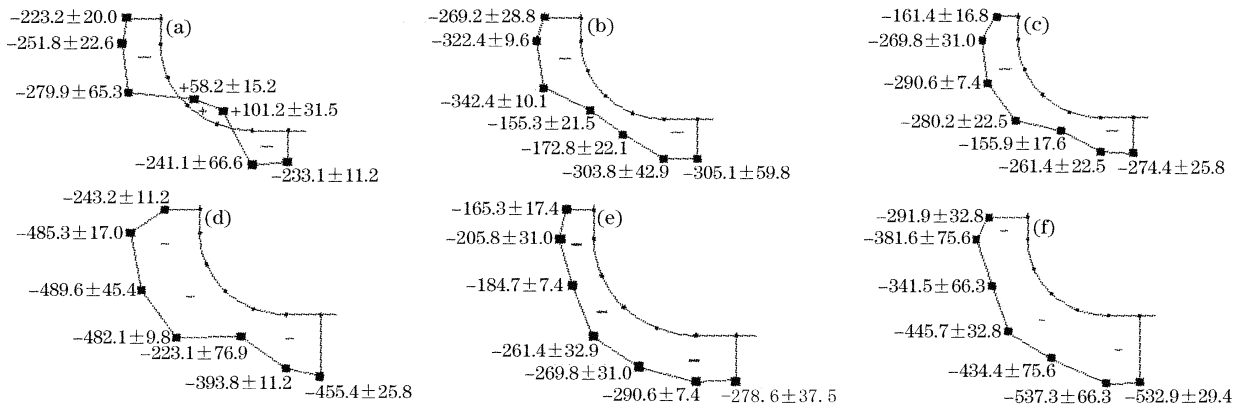


图2 曲轴圆角处激光冲击处理前后残余应力分布,未氮化激光冲击前(a)和后(b),氮化后单次冲击前(c)后(d)和氮化两次冲击前(e)后(f)

Fig. 2 Distributing of stress of non-shocking and after laser shock processing, before (a) and after (b) LSP of non-nitriding sample, before (c) and after (d) one shot of nitriding sample, before (e) and after (f) two shots of nitriding sample

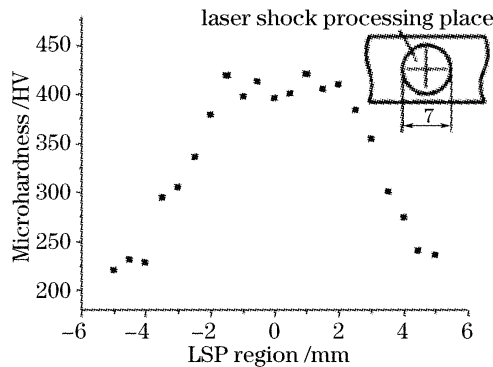


图3 冲击强化区域表面的显微硬度

Fig. 3 Surface microhardness of laser shocked regions

为检验激光冲击强化对材料内部的影响,对冲击区断面进行了显微硬度的检验,结果如图4所示。从图4可看出,从试件表面到心部,显微硬度逐渐呈下降趋势,离表面大约 $20\sim 30\ \mu\text{m}$ 处硬度值最大,约为424 HV,比心部的硬度高77.7%左右,在离试件表面大约 $120\ \mu\text{m}$ 处硬度变化趋向于平稳。

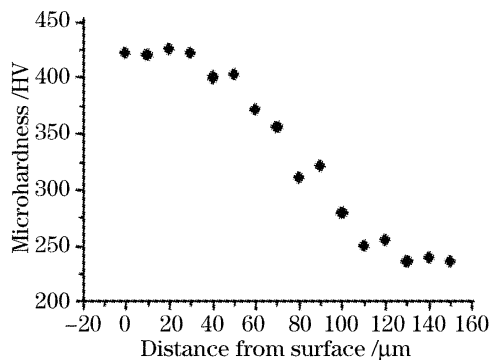


图4 激光冲击区深度方向的硬度分布

Fig. 4 Distribution of microhardness in depth

分析表明激光冲击强化后球铁表面的平均硬度随冲击次数的增加有较明显的增加,在光斑直径和冲击次数不变的条件下,随着激光能量的增加,在一定范围内可获得较高的硬度。

3.3 耐磨性能

滑动磨损实验在MM-200磨损试验机上进行,该机最大工作载荷2 kN,滑动率为100%。对激光冲击处理前后球铁QT700-2试样进行耐磨性比较实验。对磨件为GCr15, HRC58, 试样磨面尺寸 $8\ \text{mm}\times 19.5\ \text{mm}$,厚度为10 mm,冲击强化处理前后试样各准备5个,转速为200 r/min,载荷为20.1 N,实验时间为2 h,采用精度为0.01 mg的分析天平精确测量磨损量。

表1为实验结果,其中磨损量为5个试样的算术平均值,实验数据的分散度极小,各组数据间没有交叉,数据可信度高。由表1知,QT700-2经激光冲击处理后耐磨性比未冲击强化处理提高1.4倍。

表1 QT700-2经激光冲击前后磨损量的比较

Table 1 Comparison of abrasion of the strengthened zone of nodular iron QT700-2 obtained LSP

Sample	Wear mass loss /mg	Time /h
Before laser shock processing	2.53	2
After laser shock processing	1.07	2

激光冲击强化后表面硬度明显高于未冲击强化处理表面,这是冲击后表面的耐磨性高于未冲击表面的原因之一。另外,冲击后在硬化区产生了高密度的位错、孪晶、组织晶粒更加细化,这些对提高球铁QT700-2耐磨性能发挥了重要作用。

4 结 论

1) 激光冲击改变了曲轴曲柄与连杆轴颈圆角处的残余应力分布杂乱的情况,冲击后形成的压应力数值都比冲击前的压应力数值大,说明激光冲击没有副作用^[7]。氮化后进行激光冲击处理,效果更明显。进行两次冲击强化,残余压应力明显提高。

2) 激光冲击后 QT700-2 的表面显微硬度提高了约 57.1% 左右, 在光斑作用区内, 中心区的硬度较高。硬化层深度约为 100 μm , 在离表面大约 20~30 μm 处硬度值最大, 比心部的硬度高 77.7% 左右。

3) 在本实验条件下, QT700-2 经激光冲击处理后耐磨性比未冲击强化处理提高了 1.4 倍。

激光冲击强化适合处理有应力集中的局部重点疲劳区域, 如各种紧固孔、槽、圆角与焊缝, 能有效提高这些部件的疲劳寿命和抗应力腐蚀能力。

参 考 文 献

- 1 Tang Yaxin, Zhang Yongkang, Zhang Hong *et al.*. Effect of laser shock processing (LSP) on the fatigue resistance of an aluminum alloy [J]. *J. Engineering Materials and Technology*, 2000, **122**(1): 104~107
- 2 P. Payre, X. Scherpereel, L. Berthe *et al.*. Current trends in laser shock processing [J]. *Surface Engineering*, 1998, **14**(5): 377~380
- 3 Hua Yinqun, Chen Ruifang, Lu Miao *et al.*. Study on the experiment of 40Cr steel by laser shock processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4): 495~498
- 4 Zhou Jianzhong, Hua Yinqun, Yang Jichang *et al.*. Study on the laser hardening technology for a crankshaft of nodular iron [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2001, **32**(3): 109~112
- 5 Hua Yinqun, Yang Jichang, Zhang Yongkang *et al.*. Experimental study on improving wearability of ductile iron by laser compound processing [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2004, **35**(1): 147~149
- 6 Zhang Yongkang, Ge Tao, Lu Jinzhong *et al.*. Experimental study of laser shock processing on critical section of flying hammer [J]. *J. Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2005, **26**(5): 369~371
- 7 Wu Bian, Wang Shengbo, Guo Dahao *et al.*. Research of material modification induced by laser shock processing on aluminum alloy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1352~1356