

文章编号: 0258-7025(2004)04-0495-04

激光冲击强化处理 40Cr 钢的实验研究

花银群, 陈瑞芳, 路 淼, 丁建宁

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 利用 Nd:YAG 激光器,对 40Cr 钢进行了激光冲击强化处理。激光冲击强化参数:激光波长 1.06 μm ,脉冲时间为 23 ns,功率为 16~20 J,功率密度为 2.0 GW/cm^2 左右,光斑直径为 $\phi 7$ mm。选用 K9 玻璃为约束层,外形尺寸为 $\phi 19$ mm \times 4 mm;86-1 墨漆为吸光涂层,厚度为 0.025 mm。利用 HVS-1000 显微硬度计和 X-350 残余应力测试仪,对 40Cr 钢激光冲击强化区的显微硬度和残余应力进行了测试,结果表明,40Cr 钢经激光冲击强化后,强化区表面硬度提高了 30%,冲击强化区中心最大残余应力达 -450 MPa。此外,利用 H-800 透射电镜对激光冲击强化区的显微组织进行了观察和分析,在强化区显微组织内发现了相变马氏体、初生马氏体和高位错密度。

关键词 激光技术;激光强化处理;激光冲击;显微硬度;残余应力;马氏体;位错密度

中图分类号 TN 249 文献标识码 A

Study on the Experiment of 40Cr Steel by Laser Shock Processing

HUA Yin-qun, CHEN Rui-fang, LU Miao, DING Jian-ning

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract 40Cr steel has been shocked processing by Nd:YAG laser. In the experiments, the parameters of laser shock processing are as follow: the wavelength 1.06 μm , the pulse duration 23 ns, the output power 16~20 J, the power density about 2.0 GW/cm^2 . The laser is focused on a spot of $\phi 7$ mm. K9 optical glass is used as confinement layer. The sample was coated by black paint 86-1 (the thickness is about 0.025 mm). The microhardness and the residual stress were measured through HVS-1000 digitalized microhardness tester and the X-350 digitalized tester. The results indicate that the microhardness is increased by about 30%, the maximal surface residual stress reached -450 MPa in the strengthened zone center. Further, the microstructure of the strengthened zone of 40Cr steel by laser shock processing was observed and analyzed through H-800 transmission electron microscopy, it was discovered that there are the transformed martensite, the initial transformed martensite and the high dislocation density in the strengthened zone.

Key words laser technique; laser strengthened treatments; laser shocked processing; microhardness; residual stress; martensite; dislocation density

1 引 言

激光冲击处理技术(laser shock processing, LSP)是利用高功率密度(GW/cm^2 级)短脉冲(ns 级)激光对金属材料进行辐射,使金属材料表层发生塑性变形,在金属材料或零件的表层形成数百兆帕的残余压应力,从而改善金属性能的一项新技术。

利用该表面强化新技术可以有效提高金属材料的屈服强度、硬度、疲劳强度、疲劳裂纹扩展抗力及微动磨损疲劳寿命^[1~4]。它具有高效、灵活、非热、非接触式等特点,可以快速和高效地对金属零部件需要进行表面强化而难以用其他技术进行强化处理的局部区域进行表面强化。

国内外对激光冲击强化技术已进行了大量研

收稿日期:2003-04-18;收到修改稿日期:2003-06-20

基金项目:江苏省高校自然科学基金(编号:02KJB460004)资助项目。

作者简介:花银群(1963—),男,江苏东台人,江苏大学机械工程学院副教授,博士,主要从事激光表面加工方面的研究。

E-mail:huayq@ujs.edu.cn

究^[1-6],但主要集中在航空用铝合金材料领域,而对于航空工业用量较大的优质合金钢的实验研究则较少。40Cr 钢在航空工业上常用于制造在高速及小冲击负荷下工作的零件,如齿轮、轴套、凸轮等,而这些零件都需要有较高的抗疲劳和抗磨损性能,因此开展对其进行激光冲击强化处理的实验研究具有十分重要的意义。

2 实验方法

2.1 试样材料

试样材料为 40Cr 钢,它的化学成分及其机械性能如表 1 和表 2 所示,试样尺寸为 30 mm×20 mm×10 mm。试样表面用 86-1 型黑色涂料作为激光淬火和激光冲击吸光层,用 K9 光学玻璃作为激光冲击的约束层,外形尺寸为 ϕ 19 mm×4 mm。

表 1 40Cr 钢化学成分

Table 1 Chemical compositions of 40Cr steel

Chemical compositions	C	Si	Mn	Cr
wt.-%	0.37~0.44	0.17~0.37	0.50~0.80	0.80~1.10

表 2 40Cr 钢机械性能

Table 2 Mechanical properties of 40Cr steel

E/GPa	ν	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	Hv _{0.2}
211	0.277	980	750	9	271

3 实验结果及分析

40Cr 钢经激光冲击强化处理后,分别对其试样表面硬度、沿冲击强化层深度方向的硬度、强化层的残余应力分布和显微组织进行了测试和分析。

3.1 冲击区塑性形变

40Cr 钢经激光冲击后(激光冲击功率密度为 2.13 GW/cm²),试样表面发生了明显塑性形变。经一维表面形貌测量仪测试,一般变形深度在 3~7 μ m,冲击区表面粗糙度明显下降。

3.2 显微硬度

40Cr 钢激光冲击强化区表面的显微硬度的测量结果如图 1 所示,冲击强化区硬度大小分布呈半球冠状,它与冲击区表面塑性形变深度相一致,说明激光冲击后材料塑性变形区深度大,则硬度高;塑性变形区深度小,则硬度低。表面平均硬度为 Hv_{0.2} 355,与基体硬度相比提高了 30%。图 2 所示为激

2.2 参数选择

激光冲击强化试验的光束参数为:激光波长 1.06 μ m,脉宽 23 ns,输出功率 16~20 J,光斑尺寸为 ϕ 7 mm。吸光涂层厚度约为 0.025 mm。选定激光冲击功率在 2.0 GW/cm² 左右,激光冲击形成的冲击波峰值值应大于 40Cr 钢的动态屈服强度 1.456 GPa,以保证对被冲击材料产生一定的塑性变形。

2.3 性能测试设备

采用 HVS-1000 型数字显微硬度计测量激光冲击强化区表面和沿激光强化区深度方向的显微硬度,保压时间为 10 s,负荷为 200 g。残余应力测定在 X-350A 型残余应力测试仪上进行,残余应力测试位置为激光冲击处理区的中心点。显微组织的观察是在 H-800 型透射电镜上进行的,加速电压为 200 kV。

光冲击区中心沿深度方向 1.0 mm 内的硬度分布,其硬度值与距强化区表面距离近似成线性关系,平均硬度为 Hv_{0.2} 362,比基体硬度提高了 30.6%。但从两图的比较中,明显看到冲击区表面的最高硬度低于冲击区中心沿深度方向的最高硬度,这主要是在对冲击区表面进行显微硬度测试时,需要对表面进行打磨和抛光处理,因此,冲击区表面硬度总是要低于实际硬度。

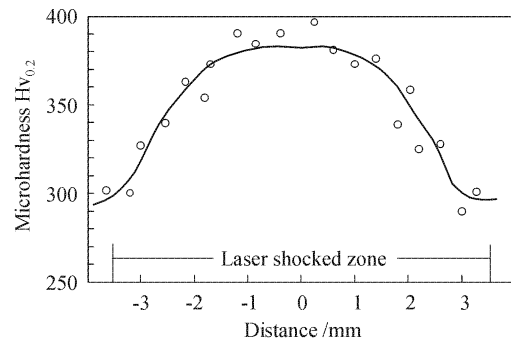


图 1 激光冲击 40Cr 钢的表面硬度分布

Fig. 1 Microhardness distribution of the laser shocking zone of 40Cr steel in the surface

3.3 残余应力

图 3 为 40Cr 钢激光冲击强化区中心沿深度方

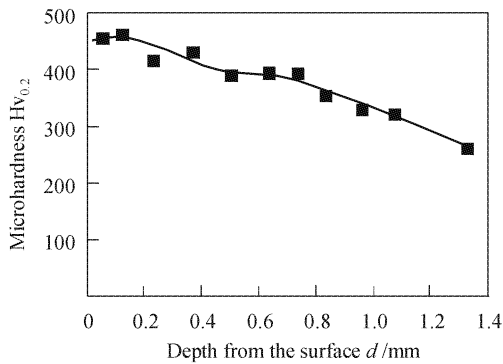


图 2 40Cr 钢激光冲击区深度方向的硬度分布
Fig. 2 Microhardness distribution of the laser shock processing zone of 40Cr steel along its depth direction

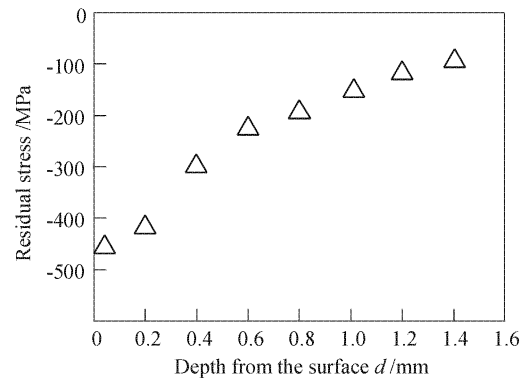


图 3 40Cr 钢激光冲击处理后的残余应力
Fig. 3 Residual stress of the strengthened zone of laser shock 40Cr steel

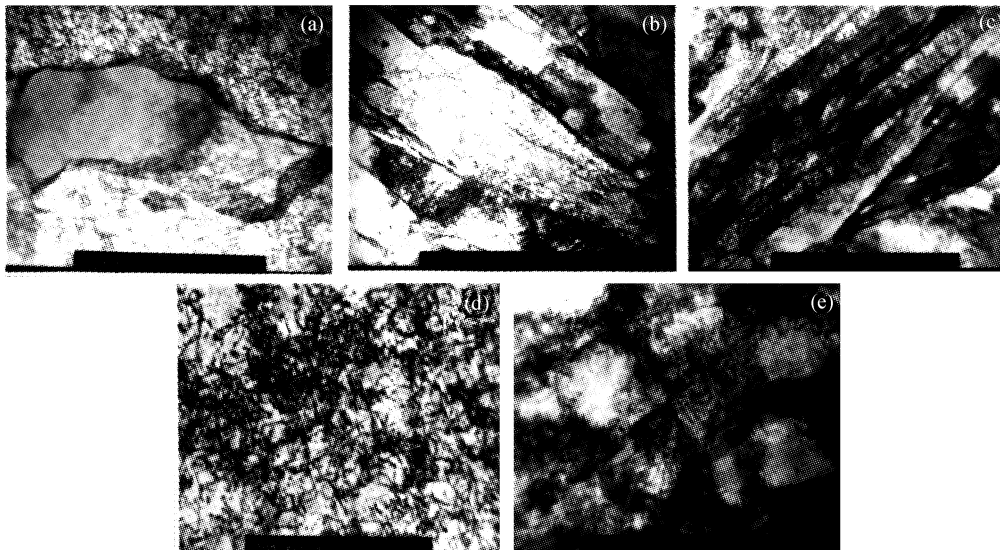


图 4 40Cr 钢激光冲击强化区显微组织

(a) 变形铁素体(14000 \times); (b) 初生马氏体(8400 \times); (c) 马氏体(14000 \times); (d) 位错(49000 \times); (e) 胞状位错(28000 \times)

Fig. 4 Microstructures of the strengthened zone of 40Cr steel by laser shock processing

(a) deformed ferrite (14000 \times); (b) initial martensite (8400 \times); (c) martensite (14000 \times);
(d) dislocation (49000 \times); (e) cellular dislocation (28000 \times)

向的残余应力分布。激光冲击(激光冲击功率密度为 2.15 GW/cm^2)强化区表面残余应力的最大值为 -450 MPa ,残余应力的最大影响深度达 2.0 mm 。激光冲击强化金属材料的显著特点是在金属工件被冲击影响区产生数百兆帕的表层残余压应力。大多数学者认为,宏观残余应力产生是源于材料弹性和塑性形变的贡献。残余应力的存在可以有效提高金属材料的抗疲劳性能。

3.4 显微组织

3.4.1 亚结构组织及相变

图 4(a)为在冲击压力下铁素体发生的晶界变形和晶粒细化,同时在铁素体周围产生了大量位错

(图中的黑色部分)。激光冲击硬化能否产生亚结构组织相变,目前还少见国内外学者在此方面的报道。在对 40Cr 钢的激光冲击实验中发现了冲击引起的马氏体相变,如图 4(b)所示,但这种相变并不完全,有的像初生马氏体。而图 4(c)所示的马氏体相变就较为完全,这可能是两者在冲击区中所受的应力不同引起的。在透射电子显微镜(TEM)照片中有孪晶马氏体,同时,激光冲击区的金相照片也看到了明显的晶粒细化。晶粒细化和孪晶马氏体的生成都应源于金属材料在冲击力作用下产生的塑性能和弹性能的贡献,尤其是相变更是如此。因为马氏体转变是一个晶体切变过程,在切变过程中完成晶

格重构,由面心立方晶格转变为体心立方晶格,这实质上也是位错运动的过程,因此激光冲击产生的马氏体相变应是由压力波引起的,而非温度引起。

3.4.2 高密度位错

图 4(d)是 40Cr 钢激光冲击后的 TEM 照片,位错线密度很高,且很短。图 4(e)是强化区形成的许多“小岛”形胞状位错。高密度位错的存在不仅可以提高材料的硬度和强度,而且可以阻碍金属材料的滑移和疲劳裂纹的扩展,从而提高金属的抗疲劳强度。

4 结 论

对 40Cr 钢的激光冲击强化处理实验表明,它能使材料强化区的显微硬度得到较大幅度的提高,产生单一的残余压应力,显微组织发生了明显的变化,从而可以有效地提高 40Cr 钢的抗磨损和抗疲劳等机械性能。

参 考 文 献

- 1 P. Payre, X. Scherpereel, L. Berthe *et al.*. Current trends in laser shock processing [J]. *Surface Engineering*, 1998, **14**(5): 377~380
- 2 Jean-Eric Masse, Gerard Barreau. Laser generation of stress waves in metal [J]. *Surface and Coating Technology*, 1995, **70** (2~3):231~234
- 3 Y. X. Tang, Y. K. Zhang, C. C. Yu. Effect of laser shock processing on the fatigue resistance of an aluminum alloy [J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2000, **122** (1):104~107
- 4 Y. K. Zhang, X. R. Zhang, X. D. Wang *et al.*. Elastic properties modification in aluminum alloy induced by laser-shock processing [J]. *Material Science and Engineering*, 2001, **A297**: 138~143
- 5 Guo Dahao, Wu Hongxing, Wang Sengbo *et al.*. Study of mechanism of strengthening materials mechanism with laser shock processing [J]. *Science in China (Ser. E)*, 1999, **42**(3): 288~293
- 6 Tang Yaxin, Zhang Yongkang, Zhang Hong *et al.*. Laser shock-induced stress wave in metal and its prospects of applications [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **B7**(3):269~275