

文章编号: 0258-7025(2010)12-3187-05

激光冲击强化对齿轮接触疲劳的影响

张兴权 何广德 戚晓利 童宝宏 余晓流

(安徽工业大学机械工程学院, 安徽 马鞍山 243002)

摘要 用吉瓦每平方厘米量级的强激光对渗碳淬火的齿轮进行了激光冲击强化试验, 对冲击处理后疲劳齿轮的综合误差进行了测量, 用 X 射线衍射(XRD)的方法测试了残余应力和组织含量的变化, 并进行了齿轮的磨损试验。结果表明, 激光冲击对齿轮的精度影响较小; 在齿廓的表层存在较大的残余压应力, 法向残余压应力至少增加了 107%, 齿向的残余应力至少增加了 85%; 激光冲击处理使残余奥氏体的含量减小; 经过磨损对比试验, 未经过激光冲击强化齿面点蚀的面积是强化后齿轮的 2.1 倍, 激光冲击能使齿轮接触疲劳寿命得到延长。

关键词 激光技术; 激光冲击; 齿轮精度; 残余应力; 疲劳寿命

中图分类号 TN249; TG39 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103712.3187

Investigation on Contact Fatigue Strength of Gear Affected by Laser Shock Processing

Zhang Xingquan He Guangde Qi Xiaoli Tong Baohong Yu Xiaoliu

(School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243002, China)

Abstract The gear teeth were shocked by high intensity laser shock waves. The transmission error of sample after shocking were tested. The residual stress and microstructure phase transformation were measured by X-ray diffraction (XRD) technique, and the fatigue damage experiment was done to test the fatigue resistant property. The results indicated the tooth profile error after laser processing still kept lower levels and the laser shock had no effecting on transmission accuracy. That the residual compressive stress of gear enhanced greatly after laser processing, and the residual stress of gear was increased by 107% in the normal direction and 85% in the tangent direction. And that the volume fraction of austenite phase decreased after shocked process. The area of defect spot on teeth flank un-shocked was 2.1 times of that shocked, which indicates that the laser shock processing can extend the gear fatigue life.

Key words laser technique; laser shock; gear accuracy; residual stress; fatigue life

1 引 言

齿轮在传动系统中起着传递动力及改变运动速度等作用, 其传动具有传动比准确可靠、传动效率高和结构紧凑等优点, 因而得到了广泛应用。由于齿轮在使用过程中容易发生疲劳、断齿等失效, 且其在制造时需要专用设备, 成本较高, 为此人们采取有效措施来强化齿轮, 延长其寿命, 如表面渗碳淬火、齿面喷丸强化和齿面激光淬火等^[1~3]。

激光冲击强化(LSP)处理技术是利用强激光束辐照材料表面产生的冲击波来提高金属材料的强度、

硬度和改善工件的耐磨性^[4~7]。由于激光冲击处理在材料表面产生残余压缩应力, 因而金属材料耐应力腐蚀性能和抗疲劳性能得到有效改善^[8~10]。激光冲击强化技术初期主要用于对安全性要求极高的航空器件上, 如航空发动机涡轮叶片的强化^[11]。近年来, 随着人们对激光冲击处理技术研究的不断深入和高功率激光器的商品化推出, 人们开始把它逐步推广到多个领域, 如对发动机飞锤危险截面和曲轴圆角进行激光冲击强化^[12, 13], 但利用激光冲击强化提高齿轮疲劳寿命, 至今鲜见报道。

收稿日期: 2010-04-27; 收到修改稿日期: 2010-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(50675090)和安徽省自然科学基金(090414156)资助课题。

作者简介: 张兴权(1970—), 男, 副教授, 主要从事激光加工方面的研究。E-mail: zhang20020313@163.com

本文以国产圆柱齿轮为研究对象,利用强激光冲击处理渗碳淬火齿轮表面,研究激光冲击强化后齿轮齿向误差的变化、残余应力的变化、金相组织成分的改变以及对其接触疲劳影响,为进一步研究齿轮表面强化工艺参数的合理确定提供了参考依据。

2 试验材料及方法

2.1 强化原理与方法

齿面的激光冲击强化是用短脉冲强激光束辐照齿面而诱导的高压冲击波对其进行强化的,其原理如图 1 所示^[14]。冲击前,用带有台阶的芯棒和螺帽将齿轮固定并放置在工作台上,调整齿轮的位置,使齿面与入射光线基本上垂直。当短脉冲高功率强激光辐照到齿面时,齿面上涂层材料迅速气化,在齿面产生高压冲击波。当冲击波在齿轮诱导的应力波峰值压力大于材料动态屈服强度,材料将发生屈服,表层材料的组织结构和机械性能得到显著改善,使齿面得到强化。冲击时,采用涂层和约束层,以提高冲击效果^[15]。强化时激光扫描的方向自上而下进行,当一个齿面完成后,转动一个角度,进行下一个齿面的冲击。

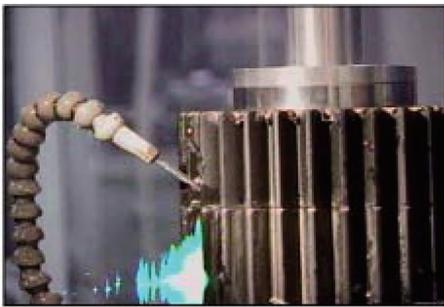


图 1 激光冲击强化处理齿轮

Fig. 1 Photo of gear tooth flank shocked by laser

2.2 试验的材料及参数

齿轮材料为 20CrMnTi,其化学成分为: C, Si, Mn, Cr 质量分数分别为 0.17~0.23, 0.17~0.37, 0.80~1.10, 1.10~1.30, 其余为 Fe。材料的力学性能为抗拉强度 1080 MPa, 屈服强度 850 MPa。

试验的对象包括直齿圆柱齿轮(SG)和斜齿圆柱齿轮(HG)两种类型。直齿圆柱齿轮的参数:模数 4, 压力角 20°, 齿宽 30 mm, 齿数为 32; 斜齿圆柱齿轮的参数:模数 4, 压力角 20°, 齿数为 46, 旋向:左旋。齿轮进行热处理(HT),先在多用炉中渗碳处理,并按工艺经淬火和回火,热处理后表面硬度为 58~63 HRC(洛氏硬度)。

采用激光脉冲的波长 1054 nm, 脉冲宽度为 23 ns, 脉冲能量 35~50 J, 光斑直径为 $\phi 8$ mm, 激光功率密度为 2.4~3.5 GW/cm², 光斑中心线落在齿轮分度圆节线上。为了便于比较激光冲击处理的齿面和未强化齿面在相同载荷下的疲劳失效情况,激光冲击处理的齿数约占整个齿轮齿数的 1/4。

冲击处理后去除齿轮表面残留的涂层,并用乙醇将表面清洗干净后,对齿轮进行形状的综合误差检验和表面残余应力等无损检验,残余应力的测量位置沿分度圆的节线进行。并在封闭的实验台上进行疲劳寿命试验,利用扭矩转速测量仪对试验过程进行监视。疲劳试验的过程中,用 3 号齿润滑油,主动齿轮转速为 1500 r/min,所受扭矩为 560 N·m, 试验后观察齿面的接触疲劳失效情况。

3 试验结果与分析

3.1 齿轮的误差

齿轮加工精度与其使用性能密切相关,加工精度的高低对于传动的噪声、平稳性和传动的效率有重要影响。齿轮激光处理前后和热处理前后的综合误差检测结果如表 1 所示,其中 ΔF_p 为齿距累积误差, Δf_{pt} 为齿距极限偏差, Δf_i 为齿形误差, ΔF_i 为齿向误差, ΔF_r 为齿圈径向跳动误差。

表 1 齿轮综合误差检测结果

Table 1 Tested data of gear

| Type | State | ΔF_i | Δf_i | Δf_{pt} | ΔF_p | ΔF_r |
|------|-------------------------|--------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|
| SG | Before HT | 12 | 11 | 10 | 32 | 31 |
| | After HT and before LSP | 23 | 18 | 14 | 38 | 40 |
| | After LSP | 24 | 24 | 15 | 35 | 42 |
| HG | Before heated | 14 | 12 | 11 | 34 | 36 |
| | After HT and before LSP | 18 | 17 | 23 | 49 | 45 |
| | After LSP | 16 | 17 | 19 | 43 | 47 |

由表 1 可以看出,齿轮表面激光冲击处理后,齿轮变形很小,几乎不影响齿轮的精度等级。因为齿轮材料的屈服强度高,且齿轮渗碳淬火后,齿轮的表面硬度较高,在激光冲击波的力的作用下,冲击坑的深度较浅。齿轮综合误差的加大主要是由齿轮热处理变形造成的。对于高速运转平稳性要求非常高的精密齿轮,应控制淬火后的齿轮变形,并在激光冲击前进行磨齿,然后进行激光冲击处理,可以达到高精度的要求。

3.2 齿面残余应力

齿面的残余应力(RS)用 X 射线应力分析仪测量,射线产生的方式为 Cr 靶,射线管电压 22 kV,电流 6 mA,测量管直径为 2 mm,扫描步进角为 0.1° ,

表 2 齿面残余应力

Table 2 Residual stress of gear tooth flank

| Distance /mm | RS of SG /MPa | | | | RS of HG /MPa | | | |
|--------------|---------------|------|-----------|------|---------------|------|-----------|------|
| | Before LSP | | After LSP | | Before LSP | | After LSP | |
| | AF | NF | AF | NF | AF | NF | AF | NF |
| 4 | -186 | -110 | -378 | -280 | -183 | -96 | -356 | -234 |
| 8 | -223 | -143 | -413 | -297 | -218 | -122 | -405 | -281 |
| 12 | -204 | -131 | -396 | -290 | -229 | -140 | -425 | -315 |
| 16 | -172 | -115 | -344 | -264 | -205 | -120 | -388 | -269 |

由表 2 看到,经过激光冲击处理后,在齿廓表面的残余压应力有较大程度的增加,其中齿向的残余应力至少增加了 85%,法向的残余应力至少增加了 107%。齿轮强化后,残余压应力大幅增加,有利于提高齿轮的疲劳寿命。因为残余压应力阻碍疲劳裂纹的扩展,不仅可以使短裂纹其扩展速度大幅度下

测量点为齿轮分度圆的节线处,测量点的间距为 4 mm。齿向(AF)和法向(NF)残余应力的测量结果如表 2 所示。

降从而形成非扩展裂纹,还大大提高疲劳短裂纹的闭合率,有助于齿轮的疲劳寿命的提高。

3.3 冲击对组织成分的影响

采用 X 射线衍射(XRD)方法测量激光冲击过程中的相结构变化,得到 X 射线衍射图谱如图 2 所示。

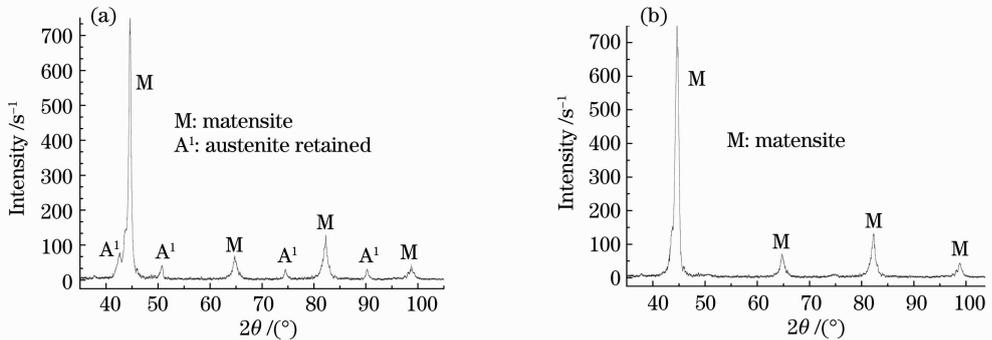


图 2 齿轮冲击前后的 XRD 图谱。(a)冲击之前,(b)冲击之后

Fig. 2 XRD patterns of phase analysis for the material. (a) before LSP, (b) after LSP

由图 2 可以看出,齿轮激光冲击强化前后,其表面的衍射图谱不同。齿轮经过渗碳回火后其表面组织为马氏体组织,含有少量的残余奥氏体。这是因为奥氏体和马氏体的晶体结构和点阵常数不同使得 X 射线衍射产生德拜环花样的位置和宽度明显不同,表现为衍射仪和应力仪上可得到的衍射角和衍射谱线宽度明显不同,冲击处理后,残余奥氏体的衍射峰在衍射之后基本消失,说明激光冲击强化能有效使残余奥氏体转变为马氏体。由于残余奥氏体的比容大于马氏体的比容,因此冲击过程中产生相变,材料体积膨胀而产生压应力,使得表层残余应力场向着更大的压应力方向变化,且马氏体的含量提高,齿面硬度得到增高,其屈服极限强度随之提高,从而提高齿轮表面的耐磨性及其疲劳寿命。

3.4 齿面点蚀失效

经过重加载疲劳磨损试验,经过 1634040 转循环后,齿轮齿廓的表面形貌如图 3 所示。由于齿轮轮廓的形状的限制,观察的视角空间有限,难以清晰观察到表面微观形貌。采用带有旋转镜头的三维数

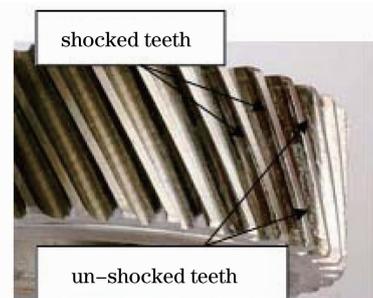


图 3 齿轮疲劳加载试验后齿面的整体形貌

Fig. 3 Appearance of teeth after cycle load actions

字式视频显微镜观察表面形貌并进行放大,如图4(a),(b)所示。

由图3可以看出,在齿轮齿面节线附近产生了点蚀。因为在齿轮啮合过程中,齿面间相对的滑移有利于形成润滑油膜,相对滑动速度越高,越容易形成油膜,当轮齿在靠近节线处啮合时,相对滑动速度越低,润滑油膜不易形成,而且当轮齿在节线附近啮合时,同时啮合的对数也少,接触应力值较大,因此

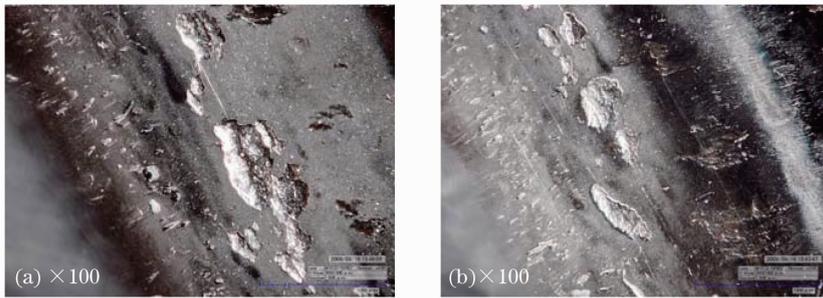


图4 齿面点蚀失效。(a)未受冲击处理,(b)受冲击处理后

Fig. 4 Tooth flank morphology of corrosion pit. (a) on un-shocked teeth, (b) on shocked teeth

齿轮受外加载荷作用后,在啮合转动过程中,在其接触部分产生了局部弹性变形,形成了狭长带型的接触面,根据弹性力学中的赫兹应力公式,接触面带宽 a 为

$$a = \left[\frac{4F}{\pi L} \cdot \frac{\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}}{\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

式中 ρ_1, ρ_2 分别为两个圆柱的接触半径, F 为压力, E_1, E_2 为两圆柱材料的弹性模量, μ_1, μ_2 为两圆柱材料泊松比, L 为接触长度, F/L 为作用在圆柱体单位长度上的法向力。

由于狭长面积上压力分布不均匀,作用在接触面中线上的最大接触应力将为平均接触压应力的 $4/\pi$ 倍,其最大的接触应力 σ_{Hmax} 为

$$\sigma_{Hmax} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{F}{2aL} = \left(\frac{F/L}{\pi \rho_r} \cdot \frac{1}{(1-\mu_1^2)/E_1 + (1-\mu_2^2)/E_2} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

式中 $\rho_r = \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$ 为当量的曲率半径。

当试验的齿轮上施加的扭矩为 $560 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时,可按(2)式算出其表面的最大接触应力为 1250 MPa 左右,齿轮在转动的过程中,齿面受到周期性的接触应力作用。工作面在变化的接触应力作用下,产生疲劳裂纹,导致齿面的金属小块剥落,即麻点状的小坑,形成所谓的点蚀,而且齿面的硬度高,材料具有

容易在轮齿的节线附近形成点蚀。

由图4(a),(b)还可以看出,未经过激光冲击强化后的齿面的点蚀坑相互连接,使材料大面积的剥落,形成了较大的点蚀坑,而受冲击处理的表面的虽然发生了点蚀,但点蚀坑面积小,且相互独立。计算整个齿廓上的点蚀坑面积,未受激光冲击强化的齿廓表面点蚀的面积是强化后齿轮的 2.1 倍。

脆性,凹坑之间再通过裂纹的扩展、贯通,形成大片剥落,即形成扩展性的点蚀。由于点蚀减小了齿轮的接触面积,不仅破坏了齿廓表面的光洁度,而且降低了承载能力,使齿轮工作时产生强烈的振动和噪声,以至于不能正常工作。

齿轮工作面经过激光冲击强化后,在其表层存在着较大的残余压缩应力。残余压应力场阻碍疲劳裂纹的扩展,残余压应力对短裂纹不仅可以使其扩展速度大幅度下降,进而形成非扩展性裂纹,并且大大提高疲劳短裂纹的闭合力。因此,可扩展的裂纹形成门槛值很高,扩展疲劳裂纹萌生后,裂纹扩展速度较慢,裂纹扩展区域相对也较小,受冲击处理后的齿轮轮廓表面点蚀的面积较小。因此激光冲击强化齿轮可提高齿轮的接触疲劳强度,延长其接触疲劳寿命。

4 结 论

1) 渗碳淬火后的齿轮,激光冲击对其精度影响较小,齿轮的综合误差主要是由淬火变形造成的;

2) 激光冲击不但可显著提高渗碳齿轮表面的残余压应力,还能使表层的组织强化,并能使残余奥氏体向马氏体转变,从而可进一步提高齿轮表层的强度和硬度;

3) 齿轮疲劳磨损后,未经过激光冲击强化后的齿面点蚀面积是强化后齿轮的 2.1 倍,从而提高齿

轮的疲劳寿命。

参 考 文 献

- 1 Li Zhanguo, Zhang Hong, Shi Yan *et al.*. Laser surface hardening of spur gear[J]. *Acta Armamentaria*, 2003, **24**(2): 226~229
李占国, 张宏, 石岩等. 齿轮激光热处理工艺研究[J]. *兵工学报*, 2003, **24**(2): 226~229
- 2 Ni Zhaorong, sheng Jisheng, Wu Xiongbiao *et al.*. The effect of shot peening on the strength of gears in automobile transmission [J]. *J. Mechanical Transmission*, 2003, **27**(1): 39~43
倪兆荣, 盛继生, 吴雄彪等. 喷丸处理对汽车变速箱齿轮疲劳强度影响的研究[J]. *机械传动*, 2003, **27**(1): 39~43
- 3 Sun Yan, Luo Hongliang. Influence of strengthening shot peening on formation and extension of fatigue crack in carburized gear surface[J]. *Automobile Technology*, 2009, **1**: 56~29
孙艳, 罗宏亮. 机械喷丸强化对渗碳齿轮表面接触疲劳裂纹形成与扩展的影响[J]. *汽车技术*, 2009, **1**: 56~29
- 4 G. Gomez Rosas, C. Rubio Gonzalez, J. L. Ocana *et al.*. High level compressive residual stresses produced in aluminum alloys by laser shock processing[J]. *Applied Surface Science*, 2005, **252**(4): 883~887
- 5 Luo Xinmin, Zhang Jingwen, Zhao Guangzhi *et al.*. Effect of laser shock strengthening on fatigue behaviors of 2A02 aluminum alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3323~3328
罗新民, 张静文, 赵广志等. 激光冲击强化对 2A02 铝合金疲劳行为的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3323~3328
- 6 Omar Hatamleh. Effects of peening on mechanical properties in friction stir welded 2195 aluminum alloy joints [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, **492**(1-2): 168~176
- 7 Shikun Zou, Ziwen Cao, Yong Zhao *et al.*. Laser peening of aluminum alloy 7050 with fastener holes[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(2): 116~119
- 8 Curt A. Lavendera, Sung Tae Honga, Mark T. Smith. The effect of laser shock peening on the life and failure mode of a cold pilger die[J]. *J. Materials Processing Technology*, 2008, **204**: 486~491
- 9 Yin Sumin, Ye Yong, Feng Aixin *et al.*. Experimental study on non-bounding layer TiN coating by pulsed-laser shock scratching [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 316~321
殷苏民, 叶勇, 冯爱新等. 脉冲激光冲击划痕无约束层的 TiN 涂层的实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 316~321
- 10 P. Peyre, L. Berthe, X. Scherpereel *et al.*. Laser-shock processing of aluminium-coated 55C1 steel in water-confinement regime, characterization and application to high-cycle fatigue behavior[J]. *J. Material Science*, 1998, **33**(6): 1421~1429
- 11 Graham Hammersley, Lloyd A. Hackel, Fritz Harris. Surface prestressing to improve fatigue strength of components by laser shot peening[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, **34**(4-6): 327~337
- 12 Ren Xudong, Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong *et al.*. Investigation on combination laser treatment technique on engine crankshaft[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineer*, 2007, **28**(2): 56~59
任旭东, 张永康, 周建忠等. 发动机曲轴的激光冲击复合处理工艺研究[J]. *内燃机工程*, 2007, **28**(2): 56~59
- 13 Lu Jinzhong, Sun Yifei, Zhang Leihong. Effect of oblique laser shock processing on fatigue strength of S1100 crankshaft [J]. *Transactions of the Chinese Agricultural Machinery*, 2007, **38**(11): 167~170
鲁金忠, 孙益飞, 张雷洪. 激光斜冲击对 S1100 型曲轴疲劳强度的影响[J]. *农业机械学报*, 2007, **38**(11): 167~170
- 14 Lloyd A. Hackel, HaoLin Chen. Laser peening- a processing tool to strengthen metals or alloys to improve fatigue lifetime and retard stress-induced corrosion cracking [R]. California: Lawrence Livermore National Laboratory, 2003, 9: 1~8
- 15 Zhang Yongkang, Gu Yongyu, Zhang Xingquan *et al.*. Mechanism of overlay to improve the pressure of laser shock waves[J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **100**(10): 103517