

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0074-04

受控激光喷丸强化技术

孙月庆, 周建忠, 陈毅彬, 黄舒

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 介绍了一种利用强脉冲激光诱导产生的冲击波压力来进行金属表面改性的新技术——受控激光喷丸强化技术, 可以大幅度提高金属材料的疲劳寿命和抗应力腐蚀能力, 但疲劳寿命和抗应力腐蚀能力并不总随着喷丸强度的提高而线性增加。最佳的疲劳寿命和抗应力腐蚀能力常出现在特定的残余压应力水平和分布下, 也即取决于喷丸参数的最佳组合。由于激光喷丸中工艺参数对喷丸后工件表层的残余应力场有决定性的影响, 如何依据已给的疲劳寿命和抗应力腐蚀能力来合理确定喷丸强化的工艺参数成为目前主要的研究方向。受控激光喷丸的机理与残余应力的形成过程密切相关。首先在理论上研究了影响残余应力分布的激光喷丸工艺参数, 如激光功率密度、脉冲宽度、光斑直径等, 以及这些参数和残余应力层深度的关系。然后采用 QT700-2 试样进行激光喷丸强化对比实验, 对激光喷丸后的残余应力场大小及其分布进行了无损检测。结果表明, 在激光喷丸强化工件时, 残余压应力层厚度存在一个最佳值, 此时金属表面的疲劳性能和抗应力腐蚀性最优, 喷丸工艺参数也达到一个最佳组合。

关键词 激光技术; 激光喷丸强化; 残余应力; 工艺参数

中图分类号 TN253 文献标识码 A

Controlled Laser Shock Peening Technology

SUN Yue-qing, Zhou Jian-zhong, CHEN Yi-bing, HUANG Shu

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

Abstract A new technology-controlled laser shock peening which is applied by using a high energy pulsed laser to induce a high amplitude shock wave to make surface modified is introduced. It can improve fatigue life, corrosion and wear resistance of metal part. The fatigue life and the corrosion resistance do not always increase with laser shock peening intensity linealy. Optimal fatigue life and corrosion resistance depend on magnitude and distribution of residual compressive stress, and influence by optimization of various laser processing parameters. Laser processing parameters have a crucial effect on residual stress. Selecting laser processing parameters according to preconcerted fatigue life and corrosion resistance becomes a present subject. Laser shock peening mechanism has a significant relation with the generation of residual stress. In this work, the effect of laser processing parameters such as laser power density, laser beam diameter, laser pulse width on distribution of residual stress, and the relationship between these parameters and residual stress depth are examined. Specimens of QT700-2 are used in this investigation. The magnitude and distribution of the residual stress are measured by using an automatic X-ray diffraction technique. It is observed that while residual compressive stress induced by laser shock peening reach an optimal level, the surface of metal part can obtain optimal fatigue life and corrosion resistance, then optimal combination of laser processing parameters can also be obtained.

Key words laser technique; laser shock peening ; residual stress; processing parameters

1 引言

激光喷丸是一种新近出现的表面处理方法, 它能够通过改变材料表面的残余应力来提高零件的抗疲劳破坏的能力。与机械喷丸相比, 激光喷丸得到了更为令人满意的表面质量, 在不锈钢上减少了应力诱发的金相改变, 得到的表面更能够抗应力腐蚀。

在铝材中, 激光喷丸降低了在机械喷丸中诸如表面搭接, 折叠等不令人满意的现象。改善过的表面条件使抗裂纹能力得到提高。当机械喷丸和激光喷丸产生出同样大小的残余应力时, 激光喷丸能够产生更深的残余压应力层, 提高了抗宏观裂纹生长的能力。显然, 残余压应力高, 抗疲劳性能强, 反之则差。

基金项目: 国家自然科学基金(50475127)、江苏省自然科学基金(BK2004063)、教育部科学技术研究重点项目(204052)和国防航空基金(02H52053)资助课题。

作者简介: 孙月庆(1982—), 男, 江苏无锡人, 硕士研究生, 主要从事激光加工方面的研究。E-mail: sunyueqing32@163.com

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: zhouljz@ujs.edu.cn

但残余压应力高就意味着能源的浪费。因此,在激光喷丸处理工艺中,并不是希望残余压应力越高越好,需要从实际工作情况的要求出发,设置预定的残余应力,以保证既满足工件的性能要求,又有效地利用激光能量。

受控激光喷丸就是通过控制激光喷丸的工艺参数来获得预定的残余应力场的新技术。它利用金属的不均匀塑性变形来形成合理的应力场,强化金属表面,以充分发挥金属材料潜在能力^[1]。这对节约材料,减轻重量,有重大意义。从喷丸后的不均匀塑性变形,到形成理想的应力场分布,中间涉及的问题相当广泛,牵扯的因素很多。因此,有关受控激光喷丸和残余应力之间的关系成为研究的重点。

2 受控激光喷丸强化的机理

受控激光喷丸的强化机理主要有两点:1)受控激光喷丸产生的高密度均匀稳定的位错;2)激光冲击诱导的表面残余压应力。如图1所示,当功率密度为 $\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 量级,脉冲宽度为ns量级的激光束通过约束介质辐照到黑色涂层材料表面时,表层材料开始吸收激光能量而产生等离子体。在激光辐照的持续时间内,等离子体层厚度增加,密度增大,温度上升,等离子体区达到比无约束条件下更高的压力。等离子体层喷射爆炸形成冲击波,传向靶方向的波透过剩余的涂层后作用于靶材表面。传向约束介质的波被约束介质反射再次作用于靶表面。因此靶表面受到比无约束条件下高得多的压力和更长的冲击持续时间。当冲击波压力超过靶材的动态屈服强度时,就在靶表层形成一个塑性变形层。在冲击波造成的塑性层中存在着残余压应力,其位错密度显著增高。由于残余压应力在疲劳载荷中起着负平均应力的作用,延缓了疲劳裂纹的萌生。由于位错密度的增高,使材料屈服强度提高,并阻碍了位错的运动,从而增大了裂纹产生的阻力。正是由于残余

压应力、高密度位错这些因素的综合作用,使材料的抗疲劳寿命得到了延长^[2~4]。

3 受控激光喷丸对金属疲劳性能的影响

3.1 对残余应力的影响

金属零件经激光喷丸之后,表层塑性变形伸长,形成与次表层之间的不均匀塑性变形而导致形状变化,表层出现压应力,从而使整个零件内应力重新平衡而建立新的残余应力场。残余压应力层的强度和深度,即喷丸效应所达到的效果,与激光工艺参数和零件的机械特性有关系。

当激光喷丸工艺参数一定时,喷丸表面残余压应力数值的大小主要取决于材料的晶体类型、屈服强度和拉伸硬化率指数。在同等冲击波压力下,弹性模量大的材料,表面残余应力大;弹性模量小的,残余应力小;泊松比大,残余应力大;泊松比小,残余应力小^[5]。

对于同一种金属材料由于激光喷丸产生的残余应力场轮廓和深度受到若干工艺参数的影响,所以要实现受控的目的,首先必须研究残余应力和激光工艺参数之间的关系。激光喷丸工艺参数主要指激光功率密度,脉冲宽度,光斑直径等。

3.1.1 激光功率密度

激光功率密度的增加,会增强冲击压力峰值和延长冲击压力持续时间。当表面保护涂层和约束层确定后,激光脉冲功率密度就成为影响激光诱导的冲击波峰值压力的主要因素^[6]。因此,激光脉冲功率密度是影响残余应力深度和峰值的主要参数。正确选择激光脉冲功率,使其诱导的冲击波峰值压力完全满足激光冲击强化处理的基本要求,保证被强化处理的材料表面既达到了强化要求,又不被破坏是极其重要的。

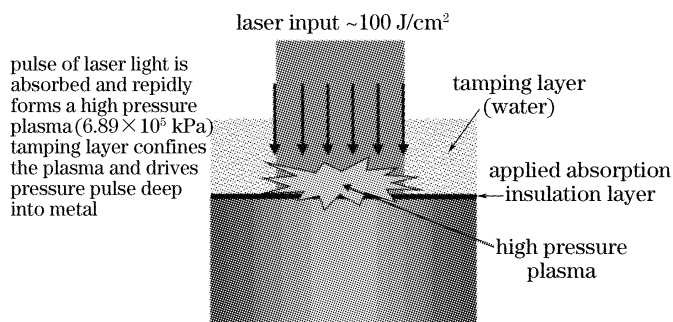


图1 激光冲击强化机理

Fig. 1 Principle of laser shock peening

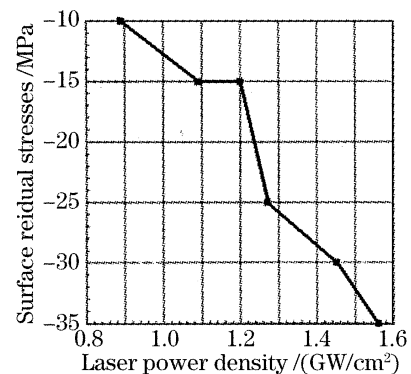


图2 表面残余应力与激光功率密度之间的关系

Fig. 2 Surface residual stress measurement as a function of the laser power density

激光功率密度至少应保证激光诱导的冲击波的峰值压力超过被强化处理材料的动态屈服强度。同时,就被强化处理的材料而言,在正反射的情况下,入射的冲击波的压力必须小于材料的动态抗拉强度。另外,还必须考虑到材料的表面保护。图 2 为激光冲击 2024-T62 铝合金板料实验中,激光功率密度和表面残余应力之间的关系。结果显示,激光功率密度越高,表面的残余压应力值越高^[7]。

3.1.2 脉冲宽度

在相同的激光功率密度的情况下,脉冲宽度越长,则所产生的应力波的半高脉冲宽也越长,作用于试件的时间也越长,硬化程度也越高。由于激光冲击强化后,材料的强化层深度与入射冲击波的脉冲宽度大小成正比。因此,从强化效果的角度来看,采用较大的激光脉冲宽度可获得较好的强化效果。然而,过大的激光脉冲宽度极易造成金属表面的热损伤,这反而与激光冲击强化的初衷相反。研究显示,在激光冲击强化金属铝合金时,采用的脉冲宽度范围应在几纳秒至数十纳秒之内。

3.1.3 光斑直径

在同等激光功率密度下,激光冲击区的表面残余应力与光斑面积大小有关。光斑面积越大,则经激光冲击后的材料冲击区的表面残余压应力越大,因此,在所需冲击强化的区域内,应尽量采取大光斑激光束进行强化处理。当然,光斑的大小选择也不是任意的,就圆形光斑而言,在冲击强化处理小孔时,为了降低最大应力提高结构强度以提高抗疲劳断裂能力,应使小孔在 $d=6r$ 的范围内得到强化。其中 d 为光斑直径, r 为小孔半径^[8]。

3.2 对疲劳寿命的影响

喷丸强化在零件表面造成残余应力场、循环硬化或软化及表面粗糙度等变化。这些变化叠加到材料本身的疲劳抗力上,共同决定疲劳裂缝萌生及扩展行为,从而决定零件的疲劳强度。研究喷丸强化工艺和机理的根本目的,在于建立确定最佳喷丸规范的原则,并用以指导强化工艺,使零件获得最高的疲劳抗力。

3.2.1 喷丸残余应力场对疲劳行为的影响

残余应力场对疲劳裂缝萌生的影响可以从两个方面来分析^[9]:1)表面萌生裂缝。当材料表面较软、粗糙度高或者存在某种形式的应力集中时,疲劳加载时疲劳源大多位于试样表面。但是由于表面存在残余压应力,抵消了部分载荷应力,从而提高了疲劳强度。2)内部萌生裂缝。适当强度喷丸后,试样表

面的粗糙度较小,表面起裂的诱因大部分消失。此时较高的表面残余压应力阻滞裂缝在表面萌生,而将其“挤”入到内部的薄弱区域,这个区域往往是残余拉应力区。内部起裂时局部载荷应力降低,此处没有表面损伤和介质的影响,同时位错滑移受到较大的约束,提高了局部抗力,因此疲劳极限必然提高。

3.2.2 喷丸残余应力场对疲劳裂缝扩展的影响

残余压应力场阻碍疲劳裂缝的扩展,不仅可以使短裂缝扩展速度大幅度下降,进而形成非扩展裂缝,并且大大提高疲劳短裂缝的闭合力,使喷丸件的疲劳强度得到提高。图 3 表示了疲劳裂缝在残余压应力场中的扩展行为。图中 I 表示,开始扩展时,随着表面残余压应力的增加,应力强度因子 K 减小,裂纹扩展速率降低;当 K 低于裂纹扩展阈值时,裂纹停止扩展。II 表示在循环过程中,发生了残余压应力松弛,使 K 重新增大,裂纹扩展速度加大,最终导致断裂^[9~10]。

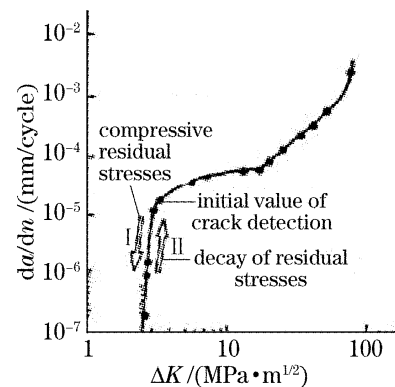


图 3 残余应力场对疲劳裂纹扩展的影响

Fig. 3 Effect of compressive residual stress field on fatigue crack propagation

3.3 对抗应力腐蚀能力的影响

机械零构件的应力腐蚀是指在一定的应力条件和一定的腐蚀环境中发生的腐蚀现象。腐蚀环境与零件材料相匹配,例如奥氏体不锈钢易在某些氯化物液体中应力腐蚀,黄铜易在一定浓度的含氨环境中应力腐蚀。大量实验证实,在同一腐蚀环境中,零件表面呈压应力,能阻止或延缓应力腐蚀,反之,表面呈拉应力,则能促进或加速应力腐蚀。受控喷丸提高零件抗应力腐蚀能力的主要原因就是在零件表面建立了压应力层。

4 受控激光喷丸强化实验研究

4.1 试样材料和参数选择

试样材料为 QT700-2 球墨铸铁。激光喷丸强化

实验的参数为：激光波长 $1.06 \mu\text{m}$ ，脉宽 20 ns ，输出功率分别为 20 J ， 30 J ，光斑尺寸为 $\phi 7 \text{ mm}$ ，涂层采用硅酸已酯，厚度约为 0.025 mm 。选定激光喷丸功率在 2.0 GW/cm^2 左右，激光喷丸形成的冲击波峰值应大于 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。

4.2 实验结果讨论

图 4 显示 QT700-2 试件经激光喷丸处理后，喷丸区的残余压应力与未经喷丸处理区存在的残余应力相比，有了极大的提高，可达到 $-155 \sim -221 \text{ MPa}$ 以上的水平。激光冲击后残余压应力分布较为均匀，在光斑的边缘，残余压应力明显急剧减小，甚至出现了表面残余拉应力，为了避免这种周边的残余拉应力影响处理零件的特性，应实行搭接喷丸，以把这个拉应力转移到疲劳关键部位以外。

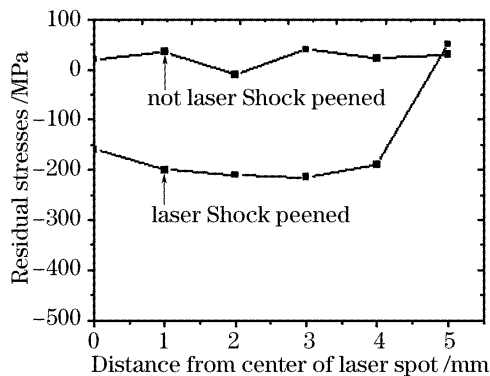


图 4 光斑区域残余应力的分布

Fig. 4 Distribution of residual stress on the field of laser spot

图 5 为不同功率密度下残余应力的分布。可以看出，激光能量增加，表面残余应力也增大，这是因为激光脉冲功率密度越高，激光诱导的冲击波峰值压力超过材料动态屈服强度的幅值越大，表面变形也就越大，产生的表面残余应力也越大。当激光功率密度超过一个给定值后，残余应力的深度增加，但

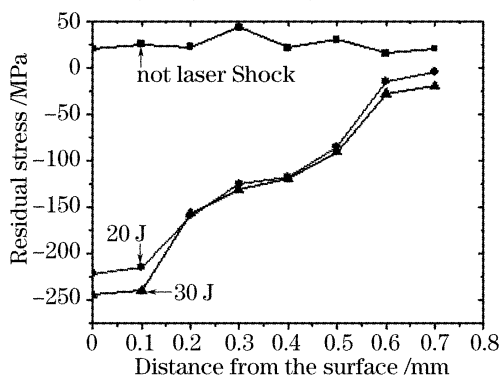


图 5 不同功率密度下残余应力的分布

Fig. 5 Distribution of residual stress under different power density conditions

在材料表面处的残余应力却减小(主要在冲击的中心)。这是因为当激光功率密度大于某一值时，冲击波峰压并不随激光功率密度的增加而增加，反而有些下降。这主要是由于约束层的绝缘击穿而引起的。这时将在约束层中产生等离子体，并导致等离子体的电离雪崩。这种绝缘击穿效应使穿过约束层的激光能量减少，限制了冲击波峰压的增加。

5 结 论

受控激光喷丸以强化为目标，利用残余应力场的合理分布来提高机械零件的性能。受控激光喷丸与其他表面强化技术相比，占有明显优势，强化效果显著，成本低，能源消耗少，适应性好，用途广泛。

参 考 文 献

- 1 Fang Bowu. Control Shot Peening and Theory of Residual Stress [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Publishing Company, 1991
方博武. 受控喷丸与残余应力理论 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1991
- 2 Guo Dahao, Wu Hongxing, Wang Shenbo *et al.*. Study on the mechanism of laser shock processing [J]. *Science in China (Series E)*, 1999, **29**(3): 223~226
郭大浩, 吴鸿兴, 王声波 等. 激光冲击强化及机理研究 [J]. 中国科学(E辑), 1999, **29**(3): 223~226
- 3 J. L. Ocana, C. Molpeceres, J. A. Porro *et al.*. Experimental assessment of the influence of irradiation parameters on surface deformation and residual stresses in laser shock processed metallic alloys [J]. *Applied Surface Science*, 2004, **238** (1~4): 501~505
- 4 Charles S. Montross, Tao Wei, Lin Ye *et al.*. Laser shock processing and its effect on microstructure and properties of metal alloys; a review [J]. *International J. Fatigue*, 2002, **24**: 1021~1036
- 5 Chen Ruifang, Hua Yinqun, Cai Lan. Estimate of residual stress of steel materials induced by laser shock wave [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2): 279~282
陈瑞芳, 花银群, 蔡 兰. 激光冲击波诱发的钢材料残余应力的估算 [J]. 中国激光, 2006, **33**(2): 279~282
- 6 Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong, Ye Yunxia *et al.*. Laser Process Technology [M]. Beijing: Chemistry Industry Publishing Company, 2004
张永康, 周建忠, 叶云霞 等. 激光加工技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004
- 7 Zhang Hong, Yu Chengye. Laser shock processing of 2024-T62 aluminum alloy [J]. *Material Science and Engineering A*, 1998, **257**(2): 322~327
- 8 S. Curtis, E. R. de Los Rios, C. A. Rodopoulos *et al.*. Analysis of the effects of controlled shot peening on fatigue damage of high strength aluminium alloys [J]. *International J. Fatigue*, 2003, **25**(1): 59~66
- 9 Zhang Dingquan. The effects of residual stresses on the fatigue strength of metal [J]. *Part A: Physical Testing*, 2002, **38**(6): 231~235
张定铨. 残余应力对金属疲劳强度的影响 [J]. 理化检验——物理分册, 2002, **38**(6): 231~235
- 10 Wyman Z. Zhuang, Gary R. Halford. Investigation of residual stress relaxation under cyclic load [J]. *International J. Fatigue*, 2001, **23**(Supplement 1): 31~37