

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0098-04

金属板料激光喷丸与机械喷丸强化的应力场数值研究

杜建钧, 周建忠, 杨超君, 倪敏雄, 曹向广, 黄 舒

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 在分析激光喷丸和机械喷丸强化机理的基础上,以有限元软件 ABAQUS/CAE 为平台,建立了激光喷丸强化模型和机械喷丸强化的有限元模型。解决了激光喷丸强化中激光冲击波转换加载的方法;对于机械喷丸强化,解决了弹丸与板料间的装配模型。数值模拟分析了激光单点喷丸板料后,材料厚度方向的残余应力分布,以及激光多点、多排喷丸板料后材料厚度方向的残余应力分布。对于机械喷丸强化,分析了单个弹丸高速撞击板料和多个受控弹丸撞击板料后残余应力分布场情况。通过分析比较这两种方法在板料中产生的残余应力大小、残余应力深度以及表面形貌的优劣,得到的结论是,激光喷丸强化提高材料使用寿命的效果明显优于传统的机械喷丸强化技术,激光喷丸有望替代传统机械喷丸技术在材料表面改性强化中获得广泛应用。

关键词 激光技术; 喷丸强化; 残余压应力; 数值模拟

中图分类号 TN249; TG665 **文献标识码** A

Simulation Study on Stress Field after Laser-Peening and Shot-Peening of Sheet Metal

DU Jian-jun, ZHOU Jian-zhong, YANG Chao-jun, NI Min-xiong,

CAO Xiang-guang, HUANG Shu

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

Abstract: On the basis of the principle of laser-peening (LP) and shot-peening (SP), the finite element method (FEM) model of LP and SP are established based on the software ABAQUS. To LP, the switchover loading of laser shock wave is solved; To SP, the assemble between pills and sheet metal is settled. The residual stress in the thickness after one LP and multi-LP and the distribution of residual stress after single pill and multi-pills shot the sheet metal are analyzed. The depth, magnitude of residual stress, the quality of surface and the shape of surface after the LP and SP are compared, respectively. The conclusion is that the effect of improving the employing longevity after LP is better than SP', the LP technique is and will be substitute for the SP technique to change the property of material and widely be used in manufacture.

Key words: laser technique; peening-process; residual compress stress; numerical simulation

1 引 言

激光喷丸是一种利用脉冲激光束冲击金属表面形成一种高幅冲击波,当激光诱导的应力波峰值超过材料的动态屈服极限时,材料发生塑性变形,不可恢复的塑性变形导致材料内残余应力。由于激光诱导的冲击波峰值压力高达 GPa 量级,激光喷丸强化后,在板料表面产生高幅残余压应力,大大提高了材料的

抗疲劳性能和耐腐蚀性能,从而有效延长零件的使用寿命^[1]。机械喷丸强化作为传统的表面处理技术,其实际应用已较为广泛。对于机械喷丸强化残余应力场对材料疲劳性能的实验已经有一定的研究,但用数值模拟的方法对两者进行研究的文献较少。本文用数值模拟的方法对两种喷丸后板料中的应力场分布进行了分析比较,研究了激光喷丸强化的效果。

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: 杜建钧(1979—),男,浙江人,硕士研究生,主要从事塑性成形和模具技术的研究。E-mail: dudreams@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: zhoujz@ujs.edu.cn

2 机械受控喷丸强化

机械受控喷丸是指弹丸依次从喷嘴里射出, 撞击板料表面。如图 1 所示, 弹丸的动能, 部分为受喷工件表层吸收, 引起塑性变形、弹性变形和材料组织的变化。经过机械喷丸后材料表面粗糙度和表面形貌也都有改观, 这是由于弹丸在喷丸过程中使材料表面产生塑性变形、位错和亚晶粒尺寸的变化。

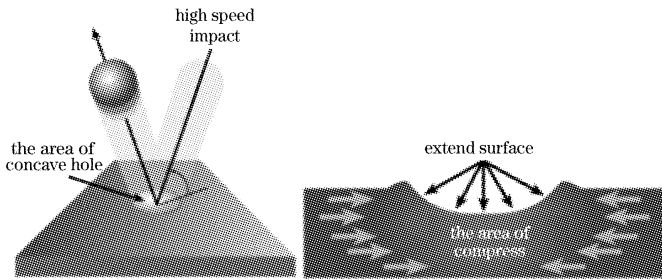


图 1 机械受控喷丸示意图

Fig. 1 Principle of shot-peening processing

3 激光喷丸强化

激光喷丸是一种利用脉冲激光束冲击金属表面形成一种高幅冲击波, 传入工件并使材料产生塑性变形的技术, 如图 2^[1] 所示。在材料表面产生在厚度方向分布的高幅残余压应力, 从而大幅度改进了疲劳性能、断裂韧性以及应力腐蚀抗力。

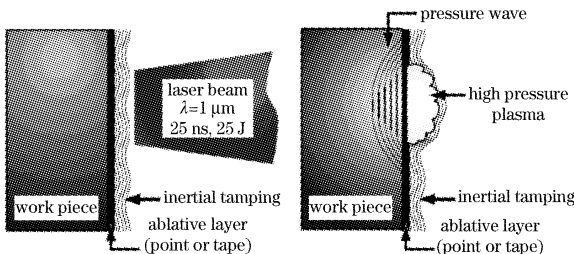


图 2 激光喷丸过程示意图

Fig. 2 Laser-peening process

4 数值模拟

4.1 喷丸模型的建立

机械受控喷丸强化与激光喷丸强化的有限元分析模型采用的是 Johnson-Cook 本构模型, 材料为铝

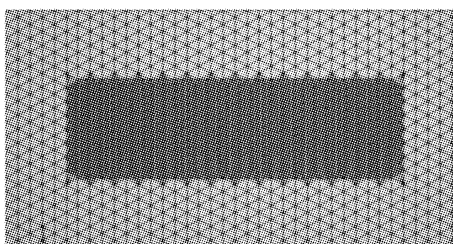


图 3 模型的建立和网格的划分

Fig. 3 Model and partition of gridding

合金 6061-T6, 网格划分如图 3 所示。由于激光斑点趋于圆形, 模拟时选择网格类型为 C3D6, 采用外接近于圆形, 即所加载的区域为正六边形^[2]。为了精确模拟的结果, 对于要喷丸强化的区域进行网格精细化, 对于不需要喷丸强化的地方采用粗糙的网格, 这样即可以得到较准确的结果, 还可以节省计算时间。

4.2 模型的转换

在 ABAQUS/CAE 前处理模块中把刚性弹丸均匀地排列在板料表面上, 如图 4 所示。控制弹丸的上下运动, 即可实现机械单点喷丸和多点喷丸的动态模拟。在软件中按照加载方式预先设置一个振幅曲线, 然后使载荷按照振幅曲线的变化规律进行加载。激光诱导的冲击波的持续时间大约为激光脉冲的 2~3 倍或更高, 模拟中冲击波作用持续时间设定为 100 ns, 峰值压力 P_{\max} 为^[3,4]

$$P_{\max} = \sqrt{\frac{A(\gamma-1)I_0 Z_{t_0} Z_{c_0} \rho}{(2\gamma-1)(K_0 Z_{c_0} + K_c Z_{t_0})}}$$

式中 A 为吸收系数, 在 0.80~0.95 之间; γ 为等离子体的绝热指数, 取 1.67; Z_{t_0} , Z_{c_0} 分别为靶材和约束层材料的声阻抗; K_0 , K_c 分别为与能量吸收和约束层密度有关的参量; ρ 为等离子体的密度, 可以看作是约束层材料、能量吸收层和工件材料气化蒸气的综合体; I_0 为激光功率密度。

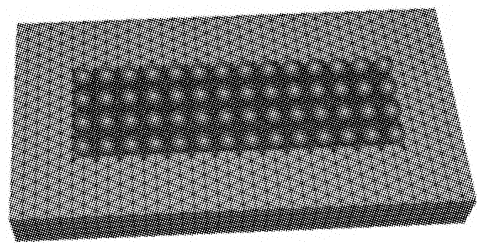


图 4 机械喷丸装配模型的建立

Fig. 4 Assemble model of shot-peening

4.3 模拟结果讨论和分析

在机械喷丸过程中, 弹丸高速撞击工件表面, 相当于众多的微型锤头锤击表层材料, 其锤点也可能相互重叠。图 5(a) 为弹丸第一次撞击后在工件表面上留下的应力分布图, 从图可以看出, 应力主要集中在撞击区域。工件表层的材料在受击部位有辐射状延伸, 应力超过屈服极限, 从而形成永久性变形的凹坑, 在其下一定深度内存在塑性变形层产生沿厚度方向分布的残余压应力, 从而有效提高结构板件的疲劳寿命。图 5(b) 为激光单点喷丸后表面的应力云图, 同样在激光喷丸区表面存在较大的残余压应力。图 6(a), (b) 分别为经机械和激光单点喷丸

后板料厚度方向的应力云图。

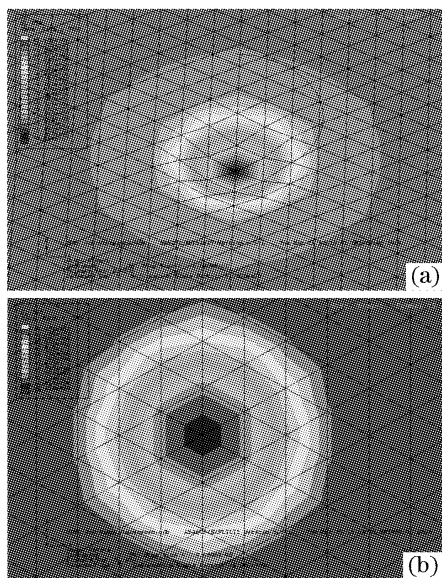


图 5 机械(a)和激光(b)单点喷丸后表面的应力云图
 Fig. 5 Stress on the surface after one shot-peening (a) and laser-peening (b)

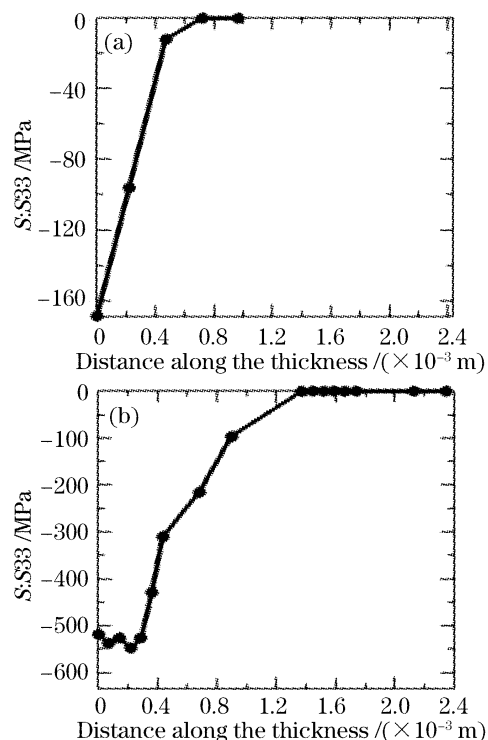


图 7 机械(a)和激光(b)单点喷丸后厚度方向的应力曲线
 Fig. 7 Stress curve in the depth after one shot-peening (a) and laser-peening (b)

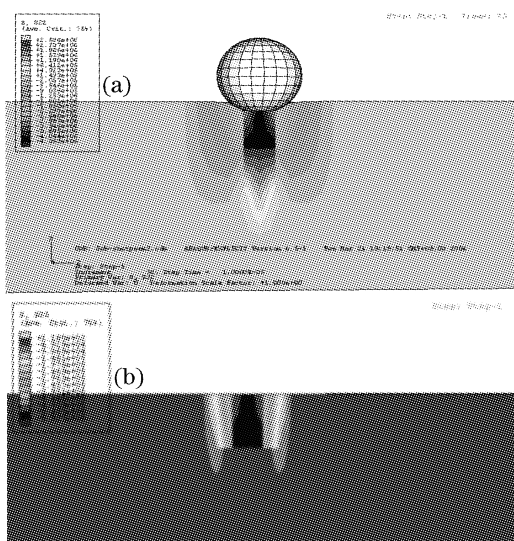


图 6 机械(a)和激光(b)单点喷丸后厚度方向的应力云图
 Fig. 6 Stress in the depth after one shot-peening (a) and laser-peening (b)

由模拟分析结果得到,经过机械单点喷丸后,产生应力深度为 0.3~0.4 mm 左右,最大残余应力值为 -160 MPa 左右,如图 7(a)所示。而经激光喷丸后,产生应力深度达到了 1.2 mm 左右,其最大应力 -500 MPa 左右,如图 7(b)所示,分别为机械喷丸的 3~5 倍,表明激光喷丸后板料产生了更深更大的残余应力,这与已有文献的研究结果相一致^[5,6]。

对于机械受控多点喷丸,主要是控制弹丸的撞击方向,避免在同一点多次重复撞击,而使得工件表面过于塑性变形和破裂,而且能使工件各部件都得到均匀喷射的机会,如图 8(a)。各个弹丸撞击而成的凹坑直径比弹丸直径小。经过机械多点喷丸后,最

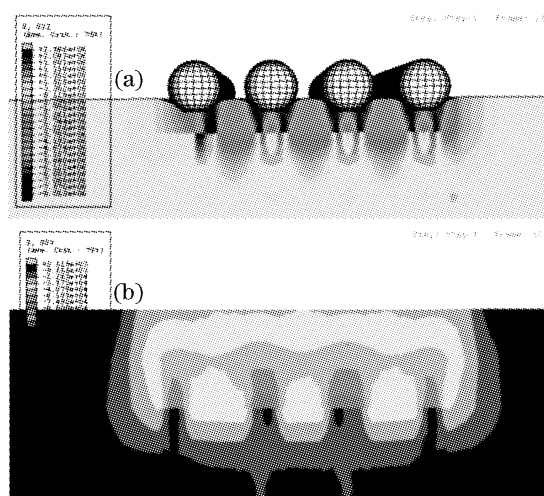


图 8 机械(a)和激光(b)多点喷丸后的截面应力云图
 Fig. 8 Stress in the depth after multi-shot-peening (a) and laser-peening (b)

大残余应力明显增大,达到了 -300 MPa 左右,其应力层深度也达到了 0.45 mm 左右。这说明,在进行机械多点喷丸时,弹丸与弹丸之间有相互影响,彼此增加了应力大小。对板料进行激光连续多点喷丸强化,图 8(b)为激光多点喷丸后的截面应力云图,从图中发现,其最大应力并不是出现在材料表面上,而是在离表面下一定深度(0.25mm 左右),这从厚度方向的应力分布曲线图 9 中得到证实。

图 10(a)为机械喷丸后的板料表面形貌。该图没有经过放大处理,可以发现,经过机械喷丸后,在

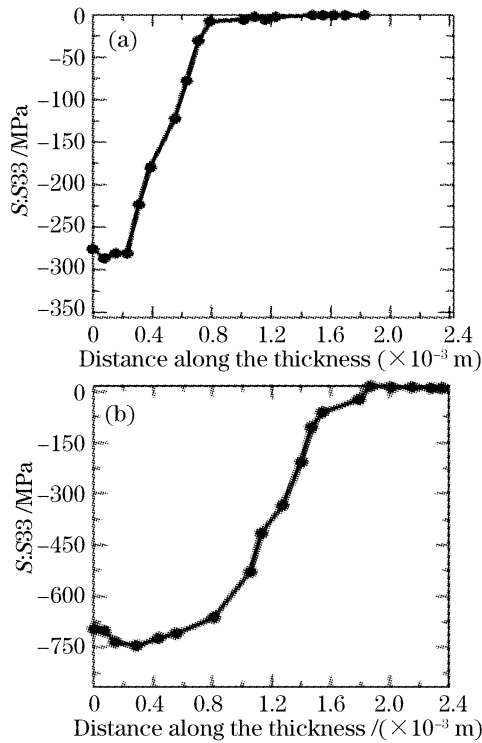


图9 机械(a)和激光(b)多点喷丸后厚度方向的应力曲线
Fig. 9 Stress curve in the depth after multi-shot-peening (a) and laser-peening (b)

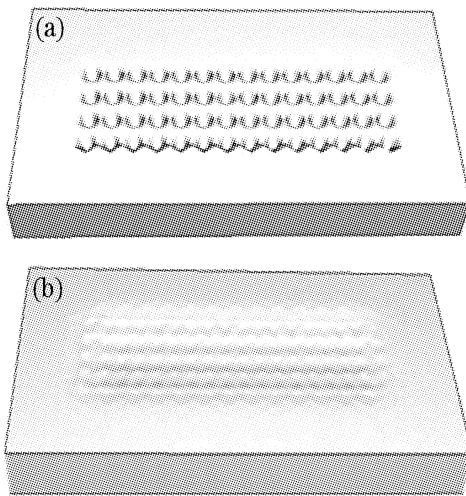


图10 机械(1×)(a)和激光(200×)(b)喷丸后的板料表面形貌

Fig. 10 Shape of surface after shot-peening (a) and laser-peening (b)

材料表面上留下了弹丸的痕迹,表面凹坑比较明显。图10(b)为同样的板料经过激光连续多点喷丸,放

大200倍后的材料表面情况。从图中可以看出,材料表面较为光滑,明显好于机械喷丸后的材料表面情况,说明激光喷丸后的材料表面具有较低的粗糙度。

5 结 论

激光喷丸后残余应力层深度达到1.2 mm左右,其最大残余应力达到-800 MPa左右,而且连续的多次喷丸可产生更高的应力峰值。

机械喷丸强化后在板料厚度上的应力深度不到1 mm,基本上在0.5 mm左右,最大应力值在-300 MPa左右。

激光喷丸后材料表面的粗糙度明显低于机械喷丸后材料表面的粗糙度。

由此可以得出激光喷丸后激光喷丸强化提高材料使用寿命的效果明显优于传统的机械喷丸强化技术,激光喷丸有望替代传统机械喷丸技术在材料表明改性强化中获得广泛应用。

参 考 文 献

- 1 Lloy A. Hackel, Hao-lin Chen. Laser peening—a processing tool to strengthen metal or alloys to improve fatigue lifetime and retard stress-induced corrosion cracking [R]. *Laser Science & Technology*, 2003
- 2 William Braisted, Robert Brockman. Finite element simulation of laser shock peening [J]. *International J. Fatigue*, 1999, **21**: 719~724
- 3 Li Zhiyong, Zhu Wenhui, Chen Jinyi *et al.*. Experimental study of high power pulsed laser induced shock waves in aluminum targets[J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(3): 259~262
李志勇,朱文辉,程经毅等. 实验研究脉冲强激光在铝靶中诱导的冲击波[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(3): 259~262
- 4 Zhou Jianzhong, Zhang Yongkang, Zhou Ming *et al.*. Theoretical analysis on deformation of sheet metal under one laser shot loading [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 135~138
周建忠,张永康,周明等. 单次激光冲击下板料变形的理论分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 135~138
- 5 Charles S. Montross, Wei Tao, Ye Lin *et al.*. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review [J]. *International J. Fatigue*, 2002, **24**: 1021~1036
- 6 Du Jianjun, Zhou Jianzhong, Yang Chaojun *et al.*. Numerical simulation of laser peen forming based on ABAQUS[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(Suppl.): 419~422
杜建钧,周建忠,杨超君等. 基于ABAQUS的板料激光喷丸成形的数值模拟[J]. *中国激光*, 2006, **33**(Suppl.): 419~422