

文章编号: 0258-7025(2007)05-0728-05

激光喷丸后板料表面微观形貌的 可视化数值研究

周建忠, 杜建钧*, 黄 舒, 杨超君, 倪敏雄, 曹向广

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 对不锈钢 SUS304 板料进行了激光喷丸成形的可视化数值模拟分析和实验研究。以有限元分析软件 ABAQUS/CAE 为平台,通过建立的激光喷丸过程冲击波加载的转换模型,把脉冲激光能量转换成冲击波压力,利用用户子程序解决了脉冲激光束连续逐点喷丸板料变形的轨迹控制,实现激光喷丸板料动态变形过程的可视化。通过所建立的模型,对脉冲激光喷丸后材料表面的微观塑性流动过程进行了分析,研究了表面微观形貌的变化。

关键词 激光技术;脉冲激光束;表面微观形貌;可视化数值模拟

中图分类号 TN 249;TG 665 **文献标识码** A

Visual Numerical Study on Surface Micro-Topography of Sheet Metal by Laser Peening

ZHOU Jian-zhong, DU Jian-jun, HUANG Shu,

YANG Chao-jun, NI Min-xiong, CAO Xiang-guang

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

Abstract Visual numerical simulations and experiments of laser peen forming on stainless SUS304 sheet metal are done. Based on the finite element analysis software ABAQUS/CAE, the conversion model during laser peen forming of laser shock wave loading is founded, by which the pulsed laser energy is converted to shock wave pressure. The tracks controlling of sheet metal deforming by pulsed laser continuous peening is solved with user subprogram. The dynamic deforming process of sheet metal by laser peening is visualized. With the above model, the micro plastic fluid process of the sheet metal after pulsed laser peening is analyzed, and the variation of surface micro-topography is studied.

Key words laser technique; pulsed laser beam; surface micro-topography; visual numerical simulation

1 引 言

金属板料成形技术一直是国内外学者研究的热点,其传统的模具冲压成形存在生产准备时间长、加工柔性差、模具费用大等缺点,而激光喷丸成形技术是将机械喷丸成形和激光冲击强化两者结合起来形成的一种新颖的板料塑性成形技术,它利用高能短脉冲激光诱导的冲击波压力作用于金属板料表面,

在材料表面及内部产生深层分布的残余压应力场而使板料成形的技术。具有工艺装备简单、生产周期短、加工柔性大、成形工艺可控等优点。2002 年 6 月,美国加利福尼亚大学 Lawrence Livermore 国家实验室的 Hackel 等在申请的美国专利^[1]中提出了激光喷丸成形的概念,国内江苏大学对激光喷丸成形技术进行了初步的研究。

由于激光喷丸过程涉及激光诱导等离子体的产

收稿日期:2006-09-08;收到修改稿日期:2006-12-08

基金项目:国家自然科学基金(50475127,50675090),教育部科学技术研究重点项目(204052),国防航空基金(02H52053)和江苏省自然科学基金(BK2004063)资助课题。

作者简介:周建忠(1964—),男,江苏无锡人,教授,博士生导师,主要从事激光新技术应用和模具设计制造新方法研究。
E-mail:zhoujz@ujs.edu.cn

* 通信联系人。E-mail:dudreams@163.com

生、冲击波的传播和衰减、材料的动态塑性变形和残余应力理论等众多学科,影响喷丸成形的因素较多,因此采用数值模拟方法来分析激光喷丸过程,指导实验是一种公认的有效手段。美国 Dayton 大学的 William Braisted 等学者进行了单次激光喷丸强化的有限元模拟,对激光喷丸诱导的应力大小及其分布进行了预测^[2]。但对于多点激光连续喷丸下板料成形过程及表面质量的数值模拟,国内外学者研究较少。本文在实验的基础上,用数值模拟方法进行了该方面的研究,主要分析了喷丸后板料表面形貌的变化情况,并对模拟结果与实验进行了比较。

2 数值模拟分析

激光喷丸成形的数值模拟需要解决材料本构模型的选择、模型的建立和网格划分、激光冲击波压力的加载方式、模拟结果的后处理,以及激光连续喷丸成形动态模拟过程的实现等技术问题。

2.1 模型的建立

模拟时选用的材料为不锈钢 SUS304,几何尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 。图 1 为所建立的方形板料的有限元网格模型^[3]。考虑到激光喷丸过程中冲击波压力的高应变率加载特征,数值模拟时选择包含应变率效应的 Johnson-Cook (JC) 模型作为材料的本构模型,网格类型为 C3D6。模拟采用的激光能量为 35 J 左右,光斑直径为 7 mm,光斑的加载区域为正六边形,接近于圆。对模型约束的边界条件为: $U_x = 0, U_{xz} = 0; U_z = 0, U_{zx} = 0$,其 y 方向处于自由状态^[3]。

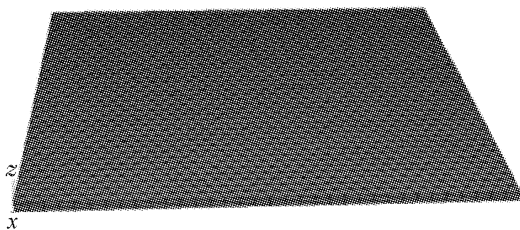


图 1 模型的建立和网格的划分

Fig. 1 Finite element mesh of sheet metal

2.2 激光冲击波加载的转换模型

对于激光冲击波压力的加载,根据激光器所激发的激光脉冲的波形,在软件中预先设置一个冲击波压力随时间变化的曲线,如图 2 所示,然后使载荷按照振幅曲线的变化规律进行加载。根据已有的文献研究^[4],激光诱导的冲击波压力持续时间约为激光脉冲的 2~3 倍或更高,故模拟中冲击波压力的作

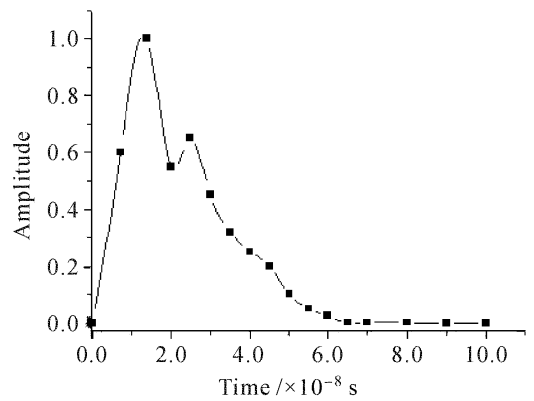


图 2 冲击波加载曲线

Fig. 2 Curve of laser shock wave loading

用持续时间设定为 100 ns,而激光冲击波峰值压力的估算式为^[5]

$$p_{\max} = \sqrt{\frac{A(\gamma-1)I_0 Z_0 Z_{c0} \rho}{(2\gamma-1)(K_0 Z_{c0} + K_c Z_0)}}$$

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_0, Z_{c0} 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。

2.3 脉冲激光束连续加载过程的实现

板料激光喷丸成形过程是一个高度非线性的瞬时动态事件,在进行多点连续喷丸时,第一个点模拟喷丸结束后,进行第二点模拟喷丸,这样以此类推,其模拟采用的激光喷丸头是间隙跳动的,间隔时间为 75 ns,移动步距为 7 mm(即光斑直径),当所有轨迹喷丸完成后,将数据导入到 ABAQUS/Standard 中进行回弹和残余应力分析。该模拟过程与实验过程基本吻合,实验时脉冲激光束对板料进行连续喷丸结束后,把板料从夹具上取下,相当于模拟中的回

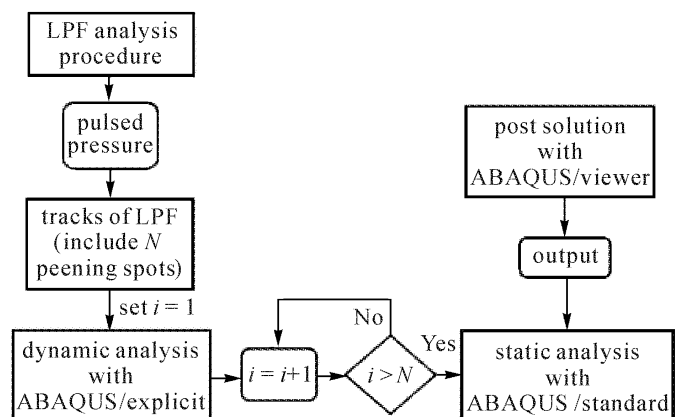


图 3 脉冲激光连续喷丸流程图

Fig. 3 Flow chart of pulsed laser continuous peening

弹分析。脉冲激光连续喷丸成形模拟的分析过程如图 3 所示^[6]。

2.4 模拟结果的讨论和分析

为了比较喷丸面与未喷丸面的形貌,对方形板料进行部分连续逐点喷丸,模拟时所用的激光光斑大小为7 mm,光斑间距为7 mm(即光斑搭接),直线喷丸轨迹(排与排之间)的间距为10 mm,脉冲激光能量为35 J。图 4(a)为板料左侧被激光逐点喷丸后在纵向放大 10 倍的表面状况。从中可以清楚地看出喷丸的轨迹,而且板料已经开始向上拱。为了更清楚地观察,放大纵向的尺寸,图 4(b)为放大 500 倍的表面状况图,可以清楚地看出板料在喷丸区是凸凹不平的。

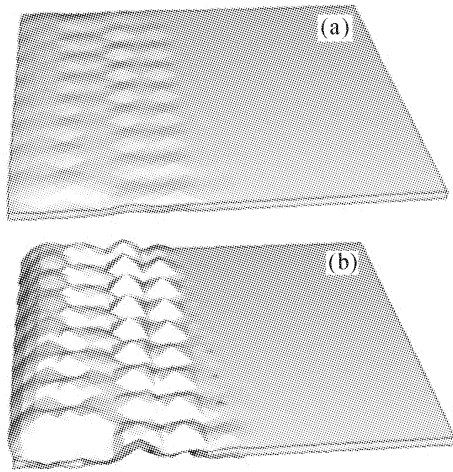


图 4 板料进行部分喷丸后表面情况的比较
(a) 放大 10×; (b) 放大 500×

Fig. 4 Comparison between peened area and unpeened area

(a) zoom out 10×; (b) zoom out 500×

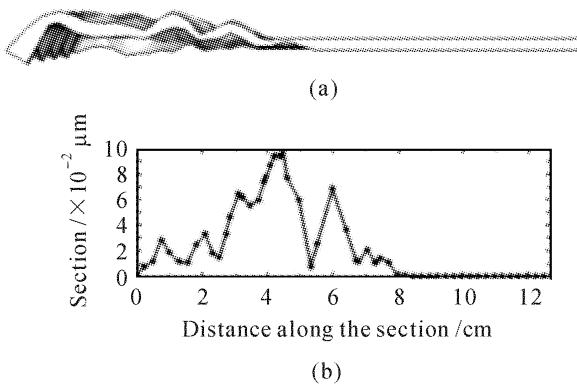


图 5 局部喷丸的截面分析

(a) 截面图(500×); (b) 截面轮廓曲线(500×)

Fig. 5 Section analysis after local peening

(a) section picture (500×); (b) section figure curve (500×)

对放大 500×后的板料进行截面分析,图 5(a)为剖面轮廓曲线,图 5(b)为提取的轮廓截面线,可

以发现喷丸面与未喷丸面的板料表面有明显的区别,喷丸面材料发生了微观塑性变形。

图 6(a)为对板料进行全面喷丸后的变形图,从未放大的变形图上可以看到,板料在宏观上变形量是比较平缓的。为了研究板料变形后材料表面的形貌,对图 6(a)所标记的区域放大 500×,如图 6(b)所示,可以发现在板料的表面有微突起。这是因为当激光诱导的冲击波的压力大于材料的动态屈服极限时,材料发生屈服变形,又由于受喷板料的应力主要集中在激光喷丸区域,造成板料局部受力不均匀,导致板料表面的材料晶格相互挤压,扭曲畸变产生微变形。

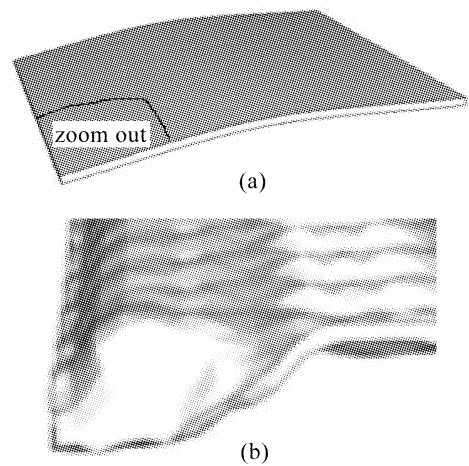


图 6 板料进行全面喷丸

(a) 没有放大; (b) 放大 500×

Fig. 6 Sheet metal after full peening

(a) no zoom; (b) zoom out 500×

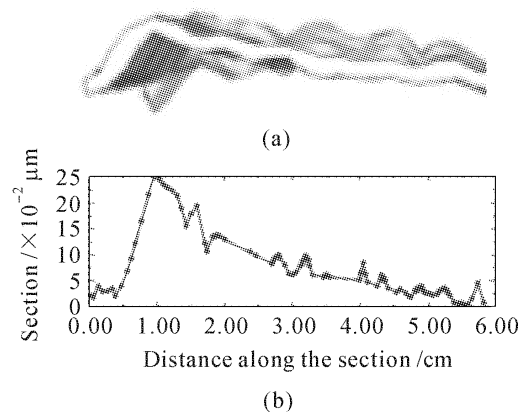


图 7 板料经全面喷丸的截面分析

(a) 截面图(500×); (b) 表面轮廓曲线(500×)

Fig. 7 Section analysis after full peening

(a) section picture (500×); (b) section figure curve (500×)

图 7 为板料经全面喷丸后放大的截面轮廓图,虽然板料微观轮廓局部不是很平滑,但从提取的截面曲线图 7(b)上看,在整个喷丸表面的长度方向,

其崎岖不平最大相差 $0.25\ \mu\text{m}$,在误差范围内还是比较理想的。

3 实验分析

采用和数值模拟相同尺寸的金属板料进行激光喷丸的实验研究。实验是在由中国科学技术大学和江苏大学联合研制的重复频率高功率钕玻璃激光冲击波系统上进行的,输出的激光波长为 $1.06\ \mu\text{m}$,脉冲能量为 $35\sim 50\ \text{J}$,脉宽为 $23\ \text{ns}$,重复频率为 $0.5\ \text{Hz}$,实验采用的有效光斑直径为 $7\ \text{mm}$ 左右,输出的光斑图和激光脉冲的波形分别如图 8 和图 9 所示。

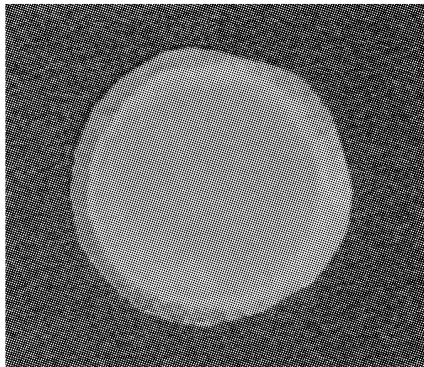


图 8 输出光斑图
Fig. 8 Facula of laser

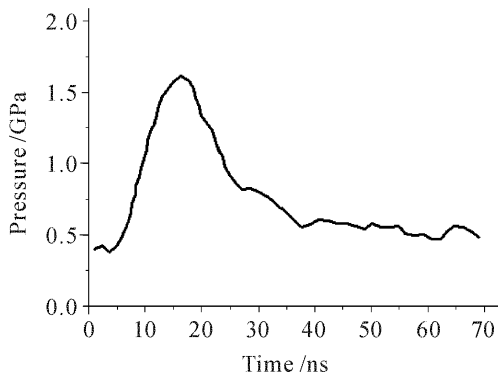


图 9 输出激光脉冲波形图
Fig. 9 Laser pulse waveform

实验所用材料为与模拟相同的不锈钢 SUS304,经过激光喷丸的板料在原子力显微镜 (AFM)下观察其材料表面结构的变化,图 10 为原子力显微镜统计结果所得到的板料表面形貌,可以发现其表面微观崎岖不平。这是由于随着激光喷丸过程的进行,板料中产生的应力不断累加,直至克服材料的屈服强度,发生了微观塑性变形。从图 10 中也可以看出板料左面变形比较严重,这是因为左边板料是最先喷丸的,所以累加的应力最大,变形也最

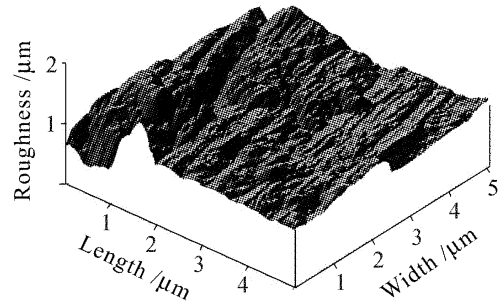
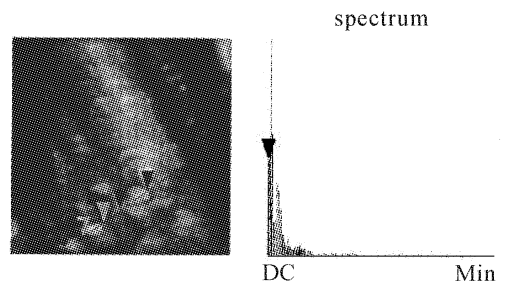
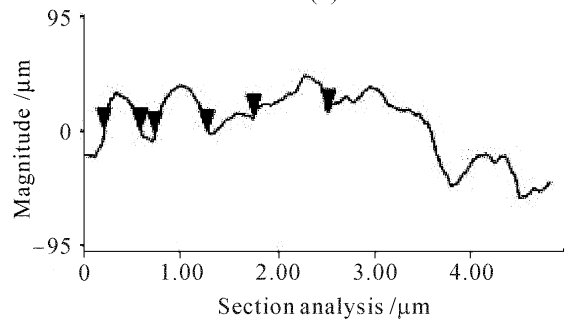


图 10 原子力显微镜观察的板料表面微观情况
Fig. 10 Surface micro-topography of material with atomic force microscope (AFM)



(a)



(b)

图 11 原子力显微镜截面分析
Fig. 11 Section analyses with AFM

大,与模拟时发生的情况相吻合。

为了观察表面的局部形貌,对图 11(a)所示的局部区域进行截面剖析,从原子力显微镜观察的结果可以发现,板料经过激光喷丸后,其表面在微观上有崎岖不平的现象,如图 11(b)所示,其最高凸点与最底凹点间的位移差为 $0.1\ \mu\text{m}$ 左右,这与图 5(b)的模拟结果基本一致。

4 结 论

经过对试样板料进行激光连续喷丸的可视化数值分析和实验研究,可以得到以下结论:

- 1) 板料在脉冲激光连续喷丸下,材料表面晶粒产生滑移和扭曲,发生微观塑性变形使得激光喷丸后的材料表面呈现微观不平度。
- 2) 可视化数值模拟结果和实验基本吻合,表明

可以用数值模拟的方法来预测各种工艺参数条件下激光喷完后板料表面的微观形貌状况,为激光喷丸过程参数优化和表面质量的有效控制研究提供理论依据。

3) 激光喷丸后板料表面的质量状况与激光能量和板料本身的属性有关,为此必须建立相关材料性能和激光喷丸工艺参数数据库,从而有效控制激光喷丸的表面质量。

参 考 文 献

- 1 Lloyd A. Hackel, Hao-Lin Chen. Laser peening—A processing tool to strengthen metals or alloys to improve fatigue lifetime and retard stress-induced corrosion cracking [R]. *Laser Science and Technology*, 2003, 1
- 2 William Braisted, Robert Brockman. Finite element simulation of laser shock peening [J]. *International Journal of Fatigue*, 1999, 21(7):719~724
- 3 Du Jjianjun, Zhou Jianzhong, Yang Chaojun *et al.*. Application of ABAQUS in simulation process of laser peen forming of sheet metal [J]. *Applied Laser*, 2005, 25(6):371~373
杜建钧,周建忠,杨超君等. ABAQUS在板料激光喷丸成形模拟过程中的应用[J]. *应用激光*, 2005, 25(6):371~373
- 4 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
- 5 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
- 6 Du Jianjun, Zhou Jianzhong, Yang Chaojun *et al.*. Numerical simulation of laser peen forming based on ABAQUS [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, 33(增刊):419~422
杜建钧,周建忠,杨超君等. 基于 ABAQUS 的激光喷丸成形数值模拟[J]. *中国激光*, 2006, 33(Suppl.):419~422

征 订 启 事

第八届全国激光加工学术论文集——《中国激光》2007年增刊,将于2007年3月出版。论文集较全面地反映了近年来我国激光加工技术研究、应用和产业化的最新成果,包括激光连接(焊接、钎焊),激光去除(切割、打孔、清洗、抛光等),激光强化(合金化、熔覆、沉积等),激光制备新材料,激光快速成形与激光快速制造,激光复合加工技术,激光微纳米技术,激光加工新技术与新应用,激光加工过程检测与控制,新型激光器件与光加工系统等领域,作者来自于国内近40个大专院校、科研机构和企业。是广大激光加工领域工作者的非常有价值的参考资料。

论文集约400页,定价100元,进口雅光纸精印,光盘版定价80元,欢迎读者订阅。

联系人:高先生 电 话:021-69918253