

文章编号: 1001-3806(2007)06-0656-03

基于有限元模拟的激光喷丸成形正交优化设计

曹向广, 周建忠*, 袁国定, 杜建钧, 倪敏雄
(江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

摘要: 影响激光喷丸成形中板料最终成形形状的工艺参数众多, 为了达到需要的板料变形量及残余应力层深度, 必须对各工艺参数进行优化控制。利用正交表设计了主要的激光器和板料参数, 并用 ANSYS/LS-DYNA 模拟了全部情况。采用极差法对数值计算结果进行分析, 得到了各因素的主次关系以及较优的参数水平组合。结果表明, 利用正交法对激光喷丸成形工艺参数进行优化设计可以有效控制残余应力形态, 从而控制板料变形, 对试验具有重要的指导意义。

关键词: 激光技术; 参数优化; 正交法; 激光喷丸成形
中图分类号: TN249 TG386 文献标识码: A

Orthogonal optimum design of laser peen forming based on finite element simulation

CAO Xiang-guang, ZHOU Jian-zhong, YUAN Guo-ding, DU Jian-jun, NI Min-xiong
(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract The process parameters in laser peen forming (LPF) have great impact on the forming shape of the processed metal sheet. In order to gain desired deformation volume and certain depth of residual stress, it is essential to optimize and control these parameters. In this paper, the orthogonal layout was used to design the main parameters of laser and the sheet. And all the situation was simulated by the ANSYS/LS-DYNA. The numerical results was studied by range analysis method. It was indicated that the optimum design of the parameters in laser peening process by orthogonal method can effectively control the residual stress modality and constructively conduct the experiments.

Key words laser technique; parameter optimization; orthogonal method; laser peen forming

引 言

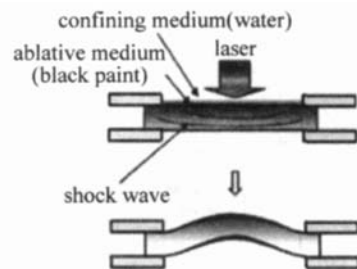
激光喷丸成形 (laser peen forming, LPF) 是利用激光诱导的高幅冲击波的力效应在金属板料表面及厚度方向形成一定分布的残余应力场, 适度的应力场分布形态对应着一定曲率的板材形状, 通过控制应力场分布形式, 实现板材的精密弯曲成形^[1, 2]。对于不同的成形对象, 需要的激光器能量及其它参数也不同, 这就涉及到激光参数和板料尺寸的优化问题。正交表设计法是常规的优化设计方法, 又是应用最为广泛的一种方法, 能科学地安排与分析多因素组合, 通过选择一部分有代表性的试验方案, 利用得到的模拟或试验数据, 分析出正确的结论, 分析影响因素的主次因素与结果指标的关系, 得出较好的生产条件及进一步模拟或试验的方向。正交表设计的好坏直接影响喷丸成形工艺

参数的设计和确定。影响激光喷丸成形的主要因素有激光功率密度, 脉冲能量, 脉宽, 光斑直径, 约束层材料及厚度, 能量吸收层材料及厚度, 板料力学性能、几何形状、尺寸大小及厚度。

作者在综合多个因素对喷丸成形效果的影响的基础上, 借助于具有一定精度的有限元模拟代替试验, 利用优化设计方法控制和确定各工艺参数, 以期达到所需的板料板料变形形状和变形量, 同时对各因素间交互作用对成形效果的影响进行了分析。

1 激光喷丸成形物理模型

如图 1 所示^[3], 激光喷丸成形物理模型描述如下:



基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50475127)

作者简介: 曹向广 (1982), 男, 硕士研究生, 现主要从事激光板料成形方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhouj@ujs.edu.cn

收稿日期: 2006-09-29; 收到修改稿日期: 2006-10-31

Fig 1 Physics model of the LPF

工件用两边分别用夹板约束, 高功率短脉冲激光束辐照覆盖有约束层和能量吸收层的工件表面。吸收层吸收激光能量温度升高气化, 气化后的蒸汽在高温高压条件下发生电离形成等离子体, 等离子体继续吸收能量发生爆炸向外喷射, 形成一动量脉冲, 故在约束层的作用下产生向板料内部传播的强冲击波^[4-6]。激光喷丸成形就是利用冲击波的力效应在板料内部形成应力场, 应力累积到一定程度释放, 板料便发生相应的三维弯曲变形。

当沿着不同的路径进行喷丸时, 相邻喷丸点形成的弯矩相互抵消, 引起了弯矩在不同方向的增减, 当弯矩叠加增加到足够大时, 板料就会发生宏观变形, 见图 2。

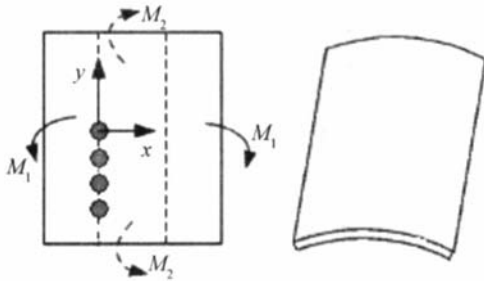


Fig 2 Peened trace and deformation shape

2 工艺参数的正交设计

激光喷丸成形中的激光参数主要有功率密度 I_0 、脉宽 τ 激光能量 E 、光斑尺寸 d 等。其相互关系为: $E = \pi d^2 \tau I_0 / 4$ 。当约束层和吸收层材料确定后, 激光功率密度就成为影响冲击波峰值的主要因素。为了使每次冲击均能在材料中形成残余应力或对已有的残余应力场产生影响, 冲击波的峰值压力必须大于一定的阈值, 即冲击波峰值压力必须超过材料在冲击瞬时应变速率条件下的动态屈服强度。并且这个阈值还必须考虑材料在激光连续冲击下所发生的塑性硬化效应。因此, 激光喷丸成形过程中各工艺参数的组合首先要满足这个条件, 然后在此条件下及激光器等物理条件允

许的参数范围内进行优化组合。可以根据下式对激光最小功率密度进行估算(单位为 GW / cm^2)^[7]:

$$I_{\min} = 100(2\alpha + 3)(2t\sigma_y / d_{\max})^2 / (Z \cdot \alpha) \quad (1)$$

式中, σ_y 板料的动态屈服强度; t 为板料的厚度; d_{\max} 为单次激光冲击时的最大尺寸; α 为内能转化为热能部分的系数, 一般取 $0.1 \sim 0.2$ Z 为折合声阻抗。

作者将板料单次喷丸后形成的残余压应力的大小作为参数优化指标。选择激光脉冲能量, 脉冲宽度, 光斑直径以及板料厚度 4 个主要因素作为设计参数, 在符合参数范围内选取差别较大的两水平, 得到喷丸成形各因素水平见表 1。对于不同的材料, 材料的屈服强度与形成的残余压应力大小有很大关系, 但一般规律是压应力随材料屈服强度增大而降低, 本文中只考虑同一种材料在激光喷丸时的各因素对应力场的影响。

Table 1 Factor level of the LPF

factor	laser energy	spot diameter	pulse duration	thickness of
	A / J	B / mm	C / ns	sheet D / mm
1	15	6	18	2
2	35	12	23	3

3 数值模拟计算

数值模拟选取常用的 2024-T6 航空铝合金材料, 为保证各参数组合间的可对比性, 在有限元模拟中采用相同的材料参数, 模型长宽比以及网格划分精度, 相同的约束条件和加载区域, 不同的是板料厚度以及各组激光参数决定的载荷值。模拟使用 ANSYS/LS-DYNA 软件, 采用弹塑性本构模型, 板料两边约束, 单列 4 点冲击, 冲击波峰值压力随各组合的参数选取不同而变化。最终的优化目标为板料压应力, 以较大值为佳。

利用前述的数值模拟方法, 在 2mm 及 3mm 的板料上计算不同激光工艺参数组合所产生的厚度方向残余压应力的大小。正交表中的 8 组参数组合数据见表 2。

Table 2 Designed orthogonal layout and simulation results

number	A	B	A × B	C	A × C	B × C	D	results / MPa
1	1	1	1	1	1	1	1	807
2	1	1	1	2	2	2	2	714
3	1	2	2	1	1	2	2	406
4	1	2	2	2	2	1	1	359
5	2	1	2	1	2	1	2	1210
6	2	1	2	2	1	2	1	1080
7	2	2	1	1	2	2	1	617
8	2	2	1	2	1	1	2	546
K_1	2286	3802	2684	3040	2839	2922	2863	$\Sigma = 5739$
K_2	3453	1928	3055	2699	2900	2817	2876	
R	291.75	468.5	92.75	85.25	15.25	26.25	3.25	

由各参数所决定的冲击波的峰值压力可由以下公式得出^[8]:

$$P_{max} = \sqrt{\frac{X(\gamma-1)I_0Z_0Z_{c0}\rho}{(2\gamma-1)(k_aZ_{c0}+K_cZ_0)}} \quad (2)$$

式中, X 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_a , K_c 分别为与能量吸收层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。

得到各组参数的冲击波峰值压力后, 将其按激光脉冲波形进行逼近, 得到近似的激光脉冲压力加载曲线, 施加在对应参数组的板料上, 用 LS-DYNA 进行冲击显示动力运算, 用 ANSYS 进行静态隐式应力平衡分析。冲击加载将在板料内形成应力场, 而进行应力静态平衡分析后, 板料内部的应力场将产生完全的或绝大部分的释放, 同时板料发生上凸的弯曲变形。图 3

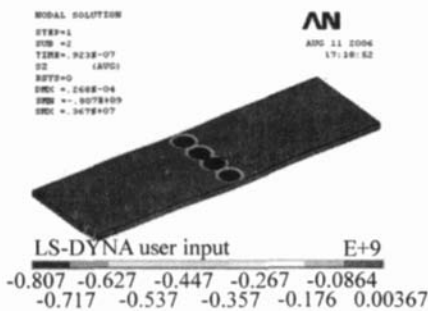


Fig 3 Load zone and sheet surface stress after explicit dynamic analyse

所示为板料冲击加载区域及第 1 组数据参数条件下先进行显示动力运算得到材料内部应力场形态, 再将模型和结果转入隐式静力进行平衡分析得到板料最终变形形状 (见图 4)。文中优化目标所对应的残余应力是板料进行隐式释放前的压应力, 即显示冲击后直接得到的应力, 此应力场的形态将决定释放后板料的变形形状。



Fig 4 Sheet deformation after implicit static analyse

4 结果分析

将八组参数分别进行模拟, 模拟得出的板料表面残余压应力值填入表 2 中。

表中, R 为各列的极差, 即各列中 K_1, K_2 最大值与

最小值之差。 K_1, K_2 为各列参数水平分别为 1, 2 时对应的优化目标值之和。极差的大小反映了该列所排因素选取不同的水平变动对指标的影响大小^[9, 10]。根据极差栏 R 数据可知, A 列 (脉冲能量) 和 B 列 (光斑直径) 较大, 分别为 291.75 和 486.5, 即对于最大残余压应力这一指标而言 (以最大为佳), 4 个因素中, 影响最大的因素为 B , 以第 1 水平为好 (由 K_1, K_2 判断); 其次是因素 A , 以第 2 水平为好; 第 3 因素是 C , 以第 1 水平为好, 影响最小的因素是 D , 以第 2 水平为好。

交互因素可以作为一个假想的因素来处理, 但没有实际水平可言, 只能说取何种水平搭配好。通过计算两因素所有搭配组合下的平均值来确定。本例中考虑因素间的交互作用, 交互列 $A \times B$ 的影响大于因素 C , 交互列 $A \times C, B \times C$ 的影响大于因素为 D 。各因子主次关系及较优的水平搭配为: $B_1A_2A_2 \times B_1C_1B_1 \times C_1A_2 \times C_1D_2$ 。最终得到选取的 4 个因素优化后的参数水平组合为 $A_2B_1C_1D_2$ 。

在上述 4 因素及 3 个交互列中, 光斑直径的大小变动对优化指标的影响最大, 以较小值为好, 这是因为光斑直径和激光功率密度相关, 在激光器系统中, 光斑直径的调节并不是简单的增大或缩小, 光斑直径增大后, 导致板料上光斑作用区单位面积上的激光能量减小, 引起最终板料表面应力值的下降, 因此较小的光斑直径将对应高的板料表面压应力; 其次是激光能量, 以较大值为好。激光能量是影响喷丸表面残余压应力最重要的因素, 这里排在第 2 位只是说明在激光能量可调节范围内的变动对指标的影响不及光斑直径的变动。同理, 板料厚度因素 D 在小范围内的变化对指标的影响最小。因此在对各参数进行选取时, 要考虑参数的变化范围, 在以后进一步的优化设计中要充分注意。

5 结 论

利用正交试验方法, 结合有限元模拟, 以板料表面压应力值为目标对激光器的 3 个主要参数 (激光脉冲能量 A 、脉宽 B 、光斑直径 C) 以及 1 个板料参数 (厚度 D) 进行了主次因素分析及参数水平优化, 得出了较优水平组合。最后对其它相关影响因素进行了探讨。根据正交试验数据处理结果, 可以得出如下结论: (1) 4 因素中光斑直径的变化对材料表面压应力值的影响最大, 其次是激光能量和脉冲宽度。板料厚度的变化 (薄板范围内) 在 4 个因素中对结果的影响最小。较优水平组合为 $A_2B_1C_1D_2$ 。(2) 对于本例所选的 4 个参数, 各因素间的交互作用对结果的影响并不明显, 其中激光能量和光斑直径两个因素的交互作用较大, 但仍低

(下转第 662 页)

靶上的能量随 Z 增大变少, 冲量耦合系数的峰值也随之减小。

4 结 论

(1) 不同离焦情况下 C_m 和 $E(I)$ 的变化关系类似, 在 I 增大过程中, 开始 C_m 随 I 增大而增大, 到达最大值后随 I 增大而减小。出现此种变化的主要原因是功率密度足够大时出现了等离子体屏蔽效应。

(2) $x=0.061$ 处最佳功率密度小于焦斑位置, 主要是由于在焦斑位置除受等离子体屏蔽效应之外, 稀疏波的作用要强于 $x=-0.061$ 处。

(3) $x=-0.061$ 处和 $x=0$ 处 C_m 峰值对应能量接近, $x=0.061$ 处 C_m 峰值对应能量明显升高, 但 C_m 峰值在三者中最小。这主要由于 $x>0$ 处, 激光和靶的作用机制不同, 发生在焦斑处的空气击穿, 使能量耗散在空气中部分增大, 导致 C_m 峰值较 $x\leq 0$ 时小。

参 考 文 献

- [1] ARAD B, ELIEZER S, GAZIT Y *et al*. Burn-through of thin aluminum foils by laser-driven ablation [J]. J A P, 1979, 50(11): 6817~6821.
- [2] ROSON D, MITTELDORF I J, KOTHANDARAMAN G. Coupling of pulsed $0.35\mu\text{m}$ laser radiation to aluminum alloys [J]. J A P, 1982, 53(8): 3190~3220.
- [3] MAN B Y, WANG X T. In-pulse coupling to HgCdTe by a pulsed laser [J]. Acta Optica Sinica 1998, 18(8): 1010~1014 (in Chinese).

- [4] PHIPPS C R, LUKE J R, LPPERT T *et al*. Micropropulsion using laser ablation [J]. Appl Phys 2004, A79(4~6): 1385~1389.
- [5] SCHALL W O, BOHN W L, ECKELEL H A. Lightcraft experiments in Germany [J]. Proc SPIE, 2000, 4065: 472~481.
- [6] HORISAWA H, KAWAKAMI M, KMURA I. Laser-assisted pulsed plasma thruster for space propulsion applications [J]. Appl Phys 2005, A81(2): 303~310.
- [7] MA F J, TIAN Y W, HE F F *et al*. Ultra-short pulse laser induced damage in transparent materials [J]. Laser Technology, 2004, 29(5): 207~210 (in Chinese).
- [8] QIN H, ZHENG R E, YANG A L. Influence of moist environment on the ablation threshold of copper [J]. Laser technology, 2003, 27(6): 497~499 (in Chinese).
- [9] LIU Ch L, LO F, LU X F *et al*. Investigation of incident laser absorption by vapor plume [J]. High power laser and particle beams 1990, 2(3), 366~371 (in Chinese).
- [10] PRR I A N. Momentum transfer and plasma formation above a surface with a high power CO_2 laser [J]. Physics Fluids 1973, 16(9): 1435~1440.
- [11] WALTERS C T, BAGNES R H, BEVERLY R E. Initiation of laser-supported-detonation (LSD) waves [J]. J A P, 1978, 49(5): 2937~2949.
- [12] LIU J NIX W, HE A Zh. Physics of laser material interaction [M]. Beijing Machinery Industry Press 1996: 65~68 (in Chinese).
- [13] ELLIOT L K, STANANLEY R B. Measurement of subsonic laser absorption wave propagation characteristics at $10.6\mu\text{m}$ [J]. J A P, 1974, 45(11): 4751~4759.
- [14] PHIPPS C R, Jr, TURNER T P, HARRISON R F *et al*. In-pulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF, and CO_2 single-pulse lasers [J]. J A P, 1988, 64(3): 1083~1096.

(上接第 658 页)

于这两个因素单独作用的影响。而激光能量和脉宽、光斑直径和脉宽的交互作用影响较小, 在进一步的参数优化设计可以忽略不计。(3) 除以上因素外, 激光冲击次数、约束层及吸收层的厚度和材料均与喷丸后板料表面压应力大小密切相关。其中冲击次数不仅影响了表面残余压应力的大小, 还使得材料内部残余压应力所达到的深度以及深度方向的应力值均得到增加。约束层能有效地提高激光诱导的冲击波的峰压值, 吸收层保护工件烧蚀的同时提高了激光吸收率。进一步的优化中, 在分析主要参数的同时要综合考虑其他因素的影响。

参 考 文 献

- [1] HACKEL L, HARRIS F. Contour forming of metals by laser peening [P]. USA: WO01/05549A2 2002-06-25.
- [2] HACKEL L A, CHEN H L. Laser peening—a processing tool to strengthen metals or alloys to improve fatigue lifetime and retard stress-induced corrosion cracking [R]. New York: Laser Science and Technology 2003. 1058~1061.
- [3] FAN Y, WANG Y, VUKELIC S. Wave solid interactions in laser

- shock-induced deformation processes [J]. J A P, 2005, 98(10): 1~11.
- [4] WANG G L, ZHOU J Zh, YANG Ch J. Application of laser induced shock wave in surface modification and forming of sheet metal [J]. The Transaction of Agriculture Engine 2005, 36(12): 148~152 (in Chinese).
- [5] ZHANG X Q, ZHOU J Zh, GU Y Y. Research on technology of metal plate plastic forming by laser shot peening [J]. Journal of Lanzhou University of Technology 2006, 32(2): 31~33 (in Chinese).
- [6] OROS C. Investigations involving shock waves generation and shock pressure measurement in direct ablation regime and confined ablation regime [J]. Shock Waves 2002, 11(5): 393~397.
- [7] ZHOU J Zh, ZHANG Y K, ZHOU M. Study on technique of laser shock forming of metal sheet [J]. Laser Technology 2002, 26(6): 478~480 (in Chinese).
- [8] ZHOU J Zh, ZHANG Y K, ZHOU M. Theoretical analysis on deformation of sheet metal under one laser shot loading [J]. Chinese Journal of Laser 2005, 32(1): 135~138 (in Chinese).
- [9] The Compile Group of Orthogonal Experimentation. Orthogonal experimentation [M]. Beijing National Defence Industry Press 1976. 1~5 (in Chinese).
- [10] JIN L Ch. Orthogonal design and multi-target analysis [M]. Beijing China Railroad Publishing Company, 1988. 41~47 (in Chinese).