

表面强化及功能化

激光冲击悬臂薄板变形的理论分析和实验研究

陆亚运, 孙桂芳, 张永康

(东南大学, 南京 211189)

摘要:目的 激光喷丸技术是一种利用激光诱导等离子体冲击波产生的力学效应来改善材料的机械性能的表面强化技术,但是在激光喷丸过程中,由于高压冲击波的作用会使薄壁件发生宏观变形,造成零件失效,为了控制激光冲击板料宏观变形过程,因此有必要对激光冲击下板料的力学变形特性进行研究。**方法** 通过对激光冲击载荷作用下悬臂板变形过程的理论分析,建立了板料在激光冲击下的受力变形模型,对激光作用下板料的变形量公式进行了理论推导计算,研究了板料变形量与板料厚度、激光能量等之间的相互关系,并通过单点冲击与多点搭接冲击实验和有限元分析相结合的方式验证了理论公式的准确性。**结果** 依据所建立的板料变形理论计算得到的理论值、实验值和有限元分析结果都较为接近,其中板料变形量对厚度的变化十分敏感,在设定条件下,当板材厚度大于 3 mm 时,板材变形很小,几乎不产生明显的变形。**结论** 板料变形量随着激光能量和光斑数量的增大而增大,板材的厚度对变形量的影响很大,是设计激光喷丸参数时必须考虑的因素。

关键词: 激光喷丸; 薄壁件; 变形; 悬臂板; 厚度; 激光能量

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)10-0114-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.10.018

Theoretical Analysis and Experimental Study on Deformation of Cantilever Plate Induced by Laser Peening

LU Ya-yun, SUN Gui-fang, ZHANG Yong-kang

(Southeast University, Nanjing 211189, China)

ABSTRACT: Laser peening is a novel surface strengthening technique used to improve mechanical property of materials by utilizing mechanical effect produced by laser induced plasma shock wave. However, during the process of laser peening, effects of high pressure shock wave may cause macroscopical deformation of thin-walled workpieces and result in failure of parts. The work aims to clarify the characteristics of mechanical deformation characteristics of plate subject to laser shock in order to con-

收稿日期: 2016-04-17; 修订日期: 2016-07-15

Received: 2016-04-17; **Revised:** 2016-07-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51201070); 国家博士后基金 (2015M570395); 江苏省产学研项目 (BY2015070-05); 江苏省博士后基金 (1501028A)

Fund: Supported by the National Science Foundation of China (51201070), China Postdoctoral Science Foundation (2015M570395), Industry-University-Institute Cooperation Joint Research Project of Jiangsu Province of China (BY2015070-05) and Postdoctoral Science Foundation of Jiangsu Province (1501028A).

作者简介: 陆亚运 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光喷丸强化技术。

Biography: LU Ya-yun(1990—), Male, Master, Research focus: laser shock peening.

通讯作者: 孙桂芳 (1982—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为激光增材制造、激光喷丸强化。

Corresponding author: SUN Gui-fang(1982—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: laser additive manufacturing, laser shock peening.

control macroscopical deformation process of plate subject to laser shock. Based on theoretical analysis of deformation process of cantilever slab under laser shock loading, a model of strained deformation of cantilever plate under laser shock was constituted and the deformation formula of plate under laser effects was calculated by theoretical derivation. The relationship between the plate deformation and various parameters such as laser energy, plate thickness was also studied. Accuracy of the theoretical formula was verified by combining single-point & multipoint lap shock experiments and finite element analysis. Experimental results showed that theoretical value, experiment value and finite element analysis results acquired by established theoretical calculation of plate were similar. The plate deformation was sensitive to variation in thickness. Under given conditions, minor plate deformation and even no obvious deformation appeared when the thickness exceeded 3 mm. Plate deformation increases with the increase of laser energy and spot number. Plate thickness has great influence on deformation and shall be considered when designing laser peening parameters.

KEY WORDS: laser peening; thin-walled parts; deformation; cantilever plate; thickness; laser energy

激光喷丸技术 (Laser Peening) 作为一种新型的表面强化工艺, 可以提高材料的抗疲劳、耐磨损和耐腐蚀等性能^[1-5]。航空发动机叶片是发动机气流通道的关键件, 它在工作过程中易受到外来物打伤, 在工作载荷作用下发生疲劳断裂, 使发动机失效以致酿成事故。航空发动机叶片采用激光喷丸处理之后可以抑制裂纹的萌生与扩展, 提高叶片的使用寿命^[6-7]。在高压冲击波作用下会使薄壁叶片发生扭转宏观变形, 如果变形量超差则会影响叶片的气动性能, 从而偏离其最佳设计点, 进而影响其性能和寿命^[8-9]。为了满足零件设计需要, 冲击强化以后不仅需要满足疲劳寿命的要求, 而且要满足变形量控制的要求。对此, 不少国内外学者做了相关研究, 如鲁金忠、顾永玉等^[10-11]对单次激光冲击下光斑处微凹坑的深度进行了推导和计算; 何卫锋等^[12]分析了冲击变形的机理和规律, 设计了合理的冲击方式, 实现了对叶片榫头的变形控制; Ocaña 等^[13]对 Al2024-T351 铝合金冲击强化过程进行了数值模拟和实验研究, 发现在零件表面产生残余压应力场的同时会发生弯曲变形, 分析指出激光能量和光斑尺寸等是影响薄壁件变形的关键因素。虽然激光喷丸技术在我国某些工业生产中已经开始应用, 但仍有一些关键问题需要解决, 比如本文提出的冲击变形控制问题。本文通过对冲击动力学、冲击波压力的研究, 初步建立了悬臂板激光冲击数学模型, 研究了板料变形与激光参数、板料厚度等之间的关系。

1 力学模型的建立与冲击波压力分析

弹塑性力学及冲击动力学等相关研究表明, 对

于板料在任意加载下的塑性变形问题, 目前尚未有精确的解析解表示。为了简化问题, 本文假设材料是刚塑性的, 并且不考虑应变率对材料本构关系的影响。

先考虑单次激光脉冲作用下板料沿中心线处的变形。现将模型简化为: 一厚度为 h , 长为 L , 宽为 b 的均匀横截面板料一端固定, 线密度为 ρ , 横截面的塑性极限弯矩为 M_p , 自由端部分受到横向载荷 $p(t)$ 的作用, 加载示意如图 1 所示。

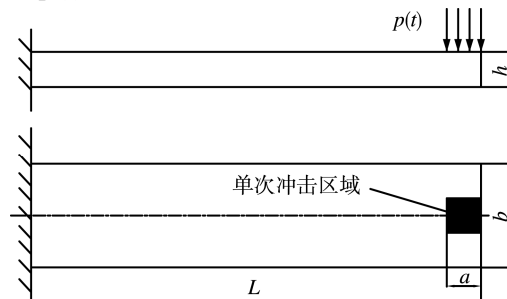


图 1 单次冲击下板料的加载模型

Fig.1 Loading system on the sheet with single impact

对于约束模式下强激光冲击靶材时所产生的冲击波压力, 学者们已经进行了深入的研究, 并对冲击波峰值压力进行了估算^[14]。冲击波的峰值压力可表示为:

$$p_m = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}} \cdot \sqrt{Z} \cdot \sqrt{I_0} \quad (1)$$

式中: α 为热能与内能的比例系数; Z 为靶材与水约束层之间的冲击波声阻抗 ($\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$); I_0 为入射激光功率密度 (GW/cm^2)。

已有学者对激光诱导冲击波峰值压力的计算进行了深入研究, 可将冲击波载荷简化为三角形载荷^[15], 如图 3 所示, t_s 为激光脉冲持续时间, 取脉

宽的 2~3 倍, p_m 为激光诱导冲击波峰值压力。

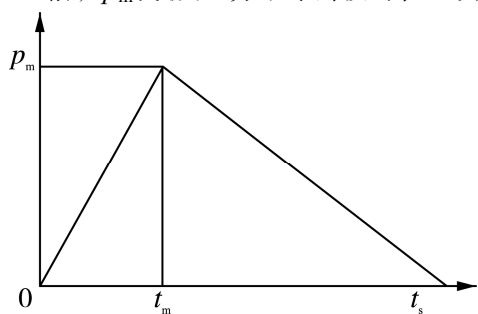


图2 激光冲击波的加载历史
Fig.2 The history of the loading

在激光喷丸过程中, 板材加载时间极短, 达到纳秒级, 远远小于普通爆炸载荷作用的时间, 所以, 在冲击波载荷结束时, 板材的变形远小于板材运动结束时的最终变形, 可以忽略不计。这样, 在激光冲击的过程中, 对于变形场的计算, 暂且忽略板材的加载过程, 以板材获得的冲量 I 来取代板材的冲击载荷进行分析。在激光冲击载荷的作用下, 板材受载荷作用而发生变形。当载荷小于静态极限载荷时, 板材不发生变形和运动, 直到载荷增大到一定值时, 假设板材在中间某截面 H 处具有初始塑性铰, 此时变形机构如图 3 所示。

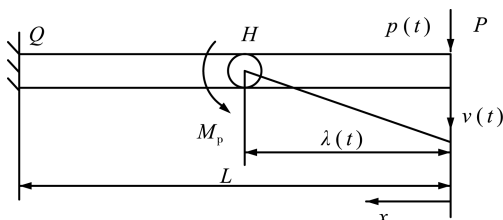


图3 板料的变形机构
Fig.3 Deformation mechanism of sheet

以 PH 段为对象进行分析, 在 $0 \sim t_s$ 的任意时间区间内, 动量的变化等于此时间段内外力施加的冲量, 即:

$$\frac{1}{2} \rho \lambda(t) v(t) = \int_0^t F(t) dt = \begin{cases} \int_0^t F(t) dt, & 0 \leq t \leq t_s \\ \int_0^{t_s} F(t) dt \equiv I, & t > t_s \end{cases} \quad (2)$$

对自由端 P 点的动量矩方程进行积分有:

$$\int_0^\lambda \rho \frac{dw}{dt} dx = M_p t \quad (3)$$

而板上点的速度分布为:

$$\frac{dw}{dt} = v(1 - x/\lambda) \quad (4)$$

由 (3) 式和 (4) 式可得:

$$\frac{1}{6} \rho \lambda^2(t) v = M_p t \quad (5)$$

联立求解 (2) 式和 (5) 式, 可以得到在脉冲结束时, 塑性铰位置为:

$$\lambda_0 = \frac{3M_p t_s}{I} \quad (6)$$

2 等效加载的弯曲变形过程

由上面分析, 不考虑板材的加载过程, 当冲击波载荷幅值降低为零时, 其塑性铰将开始离开其脉冲结束时的位置 $x = \lambda_0$, 这个阶段为板料运动的第一阶段, 随着时间的变化, 塑性铰的位置也在变化, 即形成移行铰; 第二阶段中, 移行铰已经移动到固定端, 但整个结构的运动并没有停止。因为自由端还具有速度, 会带动板继续发生绕固定端的刚体转动。

2.1 第一阶段 ($t \geq t_s$)

由动量定理 (2) 式和 (5) 式可知移行铰的位置为:

$$\lambda(t) = \frac{3M_p}{I} t \quad (7)$$

由此可知, 初始时刻位于 λ_0 处的塑性铰, 随着时间的增加将向固定端 ($x = L$ 处) 移动, 移行铰的移动速度为:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{3M_p}{I} \quad (8)$$

由此可以算出移行铰移动到固定端 B 点的时间为:

$$t_1 = \frac{IL}{3M_p} \quad (9)$$

第一阶段, 对应时间 $t_s \leq t \leq t_1$, 在此阶段中, 自由端的速度及位移分别为:

$$v(t) = \frac{2I}{\rho \lambda} = \frac{2I^2}{3\rho M_p t} \quad (10)$$

$$\Delta(t) = \int_{t_s}^t \frac{2I^2}{3\rho M_p t} dt = \frac{2I^2}{3\rho M_p} \ln \frac{t}{t_s} \quad (11)$$

随着时间的增加, 自由端的速度将逐渐降低。将第一阶段的时间 t_1 代入 (10) 式和 (11) 式, 可以得到第一阶段结束时对应的自由端速度及自由端的位移, 分别为:

$$v_1 = v(t_1) = \frac{2I}{\rho L} \quad (12)$$

$$\Delta_1 = \Delta(t_1) = \frac{2I^2}{3\rho M_p} \ln \frac{IL}{3M_p t_s} \quad (13)$$

2.2 第二阶段 ($t \geq t_1$)

第一阶段结束后, 移行铰已经移动到固定端, 对固定端的动量矩的变化有:

$$\frac{1}{3} \rho x L^2 (v - v_1) = -M_p (t - t_1) \quad (14)$$

由(14)式可得此阶段的速度随时间变化的关系式为:

$$v(t) = \frac{3}{\rho L} (I - M_p t / L) \quad (15)$$

当速度 $v(t)$ 减小到零时, 对应整个系统动态响应结束, 即系统的总响应时间为:

$$t_f = \frac{IL}{M_p} = 3t_1 \quad (16)$$

在响应结束时刻 $t = t_f$, 自由端的位移为:

$$\Delta_f = \frac{2I^2}{\rho M_p} \left(1 + \ln \frac{IL}{3M_p t_s} \right) \quad (17)$$

同时, 第二阶段中板绕根部的转角为:

$$\theta_2 = \frac{2I^2}{3\rho L M_p} \quad (18)$$

为了确定最终变形曲线, 先考虑第一阶段的曲率:

$$\frac{d\theta}{dt} = \kappa(x) \frac{d\lambda}{dt} = \frac{v}{\lambda} \quad (19)$$

式(19)表示板上某截面的转角对时间的变化率, 也就是该截面的角速度。曲率在直角坐标中的表达式:

$$\kappa(x) = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (20)$$

对式(20)中 x 积分两次, 并由边界条件可以得到第一阶段的变形为:

$$w_1(x) = \frac{2I^2}{3\rho M_p} \left(\ln \frac{L}{x} + \frac{x}{L} - 1 \right), \lambda_0 \leq x \leq L \quad (21)$$

由第二阶段固定端转角可得第二阶段变形曲线为:

$$w_2(x) = -\frac{2I^2}{3\rho L M_p} x + \frac{2I^2}{3\rho M_p}, \lambda_0 \leq x \leq L \quad (22)$$

总结激光冲击整体变形场的模型, 在冲击结束后, 对两个阶段变形叠加可以得到板的最终弯曲变形曲线, 即:

$$w_f(x) = \begin{cases} \frac{2I^2}{3\rho M_p} \left(\frac{\lambda_0}{L} - \frac{x}{L} + \ln \frac{L}{\lambda_0} \right), 0 \leq x \leq \lambda_0 \\ \frac{2I^2}{3\rho M_p} \left(\ln \frac{L}{x} \right), \lambda_0 \leq x \leq L \end{cases} \quad (23)$$

根据激光冲击的变形场表达式可以看出, 越靠近自由端变形越大, 自由端区域的变形量最大。取 $x=0$, 由(24)式可以得到沿板中心线的最大位移量为:

$$w_f(0) = \frac{2p_m^2 t_s^2 S^2}{3\rho_0 Y b^2 h^3} \left(\frac{\lambda_0}{L} + \ln \frac{L}{\lambda_0} \right) \quad (24)$$

式中: S 为冲击压力作用面积; Y 为材料屈服强度。

在进行激光喷丸强化时, 要保证待强化区域的全覆盖, 必须有一定程度的搭接。现考虑搭接路径如图 4 所示的板料的冲击变形情况。当进行第二次冲击时, 由于 AB 段不受载荷的作用, A 、 B 之间的转角不变, 即 $\theta_A = \theta_B$ 。根据(24)和(25)式, 第 n 个光斑搭接冲击之后自由端最大变形量为:

$$w_n = \sum_{m=1}^n \frac{2I^2}{3\rho M_p} \left(\frac{\lambda_0}{L_m} + \ln \frac{L_m}{\lambda_0} \right) + \sum_{k=2}^n \left\{ \frac{x_k}{L_k} \left[\frac{2I^2}{3\rho M_p} \left(\frac{\lambda_0}{L_k} + \ln \frac{L_k}{\lambda_0} \right) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=2}^k \ln \frac{L_i}{x_j} \right] \right\} \quad (25)$$

式中: w_n 表示第 n 个光斑搭接冲击之后自由端的最大变形量。 $x_1=0$, $x_n=(n-1)(1-\eta)a$, $L_n+x_n=L$, $n \geq 2$, x_n 表示第 n 个光斑到末端的距离, a 为光斑边长或直径, η 为搭接率。

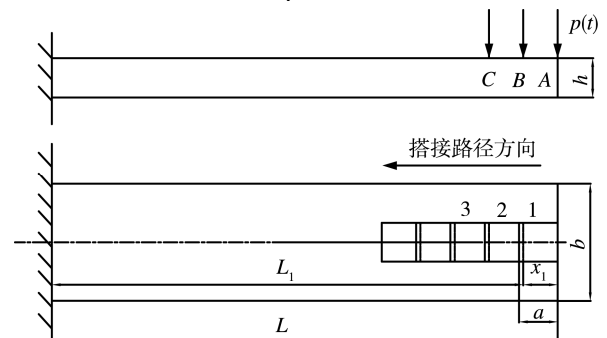


图 4 搭接冲击板料的加载模型

Fig.4 Loading system on the sheet with multi-point impact

从 (24) 和 (25) 式可以看出, 板材变形量除了与材料本身的性能有关外, 还与板料的厚度、激光能量、冲击波压力作用面积、冲击压力作用时间等多个参数有关。板料变形量随着激光能量的增加而增大, 由于光斑直径一定时, 激光能量越大, 功率密度越大, 冲击波载荷越大, 板材获得的冲量 I 也越大, 所以变形量变大。其中板材变形量的大小对板材的厚度极为敏感, 板材最大变形量与板材的厚度的三次方成反比。

3 实验准备和有限元建模

为了验证上述理论的准确性, 本文采用实验与有限元分析相结合的方式对悬臂件进行了激光冲击弯曲变形研究。实验在钕玻璃高功率激光冲击波装置上进行, 激光的波长为 $1.064\ \mu\text{m}$, 脉宽约 $15\ \text{ns}$, 最大能量 $50\ \text{J}$, 实验装置的简化模型如图 5 所示。实验详细参数见表 1。

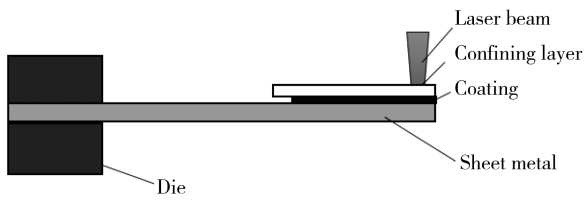


图 5 冲击装置示意
Fig.5 Sketch map of laser peenning

表 2 2Cr13 不锈钢板料的基本材料参数^[17]
Tab.2 Material parameters of 2Cr13 stainless steel^[17]

参数	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	A/MPa	B/MPa	n	C
数值	7750	213	0.24	674	288	0.52	0.015

4 结果与分析

4.1 搭接情况下光斑个数对最大变形量的影响

图 6 反映了不同搭接光斑数量对板料最大弯曲变形量的影响规律, 在本文搭接冲击条件下, 对于同一种靶材, 随着光斑数量的增加, 其弯曲变形量几乎呈指数增加。由图 6 可以看出发现数值模拟结果、解析解与实验值之间存在一定的差异, 一方面是因为实验中脉冲激光的加载不完美, 处理区域不在中心线上; 另一方面原因是理论分析过程中做了一些简化假设, 比如假设材料是刚塑性的。搭接

表 1 详细实验参数
Tab.1 Detailed experimental parameters

参数	数值
激光能量/J	20, 25, 30
光斑尺寸 a/mm	4
板料长度 L/mm	80
板料宽度 b/mm	20
板料厚度 h/mm	1, 2
搭接率 $\eta/\%$	10

模拟采用激光冲击波峰值压力进行加载, 峰值压力可由公式 (1) 计算得到。冲击波压力的时空加载曲线如图 2 所示, 同时将冲击波压力的空间分布处理为在光斑内的均布载荷, 作用面积为光斑面积。有限元模型尺寸为 $80\ \text{mm}\times 20\ \text{mm}\times 1\ \text{mm}$ 的 2Cr13 不锈钢板料。激光喷丸过程是一个高应变率非线性的动态响应过程, 而 Johnson-Cook 模型可以很好地反应应变硬化、应变率和温度软化效应对材料性能的影响, 因此本文模型本构关系采用 Johnson-Cook 模型^[16], 即:

$$\sigma_Y = \left(A + B\varepsilon^n \right) \left[1 + C \ln(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_n) \right] \quad (26)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为应变率, 取 $\dot{\varepsilon} = 10^6\ \text{s}^{-1}$; $\dot{\varepsilon}_n = 1\ \text{s}^{-1}$; ε 为应变; A 、 B 、 C 、 n 为常数, 其具体数值如表 2 所示。

光斑个数是影响悬臂板弯曲变形的一个关键因素, 合理控制光斑个数可以控制悬臂板料的曲率变化。

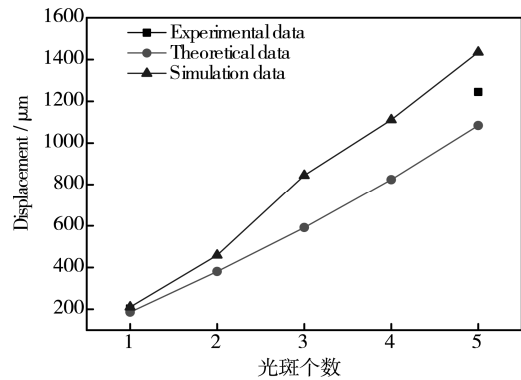


图 6 光斑数目对最大变形量的影响
Fig.6 Relation between the deformation of specimen versus numbers of spots

4.2 板料厚度对最大变形量的影响

图 7 为单次激光喷丸处理悬臂板时不同厚度板料的弯曲变形情况, 可以发现板料的厚度对弯曲变形量的影响很大, 随着板料厚度的增加, 板料弯曲变形量显著减小, 当厚度增加 3 mm 时, 板料弯曲变形非常小, 几乎不发生明显变形。在设计激光喷丸参数时, 针对板料的厚度合理选择工艺参数对悬臂板的变形控制十分关键。

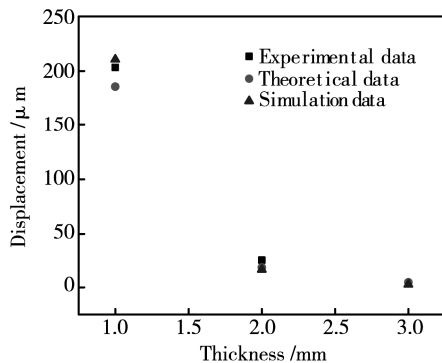


图 7 板材厚度对最大变形量的影响

Fig.7 The effect on the maximum of displacement of the thickness

4.3 激光能量对最大变形量的影响

图 8 显示了单次激光冲击下激光能量分别为 20、25、30 J 时对板料最大变形量的影响, 可以看出激光能量显著地影响着板料的向下弯曲变形, 随着激光能量的增大, 悬臂板弯曲变形量呈现出逐渐增大的趋势, 这是因为在其他参数不变的条件下, 随着激光能量的增加, 激光诱导冲击波的压力峰值变大, 使得板料受到的冲击惯性增加, 最终导致弯曲变形量增加。尽管实验结果、解析解以及有限元分析结果存在一定差异, 但总体上变化趋势是一样的, 因此理论分析以及有限分析可以有效地预测悬臂板的弯曲变形情况。

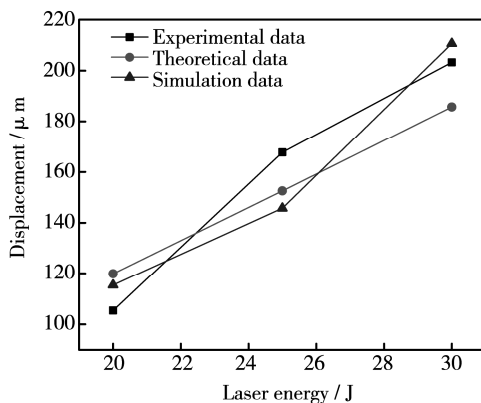


图 8 激光能量对最大变形量的影响

Fig.8 The effect on the maximum of displacement of laser energy

5 结论

通过对单次、搭接激光冲击下悬臂板料变形的理论分析, 建立了板料变形量与冲击波峰值压力、材料性能、板料厚度和作用时间等参数之间的关系。分析了板料变形各因素对板料变形量的影响, 并对不同板料厚度的薄板试样进行单点、多点搭接冲击实验以及激光冲击悬臂板的数值模拟。实验结果表明, 依据本文所建立的板料变形理论计算得到的理论值、实验值和数值模拟结果都较为接近。悬臂板料弯曲变形量随着激光能量、搭接光斑个数的增加而变大, 此外板料变形量对厚度的变化十分敏感, 在本文所设定条件下, 当厚度增加 3 mm 时, 板料弯曲变形非常小, 几乎不发生明显变形, 所以这些因素是设计激光喷丸参数时必须考虑的要素。

参考文献:

- [1] FABBRO R, FOURNIER J, BALLARD P, et al. Physical Study of Laser-Produced Plasma in Confined Geometry[J]. Journal of Applied Physics, 1990, 68(2): 775—784.
- [2] PEVRE P, FABBRO R, BERTHE L, et al. Laser Shock Processing of Materials, Physical Processes Involved and Examples of Applications[J]. Journal of Laser Applications, 1996, 8(3): 135—141.
- [3] ZHANG Y K, ZHANG S Y, YU C Y, et al. Laser Shock-Processing for Fatigue and Fracture Resistance[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 1997, 40(2): 170—177.
- [4] ZHANG Y K, HU C L, CAI L, et al. Mechanism of Improvement on Fatigue Life of Metal by Laser-Excited Shock Waves[J]. Applied Physics A, 2001, 72(1): 113—116.
- [5] MONTROSS C S, WEI T, YE L, et al. Laser Shock Processing and Its Effects on Microstructure and Properties of Metal Alloys: A Review[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(10): 1021—1036.
- [6] 王健, 邹世坤, 谭永生. 激光冲击处理技术在发动机上的应用[J]. 应用激光, 2005, 25(1): 32—34.
WANG Jian, ZOU Shi-kun, TAN Yong-sheng. Application of Laser Shock Processing on Turbine Engines[J]. Applied Laser, 2005, 25(1): 32—34.
- [7] 邹世坤, 巩水利, 郭恩明, 等. 发动机整体叶盘的激光冲击强化技术(邀请论文)[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 76—82.
ZOU Shi-kun, GONG Shui-li, GUO En-ming, et al. Laser Peening of Turbine Engine Integrally Blade Rotor[J].

- Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(6): 76—82.
- [8] 李应红, 何卫锋, 周留成. 激光冲击复合强化机理及在航空发动机部件上的应用研究[J]. 中国科学: 技术科学(中文版), 2015, 45(1): 1—8.
- LI Y H, HE W F, ZHOU L C. The strengthening Mechanism of Laser Shock Processing and Its Application on the Aero-Engine Components (in Chinese)[J]. Sci Sin Tech, 2015, 45: 1—8.
- [9] 郑赞, 田晓, 杨慧. 跨声速风扇叶片变形对气动性能的影响[J]. 航空动力学报, 2011, 26(7): 1621—1627.
- ZHENG Yun, TIAN Xiao, YANG Hui. Impact of Blade Deflection on Aerodynamic Performance of a Transonic Fan[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(7): 1621—1627.
- [10] 鲁金忠. 激光冲击强化铝合金力学性能及微观塑性变形机理研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2010.
- LU Jin-zhong. Investigation of Laser Shock Processing on the Mechanical Properties and Micro-plastic Deformation Mechanism of LY2 Aluminum Alloy[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010.
- [11] 顾永玉. 金属板料激光冲击成形的理论研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2007.
- GU Yong-yu. Theoretical Study on Laser Shock Forming of Metal Sheet[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2007.
- [12] 何卫锋, 李应红, 聂祥樊, 等. 激光冲击叶片榫头变形控制与疲劳试验[J]. 航空学报, 2014, 35(7): 2041—2048.
- HE W F, LI Y H, NIE X F, et al. Deformation Control and Fatigue Test of Blade Tenon by Laser Shock Peening[J]. Acta Aeronauticae Astronautica Sinica, 2014, 35(7): 2041—2048.
- [13] OCANA J L, CORREA C, GARCÍA-BELTRÁN A, et al. Laser Shock Processing of Thin Al2024-T351 Plates for Induction of Through-Thickness Compressive Residual Stresses Fields[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 223: 8—15.
- [14] FABBRO R, PEVRE P, BERTHE L, et al. Physics and Applications of Laser-Shock Processing[J]. Journal of Laser Applications, 1998, 10(6): 265—279.
- [15] ARIF A F M. Numerical Prediction of Plastic Deformation and Residual Stresses Induced by Laser Shock Processing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 136(1): 120—138.
- [16] 李琳, 解丽静, 王西彬, 等. 金属切削加工中难加工材料 2Cr13 的本构模型[J]. 中国机械工程, 2009, 20(20): 2466—2469.
- LI Lin, XIE Li-jing, WANG Xi-bin, et al. Constitutive Model of 2Cr13 for Finite Element Analysis of Chip Formation Process[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(20): 2466—2469.
- [17] CHEN Zi-wen, CHENG Zhi-gang, ZENG Shi-kun. Simulation Study of Stress Hole on Laser Shock Peening with Square Spot[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42: 222—225.