

文章编号 : 0258-7025(2002)08-0751-04

# 激光冲击强化技术中自由约束层 理论厚度的研究

花银群, 张永康, 杨继昌, 陈瑞芳, 叶云霞

(江苏大学机械工程学院, 江苏镇江 212013)

**提要** 针对激光冲击强化应用技术中的自由约束层厚度的问题, 分析了涂层气化、爆炸形成的向金属层内部和自由约束层内部传播的高强度压力、自由约束层与涂层之间的粘着力和约束层本身性能之间的关系。推导了自由约束层的最佳理论厚度——既能获得最佳冲击强化效果, 又可达到一次高效安全地清除自由约束层的目的。

**关键词** 激光冲击, 自由约束层, 最佳厚度

中图分类号 TN 249 文献标识码 A

## Study on Theoretical Thickness of Free Limiting Layer in Laser Shock Processing

HUA Yin-qun, ZHANG Yong-kang, YANG Ji-chang, CHEN Rui-fang, Ye Yun-xia

(School of Mechanical Engineering Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

**Abstract** This paper studies the thickness of the free limiting layer in the laser shock processing. It analyses the relationship among the high-intensity pressure caused by coating vaporization and explosion and transmitted into the interior of the metal layer and that of the free limiting layer, the adherent force between the free limiting layer and the coating, and the properties of the free limiting layer. On the above basis, the optimum thickness of the free limiting layer is obtained, which guarantees not only the optimum LSP effect but also the elimination of the free limiting layer at a time.

**Key words** laser shock processing, free limiting layer, optimal thickness

### 1 引 言

激光冲击处理技术(Laser Shock Processing-LSP)是利用高功率密度( $\text{GW}/\text{cm}^2$ 级)短脉冲(ns级)激光对金属材料进行辐射,使金属材料表层发生塑性变形,从而改善金属性能的一项新技术(图1)。在激光冲击处理之前,首先必须在金属待处理表面涂上一层不透光的材料(称为涂层,目前常用的有黑漆及其他黑色材料)。涂层处理的目的是:一是提高对激光辐射的吸收能力;二是增大压力波峰值;三是防止金属表面熔化和气化<sup>[1]</sup>。其次,在涂层表面还要覆盖一层透明材料(称为约束层)。约束层的主要作用是:当激光通过透明约束层后,涂层材料吸收激光能量迅速气化、电离爆炸而成为高压气体,由于受到约

束层的限制,形成峰值压力达到数GPa的强冲击波。这时一部分冲击波穿透金属表面向内传播,另一部分则冲击约束层。只有当冲击波的峰压超过金属材料的动态屈服强度时,才会使金属表面产生一定深度的变形,引起金属表面层发生冲击硬化,且产生均匀的残余应力,从而提高金属材料的硬度和抗疲劳寿命<sup>[1~5]</sup>。但是,在进行激光冲击强化时,如果只有涂层而没有约束层加以限制,激光冲击非但不能提高被冲击试件的抗疲劳寿命,反而会在冲击表面形成表面残余拉应力,降低冲击试件疲劳寿命。在目前已报道的激光冲击强化试验中<sup>[1~5]</sup>,对约束层一般都施加额外的夹紧装置,以保证强化效果。但是,外加夹紧装置的存在大大限制了激光冲击强化的应用范围,如圆角、轴、凹槽、内孔等。为了使激光冲击

收稿日期 2001-06-19;收到修改稿日期 2001-08-13

作者简介 花银群(1963—),男,江苏东台人,副教授,博士生,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: huanq@ujs.edu.cn

强化得到更广泛的应用,在激光冲击强化中,使用自由约束层已经成为人们关注的焦点。因此,本文针对激光冲击强化应用技术中工件表面自由约束层厚度问题进行的理论探索具有十分重要的意义。

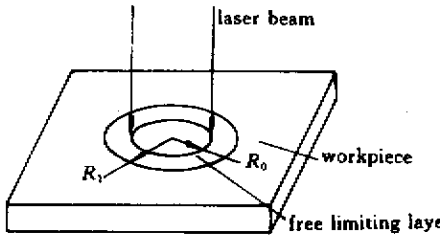


图 1 激光冲击强化示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser shock processing

## 2 自由约束层的性能特点

自由约束层是依靠约束层自身与工件的较强粘着力而达到限制涂层与激光作用产生的高压气体形成峰值压力的一种约束材料,它是相对于上述装夹约束层而言的。在激光冲击强化过程中,为了使自由压缩层在它和各种待冲击金属表面之间,既能起到增加气体峰压的作用,又不会增加激光冲击后对其清理的困难,自由约束层应该具备以下性能:

- 1) 能够通过某种波长激光,否则激光根本无法辐照涂层产生气化爆炸;
- 2) 自由约束层应为粘性液态(在使用前),这一性能有利于自由约束层能够适用于各种非平面表面加工件;
- 3) 自由约束层与工件表面能够产生较强的粘着力,否则会发生约束层的飞脱,达不到增加峰压的目的;
- 4) 常温下,粘性液态自由约束层能够自行干化,自由约束层硬化后还应具有一定的临界动态断裂强度,且相对而言易于爆碎。这样既能发挥约束层增加峰压的作用,又能避免发生清理残余约束层的工序;
- 5) 自由约束层要具有一定的厚度,约束层太厚会造成材料的浪费,太薄又承受不了金属发生塑性变形所需的压力,产生不了冲击强化效果。这一技术要求是本文的研究重点。

## 3 自由约束层的压力分析

### 3.1 激光冲击气化爆炸区峰值压力

在激光冲击强化处理中,有关爆轰波模型、爆轰

波基本关系及爆轰波末端参数有不少学者进行了研究与探索<sup>[6~8]</sup>。在这些研究中,一般都是将约束层作为刚性材料,因此产生的爆轰波也近似地被认为是一维平面波,从而得到了金属表面的冲击波峰值压力公式<sup>[8]</sup>

$$P_m = (2k)^{-2k/k-1} \cdot (k+1)^{k+1} \chi^{k-1} \cdot [\chi K^2 - 1]^{2/3} \cdot \rho_0^{1/3} \cdot (Aq_0)^{2/3} \quad (1)$$

式中, $K$ 为比热比; $A$ 为自由约束层与涂层对激光束的吸收系数(无量纲系数); $q_0$ 为激光束光斑功率密度( $\text{W}/\text{mm}^2$ ); $\rho_0$ 为自由约束层材料、涂层材料和工件材料的综合体( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

但在激光冲击中使用自由约束层时,由于自由约束层材料本身具有相对于刚性材料能够产生一定的冲击爆炸变形空间,因此必须对原有最大峰值压力进行适当修正。设 $\beta$ 为无量纲修正系数( $\beta$ 值应与自由约束层材料的刚度和临界动态断裂极限强度有关)则可得具有自由压缩层时气化爆炸峰值压力公式

$$P_m = \beta \cdot (2k)^{-2k/k-1} \cdot (k+1)^{k+1} \chi^{k-1} \cdot [\chi K^2 - 1]^{2/3} \cdot \rho_0^{1/3} \cdot (Aq_0)^{2/3} \quad (2)$$

这里, $\beta$ 应取值在1与0之间。

### 3.2 自由约束层的受力分析

图2为在激光冲击时,气化爆炸空间垂直于工件表面的最大剖面图。设自由约束层厚度为 $H$ (m),自由约束层半径为 $R_1$ (m),面积为 $S_1$ ( $\text{m}^2$ ),激光冲击光斑半径为 $R_0$ (m),面积为 $S_2$ ( $\text{m}^2$ );自由约束层与工件表面的粘着力为 $F_2$ (N),在涂层气化爆炸时,自由约束层与工件粘结接触的实际面积为 $S$ ( $\text{m}^2$ ),涂层气化爆炸后使自由约束层在与工件表面垂直方向上产生的合拉力为 $F_1$ (N)。同时假设,在激光冲击气化爆炸的压力使自由约束层产生爆碎前的一瞬间,气体爆炸使自由约束层与工件之间形成了一个半径为 $R$ (m)的球冠空间,球冠底半径与光斑半径相同为 $R_0$ ,自由约束层上球冠产生爆碎瞬间的最大横截面为 $S_3$ ( $\text{m}^2$ ),气化爆炸时自由约束层某一中心剖面一侧所受的平行于工件表面的合压力为 $F_3$ (N)。气化爆炸空间由圆弧 $EB$ 和直线 $EB$ 围成的面积为 $S_4$ ( $\text{m}^2$ )。过 $E$ 点作圆弧 $EB$ 的切线,且与工件表面相交成 $\theta$ (rad)角, $\theta$ 角的大小与自由约束层的刚度和临界动态断裂极限强度有关, $P_a$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )为自由约束层与工件之间的粘着应力。

由此可得下列公式

$$S_3 = 2A[(R+H)^2 - R^2] =$$

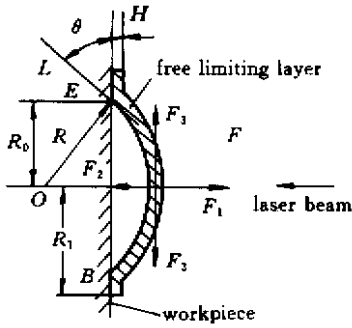


图2 自由约束层受力示意图

Fig.2 Schematic diagram of free limiting layer by force

$$2\alpha [H^2 + 2R_0 \cdot H(\sin\theta)^{-1}] \quad (3)$$

$$S = \pi(R_1^2 - R_0^2) \quad (4)$$

$$S_4 = 2\theta \cdot R^2 - R_0^2 \cot\theta = 2\theta \cdot R_0^2 (\sin\theta)^{-2} - R_0^2 \cot\theta \quad (5)$$

$$F_1 = P_m \cdot S_2 = \pi P_m R_0^2 \quad (6)$$

$$F_2 = P_a \cdot S = \pi P_a (R_1^2 - R_0^2) \quad (7)$$

$$F_3 = P_m \cdot S_4 = P_m \cdot R_0^2 [2\alpha (\sin\theta)^{-2} - \cot\theta] \quad (8)$$

则由公式(3)和(8)可知,爆炸压力对自由约束层产生的平行于工件表面的拉应力为

$$\sigma = \frac{F_3}{S_3} = \frac{P_m \cdot R_0^2 [2\alpha (\sin\theta)^{-1} - \cos\theta]}{2\theta \cdot H^2 \sin\theta + 4\theta \cdot H \cdot R_0} \quad (9)$$

## 4 自由约束层的最佳厚度

### 4.1 自由约束层的工艺要求

在产生最佳激光冲击强化效果的工艺中,除了在第二节中对自由约束层已经提出的五项要求外,还有一些具体的工艺要求。

首先,自由约束层在冲击爆炸力  $F_3$  的作用下应当产生破碎,但碎块又不能有过高飞溅速度,这样既不会增加约束层二次清理的困难,又不至于发生安全问题。自由约束层是否破碎取决于下列三个因素:

1) 自由约束层所受的拉应力  $\sigma$  应大于或等于该材料临界动态断裂强度极限值  $\sigma_0$ 。

2) 爆炸压力产生的球冠空间  $E$  点处夹角  $\theta$ 。从理论上讲,  $\theta$  角应越小越好,因为  $\theta$  角越小,说明自由约束层材料的刚度越高,爆炸压力产生的球冠空间就越小,有效冲击峰压值就越大。 $\theta$  角应该可以通过实验测得。

3) 自由约束层厚度  $H$  过大不易产生破碎,过小又易产生碎块飞爆或达不到强化效果。

其次,自由约束层必须能使激光冲击气化爆炸产生峰压  $P_m$ ,从而达到最佳强化效果。这又要取决于如下三个因素:

1) 自由约束层与工件粘着力  $F_2$ 。假设自由约束层临界动态断裂强度极限值  $\sigma_0$  较大,且有  $F_2$  小于  $F_1$  的情况下,  $P_m$  不能达到最大值,结果是自由约束层飞离表面,而这种情况是不允许发生的。

2) 自由约束层材料的临界动态断裂强度极限值  $\sigma_0$  如果过小,气体爆炸产生的压力足以使自由约束层爆碎,这样也达不到提高  $P_m$  的作用,产生不了最佳强化效果。

3) 约束层材料厚度  $H$ 。在自由约束层与工件粘着力及自由约束层具备一定临界动态断裂强度条件下,  $P_m$  主要取决于约束层厚度。假如  $H$  过小,约束层抗破碎能力就过小,产生不了峰压值;厚度  $H$  也不能过大,否则会造成材料浪费。

### 4.2 自由约束层的最佳理论厚度

由前文分析可知,在自由约束层材料特性、涂层特性和激光冲击强化处理工艺参数一定的条件下,要达到有效发挥  $P_m$  峰值冲击强化作用,同时又要避免二次清除自由约束层的困难,就必须使自由约束层受力满足下述关系:

1) 自由约束层将产生临界脱落但又不产生飞离的条件有:

$$F_1 \leq F_2$$

$$\pi P_m \cdot R_0^2 \leq \pi P_a \cdot (R_1^2 - R_0^2)$$

$$R_1 \geq R_0 \sqrt{\frac{P_m}{P_a} + 1}$$

$$R_1 \geq \beta \cdot R_0 \cdot P_a^{-1/2} \cdot \left\{ \left( \frac{K+1}{2K} \right)^{2K(K-1)} \cdot \left[ \frac{(\alpha K^2 - 1)^{2/3}}{K+1} \cdot \rho_0^{1/3} \cdot (Aq_0)^{2/3} + P_a \right]^{1/2} \right\} \quad (10)$$

$R_1$  不能过大,  $R_1$  过大会增加二次清理约束层的困难,同时也会浪费材料;但  $R_1$  过小又会产生炸脱危险,只有当等号成立时才会达到最佳效果。

2) 自由约束层破碎的条件为:

气化爆炸压力产生的破碎拉应力应大于或等于自由约束层的临界状态断裂强度。即

$$\sigma \geq \sigma_0 \quad (11)$$

将公式(9)代入不等式(11),求解以  $H$  为未知数的不等式得

$$H \leq R_0 \left\{ \left[ \frac{1}{\sin^2 \theta} + \left( \frac{1}{\sigma_0 \sin^2 \theta} - \frac{1}{2\theta \sigma_0} \cot \theta \right) P_m \right]^{1/2} - \frac{1}{\sin \theta} \right\} \quad (12)$$

将公式(2)代入不等式(12)得

$$H \leq R_0 \left\{ \left[ \frac{1}{\sin^2 \theta} + \beta \cdot \rho_0^{1/3} (A q_0)^{2/3} (2K)^{-2K/K-1} \cdot (K+1)^{K+1/K-1} \cdot [\alpha K^2 - 1]^{2/3} \cdot \left( \frac{1}{\sigma_0 \sin^2 \theta} - \frac{1}{2\theta \sigma_0} \cot \theta \right) \right]^{1/2} - \frac{1}{\sin \theta} \right\} \quad (13)$$

因此,如果将爆炸气体视为理想气体,取  $K = 1.67^{[9]}$ ,从理论上讲约束层的最佳厚度应为

$$H = R_0 \left\{ \left[ \frac{1}{\sin^2 \theta} + 0.287\beta \cdot \rho_0^{1/3} (A q_0)^{2/3} \cdot \left( \frac{1}{\sigma_0 \sin^2 \theta} - \frac{1}{2\theta \sigma_0} \cot \theta \right) \right]^{1/2} - \frac{1}{\sin \theta} \right\} \quad (14)$$

## 5 结 论

1) 根据自由约束层与装夹约束层的根本区别,本文对前人根据爆轰波和爆炸气体动力学理论求出的工件表面所受到的冲击波峰值压力计算公式进行了修正。同时,对于式(14)中的  $\beta$  和  $\theta$ ,由文中分析可知,自由约束层材料的刚度越大和临界动态断裂极限强度越高, $\beta$  值就越接近 1, $\theta$  角也就越接近 0, $\cos \theta$  亦越接近 1。因此,作者推测似可用  $\cos \theta$  来代替  $\beta$ ,当然这有待于进一步探讨。

2) 从理论分析可知,自由约束层在一定厚度范围内,它可以起增加峰值压力  $P_m$  的作用,但是如果自由约束层与工件之间粘着力较低,则无论厚度增加多大,也不会提高峰压,爆炸压力将使自由约束层

飞溅,产生不了冲击强化作用。

3) 从约束层与工件粘着应力来看,粘着力大有利于提高峰压,也有利于节约材料,但这并不意味着粘着力越大越好,粘着力太高,不利于残余自由约束层的清除。

4) 从理论上推导的自由约束层临界最佳厚度和半径,既能达到发挥最大有效激光冲击强化的作用,同时又能使自由约束层在实施冲击过程中予以清除,从而能有效提高生产效率,降低加工成本。

## 参 考 文 献

- 1 B. P. Fairand, A. H. Claur. Laser generation of high-amplitude stress in materials [J]. *J. Appl. Phys.*, 1979, **50** (3):1497 ~ 1502
- 2 M. Gerland, M. Hallouin, H. N. Presles. Comparison of two new surface treatment processes, laser-induced shock waves and primary explosive: Application to fatigue behaviour [J]. *Materials Science and Engineering*, 1992, **A15(2)**:175 ~ 182
- 3 D. Grevey, L. Maiffredy, A. B. Vannes. Laser shock on a TRIP alloy: mechanical and metallurgical consequences [J]. *Journal of Materials Science*, 1992, **27** (8):2110 ~ 2116
- 4 J. E. Masse, et al.. Laser generation of stress waves in metal [J]. *Surface and Coating Technology*, 1995, **70**:231 ~ 235
- 5 L. Berthe, R. Fabbro, P. Peyre et al.. Shock waves from a water-confined laser-generated plasma [J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, **82** (6):2826 ~ 2832
- 6 Zheng Shouzhong. Dynamics of Explosion and Shock [M]. Beijing: Press of Armament Industry, 1993. 4 (in Chinese)
- 7 Zhang Lianyu, Wang Lingyu, Miao Duansheng. Basis of Gas Explosion Dynamics [M]. Beijing: Press of Beijing Polytechnological University, 1987. 6 (in Chinese)
- 8 Zhang Yongkang. Studies on Laser Shock Processing for Increasing Fatigue Lives of Aircraft Materials. A Dissertation for the Application of Doctorate [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1995 (in Chinese)