

# 激光支持爆轰波的仿真研究

胡雅骥 李应红 汪 诚 马 壮

(空军工程大学工程学院,西安 710038)

**文 摘** 采用了爆轰波的 C-J 起爆模型,计算了激光支持爆轰波初始参数,得到激光功率密度与爆轰波波面初始参数的关系。利用流体力学的方法建立爆轰波在靶与约束层双重约束作用下的二维辐射膨胀模型,用 Fluent 软件进行仿真研究,得到了激光冲击强化后不同时间对应的爆轰波压力和轴向速度分布,仿真结果与激光冲击强化 GH742 试件后表面残余应力分布的实验结果一致。

**关键词** 激光冲击强化,数值仿真,爆轰波

## Simulation Research on Laser-Supported Detonation Wave

Hu Yaji Li Yinghong Wang Cheng Ma Zhuang

(Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038)

**Abstract** The initial parameters laser-supported detonation wave and relationship between laser power density and initial parameters of detonation wave's surface were calculated by using C - J theory of detonation wave model. Two-dimensional model of self-emission expansion development under both restraint layer and target constraint was established by using hydromechanical method. Then by using Fluent, the hydromechanics analytical software, detonation wave pressure and axis velocity distribution after laser shock processing of different time were found out. Simulation result was consistent with test result of surface residual stress distribution of effectively shocked GH742 specimen.

**Key words** Laser shock peening/processing (LSP), Numerical simulation, Detonation wave

### 1 引言

激光冲击强化技术<sup>[1]</sup>是一种新兴的表面强化技术,其原理是受短脉冲(几十纳秒)的高峰值功率密度( $>10^9 \text{ W/cm}^2$ )的激光辐射,金属表面吸收层吸收激光能量发生爆炸性气化蒸发,产生高压( $>1 \text{ GPa}$ )的等离子体,该等离子体吸收激光能量爆炸产生高强度压力的冲击波(爆轰波),作用于金属表面并向内部传播<sup>[2]</sup>,如图 1 所示。

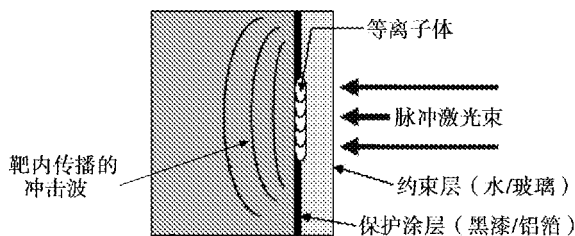


图 1 激光冲击强化原理示意图

Fig. 1 Principle of laser shock peening

当爆轰波的峰值压力超过被处理材料动态屈服强度时,材料表层就产生应变硬化,残留很大的压应力,并使材料的微观组织结构发生变化。这种爆轰波的力效应可以用来提高结构件的抗疲劳和抗腐蚀性能。

目前国内外激光冲击强化主要以实验研究为主,而仿真研究比较少。南京航空航天大学张永康<sup>[3]</sup>利用 Taylor 波理论计算了爆轰波产生时,靶表面所受到的压力,但无法描述靶表面压力的空间分布情况。法国 Fabro<sup>[4~5]</sup>等建立了等离子体轴向膨胀半经验模型;美国的 Igor Zinovic 和 Alex Povitsky<sup>[6]</sup>,对激光烧蚀形成的羽状气化物建立了数学模型;中国科技大学郭大浩等<sup>[7]</sup>建立了半经验的等离子体横向膨胀模型;南京工业大学彭薇薇、凌祥等进行了激光冲击强化产生残余应力场的有限元模拟研究<sup>[8]</sup>,预测了 304 不锈钢厚、薄靶材经过激光冲击强化后表面以及内部的残余应力场分布。该模型计算的结果能较好的反

收稿日期:2008-09-19;修回日期:2008-11-19

基金项目:国防预研基金(513270103)

作者简介:胡雅骥,1982 年出生,硕士,主要研究航空发动机可靠性与寿命工程。E-mail: xuehumen@163.com

应爆轰波的峰压随能量的变化规律,但是与实际测量结果相差较大,无法反应爆轰波压力的空间分布规律。上述模型的研究,对于激光冲击强化技术的发展起了一定的推动作用,但是随着该项技术走向应用,尤其是在航空部件(如发动机叶片)上应用,这些模型显现出了一定的局限性。对发动机部件激光冲击强化的研究中不仅关注峰值压力的大小,更关注的是波压在靶面不同位置上的分布。本文在对爆轰波性质和传播规律研究的基础上,同时考虑爆轰区域中心对称的特性,进行了激光束关闭后爆轰波在靶和约束层之间二维辐射膨胀模型研究,得到了爆轰波的时空分布规律,有助于更好的控制冲击强化的效果,防止局部压力过大或过小导致的部件表面应力集中,降低材料的疲劳性能。

## 2 爆轰波的 C-J 起爆模型及初始参数计算<sup>[9]</sup>

爆轰波的 C-J 模型是 20 世纪初 Chapman 和 Jouguet<sup>[10]</sup>各自对爆轰现象提出的简化模型,该模型反映了爆轰现象的一些基本特性,在爆轰产生阶段应用该模型进行分析具有较好的效果。

假设靶蒸气的等熵指数为  $\gamma$ ,爆轰波为强间断面。爆轰波的产生满足三大守恒方程,认为起爆阶段激光能量全部转化为爆轰波的能量。设蒸气初始热力学参数密度、气体速度、焓和气体压力分别为  $\rho_0$ 、 $u_0$ 、 $h_0$ 、 $p_0$ ,爆轰波后热力学参数为  $\rho_1$ 、 $u_1$ 、 $h_1$ 、 $p_1$ ,爆轰波波速  $D$ ,波面面积为  $A$ 。

质量守恒:流入和流出爆轰波间断面的质量相

$$\frac{\gamma}{\gamma-1}(p_1 v_1 - p_0 v_0) - v_0 \sqrt{\frac{p_1 - p_0}{v_0 - v_1}} + \frac{\sqrt{(p_1 - p_0)(v_1 - v_0)}}{2} - \alpha I_0 \sqrt{\frac{v_0 - v_1}{p_1 - p_0}} = 0 \quad (8)$$

(8) 式为爆轰产物的 Hugoniot 关系式。Rayleigh 直线和 Hugoniot 曲线是爆轰波的两个重要关系。如图 2 所示,在  $(p, v)$  平面上,  $H$  代表爆轰产物的 Hugoniot 曲线,  $H_0$  代表冲击波的 Hugoniot 曲线,  $R_1$ 、 $R_2$  代表不同斜率的 Rayleigh 直线。Rayleigh 直线因为斜率不同,与 Hugoniot 曲线的交点可能是  $S$ 、 $W$ 、 $J$ , 这些都是爆轰的解。点  $S$  对应的是强爆轰的解,点  $W$  对应的是弱爆轰的解,切点  $J$  对应的解即 C-J 爆轰的解。

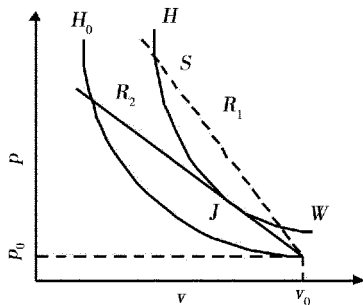


图 2 Rayleigh 直线和 Hugoniot 曲线示意图

Fig. 2 Rayleigh line and Hugoniot curve

等。

$$\rho_1(D - u_1)Adt = \rho_0(D - u_0)Adt \quad (1)$$

认为波前蒸气静止不动,即  $u_0 = 0$  整理得:

$$\rho_1(D - u_1) = \rho_0 D \quad (2)$$

动量守恒:爆轰波两边动量变化量相等

$$P_1 Adt + \rho_1 A(D - u_1) dt(D - u_1) = P_0 Adt + \rho_0 A(D - u_0) dt(D - u_0) \quad (3)$$

整理可得

$$P_1 + \rho_1(D - u_1)^2 = P_0 + \rho_0 D^2 \quad (4)$$

能量守恒:爆轰波产生后的总能为产生爆轰波前的能量加上吸收的激光能量

$$h_1 + \frac{(D - u_1)^2}{2} = h_0 + \frac{D^2}{2} + \frac{\alpha I_0}{\rho_0 D} \quad (5)$$

$I_0$  为激光功率密度,  $\alpha$  为激光吸收率(约为 0.8)。理想气体的焓  $h = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{\rho}$ ,  $\gamma \approx 1.4$  为理想气体的等熵指数。

整理(2)式~(4)式可得:

$$p_1 - p_0 = \rho_0^2 D^2 \left( \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_1} \right) \quad (6)$$

为了方便研究,引入比容  $v_0 = \frac{1}{\rho_0}$ ,  $v_1 = \frac{1}{\rho_1}$ , 上式变为

$$p_1 - p_0 = \rho_0^2 D^2 (v_0 - v_1) \quad (7)$$

此式表示的关系即为爆轰波的 Rayleigh 直线。

将式(2)、式(7)代入能量守恒方程可得:

由于  $p_1 \gg p_0$ , 可以忽略  $p_0$ , 根据切点只有一个解的条件解方程(8)可得:

$$p_1 = \frac{[2(\gamma^2 - 1)]^{\frac{2}{3}}}{\gamma + 1} \times \rho_0^{\frac{1}{3}} \times (\alpha I_0)^{\frac{2}{3}} \quad (9)$$

将结果代入式(2)和式(7)可得:

$$D = \left[ \frac{2(\gamma - 1)\alpha I_0}{\rho_0} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

$$u_1 = \frac{\left[ \frac{2(\gamma - 1)\alpha I_0}{\rho_0} \right]^{\frac{1}{3}}}{\gamma + 1} \quad (11)$$

以激光功率密度为  $10^9$  W/cm<sup>2</sup>, 金属蒸气(铝)密度  $2.7 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>, 光斑直径 8 mm 计算,爆轰波的初始压力为 3.62 GPa, 初始速度为 1 770 m/s。

## 3 爆轰波发展仿真结果和分析

进行爆轰波的仿真研究首先做如下假设:激光束关闭后爆轰波和波后区域是一个具有一定厚度和初速度的高温、高压区,而爆轰波周围的气体为靶面电

离的等离子体与金属蒸气、空气的混合体;周围气体为常温常压的区域;靶和约束层均为刚性壁面。

爆轰波的高温高压特性,决定了其传播过程是具有明显热传导的湍流。对爆轰波在靶和约束层之间流动进行研究,属于可压流,雷诺数较高,因此采用 Reynolds 平均法较为合适,湍流模型选择涡粘模型中的标准  $k-\varepsilon$  模型。爆轰波传播这样具有局部热源的问题,采用离散传播辐射(DTRM)模型是最好的辐射计算方法,故采用 DTRM 模型来考虑爆轰波传播过程的热传导。

采用流体力学软件 Fluent 6.3 进行模型的仿真计算。激光冲击强化过程中,靶面与约束层之间的距离很短,假设模型高度为 1 mm、宽 20 mm,上下表面分别是约束层和靶面,均为刚性壁面。激光冲击区域一般在几个毫米的范围内,由于模型空间的大小限制,将高压区的初始高度设为 0.3 mm、宽度为 1 mm,计算区域网格划分采用结构为  $120 \times 120$ ,如图 3 所示。模型上下边界设为无滑移壁面,进出口设为自由出口边界。由爆轰波的 C-J 起爆模型计算结果可知,爆轰波的压力为 GPa 量级,速度为  $10^3/s$  量级,结合相关文献,设爆轰波的初始压力为 0.99 GPa、初始速度 3 km/s;离子体区域初始温度为  $10^4$  K。将求解器的时间步长设为为 1 ns 进行仿真计算,仿真结果如图 4~图 5 所示。

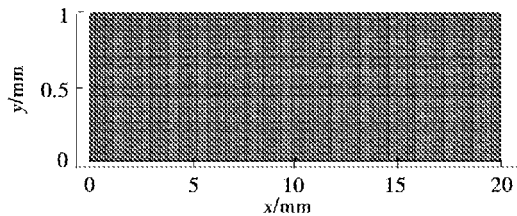


图3 计算区域网格

Fig. 3 Calculation area grid

分析不同时间爆轰波压力和轴向速度仿真结果如下。

在靶与约束层双重约束的作用下,爆轰波从初始状态辐射膨胀发展,经过约束层的反射,最后到达靶面所需时间为 315 ns,压力衰减 80% 左右,爆轰波压力随时间变化过程如图 4 所示,相应的爆轰波轴向速度虽时间变化过程如图 5 所示。爆轰波传播到约束层面上,大约需要 100 ns 左右,并在约束层面上发生积聚现象。爆轰波发展到 120 ns[图 4(d)]时的峰值压力明显超过 40 ns[图 4(b)]时的,这是由于约束层面上这种压力积聚现象导致的,压力局部增大也是压力波脉宽展宽的一个主要原因。爆轰波从约束层返回靶面后,在靶中心两侧区域形成两个局部压力集中区,如图 4(f) 所示。当初始压力较小时,这种分布对

部件表面冲击强化效果影响不大,但从对铝合金冲击强化后的实验结果表明,残余应力分布基本上是中心高、边缘低。当初始压力较高时,返回靶面的压力仍然超过材料的动态屈服强度,这时对部件表面冲击强化效果影响就比较明显了。

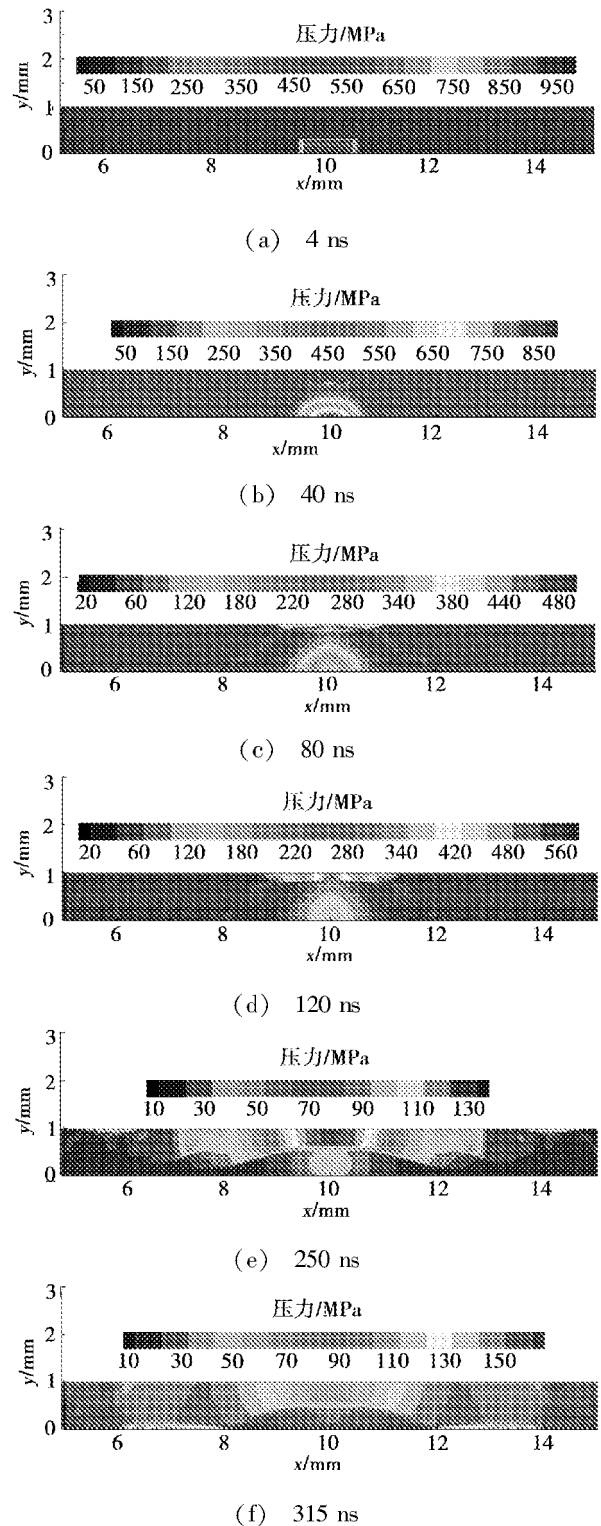


图4 不同时间对应的爆轰波压力分布云图

Fig. 4 Detonation wave pressure distribution for different time after laser shock processing

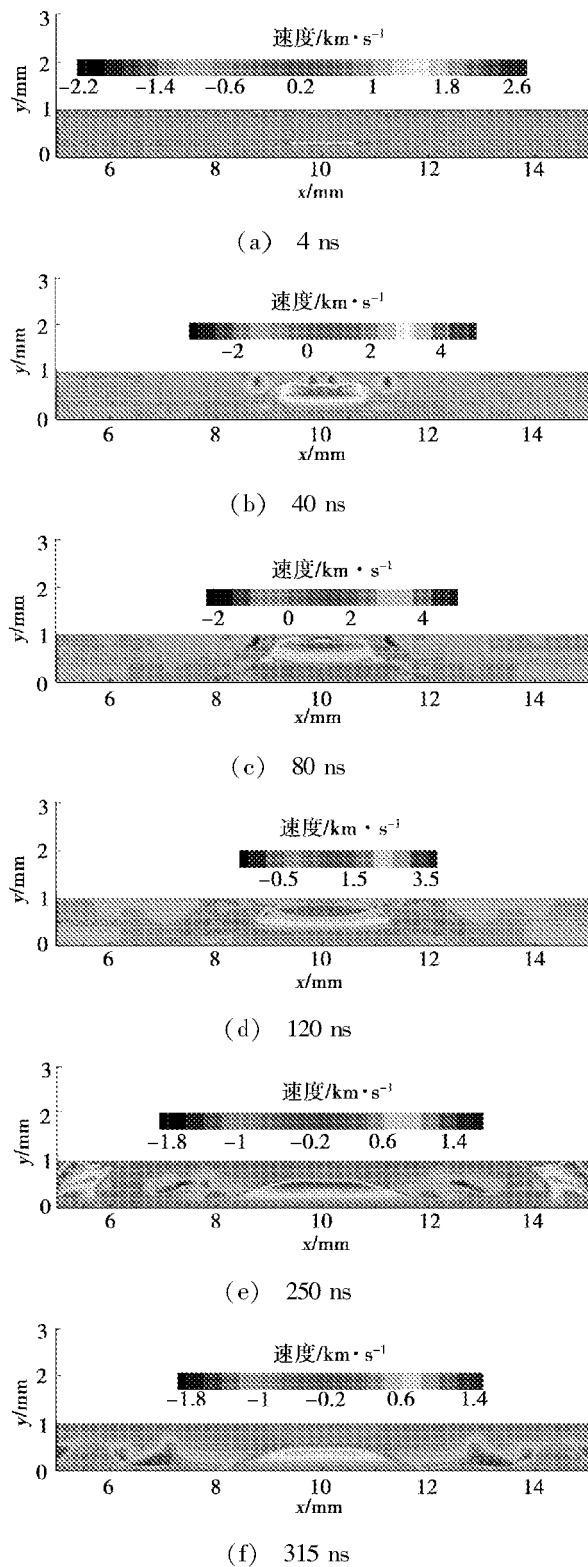


图5 不同时间对应的爆轰波轴向速度分布云图

Fig. 5 Detonation wave axis velocity distribution for different time of after laser shock processing

利用 40 J 以上的能量冲击强化 GH742 材料的试件<sup>[11]</sup>, 试件激光冲击强化后表面残余应力分布如图 6 所示, 在距离中心某一环状范围内残余压应力较高, 这一现象与图 4(f) 中的压力分布规律相同。

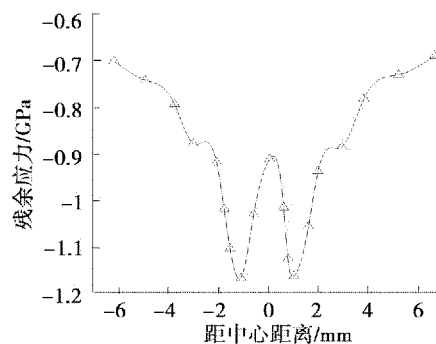


图6 GH742 试件激光冲击强化后表面残余应力分布

Fig. 6 Surface residual stress distribution of GH742 specimen after laser shocked

#### 4 结论

利用爆轰波的 C-J 起爆模型求解了爆轰波初始参数计算式, 明确了激光功率密度与爆轰波波面初始参数的关系; 利用流体力学的方法建立了约束条件下爆轰波发展的二维辐射膨胀模型, 并用 Fluent 软件仿真计算了 0.99 GPa 初始压力爆轰波的发展过程, 爆轰波二维约束模型仿真结果表明: 爆轰波在约束层的作用下, 压力积聚, 在约束层附近形成一个局部高压区, 使爆轰波压升高, 同时增大了爆轰波的脉宽; 爆轰波从约束层返回靶面后, 在靶中心两侧区域形成两个局部压力集中区, 当初始波压很大时, 这种压力集中现象对材料表面强化效果有明显的影 响。仿真结果与 GH742 试件激光冲击强化后表面残余应力分布的实验结果一致。

#### 参考文献

- 1 花银群, 张永康. 激光冲击强化技术半自由度约束层理论厚度的研究. 中国激光, 2002; 29(8): 751 ~ 754
- 2 Chu Jinn P, Ph. D. Microstructure and mechanical properties of laser shocked iron-based alloys. University of Illinois at Urbana-Champaign, 1992; 4 ~ 33
- 3 张永康. 激光冲击处理提高航空铝合金疲劳寿命研究. 南京: 南京航空航天大学出版社, 1995
- 4 Fabbro R, Fournier J, Ballard P et al. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry. J. Appl. Phys., 1990; 68(2): 775 ~ 784
- 5 Peyre P, Fabbro R. Laser shock processing; a review of the physics and applications. Opt. and Quantum Electron., 1995; 27(12): 1 213 ~ 1 229
- 6 Igor Zimovik, Alex Povitsky. Modeling of vapor-droplet plumes ablated from multiple spots. Applied Surface Science, 2007; 253: 6 371 ~ 6 376
- 7 彭薇薇, 凌祥. 激光冲击残余应力场的有限元分析. 航空材料学报, 2006; 26(6): 31 ~ 37
- 8 郭大浩, 王声波, 吴鸿兴等. 激光冲击波的幅度和时间特性的理论研究. 激光杂志, 2000; 21(3): 20 ~ 22
- 9 刘世伟, 郭大浩, 王声波. 实验参数对激光冲击强化效果的影响. 中国激光, 2000; 27(10): 937 ~ 940
- 10 李维新. 一维不定常流与冲击波. 北京: 国防工业出版社, 2003; 394 ~ 401
- 11 马壮, 李应红. 航空发动机叶片激光冲击强化机制研究. 航空维修与工程, 2007; (4): 58 ~ 59 (编辑 吴坚)