

# 冲击波在膜基结构材料中传输的研究

叶云霞<sup>1,2</sup> 赵抒怡<sup>1</sup> 左慧<sup>1</sup>

<sup>1</sup>江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013; <sup>2</sup>江苏大学激光技术研究所, 江苏 镇江 212013

**摘要** 将 Abaqus 模拟与实验相结合, 研究了激光诱导冲击波在膜基结构材料中的传输及其对膜层-基体结合强度的影响。建立不同声阻抗匹配模式的膜基结构模型, 改变膜层厚度, 分别进行模拟和实验。分析不同时刻深度方向的应力分布, 膜层脱落的凸起形貌, 不同膜层厚度对应的最大应力值、持续时间。结果发现: 当膜层声阻抗小于基体时, 膜层表面覆盖合适的约束层, 可以避免膜层-基体界面处形成拉应力, 两者结合强度不会减弱, 材料表面性能得到强化; 当膜层声阻抗大于基体时, 应根据加工要求, 决定是否可以进行激光冲击; 当拉应力不可避免时, 膜层厚度需慎重选择, 既要考虑材料表面的强化效果, 也要减小界面处拉应力强度。

**关键词** 激光技术; 激光冲击; 膜基结构; 冲击波传输; 结合强度; 数值模拟

中图分类号 TN24

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0503003

## Study of Laser-Driven Shock Wave Propagation in Film-Substrate Structure Material

Ye Yunxia<sup>1,2</sup> Zhao Shuyi<sup>1</sup> Zuo Hui<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

<sup>2</sup>Institute of Laser Technology, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

**Abstract** In order to study laser-induced shock wave's propagation properties in the film-substrate structure material and its impact on film-substrate bonding strength, the process is studied systematically based on Abaqus software and experiments. In the numerical simulation, the film-substrate structure models with different acoustic impedance matching modes are established and the film thickness is changed. The stress distribution along the depth direction at different moments, the convex morphology of films, the maximum stress value and duration of different thickness films are all analyzed. The results show that, when the acoustic impedance of the film is weaker than that of the substrate, tensile stress at the interface between the film and substrate can be avoided by covering appropriate constraint layer on the film surface. In this case, the bonding strength is not weakened and the material surface properties are enhanced. When the acoustic impedance of the film is stronger than that of the substrate, conducting the laser shock or not depends on the processing purposes. When the stress is unavoidable, choices of material thickness should be cautious. Not only the strengthening effect of the material surface should be taken into account, but also the tensile stress at the interface between the film and substrate should be reduced.

**Key words** laser technique; laser shock; film-substrate structure; shock wave propagation; binding strength; numerical simulation

**OCIS codes** 320.7090; 320.5520; 320.5550

## 1 引言

强激光作用于材料表面可诱导高压冲击波, 该冲击波可以作为加工、制造零件的能量源, 即激光冲击加工技术。近年来随着激光技术的成熟以及其高速、便捷、无污染等优势, 激光冲击加工已引起广泛关注。大量研究表明: 高功率、短脉冲激光作用于金属表面可以有效提高其表面硬度、耐腐蚀性、延长其耐疲劳寿命<sup>[1-3]</sup>。激光冲击本质上是利用强激光诱导冲击波的力学效应, 激光诱导高能冲击波在裸露金属中的传输、

收稿日期: 2015-02-18; 收到修改稿日期: 2016-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(51205172, 51175237)、上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室开放基金(MSV-2015-17)、江苏省普通高校专业学位论文研究生创新计划(SJZZ15\_0129)

作者简介: 叶云霞(1978—), 女, 博士, 副教授, 主要从事激光加工方面的研究。E-mail: yeyunxia@ujs.edu.cn

衰减规律已有大量实验、理论和数值仿真研究<sup>[4-8]</sup>。

在航天航空和生物医用等领域,为了提高金属材料的抗氧化性能和力学性能,常需要在其表面镀上一层薄膜<sup>[9-12]</sup>,形成上层膜层、下层基体的材料结构。由于所镀膜层材料性能与基体不同,当冲击波到达声阻抗不同的两种材料界面处时将发生透射、反射,还可能形成拉应力,破坏膜层-基体结合强度<sup>[13-14]</sup>。所以冲击波在膜基结构材料中的传输远比其在裸露金属中要复杂。激光冲击技术是否可用于提高此类膜基结构材料的力学性能,同时不破坏膜层-基体结合强度这一问题值得深入研究。目前关于冲击波在类似膜基结构材料中传输的研究主要包括:研究膜基系统动态应变;研究层裂的形成;研究膜层与基体的结合强度;检测材料内部是否存在裂纹,等<sup>[15-20]</sup>。这些研究,虽然应用领域各异,但本质原理均基于冲击波在不同材料界面处的传输特性。以往这些研究,只给出实验现象,证明冲击波在界面处存在透射、反射;材料界面处存在拉应力,甚至导致层裂;并未系统地给出膜基结构中压应力、拉应力的具体形成过程、形成条件,也没有提出合理的方案抑制膜层-基体界面处形成拉应力,避免两者结合强度的减弱。因此,对于激光诱导冲击波对不同膜层-基体结合强度有怎样的影响,能否将激光冲击用于各种膜基结构材料性能的强化,目前均未有清楚的判断。

由于激光冲击的瞬时性,通过实验无法实时、精确监测冲击波在材料内部的传输,而数值仿真软件可以实现这一目的,为预测和控制冲击效果提供可视化模型。基于此,本文用 Abaqus 有限元分析软件,建立铝膜-铜基体、铜膜-铝基体两种膜基结构模型,改变同种基体的膜层厚度,并对激光诱导冲击在膜基结构材料中的传输进行数值仿真。分析冲击波对膜层-基体结合强度的影响,同时通过冲击实验从侧面验证仿真结果。

## 2 数值研究方法

### 2.1 模型建立与膜层-基体声阻抗的选择

图 1 为模型的侧截面图,实际模型为绕左边虚线轴旋转一周的三维立体模型。图 1 中上层为膜层,声阻抗为  $Z_1$ ,下层为基体层,声阻抗为  $Z_2$ ,膜层与基体之间选用 Abaqus 中 Partition 功能分开定义材料属性,两者交界面处节点共用,基体下边界固定。模拟过程中基体厚度  $D = 500 \mu\text{m}$ ,激光脉宽约为 10 ns,冲击波是持续时间为激光脉宽 2~3 倍<sup>[21-22]</sup>的三角波,由 Fabbro 公式<sup>[4-5]</sup>估算激光诱导冲击波压力可达吉帕数量级。因此,模拟时将加载强度  $P$  设为极值 3 GPa,脉宽为 30 ns 的三角波,如图 2 所示。

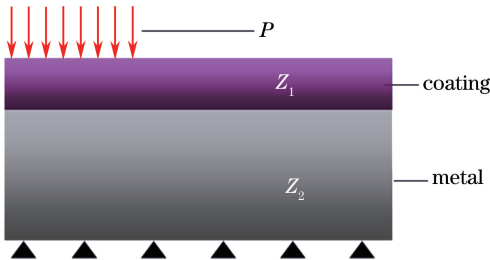


图 1 冲击模型示意图

Fig. 1 Diagram of shock model

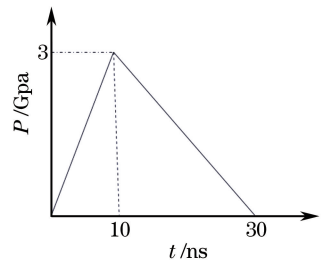


图 2 加载冲击波

Fig. 2 Loading shock wave

冲击波的传输与介质声阻抗密切相关,模拟过程中建立了两种膜层-基体声阻抗匹配模式:膜层铝-基体铜,即膜层声阻抗低于基体声阻抗模型;膜层铜-基体铝,即膜层声阻抗高于基体声阻抗模型。铜声阻抗  $Z_{\text{Cu}} = 3.6852 \times 10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ,铝声阻抗  $Z_{\text{Al}} = 1.5058 \times 10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。

### 2.2 膜层厚度的选择

根据弹塑性波的传输特性,不同材料中冲击波传输速度  $v = \sqrt{E/\rho}$ ,其中  $E$  是材料的弹性模量, $\rho$  是材料密度。一个加载周期  $T$  内冲击波的传输深度  $L = vT$ , $L$  同时也为一个完整加载波形的宽度。在研究膜层厚度对冲击波传输的影响时,建立膜层铝-基体铜模型,选择 5 种不同厚度的铝膜层  $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5$ ,且  $d_1 < d_2 < d_3 \approx L < d_4 < d_5$ 。上述各参数的具体值如表 1 所示。

### 2.3 本构模型的选择与网格的划分

激光诱导冲击波是一个超高应变率、冷塑性变形过程,模拟时需要一种能描述高应变率、高温范围下材料塑性流动行为的本构模型。John-Cook 模型形式简单、物理机理清晰,因此选择 John-Cook 模型<sup>[21]</sup>为

动态加载条件下材料的本构模型。表 2 为铜和铝的 John-Cook 模型参数,其中  $\rho$  为材料密度,  $E$  为弹性模量,  $\sigma$  为泊松比,  $M$  为材料熔点,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $n$ 、 $m$  分别为材料常数。

表 1 数值模拟参数

Table 1 Numerical simulation parameters

$T$ / ns	$V$ / (m/s)	$L$ / mm	$D$ / mm	$d_1$ / mm	$d_2$ / mm	$d_3$ / mm	$d_4$ / mm	$d_5$ / mm
30	5098	0.153	0.5	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30

表 2 铜和铝的 John-Cook 模型参数

Table 2 John-Cook model parameters of copper and aluminum

Material	$\rho$ / (g/cm <sup>3</sup> )	$E$ / MPa	$\sigma$	$M$ / k	$A$ / MPa	$B$ / MPa	$C$ / MPa	$n$	$m$
Cu	8.93	119000	0.326	1356	90	292	0.025	0.31	1.09
Al	2.77	70000	0.34	877	337	343	0.010	0.41	1

应力波沿着深度方向传输,需要一个精细的网格来捕捉波形,当加载的完整波形分布在 10 个单元格内时比较合适<sup>[23]</sup>。由于波形宽度  $L = Tv$ ,  $L$  即为 10 个单元格的宽度,由此确定每个单元格的宽度约为  $L/10$ 。

### 3 结果与分析

#### 3.1 膜层-基体声阻抗匹配模式对冲击波传输的影响规律

##### 3.1.1 数值仿真研究

冲击波进入材料内以应力波形式表现,图 3 和图 4 分别是膜层铝-基体铜和膜层铜-基体铝不同时刻法向应力在材料深度方向的分布。膜层厚度为 200  $\mu\text{m}$ ,基体厚度为 500  $\mu\text{m}$ ,以膜层上表面冲击中心为应力起始点。图中横坐标为深度,纵坐标为应力,应力负值表示压应力,方向向下,应力正值表示拉应力,方向向上,曲线的不同形式代表不同时刻。

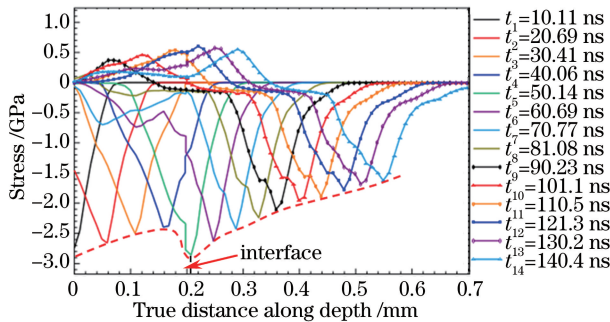


图 3 不同时刻法向应力随深度变化(200  $\mu\text{m}$  铝膜层、500  $\mu\text{m}$  铜基体)

Fig. 3 Normal stress versus depth at different moments (200  $\mu\text{m}$  aluminum film, 500  $\mu\text{m}$  copper substrate)

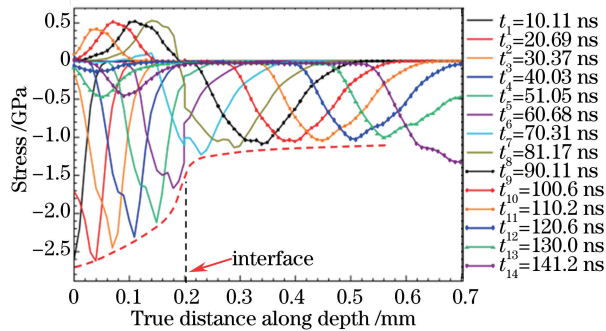


图 4 不同时刻法向应力随深度变化(200  $\mu\text{m}$  铜膜层、500  $\mu\text{m}$  铝基体)

Fig. 4 Normal stress versus depth at different moments (200  $\mu\text{m}$  copper film, 500  $\mu\text{m}$  aluminum substrate)

由图 3 和图 4 可知,初始时间段,应力波为向膜层内部传输的压应力,应力波形状为与加载脉宽类似的三角波。随着时间增加,应力波传输深度不断增大,由于应力波在材料内传输存在衰减,所以应力极值逐渐

减小。当应力波到达膜层与基体交界面处,由于膜层与基体的声阻抗不同,应力发生突变。根据波在界面处的透、反射规律,部分应力波反射回膜层内部,部分应力波透射进入基体内。设界面处的入射波强度为  $P_1$ ,则透射强度  $P_T$ ,反射强度  $P_R$  分别为<sup>[13-14]</sup>

$$P_T = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} P_1, \quad (1)$$

$$P_R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} P_1, \quad (2)$$

式中  $Z_1$ 、 $Z_2$  分别为膜层和基体的声阻抗值。

对于透射进入基体的应力波,如图 3,膜层铝的声阻抗  $Z_1$  小于基体铜的声阻抗  $Z_2$ ,由(1)式可知,界面处透射入基体的应力波强度  $P_T$  大于入射应力波强度  $P_1$ ,界面处应力波极值呈增大的突变。图 4 中,膜层铜的声阻抗值  $Z_1$  大于基体铝的声阻抗值  $Z_2$ ,透射入基体的应力波强度  $P_T$  则小于入射应力波强度  $P_1$ ,界面处应力波极值呈减小的突变。应力波进入基体后,随着传输深度的增加,应力波极值也在不断减小。

对于反射进入膜层的应力波,其传播方向改变,从界面向膜层上表面传输。由于冲击波在铝中的传输速度大于其在铜中的传输速度<sup>[24]</sup>,所以膜层为铝时冲击波在 60 ns 左右到达交界面处,膜层为铜时冲击波在 80 ns 左右到达交界面处。比较图 3 和图 4,当膜层为铝时,反射进入膜层的应力波在初始阶段 60~80 ns 仍为负值,80 ns 后为正值,即应力变化为先压后拉。膜层为铜时,情况却恰好相反:反射应力波在初始阶段 80~110 ns 为正值,120 ns 后变为负值,即先拉后压。这一现象可由图 5 来解释。

当膜层为铝时,对于基体铜来说,铝膜是低阻抗材料。如图 5(a)所示,从低阻抗铝膜层到高阻抗铜基体的应力波  $P_1$ ,到达两者交界面处,压力由  $P_1$  上升到  $P_2$ ,有一压力波阵面向基体内传输,另一压力波阵面向膜层内传输。在  $t_3$  和  $t_4$  时刻之间,向低阻抗铝箔内传输的压应力波阵面和初始冲击波  $P_1$  的卸载部分相遇,压应力减小到  $P_2 - P_1$ ,这一脉冲继续向左传输。当其到达膜层上表面,遇到膜层与空气的界面。对于空气来说,膜层铝是高阻抗材料,此时应力波由高阻抗的膜层传输到低阻抗的空气,如图 5(b)所示。假设冲击波到达界面之前压力为  $P_3$ ,到达界面处压力减小到  $P_4$ ,这个压力将产生一个稀疏脉冲反射回膜层内,这一稀疏脉冲传输中遇到压力脉冲  $P_3$  的卸载部分时,将形成拉伸脉冲  $P_3 - P_4$ ,且在两个方向传输<sup>[24]</sup>。当拉应力幅值足够大,在材料中会形成层裂,或使膜层与基体脱落。因此,原始应力波到达膜层铝与基体铜交界面处,由低阻抗传入高阻抗,在 60~80 ns 先产生反射进入膜层的压应力波,此压应力到达膜层上表面时,由高阻抗膜层传入低阻抗空气,再次反射才行成较小的拉应力波,即先压后拉。

当膜层为铜时,对于基体铝来说,铜膜层为高阻抗材料,应力波的传输为先从高阻抗膜层传入低阻抗基体,如图 5(b)所示先形成较大的反射进入膜层的拉应力,再从高阻抗膜层到低阻抗空气,应力波方向继续改变形成压应力,即先拉后压。所以膜层铜内的应力变化情况与膜层铝内应力变化情况恰好相反。

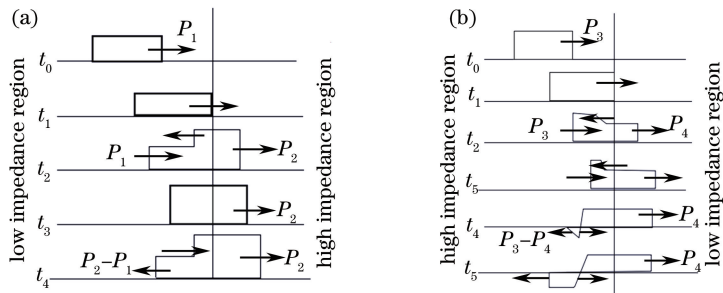


图 5 界面处冲击波传输。(a) 低阻抗到高阻抗;(b) 高阻抗到低阻抗

Fig. 5 Shock wave propagation at interface. (a) From low impedance to high impedance;

(b) from high impedance to low impedance

为了进一步验证上述冲击波在膜基结构材料中的传输规律,给出同一条件下不同声阻抗匹配模式,膜层脱落时的仿真结果。

图 6 和图 7 分别为两种不同膜层-基体匹配模式下,激光冲击后膜层与基体剥离时的形貌,不同颜色对



应不同的形变量。仿真结果显示:当膜层为铝时,膜层凸起高度为 0.02729 mm,远小于膜层为铜时的膜层凸起高度 0.2945 mm。这一现象恰好证明:激光冲击低阻膜-高阻基体结构材料时界面处不易形成拉应力,而冲击高阻膜-低阻基体结构材料时界面处产生较大的拉应力。

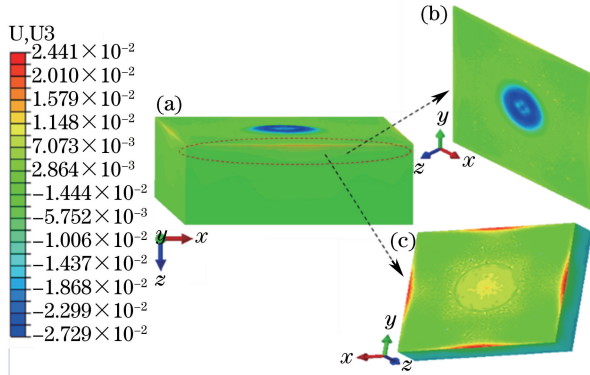


图 6 铝膜层-铜基体。(a) 整体图; (b) 界面处膜层; (c) 界面处基体

Fig. 6 Aluminum film-copper substrate. (a) Complete picture; (b) interface film; (c) interface substrate

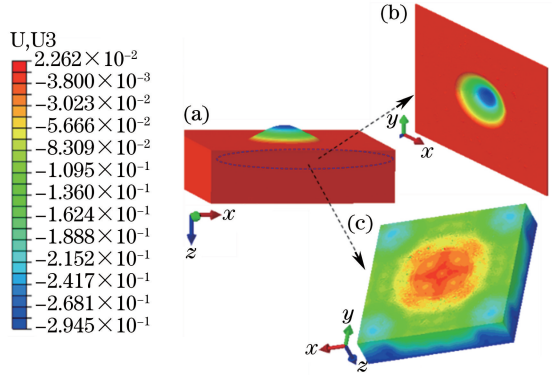


图 7 铜膜层-铝基体。(a) 整体图; (b) 界面处膜层; (c) 界面处基体

Fig. 7 Copper film-aluminum substrate. (a) Complete picture; (b) interface film; (c) interface substrate

### 3.1.2 实验验证

为验证仿真结果的正确性,对上述不同膜基结构材料进行了激光冲击实验。表 3 为具体实验参数,膜层厚度为  $d$ 、基体厚度为  $D$ 、激光能量为  $I$ 、激光脉宽为  $T_1$ 、约束层为  $C$ 。

表 3 实验材料和参数

Table 3 Experimental materials and parameters

Film-substrate	$d / \mu\text{m}$	$D / \text{mm}$	$I / \text{J}$	$T_1 / \text{ns}$	$C$
Al-Cu	150	10	9	10	water
Cu-Al	150	10	9	10	water

图 8 和图 9 为不同膜基结构材料冲击后,膜层的凸起形貌。膜层为铝时,冲击后无明显凸起;膜层为铜时,冲击后凸起明显。实验结果与数值仿真所得规律一致。

综上分析,当冲击波从低阻抗材料进入高阻抗材料时,界面处形成辐值变大的压缩波,且反射波不可能为拉应力;当冲击波从高阻抗进入低阻抗时,界面处形成辐值变小的稀疏波;当其与原始冲击波的稀疏波相遇才有可能形成拉伸波;当此拉伸波强度过大时膜层脱落。因此高阻膜-低阻基体结构时,激光冲击虽然对膜层表面起到一定的强化作用,但激光能量的有效利用率被降低,膜层结合强度也被减弱甚至破坏。此时应根据具体加工要求,衡量是否采用激光诱导冲击波加工膜基结构材料;低阻膜-高阻基体结构时,可用激光诱导冲击波加工膜基结构材料,冲击时在膜层上表面覆一层声阻抗比膜层大的透明约束装置,可以达到完全避免拉应力的理想效果,膜层不会脱落,同时增大激光诱导冲击波的压力。

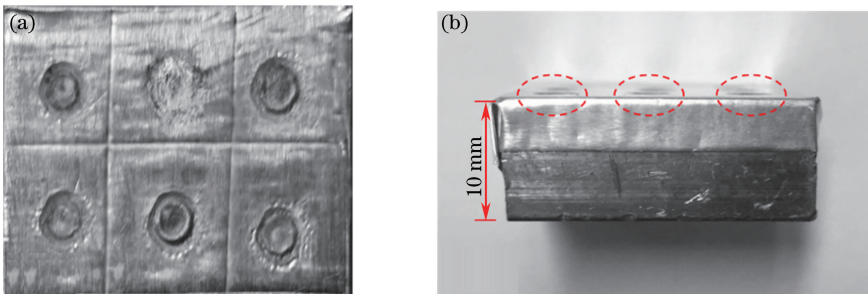


图 8 铝膜层-铜基体。(a) 正视图; (b) 侧面图

Fig. 8 Aluminum film-copper substrate. (a) Front view; (b) side view

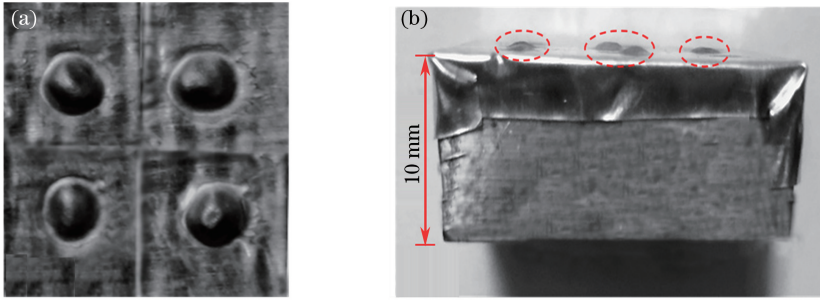


图 9 铜膜层-铝基体。(a) 正视图；(b) 侧面图

Fig. 9 Copper film-aluminum substrate. (a) Front view; (b) side view

### 3.2 膜层厚度对冲击波传输的影响

当实际条件无法实现上述合适约束层时,即使膜基结构材料为低阻膜-高阻基体结构,也无法完全避免界面处拉应力形成,此时需考虑膜层厚度对冲击波传输的影响。以  $500\ \mu\text{m}$  铜为基体,选择 5 种不同厚度的铝膜层进行模拟研究。这里给出两种典型厚度的应力分布图像,如图 10 和图 11 所示,当膜层厚度分别为  $150\ \mu\text{m}$  和  $300\ \mu\text{m}$  时,不同时刻法向应力沿深度的分布图像。经整理统计,其他条件一定,随着膜层厚度  $d$  的变化,最大压应力值  $P_C$ 、最大压应力出现的深度  $H$ ,界面处最大拉应力值  $P_T$ 、拉应力出现时刻  $T_T$ 、拉应力持续时间  $\tau$ ,均不同,结果如表 4 所示。

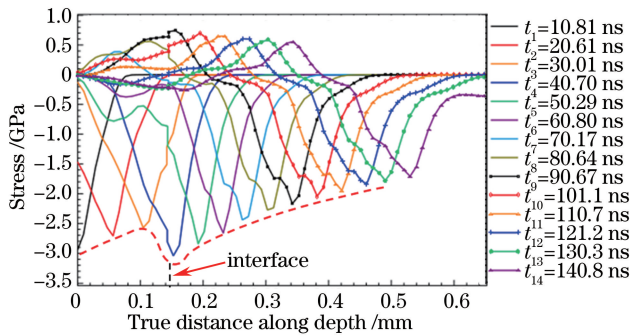


图 10 膜层  $150\ \mu\text{m}$ ,不同时刻法向应力随深度变化

Fig. 10 Normal stress versus depth at different moments, when film is  $150\ \mu\text{m}$

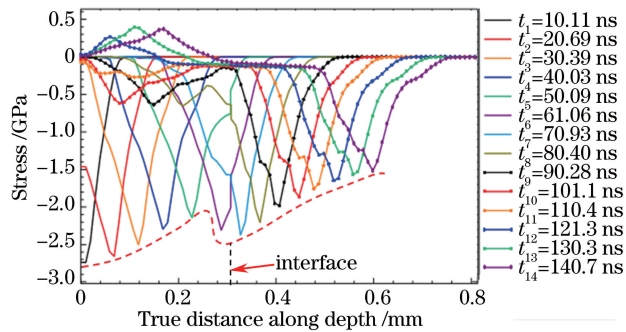


图 11 膜层  $300\ \mu\text{m}$ ,不同时刻法向应力随深度变化

Fig. 11 Normal stress versus depth at different moments, when film is  $300\ \mu\text{m}$

由表 4 数据知,当膜层厚度小于  $300\ \mu\text{m}$  时,随着膜层厚度  $d$  的增加,最大压应力值  $P_C$  逐渐减小;由  $H$  和  $d$  可知,最大压应力值均出现在膜层与基体的交界面附近。一方面,随着膜层厚度增大,应力波在其中衰减越大,到达界面处的峰值压力就越小;另一方面,如图 10 所示,应力波到达界面时由低阻抗铝膜透射进入高阻抗铜基体,压力出现增大的突变,补偿了其在膜层内的衰减,所以最大压应力值在界面附近。当膜层厚度为  $300\ \mu\text{m}$  时,如图 11 所示,最大压应力值  $P_C$  并非在界面附近。这是因为膜层过厚,应力波在膜层内衰减量较大,虽然应力波在界面处仍会有一个增大的突变,但其增大量不足以弥补其在膜层内的衰减量,因而

最大压应力并未出现在界面附近。由  $P_C$  随  $d$  的变化可知,随着膜层厚度的增加,最大压应力值减小;由  $P_T$  随  $d$  的变化可知,最大拉应力随着膜层厚度的增加而减小,但拉应力的持续时间  $\tau$  随着膜层厚度  $d$  的增加而增大。因此,激光诱导冲击波加工低膜-高阻基体结构材料且拉应力无法避免时,应合理、慎重选择膜层厚度。既要考虑获得尽可能高的冲击压力,达到理想的强化效果,也要避免界面处产生较大和持续时间较长的拉应力,防止膜层与基体间结合强度减弱。

表 4 参量随膜层厚度的变化  
Table 4 Parameters vary with film thickness

$d / \mu\text{m}$	$P_C / \text{MPa}$	$H / \mu\text{m}$	$P_T / \text{MPa}$	$T_T / \text{ns}$	$\tau / \text{ns}$
50	3921	53.06	931.9	33.5	14
100	3689	97.95	862.9	53.5	34
150	3200	142.4	736.2	68.2	45
200	2856	207.5	602.1	98.5	67
300	2658	58.37	449.3	146.2	112

## 4 结 论

研究了激光诱导冲击波对膜基结构材料的影响规律,得到如下结论:

1) 激光冲击膜基结构材料时,要重视膜层-基体界面对冲击波传输的影响,冲击波在界面处会形成透射应力波和反射应力波。对于透射应力波,其特性保持不变,仍为压应力波。对于反射应力波:当膜层声阻值抗低于基体时,应力波性质不变,仍为压应力波;当膜层声阻抗值高于基体时,应力波性质发生改变,由原来压应力波变为拉应力波。

2) 当膜层声阻抗低于基体声阻抗时,激光冲击过程中在膜层表面覆盖声阻抗较大的透明约束层可避免拉应力形成。既解决了界面处拉应力削弱膜层-基体结合强度的问题,同时也可增大激光诱导冲击波的初始压力值。

3) 当膜层声阻抗高于基体声阻抗时,激光冲击虽然对材料表面有一定的强化作用,但实际冲击压力被削弱,且界面处易形成较大拉应力,可能破坏界面结合强度。

4) 膜基界面处最大压应力、拉应力随着膜层厚度的增加而减小,但拉应力的持续时间随着膜层厚度的增加而增大。因此,当激光冲击强化膜基材料时,应合理选择膜层厚度。

## 参 考 文 献

- Ge Maozhong, Zhang Yongkang, Xiang Jianyun. Research on laser shock strengt-hening and stress corrosion cracking resistance of AZ31B magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(11): 2925-2930.  
葛茂忠, 张永康, 项建云. AZ31B 镁合金激光冲击强化及抗应力腐蚀研究[J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2925-2930.
- Li Xingcheng, Zhang Yongkang, Lu Yali, *et al.*. Research of corrosion resistance for AZ31 magnesium alloy by laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0403002.  
李兴成, 张永康, 卢雅琳, 等. 激光冲击 AZ31 镁合金抗腐蚀性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0403002.
- 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.
- Devaux D, Fabbro R, Tollier R, *et al.*. Generation of shock waves by laser-induced plasma in confined geometry[J]. Journal of Applied Physics, 1993, 74(4): 2268-2273.
- 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.
- Hong Xin, Wang Shengbo, Guo Dahao, *et al.*. Research on the attenuation property of the laser-induced shock wave propagation in aluminum[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1998, 15(5): 474-478.  
洪 昕, 王声波, 郭大浩, 等. 激光冲击波在铝靶中衰减特性研究[J]. 量子电子学报, 1998, 15(5): 474-478.
- Wang Wei, Zhang Jie, V K Senecha. Numerical simulation study of laser-driven shock wave propagation in planar Al foil targets[J]. Acta Physica Sinica, 2001, 50(4): 741-747.  
王 薇, 张 杰, V K Senecha. 冲击波在铝靶中传播的数值模拟研究[J]. 物理学报, 2001, 50(4): 741-747.

- 8 Cao Yupeng, Feng Aixin, Xue Wei, *et al.*. Experimental research and theoretical study of laser shock wave induced dynamic strain on 2024 aluminum alloy surface[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0903001.  
曹宇鹏, 冯爱新, 薛伟, 等. 激光冲击波诱导 2024 铝合金表面动态应变特性试验研究及理论分析[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0903001.
- 9 Hua Yinqun, Ji Ping, Chen Ruifang, *et al.*. Effect of laser shock on the electrical property of ZnO-based ceramic films [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0507001.  
花银群, 季平, 陈瑞芳, 等. 激光冲击处理对 ZnO 薄膜性能的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0507001.
- 10 Zhou Jianzhong, Wei Denghui, Hang Shu, *et al.*. Microscale laser shock peer on TiN coating[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(11): 2679-2684.  
周建忠, 卫登辉, 黄舒, 等. 微尺度激光喷丸强化 TiN 涂层的表面性能[J]. 光学精密工程, 2011, 19(11): 2679-2684.
- 11 Ren Peng, Wang Limin, He Min, *et al.*. Influence of pasting films on the resistant impacting property of glass [J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2010, 24(3): 10-13.  
任鹏, 王利民, 何敏, 等. 贴膜玻璃抗冲击实验分析[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2010, 24(3): 10-13.
- 12 Niu Xiuzhong. Research on the experiments of copper thin films onto Silicon wafers tread by laser shockprocessing[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010: 53-58.  
牛忠秀. 硅基铜薄膜制备及其激光冲击改性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2010: 53-58.
- 13 Gai Jingbo, Wang Shan, Yang Shiquan. Promulgation of impact wave in multilayer structure [J]. Fire Control and Command Control, 2007, 32(3): 12-18.  
盖京波, 王善, 杨世全. 冲击波在多层结构中的传播[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(3): 12-18.
- 14 Ren Lianbao, Ding Li, Liu Runsheng. The meaning and role of acoustic impedance in the process of explosion welding for Ti steel composite plate [J]. Titanium Industry Progress, 2010, 27(4): 5-8.  
任连保, 丁力, 刘润生. 声阻抗在钛-钢复合板爆炸焊接过程中的意义和作用[J]. 钛工业进展, 2010, 27(4): 5-8.
- 15 L Hu, P Miller, J Wang. High strain-rate spallation and fracture of tungsten by laser-induced [J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 504: 73-80.
- 16 E Gay, L Berthe, M Boustie, *et al.*. Study of the response of CFRP composite laminates to a laser-induced shock [J]. Composites: Part B, 2014, 64: 108-115.
- 17 Feng Aixin, Zhong Guoqi, Xue Wei, *et al.*. Dynamic stress-strain of film-substrate system induced by laser shock wave [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0603003.  
冯爱新, 钟国旗, 薛伟, 等. 激光冲击波诱导膜-基系统动态应力应变[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0603003.
- 18 Huang Xiuguang, Luo Pingxing, Fu Sizu, *et al.*. Shockwave propagation stability in Al-Au impedance-matching target irradiated by high power laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(11): 1832-836.  
黄秀光, 罗平庆, 傅思祖, 等. 激光驱动冲击波在铝-金阻抗匹配靶中的传播稳定性[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(11): 1832-1836.
- 19 Xu Meng. Researches on the bonding qualities of multi-layered metal-metal [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2007: 44-53.  
徐猛. 多层金属粘接结构粘接质量的超声检测[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2007: 44-53.
- 20 Kan Jianping. Finite element simulation of measurement of interface tensile strength by laser spallation technique [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2002: 37-45.  
阚剑平. 激光层裂法检测薄膜与基体结合强度有限元分析[D]. 镇江: 江苏大学, 2002: 37-45.
- 21 Jiang Yinfang, Huang Qin, Huang Yu, *et al.*. Research on propagation characteristics of laser shock wave in aluminum alloy sheet [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(11): 1230-1234.  
姜银方, 黄勤, 黄宇, 等. 激光冲击波在铝合金薄板中传播特性研究[J]. 激光与红外, 2012, 42(11): 1230-1234.
- 22 Chen Yibing, Zhou Jianzhong, Huang Shu, *et al.*. Numerical simulation of laser peen forming based on Abaqus [J]. Chinese J Lasers, 2007, 27(3): 175-180.  
陈毅彬, 周建忠, 黄舒, 等. 基于 ABAQUS 的激光板料成形的数值模拟研究[J]. 应用激光, 2007, 27(3): 175-180.
- 23 Zhuo Zhuang, You Xiaochun, Liao Jianhui, *et al.*. Finite element analysis and application based on Abaqus [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 198.  
庄茁, 由小川, 廖剑晖, 等. 基于 Abaqus 的有限元分析和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 198.
- 24 Marc Andre Meyers. Dynamic behavior of materials [M]. Zhang Qingming, Liu Yan, Huang Fenglei, *et al.*. Transl. Beijing: National Defence Industry Press, 2006.  
迈耶斯. 材料的动力学行为[M]. 张庆明, 刘彦, 黄风雷, 等译, 北京: 国防工业出版社, 2006.