

激光冲击波加载 690 高强钢薄板传播机制的模拟与实验

曹宇鹏^{1,3} 周东呈¹ 冯爱新^{2,3} 花国然^{1*} 陈浩天¹ 朱娟⁴

¹南通大学机械工程学院, 江苏 南通 226019

²温州大学机电工程学院, 浙江 温州 325035

³江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

⁴上海振华重工集团(南通)有限公司, 江苏 南通 226019

摘要 为研究激光冲击波在 690 高强钢薄板中的传播机制,对 690 高强钢薄板经激光冲击后的动态响应以 Hyperworks、LSDYNA 为平台进行模拟,用聚偏氟乙烯压电传感器进行测量,将模拟结果与实验结果对比研究试样动态应变特性,建立了高应变率条件下表面动态应变模型和 690 高强钢薄板激光冲击波加载模型。研究结果表明,在功率密度为 12.7 GW/cm^2 的激光加载下,通过改变表面测量位置和试样厚度测得表面 Rayleigh 波波速为 $3.08 \times 10^3 \text{ m/s}$,纵波的波速为 $3.09 \times 10^3 \text{ m/s}$;表面 Rayleigh 波传播速度模拟值为 $3.24 \times 10^3 \text{ m/s}$,模拟结果与实验结果有较好的一致性;通过调整激光功率密度可分离剪切波和表面 Rayleigh 波。实验数据证明 690 高强钢表面动态应变模型准确可靠,激光冲击波加载模型可描述激光冲击波在 690 高强钢薄板中的传播机制。

关键词 光学制造;激光光学;激光冲击波;传播机制;690 高强钢

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1102010

Simulation and Experiment of Transmission Mechanism on Laser Shock Wave Loading 690 High-Strength Steel Sheet

Cao Yupeng^{1,3} Zhou Dongcheng¹ Feng Aixin^{2,3} Hua Guoran¹

Chen Haotian¹ Zhu Juan⁴

¹School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China

²School of Mechanical and Electrical Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China

³School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

⁴Shanghai Zhenghua Heavy Industries Co., Ltd. Nantong Branch, Nantong, Jiangsu 226019, China

Abstract To study the transmission mechanism of laser shock wave inside the 690 high-strength steel sheet, the dynamic strain induced by laser shock loaded on 690 high-strength steel sheet was simulated on the platforms of Hyperworks and LSDYNA. The experimental results were measured by a polyimide fluoride piezo electric sensor. A comparison between the simulated and the experimental results was carried out. The dynamic strain model of 690 high-strength steel surface under high strain rate of pulsed laser shock and a loading model under the

收稿日期: 2016-05-26; 收到修改稿日期: 2016-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(51505236,51305050)、江苏省光子制造重点实验室开发基金(GZ201101)、江苏省科技成果转化项目(BA2013099)

作者简介: 曹宇鹏(1981—),男,博士研究生,讲师,主要从事激光加工检测技术的研究。

E-mail: cyp19812004@ntu.edu.cn

导师简介: 冯爱新(1970—),男,博士,教授,主要从事激光加工与检测技术、机械制造及其自动化等方面的研究。

E-mail: aixfeng@126.com

* 通信联系人。E-mail: huagr@ntu.edu.cn。

laser shock waves on 690 high-strength steel sheet were established. The results show that under the loading power density of 12.7 GW/cm^2 through changing the location of measuring position and thickness of the samples, the measured velocity of Rayleigh wave and laser shock is $3.08 \times 10^3 \text{ m/s}$ and $3.09 \times 10^3 \text{ m/s}$ respectively. The simulated value of the velocity of the surface Rayleigh wave was $3.24 \times 10^3 \text{ m/s}$, displaying significant consistency with the experimental results. Shear wave and Rayleigh wave can be separated through adjusting the power density of laser shock. The experimental results demonstrate the accuracy and reliability of the dynamic strain model of 690 high-strength steel surface loaded by the pulsed laser shock wave. The loading model of the laser shock waves can be used to describe the transmission mechanism of the laser shock wave inside the 690 high-strength steel sheet.

Key words optical fabrication; laser optics; laser shock wave; transmission mechanism; 690 high-strength steel

OCIS codes 120.4610; 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引 言

随着世界海洋油气开发向深海和极地的进军,海工平台用钢的综合性能面临海洋极端环境的考验^[1-2]。其中 690 高强钢是重要的海工用钢,在海洋潮差的作用下极易发生腐蚀损伤甚至腐蚀疲劳断裂,会严重威胁海工平台的安全^[3]。激光冲击强化(LSP)作为一种新型的金属表面强化技术,可显著提高材料的抗疲劳、磨损和应力腐蚀等性能,其原理是利用脉宽 ns 量级、功率密度 GW/cm^2 量级的激光束,加载金属表面的吸收层,利用等离子体冲击波的力学效应,使材料表面发生塑性变形并残留压应力,从而改善材料的表面性能^[4-6]。然而,国内外目前仅采用组织、化学成分、金相等手段研究热处理工艺对 690 高强钢力学性能的影响^[7-8],尚未采用激光冲击强化技术开展相关研究,因此,开展激光冲击强化 690 高强钢对其力学性能影响的研究具有重要的意义。另外,激光冲击强化时,可使用高分子压电材料聚偏氟乙烯(PVDF)测量激光冲击波在试样中的衰减规律与冲击波波速,之前的报道重点在利用 PVDF 压电传感器研究激光冲击钛合金、铝合金、镁合金等金属试样时背面的动态应变^[9-10],而研究激光冲击试样表面的动态应变的报道较少^[11-12]。因此,利用 PVDF 压电传感器探究激光冲击波加载 690 高强钢的传播机制,使用激光冲击提高 690 高强钢表面性能将是一个崭新的课题。

本文对激光冲击后 690 高强钢薄板的动态响应以 Hyperworks、LSDYNA 为平台进行模拟,用 PVDF 压电传感器进行测量,通过对比分析激光冲击加载后模拟所得的动态响应和 PVDF 压电传感器测得的动态应变,建立并验证了 690 高强钢在激光冲击高应变率条件下表面动态应变模型,建立了 690 高强钢激光冲击波加载模型,为研究 690 高强钢激光冲击动态响应与表面应力分布相关性提供理论支持,为解决海工平台关键零部件防腐提供技术支撑。

2 实验材料及方法

实验采用进口美制 690 高强钢,具体化学成分、机械性能见表 1。使用线切割将材料割成 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 、 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 两种尺寸的试样,将试样表面及背面用 240-1200 # 砂纸依次打磨,厚度分别为 1 mm 和 1.5 mm,用乙醇清洗并冷风风干。使用 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 150 \mu\text{m}$ 的黑胶带作为吸收层紧密贴合于试样表面,4 mm 厚的 K9 玻璃作为约束层覆盖于黑胶带之上。

表 1 690 高强钢化学成分(质量分数)与机械性能

Table 1 Chemical composites of 690 high-strength steel (mass fraction) and mechanical capacity

Mass fraction of chemical composites /%									σ_b/MPa	σ_s/MPa	E/GPa
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V			
≤ 0.18	≤ 0.50	≤ 1.6	≤ 0.02	≤ 0.01	≤ 1.5	≤ 3.5	≤ 0.7	≤ 0.08	≥ 690	835	72

在试样正面,沿激光光斑径向且距光斑中心 2 mm 处粘贴 PVDF 压电传感器(锦州科信电子材料有限公司,中国),在试样背面对应光斑中心位置粘贴 PVDF 压电传感器,PVDF 压电传感器尺寸为 $30 \mu\text{m} \times 5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。动态应变检测装置由 SGR 系列光电调 Q 脉冲 Nd:YAG 固体激光器(镭宝光电有限公司,加拿大)、DL9140 数字示波器(横河电机株式会社,日本)、光路系统、工控机、工作台组成,实验装置如图 1(a)、(b)所示。激光束通过光路系统作用在试样表面预加载区域,使用光电二极管接收激光作为示波器的触发信号,示波器实时检测 PVDF 压电传感器的压电信号,并以电压-时间曲线的形式输出。激光冲击参数脉

宽采用 10 ns, 波长 1064 nm, 脉冲能量在 0.5~1 J 之间选择, 光斑直径为 1, 2, 3 mm, 在 K9 玻璃约束下分别冲击 690 高强钢试样表面, 约束层的装夹方式如图 1(c) 所示。在脉冲激光加载区域外粘贴 PVDF 压电传感器, 从而可忽略脉冲激光冲击试样时热辐射和热对流对 PVDF 压电传感器测量结果的影响; 鉴于 K9 玻璃具有较高的导热系数, 同时可以延长作用时间, 增强冲击波压力, 因此选用 K9 玻璃作为约束层可忽略激光热效应对 PVDF 压电传感器测量结果的影响。

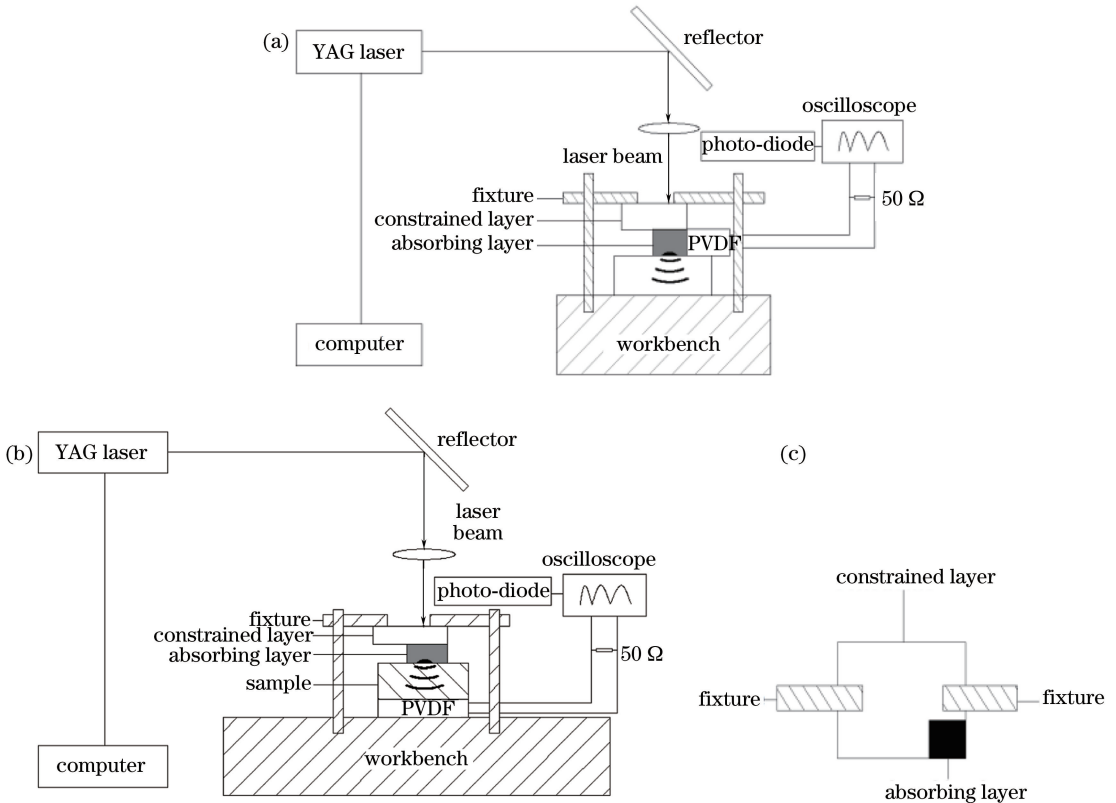


图 1 基于激光冲击的 690 高强钢动态应变检测实验装置图。(a) 表面; (b) 背面; (c) 约束层

Fig. 1 Experimental apparatus of the detection of dynamic strain of 690 high-strength steel sample after laser impact.

(a) Surface; (b) backside; (c) constrained layer

3 激光冲击有限元模型的建立

在 Hyperworks 与 LSDYNA 平台中, 采用长方体 1/4 模型作为分析对象, 网格尺寸统一为 0.125 mm。由于冲击波的横波效应, 将冲击波压力加载区域延伸至光斑半径的 1.2 倍, 即压力加载区域半径为 0.6 mm。对模型侧面与底面施加无反射边界条件, 对中间两对称面施加对称约束。模型材料采用 Johnson-Cook 本构模型, 忽略热效应造成的温度上升效应, 即采用简化后的 Johnson-Cook 本构模型。

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left[1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}'}{\dot{\epsilon}'_0} \right], \quad (1)$$

式中 A 为 690 MPa, B 为 835 MPa, n 为 0.93, C 为 0.014。 $\dot{\epsilon}'$ 表示应变率, $\dot{\epsilon}'_0$ 表示参考应变率。690 高强钢的力学性能参数如下: 弹性模量 E 为 72 GPa, 密度为 7.85 g/cm³, 泊松比 ν 为 0.3。脉冲激光诱导的冲击波作用时间为脉宽的 2~3 倍^[11], 脉宽 10 ns, 取冲击波作用时间为 30 ns。冲击波加载曲线如图 2 所示。

4 结果与讨论

4.1 690 高强钢中激光冲击波的传播模拟与测试

在功率密度为 12.7 GW/cm² 的激光冲击下, LSDYNA 数值模拟过程中可明显观察到半球面传播的表

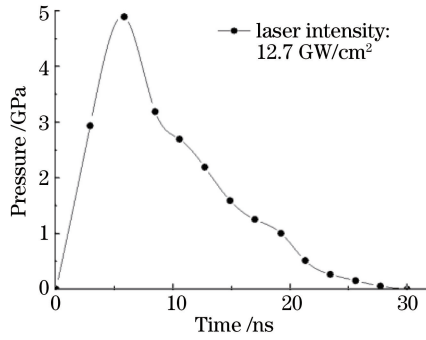


图 2 冲击波压力时程曲线

Fig. 2 Pressure-time history of laser shock wave

面 Rayleigh 波,如图 3 所示。表面 Rayleigh 波自载荷加载边界处产生并向外传播,在 1584.3 ns 时刻传递至 5.25 mm 位置,如图 3(a)所示,可知在 5.25 mm 之外只存在向外传播的表面 Rayleigh 波;在 2046.9 ns 时刻传递至 6.75 mm 位置,如图 3(b)所示,可知只有表面 Rayleigh 波沿着径向在表面向外传播。同时由图 3 (a)、(b)可知,在 462.6 ns 时间内表面 Rayleigh 波波阵面 R 向前推进了 12 个网格,即 1.5 mm,通过计算可得 690 高强钢中表面 Rayleigh 波的模拟波速为 3.24×10^3 m/s。

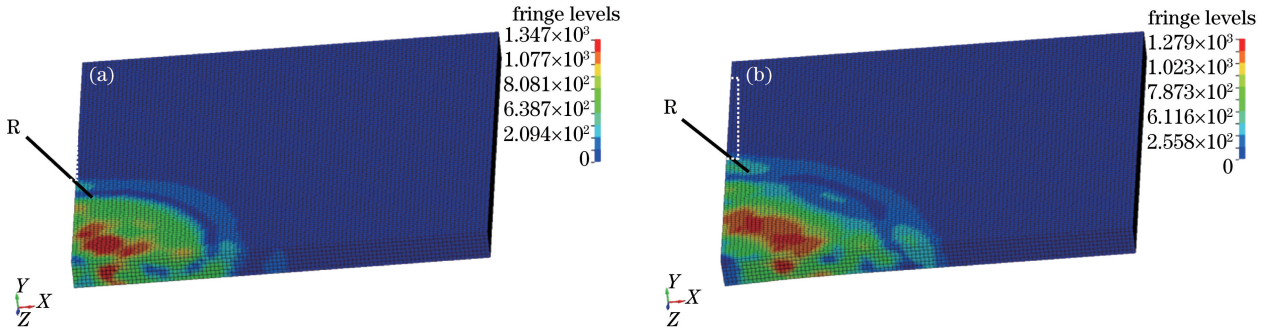


图 3 数值模拟获得的表面 Rayleigh 波在试样内的传播云图。(a) 1584.3 ns; (b) 2046.9 ns

Fig. 3 Spread of Rayleigh surface wave in the sample by simulation. (a) 1584.3 ns; (b) 2046.9 ns

PVDF 压电传感器在试样表面测量压电信号 $V(\epsilon, t)$,该动态应变的演化波形反映了脉冲激光加载时纵向传播的剪切波和横向传播的表面 Rayleigh 波。检测得到的距光斑边缘 0.5 mm 位置、2 mm 位置的动态应变压电波形分别如图 4、图 5 所示。观察图 4,冲击波的边界效应使光斑边界处材料承受较大的剪切应力从而在光斑边界处产生较大的剪切变形,由剪切变形导致的剪切波在向材料内部传播时逐渐衰减,当趋近时间点 R_1 (142.1 ns) 时其波形幅值衰减为 0。由于材料表面受到非均匀分布的冲击波作用,发生不均匀的轴向压缩,造成冲击区域的横向变形,导致表面 Rayleigh 波的产生^[13],时间点 R_1 后 $V(\epsilon, t)$ 曲线出现了幅值明显增大、波形下凹的压缩波,即表面 Rayleigh 波,由此可知当激光功率密度为 12.7 GW/cm^2 时,表面

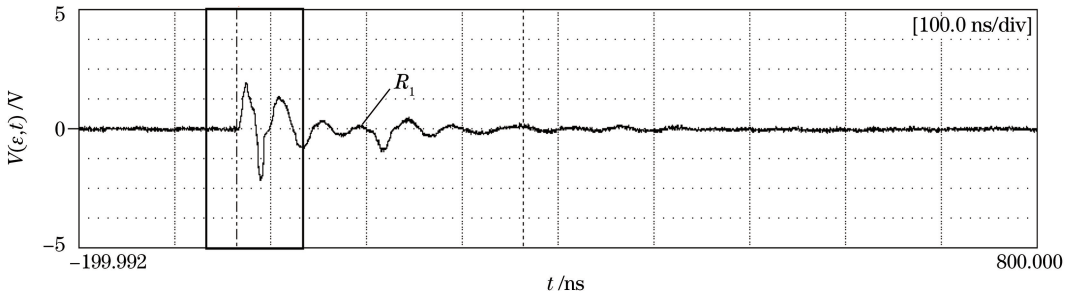


图 4 功率密度为 12.7 GW/cm^2 时激光冲击 690 高强钢距边缘 0.5 mm 处的动态应变

Fig. 4 Dynamic strain of 690 high-strength steel at the area from the edge of 0.5 mm when laser shock is loaded on its surface with a laser power density of 12.7 GW/cm^2

Rayleigh 波和剪切波不产生耦合。由图 5 可知, 压电波形在时间点 R_2 (629.5 ns) 之前较为平缓, 压电传感器在时间点 R_2 处仅检测到了幅值明显增大、波形下凹的压缩波, 根据波形和传播速度判断该压缩波为 Rayleigh 波。根据图 4、图 5 可知, 表面 Rayleigh 波在 487.4 ns 内传播了 1.5 mm, 表面 Rayleigh 波的波速为 3.08×10^3 m/s。表面 Rayleigh 波模拟所得波速为 3.24×10^3 m/s, 与实验所测波速相比两者误差不超过 5.2%, 模拟与实验具有较好的一致性。模拟结果与实验的误差主要来源于两方面: 1) 建立的材料模型是各向同性的理想情况, 而试样材料不可能是各向同性的介质; 2) 模拟建立的数学模型以一维应力波为基础, 而波在传递过程中存在不显著的侧向传播和几何弥散效应。

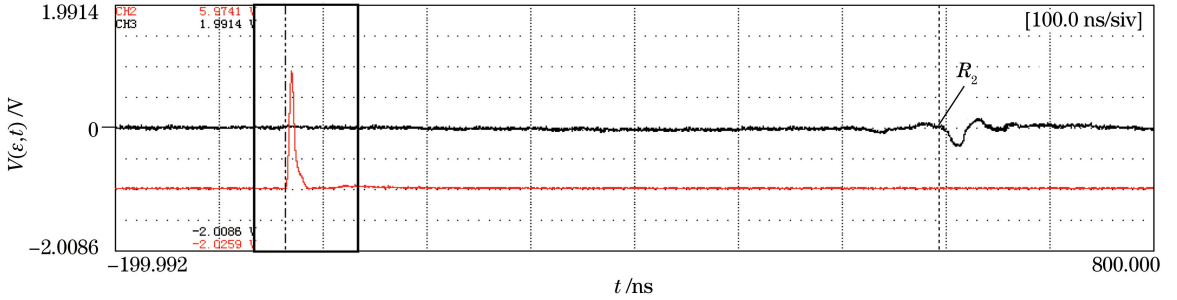


图 5 功率密度为 12.7 GW/cm² 时激光冲击 690 高强钢距边缘 2 mm 处的动态应变

Fig. 5 Dynamic strain of 690 high-strength steel at the area from the edge of 2 mm when laser shock is loaded on its surface with a laser power density of 12.7 GW/cm²

激光冲击诱导的剪切波在试样内不断振荡衰减, 当激光功率密度为 12.7 GW/cm² 时, 剪切波经 4 次振荡衰减接近于 0。如图 6 所示, 采集不同时间点反映剪切波的压电波形峰值数据, 对激光功率密度为 12.7 GW/cm² 数据采用指数衰减拟合, 可得剪切波在 690 高强钢中的衰减规律: $V(\epsilon, t) = 1.99 \exp(-0.016t)$, 单位为伏特。当 $t = 142.1$ ns 时, 剪切波的波幅已衰减接近于 0, 即当激光功率密度为 12.7 GW/cm² 时, 表面 Rayleigh 波和剪切波不产生耦合。由剪切波在 690 高强钢中的衰减规律可知: 激光功率密度越小, 剪切波压电波形的峰值越小, 则剪切波衰减为 0 的时间越短, 而检测点 Rayleigh 波出现的时间不变, 因此当激光功率密度低于 12.7 GW/cm² 时, 剪切波与表面 Rayleigh 波不发生耦合, 即通过调整激光参数可以分离剪切波和表面 Rayleigh 波。

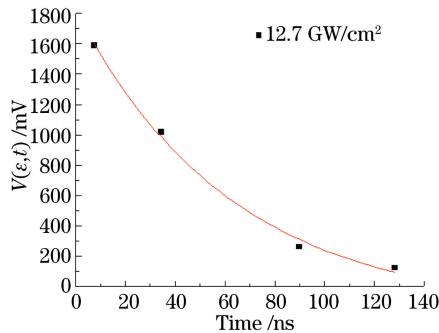


图 6 功率密度为 12.7 GW/cm² 激光诱导剪切波在 690 高强钢内的衰减曲线

Fig. 6 Attenuation curve of laser shock wave in 690 high-strength steel

综上所述, 当激光功率密度不大于 12.7 GW/cm² 时, 剪切波与表面 Rayleigh 波不产生耦合, 结合前文的模拟与实验可知通过调整激光参数可以分离剪切波和表面 Rayleigh 波。

PVDF 压电传感器在试样背面测得的压电信号 $V(\epsilon, t)$ 反映了纵波在不同厚度试样的背面引起动态应变的演化波形, 如图 7、图 8 所示。对图 7 进行分析, 激光冲击诱导的弹性应力波到达试样背面引起第一个应变压电峰值 (A_1 点), 随后在试样背面反射为向激光冲击面传播的弹性拉伸波, 并在背面引起第二个应变压电峰值 (B 点)。等离子体汽化物在约束层表面受压也会形成轴向传播的多次冲击波^[14], 多次冲击波传播至试样背面与反向拉伸波发生迎面卸载 (C 点), 引起背面动态应变在最大峰值之后的波动 (D 、 E 、 F 点)。卸载后的反向拉伸波仍具有较大的剩余动量, 可继续传播至试样表面, 而后再由表面反射至试样背面

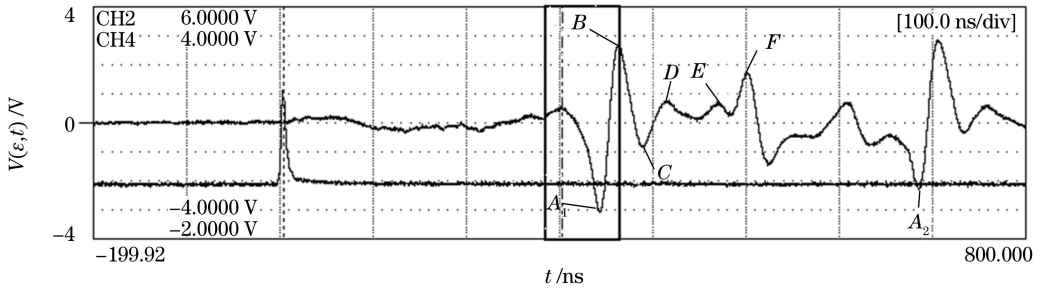


图 7 功率密度为 12.7 GW/cm² 激光冲击板厚 1 mm 试样时背面的动态应变压电波形

Fig. 7 Piezoelectric waveform representation of the dynamic strain of sample backside when the laser shock is loaded on 1 mm-thick material with a laser power density of 12.7 GW/cm²

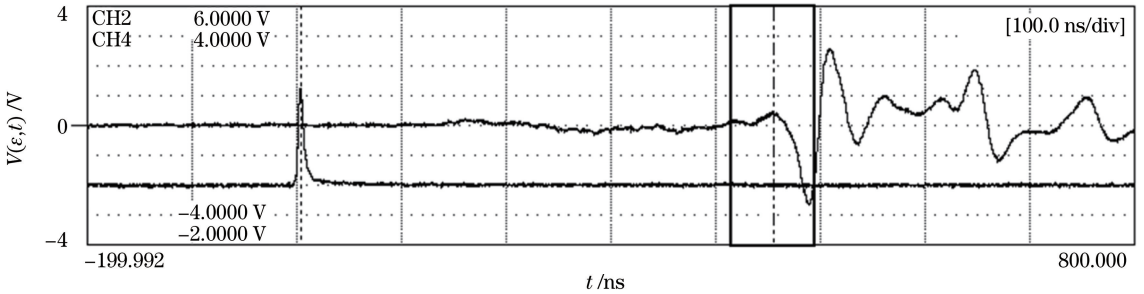


图 8 功率密度为 12.7 GW/cm² 激光冲击板厚 1.5 mm 试样时背面的动态应变压电波形

Fig. 8 Piezoelectric waveform representation of the dynamic strain of sample backside when the laser shock is loaded on 1.5 mm-thick material with a laser power density of 12.7 GW/cm²

引起第二次第一个应变压电峰值(A₂点),应力波在试样前后表面来回反射中不断衰减。

对比图 7、图 8,两者选取同一时刻作为起点,试样厚度为 1 mm 时纵波传递至试样背面的时间为 303.1 ns,试样厚度为 1.5 mm 时纵波传递至试样背面的时间为 464.4 ns。两者板厚差值为 0.5 mm,时间差值为 161.3 ns,可推知激光冲击波在 690 高强钢的传播速度为 3.09×10^3 m/s。

4.2 高应变率下 690 高强钢表面动态应变模型

通过控制激光的功率密度可以使剪切波与表面波不产生耦合,对剪切波作用部分进行分析($\epsilon_1 = 0, \epsilon_2 = 0$),假设在脉冲激光冲击 690 高强钢诱导高应变率条件下与静力拉伸条件下,两者应力-应变关系类似,存在弹性阶段、屈服阶段、强化阶段。假设 $0 < t_a < t_b < t_c < t_a$, t_a 为表面 Rayleigh 波到达 PVDF 检测点的时间,弹性阶段为 $0 \sim t_a$ 、屈服阶段为 $t_a \sim t_b$ 、强化阶段为 $t_b \sim t_c$ 。

在弹性阶段 $0 < t < t_a$ 时,有

$$a = \frac{d^2 \epsilon_3(t)}{dt^2} = \frac{dV_1(\epsilon, t)}{E_{PVDF} S d_{33} R dt} = \frac{E \epsilon_3(t)}{\rho d} = \frac{E \int_0^{t_1} V_1(\epsilon, t) dt}{E_{PVDF} S d_{33} R \rho d}, \text{ i.e., } \frac{dV_1(\epsilon, t)}{dt} = \frac{E \int_0^{t_1} V_1(\epsilon, t) dt}{\rho d}, \quad (2)$$

在屈服阶段 $t_a < t < t_b$ 时,有

$$a = \frac{d^2 \epsilon_3(t)}{dt^2} = \frac{dV_1(\epsilon, t)}{E_{PVDF} S d_{33} R dt} = \frac{\sigma_s}{\rho d}, \text{ i.e., } \frac{dV_1(\epsilon, t)}{dt} = \frac{E_{PVDF} S d_{33} R \sigma_s}{\rho d} = \text{const}, \quad (3)$$

在强化阶段 $t_b < t < t_c$ 时,有加速度

$$a = \frac{k \epsilon_3^n(t)}{\rho d} = \frac{dV_1(\epsilon, t)}{E_{PVDF} S d_{33} R dt} = \frac{k \int_{t_2}^{t_3} V_1^n(\epsilon, t) dt}{E_{PVDF} S d_{33} R \rho d}, \text{ i.e., } \frac{dV_1(\epsilon, t)}{dt} = \frac{k \int_{t_2}^{t_3} V_1^n(\epsilon, t) dt}{\rho d}, \quad (4)$$

式中 E_{PVDF} 表示压电薄膜的弹性模量, S 表示压电传感器检测点电极的面积, ϵ_j 表示应变($j = 1, 2, 3$), d_{33} 表示压电应变常数, E 表示 690 高强钢的弹性模量, ρ 表示 690 高强钢密度, d 表示激光冲击波入射深度,硬化系数用 k, n 表示。

当激光功率密度为 12.7 GW/cm^2 时,图 9 压电信号 $V(\epsilon, t)$ 的各拐点取值见表 2。当激光功率密度为 4.6 GW/cm^2 时,图 10 压电信号 $V(\epsilon, t)$ 的拐点取值见表 3。当激光功率密度为 2.0 GW/cm^2 时,冲击波能量较小,试样只发生弹性形变,冲击过程未发生屈服与强化。

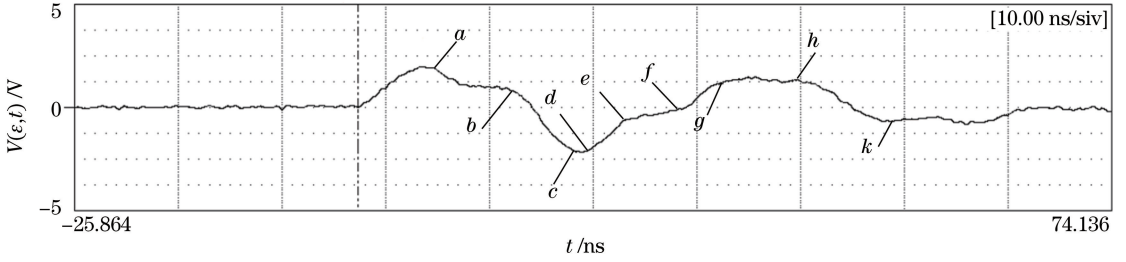


图 9 功率密度为 12.7 GW/cm^2 激光冲击板厚 1 mm 试样时表面的动态应变压电波形

Fig. 9 Piezoelectric waveform representation of the dynamic strain of sample surface when the laser shock is loaded on 1 mm-thick material with a laser power density of 12.7 GW/cm^2

表 2 功率密度为 12.7 GW/cm^2 的激光冲击试样时表面动态应变各拐点的电压值

Table 2 Voltage value of each keen point of sample dynamic strain at the laser density of 12.7 GW/cm^2

T / ns	$t_a = 7.5$	$t_b = 14.4$	$t_c = 20.8$	$t_d = 21.8$	$t_e = 25.7$	$t_f = 30.9$	$t_g = 37.7$	$t_h = 44.1$	$t_k = 50.5$
$V(\epsilon, t) / \text{mV}$	1524.19	760.50	-1645.43	-1737.14	-450.75	-24.59	1178.39	916.88	-532.60
$[dV(\epsilon, t)/dt]$ $/(\text{mV/ns})$	$V'_{1a,b} = -110.6$	$V'_{1b,c} = -375.9$	$V'_{1d,e} = 329.8$	$V'_{1e,f} = 82.0$	$V'_{1f,g} = 177.0$	$V'_{1g,h} = -226.5$	$V'_{1h,k} = -40.9$		

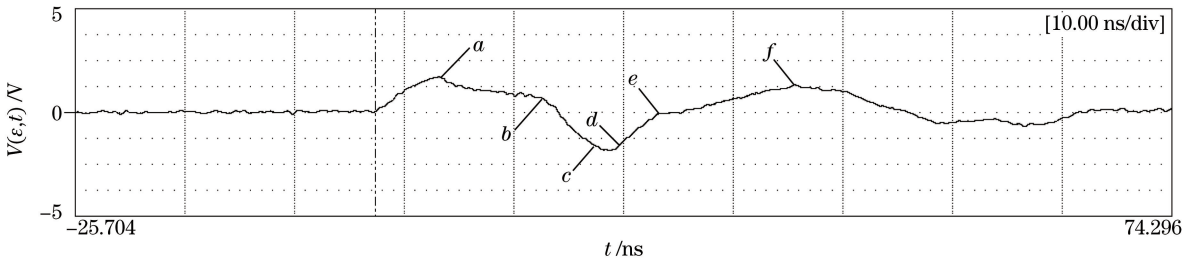


图 10 功率密度为 4.6 GW/cm^2 激光冲击板厚 1mm 试样时表面的动态应变压电波形

Fig. 10 Piezoelectric waveform representation of the dynamic strain of sample surface when the laser shock is loaded on 1 mm-thick material with a laser power density of 4.6 GW/cm^2

表 3 功率密度为 4.6 GW/cm^2 的激光冲击试样时表面动态应变各拐点的电压值

Table 3 Voltage value of each keen point of sample dynamic strain at the laser density of 4.6 GW/cm^2

T / ns	$t_a = 5.9$	$t_b = 15.1$	$t_c = 20.6$	$t_d = 21.8$	$t_e = 25.8$	$t_f = 38.3$
$V(\epsilon, t) / \text{mv}$	1385.31	587.08	-1407.36	-1412.30	-29.92	1005.95
$dV(\epsilon, t)/dt / (\text{mv/ns})$	$V'_{2a,b} = -86.8$	$V'_{2b,c} = -362.62$	$V'_{2d,e} = 345.6$	$V'_{2e,f} = 82.9$		

将图 9、图 10 中弹塑性加载阶段曲线拐点采集数据,绘出弹塑性加载阶段示意图(即图 11)。分析功率密度分别 12.7 GW/cm^2 、 4.6 GW/cm^2 时的压电波形。首先,在 de 段,将 de 段的时间差定义为 $t_{d,e}$ ($t_{d,e} = t_e - t_d$),其中表 2 中 de 段的时间差为 $t_{1d,e}$ ($t_{1d,e} = 3.9 \text{ ns}$),表 3 中 de 段的时间差为 $t_{2d,e}$ ($t_{2d,e} = 4.0 \text{ ns}$), $t_{2d,e}$ 是 $t_{1d,e}$ 的 1.025 倍。表 3 中 $dV(\epsilon, t)/dt$ 的数值 $V'_{2d,e}$ 接近于表 2 中 $dV(\epsilon, t)/dt$ 的数值 $V'_{1d,e}$ 的 1.05 倍。由于 $\sigma(t)$ 与 $dV(\epsilon, t)/dt$ 、 $\epsilon(t)$ 与 t^2 线性相关,所以在两种不同功率密度下,压电波形 $V(\epsilon, t)$ 的 de 段, $\frac{\sigma_1(t)/\epsilon_1(t)}{\sigma_2(t)/\epsilon_2(t)} \approx 1$,可知 $\sigma(t)/\epsilon(t) = E$ 为常量,因此实验结果符合(4)式。在 ef 段,表 2 中 $dV(\epsilon, t)/dt$ 的数值 $V'_{1e,f}$ 与表 3 中 $dV(\epsilon, t)/dt$ 的数值 $V'_{2e,f}$ 极为接近,即在两中不同功率密度下压电波形 $V(\epsilon, t)$ 的 ef 段有着几乎相同的斜率,可知在 ef 段两者试样动态应变加速度 a 为常量,该阶段随着时间变化应变显著增加而应力基本保持不变,实验结果符合(5)式。在 fg 段, fg 段 $dV(\epsilon, t)/dt$ 的值 $V'_{1f,g}$ 相较于 ef 段 $dV(\epsilon, t)/dt$ 的值 $V'_{1e,f}$ 再次增加,且 fg 末端呈斜率逐步减小的光滑圆弧,与静力拉伸下强化阶段的应力-应变关系曲线类似,实验结果符合(6)式。

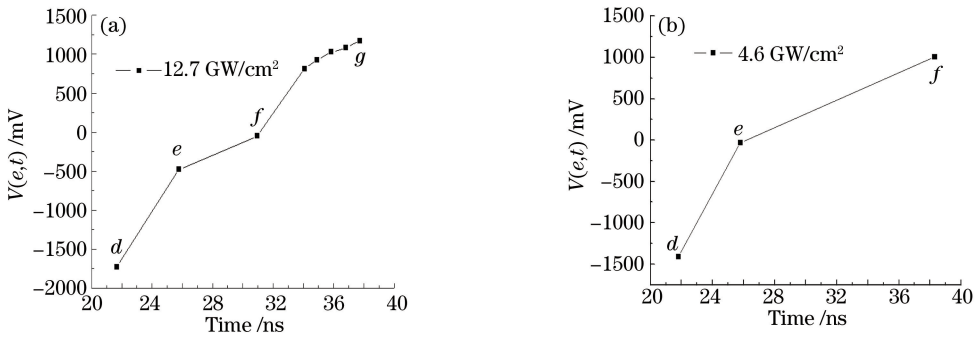


图 11 690 高强钢在脉冲激光冲击下弹塑性加载阶段的放大部分示意图。(a)激光功率密度为 12.7 GW/cm^2 ， de 标志弹性阶段、 ef 标志屈服阶段、 fg 标志强化阶段；(b)激光功率密度为 4.6 GW/cm^2 ， de 标志弹性阶段、 ef 标志屈服阶段

Fig. 11 Enlarged partial schematic diagrams of the elastic-plastic loading stage for 690 high-strength steel under laser impact with (a) laser power density of 12.7 GW/cm^2 , where de is the elastic stage, ef is the yield stage, and fg is the strain-hardening stage; and (b) laser power density of 4.6 GW/cm^2 , where de is the elastic stage, and ef is the yield stage

综上可知，在脉冲激光冲击 690 高强钢诱导高应变率与静力拉伸条件下，两者应力应变关系类似，均存在弹性阶段、屈服阶段和强化阶段，分析结果验证了 690 高强钢的动态应力-应变模型正确可靠。

4.3 690 高强钢薄板激光冲击波加载模型

文献[13]借助数值模拟分析了试样表面剪切波与表面 Rayleigh 波的传播机制。文献[14]利用 PVDF 压电传感器验证了多次反射波与多次冲击波对试样背面动态应变的影响。结合文献 [13-14]，冲击动力学理论^[15]以及实验观测得到的试样表面、背面的动态应变，建立了 690 高强钢薄板激光冲击波加载模型，如图 12 所示。

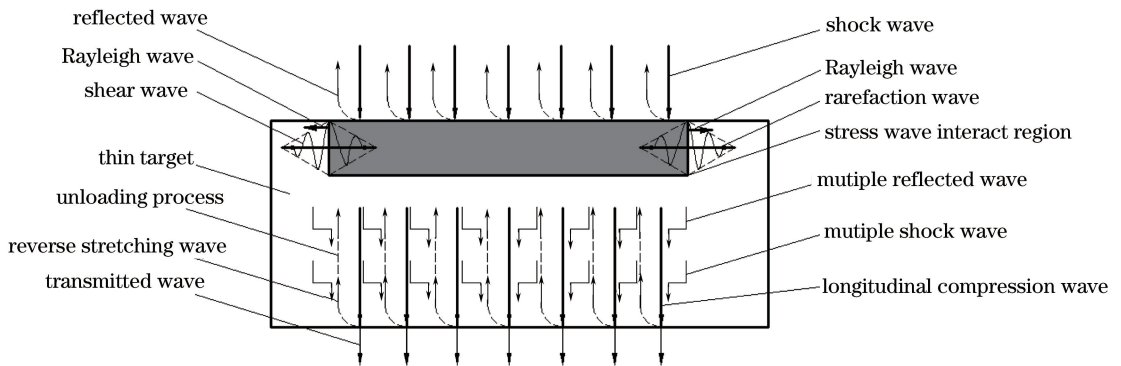


图 12 690 高强钢薄板激光冲击波加载模型

Fig. 12 Loading model of the 690 high-strength steel sheet treated by laser shock wave

激光冲击加载 690 高强钢薄板表面时，激光诱导的冲击波使试样表面产生塑性变形并发生透射和反射。透射的纵波使试样发生轴向变形从而形成轴向传播的纵向压缩波，冲击波的反射波在约束层的作用下形成轴向传播的多次反射波，同时，等离子体汽化物在约束层约束下也会形成轴向传播的多次冲击波^[13]，纵向压缩波、多次反射波、多次冲击波先后向材料内部传递，其中纵向压缩波具有较大的能量^[16]。纵向压缩波先于多次反射波和多次冲击波到达试样背面，使试样背面的应变达到最大峰值，并在试样界面处发生反射和透射，其中反射波为反向拉伸波并继续在试样中传播，透射波进入空气介质。之后多次反射波与多次冲击波向试样背面传播，与反向拉伸波发生迎面卸载，导致背面应变在最大峰值之后产生波动。卸载后的拉伸应力波仍具有较大的剩余动量，可继续传播至试样表面，而后再由表面反射至试样背面，应力波在试样表面和背面来回反射中衰减为 0。

在试样内部形成轴向传播的纵向压缩波时，冲击波的边界效应使光斑边界处产生较大的剪切变形，由剪

切变形导致的剪切波在向材料内部传播时逐渐衰减,同时使光斑边界成为稀疏波的波源。稀疏波由光斑边界向四周传播,一部分向中心会聚,一部分向外传播。由于试样受到非均匀分布的冲击波作用,会发生不均匀的轴向压缩,造成冲击区域的横向变形,导致光斑边界处产生表面 Rayleigh 波。光斑边界由剪切变形导致的剪切波和表面 Rayleigh 波,在纵向剪切波向材料内部传播时,表面稀疏波向光斑中心会聚将引起光斑中心的二次塑性变形。

5 结 论

在功率密度为 12.7 GW/cm^2 的激光冲击下表面 Rayleigh 波传播速度模拟值为 $3.24 \times 10^3 \text{ m/s}$ 、实验值为 $3.08 \times 10^3 \text{ m/s}$,模拟结果与实验结果有较好的一致性。根据模拟表面动态响应及 PVDF 测得表面动态应变,结合剪切波在 690 高强钢中的衰减规律,可知通过调整激光功率密度可分离剪切波和表面 Rayleigh 波。建立了激光冲击诱导高应变率下 690 高强钢的表面动态应变模型,根据实验数据验证了 690 高强钢在高应变率条件下的应力-应变关系与静力拉伸条件下的应力-应变关系类似,存在弹性、屈服、强化三种阶段,验证了该动态应变模型正确可靠,但是,如何将压电信号精确转换为应力或应变信息仍需进一步研究。建立了 690 高强钢薄板激光冲击波加载模型,并利用该模型描述了激光冲击波在 690 高强钢薄板中的传播机制,为研究 690 高强钢激光冲击动态响应与表面应力分布相关性提供理论支持,为解决海工平台关键零部件防腐提供技术支撑。

参 考 文 献

- 1 王定亚, 丁莉萍. 海洋钻井平台技术现状与发展趋势[J]. 石油机械, 2010, 38(4): 69-72.
- 2 Wang Zhangtang, Zhao Jianting. The development and foreground of the self-elevation drilling platform in our country[J]. China Offshore Platform, 2008, 23(4): 8-13.
汪张棠, 赵建亭. 我国自升式钻井平台的发展与前景[J]. 中国海洋平台, 2008, 23(4): 8-13.
- 3 Di Guobiao, Liu Zhenyu, Hao Liqiang, et al. Present production state and development tendency of offshore platform steels[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2008, 32(8): 1-3.
狄国标, 刘振宇, 郝利强, 等. 海洋平台用钢的生产现状及发展趋势[J]. 机械工程材料, 2008, 32(8): 1-3.
- 4 Cao Yupeng, Xu Ying, Feng Aixin, et al. Experimental study of the residual stress formation mechanism of 7050 aluminum alloy sheet by laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(7): 0702008.
曹宇鹏, 徐 影, 冯爱新, 等. 激光冲击强化 7050 铝合金薄板表面残余应力形成机制的实验研究[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0702008.
- 5 Xu Guojian, Zhong Liming, Wang Hong, et al. Performance of aluminum alloy welded joints by laser shock processing [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0603007.
徐国建, 钟立明, 王 虹, 等. 激光冲击强化铝合金焊接接头的性能[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0603007.
- 6 Yu Tianyu, Dai Fengze, Zhang Yongkang, et al. Simulation and experimental study on residual stress field of 2024 aluminum alloy induced by flat-top laser beam[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1003001.
余天宇, 戴峰泽, 张永康, 等. 平顶光束激光冲击 2024 铝合金诱导残余应力场的模拟与实验[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1003001.
- 7 Zhang Jie, Cai Qingwu, Wu Huibing, et al. Mechanical properties and marine atmosphere corrosion behavior of E690 ocean platform steel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(6): 657-665.
张 杰, 蔡庆伍, 武会宾, 等. E690 海洋平台用钢力学性能和海洋大气腐蚀行为[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(6): 657-665.
- 8 Wu Bo, Cai Qingwu, Zhang Jie, et al. Corrosion resistance of E690 platform steel in simulation marine atmosphere[J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36(3): 26-31.
武 博, 蔡庆伍, 张 杰, 等. E690 平台用钢耐海洋大气腐蚀模拟[J]. 金属热处理, 2011, 36(3): 26-31.
- 9 Yin Cheng, Feng Aixin, Cao Yupeng, et al. Experimental research of dynamic and static respond of AZ31B magnesium alloy sheet by laser shock wave[J]. Applied Laser, 2014, 34(6): 562-566.
印 成, 冯爱新, 曹宇鹏, 等. 激光冲击波加载 AZ31B 镁合金薄板动静态响应实验研究[J]. 应用激光, 2014, 34(6): 562-566.
- 10 Feng Aixin, Yin Cheng, Cao Yupeng, et al. Experimental research on laser-induced dynamic response of AZ31B

magnesium alloy sheet[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(10): 109002.

冯爱新, 印 成, 曹宇鹏, 等. 激光诱导 AZ31B 镁合金薄板动态响应实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(10): 109002.

- 11 Cao Y P, Feng A X, Hua G R. Influence of interaction parameters on laser shock wave induced dynamic strain on 7050 aluminum alloy surface[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 116(15): 153105.
- 12 Cao Yupeng, Feng Aixin, XueWei, *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): 0903004.
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): 0903004.
- 13 Wang Xuede, Nie Xiangfan, Zang Shunlai, *et al.* Formation mechanism of “residual stress hole” induced by laser shock peening[J]. High Power Laser And Particle Beams, 2014, 26(11): 119003.
王学德, 聂祥樊, 臧顺来, 等. 激光冲击强化“残余应力洞”的形成机制[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(11): 119003.
- 14 Zhang Yongkang, Yu Shuisheng, Yao Hongbing, *et al.* Experimental study of shock waves induced by high-power pulsed laser in AZ31B magnesium alloy[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(8): 5602-5605.
张永康, 于水生, 姚红兵, 等. 强脉冲激光在 AZ31B 镁合金中诱导冲击波的实验研究[J]. 物理学报, 2010, 59(8): 5602-5605.
- 15 Meyers M A. Dynamic behavior of Materials[M]. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 1994: 27-31.
- 16 Feng Aixin, Nie Guifeng, Xue Wei, *et al.* Experimental research on laser shock wave loading mechanism of 2024 aluminum alloy sheet[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(2): 205-210.
冯爱新, 聂贵锋, 薛 伟, 等. 2024 铝合金薄板激光冲击波加载的实验研究[J]. 金属学报, 2012, 48(2): 205-210.