

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

曹宇鹏^{1,2,3} 冯爱新^{1,3} 薛伟¹ 花国然²

¹ 温州大学机电工程学院, 浙江 温州 325035
² 南通大学机械工程学院, 江苏 南通 226019
³ 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 为研究脉冲激光冲击波诱导 2024 铝合金表面的动态应变特性,采用脉冲激光对 2024 铝合金试样表面进行冲击,并利用聚偏氟乙烯(PVDF)压电传感器测量了脉冲激光作用下 2024 铝合金表面的动态应变,建立了脉冲激光冲击波加载 2024 铝合金表面的动态应变模型,并通过试验数据对该模型进行了分析验证。研究表明,通过调整脉冲激光的作用参数可以控制激光冲击波与表面波不产生耦合;2024 铝合金在激光冲击波诱导高应变率作用下的动态应力-应变关系曲线与在静力拉伸条件下的静态应力-应变关系曲线类似;脉冲激光冲击波加载 2024 铝合金表面动态应变的模型与试验结果一致。

关键词 激光光学;激光冲击波;压电传感器;铝合金;动态应变

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0903004

Experimental Research and Theoretical Study of Laser Shock Wave Induced Dynamic Strain on 2024 Aluminum Alloy Surface

Cao Yupeng^{1,2,3} Feng Aixin^{1,3} Xue Wei¹ Hua Guoran²

¹ School of Mechanical and Electrical Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China
² School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China
³ School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

Abstract In order to study the dynamic strain on 2024 aluminum alloy surface induced by a pulsed laser shock wave, the pulsed laser is used to impact on a 2024 aluminum alloy sample, and the dynamic strain on the 2024 aluminum alloy surface which is under the effect of the pulsed laser shock is measured by a polyvinylidene fluoride (PVDF) piezoelectric sensor. A dynamic strain model of 2024 aluminum alloy surface loaded by the pulsed laser shock wave is established and verified by experimental data. The results show that the laser shock wave and surface wave can't couple by adjusting the parameters of laser pulse. The relationship curve of the dynamic stress-strain of 2024 aluminum alloy under high strain rate of pulsed laser shock wave is similar to the static stress-strain relationship curve of 2024 aluminum alloy under static tensile condition. The experimental results are consistent with the dynamic strain model of 2024 aluminum alloy surface loaded by the pulsed laser shock wave.

Key words laser optics; laser shock wave; piezoelectric sensor; aluminum alloy; dynamic strain

OCIS codes 140.3390; 280.5475; 160.3900

收稿日期: 2014-02-11; 收到修改稿日期: 2014-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(51175237, 51305050)、江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXLX13_642)、“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2013ZX04009031-4)、浙江省国际科技合作专项(2013C14007)、江苏省“六大人才高峰”A类项目、中国博士后基金(20100481096)、江苏省博士后基金(1002029C)、温州市工业科技研究开发项目(J20130033)、温州大学高级人才启动基金、江苏省企业博士集聚计划

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

E-mail: cyp19812004@ntu.edu.cn

导师简介: 冯爱新(1970—),男,教授,博士生导师,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)

1 引 言

激光冲击强化技术是利用脉宽纳秒量级、功率密度吉瓦每平方厘米量级的激光束,对金属表面的吸收层进行加载,诱导等离子体爆炸产生冲击波的力学效应,提高金属材料的强度、硬度、耐磨性和耐应力腐蚀等技术^[1-3]。激光加载试样表面时,等离子体爆炸产生了强度大、冲击压力作用在局部区域的瞬态冲击载荷,激光冲击波衰减快、历时短,通常借助数值模拟来分析激光冲击时试样的动态响应过程,但试验测量比模拟更具有科学指导意义。近年来,科研工作者利用聚偏氟乙烯(PVDF)压电传感器,对铝合金、钛合金以及镁合金试样背面的激光冲击波进行了研究^[4-6],但对于脉冲激光冲击波诱导试样表面动态应变特性的相关研究尚鲜见报道。PVDF压电传感器是一种新型的高分子压电材料,具有动态响应快(纳秒量级)、测量范围大(0~20 GPa)、频响范围宽(0.1 Hz~几吉赫兹)等优点。基于PVDF压电传感器良好的韧性,可加工成不同形状、不同面积的任意结构,因而可以应用于冲击波

压力和平面动态应变的测量^[7-8]。

本文采用脉冲激光对2024铝合金试样表面进行冲击,利用PVDF压电传感器对加载表面的动态应变特性进行了试验研究与分析,获得了铝合金表面动态应变的演化波形,建立了激光冲击波加载铝合金表面动态应变模型,为激光冲击波定量调控金属材料表面应力提供了理论和技术支持。

2 试验材料及方法

试验材料使用2024铝合金,具体化学成分如表1所示,利用线切割加工成100 mm×50 mm×10 mm的试样,使用400-1200#砂纸依次打磨试样表面,用乙醇清洗并风干。随后,在试样表面激光加载区域紧密贴合一层4 mm×4 mm×150 μm的黑色胶带作为能量吸收层,在黑色胶带上覆盖厚度为4 mm的K9玻璃作为约束层,沿激光光斑径向在试样表面粘贴PVDF压电传感器,压电传感器距光斑中心的距离为2 mm,试验装置如图1所示。

表1 2024 铝合金化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composites of 2024 aluminum alloy (mass fraction /%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Others	Other impurities		Al
								Single	Total	
0.5	0.5	3.5~4.9	0.3~0.9	1.2~1.8	0.25	0.15	Cr0.10+Zr0.20	0.05	0.15	Balance

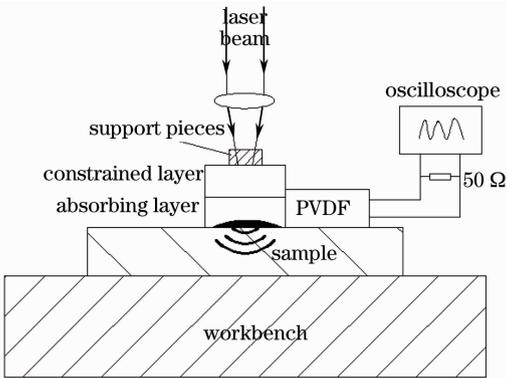


图1 激光冲击试样表面动态应变检测原理图

Fig.1 Detection schematic of laser impact surface of the sample dynamic strain

试验采用SGR系列光电调Q脉冲Nd:YAG固体激光器,示波器采用DL9140数字示波器。脉冲激光的能量为0.7 J,激光加载光斑直径分别选取1、2和3 mm,在K9玻璃的约束下对试样进行单次冲击。根据应力波的相关理论,激光束诱导的应力波在铝合金试样中来回反射,每次冲击波传播到试样表面时,PVDF压电传感器上就会产生一个电压

脉冲,数字示波器将会记录下这一电压信号。PVDF的压电效应可分为压电材料与薄膜面平行伸缩振动的压电横向效应、压电材料垂直于膜面纵向振动的压电纵向效应,前者用 d_{31} 、 d_{32} 表示,后者用 d_{33} 表示。PVDF压电传感器的电荷输出是^[9]

$$Q = \sum d_{3j} E_{PVDF} \epsilon_j S, \quad (1)$$

式中S为压电传感器电极的覆盖面积, E_{PVDF} 为压电传感器的弹性模量, ϵ_j 为应变($j=1,2,3$), d_{3j} 为压电应变常数($j=1,2,3$)。

通过示波器采集PVDF压电传感器上转移的电荷量,在t时刻PVDF压电传感器上转移的电荷Q(t)与电压信号V(t)之间满足^[10]

$$Q(t) = \int_0^t \frac{V(t)}{R} dt. \quad (2)$$

其中,PVDF压电传感器粘贴在试样表面激光冲击加载区域外,激光加载时材料热传导过程中的辐射和对流可以忽略^[11],K9玻璃不仅有着较高的导热系数和较好的冷却效果,还能增强冲击波压力和延长作用时间,因此在约束层的作用下激光热效应对

PVDF 压电传感器测量结果的影响可以忽略。

3 试验结果与分析

3.1 激光冲击波与表面 Rayleigh 波

由(1)式、(2)式可推知 ϵ 正比于 $V(t)$ ，因此可以用 PVDF 压电传感器采集电压信号 $V(\epsilon, t)$ 反映材料的动态应变。示波器所测的 $V(\epsilon, t)$ 曲线记录了由激光诱导产生的纵向冲击波和因纵向冲击波诱发材料表面产生横向变形而激发的表面 Rayleigh 波，压电波形如图 2~4 所示。观察图 2~4： $V(\epsilon, t)$

曲线中表面 Rayleigh 波到达检测点 (R 点) 的时刻，比冲击波到达时刻要延后一点。当加载激光的功率密度为 12.7 GW/cm^2 时，冲击波在试样内逐步衰减变小，接近 R 点时趋向于 0，到达 R 点时 $V(\epsilon, t)$ 曲线又出现幅值明显增大、波形下凹的压缩波，即表面 Rayleigh 波；当加载激光的功率密度为 3.2 GW/cm^2 、 1.4 GW/cm^2 时，激光冲击波在试样中均迅速衰减为 0，当到达 R 时 $V(\epsilon, t)$ 曲线又出现波形下凹的压缩波，即表面 Rayleigh 波。

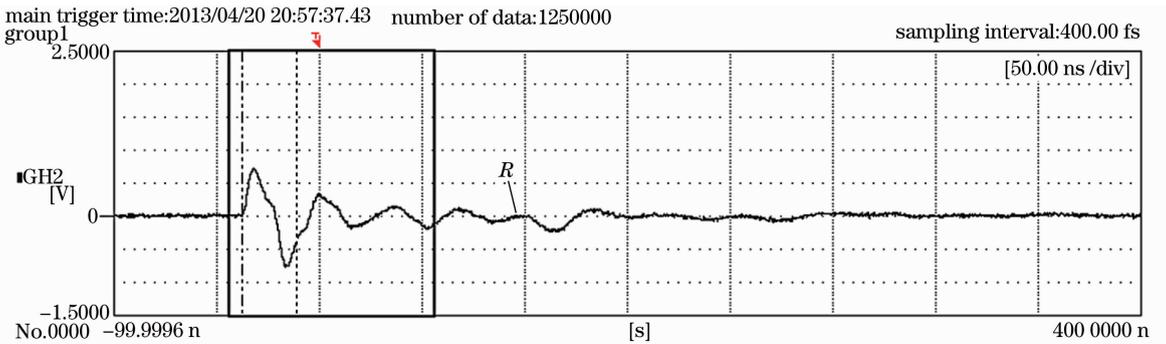


图 2 12.7 GW/cm^2 的激光冲击加载时材料的动态应变

Fig. 2 Dynamic strain of material at the laser power density of 12.7 GW/cm^2

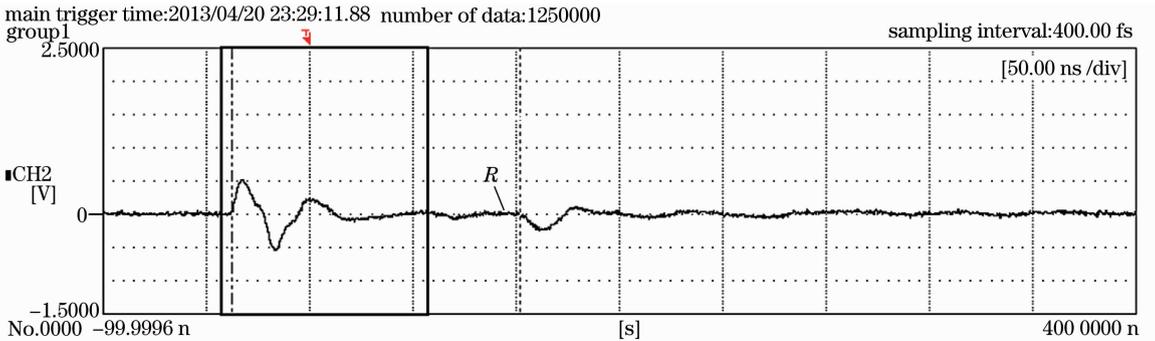


图 3 3.2 GW/cm^2 的激光冲击加载时材料的动态应变

Fig. 3 Dynamic strain of material at the laser power density of 3.2 GW/cm^2

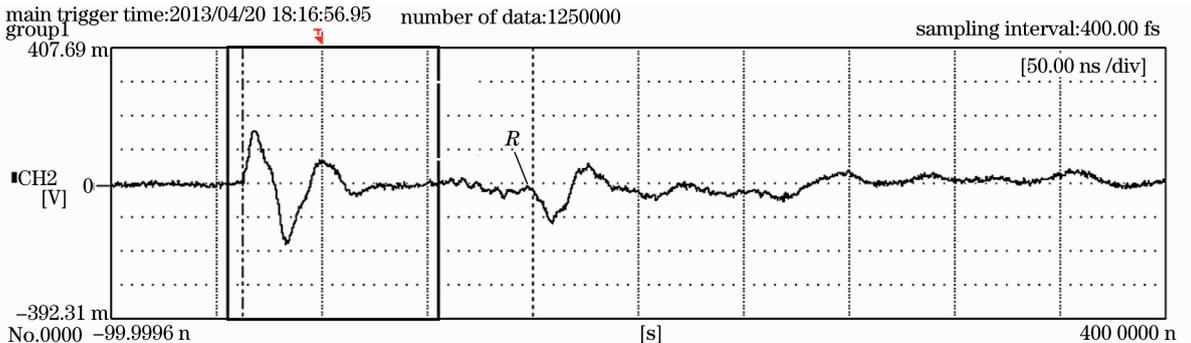


图 4 1.4 GW/cm^2 的激光冲击加载时材料的动态应变

Fig. 4 Dynamic strain of material at the laser power density of 1.4 GW/cm^2

在不同功率密度的激光加载下，表面 Rayleigh 波到达检测点的时刻分别为 140.25、140.01 和

139.25 ns。PVDF 压电传感器距光斑中心的距离为 2 mm,其中图 4 的光斑尺寸为 3 mm,检测点距离激发点的距离小于 0.5 mm,采用 0.5 mm 作为最大近似值,可知表面 Rayleigh 波的波速接近且小于 3.57×10^3 m/s。这与表面 Rayleigh 波在铝块中传播的理论值 2.93×10^3 m/s 相符,进一步证实该波为表面 Rayleigh 波。

3.2 激光冲击波加载 2024 铝合金表面动态应变模型

上文分析可知,当脉冲激光加载于试样表面时,先后产生了垂直于表面纵向振动的冲击波和与表面

平行伸缩振动的表面 Rayleigh 波。为更清晰地分析动态应变的规律,通过控制激光的作用参数使冲击波与表面波不产生耦合。表面 Rayleigh 波到达检测点的时间为 $t_a = D/v$,其中 D 为检测点距离激发点的距离, v 为表面 Rayleigh 波在铝块中传播速度的理论值。冲击波在铝合金中的衰减规律为 $P = A \exp(-at)$,通过控制激光的作用参数,调节衰减系数 A 和 a ,使 $t = t_a$ 时 $P = A \exp(-at)$ 趋于 0。

当冲击波与表面波不产生耦合即 $0 < t < t_a$ 时,由(1)式、(2)式可得

$$\epsilon_1(t) = \epsilon_2(t) = 0, \epsilon_3(t) = \frac{\int_0^t V(\epsilon, t) dt}{E_{\text{PVDF}} S d_{33} R} = m \int_0^t V(\epsilon, t) dt, m = \frac{1}{E_{\text{PVDF}} S d_{33} R} = \text{const}, \quad (3)$$

对(3)式求导,材料动态应变率

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{d\epsilon_3(t)}{dt} = mV(t), i. e. V_1(\epsilon, t) = \frac{1}{m} \frac{d\epsilon_3(t)}{dt}, \quad (4)$$

对(4)式求导,材料动态应变加速度

$$a = \frac{d^2\epsilon_3(t)}{dt^2} = m \frac{dV(\epsilon, t)}{dt}, i. e. \frac{dV(\epsilon, t)}{dt} = \frac{1}{m} \frac{d^2\epsilon_3(t)}{dt^2}. \quad (5)$$

假设 2024 铝合金在激光冲击波诱导高应变率下的动态应力-应变关系曲线与静力拉伸条件下的静态应力-应变关系曲线类似,若 $0 < t_1 < t_2 < t_3 < t_a$,可设 $0 \sim t_1$ 为弹性阶段、 $t_1 \sim t_2$ 为屈服阶段、 $t_2 \sim t_3$ 为强化阶段。

弹性阶段 $0 < t < t_1$ 时,

$$m \frac{dV(\epsilon, t)}{dt} = \frac{E\epsilon_3(t)}{\rho d} = \frac{Em \int_0^{t_1} V(\epsilon, t) dt}{\rho d}, i. e. \frac{dV(\epsilon, t)}{dt} = \frac{E \int_0^{t_1} V(\epsilon, t) dt}{\rho d}, \quad (6)$$

屈服阶段 $t_1 < t < t_2$ 时,

$$m \frac{dV(\epsilon, t)}{dt} = \frac{\sigma_s}{\rho d}, i. e. \frac{dV(\epsilon, t)}{dt} = \frac{\sigma_s}{m\rho d} = \text{const}, \quad (7)$$

强化阶段 $t_2 < t < t_3$ 时,

$$m \frac{dV(\epsilon, t)}{dt} = \frac{k\epsilon_3^n(t)}{\rho d} = \frac{km \int_{t_2}^{t_3} V^n(\epsilon, t) dt}{\rho d}, i. e. \frac{dV(\epsilon, t)}{dt} = \frac{k \int_{t_2}^{t_3} V^n(\epsilon, t) dt}{\rho d}, \quad (8)$$

式中 ρ 为铝合金密度, d 为激光冲击波入射深度, E 为铝合金的弹性模量, k, n 为硬化系数。

当激光功率密度为 12.7 GW/cm^2 时,对图 5 的 $V(\epsilon, t)$ 曲线拐点取值得表 2;当激光功率密度为 3.2 GW/cm^2 时,对图 6 的 $V(\epsilon, t)$ 曲线拐点取值得表 3。

当激光功率密度为 1.4 GW/cm^2 时,由图 4 的 $V(\epsilon, t)$ 曲线可知,冲击波能量太弱,冲击过程中只存在弹性形变。

观察图 5、图 6 所示 $V(\epsilon, t)$ 曲线中 $d \sim e$ 段,由表 2、表 3 可知:在 $d \sim e$ 段的时间差 $t_{d,e}$ 表 3 是表 2 的 1.116 倍,表 2 的 $dV(\epsilon, t)/dt$ 值接近于表 3 值的 1.21 倍,由(5)式可知 $\sigma(t)$ 与 $dV(\epsilon, t)/dt, \epsilon(t)$ 与 t^2 线性相关,所以两者在 $d \sim e$ 段 $\sigma(t)/\epsilon(t)$ 的比值几乎相等,为定值即弹性模量 E , (6)式符合试验结果;观察图 5、图 6 所示 $V(\epsilon, t)$ 曲线中 $e \sim f$ 段,由表 2、表 3 可知:两者 $dV(\epsilon, t)/dt$ 的比值极为接近,即图 5 与图 6 的 $V(\epsilon, t)$ 曲线的 $e \sim f$ 段斜率几乎相同,在

e~f 段两者材料动态应变加速度为恒值,此阶段应力基本保持不变而应变显著增加,(7)式符合试验结果;观察图 5 所示 $V(\epsilon, t)$ 曲线中 f~g 段,由表 2 可知: $dV(\epsilon, t)/dt$ 相较于 e~f 段再次增加。分析图 5、图 6 所示 $V(\epsilon, t)$ 曲线中拐点 e:两者在 d~e 段应力

与应变之比为定值,在拐点 e 之后的 e~f 段应力基本保持不变而应变显著增加,因此拐点 e 为屈服点, d~e 段为弹性阶段, e~f 段为屈服阶段。由于 e~f 段为屈服阶段, f~g 段的 $dV(\epsilon, t)/dt$ 相较于 e~f 段再次增加,所以 f~g 段为强化阶段,(8)式正确。

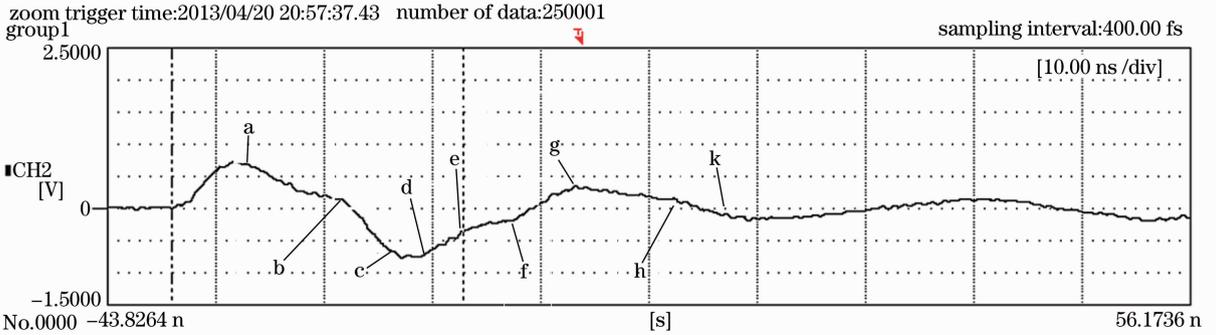


图 5 12.7 GW/cm² 的激光冲击加载时材料的动态应变

Fig. 5 Dynamic strain of material at the laser power density of 12.7 GW/cm²

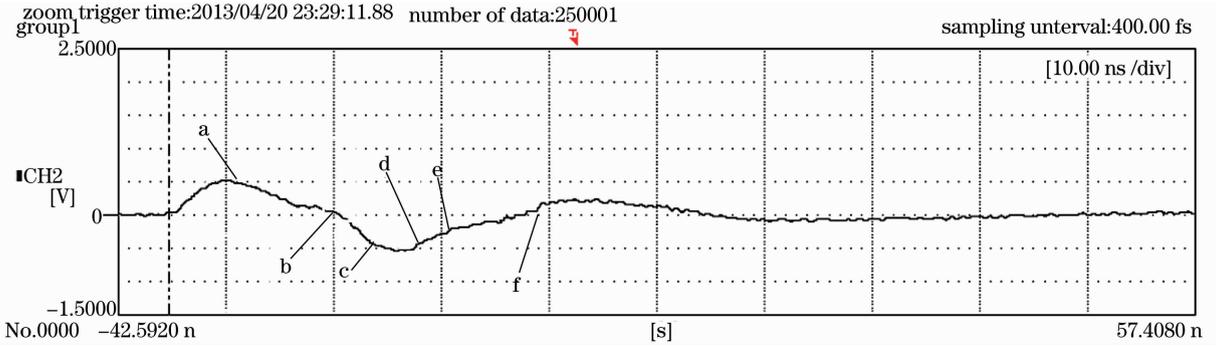


图 6 3.2 GW/cm² 的激光冲击加载时材料的动态应变

Fig. 6 Dynamic strain of material at the laser power density of 3.2 GW/cm²

表 2 12.7 GW/cm² 的激光冲击加载时材料的动态应变各拐点的电压值

Table 2 Voltage value of each inflection point of dynamic strain of material at the laser power density of 12.7 GW/cm²

T / ns	$t_a = 5.949$	$t_b = 15.696$	$t_c = 20.145$	$t_d = 23.494$	$t_e = 26.943$	$t_f = 31.492$	$t_g = 37.291$	$t_h = 46.438$	$t_k = 53.237$
$V(\epsilon, t) / \text{mV}$	725.31	136.25	-658.8	-702.5	-351.3	-186.56	342.19	151.56	-192.5
$dV(\epsilon, t)/dt / (\text{mV/ns})$	$V'_{a,b} = -60.4$	$V'_{b,c} = -178.7$	$V'_{d,e} = 101.8$	$V'_{e,f} = 36.2$	$V'_{f,g} = 91.2$	$V'_{g,h} = -20.8$	$V'_{h,k} = -50.6$		

表 3 3.2 GW/cm² 的激光冲击加载时材料的动态应变各拐点的电压值

Table 3 Voltage value of each inflection point of dynamic strain of material at the laser power density of laser 3.2 GW/cm²

T / ns	$t_a = 5.449$	$t_b = 15.196$	$t_c = 21.395$	$t_d = 22.594$	$t_e = 26.444$	$t_f = 34.194$
$V(\epsilon, t) / \text{mV}$	476.87	6.56	-568.75	-562.81	-239.69	42.37
$dV(\epsilon, t)/dt / (\text{mV/ns})$	$V'_{a,b} = -48.3$	$V'_{b,c} = -92.8$	$V'_{d,e} = 83.9$	$V'_{e,f} = 36.4$		

综上所述,2024 铝合金在激光冲击波诱导高应变率下的动态应力-应变关系曲线与静力拉伸条件下的静态应力-应变关系曲线类似; $V(\epsilon, t)$ 曲线中 e~f 段为屈服阶段、d~e 段为弹性阶段、f~g 段为强化阶段;建立的激光冲击波加载铝合金表面动态应变模型准确可靠。

4 结 论

1) 在冲击波加载 2024 铝合金表面 139.84 ns 后 PVDF 检测到表面波,通过调整激光的作用参数可以控制冲击波与表面波不产生耦合;

2) 根据假设建立了激光冲击波加载铝合金表面的动态应变模型,通过对试验数据的处理分析,可

知 2024 铝合金在激光冲击波诱导高应变率下的动态应力-应变关系曲线与静力拉伸条件下的静态应力-应变关系曲线类似,证明了激光冲击波加载铝合金表面动态应变模型准确可靠,这对激光冲击波定量调控金属材料表面应力具有重要意义。

参 考 文 献

- Nie Guifeng, Feng Aixin, Ren Xudong, *et al.*. Effect of laser shock processing parameters on residual principal stresses and its directions of 2024 aluminum alloy[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0103006.
聂贵锋, 冯爱新, 任旭东, 等. 激光冲击参数对 2024 铝合金冲击区域的主应力及其方向的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0103006.
- Cao Yupeng, Feng Aixin, Xu Chuanchao, *et al.*. Device of the laser discrete scratching for test interfacial bonding strength based on optimization algorithm[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2160-2164.
曹宇鹏, 冯爱新, 徐传超, 等. 基于优选算法的界面结合强度激光离散划痕装置[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2160-2164.
- 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.
- Wang Y C, Chen Y W. Application of piezoelectric PVDF film to the measurement of impulsive forces generated by cavitaiton bubble collapse near a solid boundary[J]. Experimental Thermal and Fluid Scince, 2007, 32(2): 403-414.
- Feng Aixin, Han Zhenchun, Nie Guifeng, *et al.*. Tests for dynamic stress-strain of 2024 aluminum alloy induced by laser shocking[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(14): 200-203.
冯爱新, 韩振春, 聂贵锋, 等. 激光冲击 2024 铝合金诱导动态应力应变实验研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(14): 200-203.
- Yuan Ling, Ren Xudong, Yan Gang, *et al.*. Experimental study of laser-generated surface acoustic waves in laser shock hardening metals[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(1): 120-124.
袁玲, 任旭东, 严刚, 等. 激光冲击硬化层中激光声表面波的实验研究[J]. 中国激光, 2008, 35(1): 120-124.
- 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.
- Yu Shuisheng, Yao Hongbing, Wang Fei, *et al.*. Influence of interaction parameters on high power laser induced shockwave in magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(5): 1386-1390.
于水生, 姚红兵, 王飞, 等. 作用参数对镁合金中强激光诱导冲击波的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1386-1390.
- Bai Shi. PVDF's Dynamic Strain Sensing Properties and Their Applications in Structural Monitoring [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. 15-33.
白石. PVDF 动态应变感知特性及其结构监测应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006. 15-33.
- Feng Aixin, Shi Fen, Han Zhenchun, *et al.*. Measurement of laser-induced dynamic strain on 2024 aluminum alloy surface[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(4): 872-874.
冯爱新, 施芬, 韩振春, 等. 激光诱导 2024 铝合金表面动态应变检测[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(4): 872-874.
- Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong, Ye Yunxia. Machining Technique of Laser[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 259-261.
张永康, 周建忠, 叶云霞. 激光加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 259-261.

栏目编辑:张浩佳