

文章编号: 0253-2239(2010)09-2613-07

# 脉冲激光冲击镁合金表面产生周期性波纹结构的分析及现象

张永康<sup>1</sup> 裴旭<sup>1\*</sup> 陈菊芳<sup>2</sup> 顾永玉<sup>1</sup> 任爱国<sup>1</sup> 尤建<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013; <sup>2</sup> 江苏技术师范学院机械工程学院, 江苏 常州 213001)

**摘要** 为了研究激光辐照材料引起表面波纹现象及原因,采用钕玻璃激光器产生的脉冲激光来冲击黑漆作为吸收层的 AZ91 镁合金试样。激光冲击后采用表面三维轮廓仪对试样冲击区域表面进行测量,结果得到在冲击区域存在波纹分布现象;观测并描绘了表面形貌及表面波纹的分布情况,并分析了材料表面波纹特性与激光能量的关系;得出波纹特性受激光能量影响。最后从等离子体对试样的作用和等离子体内部相干受激光散射机制引起的光栅效应两个方面出发,讨论了热传导、热辐射以及激光照射等因素在试样表面产生热微扰动现象的耦合过程,进而从表面热微扰动的非平衡状态探讨了表面波纹的形成机理。

**关键词** 激光光学;激光冲击处理;表面波纹;冲击波波阵面;等离子体

中图分类号 TG156.99 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103009.2613

## Phenomenon and Analysis of Periodic Ripple Structure on Magnesium Alloy Surface Induced by Laser Shock Processing

Zhang Yongkang<sup>1</sup> Pei Xu<sup>1</sup> Chen Jufang<sup>2</sup> Gu Yongyu<sup>1</sup> Ren Aiguo<sup>1</sup> You Jian<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> School of Mechanical Engineering, Jiangsu Teachers University of Technology, Changzhou, Jiangsu 213001, China

**Abstract** In order to study the ripple phenomena and its causing mechanism on material surface that caused by the laser irradiation, the pulse generated by neodymium glass laser was used to shock the specimen of magnesium alloy AZ91 covered with black paint as the absorption layer. The three-dimensional surface measurement instrument is applied to measure the shocked region of the specimen surface after shocking. And the ripples phenomenon is observed in the shocked region from the measurement results. The surface morphology, as well as the distribution of the surface ripples, is observed and described; and the relation between the characteristics of the ripples and the laser energy is analyzed. It can be concluded that the characteristics of the ripples are affected by laser energy. Based on the effects of the plasma to the specimen and the grating effects caused by the mechanism of coherent stimulated light scattering within plasma, the process of generating thermal micro-disturbance on the sample surface by coupling the thermal conductivity, the thermal radiation and the laser irradiation is discussed, and then the formation mechanism of the surface ripples caused by the non-equilibrium state of the surface thermal micro-disturbance is discussed.

**Key words** laser optics; laser shock processing(LSP); surface ripple; shock wave front; plasma

## 1 引言

激光冲击强化技术作为一种全新的表面处理技术,伴随着激光器的发展,已被广泛用于航空制造<sup>[1~3]</sup>、机械制造<sup>[4,5]</sup>等许多领域。迄今为止,国内

外已有大量的相关研究。但对激光在材料表面以及光学元件表面引起的波纹现象的研究进展还不是很大。1965年 Birnbaum 首次报道了脉冲红宝石激光系统调 Q 用的各种半导体材料表面发生光栅损伤

收稿日期: 2009-10-11; 收到修改稿日期: 2010-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(50735001)和江苏省高校自然科学基金(09KJB460002)资助课题。

作者简介: 张永康(1963—),男,博士,教授,主要从事激光先进制造技术与理论等方面的研究。

E-mail: ykzhang@ujs.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: peixuu@126.com

现象<sup>[6]</sup>,此后,关于波纹的研究报道不断出现。20世纪70,80年代研究人员主要对激光产生波纹的周期和取向研究较多。1982年J. F. Young用多个线偏振调Q激光在强度远低于样品的单脉冲激光损伤阈值情况下辐照锗材料<sup>[7]</sup>。不同的入射情况下,得到间距明显不同的波纹。1983年J. F. Young又用两种波长激光辐照Ge, Si, Al和黄铜,得到在近垂直的激光光束照射下,有两套占优势的垂直于偏振方向的条纹存在<sup>[8]</sup>。1995年A. V. Demchuk在激光能量密度接近材料损伤阈值状态下,激光辐照引起的无定型硅表面平顶层型熔化区观察到表面出现树枝状的表面结构<sup>[9]</sup>。袁永华等用Nd:YAG脉冲激光辐照表面抛光的硅材料,在损伤区附近发现明显平行等间距波纹<sup>[10]</sup>。

随着实验研究的展开,关于激光辐照引起材料表面波纹的机理探索也在不断更新。由于激光辐照引起材料表面波纹的规律很难掌握,而新的波纹现象又不断出现,因此对波纹现象缺乏统一的理论解释,一般都局限于解释某一种波纹现象。常见的解释有:表面光散射、干涉和衍射理论<sup>[6,8,11,12]</sup>;表面导波理论<sup>[13]</sup>;热和流体力学理论<sup>[14,15]</sup>及激光驱动声波理论<sup>[16]</sup>等。总体来说可归结为光学模型和非光学模型两种。早期的研究人员J. E. Sipe和J. F. Young认为,大多损伤条纹相似,并且与材料性质无关<sup>[17]</sup>,从对条纹的观察看,表面粗糙是产生表面周期损伤的原因;把条纹的出现归因于入射激光与表面划痕引起的表面散射波之间的干涉,这种解释物理上不具备充分的理论根据<sup>[18]</sup>。之后,J. F. Young又考虑了与激光诱导周期性表面结构(LIPSS)有关的材料和电磁场耦合作用的动态过程<sup>[19]</sup>,从电磁场与表面结构相互作用的角度,阐述脉冲间和脉冲内的反馈机制对保持波纹生长的作用。袁永华等用相干受激光散射机制解释了脉冲激光辐照硅材料引起表面波纹的现象<sup>[10]</sup>。此外,对波纹的应用和理论研究发展的方向也有人作了预测<sup>[20]</sup>。

通过观察、测量不同能量激光冲击的,以黑漆作为吸收层的一组镁合金试样,研究了脉冲激光冲击镁合金后引起材料表面不同波纹状结构的现象,观测了周期性波纹的结构与波纹特性,分析了材料表面波纹状结构生成与激光功率密度的关系;随后又对试样冲击区表面材料组成成分和横截面微观金相组织进行测试分析;进而对材料表面周期性波纹结构生成机理进行了探索和研究。

## 2 试验材料及方法

试验采用工业中广泛使用的AZ91镁合金作为试样。用线切割法将试样加工成尺寸为20 mm×20 mm×5 mm的小块,对表面进行打磨和抛光处理,在试样表面涂上黑漆作为激光冲击时的吸收层,增强对激光能量的吸收;为增强激光在试样表面产生的冲击波压力,延长冲击波的作用时间,冲击时采用K9玻璃作为约束层。

冲击试验采用钨玻璃脉冲激光,激光能量分布模式呈高斯分布,激光波长1054 nm,脉冲宽度23 ns,光斑直径为5 mm。激光冲击模型如图1所示。实验中分别采用不同的能量来进行实验,分别以5,10,15 J的脉冲能量冲击表面喷涂黑漆的试样,得到一组冲击试样。用表面三维形貌仪(VEECO)分别对试样冲击区表面形貌进行观测分析;用X射线能谱仪(EDS)对冲击区域进行测试,分析冲击前后材料成分的变化,并采用扫描电镜(SEM)对冲击区横截面微观金相组织进行观测。

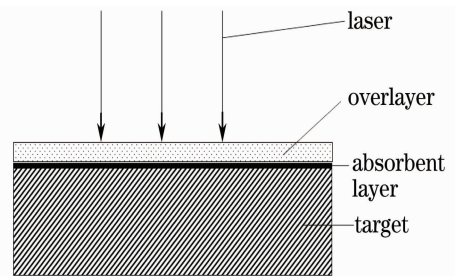


图1 激光冲击示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the laser shock processing

## 3 激光冲击后试样表面形貌、材料组成成分与横截面微观金相组织的观测与分析

### 3.1 试样冲击区表面形貌

在不同能量脉冲激光冲击后,各试样冲击区域由表面三维形貌仪测量得到的表面形貌状况如图2所示。可以看到,冲击试样表面出现了周期性波纹结构,即波纹现象。从图中周期性波纹的分布情况可以得到,激光能量为5 J时,试样冲击区域表面波纹间距很大,除了在图中底部处波纹分布可视性较差外,总体看来波纹纹理清晰;波纹的线性有的区域较好,有的区域扭曲性较大;冲击区表面有轻微凹陷现象产生,且在该区域的波纹较其它区域线性和清晰度都较差。激光能量为10 J时,试样冲击区表面周期损伤分布状况的规律性整体比较良好,波纹纹

理清晰；且波纹的线性也较好，近似一系列相互平行的直线，波纹的间距较能量为 5 J 时的波纹要小；同时试样表面产生一个凹陷的奇点，奇点周围波纹扭曲性较大，奇点内无波纹现象产生。激光能量为 15 J 时，试样表面波纹的规律性分布状况最好，只有局部区域出现轻微凹凸现象，波纹纹理清晰，整体看来都近似一组相互平行的直线。在出现轻微凹凸现象的区域波纹线性有所下降，出现轻微扭曲现象。与激光能量为 10 J 的冲击试样相比，波纹间距又有所减小。表 1 给出了不同能量的脉冲激光冲击后，试样冲击区域表面周期性波纹的平均间距和高度分布情况。通过比较表 1 中的数据，可以得到试样冲击区域表面周期性波纹间距，随着能量的升高在不断减小，且前一级减少量比后一级减少量要大；波纹

高度分布方面，激光能量为 5 J 时，波纹高度的变化范围比后面两个能量状态下得到结果的变化范围要大，但变化的只是下限的波纹高度，上限波纹高度三者保持一致，且激光能量为 10 J 和 15 J 时平均高度的变化范围相同。

表 1 不同脉冲能量状态下试样表面波纹的平均间距和高度

Table 1 Average distance and height of the surface ripples on the painted specimens under different pulse energy

Pulse energy /J	Average distance / $\mu\text{m}$	Average height / $\mu\text{m}$
5	8.6	0.02~0.2
10	7.3	0.05~0.2
15	4.7	0.05~0.2

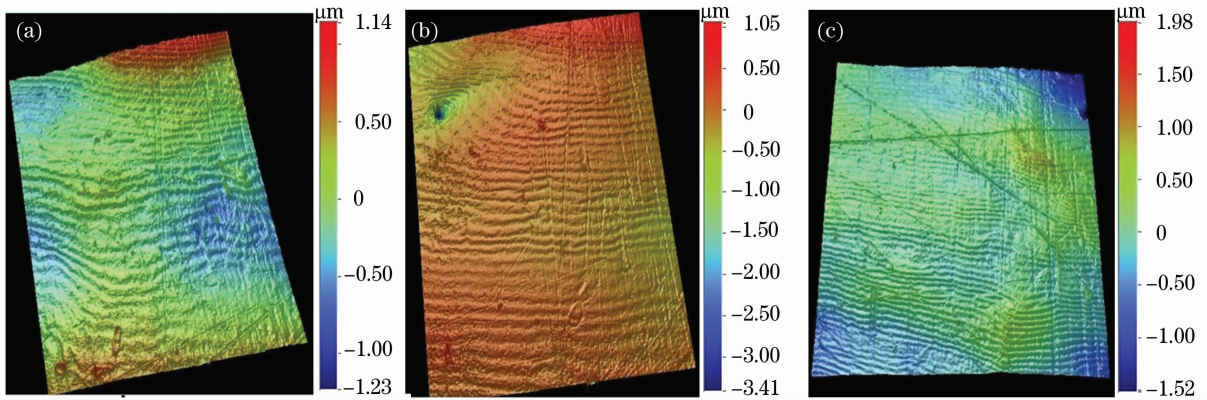


图 2 黑漆作为吸收层时不同能量脉冲激光冲击下试样的表面波纹分布状况。(a) 5 J；(b) 10 J；(c) 15 J

Fig. 2 Distribution of the surface ripples on the painted specimens induced by LSP with different energy.

(a) 5J；(b)10J；(c)15J

### 3.2 激光冲击前后材料组成成分分析

对于 AZ91 镁合金来说，其主要组成成分为镁元素和铝元素，其中并掺杂着其它多种微量成分，其组成成分如表 2 所示。为了验证激光冲击对其材料组成成分的影响，采用 X 射线能谱仪 (EDS) 对冲击区域的材料成分进行分析。

表 2 AZ91 镁合金元素的组成

Table 2 composition of AZ91 magnesium alloy

Composition	Mass fraction /%
Mg	90
Al	8.3~9.7
Zn	0.35~1.0
Mn	0.15~0.50
Si	$\leq 0.01$
Cu	$\leq 0.01$
Fe	$\leq 0.03$
Ni	$\leq 0.005$
Others	$\leq 0.02$

为了进行对比，分别对激光冲击和未冲击的试样表面进行测试，分析冲击区域与未冲击区域的材料成分变化情况。首先选择 15 J 脉冲激光能量冲击的试样来对激光冲击区域进行测试分析。测试路径沿长约 3 mm 的线段进行，如图 3(a) 所示。图中划痕左边为激光光斑内区域，划痕右边为光斑以外区域。图 3(b) 为沿此路径镁和铝的能谱分布情况。由于 AZ91 镁合金其它组成元素的含量都很少，能谱仪不能识别，所以从测试结果中只能看到镁和铝两种元素的组成比例情况。沿线段分析完成后，再分别在激光冲击区域光斑内和未冲击试样表面各选择点进行材料成分分析。测试结果如表 3 所示，从表中只能看到镁和铝的比例情况 (质量分数)，且测量结果与表 2 中的数据存在不一致的情况。分析原因可能为其他微量组成元素能谱仪不能识别，故而误差较大。但从冲击区域和未冲击区域的分析结果来看，冲击与未冲击区域材料成分几乎无变化，可



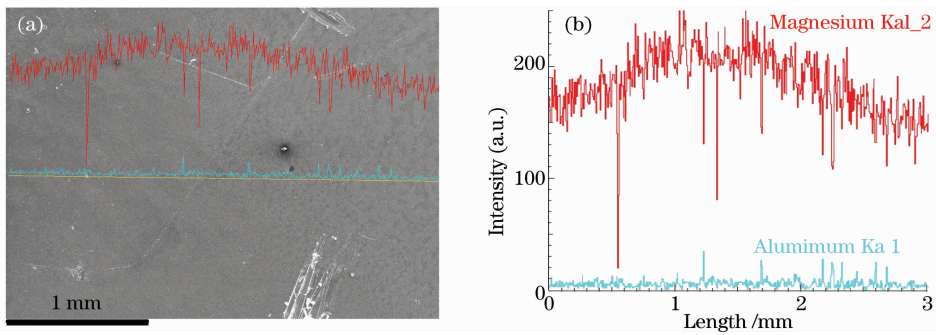


图 3 材料成分能谱分析测试路径(a)与各组成成分能谱分布(b)

Fig. 3 Test path (a) of material composition spectrum analysis and the energy spectrum distribution (b) of the various components

表 3 激光冲击区域与未冲击区域各点的材料能谱分析情况

Table 3 Energy spectrum analysis of the different points of laser shocked region and laser un-shocked region

Laser shocked area			Laser un-shocked area		
Spectrum	Mg	Al	Spectrum	Mg	Al
Spectrum 1	92.39	7.61	Spectrum 1	92.49	7.51
Spectrum 2	92.55	7.45	Spectrum 2	92.74	7.26
Spectrum 3	92.53	7.47	Spectrum 3	92.58	7.42
Spectrum 4	92.56	7.44	Spectrum 4	92.37	7.63
Spectrum 5	93	7	Spectrum5	92.56	7.44
Mean	92.61	7.39	Mean	92.55	7.45

见,激光冲击区域材料成分未发生变化,激光冲击对冲击区域的热影响很小,不会对材料组成成分产生影响。

### 3.3 冲击区域横截面金相组织变化

镁合金有多种类别,其组成成分主要是由两种或两种以上基体组织构成。对于 AZ91 镁合金来说,其压铸组织是由  $\alpha$  相(Mg)和在晶界析出的  $\beta$  相( $Mg_{17}Al_{12}$ )组成<sup>[21]</sup>。其基体组织晶相分布如图 4 所示。图中白色区域为镁合金基体的  $\alpha$  相(Mg),在白色区域边缘的黑色狭长区域为镁合金基体的  $\beta$  相( $Mg_{17}Al_{12}$ )。

激光冲击后,冲击试样横截面的晶相分布如图 5 所示。由图可见,激光冲击后表层材料的原始

晶界清晰完整,说明激光冲击对材料的热影响很小,激光冲击时材料冲击区域未出现熔池现象,由于激光作用时间很短,且有吸收层的保护作用,热影响只在表层很小的范围内。与基体的金相组织(如图 4

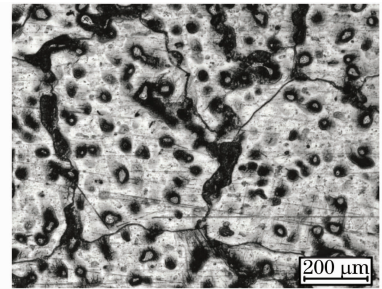


图 4 AZ91 镁合金基体组织金相组织分布

Fig. 4 Microstructure distribution of AZ91 magnesium alloy

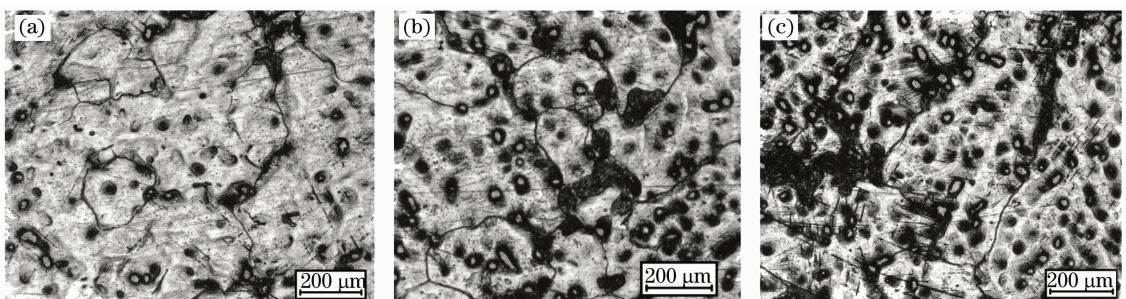


图 5 激光冲击后试样横截面金相组织分布。(a)5J;(b)10J;(c)15J

Fig. 5 Microstructure distribution of AZ91 magnesium alloy specimen after LSP. (a)5J;(b)10J;(c)15J

所示)相比,发现经过激光冲击后,晶粒内部出现晶粒细化和大量孪晶现象,并且有大量的 $\beta$ 相析出。原因是材料表层受到激光诱导冲击应力波作用,产生了塑性变形。镁合金为密排六方晶体结构,对称性低,滑移系数小,塑性变形能力较差,其塑性变形依赖于位错滑移和孪生的协调作用<sup>[22]</sup>。激光冲击后的镁合金,孪晶穿越,位错密度提高,导致更多晶界形成,使得晶粒细化<sup>[23]</sup>。

## 4 产生表面周期性波纹机理分析

在激光与材料相互作用过程中,有多种能量耦合机制,激光、材料、等离子体之间的热、力以及电磁等耦合关系极其复杂。从等离子体对试样的作用和等离子体内部相干受激光散射引起的光栅效应两个方面出发,耦合了热传导、热辐射以及激光照射等因素对试样表面产生热微扰动的影响,进而由表面的热微扰动引起的表面非平衡状态来探讨表面波纹的形成机理。

### 4.1 等离子体的产生过程、作用及其内部相干受激光散射的影响

当一束脉冲强激光照射在有约束层和吸收涂层试样表面,吸收层汽化并电离,形成等离子体。当激光能量足够强,其一部分能量可能透过等离子体照射到试样表面,另一部分能量被等离子体吸收。而等离子体在吸收激光能量后,会膨胀、爆炸,产生冲击波并作用于试样表面。

相干光入射时,其内部会产生受激光散射现象<sup>[13]</sup>;在其内部,首先要产生自发散射,自发散射光在入射光束内与入射光束差频激发具有确定相位的声子,声子继续散射入射光子得到新的散射光子,散射光子的频率与相位及传播方向都与前面产生的散射光子相同。即在入射光的传输过程中可以获得散射光的相干放大,在介质中形成两束相干光,它们的差频信号也是相干的,激发的声子也应该是相干的。激光为相干光,当激光辐照材料表面时,伴随着光与材料的能量交换以及产生的其他效应,材料表面的极化强度可能受到固定的空间调制,并在材料表面出现光栅效应。假定当激光达到一定强度时是可以穿过等离子体直接照射到试样表面的。因此,在等离子体内部,同样也受相干受激光散射机制作用,产生光栅效应。

等离子体在吸收激光能量时,同时也要向外释放能量。其释放能量过程可存在多种方式,在此仅考虑热传导和热辐射这两种方式。在脉冲激光作用

过程中,由于等离子体吸收了脉冲激光能量,等离子体也具有较高的温度。等离子体在向试样传递能量时主要以两种形式;一种是以热能的形式通过热传递由等离子体向材料表面传递。另一种是以热辐射的方式向材料表面辐射能量;当等离子体吸收激光能量后,温度升高,通过热辐射向外界释放能量。由于受到等离子体内部相干受激光散射机制产生的光栅效应的作用,辐射到试样表面的激光和等离子体向试样表面辐射的热能都以偏振态存在。材料表面受到偏振态激光照射和偏振态热辐射作用以及热应变作用下产生的压电效应、热电效应和温差效应等影响,表面应变张量可能以驻波的形式存在。使作用于材料表面的能量分布不均,因此表面就会受热不均,当能量达到材料熔融阈值时,受热不均导致材料表面出现周期性热微扰动现象,破坏材料表面的均匀性。

### 4.2 材料表面的热微扰动影响对波纹产生的作用

在材料表面产生熔融现象之前,首先在等离子体内部产生相干受激光散射机制,进而形成光栅,导致材料表面出现周期性热微扰动现象,破坏材料表面的均匀性,使材料表面出现轻微的形变量。这种材料表面轻微形变进而对等离子体产生的冲击波产生影响,会诱导波纹状的冲击波。一旦产生波纹状的冲击波,在冲击波波阵面后的横向液相运动就会诱导一个压力扰动,当压力扰动持续增加熔融波阵面的形变量时,压力扰动就会使冲击波波阵面的波纹得以保存并产生振荡。因为振荡压力区域会随着冲击波的扩展而膨胀,压力扰动和波纹状表面的振幅会随时间逐渐衰减,因为在熔融表面的压力扰动也随时间而减弱,熔融表面的形变量将会达到一个定值。假设 $a_0$ 为靶材表面热微扰动引起的初始振幅,则冲击波阵面波纹的归一化振幅为 $a_a/a_0$ ,它是归一化时间 $r_a$ 的函数。归一化时间 $r_a$ ,由下式定义<sup>[24]</sup>:

$$r_a = kc_1 t \sqrt{1 - (v_a/c_1)^2}. \quad (1)$$

式中 $c_1$ 为冲击压缩区域的声速, $v_a$ 为一个在随该压缩区域运动的参考系下熔融表面速度, $k$ 为初始波纹数。在所有情况下,熔融表面变形持续增加,并将达到接近一个特定值。强冲击波作用时,熔融表面形变量变大。可以通过冲击波波阵面之后液相横向流动促使熔融表面产生更多变形来理解,因为在强冲击作用下,液相流动性也更大。在弱冲击极限下,表示冲击波波阵面和熔融表面瞬时关系可由以下近似公式获得<sup>[24]</sup>:

$$\frac{a_n(r_a)}{a_0} \approx 1 + \frac{8M_s^2(M_s^2 - 1)}{(3M_s^2 + 1)[2\gamma M_s^2 - (\gamma - 1)]} [1 - J_0(r_a) + \sum \left( \frac{1 - \exp[-2(n-1)v_a/c_1]}{1 - \exp(-2v_a/c_1)} \right) J_{2n}(r_a)]. \quad (2)$$

式中  $J_n$  为贝塞尔函数,  $M_s$  为冲击波阵面之前液体的冲击马赫数,  $v_a/c_1$  代表熔融马赫数,  $\gamma$  为等熵指数。

## 5 结 论

激光辐照引起材料表面波纹现象是一个普遍而又难于分析的现象。为了研究这种现象产生的机理,用钹玻璃激光器发出的脉冲激光冲击以黑漆作为吸收层的镁合金试样。通过对试样冲击区域表面形貌、材料组成成分和横截面微观金相组织的观测、测试与分析,以及对材料表面波纹形成机理的初步探究,可得如下结论:

1) 激光能量影响材料表面波纹的状况。从测量结果来看,随着脉冲激光能量升高,冲击试样表面波纹间距不断减小,波纹高度变化范围也在减小;波纹的线性及波纹的清晰度却在不断提高。从分析表面波纹可能的产生原因,可见由吸收层形成的等离子体对冲击后材料表面形貌以及整个冲击过程的影响极其重要;其运动与作用过程极其复杂,耦合着多种作用过程,在整个波纹形成的过程中,可能起着非常重要的作用。

2) 从激光冲击区域表面材料成分分析和横截面微观金相组织来看,激光在冲击过程中,对试样作用的主要是激光诱导的冲击应力波作用,热影响很小,表面融化只会出现在宽度和深度都在约几个微米范围内非常小的表层材料内,材料表面不会出现熔池现象。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Shengbo, Fan Yong, Wu Hongxing *et al.*. Research of strengthening 7050 aerial aluminum alloy structural material with laser shock processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1): 125~128
- 2 王声波, 范 勇, 吴鸿兴等. 7050 航空铝合金结构材料激光冲击强化处理研究 [J]. 中国激光, 2004, **31**(1): 125~128
- 3 Zhou Jianzhong, Huang Shu, Zhao Jianfei *et al.*. Numerical analysis on fatigue properties of aluminum alloy induced by laser shock peening [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1735~1740
- 4 周建忠, 黄 舒, 赵建飞等. 激光喷丸强化铝合金疲劳特性的数字化分析 [J]. 中国激光, 2008, **35**(11): 1735~1740
- 5 Zou Shikun, Tan Yongsheng, Guo Dahao *et al.*. Effect of laser shock processing on mechanical properties of Al2Li alloy [J].

*Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(3): 371~373

- 6 邹世坤, 谭永生, 郭大浩等. 激光冲击处理对铝锂合金力学性能的影响 [J]. 中国激光, 2004, **31**(3): 371~373
- 7 Cao Ziwen, Zou Shikun, Liu Fangjun *et al.*. Laser shock processing on 1Cr11Ni2W2MoV martensite steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 316~319
- 8 曹子文, 邹世坤, 刘方军等. 激光冲击处理 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢 [J]. 中国激光, 2008, **35**(2): 316~319
- 9 Hua Yinqun, Yang Jichang, Zhang Yongkang *et al.*. Experimental study on improving wearability of ductile iron by laser compound processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **35**(1): 147~149
- 10 花银群, 杨继昌, 张永康等. 激光复合强化提高球铁耐磨性能的实验研究 [J]. 中国激光, 2004, **35**(1): 147~149
- 11 M. Birnbaum. Semiconductor surface damage produced by ruby laser [J]. *Appl. Phys.*, 1965, **36**: 3688~3689
- 12 J. F. Young, J. E. Sipe, J. S. Preston *et al.*. Laser induced periodic surface damage and radiation remnants [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **41**: 261
- 13 J. F. Young, J. S. Preston, H. M. Van Driel *et al.*. Laser induced periodic surface structure. II: experiments on Ge, Si, Al and brass [J]. *Phys. Rev.*, 1983, **27**: 1155~1172
- 14 A. V. Demchuk, V. A. Labunov. Surface morphology and structure modification of silicon layers induced by nanosecond laser radiation [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 1995, **86**: 353~358
- 15 Yuan Yonghua, Liu Songhao, Sun Chengwei *et al.*. Study of the characteristics of the surface ripple on Si material irradiated by pulsed laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 239~242
- 16 袁永华, 刘颂豪, 孙承纬等. 脉冲激光辐照硅材料引起表面波纹的特性研究 [J]. 光学学报, 2004, **24**(2): 239~242
- 17 P. M. Fauchet, A. E. Sigman. Surface ripples on silicon and gallium arsenide under picosecond pulse illumination [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **40**: 824~826
- 18 D. C. Emmony, R. P. Howson, L. J. Willis. Laser mirror damage in germanium at 10.6  $\mu\text{m}$  [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **23**: 598
- 19 F. Keilmann, Y. H. Bai. Periodic surface structures frozen into CO<sub>2</sub> laser-melted quartz [J]. *Appl. Phys. A*, 1982, **29**: 9~18
- 20 Lai Zuwu, Tan Xiaohua, Lai Zhongli *et al.*. Laser-induced ripple patterns on thin film mirror surface [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1992, **4**(2): 255~259
- 21 赖祖武, 谈效华, 赖宗力等. 激光辐照薄膜镜面产生损伤现象的研究 [J]. 强激光与粒子束, 1992, **4**(2): 255~259
- 22 Y. F. Lu, J. J. Yu, W. K. Chol. Theoretical analysis of laser-induced periodic structures at silicon-dioxide/silicon and silicon and silicon-dioxide/aluminum interfaces [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(23): 3439
- 23 N. Baltzer, M. Von Allmen. Acoustic signal from laser-annealed amorphous silicon [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **43**(9): 826
- 24 J. E. Sipe, J. F. Young, J. S. Preston *et al.*. Laser induced periodic surface structure. I: theory [J]. *Phys. Rev.*, 1983, **27**: 1141~1154
- 25 Wang Weiping, Lü Baida, Liu Cangli. Laser induced ripples on the surface of optical devices [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2002, **39**(6): 13~19
- 26 王伟平, 吕百达, 刘仓理. 激光辐照下光学元件表面波纹现象研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2002, **39**(6): 13~19
- 27 J. F. Young, J. E. Sipe, H. M. Van Driel. Laser induced periodic surface structure. III: fluence regimes, the role of feedback, and details of the induced topography in germanium [J]. *Phys. Rev.*, 1984, **30**: 2001~2015
- 28 Wang Weiping, Lü Baida, Liu Cangli. Laser induced ripples on the surface of optical devices [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2002, **39**(7): 26~32
- 29 王伟平, 吕百达, 刘仓理. 激光辐照下光学元件表面波纹现象研

- 究 [J]. 激光与光电子学进展, 2002, **39**(7): 26~32
- 21 Zhang Jin, Zhang Zonghe. Magnesium Alloys and the Application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 1~307  
张津, 章宗和. 镁合金及其应用 [M]. 化学工业出版社, 2004. 1~307
- 22 Xia Weijun, Yang Chunhua, Huang Changqing *et al.*. Influence of deformation and rate on twins of cast AM60 during compression test [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2006, **30**(8): 13~15  
夏伟军, 杨春花, 黄长清 等. 变形量和变形速率对 AM60 铸锭压缩过程中孪晶的影响 [J]. 机械工程材料, 2006, **30**(8): 13~15
- 23 Zhang Yongkang, Chen Jufang, Xu Renjun. Experimental research of laser shock strengthening AM50 magnesium alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1068~1072  
张永康, 陈菊芳, 许仁军. AM50 镁合金激光冲击强化实验研究 [J]. 中国激光, 2008, **35**(7): 1068~1072
- 24 R. Ishizaki, K. Nishihara, J. G. Wouchuk *et al.*. Rippled shock propagation and hydrodynamic perturbation [J]. *Journal of Materials Processing Technology*. 1999, 85: 34~38