

# 激光冲击强化对铜表面质量影响的实验研究

冯亚云<sup>1</sup> 叶云霞<sup>1,2</sup> 连祖焯<sup>1</sup> 宣婷<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** 采用纳秒激光对铜块进行了激光冲击强化,用光学显微镜、三维形貌仪等测量了激光冲击强化后的表面形貌和变形深度,用非接触光学轮廓仪测量了表面粗糙度,重点分析了铝箔胶带作吸收层时凹坑表面微缺陷的来源,对不同粗糙度表面的试样进行了激光冲击强化。实验结果表明,黑漆作吸收层时表面变化特征主要为宏观凹坑和冲击区域出现微凹凸结构;铝箔胶带作吸收层时表面变化特征主要为宏观凹坑和冲击区域出现微缺陷。最后,通过实验研究分析了微缺陷的形成,发现其与铝箔胶带背面黏胶内气泡有关。当原始粗糙度较大时,激光冲击会使整体粗糙度增加,单降低最大高度粗糙度;原始表面光洁度较高时,激光冲击反而会使得整体粗糙度和最大高度粗糙度都有所增加。

**关键词** 激光技术;激光冲击强化;表面质量;紫铜;微缺陷;表面粗糙度

中图分类号 TN244; TG84

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.101401

## Experimental Research on Effect of Surface Quality of Copper Treated by Laser Shock Peening

Feng Yayun<sup>1</sup> Ye Yunxia<sup>1,2</sup> Lian Zuchang<sup>1</sup> Xuan Ting<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** The surface morphology and deformation depth of the copper targets treated by nanosecond laser shock peening (LSP) are measured by optical microscope (OM), 3D profile and so on. Non-contact optical profile is used to measure the surface roughness of the metal targets. The source of micro defects is analyzed emphatically when absorption layer is aluminum foil tape. Samples with different surface roughnesses are treated by LSP. Experimental results show that there will form macro dents and micro convex-concave structures on the impacted regions when black paint is used as the absorption layer. When the absorption layer is aluminum foil tape, besides the macro dents, there will form large amounts of micro defects on the impacted region. Through analysis and experimental research, it is confirmed that the formation of micro defects are associated with the air bubbles existed in the glue on the back of aluminum foil tape. LSP can increase the overall roughness but reduce the maximum height of roughness when the original roughness is high. When the surface smoothness is high, LSP can increase the overall roughness and the maximum height of roughness.

**Key words** laser technique; laser shock peening; surface quality; red copper; micro defects; surface roughness

**OCIS codes** 140.3390; 220.4610; 350.3390; 350.3850; 240.6700

## 1 引言

激光冲击强化(LSP)技术是一项先进的金属材料表面改性技术,其基本原理是利用高功率密度、短脉冲激光在金属表面诱导高压冲击波并作用于金属表面,在表层金属材料内引入高密度位错和有益的残余压应力分布,从而大幅度提高材料表面的抗疲劳、耐磨损和耐腐蚀等性能<sup>[1-2]</sup>。近20年来,科研人员对激光诱导冲击波特性<sup>[3-5]</sup>、表层金属材料对高压冲击波的动态响应<sup>[6-7]</sup>、激光冲击强化工艺规律<sup>[8-10]</sup>、激光冲击强化设备<sup>[11-12]</sup>

收稿日期: 2015-03-30; 收到修改稿日期: 2015-05-11; 网络出版日期: 2015-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51205172), 机械系统与振动国家重点实验室开放课题基金

作者简介: 冯亚云(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事激光加工方面的研究。E-mail: 527118571@qq.com

导师简介: 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@mail.ujs.edu.cn(通信联系人)

等都进行了较为系统的研究,取得了丰硕成果。这些成果为激光冲击强化技术的工业化应用奠定了基础。激光冲击能够在金属表面引入有益残余压应力,进而改善材料表面力学性能,已经得到充分认可。但是工件的表面性能优劣,除了与表层材料力学性能有关,还与工件表面质量有关。关于激光冲击对材料表面质量的影响研究则相对比较缺乏。

以铜为冲击对象,选择常用的铝箔胶带和黑漆作为吸收层,水为约束层,通过观察冲击后表面形貌变化、表面粗糙度变化,系统研究了激光冲击对材料表面质量的影响,并分析了铝箔胶带作为吸收层时,表面微缺陷的形成来源。

## 2 实验

### 2.1 实验原理

图1所示为激光冲击强化的加工原理图,激光经过聚焦透镜,透过透明约束层照射到金属表面的吸收层上,吸收层一般为黑漆和铝箔胶带,约束层一般为水或K9玻璃。激光首先与吸收层相互作用,引起吸收层材料的气化和电离进而形成等离子体,等离子体膨胀之后受到约束层的约束作用,会产生一个反向冲击波作用于靶材,激光诱导冲击波的峰值压强一般在吉帕数量级。当冲击波峰值压力高于金属靶材的动态屈服强度时,金属靶材会发生塑性变形,并在材料表面引入残余压应力,甚至形成宏观变形。

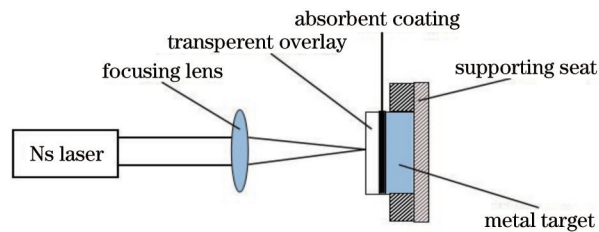


图1 激光冲击强化的原理图

Fig.1 Schematic diagram of LSP

### 2.2 实验过程

试样为紫铜,牌号T2,尺寸为25 mm×25 mm×10 mm。制备了3种不同初始表面状态的铜块a、b、c,其中铜块a用1000目的SiC砂纸打磨(1#试样),铜块b用1000、2000和2500目的SiC砂纸依次打磨(2#试样);铜块c用1000、2000、2500和3000目的SiC砂纸依次打磨,然后抛光(3#试样)。

激光冲击采用Thales公司的Nd:YAG激光器,激光脉宽约为10 ns,波长为1064 nm,聚焦到金属表面的光斑为1.2 mm,激光光束为平顶型。实验过程中采用了两类吸收层:黑漆和铝箔胶带,厚度分别约为50 μm和140 μm。黑漆的主要成分为丙烯酸树脂,采用喷涂的方法涂覆于试样表面。约束层为厚度约3 mm的水流。分别对黑漆和铝箔胶带作吸收层的铜块进行激光冲击强化,冲击实验完成后,揭去剩余吸收层,用丙酮和酒精清洗试样表面。

采用Keyence VHX-1000三维形貌仪测量试样表面冲击所致凹坑的三维形貌;采用非接触光学轮廓仪VEECO WYKO NT1100观察冲击凹坑内细微形貌;试样用氯化铁溶液(将5 g氯化铁溶于50 mL盐酸和100 mL水的混合物中配置而成)进行腐蚀,然后用Leica DM2500M光学显微镜观察试样表面冲击区金相组织;用VEECO WYKO NT1100测量冲击前后的表面粗糙度。

## 3 结果与讨论

### 3.1 宏观凹坑的三维形貌

选用能量为4 J的激光对吸收层分别为黑漆和铝箔的铜块(3#试样)进行单次冲击,并对铜块表面进行抛光处理。当激光诱导冲击波的峰值压强高于靶材的屈服强度时,靶材将发生塑性变形。在已知各实验参数情况下,可由Fabbro公式<sup>[3]</sup>估算激光诱导冲击波的峰值压强:

$$P_{\max} = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{3 + 2\alpha}} \sqrt{I_0 Z}, \quad (1)$$

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_{\text{cu}}} + \frac{1}{Z_{\text{water}}}, \quad (2)$$

式中  $P_{\max}$  为激光诱导冲击波的峰值压强, 单位为 GPa;  $I_0$  为激光功率密度, 单位为  $\text{GW}/\text{cm}^2$ ;  $\alpha$  为激光与金属靶材的作用效率, 在入射激光冲击金属靶材的过程中, 通常情况下  $\alpha = 0.1 \sim 0.2$ <sup>[13-14]</sup>, 这里取  $\alpha = 0.15$ ;  $Z$  为复合声阻抗,  $Z_{\text{cu}}$  和  $Z_{\text{water}}$  分别为铜和水的声阻抗, 单位都为  $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。由于  $Z_{\text{cu}} = 3.83 \times 10^6$ <sup>[15]</sup>,  $Z_{\text{water}} = 0.148 \times 10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ <sup>[16]</sup>, 根据(2)式计算可得  $Z = 0.285 \times 10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。能量  $E = 4 \text{ J}$  时,  $I_0 = 35.386 \text{ GW}/\text{cm}^2$ , 根据(1)式计算可得  $P_{\max} = 6.77 \text{ GPa}$ 。由计算结果可知, 激光诱导冲击波的峰值压强可达几十吉帕, 远远高于纯铜的动态屈服强度 (100 MPa 左右<sup>[17]</sup>, 一般动态屈服强度为静态屈服强度的三倍), 因此会在冲击区域产生塑性变形。

铜块经激光冲击后表面发生塑性变形并形成凹坑, 其表面形貌如图 2 所示。图 2(a) 为原始试样的表面形貌, 图 2(b) 为黑漆作吸收层时形成凹坑的表面形貌, 图 2(c) 和 (d) 为铝箔作吸收层时形成凹坑的表面形貌。与原始表面形貌相比, 经过一次激光冲击后, 黑漆作吸收层时凹坑内表面形貌没有明显的变化, 说明形成的凹坑表面质量较好; 而铝箔作吸收层时可观察到整个激光冲击区域出现大量的微缺陷, 微缺陷随机分布于整个凹坑中, 形态主要有圆形和长条状, 这些微缺陷的出现影响了冲击区域的表面质量, 并且从图 2(d) 中可以观察到明显的凹坑边缘, 凹坑边缘以外的未冲击区域并没有出现微缺陷。

与图 2 对应的黑漆和铝箔作吸收层时凹坑的三维分布如图 3 所示, 黑漆作吸收层时凹坑的变形曲线较平滑; 而铝箔作吸收层时凹坑的变形曲线波动较大, 这一想象与图 2(c) 和 (d) 中冲击区域出现的高密度微缺陷有关, 微缺陷的出现影响了冲击区域的表面质量。对比两种吸收层条件下凹坑的变形深度, 可以发现铝箔作吸收层时凹坑变形量较大, 这与吸收层对激光的吸收率、吸收层厚度等因素有关<sup>[18]</sup>, 而本文选择的参数使得铝箔作吸收层时冲击效果比黑漆好。

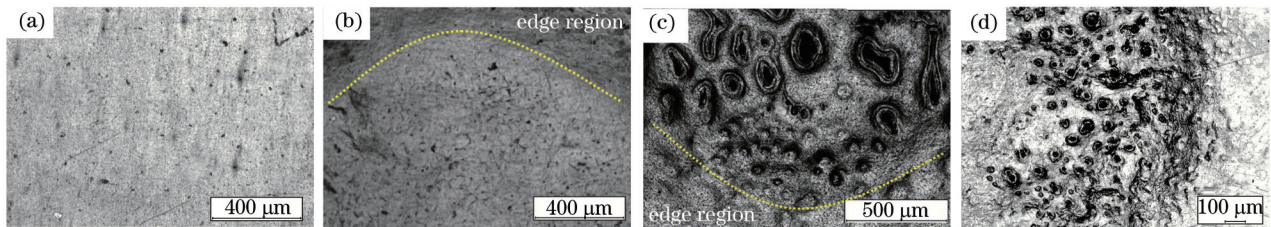


图 2 (a) 原始试样表面形貌; (b) 黑漆作为吸收层时冲击区域的表面形貌; (c)、(d) 铝箔胶带作为吸收层时冲击区域的表面形貌

Fig.2 (a) Surface morphology of original sample; (b) surface morphology of shocked region when absorption layer is black paint; (c), (d) surface morphology of shocked region when absorption layer is aluminum foil tape

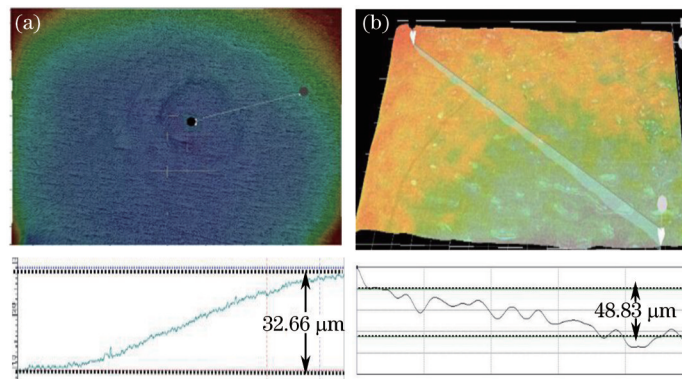


图 3 不同吸收层上凹坑的三维分布。(a) 黑漆; (b) 铝箔

Fig.3 Surface morphologies of dents on different absorption layers. (a) Black paint; (b) aluminum foil tape

### 3.2 凹坑表面的显微组织

对黑漆作吸收层时的凹坑表面形貌进行放大, 并使用 Keyence VHX-1000 三维形貌仪观察其细微形貌, 如图 4(a) 所示。可知, 冲击完后, 凹坑内出现由一些纹路构成的凹凸微结构, 这些纹路类似晶界。为判断表面纹路是否为晶界, 对试样进行了腐蚀, 用金相显微镜观察了金相组织, 如图 4(b) 所示。对比腐蚀前后的表面形貌可见, 图 4(a) 中晶粒区域的尺度与腐蚀后晶粒尺寸相当。由此推断, 图 4(a) 中的纹路为晶界。出现这种现象主要原因为: 当激光诱导冲击波峰值压力远大于材料的动态屈服强度时, 金属材料会发生显著的位错滑移, 且位错滑移更易于发生在微缺陷密集的晶界处<sup>[15,19-20]</sup>, 进而形成如图 4(a) 所示的晶界凸起的冲击表面。



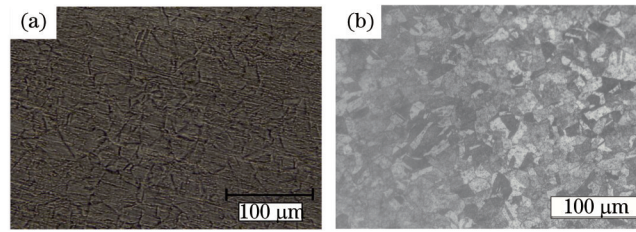


图4 冲击区域的显微组织。(a) 腐蚀前; (b) 腐蚀后

Fig.4 Surface morphologies of the shocked region. (a) Before etching; (b) after etching

对铝箔作吸收层时凹坑内单个微缺陷进行了检测。采用VECCO仪测得的单个微缺陷的二维分布如图5所示。由图5可以看出,微缺陷主要由四部分组成,A区域为凹陷部分,C区域为凸起部分,B区域和D区域都接近基准面。由于从凹陷到凸起需要一定的过渡距离(即A区域到C区域过渡),从而形成了B区域。而D区域为凸起到基准面的过渡区域。这4个部分组成的微缺陷形貌为火山口形貌,中间凹两边凸,从单个微缺陷的分布曲线可知整个微缺陷的直径约为 $225.87\ \mu\text{m}$ ,其中A区域凹陷深度约为 $4.68\ \mu\text{m}$ ,直径约为 $32.78\ \mu\text{m}$ ;C区域凸起高度约为 $2.51\ \mu\text{m}$ 。

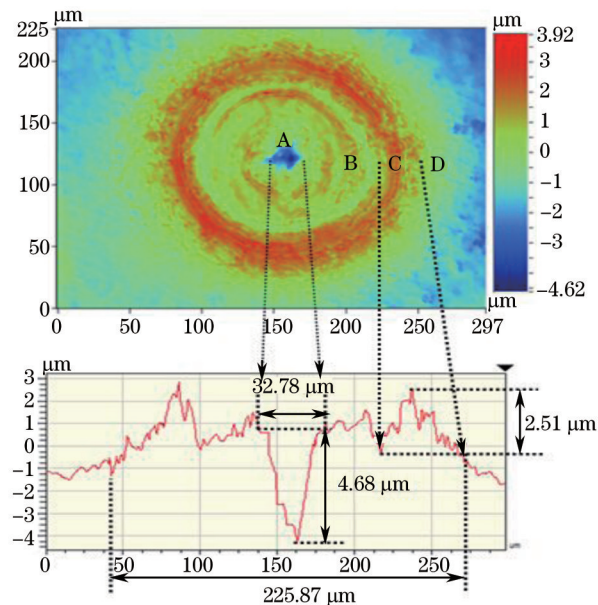


图5 单个微缺陷的二维分布

Fig.5 Two-dimensional distribution of single micro defect

为进一步分析试样表面冲击区微缺陷的产生机理,观察了作为吸收层的铝箔胶带背面的状态,图6(a)给出了铝箔胶带背面的表面形貌。可知,铝箔胶带背面有大量圆形和长条状的气泡,这些气泡存在于铝箔胶带背面的黏胶内。对比图2和图6可知,试样表面微缺陷的轮廓形状和尺寸与铝箔胶带背面上的气泡形状和尺寸一致。因此,判断铝箔胶带背面黏胶内气泡是产生表面缺陷的来源。

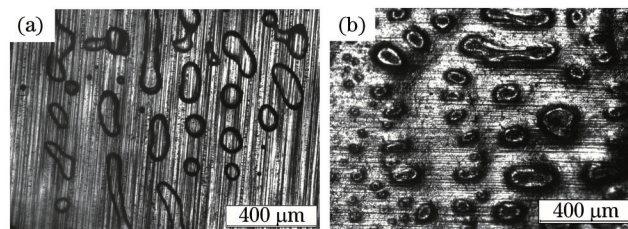


图6 (a) 粘性胶表面的气泡; (b) 激光冲击强化后铝箔背面的微缺陷

Fig.6 (a) Air bubble in adhesive glue; (b) micro defects on the back of Al foil after LSP

为验证微缺陷的出现与铝箔胶带背面黏胶内气泡有关,选择常规铝箔(背面无黏胶)为吸收层。在试样表面首先涂覆耐高温有机硅胶,然后将背面无黏胶铝箔通过耐高温硅胶黏附于试样表面。为了确定耐高温有机硅胶贴附于试样表面时是否会形成气泡,先将无黏胶铝箔通过耐高温有机硅胶贴附于透明载玻片表

面,透过载玻片可以观察到耐高温有机硅胶表面,耐高温有机硅胶内并没有气泡[图7(a)]。图7(b)为铝箔背面粘胶为耐高温有机硅胶时的冲击凹坑内表面形貌,凹坑表面没有出现类似图5中的微缺陷。由此说明,图5中冲击区域表面微缺陷与铝箔背面黏胶内气泡密切相关。

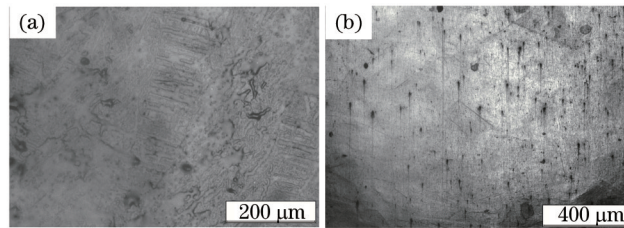


图7 (a) 耐高温有机硅胶的表面形貌; (b) 激光冲击后凹坑的表面形貌

Fig.7 (a) Surface morphology of high temperature resistant silicone rubber; (b) surface morphology of dent after LSP

### 3.3 激光冲击强化对表面粗糙度的影响

一般用  $R_a$ 、 $R_q$ 、 $R_t$  来评定三维粗糙度,  $R_a$  为算术平均偏差,  $R_q$  为轮廓方均根偏差,  $R_t$  为最大高度。  $R_a$  和  $R_q$  可以说明整体粗糙度的变化情况, 而  $R_t$  只能代表检测区域内最高点与最低点之间的距离, 对激光冲击后凹坑中心进行粗糙度检测, 1#、2#、3#试样在不同能量下的粗糙度值分别如表1、2、3所示。

由表1和表2可知, 对于1#试样和2#试样, 从  $R_a$  和  $R_q$  值来看, 冲击区域内粗糙度整体有所增加, 且能量为6J时粗糙度最大。但是从  $R_t$  值可知, 尽管1#试样整体粗糙度有所增加, 但是最大高度粗糙度是下降的; 2#试样最大高度粗糙度基本没变。所以对于原始粗糙度较大的表面来说, 一方面, 激光冲击有利于削弱粗糙尖端, 降低最大高度粗糙度值。另一方面, 激光冲击强化也使得整体粗糙度有所增加; 对于原始粗糙度处于中等情况下, 激光冲击强化会使整体粗糙度有所增加, 但对整个区域的最大高度粗糙度的影响很小。

由表3可知, 与原始粗糙度相比, 3种能量下  $R_a$  和  $R_q$  值都有所增加, 说明3#试样经激光冲击后粗糙度值整体有所增加, 且能量为9J时粗糙度值最大, 从  $R_t$  值可以看出最大高度粗糙度值也有所增加。所以对于原始表面光洁度较高时, 激光冲击强化使整体粗糙度和最大高度粗糙度值都有所提高。这可能是因为激光冲击导致的位错滑移、孪晶等微缺陷, 会在表面形成非常明显的凹凸微结构, 这些凹凸微结构会提高表面粗糙度, 进而降低表面质量。

表1 1#试样在不同能量下的粗糙度值

Table 1 Roughness value of sample 1# with different energy

	Original	4 J	6 J	9 J
$R_a$	305.29	384.93	429.38	420.70
$R_q$	405.27	507.26	554.89	550.02
$R_t$	8.86	5.56	8.25	6.33

表2 2#试样在不同能量下的粗糙度值

Table 2 Roughness value of sample 2# with different energy

	Original	4 J	6 J	9 J
$R_a$	237.19	283.48	364.14	291.33
$R_q$	303.53	355.73	450.40	370.05
$R_t$	3.54	3.60	3.91	4.03

表3 3#试样在不同能量下的粗糙度值

Table 3 Roughness value of sample 3# with different energy

	Original	4 J	6 J	9 J
$R_a$	90.85	214.88	170.12	247.47
$R_q$	127.44	270.38	227.70	329.85
$R_t$	2.27	2.64	2.44	2.78

另外随机选取激光冲击后粗糙度曲线与原始粗糙度曲线进行对比, 结果如图8所示。可知, 三种不同原始粗糙度表面经激光冲击后的变化趋势比较符合表1、2、3中对应的  $R_t$  值变化情况。因此可以进一步确认激光冲击强化对不同粗糙度表面最大高度粗糙度的影响。

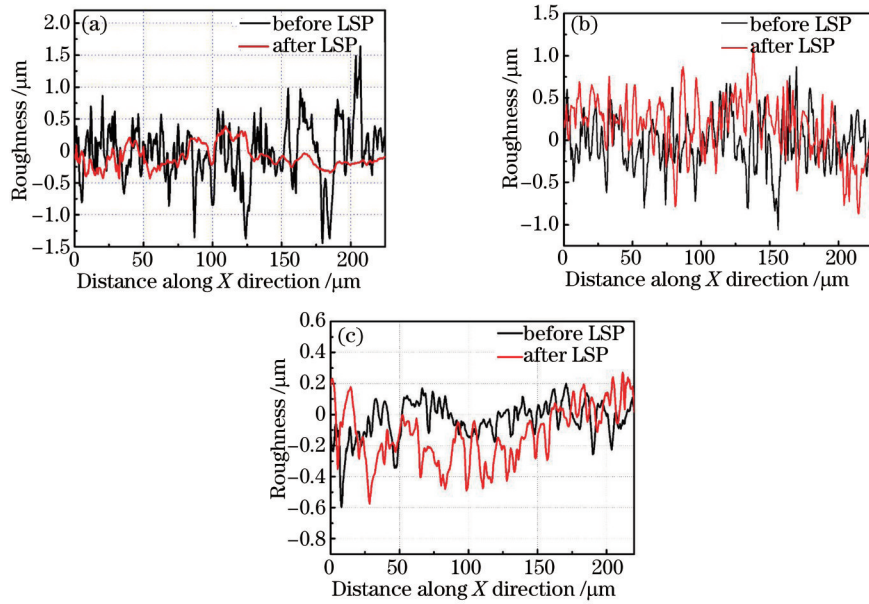


图8 不同试样激光冲击前后表面粗糙度曲线。(a) 1#试样; (b) 2#试样; (c) 3#试样

Fig.8 Roughness curves of different samples before and after LSP. (a) Sample 1#; (a) sample 2#; (c) sample 3#

## 4 结 论

研究了激光冲击对铜表面质量的影响,系统观察了各类形貌变化,并分析了成因。得到如下结论:

1) 黑漆作吸收层时,激光冲击强化后表面变化特征为:出现宏观的塑性变形凹坑;当激光诱导冲击波压力远大于金属材料屈服强度时,在激光冲击区域可以直接观察到晶粒组织。

2) 铝箔胶带作吸收层时,激光冲击强化后的表面变化特征为:出现宏观的塑性变形凹坑;与此同时,凹坑内出现圆形和长条状的微缺陷。经分析和实验验证,铝箔胶带背面黏胶内气泡是形成微缺陷的直接原因。

3) 激光冲击对试样表面粗糙度影响:当原试样表面粗糙度较大时,激光冲击可以削弱粗糙尖端,降低 $R_t$ ,但是激光冲击强化也使得整体粗糙度有所增加,即 $R_a$ 和 $R_q$ 增加;当表面粗糙度中等时,激光冲击强化会使 $R_a$ 和 $R_q$ 有所增加,但对 $R_t$ 影响很小;而当原试样表面光洁度较高时,激光冲击强化使 $R_a$ 、 $R_a$ 和 $R_t$ 都有所提高,这可能是由于激光冲击诱导产生表面微凹凸结构时,降低了表面光洁度。

## 参 考 文 献

- Zhang Qinglai, Wu Tiedan, Qian Yang, *et al.*. Study on high cycle fatigue properties and laser shock processing of AZ91D-T6 cast magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1003008.  
张青来, 吴铁丹, 钱 阳, 等. AZ91D-T6铸造镁合金激光冲击强化和高周疲劳性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1003008.
- Lai Zhilin, Wang Cheng, Li Yinghong, *et al.*. Effects of laser shock peening and ultrasonic shot peening on fatigue property of 1Cr11Ni2W2MoV stainless steel[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, (5): 051403.  
赖志林, 汪 诚, 李应红, 等. 激光冲击强化与超声喷丸对1Cr11Ni2W2MoV不锈钢疲劳性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2013, (5): 051403.
- Gu Yongyu, Zhang Yongkang, Zhang Xingquan, *et al.*. Theoretical study on the influence of the overlay on the pressure of laser shock wave in photomechanics [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(11): 5885-5891.  
顾永玉, 张永康, 张兴权, 等. 约束层对激光驱动冲击波压力影响机理的理论研究[J]. 物理学报, 2006, 55(11): 5885-5891.
- Guan Haibing, Ye Yunxia, Wu Zhong, *et al.*. Effect of long pulse-width stray light on shock wave induced by laser[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0703007.  
管海兵, 叶云霞, 吴 忠, 等. 长脉冲杂光对激光诱导冲击波的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0703007.
- 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): 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.



- 6 Lu Jinzhong, Luo Kaiyu, Feng Aixin, *et al.*. Micro-structural enhancement mechanism of LY2 aluminum by means of a single laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(10): 2662-2666.  
鲁金忠, 罗开玉, 冯爱新, 等. 激光单次冲击LY2铝合金微观强化机制研究[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2662-2666.
- 7 Li Jing, Li Jun, He Weifeng, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of TC17 titanium alloy by laser shock peening with different impacts[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(9): 2889-2895.  
李靖, 李军, 何卫锋, 等. TC17钛合金激光多次冲击强化后组织和力学性能研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 2889-2895.
- 8 Chen Ruifang, Hua Yinqun, Cai Lan, *et al.*. The effect of different confinement mediums on the result of laser shock processing[J]. Applied Laser, 2008, 28(2): 89-91.  
陈瑞芳, 花银群, 蔡兰, 等. 不同约束材料对激光冲击强化效果影响的实验研究[J]. 应用激光, 2008, 28(2): 89-91.
- 9 Wang Xuede, Nie Xiangfan, Luo Sihai, *et al.*. Study on effects of laser shock peening in TC11 titanium alloy with different impacts[J]. Laser and Infrared, 2013, 43(9): 997-1001.  
王学德, 聂祥樊, 罗思海, 等. 不同冲击次数下激光冲击对TC11钛合金的影响研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(9): 997-1001.
- 10 Lu Ying, Zhao Jibin, Qiao Hongchao. Investigation of technical and strengthening mechanism research of TiAl alloy by laser shock peening[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1003013.  
陆莹, 赵吉宾, 乔红超. TiAl合金激光冲击强化工艺探索及强化机制研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1003013.
- 11 Ren Xudong, Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong, *et al.*. Investigation of combination laser treatment technique on engine crankshaft[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2007, 28(2): 56-59.  
任旭东, 张永康, 周建忠, 等. 发动机曲轴的激光冲击复合处理工艺研究[J]. 内燃机工程, 2007, 28(2): 56-59.
- 12 Li Qipeng, He Weifeng, Tong Chonglou, *et al.*. Study of laser shock processing used in aerongine blades[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2008, 44(4): 37-39.  
李启鹏, 何卫锋, 仝崇楼, 等. 航空发动机叶片的激光冲击强化研究[J]. 航空精密制造技术, 2008, 44(4): 37-39.
- 13 R Fabbro, J Fournier, P Ballard, *et al.*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry[J]. Journal of Applied Physics, 1990, 68(2): 775-784.
- 14 D Devaux, R Fabbro, L Tollier, *et al.*. Generation of shock waves by laser-induced plasma in confined geometry[J]. Journal of Applied Physics, 1993, 74(4): 2268-2273.
- 15 Y X Ye, Y Y Feng, Z C Lian, *et al.*. Plastic deformation mechanism of polycrystalline copper foil shocked with femtosecond laser[J]. Applied Surface Science, 2014, 309: 240-249.
- 16 H Lotfi, B Faiz, A Moudeden. Characterization the acoustic impedance of mortar using ultrasonic technique[J]. Journal of Civil Engineering Research, 2013, 3(1): 46-51.
- 17 Niu Zhongxiu. Research on the Experiments of Copper Thin Films onto Silicon Wafers Treated by Laser Shock Processing[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010: 42-43.  
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: 42-43.
- 18 Shi Chaoyang, Liu Chirong, Ying Caisu. Research and application of laser shock processing[J]. Machinery Design & Manufacture, 2010, (4): 61-63.  
石朝阳, 刘赤荣, 应才苏. 激光冲击强化技术研究与应用现状[J]. 机械设计与制造, 2010, (4): 61-63.
- 19 Qiao Hongchao, Zhao Yixiang, Zhao Jibin, *et al.*. Effect of laser peening on microstructures and properties of TiAl alloy [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(7): 1766-1773.  
乔红超, 赵亦翔, 赵吉宾, 等. 激光冲击强化对TiAl合金组织和性能的影响[J]. 光学精密工程, 2014, 22(7): 1766-1773.
- 20 Ma Wen, Lu Yanwen. Molecular dynamics investigation of shock front in nanocrystalline copper[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(3): 036201.  
马文, 陆彦文. 纳米多晶铜中冲击波阵面的分子动力学研究[J]. 物理学报, 2013, 62(3): 036201.

栏目编辑: 宋梅梅