

激光冲击强化铜的表面质量和性能

王峰, 左慧, 赵雳, 陈美

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 为了研究激光冲击强化(LSP)对铜表面质量和性能的影响,利用Nd:YAG激光器对铜试样进行冲击强化处理。试验结果表明,以高分子黑胶带作为吸收层时,试样的表面形貌几乎没有缺陷;随着搭接率的提高,最大硬度增加,且表面粗糙度降低。两次冲击重叠和错开的冲击方式对试样影响层深度和最大硬度的影响类似。仿真结果显示,错开的冲击方式可提高试样的残余压应力。

关键词 激光技术; 激光冲击强化; 表面形貌; 表面质量; 硬度; 残余应力

中图分类号 TN249; TG84 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.041410

Surface Quality and Property of Copper Treated by Laser Shock Peening

Wang Feng, Zuo Hui, Zhao Li, Chen Mei

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

Abstract In order to study the effects of laser shock peening (LSP) on surface quality and property of copper, Nd:YAG lasers is used to treat copper samples by laser shock peening. The experimental results show that, when the polymer black tape is used as the absorption layer, there are no defects on the surface morphology of sample. With the increase of the overlap rate, the maximum hardness increases and the surface roughness decreases. The effects on the affected layer depth and the maximum hardness of sample caused by the overlapped and the staggered shock ways of two shocks are similar. The simulation results show that the staggered shock way can enhance the residual compressive stress of sample.

Key words laser technique; laser shock peening; surface morphology; surface quality; hardness; residual stress

OCIS codes 140.3390; 240.6700; 350.3850; 350.3390

1 引言

激光冲击强化(LSP)能够在材料表面产生有益的残余压应力分布,改善材料表层的力学性能,提高零件的使用寿命^[1]。其基本原理是利用高功率密度、短脉冲的激光在金属表面诱导形成高压冲击波,通过高压冲击波在材料表层诱导形成密集、稳定的位错结构,并明显细化冲击区域的晶粒,同时使表面材料发生塑性变形并残留高幅压应力,从而显著提高材料的抗疲劳和耐应力腐蚀等性能^[2]。目前已有大量学者对铝板、铜、马氏体不锈钢、钛合金等材料进行了激光冲击试验,并测试了冲击后试样的力学性能和微观组织,结果表明试样的力学性能良好,晶粒得到了细化^[3-6]。也有学者对LSP后材料的表面形貌进行了研究,发现表面粗糙度与零件的疲劳寿命有密切的关系^[7]。光斑直径、板材厚度通常在微米或毫米量级,多点激光冲击对金属构件表面形貌的影响较大,而零件的强度、抗磨性、耐腐蚀性等性能与表面质量密切相关^[8-9],因此,在保证力学性能的同时,也要控制表面质量。然而,很多研究人员仅单方面关注激光冲击后材料的力学性能或表面质量,关于两者结合的研究鲜有报道。

收稿日期: 2016-10-31; **收到修改稿日期:** 2016-12-26

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: 王峰(1992—),男,硕士研究生,主要从事激光冲击强化方面的研究。E-mail: ahwangfeng1992@163.com

铜及铜合金因其优异的导电导热性而广泛应用于电子、电力、冶金、航空航天领域,但是铜的强度较低,不能完全满足工业应用的需求,提高铜的强度一直是相关研究的主要方向。本文以铜为冲击对象,分别选择常用的铝箔、铝箔胶带和高分子黑胶带作为吸收层,以水为约束层,将激光冲击波加载于初始表面粗糙度不同的铜块,研究了不同吸收层、搭接率、冲击方式对试验结果的影响。通过观察冲击后试样的表面形貌、表面粗糙度、残余压应力和影响层深度,系统研究了激光冲击对铜表面质量和强化效果的影响。并通过数值仿真的方法对试验得到的结果进行了补充和佐证。

2 试验研究

2.1 试样准备

试样为紫铜,牌号为 T2,尺寸为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,分别用 $30, 18, 12\text{ }\mu\text{m}$ 和 $30, 18, 12, 9\text{ }\mu\text{m}$ 的 SiC 砂纸依次打磨,然后在丝绸上抛光。将这两种不同初始表面状态的试样进行清洗以保证一定的表面质量。

2.2 冲击试验

激光冲击原理图如图 1 所示。试验所用的激光器为 Nd:YAG 激光器,脉宽约为 20 ns ,波长为 1064 nm ,聚焦到金属表面的光斑直径为 3 mm ,最大激光脉冲能量为 5.6 J ,工作重复频率为 $1\sim 5\text{ Hz}$ 。试验过程中采用了铝箔、铝箔胶带和高分子黑胶带这三类吸收层,厚度均为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 。其中,为了研究吸收层硬度对激光冲击的影响,对部分铝箔进行了退火处理,得到了硬度不同的铝箔吸收层。约束层为厚度为 1 mm 的水流。采用多点搭接冲击,搭接率分别为 30% 、 40% 、 50% ,冲击路径如图 2 所示。另外,保持搭接率为 30% ,进行了相同激光能量下、不同注入方式的激光冲击试验。条件分别设置为:1) 脉冲能量为 5.2 J 的激光冲击一次;2) 脉冲能量为 2.6 J 的激光冲击两次,第二次冲击的扫描路径完全覆盖第一次的扫描路径;3) 脉冲能量为 2.6 J 的激光冲击两次,第二次冲击的扫描路径与第一次的相比在 x 和 y 方向各错开 15% 。冲击完成后,揭去剩余吸收层,用丙酮和乙醇清洗试样表面。

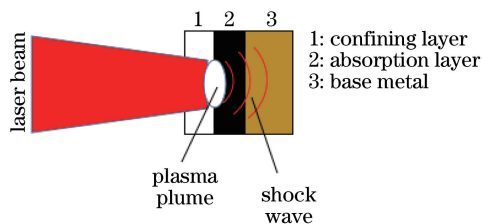


图 1 激光冲击原理图

Fig. 1 Schematic diagram of laser shock

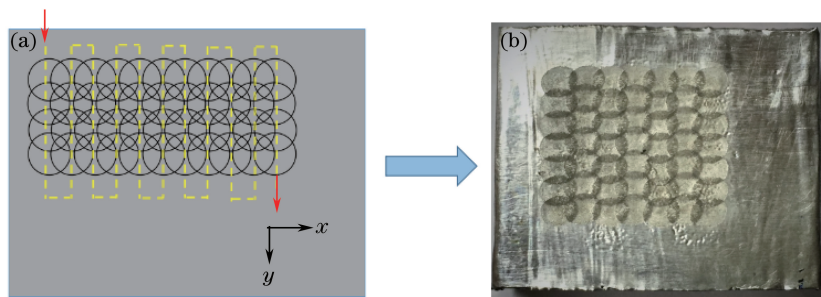


图 2 激光冲击扫描。(a)示意图;(b)实物图

Fig. 2 Laser shock scanning. (a) Schematic diagram; (b) real photo

3 试验结果及讨论

3.1 宏观凹坑的三维形貌

当激光能量为 5.2 J 时,分别对吸收层为高分子黑胶带、铝箔胶带、铝箔(退火、不退火)的,经过抛光处理的铜块进行单次冲击。铜块经过激光冲击后表面发生塑性变形,形成凹坑的表面形貌如图 3 所示。比较三种不同吸收层被冲击后的表面形貌可以看出,高分子黑胶带作为吸收层时,激光冲击一次后的表面形貌与原

始试样相比没有明显的变化;铝箔胶带作为吸收层时,凹坑表面出现了大面积的微缺陷,这种微缺陷会影响冲击区域的表面质量;退火铝箔作为吸收层时,凹坑表面并没有出现明显的缺陷,试样表面蓝色的物质是铝箔发生烧蚀焊覆形成的。

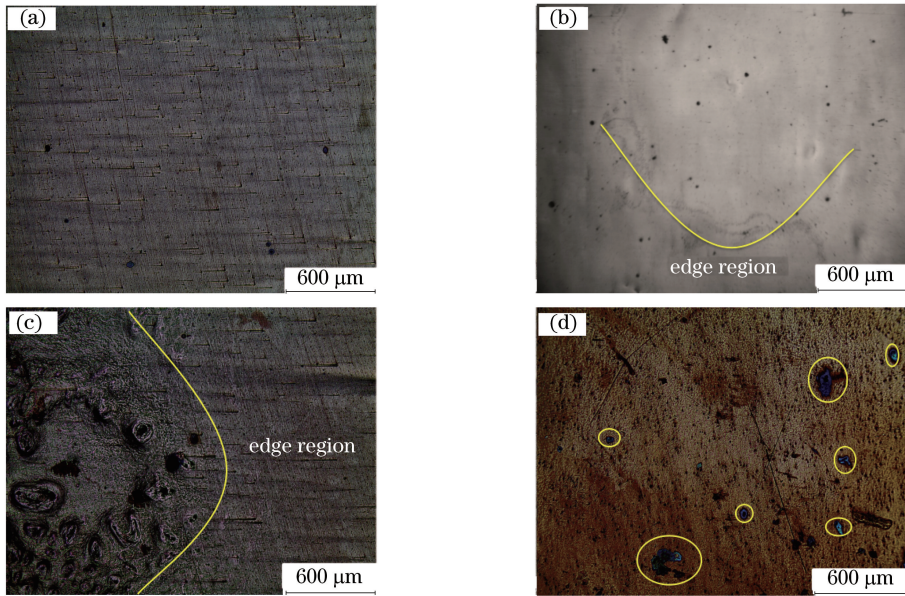


图 3 (a)原始试样的表面形貌;(b)高分子黑胶带作为吸收层时冲击区域内的表面形貌;(c)铝箔胶带作为吸收层时冲击区域内的表面形貌;(d)退火铝箔作为吸收层时冲击区域的表面形貌

Fig. 3 (a) Surface morphology of original sample; (b) surface morphology of shocked region with polymer black tape used as absorption layer; (c) surface morphology of shocked region with aluminum foil tape used as absorption layer; (d) surface morphology of shocked region with annealed aluminum foil used as absorption layer

不退火铝箔作为吸收层时,经过一次激光冲击后,揭去铝箔得到的表面形貌如图 4 所示,可以看出铜块表面发生了大面积的焊覆。这是因为不退火铝箔的硬度较高,作为吸收层时与铜块表面不能完全贴合,铝箔和铜块之间存在空气,导致形成了约束层-铝箔吸收层-空气-铜块的模式;当激光烧蚀铝箔时,可形成等离子体。空气的存在,使得铝箔与铜块表面结合处发生爆炸,一部分铝箔被撕裂,一部分铝箔被焊覆在了铜块表面。



图 4 不退火铝箔作为吸收层时冲击后的表面

Fig. 4 Surface morphology of shocked region with unannealed aluminum foil used as absorption layer

综上所述,高分子黑胶带作吸收层时,冲击区域内的表面形貌较为平整,表面质量较好;铝箔胶带作为吸收层时,其背面黏性胶内存在的大量圆形和长条形气泡会导致冲击区域内产生相应形状的微缺陷^[10];退火铝箔作吸收层时,冲击区域内的表面形貌较为平整,但为了避免铝箔被激光过度烧蚀而被焊覆在铜块表面影响表面质量,铝箔厚度的选择十分重要;不退火铝箔作为吸收层时会破坏铜块的表面。因此,选用高分子黑胶带作为吸收层进行冲击试验。

3.2 激光冲击对表面粗糙度的影响

3.2.1 搭接率对表面粗糙度的影响

表面粗糙度与零件的疲劳寿命有密切关系,大的表面粗糙度会显著降低零件的疲劳寿命,因此控制表面

粗糙度对提高零部件的疲劳寿命具有极其重要的意义^[4]。使用陕西威尔公司生产的 SP3100 轮廓仪对试样表面冲击区域的表面粗糙度进行了测量。为了保证试验结果的准确性,在同一个试样上测量三组数据取平均值,结果如图 5 所示。可以看出,当吸收层为高分子黑胶带、激光脉冲能量为 5.2 J 时,初始表面粗糙度较大的未抛光表面经过激光冲击后,其表面粗糙度有所降低,随着搭接率的提高,表面粗糙度降低的幅度也有所提高;初始表面粗糙度较低的抛光表面经过激光冲击后,其表面粗糙度有所增加,随着搭接率的提高,表面粗糙度增加的幅度也有所提高。这是因为表面粗糙度的实质是较小间距内微小波峰谷的不平度,对于表面粗糙度较大的材料,激光冲击波会“削平”尖锐的凸起,降低粗糙度。随着搭接率的提高,相同冲击区域内的峰值功率密度也会提高,因此激光冲击波“削平”凸起的能力会增强,冲击后表面粗糙度的降低程度也更明显;而对于表面粗糙度较低的材料,激光冲击则会提高其表面粗糙度。这表明在具有一定峰值功率密度的激光冲击作用下,试样的表面粗糙度最终会达到一个稳定值。

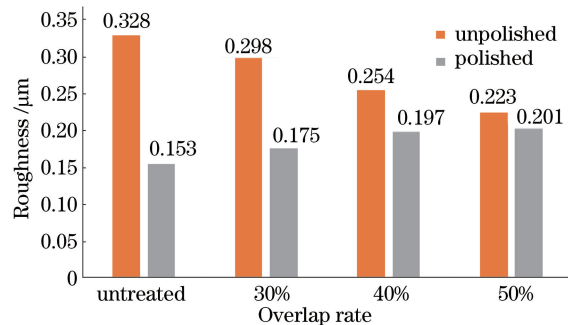


图 5 搭接率对表面粗糙度的影响

Fig. 5 Effect of overlap rate on surface roughness

3.2.2 冲击方式对表面粗糙度的影响

在注入激光总能量均为 5.2 J 的条件下,研究了第 2 节所描述的三种不同注入方式对铜块表面质量的影响,结果如图 6 所示。两次冲击区域完全重叠的方式与部分错开的方式相比,前者显著降低了铜块的表面粗糙度,大幅提高了表面质量。这是因为重复冲击会在第一次激光冲击波“削平”凸起波峰的基础上继续对表面进行修整。但是重复次数并非越多越好,这是因为经过多次激光冲击后,表面粗糙度会达到一个稳定值。

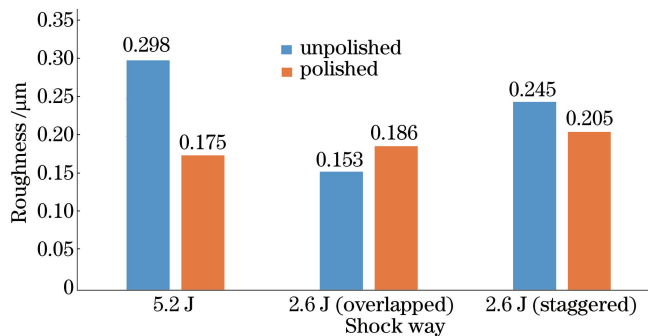


图 6 冲击方式对表面粗糙度的影响

Fig. 6 Effect of shock way on surface roughness

通过上述试验可以得出结论,为了提高工件经激光冲击后的表面质量,可以选择搭接率较大、相同能量多次重复冲击的方式来对工件进行激光冲击。一般来说,搭接率越高,局部区域的激光冲击次数就越多,但是有效长度越短。因此在激光冲击中,需要合理选择工艺参数,以提高加工质量和效率。

3.3 激光冲击对深度方向硬度的影响

将试样从冲击区域的中心沿纵向剖开,利用不同粗糙度的砂纸将试样剖面依次打磨至平整,再在丝绸上进行抛光。用维氏显微硬度仪从冲击区域上表面开始沿深度方向检测硬度,每个检测点的加载时间为 15 s,每隔 100 μm 测一个点。为了保证结果的准确性,在同一块试样上测得三组数据,并取平均值,得到的结果如图 7、8 所示。

微观硬度是表征材料力学性能的重要参数之一,可以有效评价 LSP 深度,以评估激光冲击后的强化效果。铜块的初始硬度为 95 HV,当激光脉冲能量为 5.2 J 时,由图 7 可以看出,在不同搭接率下,激光冲击后铜块的硬度得到了不同程度的提高。当搭接率分别为 30%、40%、50% 时,最大显微硬度分别提高到了 110, 114, 119 HV。三种不同搭接率的影响层深度均约为 1000 μm 。

当搭接率为 30%、激光能量为 2.6 J 时,按照不同的冲击方式对试样进行两次冲击。由图 7、8 可以看出,经能量为 2.6 J 的激光脉冲冲击两次时得到的硬度分布曲线与能量为 5.2 J 的激光脉冲冲击一次时的(图 7)几乎一致;两次冲击区域重叠或者错开时,得到的硬度结果也几乎一致,这说明冲击方式不会对铜块的硬度产生太大的影响。

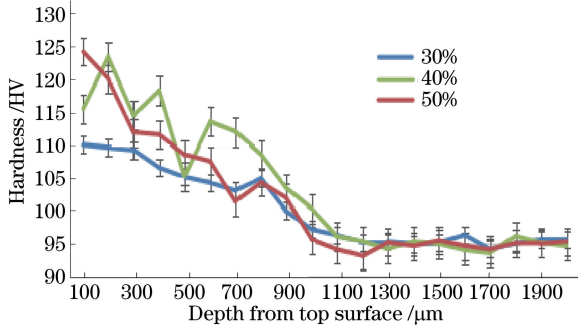


图 7 搭接率对深度方向硬度的影响

Fig. 7 Effect of overlap rate on hardness along depth direction

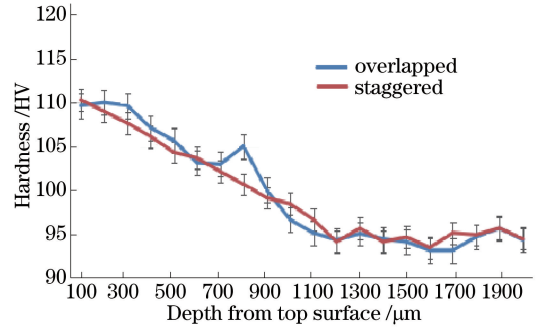


图 8 冲击方式对深度方向硬度的影响

Fig. 8 Effect of shock way on hardness along depth direction

4 数值研究

4.1 激光冲击下的本构关系

激光冲击是在一个高度非线性的瞬时动态内完成的,其应变率高达 10^8 s^{-1} ,故采用 JC 模型模拟高应变率下等效应力,即

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

式中 σ 为流动应力; ϵ 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}$ 为塑性应变率; $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ 为参考应变率; A 为参考应变率下的初始屈服应力, B 为材料硬变硬化模量, C 为材料硬变强化参数, n 为材料硬化指数。铜的 JC 模型基本参数见表 1,其中 ρ 为密度, E_1 为铜的杨氏模量, ν_1 为泊松比, T_M 为材料熔点, m 为材料热软化指数。

表 1 铜的 JC 模型参数

Table 1 JC model parameters of copper

Parameter	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	E_1 / MPa	ν_1	T_M / K	A / MPa	B / MPa	C / MPa	n	m
Value	8.93	119000	0.326	1356	90	292	0.025	0.31	1.09

4.2 Fabbro 压力估算模型

Fabbro 等^[11]建立了激光冲击波传播的一维模型,用此模型估算出激光诱导冲击波的峰值压力为

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

式中 P_{\max} 为冲击波的峰值压力, α 为激光与金属靶材的作用效率。在激光冲击金属靶材的过程中,激光能量 E 分为两个部分,其中 αE 转化为内能, $(1-\alpha)E$ 用于形成等离子体冲击波, $\alpha = 0.1$ ^[12]。 Z 是靶材与约束层的合成冲击波声阻抗,满足

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}, \quad (3)$$

式中 Z_1 和 Z_2 分别为材料和约束层的冲击声阻抗。铜的声阻抗 $Z_1 = 3.26 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[10],水的声阻

抗 $Z_2 = 0.15 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1[13]}$, 因此可得 $Z = 2.87 \times 10^5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

I_0 为入射激光功率密度, 可通过改变脉冲能量和光斑直径进行调整, 其满足

$$I_0 = \frac{4E}{\pi d^2 \tau}, \quad (4)$$

式中 E 为激光脉冲能量, d 为光斑直径, τ 为激光脉冲宽度。试验中 $d = 3 \text{ mm}$, $\tau = 20 \text{ ns}$ 。激光诱导的冲击波的持续时间大约为激光作用时间的 2~3 倍, 因此模拟所加载的冲击波压力作用时间为 60 ns。

4.3 不同冲击方式下残余应力分布

激光冲击后, 材料深度方向的残余应力分布的模拟结果如图 9 所示。可以看出, 2.6 J 激光能量分两次作用在铜块表面时, 产生的残余应力影响层深度均约为 $1000 \mu\text{m}$, 而不同的冲击方式会产生幅值不同的残余压应力。2.6 J 激光能量第一次冲击铜块表面时在铜块表面产生幅值为 30 MPa 的残余压应力, 随着深度的增加, 激光能量的影响减小。当第二次 2.6 J 激光能量分别在 x, y 轴方向各错开 15% 的条件下作用于铜块表面时, 在铜块表面产生了幅值为 60 MPa 的残余压应力, 影响深度与第一次冲击的相同。而 2.6 J 激光能量第二次作用于铜块表面的相同区域时, 得到的模拟结果几乎与第一次的一致。这说明在相同区域重复冲击时, 第二次冲击几乎不会改变材料的残余压应力。造成这种现象的原因可能是第一次激光冲击便使得该区域内的塑性变形趋于饱和, 随后的多次冲击无法在该区域内继续增加残余压应力。

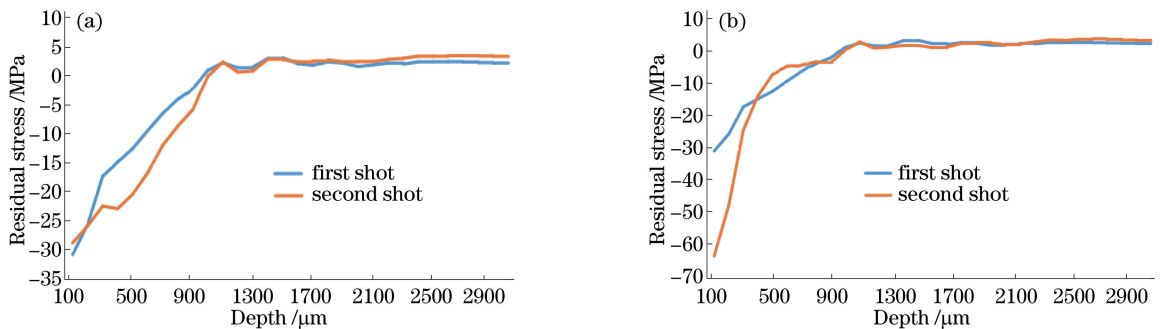


图 9 冲击方式对残余应力的影响。(a)重叠的冲击方式;(b)错开的冲击方式

Fig. 9 Effect of shock way on residual stress. (a) Overlapped shock way; (b) staggered shock way

5 结 论

研究了激光冲击对铜表面质量和性能的影响, 系统观察了不同材料作为吸收层时铜块的表面形貌, 获得了不同冲击方式下的表面质量, 研究了激光冲击对铜强化效果的影响。以高分子黑胶带和退火铝箔作为吸收层时, 铜块表面质量较好, 没有明显缺陷, 而铝箔胶带和不退火铝箔不太适合作为吸收层。激光冲击既能提高铜的表面质量又可强化其性能, 且效果随着搭接率的提高而越发明显。对于初始表面粗糙度较大的试样, 激光冲击会较低其表面粗糙度, 提高表面质量。当搭接率为 50% 时, 经激光冲击后铜块的表面质量最好, 最大硬度最大。在相同激光总能量的条件下, 两次冲击重叠时, 得到的铜块表面质量最好; 两次冲击错开时, 得到的力学性能最好。

参 考 文 献

- [1] Zhang Qinglai, Wang Rong, Zhang Bingxin, *et al.* Effect of laser shock processing on mechanical properties and mesostructures of AZ31 magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0303001.
张青来, 王 荣, 张冰昕, 等. 激光冲击强化对 AZ31 镁合金力学性能和组织结构的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303001.
- [2] 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, 50(5): 051403.
赖志林, 汪 诚, 李应红, 等. 激光冲击强化与喷丸对 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢疲劳性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5): 051403.

- [3] Qiao Hongchao. Effect of laser peening on mechanical properties of 6082 aluminum alloy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(6): 061404.
乔红超. 激光冲击强化对 6082 铝合金机械性能的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(6): 061404.
- [4] Feng Yayun, Ye Yunxia, Lian Zuchang, *et al.* Experimental research on effect of surface quality of copper treated by laser shock peening[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(10): 101401.
冯亚云, 叶云霞, 连祖焜, 等. 激光冲击强化对铜表面质量影响的实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(10): 101401.
- [5] Zhang Qinglai, Zhao Bo, Zhang Bingxin, *et al.* Effect of multiple-laser shock processing on microstructure and residual stress of $\Theta\Pi866$ martensitic stainless steel[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(11): 1102009.
张青来, 赵博, 张冰昕, 等. 多次激光冲击强化对 $\Theta\Pi866$ 马氏体不锈钢组织及残余应力的影响[J]. *中国激光*, 2016, 43(11): 1102009.
- [6] Qiao Hongchao, Zhao Jibin, Yu Yanfeng. Analysis on laser processing parameters and strengthening effects of laser peening of TC4 titanium alloy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(4): 041405.
乔红超, 赵吉宾, 于彦凤. TC4 钛合金激光冲击强化参数及性能分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(4): 041405.
- [7] Mc Evily A J, Renauld M, Bao H, *et al.* Fatigue fracture-surface roughness and the K-opening level[J]. *International Journal of Fatigue*, 1997, 19(8/9): 629-633.
- [8] Shang Deguang, Wang Dejun. Multiaxial fatigue strength[M]. Beijing: Science Press, 2007.
尚德广, 王德俊. 多轴疲劳强度[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [9] Abrão A M, Aspinwall D K. The surface integrity of turned and ground hardened bearing steel[J]. *Wear*, 1996, 196(1/2): 279-284.
- [10] Ye Y X, Feng Y Y, Lian Z C, *et al.* Plastic deformation mechanism of polycrystalline copper foil shocked with femtosecond laser[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 309: 240-249.
- [11] 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.
- [12] Devaux D, Fabbro R, Tollier L, *et al.* Generation of shock waves by laser-induced plasma in confined geometry[J]. *Journal of Applied Physics*, 1993, 74(4): 2268-2273.
- [13] 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.