

强激光直接辐照铝靶诱导残余应力的分布特性

黄志伟¹, 张兴权¹, 陈彬², 童靳于¹, 方光武¹, 段士伟¹

¹安徽工业大学机械工程学院, 安徽 马鞍山 243032;

²安徽工业大学管理科学与工程学院, 安徽 马鞍山 243032

摘要 为研究强激光直接辐照靶材诱导残余应力的分布特性, 利用 Nd:YAG 型激光器对 7075 铝合金试样在无吸收层和有吸收层的条件下分别进行了激光辐照试验, 并对试验结果进行了对比。结果表明, 激光直接辐照后的试样表面产生了重熔层和激光烧蚀斑点, 试样表面分布的最大残余拉应力 (TRS) 为 116.2 MPa, 试样深度方向分布的残余应力为“拉应力-压应力 (CRS)-拉应力”, 且深度方向最大残余压应力为 153.6 MPa, 显微硬度在深度方向的最大值为 174.5 HV。有吸收层时, 吸收层激光辐照处存在近似光斑大小的圆形烧蚀区域, 去除吸收层后试样表面存在光滑的凹坑; 试样表面分布的最大残余压应力为 264.7 MPa, 试样深度方向分布的残余应力为“压应力-拉应力”, 深度方向的最大残余压应力为 258.3 MPa, 显微硬度在深度方向的最大值为 193.6 HV。

关键词 激光技术; 激光辐照; 吸收层; 残余应力; 表面形貌; 显微硬度

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.021409

Distribution Characteristic of Residual Stress in Aluminum Target Irradiated Directly by High Power Laser

Huang Zhiwei¹, Zhang Xingquan¹, Chen Bin², Tong Jinyu¹, Fang Guangwu¹, Duan Shiwei¹

¹ School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243032, China;

² School of Management Science and Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243032, China

Abstract In order to investigate the distribution characteristic of residual stress in targets directly irradiated by high power laser, the experiments of laser irradiation on 7075 aluminum alloy samples under the condition with or without absorbing layers are respectively conducted by means of Nd:YAG laser, and the experimental results are compared. The results show that there are remelting layers and ablation spots on the sample surface after direct laser irradiation. The maximum tensile residual stress (TRS) distributed on the surface of samples reaches 116.2 MPa, the residual stress distribution in the depth direction of the sample is TRS-compressive residual stress (CRS)-TRS, the maximum CRS in the depth direction is 153.6 MPa, and the maximum micro-hardness in the depth direction is 174.5 HV. When the absorbing layer is included, there is a circular ablation zone on the surface of the absorbing layer, and the smooth dent appears on the sample surface after the removal of the remaining absorbing layer. The maximum CRS distributed on the surface of samples is 264.7 MPa, the residual stress distribution in the depth direction of the sample is CRS-TRS, the maximum CRS in the depth direction is 258.3 MPa, and the maximum micro-hardness in the depth direction is 193.6 HV.

Key words laser technique; laser irradiation; absorbing layer; residual stress; surface morphology; micro-hardness

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

收稿日期: 2017-09-01; 收到修改稿日期: 2017-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(51675002, 51175002)、安徽省自然科学基金(1708085ME110)、安徽工业大学研究生创新基金(2015043)

作者简介: 黄志伟(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光冲击强化方面的研究。E-mail: zhiwei10270820@163.com

导师简介: 张兴权(1970—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光表面强化和激光加工方面的研究。

E-mail: zhang20020313@163.com(通信联系人)

1 引言

激光冲击强化技术是利用强激光诱导的应力波与材料相互作用,在材料表层形成有益的残余压应力,从而提高材料抗疲劳和耐应力腐蚀等性能。激光冲击强化技术可控性好,能够精确控制诱导残余应力的幅值和作用深度,强化后零件的表面具有良好的完整性^[1-4];该技术也可对传统机械喷丸强化技术难以实现的区域进行强化处理。因此,激光冲击强化技术是最具有竞争力的表面强化技术之一。

激光冲击强化过程中,脉冲激光的高功率密度几乎能够烧蚀任何材料并产生高压等离子体。为了保护强化处理的靶材表面不被烧蚀,通常采用约束模型的方式进行激光冲击处理^[5-7],即在靶材表面覆盖吸收层,在吸收层上方再覆盖约束层,强激光通过约束层后烧蚀吸收层材料,产生的高压冲击波可对材料进行冷塑性强化。约束模型下激光辐照诱导残余应力场的分布规律表明,强化处理后材料表层的残余压应力对延长零件的疲劳寿命具有决定性的意义^[8-9]。然而,在涂覆吸收层的过程中,金属材料表面较大的粗糙度会导致吸收层与金属材料表面难以贴合^[10]。有些吸收层的涂覆厚度难以保持均匀,在强化处理后,存在吸收层清洗困难等不足。对于激光连续多次冲击靶材,需要采用停机、多次涂覆吸收层的方法,但这会大大降低加工效率。因此,一些学者对在无吸收层条件下采用激光直接辐照金属材料进行的表面强化处理展开了研究。焦阳等^[10]在无吸收层条件下对 K24 合金进行激光辐照处理并改善了试样的疲劳性能。Gill 等^[11]对表面无吸收层的 IN718 合金开展了激光冲击强化的研究,发现激光辐照后试样表面被烧蚀并存在较大拉应力。Sano 等^[12]研究表明,无吸收层条件下激光冲击的 A6061-T6 铝合金试样的表面粗糙度增大,但其疲劳性能仍得到提高。文献^[13]中指出表面较大的粗糙度和较大的拉应力都会缩短零部件的疲劳寿命。然而,上述研究均表明,零件在激光直接辐照后表面粗糙度增加,且存在残余拉应力,但疲劳寿命仍有所增加,这与经典理论不相符合。目前,关于激光直接辐照金属靶材诱导残余应力分布特性的研究鲜有报道,对于激光直接辐照靶材后仍可改善其疲劳性能的原因没有给出详细的解释,因此,有必要开展关于激光直接辐照金属靶材诱导残余应力的分布特性研究。

本文以 7075 铝合金为研究对象,在激光直接辐照试样表面后,观察试样的表面形貌,测量试样的残

余应力和显微硬度,并与有吸收层条件下的激光辐照试验的相关结果进行对比,研究了激光直接辐照金属材料诱导残余应力的分布特性,研究结果为分析激光直接辐照靶材提高疲劳性能的机制提供了参考。

2 激光辐照作用机理

约束条件下激光冲击强化的原理如图 1 所示。在金属靶材待强化表面覆盖一层薄的黑漆或专用黑胶带作为吸收层,在吸收层表面覆盖一层流水或透明玻璃作为约束层。当高功率、短脉冲激光穿过约束层辐照在吸收层材料表面时,吸收层吸收能量后瞬间发生熔化、汽化、电离产生等离子体,等离子体充分吸收激光能量后产生高压等离子体,高压等离子体急剧膨胀产生 GPa 量级的冲击波,冲击波对材料施压并在材料内部诱导应力波。当应力波的峰值压力超过金属材料的动态屈服极限时,金属靶材表面将发生不可逆的塑性变形,产生残余压应力,材料表层的晶粒得到细化,因此材料的抗疲劳、抗磨损和耐腐蚀等性能^[14-15]得到改善。显然,当有吸收层时,吸收层材料首先被烧蚀;当无吸收层时,激光直接辐照靶材表面,靶材表面的金属材料被烧蚀。

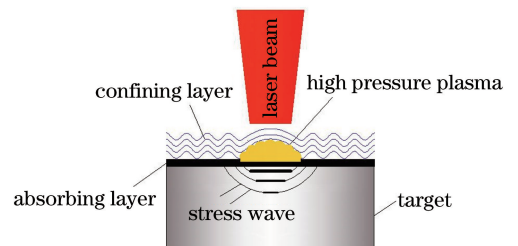


图 1 约束条件下激光冲击强化原理图

Fig. 1 Schematic of laser shock processing under constraint condition

3 试验

采用线切割的方法切取 20 mm × 20 mm × 5 mm 的 7075 铝合金试样,用砂纸将表面抛光后用无水乙醇去除表面污渍,再用蒸馏水洗净后吹干。将试样分为两组,其中一组试样不使用吸收层,另一组试样表面均匀涂覆上一层厚度约为 100 μm 的黑漆作为吸收层。激光辐照时,两组试样表面均采用厚度约为 2 mm 的流水作为约束层。激光脉冲的波长为 1064 nm,脉冲宽度为 23 ns,光斑直径为 3 mm,单个脉冲输出的能量为 8 J。

采用日本电子株式会社生产的 JSM-7001F 型扫描电子显微镜和日本基恩士 KEYENCE 公司生

产的 VHX-900 型超景深显微镜观察黑漆和金属靶材的表面形貌,采用河北爱思特应力技术有限公司生产的 X350 型 X 射线应力仪测量试样中诱导的残余应力。测试方法采用侧倾固定 ψ 法,定峰方法为交相关法;X 射线由 Cr $K\alpha$ 发出,准直管直径为 1.5 mm;X 射线管电压为 20 kV,电流为 5 mA;Cr $K\alpha$ 特征辐射,衍射晶面为 (211),衍射角扫描步距为 0.10° ,计数时间为 0.5 s,扫描的起始角为 130° ,终止角为 142° 。为了测定试样次表层的残余应力,需采用 NH_4Cl (体积分数为 95%) + $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ (体积分数为 5%) 的电解抛光液以 $0.5\sim 1\ \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的腐蚀速率对试样进行逐层电解抛光,再进行残余应力的测量。用日本 FUTURE-TECH 公司生产的 FM-300 型数字显微硬度仪测量试样激光辐照区域自表面沿深度方向的显微硬度,设定载荷为 0.2 N,保荷时间为 10 s。每个位置的残余应力和显微硬度都测量三次,取平均值作为结果。

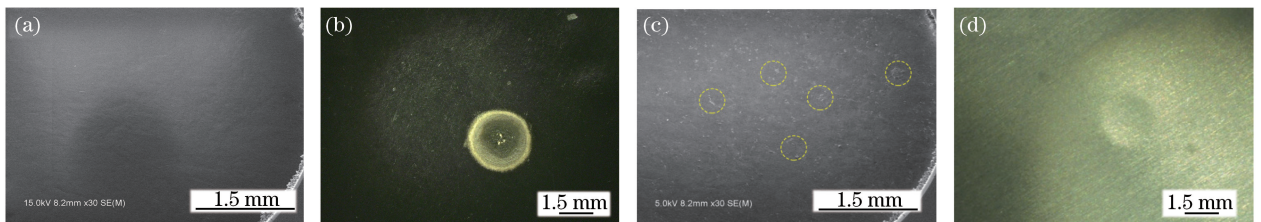


图 2 有吸收层条件下黑漆和靶材的表面形貌。(a)辐照前黑漆;(b)辐照后黑漆;(c)辐照区域周围黑漆;(d)去除黑漆后靶材

Fig. 2 Surface morphologies of black paint and target with absorbing layer. (a) Black paint before laser irradiation; (b) black paint after laser irradiation; (c) black paint around irradiated region; (d) target after removal of black paint

激光直接辐照后试样的表面形貌如图 3 所示。从图 3(a)可以看出,被辐照区域出现明显被激光烧蚀的痕迹,激光和材料相互作用的区域形状不规则。这是因为在激光辐照下,光滑的金属表面会反射一部分激光,材料对激光的吸收率大大减小;同时,光斑内能量分布不均匀,导致光斑区域内的功率密度不均匀。铝合金材料在激光功率密度很小的区域不能发生熔化、汽化、电离等,因此有些区域没有被烧蚀;激光功率密度较大的

区域则会被烧蚀并产生冲击波。由图 3(c)可以看出,铝合金材料在激光辐照下熔化、汽化产生高压等离子体,未被汽化的熔融物在高压等离子体的作用下发生动态的流动,遇冷凝固后呈现河流状,在表面形成重熔层。高温下熔融的铝合金材料还可能与空气中的氧气发生化学反应,使重熔层的表面覆盖很薄的氧化物^[16-17]。图 3(d)为冲击波作用下飞溅熔融物发生凝固后的放大图,凝固的颗粒状熔融物增大了零件表面的粗糙度。

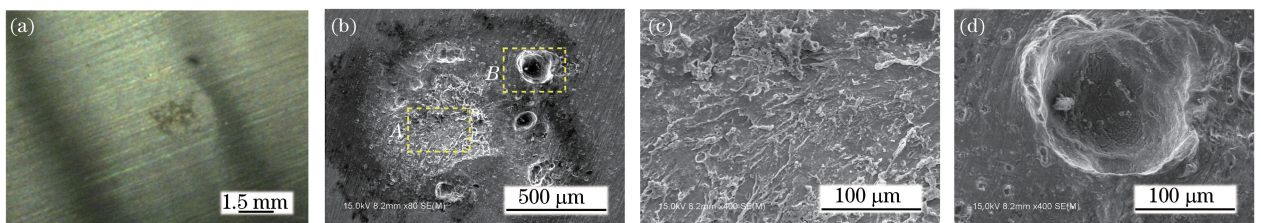


图 3 激光直接辐照后的试样表面形貌。(a)辐照区域;(b)烧蚀区域;(c)图 3(b)中 A 区域的放大图;(d)图 3(b)中 B 区域的放大图

Fig. 3 Surface morphologies of samples after direct laser irradiation. (a) Irradiation region; (b) ablation region; (c) enlarged picture of A region in Fig. 3 (b); (d) enlarged picture of B region in Fig. 3 (b)

4 结果与分析

4.1 表面形貌

激光辐照后吸收层黑漆和靶材表面形貌如图 2 所示。由图 2(a)可知,激光辐照处理前涂覆在试样表面的黑漆光滑明亮;由图 2(b)可知,激光辐照后,被辐照区域的黑漆颜色变成褐色,表面留下了近似于圆形光斑大小的激光烧蚀痕迹。由图 2(c)可看出,在烧蚀区域外存在固态熔化物颗粒,这是由于高压等离子体在向外横向膨胀时所带出的固态熔化物颗粒。由图 2(d)可以看出,试样表面没有被烧蚀的痕迹,表面质量较好。在激光冲击波的作用下,试样表面形成近似光斑大小的圆形凹坑,这是由于在激光辐照过程中,产生的冲击波压力大于材料动态屈服极限,从而在辐照区域发生明显的塑性变形。同时,激光烧蚀黑漆保护了试样表面不被激光热损伤,说明激光冲击产生的凹坑是机械力作用的结果。

4.2 残余应力分析

试样经激光辐照后诱导残余应力的分布如图4所示。从图4(a)可以看出,有吸收层时,试样表面分布着残余压应力,表面残余压应力的最大值在距离光斑中心0.62 mm的位置,其最大值为264.7 MPa,说明激光辐照后试样表面光斑中心存在残余压应力缺失。这主要是由于在激光诱导冲击波作用下,材料表层发生弹性变形和塑性变形。卸载后,被辐照区域表层发生图2所示的塑性变形,阻碍了周围弹性变形层的恢复,从而在试样表层产生了残余压应力。激光诱导冲击波使材料表面被辐照区域受到挤压,在加载光斑边缘产生稀疏波,稀疏波

向激光光斑中心传播时将产生反向加载,稀疏波在光斑中心会聚并对材料施加更大的反向加载,并发生反向塑性变形,从而使光斑中心的残余压应力缺失,即出现“残余应力洞”现象^[18-19]。从图4(a)还可以看出,激光直接辐照后试样表面分布着最大值为116.2 MPa的残余拉应力。激光使材料被辐照区域发生高温熔化和汽化,在熔融状态下,表面材料没有应力。在熔融层冷却过程中,表面材料体积不断收缩,但次表层材料会阻碍其收缩,这时表面材料就产生了拉应力。最后完全冷却时,表面熔融层的体积继续减小,拉应力进一步增大,直至与次表层的相互作用应力达到平衡。

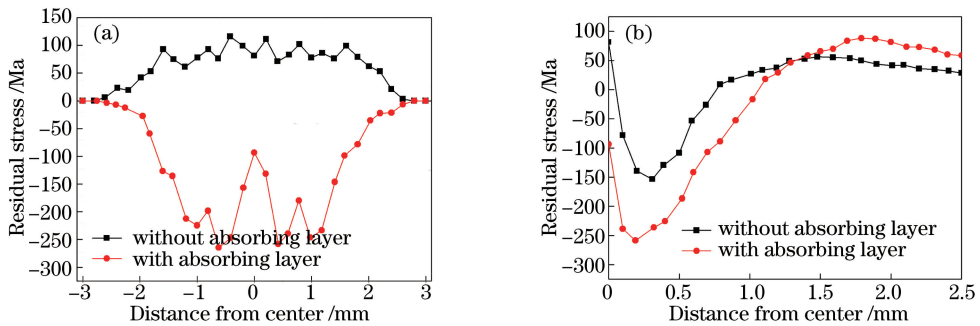


图4 试样残余应力分布。(a)表面方向;(b)深度方向

Fig. 4 Residual stress distributions of samples. (a) Surface direction; (b) depth direction

由图4(b)可以看出,激光辐照有吸收层的试样后,试样表面光斑中心处的残余压应力为93.5 MPa;随着深度增大到0.19 mm时,残余压应力增大到最大值258.3 MPa;当深度继续增大到1.08 mm时,残余压应力减小到零并逐渐转变成残余拉应力,试样表层由外及里分布的残余应力为“残余压应力-残余拉应力”。激光直接辐照靶材后,试样表面光斑中心处的残余拉应力为81.3 MPa;随着深度的增加,残余拉应力迅速减小到零并转变为残余压应力;当深度达到0.31 mm时,残余压应力达到最大值153.6 MPa,之后随着深度增加而逐渐减小;当深度达到0.72 mm时,残余压应力减小到零并再次转变为幅值较小的残余拉应力,试样表层由外及里分布的残余应力为“残余拉应力-残余压应力-残余拉应力”。比较两种条件下得到的残余应力分布曲线可以发现,有吸收层试样在激光辐照后获得残余压应力的幅值和深度比无吸收层时的大,在深度方向上残余压应力的最大值大104.7 MPa,残余压应力的深度大0.36 mm。

激光诱导冲击波产生后,对材料表面施加GPa量级的动态压力,在材料内部产生应力波。当应力

波开始作用于材料表面时,其压力远大于材料的动态屈服极限,使材料表面产生屈服并发生塑性变形,产生残余压应力。随着应力波向靶材内部传播距离的增大,应力波的峰值压力快速减小^[20],经过很短的距离后就小于材料的动态屈服极限,无法使材料产生屈服而发生塑性变形,因此,激光冲击波在材料内部诱导残余压应力层的深度是有限的。激光辐照后在材料表层产生了残余压应力,为了保持靶材自身的应力平衡,在次表层必然会产生相应的残余拉应力。激光辐照有吸收层试样的作用效果要优于激光直接辐照试样的作用效果,这是由于吸收层有效吸收了激光能量,产生了具有较大峰值压力的冲击波。

4.3 显微硬度

试样被辐照区域中心位置自表面沿深度方向的显微硬度如图5所示。可以看出,被激光直接辐照后试样表面的显微硬度为121.4 HV,当深度增大至0.18 mm时,显微硬度达到最大值174.5 HV;当深度为0.63 mm时,深度方向的显微硬度减小至与基体材料的显微硬度相近。当试样表面有吸收层时,试样表面位置的显微硬度为187.3 HV,当深度增大

至 0.11 mm 时,显微硬度达到最大值 193.6 HV;深度增大至 0.89 mm 时的显微硬度接近于基体材料的显微硬度。

在有吸收层条件下, GPa 量级激光冲击波的产生会对材料产生机械力的作用,材料将发生冷作硬化,材料的硬度得到提高。由于应力波的强度随传播距离的增大而快速减小,材料冷作硬化程度也迅速降低,因此,应力波对材料硬度的有效提升仅限于材料表层较浅的范围内^[21]。试样被激光直接辐照后,大量的热被注入到材料表层,材料表面发生重熔并形成热影响层。当铝合金材料被加热回复时,其硬度有所减小。因此,激光直接辐照后表面材料的显微硬度小于基体材料的显微硬度,显微硬度的最大值出现在次表层。

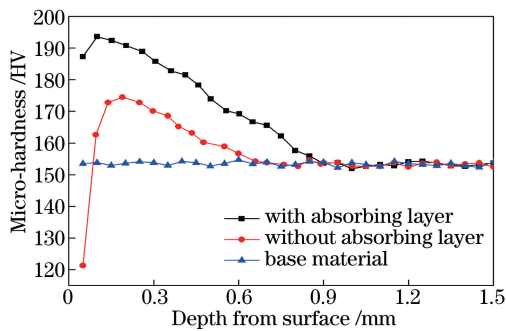


图 5 试样深度方向的显微硬度

Fig. 5 Micro-hardness of samples in depth direction

4.4 讨论

在激光辐照靶材的过程中,不同材料对激光的吸收率存在差异。金属材料表面粗糙度较小,对激光的反射率较大,因此,相当一部分直接辐照在靶材表面的激光被反射回去。然而,黑漆等材料对激光的吸收率较大,能够有效吸收用来熔化、汽化吸收层并产生高压等离子体的激光能量。材料吸收的激光能量越多,电离产生的高压等离子体就越多,产生高压等离子体的温度就更高,高压等离子体的压力也越大。因此,激光辐照黑漆产生的冲击波压力比激光直接辐照铝合金的大。同时,黑漆的汽化热比铝合金的小,黑漆更容易发生汽化。当吸收相同能量时,黑漆被汽化的物质的量更多,产生的高压等离子体的压力越大,冲击波压力的差异进一步加大^[22],有无黑漆时激光辐照诱导冲击波压力的时程曲线如图 6 所示。综上所述,两种条件下产生的冲击波在材料表面作用的效果不同。在有吸收层条件下,靶材表面的塑性变形明显,产生塑性坑的深度较大,形成残余压应力的幅值较大,硬度值较大,残余压应力层的深度较大。

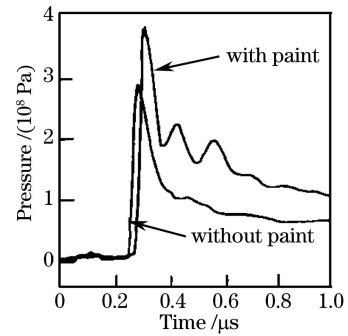


图 6 黑漆对激光冲击波的影响^[22]

Fig. 6 Effect of black paint on laser shock wave^[22]

在约束模型的激光辐照过程中,为了保护金属材料表面不被激光烧蚀,吸收层的厚度要大于烧蚀层的厚度。因此,激光辐照产生的冲击波在向材料传播的过程中,首先要经过剩余的吸收层才能到达靶材表面。在此过程中,剩余吸收层的存在会消耗部分冲击波能量。此外,吸收层的声阻抗和靶材的声阻抗不等,这会导致部分冲击波能量进入靶材内部,而另一部分则因反射回吸收层被消耗。因此,剩余吸收层的存在会减小实际作用于靶材表面的冲击波强度,尤其是当吸收层厚度较大时,实际作用于靶材表面的冲击波压力将大大减小,进而影响到冲击效果^[23]。当无吸收层时,激光直接辐照靶材表面诱导的冲击波压力直接传输到靶材内部,不存在额外的压力损失。

激光直接辐照靶材表面后,被烧蚀区域存在重熔层和热影响层,表面的粗糙度增大并产生有害的残余拉应力和许多细微的裂纹,降低了工件的表面质量,损害了工件的抗疲劳性能。然而,在靶材的次表面却分布着有益的残余压应力,残余压应力的存在减小了工件在使用过程中由外力引起的拉应力的幅度,改善了零件的疲劳寿命。因此,激光直接辐照处理后,工件的疲劳寿命是由表面拉应力和次表面残余压应力共同作用决定的。相比较零件表面的拉应力,次表面残余压应力的幅值和分布深度更大,次表面的残余压应力对工件疲劳寿命的增益占主导方面,零件被激光直接辐照处理后的疲劳寿命将有所增加,文献[11-12]描述的激光直接辐照后残余应力与疲劳寿命增益间的关系也得到了很好的解释。显然,激光直接辐照处理后工件的疲劳增益小于有吸收层条件下的激光辐照处理。激光直接辐照后工件表面产生的有害重熔层和热影响层深度很小,可用砂纸打磨去除,从而使直接辐照处理后工件的疲劳性能更好。

5 结 论

通过试验研究了激光直接辐照靶材表面诱导残余应力分布特性,并与有吸收层条件下激光辐照的试验结果进行了对比,同时比较了表面形貌和显微硬度的变化,得到以下结论。

1) 激光直接辐照铝合金试样后,被辐照区域表面产生重熔层和热影响层,表面的粗糙度增大;当试样表面有吸收层时,试样表面的被辐照区域产生近似光斑大小的圆形凹坑,其表面较为光滑。

2) 有吸收层和无吸收层试样被激光辐照后,有吸收层试样在深度方向上产生的残余压应力最大值更大,且分布深度更大。

3) 激光直接辐照后,材料表面的显微硬度有所减小,次表层的显微硬度增大;有吸收层时,激光辐照处理后,材料表层的显微硬度增大。随着深度的增加,两者最终都接近于基体材料的显微硬度。

参 考 文 献

- [1] Singh G, Grandhi R V, Stargel D S. Modeling and parameters design of a laser shock peening process [J]. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 2011, 12(5): 233-253.
- [2] Zhang X Q, Li H, Huang Z L, *et al.* Numerical simulation of residual stress induced in 7075 aluminum alloy by repeated high-power laser pulses [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(12): 1203002.
张兴权, 李欢, 黄志来, 等. 7075 铝合金激光多点冲击诱导残余应力的数值模拟 [J]. *中国激光*, 2015, 42(12): 1203002.
- [3] Li X C, Zhang Y K, Lu Y L, *et al.* Research of corrosion resistance for AZ31 magnesium alloy by laser shock processing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(4): 0403002.
李兴成, 张永康, 卢雅琳, 等. 激光冲击 AZ31 镁合金抗腐蚀性能研究 [J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0403002.
- [4] Luo K Y, Lin T, Dai F Z, *et al.* Effects of overlapping rate on the uniformities of surface profile of LY2 Al alloy during massive laser shock peening impacts [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2015, 266: 49-56.
- [5] Cellard C, Reira D, Francois M, *et al.* Laser shock peening of Ti-17 titanium alloy: Influence of

process parameters [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2012, 532: 362-372.

- [6] Zhang X Q, Zhang Y, Duan S W, *et al.* Numerical simulation of dynamic response of round rod subjected to laser shocking [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 0903009.
张兴权, 章艳, 段士伟, 等. 圆杆在激光冲击作用下动态响应的数值模拟 [J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0903009.
- [7] Zhang Q L, Wu T D, Qian Y, *et al.* Study on high cycle fatigue properties and laser shock processing of AZ91D-T6 cast magnesium alloy [J]. *Chinese Journal of 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.
- [8] Chai Y, Ren J, He W F, *et al.* Effect of laser shock processing on the fatigue property of K4030 alloy blade [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1): 011405.
柴艳, 任军, 何卫锋, 等. 激光冲击强化对 K4030 合金叶片疲劳性能的影响 [J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(1): 011405.
- [9] Zhang X Q, Li H, Yu X L, *et al.* Investigation on effect of laser shock processing on fatigue crack initiation and its growth in aluminum alloy plate [J]. *Materials & Design*, 2015, 65: 425-431.
- [10] Jiao Y, He W F, Luo S H, *et al.* Study of micro-scale laser shock processing without coating improving the high cycle fatigue performance of K24 simulated blade [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(10): 1003002.
焦阳, 何卫锋, 罗思海, 等. 无保护层激光冲击提高 K24 合金高周疲劳性能研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(10): 1003002.
- [11] Gill A S, Telang A, Vasudeyan V K. Characteristics of surface layers formed on inconel 718 by laser shock peening with and without a protective coating [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 225: 463-472.
- [12] Sano Y, Masaki K, Gushi T, *et al.* Improvement in fatigue performance of friction stir welded A6061-T6 aluminum alloy by laser peening without coating [J]. *Materials & Design*, 2012, 36: 809-814.
- [13] Wang M. Principle & technology of anti-fatigue manufacture [M]. Jiangsu: Phoenix Science Press, 1999: 186-196.
王珉. 抗疲劳制造原理与技术 [M]. 江苏: 江苏凤凰

- 科学技术出版社, 1999: 186-196.
- [14] Cao Y P, Feng A X, Xue W, *et al.* Experimental research and theoretical study of laser shock wave induced dynamic strain on 2024 aluminum alloy surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(9): 0903004.
曹宇鹏, 冯爱新, 薛伟, 等. 激光冲击诱导 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.
- [15] Zhang X Q, Chen L S, Li S Z, *et al.* Investigation of the fatigue life of pre- and post-drilling hole in dog-bone specimen subjected to laser shot peening [J]. Materials & Design, 2015, 88: 106-114.
- [16] Sathyajith S, Kalainathan S, Swaroop S. Laser peening without coating on aluminum alloy Al-6061-T6 using low energy Nd:YAG laser[J]. Optics and Laser Technology, 2013, 45: 389-394.
- [17] Zhu Y H, Fu J, Zheng C, *et al.* Effect of laser shock peening without absorbent coating on the mechanical properties of Zr-based bulk metallic glass[J]. Optics and Laser Technology, 2015, 75: 157-163.
- [18] Jiang Y F, Lai Y L, Zhang L, *et al.* Investigation of residual stress hole on a metal surface by laser shock[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8): 2073-2079.
姜银方, 来彦玲, 张磊, 等. 激光冲击材料表面“残余应力洞”形成规律与分析[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2073-2079.
- [19] Xue Y Q, Zhou X, Li Y H, *et al.* Validation and restraint of "residual stress hole" produced by laser shock processing [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(12): 121405.
薛彦庆, 周鑫, 李应红, 等. 激光冲击强化“残余应力洞”测试验证及抑制方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(12): 121405.
- [20] Ocaña J L, Morales M, Molpeceres C, *et al.* Numerical simulation of surface deformation and residual stresses fields in laser shock processing experiments [J]. Applied Surface Science, 2004, 238(1/2/3/4): 242-248.
- [21] Qiao H C, Zhao Y X, Zhao J B, *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.
- [22] Zhu W H, Li Z Y, Zhou G Q, *et al.* Effects of black paint on laser induced shock waves on surface of confined targets[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1997, 9(3): 458-462.
朱文辉, 李志勇, 周光泉, 等. 约束靶面黑漆涂层对激光冲击波的影响[J]. 强激光与粒子束, 1997, 9(3): 458-462.
- [23] Ye Y X, Zhao S Y, Xiong S, *et al.* Experimental study on the effect of the remaining absorbing layer on laser shock processing [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(12): 3541-3547.
叶云霞, 赵抒怡, 熊松, 等. 剩余吸收层对激光冲击效果影响的实验研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(12): 3541-3547.