

激光冲击强化 MB8 镁合金的工艺分析 及摩擦磨损性能研究

延黎¹, 吴昊年¹, 田乐², 徐培文¹, 邓涛¹, 聂祥樊²

(1.重庆交通大学, 重庆 400074; 2.空军工程大学, 西安 710038)

摘要: 目的 通过激光冲击强化技术的加工硬化效应改变 MB8 镁合金表面硬度及粗糙度, 显著提高其抗磨损性能。方法 在不同功率密度、搭接率、冲击次数下对 MB8 镁合金激光冲击强化处理, 通过非球面测量仪和显微硬度计分析材料表面粗糙度和显微硬度的影响规律, 结合不同载荷下滑动摩擦磨损试验后的电镜图像, 揭示激光冲击强化改变镁合金材料粗糙度、硬度从而影响耐磨性能的机理。结果 经激光冲击处理后镁合金硬度明显提高, 表面硬度最大增幅达 30.2%, 同时形成了梯度硬化层。随着材料硬度的提升, 其质量磨损率明显下降, 耐磨损程度得到了显著改善, 强化后镁合金的平均质量磨损率降幅可达 28.73%。结论 试验冲击区域的粗糙度与激光功率密度呈正相关, 与搭接率呈负相关, 粗糙度随着冲击次数呈现先下降后升高的变化趋势。材料的硬化程度随着激光功率密度、搭接率和冲击次数的提高而增大, 冲击次数的影响最为明显, 激光功率密度次之, 搭接率的影响最弱。低载条件下材料以磨粒磨损为主, 而在高载荷条件下材料磨损过程伴随着疲劳磨损, 强化效果有限。

关键词: 镁合金; 激光冲击强化; 粗糙度; 硬度; 质量磨损率; 耐磨机理

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)11-0045-13

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.11.005

Process Analysis and Friction Wear Performance Study of Laser Impact Strengthened MB8 Magnesium Alloy

YAN Li¹, WU Hao-nian¹, TIAN Le², XYU Pei-wen¹, DENG Tao¹, NIE Xiang-fan²

(1. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

ABSTRACT: Magnesium alloy due to its high specific strength, specific stiffness and good electrical conductivity, thermal conductivity and electromagnetic shielding properties and in the aerospace, weapons industry, nuclear industry and other military high-end fields have been widely used, known as the "21st century green engineering materials". However, its low strength and hardness make it susceptible to wear and fatigue failure under complex service conditions, which seriously affects the safety and reliability of the structure. Laser impact peening is a surface modification technique that uses the force effect of

收稿日期: 2022-07-10; 修订日期: 2022-10-22

Received: 2022-07-10; Revised: 2022-10-22

基金项目: 国防科工局基础科研计划重点项目 (JCKY2019802B001); 国家自然科学基金项目 (52275051)

Fund: National Defense Basic Research Program (JCKY2019802B001); National Natural Science Foundation of China (52275051)

作者简介: 延黎 (1987—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为激光冲击强化、表面工程。

Biography: YAN Li (1987-), Female, Ph. D. student, Research focus: laser shock peening, surface engineering.

通讯作者: 聂祥樊 (1986—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为航空等离子体动力学。

Corresponding author: NIE Xiang-fan (1986-), Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: aerospace plasma dynamics.

引文格式: 延黎, 吴昊年, 田乐, 等. 激光冲击强化 MB8 镁合金的工艺分析及摩擦磨损性能研究[J]. 表面技术, 2022, 51(11): 45-57.

YAN Li, WU Hao-nian, TIAN Le, et al. Process Analysis and Friction Wear Performance Study of Laser Impact Strengthened MB8 Magnesium Alloy[J]. Surface Technology, 2022, 51(11): 45-57.

laser-induced shock waves to cause plastic deformation and residual compressive stress in metallic materials, thereby improving the overall mechanical properties of the material. This paper investigates the effect of laser impact peening on the wear and fatigue resistance of MB8 magnesium alloy. The main research work and conclusions are as follows. 1. The changes in surface morphology and roughness of MB8 magnesium alloy during laser impact with different impact parameters. The roughness of the impact area was found to be positively correlated with the laser power density and negatively correlated with the lap rate, while the roughness showed a trend of decreasing and then increasing when the number of impacts was 1, 2 and 3 times respectively. 2, using different impact parameters of laser impact when the MB8 magnesium alloy hardness change law. After the laser impact treatment of magnesium alloy hardness significantly increased, the maximum increase in surface hardness of 30.2%, while the formation of a gradient hardening layer. As the hardness of the material increases its mass wear rate decreases significantly and the degree of wear resistance is improved significantly, with the average mass wear rate of the strengthened magnesium alloy decreasing by up to 28.73%. The hardening degree of the material increases with the increase of laser power density, lap rate and impact number, the impact number has the most obvious effect, the laser power density is the second, the lap rate has the weakest effect. 3. The effect of laser impact on the tribological properties of magnesium alloys under different loads was investigated. After laser impact, the mass wear rate of the material is significantly reduced, and the wear resistance is significantly improved, and because the material is mainly abrasive wear under low load and low speed conditions, and laser impact can make the material hardness significantly increased, so its wear resistance strengthening effect is more obvious. However, under high load conditions the material wear process is accompanied by fatigue wear and thus the strengthening effect is limited.

KEY WORDS: magnesium alloy; laser shock strengthening; roughness; hardness; mass wear rate; wear resistance mechanism

镁合金作为一种轻合金具有密度小、比强度高、加工性好、承受冲击载荷能力大、减振性好以及电磁屏蔽性好等特点^[1], 常用于航空动力装置中机匣、机架、飞机的框架、壁板、起落架轮毂等^[2-3]。但由于耐磨性、耐腐蚀性差和表面相关性能较差, 飞机、发动机的一些镁合金部件经常因磨损和疲劳等问题导致失效断裂, 比如飞机副油箱经常因孔连接部位磨损疲劳断裂而引起失效故障, 严重影响飞机的飞行安全。激光冲击强化技术^[4] (Laser Shock Peening, LSP) 是一种新型表面处理技术, 该技术采用短脉冲 (几十纳秒)、高峰值功率密度 ($>10^9$ W/cm²) 的激光辐照金属表面, 使金属表面涂覆的吸收层 (黑漆、铝箔等) 吸收激光能量并迅速发生爆炸性气化蒸发, 从而产生高压 (>1 GPa) 的等离子体冲击波并在表面约束层的作用下向靶材内部传播, 利用冲击波的力效应使表层材料微观组织发生变化, 产生形变硬化层并在较深的厚度上引入残留压应力, 从而有效提高材料磨损、疲劳的强度, 可用于镁合金耐磨性能的提升。

研究主要集中在激光冲击对镁合金改变表面残余应力及延缓裂纹。钱阳^[5]研究发现在功率密度为 2.1 GW/cm² 时, 镁合金内部将出现大范围残余拉应力, 从而使其疲劳寿命下降; 而功率密度大于 2.1 GW/cm² 时, 材料内拉应力区域较小, 在表面残余压应力的作用下, 其拉-拉疲劳寿命最高可提升 33.7%。张青来等^[6-7]发现 AZ80-T6 镁合金在功率密度为 1.53 GW/cm² 的激光冲击作用后表面残余了 -125 MPa 的压应力, 疲劳裂纹萌生于材料次表面且以沿晶断裂形式为主; 在功率密度为 1.5 GW/cm² 的激光冲击作用后, AZ91D-T6

镁合金表面残余了 -120 MPa 的压应力, 硬度提高了约 24%, 疲劳断口处存在大量解理台阶和河流花样, 呈现解理断裂特征。进一步, 一些文献研究了不同激光冲击参数对镁合金耐磨机理的影响, 如: Ge 等^[8]采用 3 种不同能量值 (6.5、8.5、10.5 J) 的激光冲击强化 Mg-3Al-1Zn 合金的表面, 细化合金表面晶粒尺寸, 并形成纳米晶粒, 合金表面粗糙度下降, 使磨损率分别降低了 32.1%、45.3% 和 69.8%, 其磨损机制为磨粒磨损和氧化磨损。王朋飞等^[9]在激光功率密度为 7.5 GW/cm²、光斑半径为 2 mm、搭接率为 75%、冲击次数为 2~4 次时, 激光冲击强化可使焊缝区的残余拉应力转变为残余压应力, 从而提升镁合金焊接接头的疲劳裂纹扩展寿命。Mao 等^[10]利用不同功率密度参数冲击镁合金并从试样横剖面来观察用激光冲击强化的 AZ31B 镁合金, 发现会形成一种孪晶梯度。合金表面孪晶的体积分数最高达到 38%, 并随着距离表面深度的增加而下降, 到距离表面 350 μ m 处孪晶的体积分数为 0。随着孪晶体积分数的增加, 合金的维氏硬度逐渐从 61HV 增加到 72HV; 在 20 N 载荷下磨损试验, 摩擦因数和磨损率分别下降了 53% 和 62.5% 左右, 耐磨性能得到提高。上述研究进一步证明, 合理的激光冲击参数可以有效地提升镁合金的耐磨性能。蒋素琴等^[11-13]针对激光冲击强化对镁合金抗疲劳性能的影响展开了一系列研究, 并且基于 ABAQUS 有限元软件和 MSC. Figue 疲劳分析软件, 利用响应面分析法提出了面向材料抗疲劳性能的激光冲击强化参数优化方法, 为实现激光冲击强化参数优化和材料疲劳寿命的定量分析提供了基础。研究结果表明,

通过响应面回归分析可成功实现冲击强化参数优化,同时基于该优化参数下的疲劳试验数据,对比分析利用二次回归模型所得的疲劳寿命预测值与有限元模拟值发现两者仅相差 0.97%,从而证明了二次回归模型对材料激光冲击强化后疲劳寿命预测的准确性。除冲击参数外,罗开玉等^[14]研究了 0~40 mm 长度范围内不同激光冲击区域对 AM50 镁合金拉伸试样力学性能的影响,并从微观组织结构对其作用规律和强化机理进行了探讨。研究结果表明,裂纹萌生位置与激光冲击区域有关,高压冲击波作用下发生的孪生与重结晶将改变裂纹扩展方向,有效延缓裂纹扩展速率,从而提高其抗疲劳性能。从强化效果来看,葛茂忠等^[15]对 AZ31B 镁合金激光冲击强化后的显微组织和裂纹扩展速率展开了相应的研究,结果发现镁合金经冲击处理后形成了平均尺寸为 17.5 nm 的纳米晶组织,并且在表层 0.8 mm 深度内残余压应力,在细晶强化和残余压应力的共同作用下疲劳裂纹扩展速率明显下降。

上述研究表明激光冲击强化对于镁合金耐磨性的提升具有显著作用,优选激光冲击参数并在冲击后对试件进行耐磨试验成为研究主流,但是作为影响耐磨性的 2 个关键参数粗糙度和硬度并未单独讨论其影响的大小,对于分析 LSP 处理材料提高耐磨性的机理及规律认识有待提高。基于此,本文首先分析了 MB8 镁合金激光冲击强化的相关参数(功率密度、搭接率、冲击次数),并针对所选材料测试获得其最优冲击参数;然后采用试验方法针对不同工艺参数对 MB8 镁合金的粗糙度和硬度的影响展开研究,分别揭示了镁合金表面粗糙度、硬度和不同强化参数之间的关系。对冲击件做不同载荷的摩擦磨损试验,揭示粗糙度、硬度与摩擦因数之间的影响关系,探究激光冲击强化对于材料耐磨性的影响规律及作用机理,该研究对后续镁合金激光冲击强化工业应用时的参数优选具有重要意义。

1 试验

1.1 MB8 镁合金材料

MB8 镁合金属于 Mg-Mn 系二元镁合金,也被称

为稀土变形镁合金。它具有良好的焊接性能和力学性能,并且无应力腐蚀倾向^[16]。本文针对不同激光冲击工艺参数对 MB8 镁合金的粗糙度和硬度的影响展开研究。为了保证试验条件的一致性,试验中的激光冲击强化试样采用与标准振动试样厚度相同的 3 mm 厚 MB8 变形镁合金试样,试样大小为 20 mm×20 mm。在进行激光冲击强化前先对试件表面进行打磨抛光,并用丙酮清洗其表面,然后粘贴黑胶带开始激光冲击试验。所选用的 MB8 镁合金基本力学性能如表 1 所示。

表 1 MB8 镁合金力学性能
Tab.1 Mechanical properties of MB8 magnesium alloy

Density/ (g·cm ⁻³)	Poisson ratio	Elasticity modulus/ GPa	Strength of extension/ MPa	Yield strength/ MPa	Coefficient of elonga- tion/%
1.78	0.34	40.2	230	260	18

1.2 激光冲击强化工艺设计

本文采用西安天瑞达光电技术股份有限公司的高功率、高能、高频 YD60-M165 型 Nd:YAG 激光器。激光器具体参数为:激光波长 1 064 nm/532 nm,脉宽(20±2) ns,重复频率 1~5 Hz,脉冲能量 2~12.5 J,光束发散角≤2 mrad,输出稳定度≤5%。将黑胶带作为激光冲击强化过程中的吸收保护层,并涂覆于待冲击区域,试验均采用去离子水作为约束层。

另外由材料 Hugoniot 弹性极限^[17](Hugoniot Elastic Limit, HEL)及文献[18]研究可知,材料的动态屈服极限通常是其静态屈服强度的 2~4 倍。通过查阅《中国航空材料手册》可知,本文所选用的 MB8 镁合金的静态屈服强度为 260 MPa,所以其动态屈服极限为 520~1 040 MPa,本文计算过程中取其值为 840 MPa。根据计算可知,MB8 镁合金的 Hugoniot 弹性极限约为 804 MPa,激光诱导冲击波的峰值压力最佳范围为 1.61~2.01 GPa。故选取如表 2 所示的工艺参数开展激光冲击强化试验。

表 2 激光冲击强化方案设计
Tab.2 Laser impact peening scheme design

Sample number	Energy/J	Spot diameter/mm	Pulse width/ns	Power density/ (GW·cm ⁻²)	Overlap rate	Shock number	Shock path
1	2	3	20	1.415	50%	1	S-type
2	3	3	20	2.122	50%	1	
3	3	3	20	2.122	75%	1	
4	3	3	20	2.122	50%	2	
5	3	3	20	2.122	50%	3	

2 结果与讨论

2.1 不同冲击参数对镁合金表面粗糙度的影响

2.1.1 粗糙度测试方法

采用中国泰勒 PGI3D 型非球面测量仪对激光冲击强化后试样表面轮廓及其粗糙度进行测试,将径向误差和锥角误差分别控制在 $0.02\ \mu\text{m}$ 和 $0.000\ 3\ \mu\text{m}/\text{mm}$ 以内。镁合金试样表面粗糙度进行测试时,选定测量长度为 $15\ \text{mm}$,取样长度为 $4\ \text{mm}$,探针扫描速度为 $0.5\ \text{mm}/\text{s}$,并且每个试样取 3 处进行测量,再取其平均值以减小试验误差。

2.1.2 功率密度对粗糙度的影响

选择编号 1 和编号 2 试样为研究对象,其能量分别为 $1.415\ \text{GW}/\text{cm}^2$ & $2\ \text{J}$, $2.122\ \text{GW}/\text{cm}^2$ & $3\ \text{J}$ 。利用非球面测量仪测得不同功率密度激光冲击处理后的镁合金表面轮廓曲线如图 1 所示。通过对比发现,经功率密度为 $1.415\ \text{GW}/\text{cm}^2$ 激光冲击后,镁合金表面波动较小,波峰(挤出区)与波谷(凹陷区)之间的最大高度差约为 $24\ \mu\text{m}$,且单个光斑冲击产生的凹坑直径约为 $2.8\ \text{mm}$,与激光直径 $3\ \text{mm}$ 较为接近,说明在该能量下材料塑性变形程度一般,搭接对材料塑性变形的影响较小。然而功率密度为 $2.122\ \text{GW}/\text{cm}^2$ 激光冲击时,镁合金表面波峰与波谷之间的最大高度差达 $28\ \mu\text{m}$,同时波峰距波峰的间距缩短为约 $1.6\ \text{mm}$,说明此时材料的塑性变形程度明显较功率密度为 $1.415\ \text{GW}/\text{cm}^2$ 激光冲击时更为剧烈,同时在 50% 搭接率时,搭接区域的凹坑深度更深,导致材料塑性流动过程过于剧烈,最终造成材料表面均匀性下降。

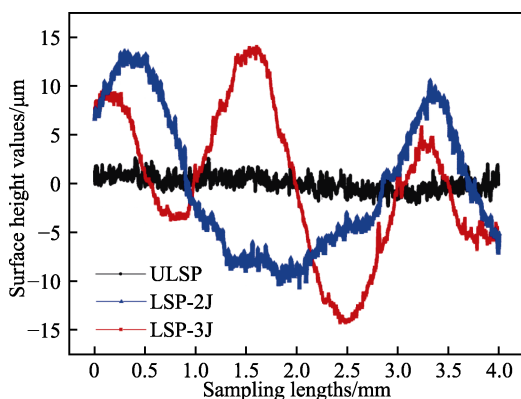


图 1 不同功率密度激光冲击后表面轮廓对比
Fig.1 Comparison of surface profiles after laser impact at different power densities

通过计算可知,经功率密度分别为 $1.415\ \text{GW}/\text{cm}^2$ 和 $2.122\ \text{GW}/\text{cm}^2$ 的脉冲激光冲击处理后,镁合金表面粗糙度均大幅提升,其粗糙度如图 2 所示。经功率密度为 $1.415\ \text{GW}/\text{cm}^2$ 的激光冲击后,其粗糙度达到

了 $0.809\ 1\ \mu\text{m}$,较未强化试样的 $0.437\ 1\ \mu\text{m}$ 上升了约 85.1%;而采用功率密度为 $2.122\ \text{GW}/\text{cm}^2$ 的激光冲击后,镁合金表面粗糙度高达 $1.004\ 3\ \mu\text{m}$,较未强化试样升高了约 129.8%。该结果表明:材料表面粗糙度随着激光冲击强化中功率密度的提高而增大。此结论也与江苏大学钱阳^[5]所得结论一致。此外,通过对比 2 组激光冲击试样的表面粗糙度,发现增幅仅为 24.1%,说明镁合金材料采用 $2\ \text{J}$ 能量处理后变形程度已经较大,功率密度的升高虽能进一步诱发塑性变形,但其影响有限。因此,针对该试样最优功率密度参数为 $2.122\ \text{GW}/\text{cm}^2$ 。

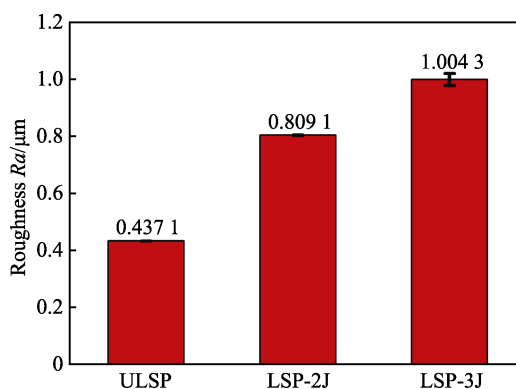


图 2 不同功率密度激光冲击后镁合金表面粗糙度
Fig.2 Surface roughness of magnesium alloy after laser impact at different power densities

2.1.3 搭接率对粗糙度的影响

选择编号 2 和编号 3 试样为研究对象,对比分析不同搭接率对表面粗糙度的影响,其搭接率分别为 50% 和 75%。利用非球面测量仪对表面轮廓进行测量,结果如图 3 所示。激光冲击强化处理后,材料表面塑性变形程度差异较大,但基本呈现“正弦”波动趋势,同时在相同取样长度内的波峰、波谷数量也存在明显差别。

采用 50% 搭接率强化处理后材料表面变形不一,波峰之间的高度也存在区别,取样长度内的波峰与波谷之间的最大高度差约为 $30\ \mu\text{m}$,并在搭接区形成一定深度的凹陷。采用 75% 搭接率进行冲击强化处理后宏观变形严重、塑性变形更加剧烈,但均匀度有所改善,材料“挤出区”和“凹陷区”的宏观变形深度均为 $28\ \mu\text{m}$ 左右。此外,采用 50% 和 75% 搭接率进行激光冲击强化处理后,所形成的凹坑直径分别为 $1\ \text{mm}$ 和 $2\ \text{mm}$ 左右,所以在相同长度区域内经 75% 搭接率处理后的镁合金表面波峰、波谷较少,材料表面平整度得到了一定程度的改善。究其原因,主要是 50% 搭接率处理时,光斑个别位置由于搭接幅度较小造成所承载的激光能量较小,从而变形程度一般,最终从宏观上造成变形不均匀、轮廓曲线杂乱的现象。而采用 75% 搭接率时,冲击区域内的材料经过多次冲击,使得材料宏观变形较 50% 搭接率时更为严重,同

时材料表面经 2 次、3 次甚至 4 次重复冲击的区域面积明显增大, 材料表面较小间距内的微凸起等缺陷, 在多次重复冲击波的作用下被多次“削平”, 表面平整度得到显著改善。

通过计算, 不同搭接率条件下强化处理后镁合金表面粗糙度如图 4 所示, 搭接率为 75% 时粗糙度仅为 $0.915\ 5\ \mu\text{m}$, 较采用 50% 搭接率进行激光冲击处理后的粗糙度 ($1.004\ 3\ \mu\text{m}$) 有了一定程度的下降, 降幅为 7.85%。主要原因是高搭接率下材料多次冲击区域面积明显增大, 材料表面凹凸不平区域在激光冲击波的作用下被多次“削平”, 从而使材料表面均匀性得到改善, 而粗糙度的实质是一定区域内微小波峰谷的不平整度, 所以高搭接率处理后的表面粗糙度将小于低搭接率处理后的粗糙度。为保证粗糙度均匀且稳定, 后续试验搭接率选择 50%。

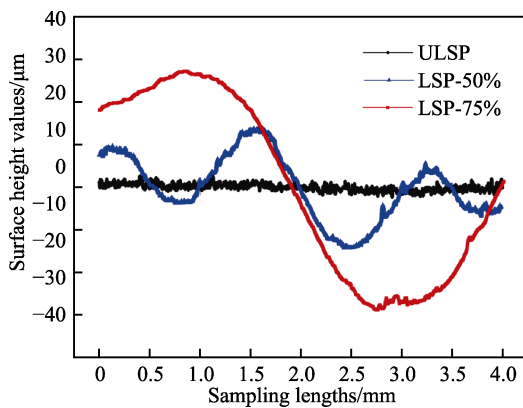


图 3 不同搭接率激光冲击后表面轮廓对比
Fig.3 Comparison of surface profiles after laser impact at different lap rates

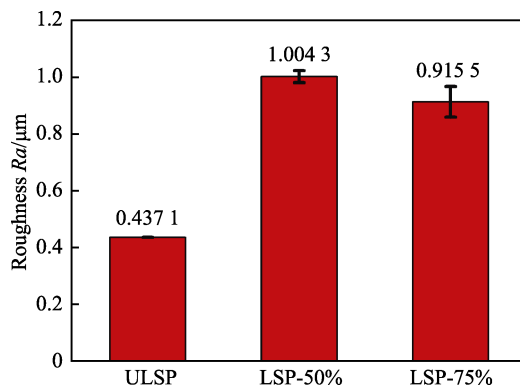


图 4 不同搭接率激光冲击后镁合金表面粗糙度
Fig.4 Surface roughness of magnesium alloy after laser impact with different lap rates

2.1.4 冲击次数对粗糙度的影响

选择编号 3、编号 4 和编号 5 试样为研究对象, 对比分析不同冲击次数对 MB8 镁合金表面粗糙度的影响, 其冲击次数分别为 1 次、2 次和 3 次。按照不同冲击次数进行激光冲击处理后的表面轮廓如图 5 所示。

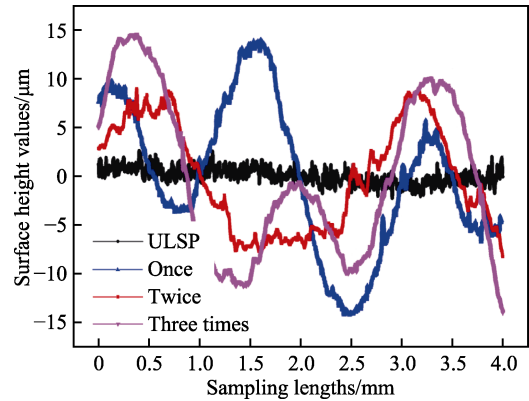


图 5 不同次数激光冲击后表面轮廓对比
Fig.5 Comparison of surface profile after different number of laser impacts

从图 5 中可知, 冲击次数的不同使材料表面宏观变形存在较大差异。冲击次数分别为 1 次和 3 次时, 表面变形趋势较为相似, 均形成了高度不一的波峰、波谷。采用 1 次激光冲击后, 在取样范围内形成的波峰最大值为 $14.03\ \mu\text{m}$ 、最小值约为 $6.1\ \mu\text{m}$, 而采用 3 次激光冲击后形成的波峰最大值为 $14.59\ \mu\text{m}$ 、最小值仅有约 $-1.2\ \mu\text{m}$, 这是由于随着重复次数的不断增加, 原有的材料“挤出区”可能在下一次冲击时被压缩, 使得某些位置的波峰高度减小。而采用 2 次激光冲击后所形成的宏观变形与 1 次和 3 次激光冲击后的宏观变形明显不同, 2 次激光冲击处理后材料表面所形成的波峰和波谷的高度值均为 $\pm 8\ \mu\text{m}$ 左右, 宏观变形均匀度明显较 1 次冲击和 3 次冲击后更好。同时发现 2 次冲击处理后波峰与波峰之间的距离更大, 该差异的出现主要是因为材料在第 2 次冲击时所发生的变形基本与第 1 次冲击时一致, 材料表面变形经两次冲击波作用后得以加强, 均匀度也得以改善。然而, 当冲击次数再次增加时, 材料的变形并非简单的叠加, 这可能造成原有波峰位置被压缩, 波谷位置因塑性流动而形成材料堆积, 最终使材料变形更加剧烈, 形成混乱的表面轮廓。

镁合金按照不同冲击次数进行激光冲击强化处理后的表面粗糙度如图 6 所示, 经 2 次激光冲击后材料粗糙度最小, 为 $0.847\ 0\ \mu\text{m}$, 较未强化前 $0.437\ 1\ \mu\text{m}$ 的粗糙度提高了 93.78%, 而采用 1 次和 3 次激光冲击后的粗糙度较大, 分别达到了 $1.004\ 3\ \mu\text{m}$ 和 $1.056\ 5\ \mu\text{m}$, 相比于未强化处理时的粗糙度分别上升了 129.76% 和 141.71%。通过对比图 5 和图 6 可知, 按照 3 种冲击方案处理后的粗糙度值与材料表面轮廓情况基本一致, 由于采用 2 次激光冲击处理后材料表面形成的波峰、波谷高度较为一致, 分布更加均匀, 所以相比于按照 1 次和 3 次激光冲击后的表面平整度更好, 粗糙度也略有下降。

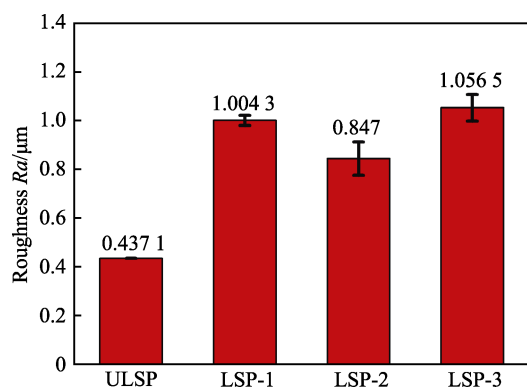


图6 不同次数激光冲击后镁合金表面粗糙度
Fig.6 Surface roughness of magnesium alloy after different number of laser impacts

2.2 不同冲击参数对镁合金硬度的影响

2.2.1 硬度测试方法

硬度测量采用 HX-1000TM/LCD 型显微硬度仪对不同状态下的镁合金表层维氏硬度进行测试。未强化试样和各种参数下的强化试样每组各 2 件, 分别在相同位置进行测试后取两者平均值作为该状态下的硬度值。表面硬度测试是在冲击区域和未冲击区域随机选取 3 个点进行测试并取平均值。对截面硬度进行测试前先将试样进行冷镶嵌, 如图 7 所示, 再依次用 240#—2000#砂纸对截面试样进行打磨抛光, 保证截面光洁度, 减少误差。从距冲击表面 $250\ \mu m$ 深度处开始依次间隔 $200\ \mu m$ 向试样中间进行测试, 同一深度内左右间隔 $500\ \mu m$ 测试 3 个点作为该深度的硬度值。考虑到试样是采用激光双面同时对冲方式进行处理的, 且试样厚度为 $3\ mm$, 所以对其截面硬度测试时到 $1\ 450\ \mu m$ 深度为止, 具体测试位置如图 8 所示。

2.2.2 功率密度对硬度的影响

编号 1、编号 2 试样冲击处理后镁合金硬度随深度的变化曲线如图 9 所示, 观察可知激光冲击后镁合金硬度得到了显著提高。未进行激光冲击处理的镁合金硬度约为 $42\ HV$, 但是由于加工硬化的原因表面硬度略高于 $42\ HV$, 取未强化试样各点硬度算术平均值 $42.2\ HV$ 作为基体硬度。因为试验采用 HX-1000TM/LCD 型显微硬度仪, 采用如图 7 所示冷镶嵌的方式

进行测量。由国家标准 GB/T 4340.1—1999 规定可知, 材料维氏硬度测试时的压痕对角线长度应为 $0.020\sim 1.400\ mm$, 且 MB8 镁合金的维氏硬度约为 $50\ kg/mm^2$, 根据公式估算后选择加载载荷为 $200\ g$, 保荷时间为 $15\ s$, 于常温下分别对激光冲击处理前后的镁合金表层硬度进行测试。因为是仪器测量测试, 结果必定存在误差。图 9—13 中用误差棒表征测试过程中误差的影响。

经功率密度为 $1.415\ GW/cm^2$ 的脉冲激光冲击后, 镁合金表面硬度达到了 $49.4\ HV$, 较未强化表面的 $44.0\ HV$ 提高了约 12.3% , 而采用 $2.122\ GW/cm^2$ 功率密度的激光冲击后表面硬度达到了 $52.3\ HV$, 相比未强化表面硬度提高了 18.9% 。显而易见, 随着激光功率密度的提高, 镁合金表面硬度的提升幅度明显增大, 这主要是因为激光功率密度的增大意味着激光诱导冲击波峰值压力的增加, 而在更高压力的冲击波作用下, 材料塑性变形程度也更加严重, 从而导致塑性硬化效果明显加剧。

对于截面硬度, 在相同深度处高功率密度的激光冲击处理强化效果优于低功率密度的激光强化效果, 且在材料近表层处该差异更加明显, 随着深度的增加, 两者之间的差异逐渐减小。经功率密度为 $2.122\ GW/cm^2$ 激光冲击后不同深度的硬度均较基体硬度 $42.2\ HV$ 有所提升, 硬化层深度高达 $1.4\ mm$ 。而采用 $1.415\ GW/cm^2$ 功率密度激光冲击处理后硬化层仅有 $1.1\ mm$ 左右。结果表明: 脉冲激光功率密度的提高不仅可使同一深度处硬度进一步提高, 而且会产生更厚的强化层。造成这一现象的原因主要是: 高功率密度激光诱导的冲



图7 经冷镶嵌后的镁合金截面试样
Fig.7 Cross-sectional specimen of magnesium alloy after cold inlay

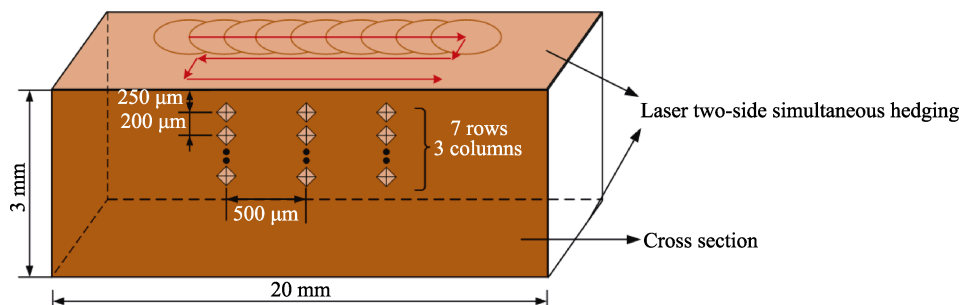


图8 深度方向硬度测试示意图
Fig.8 Schematic diagram of hardness test in depth direction

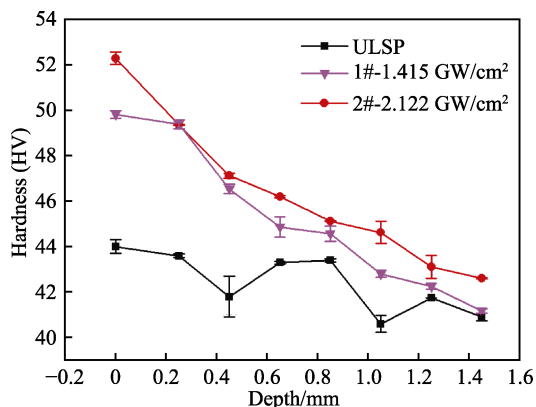


图 9 不同功率密度激光冲击后硬度变化曲线
Fig.9 Hardness change curve after laser impact at different power densities

击波峰值压力较大,在相同深度其压力高于低功率密度激光诱导的冲击波压力,使得材料塑性变形程度增大,组织细化严重,最终硬度的提高幅度高于低功率密度激光处理时的提高幅度。此外,激光诱导冲击波的衰减过程随着激光功率密度的提高而增长,从而使得高功率密度脉冲激光产生的冲击波作用时间更长、影响层更深。

2.2.3 搭接率对硬度的影响

采用功率密度均为 2.122 GW/cm^2 的脉冲激光分别按照搭接率 50% 和 75% 的冲击方案对编号 2 和编号 3 试样进行双面同时对冲,冲击处理后镁合金硬度随深度的变化曲线如图 10 所示。

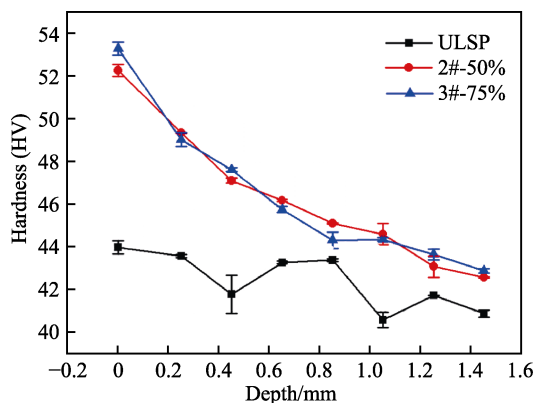


图 10 不同搭接率激光冲击后硬度变化曲线
Fig.10 Hardness change curve after laser impact at different lap rates

通过图 11 可知,采用 50% 搭接率和 75% 搭接率方案进行冲击强化处理后材料硬度均得到了提高,但是硬度最大值和硬化层深度区别不大。表面硬度方面,当光斑搭接率为 50% 时镁合金表面硬度从 44.0 HV 提高至 52.3 HV ,提高幅度达 18.9%;采用 75% 光斑搭接率进行冲击处理后表面硬度提高至 53.3 HV ,提高幅度达到了 21.1%,略高于采用 50% 搭接率冲击后的表面硬度。深度方向,采用不同搭接率进行冲击

处理后硬度均呈现梯度分布,在同一深度层处硬度区别不大,同时其硬化层厚度均为 1.4 mm ,无明显差异。所以,搭接率对材料硬度的影响较小,这主要是因为材料硬度的提高源于高压冲击波作用下的硬化效应,而在功率密度相同的情况下材料表面形貌虽会受到搭接率不同的影响,然而材料的塑性应变硬化程度区别较小,从而使得不同搭接率下材料硬度分布基本一致。

2.2.4 冲击次数对硬度的影响

分别对编号 2、编号 4 和编号 5 试样进行 1 次、2 次和 3 次激光冲击以研究不同冲击次数对材料硬度的影响,3 组试样经冲击处理后的硬度分布情况如图 11 所示。2# 试样经过激光冲击处理后硬度提高至 52.3 HV ,较未强化表面 44.0 HV 的硬度提高了 18.9%,而分别经 2 次和 3 次冲击处理后的 4# 和 5# 试样表面硬度分别提高至 54.7 HV 和 57.3 HV ,增幅分别达到了 24.3% 和 30.2%。深度方向,材料经激光冲击处理后硬度得到了不同程度的提高,冲击次数越多硬度提高效果越明显,同时采用 3 次冲击方案处理后的材料硬化层厚度也较 1 次和 2 次冲击处理后的硬化层厚度略微升高。显而易见,当激光冲击次数在 3 次以内时镁合金硬度随着冲击次数的增多而不断提高,并且深度方向硬度均呈现梯度分布。该结果与江苏大学鲁金忠等^[19]的研究结果相似。究其原因,主要是因为材料硬度的提高是塑性应变硬化和显微组织细化的结果,而采用多次冲击方式对靶材表面进行处理时,表层材料将在一定范围内持续发生塑性变形,使得位错密度进一步提高,组织细化加剧,最终达到提高硬度的目的。

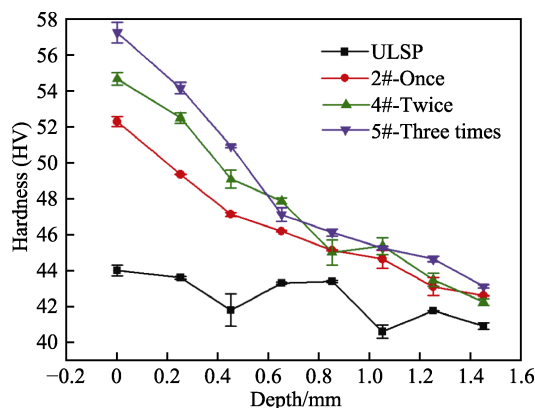


图 11 不同冲击次数激光冲击后硬度变化曲线
Fig.11 Hardness change curve after laser impact with different number of impacts

此外,虽然冲击次数的提高能够使材料进一步发生塑性变形、提高材料硬度,但是硬度的提升幅度与冲击次数并未呈现线性关系。由图 11 可知,在靶材表层 0.6 mm 深度范围内,材料经 2 次激光冲击后的硬度较仅冲击 1 次时提升效果较为明显,而将冲击次数提高到 3 次后硬度虽然得到了进一步提高,但是增

幅明显放缓。这可能是由于 2 次冲击后材料内部已经发生较大的塑性应变,形成了大量的高密度位错,而冲击次数再次提高时材料内部已经形成的挤压变形和位错使得塑性应变难以再次发生,从而使得硬度提高有限,难以进一步形成更高数值的硬化层。

2.3 不同载荷摩擦磨损试验及结果分析

试验对象为图 12a—b 所示的 MB8 镁合金薄板,摩擦磨损试样共分为 2 组,研究激光冲击强化处理对镁合金在不同载荷下耐磨损性能的改善效果。A1 组采用未经激光冲击处理的镁合金试样作为对照组,而 A2 组中的镁合金试样采用第 2.1、2.2 节试验中最优参数,即功率密度为 2.122 GW/cm^2 、光斑直径为 3 mm、搭接率为 50%、冲击次数为 1 次的强化方案,按照蛇形路径进行单面激光冲击处理,并将其作为试验组开展后续的对比研究。为减小试验误差带来的不利影响,各参数下的试验均进行 2 次,磨损量和磨损率等评价指标均采用 2 次重复试验的平均值。

采用由兰州华汇仪器科技有限公司生产制造的 MST-3001 型球-盘摩擦磨损试验机进行干滑动摩擦磨损试验研究。该试验平台加载载荷为 10~2 000 g,转速范围为 1~3 000 r/min,回转半径为 3~10 mm,并且可以通过计算机系统对试验过程中的摩擦因数进行精度达 ± 0.0001 的实时监控与记录。

为研究不同载荷作用下镁合金激光冲击强化前后摩擦性能的差异性。本组试验均采用 Si_3N_4 陶瓷磨球,并保证转速 300 r/min 和工作时间 90 min 等参数不变,分别研究在 50、100、150、200 g 载荷作用下激光冲击强化的作用效果。摩擦因数作为评价材料摩擦性能的一项重要指标,与材料表面粗糙度、润滑情况以及材料自身属性密切相关,摩擦因数的大小可以用滑动面之间的摩擦力与其之间垂直载荷的比值表示。在本试验中,摩擦因数可通过 MST-3001 型球-

盘摩擦磨损试验机进行实时采集。磨损率也常被用来评价材料的耐磨损性能。质量磨损率是指材料在摩擦磨损试验中损失的质量与加载载荷和滑动距离的比值,它表示在单位载荷作用下材料经过单位滑动距离后所磨损的质量,磨损率直观地反映了材料的耐磨损性能。

试验采用直径为 5 mm 的 Si_3N_4 陶瓷球作为对磨偶件,其硬度为 20 GPa,对磨盘回转半径设定为 3 mm。由于磨损量从直观上反映了摩擦磨损的剧烈程度,因此它是评判材料耐磨性和零部件表面质量优劣的一项重要指标。通常,磨损量包括 3 种形式:线磨损量、体积磨损量和质量磨损量。考虑到材料经激光冲击处理后表面发生了宏观变形,难以准确测得试验前后的体积变化量,因此本文主要以质量变化为指标研究镁合金的耐磨损性能。

摩擦磨损试验中材料的质量磨损量较小,为了获得试样的准确质量,在试验开始前首先利用超声波清洗仪对试样进行清洗,经风干处理后采用 METTLER TOLEDO 仪器(上海)有限公司生产的 ME204E 型电子天平进行称量,该天平量程为 10 mg~220 g,精度达 0.0001 g,符合试验要求。然后,在温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 45%~60%的环境下开始摩擦磨损试验,试验完成后将磨屑进行收集封存,试样经超声波清洗 15 min 后进行称量并计算其磨损量和磨损率。而后利用扫描电子显微镜(SEM)以及能谱仪(EDS)等设备对不同试验条件下的磨损形貌和磨损产物进行分析,从而研究激光冲击强化处理对镁合金耐磨损性能的影响机理。

2.3.1 激光冲击 MB8 镁合金的摩擦磨损试验结果

不同表面处理状态的镁合金试样的摩擦因数随载荷的变化趋势如图 13 所示。由图 13a 可知,在激光冲击强化处理前,试样表面的摩擦因数随着载荷的

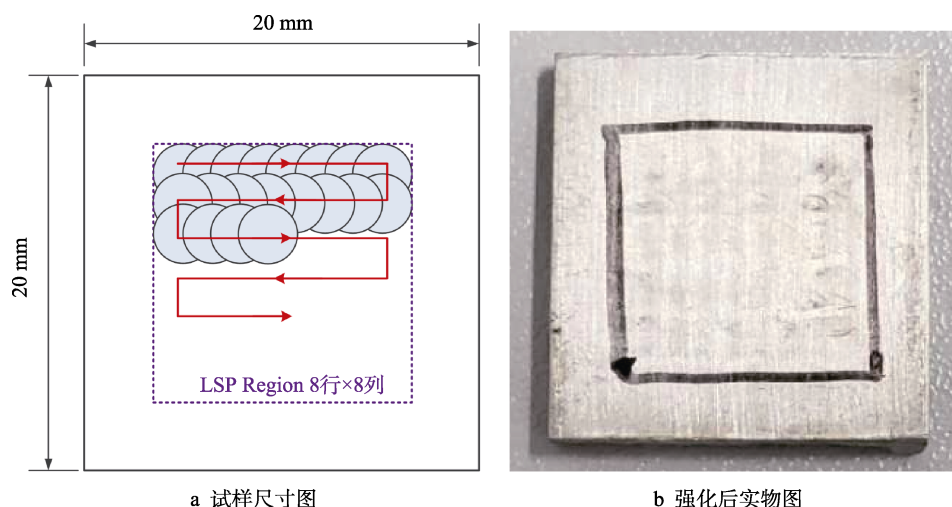


图 12 摩擦磨损试样

Fig.12 Frictional wear specimen: a) sample size diagram; b) physical picture after strengthening

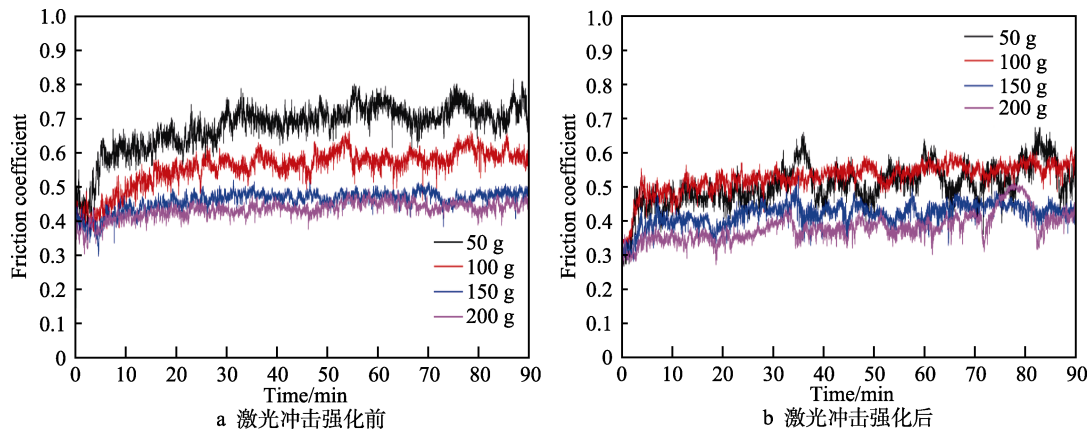


图 13 镁合金摩擦因数随载荷变化趋势

Fig.13 Variation trend of friction coefficient of magnesium alloy with load: a) before laser shock strengthening; b) after laser shock strengthening

增加而逐渐减小。在 150 g 和 200 g 载荷作用下, 试样的摩擦因数基本保持不变。这是因为材料在小载荷情况下发生的弹性变形尚未饱和。随着载荷的增加材料将进一步产生弹性变形, 并使对磨球与试样表面的接近量增加, 而两者之间的真实接触面积与载荷呈正相关, 为 0.6 次幂非线性关系, 因此接触面积增加的速率远小于载荷的增加速率。结合摩擦因数公式^[20]及综合摩擦因数公式^[21-22]可知, 材料的摩擦因数将随载荷的增加而减小。此外, 真实接触面积的增加必然导致接触点数量的增加, 各接触点处的压强将较之前有所降低, 从而使得材料塑性变形程度降低, 剪切摩擦力减小, 并最终导致摩擦因数减小。另一方面, 在低载荷作用下随着摩擦过程的进行, 摩擦因数先呈现增加趋势而后基本保持在某一水平附近波动, 而在高载荷作用下摩擦因数将在前期迅速上升然后保持稳定。说明随着载荷的增加材料将更快进入稳定磨损阶段, 而在低载荷作用下材料需经较长时间的啮合阶段才能进入稳定磨损阶段。

由图 13b 可知, 镁合金经激光冲击强化处理后在不同载荷下的摩擦因数变化趋势与未经激光冲击处理时的变化规律一致, 均随载荷的增加呈现降低趋势。但激光冲击强化处理后, 材料在不同载荷下的摩擦因数的差异性显著减小。

4 种不同载荷下镁合金激光冲击强化前后摩擦因数的区别如图 13 所示。显而易见, 激光冲击强化可使镁合金的摩擦因数减小, 但是随着载荷从 50 g 提高到 200 g 时, 激光冲击强化处理对镁合金摩擦性能的改善效果逐渐减弱。在一个完整的摩擦过程中, 激光冲击强化可使镁合金在 50 g 载荷作用下的平均摩擦因数由 0.678 1 降低至 0.506 2, 而当载荷逐步增加至 200 g 时, 平均摩擦因数仅从 0.434 4 降至 0.381 6, 说明激光冲击强化对镁合金摩擦剧烈程度的弱化作用在一定程度上随着载荷的提高而降低。

激光冲击处理前后镁合金材料磨损量随载荷的

变化趋势如图 14 所示。整体对比冲击前后磨损量的趋势可知, 相同表面状态试样的磨损量均随着载荷的增加而增大, 这表明在重载条件下材料的摩擦磨损更加剧烈, 质量损失愈发严重。单个来看, 相同载荷情况下经激光冲击处理后镁合金材料的质量磨损量较未处理前均有所下降, 这是因为镁合金经冲击处理后形成了纳米晶组织, 并且在表层深度内产生了残余压应力, 使得磨损量减少, 这也说明激光冲击强化可以有效提高镁合金的耐磨损性能。此外, 通过对比可以发现, 未经激光冲击处理和采用激光冲击处理后的试样的质量磨损量之间的差值随着载荷的提高而有所降低, 说明在 50~200 g 载荷范围内激光冲击强化处理对镁合金材料轻载条件下的耐磨损性能改善更加明显, 而对重载条件下的改善性能有限。

结合磨损率公式^[23-24]可知激光冲击强化可使材料的质量磨损率降低, 未强化时的平均质量磨损率约为 2.997×10^{-5} , 而经强化处理后镁合金的平均质量磨损率降为约 2.145×10^{-5} , 降幅达 28.73%, 这表明镁合金经激光冲击强化处理后耐磨损性能确有提升。

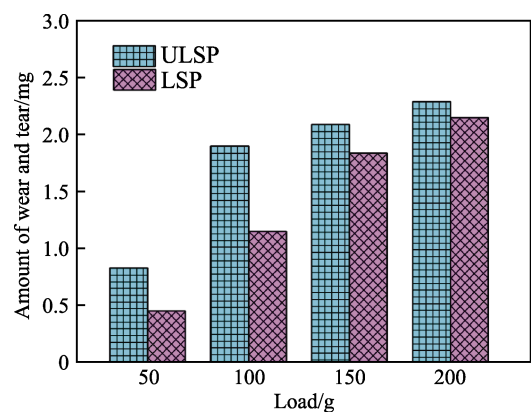


图 14 磨损量的变化影响

Fig.14 Influence of wear quantity

2.3.2 激光冲击 MB8 镁合金的耐磨机理

为了研究激光冲击强化对镁合金耐磨性能的影响,通过对试样表面磨损形貌进行观察,对比分析了激光冲击处理前后磨损形貌的区别,研究激光冲击强化处理后磨损形式的改变,为镁合金激光冲击强化表面改性应用提供理论参考。磨损形貌的宏、微观观察均使用捷克生产的 TESCAN MIRA3 型场发射扫描电子显微镜进行,该型扫描电镜具有优异的光学性能,在高真空和低真空模式下均可工作等突出特点,其加速电压范围为 0.2~30 kV,放大倍数可达 100 万倍,可以满足试验需求。

不同载荷下镁合金摩擦磨损试验后的表面宏观形貌如图 15 所示。对比宏观形貌可知,载荷提高磨损区域面积逐渐增大且磨痕宽度增加,在磨损区域圆心处的小圆面积减小,该现象说明材料的磨损程度随载荷的增加而愈发严重。同时,对比有无激光冲击强化处理试样的宏观形貌可知,经激光冲击处理后相同参数试样的磨损面积明显减小,且强化处理后磨痕的平均宽度较小,激光冲击强化后在不同载荷下镁合金的磨损情况有显著提升,这也与图 14 中的磨损量情况相吻合。

为探究激光冲击强化前后镁合金磨损机理的不同,采用扫描电子显微镜对其磨损表面进行微观形貌观察。未经激光冲击处理的镁合金磨损形貌如图 16 所示,在磨损区域内沿磨削方向形成了大量明显的犁沟,且随着载荷的增加表面形貌变化明显,“羽毛状条纹”逐渐紊乱。在 50 g 和 100 g 载荷下磨损表面的犁沟较为清晰、明显,且宽度较小,主要磨损机理为磨粒磨损(如图 16a—b);载荷较大时磨损表面粗糙

度增加,磨损程度加剧,犁沟较低载荷时数量有所减少,但宽度和深度均有增加。局部金属在循环接触应力的作用下反复发生塑性变形并在切应力作用下形成了大小不一的剥落坑,最终表面产生疲劳剥落现象(如图 16c—d),同时可观察到裂纹的存在,说明在高载荷作用下,表面切应力超过屈服极限,磨损形式转变为以接触疲劳磨损为主、磨粒磨损为辅。

采用激光冲击强化处理后的镁合金磨损表面微观形貌特征如图 17 所示。与未强化试样相似,在小载荷作用下材料表面有大量细小型沟形成,但整体更加平整,当载荷为 200 g 时犁沟数量较之前有所减少,磨损形式仍为磨粒磨损(图 17a—b)。随着载荷的增加犁沟深度和宽度逐渐增加,同时在局部区域发生了轻微剥落(图 17c),当载荷达到 200 g 时磨损区内有小片层离剥落出现,但是剥落情况较未经强化处理前有所改善,这主要是由于激光冲击强化后材料表面的屈服强度得以提高,此时磨损形式主要为磨粒磨损但局部区域出现了轻微黏着磨损,同时可在其中观察到唇片的存在但是未发现裂纹,说明此时材料表面最大切应力小于其屈服极限,所以无裂纹产生。

在小载荷时激光冲击强化并未改变其磨损形式,仍为磨粒磨损,但是由于硬度的提高材料表面的犁沟较未强化时变得更细更浅。而随着载荷的逐渐增加,镁合金的磨损形式从未经强化处理时的接触疲劳磨损为主、磨粒磨损为辅转变为磨粒磨损为主并伴有少量轻微黏着磨损,这是由于激光冲击强化处理后材料不仅硬度有所增加,表面屈服强度也得到了一定程度的提高,使得剥落难以发生,同时裂纹成核与扩展阻力增加,从而使得镁合金的耐磨性能得以改善。

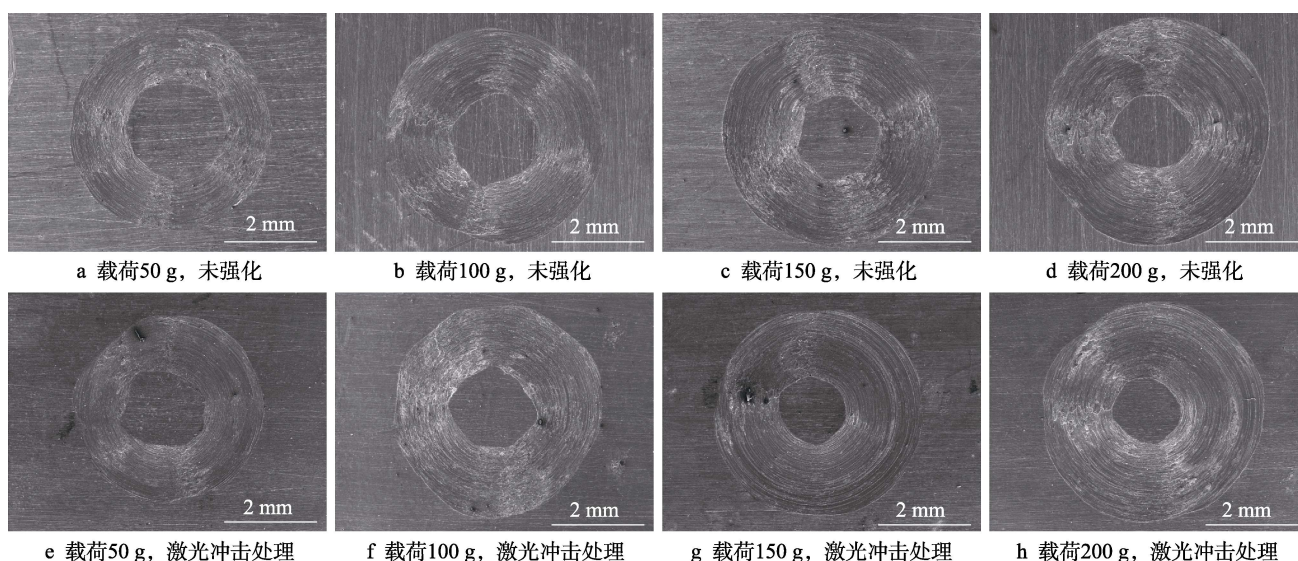


图 15 不同载荷下磨损表面宏观形貌

Fig.15 Macroscopic morphology of wear surface under different loads: a) load 50 g, unreinforced; b) load 100 g, unreinforced; c) load 150 g, unreinforced; d) load 200 g, unreinforced; e) load 50 g, laser shock processing; f) load 100 g, laser shock processing; g) load 150 g, laser shock processing; h) load 200 g, laser shock processing

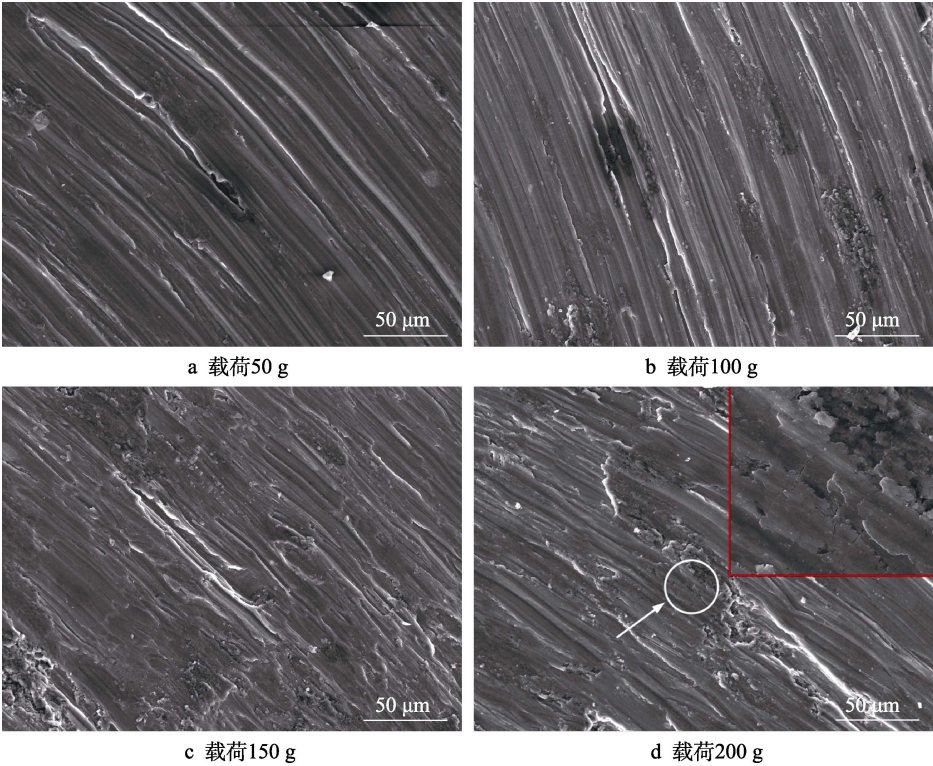


图 16 未强化试样在不同载荷下的磨损表面微观形貌
Fig.16 Microstructure of wear surface of unstrengthened specimens under different loads

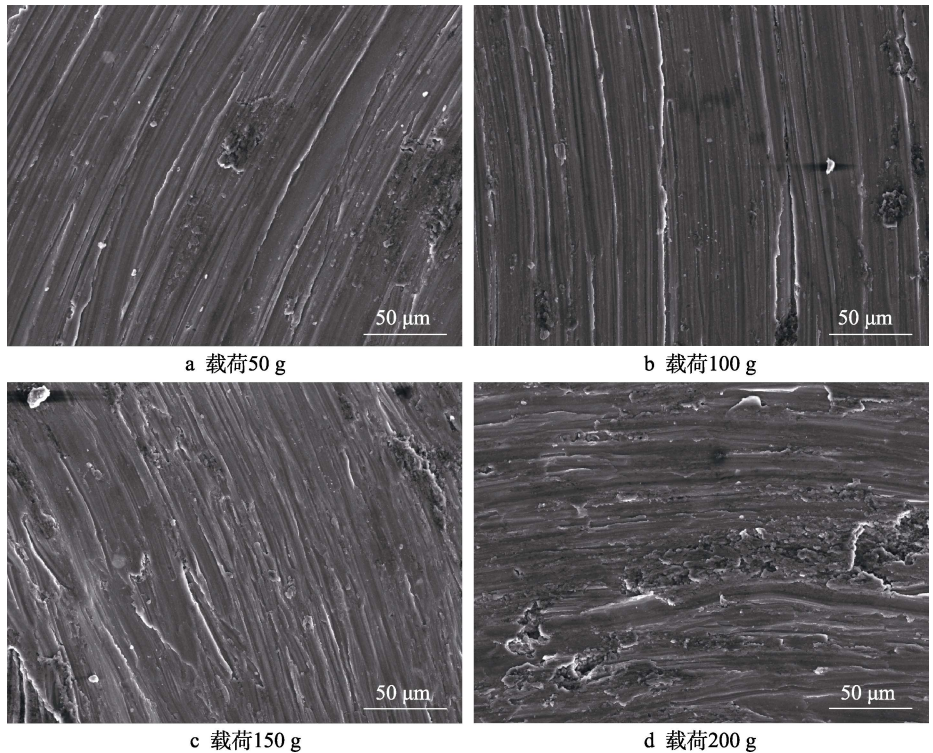


图 17 激光冲击强化试样在不同载荷下的磨损表面微观形貌
Fig.17 Microstructure of wear surface of laser shock strengthened specimens under different loads

3 结论

1) 激光冲击强化会改变镁合金表面粗糙度和硬度, 不同激光参数试验冲击区域的粗糙度与激光功率

密度呈正相关, 与搭接率呈负相关, 粗糙度随着冲击次数呈现先下降后升高的变化趋势; 经激光冲击处理后镁合金硬度明显提高, 表面硬度最大增幅达 30.2%, 同时形成了梯度硬化层。材料的硬化程度随着激光功

率密度、搭接率和冲击次数的提高而增大,冲击次数的影响最为明显,激光功率密度次之,搭接率的影响最弱。

2) 激光冲击强化通过改变镁合金表面粗糙度和硬度影响其功能耐磨性,镁合金经激光冲击强化处理后,在不同载荷下的摩擦因数变化趋势与未经激光冲击处理时的变化规律一致,均随载荷的增加呈现降低趋势。但激光冲击强化处理后,材料在不同载荷下的摩擦因数的差异性显著减小。在一个完整的摩擦过程中,激光冲击强化可使镁合金在 50 g 载荷作用下的平均摩擦因数由 0.678 1 降低至 0.506 2,而当载荷逐步增加至 200 g 时平均摩擦因数仅从 0.434 4 降至 0.381 6,说明激光冲击强化对镁合金摩擦剧烈程度的弱化作用在一定程度内随着载荷的提高而降低。激光冲击强化可使材料的质量磨损率降低,未强化时的平均质量磨损率约为 2.997×10^{-5} ,而经强化处理后镁合金的平均质量磨损率降为约 2.145×10^{-5} ,降幅达 28.73%,这表明镁合金经激光冲击强化处理后耐磨损性能确有提升。

3) 强化处理后镁合金表面整体耐磨性增强,试验呈现磨损面积减小、磨痕变浅。相同载荷下犁沟变小变浅,疲劳剥落现象降低,磨损程度降低。磨损形式随着载荷的增加逐渐从磨粒磨损过度到磨粒磨损伴有黏着磨损。

参考文献:

- [1] 查敏,王思清,方圆,等. 高性能轧制镁合金研究进展[J]. 精密成形工程, 2020, 12(5): 20-27.
ZHA Min, WANG Si-qing, FANG Yuan, et al. Advancement in Research of Rolled Magnesium Alloys with High Performance[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(5): 20-27.
- [2] RAMALINGAM V V, RAMASAMY P, KOVUKKAL M D, et al. Research and Development in Magnesium Alloys for Industrial and Biomedical Applications: A Review[J]. Metals and Materials International, 2020, 26(4): 409-430.
- [3] LIU Yong, JIN Bin, SHAO Shuang, et al. Dry Sliding Wear Behavior of Mg-Zn-Gd Alloy before and after Cryogenic Treatment[J]. Tribology Transactions, 2014, 57(2): 275-282.
- [4] SUN Ru-jian, CHE Zhi-gang, CAO Zi-wen, et al. Fatigue Behavior of Ti-17 Titanium Alloy Subjected to Different Laser Shock Peened Regions and Its Microstructural Response[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 383: 125284.
- [5] 钱阳. AZ80-T6 镁合金激光冲击温强化及疲劳行为研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2015.
QIAN Yang. Study on Laser Shock Temperature Strengthening and Fatigue Behavior of AZ80-T6 Magnesium Alloy[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2015.
- [6] 张青来, 刘惠, 张冰昕, 等. AZ80-T6 挤压镁合金激光冲击温强化和低周疲劳行为[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 69-76.
ZHANG Qing-lai, LIU Hui, ZHANG Bing-xin, et al. Warm Laser Shock Peening and Low Cycle Fatigue Behavior of Extruded AZ80-T6 Magnesium Alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(11): 69-76.
- [7] 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): 93-99.
ZHANG Qing-lai, WU Tie-dan, QIAN Yang, 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): 93-99.
- [8] GE Mao-zhong, XIANG Jian-yun, TANG Yang, et al. Wear Behavior of Mg-3Al-1Zn Alloy Subjected to Laser Shock Peening[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 337: 501-509.
- [9] MAO Bo, SIDDIAIAH A, ZHANG Xing, et al. The Influence of Surface Pre-Twinning on the Friction and Wear Performance of an AZ31B Mg Alloy[J]. Applied Surface Science, 2019, 480: 998-1007.
- [10] 王朋飞. 激光冲击镁合金接头疲劳裂纹扩展数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
WANG Peng-fei. Numerical Simulation of Laser Shock Peening on Fatigue Crack Growth of Magnesium Alloy Joint[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [11] 蒋素琴. 激光喷丸镁合金疲劳行为的数值分析与试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
JIANG Su-qin. Research on the Fatigue Behavior of Magnesium Alloy Treated by Laser Shot Peening Based on Numerical Analysis and Experiment[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009.
- [12] 蒋素琴, 徐红光, 吴建华, 等. 激光喷丸强化变形镁合金的疲劳寿命数值分析[J]. 应用激光, 2012, 32(5): 379-383.
JIANG Su-qin, XU Hong-guang, WU Jian-hua, et al. Numerical Analysis on Fatigue Life of Wrought Magnesium Alloy Treated by Laser Shot Peening[J]. Applied Laser, 2012, 32(5): 379-383.
- [13] 蒋素琴, 周建忠, 吴建华, 等. 激光喷丸强化 ZK60 变形镁合金的疲劳性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(8): 120-126.
JIANG Su-qin, ZHOU Jian-zhong, WU Jian-hua, et al. Research on Fatigue Properties of ZK60 Wrought Magnesium Alloy Treated by Laser Shot Peening[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(8): 120-126.
- [14] LUO K Y, WANG C Y, SUN G F, et al. Investigation and Microstructural Analyses of Massive LSP Impacts with Coverage Area on Crack Initiation Location and Tensile Properties of AM50 Magnesium Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 650: 110-118.
- [15] GE Mao-zhong, XIANG Jian-yun. Effect of Laser Shock Peening on Microstructure and Fatigue Crack Growth

- Rate of AZ31B Magnesium Alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 680: 544-552.
- [16] 郭峰. 激光喷丸对材料摩擦磨损性能影响的试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- GUO Feng. Experimental Study on Tribological Property of Materials Processed by Laser Shock Peening[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [17] PEYRE P, BERTHE L, SCHERPEREEL X, et al. Laser-Shock Processing of Aluminium-Coated 55C1 Steel in Water-Confinement Regime, Characterization and Application to High-Cycle Fatigue Behaviour[J]. *Journal of Materials Science*, 1998, 33(6): 1421-1429.
- [18] 周南, 乔登江. 脉冲束辐照材料动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- ZHOU Nan, QIAO Deng-jiang. Dynamics of pulsed beam irradiated materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
- [19] 鲁金忠. 激光冲击强化铝合金力学性能及微观塑性变形机理研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2010.
- LU Jin-zhong. Investigation of Laser Shock Processing on the Mechanical Properties and Micro-Plastic Deformation Mechanism of LY2 Aluminum Alloy[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010.
- [20] 田晓, 林彬, 杨飞, 等. SiC 对不锈钢的摩擦磨损特性[J]. *河北大学学报(自然科学版)*, 2006, 26(2): 157-160, 218.
- TIAN Xiao, LIN Bin, YANG Fei, et al. Friction and Wear Properties of SiC Against 1Cr18Ni9Ti Friction Couple[J]. *Journal of Hebei University (Natural Science Edition)*, 2006, 26(2): 157-160, 218.
- [21] 戴达煌. 现代材料表面技术科学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- DAI Da-huang. Modern Material Surface Technology Science[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004.
- [22] 田晓. 陶瓷材料摩擦副的摩擦磨损特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- TIAN Xiao. The Friction and Wear Characteristics Research of Ceramics Friction Pair[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- [23] LUO K Y, WANG C Y, SUN G F, et al. Investigation and Microstructural Analyses of Massive LSP Impacts with Coverage Area on Crack Initiation Location and Tensile Properties of AM50 Magnesium Alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 650: 110-118.
- [24] GE Mao-zhong, XIANG Jian-yun. Effect of Laser Shock Peening on Microstructure and Fatigue Crack Growth Rate of AZ31B Magnesium Alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 680: 544-552.

责任编辑: 万长清

(上接第 9 页)

- [31] VILLUENDAS A, JORBA J, ROCA A. The Role of Precipitates in the Behavior of Young's Modulus in Aluminum Alloys[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2014, 45(9): 3857-3865.
- [32] WANG Fei, YAN Xue-liang, LIU Lei, et al. Surface Strengthening of Single-crystal Alumina by High-temperature Laser Shock Peening[J]. *Materials Research Letters*, 2021, 9(3): 155-161.
- [33] QI Yu-ming, CHEN Xiu-hua, FENG Miao-lin. Molecular Dynamics-based Analysis of the Effect of Voids and HCP-Phase Inclusion on Deformation of Single-crystal CoCrFeMnNi High-entropy Alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 791: 139444.
- [34] JIANG Dong-dong, WU Bao, WANG Pei, et al. Spalling Characteristics Associated with Shock-Induced Microstructure Based on Molecular Dynamics Simulation of Single-Crystal Aluminum[J]. Available at SSRN 3855731, 2021.
- [35] 孟宪凯, 周建忠, 黄舒, 等. 激光温喷丸诱发单晶铜位错扩展的分子动力学模拟[J]. *中国激光*, 2015, 42(07): 21-27.
- MENG Xian-kai, ZHOU Jian-zhong, HUANG Shu, et al. Molecular Dynamics Simulation of Dislocation Development in Monocrystalline Copper induced by Warm Laser Peening[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(07): 21-27.
- [36] 白清顺, 童振, 梁迎春, 等. 单晶 Cu 纳米杆拉伸力学特性的尺寸依赖性模拟[J]. *金属学报*, 2010, 46(10): 1173-1180.
- BAI Qing-shun, TONG Zhen, LIANG Ying-chun, et al. Simulation of Scale Dependency on Tensile Mechanical Properties of Single Crystal Copper Nano-rod. *Acta Metallurgica Sinica*, 2010, 46(10): 1173-1180.
- [37] 王志龙, 罗开玉, 刘月, 等. 超高应变率力学效应下多晶铜的微观塑性变形分子动力学模拟[J]. *中国激光*, 2015, 42(07): 114-119.
- WANG Zhi-long, LUO Kai-yu, LIU Yue, et al. Molecular Dynamics Simulation of Plastic Deformation of Polycrystalline Cu under Mechanical Effect with Ultrahigh Strain Rate. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(07): 114-119.
- [38] XIONG Qi-lin, KITAMURA T, LI Zhen-huan. Transient Phase Transitions in Single-crystal Coppers under Ultrafast Lasers induced Shock Compression: A Molecular Dynamics Study[J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 125(19): 194302.
- [39] HE Zhao-ru, SHEN Yi-zhou, TAO Jie, et al. Laser Shock Peening Regulating Aluminum Alloy Surface Residual Stresses for Enhancing the Mechanical Properties: Roles of Shock Number and Energy[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 421: 127481.