

激光冲击光整对 2024 铝合金铣削 平面表面质量的影响

李海洋, 赵喆, 郑超*, 季忠, 赵国群

(山东大学 材料科学与工程学院, 济南 250061)

摘要: **目的** 减小铝合金铣削平面的表面粗糙度, 满足工程应用中对构件高质量表面的需求。**方法** 通过铣削加工获得 3 种具有不同初始表面粗糙度的平面试样, 试样的 Ra 分别为 1.439、0.614、0.220 μm 。采用短脉冲、高功率密度激光对表面进行光整处理, 利用激光共聚焦显微镜观察光整后试样的表面形貌, 采用粗糙度仪检测试样的表面轮廓和表面粗糙度, 分析光斑搭接率和激光能量对铝合金铣削平面表面质量的作用规律。**结果** 在脉冲宽度为 12 ns、波长为 1 064 nm、工作频率为 1 Hz、光斑直径为 2 mm 的平顶光束作用下, 试样的表面形貌发生重塑。当光斑搭接率为 30%、50%、70% 时, 对于 $Ra=1.439 \mu\text{m}$ 的试样, 在冲击后其表面轮廓变化幅值分别为 6.88、6.71、6.20 μm , 表面粗糙度变化率分别为 -70.8%、-72.9%、-73.2%; 对于 $Ra=0.614 \mu\text{m}$ 的试样, 在冲击后其表面粗糙度变化率分别为 -58.0%、-58.8%、-66.1%。当激光能量为 1.5、2.5、3.5、4.5 J 时, 对于 $Ra=1.439 \mu\text{m}$ 的试样, 在冲击后其表面轮廓变化幅值分别为 6.92、6.71、5.22、6.18 μm , 表面粗糙度变化率分别为 -68.1%、-72.9%、-74.6%、-73.8%; 对于 $Ra=0.614 \mu\text{m}$ 的试样, 在冲击后其表面粗糙度变化率分别为 -49.2%、-58.8%、-54.4%、-58.1%。**结论** 合理增大光斑搭接率和增强激光能量, 能够有效去除铣削刀痕, 改善试样表面形貌的均匀性。光斑搭接率和激光能量对表面粗糙度的影响与试样的初始表面粗糙度有关。对于 $Ra=1.439 \mu\text{m}$ 和 $Ra=0.614 \mu\text{m}$ 的试样, 增大光斑搭接率和增强激光能量均能显著降低其表面粗糙度; 对于 $Ra=0.220 \mu\text{m}$ 的试样, 在文中的激光冲击参数范围内均不能有效提高其表面质量。

关键词: 激光冲击; 2024 铝合金; 表面形貌; 表面粗糙度; 光斑搭接率; 激光能量

中图分类号: TN249 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2023)09-0388-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.09.035

Effect of Laser Shock Finishing on the Surface Quality of 2024 Aluminum Alloy with Milled Plane

LI Hai-yang, ZHAO Zhe, ZHENG Chao*, JI Zhong, ZHAO Guo-qun

(School of Materials Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

ABSTRACT: Aluminum alloy is widely applied in the field of aeronautics and astronautics because of its light weight, high specific strength and excellent corrosion resistance. The parts made of aluminum alloy are usually processed by milling, and the surface quality after milling is closely associated with the service performance of these parts. Therefore, finishing process is

收稿日期: 2022-07-29; 修订日期: 2023-03-21

Received: 2022-07-29; Revised: 2023-03-21

基金项目: 国家自然科学基金 (52075299, 52075298); 山东省自然科学基金 (ZR2020ME149); 山东省重点研发计划 (2021ZLGX01)

Fund: National Natural Science Foundation of China (52075299, 52075298); Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2020ME149); Key Research and Development Program of Shandong Province (2021ZLGX01)

引文格式: 李海洋, 赵喆, 郑超, 等. 激光冲击光整对 2024 铝合金铣削平面表面质量的影响[J]. 表面技术, 2023, 52(9): 388-396.

LI Hai-yang, ZHAO Zhe, ZHENG Chao, et al. Effect of Laser Shock Finishing on the Surface Quality of 2024 Aluminum Alloy with Milled Plane[J]. Surface Technology, 2023, 52(9): 388-396.

necessary to reduce the roughness and strengthen the mechanical property of milled surface. Laser shock finishing is a novel flexible manufacturing method in which the laser shock wave pressure is employed to cause plastic deformation on the surface and further improve the surface quality. Compared with the traditional finishing process, laser shock finishing takes advantages of superb flexibility, good repeatability, high efficiency and high precision. However, few attempts have been made to study the effect of laser shock finishing on the surface quality of aluminum alloy after milling.

In this work, the effect of laser shock parameters on the finishing quality of 2024-T351 aluminum alloy with milled plane was experimentally investigated. The planar milled specimens with three different initial roughness were manufactured through CNC machining center, and the initial R_a was 1.439, 0.614, and 0.220 μm respectively. A laser system with ultrashort pulse and high laser power density was employed to finish the milled plane. After that, a laser scanning confocal microscope was used to observe the surface morphology of specimens after laser shock finishing. Both the surface profile and roughness were measured by a roughmeter. Based on the measurement, the effect of overlapping rate and laser energy on the surface quality of 2024-T351 aluminum alloy with milled plane was evaluated.

It was found that the surface morphology of planar milled specimens could be reshaped by the laser in case of pulse width of 12 ns, wavelength of 1 064 nm, working frequency of 1 Hz, spot diameter of 2 mm and flat-topped beam. While the overlapping rate was 30%, 50%, and 70%, for the specimens with R_a of 1.439 μm , the changing amplitude of surface profile after laser shock finishing was 6.88, 6.71, and 6.20 μm , and the changing rate of roughness was -70.8%, -72.9%, and -73.2% respectively. For the specimens with R_a of 0.614 μm the changing rate of roughness after laser shock was -58.0%, -58.8%, and -66.1%. While the laser energy was 1.5, 2.5, 3.5, and 4.5 J, for the specimens with R_a of 1.439 μm the changing amplitude of surface profile after laser shock finishing was 6.92, 6.71, 5.22, and 6.18 μm , and the changing rate of roughness was -68.1%, -72.9%, -74.6%, and -73.8% respectively. For the specimens with R_a of 0.614 μm the changing rate of roughness after laser shock was -49.2%, -58.8%, -54.4%, and -58.1%. It is revealed that both increasing overlapping rate and strengthening laser energy reasonably can effectively remove the milled mark on the surface and improve the uniformity of surface morphology. In addition, the effect of overlapping rate and laser energy on roughness strongly is related to the initial roughness of planar milled specimens. For the specimens with R_a of 1.439 and 0.614 μm , both increasing overlapping rate and strengthening laser energy can significantly reduce the roughness after laser shock. However, for the specimens with initial R_a of 0.220 μm , the surface quality can not be improved under the given laser shock conditions.

KEY WORDS: laser shock; 2024 aluminum alloy; surface morphology; surface roughness; overlapping rate; laser energy

铝合金具有质轻、强度高、耐蚀性好等优异特性,在航空航天、轨道交通、汽车等领域获得了广泛应用。其中,在航空航天领域一些要求轻量化的零部件上,高综合性能的 2XXX 系铝合金和 7XXX 系铝合金具有不可替代的地位^[1-2]。铣削加工具有生产效率高、加工范围广、适应材料种类多等优点,成为铝合金零部件加工常用工艺之一。铣削加工通过去除材料的方式获得满足一定形状和尺寸要求的零件,材料在铣削加工时将反复发生变形和断裂,这一过程会显著影响零件的表面微观形貌,形成不同等级的表面粗糙度,进而影响零件的服役性能^[3]。为了改善机械加工后零件的表面形貌,降低其表面粗糙度,通常采用光整加工技术。常用的光整加工方法有手工抛光、机械抛光、化学抛光、电化学抛光、激光抛光和复合抛光等^[4-6]。近年来,光整加工技术正朝着智能化、柔性化、高效率、无污染、少/无热损伤等方向发展,新的光整加工方法不断涌现。

激光冲击技术利用短脉冲、高功率密度激光辐照材料表面,形成冲击波,诱导材料发生高应变率塑性

变形,从而达到强化、成形、连接等效果,并由此发展形成激光冲击强化、激光冲击成形、激光冲击连接等具体工艺^[7-10]。由于激光具有施加灵活、可控、高效等特点,因此激光冲击技术越来越广泛地应用于复杂外形和高性能零部件的加工制造。特别是在表面强化方面取得了显著成效,推动了该技术的快速发展和工程应用^[11]。值得注意的是,激光冲击技术在提升零部件表面力学性能的同时,在一定程度上会增大表面粗糙度,因而降低了零部件的表面质量。Salimianrizi 等^[12]研究发现,经激光冲击后,6061-T6 铝合金的表面粗糙度明显增加;当光斑搭接率达到 70% 时,由于吸收层发生了过度烧蚀,其表面粗糙度进一步增大。王佳波^[13]对 304 不锈钢分别进行了激光冲击、超声冲击、激光/超声复合冲击 3 种表面强化处理,结果表明,3 种处理方式均使试样的表面粗糙度增大;基于非接触加工和吸收层的保护作用,经激光冲击后试样的表面粗糙度增幅最小。Wei 等^[14]采用 30%~70% 的光斑搭接率对 T2 纯铜表面进行了激光冲击处理,结果表明,在冲击后试样的表面粗糙度均有所增大,其

中光斑搭接率为 70%时试样的表面粗糙度最大,光斑搭接率为 30%时次之,光斑搭接率为 50%时试样表面粗糙度的上升幅度最小。由此可见,如何在激光冲击处理表面时,合理控制零件的表面粗糙度成为亟待解决的重要问题之一。

针对激光冲击处理零件的表面质量问题,中国矿业大学杨海峰教授等^[15]提出一种激光冲击平坦化技术,通过创新激光冲击工艺装置实现了箔材表面粗糙度的降低。该技术通过在待冲击纯铜箔材底部增加一层光滑的玻璃底板,以实现箔材的平整和强化,检测结果表明,纯铜箔材的表面粗糙度最大降低了 67%。围绕块体金属材料的激光冲击处理,江苏大学戴峰泽教授等^[16]提出一种刚性接触激光冲击光整技术。该技术是在激光冲击强化工艺装置基础上,在吸收层与试样之间加入一层被称为接触膜的光滑、高强、硬质金属箔材,在接触膜的剧烈压缩作用下,LY2 铝合金表面凹凸不平的现象得到显著改善,从而降低了激光冲击后试样的表面粗糙度。随后,戴峰泽教授等^[17]对比了 10%~50%光斑搭接率和有、无接触膜时激光冲击处理对 304 不锈钢试样表面粗糙度的影响,并阐明了接触膜的作用机理。实验结果表明,不论是否采用接触膜,激光冲击均会在试样表面形成凹坑,但有接触膜时凹坑边缘堆积高度远低于无接触膜时;光斑搭接率较小更利于获得较低的表面粗糙度。在刚性接触激光冲击光整技术基础上,戴峰泽教授课题组进一步提出一种激光冲击波碾压光整技术,耿杰等^[18-19]分析了单次和多次激光冲击波碾压过程中 LY2 铝合金试样表面微特征的变形行为,对比了不同厚度接触膜的作用效果,并通过数值模拟手段研究了激光能量的影响。结果表明,接触膜厚度和激光能量均不宜过大或过小,应结合实际工艺条件合理取值;对于不同初始表面粗糙度的试样,宜搭配不同表面粗糙度的接触膜,以获得最优的光整效果。裴智鹏等^[20-21]研究了接触膜材质对 LY2 铝合金试样表面微形貌的作用规律,发现接触膜的密度越小,对表面凸起的碾压作用越强;接触膜强度和弹性模量越高,对表面凹陷的抬升作用越明显;接触膜越薄,对表面残留刀痕的去除效率越高。然而,接触膜过薄会引起表面塌陷,反而会破坏表面轮廓形状。上述研究重点探讨了激光冲击光整技术的实施可行性和材料适应性,揭示了激光冲击光整技术的作用机理,研究了材质、厚度、表面粗糙度等接触膜特性对光整效果的影响规律。上述研究的

试样初始表面多由 SiC 砂纸打磨或激光雕刻等方法制备,对于铣削表面涉及较少,也未系统探讨在铣削表面条件下主要激光参数对试样表面质量的影响。

由此,这里以 2024-T351 铝合金为研究对象,通过实验研究方法探讨激光冲击光整对铝合金铣削平面表面质量的影响。首先通过铣削加工获得 3 种具有不同表面粗糙度等级的平面铣削试样,随后采用不同激光冲击参数对其表面进行处理,观察光整后试样表面的三维形貌和二维轮廓,测量其表面粗糙度,分析光斑搭接率和激光能量对铝合金铣削平面光整效果的影响。

1 实验

1.1 激光冲击光整前处理

选用 2024-T351 铝合金为实验材料。2024 铝合金作为典型的 2XXX 系铝合金,属于 Al-Cu-Mg 系高强度硬铝,具有低密度、高强度、高疲劳性能和良好加工性能等特点,广泛应用于飞机机翼、隔框、蒙皮、肋梁等结构中。T351 为其主要热处理状态的代号之一,指该材料经过固溶处理+冷变形(永久变形量为 1%~3%)+自然时效的热处理工艺。

选取厚度为 5 mm 的 2024-T351 铝合金板料,将其切割成 60 mm×60 mm 的小块,利用上海西马特机械制造有限公司生产的 iKX3 型数控加工中心对其表面进行铣削处理,获得平面铣削试样。为了与实际生产中常见的铣削表面条件一致,结合设备的加工能力,这里选用 3 种初始表面粗糙度,分别命名为 Ra 1.4、 Ra 0.6、 Ra 0.2(实际的表面粗糙度为一定范围),其对应的铣削参数如表 1 所示。

使用德国卡尔蔡司公司生产的 LSM-800 型激光共聚焦显微镜观察试样的表面形貌,经铣削加工后得到的 3 种表面形貌如图 1 所示。可以看到 Ra 1.4 表面上铣削加工刀痕明显,且存在以行距为周期的明显起伏; Ra 0.6 表面的刀痕仍较明显,但表面整体较平整; Ra 0.2 表面的刀痕细密,较难分辨,且表面整体平整,基本无起伏。

激光冲击光整实验采用北京镭宝激光技术有限公司生产的 SGR-60 型 Nd:YAG 激光器系统,脉宽为 12 ns,波长为 1 064 nm,工作频率为 1 Hz,输出光束为平顶模式。激光束经过 45°全反射后,传输方向由水平改为竖直向下,再经凸透镜聚焦后在试样表面形成了直径为 2 mm 的圆形光斑。为了满足光斑精

表 1 不同初始表面粗糙度平面试样所对应铣削参数
Tab.1 Milling parameters for planar specimens with different initial roughness

Surface No.	Ra range/ μm	Average $Ra/\mu\text{m}$	Line spacing/mm	Spindle speed/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	Feed speed/($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)
Ra 1.4	1.307-1.543	1.439	0.4	1 000	200
Ra 0.6	0.522-0.713	0.614		1 000	
Ra 0.2	0.215-0.259	0.220		3 000	

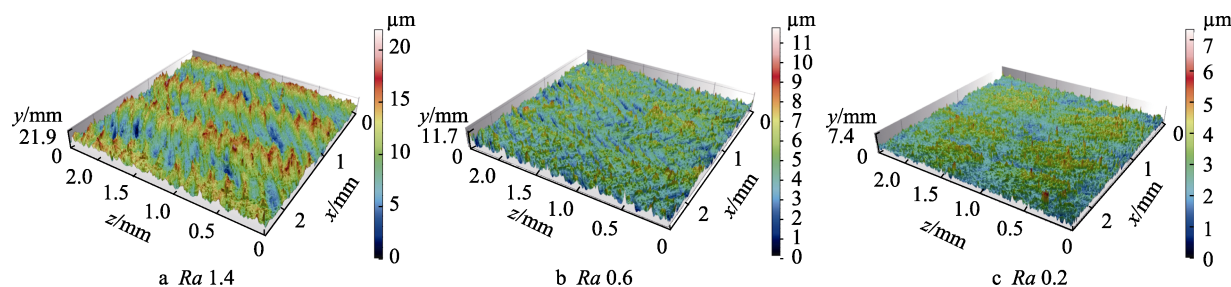


图 1 平面铣削试样的初始表面形貌

Fig.1 Initial surface morphology of planar milled specimens

准搭接需求,采用北京微纳光科仪器有限公司生产的数控位移台系统,该系统由 3 个平移轴和 1 个运动控制器组成,可以实现试样的高精度按需移动。使用蒸馏水作为约束层,水膜厚度约为 2 mm。选用厚度为 180 μm 的 3M 黑色绝缘胶带为吸收层,采用厚度为 150 μm 的 60Si2CrVA 弹簧钢箔材为接触膜,其表面粗糙度 R_a 接近 0.2 μm 。在实验前,将绝缘胶带和弹簧钢箔材紧贴在试样表面,随后将试样固定在水箱中,并注入蒸馏水,保持水膜厚度约为 2 mm。平面铣削试样激光冲击光整实验装置示意图如图 2 所示。

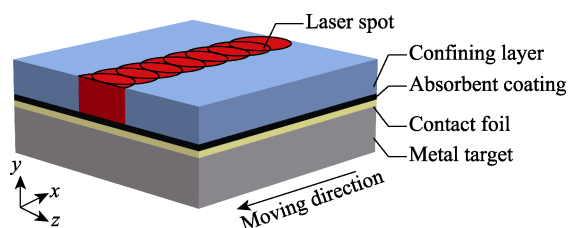


图 2 平面铣削试样激光冲击光整实验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of laser shock finishing apparatus for planar milled specimens

这里选取光斑搭接率 η 和激光能量 E 2 个主要激光参数,研究它们对铝合金铣削平面光整效果的影响。综合考虑激光冲击光整工艺常用参数和加工效率, η 取 30%、50%、70%,其示意图如图 3 所示。结合激光器加工能力及试样初始表面状态确定了激光能量的变化范围,最终选取 E 为 1.5、2.5、3.5、4.5 J。在实验时,按照 x 方向进行单道次线冲击。

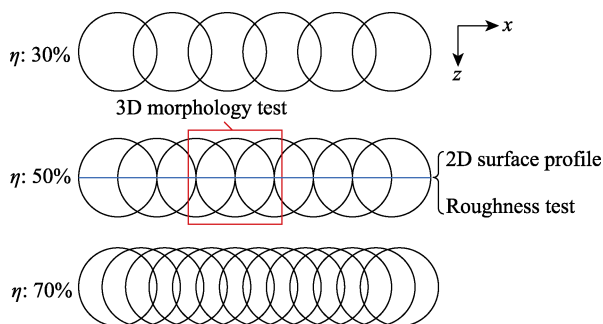


图 3 光斑搭接率和表面质量检测位置示意图

Fig.3 Schematic diagram of spot overlapping rate and surface quality detection position

1.2 表面质量检测

在激光冲击光整实验结束后,将试样置于超声清洗机中,在室温条件下清洗 10 min 后烘干。使用德国卡尔蔡司公司生产的 LSM-800 型激光共聚焦显微镜观察光整后试样的 3D 表面形貌,测量位置选取远离边界的中间冲击区域,测量区域面积为 2.4 mm×2.4 mm。使用北京时代之峰科技有限公司生产的 TIME-3231 型粗糙度仪检测试样的 2D 表面轮廓和表面粗糙度 R_a 。根据 GB/T 1031—2009《产品几何技术规范(GPS) 表面结构 轮廓法 表面粗糙度参数及其数值》^[22],由于试样的 R_a 在 0.1~2 μm 内,测量时设置取样长度为 0.8 mm,评定长度为 4 mm,每种情况重复测量 5 次后取其平均值。2D 表面轮廓和表面粗糙度的测量位置均位于冲击区中轴线,如图 3 所示。

2 结果及分析

2.1 表面微观形貌变化规律

2.1.1 初始表面粗糙度的影响

在不同初始表面粗糙度下,经激光冲击光整后试样的 3D 表面形貌如图 4 所示,此时 $\eta=50\%$, $E=2.5$ J。由图 4 可以看到,试样表面受冲击区域的整体高度明显低于两侧未受冲击区域,说明 3 种不同初始表面粗糙度平面铣削试样在受到激光冲击后均发生了明显的塑性变形,导致其表面形貌发生变化。由图 3 可知,当 $\eta=50\%$ 时,试样表面存在受到 2 次冲击的重叠区和只受到 1 次冲击的未重叠区。如图 4a 所示, R_a 1.4 试样在激光冲击后难以区分重叠区与未重叠区的边界。如图 4b、c 所示,可以明显分辨 R_a 0.6 和 R_a 0.2 试样受冲击区域重叠区和未重叠区的位置。说明随着初始表面粗糙度的减小,冲击后重叠区与未重叠区的边界变得更加清晰。这主要是因为初始表面粗糙度较大时,试样表面铣削刀痕高低起伏较大,此时试样表面受到接触膜直接作用的面积较小,导致冲击波压力传递和塑性变形不均匀,因而冲击后试样表面未呈现较规则的形貌。

在不同初始表面粗糙度下,经激光冲击光整后试样的 2D 表面轮廓如图 5 所示。可以看出,经冲击后

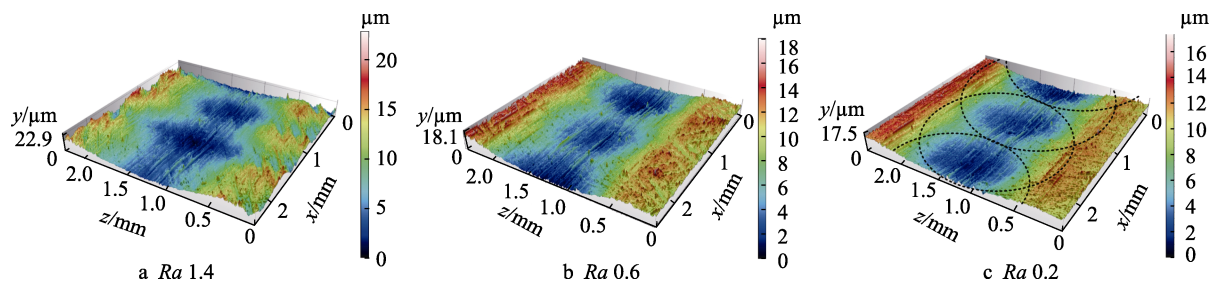


图4 不同初始表面粗糙度下激光冲击光整后试样的3D表面形貌

Fig.4 3D morphology of specimens under different initial roughness after laser shock finishing

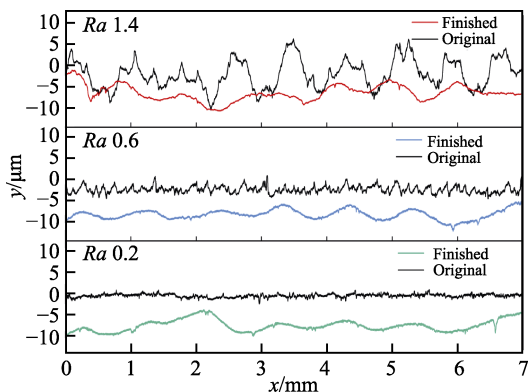


图5 不同初始表面粗糙度下激光冲击光整后试样的2D表面轮廓

Fig.5 2D profiles of specimens under different initial roughness after laser shock finishing

Ra 1.4 试样的表面轮廓变化十分明显。由于试样表面发生了塑性变形,冲击前高低起伏的铣削刀痕消失,轮廓曲线趋于平缓,这意味着激光冲击对试样表面有着显著的“塑形”作用;受冲击区域整体出现下沉,最低处约为 $10\ \mu\text{m}$,说明冲击后试样发生了表面塌陷^[20]。对于 Ra 0.6 和 Ra 0.2 试样,冲击后铣削刀痕同样消失,因此表面轮廓相较于原始轮廓变得更光滑;冲击后试样也出现了整体下沉,最低处约为 $10\ \mu\text{m}$,这与 Ra 1.4 试样冲击后表面轮廓的最大深度相近。总体来看,在冲击后3种试样的表面轮廓均呈现一定的周期性起伏变化,显然这种周期性变化与激光冲击条件有关。上述结果说明,对于具有不同初始表面粗糙度的平面铣削试样,经过激光冲击光整后制约其表面轮廓特征的因素由铣削加工参数变为激光冲击参数。

2.1.2 光斑搭接率的影响

选取 Ra 1.4 试样研究光斑搭接率对铝合金铣削平面表面微观形貌的影响,选取激光能量为 $2.5\ \text{J}$ 。在不同光斑搭接率下,经激光冲击光整后试样的3D表面形貌如图6所示。从图6a可知,当 $\eta=30\%$ 时,由于试样表面受冲击区域大部分属于只受到1次冲击的未重叠区,因而仍保留较明显的铣削加工痕迹,光整作用不够彻底。从图6b可知,当 $\eta=70\%$ 时,试样表面受冲击区域的铣削加工特征基本消失,表面形貌均匀性较好;此时受冲击区域的深度较大,与未受冲击区域相比,出现了明显的表面塌陷。这说明光斑搭接率与受冲击区域的深度和表面形貌的均匀性密切相关。增大光斑搭接率,意味着单位面积内光斑的数量增多,使得受冲击区域有更多机会受到2次或2次以上的激光冲击,因而试样表面的塑性变形程度更大,“塑形”效果更彻底,变形分布也更均匀,这有利于试样表面受冲击区域的深度趋于一致。值得注意的是,过大的光斑搭接率会造成受冲击区域过度沉降,从而影响零件尺寸精度。

在不同光斑搭接率下,经激光冲击光整后试样的2D表面轮廓如图7所示,可以看到,在不考虑试样边缘效应时,即 x 为 $1\sim 6\ \text{mm}$ 时,随着光斑搭接率的增大,试样表面轮廓的变化幅值有所减小,由 $\eta=30\%$ 时的 $6.88\ \mu\text{m}$ 减至 $\eta=70\%$ 时的 $6.20\ \mu\text{m}$;当 $\eta=70\%$ 时,经冲击后试样表面轮廓的周期性起伏已不明显,这进一步说明光斑搭接率对激光冲击后试样的表面形貌具有显著影响。值得注意的是,增大光斑搭接率意味着工艺能耗增大、成形效率降低,在设计激光冲击光

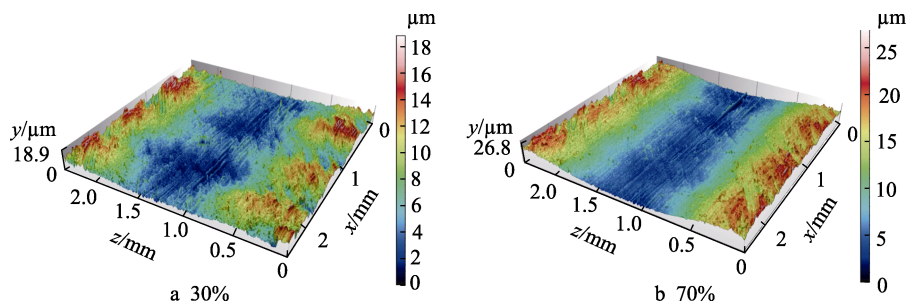


图6 不同光斑搭接率下激光冲击光整后试样的3D表面形貌

Fig.6 3D morphology of specimens under different overlapping rates after laser shock finishing

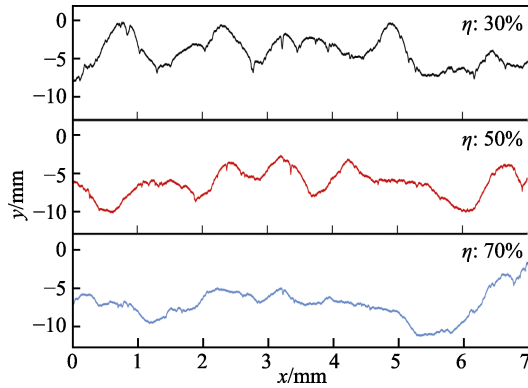


图 7 不同光斑搭接率下激光冲击光整后试样的 2D 表面轮廓

Fig.7 2D profiles of specimens under different spot overlapping rates after laser shock finishing

整参数时需予以综合考虑。在文中的实验条件下, $\eta=50\%$ 时效果相对较好。

2.1.3 激光能量的影响

在不同能量下, 经激光冲击光整后试样的 3D 表面形貌如图 8 所示, 此时 $\eta=50\%$ 。由图 8a 可知, 当 $E=1.5$ J 时, 试样表面受冲击区域的深度不均匀, 重叠区明显深于未重叠区。说明此时由于激光能量较小, 与吸收层相互作用形成的冲击波压力不足, 因而表面塑性变形程度较小, 对铣削刀痕的影响有限。随着激光能量的增强, 重叠区与未重叠区成形深度的差异不再明显, 如图 8b、c 所示。

在透明约束层 (水、玻璃等) 作用下, 由等离子体快速膨胀形成的激光冲击波幅值变大, 持续时间延长, 最终产生 GPa 量级的压力, 这是激光冲击光整工艺得以实现的前提^[23]。由于激光能量与形成的冲击波压力和材料的塑性变形密切相关, 有必要估算 1.5~4.5 J 时对应的冲击波压力。Fabbro 等^[24]提出一种一维等离子体爆轰波模型, 它能较准确地估算冲击波峰值压力 p_{\max} , 因而被广泛使用, 其表达式见式 (1)。

$$p_{\max} = 10^{-9} \sqrt{\left(\frac{\alpha}{2\alpha+3} \right) \cdot Z \cdot I_0} \quad (1)$$

式中: α 为能量转换系数, 通常取 0.1; I_0 为激光功率密度; Z 为约束层和靶材的联合声阻抗。

联合声阻抗 Z 由式 (2) 计算。

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

式中: Z_1 为约束层声阻抗; Z_2 为靶材声阻抗。

激光功率密度 I_0 由式 (3) 计算。

$$I_0 = \frac{4E}{\pi D^2 \tau} \quad (3)$$

式中: E 为激光能量; D 为激光光斑直径; τ 为激光脉冲宽度。这里取 $D=2$ mm, $\tau=12$ ns。

这里使用水作为约束层。由于接触膜会参与冲击波的形成过程, 故 Z_1 和 Z_2 分别为水和 60Si2CrVA 弹簧钢的声阻抗, 其数值分别为 1.65×10^6 、 4×10^7 kg/(m²·s)^[20]。在激光能量为 1.5~4.5 J 时, 由式 (1) 计算得到 p_{\max} 为 2.0~3.4 GPa, 而 2024 铝合金的动态屈服强度约为 385 MPa^[25], 因此在这里的激光能量条件下, 试样表面均发生了塑性变形, 且塑性变形程度随着激光能量的增强而增大。

在不同能量下, 经激光冲击光整后试样的 2D 表面轮廓如图 9 所示。在不考虑试样边缘效应时, 随着激光能量的增强, 试样表面轮廓的变化幅值分别为 6.92 (1.5 J)、6.71 (2.5 J)、5.22 (3.5 J)、6.18 μ m (4.5 J), 可以看到, 在一定激光能量范围内, 变化幅值存在最低值, 而能量过低或过高时均会增大变化幅值。朱然等^[26]研究发现, TC6 钛合金在受到平顶激光冲击时, 单光斑内的表面轮廓变化幅值随着激光能量的增强而持续增大。在多光斑搭接激光冲击过程中, 试样表面受到后续激光作用时, 不仅光斑覆盖区域内的材料会发生变形, 由于材料塑性变形的相互协调性, 前期已受激光冲击的部分相邻材料也会发生塑性变形, 从而引起表面轮廓的相应变化, 导致其塑性变形过程和结果与单光斑 (即无搭接) 冲击时明显不同。

2.2 表面粗糙度变化规律

2.2.1 光斑搭接率的影响

在不同光斑搭接率下, 经激光冲击光整后试样的表面粗糙度如图 10 所示, 激光能量选取 2.5 J。可以看出, 光斑搭接率对表面粗糙度的影响与试样的初始表面粗糙度有关。对于 Ra 1.4 试样, 在冲击后试样的表面粗糙度随着光斑搭接率的增大而首先呈下降的趋势, 在 50% 和 70% 时基本保持不变。这说明对于

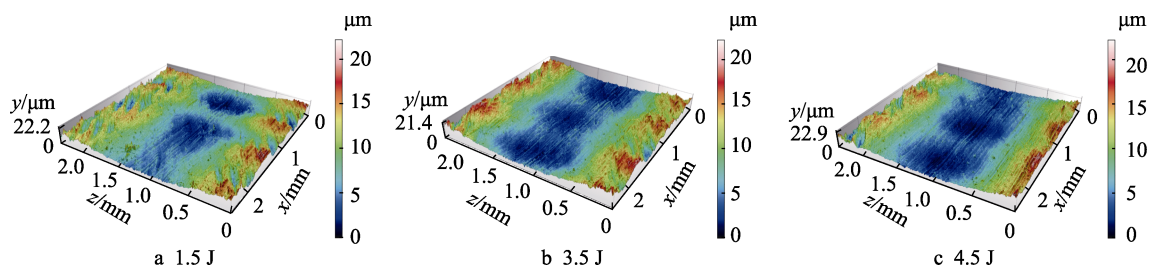


图 8 不同能量下激光冲击光整后试样的 3D 表面形貌

Fig.8 3D morphology of specimens under different laser energies after laser shock finishing

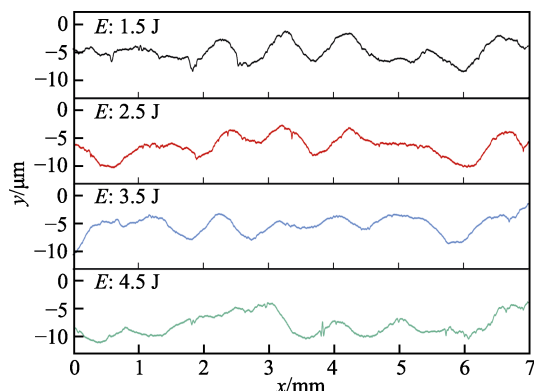


图9 不同能量下激光冲击光整后试样的2D表面轮廓
Fig.9 2D profiles of specimens under different laser energies after laser shock finishing

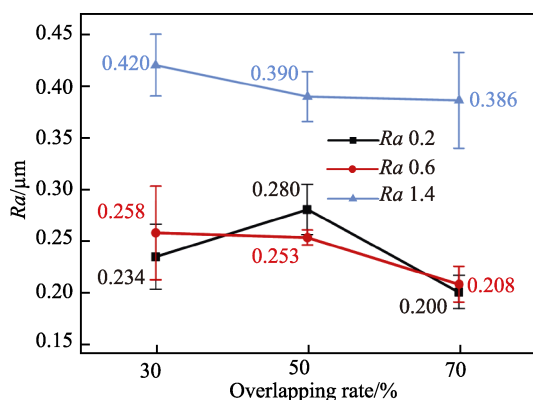


图10 不同光斑搭接率下激光冲击光整后试样的表面粗糙度
Fig.10 R_a under different spot overlapping rates after laser shock finishing

$R_a 1.4$ 试样, 单纯增大光斑搭接率不能持续降低表面粗糙度。这种现象与激光冲击处理 TC4 钛合金表面粗糙度的变化特点相近^[27]。通过分析认为, 当初始表面粗糙度较大时, 试样表面铣削刀痕高度差较大, 显然过高的峰在碾平过程中需要更大幅值的冲击波压力。由式(1)可知, 增大光斑搭接率不能增强冲击波压力幅值, 因此对试样表面质量的持续改善效果有限。将各光斑搭接率下冲击后试样的平均表面粗糙度与冲击前试样的平均表面粗糙度(表1)进行比较, 可以计算得到表面粗糙度的变化率。对于 $R_a 1.4$ 试样, 其表面粗糙度变化率分别为-70.8%(30%)、-72.9%(50%)、-73.2%(70%), 说明激光冲击光整效果十分显著。在激光冲击后, $R_a 0.6$ 试样的表面粗糙度随着光斑搭接率的增大也先下降, 但在光斑搭接率增至70%时, $R_a 0.6$ 试样的表面粗糙度依然明显下降; 表面粗糙度变化率由30%光斑搭接率下的-58.0%, 变为50%光斑搭接率下的-58.8%, 再变为70%光斑搭接率下的-66.1%。这说明当初始表面粗糙度处于较低数值时, 光斑搭接率的增大能够进一步调控试样的表面状态, 发生的塑性变形对于降低表面粗糙度仍然有利, 因而能够持续提升光整效果。对于

$R_a 0.2$ 试样, 当光斑搭接率为30%、50%时, 冲击后试样的平均表面粗糙度与冲击前相比反而增大; 在70%光斑搭接率下, 尽管表面粗糙度下降, 但变化率仅为-9.1%, 光整效果并不明显。这说明对于初始表面质量较高的试样, 单纯改变光斑搭接率并不能持续提升表面质量。

2.2.2 激光能量的影响

在不同能量下, 经激光冲击光整后试样的表面粗糙度如图11所示, 光斑搭接率选取50%。可以看到, 激光能量对表面粗糙度的影响与试样的初始表面粗糙度有关。 $R_a 1.4$ 试样的表面粗糙度随着激光能量的增强呈先减小后增大的趋势, 在3.5 J时获得最小值, 随后有所增大, 但增幅很小。这说明过高的激光能量使表层材料发生了过量塑性变形, 反而难以继续降低表面粗糙度, 甚至会引起表面粗糙度的上升。此外, 随着激光能量的增强, 激光与吸收层的相互作用得到强化, 吸收层材料的烧蚀程度更大, 导致留给后次冲击的未烧蚀吸收层面积减小, 这也会引起光整效率的降低。对于 $R_a 1.4$ 试样, 其表面粗糙度变化率分别为-68.1%(1.5 J)、-72.9%(2.5 J)、-74.6%(3.5 J)、-73.8%(4.5 J), 说明激光冲击的光整效果十分显著。综上可知, 合理选择激光能量对于提升光整效果十分重要, $R_a 1.4$ 试样在激光能量为3.5 J时的光整效果最好。 $R_a 0.6$ 试样在冲击后的表面粗糙度随着激光能量的增强呈先减小后增大的趋势, 在2.5 J时获得最小值, 随后有所波动, 但幅度不大; 与初始表面相比, 其表面粗糙度变化率分别为-49.2%(1.5 J)、-58.8%(2.5 J)、-54.4%(3.5 J)、-58.1%(4.5 J)。由此可见, 对于 $R_a 0.6$ 试样, 激光能量同样存在优选值, 表面粗糙度的最小值在2.5 J时获得。然而, 该值与 $R_a 1.4$ 试样不同, 说明对于不同初始粗糙度的试样, 应有针对性地选择激光能量, 以获得最优的光整效果。对于 $R_a 0.2$ 试样, 在文中所研究的激光能量范围内, 冲击后试样的表面粗糙度均高于初始值, 且随着激光能量的增强而不断增大。综上可知, 由于 $R_a 0.2$ 试样初始表面

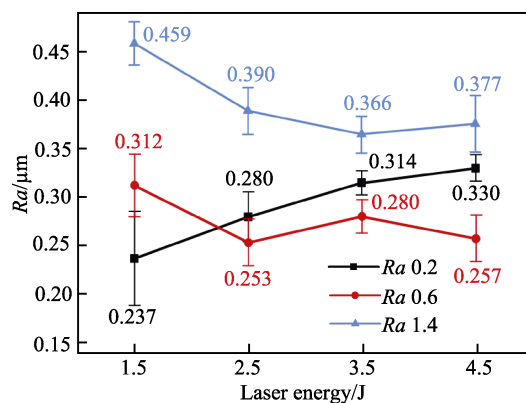


图11 不同能量下激光冲击光整后试样的表面粗糙度
Fig.11 R_a of specimens under different laser energies after laser shock finishing

已经足够光滑, 此时通过增大光斑搭接率或增强激光能量的方式均不能进一步有效提升其表面质量。通过调整接触膜的特性, 如接触膜的材质、厚度、表面粗糙度, 可能有助于改善 Ra 0.2 试样的表面光整效果, 这将在后续研究中予以关注。

值得注意的是, 文中的研究工作仅考虑了激光能量和光斑搭接率对铝合金铣削平面表面质量的影响, 未对各影响因素之间的关联性进行分析。在后续研究工作中, 应针对各个影响因素选择合适值, 进一步采取多因素实验分析方法 (如正交实验设计方法) 对各个影响因素之间的交互作用进行分析, 以更加全面地认识激光冲击光整时各个因素对表面质量的作用规律。

3 结论

1) 铝合金铣削平面经过激光冲击光整处理后, 铣削刀痕消失, 表面形貌发生重塑, 制约表面质量的因素由铣削加工参数变为激光冲击参数。

2) 增大光斑搭接率能够改善试样表面形貌的均匀性, 同时加大了受冲击区域的深度, 造成表面塌陷。增强激光能量能够有效去除铣削刀痕, 过高或过低的激光能量均不利于减小试样表面轮廓的变化幅值。

3) 光斑搭接率和激光能量对表面粗糙度的影响均与试样的初始表面粗糙度有关。对于初始表面粗糙度较低的试样 (如 $Ra=0.220\ \mu\text{m}$), 通过增大光斑搭接率或增强激光能量均不能进一步有效提高表面质量。

4) 对于初始表面粗糙度 $Ra=1.439\ \mu\text{m}$ 和 $Ra=0.614\ \mu\text{m}$ 试样, 增大光斑搭接率和增强激光能量均能显著降低表面粗糙度, 合理选择激光冲击参数能够获得最佳的表面光整效果。

参考文献:

- [1] 管仁国, 姜花芬, 黄晖, 等. 铝合金材料发展现状、趋势及展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 68-75.
GUAN Ren-guo, LOU Hua-fen, HUANG Hui, et al. Development of Aluminum Alloy Materials: Current Status, Trend, and Prospects[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 68-75.
- [2] 张建巧, 孙旋, 罗兆伟. 激光熔化沉积铝合金显微组织及力学性能[J]. 精密成形工程, 2022, 14(10): 133-138.
ZHANG Jian-qiao, SUN Xuan, LUO Zhao-wei. Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Alloy Deposited by Laser Melting[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(10): 133-138.
- [3] LIAO Zhi-rong, MONACA A, MURRAY J, et al. Surface Integrity in Metal Machining-Part I: Fundamentals of Surface Characteristics and Formation Mechanisms[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021, 162: 103687.
- [4] HAN Wei, FANG Feng-zhou. Fundamental Aspects and Recent Developments in Electropolishing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 139: 1-23.
- [5] ZHU Wu-le, BEAUCAMP A. Compliant Grinding and Polishing: A Review[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 158: 103634.
- [6] KRISHNAN A, FANG Feng-zhou. Review on Mechanism and Process of Surface Polishing Using Lasers[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2019, 14(3): 299-319.
- [7] 李应红. 激光冲击强化理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 6-21.
LI Ying-hong. Theory and Technology of Laser Shock Processing[M]. Beijing: Science Press, 2013: 6-21.
- [8] ZHANG Chao-yi, DONG Ya-lin, YE Chang. Recent Developments and Novel Applications of Laser Shock Peening: A Review[J]. Advanced Engineering Materials, 2021, 23(7): 2001216.
- [9] 乔红超, 胡宪亮, 赵吉宾, 等. 激光冲击强化的影响参数与发展应用[J]. 表面技术, 2019, 48(12): 1-9.
QIAO Hong-chao, HU Xian-liang, ZHAO Ji-bin, et al. Influence Parameters and Development Application of Laser Shock Processing[J]. Surface Technology, 2019, 48(12): 1-9.
- [10] ZHENG Chao, PAN Chang-dong, WANG Ji-lai, et al. Mechanical Joining Behavior of Cu-Fe Dissimilar Metallic Foils in Laser Shock Clinching[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(3/4): 1001-1014.
- [11] 聂祥樊, 李应红, 何卫锋, 等. 航空发动机部件激光冲击强化研究进展与展望[J]. 机械工程学报, 2021, 57(16): 293-305.
NIE Xiang-fan, LI Ying-hong, HE Wei-feng, et al. Research Progress and Prospect of Laser Shock Peening Technology in Aero-Engine Components[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(16): 293-305.
- [12] SALIMIANRIZI A, FOROOZMEHR E, BADROSSAM-AY M, et al. Effect of Laser Shock Peening on Surface Properties and Residual Stress of Al6061-T6[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 77: 112-117.
- [13] 王佳波. 激光和超声冲击复合强化 AISI304 不锈钢摩擦磨损性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020: 26-27.
WANG Jia-bo. Study on Friction and Wear Properties of AISI304 Stainless Steel Strengthened by Laser and Ultrasonic Impact[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020: 26-27.
- [14] WEI Bo-xin, XU Jin, CHENG Y, et al. Microstructural Response and Improving Surface Mechanical Properties of Pure Copper Subjected to Laser Shock Peening[J]. Applied Surface Science, 2021, 564: 150336.
- [15] YANG Hai-feng, XIONG Fei, WANG Yan, et al. Manufacturing Profile-Free Copper Foil Using Laser Shock Flattening[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 152: 103542.
- [16] DAI Feng-ze, ZHANG Yong-kang, LU Jin-zhong, et al. A Method to Decrease Surface Roughness in Laser Shock Processing[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 261: 35-40.
- [17] DAI Feng-ze, ZHOU Jian-zhong, LU Jin-zhong, et al. A

- Technique to Decrease Surface Roughness in Overlapping Laser Shock Peening[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 370: 501-507.
- [18] DAI Feng-ze, GENG Jie, REN Xu-dong, et al. Dynamic Response of Surface Micro-Features Subjected to a Laser Shock Wave Planishing Technique[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 742: 54-65.
- [19] DAI Feng-ze, GENG Jie, REN Xu-dong, et al. Surface Roughness Control of LY2 Aluminum Alloy Milled Surface Subjected to Laser Shock Wave Planishing Processing[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 486: 121-127.
- [20] DAI Feng-ze, PEI Zhi-peng, REN Xu-dong, et al. Effects of Different Contact Film Thicknesses on the Surface Roughness Evolution of LY2 Aluminum Alloy Milled Surface Subjected to Laser Shock Wave Planishing[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 403: 126391.
- [21] DAI Feng-ze, PEI Zhi-peng, REN Xu-dong, et al. Surface Dynamic Deformation of LY2 Aluminum Alloy Subjected to a Laser Shock Wave Planishing Technique with Different Kinds of Contacting Foils[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 126: 106074.
- [22] GB/T 1031—2009, 产品几何技术规范(GPS) 表面结构轮廓法 表面粗糙度参数及其数值[S].
GB/T 1031-2009, Geometrical Product Specifications (GPS)-Surface Texture: Profile Method-Surface Roughness Parameters[S].
- [23] GAO Huang, HU Yao-wu, XUAN Yi, et al. Large-Scale Nanoshaping of Ultrasoother 3D Crystalline Metallic Structures[J]. *Science*, 2014, 346(6215): 1352-1356.
- [24] 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.
- [25] NGIEJUNBWEN L A, SHANGGUAN Jian-feng, ASAMOAH E, et al. Experimental Investigation of Sheet Metal Forming of Aluminum 2024 Using Nanosecond Pulsed Nd: YAG Laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 133: 106528.
- [26] 朱然, 谢地辉, 朱帅光, 等. 高频率 Nd: YLF 平顶激光冲击对 TC6 钛合金表面应力及微变形的影响[J]. *金属热处理*, 2022, 47(3): 204-210.
ZHU Ran, XIE Di-hui, ZHU Shuai-guang, et al. Effect of High Frequency Nd: YLF Flat-Top Laser Shock on Surface Stress and Micro-Deformation of TC6 Titanium Alloy[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2022, 47(3): 204-210.
- [27] 徐硕, 苏波泳, 花国然, 等. 激光冲击强化对 TC4 钛合金表面 TiN 涂层界面结合性能的影响[J]. *表面技术*, 2022, 51(3): 315-325.
XU Shuo, SU Bo-yong, HUA Guo-ran, et al. Effect of Laser Shock Peening on the Interfacial Bonding Properties of TiN Coatings on TC4 Titanium Alloy[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(3): 315-325.

责任编辑: 彭颖

(上接第 387 页)

- [35] BOETTINGER W J, AZIZ M J. Theory for the Trapping of Disorder and Solute in Intermetallic Phases by Rapid Solidification[J]. *Acta Metallurgica*, 1989, 37(12): 3379-3391.
- [36] ZHANG Du-yao, QIU Dong, GIBSON M A, et al. Additive Manufacturing of Ultrafine-Grained High-Strength Titanium Alloys[J]. *Nature*, 2019, 576(7785): 91-95.
- [37] 汤雁冰, 沈新旺, 刘志红, 等. 激光选区熔化 Inconel 718 合金在 NaOH 溶液中的腐蚀行为[J]. *金属学报*, 2022, 58(3): 324-333.
TANG Yan-bing, SHEN Xin-wang, LIU Zhi-hong, et al. Corrosion Behaviors of Selective Laser Melted Inconel 718 Alloy in NaOH Solution[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2022, 58(3): 324-333.
- [38] GAO Ming-hao, ZHANG Suo-de, YANG Bai-jun, et al. Influence of Yttrium on Surface Chemistry and Stability of Passive Film in Al-Based Binary Metallic Glasses[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 457: 536-547.
- [39] 崔洪芝, 姜迪. 高熵合金涂层研究进展[J]. *金属学报*, 2022, 58(1): 17-27.
CUI Hong-zhi, JIANG Di. Research Progress of High-Entropy Alloy Coatings[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2022, 58(1): 17-27.
- [40] SHU F, WANG B, ZHAO H, et al. Effects of Line Energy on Microstructure and Mechanical Properties of CoCrFeNiBSi High-entropy Alloy Laser Cladding Coatings[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2020, 29(4): 789-797.
- [41] WAN Hong-xia, SONG Dong-dong, SHI Xiao-lei, et al. Corrosion Behavior of $\text{Al}_{0.4}\text{CoCu}_{0.6}\text{NiSi}_{0.2}\text{Ti}_{0.25}$ High-Entropy Alloy Coating via 3D Printing Laser Cladding in a Sulphur Environment[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 60: 197-205.
- [42] IZADI M, SOLTANIEH M, ALAMOLHODA S, et al. Microstructural Characterization and Corrosion Behavior of $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ High Entropy Alloys[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2021, 273: 124937.
- [43] CHENG Pei-ze, ZHONG Ning, DAI Nian-wei, et al. Intergranular Corrosion Behavior and Mechanism of the Stabilized Ultra-Pure 430LX Ferritic Stainless Steel[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(8): 1787-1796.
- [44] PRATSKOVA S, SAMOILOVA O, AGEENKO E, et al. Corrosion Resistance of $\text{Al}_x\text{CoCrFeNiM}$ ($M = \text{Ti, V, Si, Mn, Cu}$) High Entropy Alloys in NaCl and H_2SO_4 Solutions[J]. *Metals*, 2022, 12(2): 352.
- [45] DAI Chun-duo, ZHAO Tian-liang, DU Cui-wei, et al. Effect of Molybdenum Content on the Microstructure and Corrosion Behavior of FeCoCrNiMo_x High-Entropy Alloys[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 46: 64-73.

责任编辑: 刘世忠