

铝合金表面激光冲击纳米 WC 颗粒注入强化研究

吕 亮 黄 婷 钟敏霖

(清华大学机械系激光加工研究中心, 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要 发展了一种新的强化方法——基于激光冲击的纳米颗粒注入强化, 即利用激光冲击产生的 GPa 量级压力将预置的纳米 WC 颗粒注入铝合金表面实现复合强化。激光冲击强化技术利用光致冲击波作用材料表面, 引入残余应力, 提高材料表面性能。作为一种冷加工手段, 这种方法避免了铝合金常规热强化方法容易产生的低熔点元素烧损、气孔、裂纹等缺陷, 也避免了常规添加纳米材料强化时纳米颗粒由于熔点较低所造成的熔化凝固而失去纳米特性的问题。研究了激光冲击纳米 WC 颗粒的工艺、参数影响, 复合强化层的硬度、残余应力和摩擦学性能等。研究表明, 激光冲击注入 WC 纳米颗粒增强复合涂层表面硬度相对初始状态提高了 20%, 表面残余应力状态由拉应力状态转变为压应力状态, 其耐磨性是原始铝合金的 5 倍, 是单纯激光冲击的 1.5 倍。

关键词 激光技术; 激光冲击强化; 注入强化; 纳米颗粒; 复合涂层

中图分类号 TN249; TG665

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201138.1203006

WC Nano-Particle Implanting Strengthening on Aluminum Alloy Surface Via Laser Shock Peening

Lü Liang Huang Ting Zhong Minlin

(Key Laboratory for Advanced Materials Processing, Ministry of Education, Laser Processing Research Centre, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract We have developed a novel process: nano powder implanting via laser shock peening process, by which the nano powders are squeezed into the surface layer of light metal alloys by the very high pressure (up to giga pascals) induced by the laser shock peening process. Laser shock peening hardens the material surface by the laser-induced shock wave and the residual compressive stress, it is typically a cold process, which is capable of avoiding the defects like the melting loss of the lower-melting-point elements, porosity, cracking and surface deterioration associated with a conventional thermal hardening approaches of aluminum alloys. This also eliminates the problem when hardening a material with nanoparticles, that is, the easy melting of nano particles in a melt pool and then solidified a microstructure without nano characteristics. This paper reports the work on nano WC powder implanting onto aluminium alloy surface by laser shock peening, focusing on the process development, parameter influence, microstructure, hardness, residual stress and wear resistance. The research approves that after implanting of WC nano particles by laser shock peening, the surface hardness of aluminum alloy is enhanced by 20%, wear resistance increases 5 times than that of original aluminum and 1.5 times than that of the only laser shock peened surface. The surface tensile state of aluminum alloy is changed to be beneficial compressive state at the same time.

Key words laser technique; laser shock peening; implanting; nano particle; composite coatings

OCIS codes 140.3390; 140.3440; 140.3540; 350.3390; 350.3850

1 引 言

铝合金由于其质量轻、比强度高以及良好的耐

蚀性等突出特点, 作为结构材料广泛应用于航空航天、汽车电子、航运业等许多领域^[1]。同时, 作为可

收稿日期: 2011-10-08; 收到修改稿日期: 2011-10-11

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50735001)资助课题。

作者简介: 吕 亮(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事材料激光加工方面的研究。E-mail: lliang701@163.com

导师简介: 钟敏霖(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光成形制造和激光微纳制造等方面的研究。

E-mail: zhml@mail.tsinghua.edu.cn(中国光学学会会员号: z1009195)

回收能持续重复利用的材料,铝合金还能够起到减少材料和能源消耗,保护环境的作用。但是,较低的表面硬度和较差的表面耐磨性能限制了铝合金的使用寿命和应用范围。针对铝合金较差的表面性能,已经报道了多种表面改性方法,包括等离子喷涂技术、微弧氧化、激光熔覆、激光合金化以及多种热处理方法,都能取得较好的效果。但是,这些表面改性方法,大多伴随着高温熔化与凝固等热过程,往往会导致合金中低熔点元素的熔化与气孔等缺陷,严重时还会出现裂纹,降低了铝合金的表面质量^[2~4]。

激光冲击强化(LSP)技术,也称激光喷丸技术,是通过高功率密度(GW/cm^2 量级)、短脉冲(10~30 ns量级)激光作用于金属表面形成等离子体,继而形成高强度冲击波作用于金属表面,改善金属表层性能的技术。当冲击波的峰值压力超过材料的动态屈服强度时,材料表层发生塑性变形,形成较高的残余压应力。残余压应力会降低交变载荷中的拉应力水平,使平均应力水平下降,从而提高疲劳裂纹萌生寿命。同时残余压应力的存在,可引起裂纹的闭合效应,从而有效降低疲劳裂纹扩展的驱动力,延长疲劳裂纹扩展寿命^[5,6]。与传统喷丸强化技术相比,激光冲击强化技术具有高压、高能、高应变率、非热、非接触等多种优异特性,激光冲击强化技术也是美国第四代战机发动机叶片的关键强化技术之一,具有广阔的应用前景。

纳米粉末由于众多优良的纳米尺度效应而越来越多地被应用于现代材料加工技术中,在传统的材料加工工艺中使用纳米材料通常能够有效地提高加工处的性能。由于比表面能很高,纳米粉末的熔点明显低于宏观尺寸的同种材料,在相对高温处理的环境中很容易熔化,凝固后会失去其独特的纳米尺度特征性能。

利用激光冲击技术,结合纳米粉末的独特性能,能够在铝合金表面形成一层注入纳米粉末的复合强化涂层,有助于提高铝合金的表面性能。由于激光冲击强化的非热特性,涂层表面为压应力状态,避免了熔化凝固过程中由于拉应力而导致的表面裂纹缺陷。表面的纳米粉末在激光冲击的超高冲击力下,能与材料本身形成良好的结合,并实现纳米材料在表面强化中优异的性能。

清华大学机械系激光加工研究中心综合激光冲击的冷加工特征与纳米碳化物颗粒的优良特性,发展了“轻金属表面激光冲击微纳米颗粒注入强化方法”(中国发明专利)。本文研究用激光冲击方法将

纳米 WC 颗粒注入铝合金表面制备纳米 WC 颗粒增强复合涂层的技术、工艺参数的影响、纳米颗粒与基体之间的界面结合状况、纳米涂层的硬度和摩擦学性能等。球-盘摩擦磨损实验证实,经激光冲击纳米 WC 颗粒注入强化的铝合金表面硬度提高 2 倍以上,耐摩擦性能相对于未处理的轧制态铝合金提高 5 倍以上,相对于仅用激光冲击的铝合金表面提高 50% 以上。

2 实验材料、设备及方法

图 1 所示为激光冲击注入纳米 WC 颗粒制备强化复合涂层的示意图。冲击试样由铝合金、纳米颗粒涂层、吸收层与约束层组成。当高功率密度(GW/cm^2 量级)、短脉冲(纳米级)激光束透过透明约束层作用于覆盖在材料表面的吸收层上,吸收层吸收激光能量气化,气化后的蒸气经进一步吸收激光能量形成等离子体而爆炸产生冲击波即应力波,冲击波由于受到约束层的约束而向材料内部传播,当冲击波峰值压力超过材料动态屈服强度极限时,使材料发生塑性变形而在材料的表层形成残余压应力,同时改变了材料表层的微结构。纳米 WC 颗粒涂层夹在吸收层与目标金属之间,在高达 GPa 量级的应力波作用下,纳米颗粒被压入金属基体表面,由几乎无结合作用的吸附方式转变为机械咬合或“微焊合”等较强界面结合方式,形成纳米颗粒增强复合涂层。约束层能提高激光诱发的冲击波的峰值压力并延长其对材料的作用时间,吸收层除有效吸收激光外,还使金属材料表面不受热作用而烧伤。

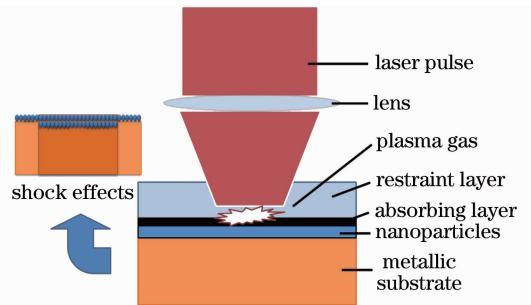


图 1 激光冲击纳米颗粒注入强化轻金属原理示意图
Fig. 1 Schematic of nano-particle implanting via laser shock peening

激光冲击处理系统由 Nd:YAG 激光器、光路调整平台、工件运动系统及送水装置 4 部分组成。激光器的主要技术指标为:波长 1064 nm,光斑直径分别为 6 mm 和 9 mm,脉宽 30 ns,单脉冲最大输出能量可达 50 J。

实验中使用的铝合金基体为变形防锈铝合金 5A06, 厚度为 3 mm, 轧制态, 其化学成分如表 1 所示。

表 1 5A06 铝合金化学成分(质量分数, %)

Table 1 Component of 5A06 aluminum alloy (mass fraction, %)

	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Al	Other
5A06 Al alloy	5.8~6.8	0.5~0.8	≤0.4	≤0.4	≤0.2	Bal.	≤0.2

实验中选择黑漆为吸收层材料, 它能够保护材料表面不被激光烧蚀, 并有利于等离子体产生和吸收。约束层采用 K9 玻璃和流动水, 是两种常用的激光冲击约束层材料。实验对比了两种约束层材料对于纳米颗粒注入效果的影响。实验中使用的硬质相强化纳米粉末选用 WC 纳米粉末, 平均粒度为 100 nm。

铝合金基体在实验前进行预处理, 用线切割设备切成边长为 10 mm、厚度为 3 mm 的正方形试样块, 将待处理表面打磨抛光至镜面。基体表面依次预置纳米 WC 粉末层、黑漆吸收层与 K9 玻璃约束层(水约束层在实验时利用流水产生), 制成预处理试样。激光冲击实验后, 去除试样表面的约束层与吸收层, 并用乙醇对处理表面进行超声清洗。采用 QUANTA 200 FEG 扫描电子显微镜(SEM)观察冲击涂层形貌, 显微硬度计测量硬度, 西门子 08DISCOVER 高分辨率衍射仪检测涂层表面应力

状态, 采用 CETR-UMT 球-盘磨损试验机对涂层摩擦学性能进行测试。

3 实验结果

3.1 纳米颗粒增强涂层形貌分析

图 2(a)为激光冲击注入纳米颗粒增强涂层的表面形貌扫描电镜背散射照片。图片中的白色颗粒即为注入的 WC 纳米颗粒, 由于其原子量明显比铝基体高, 呈现亮色。从照片中可以看出, 纳米 WC 颗粒嵌入涂层表层, 与涂层表面相结合。涂层表面无明显加热熔化所形成的熔池痕迹。WC 颗粒的纳米尺寸效应使得颗粒呈现聚集现象。激光冲击过程产生的冲击波, 对聚集的颗粒起到了一定的分散作用。由于激光冲击 GPa 量级压强带来的短时间强大冲击力, 在 Al 合金基体表面形成了一层较深的塑性变形层, 部分晶粒在塑性形变过程中, 由于冲击应力超过基体材料屈服强度, 而形成材料表面宏观起伏。

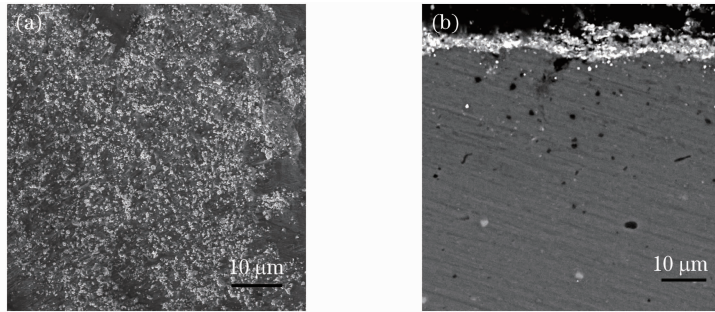


图 2 激光冲击注入纳米颗粒涂层表面形貌(a)与截面形貌(b) SEM 照片

Fig. 2 SEM images of (a) surface and (b) cross-section morphologies after implanting nano-particles

图 2(b)显示了激光冲击形成的复合涂层的横截面形貌。从图中可以看出在材料表层受冲击区存在密集的 WC 纳米颗粒, 带状颗粒聚集区与基体塑性变形区界面清晰连续, 复合涂层呈现出上层“硬质纳米颗粒层”, 下层“塑性变形层”的双层强化结构。图片显示纳米颗粒的强化深度约为几个微米。

根据 Peyre 等^[7]建立的冲击波一维模型, 冲击波的峰值压力可以估算为

$$P_{\max} = 0.1 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \sqrt{Z} \sqrt{I_0}, \quad (1)$$

式中 I_0 为脉冲激光能量密度, Z 为约束层阻抗, α 为

特征因子。可以看到峰值压力的平方与脉冲激光能量密度和约束层阻抗成正比。如果要得到更高的峰值压力, 可以选择提高激光能量密度, 或者选用高阻抗约束层(用玻璃代替流水作为约束层)。

由激光器参数, 取单脉冲能量 $Q = 40$ J, 脉宽 $\tau = 30$ ns, 光斑直径 $d = 0.6$ cm, 衰减因子 $\beta = 0.45$, 得 $I_0 = 2.12$ GW/cm²。由文献[5]可知, 取 $\alpha = 0.15$, $Z = 1.3 \times 10^6$ g/(cm²·s), 代入 I_0 , 得到 $P_{\max} = 3.54$ GPa, 大大超过了铝合金的动态屈服强度。

Gurney 模型^[8]是根据能量守恒和动量守恒计算炸药驱动飞片速度的一个近似一维方法, 公式为

$$\begin{cases} m_b E_g = \frac{1}{2} m_b v_b^2 + \frac{1}{2} m_f v_f^2 \\ \frac{v_f}{v_b} = \ln\left(\frac{m_0}{m_f}\right) \end{cases}, \quad (2)$$

式中 m_b 和 m_f 分别表示单位面积上等离子体和飞片的质量, m_0 为飞片总质量, $m_b + m_f = m_0$, E_g 为激光沉积在飞片上转化为等离子体和飞片动量的那部分能量, v_b 和 v_f 分别是等离子体的速度和飞片的速度。

由于激光冲击过程, 能量沉积与炸药爆炸驱动类似, 因此 Gurney 模型也被常常用来进行激光驱动飞片理论分析。如果将吸收层与粉末层看作成一个整体复合层, 其表面尺寸远大于其厚度, 与飞片类似, 可采用 Gurney 模型计算纳米 WC 颗粒在激光冲击能量沉积作用下获得的初速度 v_f 。

对于由吸收层与纳米粉末层组成的双层复合结构, 由于等离子体主要来源于吸收层, 因此 m_b 可以认为即吸收层质量, m_f 即为粉末层质量。令吸收层厚度与粉末层厚度比值为 h , 则有:

$$\frac{m_b}{m_f} = h \frac{\rho_b}{\rho_f}. \quad (3)$$

由(2)式, 并将(3)式代入化简得到, 纳米 WC 颗粒的速度 v_f 表达式为

$$v_f = \sqrt{\frac{\frac{2m_b E_g}{m_b} + m_f}{\ln^2\left(\frac{m_0}{m_f}\right)}} = \sqrt{\frac{\frac{2E_g}{1} + \frac{\rho_f}{\rho_b h}}{\ln^2\left(\frac{\rho_b h}{\rho_f} + 1\right)}}. \quad (4)$$

令黑漆密度 $\rho_b = 1.15 \text{ g/cm}^3$, WC 密度为 15.63 g/cm^3 , 取孔隙率为 60% , 令 $\rho_f = 9.378 \text{ g/cm}^3$, $h = 5$, $E_g = 15.9 \times 10^4 \text{ J/m}^2$, 得到 $v_f = 230 \text{ m/s}$ 。

由上述初步计算得出, 激光冲击产生了约 3.54 GPa 的压力, 使得纳米 WC 产生约 230 m/s 的初速度, 完全有可能将预置的纳米 WC 颗粒注入铝

合金表层。

3.2 工艺参数对涂层形貌控制的影响

作为颗粒增强涂层, 纳米颗粒的均匀分布对于涂层的整体性能起重要作用, 通过(1)式可以看出, 冲击波压力与激光脉冲功率相关, 与约束层种类相关, 通过改变约束层与激光脉冲功率, 可以改变冲击波压力分布, 从而影响纳米颗粒在涂层表面的分布情况。由于纳米颗粒分布在复合涂层的表层与近表层, 因此可以通过拍摄扫描电镜照片, 然后运用图像处理软件对颗粒分布形态进行分析。

为了描述纳米颗粒的分布特性, 引入了颗粒面积比(ENP)与颗粒分散度(NDD)两个指标, 颗粒面积比是指纳米颗粒覆盖区域占整个激光冲击区涂层表面的百分比, 它反应了颗粒在涂层中的密度分布情况, 面积比越大, 说明颗粒在涂层中的分布密度越高。颗粒分散度则反映了纳米颗粒在涂层中的分散情况, 分散度数值越大, 说明纳米颗粒的分散情况越好, 分布越均匀。分散度公式为

$$f_{\text{NDD}} = \frac{\left(\sum_{n=k}^{n=k} S\right)^2}{\sum_{n=1}^{n=k} S^2}. \quad (5)$$

图 3(a)、(b)为分别采用玻璃和水作为约束层得到的复合涂层形貌照片。从图中可以看出, 利用 K9 玻璃作为约束层, 复合涂层中能保留更多的纳米 WC 颗粒, 而利用流水作为约束层时, 复合涂层中纳米 WC 颗粒含量相对较少。这是由于玻璃的冲击波阻抗大于流水, 由(1)式可知, 利用玻璃作为约束层时, 能够产生更高的峰值压力, 因而有更多的纳米颗粒注入表层。实验指出, 用流水作为约束层时, 纳米颗粒具有更好的分散性, 分布较为均匀, 大块颗粒集聚情况较少, 这体现了流水约束层的柔性特征。分散度数值越高, 表示颗粒分散均匀, 材料表面的性能也就越均匀, 涂层的实际应用特性会更好。

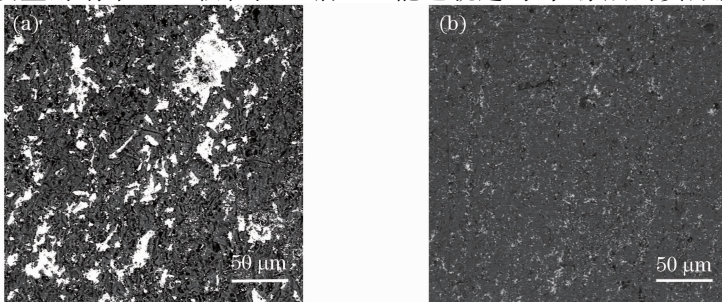


图 3 不同约束层纳米颗粒增强复合涂层形貌对比。(a) K9 玻璃作为约束层; (b) 水作为约束层
Fig. 3 Surface morphologies with different restraint layers. (a) With restraint layer of K9 glass; (b) with restraint layer of water

图 4 表示激光功率密度对颗粒分布情况的影响。从图中可以看到,随着激光功率的增强,表面的颗粒面积比增加,也就是单位面积内的硬质颗粒更多,但是伴随而来的问题是这些颗粒分布可能出现

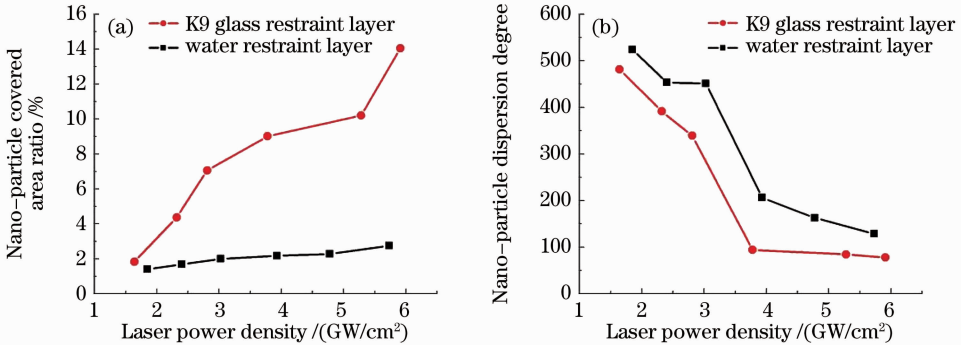


图 4 激光功率密度对颗粒分布的影响。(a)颗粒面积比;(b)颗粒分散度

Fig. 4 Distribution of nano-particles under different laser power densities. (a) Area ratio; (b) dispersion degree

3.3 硬度与残余应力状态分析

图 5 显示激光冲击注入纳米 WC 颗粒强化涂层截面的显微硬度分布。可以看到自表面向下约 100 μm 深度范围内,平均显微硬度为 120HV,明显高于基体显微硬度 100HV。可以认为激光冲击产生的残余压应力硬化层厚度大致为 100 μm。同时可以发现,与单纯激光冲击强化造成表层硬度最高不同,添加纳米颗粒后,近表层硬度最高,表层硬度低于近表层硬度。原因主要是因为纳米颗粒在冲击波作用下冲击并注入金属表面时,改变了金属表面的形貌微结构,金属表面被冲出微坑,产生结构微起伏,使得坑底的显微硬度高于材料表面。从光镜照片中,能看到由于冲击塑性变形而产生的滑移带,这也是金属表面由于冲击压缩而硬化的有力证据。

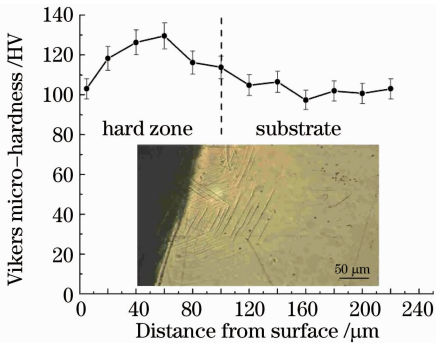


图 5 复合涂层横截面显微硬度分析

Fig. 5 Micro-hardness results along the depth of the strengthening coatings

为了更好地研究激光冲击注入纳米颗粒的强化效果,还进行了不同工艺处理对照实验,分别为空白组(铝合金基材,不做任何处理)、粉末组(用粘结剂

不均匀的问题,颗粒的分散度与激光功率密度呈现负相关的特性。同时,使用 K9 玻璃作为约束层能得到更高的颗粒面积比数值,但是相对来说,分散度的数据就会不理想。

在铝合金基材表面粘结纳米 WC 颗粒)、冲击组(对基材表面进行激光冲击强化处理,不注入纳米 WC 颗粒)与复合组(进行激光冲击纳米颗粒注入强化处理)。研究对比这 4 种不同工艺条件处理下,铝合金的表面硬度、残余应力状态以及耐摩擦磨损性能的测试结果。

图 6 显示铝合金在 4 种不同处理工艺下表面硬度的对比结果。测试结果显示,原始铝合金基体(空白组)表面硬度值为 97.8HV,粘结纳米 WC 涂层后,表面硬度值略有提高,为 HV100.3,相对空白组,冲击组与复合组表面硬度值都有较大幅度的提高,分别提升至 109.3HV 与 119.4HV,4 种处理工艺中,复合组表面硬度值最高,较基体原始硬度值提高了 20%,较单纯激光冲击强化层提高了 9%。值得注意的是,复合组硬度的提高并不是粉末组与冲击组硬度提高值的简单加和,在对表面硬度提高的贡献中,既有纳米颗粒(2.5HV)与激光冲击强化

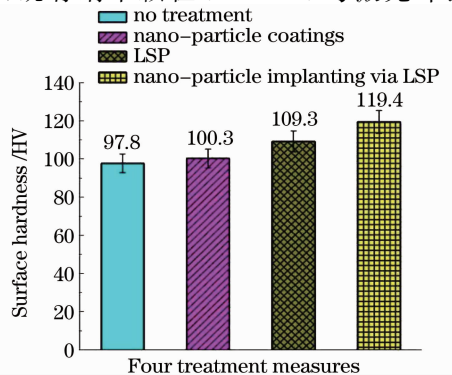


图 6 不同处理工艺下表面硬度值的对比
Fig. 6 Surface hardness results under four treatment measures

(11.5HV)的单独贡献,更包括两者复合作用产生的耦合贡献结果(7.9HV)。这种耦合效应体现在纳米颗粒的“微冲击”强化效果,纳米颗粒在激光冲击产生的超高压作用高速撞击基体,产生类似“飞片增压”的作用效果,使得冲击强化效果大大增强,进一步提高铝合金基体表面硬度。从图中可以看到,经过激光冲击纳米颗粒注入增强涂层处理,并且,表面应力状态由拉应力状态转变为-164 MPa的压应力状态,与直接进行激光冲击强化处理效果相当。

图7显示铝合金在4种不同处理工艺下表面残余应力的比较结果。从测试结果可以看出,空白组与粉末组表面均为20 MPa左右的残余拉应力状态,这表明铝合金基体的表面应力状况不是十分理想。而在冲击组与复合组,铝合金基体表面应力状态均由拉应力状态转变为更理想的压应力状态,两组实验结果的压应力值分别达到了196 MPa和164 MPa。关于激光冲击对于材料表面应力状态的改善,已有诸多报道,都取得了不错的效果。复合组的结果表明,加入纳米颗粒进行复合作用强化后,仍然能够大幅改善铝合金基体的表面应力状态。同时也看到,相对于单纯激光冲击强化,复合强化得到的表面残余压应力值减少了32 MPa。由于残余应力的测量对材料的表面状态比较敏感,复合强化过程中由于纳米WC颗粒对铝合金基体表面挤压而引起的表面形貌宏观起伏将影响到表面压应力测量结果。

3.4 摩擦磨损实验结果分析

图8显示铝合金在4种不同处理工艺下球-盘摩擦学实验结果,使用直径6 mm 不锈钢球作为对磨球,铝合金做成外直径30 mm,内直径15 mm的

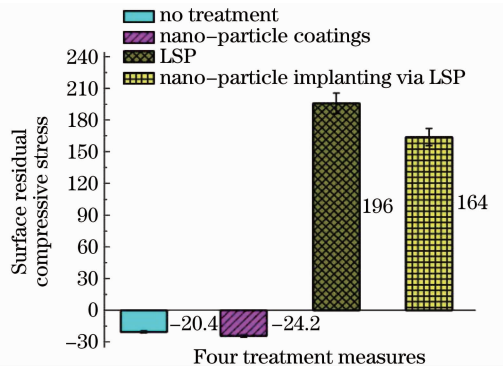


图7 不同处理工艺下表面残余应力值的对比
Fig. 7 Surface residual stress results under four treatment measures

环状试样。摩擦磨损实验条件为室温、干摩擦、无润滑状态。工艺参数为:跑合期一阶段,载荷2 N,转速100 r/min,时间1 min;跑合期二阶段,载荷2 N,转速300 r/min,时间1 min;磨合期,载荷10 N,转速300 r/min,时间5 min。采用失重法评价不同工艺条件的耐磨性效果。图8(a)显示的是磨损量以及相对耐磨性的比较,图8(b)显示的是摩擦系数的比较结果。从图8(a)中可以看到,空白组的磨损量最大,达到了0.41 g,粉末组、冲击组、复合组的失重量分别为0.27 g,0.12 g以及0.08 g,均小于空白组的磨损失重量,复合组的磨损失重量最小,如果按失重量评价,其耐磨性较未处理前大幅提高了5倍,较单纯激光冲击强化处理提高了1.5倍。图8(b)的摩擦系数实验结果表明,相对于耐磨性能的改善,粉末组与复合组摩擦系数的改变较为明显,摩擦系数相对空白组有所下降,而冲击组实验结果摩擦系数改变不明显。这表明激光冲击对摩擦系数的影响较小,纳米颗粒对摩擦系数的下降起主要贡献作用。

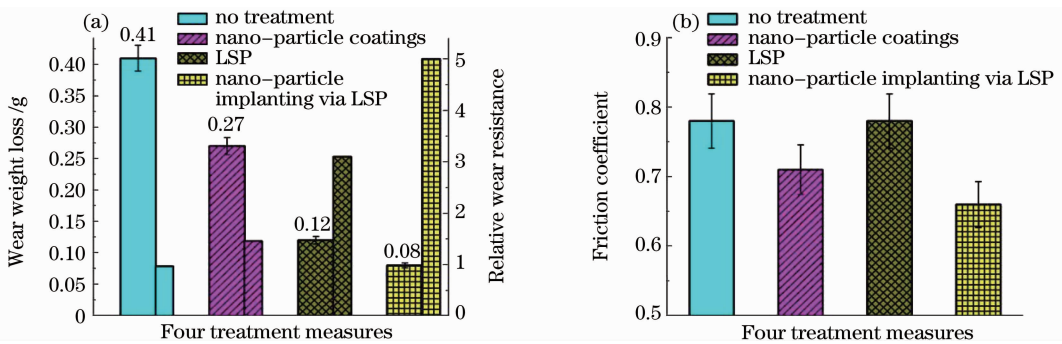


图8 不同处理工艺下球-盘摩擦磨损实验结果对比。(a)磨损量对比;(b)摩擦系数对比

Fig. 8 Ball-on-disk wear test results under four treatment measures. (a) Weight loss; (b) friction coefficient

可以这样认为,复合强化方法对铝合金耐磨性能的提高主要体现在两方面:纳米颗粒的减摩及自修复作用,以及激光冲击与纳米颗粒耦合引起的

表面微形貌结构的影响。

纳米粒子减摩的作用机理,主要观点就是纳米粒子支撑负荷,将滑动摩擦形式转变为滚动摩擦形

式,起“滚珠轴承”作用。李宝良等^[9]认为润滑油最大无卡咬负荷的大幅提高,可以认为是纳米粒子在摩擦表面起支撑载荷的“滚珠轴承”作用,即纳米粒子的尺寸小可以近似看作球形,在摩擦副间像鹅卵石一样,起支撑载荷的“滚珠轴承”作用而提高润滑油的抗磨抗极压性。顾卓明等^[10]认为纳米材料粉末颗粒近似为球形,它们起类似微型“球轴承”的作用,从而提高了摩擦表面的润滑性能,显著减轻摩擦磨损。此外,摩擦过程中纳米粒子能填平摩擦表面凹处甚至陷入基体中,并可及时填补损伤部位,具有自修复功能,使摩擦表面始终处于较为平整的状态。

研究发现,摩擦副表面的微结构形貌特征对于耐磨性的改善也具有重要意义。Yoon 等^[11]在硅基底聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)薄膜表面制作了纳米级的微凸体,与没有经过形貌修饰的薄膜相比,修饰表面由于降低了接触面积并且增加了疏水性,其摩擦系数和黏着力会降低。在激光冲击纳米 WC 颗粒的注入过程中,WC 颗粒的“微冲击”作用使得铝合金表面也形成了这种类似的微结构特征,同样对于耐磨性改善具有正面影响。同时纳米 WC 颗粒的注入使得铝合金基体表面形成了一层嵌有 WC 硬质相颗粒的复合涂层,这种以纳米 WC 颗粒作为硬质支撑相,以铝合金作为软基体的“软硬结合”结构也具有十分优异的耐摩擦磨损特性。

4 结 论

1) 研究了一种新的轻金属表面激光冲击 WC 纳米颗粒注入强化方法,在铝合金表面经激光冲击注入纳米 WC 颗粒制备出高性能纳米颗粒增强复合涂层。结合图像处理方法,引入颗粒面积比与颗粒分散度两个表征颗粒分布的量化指标,研究了约束层和激光功率密度变化对纳米颗粒分布的影响。

2) 激光冲击注入 WC 纳米颗粒增强复合涂层表面硬度相对初始状态提高了 20%,表面残余应力状态由拉应力状态转变为压应力状态。复合涂层具有良好的耐磨损特性,其耐磨性是原始铝合金的 5 倍,是单纯激光冲击的 1.5 倍。

参 考 文 献

- 1 Su Xuechang. Reinforce of aluminum alloy[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 1996, **24**(9): 2~5
苏学常. 铝合金的强化[J]. *轻合金加工技术*, 1996, **24**(9): 2~5
- 2 Zeng Zhi, Wang Lijun, Wang Yue *et al.*. Numerical and experimental investigation on temperature distribution of the discontinuous welding[J]. *Computational Materials Science*, 2009, **44**(4): 1153~1162
- 3 Tian Hua, Xue Wenbin, Li Xijin *et al.*. Tribological performance of micro-arc oxidation coatings on 15SiCp/2024 aluminum matrix composites[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2008, **36**(5): 636~641
田 华, 薛文斌, 李夕金 等. 15SiCp/2024 铝基复合材料表面微弧氧化的摩擦学特性[J]. *硅酸盐学报*, 2008, **36**(5): 636~641
- 4 Jiang Bailing, Zhang Shufen, Wu Guojian *et al.*. Microflow and phases constitution of ceramic coating formed by micro-arc oxidation on magnesium alloys and their influence on corrosion-resistance[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, **12**(3): 454~457
蒋百灵, 张淑芬, 吴国建 等. 镁合金微弧氧化陶瓷层显微缺陷与相组成及其耐蚀性[J]. *中国有色金属学报*, 2002, **12**(3): 454~457
- 5 Tong Yanqun, Yao Hongbing, Zhang Yongkang *et al.*. Experimental research of high-speed plate deformation process shocked by strong and short pulsed laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0203007
佟艳群, 姚红兵, 张永康 等. 强短脉冲激光冲击薄板高速变形的实验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0203007
- 6 Jiang Yinfang, Lai Yanling, Zhang Lei *et al.*. Investigation of residual stress hole on a metal surface by laser shock[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2073~2079
姜银方, 来艳玲, 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
- 7 P. Peyre, R. Fabbro, P. Merrien *et al.*. Laser shock processing of aluminium alloys: application to high cycle fatigue behaviour [J]. *Materials Science and Engineering*, 1996, **A210** (1-2): 102~113
- 8 Jing Fuqian, Chen Junxiang. Dynamic high-pressure generation principle and related technologies[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006. 306~308
经福谦, 陈俊祥. 动高压原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006. 306~308
- 9 Li Baoliang, Yu An, Jiang Qinyu. Tribological properties of nanometer particles as additive in lubrication oil[J]. *Journal of Dalian Railway Institute*, 2005, **26**(4): 22~24
李宝良, 余 安, 江亲瑜. 纳米润滑油添加剂摩擦学性能试验研究[J]. *大连铁道学院学报*, 2005, **26**(4): 22~24
- 10 Gu Zhuoming, Gu Caixiang. Tribological performances of lubricating oils additives of mixtures of nano-CaCO₃ and nano-Cu [J]. *Lubrication Engineering*, 2006, (7): 94~96
顾卓明, 顾彩香. 纳米 CaCO₃, Cu 混合物润滑油添加剂的摩擦学性能[J]. *润滑与密封*, 2006, (7): 94~96
- 11 E. S. Yoon, R. A. Singh, H. Kong *et al.*. Tribological properties of bio-mimetic nano-patterned polymeric surfaces on silicon wafer[J]. *Tribology Letters*, 2006, **21**(1): 31~37