

## 激光与光电子学进展

Ni-Co-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>复合镀层表面激光加工微结构的形貌演化规律纪玲玲<sup>1</sup>, 黎宁慧<sup>2</sup>, 康敏<sup>1,3\*</sup><sup>1</sup>南京农业大学工学院, 江苏 南京 210031;<sup>2</sup>南京工业职业技术大学交通工程学院, 江苏 南京 210023;<sup>3</sup>江苏省智能化农业装备重点实验室(南京农业大学), 江苏 南京 210031

**摘要** 为研究激光加工参数对镍基合金镀层表面微结构形貌的影响,采用电沉积法在45钢表面制备了Ni-Co-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>复合镀层,使用波长为1070 nm的光纤激光器对镀层表面进行加工。采用单因素法研究激光单脉冲能量密度、脉冲宽度和脉冲数量3个参数对微结构形貌的影响,得到微结构内径、外径、中心点高度、边缘高度和最低点高度等表征参数的演化规律。研究表明:激光与Ni-Co-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>复合镀层相互作用,形成了球冠状凸包、W状凹坑、火山口凹坑、两个同轴火山口叠加状凹坑4种典型形貌;激光单脉冲能量密度增大,使得镀层表面微结构形貌由球冠状凸包向两个同轴火山口叠加状凹坑转变,脉冲宽度增加使得镀层表面微结构形貌由火山口凹坑向球冠状凸包转变,脉冲数量的增加可以增大火山口凹坑的深度与边缘凸起高度。

**关键词** 激光光学; 激光材料加工; 镍基镀层; 表面微结构; 表面形貌; 脉冲激光

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0914002

Evolution Law of Laser-Textured Microstructure on Ni-Co-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Composite Coating SurfaceJi Lingling<sup>1</sup>, Li Ninghui<sup>2</sup>, Kang Min<sup>1,3\*</sup><sup>1</sup>College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210031, China;<sup>2</sup>College of Transportation Engineering, Nanjing Vocational University of Industry Technology, Nanjing, Jiangsu 210023, China;<sup>3</sup>Key Laboratory of Intelligence Agricultural Equipment of Jiangsu Province (Nanjing Agricultural University), Nanjing, Jiangsu 210031, China

**Abstract** To study the effect of laser processing parameters on the surface texture morphology of Ni-Co-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite coating, we used an electrodeposition technique to prepare the Ni-Co-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite coating on the 45 steel surfaces and then processed the coating by optical fiber laser with 1070-nm wavelength. We studied the influence of pulse energy density, pulse width, and pulse number of laser on microstructure by single-factor method, obtaining the evolution law of characteristic parameters such as inside diameter, outside diameter, center point height, edge height, and nadir height of microstructure. The results showed that the laser interacts with the Ni-Co-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite coating, forming four typical morphologies: spherical-cap-shaped bump, W-shaped pit, crater pit, and pit with double concentric holes. The surface microstructure changed from spherical-cap-shaped bump to pit with

收稿日期: 2020-08-24; 修回日期: 2020-09-18; 录用日期: 2020-09-22

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX19\_0607)

\*E-mail: kangmin@njau.edu.cn

double concentric holes because of the increased pulse energy density and changed from crater pit to spherical-cap-shaped bump because of the increased pulse width. Besides, the depth and edge height of the surface microstructure increased because of the increased pulse number.

**Key words** laser optics; laser material processing; nickel-based coating; surface microstructures; surface topography; pulse laser

**OCIS codes** 140.3390; 240.6700; 140.3538; 350.3850

## 1 引言

电沉积作为一种表面涂覆技术,能够赋予材料优异的表面性能,已被广泛应用于工业生产中<sup>[1]</sup>。研究表明,在镍基合金镀层中加入纳米颗粒可以使其具有更高的硬度和更好的耐磨性能和耐腐蚀性能<sup>[2-6]</sup>。激光表面织构技术是一种利用高能量密度激光束对材料表面的几何形状进行微尺度改性的技术<sup>[7]</sup>,主要应用于材料表面的硬度提高、耐磨性和疏水性提升等方面<sup>[8-11]</sup>。

相较于单种加工方式,将激光织构技术与电沉积技术结合应用于材料表面,将使材料表面获得更好的摩擦性能与润湿性能<sup>[12-16]</sup>;李晶等<sup>[12-13]</sup>利用激光在镍基镀层表面构造微米级沟槽,加工出的表面相比于基体硬度明显提高,并获得超疏水特性,腐蚀电流密度降低了一个数量级,具有较优越的复合性能;李晶等<sup>[14]</sup>先利用激光在铝基体表面制备网格状结构,再利用脉冲电沉积技术制备镍基镀层,使材料表面获得高疏水与高黏附特性;周龙鹏<sup>[15]</sup>对 Ni-Co 镀层表面进行激光织构化处理,探索了激光功率对镀层表面形貌的影响,发现通过改变镀层表面润湿角,可实现对摩擦性能的调控;万轶等<sup>[16]</sup>利用激光在 Ni-MoS<sub>2</sub> 镀层表面制备织构,有效降低了镀层的表面摩擦系数和磨损率。

根据现有研究,材料表面性能在一定程度上取

决于表面微结构的形貌<sup>[17-18]</sup>,而不同基体的表面微结构形貌受激光参数的影响不同;Bennett 等<sup>[19]</sup>分析了激光参数对 Ni-P 镀层表面的影响;符永宏等<sup>[20]</sup>研究了激光作用下 45 钢表面毛化凸点的形成过程;Cheng 等<sup>[21]</sup>通过改变激光参数,在铜、铝和钛合金表面制备出不同的微结构形貌。

目前,将激光织构技术与电沉积技术结合来改变材料表面性能的研究逐渐增多,但关于激光在镍基镀层表面制备出的微结构形貌演化规律和机理的研究还很少,激光参数与镀层表面微结构形貌的对应关系还没有可参考的依据。因此,本文利用脉冲激光对镍基镀层表面进行微结构加工,探索激光单脉冲能量密度、脉冲宽度和脉冲数量对微结构形貌的影响规律,为激光在镍基镀层表面的微织构加工与性能调控提供参考。

## 2 实验

### 2.1 镀层制备

采用尺寸为 30 mm×30 mm×1 mm 的 45 钢,经水洗、机械抛磨、除油、除锈、活化等步骤处理后,用去离子水超声清洗,吹干待用。镀液的组成如表 1 所示。

制备镀层的工艺参数如下:电沉积时间为 90 min,镀液温度为 60 °C,电流密度为 6 A/dm<sup>2</sup>,机械搅拌速度为 300 r/min。

表 1 镀液的组成

Table 1 Plating solution composition

Bath component	Molecular formula	Mass concentration / (g·L <sup>-1</sup> )	Specification
Nickel sulphate	NiSO <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O	200.000	A. R.
Nickel chloride	NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	50.000	A. R.
Cobalt sulfate	CoSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	10.000	A. R.
Boric acid	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	30.000	A. R.
Sodium dodecyl sulfate	C <sub>12</sub> H <sub>25</sub> SO <sub>4</sub> Na	0.050	A. R.
Thiourea	CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> S	0.002	A. R.
Silicon nitride	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	6.000	20 nm

### 2.2 激光加工

采用 IPG 公司生产的型号为 YLR-200-SM-AC

的光纤激光器,光束为高斯光束,最大输出功率为 200 W,波长为 1070 nm,频率范围为 50~500 kHz,

脉冲宽度范围为 0.002~20 ms。激光通过焦距为 50 mm 的凸透镜聚焦成半径为 10 μm 的光斑,垂直照射到材料表面。

整个实验均在空气环境和标准大气压下进行。设定激光脉冲频率为 2500 Hz,主要通过改变激光单脉冲输出能量、脉冲宽度、脉冲数量来改变加工条件。直线电机在 Y 轴方向进行直线加工,每行等间距停顿 20 次,激光在停顿时间内发射脉冲,相邻停顿点的距离均为 0.2 mm,在此距离内直线电机以 5 mm/s 的速度移动。激光加工实验参数如表 2

表 2 激光加工实验参数

Table 2 Laser processing parameters used for experiments

Number of pulses	Laser pulse width / μs	Laser energy density / (J·cm <sup>-2</sup> )
1	10	198.73–287.75
1	10–50	248.47
1–9	10	211.23

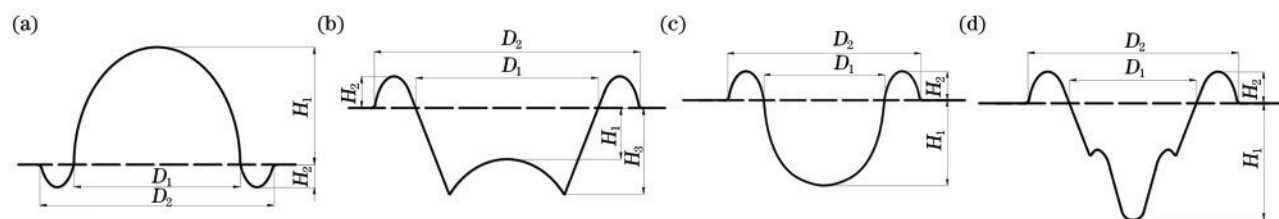


图 1 镀层表面微结构形貌表征。(a)球冠状凸包;(b)W 状凹坑;(c)火山口凹坑;(d)两个同轴火山口叠加状凹坑

Fig. 1 Characterization of the coating surface microstructures. (a) Spherical-cap shaped bump; (b) W-shaped pit; (c) crater pit; (d) pit with double concentric holes

### 3 结果与讨论

#### 3.1 镀层形貌与元素组成

图 2 为本实验制备的镀层表面形貌与截面图,可以看到,工件表面产生了均匀的胞状晶体,无可见气孔等缺陷,镀层致密性良好,经测量镀层厚度约为 50 μm。

表 3 所示为镀层 EDS 能谱分析结果,显示了镀层所含元素的质量分数;图 3 所示为镀层的 XRD 衍射图谱,显示了材料的物相组成。结合表 3 和图 3 可知,

表 3 镀层的 EDS 分析结果

Table 3 EDS analysis results of coating

Element	Ni	Co	Si	N	C	O	S
Mass fraction / %	Balance	14.23	0.31	0.35	3.63	0.72	0.41

#### 3.2 典型微结构形貌

随着入射激光参数的变化,镀层表面微结构形貌也会产生相应变化,图 4 为本实验中得到的 4 种

所示,每组激光加工参数在 Ni-Co-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合镀层表面诱导出 1 组(3 行,20 列,共 60 个)微结构。

#### 2.3 测试表征

采用 Gentec-EO 生产的型号为 UP25N-250F-H12 的功率计探头和 MAESTRO 读数头测量激光输出功率。加工后的试样经超声清洗,采用激光共聚焦显微镜(LEXT; Olympus Corporation, OLS4100)和场发射扫描电子显微镜(SEM; Quanta 250FEG)观察微结构形貌,并采用 SEM 附带的能谱仪(EDS)进行表面元素分析。

如图 1 所示,镀层表面微结构形貌表征采用 D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub>、H<sub>1</sub>、H<sub>2</sub>、H<sub>3</sub> 5 个参数表示,其中 D<sub>1</sub> 表示微结构的内径,D<sub>2</sub> 表示微结构的外径,H<sub>1</sub> 表示微结构的中心点高度,H<sub>2</sub> 表示凸包或凹坑结构的边缘高度,H<sub>3</sub> 表示当凹坑结构的中心点非最低点时的最低点高度。在每组激光参数加工得到的 60 个微结构中随机选取 5 个,读取其形貌表征参数并取平均值。

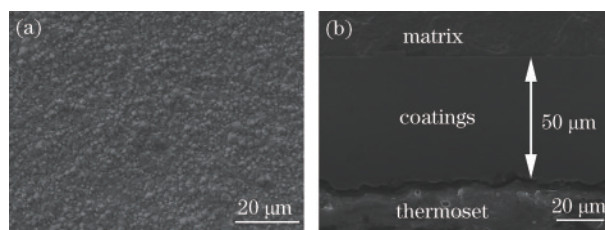


图 2 镀层表面形貌与截面。(a)二维形貌图;(b)截面

Fig. 2 Surface morphology and cross-section of the coating. (a) 2D morphology image; (b) cross-section

镀层的主要成分是 Ni-Co 合金,含有少量的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>。

典型微结构的俯视图、三维图与剖面图。可以看到:球冠状凸包形貌中,激光辐照区域中心处呈现微凸起伏,辐照区域边缘高度低于镀层表面高度,



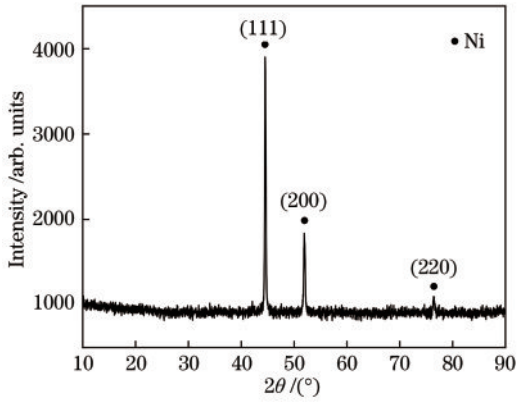


图 3 镀层的 XRD 谱图

Fig. 3 XRD spectrum of coating

呈现环状沟槽形态;W 状凹坑形貌中,凹坑边缘有环状凸起,凹坑内壁较光滑,坑底有高度较小的凸起;火山口凹坑形貌中,凹坑边缘有较宽的环状凸起,凹坑内壁和坑底光滑;两个同轴火山口叠加状凹坑形貌中,微结构边缘环状凸起宽度和高度较大,上方火山口凹坑的直径较大,下方火山口凹坑出现在上方火山口凹坑的坑底,直径较小,但凹坑深度较大。

### 3.3 单脉冲能量对镀层表面微结构形貌的影响

金属表面激光辐照区域吸收激光能量,依次经历加热、熔化、汽化、离化、固化等过程,其表面形貌会产生一系列变化<sup>[7]</sup>;同样地,Ni-Co-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>复合镀层受脉冲

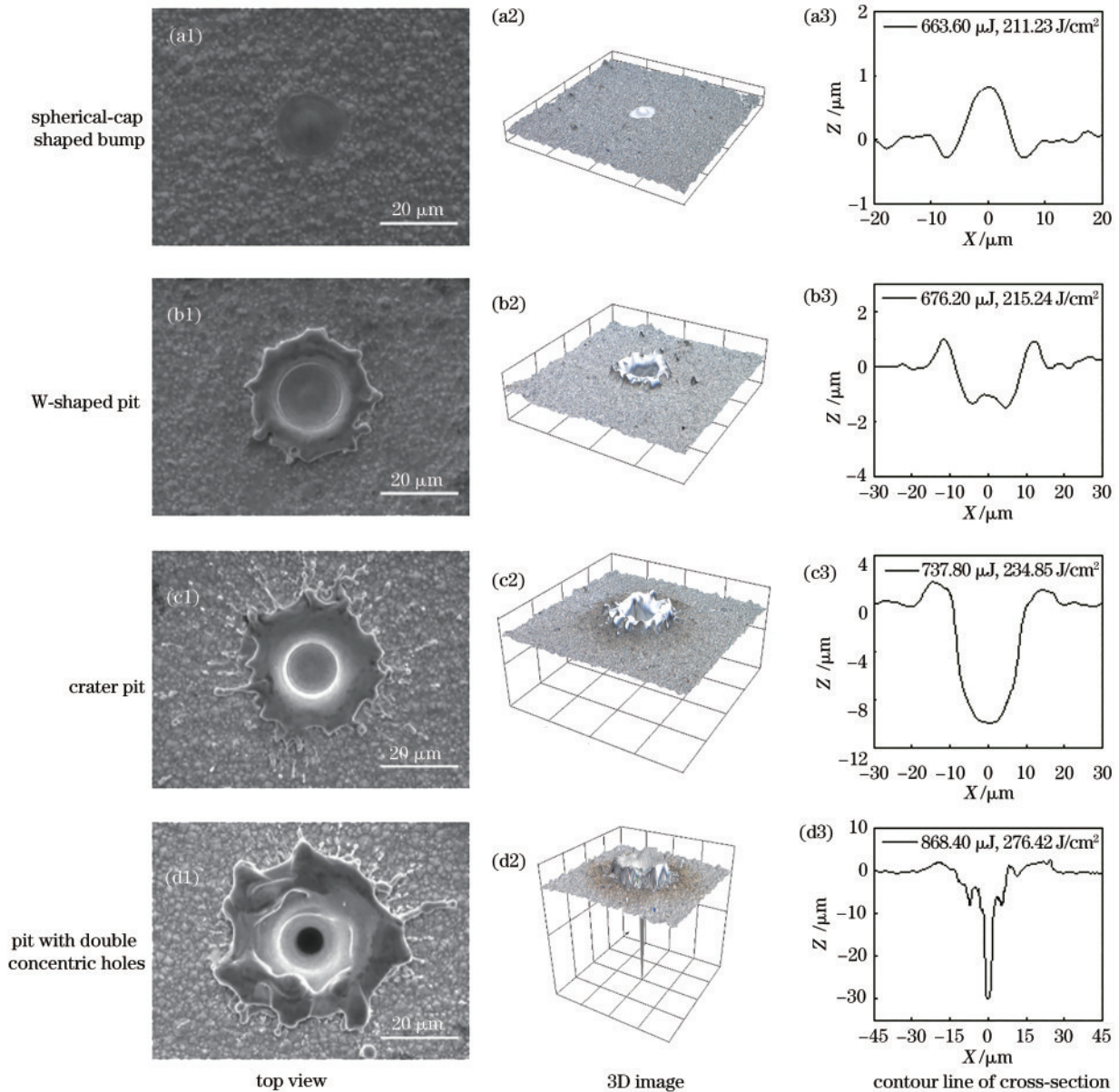


图 4 4 种典型微结构的俯视图、三维图和剖面轮廓线图

Fig. 4 Top views, 3D images, and contour lines of cross-sections of four typical microstructures

激光辐照影响,也会发生一定变化。当激光脉冲宽度为  $10\ \mu\text{s}$ , 脉冲数量为 1, 单脉冲能量密度在  $198.73\sim$

$287.75\ \text{J}/\text{cm}^2$  范围内变化时, 镀层表面微结构的形貌表征参数如图 5 所示, 剖面轮廓线如图 6~9 所示。

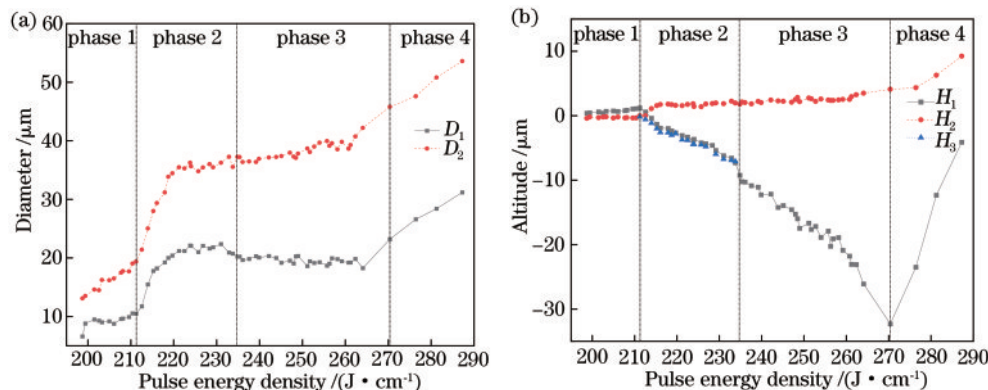


图 5 不同单脉冲能量密度下镀层表面微结构形貌表征参数图。(a)直径;(b)高度

Fig. 5 Characteristic parametric diagrams of the coating surface microstructures at varying pulse energy densities. (a) Diameter; (b) altitude

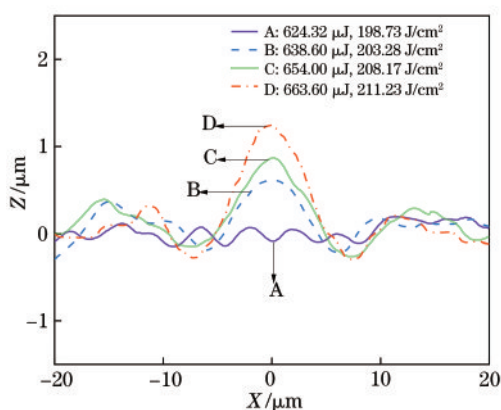


图 6 第一阶段镀层表面微结构剖面轮廓线

Fig. 6 Cross-section contour lines of the coating surface microstructures in phase 1

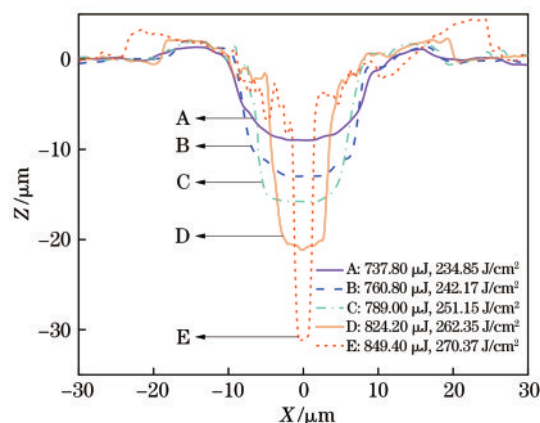


图 8 第三阶段镀层表面微结构剖面轮廓线

Fig. 8 Cross-section contour lines of the coating surface microstructures in phase 3

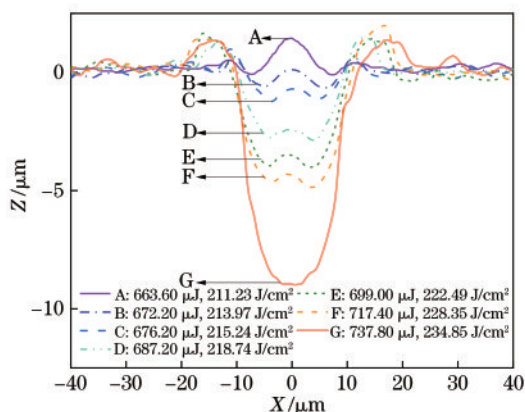


图 7 第二阶段镀层表面微结构剖面轮廓线

Fig. 7 Cross-section contour lines of the coating surface microstructures in phase 2

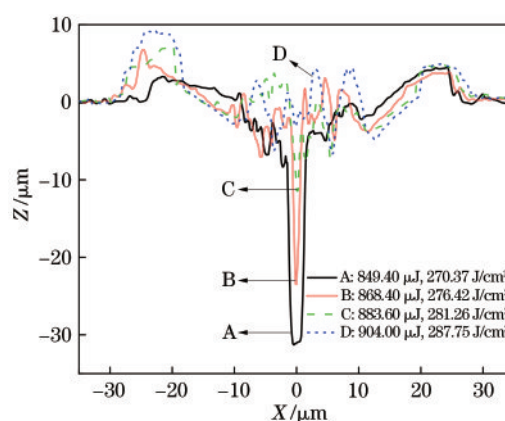


图 9 第四阶段镀层表面微结构剖面轮廓线

Fig. 9 Cross-section contour lines of the coating surface microstructures in phase 4

按照微结构的形貌表征参数和剖面轮廓线变化趋势,将激光单脉冲能量密度划分为 4 个阶段,每个阶段对应不同的微结构特征形貌:第一阶段,球冠状凸包形貌呈现长大趋势;第二阶段,球冠状凸包形貌逐渐向火山口凹坑形貌转变,中间经历了 W 状凹坑形貌;第三阶段,火山口凹坑形貌的深度不断增加并最终呈现出两个同轴火山口叠加状凹坑形貌;第四阶段,两个同轴火山口叠加状凹坑形貌中,下方火山口凹坑逐渐消失,上方火山口凹坑底部出现尖刺状凸起。

第一阶段,激光单脉冲能量密度从  $198.73 \text{ J/cm}^2$  增加到  $211.23 \text{ J/cm}^2$ ,镀层材料经历了加热、熔融和固化等过程。结合图 5 和图 6 可知,随着激光单脉冲能量密度的增大,球冠状凸包结构的内径  $D_1$ 、外径  $D_2$  和中心点高度  $H_1$  都呈增大趋势,微结构边缘高度  $H_2$  呈现下降趋势,这是因为随着激光单脉冲能量密度的增大,镀层材料表面热影响区增大,熔池也不断扩大<sup>[22]</sup>。根据相关研究,激光能量呈高斯分布,镀层材料表面的激光辐照区域温度也相应地呈高斯分布<sup>[19]</sup>,球冠状凸包形貌的形成有两种可能性:一种可能是熔池中各点温度不同,导致表面活性剂浓度不同,形成了化学成分浓度梯度<sup>[21, 23-24]</sup>,从而改变了材料的表面张力;另一种可能则是将两种表面张力温度系数为负的金属制备成合金后,合金的表面张力温度系数变为正值<sup>[25]</sup>,即液体表面温度较高区域的表面张力大于温度较低区域的表面张力。无论是哪种可能,镀层材料表面激光辐照区域的中心处表面张力大于边缘的表面张力,马兰戈尼效应使熔融的镀层材料由边缘向中间聚集,固化后形成中间凸起而边缘凹陷的球冠状凸包形貌。

第二阶段,激光单脉冲能量密度从  $211.23 \text{ J/cm}^2$  增加到  $234.85 \text{ J/cm}^2$ ,镀层材料经历了加热、熔融、汽化和固化等过程。结合图 5 和图 7 可知,随着激光单脉冲能量密度的增加,镀层表面微结构的内径  $D_1$  和外径  $D_2$  先迅速增大后缓慢增大,中心点高度  $H_1$  和最低点高度  $H_3$  减小,边缘高度  $H_2$  由负值变为正值,即边缘由凹槽转化为凸起,微结构从球冠状凸包形貌经历 W 状凹坑形貌,最终转化为火山口凹坑形貌。单脉冲能量密度的增加使激光辐照区域中心处温度达到了镀层材料的汽化点,液态的镀层材料表面发生汽化并产生方向垂直向下的反冲压力。随着温度的继续升高,受汽化影响,一方面熔池内汽化的熔体体积增大,导致剩余熔体的体积减小;另一

方面汽化材料的体积增大引起反冲压力升高<sup>[7]</sup>,导致更多的熔体克服重力和表面张力的影响,被挤出坑外并堆积在边缘,使得中心点高度  $H_1$  和最低点高度  $H_3$  不断减小,而坑外环状凸起高度  $H_2$  不断增加。当激光作用结束后,熔池内未被去除的熔体在重力作用下滑落到坑底,与第一阶段的情况相同,受马兰戈尼效应影响,熔体在坑底向中心处聚集,固化后形成 W 状凹坑形貌。当激光单脉冲能量密度从  $228.35 \text{ J/cm}^2$  增加到  $234.85 \text{ J/cm}^2$  时,受汽化影响熔池内去除材料的体积增加速度大于熔体的体积增加速度,此时熔池内熔融层很薄<sup>[7, 26-27]</sup>,微结构坑底呈现光滑形态。

第三阶段,激光单脉冲能量密度从  $234.85 \text{ J/cm}^2$  增加到  $270.37 \text{ J/cm}^2$ ,镀层材料经历了加热、熔融、汽化、离化和固化等过程。结合图 5 和图 8 可知:微结构内径  $D_1$  逐渐减小,而外径  $D_2$  逐渐增大;中心点高度  $H_1$  不断降低,而边缘环状凸起高度  $H_2$  呈现增大趋势,即凹坑向更细更深演化。这可能是因为等离子体屏蔽效应逐渐增强<sup>[28]</sup>,镀层材料汽化后吸收一部分激光光束能量,形成等离子体,等离子体继续吸收能量后体积急剧膨胀,产生较强的冲击波,将熔池内的熔体挤压出坑外,甚至出现如图 4(c1)所示的喷溅现象。当激光单脉冲能量密度大于  $262.35 \text{ J/cm}^2$  时,从图 8 可以看到,微结构形貌为两个同轴火山口叠加状凹坑,这可能是因为随着等离子体体积持续增大,其屏蔽效应不断增强,能够穿过等离子体作用于镀层材料表面的激光越来越微弱,此时作用机制转变为以等离子体-材料相互作用为主,从而导致微结构内部形貌很不规则<sup>[7]</sup>。

第四阶段,激光单脉冲能量密度从  $270.37 \text{ J/cm}^2$  增加到  $287.75 \text{ J/cm}^2$ ,镀层材料经历了加热、熔融、汽化、离化和固化等过程。结合图 5 和图 9 可知,微结构内径  $D_1$  和外径  $D_2$  增大,边缘凸起高度  $H_2$  明显增加,中心点高度  $H_1$  迅速升高,最终下方火山口凹坑消失,上方火山口凹坑底部出现密集的尖刺状凸起。这可能是因为等离子体屏蔽效应开始饱和<sup>[29-30]</sup>,此时部分激光可以穿过等离子体,作用于镀层材料表面,而激光与等离子体的共同作用导致镀层表面微结构形貌变化剧烈,无明显的固定形貌<sup>[7]</sup>。

### 3.4 脉冲宽度对镀层表面微结构的影响

为探索脉冲宽度对 Ni-Co-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合镀层表面微结构的影响,当激光单脉冲能量为  $780.60 \mu\text{J}$ ,能量密度为  $248.47 \text{ J/cm}^2$ ,脉冲数量为 1,脉冲宽度在



10~50  $\mu\text{s}$  范围内变化时, 镀层表面微结构形貌表征

参数和剖面轮廓线分别如图 10 和图 11 所示。

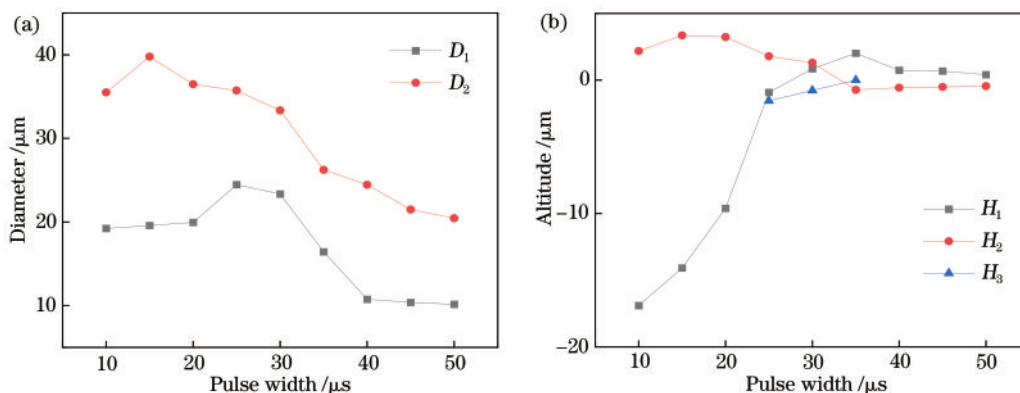


图 10 不同脉冲宽度下镀层表面微结构形貌表征参数图。(a)直径;(b)高度

Fig. 10 Characteristic parametric diagrams of coating surface microstructures with varying pulse widths. (a) Diameter; (b) altitude

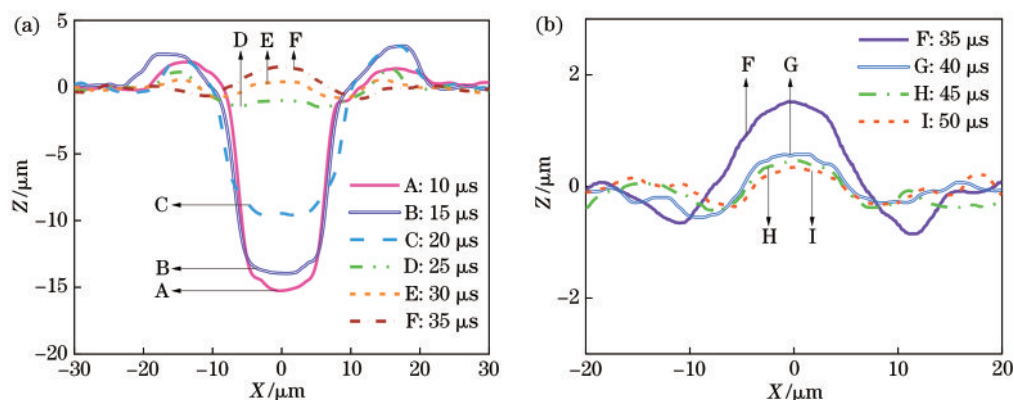


图 11 不同脉冲宽度下镀层表面微结构剖面轮廓。(a)10~35  $\mu\text{s}$ ;(b)35~50  $\mu\text{s}$

Fig. 11 Cross-section contour lines of the coating surface microstructures with varying pulse widths. (a) 10~35  $\mu\text{s}$ ; (b) 35~50  $\mu\text{s}$

与脉冲宽度为 10  $\mu\text{s}$  的结果相比, 当脉冲宽度为 15  $\mu\text{s}$  时, 相同的单脉冲能量下, 激光峰值功率降低, 汽化熔体的体积减小, 熔体堆积在凹坑边缘而非喷溅出坑外, 导致凹坑外径  $D_2$  和边缘环状凸起宽度 ( $D_2 - D_1$ ) 都增大, 中心点高度  $H_1$  和边缘凸起高度  $H_2$  也增大。

脉冲宽度从 15  $\mu\text{s}$  增加到 25  $\mu\text{s}$ , 激光峰值功率继续降低, 镀层材料达到汽化点所需的时间增加, 受汽化影响去除的熔体体积减小, 因此凹坑外径  $D_2$  和边缘环状凸起宽度 ( $D_2 - D_1$ ) 减小, 中心点高度  $H_1$  增大, 边缘凸起高度  $H_2$  减小。当脉冲宽度达到 25  $\mu\text{s}$  时, 熔体开始在中心点聚集, 微结构呈现 W 状凹坑形貌。

脉冲宽度从 25  $\mu\text{s}$  增加到 35  $\mu\text{s}$ , 随着激光峰值功率的降低, 受汽化影响去除的材料体积进一步减小, 熔池直径也减小, 熔体向中心聚集现象更加明显, 微结构形貌由 W 状凹坑逐渐转向球冠状凸包, 因此微结构内径  $D_1$ 、外径  $D_2$  逐渐减小, 中心点高度  $H_1$  增大, 边

缘高度  $H_2$  由正值转化为负值, 即微结构边缘由环状凸起变为环状凹槽, 最低点高度  $H_3$  由负值增大至 0。

脉冲宽度从 35  $\mu\text{s}$  变化到 50  $\mu\text{s}$ , 激光峰值功率进一步降低, 镀层材料温度无法到达汽化点, 熔池直径也进一步减小, 导致球冠状凸包结构的内径  $D_1$ 、外径  $D_2$  和中心点高度  $H_1$  都减小, 边缘高度  $H_2$  增大。

综合脉冲宽度在 10~50  $\mu\text{s}$  范围内变化的全过程可知, 在其他激光参数不变的情况下, 脉冲宽度由小变大会导致激光峰值功率由大变小, 从而使镀层材料表面激光辐照区域所能达到的最高温度降低, 进而影响微结构的表面形貌。

### 3.5 脉冲数量对镀层表面微结构的影响

为探索脉冲数量对 Ni-Co-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合镀层表面微结构的影响, 当激光单脉冲能量为 663.60  $\mu\text{J}$ , 能量密度为 211.23  $\text{J}/\text{cm}^2$ , 脉冲宽度为 10  $\mu\text{s}$ , 脉冲数量在 1~9 范围内变化时, 镀层表面微结构形貌表征参数和剖面轮廓线分别如图 12 和图 13 所示。

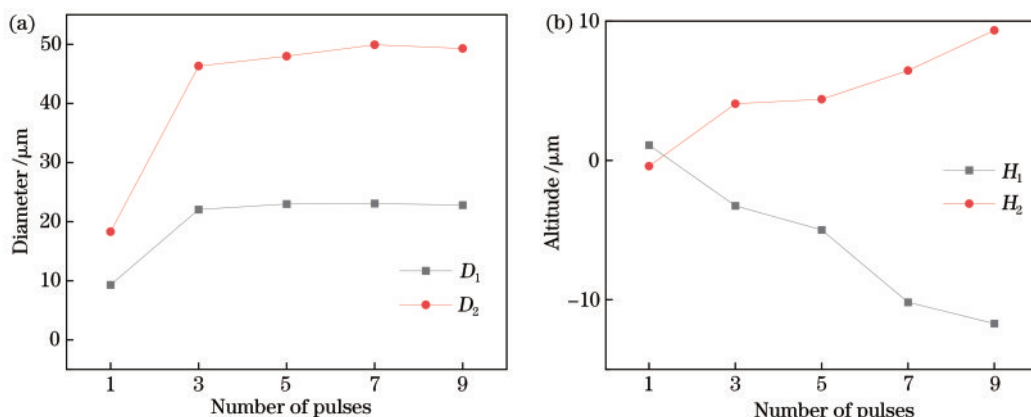


图 12 不同脉冲数量下镀层表面微结构形貌表征参数图。(a)直径;(b)高度

Fig. 12 Characteristic parametric diagrams of the coating surface microstructures at different numbers of pulses. (a) Diameter; (b) altitude

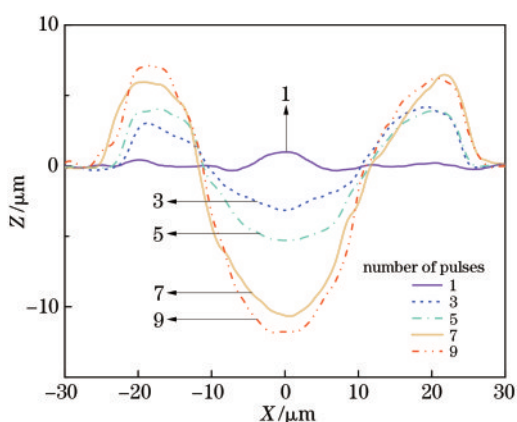


图 13 不同脉冲数量下镀层表面微结构剖面轮廓线

Fig. 13 Cross-section contour lines of the coating surface microstructures at varying numbers of pulses

当脉冲数量从 1 增加到 3 时,镀层表面微结构由球冠状凸包转化为火山口凹坑,此后随着脉冲数量的增加,微结构形貌保持为火山口凹坑,其内径  $D_1$ 、外径  $D_2$  虽呈增长趋势,但变化不大且逐渐趋于平稳,凹坑中心点高度  $H_1$  和边缘凸起高度  $H_2$  也都呈现增大的趋势。这可能是因为当脉冲数量增加时,前一个脉冲引起的热效应还未消散,下一个脉冲就继续作用在镀层材料表面,激光总能量累加使得汽化体积增大<sup>[16, 31]</sup>,被挤出坑外的熔体体积也增大。

## 4 结 论

采用波长为 1070 nm 的脉冲激光,探索了激光单脉冲能量密度、脉冲宽度和脉冲数量对 Ni-Co-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合镀层表面微结构形貌演化规律的影响,得出以下结论。

1) 激光与 Ni-Co-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合镀层相互作用可得

到 4 种典型形貌,分别为球冠状凸包、W 状凹坑、火山口凹坑、两个同轴火山口叠加状凹坑形貌。

2) 随着辐照在 Ni-Co-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合镀层表面的激光单脉冲能量密度增加,按照镀层表面微结构形貌表征参数的变化规律,可将单脉冲能量密度划分为 4 个阶段,每个阶段镀层材料都经历不同的物理化学过程,形成不同的微结构形貌:第一阶段,球冠状凸包形貌呈现长大趋势;第二阶段,球冠状凸包形貌逐渐向火山口凹坑形貌转变,中间经历了 W 状凹坑形貌;第三阶段,等离子体屏蔽效应不断增强,火山口凹坑形貌的深度不断增加并最终呈现出两个同轴火山口叠加状凹坑形貌;第四阶段,等离子体屏蔽效应达到饱和,下方火山口凹坑逐渐消失。随着脉冲宽度的增加,镀层表面微结构由火山口凹坑形貌向球冠状凸包形貌演化。随着脉冲数量的增加,火山口凹坑形貌深度和边缘凸起高度增大。

3) 通过实验将激光参数与 Ni-Co-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合镀层表面微结构形貌形成对应关系。以此为基础,可以建立数学模型和数值计算模型进行数值模拟并对比结果,研究复合镀层表面的激光微结构形貌形成机理;还可以结合特定的应用领域,根据实际功能需求,选取最合适的激光微结构形貌进行大面积加工,以改善材料表面性能。

## 参 考 文 献

[1] Feng X J, Kan H M, Wei X D, et al. Research progress of Ni-based composite coatings prepared by electrodeposition[J]. Surface Technology, 2017, 46 (5): 75-82.  
冯筱珺, 阚洪敏, 魏晓冬, 等. 电沉积制备镍基复合



- 镀层的研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(5): 75-82.
- [2] Liu L, Kang M, Yang Y C, et al. Effect of spray parameters on hardness and wear resistance of Ni-P-BN(h)-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings[J]. Materials Protection, 2020, 53(2): 93-98,111.  
刘琳, 康敏, 杨寅初, 等. 喷射参数对 Ni-P-BN(h)-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米复合镀层显微硬度及耐磨性的影响[J]. 材料保护, 2020, 53(2): 93-98,111.
- [3] Zhang Y, Kang M, Fu X Q, et al. Surface structure and wear resistance of Ni-Co-P-BN(h)-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> binary nano composite coatings [J]. Materials Science and Technology, 2019, 27(6): 55-66.  
张银, 康敏, 傅秀清, 等. Ni-Co-P-BN(h)-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 二元纳米复合镀层表面组织结构及耐磨性研究[J]. 材料科学与工艺, 2019, 27(6): 55-66.
- [4] Li H Z, Kang M, Zhang Y, et al. Influences of jet parameters on structure and wear resistance of Ni-Co-BN(h) nanocomposite coatings [J]. China Surface Engineering, 2018, 31(2): 103-112.  
李恒征, 康敏, 张银, 等. 喷射参数对 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层结构及耐磨性的影响[J]. 中国表面工程, 2018, 31(2): 103-112.
- [5] Mbugua N S, Kang M, Zhu J P, et al. Synthesis and characterization of Ni-W/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite coatings using electrochemical deposition technique [J]. Coatings, 2019, 9(12): 815.
- [6] Paydar S, Jafari A, Bahrololoom M E, et al. Enhancing Ni electroplated matrix through mixed boron nitride-carbide reinforcement [J]. Vacuum, 2013, 92: 52-57.
- [7] Li N H, Mou L Q, Li Z W, et al. Evolution of surface topography of 304L stainless steel irradiated by long pulse laser[J]. AIP Advances, 2018, 8(7): 075211.
- [8] Bao Y M, Wang C W, Jin Z W, et al. Textured surface on a bioceramic coating via a femtosecond laser and its friction and wear properties[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0203003.  
鲍雨梅, 王成武, 金志伟, 等. 激光表面织构化生物陶瓷涂层及其摩擦磨损性能[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0203003.
- [9] Ye Y X, Liu Y F, Du T T, et al. Experimental study on gradient wettable surface fabricated by laser rapid processing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1002001.  
叶云霞, 刘远方, 杜婷婷, 等. 激光快速加工梯度润湿性表面的实验研究[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1002001.
- [10] Wang L, Wang X S, Li N H, et al. Processing of microstructures on 304L stainless steel surface based on long pulse laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(3): 031402.  
王玲, 王兴盛, 黎宁慧, 等. 基于长脉冲激光的 304L 不锈钢表面微织构加工[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(3): 031402.
- [11] Liu C H, Zhu X J, Li X M, et al. Wettability of nanosecond laser-induced titanium oxide alloys and coatings [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 011408.  
刘晨华, 祝锡晶, 黎相孟, 等. 纳秒激光诱导氧化钛片及涂层的润湿性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 011408.
- [12] Li J, Zhao Y H, Yu H D, et al. Fabrication of coupling structure and composite properties by electro-brush plating and laser processing [J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(12): 28-34.  
李晶, 赵言辉, 于化东, 等. 电刷镀-激光加工法制备耦合结构及复合特性研究[J]. 材料工程, 2016, 44(12): 28-34.
- [13] Li J, Zhao Y H, Yu H D, et al. Fabrication and properties of superhydrophobic surface on aluminum alloys substrates by brush plating and laser processing technology[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(1): 82-87,92.  
李晶, 赵言辉, 于化东, 等. 铝合金电刷镀与激光微加工耦合制备超疏水表面及其特性[J]. 中国机械工程, 2017, 28(1): 82-87,92.
- [14] Li J, Zhao S C, Du F, et al. Fabrication of groove and grid structure surface with superhydrophobicity and corrosion resistance by laser [J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(5): 86-91.  
李晶, 赵世才, 杜锋, 等. 激光构筑槽棱与网格状结构超疏水耐腐蚀表面研究[J]. 材料工程, 2018, 46(5): 86-91.
- [15] Zhou L P. Study on the texture processing and micro-friction performance of Ni-Co alloy coating[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014: 67.  
周龙鹏. 镍钴合金镀层的织构化处理及微摩擦性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014: 67.
- [16] Wan Y, Li J L, Xiong D S, et al. Effect of number of laser pulses on tribological property of textured-coating [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(3): 031403.  
万轶, 李建亮, 熊党生, 等. 激光脉冲次数对织构化涂层的摩擦学性能影响[J]. 激光与光电子学进展,

- 2017, 54(3): 031403.
- [17] Li T T, Sun Y N, Zhang L, et al. Research progress on effect of surface texturing on tribological properties [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2020, 44 (5) : 44-48.  
李甜甜, 孙耀宁, 张丽, 等. 表面织构化对摩擦学性能影响的研究进展 [J]. *机械工程材料*, 2020, 44 (5): 44-48.
- [18] Liu Y, Li X L, Jin J F, et al. Anti-icing property of bio-inspired micro-structure superhydrophobic surfaces and heat transfer model [J]. *Applied Surface Science*, 2017, 400: 498-505.
- [19] Bennett T D, Krajnovich D J, Grigoropoulos C P, et al. Marangoni mechanism in pulsed laser texturing of magnetic disk substrates [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1997, 119(3): 589-596.
- [20] Fu Y H, Huang T, Ye Y X, et al. Influence of melt flow characteristics on textured bump forming [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0702005.  
符永宏, 黄婷, 叶云霞, 等. 熔质流动特性对毛化凸点成形的影响 [J]. *中国激光*, 2019, 46 (7) : 0702005.
- [21] Cheng J, Perrie W, Sharp M, et al. Single-pulse drilling study on Au, Al and Ti alloy by using a picosecond laser [J]. *Applied Physics A*, 2009, 95 (3): 739-746.
- [22] Li N H, Li Z W, Kang M, et al. Numerical simulation and experimental study on laser micromachining of 304L stainless steel in ambient air [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 140: 978-991.
- [23] Chen S C, Cahill D G, Grigoropoulos C P. Melting and surface deformation in pulsed laser surface micromodification of Ni-P disks [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2000, 122(1): 107-112.
- [24] Sahoo P, Debroy T, McNallan M J. Surface tension of binary metal: surface active solute systems under conditions relevant to welding metallurgy [J]. *Metallurgical Transactions B*, 1988, 19 (3) : 483-491.
- [25] Lee J, Shimoda W, Tanaka T. Surface tension and its temperature coefficient of liquid Sn-X (X=Ag, Cu) alloys [J]. *Materials Transactions*, 2004, 45 (9): 2864-2870.
- [26] Semak V V, Knorovsky G A, MacCallum D O, et al. Effect of surface tension on melt pool dynamics during laser pulse interaction [J]. *Journal of Physics D*, 2006, 39(3): 590-595.
- [27] Han S W, Cho W I, Na S J, et al. Influence of driving forces on weld pool dynamics in GTA and laser welding [J]. *Welding in the World*, 2013, 57 (2): 257-264.
- [28] Stauter C, Fontaine J, Engel T. Real-time determination of the amount of removed material during short pulses laser micromachining [J]. *Applied Surface Science*, 1996, 96/97/98: 522-527.
- [29] Cristoforetti G, Legnaioli S, Palleschi V, et al. Observation of different mass removal regimes during the laser ablation of an aluminium target in air [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2008, 23(11): 1518-1528.
- [30] Bindhu C V, Harilal S S, Tillack M S, et al. Laser propagation and energy absorption by an argon spark [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 94 (12) : 7402-7407.
- [31] Chen X, Wang F, Wu Q, et al. Pit morphology evolution law of 3A21 aluminum alloy surface in laser texturing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(24): 241404.  
陈熾, 王菲, 吴琼, 等. 3A21 铝合金表面激光毛化坑点形貌演变规律 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(24): 241404.