

激光与光电子学进展

激光冲击压印制备具有良好时效性的疏水铜表面

沈宗宝*, 李闯, 李品, 张蕾, 王霄, 刘会霞

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 采用激光冲击压印技术制备具有多级沟槽微结构的疏水性铜箔表面。首先通过激光标刻制备具有多级沟槽特征的微模具, 然后通过激光冲击压印技术将微模具上的多级沟槽微结构复制到工件表面。研究了冲击次数、软膜厚度对工件多级沟槽微结构疏水表面的表面形貌、静态接触角的影响。结果表明: 当冲击次数从 1 次增加到 7 次、软膜厚度从 300 μm 减少至 100 μm 时, 工件表面复制微结构的程度逐渐变大, 同时表面的静态接触角增大, 疏水性增强。通过对工件微结构表面元素及其成分的测量发现, 采用激光冲击压印技术制备的具有多级沟槽微结构疏水表面在空气、水以及质量分数 3.5% NaCl 溶液中放置 21 天后, 仍保持为疏水性, 体现出该工艺制备的疏水表面具有良好的时效性。

关键词 激光技术; 激光冲击压印; 沟槽微结构; 疏水性; 时效性

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1714006

Preparation of a Hydrophobic Copper Surface with Excellent Aging Properties Using Laser Shock Imprinting

Shen Zongbao*, Li Chuang, Li Pin, Zhang Lei, Wang Xiao, Liu Huixia

School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China

Abstract In this study, laser shock imprinting technology was used to prepare a hydrophobic copper foil surface with multilevel grooved microtexture. First, a micro-mold with multilevel groove characteristics was prepared by laser marking. Then, the microtexture of the multilevel groove on the micro-mold was copied to the surface of a workpiece using laser shock imprinting technology. The effects of the number of laser shocks and the thickness of the soft film on the surface morphology and static contact angle of the multilevel grooved microtextured hydrophobic surface of the workpiece were studied. The results show that when the number of laser shocks increases from 1 to 7 and the soft film thickness decreases from 300 μm to 100 μm , the degree of microtexture replication on the workpiece surface gradually increases. Simultaneously, the static contact angle and hydrophobicity of the surface increase. By measuring the microtextured surface elements and components of the workpiece, it is found that the multilevel grooved microtexture of the hydrophobic surface remains unchanged after being placed in air, water, and mass fraction 3.5% NaCl solution for 21 days. It shows that the hydrophobic surface prepared by this process has excellent aging properties.

Key words laser technique; laser shock imprinting; groove microtexture; hydrophobicity; aging properties

1 引言

超疏水表面一直以来都受到工业界的广泛关注。超疏水材料表面具有自清洁^[1]、耐腐蚀^[2]、防冰霜^[3-4]以及油水分离^[5]等优异的性能。从荷叶的表面结构可以看出, 通过构造多尺度多层微结构可以实现超疏水功能^[6]。然而, 超疏水表面在工业应用或者日常生活得到广泛应用之前, 还需解决一个问题, 即时效性。在实际

使用超疏水表面时, 难免会受到外部环境中其他复杂因素的影响, 比如化学反应、高温破坏、细菌污染等^[7], 因此研究超疏水表面的时效性具有十分重要的意义。

超疏水表面的制作原理基本上是先在工作表面制备出多级微结构, 然后用低表面能物质来修饰多级微结构。目前已经有多种制备方法, 如机械切削的方法^[8]、阳极氧化合成的方法^[9]、纳秒激光加工方法^[10-11]、皮秒飞秒激光加工方法^[4, 12-14]。本研究采用了激光冲

收稿日期: 2021-12-04; 修回日期: 2022-01-06; 录用日期: 2022-01-11

基金项目: 中国博士后科学基金(2019M651724)、国家自然科学基金(52075226)

通信作者: *szb@ujs.edu.cn

击压印(LSI)工艺来制备超疏水表面。激光冲击压印是一种新型的微成形技术,因为微成形技术具有精度高、灵活性好且工件加工后机械性能提升等优点而被广泛应用^[15]。但传统的微成形中微凸模的制造是一个难点^[16],同时微凹模和凸模之间的对中精度也难以保证。为了解决这些问题,很多学者尝试研发新型微成形工艺,例如,上海交通大学的姚振强以及胡永祥教授就对激光冲击微成形技术进行了系统的研究^[17-18]。激光冲击微成形是一种来源于激光冲击技术的新型微成形工艺^[6,19-21],该工艺利用激光冲击波作为凸模加载工件,因此不需要传统的微刚性凸模,可以较好地解决传统微成形技术存在的上述问题。与传统的微结构加工方式相比:激光冲击压印具有精度高、效率高、成本可控以及普遍适用性的优点,可以实现大面积复杂微结构高精度、快速加工成形与制造;该方法加工时间短,可以通过改变参数获得不同的多级微结构;通过塑性变形得到的微结构机械性能会增强。目前,对激光冲击压印工艺技术的研究报告有很多。Jin等^[22]通过激光冲击压印在铝箔上制备出叶片表面形貌,可以扩大摩擦纳米发电机的应用范围。Man等^[23]利用激光冲击压印在铝箔上制备了高质量、精确的纳米线纹理,并研究了脉冲激光能量和激光预处理对纳米线纹理制备的影响。Yang等^[24]利用

激光冲击压印来制造高精度复杂的微结构,通过填充率和垂直度来衡量微观组织的成形精度,实现了微结构的高精度成形。Man等^[25]采用激光预冲击铝箔来制作优异力学性能的超光滑微图案,结果表明,适当的激光冲击压印参数可以在激光预冲击铝箔上制作超光滑、精确、可控、优异力学性能的微图形。

虽然激光冲击压印技术引起了学者的广泛关注,但是有关激光冲击压印技术在疏水表面制备领域的应用的报道却很少。鉴于时效性^[26-27]对于疏水表面的重要性,本文研究了激光冲击压印制备疏水铜表面的时效性。首先,利用激光标刻的方法在微模具表面制备出多级沟槽微结构;然后,利用激光冲击压印技术将微模具上的多级沟槽微结构复制到铜箔表面上;接着,研究了不同冲击次数以及软膜厚度对工件疏水表面的表面形貌、静态接触角的影响;最后,通过对工件微结构表面元素及其成分的测量,系统研究了疏水性铜箔表面的时效性。

2 试验原理与准备

2.1 试验材料与制备方法

图1为激光冲击压印的示意图。首先,利用激光打标机在微模具上进行第一次标刻,从而能够毛化微

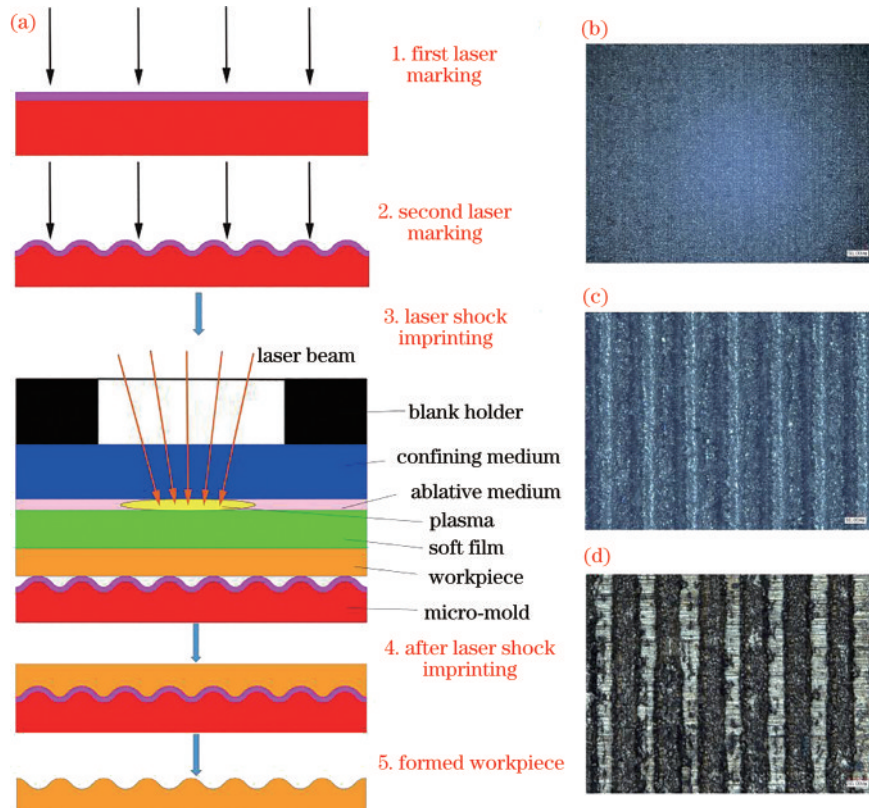


图1 激光冲击压印工艺的原理示意图。(a)整个过程图;(b)第一次激光标刻后微模具的表面三维形貌;(c)第二次激光标刻后微模具的表面三维形貌;(d)激光冲击压印后工件表面的三维形貌

Fig. 1 Schematic diagram of LSI process. (a) Whole process diagram; (b) three-dimensional topography of micro-mold after first laser marking; (c) three-dimensional topography of micro-mold after second laser marking; (d) three-dimensional topography of workpiece surface after LSI

模具表面,增加表面粗糙度,如图 1(b)所示;然后,在毛化后的表面进行第二次标刻,可以在微模具上制造出周期性沟槽微织构,如图 1(c)所示;最后,利用激光冲击压印技术,在工件表面复制微模具的多级微织构,如图 1(d)所示。

本试验中,采用激光打标机(K20-CS,大族激光科技产业集团股份有限公司,深圳)进行激光标刻以加工微模具。微模具的材料选用强度高、韧性好、耐侵蚀性好的 TI-6Al-4V(TC4)的钛合金板(厚度为 3 mm)。微模具的表面加工处理区域为 10 mm×10 mm。在激光冲击压印中,使用的激光器为德国 InnoLas 公司生产的 Nd:YAG Splitlight 2000 激光器,该激光器采用高斯分布光束,激光波长为 1064 nm,脉冲持续时间为 8 ns,最大的脉冲能量为 2 J,出口光斑直径为 9 mm,重复频率在 1~10 Hz 之间。

如图 1(a)所示,LSI 的试验装置由约束层、烧蚀层、软膜、工件以及微模具组成。当激光穿过约束层并作用于烧蚀层表面时,激光会瞬间辐射在烧蚀层上,使其材料迅速气化,由此会瞬间产生高温高压等离子体,等离子体继续吸收能量并迅速膨胀,然后爆炸,在烧蚀层和约束层间产生较大的冲击压力,并且在约束层作用下,冲击波压力向下运动并陆续加载到软膜以及工件上。当冲击波压力超过工件材料的屈服强度时,样品紧贴在微模具特征表面,从而完成样品表面对微模具多尺度微纹理沟槽微织构的复制。

试验中约束层采用的是厚度为 2 mm 的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)。烧蚀层则采用厚度 40 μm 的纯

铝箔。PMMA 对等离子体有限制作用,使得产生等离子体的冲击压力增大,同时也可以延长等离子体冲击波的持续时间^[25]。本试验采用纯度为 99.9%,厚度为 80 μm 的紫铜作为样品材料。软膜则采用聚氨酯橡胶,该材料可以均化冲击压力的空间分布,同时保护工件免受激光烧蚀的影响^[28]。

2.2 性能表征

使用扫描电子显微镜(SEM,S-3400N,Hitachi,日本)观察与测量工件表面微织构。使用 X 射线能谱仪(EDS,EDAX Inc.,美国)对工件表面元素进行检测与分析。采用超景深三维显微镜(VHX-1000C,KEYENCE,日本)观察工件表面微织构的三维形貌和轮廓。采用基于视频的光学接触角测量仪(OCAH200,Dataphysics,德国)测量静态接触角,选择用于静态接触角测量的水滴体积为 5 μL,每个表面接触角测 7 次并取平均值作为试验结果。

2.3 模具形貌

图 2、图 3 分别为第一次、第二次标刻后微模具表面的 SEM 图像。图 2 中,经过第一次标刻后,微模具表面得到一定程度的毛化,产生了微米级别凹坑以及少量碎絮状突起颗粒。图 3 中,经过两次标刻后的微模具沟槽微织构十分明显,排列也均匀整齐。在图 3(a)~(c)中,可以观察到沟槽织构。图 3(d)~(f)分别为观察的沟槽微织构顶部、左侧和右侧区域的具体形貌,可以发现表面存在许多微米级的突起结构。而图 3(g)~(i)分别为图 3(d)~(f)中的部分放大区域,可以发现有许多细小絮状突起物附着在微米级突起结构上,故微模具表面存在多级微织构。

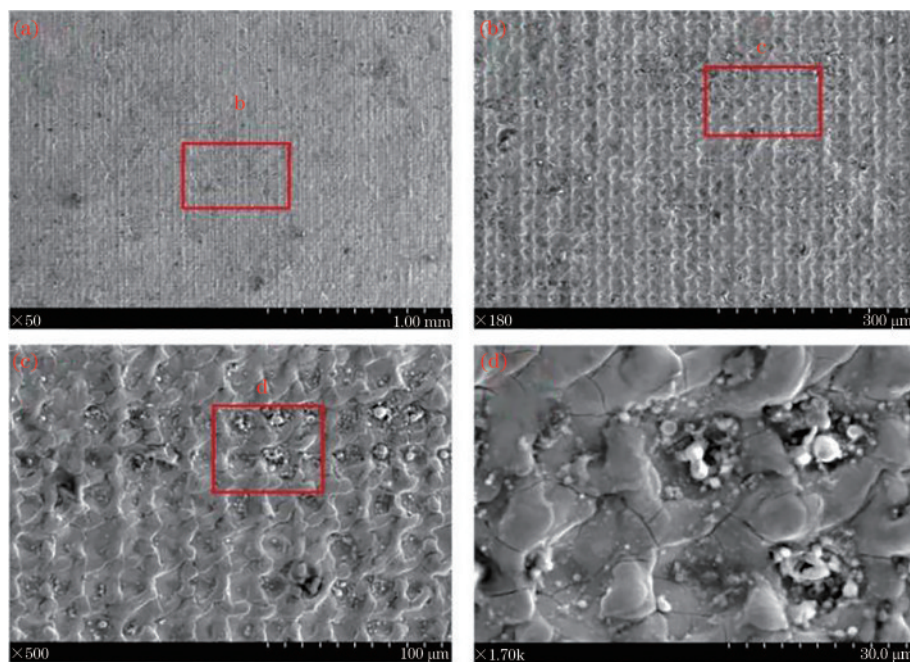


图 2 第一次标刻后微模具表面的 SEM 图像

Fig. 2 SEM images of micro-mold surface after the first marking

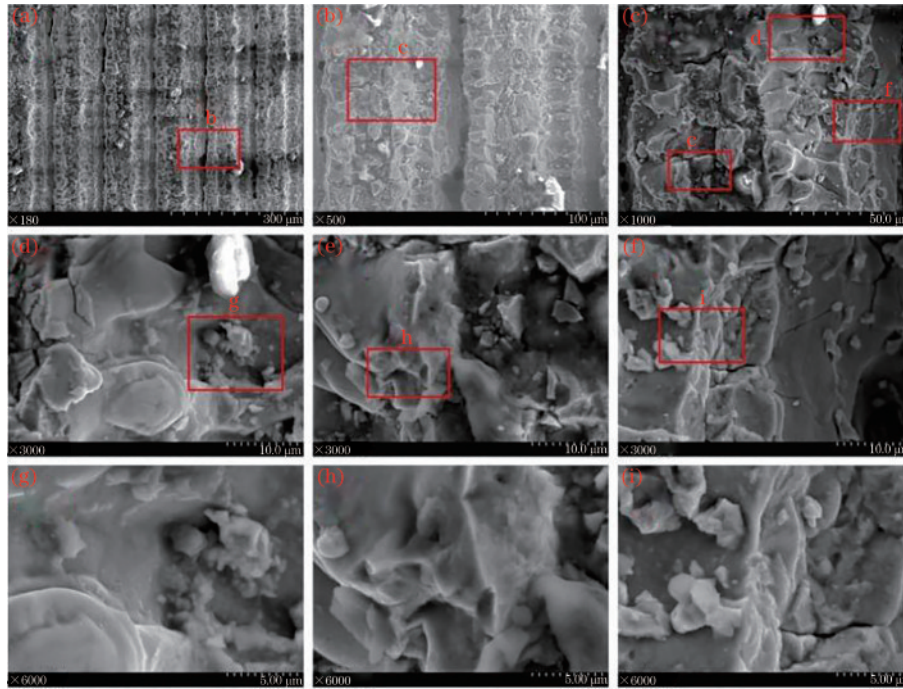


图 3 第二次标刻后微模具表面沟槽微结构的 SEM 图像

Fig. 3 SEM images of groove microtexture on the surface of micro-mold after the second marking

3 分析与讨论

3.1 冲击次数的影响

试验中分别选取了 1、3、5、7 这 4 种不同冲击次数，

其他试验参数如下：冲击能量为 1690 mJ，软膜厚度为 100 μm。不同冲击次数下工件成形表面的 SEM 图像如图 4 所示，可以发现，随着冲击次数的增大，成形件表面沟槽微结构越来越明显，表面也产生越来越多的

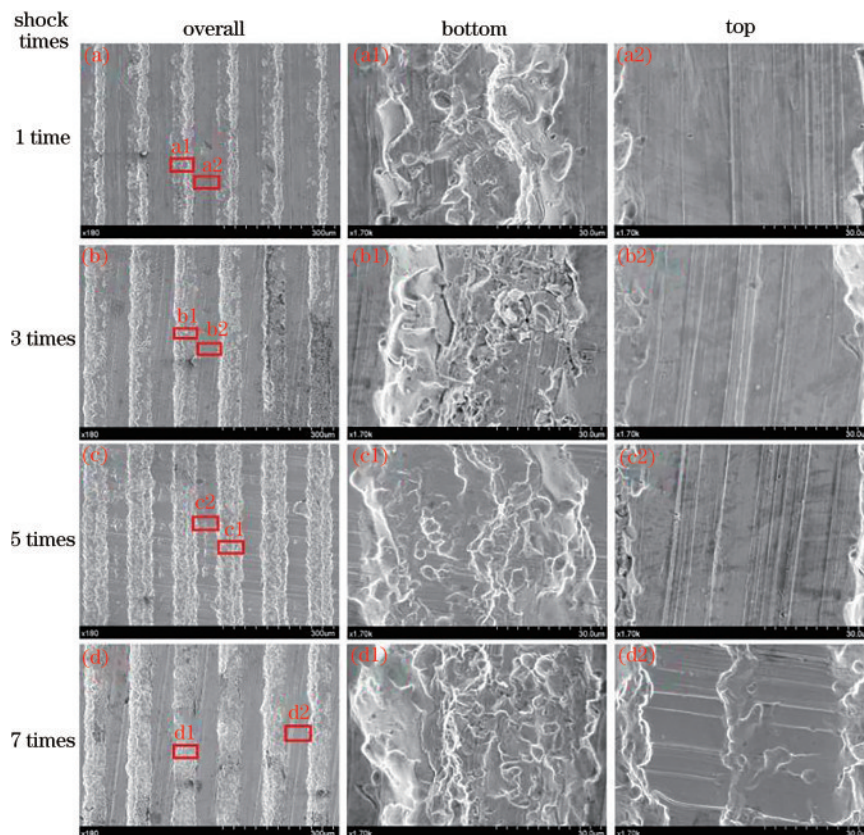


图 4 不同冲击次数下工件成形表面的 SEM 图像

Fig. 4 SEM images of workpiece forming surface under different shock times

突起与颗粒结构,成形效果不断改善。不同冲击次数下工件成形表面的成形深度变化规律如图 5 所示,可以看出,随着冲击次数的不断变大,烧蚀层会在后面的冲击中继续产生等离子体,而等离子体会不断吸收能量直至膨胀爆炸,烧蚀层继续产生较大的冲击波压力,冲击波压力加载在软膜以及工件表面并且在超过工件表面屈服强度后,继续使工件产生形变,因此工件成形深度变大,成形效果更好,工件与微模具之间的贴合度也变得更高。从图 4 可以看出,在工件表面沟槽微结构非常明显,且分布比较均匀,表面沟槽微结构底部、顶部区域存在不少微米级突起。同时,可以看到更多细小絮状突起附着在微米级特征表面,因此工件表面也较好地复制了微模具多尺度沟槽微结构。

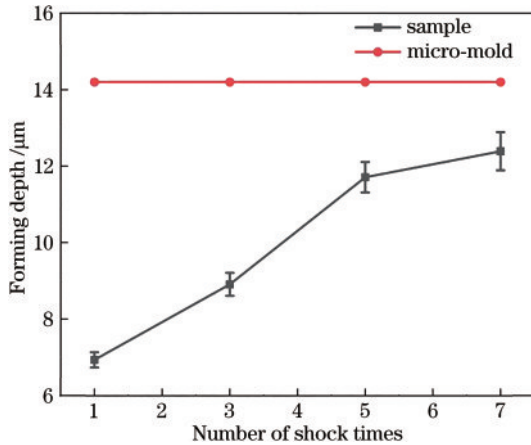


图 5 不同冲击次数下工件成形表面的成形深度变化规律
Fig. 5 Variation of forming depth of workpiece forming surface under different numbers of shock times

样品工件的润湿性主要由静态接触角来表征,一般接触角小于 90°为亲水性,大于 90°定义为疏水性。不同冲击次数下工件静态接触角的变化规律如图 6 所示,当冲击次数分别为 0、1、3、5、7 次时,工件接触角分别为 83°、91°、95°、101°、105°,工件表面从亲水性转化

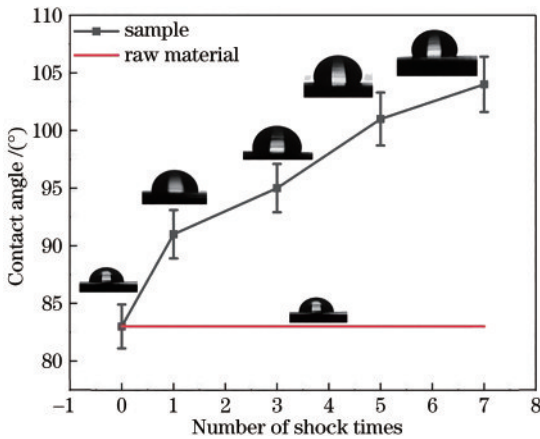


图 6 不同冲击次数下工件静态接触角的变化规律
Fig. 6 Variation of static contact angle of workpiece under different numbers of shock times

为疏水性。由于工件表面不规则,固体表面较粗糙,液滴没有与沟槽微结构完全接触,工件表面润湿情况更接近于 Cassie-Baxter 模型。Cassie-Baxter 模型方程表示为

$$\cos \theta_r = f \cos \theta + f - 1, \quad (1)$$

式中: θ_r 为静态接触角; f 为固体液体润湿面积占总面积的比值。根据方程可知,固体表面与水润湿面积在总面积的比重 f 减少,固体表面与空气接触的面积在总面积的比重变大,静态接触角 θ_r 变大。

从图 6 可以看出,随着冲击次数的增多,工件接触角在变大。这是因为随着冲击次数的增多,工件表面沟槽微结构的成形效果越来越好,尤其是产生的突起与颗粒结构,使得表面越来越粗糙。图 7 为不同冲击次数下工件表面润湿状态示意图。如图 7(a) 所示,当冲击次数为 1 次时,工件表面沟槽微结构作为一级微结构在激光冲击压印作用下成形,工件表面内部晶粒也得到初步细化,在沟槽底部产生少量二级细晶微结构,表面性能得到提升。在与水接触过程中,由于沟槽微结构表面光滑,水滴可以渗透到沟槽底部,所以表面静态接触角较小。在图 7(b) 中,随着冲击次数增大到 7 次,激光冲击压印程度强化,工件表面沟槽微结构成形效果变好,在微结构的表面也产生了大量二级细晶微结构,同时工件表面内部晶粒得到进一步细化,表面性能得到进一步强化^[6]。由于微结构的表面存在大量二级细晶微结构,水滴与工件表面之间存在大量的间隙,微结构颗粒附着在工件表面,在水滴下提供了足够的空间作为“空气陷阱”,形成了一个典型 Cassie-Baxter 状态。工件表面变得粗糙使得 f 较小,固体空气接触面积在总面积的比重较大,静态接触角 θ_r 较大,疏水性增强,工件表面由亲水性转化为疏水性。

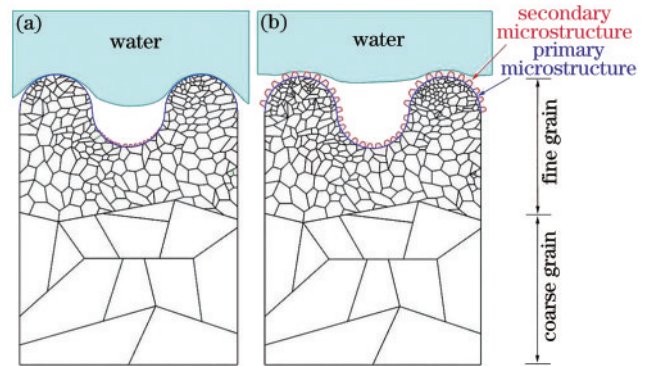


图 7 不同冲击次数下工件表面润湿状态示意图。(a) 冲击次数为 1 次; (b) 冲击次数为 7 次

Fig. 7 Schematic diagram of workpiece surface wettability under different numbers of shock times. (a) Number of shock times is 1; (b) number of shock times is 7

3.2 软膜厚度的影响

分别选取了 0 μm (无软膜)、100 μm、200 μm 以及 300 μm 四种不同厚度规格的软膜来进行冲击压印,其

他参数如下:冲击能量为 1690 mJ,冲击次数为 7 次。为了研究软膜厚度对于冲击压力的改善效果,在成形表面的横截面上分别选取 20 个凹槽,测量其成形深度的分布情况,如图 8 所示。可以发现,有软膜情况下工件成形深度要优于无软膜情况,而随着软膜厚度的增大,成形工件的成形深度也在递减。当软膜厚度为 100 μm 时,成形工件的深度最大,同时具有较好的成形均匀性。这是由于软膜可以均化冲击压力的空间分布,增加约束层和工件之间的约束效应,所以软膜的存在可以改善成形效果^[29]。而随着软膜厚度的增大,软膜自身弹性变形

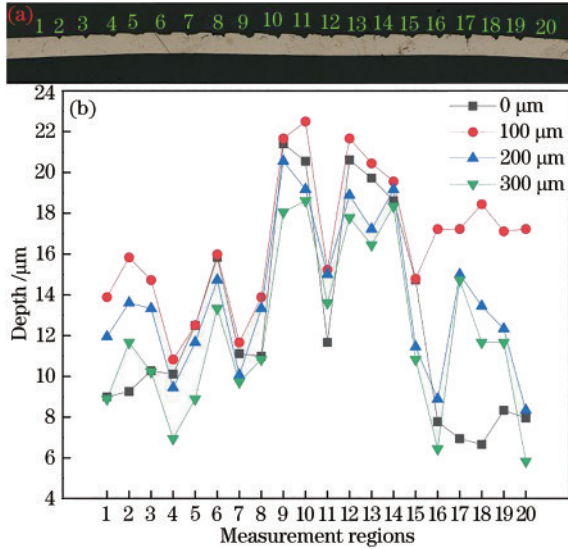


图 8 不同软膜厚度下工件表面凹槽成形效果。(a)凹槽选取示意图;(b)成形深度变化规律

Fig. 8 Forming effect of groove on workpiece surface under different soft film thicknesses. (a) Schematic diagram of groove selection; (b) variation of forming depth

消耗的冲击能量逐渐增大,所以成形深度逐渐减小。

不同软膜厚度下工件静态接触角的变化规律如图 9 所示,当软膜厚度分别为 0 μm 、100 μm 、200 μm 、300 μm 时,工件接触角分别为 92°、105°、99°、96°。原材的接触角为 83°,经过激光冲击压印之后,表面从亲水性转化为疏水性。不同软膜厚度下工件成形表面的 SEM 图像如图 10 所示。从图 10 可以看出,随着软膜厚度减少,成形件表面沟槽微织构越来越明显,成形效果得到改善。不同软膜厚度下工件表面接触角的变化规律与不同冲击次数下工件表面润湿的变化规律相同,从图 7 和图 10 可以看出,当软膜厚度从 300 μm 变化到 100 μm 时,工件表面沟槽微织构成形效果变好,在微织构的表面也产生了大量二级细晶微织构,同时内部晶粒细化,表面性能强化^[6]。由于微织构的表面存在大量二级细晶微织构,水滴与工件表面之间存在

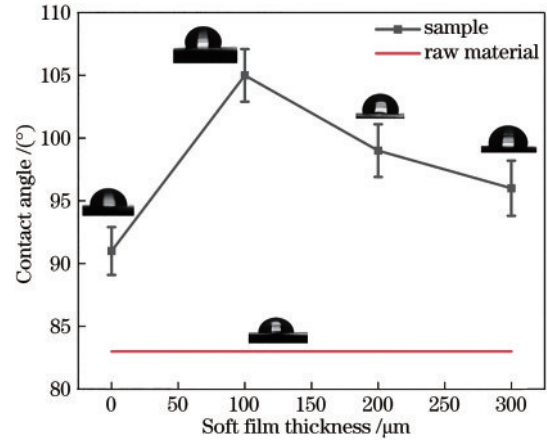


图 9 不同软膜厚度下工件静态接触角的变化规律

Fig. 9 Variation of static contact angle of workpiece under different soft film thicknesses

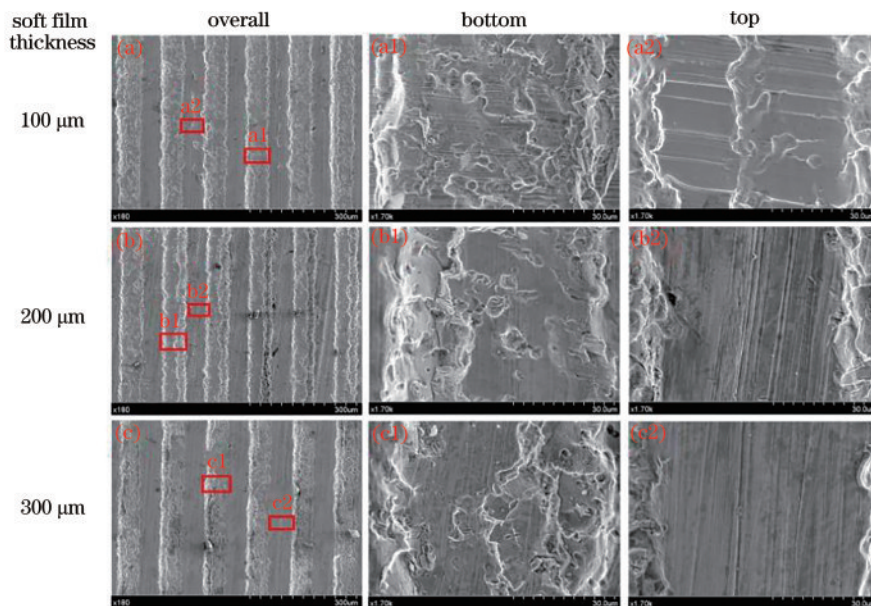


图 10 不同软膜厚度下工件成形表面的 SEM 图像

Fig. 10 SEM images of workpiece forming surface under different soft film thicknesses

大量的间隙,从而形成了一个典型 Cassie-Baxter 状态,工件表面粗糙使得 f 较小,固体空气接触面积在总面积的比重较大,静态接触角 θ 较大,疏水性增强,工件表面由亲水性转化为疏水性。

3.3 时效性

在激光冲击压印试验中,选取冲击能量为 1690 mJ,冲击次数为 7 次,软膜厚度为 100 μm 。在这样的工艺参数下,烧蚀层会产生更大的等离子体和冲击波压力,工件会发生更剧烈的变形以及更好的成形效果,同时在微结构的表面也产生了大量二级细晶微结构,使得水滴与工件表面之间存在大量的间隙,形成了一个典型 Cassie-Baxter 状态,工件表面粗糙使得 f 较小,固体空气接触面积在总面积的比重较大,静态接触角 θ 较大,工件表面疏水性增强,从而可以制备出良好疏水性的工件表面。为了研究工件疏水表面的时效性,将其分别放在空气、水、质量分数 3.5% NaCl 溶液中各 21 天,在不同天数时测量其表面接触角并研究其变化规律,接触角变化如图 11 所示。在空气中,前 7 天里,工件表面的接触角几乎没变,从第 7 天开始,表面接触角开始下降。而在水和 3.5% NaCl 溶液中,工件表面接触角下降速度从第一天就很快,到达一定天数后下降速度慢慢变缓,到第 21 天,表面在 3 种环境下的接触角分别为 103° 、 101.5° 、 99° 。可以发现,工件表面在这 3 种环境下均保持了疏水性,表现出优异的时效性。这是由于工件表面微结构经过激光冲击压印后,表面内部晶粒细化(图 7),工件表面机械性能得到提升^[6],其抗腐蚀破坏能力得到加强,增强了工件表面的时效

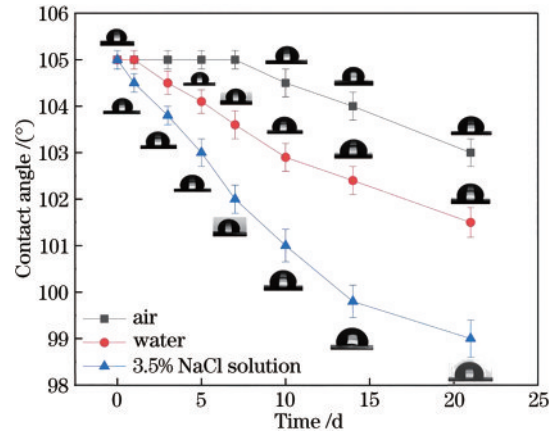


图 11 不同化学环境下工件疏水表面的接触角随时间的变化规律

Fig. 11 Variation of contact angle of hydrophobic surface of workpiece with time in different chemical environments

性。经过一定程度腐蚀破坏后,接触角为 99° ,工件表面仍表现为疏水性,表现出良好的时效性。

将工件疏水表面放置在质量分数 3.5% NaCl 溶液中,分别观察测量第 1、3、7、14、21 天时,表面沟槽微结构顶部、底部和原材区域的形貌与成分含量变化,如图 12、表 1 所示。从图 12 可以看出,随着时间的不断增大,工件表面沟槽微结构的顶部、底部和原材区域中产生的新突起与颗粒物越来越多,区域表面遭到腐蚀破坏程度越来越严重。从表 1 可以看出,随着时间的增大,沟槽微结构的顶部、底部和原材区域 C、O、Na、Cl 元素含量都在增大,Cu 元素含量都在减小。且同一时间内,

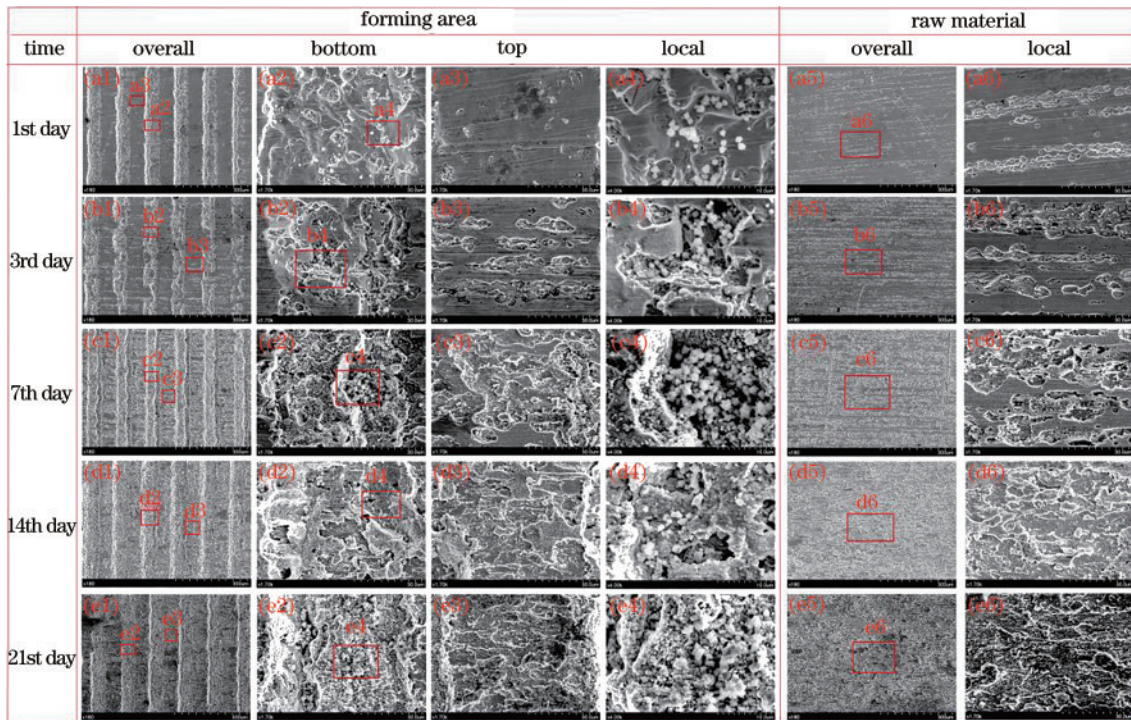


图 12 在 NaCl 溶液中第 1、3、7、14、21 天工件疏水表面的 SEM 图像

Fig. 12 SEM images of hydrophobic surface of workpiece on the 1st, 3rd, 7th, 14th, and 21st days in NaCl solution

表1 在 3.5% 的 NaCl 溶液中第 1、21 天沟槽微织构顶部、底部以及原材区域的 EDS

Table 1 EDS of the top, bottom, and raw material area of the groove microtexture on the 1st and 21st days in 3.5% NaCl solution

Area	Fraction / %				
	C	O	Na	Cl	Cu
Top (1st day)	1.34	0.19	0.23	0.24	93.11
Bottom (1st day)	1.18	0.13	0.13	0.15	94.05
Raw material (1st day)	1.03	0.11	0.09	0.02	95.05
Top (21st day)	10.99	6.14	1.99	1.49	78.68
Bottom (21st day)	10.64	5.86	1.90	1.18	80.12
Raw material (21st day)	10.18	5.49	1.24	0.97	81.28

顶部区域 C、O、Cl 元素含量最大,这是由于顶部区域与 NaCl 溶液的接触更充分。工件疏水表面与 NaCl 发生反应,在沟槽微织构上形成了氯化铜等物质,对表面沟槽微织构造成了严重的腐蚀破坏,所以表面接触角不断减小,疏水性会慢慢降低。

将工件分别放在空气与水中 21 天,观察测量表面沟槽微织构顶部、底部区域的形貌与成分含量变化,如图 13、表 2 所示。从中可以发现,在空气中,工件疏水表面沟槽微织构被慢慢氧化,形成氧化铜,使得 O 元素含量增加,氧化铜附着在沟槽微织构上,对其造成了轻微的破坏,所以接触角不断减少,表面疏水性慢慢弱

化。但弱化效果有限,在空气中 21 天后,工件表面仍表现为疏水性。在水中,工件表面沟槽微织构在长期浸泡下会与氧气以及水反应产生铜锈,导致了 C、H 以及 O 元素含量增加,铜锈也会对表面微织构产生一定程度的破坏,所以接触角在减少,表面疏水性会降低。工件表面在空气、水中的情况与在 3.5% NaCl 溶液中情况大致相似,工件沟槽微织构表面经过激光冲击压印后,表面内部晶粒细化,表面机械性能得到提升以及表面强度改善^[6],其抗破坏能力得到提升,增强了表面时效性,空气与水对工件表面的破坏效果很有限,所以在水中 21 天后,工件表面也仍表现为疏水性。

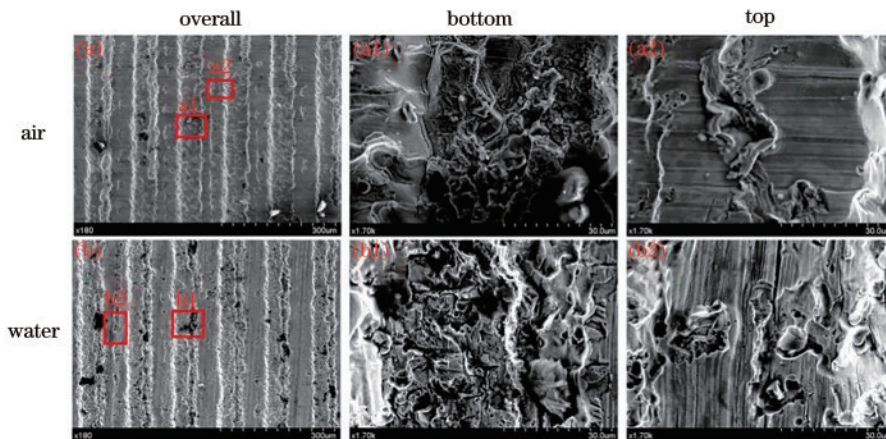


图 13 在空气、水中第 21 天工件表面沟槽微织构的 SEM 图像

Fig. 13 SEM images of groove microtexture on the workpiece surface on the 21st day in air and water

表 2 在空气、水中第 1、21 天工件沟槽微织构的 EDS

Table 2 EDS of workpiece groove microtexture on the 1st and 21st days in air and water

Environment	Mass fraction / %			
	C	O	H	Cu
Air (1st day)	3.61	0.68	—	96.05
Air (21st day)	10.22	3.04	—	85.67
Water (1st day)	5.43	1.34	0.21	92.58
Water (21st day)	16.45	4.21	1.34	79.14

4 结 论

本文采用激光冲击压印工艺来制备具有多级沟槽

微织构的疏水铜箔表面,研究了冲击次数、软膜厚度对疏水表面的表面形貌、接触角的影响。结果表明:当冲击次数从 1 次增加到 7 次时,由于烧蚀层会在后面的冲击中继续产生等离子体和冲击波压力,工件会发生更剧烈的变形;当软膜厚度从 300 μm 减少至 100 μm 时,软膜自身弹性变形消耗的冲击能量变小,这些都会使工件表面复制微织构的程度逐渐增大,工件成形深度变大,成形效果变好。同时工件经过激光冲击压印后,沟槽微织构产生大量二级细晶微织构,使得固体表面与空气接触面积在总面积比例增大,表面接触角变大,沟槽微织构表面从亲水性转变为疏水性。将经过激光冲击压印后的工件分别放在空气、水以及质量分数

3.5%NaCl 溶液中 21 天来进行时效性试验。结果发现:工件表面沟槽微织构遭到破坏,由于表面经过激光冲击压印,晶粒得到细化,机械性能提升,抗腐蚀破坏能力提高,所以其疏水性下降但影响效果有限,最后表面仍为疏水性,体现出该工艺所制备的疏水表面具有优异的时效性。

参 考 文 献

- [1] Lee K J, Lyu S N, Lee S M, et al. Characteristics and self-cleaning effect of the transparent super-hydrophobic film having nanofibers array structures[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(22): 6729-6735.
- [2] Zhu J Y, Wan H R, Hu X F. A rapid one-step process for the construction of corrosion-resistant bionic superhydrophobic surfaces[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2016, 100: 56-62.
- [3] Qi Y L, Chen S J, Zhang J. Fluorine modification on titanium dioxide particles: improving the anti-icing performance through a very hydrophobic surface[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 476: 161-173.
- [4] 潘瑞, 张红军, 钟敏霖. 三级微纳超疏水表面的超快激光复合制备及防除冰性能研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(2): 0202009.
Pan R, Zhang H J, Zhong M L. Ultrafast laser hybrid fabrication and ice-resistance performance of a triple-scale micro/nano superhydrophobic surface[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(2): 0202009.
- [5] Zhang F, Gao S J, Zhu Y Z, et al. Alkaline-induced superhydrophilic/underwater superoleophobic polyacrylonitrile membranes with ultralow oil-adhesion for high-efficient oil/water separation[J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, 513: 67-73.
- [6] Shen Z B, Zhang L, Li P, et al. Altering the surface wettability of copper sheet using overlapping laser shock imprinting[J]. *Applied Surface Science*, 2021, 543: 148736.
- [7] Millionis A, Loth E, Bayer I S. Recent advances in the mechanical durability of superhydrophobic materials[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2016, 229: 57-79.
- [8] Zhu J Y. A novel fabrication of superhydrophobic surfaces on aluminum substrate[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 447: 363-367.
- [9] Zhang X W, Zhou T, Liu J, et al. Volcano-like hierarchical superhydrophobic surface synthesized via facile one-step secondary anodic oxidation[J]. *Applied Surface Science*, 2021, 540: 148337.
- [10] Zhang M J, Guo C F, Hu J. One-step fabrication of flexible superhydrophobic surfaces to enhance water repellency[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 400: 126155.
- [11] 周培阳, 彭耀政, 黄泽铭, 等. 纳秒激光制备的超疏水表面及其液滴冲击性能[J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0402012.
Zhou P Y, Peng Y Z, Huang Z M, et al. Fabrication and droplet impact performance of superhydrophobic surfaces developed using nanosecond lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0402012.
- [12] 章泽斌, 花银群, 叶云霞, 等. 基于皮秒激光的超疏水镍铝青铜合金表面的制备[J]. *中国激光*, 2019, 46(3): 0302013.
Zhang Z B, Hua Y Q, Ye Y X, et al. Fabrication of superhydrophobic nickel-aluminum bronze alloy surfaces based on picosecond laser pulses[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(3): 0302013.
- [13] 王冬, 张振宇, 张朝阳, 等. 皮秒激光参数对仿生跨尺度乳突织构表面润湿性的影响[J]. *中国表面工程*, 2021, 34(3): 110-119.
Wang D, Zhang Z Y, Zhang Z Y, et al. Effects of picosecond laser parameters on surface wettability of cross-scale bionic mastoid-like texture[J]. *China Surface Engineering*, 2021, 34(3): 110-119.
- [14] 李晨, 程光华, Razvan Stoian. 飞秒激光诱导金属钨表面周期性自组织结构的研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0532001.
Li C, Cheng G H, Razvan S. Investigation of femtosecond laser-induced periodic surface structure on tungsten[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0532001.
- [15] Huang J H, Xu Z T, Li X N, et al. An experimental study on a rapid micro imprinting process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 283: 116716.
- [16] Koo S J, Kim H S. The homogeneity of multi-textured micro-pattern arrays in a laser shock surface patterning process and its effect on the surface properties of aluminum alloy[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 382: 125149.
- [17] 郭永升, 孙霄川, 羊茜, 等. 基于激光冲击动态力学效应的薄板变形特性与控制[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(8): 081402.
Guo Y S, Sun X C, Yang X, et al. Fabrication and controlling of metal sheets based on dynamic and mechanical effect of laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 081402.
- [18] 王飞. 脉冲激光冲击成形的理论与实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008: 73-86.
Wang F. Theoretical and experimental research on laser shock forming[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008: 73-86.
- [19] 张文昊, 刘会霞, 沈宗宝, 等. 多层金属复合板激光冲击柔性微成形实验研究[J]. *中国激光*, 2017, 44(7): 0702001.
Zhang W H, Liu H X, Shen Z B, et al. Experimental research on laser-shock flexible micro-forming of multilayer-metal composite sheets[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0702001.
- [20] 罗晓, 刘伟建, 张红军, 等. 超快激光制备金属表面可控微纳二级结构及其功能化[J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 1502002.
Luo X, Liu W J, Zhang H J, et al. Ultrafast laser fabricating of controllable micro-nano dual-scale metallic surface structures and their functionalization[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(15): 1502002.
- [21] Shen Z B, Zhang J D, Liu H X, et al. Reducing the rebound effect in micro-scale laser dynamic flexible

- forming through using plasticine as pressure-carrying medium[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, 141: 1-18.
- [22] Jin S Y, Wang Y X, Motlag M, et al. Large-area direct laser-shock imprinting of a 3D biomimic hierarchical metal surface for triboelectric nanogenerators[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(11): 1705840.
- [23] Man J X, Zhao J Y, Yang H F, et al. Study on laser shock imprinting nanoscale line textures on metallic foil and its application in nanotribology[J]. *Materials & Design*, 2020, 193: 108822.
- [24] Yang H F, Jia L, Liu K, et al. High precision complete forming process of metal microstructure induced by laser shock imprinting[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 108(1/2): 143-155.
- [25] Man J X, Yang H F, Wang Y F, et al. Study on controllable surface morphology of the micro-pattern fabricated on metallic foil by laser shock imprinting[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 119: 105669.
- [26] Kim D G, Kim J G, Chu C N. Aging effect on the wettability of stainless steel[J]. *Materials Letters*, 2016, 170: 18-20.
- [27] Han J P, Cai M Y, Lin Y, et al. 3D re-entrant nanoglass on microcones for durable superamphiphobic surfaces via laser-chemical hybrid method[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 456: 726-736.
- [28] Shen Z B, Wang X, Liu H X, et al. Rubber-induced uniform laser shock wave pressure for thin metal sheets microforming[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 327: 307-312.
- [29] Chen H, Yuan Z Q, Zhang J D, et al. Preparation, characterization and wettability of porous superhydrophobic poly (vinyl chloride) surface[J]. *Journal of Porous Materials*, 2009, 16(4): 447-451.