

# 6061 铝合金的冲压式微坑阵列制备技术研究

林晓辉<sup>1,2</sup>, 孙宇奇<sup>1</sup>, 孙国梁<sup>1</sup>, 许嘉洛<sup>1</sup>

(1. 厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361000;  
2. 厦门市机器人系统与数字制造重点实验室, 福建 厦门 361000)

**摘要:** **目的** 提升 6061 铝合金的表面耐磨性能, 并延长其使用寿命。**方法** 采用工业机器人辅助的冲压式微坑阵列加工技术, 利用冲压头产生的冲击力效应, 在 6061 铝合金表面形成圆柱形微坑及其阵列。构建电磁式冲压制备系统, 采集印压力信息, 并进行分析。设计印压力迭代学习控制系统, 保证印压力输出准确稳定、微坑深度可控, 提高微坑阵列制备质量。进行 6061 铝合金的冲压微坑加工实验, 探究印压力对微坑形貌的影响, 并评价微坑阵列的一致性。进行微坑阵列的销-盘式摩擦实验, 探究冲压式微坑列表面的减摩耐磨性能。**结果** 微坑表面形貌与深度受到印压力的影响较大, 印压力为 25~35 N 时可获得规则的表面形貌。印压力与微坑深度呈正相关, 有效制备深度为 50~85  $\mu\text{m}$ 。微坑的间距误差主要由工业机器人的定位误差引起。微坑阵列深度误差为 3%, 直径误差为 2%, 阵列具有良好的一致性。微坑阵列样品的摩擦因数均小于原始样品的摩擦因数。摩擦因数先随着微坑面积密度的增大而减小, 当面积密度达到 14% 后, 摩擦因数有所增大。相对于微坑面积密度, 微坑深度对摩擦因数的影响甚微。微坑阵列储油、存储磨粒能够改善试样表面耐磨性能, 与原始试样相比, 磨痕截面积最大可减少 63.4%。**结论** 冲压式制备工艺可高效、绿色、高质量地制备微坑阵列, 有效改善了 6061 铝合金的表面减摩耐磨性能。

**关键词:** 冲压; 微坑; 力控制; 6061 铝合金; 阵列; 摩擦性能

**中图分类号:** TH162 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)23-0180-10

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.23.016

## Preparation Technology of Embossed Micro-pits Array of 6061 Aluminium Alloy

LIN Xiaohui<sup>1,2</sup>, SUN Yuqi<sup>1</sup>, SUN Guoliang<sup>1</sup>, XU Jiaming<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Fujian Xiamen 361000, China;  
2. Xiamen Key Laboratory of Robot Systems and Digital Manufacturing, Fujian Xiamen 361000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to enhance the wear resistance of 6061 aluminum alloy and prolong its service life. The mechanical embossing technique was proposed for micro-pits array fabrication assisted by industrial robot. The cylindrical micro-pits array of 6061 aluminium alloy was embossed by impact effect with carbide tip oscillating in its axial direction at certain frequency. The electromagnetic embossing fabrication system was designed including voice motor, motion control card, signal amplifier, force sensor and industrial robot. The carbide tip was driven by voice motor and the path programming of

收稿日期: 2023-11-23; 修订日期: 2024-05-31

Received: 2023-11-23; Revised: 2024-05-31

基金项目: 福建省自然科学基金 (2021J011200)

Fund: Natural Science Foundation of Fujian Province (2021J011200)

引文格式: 林晓辉, 孙宇奇, 孙国梁, 等. 6061 铝合金的冲压式微坑阵列制备技术研究[J]. 表面技术, 2024, 53(23): 180-189.

LIN Xiaohui, SUN Yuqi, SUN Guoliang, et al. Preparation Technology of Embossed Micro-pits Array of 6061 Aluminium Alloy[J]. Surface Technology, 2024, 53(23): 180-189.

embossing tracks were controlled by industrial robot. The embossing forces were collected by force sensor and analyzed during the embossing process. In order to improve the quality of micro-pits array, the iterative learning control system of embossing force was designed and the expected output forces were rapidly and accurately responded. Therefore, the embossing force control system could ensure the accurate and stable embossing force and controllable depths of micro-pits. The embossed micro-pits experiment of 6061 aluminium alloy was carried out and embossing force was chosen as key a parameter. Two types of arrays, rectangle and annular, were embossed on the 6061 aluminium alloy specimens. The effect of embossing force on topography of micro-pits was investigated and the consistency of micro-pits array was evaluated. Furthermore, the friction performance of micro-pits array was experimentally studied with a pin-disc-type apparatus and the effect of area density and depth on friction coefficient was investigated. The experimental results showed that the embossing force had great effect on the surface topography and depth of micro-pits. Large embossing force led to bulge and extra marks, while small embossing force caused little deformation. Hence, it was found that intact surface topographies were obtained when 25-35 N embossing force was adopted. The depths of micro-pits were positively associated with embossing force and the effective depths of micro-pits were 50-85  $\mu\text{m}$ . The deviations of interval of micro-pits were mainly caused by positional accuracy of industrial robot. The deviations of depths and diameters of micro-pits were 3% and 2%, respectively, indicating that the micro-pits array had a good consistency. The friction coefficients of specimens with micro-pits array with different area density and depth of micro-pits were all less than those of as-received 6061 aluminum alloy specimens. The friction coefficients decreased with increasing of area density, however, the large area density of micro-pits led to bulge around the embossed micro-pits and the values of surface roughness increased. Thus, the friction coefficients turned to increase when area density reached 14%. The depth of micro-pits had little effect on the friction coefficients compared to area density. The embossing micro-pits were conducive to lubricating oil storage and reduction of friction in sliding contacts, the maximum sectional area of wear marks could be reduced by 63.4%. Based on this, the embossing micro-pits array on 6061 aluminium alloy is a suitable way to enhance the wear resistance. As a result, the mechanical embossing technique is a high-efficiency green process for high-quality micro-pits array fabrication, which additionally results in an enhancement in wear resistance, thus opening up a wide range of potential applications in tribologically loaded surfaces.

**KEY WORDS:** embossing; micro-pits; force control; 6061 aluminium alloy; array; friction performance

铝合金具有质轻、比强度高、易于加工等优点,被广泛应用于航空航天、船舶、汽车等领域<sup>[1-5]</sup>。由于铝合金存在硬度低、耐磨性差等缺点,极大地限制了其使用范围,因此提升铝合金的摩擦学性能具有重要意义<sup>[6-10]</sup>。有研究表明,在材料表面制备凹坑型微坑,可以使其具备良好的储油效果,在相对运动中能够大幅度减小摩擦<sup>[11-14]</sup>。

目前,微坑制备的主要方法有激光加工、电火花加工、电解加工、机械加工,以及多种方式复合加工等<sup>[15-20]</sup>。激光加工可分为激光烧蚀技术、激光冲击技术,激光烧蚀具有定域性强、无污染、加工效率高等优点。华希俊等<sup>[21]</sup>采用皮秒激光在钛合金表面制备微坑,研究发现钛合金表面出现热积累现象,易产生熔渣,从而影响加工精度。采用激光冲击波产生的力效应制备微坑,能够改善材料的表面力学性能,冯旭等<sup>[22]</sup>使用激光冲击在灰铸铁表面制备微坑阵列,增强了灰铸铁的耐磨性能,但激光冲击所制备的微坑阵列的几何精度较低。电火花加工利用放电过程中产生的热能去除材料,适合于加工特殊复杂结构的零件。杨志伟<sup>[23]</sup>采用电火花技术在 2Cr13 钢表面加工出边长为 200  $\mu\text{m}$ 、深度为 50~100  $\mu\text{m}$  的方形微坑阵列,但电火花加工电

极会出现磨损,需要经常更换电极。微细电解加工具有受材料的限制小、阴极无磨损等优点。王明环等<sup>[24]</sup>采用掩膜微细电解加工在不锈钢表面加工出深径比为 0.204 的凹坑型微坑,但微细电解加工间隙较难控制,且电解液循环系统成本高。机械加工利用机械装置产生的力效应,改变材料表面形貌,从而提高其摩擦性能,Chen 等<sup>[25]</sup>研制了一种微坑 CNC 高频电磁冲压系统,冲压头在电磁效应的作用下冲击工件表面,产生微坑,可以实现高速制备一致性较好的微坑阵列,但受到冲压装置的影响,无法灵活调控阵列密度和微坑深度。复合加工能够克服单一加工技术的局限性,进一步提升微坑阵列制备质量。蒋雯等<sup>[26]</sup>提出了激光烧蚀复合电化学加工技术,改进了激光烧蚀表面形貌差及电化学定域性差的缺陷,但多种加工技术的结合使加工过程更为复杂,从而提升了微坑阵列制备难度。从上述分析可知,微坑产业化的主要挑战是制造设备成本高、加工耗时长、制备工艺烦琐等<sup>[27]</sup>,因此高效率、低成本、适用于大规模产业应用的微坑阵列加工技术仍是当前的研究重点和发展趋势。

本文设计了一种低成本、高效率、灵活性好的机器人辅助微坑阵列冲压制备系统。冲压制备法本质是

利用力效应改变材料的物理形貌,通过控制印压力来提高微坑制备质量,并从微坑表面形貌及一致性方面探究印压式工艺。通过摩擦学实验分析加工参数对6061 铝合金表面摩擦性能的影响,为微坑阵列对铝合金工件的减摩耐磨影响提供了新的思路。

1 印压式微坑阵列制备工作原理

印压制备系统采用机器人搭载印压装置的方式进行微坑阵列制备。印压加工原理如图 1 所示,音圈电机作为印压装置的核心元器件,其直线运动的优势是将电能直接转换成机械能,能够减少传动过程带来的能量损耗。通过辅助连接件,将印压头安装于音圈电机动子上,构成运动部件,运动部件与导轨相连,并固定于机架。两侧的肋板保障了整个印压执行器的稳定运行。运动部件受到电磁力的影响,以高加速直线运动方式,将印压头垂直压入工件表面。当冲击力超过材料表面屈服强度时,局部发生塑性变形,从而形成微坑。

本文由机器人控制微坑阵列分布,首先对待制备工件构建三维模型,从中获取微坑阵列位置分布信息。将微坑位置信息转化为机器人路径点坐标,并生成加工路径,计算出路径点法向量,以保证印压机构能够始终沿着路径点坐标的法向方向。接着建立机器

人印压机构姿态矩阵,将其转化为对应的四元数信息。最后编写机器人运动程序,导入机器人控制器中,完成印压加工路径的控制。

2 印压力控制方案

对于微坑阵列,阵列中的微坑形貌及深度应具备较高的一致性。印压力极大地影响了微坑的形貌和深度,因此构建力控制系统对于提高微坑阵列的制备质量至关重要。

2.1 印压力控制系统

如图 2 所示,力控制系统由上位机、运动控制卡、信号放大器、电机驱动器、力传感器、印压装置等构成。力传感器被置于待制备试样下方,收集印压过程中的力数据。运动控制卡模块将采集到的力数据上传到上位机,上位机对获取到的力数据进行处理,并更新控制指令。更新的控制指令用于印压装置的音圈电机输入信号,达到控制印压力的目的。

2.2 印压力分析

印压法的本质是利用印压头产生的冲击力使材料发生形变,鉴于瞬时冲击力难以检测与控制,对其进行如下分析。已知冲击力的计算见式(1)。在制备过程中,印压头到达试件表面的速度的计算见式(2)。

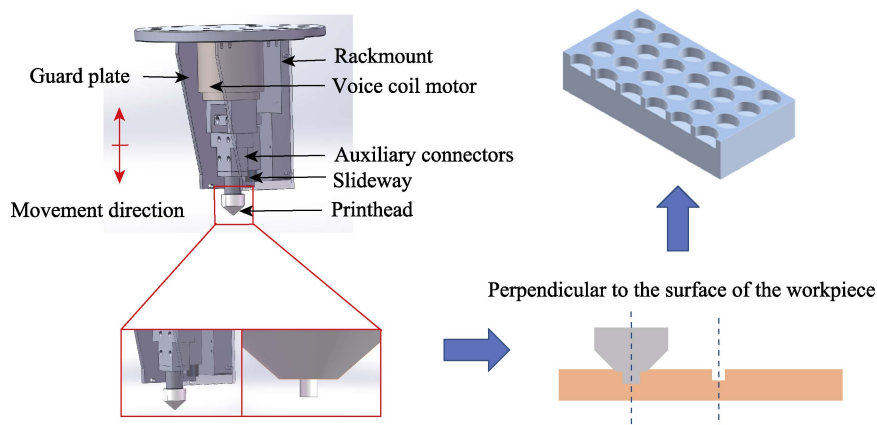


图 1 印压制备原理  
Fig.1 Principle of mechanical embossing

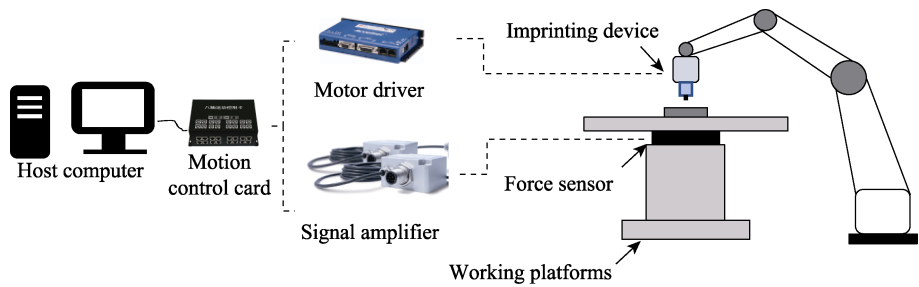


图 2 印压力控制系统  
Fig.2 Embossing force control system

由式 (1)~(2) 可得到试件受到的印压力, 见式 (3)。

$$F_t t = mv \quad (1)$$

$$v = \sqrt{\frac{2Fx}{m}} \quad (2)$$

$$F_t = \frac{\sqrt{2mFx}}{t} \quad (3)$$

式中:  $F$  为电机推力;  $F_t$  为冲击力;  $t$  为碰撞时间;  $v$  为运动速度;  $a$  为加速度;  $x$  为印压头运动行程;  $m$  为运动部分总质量。

在制备过程中, 运动行程  $x$ 、负载总质量  $m$ 、碰撞时间  $t$  均保持不变。由式 (3) 可知, 冲击力  $F_t$  由电机输出的推力  $F$  决定。综上分析, 可以通过控制音圈电机输出力的方式改变微坑形貌。在制备微坑时,

使印压头在铝合金表面短暂驻留, 让力传感器能充分采集音圈电机输出的力信息。

## 2.3 印压力的迭代学习控制

采用印压法制备微坑阵列, 微坑在印压力的作用下瞬间成型, 印压力输出持续时间短, 且在单次微坑制备中不具备调整性。另一方面, 每制备 1 个微坑就重复 1 次印压过程, 可以将微坑阵列制备看作一个重复过程。针对这些特性, 采用迭代学习控制算法, 设定期望力  $y_d$ , 利用前几次加工输出力的误差信息  $e_k$  来调整音圈电机输入  $u_k$ , 使得输出力  $y_k$  达到期望力  $y_d$ 。将迭代学习控制策略用于印压系统力控制的结构如图 3 所示。

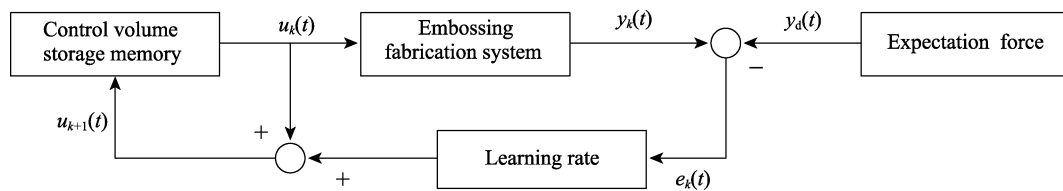


图 3 系统控制框图

Fig.3 System control block

这里采用 P 型迭代学习控制算法, 其数学描述具体形式见式 (4)。

$$\begin{cases} u_{k+1}(t) = u_k(t) + k_p e_k(t) \\ e_k(t) = y_d(t) - y_k(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $u_{k+1}(t)$  为当前控制输入量;  $u_k(t)$  为前一次控制输入量;  $k_p$  为学习因子,  $e_k(t)$  为误差,  $y_d(t)$  期望输出力,  $y_k(t)$  为实际输出力, 下标  $k$  为迭代次数。

迭代学习算法收敛是应用的前提, 即迭代次数  $k$  趋于无穷大时, 跟踪误差趋于零。由 P 型学习率可知, 选择合适的学习增益就可以使算法收敛, 文献[28]给出了详细的 P 型学习率收敛性证明。

通过对上述控制策略的设计, 将 P 型迭代学习控制算法应用于微凹坑印压制备系统中。选取学习增益  $k_p = 0.012$ , 设置期望力轨迹为 40 N, 以此开展实验。如图 4 所示, 输出力误差呈渐近性减少, 在第 15 次

迭代时已经收敛, 并且系统的跟踪误差趋于 0。音圈电机多次迭代学习后的输出力变化情况如图 5 所示, 印压力的持续时间短但稳定, 在 15 次迭代后实现了期望力的完全跟踪, 说明 P 型迭代学习算法在微凹坑印压系统中对期望输出力的快速高精度跟踪是有效的。

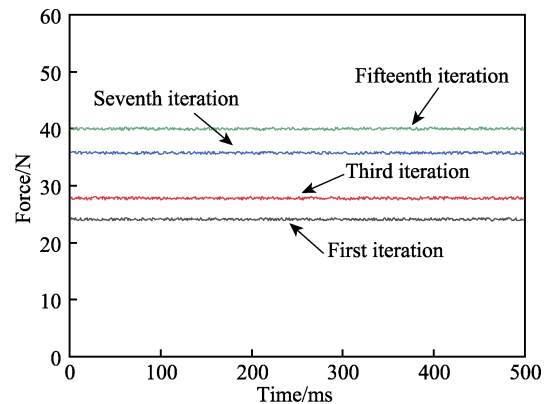


图 5 印压力迭代输出曲线

Fig.5 Iterative output curve for embossing force

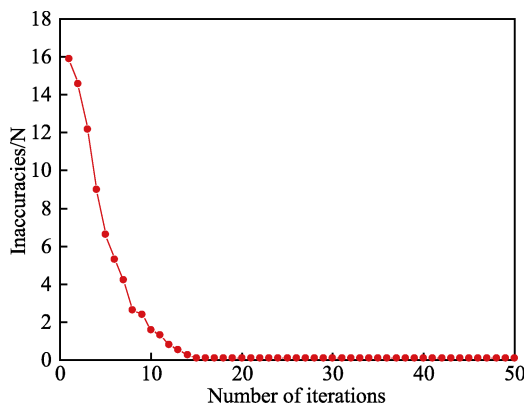


图 4 迭代学习误差曲线

Fig.4 Iterative learning error curve

## 3 印压实验分析

如图 6 所示, 搭建了印压制备实验平台, 采用 ABB IRB 6700 工业机器人, 力传感器选用欧路达 AT8602 系列。选用北京星微自动化科技有限公司的 XVLC180-005-00N 音圈电机作为印压装置的核心元件, 最大行程为 5 mm, 瞬时峰值推力为 180 N。选取直径为 0.6 mm 的圆柱形印压头, 在 6061 铝合金试样表面制备圆形微坑阵列。



首先制备单个微坑,探究印压力对微坑形貌的影响规律。利用白光干涉仪 Zygo NewView 9000 观测微坑形貌,选取印压力参数范围为 10~40 N。部分微坑形貌如图 7 所示,当印压力为 20 N 时,印压头无法促使材料发生较大形变,微坑深度较浅且呈不规则状。当印压力为 30 N 时,凹坑成型效果好,形貌与

印压头一致,微坑周围未出现较高隆起。当印压力为 40 N 时,凹坑周围出现明显隆起,并且出现额外印痕,表面形貌不规则。可能的原因包括印压力过大造成的撕裂和印压头的磨损,导致制备精度降低。由此可见,现有印压系统存在一个合理的印压力范围,可在 6061 铝合金上制备较高质量的圆形微凹坑。

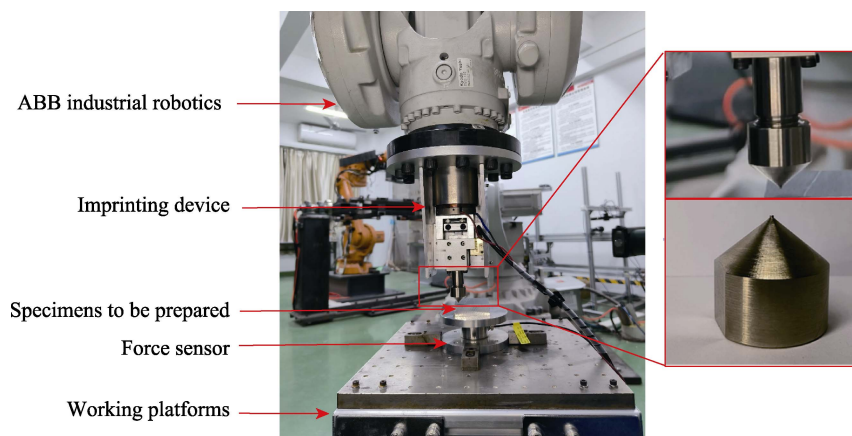


图 6 印压制备实验平台

Fig.6 Mechanical embossing experiment platform

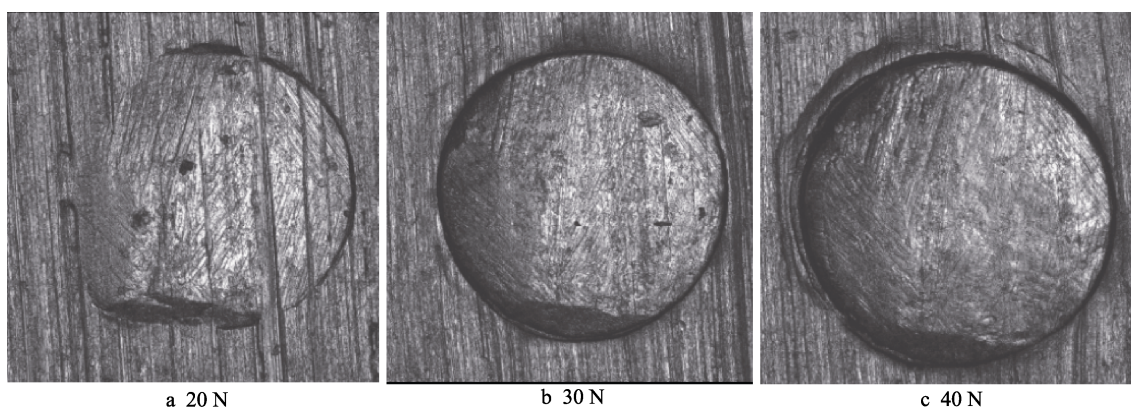


图 7 不同力作用下的表面凹坑形貌

Fig.7 Surface topography of micro-pits under different forces

经过实验筛选,在印压力为 25~35 N 时,微坑形貌最佳。在不同印压力下,微坑深度与直径的关系如图 8 所示。随着印压力的增加,微坑直径变化较小,在 650~670  $\mu\text{m}$  之间波动,微坑深度随着力的增加逐渐增大,两者呈正相关,深度的有效制备范围为 50~85  $\mu\text{m}$ 。

利用工业机器人完成微坑阵列的制备,并分析微坑分布的一致性。在 6061 铝合金表面制备矩形和环形微坑阵列的实物如图 9 所示。阵列中微坑分布一致性是衡量微坑阵列质量的重要参数之一。相较于环形阵列,矩形阵列可以直观地观测工业机器人对微坑阵列分布的控制情况。本文阵列微坑的一致性评价参数包括微坑中心距、深度和直径。

分别制备相邻微坑中心距为 1.2、1.6 mm 的矩形阵列。采用常规采样检测方法从阵列中随机选取 30 个微坑间距。微坑间距为相邻微坑中心距与微坑直径之差,所制备阵列中微坑的直径为 650  $\mu\text{m}$ 。如图 10

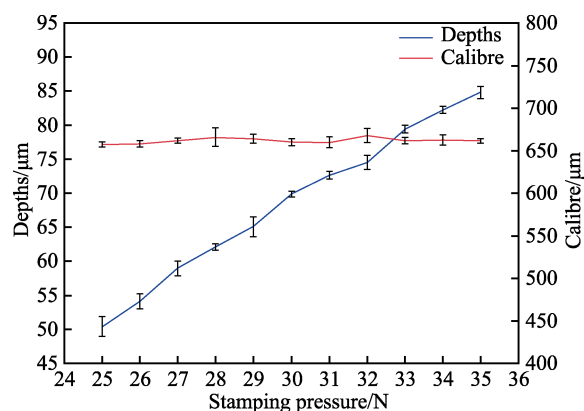


图 8 不同印压力下微坑深度与直径的关系曲线

Fig.8 Relationship between depth and diameter of micro-pits under different embossing forces

所示,在微坑中心距为 1.2 mm 时,理论微坑间距为 550  $\mu\text{m}$ ,实际微坑间距在 500~600  $\mu\text{m}$  之间浮动。在

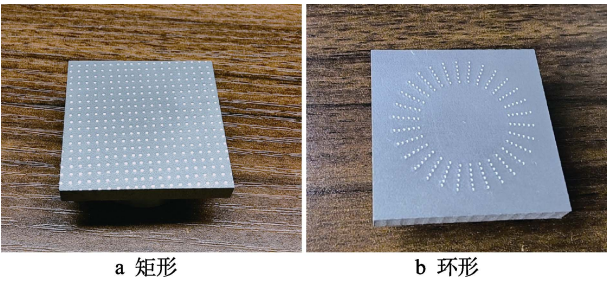


图 9 冲压式微坑阵列实物  
Fig.9 Physical drawing of embossed micro-pit array:  
a) rectangular; b) ring

中心距为 1.6 mm 时, 理论微坑间距为 950  $\mu\text{m}$ , 实际微坑间距在 900~1 000  $\mu\text{m}$  之间浮动, 阵列间距误差在正负 50  $\mu\text{m}$  以内。经分析, 造成相邻微坑间距波动的原因是微坑分布由机器人进给距离决定, 机器人在加工过程中存在定位误差, 误差对于整体织构在可接受范围内。

为了验证阵列中微坑形貌的一致性, 选择印压力为 30 N、微坑中心距为 1 mm 等参数制备微坑阵列。对阵列中任意区域采用白光干涉仪 Zygo NewView 9000 进行形貌观测。如图 11 所示, 微坑底部圆滑平整, 表面形貌规整, 无较高隆起, 微坑分布均匀, 表

明采用冲压法制备的微坑阵列可以保持较好的表面形貌。为了进一步探究所制备微坑阵列深度和直径的一致性, 采用随机采样法, 从阵列中挑选 20 个微坑测量其尺寸和深度。如图 12 所示, 样本中微坑深度的误差在 3%以内, 直径误差在 2%以内。微坑深度与直径具有良好的一致性, 说明在迭代学习控制下每个冲压行程的印压力准确且稳定, 同时验证了冲压式微坑制备具有良好的可控性。

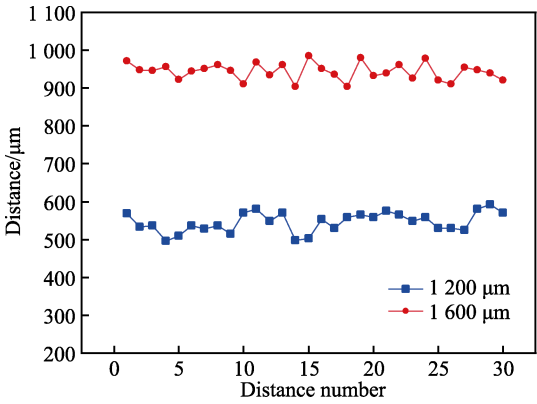


图 10 微坑间距  
Fig.10 Micro-pit spacing

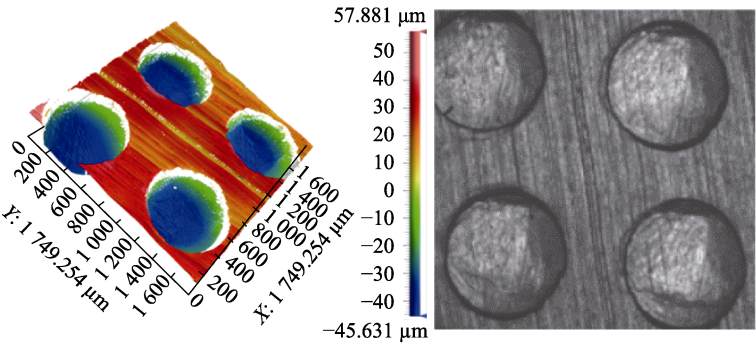


图 11 微凹坑三维形貌  
Fig.11 3D morphology of the micro-pits

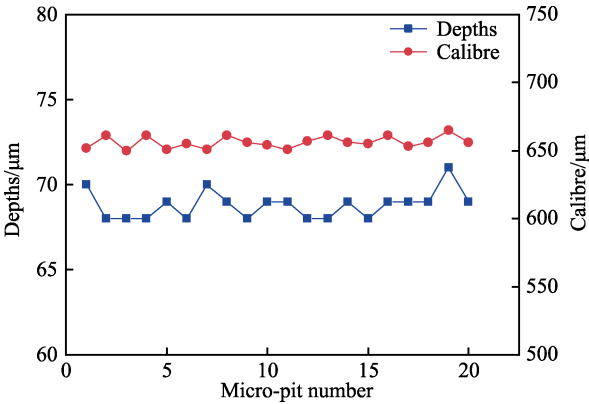
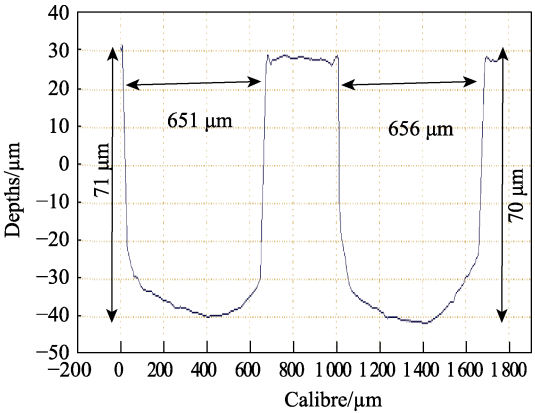


图 12 阵列中微坑尺寸  
Fig.12 Dimensions of the micro-pits in the array

## 4 微坑减摩性能

### 4.1 摩擦试验

选用 MVF-2A 型摩擦磨损试验机, 采用销-盘摩擦副, 摩擦类型为旋转摩擦, 旋转直径为 23.87 mm。上摩擦副选用材料为 45#钢、直径为 2.5 mm 的弧面摩擦销, 经热处理后其硬度为 44HRC~46HRC, 形状如图 13a 所示。下摩擦副材料为 6061 铝合金, 形状如图 13b 所示, 将其底部设计为圆环状, 与试验机夹具尺寸一致, 将其顶部设计为 37 mm×37 mm 的方形平面, 用于制备微坑阵列。

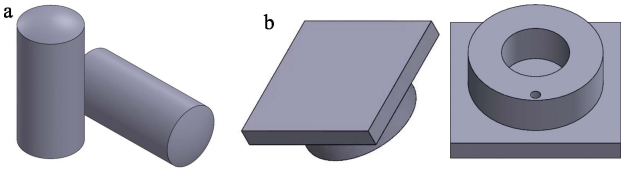


图 13 摩擦销 (a) 及下摩擦副试样 (b)  
Fig.13 Specimen drawing of friction pin (a) and lower friction pair (b)

摩擦磨损试验机工作原理如图 14a 所示, 在进行摩擦实验时, 摩擦销所经过区域为有效摩擦区域, 因

此仅保留有效摩擦区域内的微坑阵列。如图 14b 所示, 将试样表面阵列简化为单圈环形阵列, 进行微坑阵列摩擦实验。

在试验时, 将印压有环形微坑的 6061 铝合金作为下试样, 固定于摩擦磨损试验机载物槽内。使用惠克 L-CKC 润滑油作为润滑介质, 密度为  $890 \text{ kg/m}^3$ , 动力黏度为  $0.057 \text{ 97 kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。本实验模拟乏油工况, 向试样表面滴加少量润滑油, 使用软质刮刀将表面多余润滑油刮去, 在实验过程中不再加油。实验参数如表 1 所示, 每种试样重复进行 3 次实验, 取平均值为最终测量结果。

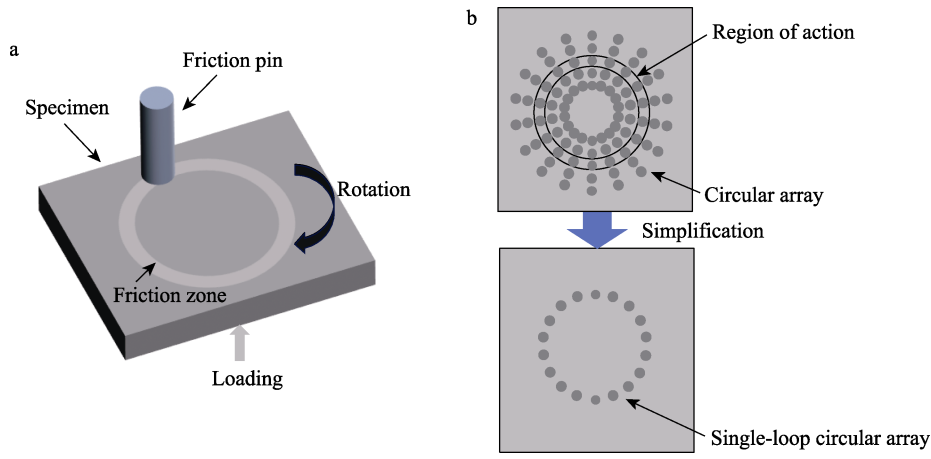


图 14 销盘摩擦原理 (a) 及环形阵列简化图 (b)  
Fig.14 Schematic diagram of pin disc friction (a) and simplified diagram of ring array (b)

表 1 摩擦磨损实验参数  
Tab.1 Experimental parameters of friction wear

Parameters	Value
Loading $F/\text{N}$	20
Rotation speed $v/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	400
Area density $S_p/\%$	8, 10, 12, 14
Depths $h/\mu\text{m}$	50, 60, 70

## 4.2 结果分析

### 4.2.1 印压式微坑阵列对摩擦因数的影响

在微坑深度为  $70 \mu\text{m}$  时, 不同面积密度试样的摩擦因数随时间的变化如图 15 所示, 可知摩擦因数随着面积密度的增大呈现先减小后增大的趋势。这是由于密度越大, 润滑油存储量越多, 润滑效应越明显。当面积密度为 14% 时, 摩擦因数开始变大。这是由于较密的微坑数量造成铝合金表面粗糙度增加, 使得润滑效应减弱。说明选择合理的面积密度可以提升微坑阵列的减摩性能。

不同深度下, 不同面积密度微坑阵列的平均摩擦因数如图 16 所示, 无微坑阵列试样的平均摩擦因数

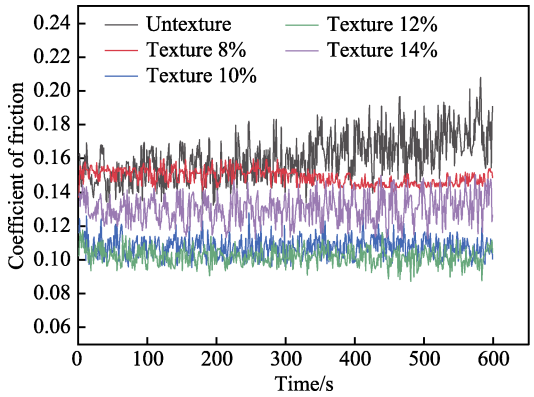


图 15 在深度  $70 \mu\text{m}$  下不同面密度微坑阵列摩擦因数随时间的变化

Fig.15 Friction coefficients of micro-pit arrays with different surface densities at depth of  $70 \mu\text{m}$  versus time

为 0.162 9。当深度为  $50 \mu\text{m}$  时, 微坑阵列试样的平均摩擦因数分别为 0.137 7、0.104 6、0.105 2、0.127 2。当深度为  $60 \mu\text{m}$  时, 平均摩擦因数分别为 0.139 9、0.105、0.102 8、0.126 4。当微坑深度为  $70 \mu\text{m}$  时, 平均摩擦因数分别为 0.136 4、0.105 9、0.104、0.126 1。可知不同面积密度的微坑阵列样品的平均摩擦因数



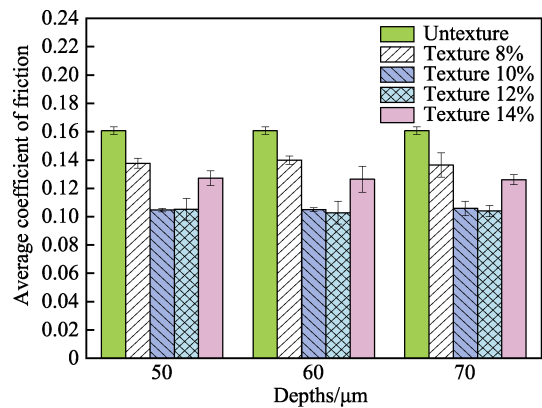


图 16 摩擦因数随微坑深度的变化曲线  
Fig.16 Plot of friction coefficient as a function of micro-pit depth and density

均小于原始样品的平均摩擦因数,当微坑阵列密度为12%时可获得最佳减摩效果,冲击冲压制备的表面微坑具有减摩润滑效果。当面积密度相同时,不同深度的微坑阵列的平均摩擦因数相差不大,微坑深度对摩擦因数的影响较小。

4.2.2 磨损形貌分析

试样表面磨损形貌如图 17 所示,未制备微坑阵列的试样表面磨损严重,出现了黏着磨损,且存在明显的犁沟及材料剥落现象。带有微坑阵列试样的表面磨损形貌以磨粒磨损为主,试样表面仅存在轻微的划

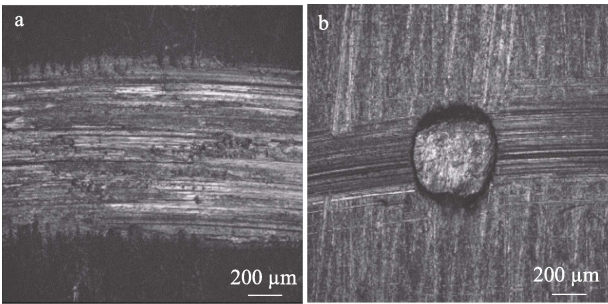


图 17 未制备微坑阵列试样 (a)、微坑阵列试样 (b) 的磨损形貌  
Fig.17 Wear morphology of unprepared micro-pit array specimen (a) and micro-pit array specimen (b)

痕和犁沟,圆形微坑发生了变形。在乏油状态下,微坑可以存储润滑油,当摩擦销经过微坑时,对其产生了挤压作用,使微坑存储的润滑油溢出,起到了“二次润滑”的效果,有效降低了因摩擦热产生的黏着磨损。此外,微坑具有存储磨粒的作用,能够减轻磨粒对试样表面的切削作用。

为了进一步探究冲压式微坑阵列的耐磨性能,对深度为 70  $\mu\text{m}$  的不同面积微坑阵列试样磨损表面进行了三维形貌表征。不同面积密度试样的磨损三维形貌如图 18a~e 所示,可以看出,带有微坑阵列的试样表面磨痕深度及宽度皆小于无微坑阵列试样。不同面积密度试样的磨痕截面积如图 18f 所示,其中面积密度为 8%、14%的试样的表面磨损程度大于面积密度

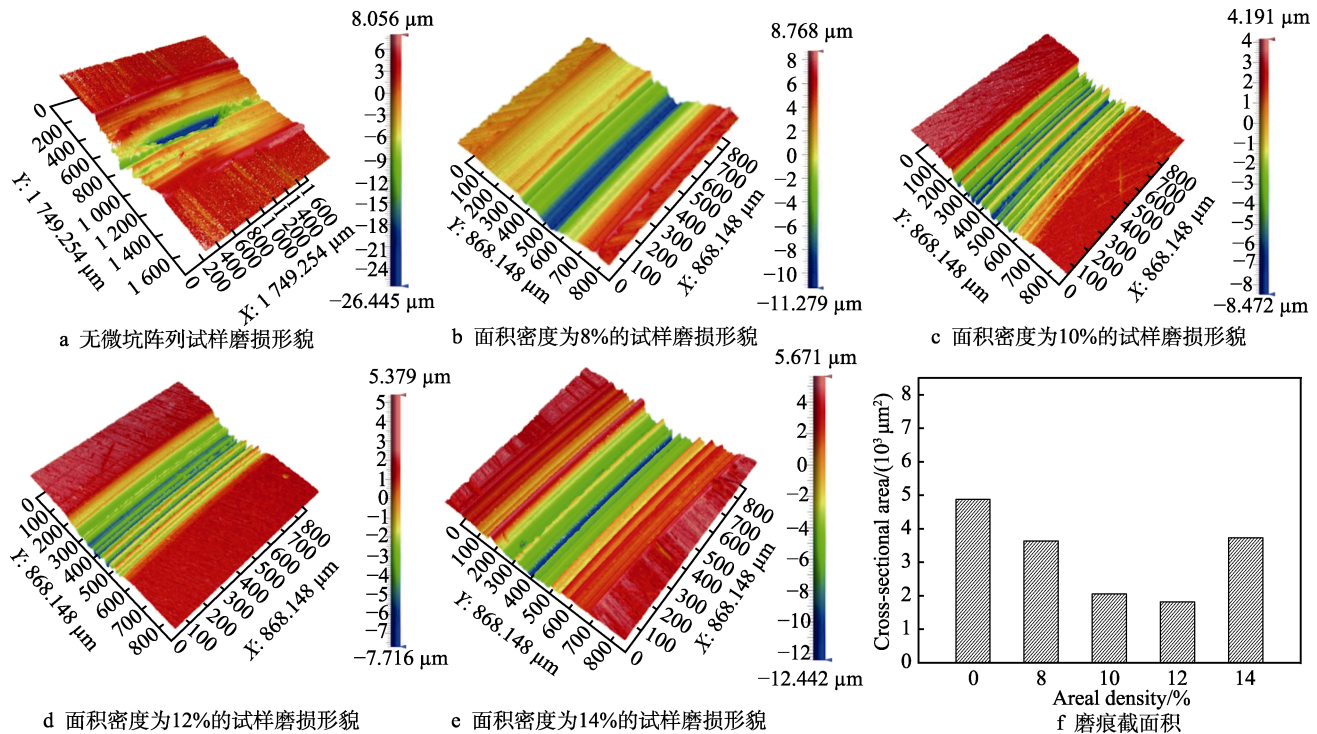


图 18 不同面积密度试样表面磨损三维形貌和磨痕截面积  
Fig.18 Three-dimensional morphology of surface wear and cross-sectional area of abrasion marks on specimens with different area densities: a) wear morphology of micro-pitless array specimens; b) wear pattern of specimens with an area density of 8%; c) wear pattern of a specimen with an area density of 10%; d) wear pattern of a specimen with an area density of 12%; e) wear pattern of a specimen with an area density of 14%; f) cross-sectional area of abrasion marks

10%、12%的试样。微坑阵列的耐磨性能随着密度的增大呈现先减小后增大的趋势,在面积密度为 12%时所展现出来的耐磨性能最佳,磨痕截面积减少了约 63.4%。经分析,当微坑数量较少时,微坑提供的润滑油数量有限,且磨粒存储能力有限,因此耐磨性能较差。当密度较大时,降低了试样与摩擦销之间的接触面积,两者接触时平均压力增大,导致试样表面磨损加剧。由此可见,选择合理的面积密度可以获得最佳的耐磨性能。

## 5 结语

设计了一种印压式微坑表面制备系统,采用工业机器人搭载印压装置的方式制备 6061 铝合金表面微坑。所制微坑阵列形貌规则、一致性较好,是一种低成本、环保的绿色加工工艺。通过印压式微坑阵列实验得出以下结论。

1) 设计的印压装置的印压力为 25~35 N 时,可在 6061 铝合金表面制备出规则表面形貌的圆柱形微坑阵列。

2) 通过探究印压系统制备的微凹坑阵列表面形貌可知,采用印压法制备的微坑阵列深度与直径具有良好的一致性。

3) 摩擦学实验表明,采用印压法制备的环形微坑阵列在乏油润滑下能够显著提高铝合金试样的摩擦性能。微坑深度对摩擦因数的影响不大,在合理的参数范围内,微坑面积密度的增加可有效降低摩擦因数。

4) 微坑阵列能够提升 6061 铝合金的耐磨性能,带有微坑阵列试样的磨损程度均优于无微坑阵列试样。磨损程度随着面积密度的增大,呈现先减小后增大的趋势。

### 参考文献:

- [1] 李斌,董丽虹,王海斗,等. 航空航天铝合金腐蚀疲劳研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(7): 106-118.  
LI B, DONG L H, WANG H D, et al. Research Progress on Corrosion Fatigue of Aerospace Aluminum Alloy[J]. Surface Technology, 2021, 50(7): 106-118.
- [2] 刘贞山,李英东,赵经纬,等. 汽车轻量化用铝合金材料及应用技术研究[J]. 中国材料进展, 2022, 41(10): 786-795.  
LIU Z S, LI Y D, ZHAO J W, et al. Research on Aluminum Alloy Materials and Application Technology for Automobile Lightweight[J]. Materials China, 2022, 41(10): 786-795.
- [3] 胡海亮. 船舶与海洋工程中铝合金的运用研究[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(4): 45-48.  
HU H L. Research on Application of Aluminum Alloy in Ship and Marine Engineering[J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(4): 45-48.
- [4] 李岩,卞贵学,徐宁,等. 新型航空清洗剂对航空铝合金防盐雾性能影响的分析[J]. 装备环境工程, 2023, 20(8): 9-14.  
LI Y, BIAN G X, XU N, et al. Analysis of Effect of New Aircraft Cleaning Agent on Anti-salt Fog Performance of Aeronautical Aluminium Alloy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(8): 9-14.
- [5] 张瑶,李岩,胡志力. AA6061 铝合金薄壁构件单点增量成形表面质量研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(8): 1-9.  
ZHANG Y, LI Y, HU Z L. Surface Quality of AA6061 Aluminum Alloy Thin-walled Component by Single Point Incremental Forming[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(8): 1-9.
- [6] PANCRECIOS J K, DEEPA J P, JAYAN V, et al. Nanoceria Induced Grain Refinement in Electroless Ni-B-CeO<sub>2</sub> Composite Coating for Enhanced Wear and Corrosion Resistance of Aluminium Alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 356: 29-37.
- [7] 杜忠泽,芮星,王强,等. 铝合金汽车发动机缸体内壁表面改性的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(增刊 1): 336-340.  
DU Z Z, RUI X, WANG Q, et al. Research Progress on Surface Modification of Aluminum Alloy Automotive Engine Cylinder Inner Wall[J]. Materials Reports, 2018, 32(Sup. 1): 336-340.
- [8] 赵艳君,陆泽鹏,丁俊,等. Zr 与 Er 复合添加后的高镁铝合金耐磨性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(2): 609-616.  
ZHAO Y J, LU Z P, DING J, et al. Wear Resistance of High Mg-Al Alloy with Combining Additions of Zr and Er[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(2): 609-616.
- [9] 唐艳茹,潘利华,常宇,等. 微弧氧化提高铝合金耐磨性能的研究[J]. 表面技术, 2015, 44(2): 48-54.  
TANG Y R, PAN L H, CHANG Y, et al. Improving the Wear Resistance of Aluminum Alloy through the Micro-Arc Oxidation Technology[J]. Surface Technology, 2015, 44(2): 48-54.
- [10] YU S X, ZHANG Z Q, WANG Q, et al. Study on Wear Resistance of Local Aluminum Alloy Reinforced by Carbon Fiber Transfer Membrane Region[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23: 5772-5782.
- [11] 符永宏,汤伯虎,纪敬虎,等. 微凹坑结构表面摩擦学性能的实验研究[J]. 润滑与密封, 2013, 38(5): 19-23.  
FU Y H, TANG B H, JI J H, et al. Experimental Study on Tribological Properties of Laser Textured Micro-Dimple Surface[J]. Lubrication Engineering, 2013, 38(5): 19-23.
- [12] DU H H, CHEN H W, ZHU Z W, et al. Novel Hybrid Machining Process of Titanium Alloy for Texturing High-Quality Microstructure Array Surfaces[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 462: 129494.
- [13] 鲍雨梅,吴霄,王成武. 织构对混合润滑条件下人工关

- 节材料摩擦磨损性能的影响[J]. 浙江工业大学学报, 2019, 47(4): 375-381.
- BAO Y M, WU X, WANG C W. Effect of Texture on Friction and Wear Properties under Mixed Lubrication Conditions for Artificial Joint Materials[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2019, 47(4): 375-381.
- [14] ALI S, KURNIAWAN R, CHUL P G, et al. Tribological Properties of Hierarchical Micro-Dimples Produced on a Cylindrical Surface by Dual-Frequency Texturing[J]. Friction, 2023, 11(2): 246-258.
- [15] 郑晓辉, 宋皓, 张庆, 等. 激光表面结构化对材料摩擦学性能影响的研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(17): 68-74.
- ZHENG X H, SONG H, ZHANG Q, et al. Effect of Laser Surface Texturing on Tribological Properties of Materials: A Review[J]. Materials Review, 2017, 31(17): 68-74.
- [16] 赵昌龙, 王旭旭, 吕起印, 等. 电火花加工表面微结构仿真与实验研究[J]. 制造技术与机床, 2021(7): 21-26.
- ZHAO C L, WANG X X, LYU Q Y, et al. Simulation and Experimental Study on Micro Texture of EDM Surface[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2021(7): 21-26.
- [17] 王清清, 傅秀清, 张震, 等. 回转体表面掩膜微细电解加工有限元分析及试验研究[J]. 机械设计, 2020, 37(3): 47-53.
- WANG Q Q, FU X Q, ZHANG Z, et al. Finite-Element Simulation and Experimental Study on the Mask Micro Electrochemical Machining of the Revolving Surface[J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(3): 47-53.
- [18] 宋云. 三维椭圆振动辅助切削系统研究与开发[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018: 51-60.
- SONG Y. Research and Development of 3D Elliptical Vibration Assisted Cutting System[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018: 51-60.
- [19] 张西方, 徐文杰, 任坤, 等. 超声振动辅助模板电解加工微凹坑方法研究[J]. 现代制造工程, 2022(6): 78-84.
- ZHANG X F, XU W J, REN K, et al. Research on the Method of Through-Mask Electrochemical Machining of Micro-Dimples with Ultrasonic Vibration[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022(6): 78-84.
- [20] XIAO J R, ZHANG Y T, HU B, et al. Tribological Properties of  $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$  Alloy Composite Texture Fabricated by Ultrasonic Strengthening Grinding and Laser Processing[J]. Materials, 2022, 16(1): 355.
- [21] 华希俊, 王成, 郝静文, 等. TC11 钛合金表面微凹坑织构皮秒激光加工工艺[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 42-47.
- HUA X J, WANG C, HAO J W, et al. Picosecond Laser Processing Technology of Micro-Dimple Texture on Surface of TC11 Titanium Alloy[J]. Surface Technology, 2018, 47(3): 42-47.
- [22] 冯旭, 周建忠, 王建军. 激光喷丸灰铸铁表面摩擦性能的改善研究[J]. 应用激光, 2015, 35(5): 521-524.
- FENG X, ZHOU J Z, WANG J J. Research on Improving Friction Performance of Grey Cast Iron by Laser Peening[J]. Applied Laser, 2015, 35(5): 521-524.
- [23] 杨志伟. 微凸起和微坑结构的特种加工成形技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007: 52-57.
- YANG Z W. Study on Special Machining and Forming Technology of Micro-Convex and Micro-Pit Structure[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007: 52-57.
- [24] 王明环, 王旭峰, 鲍兆彦, 等. 气膜屏蔽微细电解加工方法研究[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(12): 1891-1895.
- WANG M H, WANG X F, BAO Z Y, et al. Investigating Gas Film Shielding Electrochemical Micro-Machining[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(12): 1891-1895.
- [25] CHEN S T, LIN P A, CHIANG C J. A High-Frequency Electromagnetic Stamping System for High-Throughput Stamping of Microdimples[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 303: 117527.
- [26] 蒋雯, 张朝阳, 顾秦铭, 等. 复合工艺制备的表面微凹坑织构的摩擦性能研究[J]. 润滑与密封, 2019, 44(11): 85-89.
- JIANG W, ZHANG Z Y, GU Q M, et al. Tribological Properties of Micro-Pit Texture Generated by Composite Processing[J]. Lubrication Engineering, 2019, 44(11): 85-89.
- [27] CHEN D L, LIU Z Q, LI L, et al. Manufacturing of Dies and an Experimental Study on the Cold-Press Surface-Texture Forming Process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 99: 27-37.
- [28] 于少娟, 齐向东, 吴聚华. 迭代学习控制理论及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- YU S J, QI X D, WU J H. Iterative Learning Control Theory and Its Application[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 32-68.