

文章编号 1004-924X(2016)04-0788-08

研磨抛光表面微孔组织的形成

郑锦华^{1,2}, 吴 双^{1*}, 魏新煦¹, 王俊杰¹, 许 璐¹

(1. 郑州大学 化工与能源学院 热能系统节能技术与装备教育部工程研究中心, 河南 郑州 450001;
2. 郑州瑞邦石油机械有限公司, 河南 郑州 450001)

摘要: 由于表面织构可以改善机械零部件的摩擦磨损特性, 延长其使用寿命, 本文基于研磨抛光方法开发了一种表面微孔快速成型技术。该技术的特点是微孔成型过程与抛光过程同步进行。选取载荷为 0.023 2 MPa、研磨液浓度为 9%、研磨速度为 2.09 m/s 以及研磨粒径为 0.5 μm 作为考察条件, 研究了微孔在金属表面的形成机理, 证明了表面微孔是由于研磨颗粒在表面预制微缺陷处做涡旋运动, 同时工件的自转使研磨颗粒在 360° 方向上依次磨削微缺陷壁面而形成的。利用该技术所形成的微孔周边为圆弧过度, 无其他织构技术所形成的凸起和毛刺, 因此无需进行抛光后处理。利用该方法在一定的织构条件下可以形成次生孔, 从而进一步增加工件的比表面积。另外, 选取合适的研磨时间在适当的织构条件还可以在工件表面形成微米及亚微米孔, 为减少类金刚石 (DLC) 薄膜内应力和提高界面结合强度提供了新的思路。研究显示研磨抛光表面微孔织构技术具有设备简单、效率高、适合大面积、多种材料织构等特点。

关键词: 表面织构; 研磨抛光; 微孔成型; 表面形貌; 次生孔

中图分类号: TG580.692.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162404.0788

Formation of surface micro-pore texture by grinding and polishing

ZHENG Jin-hua^{1,2}, WU Shuang^{1*}, WEI Xin-xu¹, WANG Jun-jie¹, XU Lu¹

(1. *Engineering Research Center of Energy-saving Technology & Equipment of Thermal Energy System of the Ministry of Education, School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;*

2. *Zhengzhou Reborn Petroleum Machinery Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)*

** Corresponding author, E-mail: zzuwshuang@163.com*

Abstract: As surface texturing technology can significantly improve the friction and wear properties of mechanical components and can extend its lifespan, this paper proposes a technology to rapidly form micro-pores on the metal surface by grinding and polishing method. This technology is characterized by carrying molding process and polishing process simultaneously. By choosing a load of 0.0232 MPa, slurry concentration of 9%, polishing rate of 2.09m/s and an abrasive grain diameter of 0.5 μm as the investigation conditions, the formation mechanism of micro-pores on the metal surface is researched. It confirms that the surface micro-pores are formed by the vortex flow motion of the abrasive particles in surface micro defects and the rotation of work component allowing the abrasive particles to grind the wall of defects in turn in the direction of 360°. Moreover, the rounding of micro-pore formed by

收稿日期: 2015-11-10; 修订日期: 2015-12-20.

基金项目: 郑州市创新型科技人才队伍建设工程 资助项目 (No. 131PLJRC639); 河南省“百人计划”资助项目 (豫人才办[2015]4 号)

this technology is arc transition without projections and glitch, which does not require further polishing. By the proposed technology, secondary pores can be formed to extend the specific surface area of the work component under certain texturing condition. In addition, a large amount of micron and sub-micron pores are formed on the surfaces of work components by selecting proper grinding time and texturing condition, which provides a new direction for decreasing the internal film stress and improving interface bonding strength of Diamond-like Carbon (DLC). This study indicates that the micropore texturing technology on grinding and polishing shows the characteristics of simple device, high efficiency as well as large area and multi-material textures adapted.

Key words: surface texturing; grinding-polishing; micropore molding; surface morphology; secondary pore

1 引言

为改善机械零部件的摩擦磨损性能,延长使用寿命,人们采用了各种技术和手段,如表面镀层^[1-3],耐磨材料^[4]、润滑油等。在20世纪60年代出现的表面织构技术已被证明是改善摩擦学性能的有效方法,在推力轴承^[5]、活塞环^[6]、刀具^[7]、生物医学^[8-9]、MEMS^[10]、太阳能电池^[11]方面都得到了成功应用,吸引了国内外大量研究者的广泛关注。

对于表面织构改善摩擦学特性的机理,人们普遍认为是表面织构在不同条件下分别起到充当微小流体动压润滑轴承,增强动压效应而提高承载能力、润滑剂储存器提供持续润滑及捕获磨屑粒子而减小犁沟和颗粒磨损等作用^[5,12-15]。

目前已开发了多种表面织构制备方法,如反应离子刻蚀(RIE)^[16]、光刻(LIGA)^[17]、超声波纳米晶体表面改性(UNSM)^[18-19]、机械加工^[20]、电火花加工(EDT)^[21]和激光表面织构(LST)^[22-24]等。其中反应离子刻蚀需要辅助设备或特殊环境,很难在大气环境下进行;光刻加工工艺过于复杂,成本较高;超声波加工凹坑形貌分布不能灵活设置且凹坑直径过大;机械加工效率较低;电火花加工及其激光表面织构则会由于热效应的影响产生拉伸残余应力和缩孔^[19],且在边缘会形成凸起和毛刺,需要进行二次抛光,因此开发新的高效表面织构技术成为研究热点。

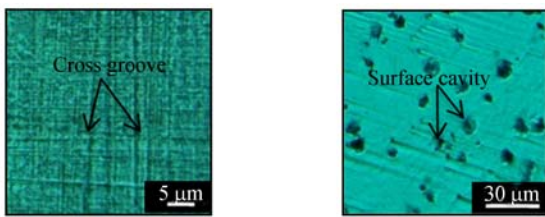
类金刚石薄膜(Diamond-like Carbon, DLC)以其较高的机械硬度、高耐磨性和低摩擦系数等方面受到广泛的关注^[25-26]。然而DLC薄膜较高的残余压应力及其与金属基材间较差的结合强度

是制约其工程应用的关键。将DLC薄膜与表面织构技术相结合^[27-29],利用表面织构的微型图案来释放薄膜内的残余内应力,并使DLC薄膜与基材之间达到界面“锚定”效果来增强其结合强度具有较好的应用前景。如Zheng^[30]等人在研制的复合阳极RF-DCCVD双电源化学气相沉积设置中,利用锯齿结构的辅助阳极产生尖端放电,在SAE1060碳素钢基材上制备了具有微米类陨石坑密度的DLC薄膜,结果显示微米类陨石坑非连续结构能够有效释放膜内的残余压缩应力,延长SAE1060碳素钢基材上沉积DLC薄膜使用寿命。He^[31]等人结合激光表面织构和DLC薄膜来提高钛合金的摩擦学特性,证明具有合适的凹坑面积密度(44%)的DLC薄膜可以显著增强钛合金基底的摩擦性能。Shimizu^[32]等人也发现在干滑动摩擦条件下,微织构的DLC薄膜的摩擦系数相对稳定且较低为0.01~0.06,而常规的无纹理DLC薄膜的摩擦系数为0.25。

在基材处理过程中,经常需要研磨抛光方法使其表面粗糙度符合要求,但却很少有研究者关注在研磨抛光过程中形成的微孔。本文基于研磨抛光方法开发了一种新型表面织构技术,在工件表面快速形成微孔图案,并研究了微孔形成机理,考察了研磨时间对微孔形貌(微孔数目及孔径)的影响。

2 实验方法

所用基材为 $\Phi 40\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ SUS304不锈钢,用机械刻画的方法分别在其表面预制微网格沟槽和微凹坑表面缺陷,如图1所示,其表面粗糙度Ra0.021。



(a) 微网状沟槽表面 (b) 微凹坑表面
(a) Micro cross-groove surface (b) Micro cavity surface

图 1 表面预制微缺陷

Fig. 1 Prefabricated defects on surface

研磨抛光液是由硬质研磨颗粒($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, 粒径为 $0.5\ \mu\text{m}$)、溶剂、分散剂和乳化剂等组成, 高速搅拌 24 h 构成均质悬浮液。

研磨抛光实验在抛光机上进行, 抛光机装置如图 2 所示。工件中心偏离研磨盘中心 100 mm, 并固定在电机的主轴上。工件表面受到向下的重力作用, 紧贴在抛光布表面。在研磨盘中注入一定量的研磨液, 保持研磨液浸入抛光布。工件在电机的带动下做自转的同时, 并绕研磨盘中心公转, 以实现研磨颗粒对工件表面的研磨抛光。在所定的时间间隔通过显微镜来观察工件表面形貌, 同时使用原子力显微镜(AFM)在点接触模式下观察表面织构特征, 并用 TR200 手持式粗糙度仪(精度为 $0.001\ \mu\text{m}$)来测量工件表面的粗糙度, 记录相关数据。每组实验重复进行 3 次, 取其平均值来减小实验误差。

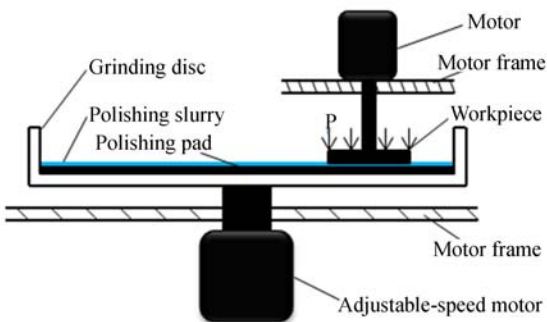


图 2 抛光机装置概略图

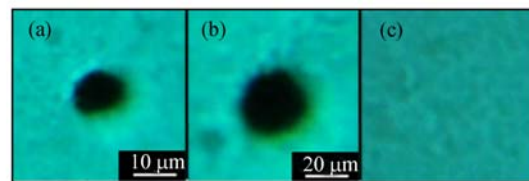
Fig. 2 Schematic drawing of polishing machine

3 结果与讨论

3.1 表面纹理形态及形成机理分析

对于图 1 所示的微网格沟槽和微凹坑两种表面缺陷, 在工件绕研磨盘中心公转且伴随着其自

转过程中形成了如图 3(a)、(b)所示的纹理形态。可以发现, 两种微缺陷表面经研磨抛光均形成圆孔型图案, 且圆孔周边为圆弧过渡, 而在微缺陷之间的平面上将产生平面磨削作用, 达到表面抛光的目的, 如图 3(c)所示, 这表明两种不同初始微缺陷表面的微孔成型机理是相似的。这种表面织构技术包含了微孔成型和表面抛光过程, 且在工件的全表面微缺陷处同时进行, 从而使工件表面快速形成大量的微孔形貌, 表面微孔形貌取决于两个过程的协同竞争作用, 形成的微孔表面不存在热影响区和应力集中区域, 避免了成型之后的“二次处理”。



(a) 微网状沟槽表面上形成的微孔 (b) 微凹坑表面上形成的微孔
(a) Micro-porous surface of micro cross-grooves (b) Micro-pores formed on surface of micro dimples (c) Micro-pores formed on surface after polishing

图 3 表面微孔显微形貌

Fig. 3 Photomicrograph of micro-pores on surface

通过圆孔的断面观察(图 4), 发现微孔的断面呈半圆形, 表明微孔的形状为近似半球形, 深度与半径相当。对微孔形态提出了如下的形成机理(如图 5 所示): 研磨颗粒在研磨液的裹挟下进入预制微缺陷中, 在工件与抛光布的挤压下研磨颗粒在微缺陷中作近似涡旋运动; 研磨颗粒与缺陷壁面接触时, 对缺陷壁面产生磨削作用; 工件绕研磨盘公转的同时伴随着自转, 相对于工件某一位点, 研磨液的流动方向将在 360° 方向上连续变化, 意味着研磨颗粒在 360° 方向上依次磨削微缺陷壁面, 从而在缺陷处形成了半球形或近似半球形微孔形貌。

通过 AFM 表征的研磨抛光方法所形成的表面微孔织构如图 6 所示。由图 6(a)可以观察到, 试件表面存在抛光区和微孔, 且微孔周边为圆弧过度。同时还发现微孔周围不同位置磨削量不同, 使微孔具有向一边倾斜的迹象, 即“尾迹”现象。这是因为工件的自转和公转使微孔在不同角

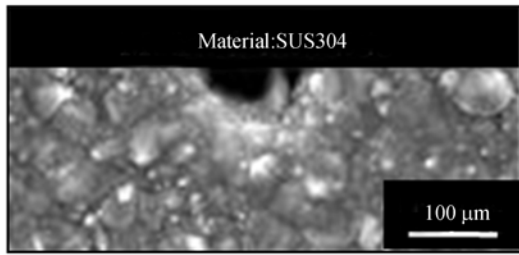


图 4 微孔断面显微照片

Fig. 4 Cross-section photomicrograph of micro-pores

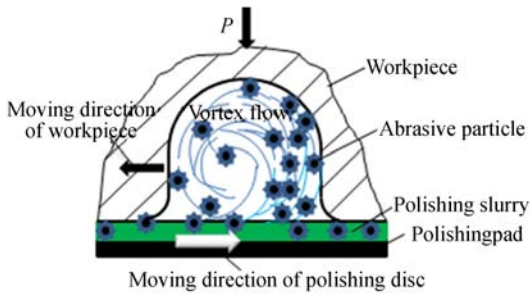
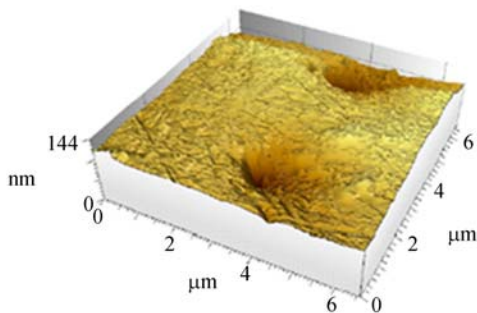


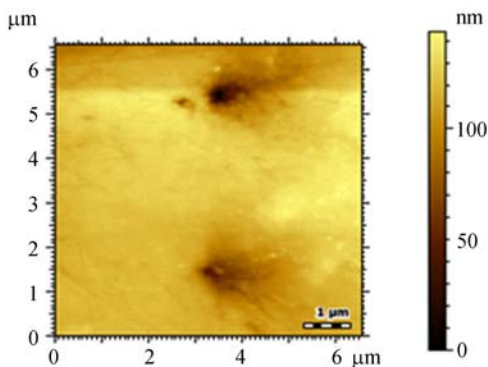
图 5 微孔内壁磨削原理图

Fig. 5 Grinding schematics of micro-pore inner wall



(a) 微孔 3D 表面形貌

(a) 3D surface topography of micro-pores



(b) 微孔 2D 表面形貌

(b) 2D surface topography of micro-pores

图 6 微孔表面 AFM 图

Fig. 6 Typical AFM images of micro-pores

度方位上与研磨盘的相对速度不断变化, 存在一个最大相对速度位和一个最小相对速度位, 而且这两个位置正好对称, 导致在最大相对速度位时, 研磨颗粒的涡旋运动速度也最大, 对微孔壁面的磨削强度也最强烈; 而在其相反的方向上正好处于最小相对速度位, 研磨颗粒对微孔壁面的磨削强度也最弱, 产生了孔向一边倾斜的现象, 倾斜方向与研磨盘的旋转方向一致; 图 6(b) 的二维图可以看到两个微孔的直径有所差异, 从整体表面观察, 在工件上形成了微米及亚微米孔共存的表面织构形貌。

若工件仅绕研磨盘中心公转, 即单向研磨, 则在沿着研磨方向上将形成磨耗延展性线型沟槽 (图 7), 由于研磨颗粒未在缺陷壁面处形成 360° 回转, 从而形成线型沟槽, 这也证明了单方向的涡旋流只能在研磨方向上实现磨削作用, 而 360° 回转是形成微孔的必要条件。

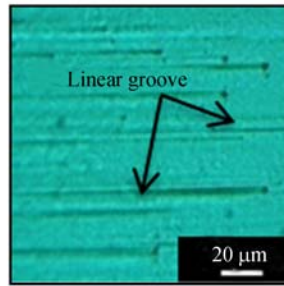


图 7 单向研磨抛光的延展性线型沟槽

Fig. 7 Ductility linear grooves on surface formed by One-way grinding and polishing

3.2 微孔形貌随研磨时间的变化

从前面讨论可知, 对于微网格沟槽和微凹坑两种缺陷表面, 从表面织构纹理形态分析其微孔成型机理是相似的, 因此着重讨论微网格沟槽表面微孔成型过程。

在载荷 0.023 2 MPa、研磨液浓度 9%、研磨速度 2.09 m/s、粒径 0.5 μm 时, 微网格沟槽表面缺陷的微孔形貌随时间的变化过程如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 在研磨初始时刻, 随着微网格沟槽逐渐消失, 在缺陷处形成大量的微孔, 且微孔孔径较小。随着研磨过程的进行, 缺陷位完全消失, 微孔数目 (单位面积微孔个数) 逐渐减小, 孔径有所增加。根据微孔数目及其孔径的变化, 微孔成型过程可以分为三个阶段:

(1) 缺陷位迅速消失并伴随着大量微纳米孔

形成。图 8(a)~(c)所示,研磨 5 min 后,可以看到缺陷位大部分消失,同时产生了大量的微纳米孔。此时微孔数目较多,分布均匀性较好,且孔径较小,大部分孔径小于 $5\ \mu\text{m}$ 。在研磨 20 min 后缺陷位完全消失,孔径逐渐增大。

(2)微孔准态成型阶段。图 8(d)~(g)所示,在研磨 30 min 后,微孔数目出现一定程度减小,而孔径趋于均一化,主要集中在 $5\sim 15\ \mu\text{m}$ 。亚微米孔几乎消失,得到了孔径相对均匀的表面。

(3)微孔表面形貌恶化阶段。图 8(h),(i)所示,随着研磨时间延长,微孔数目出现下降,均匀性较差,孔径分布在 $5\sim 20\ \mu\text{m}$ 左右, $5\ \mu\text{m}$ 以下的微孔全部消失,在研磨时间超过 120 min 后,能够观察到微孔的“尾迹”现象,如图 8(i)放大图所示。这种现象在研磨后期可以明显地被观察到。

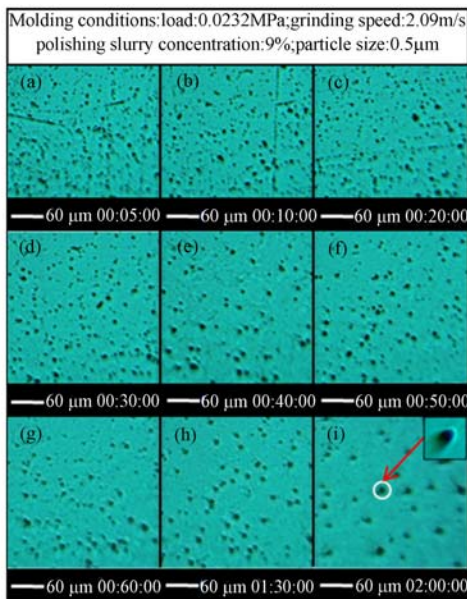


图 8 金属表面微孔形貌

Fig. 8 Morphology of micro-pores on metal surface

微孔表面织构的过程表明,金属表面上的微孔数目及孔径是随着研磨时间而变化,通过对变化过程的详尽研究,可了解其变化规律,为提供不同需求的织构表面创造条件。

3.3 表面粗糙度随研磨时间的变化

表面粗糙度是材料表面重要的表征参数,影响摩擦学特性^[33-34]。表面微孔的形成,在一定程度上会增加其表面粗糙度。同时摩擦副的润滑状态与其表面粗糙度及润滑膜厚度有关,一般用膜

厚比 λ ^[35-36]来衡量。根据流体动压润滑理论,膜厚比为:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2}}, \quad (1)$$

式中: h 为润滑膜厚度; R_{q1} 、 R_{q2} 分别为摩擦副两表面均方根粗糙度。当润滑膜厚度一定时,摩擦副表面粗糙度增加,使 λ 值降低。一般认为,当 $\lambda < 1$ 时,为边界润滑状态,在此润滑状态下,摩擦副表面磨损加剧;当 $1 \leq \lambda \leq 3$ 时,为非全膜润滑即部分弹流,但仍以润滑膜承载为主,润滑膜不连续,有少部分微凸体接触;当 $\lambda > 3$ 时,为全膜润滑状态,在此状态下润滑膜完整,将摩擦副表面完全分开,表面磨损最小。由此可见表面粗糙度对摩擦副之间的润滑状态及其摩擦磨损状况至关重要,有必要研究其粗糙度的变化。对应于图 8 所示的微孔成型过程,其表面粗糙度的变化如图 9 所示。

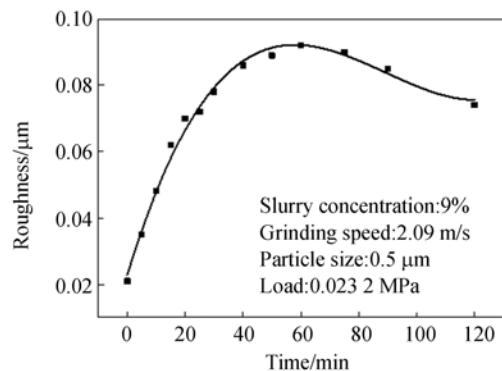


图 9 粗糙度随研磨时间变化曲线

Fig. 9 Roughness curve changing with grinding time

从微孔成型过程可知,在短时间内,金属表面会产生大量的微纳米孔,且微孔数目较大。随着研磨时间延长,微孔数目减少,而孔径有所增加。微孔数目的减少,使表面粗糙度降低,而孔径增大却会增加表面粗糙度,总体而言对粗糙度的影响也属于一种双作用协同机制。因此随着研磨时间的增加,工件表面粗糙度逐渐增加,而后开始下降;在研磨后期由于微孔数目及孔径趋于稳定,粗糙度也趋于定值。

3.4 次生孔

由于工件的自转和公转,工件上的某一点在不同角度时,研磨液(或研磨盘)与工件的相对速度不同,从而产生倾斜孔。在研磨抛光后期,随着

孔径及其倾斜程度增加,可以观察到在倾斜微孔中有次生孔的生成。从图10中可以看出次生孔孔径小于原生孔穴。

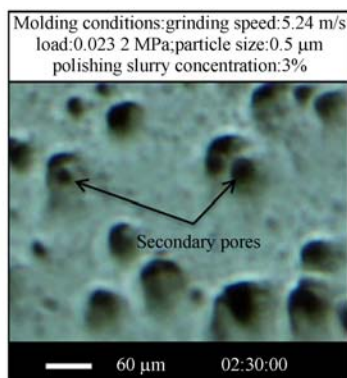


图10 次生孔显微照片

Fig. 10 Micrograph of secondary pores

对次生孔的产生原因可以做如下解释:斜孔可以视为一种缺陷,当少数研磨颗粒进入到斜孔内,受到斜孔边界的阻挡不能顺利的被研磨液的高速冲刷所带走,从而在斜孔内部及其“尾迹”上做涡旋运动并形成次生孔。次生孔的产生必须伴随着斜孔出现而形成。此外基于研磨抛光方法所形成的表面微孔,当研磨时间足够长,在任何条件下都可以观察到斜孔及次生孔的生成。次生孔的产生进一步增大比表面积。

参考文献:

- [1] HATADA R, FLEGE S, BOBRICH A, *et al.*. Surface modification and corrosion properties of implanted and DLC coated stainless steel by plasma based ion implantation and deposition [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2014, 226: 23-29.
- [2] 郑锦华, 晁云峰, 张冲, 等. 射频磁控溅射法沉积 SiC-Al 薄膜的摩擦特性[J]. *真空科学与技术学报*, 2014, 34: 1178-1183.
- ZHENG J H, CHAO Y F, ZHANG C, *et al.*. Friction properties of SiC-Al films deposited by RF magnetron sputtering [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science & Technology*, 2014, 34: 1178-83. (in Chinese)
- [3] 郑锦华, 李聪慧, 张冲, 等. 不同金属基材上类金刚石薄膜的摩擦特性[J]. *光学精密工程*, 2013,

4 结 论

本文基于研磨抛光方法,在预制微缺陷表面进行结构化处理,获得了具有微孔形貌的表面纹理。同时对微孔形成机理和过程进行了分析,并对表面粗糙度的影响进行了探讨,得到了如下结论:对于微网格沟槽和微凹坑两种表面缺陷,通过研磨抛光方法均可获得微孔形貌,表明两种缺陷表面的微孔成型机理相似。微孔成型机理为:研磨颗粒在研磨液的裹挟下进入缺陷处,研磨液被封闭在研磨盘和工件表面的微缺陷中,迫使其做近似涡旋运动,同时由于工件的自转,研磨颗粒在 360° 方向上依次磨削微缺陷壁面形成了半圆形微孔形貌。这种行为在金属表面的微缺陷处同时进行,从而形成了一定分布密度和孔径的微孔织构表面。在微孔成型过程中微孔数目减小,孔径增加,研磨时间为120 min后孔径主要集中在 $5\sim 20\ \mu\text{m}$ 。随着研磨时间延长,微孔会逐渐发生倾斜,可以明显观察到“尾迹”现象。随着研磨过程的进行,在微孔成型和表面抛光的协同作用下,工件表面粗糙度呈现出先增长后下降并最终趋于稳定的趋势。在倾斜微孔中会产生次生孔,次生孔的孔径小于原生孔。次生孔的产生会进一步增加工件的比表面积。

21(6): 1545-1552.

- ZHENG J H, LI C H, ZHANG C, *et al.*. Friction properties of DLC film on different metal substrates [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1545-52. (in Chinese)
- [4] GOGOLEVA O V, PETROVA P N, POPOV S N, *et al.*. Wear-resistant composite materials based on ultrahigh molecular weight polyethylene and basalt fibers [J]. *Journal of Friction & Wear*, 2015, 36(4): 301-305.
- [5] ETSION I, HALPERIN G, BRIZMER V, *et al.*. Experimental investigation of laser surface textured parallel thrust bearings [J]. *Tribology Letters*, 2004, 17(2): 295-300.
- [6] KLIGERMAN Y, ETSION I, SHINKARENKO A. Improving tribological performance of piston rings by partial surface texturing [J]. *Transactions of*

- the ASME Journal of Tribology, 2005, 127(3): 632-638.
- [7] KAWASEGI N, SUGIMORI H, MORIMOTO H, *et al.*. Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior [J]. *Precision Engineering*, 2009, 33(3): 248-254.
- [8] NADDEO P, LAINO L, NOCE M, *et al.*. Surface biocompatibility of differently textured titanium implants with mesenchymal stem cells [J]. *Dental Materials*, 2015, 31(3): 235-243.
- [9] ZHANG H, QIN L G, HUA M, *et al.*. A tribological study of the petaloid surface texturing for Co-Cr-Mo alloy artificial joints[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 332: 557-564.
- [10] ASHOK A, PAL P. Room temperature synthesis of silicon dioxide thin films for MEMS and silicon surface texturing [C]. 2015 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Estoril, Portugal; MEMS, 2015: 385-388.
- [11] FANG Z G, LU C H, GAO D S, *et al.*. Surface textured Sm_{0.5}Sr_{0.5}CoO_{3-δ} as light absorber for solar thermoelectric generator[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, 35(4): 1343-1348.
- [12] RIPOLL M R, SIMIC R, BRENNER J, *et al.*. Friction and lifetime of laser surface-textured and MoS₂-coated Ti6Al4V under dry reciprocating sliding[J]. *Tribology Letters*, 2013, 51(2): 261-271.
- [13] KIM J H, CHOI S G, SEGU D Z, *et al.*. Improvement of tribological characteristics of multi-scale laser-textured surface in terms of lubrication regime[J]. *Journal of KSTLE*, 2014, 30(1): 59-63.
- [14] SEGU D Z, CHOI S G, CHOI J H, *et al.*. The effect of multi-scale laser textured surface on lubrication regime [J]. *Applied Surface Science*, 2013, 270: 58-63.
- [15] XING Y Q, DENG J X, WU Z, *et al.*. Effect of regular surface textures generated by laser on tribological behavior of Si₃N₄/TiC ceramic[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 265: 823-832.
- [16] LIU SH Y, NIU X W, SHAN W, *et al.*. Improvement of conversion efficiency of multicrystalline silicon solar cells by incorporating reactive ion etching texturing[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2014, 127: 21-26.
- [17] AUMALIKOVA M N, TIMCHENKO N A, KUZNETSOV S I, *et al.*. Manufacturing of regular microstructures by methods of LIGA-technologies[C]. 2012 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST), Tomsk, Russia; IFOST, 2013.
- [18] AMANOV A, PYUN Y S, SASAKI S. Effects of ultrasonic nanocrystalline surface modification (UNSM) technique on the tribological behavior of sintered Cu-based alloy [J]. *Tribology International*, 2014, 72: 187-197.
- [19] AMANOV A, CHO I S, PYOUN Y S, *et al.*. Micro-dimpled surface by ultrasonic nanocrystal surface modification and its tribological effects[J]. *Wear*, 2012, 286-287: 136-144.
- [20] TAKASHI M, SATORU T. Micro dimple milling on cylinder surfaces[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2012, 14(2): 135-140.
- [21] ZHOU R, CAO J, WANG Q J, *et al.*. Effect of EDT surface texturing on tribological behavior of aluminum sheet [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(10): 1643-1649.
- [22] ETSION I. Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing [C]. *Conference Smart Surfaces in Tribology, Zurich, Switzerland; Tribology Letters*, 2004, 17(4): 733-737.
- [23] ETSION I. State of the art in laser surface texturing[J]. *Journal of Tribology-Transactions of the Asme*, 2005, 127(1): 248-253.
- [24] AUEZHAN A, RYO T, HIRONOBU O, *et al.*. The influence of bulges produced by laser surface texturing on the sliding friction and wear behavior [J]. *Tribology International*, 2013, 60: 216-223.
- [25] ROBERTSON J. Diamond-like amorphous carbon [J]. *Materials Science & Engineering R-Reports*, 2002, 37(4-6): 129-281.
- [26] BELENKOV E A, GRESHNYAKOV V A. Structures and properties of diamond-like phases derived from carbon nanotubes and three-dimensional graphites [J]. *Journal of Materials Science*, 2015, 50(23): 7627-7635.
- [27] SHUM P W, ZHOU Z F, LI K Y. Investigation of the tribological properties of the different tex-

- tured DLC coatings under reciprocating lubricated conditions [J]. *Tribology International*, 2013, 65: 259-264.
- [28] ZHAO W J, PU J B, YU Q Y, *et al.*. A Novel strategy to enhance micro/nano-tribological properties of DLC film by combining micro-pattern and thin ionic liquids film[J]. *Colloids & Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2013, 428: 70-78.
- [29] AZIZIA A A, OSMAN E, ERDEMIR A, *et al.*. Nano-texture for a wear-resistant and near-frictionless diamond-like carbon[J]. *Carbon*, 2014, 73: 403-412.
- [30] 郑锦华, 张冲, 晁云峰, 等. 类陨石坑表面类金刚石薄膜的制备及摩擦特性[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(4): 934-941.
- ZHENG J H, ZHANG C, CHAO Y F, *et al.*. Deposition and friction properties of DLC films with micro-crater-like structures[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4): 934-941. (in Chinese)
- [31] HE D Q, ZHANG S X, PU J B, *et al.*. Improving tribological properties of titanium alloys by combining laser surface texturing and diamond-like carbon film[J]. *Tribology International*, 2015, 82: 20-77.
- [32] SHIMIZU T, KAKEGAWA T, YANG M. Micro-texturing of DLC thin film coatings and its tribological performance under dry sliding friction for microforming operation [C]. *11th International Conference on Technology of Plasticity (ICTP)*, Nagoya, JAPAN: ICTP, 2014, 81: 1884-1889.
- [33] RAHAMAN M L, ZHANG L CH, LIU M, *et al.*. Surface roughness effect on the friction and wear of bulk metallic glasses [J]. *Wear*, 2015, 332: 1231-1237.
- [34] DAWOOD H I, MOHAMMED K S, RAHMAT A, *et al.*. The influence of the surface roughness on the microstructures and mechanical properties of 6061 aluminium alloy using friction stir welding [J]. *Surface & coatings technology*, 2015, 270: 272-283.
- [35] KOVALCHENKO A, AJAYI O, ERDEMIR A, *et al.*. The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact[C]. *Conference on Boundary Lubrication, Copper Mt, CO: Tribology International*, 2005, 38(3): 219-225.
- [36] KOVALCHENKO A, AJAYI O, ERDMIR A, *et al.*. The effect of laser texturing of steel surfaces and speed-load parameters on the transition of lubrication regime from boundary to hydrodynamic [C]. *STLE/ASME Tribology Conference, PONTE VEDRA, FL: Tribology transactions*, 2004, 47(2): 299-307.

作者简介:



郑锦华(1965—),男,湖南常德人,特聘教授,高级研究员,1987年-1990年于郑州大学分别获得学士、硕士学位,2005年于日本国立广岛大学获得博士学位,主要从事功能性薄膜的研究开发,在SiC薄膜和DLC薄膜方面的研究有独特的造诣,并在日本实现了产业化生产。E-mail: zhengjh2005@aliyun.com



吴双(1990—),男,河南南阳人,硕士研究生,2014年于郑州大学获得学士学位,从事功能性薄膜材料的研究开发和DLC薄膜材料的研究工作。E-mail: zzuwushuang@163.com