纳秒脉冲激光参数及激光路径填充方式对表面织构平坦化的影响

刘奇，董光能

（西安交通大学 设计科学与基础部件研究所，西安 710049）

摘 要：目的 减少光纤脉冲激光器制备表面织构产生的毛刺，提高织构制备的质量。**方法** 利用纳秒激光器在 CoCrMo 盘加工表面织构时，织构周围会出现随着激光功率增加而升高的毛刺，通过保持激光平均功率不变，增大激光频率的方法来减小织构周围毛刺的高度，并且在材料表面覆盖一层水膜，来进一步减小织构周围毛刺，实现表面织构平坦化，制备出可以直接使用无需二次抛光的表面织构。在此基础上，增加织构加工的次数，在 4 mm 厚的水膜下打标出一组深度为 50 μm 左右、毛刺高度小于 2 μm 的表面织构，并且在 25.434 N 载荷下，采用销-盘摩擦方式，改变摩擦副的相对运动速度，对其进行摩擦磨损实验研究。**结果** 当相对运动速度为 30 mm/s 时，摩擦系数最小，为 0.067 67，远远小于直接加工表面织构的摩擦系数，比原始盘表面降低了 23.1%。**结论** 增大脉冲激光的频率和覆盖水膜制备法可以减小制备织构的毛刺高度，使用覆盖水膜制备法时，多次加工制备大深度织构，毛刺高度始终保持在 2 μm，没有明显变化。

关键词：纳秒脉冲激光器；织构毛刺；织构平坦化；水膜

中图分类号：TH117 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2019)08-0023-06

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.08.004

Effect of Nanosecond Pulsed Laser Parameters and Texture Machining Methods on Surface Texture Flattening

LIU Qi, DONG Guang-neng

(Institute of Design Science and Basic Components, Xi′an Jiaotong University, Xi′an 710049, China)

ABSTRACT: The work aims to reduce the burr of surface texture produced by pulsed fiber laser and improve the quality of texture preparation. When nanosecond laser was used to process surface texture on CoCrMo disk, burrs around the texture grew with the increase of laser power. By keeping the average laser power unchanged, laser frequency was increased to reduce the burr height around the texture. A layer of water film was covered on the surface of the material to further decrease the burrs around the texture and then flatten the surface texture. Therefore, the surface texture could be directly used without secondary polishing. Based on this method, the number of texture processing was increased to mark a group of surface textures with a depth of about 50 μm and a height of less than 2 μm under 4 mm thick water film. Under 25.434 N load, the pin-on-disk friction mode was used to carry out experiments by changing the relative motion velocity of friction pairs. When the relative motion velocity was 30 mm/s, the minimum friction coefficient was 0.067 67 which was much less than that of the directly processed

收稿日期：2019-06-03；**修订日期：**2019-07-03

Received：2019-06-03；**Revised：**2019-07-03

基金项目：刘奇（1994—），男，博士，主要研究方向为表面织构加工。

Fund：LIU Qi (1994—), Male, Ph. D, Research focus: surface texture processing.

作者简介：董光能（1965—），男，博士，教授，主要研究方向为摩擦学材料。邮箱：donggn@mail.xjtu.edu.cn

Biography：DONG Guang-neng (1965—), Male, Doctor, Professor, Research focus: tribo-materials. E-mail: donggn@mail.xjtu.edu.cn

surface, and 23.1% lower than that of the original disk surface. Increasing the frequency of pulsed laser and the machining method of coated water film can reduce the burr height of the texture. When the machining method of coated water film is used, the deep texture can be fabricated many times, and the burr height remains unchanged at 2 μm without any change.

KEY WORDS: nanosecond pulsed laser; texture burr; surface texture flattening; water film

在近几十年中，表面织构在科学研究和工程应用中得到越来越多的重视。适当的表面织构化处理，可以改变摩擦副的润滑特性，提高材料的减摩耐磨性能，从而提升摩擦部件的使用寿命[1]。目前，在众多关键的机械摩擦副中，例如滑动轴承[2]、活塞缸[3]、机械密封[4]等，都有表面织构的存在。润滑是影响摩擦副磨损和摩擦力的重要因素之一，摩擦部件的损坏大部分都是由润滑不良引起的。表面织构能够改善润滑环境，其作用机理主要有四种：在流体动压润滑中提供微流体动力作用；储存润滑剂，改善接触区乏油状况；储存磨屑，减少因磨粒、犁沟磨损造成的摩擦部件磨损发热失效情况；减小接触面积，从而减小接触面的磨损[5-8]。根据中国工程院发布的摩擦学调查报道，在所有的失效形式中，磨损失效占了 80%，造成的经济损失相当于 GDP 的 4.5%。因此，利用表面织构改善摩擦副表面的润滑特性对于工程应用具有重大意义。目前，制备表面织构的方法有激光加工法[9]、反应离子刻蚀技术[10]、电解加工[11]、LIGA 加工[12]等。与同类制备方法相比，激光加工法具有成本低、加工速度快、灵敏度高、加工材料多样化等优点[13-14]，但激光加工会破坏织构周围原本平坦的表面，形成毛刺，需经过二次磨抛加工才能投入使用。目前，虽然针对激光表面织构减摩作用机理等研究很多，但是针对如何提高激光表面织构的加工质量以及激光加工参数的研究相对来说较少。

目前激光加工法制备表面织构在科学研究和工程中已经被大量使用。激光加工法带来便捷的同时，也有着很大的缺陷。高能量密度的脉冲激光在烧蚀金属表面之后，部分烧蚀金属会冷却堆积在织构周围，形成毛刺。这种经过高温氧化之后的毛刺硬度很大，对摩擦配副产生磨粒、犁沟磨损。通常去除毛刺的方法是在激光加工之后，进行磨抛等后处理。“单脉冲同点间隔多次”优化工艺抑制重铸层的形成[15]，可除去灰铸铁表面织构周围的毛刺，但是这种方法加工会使得时间增加数倍。GUO 等[16]将加工试样冷冻，并在激光加工时覆上冰水，减少了激光表面织构周围的毛刺，取得了很好的效果，但是长时间加工，试样温度上升，冰块会融化。有学者提出使用刚性接触激光处理工艺[17]，利用脉冲激光在金属箔表面产生的应力使工件发生塑性变形，这种方法虽然不会出现毛刺，但是只能加工硬度很小的材料，而且加工织构深度较浅。CoCrMo 合金和超高分子聚乙烯是人工关节常用的一组配副，利用激光在 CoCrMo 合金上制备一定密度的织构来减小摩擦磨损，可提升人工关节的寿命。如果不除去这些激光加工带来的硬质毛刺，会增加人工关节的磨损，提升人体血液中的金属离子浓度，对人体器官造成损伤，甚至会危害生命。

文中研究通过保持激光平均功率不变，改变纳秒激光脉冲频率和单次脉冲激光能量密度，探索激光参数对表面织构质量的影响。然后在试样加工表面覆盖一层蒸馏水膜，结合适当工艺参数，减小表面织构周围的毛刺。使用激光共聚焦显微镜观测织构的深度和织构周围毛刺状况。利用销-盘往复摩擦磨损实验，通过改变摩擦配副的相对运动速度获得不同的摩擦系数，用未制备表面织构的原始 CoCrMo 盘作为对照，比较总结激光制备的织构的润滑特性。

1 实验

1.1 材料准备

实验用盘材料是 CoCrMo 合金（尺寸 ϕ30 mm×5 mm），硬度为 385HV，在磨抛机上研磨抛光至表面粗糙度 *Ra* 为 0.019 μm。销材料是超高分子聚乙烯，直径为 3 mm。试验所选用的润滑剂为模拟体液，主要成分见表 1。模拟体液[18]的制备过程是：先将 AR 等级的 NaCl、KCl、$NaHCO_3$、$MgCl_2·6H_2O$、$CaCl_2$ 和 K_2HPO_4 溶解到去离子水中，然后用缓冲溶液调整 pH 为 7.2。

表 1 模拟体液成分

Tab.1 Composition of simulated humoral fluid

Ion	Ion concentration in the plasma/ (mmol·L^{-1})	Ion concentration in the simulated body fluids/(mmol·L^{-1})
Na^+	142.0	142.0
K^+	5.0	5.0
Mg^{2+}	1.5	1.5
Ca^{2+}	2.5	2.5
Cl^-	103.0	103.0
HCO_3^-	27.0	10.0
HPO_4^{2-}	1.0	1.0
SO_4^{2-}	0.5	0.5

1.2 表面织构制备及实验测试

1）使用 QC-F20 光纤激光打标机制备表面织构。激光器使用 BasiCube 10 振镜，激光波长为 1064 nm。

分别在不同激光功率、走线方式、频率和覆盖水膜的条件下制备表面织构。使用 KQ2200E 型超声波清洗器在无水乙醇溶液中清洗 10 min，迅速吹干。

2）用激光共聚焦显微镜和 T200 手持式粗糙度仪测量织构深度以及织构周围毛刺高度，用光学显微镜观测织构的表面质量。

3）采用 UMT-2 摩擦磨损试验机测试样品的摩擦学性能。做销-盘往复实验，用 CoCrMo 合金为盘，超高分子聚乙烯为销。实验载荷为 25.43 N，测试时间为每组 30 min，速度为 12~30 mm/s。

2　织构数据分析

2.1　脉冲激光路径和平均功率对表面织构质量的影响

制备表面织构时，脉冲激光平均功率为 16 W，频率为 20 kHz，加工速度为 500 mm/s。激光制备表面织构时的激光路径如图 1 所示，Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ等四种路径，每个织构加工 4 次，Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ由于激光路程增加 1 倍，每个织构加工 2 次。表面织构具体的毛刺和织构深度数据如图 2 所示。

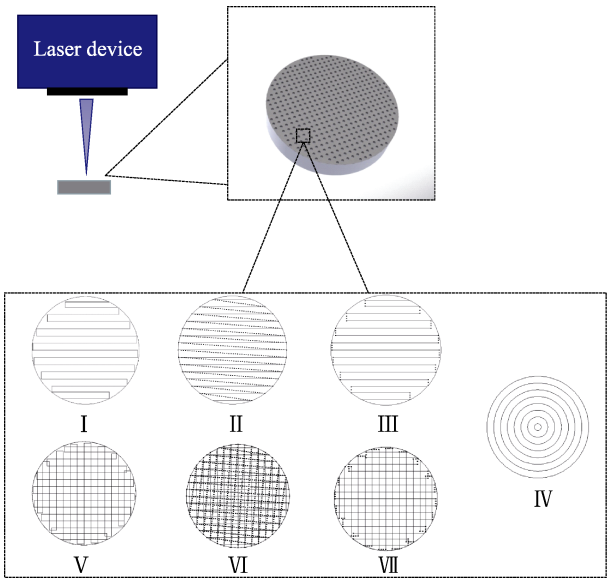


图 1　激光器制备表面织构过程及单个织构激光路径
Fig.1 Surface texture fabrication process by laser and laser path of single texture

从图 2 可以看出，从Ⅰ至Ⅶ，织构周围的毛刺高度逐渐增大，其中Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ毛刺高度几乎一致，且与Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ相比，有明显的增加，Ⅶ毛刺高度最大，为 34.79 μm，Ⅰ的毛刺高度最小，为 24.45 μm。不同激光路径所制备织构的深度也有差异，方式Ⅱ制备的织构深度最大，为 40.81 μm，方式Ⅲ最小，为 30.4 μm。在保证单个织构制备时所受激光照射总能量相同的情况下，Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ由于激光路径是水平和

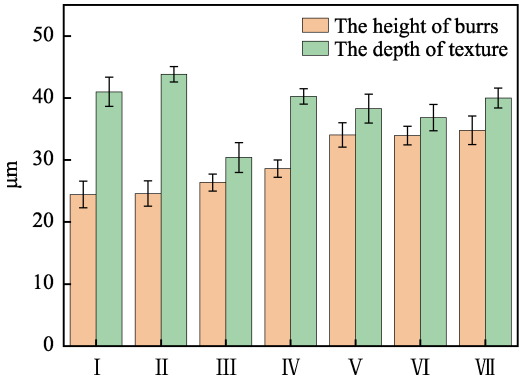


图 2　激光不同路径对织构毛刺高度和织构深度的影响
Fig.2 Effects of different laser paths on the burr height and depth of the machined textures

垂直相互叠加，在整个织构上，单位时间内的平均能量密度大。这就导致了单位时间内烧蚀的金属多，冷却之后，金属的堆积更严重，因而所制备织构周围的毛刺更大。方式Ⅲ由于相邻激光总路程最小，单个织构接受激光照射的总能量最小，所以制备的织构深度最小。

图 3a 是不同激光路径所制备织构的截面图，可以看出，按照Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ路径制备的表面织构所形成的毛刺主要堆积在与激光运动方向相反的一侧，Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ路径制备的表面织构毛刺比Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ更加密集，毛刺的范围更大。这主要是由于Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ路径整体运动方向是相互垂直的两个方向，而且单位时间内的平均能量密度大，所以毛刺的范围和高度均比其他路径大。Ⅳ路径是圆形，毛刺主要堆积在织构周围。图 3b 是直线路径的金属堆积示意图。在激光烧蚀金属时，烧蚀点的金属液体由于飞溅和流动，会堆积在激光加工过的低处表面，激光扫过一遍之后，就会在织构周围形成一边高、一边低的情况。图 3c 是圆形路径的金属堆积示意图。激光烧蚀点的金属向外圈飞溅和流动，最终形成内圈低、外圈高的表面织构。

通过改变激光的平均功率来改变单束脉冲激光的能量，研究单束脉冲激光能量对表面织构毛刺高度和织构深度的影响。所制备的织构深度和毛刺高度数据如图 4 所示，制备织构的路径为圆形路径，激光速度为 600 mm/s，频率为 20 kHz，每个织构加工 4 次。从图 4 可以看出，随着激光平均功率的增大，制备的织构深度增大，织构周围的毛刺也增大。这是由于单束脉冲激光能量越高，烧蚀点的影响区域就会越大，就有越多的金属粉尘和金属液体堆积，从而造成了更大的织构深度和毛刺高度。

2.2　加水膜与不加水膜条件下表面织构形貌对比分析

从图 4 可以得出，减小单束激光能量可以有效减小织构周围毛刺的高度。因此保证激光平均功率不变，通过增大激光频率来减小单束脉冲激光的能量，

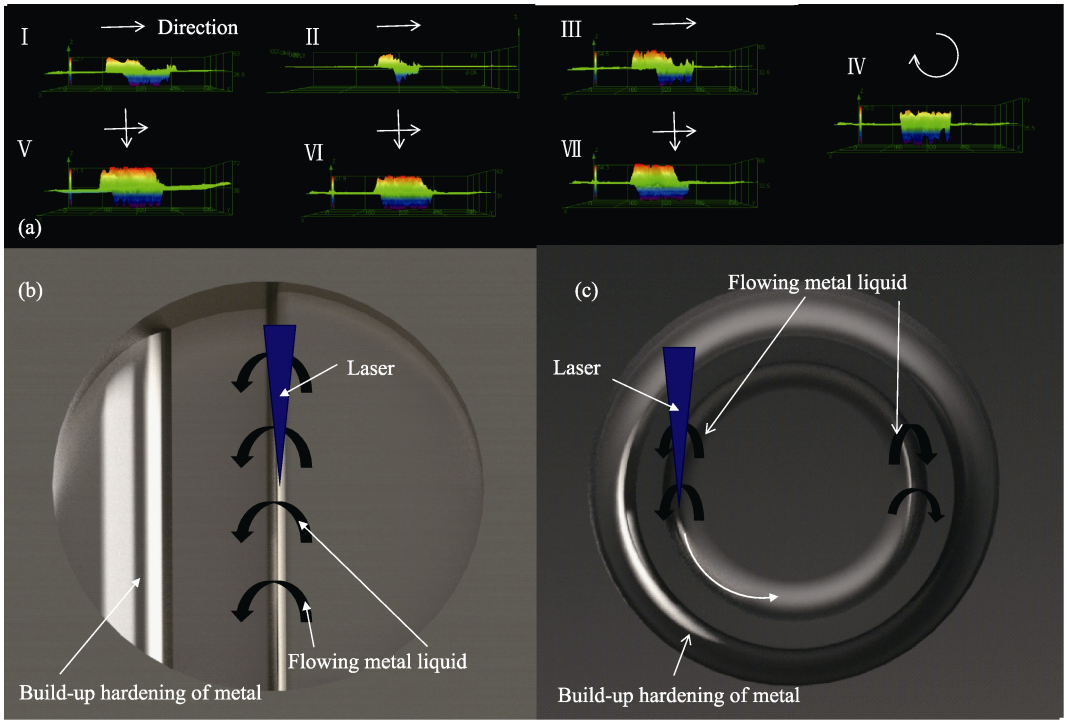


图 3　不同激光路径所制备织构的截面(a)和直线(b)、圆形(c)路径金属堆积示意

Fig.3 Cross sections of textures prepared by different laser paths (a), metal stacking schematic diagram with straight path (b) and circular path (c)

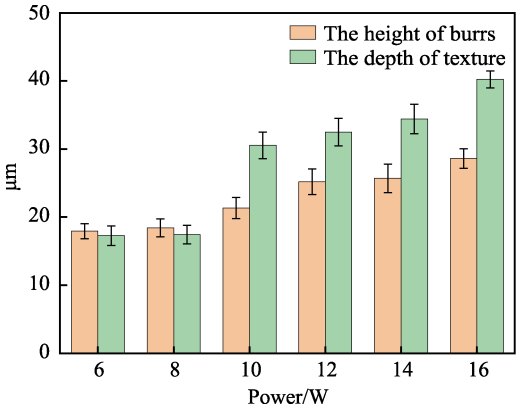


图 4　激光平均功率对表面织构毛刺高度和织构深度的影响

Fig.4 Effect of average laser power on texture burr height and texture depth

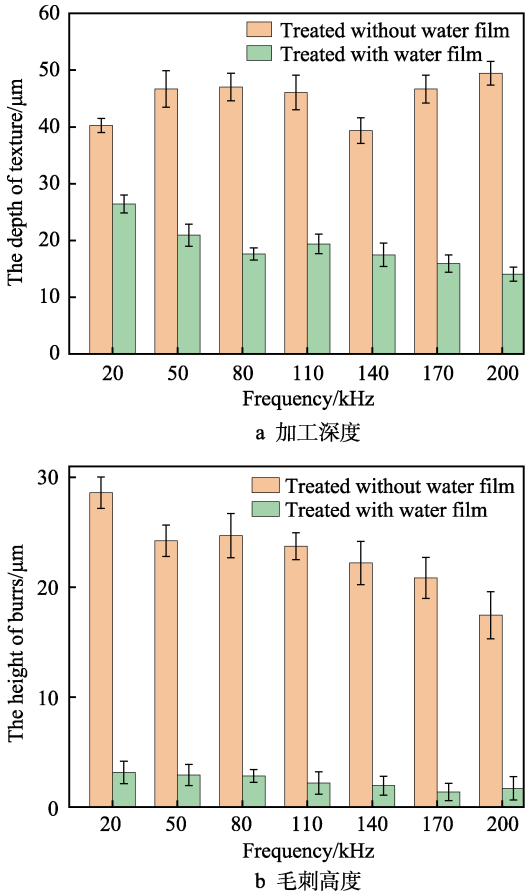


图 5　频率和水膜对表面织构加工深度和毛刺高度的影响

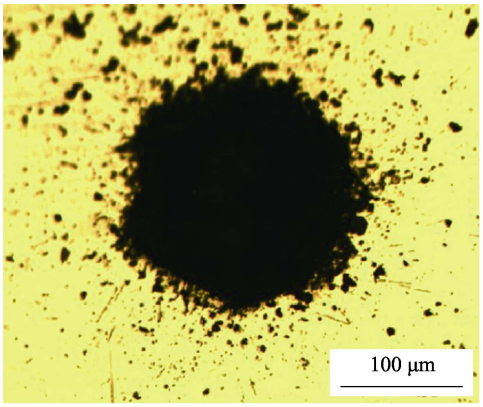
Fig.5 Effects of frequency and water film on surface texture depth and burr height: a) Processing height; b) Burr height

并且覆盖上一层水膜，利用水的冷却能力，使激光烧蚀的金属迅速冷凝成金属粉末，从而减少金属堆积。在有水膜和无水膜情况下，通过改变激光频率制备的表面织构的深度和毛刺高度数据如图 5 所示。激光平均功率为 15 W，速度为 600 mm/s，每个织构加工 4 次，水膜厚度为 2 mm，激光路径为圆形。

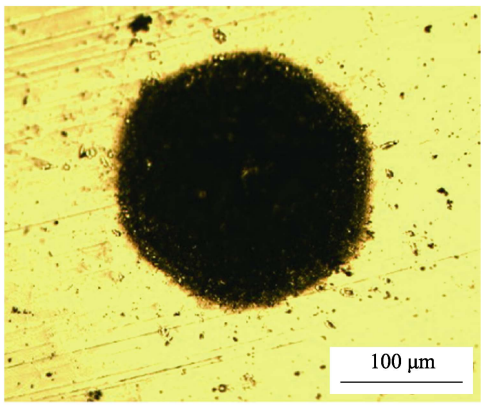
从图 5 a 可以看出，在无水膜情况下，增大激光频率即减小单束脉冲激光的能量，加工的织构的深度没有明显的变换规律。这是由于在平均功率相同时，改变激光频率没有改变整个织构制备时所接受激光照射的总能量，而且单束激光的能量密度始终都在材料烧蚀能量密度阈值之上，因此整体深度没有多大变

化。在覆盖上一层水膜之后，随着频率的增大，织构深度减小。这是由于水膜的存在对激光能量有约束作用，减小了单束脉冲激光烧蚀金属的体积，而且激光能量越小，这种能量约束作用就会越明显。因此，覆盖上水膜之后，织构深度会表现出随着激光频率增加而减小的趋势。图 5b 表明，随着激光频率的增加，有无水膜情况下，织构周围毛刺高度都有减小趋势。这是由于单束激光能量减小，减少了单位时间内金属的堆积量，而且在有水膜存在的情况下，烧蚀金属在水的快速冷却作用下，变成金属粉尘，由于受到水的浮力，不能立刻粘在织构周围，因此减小了织构周围毛刺高度，最高可减小 89.3%。

不加水膜和加水膜制备的织构在光镜下的图像如图 6 所示。从图 6a 可以看出，在正常情况下，使用脉冲激光制备织构时，烧蚀的金属冷却之后会有部分颗粒粘在织构周围，在使用之前必须经过磨抛工序，否则硬颗粒会在摩擦副表面形成严重的磨粒磨损，造成高的摩擦系数，影响摩擦部件的使用寿命。图 6b 表明，覆盖上一层水膜后，表面织构周围光洁度明显变好，黑色颗粒减少，这可能是由于水的浮力增加了金属颗粒回落的时间，使金属颗粒在到达基体表面之前达到完全冷却，减少了颗粒的粘着。



a 未加水膜



b 加水膜

图 6　未加水膜和加水膜制备织构的光镜图像

Fig.6 Light microscope image of texture prepared with and without water film: a) Without water film; b) With water film

2.3　水膜下高加工次数制备深织构对表面毛刺高度的影响

激光加工次数对加工深度和毛刺高度的影响如图 7 所示。激光平均功率为 16 W，频率为 110 kHz，激光速度为 600 mm/s。在覆盖水膜加工织构时，由于加工深度较小，通过增加加工次数的方法来增大加工深度。可以看出，随着加工次数的增加，加工深度增加，而织构毛刺高度几乎保持不变。从图 5 中可以看出，在无水膜下加工表面织构，110 kHz 时加工深度为 46.06 μm，毛刺高度是 23.73 μm。由图 7 可知，加工深度为 45.33 μm 时，毛刺高度是 2.07 μm。在加工织构深度几乎相同的情况下，有水膜比无水膜织构毛刺减小 91.3%。由此可以看出，在覆盖水膜时，通过使用提高激光加工次数的方法来制备某一深度的织构，可以有效减小织构周围毛刺高度。

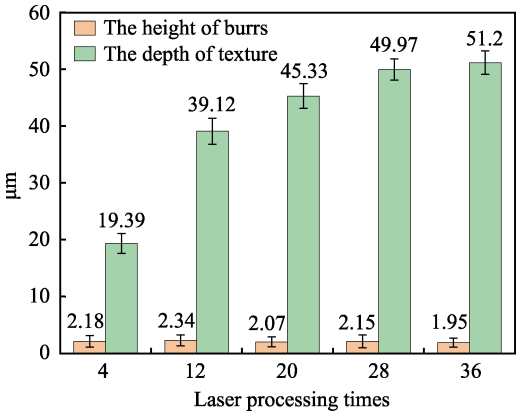


图 7　覆水膜后激光加工次数对表面织构深度和毛刺高度的影响

Fig.7 Effect of laser processing times on surface texture depth and burr height after water film is coated

2.4　摩擦学实验

本次摩擦学实验使用 UMT-2 摩擦磨损试验机，采用直线往复销-盘实验。实验所用的 CoCrMo 合金盘有三种：原始盘、直接加工织构盘和覆水膜加工织构盘。表面织构数据如图 8 所示。整个实验过程中，保证实验载荷、时间不变，改变平均速度，观察织构表面与超高分子量聚乙烯之间的摩擦系数变化情况，并与原始未加工织构表面比较。销的材料高分子聚乙烯常用来当作人工髋关节的臼杯，而 CoCrMo 合金常用来当作人工髋关节材料，正常运动的情况下，髋关节的压强是 3.6 MPa，髋关节与臼杯的相对运动速度在 25 mm/s 左右。因此设置载荷为定值（25.434 N），运动速度为 12~30 mm/s，时间为 30 min，实验润滑剂使用模拟体液。

从图 9 可以看出，在模拟体液作为润滑剂下，随着相对运动速度的增加，原始 CoCrMo 合金盘与超高分子聚乙烯之间的摩擦系数变化不明显。未覆水膜加

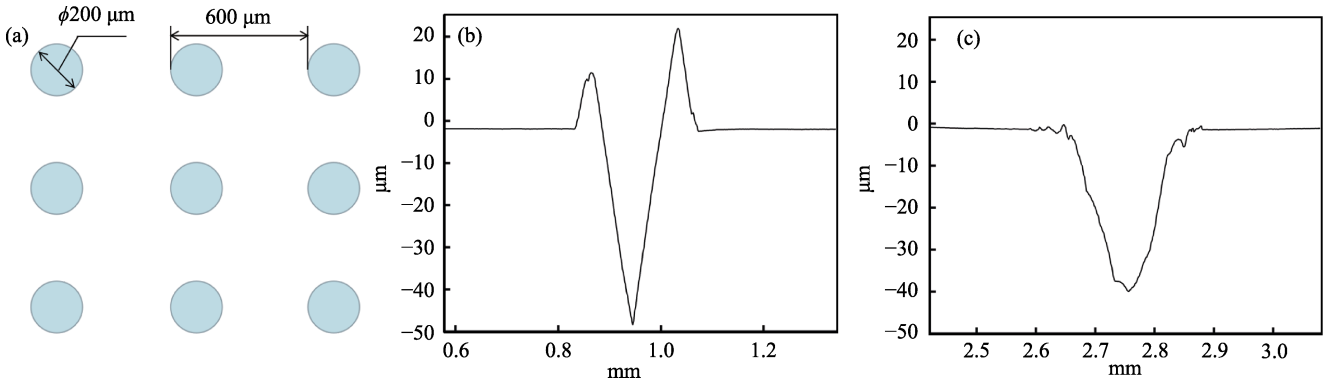


图 8　用于摩擦学实验的表面织构参数(a)和直接制备(b)、加水膜制备(c)织构截面

Fig.8 Surface texture parameters for tribological tests (a), cross section of direct machining texture (b) and cross section of machining texture with water film (c)

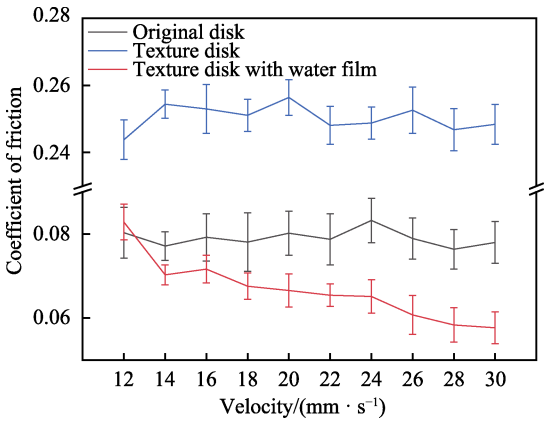


图 9　速度对摩擦系数的影响

Fig.9 Effect of velocity on friction coefficient

工的表面织构的摩擦系数比原始盘增大，这是由于激光加工使织构周围形成了微毛刺，在实验进行中易形成硬颗粒，在摩擦副接触面造成严重的磨粒磨损，导致摩擦系数升高。随着速度的增加，覆水膜制备表面织构的 CoCrMo 合金盘与超高分子聚乙烯之间的摩擦系数明显下降，最高摩擦系数比不带织构圆盘降低了 23.1%。这说明在模拟体液环境下，相对运动速度在 12~30 mm/s 之间时，表面织构具有很好的减摩作用，且速度越大，减摩的作用越明显。在低速的时候，带织构表面摩擦系数稍高于原始表面。这是由于摩擦副处于混合润滑状态，低速时，边界润滑占比较大，带织构表面由于整体粗糙度增大，导致摩擦系数上升；当速度变大时，润滑状态下的流体动力润滑占比变大，表面织构的微流体动力效应和表面织构对润滑剂的储存作用使摩擦系数减小。

3　结论

文中研究了光纤脉冲激光参数对所制备表面织构质量的影响，通过改善激光加工参数和加工方式，提高表面织构的制备质量，可使得制备的织构在进行实验时不需要二次抛光工序，减少了由于抛光造成磨屑堵塞织构等问题，优化了实际工程应用中的制备工艺。得出以下结论：

1）激光制备表面织构的质量与激光走线有关。单侧推进的方式会造成织构深度和毛刺分布不均匀，圆形走线方式制备的织构比较均匀，方便后续处理。

2）平均功率一定时，脉冲激光的频率越大，织构的毛刺高度越小。

3）基体表面覆盖一层水膜之后再制备织构，跟不加水膜相比，表面毛刺高度会大大减小，最高减小 89.3%。

4）在水膜下，通过提高加工次数制备大深度的织构，表面毛刺的高度不会有明显变化。

5）在模拟体液润滑下，超高分子聚乙烯与 CoCrMo 合金盘对磨，覆上水膜制备的织构有很大的减摩效果，摩擦系数最高减小 23.1%。

参考文献：

[1]　万轶，熊党生. 激光表面织构化改善摩擦学性能的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2006, 26(6): 603-607.
WAN Yi, XIONG Dang-sheng. Study of laser surface texturing for improving tribological properties[J]. Tribology, 2006, 26(6): 603-607.

[2]　尹明虎，陈国定，高当成，等. 微织构特征对径向滑动轴承动特性的影响[J]. 西北工业大学学报，2015(4): 658-664.
YIN Ming-hu, CHEN Guo-ding, GAO Dang-cheng, et al. Effects of micro texture on the dynamic characteristics of journal bearing[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2015(4): 658-664.

[3]　刘一静，袁明超，王晓雷. 表面织构对发动机活塞/缸套摩擦性能的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(6): 866-871.
LIU Yi-jing, YUAN Ming-chao, WANG Xiao-lei. Influence of the surface texture on the tribological performances of piston skirt/liner[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(6): 866-871.

（下转第 47 页）

metrical parameters in micro-grooved crosshatch parameter under lubricated sliding friction[J]. Tribology international, 2010, 43: 1508-1517.

[6] 徐鹏飞，周飞，王谦之，等. 网纹型表面微结构对 Ti-6Al-4V 水润滑摩擦学特性的影响[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(4): 377-383.
XU Peng-fei, ZHOU Fei, WANG Qian-zhi, et al. Influence of meshwork pattern grooves on the tribological characteristics of Ti-6Al-4V alloy on water lubrication[J]. Tribology, 2012, 32(4): 377-383.

[7] BIBOULET N, BOUASSIDA H, LUBRECHT A A. Cross hatched texture influence on the load carrying capacity of oil control rings[J]. Tribology international, 2015, 82: 12-19.

[8] BOUASSIDA H, BIBOULET N, SAINSOT P, et al. Piston ring load carrying capacity: Influence of cross-hatching parameters[J]. Proc imeche part J: Journal of engineering tribology, 2014, 228(6): 642-648.

[9] NOUTARY M P, BIOULET N, LUBRECHT A A. A robust piston ring lubrication solver: Influence of liner groove shape, depth and density[J]. Tribology international, 2016, 100: 35-40.

[10] HU Y, MENG X, XIE Y. A new efficient flow continuity lubrication model for the piston ring-pack with consideration of oil storage of the cross-hatched texture[J]. Tribology international, 2018, 119: 443-463.

[11] QIU Y, KHONSAI M M. Performance analysis of full-film textured surfaces with consideration of roughness effects[J]. Journal of Tribology-transactions of the ASME, 2011, 133: 021704.

[12] JI J, GUAN C, FU Y. Effect of micro-dimples on hydrodynamic lubrication of textured sinusoidal roughness surfaces[J]. Chinese Journal of mechanical engineering, 2018, 31: 67.

[13] PATIR N, CHENG H S. Application of average flow model to lubrication between rough sliding surfaces[J]. Journal of lubrication technology-transactions of the ASME, 1979, 101: 220-229.

[14] 温诗铸，黄平. 摩擦学原理[M]. 北京：清华大学出版社, 2012.
WEN S Z, HUANG P. Principles of tribology[M]. Beijing: Tsinghua Press, 2012.

（上接第 28 页）

[4] YI X, LI Y, WANG Y. Hydrostatic effect of rectangle microtexture on liquid-lubricated mechanical seal[J]. International journal of nanomanufacturing, 2013, 9: 29-42.

[5] 张玉周. 表面织构化改善摩擦学性能研究综述[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2013, 32(1): 64-67.
ZHANG Yu-zhou. Review of research on surface texturing for improving tribological performance[J]. Journal of Chengdu University (Natural science), 2013, 32(1): 64-67.

[6] KOURA M M. The effect of surface texture on friction mechanisms[J]. Wear, 1980, 63(1): 1-12.

[7] ZHANG Hui, ZHANG Dong-ya, HUA Meng, et al. A study on the tribological behavior of surface texturing on Babbitt alloy under mixed or starved lubrication[J]. Tribology letters, 2014, 56(2): 305-315

[8] ZHANG Hui, HUA Meng, DONG Guang-neng, et al. A mixed lubrication model for studying tribological behaviors of surface texturing[J]. Tribology international, 2015, 93(1): 583-592

[9] TA D V, DUNN A, WASLEY T J, et al. Nanosecond laser textured super hydrophobic metallic surfaces and their chemical sensing applications[J]. Applied surface science, 2015, 357: 248-254

[10] WANG X L, KATO K. Improving the anti-seizure ability of SiC seal in water with RIE texturing[J]. Tribology letters, 2003, 14(4): 275-280.

[11] 薛腾，朱嘉澄，钱彩虹，等. 基于干膜的表面织构微沟槽阵列电解加工研究[J]. 电加工与模具, 2017(4): 34-37.
XUE Teng, ZHU Jia-cheng, QIAN Cai-hong, et al. Study on electrochemical machining of micro-groove arrays using dry-film mask[J]. Electromachining & mould, 2017(4): 34-37.

[12] PÉRENNÈS, F, MARMIROLI B, MATTEUCCI M, et al. Sharp beveled tip hollow microneedle arrays fabricated by LIGA and 3D soft lithography with polyvinyl alcohol [J]. Journal of micromechanics and microengineering, 2006, 16(3): 473-479.

[13] COSTIL S, LAMRAOUI A, LANGLADE C, et al. Surface modifications induced by pulsed-laser texturing—Influence of laser impact on the surface properties[J]. Applied surface science, 2014, 288: 542-549.

[14] KUSIŃSKI, J, KAC S, KOPIA A, et al. Laser modification of the materials surface layer—A review paper[J]. Bulletin of the polish academy of sciences technical sciences, 2012, 60(4): 711-728.

[15] 康正阳，符永宏，华希俊，等. 激光微织构发动机缸孔的后处理工艺研究[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(7): 1040-1043.
KANG Zheng-yang, FU Yong-hong, HUA Xi-jun, et al. Exploring post-processing of laser cylinder surface texturing[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering, 2015, 34(7): 1040-1043.

[16] GUO J, LI Y, LU H, et al. An effective method of edge deburring for laser surface texturing of Co-Cr-Mo alloy[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2017, 94: 1-13.

[17] DAI F Z, ZHANG Y K, LU J Z, et al. A method to decrease surface roughness in laser shock processing[J]. Surface & coatings technology, 2015, 261: 35-40.

[18] AZAMI M, MOOSAVIFAR M J, BAHEIRAEI N, et al. Preparation of a biomimetic nanocomposite scaffold for bone tissue engineering via mineralization of gelatin hydrogel and study of mineral transformation in simulated body fluid[J]. Journal of biomedical materials research, Part A, 2012, 100(5): 1347-1355.