

# 激光微加工在微织构技术中的应用及研究进展

葛良辰<sup>1</sup>, 马剑军<sup>2</sup>, 曹宇鹏<sup>1,3,4</sup>, 葛桂兰<sup>3</sup>, 花国然<sup>1</sup>, 王振刚<sup>4</sup>, 蒋苏州<sup>1</sup>

(1. 南通大学机械工程学院, 江苏 南通 226019; 2. 上海振华重工(南通)传动机械有限公司, 江苏 南通 226017;  
3. 江苏五星波纹管有限公司, 江苏 泰州 225500; 4. 南通中远船务工程有限公司, 江苏 南通 226006)

**摘要:** 阐述了激光微加工在微织构技术中的应用及其研究进展, 针对常见的微凹坑织构、微沟槽织构及特殊织构进行探讨, 并分析了织构参数对润滑减磨效果的影响。重点阐述了微凹坑织构中凹坑直径、深度、面积占有率及其协同作用对织构效果的影响, 具体分析了最优面积占有率的选取问题; 重点阐述了微沟槽织构在截面构型、深度及沟槽方向等方面对微织构效果的影响, 横向对比了多参数协同作用; 重点阐述了两种特殊织构的特点及其优劣。在此基础上, 进一步指出了微织构技术的研究方向以及激光器、计算机辅助技术等的发展对微织构技术的推动作用, 探讨了激光冲击强化技术与微织构技术结合的可能, 展望了激光技术介入特殊织构的发展方向。

**关键词:** 微织构; 激光技术; 润滑减磨; 织构参数

**中图分类号:** TG356.16 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2019.08.002

## Influence of micro texture and its parameters on the effect of lubrication reduction

GE Liang-chen<sup>1</sup>, MA Jian-jun<sup>2</sup>, CAO Yu-peng<sup>1,3,4</sup>, GE Gui-lan<sup>3</sup>,  
HUA Guo-ran<sup>1</sup>, WANG Zhen-gang<sup>4</sup>, JIANG Su-zhou<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China; 2. Shanghai Zhenhua Heavy Industry (Nantong) Transmission Machinery Co., Ltd., Nantong 226017, China; 3. Jiangsu Five Star Corrugated Pipe Co., Ltd., Taizhou 225500, China; 4. Nantong Zhongyuan Shipping Engineering Co., Ltd., Nantong 226006, China)

**Abstract:** The application and research progress of laser micro-machining in micro-texture technology are described, in the paper. The common micro pits texture, micro groove texture and special texture are discussed and the effect of texture parameters on lubrication and wear reduction is analyzed. The effects of pit diameter, depth, area occupancy and their synergistic effects on the textural effect of micro-pit texture are emphatically expounded, and the selection of optimum area occupancy is analyzed in detail. The influence of micro-groove texture on the micro-texture effect in cross-section configuration, depth and groove direction is emphatically expounded, and the synergistic effect of multi-parameters is contrasted horizontally. The characteristics, advantages and disadvantages of two special textures are emphasized. On this basis, the research direction of micro-texture technology and the impetus of laser and computer-aided technology to micro-texture technology are further pointed out. The possibility of combining laser shock hardening technology with micro-texture technology is discussed. Finally, the development direction of laser intervention in special texture is prospected.

**Key words:** micro texture; lubrication reduction; surface topography; texture parameters

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (No. 51505236); 南通市应用基础研究项目 (No. GY12016001) 资助。

**作者简介:** 葛良辰 (1994 -), 女, 硕士研究生, 主要从事材料表面改性及仿真模拟研究。E-mail: 243345189@ qq. com

**通讯作者:** 曹宇鹏 (1981 -), 男, 博士, 讲师, 主要从事激光加工检测技术, 海工重型装备制造的研究。

E-mail: cyp19812004@ ntu. edu. cn

**收稿日期:** 2018-10-31; **修订日期:** 2018-12-21

## 1 引言

根据摩擦学原理,特定的表面形貌较光滑表面具有更好的减磨润滑性能,表面微织构技术应运而生。表面微织构是采用激光加工、电子束刻蚀等方法在零件表面加工出特定微细形貌的技术,这种表面处理工艺涉及材料性能和界面效应<sup>[1-6]</sup>。总体来说,微织构形貌是模仿、优化仿生学结构,达到工业生产的目的,但为降低加工成本,提高可行性,在研究中往往将复杂的仿生学结构简化为凹坑、沟槽形貌。其中,激光表面微织构具有独特的优势,加工速度快,效率高,非接触加工方式更易实现精密加工,对表面破坏较小,近年来受到广泛关注,常见的织构形貌有:凹坑形、沟槽形、凸体形和鳞片形等<sup>[7-8]</sup>。国内外学者通过研究不同织构形貌对摩擦特性、润滑效果的影响,改善摩擦磨损状况,有效延长了机械部件的寿命。目前,激光表面微织构在刀具、发动机气缸、轴承以及医学等领域均有应用<sup>[9]</sup>。

本文阐述了微织构形貌及其参数对表面微织构润滑减磨效果的影响,及激光表面微织构的最新研究动态,从微凹坑、沟槽以及特殊形貌及其参数对织构效果的影响三方面阐述了表面微织构的研究成果和技术进展,对激光微织构技术的发展和广阔前景进行了展望。

## 2 微凹坑织构

微凹坑是激光表面织构形貌中最常见的一种,采用一定规则排布的微凹坑能够显著改善润滑条件,具有储存脱落磨粒的功能,同时减少接触面积,解决乏油等问题。通过设计织构阵列、设置激光功率,调控织构的直径、深度和面积占有率,均对润滑效果有显著影响<sup>[10-11]</sup>。微凹坑织构形状中常见的有:球状织构、圆柱织构、三角柱织构和方柱织构<sup>[12-13]</sup>。

自 1950 年 Salama<sup>[14]</sup>发现图案化结构对表面性能的影响以来,微织构技术迅速发展,大量实验验证了微凹坑表面形貌的作用。近年来,激光微造型由于其灵活性高而广泛应用于微凹坑织构中,又因其无接触加工的特点使得加工精度较一般加工高,多应用于模具、人造骨骼等精度需求高的场合。2016 年, Mohd Ahyan Nurul 等<sup>[15]</sup>研究了微坑压痕对挤压模滑动接触面的影响,在锥形模内部设计了微坑点阵,以降低冷挤压时的挤压载荷和摩擦磨损情况,其锥形模微凹坑表面图像

如图 1 所示。硬化处理后,纹理硬度可达 825.2HV,能够最大程度的减小失真。这种微坑能够储油、增加滑动速度,从而降低挤压载荷和摩擦磨损情况。在实验过程中,微坑内的碎片没有对金属成型制品造成性能上的影响,也没有观察到相应的摩擦磨损情况,但仍有可能导致其他形式的失效,还需要进一步研究证明其可靠性。

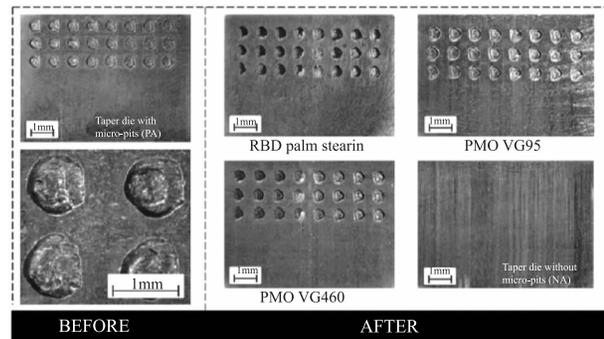


图 1 锥形模微凹坑表面图像<sup>[15]</sup>

Fig. 1 Surface image of taper die with micro-pits (PA)<sup>[15]</sup>

由于面积占有率对润滑减磨效果影响显著,通常通过纹理密度、纹理纵横比等定量调控,国内外学者聚焦于此,通过大量试验进行了研究,以期获得最佳的润滑性能。2017 年, Borjali A 等<sup>[16]</sup>在研究聚乙烯假体髋关节的寿命时,未采用制造超光滑铰接表面的方法,转而采用图案化微结构即微凹坑的方法,促使表面形成弹流润滑,从而减少聚乙烯磨损。实验采用激光表面纹理及飞秒激光烧蚀的办法,选择了不同的纹理密度与纹理纵横比,即面积占有率,进行摩擦试验。对比试验表明,配合相应的润滑油膜厚度,当纹理密度为 0.1,纹理纵横比为 0.01 时,减磨效果最佳,而此时并非面积占有率最大时。

2017 年,余广等<sup>[17]</sup>在分析液压缸活塞表面微织构动压润滑性能时,利用数值模拟等手段探讨了面积占有率对表面摩擦因数的影响,研究的结果如图 2 所示。当截面构型为圆形时,最高面积占有率为 78.75%。面积占有率的升高伴随着摩擦因数的急剧减小,但当面积占有率上升到 0.48 以上时,摩擦因数的变化趋于平缓,因此,在选取面积占有率时,需考虑加工后的材料强度及成本等因素,综合评判得出最优面积占有率。数值模拟技术在控制变量等方面独具优势,随着计算机技术的不断进步,其准确性也进一步提高,与实验协同进行能够降低成本,增加最终结果的

可信度。面积占有率对微织构表面摩擦因数的影响程度也与前文中最佳面积占有率并非最大值相符合,但其数据差异较大。

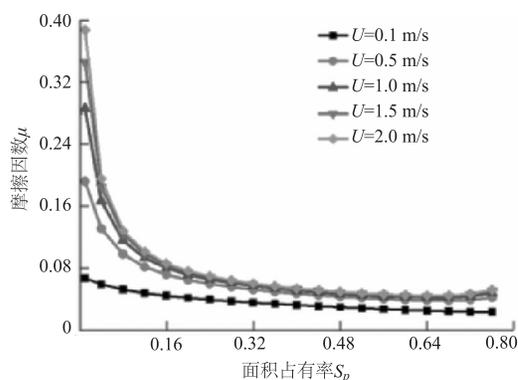


图2 面积占有率对微织构表面摩擦因数的影响<sup>[17]</sup>

Fig. 2 Influence of area occupation on friction coefficient of micro texture surface<sup>[17]</sup>

2017年,李星亮等<sup>[18]</sup>在研究磨料粒度对表面微织构纯钛干摩擦性能的影响时,采用激光表面加工技术设置不同参数的点阵微织构对纯钛表面进行处理,控制微凹坑点阵深度为30 μm,点阵密度分别为10.5%、17.4%和26.2%。实验表明,干摩擦性能与磨料粒度的选取关系重大,选用小于织构直径的磨料能够最大程度降低摩擦减少磨损,同时,较大的织构密度能够降低摩擦系数和磨损率。这一实验不仅探究了面积密度对织构效果的影响,而且指出了外界工况,如磨料粒度等对摩擦磨损情况的影响。由此也可以看出,在进一步研究激光表面微织构的过程中,考虑工况条件,控制润滑条件等减小外界条件对实验结果的影响有重要意义。

由规则凹坑织构形成的油膜压力除受到面积占有率的影响外,凹坑深度、直径及深径比对润滑效果的影响也至关重要<sup>[19]</sup>。2014年,Beomkeun Kima等<sup>[20]</sup>在研究微织构对铸铁表面摩擦行为的影响时,以在汽车发动机中的应用为研究对象<sup>[21-22]</sup>,以Ronen等<sup>[23]</sup>数值模拟结果作为参照,对在不同程度润滑条件下的织构参数进行了多组对比实验,明确了纹理板在低润滑参数下的减磨能力,排除了凹坑直径对织构效果的影响。低润滑条件下,深径比影响较面积占有率小,但在某些润滑条件下,面积占有率对摩擦系数减弱,此时,深径比对其影响较大。该实验验证了数值模拟结果,进一步指出了特定条件下表面织构参数的影响,同时也侧面证明了数值模拟技术的可信度。

2015年,周建忠等<sup>[24]</sup>在研究激光喷丸诱导镁合金

表面微织构的电化学腐蚀性能时,通过控制激光能量和喷丸次数,改变微凹坑的直径与深度。研究表明,当激光功率密度一定时,增加喷丸次数可以增加深度与直径,但达到一定程度后,由于形变硬化,直径与深度将不再变化。深度的增加伴随着更高的功率密度与更多的喷丸次数,这使表层晶粒细化,同时抑制电腐蚀裂纹的萌生与蔓延。结合激光冲击波对材料表面残余应力均匀性的调整,进一步加强了对电腐蚀裂纹的抑制<sup>[25-26]</sup>。这种基于激光冲击强化技术的微织构形貌对材料基体的强化作用不可忽视,但其在直径、深度等参数上与微织构表面形貌尚存在较大差异,这一差异的优劣尚需大量实验进行证明。

随着微织构研究日渐深入,越来越多的学者将目光投向了多种参数联合作用的影响。2016年,F. Saeidi等<sup>[27]</sup>在贫油润滑条件下研究铸铁表面织构参数对往复运动的影响时,采用激光加工的手段,设计实验探究了多个参数的相互作用,选取深度、直径、长度、面积占有率以及滑动方向分别进行实验研究。实验结果表明,直径与面积占有率对摩擦系数影响显著,而长度、深度和滑动方向对摩擦系数的影响并不明显;但各参数间的相互作用对摩擦系数和寿命存在影响,其相互作用机理复杂。在贫油润滑条件下,微观织构确有延长寿命之效,多次实验得出:当深度为50 μm,直径为100 μm,长度为500 μm,面积占有率为5%且织构方向与运动方向垂直时,其对摩擦系数的改善最为明显。除此以外,体积比作为一个新的参数被列入考量之中,它对于摩擦系数的影响较其他参数更为直接,但相关实验研究尚鲜见报道。

目前,微凹坑在润滑减磨等方面的优越性能已经引起了国内外专家学者的广泛关注,针对微凹坑的研究也最为细致。尽管多参数协同研究已见于报道,但微凹坑参数对润滑减磨的影响还应就具体情况进行分析,尤其是面积占有率对织构效果的影响。最优面积占有率尚存在多种说法,因此需要进一步考察润滑条件、材料及工况的影响,减少外界条件及偶然因素对实验结果的干扰。模拟技术的运用将微织构的现有技术与理论研究结果进一步结合起来,是微织构技术创新发展的机遇。

### 3 微沟槽织构

微沟槽表面织构是一种高效的减阻手段,加工方便易得、价格低廉,在摩擦学、医学等领域应用广

泛。润滑剂与微沟槽协同作用,在“约束作用”和“尖峰作用”的相互博弈中,实现减阻强化,在此过程中,沟槽宽度、深度、深宽比、面积密度及方向等均对微沟槽织构效果有显著影响<sup>[28-31]</sup>。近年来,部分专家学者将微沟槽激光表面织构与仿生学联系起来,通过改变沟槽横截面形状使之近似鲨鱼皮表面,达到减阻的目的,常见的沟槽截面构型有:矩形沟槽、三角形沟槽、椭圆形沟槽和 Space-V 沟槽<sup>[32-34]</sup>。

微沟槽表面织构多用于增加刀具的抗粘结性能,近年来,承力、减磨等方面的研究表明了微沟槽织构在承力部位的独特优势。2013 年,尹必峰等<sup>[35]</sup>在仿真分析柴油机缸套表面微结构润滑性能时,从沟槽角度、面积密度和深宽比三个方面分析了织构参数对润滑效果的影响。根据 MATLAB 优化模型,当微沟槽与活塞运动方向夹角为  $60^\circ$  时最佳,既不影响润滑油膜的形成,也不妨碍油环刮油;面积密度的影响仅在上止点附近较大;深宽比的影响作用最大,深度对润滑效果影响显著,摩擦力随深度的增加而增加,控制沟槽深度  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  时润滑性能最佳。这种建立数学模型进行仿真模拟研究的方式随着计算机技术的发展已日渐普遍,但相关实验的验证仍是不可或缺的一环。

2016 年,刘泽宇等<sup>[36]</sup>在对陶瓷刀具表面微结构激光加工工艺进行研究时,分别控制激光功率、频率、扫描速度和次数对微沟槽减磨效果进行了分析,其微结构沟槽形貌如图 3 所示。实验结果表明:织构深度与宽度受工艺参数影响较大,但织构深度与宽度较大时,摩擦系数不减反增,不能达到减磨润滑的效果。因此,实验数据表明当激光功率控制在  $4 \text{ W}$  以下,激光重复频率范围为  $60 \sim 80 \text{ kHz}$ ,保持扫描次数不超过两次,速度在  $50 \sim 100 \text{ mm/s}$  能够获得较好的减磨效果。

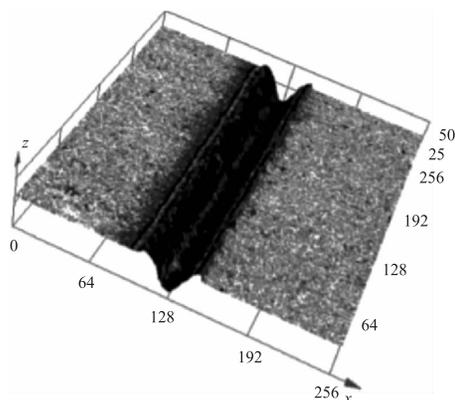


图 3 激光加工微织构沟槽形貌

Fig. 3 Morphology of micro grooves with Laser processing

除常规的深度、直径等因素外,沟槽方向的选取也对织构效果影响重大。2014 年,陈平等<sup>[37]</sup>在研究表面条纹织构倾斜角对摩擦性能的影响时,针对较少见于报道的点、线摩擦进行研究<sup>[38]</sup>,采用电加工的方式进行织构,对比了垂直织构和倾斜织构的摩擦性能,并分析了倾斜角对织构效果的影响。实验证明,摩擦系数的波动幅度与载荷变化关系不大,但织构的倾斜方向与之有关,特别是当倾斜方向与摩擦方向一致时,摩擦系数变化更大。但对于如何利用方向对摩擦性能的影响改善摩擦磨损性能以及最优角度的确定还需要进一步研究。

2014 年,Ismael Syed 等<sup>[39]</sup>在研究微沟槽的流体动压润滑时,利用 UID 惯性效应建立数学模型,探究了横向纹理的影响以及椭圆、三角截面纹理的取向。在多纹理的研究中,横向纹理数量保持在较低的水平时可以获得更好的润滑性能。不同角度的沟槽分布影响不同,应用场合也不相同, $45^\circ$ 三角截面和  $90^\circ$ 椭圆截面沟槽对密封性能有一定的增强; $60^\circ$ 三角截面和  $90^\circ$ 椭圆截面沟槽则对承载能力有提升; $90^\circ$ 椭圆截面沟槽较三角截面能够带来更高的负载能力和较低的摩擦系数。该类研究并不多见于报道,实验难度较大。

织构形状与参数均对润滑性能的改善起着至关重要的作用,为达到最佳的减磨效果,织构截面构型对工作表面的影响不可忽略。2016 年,尹明虎等<sup>[40]</sup>将截面构型分别为矩形、圆形和三角形的三种织构形貌进行对比,测试了其径向滑动轴承性能的影响。微沟槽对降低最大油膜压力效果显著,但将织构布置在主要承载区时效果最佳。从实验结果看,三种织构形貌对承载能力的影响存在较大差异,采用矩形截面承载能力提升效果最好,但在实际生产中,矩形截面对仪器设备要求较高,生产成本不可忽略。

织构性能的提升是截面构型与分布合理匹配的结果,因此,研究其相互作用对织构效果的影响势在必行。2016 年,Shipra Aggarwal 等<sup>[41]</sup>在研究推力轴承的摩擦系数和承载性能时,在扇形面上刻画出微沟槽,分别分析了横截面为圆形、矩形、梯形和三角形的性能差异。与无纹理时相比,纹理表面对摩擦系数和承载能力的改善显而易见。四种横截面形状的对比中,矩形截面较其他三种更为突出,承载能力

较无纹理时增加 97 % , 摩擦系数显著降低 51 % 。经过多次实验, 得到最优参数, 即在选用矩形截面时, 控制槽长为 0.85 B, 深度为 30  $\mu\text{m}$ , 宽度为 6.75 mm。由于微造型技术对表面和基材破坏较小, 对材料强度影响较小, 因此具备设置在承力部位的条件, 此结论与上文所述一致。

2017 年, Janusz Skrzypacz 等<sup>[42]</sup> 在研究微沟槽对离心泵叶轮的影响时, 对比了光滑表面和织构表面在叶轮通道中的速度分布及泵的总效率, 实验证明了在采用沟槽织构的离心泵叶轮中, 可以观察到更好的速度平衡, 并有效防止回流区的形成。较超光滑表面在制造成本等方面, 沟槽织构优势显著, 随着对沟槽织构效果的进一步研究, 参数选择对微沟槽织构效果的影响也逐步厘清。

目前, 对于微沟槽润滑减磨效果的研究已经广泛展开, 其织构效果也获得了学界广泛认可, 并在部分领域实现了应用。但从大量实验中获得的数据及分析结果却大有不同, 这与材料基质及应用场合关联密切, 因此, 探究材料与微沟槽的关系, 实现润滑减磨的定量调控和截面构型、织构参数及方向等多尺度的协同作用还亟待研究。同时, 微沟槽织构对激光器性能要求较高, 因此多应用于精度要求高的承力部件中, 其发展亦与激光器技术的发展相关联。

#### 4 特殊织构

特殊织构是表面处理专业化的产物, 现有的特殊织构形貌可分为两类, 一类是对织构的形状进行定制设计, 呈现出微凸起、鳞包及菱形等不常见形貌, 另一类是将常见表面织构进行有机结合, 进一步达到润滑减磨效果<sup>[43-46]</sup>。

1971 年, I. C. CLARKE<sup>[47]</sup> 在研究人体关节面轮廓与相关表面凹陷频率时, 将兔、狗等生物关节的表面凹陷数目进行对比, 较人类关节结构摩擦磨损系数低, 这种在适者生存中进化而来的结构具有优异的界面性能。随着仿生学原理的深入研究, 织构形状也呈现出更加类似于生物结构的趋势, 如: 由鲨鱼皮盾甲鳞结构而衍生出的鳞包织构、菱形织构等。这些仿生学结构较普通织构形式减阻效果明显, 且具有超疏水性, 在航空航天、输油管道等场合应用广泛<sup>[48]</sup>。2014 年, 汪久根等<sup>[49]</sup> 运用菱形织构减弱列车在高速运行时的摩擦噪声, 这种仿生鲨鱼皮的结构不仅降噪效果明显, 且改变了噪声的分布。实验

表明, 列车运行方向的菱形对角线越长, 摩擦噪声越小; 在一定范围内, 织构深度越大, 降噪程度越强。

尽管微织构润滑减磨研究已经渐趋成熟, 但混合纹理的作用尚未完全发挥, 大量实验表明, 混合织构润滑效果明显优于单个纹理。混合纹理不仅是对单个纹理有效面积进行扩展, 且两种织构形式协同互补, 提高润滑油膜压力<sup>[50]</sup>。2010 年, 朱华等<sup>[51]</sup> 设计了变密度微圆坑表面织构, 测试其在活塞-缸套往复运动中的润滑减磨作用, 并与均匀密度织构进行对比。实验结果表明, 载荷、摩擦速度等对织构效果的影响不可忽略。低载荷及中高载荷高速摩擦时, 变密度织构显著改善了减磨效果; 针对活塞-缸套的工作环境, 将低密度织构设置在中部, 高密度织构设置在两边效果较好, 但最优密度范围尚未确定。

2016 年, Jialin Sun 等<sup>[52]</sup> 在研究混合织构对钴基刀具切削纯铁性能的影响时, 利用激光技术在前刀面上进行微凹坑和微沟槽的混合织构。与单一纹理相比, 混合纹理降低了切削力、切削温度和摩擦力。实验结果表明, 当切削速度达到 120 米/分钟时, 采用混合织构刀具进行切削时, 切削力下降了 7.1 % ~ 33.3 % , 切削温度下降了 6.9 % ~ 21.7 % , 表面粗糙度降低了 42.9 % ~ 69.1 % 。

近年来, 特殊织构逐渐兴起, 其形式较常见织构更为复杂, 但由于制造技术的限制, 难以批量加工, 因此, 成本较高, 已有一些专家学者对这一问题进行攻关, 以期降低成本实现工业化生产。激光微造型灵活性高, 材料应用范围广, 与特殊织构发展过程中的瓶颈问题契合度高, 但激光微造型与特殊织构的协同设计及研究尚鲜见报道。随着微凹坑、微沟槽表面织构原理、效果的厘清, 更多的目光必将聚焦于特殊织构的研究中。

#### 5 结论

1) 在微凹坑织构中, 面积占有率对织构效果的影响最为显著, 但最优面积占有率的选取还需进一步考虑工况等客观因素的影响; 微沟槽织构由于其对激光器要求较高, 受设备水平限制, 但其织构效果在刀具等实际工况的应用中优于微凹坑织构, 因此进一步探究沟槽深度、方向和截面构型的协同作用还亟待研究; 特殊织构批量生产困难, 成本较高, 但针对具体场合织构效果更为明显, 混合纹理替代单

一纹理能够进一步降低摩擦,减小磨损;

2)微凹坑、沟槽表面结构是仿生学结构的一种简化形式,能够以较小的成本达到润滑减磨的目的,目前在工业生产中已有应用,但针对实际工况的实验研究还存在不足。随着仿真模拟等手段的进步,激光微结构研究能够控制成本,减少外界客观条件对研究结果的影响,已成为激光微结构研究中不可或缺的一环;而针对特殊结构囿于制造技术限制难以批量加工等问题,激光微造型应用灵活,其发展也将促进特殊结构技术的发展;

3)激光技术作为一种非接触性加工方法,除激光微造型外,借助激光冲击强化技术进行凹坑阵列加工也逐渐出现在微结构研究中,但凹坑深度、直径等问题与微结构还有较大差异,其润滑减磨效果还亟待研究。

#### 参考文献:

- [1] YANG Wenbin, XIAO Qian, LIANG Jun, et al. Preparation and tribological properties of plasma electrolytic oxidation coatings on carbon steel [J]. *Tribology*, 2015, 35(3):328-334. (in Chinese)  
杨文斌,肖乾,梁军,等. 碳钢表面微弧氧化膜的制备及摩擦磨损性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2015, 35(3):328-334.
- [2] Kümmel J, Braun D, Gibmeier J, et al. Study on micro texturing of uncoated cemented carbide cutting tools for wear improvement and built-up edge stabilisation [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 215:62-70.
- [3] Zhang K, Deng J, Sun J, et al. Effect of micro/nano-scale textures on anti-adhesive wear properties of WC/Co-based TiAlN coated tools in AISI 316 austenitic stainless steel cutting [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 355:602-614.
- [4] Zhang H, Zhang D Y, Hua M, 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.
- [5] Costa H L, Hutchings I M. Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions [J]. *Tribology International*, 2007, 40(8):1227-1238.
- [6] HE Xia, LIAO Wenling, WANG Guorong, et al. Research of femtosecond laser processing texture and influence of texture on tribological properties [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(10):32-37. (in Chinese)  
何霞,廖文玲,王国荣,等. 飞秒激光加工结构及结构对磨损的影响研究[J]. *激光与红外*, 2017, 47(10):32-37.
- [7] ZHANG Peiyun, HUA Xijun, FU Yonghong, et al. Experimental investigations on laser surface micro-texturing technology and application [J]. *Surface Technology*, 2013, 42(5):55-58. (in Chinese)  
张培耘,华希俊,符永宏,等. 激光表面微结构工艺试验及应用研究[J]. *表面技术*, 2013, 42(5):55-58.
- [8] Zhong M P, Yuan J L, Yao W F, et al. Researcher on manufacturing surface of air compressor cylinder by vibration and mechanism of lubrication [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 842:643-646.
- [9] FU Yonghong, LIU Qiangxian, YE Yunxia, et al. Research on laser surface micro texturing processing of single pulse intervals [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, (12):98-105. (in Chinese)  
符永宏,刘强宪,叶云霞,等. 同点间隔多次激光微结构工艺研究[J]. *中国激光*, 2015, (12):98-105.
- [10] Pan L, Zheng Z, Ali A, et al. Evaluation of the parameters of titanium surface micro-pits on the titanium-PEEK joint fracture toughness [J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2017, 75:165-173.
- [11] YU Haiwu, WANG Xiaolei, SUN Zao, et al. Theoretical analysis on hydrodynamic lubrication of cylinder micro-dimple surface texture [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2010, 42(2):209-213. (in Chinese)  
于海武,王晓雷,孙造,等. 圆柱形微凹坑表面结构对流体动压润滑性能的影响[J]. *南京航空航天大学学报*, 2010, 42(2):209-213.
- [12] Jiang D, Long J, Cai M, et al. Femtosecond laser fabricated micro/nano interface structures toward enhanced bonding strength and heat transfer capability of W/Cu joining [J]. *Materials & Design*, 2017, 114:185-193.
- [13] Dong J, Gao M, Huan Y, et al. Enhanced tensile plasticity of Zr based bulk metallic glasses by a stress induced large scale flow [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 727:297-303.
- [14] Salama M E. The effect of macro-roughness on the performance of parallel thrust bearings [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1950, 163(1):149-161.
- [15] Nurul M A, Syahrullail S. Influence of micro-pits indentation and palm based-oil on taper die sliding contact surface in cold extrusion process [J]. *International Journal of Precision Engineering & Manufacturing*, 2016, 17(7):917-930.
- [16] Borjali A, Langhorn J, Monson K, et al. Using a patterned microtexture to reduce polyethylene wear in metal-on-polyethylene prosthetic bearing couples [J]. *Wear*, 2017,

- 392-393;77-83.
- [17] YU Guang, ZENG Liangcai, MAO Yang, et al. Analysis on hydrodynamic lubrication performance of micro-texture on hydraulic cylinder piston surface[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(12):1823-1829. (in Chinese)  
余广, 曾良才, 毛阳, 等. 液压缸活塞表面微织构动压润滑性能分析[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(12): 1823-1829.
- [18] LI Xingliang, YUE Wen, HUANG Fei, et al. Effect of wear particle size on dry tribological properties of surface texturing titanium[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(24):25-33. (in Chinese)  
李星亮, 岳文, 黄飞, 等. 磨料粒度对表面微织构纯钛干摩擦性能的影响[J]. 机械工程学报, 2017, 53(24):25-33.
- [19] Li D, Chen X, Guo C, et al. Micro surface texturing of alumina ceramic with nanosecond laser[J]. Procedia Engineering, 2017, 174:370-376.
- [20] Kim B, Chae Y H, Choi H S. Effects of surface texturing on the frictional behavior of cast iron surfaces[J]. Tribology International, 2014, 70(2):128-135.
- [21] Ryk G, Etsion I. Testing piston rings with partial laser surface texturing for friction reduction[J]. Wear, 2006, 261:792-796.
- [22] Ryk G, Kligerman Y, Etsion I, et al. Experimental investigation of partial laser surface texturing for piston-ring friction reduction[J]. Tribol Trans, 2005, 48:583-588.
- [23] Ronen A, Kligerman Y, Etsion I. Friction-reducing surface-texturing in reciprocating automotive components[J]. Tribol Trans, 2001, 44:359-366.
- [24] ZHOU Jianzhong, MEI Yufang, SHENG Jie, et al. Electrochemical corrosion behaviors of magnesium alloy micro-textured induced by laser peening[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(16):120-126. (in Chinese)  
周建忠, 梅於芬, 盛杰, 等. 激光喷丸诱导镁合金表面微织构的电化学腐蚀性能[J]. 机械工程学报, 2015, 51(16):120-126.
- [25] LUONG H, HILL M R. The effects of laser peening on high-cycle fatigue in 7085-T7651 aluminum alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 477(1):208-216.
- [26] CHEUNG C, ERB U, PALUMBO G. Application of grain boundary engineering concepts to alleviate intergranular cracking in Alloys 600 and 690[J]. Materials Science and Engineering, 1994, 185(1):39-43.
- [27] Saeidi F, Meylan B, Hoffmann P, et al. Effect of surface texturing on cast iron reciprocating against steel under starved lubrication conditions: A parametric study[J]. Wear, 2016, 348-349:17-26.
- [28] WEI Jinjia, HUANG Chonghai, YU Bo. Study of collaborative drag-reducing effect of surfactant solution and longitudinal microgroove channel[J]. CIESC Journal, 2018, 69(1):472-482. (in Chinese)  
魏进家, 黄崇海, 宇波. 表面活性剂溶液与壁面纵向微沟槽协同减阻研究[J]. 化工学报, 2018, 69(1): 472-482.
- [29] Kindrachuk M, Radionenko O, Kryzhanovskiy A, et al. The friction mechanism between surfaces with regular micro grooves under boundary lubrication[J]. Aviation, 2014, 18(2):64-71.
- [30] Asakura K, Yan J W. Ultraprecision micro grooving on brass for surface wettability control[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1017:489-494.
- [31] Li Y, Liu C, Liu X, et al. Numerical simulation of fluid flow and heat transfer on the lubricating surface with micro-groove[J]. Heat Transfer-asian Research, 2016, 45(3):228-238.
- [32] LI Tianjian, CHEN Zongmei, DING Xiaohong, et al. Design of the aerostatic linear guideway with micro-structured surfaces for ultra precision machine tools[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(3):193-200. (in Chinese)  
李天箭, 陈宗镁, 丁晓红, 等. 超精密机床静压气浮导轨表面微结构设计研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(3):193-200.
- [33] Asakura K, Yan J W. Ultraprecision micro grooving on brass for surface wettability control[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1017:489-494.
- [34] Shi C, Li X, Chen Z. Design and experimental study of a micro-groove grinding wheel with spray cooling effect[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 27(2):407-412.
- [35] YIN Bifeng, QIAN Yanqiang, LI Xiaodong, et al. Simulation and analysis on lubrication performance of surface micro-groove texturing on cylinder liner in diesel engine[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(5):644-650. (in Chinese)  
尹必峰, 钱晏强, 李晓东, 等. 柴油机缸套表面微沟槽结构润滑性能仿真分析[J]. 中国机械工程, 2013, 24(5):644-650.
- [36] LIU Zeyu, WEI Xin, XIE Xiaozhu, et al. Experimental study on laser processing of surface micro texture on ceramic tool[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(3):259-264.

- 刘泽宇,魏昕,谢小柱,等. 陶瓷刀具表面微织构激光加工工艺的实验研究[J]. 激光与红外,2016,46(3): 259-264.
- [37] CHEN Ping, LI Yunlong, SHAO Tianmin. Influence of the incline angle of striated surface textures on the friction behavior of stainless steel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2014,(10):1315-1321. (in Chinese)  
陈平,李云龙,邵天敏. 不锈钢表面条纹织构倾斜角对摩擦性能的影响[J]. 北京科技大学学报,2014,(10):1315-1321.
- [38] WANG Wenzhong, HUANG Zhixiang, SHEN Dian, et al. Effect of the patterned cylindrical dimple array on the tribological performance of lubricated point-contacts[J]. Tribology,2012,32(4):371. (in Chinese)  
王文中,黄志祥,沈殿,等. 圆柱形表面微坑阵列对点接触润滑摩擦性能的影响[J]. 摩擦学学报,2012,32(4):371.
- [39] Syed I, Sarangi M. Hydrodynamic lubrication with deterministic micro textures considering fluid inertia effect [J]. Tribology International,2014,69(1):30-38.
- [40] YIN Minghu, CHEN Guoding, GAO Dangcheng, et al. Effects of three types of surface texture on the performances of journal bearing[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2016,48(1):159-164. (in Chinese)  
尹明虎,陈国定,高当成,等. 3种微织构对径向滑动轴承性能的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报,2016,48(1):159-164.
- [41] Aggarwal S, Pandey R K. Frictional and load-carrying behaviours of micro-textured sector shape pad thrust bearing incorporating the cavitation and thermal effects [J]. Lubrication Science,2016,29(4):255-277.
- [42] Janusz Skrzypacz, Marcin Bieganowski. The influence of micro grooves on the parameters of the centrifugal pump impeller [J]. International Journal of Mechanical Sciences,2017,144(15):827-835.
- [43] Ranjan R, Lambeth D N, Tromel M, et al. Laser texturing for low-flying-height media[J]. Journal of Applied Physics,1991,69(8):5745-5747.
- [44] Zhao D Y, Huang Z P, Wang M J, et al. Vacuum casting replication of micro-riblets on shark skin for drag-reducing applications [J]. Journal of Materials Processing Technology,2012,212(1):198-202.
- [45] Hyzy S L, Cheng A, Cohen D J, et al. Novel hydrophilic nanostructured microtexture on direct metal laser sintered Ti-6Al-4V surfaces enhances osteoblast response in vitro and osseointegration in a rabbit model[J]. Journal of Biomedical Materials Research: part a,2016,104(8):2086-2098.
- [46] Xiang D, Feng H, Guo Z, et al. Preparation technology and properties of microtexture diamond-coated tools[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials,2018,76:16-24.
- [47] Clarke I C. Human articular surface contours and related surface depression frequency studies[J]. Annals of the Rheumatic Diseases,1971,30(1):15.
- [48] Chamorro L P, Arndt R E A, Sotiropoulos F. Drag reduction of large wind turbine blades through riblets: evaluation of riblet geometry and application strategies[J]. Renewable Energy,2013,50(3):1095-1105.
- [49] WANG Jiugen, CHEN Shihong, WANG Qingjiu. Effect of bionic rhombic surface texture on frictional noise of high-speed train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2014,(1):43-48. (in Chinese)  
汪久根,陈仕洪,王庆九. 仿生菱形表面织构对高速列车摩擦噪声的影响[J]. 交通运输工程学报,2014,(1):43-48.
- [50] Ogihara H. Technology for reducing rubbing resistance by means of surface improvement[J]. Journal of the Surface Finishing Society of Japan, 2009, 52(2): 184-187.
- [51] ZHU Hua, LI Jianquan, LU Binbin, et al. Friction reduction effect of micro-round dimple surface texture with variable density in reciprocating[J]. Journal of Southeast University: natural science edition,2010,40(4):741-745. (in Chinese)  
朱华,厉建全,陆斌斌,等. 变密度微圆坑表面织构在往复运动下的减摩作用[J]. 东南大学学报:自然科学版,2010,40(4):741-745.
- [52] Sun J, Zhou Y, Deng J, et al. Effect of hybrid texture combining micro-pits and micro-grooves on cutting performance of WC/Co-based tools [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(9-12):1-12.