

DOI : 10.3901/JME.2015.23.084

# 表面织构创新设计的研究回顾及展望\*

王静秋<sup>1,2</sup> 王晓雷<sup>1,2</sup>

(1. 南京航空航天大学机电学院 南京 210016 ;

2. 南京航空航天大学江苏省精密与微细制造技术重点实验室 南京 210016)

**摘要:**近十年来,作为一种可以显著提高界面性能的方法,表面织构已成为国内外界面科学领域的一个研究热点。微细加工技术的进步,使得通过精确控制织构的形状和尺度,优化其界面性能成为可能;仿生技术的发展为表面织构设计提供了源泉;对表面织构作用机制的深化理解促使其应用领域的扩展。目前,表面织构的应用已涉及减摩、抗磨、增摩、减振、抗粘附、抗蠕爬等多个领域。TRIZ 理论认为实现发明创新的基本原理和规律是客观存在的。人们如果掌握这些原理和规律,就可以能动地进行设计和创新,其结果具有预测性和可控性。对表面织构的研究进展进行了综述,从 TRIZ 理论的角度进行了归纳和总结,并通过 TRIZ 理论对表面织构研究的发展趋势进行了展望。

**关键词:**表面织构;摩擦;磨损;润滑;TRIZ 理论

**中图分类号:**TH117

## State of the Art in Innovative Design of Surface Texture

WANG Jingqiu<sup>1,2</sup> WANG Xiaolei<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,  
Nanjing 210016;

2. Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology, Nanjing University of Aeronautics and  
Astronautics, Nanjing 210016)

**Abstract:** Over the past decade, surface texture has received a significant boost in the field of interfacial science since it is proven to be an effective means to improve the properties of interface. The modern micro-machining technology makes it possible to optimize the interface performance by precisely controlling the shape and dimensions of surface texture. The understandings of the principles of bio-systems provide novel concepts and ideas for surface texture design. The discovery on the mechanisms of surface texture enhances the development of surface texture for different applications in industrial fields. Currently, surface texture has been involved in reducing friction, anti-wear, increasing friction, reducing vibration, anti-adhesion, anti-creeping etc. TRIZ is a theory of inventive problem solving, which indicates the objective existence of methodology and principles of innovation process. By mastering the methodology and principles, the innovative designing process could be promoted, and the results could be predictable and controllable. The research progresses of surface texture are reviewed, analyzed, and prospected based on TRIZ theory.

**Key words:** surface texture ; friction ; wear ; lubrication ; TRIZ theory

## 0 前言

无论是在自然界还是推动人类文明进步的各类机械设备中,大部分涉及能量交换、运动和信号传递的物理过程都是通过表面来实现的。最近几十年来,随着人类对表面微观物理及化学现象的深入,随着先进制造技术的发展,表面微观结构的设计与制造在减摩抗磨<sup>[1-3]</sup>、增摩<sup>[4]</sup>、减振<sup>[5-7]</sup>、抗粘附<sup>[8]</sup>、抗蠕爬<sup>[9]</sup>等多个领域已显示出良好的应用

前景,成为实现机械设备高效、小型化、以及高可靠性的一个有效途径<sup>[10]</sup>。

所有制造的表面都存在特定的加工痕迹或纹理。SCHLESINGER 在 1942 年指出“表面的质量对于其正确的功能极其重要”<sup>[11]</sup>,表明设计者们很早就意识到表面形态的重要性,认识到通过改变表面的纹理或织构,可以改善表面的机械、物理、以及化学性能。

什么是表面织构(Surface texture)? EVANS<sup>[11]</sup>曾借用了一句美国法官的名言“我无法准确定义,但是,我看到了就能够认识”,表明表面织构的定义仍存在模糊性和不确定性。EVANS 认为结构化表面

\* 国家自然科学基金资助项目(U1134003, 51175246)。20141206 收到初稿,20150702 收到修改稿

有别于工程化表面(Engineered surface)。工程化表面是指那些通过优化加工过程,形成特定的几何和表层材料结构,从而可以改善某些功能的表面;而织构化表面是指那些通过主动设计和制造,产生了按一定规则排布的微小结构,从而获得特定功能的表面。如何定义表面织构自然仁者见仁智者见智,然而,从“工程化表面”到“织构化表面”,体现了人类对表面的驾驭从被动使用到主动控制的进化过程。

## 1 表面织构的应用历史及研究

传统的机械设计和摩擦学理论一般认为,光滑的接触表面有助于减小摩擦和磨损,所以,机械加工技术一直朝着高精度和高光洁度的方向发展。

但另一方面,表面纹理或表面织构的应用也有着很长的历史。作为表面纹理早期的成功范例,利用珩磨工艺在发动机缸套表面制造的交叉网纹结构从20世纪40年代一直使用至今<sup>[12]</sup>。45°交叉的珩磨网纹具有均匀分布的“深谷”和“平台”分别用于存储润滑油和承受法向载荷,从而极大地避免了发动机拉缸等磨损故障。很明显的是,常用的表示表面粗糙度的参数,如轮廓算数平均偏差 $R_a$ ,均方根偏差 $R_q$ 均不能提供足够的信息来描述缸套的网纹结构。1933年针对珩磨网纹提出的“艾伯特曲线”或“承载面积曲线”是发动机制造商一直使用的表面评价方法。正如WILLIS指出的那样,对缸套表面处理工艺的发展是表面织构的一个重要里程碑,不仅使人们认识到一个合理的表面织构能够提高活塞/缸套等滑动接触副的摩擦和磨损特性,而且极大地促进了人们对测量和表征表面几何微结构的相关研究。

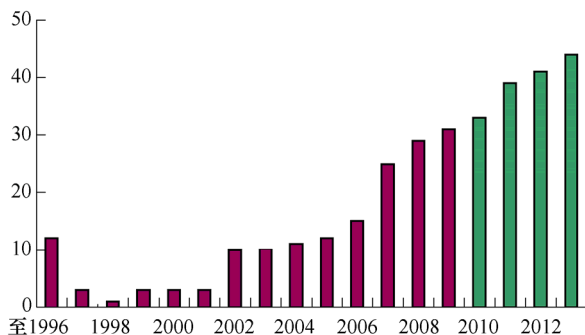


图1 有关表面织构的文章数量

ETSION曾统计过2009年之前发表在重要国际期刊上的有关表面织构的论文数量<sup>[13]</sup>。按照类似的统计方法,我们加上了2010年至2013年的数据。

如图1所示,在1996年之前,累计只有很少的几篇论文,而2000年以来,论文数量急剧增加。近年来,我国国家自然科学基金委员会已将“表面织构”列为机械表面效应与表面技术研究领域的一个研究方向,反映出我国对表面织构研究的重视。

需求的牵引和相关技术研究的进步是表面织构发展的动力。本文将从应用需求、技术发展的角度对表面织构的研究现状进行综述和分析,并利用创新方法论之一的TRIZ发明理论对其发展趋势进行预测和展望。

## 2 表面织构化的需求

现代机械设备对高性能机械零部件的需求是表面织构技术发展的牵引力。以机械密封为例,如图2所示<sup>[14]</sup>,现代机械要求机械密封能够可靠地工作在高速、高压、高温以及含有更多杂质的场合。从20世纪80年代至本世纪初,机械密封的最高工作压力从13 MPa提高到20 MPa,最高圆周速度从100 m/s提高到140 m/s。高压高速必然更容易引起密封表面的磨损甚至咬死。由此催生了密封表面的织构化技术。通过设计毫米尺度的沟槽或微米尺度的凹坑,在机械密封表面产生流体动压力,形成流体动压润滑膜,从而实现了密封在工作过程中的非接触,减小甚至避免了表面的磨损。

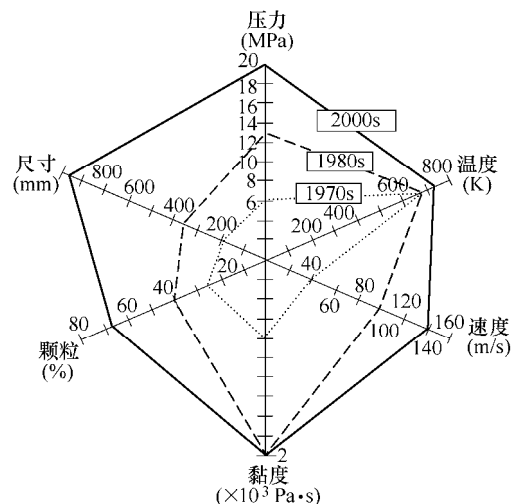


图2 机械密封工作条件的变迁

汽车发动机尾气中细小颗粒的排放和发动机润滑油的消耗密切相关。针对发动机排放标准的提高,首先需要采取的措施就是减少活塞环在缸套表面的布油量以减小机油消耗。这就需要进一步优化缸套表面的网纹结构,使其具备良好的储油和减摩能力,以使活塞(活塞环)/缸套摩擦副在供油量降低

的条件下保持良好的润滑性能<sup>[15]</sup>。

### 3 表面织构研究发展的动力

#### 3.1 先进加工技术的发展

尽管表面织构的性能取决于其形态和参数的优化,但同时,织构的加工精度和加工方法带来的影响也不容小觑<sup>[16]</sup>。加工技术在 20 世纪得到了迅猛发展。压印、磨粒流喷射、微切/铣削、反应性离子刻蚀、激光以及 MEMS 工艺等制造技术为表面织构的加工提供了有效手段。加工精度及成型能力的提高为优化表面织构的形态及参数,进一步提升其摩擦学性能提供了可能。

压印是一种古老的加工方法。文艺复兴时期的达芬奇不仅是艺术家,其留下的大量与机械设计及摩擦学相关的手绘,至今让人叹为观止。为了制造锉刀表面的微结构阵列,他设计了专用的机器,这是压印技术在表面织构制造方面较早的应用。超硬涂层技术和 MEMS 加工技术为微小阵列压印工具的制作提供了可能,使得可控压印的尺度达到微米量级<sup>[17]</sup>。

采用掩模板配合高速磨粒喷射,可以实现对硬质材料如陶瓷表面的织构化加工,无微观的翻边和隆起现象<sup>[18]</sup>。

利用改进的车床和间歇进给机构,车削加工的优势在于可以在圆柱面或圆柱端面形成整齐排列的凹坑织构<sup>[19]</sup>。但是,切削过程中的毛刺和翻边是需要注意的问题。

反应性离子刻蚀来源于 MEMS 的硅加工工艺,可以实现对陶瓷等非金属材料的表面加工<sup>[20]</sup>。通过掩模板可以获得需要的形状,加工精度取决于材料的晶粒尺寸。

激光是表面织构加工中应用最为广泛的一种手段<sup>[1, 21-22]</sup>。织构的深度和深径比取决于激光加工的时间、波长、功率等因素。使用毫秒至纳秒( $10^{-9}$  s)宽度的脉冲加工时,表面材料的熔化和蒸发是材料的去除形式,作为结果,在工作点附近不可避免地形成飞边和热影响区,从而可能形成微观裂纹或相变。当使用飞秒( $10^{-15}$  s)脉冲的激光时,蒸发成为材料的主要去除形式,热影响区小,表面织构的质量可以得到提高。巧妙地利用光纤的柱面作为聚焦原件,也可使用激光一次性成形沟槽等网状织构<sup>[23]</sup>。

采用一次性或可重复使用掩膜的微细电解技术属于电化学加工范畴,具有加工精度高、速度快,一次完成大面积织构加工的特点,满足金属表面织

构的工业化生产需求<sup>[24]</sup>。

#### 3.2 表面织构工作机理的理解深化

对表面织构工作机理的理解是表面织构设计的基础。典型的表面织构四大工作机理已经得到归纳、总结和验证<sup>[2]</sup>。

1966 年 HAMILTON 提出了附加流体动压效应,经过 ETSION 等的深化,已成为表面织构最重要的工作机理。该机理认为,加工在摩擦副表面的凹坑或沟槽在液体流动过程中都会形成微小的收敛楔和发散楔。每一个微小收敛楔中的流体都会因为摩擦副的相对运动产生流体动压效应,从而形成正压力;而发散楔中由于有“气穴”现象的存在,流体的“负压”得到了抑制,因此,表面之间形成了附加的流体动压力,提高了流体膜的承载能力。至今,流体动压原理仍是高速轻载条件下表面织构设计的主要依据<sup>[25-28]</sup>。

1994 年, SUH 通过试验发现<sup>[29]</sup>,在真空及无润滑条件下,具有沟槽的表面和光滑表面相比,摩擦因数低并且稳定。据此提出了表面的沟槽结构能够捕捉和容纳磨屑以防止产生三体磨损的减磨机理。

在相对低速重载条件下,表面织构能够存储润滑油并提供给周围区域,实现“二次润滑”<sup>[30-31]</sup>,促进边界润滑性能。缸套上的珩磨条纹正是使用了这个机理。表面的储油能力和表面织构的形态密切相关,除艾伯特曲线之外,2007 年推出的 ISO25178 为表面形貌的描述提供了三维表征参数,如  $V_{VC}$  表示支撑率在 10%~80% 的平均空体体积,  $V_{VV}$  是支撑率在 80%~100% 时的平均空体体积,  $E$  为连通性系数。李兵等<sup>[32-33]</sup>认为,表面空体体积决定了表面的储油能力,而连通性系数  $E$  则影响摩擦副表面润滑油的分布及流动性。

在 MEMS 系统中,由于零件的微小化,加之,摩擦副的间隙尺度一般处于纳米级甚至为零间隙,表面力的作用超过了体积力和惯性力,由此在表面产生了显著的粘着力和摩擦力。磁性存储器如硬盘的接触区通常都要进行织构化处理,以减小接触面积从而避免粘附和静摩擦故障<sup>[34-35]</sup>。

除上述机理之外,通过持续不断的研究,对表面织构工作机理的理解也在不断深化。

TONDER<sup>[36]</sup>认为,由于织构化表面可以在入口区域内存储润滑油,因而能够较好地保持油膜,从而得到承载力的提升。FOWELL 等<sup>[37]</sup>提出了“入口泵吸”效应,即当气穴现象产生时,润滑剂入口处的压力大于微凹坑内部润滑膜的压力,致使润滑剂被压入微凹坑内部,从而产生附加流体动压力。由

于气穴现象的重要性, ZHANG 等<sup>[38]</sup>对沟槽状和凹坑状织构中的气穴特性进行了理论和试验研究, 指出 JFO 模型对气穴发生区域的预测要好于雷诺模型。

凹坑和沟槽是减摩织构的典型单元。凹坑型织构具有独立和封闭的特性, 有助于形成较高的流体动压力<sup>[39]</sup>。而沟槽型织构则有利于为摩擦面提供润滑油。将沟槽或椭圆形凹坑按一定角度倾斜地布置在端面密封表面则可以提供反向泵送效应以减少泄漏<sup>[40-41]</sup>。

对沟槽型织构中流体的模拟结果表明, 平行于滑动方向的沟槽有利于表面的供油行为, 而垂直于运动方向的沟槽, 则有利于形成流体动压力。这个结果能够解释为什么缸套上的珩磨条纹一般取 45° 相互交叉<sup>[42]</sup>。

为了能够设计有效的表面织构, 不仅需要掌握表面织构的减摩和抗磨的工作机理, 也要深刻理解织构带来的负面相应。众所周知, 表面织构化会带来表面粗糙度的增加和表面承载面积的减小, 所以人们要使用艾伯特曲线来评价缸套表面的承载力。除此自外, 最近的研究表明, 在表面的接触过程中, 表面微结构的边缘会产生应力集中, 在软硬材料组成的摩擦副中, 织构加工在硬表面产生的应力集中现象更为显著; 当两个表面接触且有相对运动时, 垂直于运动方向的边缘会有更高的接触应力<sup>[43]</sup>。

表面的润湿性以及润滑液的蠕爬特性是影响润滑性能的重要因素。MA 等<sup>[44]</sup>的试验结果表明, 利用激光加工的正方形凸起可以提高 SiC 表面的亲水性, 可以将其接触角从 63.5° 减小至 39.3°。润滑液的蠕爬是空间机构丧失润滑的主要原因之一, 由于环境温度以及摩擦生热产生的温度梯度会驱使润滑油从温度高的区域流向温度低的区域, 导致摩擦区域润滑剂的流失。而垂直于蠕爬方向的条纹型织构已被证明可以有效地阻止蠕爬的发生<sup>[9]</sup>。

### 3.3 仿生学的发展

在 35 亿年的进化和生存竞争中, 动物和植物形成了许多优异的几何结构、巧妙的材料拓扑、简约而有效的控制方式和功能丰富的表面织构<sup>[45]</sup>。得益于关节软骨表面的起伏和凹陷<sup>[46]</sup>, 动物关节的摩擦因数可以低至 0.005, 比人工关节至少要低一个数量级; 鲨鱼皮的肋条结构能够大大降低它在水中运动时的阻力; 荷叶表面的微纳米乳突结构产生了超疏水和自清洁效应<sup>[47]</sup>; 树蛙的脚掌结构使它可以栖息在湿滑的树干和树叶表面<sup>[48]</sup>。这些具有优异界面性能的生物体表面结构及其工作机理, 一直是表面织构创新设计的源泉。

## 4 表面织构技术发展的规律分析

表面织构技术研究的进步需要借鉴其他学科的发展, 借鉴科学的方法论和创新的思维。自 1620 年培根的《科学方法论》以来, 许多学者都致力于创新方法论的科学探索。目前, 常用的创新方法包括: 头脑风暴法、TOC 法、QFD 法、AD 法和 TRIZ 法等, 其中, TRIZ 是创新设计理论与方法中的佼佼者。

### 4.1 TRIZ 理论

TRIZ 是由俄文转换为拉丁文 “Teoriya Resheniya Izobreatatelskikh Zadatch” 的词头缩写, 其英文全称是 “Theory of Inventive Problem Solving”, 涵义是 “发明问题解决理论”。

TRIZ 理论方法的相关研究始于 1946 年, 以 ALTSHULLER 为首的前苏联研究团队分析了数千万项专利, 综合多学科知识, 提出创新问题的一系列可遵循的原理和法则<sup>[49]</sup>。随后, 经过几十年的发展, TRIZ 的研究与实践在美国和西欧迅速发展, TRIZ 理论和方法得到了不断完善和充实, 形成了如技术系统进化法则、40 个创新原理、冲突矩阵等九大经典理论体系, 其应用也遍及诸多领域<sup>[50]</sup>。

TRIZ 理论认为实现发明创新的基本原理是客观存在的。任何领域的产品改进、技术创新和生物系统一样, 都存在产生、生长、成熟的过程, 存在着一般规律。人们如果掌握这些原理和规律, 就可以能动地进行设计和创新, 其结果具有预测性和可控性。

40 条创新原理是 TRIZ 理论中重要的创新工具, 具有普遍性, 这些原理已被成功地应用于各个设计领域, 不断地激发着人们的创新思维。

### 4.2 TRIZ 理论与表面织构

表面织构的研究进程表明, 表面织构的发展符合 TRIZ 理论, 以下通过几个具体事例说明部分 TRIZ 创新原理在表面织构研究过程中的体现。

(1) 不对称原理和组合原理。不对称原理是指用非对称性代替对称性; 组合原理是指对已有系统进行组合, 以产生新的功能。

早期织构设计的特点是每个微织构单元的几何特征相同, 单元均匀地排布在接触表面。2005 年, ETSION 将部分织构引入到机械动密封及活塞环表面。所谓部分织构就是在接触表面的一侧设计加工表面织构, 而另一侧则保持光滑的表面。从微观的角度考虑, 每个微凹坑可以产生局部的流体动压效应; 从宏观的角度看, 加工有微凹坑一侧的整体平

均高度低于光滑的一侧,相当于与光滑的一侧组成了台阶轴承。所以,形成了局部流体动压和整体流体动压的累积效应,如图 3 所示。流体动压效果获得显著增加,在提高承载能力方面优于织构单元均匀分布的“个体效应”<sup>[11]</sup>。

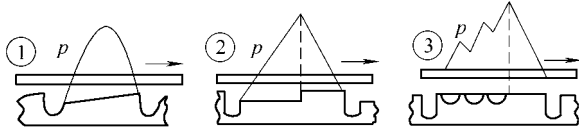


图 3 部分织构的累积效应原理图

对于水润滑下的碳化硅陶瓷轴承,一方面,试验表明,直径 350  $\mu\text{m}$  左右的较大的凹坑可以形成良好的流体动压效应。另一方面,水润滑陶瓷轴承的关键是陶瓷与水在磨合过程中可以产生摩擦化学反应,从而可以提高表面的光洁度,产生具有高粘度的摩擦化学产物,促进流体润滑,避免机械磨损。大量的小尺度凹坑可以均匀地为摩擦接触面供水,促进以表面摩擦化学反应为主的磨合过程的进行。所以,如图 4 所示,混合有较大凹坑和较小凹坑的混合织构表现出高于单一大或小单元织构表面的承载力<sup>[51]</sup>。

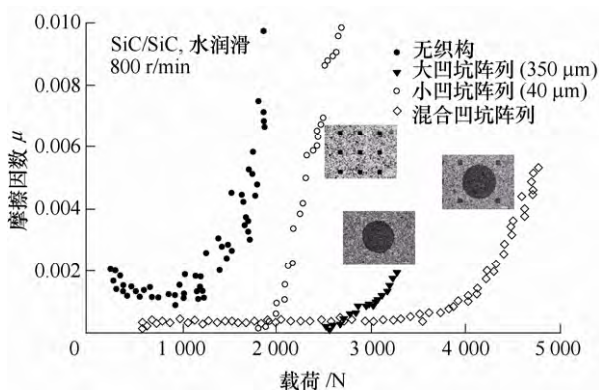


图 4 碳化硅表面单一及混合织构承载力对比

近年来,如图 5 所示,混合有传统珩磨条纹和激光加工凹坑的织构形式也出现在发动机缸套的表面处理上,用于进一步减少发动机的摩擦和磨损<sup>[52]</sup>。

将表面织构与固体薄膜同时加工在摩擦副表面时,其效应不仅来源于二者作用的叠加,而且往往会得益于表面织构与固体薄膜之间的协同耦合作用<sup>[53]</sup>。DING 等<sup>[54]</sup>研究了织构化非晶碳(a-C)膜与 AISI-52100 钢球配副时的往复滑动摩擦学性能,结果表明,薄膜表面微凸起和多孔结构使真实接触面积减小,从而降低粘着,并且摩擦过程中接触表面间形成富含纳米石墨的软润滑膜,因此使摩擦因数与未织构化薄膜相比明显下降。PIMENTEL 等<sup>[55]</sup>

研究了沟槽间距对 W-S-C-Cr 薄膜与 100Cr6 钢球配副时的摩擦学性能,结果表明,较大的沟槽间距有利于 WS<sub>2</sub> 的形成,其摩擦因数低于无织构薄膜。

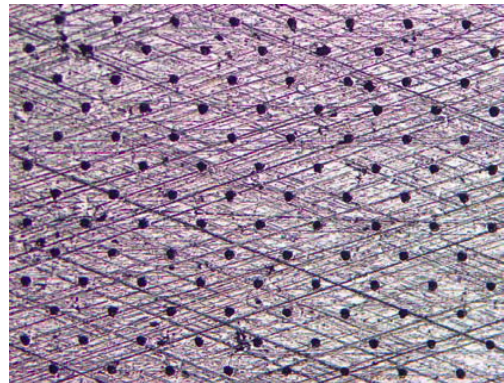


图 5 珩磨条纹与凹坑(40  $\mu\text{m}$ )阵列的混合

除此之外,表面织构与固体润滑剂的组合可以保持长时间的低摩擦<sup>[56-59]</sup>,这个结果为高温条件下表面织构的使用提供了可能。表面织构和离子液体的组合可以增加薄膜的耐磨性并减少摩擦<sup>[60]</sup>。

(2) 预加反作用原理和预补偿原理。预加反作用原理是指针对可能出现的问题,预先施加某种反作用,控制或防止问题的出现,也称为预防原理;预补偿是指对将要发生的危险,预先做好防范措施,补偿物体相对较低的可靠性,以防止或降低危险的发生。

显然,当仅仅考虑表面织构的流体动压效应、容纳磨屑效应、以及储存润滑油等效应时,似乎任何形式的表面织构都可以起到降低磨损、减小摩擦的作用。但实际试验过程中却存在大量与期望相反,即,增加摩擦和磨损的事例。所以,在实际过程中,对表面织构可能带来的负面问题给予重视,采取措施消除或降低其影响就变得尤为重要。

在表面加工织构后,除表面粗糙度增加之外,无论是凹坑还是沟槽,必然在表面引入大量的边缘,而这些边缘不可避免地对摩擦副的接触特性带来影响,特别是当表面存在硬质薄膜的时候<sup>[61]</sup>。

图 6 显示出摩擦副表面接触且相对滑动时,沟槽边缘的应力分布。可以看出,在相同的载荷下,当沟槽垂直于滑动方向时,其边缘的应力值要远高于沟槽平行于滑动方向时的应力值<sup>[42]</sup>。所以,如果仅仅是为了摩擦副表面供油的目的,应尽量将沟槽设计成平行于滑动的方向。

当摩擦副由软/硬材料配对构成时,就存在到底在哪个面上设计加工织构为好的问题。不锈钢与超高分子量聚乙烯是人工关节常用的配副材料。图 7 显示出当相同的凹坑加工在不锈钢表面和超高分子量聚乙烯表面时的应力分布对比<sup>[62]</sup>。可以看出,将

凹坑加工在较软材料的表面可以有效地降低应力集中。

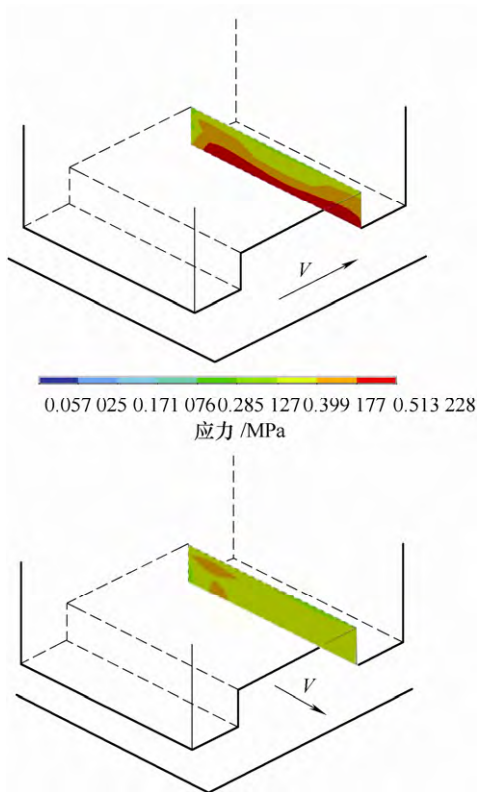


图 6 不同滑动方向时沟槽边缘的应力分布

的，摩擦副表面需要保持较大的承载面积，织构的设计一般以凹坑或沟槽为主，以便存储润滑剂、产生流体动压效果。

与此相反，如图 8 所示，与凹坑或沟槽相反的凸起型织构近年来也出现在研究之中<sup>[63]</sup>。

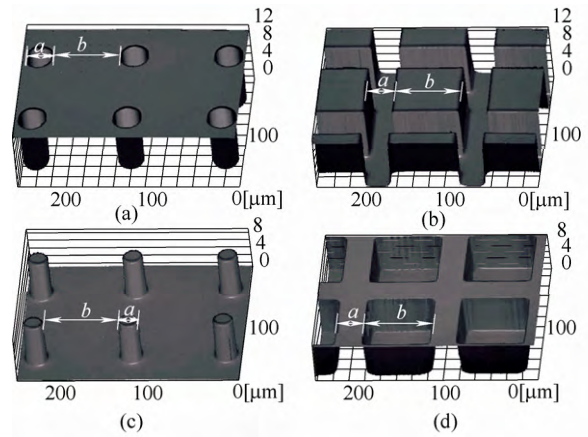


图 8 凹、凸表面织构的三维形貌及尺寸(μm)

采用激光加工凹坑时，由于激光的热冲击效应，在凹坑的周边经常会产生隆起。这通常被认为是激光加工的缺点，需要通过后续的抛光去除隆起的边缘。但对于硬盘磁头和记录盘片而言，磁头与盘片之间的表面力作用显著，会导致粘着故障，严重影响磁头的工作可靠性。采用激光加工，产生具有隆起边缘的“水库”形表面形貌，如图 9 所示，可以有效减小接触面积，减小表面力，避免粘着故障的发生<sup>[34]</sup>。

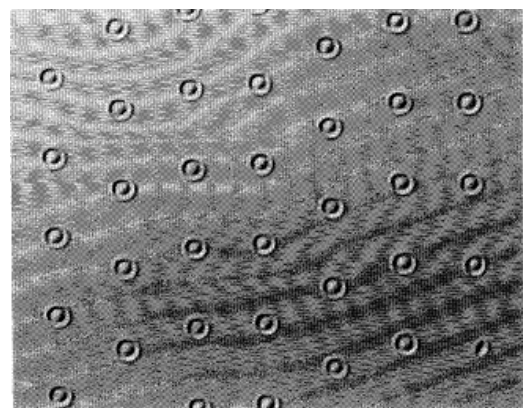
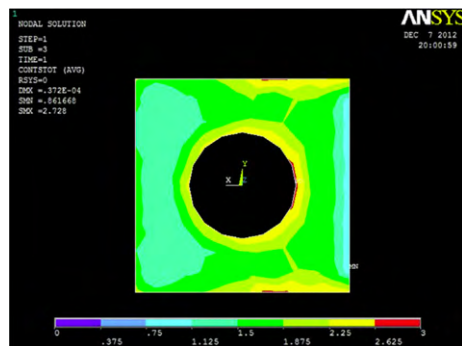
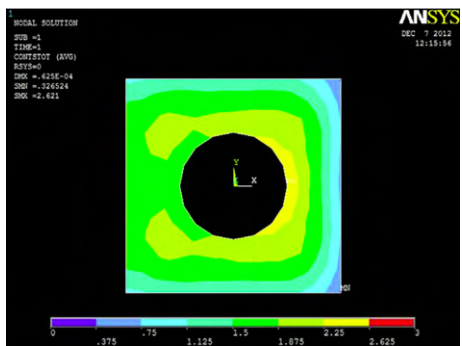


图 9 硬盘磁头起飞区的激光加工形貌



(a) 加工在钢表面



(b) 加工在超高分子量聚乙烯表面

图 7 凹坑边缘的应力分布

(3) 反向原理。反向原理是指施加一种相反作用，上下颠倒或内外翻转，以实现不同的功能。大部分情况下，摩擦副的设计通常以减摩为目的

树蛙可以附着在湿滑的树叶上栖息活动，也能沿着光滑的树干爬上树枝；自然环境下，蝾螈在水流中爬登岩石时，其行动灵活自如，实验室测试中，蝾螈可以爬上垂直的玻璃<sup>[4]</sup>。这些特性均得益于其脚掌的凸起型微纳结构，如图 10 所示。

从树蛙、蝾螈的脚掌结构获取灵感，设计制作出的六边形凸起织构在液体介质中具有显著的增加摩擦的效应，其摩擦力不随滑动速度的增加而减小，

而且, 摩擦力随着微凸起所占面积率  $r$  的增加而增加<sup>[4]</sup>, 如图 11 所示。多边形的凸起与圆形凸起相比可以达到更高的面积率, 这可能是为什么自然界很多脚掌具有多边形凸起结构的一个解释。对凸起结构设计原理的理解为水下爬壁机器人、以及胶囊式内窥镜机器人的脚掌设计提供了解决方案。

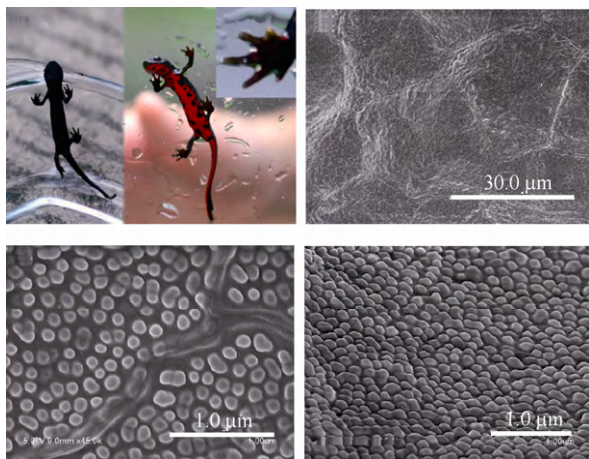


图 10 蜥脚掌的微纳结构

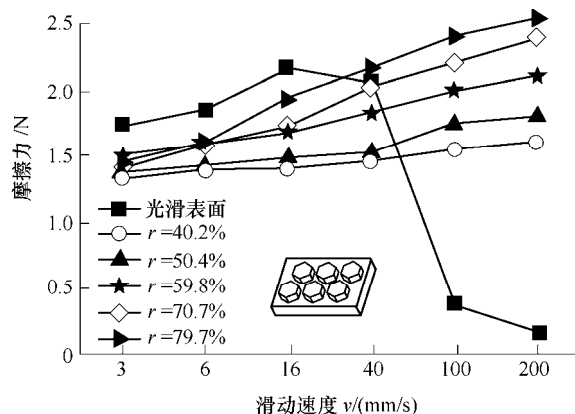


图 11 凸起六边形织构的增摩特性

## 5 表面织构技术创新发展之展望

表面织构发展的历程表明其发展符合 TRIZ 发明理论。同样, 根据 TRIZ 理论, 结合当前的研究现状, 可以通过进一步理解和掌握 TRIZ 技术系统进化法则、TRIZ 创新原理, 指导表面织构创新设计的开展, 并对其技术发展趋势进行预测。

协调性进化法则是 TRIZ 理论的八大进化法则之一。该法则指出, 为了实现所需的功能, 技术系统的各子系统, 各参数之间要相互协调, 实现动态的调整和配合。

高分子聚合物材料由于其轻量、耐磨等优异特性, 在机械行业中得到了越来越广泛的应用, 如超高分子量聚乙烯用于人工关节, 尼龙用于航天液体

输送泵的齿轮, 橡胶用于各种密封件等。由于高分子聚合物材料特殊的表面物理和化学性能, 与金属材料相比, 高分子聚合物材料的表面织构设计往往需要协调更多的影响因素。例如, 由于聚合物材料的表面能要远低于金属材料, 根据液固界面实际表面张力的状态, 液体在聚合物材料表面会存在浸润与非浸润等不同的状态, 这个状态影响了表面织构存储液体以及输送液体的特性, 在表面织构优化设计过程中, 需要与形状、尺度、分布等参数协调考虑<sup>[64-65]</sup>。

由于高分子聚合物的弹性模量要比金属材料低一个数量级以上, 表面在接触过程中的变形是需要考虑的另一个重要因素。一方面, 变形是产生某些功能的必要条件。如, 动态条件下, 唇形密封表面的粗糙峰受到剪切力发生形变, 在整个圆周方向变形为叶片形状, 产生了“泵吸”效应, 使密封液体从空气侧泵吸至液体侧, 阻止了泄漏。通过优化微凸起的形状和排布, 可以数倍地提高阻止泄漏的泵吸效果<sup>[66-67]</sup>。另一方面, 表面的流体动压分布和表面的弹性变形是一个相互耦合的关系。目前, 对表面织构流体动压效应的模拟大多是采用刚性表面的假设, 即, 在给定润滑膜厚度的条件下, 计算流体动压分布, 评价表面织构对承载能力的影响<sup>[68]</sup>。但研究表明, 即使是金属材料, 当润滑膜厚度降到 200 nm 左右时, 表面的弹性变形也会显著影响阶梯轴承的流体动压分布<sup>[69]</sup>。对于低弹性模量的高分子材料, 在流体动压力的作用下, 表面的宏观变形和织构局部的微观变形更加显著。所以, 需要建立耦合流体动压和表面弹性变形的理论模型, 细致地解析从加载, 流体动压效果与表面弹性变形相耦合, 最终形成稳定流体膜的动态过程。

曲面化原理是指应用曲面或曲线属性代替线性属性; 动态化原理是指通过调节设计方案, 使其在工作的各个阶段都达到最佳效果。

45°交叉珩磨条纹的加工工艺已在发动机缸套表面使用了半个多世纪。对条纹状织构润滑机理的理解近年来得到深化。如前所述, 垂直于滑动方向的沟槽有利于形成流体动压效应, 而平行于滑动方向的沟槽则有利于为表面供油, 减小应力集中。发动机活塞/活塞环相对于缸套做往复运动, 通过中点时运动速度最高, 而通过两端点时换向, 最低速度为零。从织构设计的角度, 在缸套的中部, 即高速区, 应考虑提升流体动压性能, 形成全膜润滑; 而在缸套的两端, 应重视织构的储油和供油能力, 提高活塞/活塞环与缸套的边界润滑特性。如图 12 所示, 当前的研究中, 已出现两端珩磨条纹的倾角大,

中间倾角小的三段组合型表面织构(图 12a)<sup>[52]</sup>,与此同时,在缸套不同位置设计不同参数凹坑型结构的组合也在研究之中(图 12b)<sup>[70]</sup>。这种考虑活塞/活塞环在缸套不同位置的动态运动特征、不同润滑模式的设计有利于全面提升活塞/缸套摩擦副的整体性能。根据这个思路,考虑活塞运动时速度和载荷变化的连续性,可否以曲线化的设计(图 12c)代替分段珩磨条纹的组合?

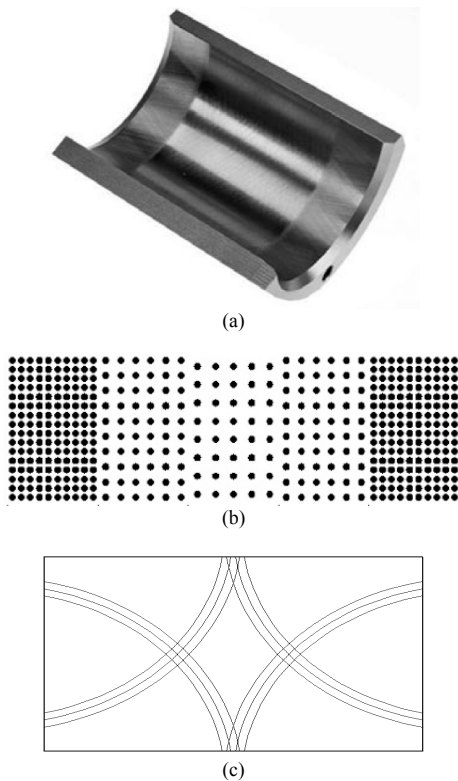


图 12 缸套表面的新型结构

嵌套设计是指将一个物体放入另一物体内部,或让一个对象通过另一个对象的空腔而实现嵌套,即彼此吻合、组合、配合等,以实现其功能的扩展。

嵌套的现象广泛存在于自然界。如荷叶表面微米尺度的乳突上分布着纳米尺度的凸起结构,从而使水滴和污染物与荷叶表面的实际接触面积变得很小;壁虎脚掌刚毛的顶部还有大量更加纤细的绒毛结构从而能进一步增加与攀爬表面的接触面积。

随着加工方法和加工工艺的进步,精确控制表面织构的尺度和基本形状已被证明是提高表面织构效能的一个有效手段<sup>[40, 71-72]</sup>,除此之外,人们对表面织构细节结构的掌控能力正得到不断提高。理论和试验表明,通过单个微凹坑内部结构的改变,如增加斜面、增加台阶等,如图 13 所示,可以调控微凹坑产生的流体动压效果<sup>[73-74]</sup>。

对于以增摩为目的的凸起型织构,如图 14 所示,以不同尺度微小结构的嵌套,进一步提升界面

的摩擦学特性以及粘附性能的研究正成为一个热点<sup>[8, 75]</sup>。

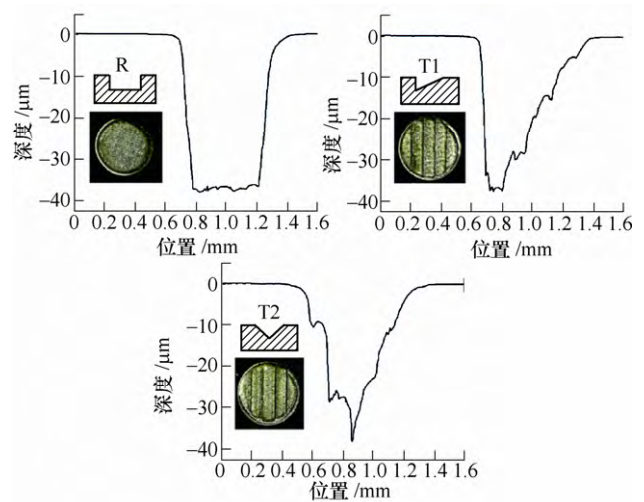


图 13 几种凹坑的内部结构

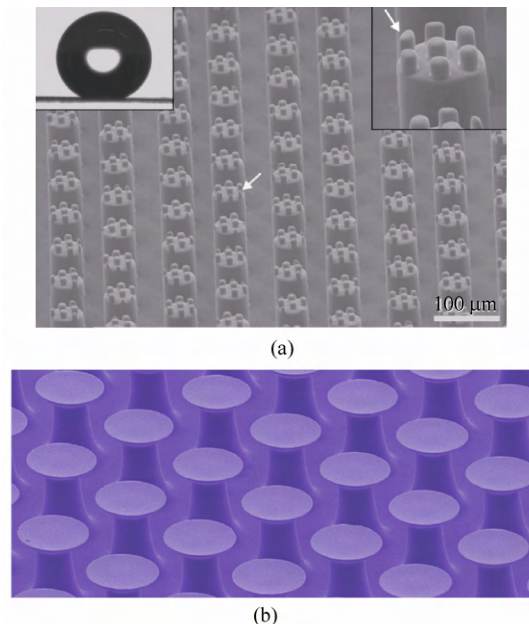


图 14 嵌套型凸起结构

维数变化原理是指将设计从一维拓展至多维。该原理不仅涉及几何学,还包括新的特性、参数、及场的增加等。

图 15 显示了将磁性材料和磁场引入表面织构从而形成的一种“磁性表面织构”。首先在摩擦副表面加工微米尺度的凹坑阵列,然后将永磁材料 CoNiMnP 电沉积到这些凹坑之中。因此,充磁后,表面既具有传统的几何表面织构,同时,永磁体阵列形成了周期性分布的磁场,即磁性织构。当表面采用磁性液体润滑时,可以通过几何织构产生流体动压效应,而周期性分布的磁场织构可以将磁性液体定位在摩擦副表面。其结果是,磁性液体膜可以



在滑动速度非常低的条件下产生承载能力<sup>[76-77]</sup>。

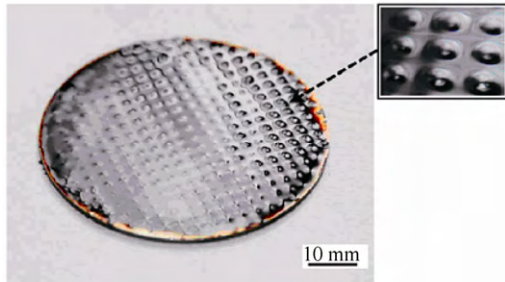


图 15 磁性织构

撒哈拉沙漠中的沙鱼经常在沙中潜行。经试验测试,其皮肤表面具有的抗沙冲蚀的能力优于钢和玻璃表面。这种优异的耐冲蚀性能可能与沙鱼皮肤表面的织构特征、以及织构表面的电荷效应有关。据推测,织构表面的电荷与运动的砂砾可能产生了相斥的作用,从而避免或减缓了砂砾对表面的冲蚀。自然界永远是人类学习的楷模,从沙鱼的皮肤结构得到启示,能否在表面织构的设计中增加电场的维度,进一步实现界面摩擦学和力学性能的调控,这或许是可以挑战的另一个课题。

## 6 结论

创新方法论来源于对人类创新历程的归纳、分析和总结,将创新方法论应用到设计过程又可以起到激发创新思维,加速创新进程的作用。本文列举了 TRIZ 理论的一些创新原理在表面织构设计中的体现,并结合 TRIZ 理论对表面织构的发展进行了展望。需要说明的是,本文仅仅涉及了 TRIZ 理论的一小部分。其实,TRIZ 是一个理论体系,包含八大技术系统进化法则、40 个创新原理、冲突矩阵等九大经典理论。在表面织构研究过程中合理地使用这些法则,如微观级进化法则,提高理想度法则(提高有用效应与有害效应的比值),动态进化法则(柔性化,可控性化)等,将进一步促进表面织构创新设计及应用的发展。

### 参 考 文 献

- [1] ETSION I. State of the art in laser surface texturing[J]. Journal of Tribology Transactions of the ASME, 2005, 127: 248-253.
- [2] YU Haiwu, HUANG Wei, WANG Xiaolei. Dimple patterns design for different circumstances [J]. Lubrication Science, 2013, 25: 67-78.
- [3] TANG Wei, ZHOU Yuanhai, ZHU Hua, et al. The effect of surface texturing on reducing the friction and wear of

steel under lubricated sliding contact[J]. Applied Surface Science, 2013, 273: 199-204.

- [4] HUANG Wei, WANG Xiaolei. Biomimetic design of elastomer surface pattern for friction control under wet conditions[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2013, 8(4): 046001.
- [5] 汪久根, 陈仕洪. Koch 雪花表面织构设计与高铁空气摩擦噪声分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(7): 78-83. WANG Jiugen, CHEN Shihong. Bionic design of Koch snowflake surface texture and its effects on air frictional noise of high speed train[J]. Journal of Mechanical Engineering, 50(7): 78-83.
- [6] MO J L, WANG Z G, CHEN G X, et al. The effect of groove-textured surface on friction and wear and friction-induced vibration and noise[J]. Wear, 2013, 301(1-2): 671-681.
- [7] 王东伟, 莫继良, 王正国, 等. 沟槽结构化表面影响摩擦振动噪声机理[J]. 机械工程学报, 2013, 49(23): 112-116. WANG Dongwei, MO Jiliang, WANG Zhengguo, et al. Mechanism of the effect of groove-textured surface on the friction vibration and noise[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(23): 112-116.
- [8] WANG Yue, HU Hong, SHAO Jinyou, et al. Fabrication of well-defined mushroom-shaped structures for biomimetic dry adhesive by conventional photolithography and molding[J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2014, 6(4): 2213-2220.
- [9] DAI Qingwen, HUANG Wei, WANG Xiaolei. Surface roughness and orientation effects on the thermo-capillary migration of a droplet of paraffin oil[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 57: 200-206.
- [10] BRUZZONE A A G, COSTA H L, LONARDO P M, et al. Advances in engineered surfaces for functional performance[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2008, 57: 750-769.
- [11] EVANS C J, BRYAN J B. "Structured", "Textured" or "Engineered" surfaces[J]. Annals of the CIRP, 1999, 48(2): 541-556.
- [12] WILLIS E. Surface finish in relation to cylinder liners[J]. Wear, 1986, 109(1-4): 351-366.
- [13] ASTRENE T T. 20 minutes with Dr. Izhak Etsion[J]. Tribology & Lubrication Technology, 2010, 10: 17-20.
- [14] 高橋秀和. メカニカルシールの市場と動向[J]. トライボロジー, 1998(10): 34-37. TAKAHASHI H. Present state and future trend in mechanical seal technology[J]. Journal of Japanese Society of Tribologists, 1998(10): 34-37.

- [15] TOMANIK E. Friction and wear bench tests of different engine liner surface finishes[J]. Tribology International, 2008, 41 : 1032-1038.
- [16] COBLAS D G ,FATU A ,MAOUI A ,et al. Manufacturing textured surfaces :State of art and recent developments[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers , Part J : Journal of Engineering Tribology , 2014 , 229(1) : 3-29.
- [17] PETTERSSON U , JACOBSON S. Tribological texturing of steel surfaces with a novel diamond embossing tool technique[J]. Tribology International ,2006 ,39 :695-700.
- [18] WAKUDA M , YAMAUCHI Y , KANZAKI S. Effect of workpiece properties on machinability in abrasive jet machining of ceramic materials[J]. Precision Engineering , 2002 , 26(2) : 193-198.
- [19] DENKENA B , KÖHLER J , KÄSTNER J , et al. Efficient machining of microdimples for friction reduction[J]. Journal of Micro and Nano-Manufacturing , 2013 , 1(1) : 011003.
- [20] WANG Xiaolei , KATO K , ADACHI K , et al. Loads carrying capacity map for the surface texture design of SiC thrust bearing sliding in water[J]. Tribology International , 2003 , 36(3) : 189-197.
- [21] 刘莹,陈大融,杨文言. 轧辊表面微凸体形貌激光毛化技术的试验研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(7) : 107-110.  
LIU Ying ,CHEN Darong ,YANG Wenyan. Experimental investigation of laser-textured on roller with micro-convex topography[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering , 2003 , 39(7) : 107-110.
- [22] 符永宏,叶云霞,张永康,等. 用于显著改善摩擦副润滑状态的激光晰磨技术[J]. 机械工程学报, 2002, 38(8) : 115-117.  
FU Yonghong , YE Yunxia , ZHANG Yongkang , et al. Technology of laser honing applied in distinctively improving the lubrication of frictional units[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering ,2002 ,38(8) :115-117.
- [23] ZHOU Y Q ,SHAO T M ,YIN L. A method of micro laser surface texturing based on optical fiber focusing[J]. Laser Physics , 2009 , 19(5) : 1061-1066.
- [24] 刘一静,袁明超,王晓雷. 表面机构对发动机活塞/缸套摩擦性能的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(6) : 872-877.  
LIU Yijing ,YUAN Mingchao ,WANG Xiaolei. Influence of the surface texture on the tribological performances of piston skirt/ liner[J]. Journal of China University of Mining & Technology , 2009 , 38(6) : 872-877.
- [25] HAN J ,FANG L ,SUN J ,et al. Hydrodynamic lubrication of microdimple textured surface using three-dimensional CFD[J]. Tribology Transactions , 2010 , 53(6) : 860-870.
- [26] 张金煜,孟永钢. 推力滑动轴承表面织构的优化设计[J]. 机械工程学报, 2012, 48(17) : 91-99.  
ZHANG Jinyu , MENG Yonggang. Optimal design of surface texture in parallel thrust bearings[J]. Journal of Mechanical Engineering , 2012 , 48(17) : 91-99.
- [27] 尹必峰,卢振涛,刘胜吉,等. 缸套表面织构润滑性能理论及试验研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(21) : 91-96.  
YIN Bifeng , LU Zhentao , LIU Shengji. Theoretical and experimental research on lubrication performance of laser surface texturing cylinder liner[J]. Journal of Mechanical Engineering , 2012 , 48(21) : 91-96.
- [28] 马晨波,华朱,孙见君. 基于 CFD 分析的表面织构润滑计算适用方程研究[J]. 机械工程学报,2011,47(15) : 95-106.  
MA Chenbo , HUA Zhu , SUN Jianjun. Applicable equation study of lubrication calculation of surface texture based on CFD analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering , 2011 , 47(15) : 95-106.
- [29] SUH N P , MOSLEH M , HOWARD P S. Control of friction[J]. Wear , 1994 , 175(1-2) : 151-158.
- [30] LO S W , HORNG T C. Lubricant permeation from micro oil pits under intimate contact condition[J]. Journal of Tribology-Transactions of the ASME , 1999 , 121(4) : 633-638.
- [31] WANG Xiaolei , KATO K. Improving the anti-seizure ability of SiC seal in water with RIE texturing[J]. Tribology Letters , 2003 , 14(4) : 275-280.
- [32] 李兵,刘焜,王静,等. 线接触滑—滚条件下微凹坑表面摩擦特性[J]. 机械工程学报, 2011, 47(21) : 91-96.  
LI Bing , LIU Kun , WANG Jing , et al. Micro cavity's tribological property under line contact and sliding-rolling conditions[J]. Journal of Mechanical Engineering , 2011 , 47(21) : 91-96.
- [33] 李媛,刘小君,张彦,等. 面接触条件下织构表面摩擦特性研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(19) : 109-115.  
LI Yuan , LIU Xiaojun , ZHANG Yan , et al. Frictional properties of textured surfaces under plane contact[J]. Journal of Mechanical Engineering , 2012 , 48(19) : 109-115.
- [34] BAUMGART P , KRAJNOVICH D J , NGUYEN T A , et al. A new laser texturing technique for high-performance magnetic disk drives[J]. IEEE Transactions on Magnetics , 1995 , 31(6) : 2946-2951.
- [35] ZHOU L , KATO K , UMEHARA N , et al. Friction and wear properties of hard coating materials on textured hard

- disk sliders[J]. *Wear*, 2000, 243(1-2) : 133-139.
- [36] TONDER K. Hydrodynamic effects of tailored inlet roughnesses .Extended theory[J]. *Tribology International*, 2004, 37(2) : 137-142.
- [37] FOWELL M, OLVER A V, GOSMAN A D, et al. Entrainment and inlet suction : Two mechanisms of hydrodynamic lubrication in textured bearings[J]. *Journal of Tribology*, 2007, 129 : 336-347.
- [38] ZHANG J, MENG Y. Direct observation of cavitation phenomenon and hydrodynamic lubrication analysis of textured surfaces[J]. *Tribology Letters*, 2012, 46(2) : 147-158.
- [39] NAKANO M, KORENAGA A, KORENAGA A, et al. Applying micro-texture to cast iron surfaces to reduce the friction coefficient under lubricated conditions[J]. *Tribology Letters*, 2007, 28 : 131-137.
- [40] 白少先, 柏林清, 孟祥铠, 等. 倾斜微孔密封端面气体润滑动压效应试验研究[J]. *中国机械工程*, 2013, 24(6) : 831-835.  
BAI Shaoxian, BAI Linqing, MENG Xiangkai, et al. Experimental research on hydrodynamic effect of inclined micro-pored gas face seals[J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(6) : 831-835.
- [41] MENG X, BAI S, PENG X. Lubrication film flow control by oriented dimples for liquid lubricated mechanical seals[J]. *Tribology International*, 2014, 77 : 132-141.
- [42] YUAN Sihuan, HUANG Wei, WANG Xiaolei. Orientation effects of micro-grooves on sliding surfaces[J]. *Tribology International*, 2011, 44(9) : 1047-1054.
- [43] WANG Xiaolei, WANG Jingqiu, ZHANG Bo, et al. Design principles for the area density of dimple patterns[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J : Journal of Engineering Tribology*, 2015, 229(4) : 538-546.
- [44] MA C, BAI S, MENG Y, et al. Hydrophilic control of laser micro-square-convexes SiC surfaces[J]. *Materials Letters*, 2013, 109 : 316-319.
- [45] 戴振东, 佟金, 任露泉. 仿生摩擦学研究及发展[J]. *科学通报*, 2006, 51(20) : 2353-2359.  
DAI Zhendong, TONG Jin, REN Luquan. Researches and developments of biomimetics in tribology[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(20) : 2353-2359.
- [46] CLARKE I C. Human articular surface contours and related surface depression frequency studies[J]. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 1971, 30(15) : 15-23.
- [47] BECHERT D W, BRUSE M, HAGE W, et al. Fluid mechanics of biological surfaces and their technological application[J]. *Naturwissenschaften*, 2000, 87 : 157-171.
- [48] FEDERLE W, BARNES W, BAUMGARTNER W, et al. Wet but not slippery : Boundary friction in tree frog adhesive toe pads[J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2006, 3(10) : 689-697.
- [49] ALTSHULLER G S. Creativity as an exact science : The theory of the solution of inventive problems[M]. New York : Gordon and Breach Science Publishers, 1984.
- [50] 沈萌红. TRIZ 理论及创新实践[M]. 北京 : 机械工业出版社, 2012.  
SHEN Menghong. TRIZ theory and innovative practice[M]. Beijing : China Machine Press, 2012.
- [51] WANG Xiaolei, ADACHI K, OTSUKA K, et al. Optimization of the surface texture for silicon carbide sliding in water[J]. *Applied Surface Science*, 2006, 253(3) : 1282-1286.
- [52] SCHMID J. Friction optimization of cylinder surfaces from the perspective of production technology[J]. *MTZ*, 2010, 71 : 18-23.
- [53] DING Q, WANG L, WANG Y, et al. Improved tribological behavior of DLC films under water lubrication by surface texturing[J]. *Tribology Letters*, 2011, 41(2) : 439-449.
- [54] DING Q, WANG L, HU L, et al. The pairing-dependent effects of laser surface texturing on micro tribological behavior of amorphous carbon film[J]. *Wear*, 2012, 274-275 : 43-49.
- [55] PIMENTEL J V, POLCAR T, CAVALEIRO A. Structural, mechanical and tribological properties of Mo-S-C solid lubricant coating[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2011, 205(10) : 3274-3279.
- [56] RAPOPORT L, MOSHKOVICH A, PERFILYEV V, et al. Friction and wear of MoS<sub>2</sub> films on laser textured steel surfaces[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2008, 202(14) : 3332-3340.
- [57] LI J, XIONG D, ZHANG Y, et al. Friction and wear properties of MoS<sub>2</sub>-overcoated laser surface-textured silver-containing nickel-based alloy at elevated temperatures[J]. *Tribology Letters*, 2011, 43(2) : 221-228.
- [58] LI J, XIONG D, WU H, et al. Tribological properties of laser surface texturing and molybdenizing duplex-treated stainless steel at elevated temperatures[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 228 : S219-S223.
- [59] VOEYODIN A A, ZABINSKI J S. Laser surface texturing for adaptive solid lubrication[J]. *Wear*, 2006, 261(11-12) : 1285-1292.
- [60] 蒲吉斌, 万善宏, 胡天昌, 等. 离子液体/织构化类金刚石碳复合润滑薄膜的构筑及其摩擦学性能的研究[J].

- 摩擦学学报, 2012, 32(5): 472-479.
- PU Jibin, WAN Shanhong, HU Tianchang, et al. Fabrication and tribological study of ionic liquid/texturing diamond-like carbon composite lubrication films[J]. Tribology, 2012, 32(5): 472-479.
- [61] RAMACHANDAR S, OVAERT T C. Effect of coating geometry on contact stresses in two-dimensional discontinuous coatings[J]. Journal of Tribology, 2000, 122: 665-671.
- [62] ZHANG Bo, HUANG Wei, WANG Jingqiu, et al. Comparison of the effects of surface texture on the surfaces of steel and UHMWPE[J]. Tribology International, 2013, 65: 138-145.
- [63] NAKANO M, MIYAKE K, KORENAGA A, et al. Tribological properties of patterned NiFe-covered Si surfaces[J]. Tribology Letters, 2009, 35: 133-139.
- [64] 姜亮, 马国亮, 王晓雷. PDMS 表面织构润滑特性的研究[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(3): 262-267.
- JIANG Liang, MA Guoliang, WANG Xiaolei. Lubrication properties of surface texture on PDMS[J]. Tribology, 2010, 30(3): 262-267.
- [65] HUANG Wei, JIANG Liang, ZHOU Congxi, et al. The lubricant retaining effect of micro-dimples on the sliding surface of PDMS[J]. Tribology International, 2012, 52: 87-93.
- [66] 董慧芳, 刘焜, 王伟, 等. 激光加工微凹坑轴表面对唇形密封泵吸及摩擦特性的影响[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(2): 126-132.
- DONG Huifang, LIU Kun, WANG Wei, et al. Laser textured shaft surfaces on the pumping action and frictional properties of lip seals[J]. Tribology, 2012, 32(2): 126-132.
- [67] HADINATA P, STEPHENS L. Soft elastohydrodynamic analysis of radial lip seals with deterministic microasperities on the shaft[J]. Journal of Tribology, 2007, 129: 851-859.
- [68] 于海武, 邓海顺, 黄巍, 等. 微凹坑相对位置变化对表面减摩性能的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(6): 943-948.
- YU Haiwu, DENG Haishun, HUANG Wei, et al. Effects of micro-dimple arrangements on tribological performance of sliding surfaces[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(6): 943-948.
- [69] YAGI K, SUGIMURA J. Elastohydrodynamic simulation of Rayleigh step bearings in thin film hydrodynamic lubrication[J]. Tribology International, 2013, 64: 204-214.
- [70] ZHOU Y, ZHU H, TANG W, et al. Development of the theoretical model for the optimal design of surface texturing on cylinder liner[J]. Tribology International, 2012, 52: 1-6.
- [71] YU Haiwu, WANG Xiaolei, ZHOU Fei. Geometric shape effects of surface texture on the generation of hydrodynamic pressure between conformal contacting surfaces[J]. Tribology Letters, 2010, 37(2): 123-130.
- [72] JI J, FU Y, BI Q. The influence of partially textured slider with orientation ellipse dimples on the behavior of hydrodynamic lubrication[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2014, 66(2): 161-167.
- [73] SHEN C, KHONSARI M M. Effect of dimple's internal structure on hydrodynamic lubrication[J]. Tribology Letters, 2013, 52(3): 415-430.
- [74] HSU S M, JING Y, HUA D, et al. Friction reduction using discrete surface textures: Principle and design[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 47(33): 335307.
- [75] GREINER C, ARZT E, del CAMPO A. Hierarchical Gecko-like adhesives[J]. Advanced Materials, 2009, 21(4): 479-482.
- [76] SHEN Cong, HUANG Wei, MA Guoliang, et al. A novel surface texture for magnetic fluid lubrication[J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 204(4): 433-439.
- [77] LIAO Sijie, HUANG Wei, WANG Xiaolei. Micro-magnetic field arrayed surface for ferrofluids lubrication[J]. Journal of Tribology, 2012, 134(2): 021701.

作者简介: 王静秋, 女, 1972 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为计算机图形学、摩擦学、工况监测与故障诊断。

E-mail: meejqwang@nuaa.edu.cn

王晓雷(通信作者), 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为表面织构设计、摩擦学。

E-mail: wxl@nuaa.edu.cn