

# 表面织构润滑减摩的国内外研究现状及进展

黄云磊, 钟林, 王国荣, 魏刚, 彭事超

(西南石油大学, 成都 610500)

**摘 要:** 表面织构是源自于自然界生物非光滑表面的微纳米结构, 这些微观结构使得生物在进化过程中呈现出优异的自润滑和抗磨减摩性能。国内外研究也一致表明, 表面织构是改善表界面摩擦学特性的一种有效手段, 可使材料表面实现自润滑效果, 并且能够减少摩擦磨损带来的机械设备提前失效和能源耗损。从表面织构的形态特征及其作用机制出发, 对近年来表面织构在润滑减摩方面的国内外研究现状及进展进行调研分析。讨论了表面织构形状(规则织构、不规则织构等)、织构分布形式(全织构分布、部分织构分布等)、织构几何参数(深度、面积比、深径比等)、工况参数(载荷、速度等)等因素, 对结构化表面润滑减摩性能的影响, 同时总结了表面织构润滑减摩作用机制研究中面临的难题。提出未来应重点开展极端工况、混合润滑状态下多类型复合织构的润滑减摩作用机制, 考虑动态磨损的表面粗糙度与织构协同作用润滑减摩规律和仿生微织构与涂层耦合作用下抗磨性能等方面的研究, 从而进一步推动表面织构在润滑减摩领域的工程应用。

**关键词:** 表面织构; 摩擦; 润滑; 减摩; 表面粗糙度; 涂层

**中图分类号:** TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)12-0217-16

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.12.022

## Research Status and Progress of Surface Texture Lubrication and Friction Reduction

HUANG Yun-lei, ZHONG Lin, WANG Guo-rong, WEI Gang, PENG Shi-chao

(Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**ABSTRACT:** Surface texture is a kind of micro-nano structure derived from the non-smooth surface of natural organisms. These microstructures enable organisms to exhibit excellent self-lubricating, anti-wear and friction reduction properties during the evolution process. The studies at home and abroad have also consistently shown that surface texture is an effective means to improve the tribological performance of the surface, which can realize the self-lubricating effect of the material surface and reduce the premature failure of mechanical equipment and the energy consumption caused by friction and wear. In this paper, from the perspective of the morphological characteristics of surface texture and its mechanism of action, the research status and

收稿日期: 2020-11-29; 修订日期: 2021-06-01

Received: 2020-11-29; Revised: 2021-06-01

**基金项目:** 国家重点研发计划(2018YFC0310201, 2019YFC0312305); 国家自然科学基金面上项目(51775463); 国际合作项目(2019-GH02-00055-HZ); 省级大学生创新创业训练项目(S202010615075)

**Fund:** National Key R&D Program of China (2018YFC0310201, 2019YFC0312305); General Program of the National Natural Science Foundation of China (51775463); International Cooperation Projects (2019-GH02-00055-HZ); College Students' Innovative Entrepreneurial Training Plan Program (S202010615075)

**通讯作者:** 钟林(1985—), 男, 博士, 实验师, 主要研究方向为油气装备的仿生摩擦学。

**Corresponding author:** ZHONG Lin (1985—), Male, Doctor, Technician, Research focus: bionic tribology of oil and gas equipment.

**引文格式:** 黄云磊, 钟林, 王国荣, 等. 表面织构润滑减摩的国内外研究现状及进展[J]. 表面技术, 2021, 50(12): 217-232.

HUANG Yun-lei, ZHONG Lin, WANG Guo-rong, et al. Research status and progress of surface texture lubrication and friction reduction[J]. Surface technology, 2021, 50(12): 217-232.

progress of surface texture in lubrication and friction reduction in recent years were investigated and analyzed. Then, the influences of surface texture shape (including regular texture, irregular texture, etc.), surface texture distribution pattern (including full texture distribution, partial texture distribution, etc.), surface texture geometric parameters (including depth, area ratio, aspect ratio, etc.), working condition parameters (including load, speed, etc.) and other factors on the lubrication and friction reduction performance of the textured surface were discussed in detail. At the same time, the problems and deficiencies in the research of the mechanism of surface texture lubrication and friction reduction were summarized. It is suggested that future research should be focused on the development of multi-type compound texture lubrication and friction reduction mechanism under extreme working conditions and mixed lubrication conditions, the law of lubrication and friction reduction under the synergistic effect of surface roughness and texture considering dynamic wear, and the anti-wear performance under the coupling effect of biomimetic micro-texture and coating as well as other aspects, so as to further promote the engineering application of surface texture in the field of lubrication and friction reduction.

**KEY WORDS:** surface texture; friction; lubrication; friction reduction; surface roughness; coatings

据不完全统计,世界上一切能源的 1/3 都损耗于摩擦磨损,70%以上的设备损坏也是由各种形式的磨损引起的,因此减小接触表面的摩擦磨损,对提高能源的利用率及延长设备的使用寿命具有重要意义<sup>[1]</sup>。近年来,仿生表面织构已被证实能有效提高摩擦副表面的润滑性能,减少摩擦磨损,受到了国内外摩擦学工作者的广泛关注。传统摩擦学认为,两相互接触的表面越光滑,其摩擦学性能越优,但大量研究已证明,表面并非越光滑,其摩擦学性能就越好,具有一定形貌的表面反而表现出更好的摩擦学性能<sup>[2-4]</sup>。HAMILTON 等<sup>[5]</sup>在 1966 年提出的“微小不规则体”即为表面织构的最初表达形式。近半个多世纪以来,表面织构已经在改善刀具耐磨性能<sup>[6]</sup>、改善齿轮泵摩擦副抗磨损性能<sup>[7]</sup>、提升机械密封润滑及密封性能<sup>[8]</sup>等方面取得重大进展。但随着现代工业的发展,机械设备摩擦副的工作环境也在逐渐向深海、高温高压、强腐蚀或氧化等方向发展,面对极端工况下的摩擦学问题,传统

润滑减摩手段已无法很好地满足恶劣环境下相对滑动摩擦副对润滑减摩性能继续提升的迫切要求。

表面织构的设计灵感主要来自于自然界中体表具备几何非光滑形态的生物体,经过自然的进化,形成了一些能够保证自身优越性能的表面微纳米结构特征,使其能够更好地适应周围环境。这些生物体具有耐磨、疏水、减阻、防污等功能<sup>[9]</sup>,为表面织构的研究提供了更多的可能性。在耐磨方面,穿山甲、蜥蜴及蜈蚣等在砂石、土壤中穿梭而不损伤体表,是由于其体表的非光滑形态具有优异的抗磨和抗挤压能力<sup>[10]</sup>,如图 1 所示;在减阻方面,蚯蚓等土壤动物体表呈现多种形态的非光滑几何形态,使它们具有减小土壤滑动阻力的功能,利于在土壤中行动<sup>[11]</sup>。鲨鱼皮肤上生长着许多被称为“皮肤细齿”的微米级沟槽状鳞片,如图 2 所示,这些带凹槽的鳞片可以减少表面涡流的形成,从而减少鲨鱼在水中游动的阻力<sup>[12-13]</sup>。

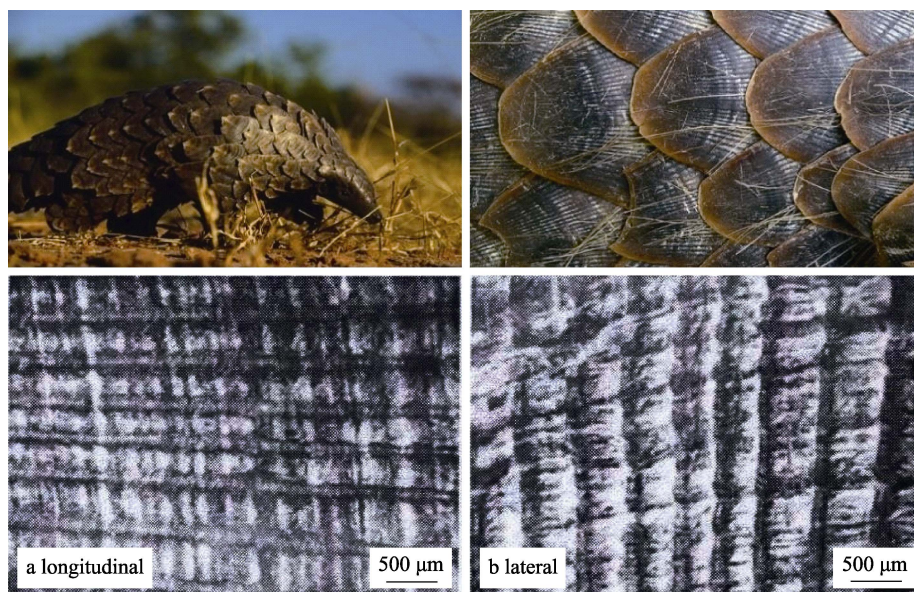
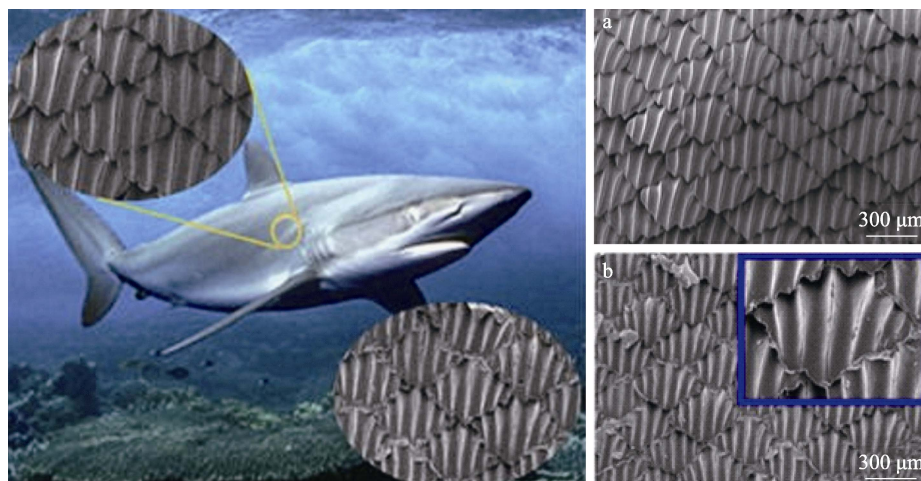


图 1 穿山甲鳞片的表面形貌<sup>[17-18]</sup>

Fig.1 Surface morphology of the scale of the pangolin<sup>[17-18]</sup>

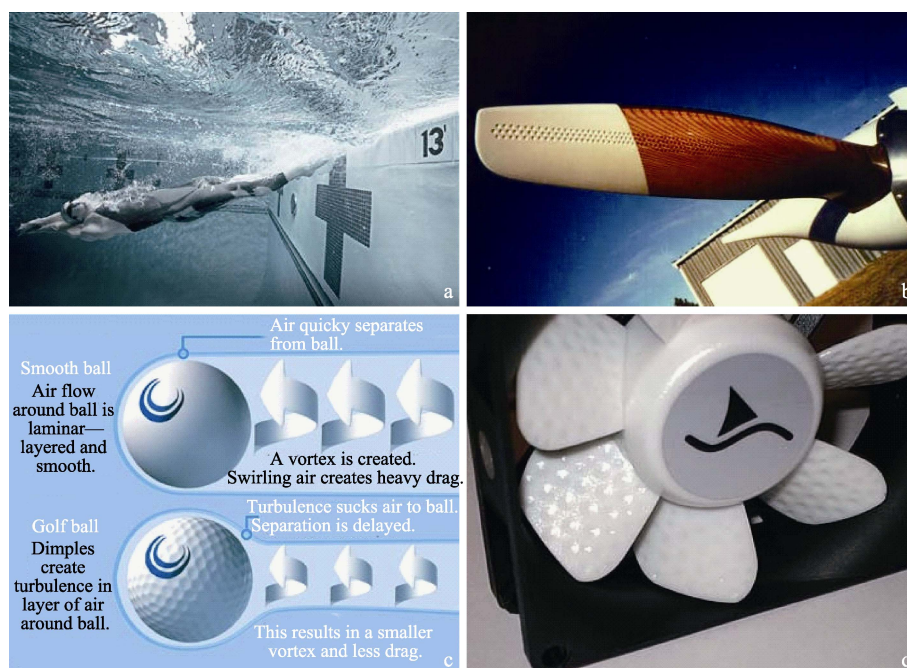


图 2 通过微复制制备的鲨鱼皮表面的 SEM 图像<sup>[13]</sup>Fig.2 SEM images of the shark-skin surface prepared via microreplication<sup>[13]</sup>

表面织构 (surface texture), 即在摩擦表面加工具有一定尺寸和分布的图案阵列, 是一种提高表面承载力、改善表面摩擦学特性和延长使用寿命的有效方法。目前, 基于荷叶<sup>[14]</sup>、蝴蝶<sup>[14]</sup>、鲨鱼<sup>[15]</sup>和壁虎<sup>[16]</sup>等功能化的表面仿生摩擦学已日益受到广泛关注。

源于仿生非光滑表面的表面织构已成为国内外表面科学领域的一个研究热点。NASA 兰利研究中心的 Walsh 等<sup>[19-21]</sup>模仿鲨鱼表面设计并优化了沟槽结构, 利用风洞实验测试得到最高减阻率接近 25%。Yu 等<sup>[22]</sup>受鲨鱼体表的启发, 提出了一种在微观结构模型中确定减阻率的新概念, 使得减阻机理的分析更为简便。实际上, 仿生生物的表面形态为多尺度复杂织构类型, 作用机理比单一沟槽织构更加复杂。缪晨炜等<sup>[23]</sup>基于蚯蚓头部的多尺度沟槽织构, 设计了多种梯

度变化的沟槽织构, 为沟槽织构的优化设计提供了参考。对蚯蚓体表非光滑形态的研究为泥浆泵活塞-缸套运动副设计提供了思路。孙艺文等<sup>[24]</sup>以蚯蚓为仿生原型, 在泥浆泵活塞表面设计加工凹坑形仿生单元体, 显著提高了其使用寿命。Zheng 等<sup>[25]</sup>将硬度梯度与六边形纹理仿生耦合, 为改善耐磨性能提供了新的策略。近年来, 仿生非光滑表面在减阻、抗粘附、抗蠕爬等多个领域已经取得了一定的研究成果, 如仿鲨鱼皮的泳衣、飞机螺旋桨蒙皮贴片、高尔夫球、散热风扇等<sup>[26-27]</sup>, 如图 3 所示。表面织构技术已经发展成为一种控制摩擦、减少磨损、改善润滑性能的有效手段<sup>[28]</sup>, 在机械密封<sup>[29]</sup>、推力轴承<sup>[30]</sup>、发动机系统<sup>[31]</sup>、气缸套-活塞环<sup>[32]</sup>等机械零部件上的研究与应用已经获得了一定的进展。

图 3 表面织构应用实例<sup>[27]</sup>Fig.3 Application examples of surface texture<sup>[27]</sup>

# 1 表面织构摩擦及润滑性能的影响因素

## 1.1 表面织构形状的影响

表面织构的类型繁多,主要包括凸体、凹坑、凹槽以及各类混合形貌等。图4展示了一些常见的表面织构形态特征<sup>[33-34]</sup>。贾洪铎等<sup>[35]</sup>设计了圆柱形、六边形、密封和非密封六边形裙边结构4种类型的微凸起

织构,其中后两种织构化试样的静摩擦力随表面微凸起面积率的变化更加剧烈。侯启敏等<sup>[36]</sup>对凹坑形、凸包形、刚毛形和沟槽形4种典型织构进行论述,其中减阻耐磨效果最优的是沟槽形,凹坑形次之。而李一楠等人<sup>[37]</sup>则认为相比凹坑类织构,微凸体织构具有不会破坏试件强度、刚度等物理属性的优点。针对微凸体形貌,不同的研究人员持不同的看法,考虑加工制造成本及润滑减摩效果,目前表面织构在润滑减摩方面的研究主要以凹坑形和凹槽形为主。

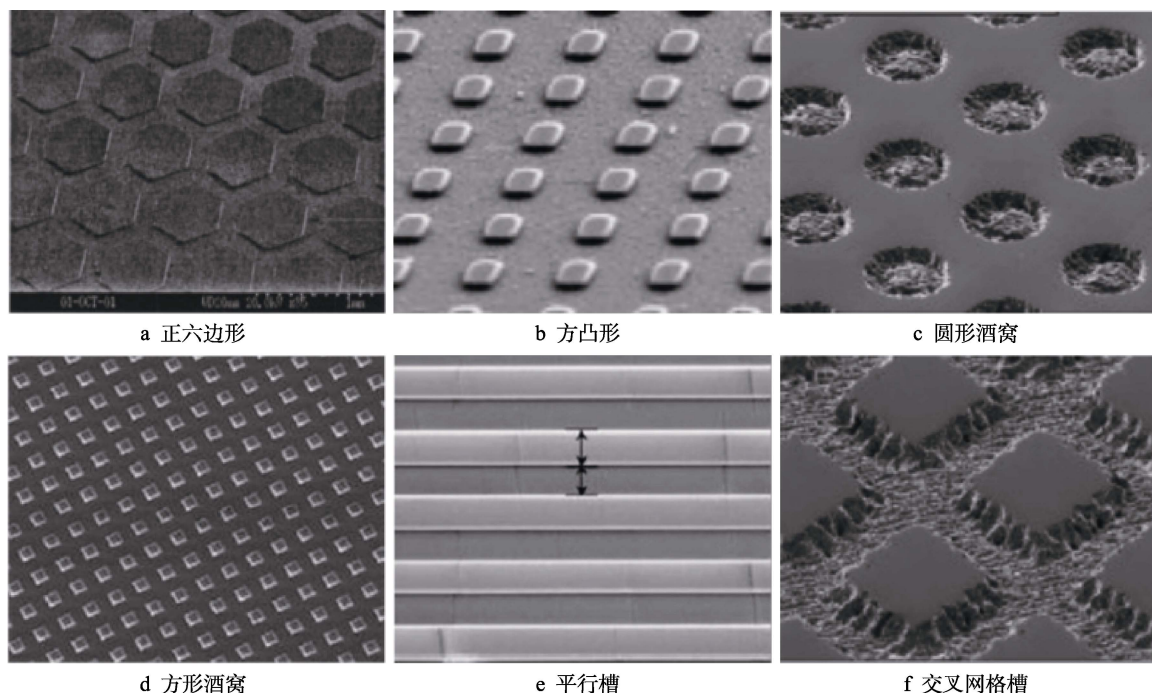


图4 表面织构形态特征<sup>[34]</sup>

Fig.4 Morphological characteristics of surface textures<sup>[34]</sup>: (a) orthohexagonal, (b) square bulge, (c) circular depression, (d) square pit, (e) parallel-groove, (f) Intersecting grid slot

尹明虎等<sup>[38]</sup>研究了矩形、圆柱形和三角形3种微织构对径向滑动轴承的影响,只有矩形织构提升了轴承的承载能力。高元等<sup>[39]</sup>研究发现,相同工况条件下,矩形凹槽分布的滑动轴承润滑效果优于矩形凹坑。M. Qiu 等<sup>[40]</sup>比较了球形、椭球形、圆形、椭圆形、三角形、V形6种凹坑织构对滑动轴承承载力的影响,结果表明,椭球形织构的承载能力最高。彭龙龙等<sup>[41]</sup>对矩形、菱形、球形和雪花状4种表面织构进行研究,如图5所示,发现球形织构对承载能力的提升最大。以上研究中,织构分布位置、尺寸及工况参数均不同,表明滑动轴承性能的提升不仅依赖于微织构形状和类型,还与织构的分布及工况条件等息息相关。

除了对凹坑凹槽等单一类型或单一形状织构进行分析,越来越多学者开始探究复合织构对润滑减摩性能的影响。王国荣等<sup>[42]</sup>分析了复合织构对柱塞密封副动压润滑性能的影响规律,发现复合织构对动压润滑性能的影响以外织构的影响为主。钟林等<sup>[43]</sup>在齿轮钻头滑动轴承轴颈表面加工出圆形、矩形、三角形及复合织构,结果表明,圆形、矩形织构的减摩和耐磨

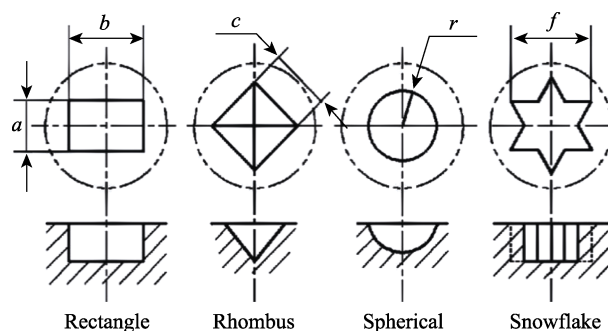


图5 4种织构形状<sup>[41]</sup>

Fig.5 Four kinds of texture shapes<sup>[41]</sup>

性能最优,复合织构反而增大了摩擦系数及磨损量。而 Segu 等<sup>[44]</sup>通过试验研究证实了椭圆形凹坑和圆形凹坑两者复合可降低摩擦系数。两者的研究结果不一致,说明复合织构的性能并不一定优于单一织构,其积极作用与分布方式、摩擦副工作环境等有关。

近年来,随着先进制造技术的发展,开始有学者提出一系列不规则形状织构。Schuh 等<sup>[45]</sup>对非对称的表面织构(图6)进行研究,发现非对称表面织构



能有效降低摩擦系数, 当  $\beta=5.3^\circ$  时, 摩擦系数最小。李俊玲等<sup>[46]</sup>将不同直径的圆凹坑织构复合, 得到一种非规则对称的葫芦形织构, 在润滑状态下, 葫芦形织构具有方向性且正方向织构的摩擦系数更小。M. S. UDDIN 等<sup>[47]</sup>提出一种“星形”织构, 与椭圆、V 形、三角形和圆形相比, “星形”织构对摩擦系数的降低更明显。卫培梁<sup>[48]</sup>设计并制备了一种箴形表面织构, 发现箴形织构能大幅度提高油膜承载力, 并减小摩擦副的摩擦系数, 改善摩擦表面的摩擦学性能。通过对织构形状进行优化得到的不规则织构, 在一定条件下具有比规则织构更优的摩擦学性能, 为织构形状的优化设计提供了参考。大量理论与实验研究表明, 表面织构化和保护性涂层的融合技术, 可显著提高机械配合表面的摩擦学性能<sup>[49-50]</sup>, 国内外学者以两者的协同

作用效果为重点开展了研究。M. Sedlaček 等<sup>[51]</sup>在硬质合金表面 TiAlN 涂层沉积前后引入金字塔凹痕、圆锥凹痕以及激光凹痕, 发现不管涂层沉积顺序如何, 激光织构表面的摩擦学性能最优, 金字塔形的摩擦学性能最差, 而先涂层后织构的试样, 无论织构类型如何, 摩擦力都趋于降低。祁鹏浩等<sup>[52]</sup>在 GCr15 钢盘表面镀 DLC 涂层前后加工线形、圆形、V 型和微纹 4 种织构, 摩擦实验表明: 先织构后涂层处理的表面减摩抗磨性能较差, 而先涂层后织构处理的表面摩擦学性能较好, 微纹织构与 DLC 涂层的协同最好。以上研究主要从织构与涂层作用的先后顺序和织构形状着手, 虽然结果存在一定差异, 但均证明了先涂层后织构的加工方式有助于改善材料表面的摩擦特性。

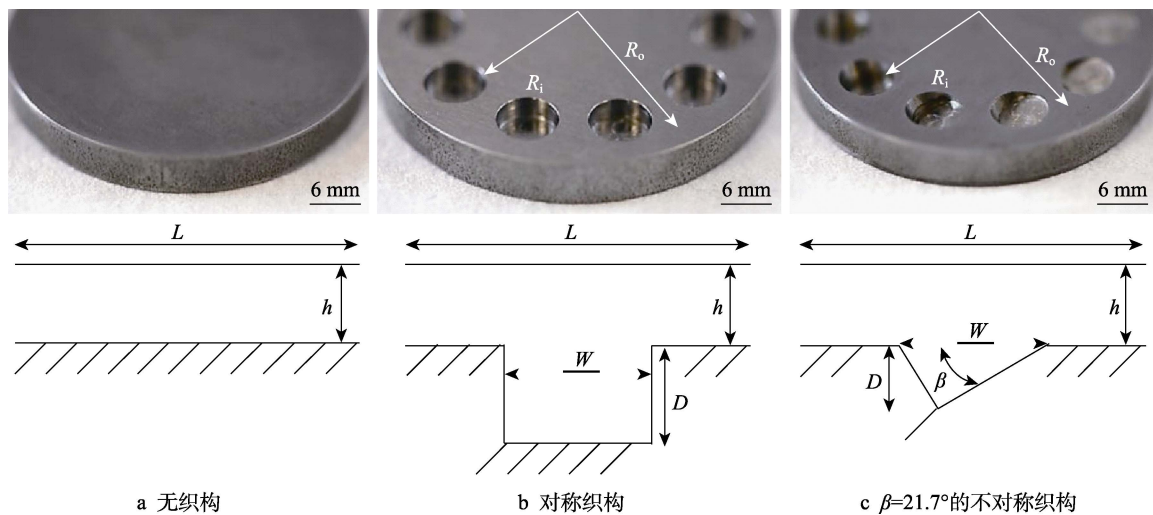


图 6 3 种测试表面和中心线深度轮廓示意图<sup>[45]</sup>

Fig.6 Photos and centerline depth profile schematics for the three types of surfaces tested: (a) flat plate, (b) symmetric texture, and (c) asymmetric texture with  $\beta=21.7^\circ$

对比研究多种织构形状发现, 就规则织构而言, 圆形、方形织构的承载能力比其他规则织构的承载能力更高, 但在实际工程应用中, 圆形织构由于其加工方便、制造成本低等优点, 而得到更加广泛的应用。同时, 也有学者提出一些不规则形状的织构, 发现在特定条件下, 其摩擦学性能优于规则织构。还有学者针对表面织构和保护性涂层的协同作用效果对织构形状进行研究, 发现微织构与涂层加工的先后顺序会对材料表面的摩擦特性产生不同的影响。总的来看, 目前关于表面织构形状的研究大多集中在单一织构, 对于复合织构的研究较少, 复合织构类型也比较单一, 且并未对复合织构类型、截面形状等作深入的讨论。从织构类型上看, 复合方式有凹坑-凸起、凹坑-沟槽、凸起-沟槽等; 从截面形状上看, 复合方式有矩形-三角形、矩形-圆弧形、矩形-抛物线形等。随着表面织构技术研究的深入, 多类型织构复合及织构和涂层的耦合作用对润滑减摩性能的影响将成为未来

研究的一大热点, 同时也对表面织构的加工技术提出了更高的要求。

## 1.2 表面织构分布形式的影响

当前对表面织构排布形式的研究, 主要是将多种织构排布进行对比分析, 从而得到最优织构分布形式。王洪涛<sup>[53]</sup>设计了 3 种不同排布模式的椭圆柱形表面微凹坑织构, 如图 7 所示, 在全膜润滑条件下, 3 种模式织构表面的摩擦系数基本一致, 但 P1 和 P2 模式表面的动压承载能力比 P3 模式更优。Yue 等<sup>[54]</sup>在滑动导轨接触表面上制备了与滑动方向平行、垂直及成  $45^\circ$  方向的微沟槽织构, 在边界润滑条件下, 除平行分布的导轨外, 其他分布形式的表面的摩擦系数均低于无织构导轨表面。此外, 也有一些研究在优选织构分布形式的基础上, 深入地探讨了织构分布的影响因素, 发现最优织构排布方案与织构密度、织构间距等参数有关。徐文静<sup>[55]</sup>分析了在升压区, 圆形微凹

坑结构排布形式对动压滑动轴承承载力的影响,发现随着结构密度的增加,不同的结构分布均会引起轴承承载力下降。王劲孚等<sup>[56]</sup>基于 N-S 方程,采用 CFD 方法分析不同排布形式表面结构的润滑特性,其中纵横间距为  $250\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$  的交错排布微凹坑结构具有最高的油膜承载力。梁志强等<sup>[57]</sup>采用微磨削方法制备出横向、纵向和交叉 3 种微结构刀具,发现沟槽间距为  $150\ \mu\text{m}$  的横向结构刀具的减摩、抗粘、降温效果最好。

除了上述对结构排布模式进行对比的研究外,也有学者针对结构布局进行优化设计,主要从全结构分布与部分结构分布以及结构分布位置等方面开展研究。Jamwal 等<sup>[58]</sup>在动压滑动轴承内表面制备了人字形微结构,发现具有完全结构化分布的轴承的稳定性最优。此结论与高元等人的研究结论出现分歧。高元等<sup>[39]</sup>在轴承内表面沿圆周方向分布一系列均匀的矩形凹槽,发现部分结构的润滑效果优于完全分布结构。究其原因,发现两者的实验参数以及结构几何参数都

不相同,因此结构分布形式的合理选择还需要根据实际工况参数以及结构几何参数来确定。徐文静等<sup>[55]</sup>对圆形微凹坑结构在升压区、降压区、全结构时的动压滑动轴承油膜压力进行分析,得知当结构位于升压区时,滑动轴承取得较好的承载润滑性能,而在降压区和全结构时,不利于轴承承载。此结果与毛亚洲等人的研究很好地吻合。毛亚洲等<sup>[59]</sup>基于 Reynolds 方程,研究结构分布在圆周方向对动压滑动轴承油膜压力的影响,发现在升压区时,局部结构分布的滑动轴承具有较好的润滑、承载性能,而在降压区和全结构分布时,轴承油膜压力明显低于无结构轴承。此外,也有研究表明,部分结构分布的轴承,其性能还与实际工况参数有关。Henry 等<sup>[60]</sup>发现局部结构分布的止推轴承有助于减少摩擦,在低载下可减少 30%,而在重载下,其性能与无结构的平面轴承相当,甚至更低。合理的工况参数对部分结构分布轴承的润滑性能起到积极作用,反之,不合理的工况参数下,反而破坏轴承的性能。

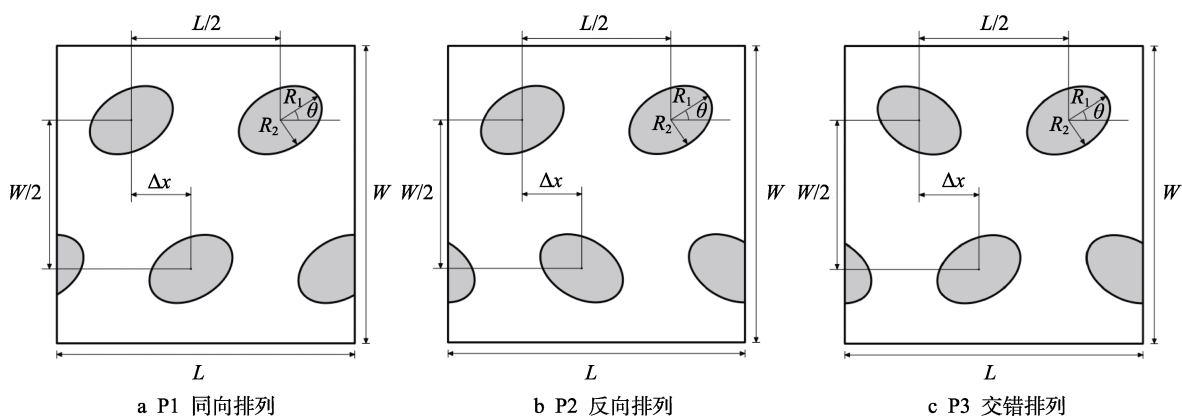


图 7 椭圆结构几何结构 3 种排布模式<sup>[53]</sup>

Fig.7 Geometry structure of elliptical textures in P1, P2 and P3 patterns<sup>[53]</sup>: a) arrange in the same direction, b) arrange in the opposite direction, c) arrange in the staggered direction

从现有的研究来看,合理分布的表面微结构能有效提高润滑减摩性能。对于同一结构,其分布形式和分布位置不同,摩擦学性能也有较大差异,研究结果甚至可能出现相互矛盾。这是因为不同研究针对的结构化表面的材料、工况参数各不相同,采用的研究方法也有区别,不同分布形式出现的结果也存在差异,因此对于表面结构分布形式的研究,在参考理论研究的同时,需要考虑结构的润滑状态、分布位置等实际条件。

### 1.3 表面结构几何参数的影响

几何参数是影响表面结构润滑减摩性能的关键因素之一,设计最合适的表面结构几何参数可使结构化表面获得最优的摩擦学特性和润滑性能。

表面结构的深度、深径比、面积比等都是影响摩擦磨损的重要几何参数。齐焯等<sup>[61]</sup>发现在一定的工况

条件下,存在最优的凹槽深度,使得油膜的承载能力最强,动压润滑效果最优。厉淦等<sup>[62]</sup>在 316L 不锈钢表面制备出不同尺寸的沟槽型表面微结构,发现沟槽宽度为  $100\ \mu\text{m}$  和沟槽间距为  $200\ \mu\text{m}$  时,结构具有最佳的减摩抗磨特性。Janssen 等<sup>[63]</sup>对皮秒激光结构化样品进行了销-盘实验,结果表明,微凹坑的深径比是影响摩擦副摩擦学性能的关键参数。Meng 等<sup>[64]</sup>对 W-S-C 固体润滑剂与激光表面结构结合的研究表明,在一定的范围内,结构密度越大,减摩效果越好。孙建芳等<sup>[65]</sup>在钛合金表面构造出 4 种不同密度的结构分布,发现干摩擦条件下存在最优结构密度(8.7%),使得钛合金表面减摩抗磨性能最好。以上研究大多针对某一特定润滑条件或干摩擦进行分析,然而,实际工作中,摩擦副大多处于混合润滑状态,在运转过程中,其润滑状态也会发生变化,甚至出现乏油的情况。李亚军等<sup>[66]</sup>在 45 钢表面制备了不同密度的表面微



构, 在干摩擦和乏油条件下, 当织构密度为 8.1% 时, 抗磨效果最好。蔡兴兴<sup>[67]</sup>研究了混合润滑状态下不同织构参数对摩擦润滑性能的影响规律, 轻载荷下, 对于圆形织构, 最优摩擦润滑性能的几何参数为: 织构面积率 20%, 半径 100  $\mu\text{m}$ , 深度 17  $\mu\text{m}$ 。路继松等<sup>[68]</sup>建立了带有表面织构的水润滑轴承混合润滑模型并数值求解, 研究表明, 表面织构能否改善润滑性能与其深径比及面密度参数密切相关。

随着研究的深入, 有研究表明, 表面织构的最佳几何尺寸会受到工况条件、润滑方式等因素的影响。何霞等<sup>[69]</sup>探究了不同织构参数对钻头滑动轴承承载力和摩擦系数的影响规律, 发现在不同偏心率条件下, 摩擦系数均随着深度的增加而先降低后上升, 且摩擦系数小于无织构光滑轴承。李东志等<sup>[70]</sup>利用 CFD 方法考虑有无空化时织构深度对油膜承载性能的影响,

发现随着织构深度的变化, 总存在一个最优织构深度, 使得油膜的承载力最大, 且最优深度值与空化有关。Arslan 等<sup>[71]</sup>发现在润滑滑动条件下, 织构深度对 DLC 涂层磨损率的影响呈现先减少后增长的趋势。苏峰华等<sup>[72]</sup>研究发现, 在 PAO6 油润滑条件下存在最优深度 (10  $\mu\text{m}$ ), 使得不锈钢表面的抗磨和减摩效果最优, 如图 8 所示。杨国来等<sup>[73]</sup>对轴向柱塞泵配流副进行研究发现, 最佳深径比与织构形状相关, 矩形和圆弧织构的最佳深径比为 1:5, 三角形和等腰梯形织构的最佳深径比为 1:4。蒋雯<sup>[74]</sup>发现, 在不同工况条件下, 沟槽织构均存在最优面密度, 随着载荷的增大, 最优面积密度值逐渐减小。从以上研究可以看出, 偏心率、润滑条件不同, 最优织构深度存在差异, 最优面密度也与载荷条件有关, 因此具体的几何参数往往需要结合实际工作条件才能确定。

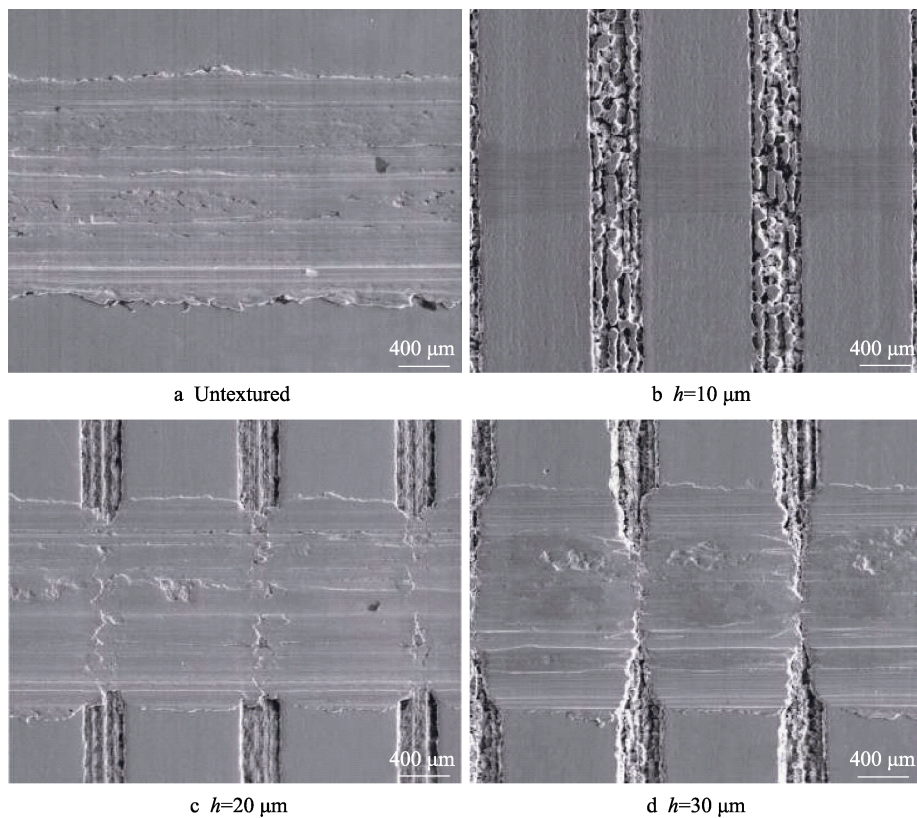


图 8 不同深度沟槽的表面磨损形貌 SEM 照片<sup>[72]</sup>

Fig.8 SEM micrographs of the worn textured surface with different groove depths<sup>[72]</sup>

近年来, 针对典型的几何参数, 有学者考虑它们对润滑减摩性能的影响是否存在主次顺序。张东亚等<sup>[75]</sup>研究了表面织构参数 (直径、面密度、深度) 对滑靴副摩擦系数的影响规律, 结果表明, 各因素的主次顺序为: 直径>面密度>深度。卫培梁<sup>[48]</sup>探究了等形织构各参数 (面积率、倾斜角度、深度、边夹角、织构大小) 对摩擦系数的影响, 结果表明, 各参数的主次顺序为: 深度>织构大小>倾斜角度>边夹角>面积率。董保栋<sup>[76]</sup>研究发现, 交叉沟槽织构的宽度、深

度和交叉角度对表面流体动压润滑性能的影响比沟槽间距和重叠系数更显著。可以看出, 目前对于几何参数影响主次顺序的研究缺少系统性, 但为织构参数的优化设计及优选方法提供了理论和实验依据。

以上研究主要讨论了织构深度 ( $h_p$ )、面积比 ( $s_p$ )、深径比 ( $\mu$ ) 等几何参数的影响, 其中织构深度是影响表面织构摩擦学性能的关键因素。在单一几何参数 (就织构深度而言) 的作用下, 在不同的润滑条件下, 存在最优织构深度使得润滑效果最佳。然

而在与深径比、面积比等几何参数共同作用时,最优织构深度的范围存在一定差异。值得探究的是,对于不同润滑状态、不同几何参数组合,能否用一个归一化的方程 $f(h_p, s_p, \mu, \dots)$ 去解释。

#### 1.4 工况参数的影响

除织构分布形式、形状和几何参数外,工况参数也是影响表面织构摩擦及润滑性能的重要因素。工况条件不同,表面织构体现出的摩擦学性能也不相同<sup>[77]</sup>。

苗嘉智等<sup>[78]</sup>在缸套切片表面制备了一种微凹坑织构,发现存在一个合适的工况条件,使其能最有效地改善摩擦学性能。张东亚等<sup>[79]</sup>在锡基巴氏合金基体上制备凹坑织构,发现滑动速度和载荷均影响矩形阵列织构表面的摩擦系数。Mohmad等<sup>[80]</sup>在活性炭复合材料表面制备激光织构,发现摩擦系数随滑动速度的增加而降低,随着载荷的增加而增加,此结果与姜莉莉<sup>[81]</sup>的研究结果一致。李直等<sup>[82]</sup>发现在线接触弹流状态下,随着载荷和转速的变化,不同程度的弹性变形导致接触表面间润滑性能不同。以上研究表明,在不同的工况下,表面织构的润滑减摩作用效果不一,因此分析速度和载荷等工况参数在工作过程中所占权重,对优选合适的工况参数尤为重要。宋克峰<sup>[83]</sup>研究发现,PTFE表面织构的摩擦系数和磨损深度随着载荷和滑动速度的变化规律相同,最佳的工况条件为:载荷5 N,滑动速度5 cm/s。高元<sup>[84]</sup>发现,不同工况条件下,织构改善润滑性能的效果不同,低载荷、高转速时效果较为明显。姜莉莉<sup>[81]</sup>研究发现,在高速轻载条件下,微凹坑织构表面具有较好的减摩抗磨性能。可以看出,目前关于最优工况参数组合的研究结果并不完全一致,但总的来看,高速轻载工况下,表面织构具有较优的摩擦学性能。

除了典型的工况(速度、载荷),也有不少学者根据摩擦副所处的工作环境,对润滑油黏度、频率、压力等工况参数进行研究。何霞等<sup>[85]</sup>选用低黏度L-CKD150润滑油和高黏度复合锂基润滑脂为润滑介质,发现相同工况下,高黏度的润滑脂润滑时,最优织构直径更大。马明明等<sup>[86]</sup>测试了圆台形凹坑织构表面在水、海水和油介质中的摩擦学性能,发现织构表面在油介质中的摩擦系数和磨损量最小。解玄等<sup>[87]</sup>在脂润滑条件下分别研究载荷和往复运动频率对轴承钢GCr15材料表面摩擦性能的影响,发现摩擦系数随载荷和往复频率的增加呈平缓下降趋势。何霞等<sup>[85]</sup>在圆形微凹坑织构的铍青铜盘试样表面开展销-盘摩擦学实验,发现摩擦学性能差异主要与接触压力及试样间的相对速度有关。路慧彪等<sup>[88]</sup>通过CFD方法分析发现,流体润滑时,随着入口压力的增加,织构的承载力也会线性成比例的增加。张生光等<sup>[89]</sup>发现,在乏油工况下,随着速度和供油量的增加,织构表面的润滑油膜厚度和摩擦系数存在最优值。实际上,目前

针对不同工况下表面织构润滑减摩性能的理论及试验研究相对都比较欠缺,特别是针对极端工况条件,可以说是研究领域的一块空白所在,非常具有进一步深入研究的必要性。

通过对比分析可知,载荷和速度是目前影响表面织构摩擦及润滑性能最重要的因素之一,并存在一个最优的数值,使得织构性能达到最优。但表面织构的润滑减摩作用不仅受到载荷和速度的影响,同时与温度、相对湿度、表面粗糙度等有密切关系。一方面,目前工况参数的研究多集中于载荷、速度等单一参数,对于高速重载、低速重载等组合工况参数对表面织构摩擦及润滑性能影响的研究较少;另一方面,随着现代工业化的进一步发展,对机械设备的寿命和可靠性等提出了更高的要求,表面织构摩擦副工况参数的研究也需要向着高温高压、强腐蚀等方向发展。

## 2 表面织构的润滑减摩机制

表面织构的润滑减摩机制与润滑状态有关,在不同的润滑状态下,表面织构的润滑减摩机制不同。目前,润滑状态主要有流体润滑、边界润滑和干摩擦<sup>[90]</sup>。

Stribeck曲线能够显示不同润滑状态之间的转换(如图9所示<sup>[91]</sup>),被认为是一种判断润滑状态简单且有效的方法。万轶等<sup>[92]</sup>根据膜厚比 $\lambda = h_{\min}/R$ ,在Stribeck曲线上将润滑机制分为3种:边界润滑、混合润滑和流体润滑。在流体润滑状态下主要表现为微流体动压作用,摩擦副表面的相对运动将黏性流体带入微凹坑区域,形成厚度为1~100  $\mu\text{m}$ 量级的黏性流体膜,并在每个微凹坑区域内产生不对称的压力分布,使润滑膜具有一定的承载力以承受载荷,如图10a所示<sup>[28,93]</sup>。不少研究表明,表面织构流体动压润滑性能会受面积率和深径比<sup>[94]</sup>、形状<sup>[95]</sup>、相对位置变化<sup>[96]</sup>、摩擦副接触方式变化(线接触-面接触)<sup>[97]</sup>

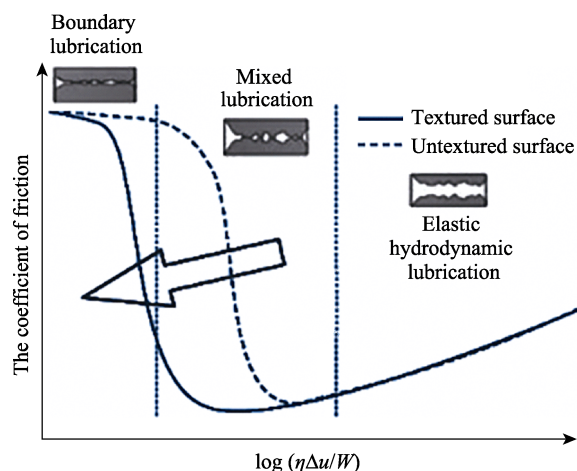


图9 织构表面润滑状态转变效果图<sup>[91]</sup>

Fig.9 Effect picture of lubrication state transition on textured surface<sup>[91]</sup>



等的影响。项欣等<sup>[98]</sup>研究表面织构分布区域对摩擦副摩擦学行为的影响,发现中间织构通过形成局部流体动压润滑效应,提高了摩擦副的承载能力,降低了接触表面的摩擦系数。在边界润滑状态下,主要表现为“二次润滑”效应,摩擦副表面润滑剂中的极性分子与摩擦表面吸附形成一层厚度为  $0.005\sim 0.010\ \mu\text{m}$  且与润滑介质性质不同的边界润滑膜<sup>[34,76]</sup>,此时摩擦面的间隙逐渐减小,表面微凸体相互作用加强,边界膜厚远小于粗糙峰高度,如图 10b 所示,微凸体与润滑剂表面之间的边界润滑膜承受大部分载荷<sup>[99-102]</sup>。周刘勇等<sup>[103]</sup>对边界润滑下仿鲨鱼皮织构的减摩性能机理进行分析,发现随着织构的不断磨损,沟槽中存储的润滑油不断溢出,形成“二次润滑”。纪敬虎等<sup>[104]</sup>发现,低载时,表面处于流体动压润滑状态,载荷由润滑油膜所产生的流体动压力承担,而高载

时,表面处于边界润滑状态,沟槽织构起到储存润滑介质、为摩擦表面提供和补给润滑剂的作用。在干摩擦状态下主要表现为磨屑“储存”作用,零件表面由于摩擦会形成磨屑,随着摩擦副的相对运动,磨屑会在接触面上形成犁沟,破坏表面形貌<sup>[105]</sup>,表面织构的工作机制主要包括储存和容纳磨粒、磨屑,减少由于其犁沟作用产生的高摩擦磨损对基体产生二次磨损<sup>[106]</sup>,如图 10c 所示。高贵等<sup>[107]</sup>对聚四氟乙烯 (PTFE) 复合材料研究发现,在接触应力作用下,磨屑中的纳米粒子与织构底部及侧面的粗糙峰形成机械互锁,提高了磨屑的附着力。段仁慧等<sup>[108]</sup>发现 316 不锈钢试样在干摩擦条件下的磨损机理主要为疲劳磨损和氧化磨损,表面的凹槽织构起到捕捉、存储磨屑的作用。Xuemu Li 等<sup>[109]</sup>在  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$  陶瓷表面上生产仿生鲨鱼皮,干摩擦下,其作用主要是捕获磨屑,减少剪切应力。

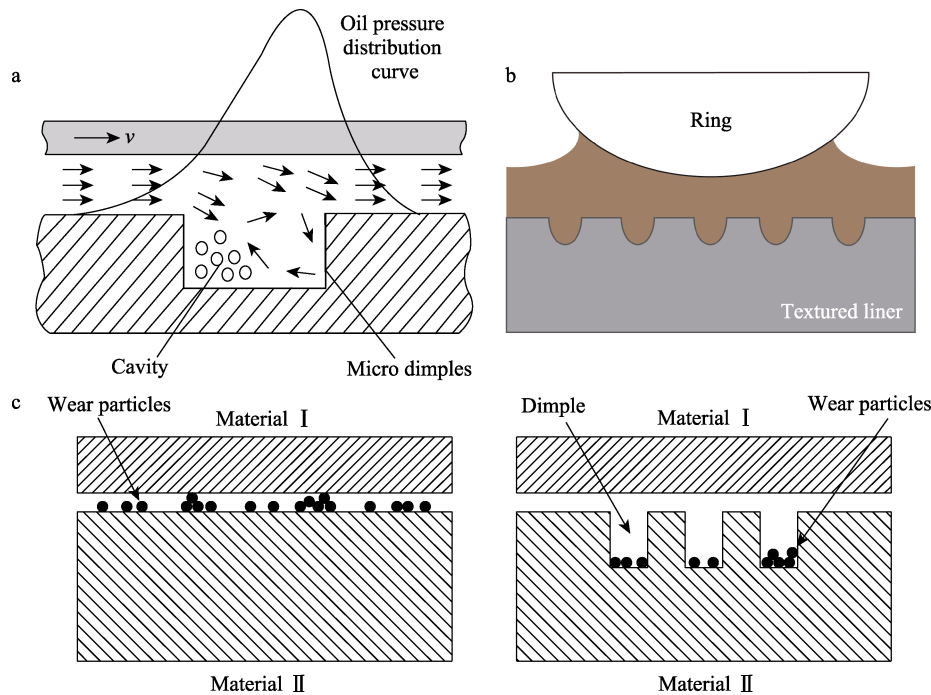


图 10 (a) 表面织构流体动压润滑形成机理<sup>[28]</sup>; (b) 活塞环-缸套之间的局部油膜示意图<sup>[102]</sup>; (c) 干摩擦情况下作用机制<sup>[106]</sup>

Fig.10 (a) Formation mechanism of fluid hydrodynamic lubrication of surface texture<sup>[28]</sup>; (b) Schematic diagram of the local oil film between a ring and textured liner<sup>[102]</sup>; (c) The mechanism of surface texture under dry condition<sup>[106]</sup>

一些学者<sup>[1,110-112]</sup>在考虑试件表面粗糙度的情况下,对其流体动压润滑性能进行研究。粗糙的织构系统存在宏观尺度和局部尺度,局部尺度包括织构尺度和粗糙度尺度,涉及到表面织构或表面粗糙度,对润滑接触有较大的影响,如图 11 所示。但研究者往往忽略了摩擦副表面的动态磨损,随着试验的进行,表面织构本身也存在摩擦磨损,织构的粗糙度、形状、几何参数等也随之发生变化,对织构的润滑减摩性能也存在一定影响。

此外,表面织构对材料表面润湿性具有直接影响,而润湿性与摩擦学性能相互关联<sup>[113-114]</sup>。有一些

研究对织构表面的润湿性及摩擦学性能进行了讨论。王新宇等<sup>[115]</sup>发现,与未织构的 DLC 涂层相比,PAO 润滑油在织构化处理的 DLC 涂层样品表面具有更好的润湿性和摩擦学性能。N. Coniglio 等<sup>[116]</sup>研究发现,润湿性与表面纹理的尺度及表面粗糙度有关。马明明等<sup>[113]</sup>探讨凹坑形织构对表面润湿性和摩擦学性能的影响,发现在其研究条件下,凹坑形貌对摩擦学性能的影响大于对润湿性的影响。王权岱等<sup>[117]</sup>发现,材料表面润湿性在不同润滑状态下对摩擦学特性有显著的影响。可见,表面织构既影响表面润湿性,也影响表面的摩擦学性能<sup>[118]</sup>,润滑状态、润滑介质、织

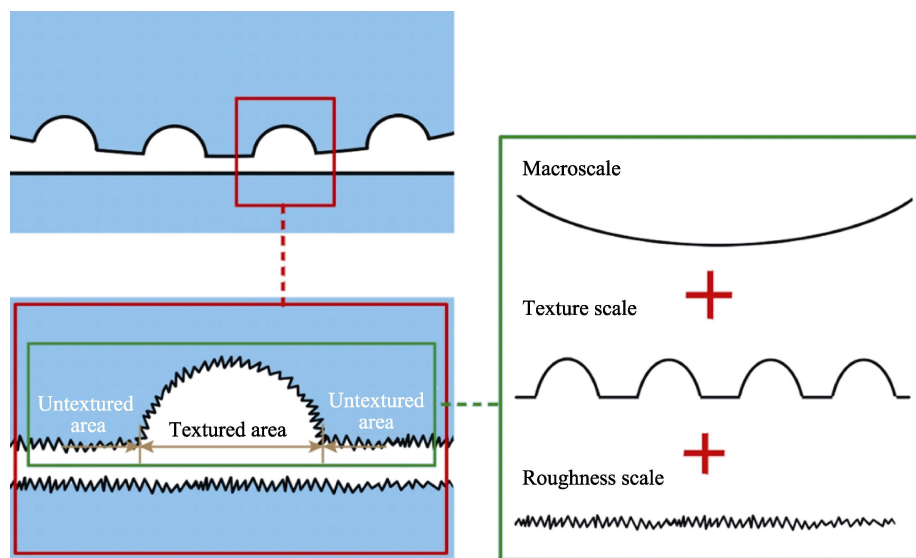


图 11 织构表面存在的不同尺度<sup>[110]</sup>  
Fig.11 Different scales of the rough textured surfaces<sup>[110]</sup>

构参数、涂层织构化顺序等都对表面润湿性具有影响,针对润湿性亟需更加深入、系统性的研究。

关于表面织构对改善润滑及减摩性能的机理,目前被普遍认可的有:微流体动压作用<sup>[119]</sup>、“二次润滑”效应<sup>[120]</sup>、磨屑“储存”作用<sup>[121]</sup>、接触面积减少效应<sup>[122]</sup>等。掌握表面织构的润滑减摩机制对设计织构化表面具有指导性的意义。早期的织构设计主要通过不断试错,选择适合配副结构、材料和运行工况的织构设计,这种“试错法”低效且不经济<sup>[123]</sup>。现有研究对于表面织构的润滑减摩机制已经逐渐完善,但是对于高速和重载等极端工况、多类型复合织构以及动态磨损下的作用机制,国内外尚未涉及,还缺乏统一的设计优化理论,例如高速重载下,齿轮织构减摩特性及其复合润滑介质的作用机制等。

### 3 总结与展望

本文分析了表面织构的类型及润滑减摩机制,并对表面织构形状、织构分布形式、织构几何参数、工况参数等影响织构化表面润滑减摩性能的因素进行总结。对织构化表面润滑减摩性能的研究主要分理论研究和实验研究两个方面。理论方面,一般采用 N-S 方程、Reynolds 方程等方法,通过建立理论模型或数值仿真分析微结构类型、几何参数等因素的变化对其润滑减摩的影响。实验方面,一般采用单元摩擦学实验、台架实验等方法,从摩擦系数、磨损量、油膜压力等方面分析摩擦副表面润滑减摩机理。现有研究基本表明表面织构的积极作用会受织构分布、织构形状、织构几何参数和工况参数等摩擦试验参数影响,而最优的织构参数组合往往需要综合考虑接触类型、工作环境等复杂因素。因此,针对实际工况下的织构参数优化设计是非常有必要的。

表面织构在摩擦学领域中虽已取得许多优秀的研究成果,但整体研究仍缺乏系统性和综合性,结合表面织构的应用需求和研究现状,建议未来应关注以下几个方面研究:

1) 在典型凹坑、沟槽型织构和单一织构参数调控润滑减摩规律的研究基础上,多参数耦合、复杂形状和复合类型协同作用下,表面织构影响润滑减摩性能的规律有待进一步深入研究。

2) 表面织构与涂层/薄膜体系耦合作用下协同调控润滑减摩的机制尚不清楚,需深入地探究其机理。

3) 考虑利用一个统一方程或归一化参数统一判断评价织构润滑减摩性能,优化织构的参数组合,探索织构润滑减摩机理,结合人工智能的方法,探索多参数耦合作用下表面织构润滑减摩的智能优化设计理论及评估方法。

4) 针对表面织构在时空尺度上动态磨损的问题,建议采用多尺度耦合的方法搭建微观到宏观尺度沟通的桥梁,开展表面粗糙度、织构形状、几何参数等表界面参数和润滑介质性能动态变化对滑动界面磨损性能的影响机制研究。

5) 开展表面粗糙度与表界面微纳米织构耦合作用下润滑减摩性能的研究,可能是未来仿生织构摩擦学研究的热点。

6) 表面织构的工业化制造技术及装备是制约表面织构工程化应用的主要痛点,亟需攻关突破高效率、高质量、低成本的复杂曲面微纳米织构的加工、表征及评价技术。

表面织构技术已被证明在改善润滑效果、提高抗磨损性能方面具有积极作用,现已成为国内外研究的一大热点,未来必将成为机械装备降耗增寿的变革性技术。为实现机械装备的可靠使用、延寿和经济运行,未来应大力推进表面织构的工程化应用。



## 参考文献:

- [1] 何霞, 廖文玲, 王国荣, 等. 正弦波粗糙度对织构表面动压润滑的影响[J]. 润滑与密封, 2017, 42(8): 64-70, 114.  
HE Xia, LIAO Wen-ling, WANG Guo-rong, et al. Effects of sinusoidal roughness on hydrodynamic lubrication performance of textured surface[J]. Lubrication engineering, 2017, 42(8): 64-70, 114.
- [2] SHINKARENKO A, KLIGERMAN Y, ETSION I. The effect of surface texturing in soft elasto-hydrodynamic lubrication[J]. Tribology international, 2009, 42(2): 284-292.
- [3] HE Bo, CHEN Wei, WANG Q J. Surface texture effect on friction of a microtextured poly(dimethylsiloxane) (PDMS) [J]. Tribology letters, 2008, 31(3): 187-197.
- [4] ZHOU Lin, 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.
- [5] HAMILTON D B, WALOWIT J A, ALLEN C M. A theory of lubrication by microirregularities[J]. Journal of basic engineering, 1966, 88(1): 177-185.
- [6] 刘晓敏, 赵登超, 罗林辉, 等. 仿生物体表非光滑微织构形态刀具应用及发展[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(3): 114-118.  
LIU Xiao-min, ZHAO Deng-chao, LUO Lin-hui, et al. Research of biomimetic biological non-smooth surfacemicro-textured tool application and progress[J]. Machine design & research, 2019, 35(3): 114-118.
- [7] 强巍, 王万成, 何彬. 表面织构在齿轮泵关键摩擦副上的应用[J]. 润滑与密封, 2018, 43(2): 133-136.  
QIANG Wei, WANG Wan-cheng, HE Bin. Application of surface texture in key friction pair of gear pump[J]. Lubrication engineering, 2018, 43(2): 133-136.
- [8] 戴庆文, 李思远, 王秀英, 等. 不同密封副材料的表面织构设计及其润滑和密封特性[J]. 中国表面工程, 2019, 32(3): 21-29.  
DAI Qing-wen, LI Si-yuan, WANG Xiu-ying, et al. Surface texturing of different sealing materials and their lubrication and sealing performances[J]. China surface engineering, 2019, 32(3): 21-29.
- [9] 文怀兴, 任锐锐, 宋浩杰. 仿生织构对材料表面的摩擦学性能影响研究现状与展望[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(5): 130-133.  
WEN Huai-xing, REN Rui-rui, SONG Hao-jie. Current situation and prospect of study on effect of surface texture on tribological properties of materials[J]. Engineering plastics application, 2018, 46(5): 130-133.
- [10] 韩志武, 任露泉, 刘祖斌. 激光织构仿生非光滑表面抗磨性能研究[J]. 摩擦学学报, 2004, 24(4): 289-293.  
HAN Zhi-wu, REN Lu-quan, LIU Zu-bin. Investigation on anti-wear ability of bionic nonsmooth surfaces made by laser texturing[J]. Tribology, 2004, 24(4): 289-293.
- [11] 赵文杰, 王立平, 薛群基. 织构化提高表面摩擦学性能的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(6): 622-631.  
ZHAO Wen-jie, WANG Li-ping, XUE Qun-ji. Development and research progress of surface texturing on improving tribological performance of surface[J]. Tribology, 2011, 31(6): 622-631.
- [12] BECHERT D W, BRUSE M, HAGE W. Experiments with three-dimensional riblets as an idealized model of shark skin[J]. Experiments in fluids, 2000, 28(5): 403-412.
- [13] LIU Yun-hong, LI Guang-ji. A new method for producing "lotus effect" on a biomimetic shark skin[J]. Journal of colloid and interface science, 2012, 388(1): 235-242.
- [14] LIU Ming-jie, ZHENG Yong-mei, ZHAI Jin, et al. Bioinspired super-antiwetting interfaces with special liquid-solid adhesion[J]. Accounts of chemical research, 2010, 43(3): 368-377.
- [15] 周刘勇. 类鲨鱼皮织构的制备及其减摩性能研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2018.  
ZHOU Liu-yong. Preparation and antifriction properties of shark skin texture[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2018.
- [16] XU Quan, WAN Yi-yang, HU T S, et al. Robust self-cleaning and micromanipulation capabilities of gecko spatulae and their bio-mimics[J]. Nature communications, 2015, 6: 8949.
- [17] 宋剑. 干气密封摩擦振动瞬态分析及抑振研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.  
SONG Jian. Transient analysis and vibration suppression of dry gas seal friction[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.
- [18] 邓默. 基于穿山甲鳞片型织构特征的刀具减摩机制研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2016.  
DENG Mo. Research on anti-friction mechanism of cutting tool based on pangolin scales texture feature[D]. Hefei: Anhui University, 2016.
- [19] WALSH M. Turbulent boundary layer drag reduction using riblets[C]// 20th aerospace sciences meeting. Virginia: AIAA, 1982: 169.
- [20] WALSH M J. Riblets as a viscous drag reduction technique[J]. AIAA journal, 1983, 21(4): 485-486.
- [21] WALSH M, LINDEMANN A. Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction[C]// 22nd aerospace sciences meeting. Virginia: AIAA, 1984: 347.
- [22] YU Hai-yan, ZHANG Hao-chun, GUO Yang-yu, et al. Thermodynamic analysis of shark skin texture surfaces for microchannel flow[J]. Continuum mechanics and thermodynamics, 2016, 28(5): 1361-1371.
- [23] 缪晨炜, 郭智威, 袁成清. 仿生多尺度沟槽织构对表面摩擦性能的影响[J]. 中国表面工程, 2019, 32(1): 22-30.  
MIAO Chen-wei, GUO Zhi-wei, YUAN Cheng-qing. Effects of bionic multi-scales groove textures on surface tribological properties[J]. China surface engineering, 2019, 32(1): 22-30.
- [24] 孙艺文, 汝绍锋, 丛茜. 仿生凹坑形钻井泥浆泵活塞磨损寿命试验[J]. 石油学报, 2017, 38(2): 234-240.  
SUN Yi-wen, RU Shao-feng, CONG Qian. Wear-life experiment of drilling mud pump piston with dimple-shaped bionic surface[J]. Acta petrolei sinica, 2017, 38(2): 234-

- 240.
- [25] ZHENG Long, WU Jian-jun, ZHANG Si, et al. Bionic coupling of hardness gradient to surface texture for improved anti-wear properties[J]. *Journal of bionic engineering*, 2016, 13(3): 406-415.
- [26] 林乃明, 谢瑞珍, 邹娟娟, 等. 表面织构改善钛合金摩擦学性能的研究进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2018, 47(8): 2592-2599.
- LIN Nai-ming, XIE Rui-zhen, ZOU Jiao-juan, et al. Research progress on surface texture for improving tribological properties of titanium alloys[J]. *Rare metal materials and engineering*, 2018, 47(8): 2592-2599.
- [27] 袁思欢. 沟槽型表面织构的摩擦特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- YUAN Si-huan. Research on friction properties of micro-grooves surface textures[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [28] 汤勇, 唐恒, 万珍平, 等. 表面织构流体动压润滑性能的研究进展[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(9): 1-11.
- TANG Yong, TANG Heng, WAN Zhen-ping, et al. Research progress of hydrodynamic lubrication of surface texture[J]. *Journal of South China University of Technology (natural science edition)*, 2017, 45(9): 1-11.
- [29] 程香平, 孟祥铠, 彭旭东, 等. 大圆形孔端面机械密封性能分析[J]. *润滑与密封*, 2012, 37(5): 27-31.
- CHENG Xiang-ping, MENG Xiang-kai, PENG Xu-dong, et al. Analysis on seal performance of mechanical seals with macro-pores[J]. *Lubrication engineering*, 2012, 37(5): 27-31.
- [30] WANG Xiao-lei, 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.
- [31] 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.
- [32] GRABON W, KOSZELA W, PAWLUS P, et al. Improving tribological behaviour of piston ring-cylinder liner frictional pair by liner surface texturing[J]. *Tribology international*, 2013, 61: 102-108.
- [33] 历建全, 朱华. 表面织构及其对摩擦学性能的影响[J]. *润滑与密封*, 2009, 34(2): 94-97, 103.
- LI Jian-quan, ZHU Hua. Surface texture and its influence on tribological properties[J]. *Lubrication engineering*, 2009, 34(2): 94-97, 103.
- [34] 邱孝聪, 樊曙天, 伍勇. 表面织构改善摩擦磨损性能的研究进展[J]. *润滑与密封*, 2013, 38(8): 121-124.
- QIU Xiao-cong, FAN Shu-tian, WU Yong. Study of surface texture for improving friction and wear properties[J]. *Lubrication engineering*, 2013, 38(8): 121-124.
- [35] 贾洪铎, 于海武, 唐火红, 等. 微凸起织构化 PDMS 表面静摩擦特性研究[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2016, 39(12): 1614-1618.
- JIA Hong-duo, YU Hai-wu, TANG Huo-hong, et al. Research on static friction performances of textured surface of PDMS with micro convexes[J]. *Journal of Hefei University of Technology (natural science)*, 2016, 39(12): 1614-1618.
- [36] 侯启敏, 杨学锋, 王守仁, 等. 仿生织构类型及其对表面摩擦性能影响[J]. *中国表面工程*, 2020, 33(3): 18-32.
- HOU Qi-min, YANG Xue-feng, WANG Shou-ren, et al. Bionic texture types and their influence on surface friction properties[J]. *China surface engineering*, 2020, 33(3): 18-32.
- [37] 李一楠, 张勇, 冯天明, 等. 放电沉积凸貌微织构表面动压润滑性能仿真研究[J]. *表面技术*, 2019, 48(8): 59-67.
- LI Yi-nan, ZHANG Yong, FENG Tian-ming, et al. Simulation study on hydrodynamic lubrication performance of convex texture surface based on discharge deposition[J]. *Surface technology*, 2019, 48(8): 59-67.
- [38] 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.
- YIN Ming-hu, CHEN Guo-ding, GAO Dang-cheng, 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.
- [39] 高元, 王文中, 赵自强, 等. 表面织构对滑动轴承润滑性能的影响[J]. *润滑与密封*, 2016, 41(8): 6-13.
- GAO Yuan, WANG Wen-zhong, ZHAO Zi-qiang, et al. Effects of surface texture on lubrication performance of journal bearing[J]. *Lubrication engineering*, 2016, 41(8): 6-13.
- [40] QIU Ming-feng, DELIC A, RAEYMAEKERS B. The effect of texture shape on the load-carrying capacity of gas-lubricated parallel slider bearings[J]. *Tribology letters*, 2012, 48(3): 315-327.
- [41] 彭龙龙, 汪久根, 彭娟娟, 等. 表面织构对油水混合液润滑轴承湍流润滑性能的影响[J]. *润滑与密封*, 2015, 40(11): 30-34.
- PENG Long-long, WANG Jiu-gen, PENG Juan-juan, et al. Influences of surface texture on turbulent lubrication of journal bearing with oil and water mixture[J]. *Lubrication engineering*, 2015, 40(11): 30-34.
- [42] 王国荣, 廖文玲, 赵明建. 复合织构化压裂泵柱塞密封副动压润滑性能仿真研究[J]. *润滑与密封*, 2019, 44(1): 20-30.
- WANG Guo-rong, LIAO Wen-ling, ZHAO Ming-jian. Simulation analysis on hydrodynamic lubrication performance of fracturing pumper plunger seal with compound texture[J]. *Lubrication engineering*, 2019, 44(1): 20-30.
- [43] 钟林, 魏刚, 李宇, 等. 表面织构形状对牙轮钻头轴承摩擦学性能影响的实验研究[J]. *润滑与密封*, 2020, 45(3): 27-32.
- ZHONG Lin, WEI Gang, LI Yu, et al. Experimental study on the influence of surface texture on tribological properties of bit bearing[J]. *Lubrication engineering*, 2020, 45(3): 27-32.
- [44] 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.
- [45] SCHUH J K, EWOLDT R H. Asymmetric surface textures decrease friction with Newtonian fluids in full film lubricated sliding contact[J]. *Tribology international*, 2016, 97: 490-498.
- [46] 李俊玲, 陈平, 邵天敏, 等. 葫芦形微凹坑对不锈钢表面摩擦学性能的影响[J]. *摩擦学报*, 2016, 36(2): 207-214.  
LI Jun-ling, CHEN Ping, SHAO Tian-min, et al. The effect of gourd-shaped surface texture on tribological performance of stainless steel[J]. *Tribology*, 2016, 36(2): 207-214.
- [47] UDDIN M S, LIU Y W. Design and optimization of a new geometric texture shape for the enhancement of hydrodynamic lubrication performance of parallel slider surfaces[J]. *Biosurface and biotribology*, 2016, 2(2): 59-69.
- [48] 卫培梁. 表面点接触润滑及筝形织构润滑摩擦特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.  
WEI Pei-liang. Research on friction characteristics of surface point contact lubrication and kite-shaped texture lubrication[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [49] PETTERSSON U, JACOBSON S. Influence of surface texture on boundary lubricated sliding contacts[J]. *Tribology international*, 2003, 36(11): 857-864.
- [50] CHEN Ping, XIANG Xin, SHAO Tian-min, et al. Effect of triangular texture on the tribological performance of die steel with TiN coatings under lubricated sliding condition[J]. *Applied surface science*, 2016, 389: 361-368.
- [51] SEDLAČEK M, PODGORNİK B, RAMALHO A, et al. Influence of geometry and the sequence of surface texturing process on tribological properties[J]. *Tribology international*, 2017, 115: 268-273.
- [52] 祁鹏浩, 仝哲, 刘奇, 等. 表面织构化 DLC 涂层在脂润滑下的摩擦学性能研究[J]. *表面技术*, 2021, 50(1): 296-304.  
QI Peng-hao, TONG Zhe, LIU Qi, et al. Tribological properties of DLC coated textured surfaces under grease lubrication[J]. *Surface technology*, 2021, 50(1): 296-304.
- [53] 王洪涛. 油润滑条件下减摩织构表面的优化设计[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.  
WANG Hong-tao. Optimization design of antifriction textured surface under oil lubrication[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [54] YUE Hong-zhi, DENG Jian-xin, GE Dong-liang, et al. Effect of surface texturing on tribological performance of sliding guideway under boundary lubrication[J]. *Journal of manufacturing processes*, 2019, 47: 172-182.
- [55] 徐文静. 圆形微凹坑织构对动压滑动轴承润滑性能的影响[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2017.  
XU Wen-jing. Effect of the circular micro-dimple textures on the lubrication performance of hydrodynamic sliding bearings[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2017.
- [56] 王劲孚, 钱炜, 熊磊, 等. 表面织构排布形式对其润滑特性的影响[J]. *润滑与密封*, 2015, 40(4): 86-90.  
WANG Jin-fu, QIAN Wei, XIONG Lei, et al. Effect of surface texture arrangements on lubrication characteristics [J]. *Lubrication engineering*, 2015, 40(4): 86-90.
- [57] 梁志强, 李蒙招, 陈碧冲, 等. 基于微磨削方法的微织构刀具制备与切削性能研究[J]. *表面技术*, 2020, 49(2): 143-150.  
LIANG Zhi-qiang, LI Meng-zhao, CHEN Bi-chong, et al. Fabrication and cutting performance of micro-textured tools based on micro-grinding[J]. *Surface technology*, 2020, 49(2): 143-150.
- [58] JAMWAL G, SHARMA S, AWASTHI R K. The dynamic performance analysis of chevron shape textured hydrodynamic bearings[J]. *Industrial lubrication and tribology*, 2019, 72(1): 1-8.
- [59] 毛亚洲, 杨建玺, 刘永刚. 织构分布对动压滑动轴承油膜压力的影响[J]. *润滑与密封*, 2018, 43(6): 55-60, 71.  
MAO Ya-zhou, YANG Jian-xi, LIU Yong-gang. Analysis of influence of oil film pressure distribution of textured hydrodynamic sliding bearing[J]. *Lubrication engineering*, 2018, 43(6): 55-60, 71.
- [60] HENRY Y, BOUYER J, FILLON M. An experimental analysis of the hydrodynamic contribution of textured thrust bearings during steady-state operation: A comparison with the untextured parallel surface configuration[J]. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, part J: Journal of engineering tribology*, 2015, 229(4): 362-375.
- [61] 齐焯, 常秋英, 沈宗泽. 表面织构的深度影响润滑油膜承载能力的机制研究[J]. *润滑与密封*, 2012, 37(5): 39-42.  
QI Ye, CHANG Qiu-ying, SHEN Zong-ze. The influence of surface texture depth on the load bearing capacity of oil film[J]. *Lubrication engineering*, 2012, 37(5): 39-42.
- [62] 厉淦, 沈明学, 孟祥铠, 等. 316L 不锈钢沟槽型表面微织构减摩特性实验研究[J]. *功能材料*, 2015, 46(2): 2033-2037.  
LI Gan, SHEN Ming-xue, MENG Xiang-kai, et al. An experimental study on tribological properties of groove-textured surfaces of 316L stainless steel[J]. *Journal of functional materials*, 2015, 46(2): 2033-2037.
- [63] JANSSEN A, PINEDO B, IGARTUA A, et al. Study on friction and wear reducing surface micro-structures for a positive displacement pump handling highly abrasive shale oil[J]. *Tribology international*, 2017, 107: 1-9.
- [64] MENG Rong, DENG Jian-xin, LIU Ya-yun, et al. Improving tribological performance of cemented carbides by combining laser surface texturing and W-S-C solid lubricant coating[J]. *International journal of refractory metals and hard materials*, 2018, 72: 163-171.
- [65] 孙建芳, 李傲松, 苏峰华, 等. 表面织构钛合金的干摩擦和全氟聚醚油润滑下的摩擦学性能研究[J]. *摩擦学报*, 2018, 38(6): 658-664.  
SUN Jian-fang, LI Ao-song, SU Feng-hua, et al. Tribological property of titanium alloy surface with different texture structure under dry friction and perfluoropolyether lubrication[J]. *Tribology*, 2018, 38(6): 658-664.
- [66] 李亚军, 逢显娟, 孙乐民, 等. 激光表面织构化对 45 钢摩擦磨损性能的影响[J]. *表面技术*, 2018, 47(8): 147-

154.  
LI Ya-jun, PANG Xian-juan, SUN Le-min, et al. Effects of laser surface texturing on friction and wear properties of 45 steel[J]. Surface technology, 2018, 47(8): 147-154.
- [67] 蔡兴兴. 混合润滑状态下织构化表面摩擦特性的数值计算与试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.  
CAI Xing-xing. Numerical calculation and experimental study on textured surface tribology performance under mixed lubrication[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [68] 路继松, 宋新涛, 王晓力. 表面织构对水润滑轴承混合润滑性能的影响[J]. 润滑与密封, 2019, 44(11): 29-33.  
LU Ji-song, SONG Xin-tao, WANG Xiao-li. The influence of surface texture on mixed lubrication performance of water-lubricated bearing[J]. Lubrication engineering, 2019, 44(11): 29-33.
- [69] 何霞, 杜文鑫, 王国荣, 等. 凹槽型织构对钻头滑动轴承表面摩擦学性能影响分析[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(1): 1-8.  
HE Xia, DU Wen-xin, WANG Guo-rong, et al. Effects of groove texture on tribological performance of sliding bearing surface of drill bit[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering, 2021, 40(1): 1-8.
- [70] 李东志, 马晨波, 孙见君, 等. 考虑空化的倾斜织构表面摩擦学性能 CFD 分析[J]. 润滑与密封, 2018, 43(8): 76-81.  
LI Dong-zhi, MA Chen-bo, SUN Jian-jun, et al. CFD analysis of tribological properties of inclined texture surface with consideration of cavitation[J]. Lubrication engineering, 2018, 43(8): 76-81.
- [71] ARSLAN A, MASJUKI H H, VARMAN M, et al. Effects of texture diameter and depth on the tribological performance of DLC coating under lubricated sliding condition [J]. Applied surface science, 2015, 356: 1135-1149.
- [72] 苏峰华, 毛川, 李助军. 织构深度对不锈钢表面油润滑条件下摩擦学性能影响的试验和仿真研究[J]. 摩擦学学报, 2019, 39(2): 181-187.  
SU Feng-hua, MAO Chuan, LI Zhu-jun. Experiment and simulation study on the effect of texture depth on tribological properties of stainless steel surface under oil lubricating condition[J]. Tribology, 2019, 39(2): 181-187.
- [73] 杨国来, 金晶, 张明明, 等. 不同织构几何参数对轴向柱塞泵配流副动压支承的影响研究[J]. 液压气动与密封, 2019, 39(10): 32-35.  
YANG Guo-lai, JIN Jing, ZHANG Ming-ming, et al. Study on the influence of different texture geometric parameters on the dynamic pressure support of axial piston pump valve plate[J]. Hydraulics pneumatics & seals, 2019, 39(10): 32-35.
- [74] 蒋雯. 皮秒激光与电化学复合刻蚀制备表面织构及其摩擦性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.  
JIANG Wen. Study on preparation and friction properties of surface texture produced by picosecond laser electrochemical composite etching[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
- [75] 张东亚, 孙喜洲, 高峰, 等. 表面织构参数对液压马达滑靴副的摩擦学性能影响研究[J]. 表面技术, 2019, 48(4): 230-236.  
ZHANG Dong-ya, SUN Xi-zhou, GAO Feng, et al. Effect of texture parameters on tribological performance of slipper surface in hydraulic motor[J]. Surface technology, 2019, 48(4): 230-236.
- [76] 董保栋. 激光加工交叉沟槽织构表面润滑理论与摩擦性能试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.  
DONG Bao-dong. Investigation of lubrication theory and tribological characteristics experiment on crosshatched grooves surface with laser micro-texture[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
- [77] 王胜伟. 边界润滑状态下面齿轮传动的失效机理研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2015.  
WANG Sheng-wei. Research on failure mechanism of face-gear drive under boundary lubrication conditions[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2015.
- [78] 苗嘉智, 郭智威, 袁成清. 表面织构对内燃机缸套-活塞环系统摩擦性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(4): 465-471.  
MIAO Jia-zhi, GUO Zhi-wei, YUAN Cheng-qing. Effect of textured surface on the friction performance of cylinder liner-piston ring system in the internal combustion engine [J]. Tribology, 2017, 37(4): 465-471.
- [79] 张东亚, 张辉, 秦立果, 等. 表面织构对巴氏合金轴承材料摩擦学性能影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(12): 30-34, 52.  
ZHANG Dong-ya, ZHANG Hui, QIN Li-guo, et al. Effect of surface texturing on tribological properties of Babbitt alloy[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (natural science edition), 2014, 42(12): 30-34, 52.
- [80] MOHMAD M, ABDOLLAH M F B, TAMALDIN N, et al. Frictional characteristics of laser surface textured activated carbon composite derived from palm kernel[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2018, 95(5-8): 2943-2949.
- [81] 姜莉莉. 基于激光工艺制备的表面微织构齿面摩擦性能研究[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2020.  
JIANG Li-li. Research on friction properties of micro-textured tooth surface based on laser technology[D]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2020.
- [82] 李直, 陈剑, 沈锦龙, 等. 线接触滚/滑状态下表面形貌的弹性变形研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(5): 142-148.  
LI Zhi, CHEN Jian, SHEN Jin-long, et al. Elastic deformation of surface topography under line contact and sliding-rolling conditions[J]. Journal of mechanical engineering, 2018, 54(5): 142-148.
- [83] 宋克峰. 模压烧结制备复杂织构的 PTFE 表面及其摩擦学性能[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.  
SONG Ke-feng. Preparation and tribological properties of complex textured PTFE surfaces by embossing and thermal annealing[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2020.
- [84] 高元. 表面织构对滑动轴承及内燃机连杆轴承的润滑影响研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.



- GAO Yuan. Effects of surface texture on lubrication performance of journal bearing and engine connecting rod bearing[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [85] 何霞, 李梦媛, 江士凯, 等. 润滑介质对织构化表面摩擦学性能影响的实验研究[J]. 润滑与密封, 2018, 43(4): 8-14.
- HE Xia, LI Meng-yuan, JIANG Shi-kai, et al. Experimental study on the influence of different lubrication mediums on tribological properties of textured surface[J]. Lubrication engineering, 2018, 43(4): 8-14.
- [86] 马明明, 连峰, 臧路苹, 等. 凹坑深度对铝合金表面在不同润滑介质中摩擦学性能的影响[J]. 金属学报, 2017, 53(4): 406-414.
- MA Ming-ming, LIAN Feng, ZANG Lu-ping, et al. Effect of dimple depth on friction properties of aluminum alloy under different lubrication conditions[J]. Acta metallurgica sinica, 2017, 53(4): 406-414.
- [87] 解玄, 尹必峰, 华希俊, 等. 脂润滑条件下 PTFE/GCr15 激光织构表面滑动摩擦性能研究[J]. 表面技术, 2019, 48(8): 77-82.
- XIE Xuan, YIN Bi-feng, HUA Xi-jun, et al. Research on sliding friction properties of PTFE/GCr15 laser textured surface under grease lubrication[J]. Surface technology, 2019, 48(8): 77-82.
- [88] 路慧彪, 曹淑华, 唐平. 入口压力对织构表面承载力的影响[J]. 机床与液压, 2018, 46(5): 111-113, 154.
- LU Hui-biao, CAO Shu-hua, TANG Ping. Influence of supply pressure on carrying capacity of texture surface[J]. Machine tool & hydraulics, 2018, 46(5): 111-113, 154.
- [89] 张生光, 王文中, 赵自强. 表面织构及供油量对润滑性能影响的建模分析[J]. 表面技术, 2017, 46(6): 1-8.
- ZHANG Sheng-guang, WANG Wen-zhong, ZHAO Zi-qiang. Effect of surface texture and oil supply on lubricating performance based on modeling[J]. Surface technology, 2017, 46(6): 1-8.
- [90] 刘强, 林乃明, 邹娟娟, 等. 改善钢铁材料摩擦学行为的表面织构研究现状[J]. 表面技术, 2016, 45(5): 41-50.
- LIU Qiang, LIN Nai-ming, ZOU Jiao-juan, et al. Recent developments in improving tribological behaviors of iron and steel via surface texturing[J]. Surface technology, 2016, 45(5): 41-50.
- [91] 钟林. 表面织构对牙轮钻头滑动轴承润滑减磨的机理研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
- ZHONG Lin. Study of surface texture on lubrication and antifriction mechanism of the rock bit journal bearing[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [92] 万轶, 李建亮, 熊党生. 滑动速度对织构化表面润滑状态的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(12): 4442-4447.
- WAN Yi, LI Jian-liang, XIONG Dang-sheng. Influence of sliding velocity on lubrication state of surface texturing[J]. Journal of Central South University (science and technology), 2015, 46(12): 4442-4447.
- [93] 温诗铸. 润滑理论研究的进展与思考[J]. 摩擦学学报, 2007, 27(6): 497-503.
- WEN Shi-zhu. Study on lubrication theory-progress and thinking-over[J]. Tribology, 2007, 27(6): 497-503.
- [94] ETSION I, KLIGERMAN Y, HALPERIN G. Analytical and experimental investigation of laser-textured mechanical seal faces[J]. Tribology transactions, 1999, 42(3): 511-516.
- [95] YU Hai-wu, WANG Xiao-lei, 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.
- [96] 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 Hai-wu, DENG Hai-shun, 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.
- [97] 廖文玲. 摩擦副接触方式变化对织构表面动压润滑性能的影响[J]. 成都工业学院学报, 2020, 23(3): 1-9.
- LIAO Wen-ling. The influence of contact mode of friction pair on the hydrodynamic lubrication performance of textured surface[J]. Journal of Chengdu Technological University, 2020, 23(3): 1-9.
- [98] 项欣, 陈平, 李俊玲, 等. 圆凹坑织构对线接触摩擦副摩擦学性能的影响[J]. 中国表面工程, 2015, 28(4): 33-38.
- XIANG Xin, CHEN Ping, LI Jun-ling, et al. Influence of dimple texture on tribological behavior of line contact friction pairs[J]. China surface engineering, 2015, 28(4): 33-38.
- [99] 陈怀松. 边界润滑状态下往复摩擦磨损的数值仿真研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
- CHEN Huai-song. Study of numerical simulation on reciprocating wear under boundary lubrication condition[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005.
- [100] 李冰. 摩擦副表面微凸体油膜弹性支承效应的试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- LI Bing. Experimental study on the elastic support effect of micro-convex oil film on the surface of friction pair[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [101] 许迪初. 边界润滑动态特性及其实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- XU Di-chu. Dynamic features and experimental investigations in boundary lubrication[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [102] LIU Zhan, MENG Xiang-hui, WEN Cheng-wei, et al. On the oil-gas-solid mixed bearing between compression ring and cylinder liner under starved lubrication and high boundary pressures[J]. Tribology international, 2019, 140: 105869.
- [103] 周刘勇, 刘政, 张伟, 等. 边界和混合润滑下仿鲨鱼皮织构的减摩性能[J]. 机械设计与制造, 2019(10): 166-169.
- ZHOU Liu-yong, LIU Zheng, ZHANG Wei, et al. Antifriction properties of shark skin texture under boundary and mixed lubrication[J]. Machinery design & manufac-

- ture, 2019(10): 166-169.
- [104] 纪敬虎, 周加鹏, 王沫阳, 等. 初始表面粗糙度对沟槽织构摩擦性能的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(2): 139-143.  
JI Jing-hu, ZHOU Jia-peng, WANG Mo-yang, et al. Effect of initial roughness on the tribological properties of textured surfaces with micro-grooves[J]. Surface technology, 2019, 48(2): 139-143.
- [105] 李甜甜, 孙耀宁, 张丽, 等. 表面织构化对摩擦学性能影响的研究进展[J]. 机械工程材料, 2020, 44(5): 44-48.  
LI Tian-tian, SUN Yao-ning, ZHANG Li, et al. Research progress on effect of surface texturing on tribological properties[J]. Materials for mechanical engineering, 2020, 44(5): 44-48.
- [106] ITO H, KANEDA K, YUHTA T, et al. Reduction of polyethylene wear by concave dimples on the frictional surface in artificial hip joints[J]. The journal of arthroplasty, 2000, 15(3): 332-338.
- [107] 高贵, 龚俊, 李瑞红, 等. 表面织构对 PTFE 复合材料摩擦磨损行为的影响[J]. 摩擦学学报, 2020, 40(6): 697-706.  
GAO Gui, GONG Jun, LI Rui-hong, et al. Effect of surface texture on friction and wear behavior of PTFE composites[J]. Tribology, 2020, 40(6): 697-706.
- [108] 段仁慧, 刘志奇, 王骁, 等. 磨料水射流-离子氮化复合处理对 316 不锈钢表面摩擦性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(7): 149-158.  
DUAN Ren-hui, LIU Zhi-qi, WANG Xiao, et al. Effect of abrasive water jet-plasma nitriding duplex treatment on friction property of 316 stainless steel surface[J]. Surface technology, 2020, 49(7): 149-158.
- [109] LI Xue-mu, DENG Jian-xin, YUE Hong-zhi, et al. Wear performance of electrohydrodynamically atomized WS<sub>2</sub> coatings deposited on biomimetic shark-skin textured surfaces[J]. Tribology international, 2019, 134: 240-251.
- [110] 顾春兴. 织构化内燃机关键摩擦副的混合润滑分析及减摩机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.  
GU Chun-xing. Analysis on the performance of the textured internal combustion engine critical friction pairs under the mixed lubrication regime and research on the involved friction reducing mechanism[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [111] 陈小兰, 曾良才, 湛从昌. 计入粗糙度的液压缸仿生微织构耦合效应研究[J]. 润滑与密封, 2019, 44(9): 37-43.  
CHEN Xiao-lan, ZENG Liang-cai, ZHAN Cong-chang. Research on coupling effect of biomimetic micro-texture of hydraulic cylinder considering roughness[J]. Lubrication engineering, 2019, 44(9): 37-43.
- [112] 纪敬虎, 管采薇, 符昊, 等. 粗糙度对微凹坑织构化表面摩擦学性能的影响[J]. 润滑与密封, 2018, 43(1): 20-25.  
JI Jing-hu, GUAN Cai-wei, FU Hao, et al. Effect of roughness on tribological properties of textured surfaces[J]. Lubrication engineering, 2018, 43(1): 20-25.
- [113] 马明明, 连峰, 姜康, 等. 织构表面在油和水中的润湿性及摩擦学性能[J]. 材料研究学报, 2018, 32(3): 191-199.  
MA Ming-ming, LIAN Feng, JIANG Kang, et al. Wettability and tribological performance of texture surface in oil and water[J]. Chinese journal of materials research, 2018, 32(3): 191-199.
- [114] 董青. 表面润湿性对粗糙表面接触界面摩擦特性的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.  
DONG Qing. Effect of surface wettability on the friction in rough contact interface[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.
- [115] 王新宇, 张帅拓, 刘建, 等. 表面织构对管道内壁碳基涂层润湿性与摩擦学性能影响[J]. 摩擦学学报, 2021, 41(1): 86-94.  
WANG Xin-yu, ZHANG S T, LIU Jian, et al. Effect of surface texture on wettability and tribological properties of carbon-based coatings on the inner surface of pipes [J]. Tribology, 2021, 41(1): 86-94.
- [116] CONIGLIO N, MEZGHANI S, EL MANSORI M, et al. Effect of nano-penning surface texturing on self-cleaning function[J]. Surface and coatings technology, 2018, 353: 126-134.
- [117] 王权岱, 李志龙, 郭兵兵, 等. 不同润滑状态下表面润湿性的摩擦学特性研究[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(6): 665-672.  
WANG Quan-dai, LI Zhi-long, GUO Bing-bing, et al. Tribological properties of surface wettability under different lubrication regimes[J]. Tribology, 2018, 38(6): 665-672.
- [118] 毛璐璐, 郑清春, 张春秋, 等. 人工髋关节微织构减摩性能及织构参数优化[J]. 润滑与密封, 2020, 45(8): 84-89.  
MAO Lu-lu, ZHENG Qing-chun, ZHANG Chun-qiu, et al. Micro-texture friction reducing performance and texture parameter optimization of artificial hip joint[J]. Lubrication engineering, 2020, 45(8): 84-89.
- [119] ZHANG Hui, HUA Meng, DONG Guang-neng, et al. A mixed lubrication model for studying tribological behaviors of surface texturing[J]. Tribology international, 2016, 93: 583-592.
- [120] RYK G, ETSION I. Testing piston rings with partial laser surface texturing for friction reduction[J]. Wear, 2006, 261(7-8): 792-796.
- [121] 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.
- [122] TANG Wei, ZHOU Yuan-kai, 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.
- [123] 张辉, 刘洋, 王伟, 等. 织构化表面设计及其摩擦学应用[J]. 机械工程学报, 2019, 55(17): 85-93.  
ZHANG Hui, LIU Yang, WANG Wei, et al. Surface texture design and its tribological application[J]. Journal of mechanical engineering, 2019, 55(17): 85-93.