

# 活塞-缸套表面纹理摩擦磨损特性研究进展

程家豪, 陈文刚\*, 王泽霄, 郭思良, 魏北朝, 王海军, 袁浩恩, 罗海

(西南林业大学 机械与交通学院, 昆明 650224)

**摘要:** 减少摩擦损失是高性能发动机效率的一个重要方面。活塞作为发动机组成的一个重要部件, 在机械损失上损耗了发动机产生的总能量的 40%, 近乎于占据了发动机摩擦损失能量的一半, 因此在发动机活塞-缸套上制备表面织构以改善活塞摩擦副的摩擦学性能, 保持发动机在实际运行中拥有良好的性能是现在发动机发展不可或缺的。表面纹理已广泛应用于改善滑动表面的摩擦性能, 减少磨损、减低摩擦等是表面纹理化应用在减摩抗磨方面最直接的效果体现。主要围绕近些年发表关于表面织构几何参数对活塞-缸套的影响, 从有限元模拟分析以及实验室试验研究等两个方面综述织构应用在活塞-缸套上的研究进展, 再从织构形状、织构面密度、织构排列方式及其他参数等方面对活塞/缸套的摩擦磨损影响进行对比分析, 以帮助后续研究者在该方向的研究提供参考。依据机械部件之间的磨损量以及摩擦因数体现出表面织构运用之后的摩擦学性能。最后对表面织构在活塞-缸套上的发展趋势进行展望。

**关键词:** 表面织构; 活塞-缸套; 摩擦磨损; 有限元仿真; 试验研究

**中图分类号:** TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)11-0128-11

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.11.010



扫码查看文章讲解

## Progress of Research on Frictional Wear Characteristics of Piston-cylinder Liner Surface Texture

CHENG Jia-hao, CHEN Wen-gang\*, WANG Ze-xiao, GUO Si-liang,  
WEI Bei-chao, WANG Hai-jun, YUAN Hao-en, LUO Hai

(School of Machinery and Transportation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

**ABSTRACT:** Surface weave has become one of the effective ways to reduce friction and antiwear in modern machinery. The weave parameters, lubrication state, surface morphological characteristics, location and distribution all play an important role in friction and antiwear. As an important part of the engine, the piston loses 40% of the total energy generated by the engine, which is nearly half of the energy lost by the engine friction. Therefore, it is indispensable for the development of the engine to prepare the surface weave on the piston-cylinder liner to improve the tribological performance of the piston friction and keep the engine in good performance in actual operation. In this paper, the research progress of surface weave application on piston-cylinder liner in terms of finite element simulation and laboratory experimental research were reviewed, and then the frictional wear effects on piston/cylinder liner in terms of weave shape,

收稿日期: 2022-09-11; 修订日期: 2022-11-11

Received: 2022-09-11; Revised: 2022-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(51865053); 国家外专局外国专家项目(G2021039004); 云南省农业联合专项项目(202101BD070001-051)

Fund: National Natural Science Foundation of China(51865053); Foreign Experts Program of the State Administration of Foreign Affairs(G2021039004); Joint Special Project for Agriculture in Yunnan Province(202101BD070001-051)

引文格式: 程家豪, 陈文刚, 王泽霄, 等. 活塞-缸套表面纹理摩擦磨损特性研究进展[J]. 表面技术, 2023, 52(11): 128-138.

CHENG Jia-hao, CHEN Wen-gang, WANG Ze-xiao, et al. Progress of Research on Frictional Wear Characteristics of Piston-cylinder Liner Surface Texture[J]. Surface Technology, 2023, 52(11): 128-138.

\*通信作者 (Corresponding author)

weave surface density, weave arrangement and other parameters were compared. The tribological performance of the surface weave after its application was shown by the wear amount and friction coefficient between mechanical components. Finally, the development trend of surface weave in piston/cylinder liner was discussed.

This paper summarized the analysis in terms of weave shape, weave surface density, weave arrangement, and other parameters in both finite element simulations and laboratory experimental studies. The surface weave in the study was mainly divided into two forms: raised and depressed, where the raised weave was mainly used to increase the friction coefficient and hydrophobicity, while the depressed weave was on the contrary, generally used to reduce the friction coefficient and reduce the resistance in the sliding process. In the study of mechanical components, the depressed weave was often used to increase the energy conversion efficiency, the service life of the component and the friction coefficient between the contact surfaces. The paper also went on to discuss the forming method of depression weaving, which was summarized in detail for the laser surface texturing method, as it was one of the most cost-effective and effective of the existing surface weaving methods, and was one of the newest techniques for improving the tribological properties of mechanical components. Secondly, this paper focused on the effect of the depressed weave on the surface friction performance of mechanical components in both finite element simulation analysis and laboratory experiments, and summarized the optimal combination of parameters from the effect of the weave geometry on the piston-cylinder liner. The results of the effect of the geometric parameters discussed showed that each shape of the weave structure had a different effect on the results, while this paper focused on the effect of triangular, rectangular, bar, V-shaped, elliptical, hexagonal and spherical textures on the friction properties. For the effect of surface density of the weave on the friction coefficient, the results showed that both too large and too small surface densities had a suppressive effect on the friction coefficient, which was not conducive to the advantages of micro-weave. The effects of various arrangements of surface weave on friction properties were discussed in detail in this paper.

The effect of surface weave on the piston-cylinder liner under different geometrical parameters is summarized in this paper from finite element simulations and laboratory experimental studies. Some suggestions are made for the existing problems of surface weaving, which are expected to provide a reference for the subsequent researchers. And in the subsequent development of surface weaving, it will be extended to more fields.

**KEY WORDS:** surface weaving; piston-cylinder liner; frictional wear; finite element simulation; experimental study

随着如今全球的能源消耗, 以及近年来实施严格的排放规则, 针对于  $\text{CO}_2$  排放的车辆制定了新标准<sup>[1]</sup>。通过降低燃料消耗率和  $\text{CO}_2$  排放来提高机械效率一直是内燃机 (IC) 设计工程师和研究人员面临的一大挑战。在内燃机实际运行燃料消耗中接近三分之一的燃料所产生的能量被用来克服汽车各个部件所产生的摩擦, 其中占比较大的包括发动机、轮胎、变速器和制动器。而用来克服发动机的能量消耗在这几个中是最高的, 同时在整个发动机消耗能量的比例上活塞-缸套摩擦副又是其中最高的。减少活塞-缸套的摩擦损失直接关系到整个发动机的燃油经济性、可靠性以及动力性等, 因此通过有效的方法对活塞-缸套进行减摩对发动机的发展历程是具有重要意义的<sup>[2]</sup>。

表面织构已经成为现代机械减摩抗磨的有效方式之一。织构参数、润滑状态、表面形貌特征、位置以及分布都对减摩抗磨起到了很重要的作用<sup>[3]</sup>。Nikam 等<sup>[4]</sup>研究表明, 表面织构通过在物体的表面进行特定图案的制造, 特定图案的作用在实验过程中达到增强表面性能的能力, 比如摩擦、空气吸入、接触面积等。并且还提到, 通过表面织构的作用达到减少

摩擦磨损, 可以提高相互接触表面之间的使用寿命。此外 Azmi 等<sup>[5]</sup>在表面织构改善表面的摩擦学性能的应用上可以通过减少摩擦和磨损的方式来达到效果。而表面织构之所以减少表面之间的摩擦因数, 是因为表面上的纹理会将接触面之间的接触面积减少, 从而减少摩擦<sup>[6-7]</sup>。因此在物体表面上制造微观特征是改善两相互作用表面摩擦学性能的有效方法。

最早在 1966 年, Hamilton 等<sup>[8]</sup>通过在机械接触的表面上制造一些微凸起, 并且在自己的实验和理论分析下, 得到减少摩擦因数中最适合的织构尺寸。除此之外表明微织构除了起到减少摩擦的作用外还可以增强摩擦副的承载能力。进入 21 世纪以来, 减少活塞-缸套之间的摩擦磨损被人们广泛探索<sup>[9]</sup>, 较为热点的是在活塞-缸套表面进行织构化处理, 并且表面织构已经被证明是减少活塞-缸套摩擦磨损最有效的方式之一<sup>[10]</sup>。表面织构在较早之前就通过气缸套珩磨而运用在内燃机上<sup>[11-12]</sup>。发展到现在的阶段, 不再局限于用简单的珩磨方式制备的形状, 而是以各种各样的形状呈现在机械接触表面之间<sup>[13]</sup>。表面织构的作用也显而易见, 研究表明, 与无织构的表面进行对比,

进行织构的表面能够减少 20%~50%的摩擦,且在纹理覆盖面积上来说,全纹理的活塞环比部分纹理表面产生了更大的流体动压,达到更好的减摩效果<sup>[14]</sup>。目前针对于织构的应用尚处于研究阶段,主要研究对象集中在活塞-缸套、滑动轴承、切削刀具以及机械密封环等几个方面。Ryk 等<sup>[15]</sup>通过实验研究表面织构对往复式汽车部件摩擦学性能的实用性,结果表明,在简单但具有代表性的试样上,汽车部件摩擦学性能显示出良好的效果,在将织构制备在实际活塞环与缸套段的应用上同样表现出良好的摩擦学性能。在实际生产应用中,日本大丰工业株式会社通过在轴瓦内制备环形沟纹进而提高轴瓦的疲劳强度,在与普通的轴瓦对比之下,拥有纹理的轴瓦展现出良好的抗疲劳强度。目前广泛应用于丰田、铃木等公司对应的产品中<sup>[16]</sup>。在最近几年对于活塞-缸套总体的研究成果显著增加,因此本篇综述旨在结合有限元模拟分析以及实验室模拟试验两方面总结近几年发动机活塞-缸套在表面织构下的摩擦磨损特性研究进展。

## 1 活塞-缸套表面织构的成型方法分析

随着研究的不断深入表面织构的作用也在逐渐被放大,其制备的方式也在最近几十年的研究中不断衍生出多种成型方法。Etsion 等<sup>[17]</sup>通过研究平行推力轴承的激光表面纹理加工(LST)的性能增强,将单向和双向部分 LST 轴承的性能与无纹理轴承的性能进行了比较,显示了 LST 在增加间隙和减少摩擦方面的优势。Pettersson 等<sup>[18]</sup>在文章中提出一种用新技术来制造定义明确的微型压花工具在金属表面制备纹理的方法-金刚石压花法。Qian 等<sup>[19]</sup>通过采用各种技术在摩擦副表面产生微凹坑而减少机械部件之间的摩擦时,开发了一种改进的通过掩膜电化学微加工(TMEMP),其中绝缘层直接附着在阴极上,以在硬铬涂层表面上产生微凹坑。Wakuda 等<sup>[20]</sup>通过对具有高接触压力的圆柱/平面接触界面建模的销盘测试来评估纹理陶瓷表面的摩擦性能研究中提出一种简单高效的制备微织构的方法,磨料喷射加工法。Wang 等<sup>[21]</sup>为提高 SiC 推力轴承在水润滑中的承载能力,通过反应离子刻蚀(RIE)在一个接触面上引入微凹坑,结果表明,通过该方法制造的微凹坑大大提高了轴承的承载能力。Wang 等<sup>[22]</sup>通过在 AISI1045 钢表面用一种方便且经济的压片方式进行微织构,并通过实验表明压片制成的表面凹坑有利于改善机械部件的摩擦学性能。Zhou 等<sup>[23]</sup>提出放电纹理(EDT)技术是一种适用于大规模生产的表面纹理化方法,正被用于对汽车工业中的铝板进行纹理处理。就此研究了放电纹理法(EDT)在不同接触压力和滑动速度下对铝汽车板摩擦行为的影响,结果表明,EDT 织构可以降低接触副在高接触压力下的摩擦因数,而在低接触压力

下增加摩擦因数。Amanov 等<sup>[24]</sup>在研究中提出超声波纳米晶表面改性(UNSM),展示通过 UNSM 技术制备微凹坑的过程,并评估其对摩擦学特性的影响。结果表明 UNSM 处理表面与无纹理表面相比,UNSM 处理表面的摩擦因数降低了约 25%。而如今激光表面纹理法的运用较为广泛。

激光表面纹理法在现有的表面织构成型方法中是成本较低且最行之有效的,也是在改良机械部件摩擦学性能上很新的技术之一<sup>[25-26]</sup>。LST 对产生的织构的形状和尺寸能够起到精确控制以及加工速度的高效性使其在织构成型方法上具有优势。Etsion 等<sup>[27]</sup>研究提到激光表面纹理(LST)在应用方面被大量的用于不同深度和宽度的微凹坑的生产,被用于充当微型储层和微流体动力轴承的要求。Nandakumar 等<sup>[28]</sup>通过研究激光表面纹理(LST)在边界润滑状态下可有效的降低运行时发动机活塞组件的摩擦,对比活塞组件在有织构与无织构的条件下发现,活塞组件在相似的操作条件下有织构的摩擦因数都可以显著的降低。根据 Bathe 提到,利用激光技术在材料表面进行织构的方法最早可以追溯到 20 世纪 80 年代初期,而自 1986 到现在,MEMS 设备就在防止粘附上一直使用 LST。从 20 世纪到现在发表的关于激光表面纹理的文章来看,激光表面纹理技术正在被广泛的应用于制备表面织构,而且在所发表的刊物中的研究提到,LST 技术在机械部件相互接触的表面之间减少了接触面,通过高效的流体动力润滑将磨损率降低<sup>[29-31]</sup>。此外激光表面纹理还可以通过改变活塞表面的微观结构,从而降低摩擦功率。这项方法的运用不止在于减少相互接触表面之间的摩擦因数,还在一定程度上降低了污染气体的排放,同时由于活塞-缸套之间的摩擦磨损减少,一定程度上降低了发动机工作时产生的噪音。除此之外其在活塞方面还具有局部加热,然后快速的凝固,使纹理表面产生硬化的效果。在使用寿命上,激光表面纹理加工出的表面也比机械加工产生的纹理使用寿命更加的长久<sup>[32-34]</sup>。Patel 等<sup>[35]</sup>在将激光表面纹理应用到活塞上试验得出,激光纹理活塞可以有效降低气缸套表面摩擦损失,降低润滑油实际工况下的温度,延长润滑油使用寿命,从而增加发动机活塞使用年限。

通过上述激光表面纹理法在活塞-缸套表面制造织构来看,该方法在与无纹理表面相比活塞环表面全 LST 的摩擦损失显著降低,除此之外激光表面纹理活塞可以将润滑油温度显著的降低,从而将润滑油的使用寿命增加。并且在激光表面纹理活塞中,活塞气缸壁的物体温度保持降低在一定程度保护气缸壁。此外激光表面纹理活塞可以有效的降低摩擦功率,且降低的摩擦损失、温度以及摩擦功率可以有效延长发动机使用寿命。

## 2 活塞-缸套表面织构改性的仿真分析及试验研究

有限元仿真分析作为现在实验过程中不可缺少的环节之一, 在实验进程中优化产品、排除不合理的设计, 并在最后找到影响性能的关键参数。从近年来的文章可以看出对机械部件表面纹理进行仿真分析变得越来越重要, 而表面织构对摩擦性能的影响不止在于其在机械部件表面形成微凹坑从而储存润滑油, 起到二次润滑的效果。通过试验验证织构的效果与仿真分析后的结果完全一致而证明织构在实际运用中的有效性。从近些年的研究中可以了解到, 目前针对活塞-缸套表面织构的研究主要集中在有限元仿真以及实验室试验研究两个主要方面。而试验研究与仿真分析相辅相成, 在探究最佳的织构参数方面, 进行仿真优化绝对是最好的办法之一, 而想要直观的看到织构的效果, 实验室模拟试验也是必不可少的。因此本文结合仿真分析以及实验室试验研究两方面对活塞-缸套表面织构的影响进行综述。

### 2.1 表面织构对活塞-缸套摩擦影响的仿真研究

将表面织构应用在活塞/缸套摩擦副可以有效降低其在实际运行中的摩擦磨损特性。对织构进行优化仿真是目前将织构应用于实际中一种提高经济性、可靠性的有效方法。良好的表面织构在机械部件表面之间可以起到明显的减摩降损作用, 在运用有限元仿真分析结合实验进行验证两者之间的差异性, 有效的提高了织构的运用效率, 并在一定程度上降低了经济的投资。在有限元仿真分析缸套-活塞环表面织构减摩抗磨研究方面, 研究者从织构形状、织构面密度、织构排列方式及其他参数方面进行了很多的研究。

#### 2.1.1 织构形状的影响

表面织构形状上的发展越来越广泛, 不再局限于以往的三角形、圆形和矩形等常规图案。通过研究在不同的织构形状下减摩所得到的效果也存在着一定的差异。Zhang 等<sup>[36]</sup>利用有限元数据分析了不同微织构的形状下工件表面的应力分布。发现在不同微织构的形状下工件表面的最大等效应力值之间存在着明显的区别。并通过数据表明有织构与无织构在最大等效应力值相比, 基本等效数据减少了 3.5%~7.2%。宋文涛等<sup>[37]</sup>研究表面织构对发动机活塞裙部减摩作用机理时, 提出了三角微织构形状、条形纹理以及三角纹理和条形纹理的结合等 3 种图案, 通过有限元模拟分析以及实验数据得出条形纹理摩擦因数最低。Uddin 等<sup>[38]</sup>在对比三角形、圆形、V 型、椭圆形等 4 种常规图案的减摩效果上总结提出一种新的星形图案, 并在设计星形图案时通过优化三角纹理对比薄膜

压力对摩擦因数影响, 由图 1 所示得出, 随着薄膜压力的增加, 摩擦因数会降低。最后通过有限差分方法实现表面纹理的数值建模。仿真结果表明与顶角和取向角相比, 新的“星状”纹理的顶点数量对薄膜压力和摩擦因数有显著影响。

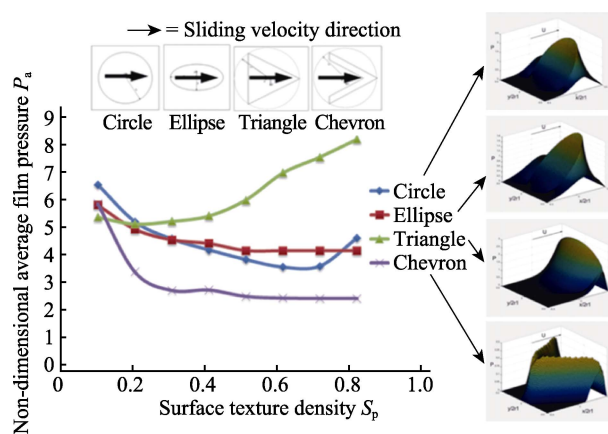


图 1 顶点数对顶点角  $\theta=15^\circ$  和取向角  $\gamma=0^\circ$  处的无量纲平均薄膜压力的影响<sup>[38]</sup>

Fig.1 Effect of vertex number on dimensionless mean film pressure at vertex angle  $\theta=15^\circ$  and orientation angle  $\gamma=0^\circ$ <sup>[38]</sup>

Zavos 等<sup>[39]</sup>使用 Navier-Stokes 方程创建了数值模型, 进行流体-结构相互作用分析计算活塞环在几种发动机运行条件和表面织构模式下的结构完整性。通过在活塞环上制备了球形和矩形微织构说明各种表面人工织构下的流体动力摩擦力。结果表明, 两种织构都可以起到减少摩擦的作用, 但矩形织构的效果更好。马旋等<sup>[40]</sup>通过对比分析沟槽和凹坑两种织构对活塞-缸套的减摩作用的影响, 经过仿真分析得出沟槽形织构在降低摩擦因数上可以达到更好的效果。

通过最后分析结果可以看出, 织构形状对活塞-缸套的减摩效果不存在的单一的表现, 从条状纹理、星形图案到最后的沟槽形织构都起到明显的减摩作用。而在结合有限元仿真分析之后可提前分析出织构对机械部件减摩抗磨上的效果。

#### 2.1.2 织构面密度的影响

表面织构影响活塞-缸套摩擦磨损不止在于其本身在相互接触时减少接触面积。形状、深度和尺寸等对织构减摩效果起到很明显的效果。织构的面密度同样在降低摩擦因数上有着明显的效果。Ahmed 等<sup>[41]</sup>在表面织构几何参数对活塞-缸套的影响时叙述说到, 织构密度在它的数量讨论时可以定义为单位面积上的凹坑。Kligerman 等<sup>[42]</sup>提到在进行数值模拟的时通过仿真分析得到, 织构凹坑的密度的最大化应该是为了将活塞的摩擦降低最低。Babu 等<sup>[43]</sup>在将不同的织构凹坑的参数通过数值建模进行优化后, 认为 16% 的面积密度在圆盘测试台上对销钉测试化学刻蚀工艺时最有利于减少摩擦。尹红泽等<sup>[44]</sup>通过 3D 打印技



术制备三角楔形微织构模拟在发动机活塞部件上的减摩效果时,制造了12组不同织构密度的对比实验,并对比有织构与无织构时的油膜压力对比,如图2所示,得出在有织构时的油膜压力对降低摩擦副间的摩擦因数有着积极作用,并最后发现当织构密度为16.83%时减摩效果最为明显。Venkateswara等<sup>[45]</sup>在模拟活塞运行条件下的工作状况,在纯流体动力学和混合润滑条件下,在其表面引入面密度等各种参数探究其对活塞的影响,结果表明,椭圆状织构在降低活塞摩擦因数等摩擦性能参数方面具有明显的优越性。

织构面密度的分布对于降低摩擦因数来说并不是织构分布的越密效果更好,从不同的研究结果可以了解到,在论述表面织构密度对活塞-缸套摩擦磨损

的影响下,得出当表面织构密度在较低的数值下能得到最佳的摩擦因数值。而当织构的密度越密时,织构在减摩效果上达到相反的作用。

### 2.1.3 织构排列方式的影响

在进行制备织构减摩,提高相互接触的表面之间的使用寿命,减少能量损失,织构排列方式在一定程度上起到举足轻重的作用。黄云磊等<sup>[46]</sup>提到在提高织构减摩的作用的同时,合理的织构分布是很有必要的,而且对于在相同织构下,织构的排列方式和分布的位置都对最后的摩擦学性能产生不同的效果。Suh等<sup>[47]</sup>通过在SKD11钢件上加工出5种角度不同的凹槽织构,如图3a~b所示,图3c~d显示了其在流体润

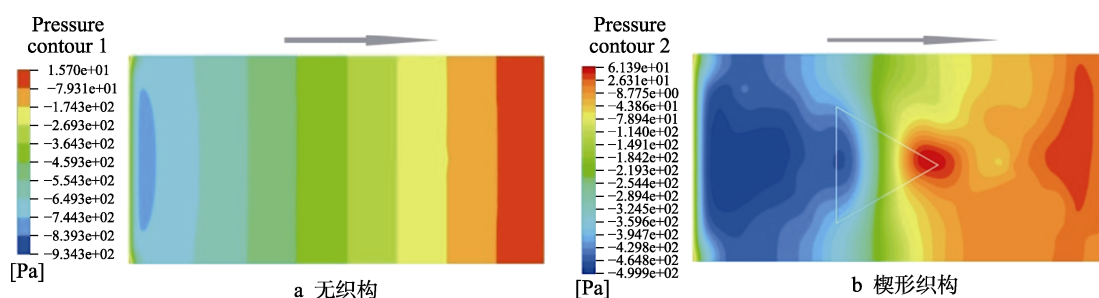


图2 有无织构的油膜内部压力云图对比<sup>[44]</sup>

Fig.2 Comparison of internal pressure plots of oil film with and without texture<sup>[44]</sup>:

a) non-textured surface; b) wedge-textured surface

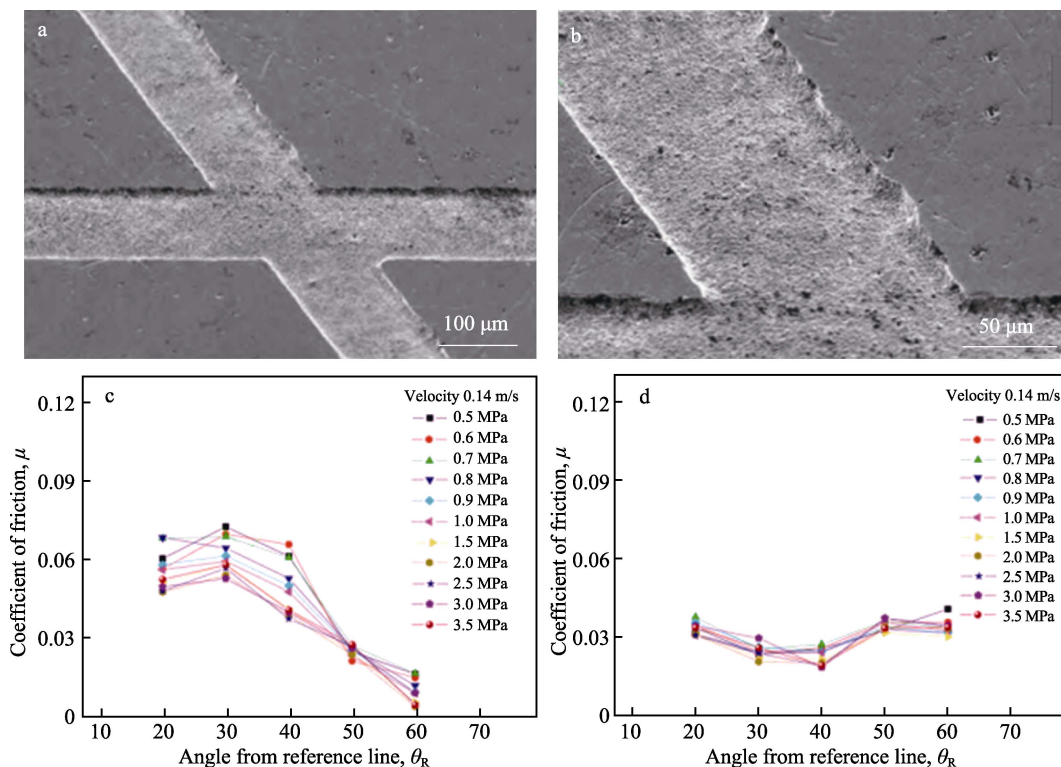


图3 (a) SKD11 钢纹理表面的 SEM 显微图像; (b) 部分放大细节; (c) 摩擦因数与宽度为 70 μm 的十字槽角度的关系; (d) 摩擦因数与横向槽角在宽度 40 μm 上的关系<sup>[47]</sup>

Fig.3 (a) SEM micrograph of the textured surface of SKD11 steel; (b) Partially magnified detail;

(c) Coefficient of friction as a function of the angle of the cross groove with a width of 70 μm;

(d) Relationship between friction coefficient and transverse groove angle in width 40 μm<sup>[47]</sup>

滑状态下的摩擦学性能, 表明在织构在  $40\ \mu\text{m}$  和  $70\ \mu\text{m}$  的宽度下最佳的织构角度分别是  $60^\circ$  和  $40^\circ$ , 由此可以看出织构的宽度与角度在实际磨损中相互影响, 摩擦因数的值也相差较大。

刘伟等<sup>[48]</sup>通过在活塞裙部制造织构减少活塞缸套表面间的磨损量, 为更好了解摩擦磨损机理, 以单个凹坑对平面以及曲面之间的润滑特性利用有限元分析法对其进行分析, 在不同情况下的油膜平均承载力计算中表征出微织构及织构参数的摩擦学特性。结果表明, 在织构与平面接触时, 存在最佳的织构深度、直径或者面积密度使得油膜能够产生的平均承载力最大; 而当与曲面接触时在织构深径比和织构面积率相同的情况下, 直径小的比直径大的情况下更容易得到流体动压力。王洪涛等<sup>[49]</sup>在研究全膜润滑状态下, 3 种不同排布的椭圆形织构的摩擦性能时, 如图 4 所示, 发现 3 种织构的减摩效果大致相同, 但 P1 和 P2 排列方式下的动压承载能力比 P3 方式的效果更佳。Zhong 等<sup>[50]</sup>在 MATLAB 中构造了两种排列方式 ( $0^\circ$ 、 $90^\circ$ ) 的六边形织构, 作者通过数值模拟研究两种织构所产生的润滑膜流速和压力的分布, 得出  $90^\circ$  排列的六边形织构比  $0^\circ$  的织构的承载力更加高一些, 在降低摩擦上的效果也更加的好。因此在探究织构线性交叉排列方式以及多边形织构的排列方式上都对部件表面的减摩效果产生一定的影响。

织构的排列方式对机械部件的摩擦学性能首先体现在其排列形式, 可以具体表现在织构的角度。其次针对不同织构, 织构的方向与摩擦副相对运动方向相一致才能将织构的作用发挥到最大化。比如在进行活塞-缸套织构减摩的过程中, 考虑活塞进气与排气时缸套与活塞接触的部位, 对织构的方向进行变化, 从而可以达到更好的效果。

#### 2.1.4 其他参数的影响

表面织构对相互接触表面的部件之间起到降低摩擦因数等主要作用。不同材料、不同环境以及不同材料之间的表面粗糙度等也对摩擦学性能造成较大

的影响<sup>[51]</sup>。除了上述织构形状、织面密度和织构排列方式等会对摩擦因数起到降低的作用之外, 织构的深度、直径以及深径比等都会对活塞-缸套的摩擦学性能产生较大的影响。Deng 等<sup>[52]</sup>经研究得出, 当织构的深度与油膜厚度接近时, 油膜的承载力将会达到最大的; 而当织构的深度略大于油膜的厚度时, 部件表面的耐磨性和表面的完整性都是效果最好的; 而当深度小于油膜厚度时, 纹理的作用就没这么明显。Qiu 等<sup>[53]</sup>通过研究织构尺寸 (直径) 对承载力影响, 得出结论, 织构在将油膜的承载能力提升时是通过空化达到的。Guo 等<sup>[54]</sup>通过研究微织构和滑动对活塞裙部性能的耦合影响, 运用 Galerkin 有限元法结合 Stokes 系统来计算润滑流动的效应, 在实验结论中表明滑移长度和织构深度在对活塞裙部性能的影响中可以反向调节润滑剂的压力波动。Mishra 等<sup>[55]</sup>在了解有织构刀具对钛合金干切削时的功效时, 通过在 3 个不同的区域测量切屑锯齿, 并且将普通工具的接触长度变化与有织构工具的接触长度变化进行比较进行有限元模拟分析, 如图 5 所示, 可以看出切屑正在逐渐的将织构完全的嵌入接触区, 并且还能看见底切与碎屑。因此可以提出, 由于高切屑与底切, 纹理刀具在进给和速度增加时会失去有效性。

通过以上容易被忽略的几何参数对机械部件的影响可以了解到, 在运用有限元分析软件不管是对机械部件的应力分析还是承载力分析, 都可以在进行有限元分析后得到明确的数值, 有利于在之后进行优化设计时更好的规避对部件不好的参数, 同时在分析过程中也可以更直观的观察出机械部件在接触中的磨损状态。如表 1 所示, 展现各织构参数分析下的结果对比。

## 2.2 表面织构对活塞-缸套摩擦影响试验研究

进行实验室模拟实验测试在表面织构应用于实际中扮演着承上启下的作用。通过实验室的模拟实验可以获取最佳性能表面微织构几何参数。Rao 等<sup>[59]</sup>为了解不同织构对缸套-活塞环 (CLPR) 摩擦副的性

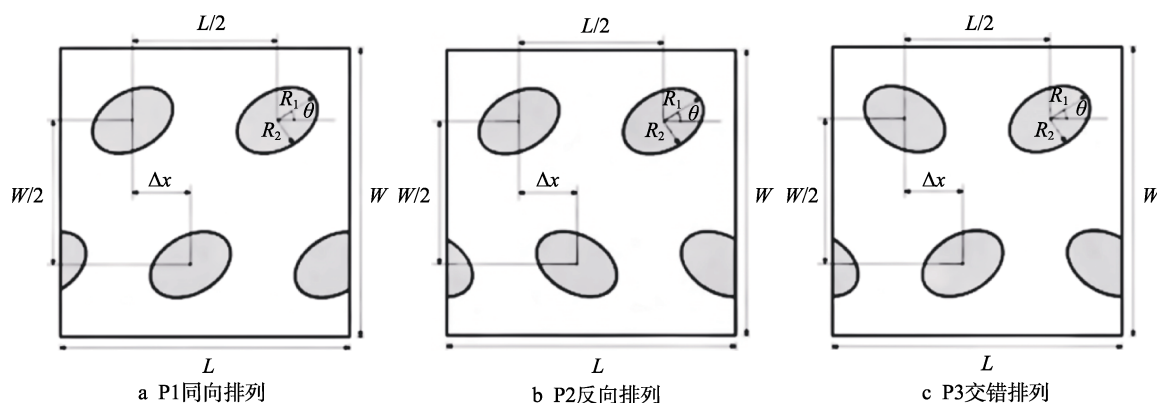


图 4 椭圆织构 3 种排布模式<sup>[49]</sup>

Fig.4 Three arrangement patterns of elliptical texture<sup>[49]</sup>

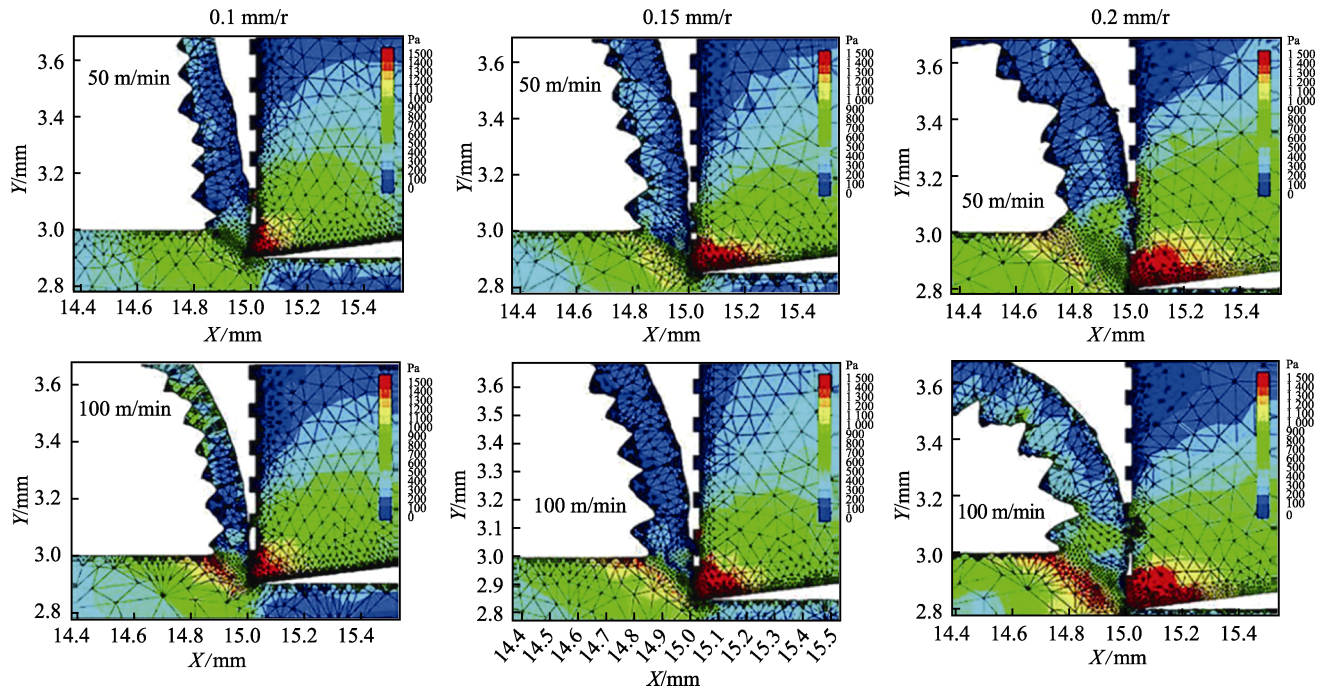
图5 不同加工参数下织构刀具接触长度的仿真结果<sup>[55]</sup>Fig.5 Simulation results of texture tool contact length under different machining parameters<sup>[55]</sup>

表1 仿真分析下表面织构对活塞-缸套摩擦影响

Tab.1 Effects of lower surface weaving on piston-cylinder liner friction under simulation analysis

Author	Weave shape	Surface density	Alignment	Depth	Conclusion
Song Wentao <sup>[37]</sup>	Triangles, bars, mixed textures			0.1 mm	The striped texture has the lowest coefficient of friction compared to the other two shapes
Uddin M S <sup>[38]</sup>	Triangular, circular, V-shaped, oval, star-shaped			5 μm	The number of vertices of the new "star" texture has a significant effect on film pressure and friction coefficient
Ma Xuan <sup>[40]</sup>	Grooves, pits			3-30	The groove design solution has a slight advantage in reducing friction
Babu P V <sup>[43]</sup>	Rectangle, triangle, oval	10%	—	5 mm	The elliptical weave is the most effective in reducing friction at a surface density of 10%
Wang Hongtao <sup>[49]</sup>	Microspherical crown-shaped, oval	7.1%, 28.3%	Elliptical isotropic, inverted and staggered arrangements	6, 8, 10, 12 mm	Synchronous and reverse alignment for better dynamic pressure carrying capacity of the surface
Zhong Y <sup>[50]</sup>	Hexagonal	—	Arranged in a 0°, 90° hexagonal weave	—	The 90° hexagonal weave has a higher load capacity than the 0° weave and is more effective in reducing friction
Guo C <sup>[54]</sup>	Groove-shaped weaving	—	—	6 μm	The best lubrication and friction reduction effect is achieved when the weave depth is 6 μm
Cheng Linkai <sup>[56]</sup>	Round, V-shaped	20%, 25.9%	—	8 μm, 13 μm	V-shaped weave exhibits superior lubrication compared to round
Zavos A B <sup>[57]</sup>	Spherical, rectangular	61%	—	4 μm	Rectangular weave provides better friction reduction than spherical weave
Li W <sup>[58]</sup>	Circular micro-craters	22%	Arranged in quarter-radius intersecting distance	0.92 μm	The friction reduction effect of circular micro-pits is more obvious with this combination of geometric parameters



能具有的重要意义,进行热机试验,将不同类型的表面织构与柴油机缸套-活塞环在热发动机条件下的性能之间进行相互作用,结果表明,在与无织构的缸套-活塞环试验对比下,适度的表面织构对柴油机的综合性能起着显著的影响。Yin 等<sup>[60]</sup>通过在活塞-缸套上进行激光织构制备,并在摩擦磨损试验机上进行往复试验,测试缸套-活塞环的瞬时摩擦力,比较激光制备织构以及高原磨削缸套两者的摩擦学性能;试验结果表明,当在润滑方式不同的情况下,在缸套上进行激光制备织构可以有效的降低摩擦力。Rao 等<sup>[61]</sup>为解决表面织构应用于柴油发动机中的实际效果,设计了几组不同织构宽度(1、2、3、4 mm)的表面纹理,在往复试验机中进行一系列测试实验,获得了在不同工况下柴油发动机的摩擦特性,结果表明,当织构宽度为 2 mm 时更有利于将低速状态下的磨损性能提高,而在织构宽度为 3 mm 时更有利于改善高速下的磨损性能,但在高负荷的状态下的磨损性能还有待于提高。Rao 等<sup>[62]</sup>在深入了解螺纹槽织构应用于船用柴油机之间的摩擦磨损时,在发动机缸套上制备了 4 种宽度(1、2、3、4 mm)的表面织构,并使用四冲程活塞-缸套摩擦磨损测试仪进行试验测试,实验结果显示,表面织构对实验结果起着显著的影响,其中 3 mm 的织构宽度对活塞-缸套的减摩效果最明显,其摩擦因数减少了 30.9%,而油膜润滑性能显著提高了 33.3%,密封性也增加了 14.4%。Mishra 等<sup>[63]</sup>在应用研究活塞-缸套摩擦学性能在激光表面纹理对添加剂摩擦化学膜形成的影响时,运用线性往复摩擦试验机进行试验研究,在设置试验载荷为 75 N,频率为 0.1 Hz 和 80 °C 的温度下进行,结果显示,表面织构会影响摩擦化学膜的形成,并且即使在加入添加剂的情况下,活塞-缸套的润滑性能也在凹坑的流体力学效应下有显著提高。崔增霸等<sup>[64]</sup>在实验中运用圆形、正方形、椭圆形以及菱形织构对活塞进行减摩效果研究,结果表明高速的时候圆形织构油膜的承载能力最强,减摩效果也相对较好一些,而在低中速的时候却并没有太大的区别。Wang 等<sup>[65]</sup>通过采用正交试验方法对气缸活塞环摩擦学性能进行表面织构研究,通过对比不同织构参数对摩擦磨损的影响得出结论,在表面织构各参数(直径、深度、形状和表面密度)对摩擦学性能的影响下,通过正交试验以及仿真分析得出,对活塞缸套摩擦因数降低最有影响的是织构深度,其次依次是织构的直径、形状和表面密度。而各对应的最佳值依次是 300  $\mu\text{m}$  深度、700  $\mu\text{m}$  直径、三角形和 8% 面密度。并且表明在伴随着织构的直径大小、深度和表面密度的增加的同时,织构在气缸活塞上的减摩效果就会更好更明显。Qiu 等<sup>[66]</sup>在实验验证下得到,表面织构的形状、几何形状和密度在同样有着表面纹理的滑块轴承的摩擦学的性能中起着关键性的作用。Yan 等<sup>[67]</sup>经过实验认为在影响表面织构的

不同参数中,影响最重要的参数是凹坑的面积密度,紧接着是凹坑的深度和直径。但同时他们补充到在不同的环境和载荷条件下,参数的影响程度又有可能不一样。

通过模拟实验数据的测试,可以将更优的数据积攒应用到实际中,同时将实际应用中的利益起到最大化,不至于直接在实际应用中造成不必要的损失。

台架试验是为了给发动机相关零部件测试、验证以及改进技术而进行的试验研究。Kang 等<sup>[68]</sup>在单缸柴油机气缸套表面制备了不同尺寸织构进行台架试验,在无织构的气缸套(S0)和有织构的(S1、S2和S3)在同一台发动机上进行组装测试,结果如图 6 所示,经过 12 h 的台架试验测试缸套的油耗,可以明显看出,S2 的油耗增加了 83.3%,由此可知,在不良的表面织构方案中也会明显的增加发动机油耗;而由 S1 和 S3 看出,表面织构同样优化了缸套摩擦性能,油耗分别降低了 45.5%和 37.9%。

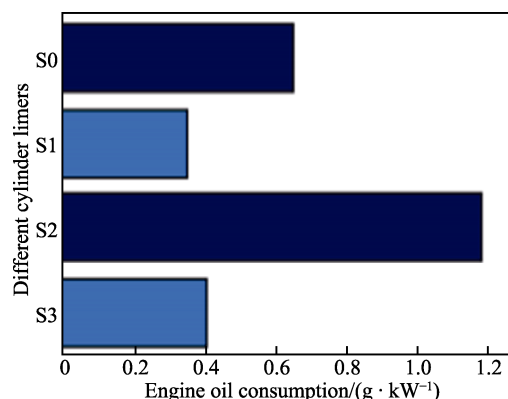


图 6 发动机油耗的比较<sup>[68]</sup>

Fig.6 Comparison of engine fuel consumption<sup>[68]</sup>

Yin 等<sup>[69]</sup>利用激光表面纹理技术在汽油机缸套表面进行方形阵列、沿直线周拉伸阵列、交错排列等 3 种微织构的制备,并进行发动机台架试验,经过试验验证,3 种织构的阵列形式中发动机的驱动扭矩依次呈现增大的趋势,并且 3 种织构中方形阵列的减摩效果是最好的,交错阵列的减摩效果最差。Peng 等<sup>[70]</sup>通过研究微织构对缸套-活塞环润滑性能的影响,在缸套衬套内进行微织构的制备,并通过台架试验研究不同转速条件下表面织构对活塞组件的摩擦学性能的影响,结果表明,当柴油机在高转速的情况下,缸套内表面的织构形状可以适当的改善气缸套-活塞环的磨损性能,并在一定程度上降低摩擦和磨损。

表面织构应用于发动机活塞-缸套上的效果体现不可能直接将制备有织构的活塞直接放在发动机上进行实际上路测试,因此进行台架试验是必要的,可以提前测试出对发动机能量转化最优的一组织构参数,从而进行实践,同时也可降低在实际应用中资金的不必要损失。

### 3 总结与展望

本文结合表面织构的几何参数在活塞-缸套上的减摩特性,从表面织构的形状、面密度、排列方式等几个经常被弱化的参数对活塞-缸套表面润滑减摩性能的因素进行总结,并从有限元模拟分析和实验室模拟试验对织构参数进行验证。可知表面织构在不同参数条件下,对活塞-缸套的减摩效果不尽相同。在今后的关于活塞-缸套的研究当中可作为借鉴,以达了解织构应用在活塞-缸套上的减摩效果。在活塞-缸套的减摩机制分析中如今的文献尚还有点局限,还需要进一步的研究。从这篇简短的综述中,为今后发动机活塞部分研究提出一些可行的建议:

1) 表面微织构能有效改善摩擦副的润滑性能,但对于楔形织构的应用并不常见,楔形织构在降低摩擦、提高承载力上也有着出色的表现,之后对织构的选择上可以尝试楔形织构的应用。

2) 表面织构对发动机活塞-缸套摩擦学性能的影响过多停留在实验室测试阶段,应更多将台架实验或者实际上路测试结合起来。

3) 在将台架实验或者实际路测应用上,关于活塞-缸套的减摩应用机制中活塞裙应用的微织构摩擦学研究,重点在于根据发动机实际运行工况下优化微织构的参数,使其在降低摩擦、减少油耗上起到更有效的作用。

4) 织构的加工时间和表面织构形状、精度、深度以及费用的昂贵是加工织构以及在织构的广泛性应用上成为局限性的因素,希望有更多的研究者从这方面研究出发降低加工成本,提高织构的各方面的不足。

#### 参考文献:

- [1] JOHNSON T V. Review of Vehicular Emissions Trends[J]. SAE International Journal of Engines, 2015, 8(3): 1152-1167.
- [2] 许磊, 杜彦斌, 张磊. 表面损伤叶轮激光增材再制造研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2021, 38(1): 1-6.  
XU Lei, DU Yan-bin, ZHANG Lei. Laser Cladding Remanufacture on Damaged Impeller Surface[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2021, 38(1): 1-6.
- [3] 吕延军, 康建雄, 张永芳, 等. 内燃机活塞-缸套系统减摩抗磨研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(4): 21-34.  
LYU Yan-jun, KANG Jian-xiong, ZHANG Yong-fang, et al. Research Progress of Anti-Friction and Anti-Wear of Piston-Cylinder Liner System in Internal Combustion Engine[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(4): 21-34.
- [4] NIKAM M D, SHIMPI D, Bhole K, et al. Design and Development of Surface Texture for Tribological Application[J]. Key Engineering Materials, 2019, 803: 55-59.
- [5] MOHD AZMI M A, WAN MAHMOOD W M F, GHANI J A, et al. A Review of Surface Texturing in Internal Combustion Engine Piston Assembly[J]. International Journal of Integrated Engineering, 2020, 12(5): 146-163.
- [6] WAN Yi, XIONG Dang-sheng. The Effect of Laser Surface Texturing on Frictional Performance of Face Seal[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 197(1-3): 96-100.
- [7] RAHMAN H A, GHANI J A, MAHMOOD W M F W. A Brief Review on Friction Reduction via Dimple Structure for Piston Engine[J]. World Review of Science, Technology and Sustainable Development, 2018, 14(2/3): 147.
- [8] 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.
- [9] RAO Xiang, SHENG Chen-xing, GUO Zhi-wei. The Influence of Different Surface Textures on Wears in Cylinder Liner Piston Rings[J]. Surface Topography: Metrology and Properties, 2019, 7(4): 045011.
- [10] CHENG Jia-hao, CHEN Wen-gang, LI Dong-yang, et al. Effect of Spherical Crown Texturing and Ionized Sulfur Infiltration on the Tribological Performance of Piston-Cylinder Liner[J]. Tribology International, 2023, 189: 108969.
- [11] ETSION I, SHER E. Improving Fuel Efficiency with Laser Surface Textured Piston Rings[J]. Tribology International, 2009, 42(4): 542-547.
- [12] ETSION I. Modeling of Surface Texturing in Hydrodynamic Lubrication[J]. Friction, 2013, 1(3): 195-209.
- [13] GROPPER D, WANG Ling, HARVEY T J. Hydrodynamic Lubrication of Textured Surfaces: A Review of Modeling Techniques and Key Findings[J]. Tribology International, 2016, 94: 509-529.
- [14] EZHILMARAN V, VASA N J, VIJAYARAGHAVAN L. Investigation on Generation of Laser Assisted Dimples on Piston Ring Surface and Influence of Dimple Parameters on Friction[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 335: 314-326.
- [15] RYK G, KLIGERMAN Y, ETSION I. Experimental Investigation of Laser Surface Texturing for Reciprocating Automotive Components[J]. Tribology Transactions, 2002, 45(4): 444-449.
- [16] 汪久根, 董光能. 摩擦学基础[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2018.  
WANG Jiu-gen, DONG Guang-neng. Tribological Basis[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2018.
- [17] 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.
- [18] PETERSSON U, JACOBSON S. Tribological Texturing



- of Steel Surfaces with a Novel Diamond Embossing Tool Technique[J]. *Tribology International*, 2006, 39(7): 695-700.
- [19] QIAN Shuang-qing, ZHU Di, QU Ning-song, et al. Generating Micro-Dimples Array on the Hard Chrome-Coated Surface by Modified through Mask Electrochemical Micromachining[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 47(9): 1121-1127.
- [20] WAKUDA M, YAMAUCHI Y, KANZAKI S, et al. Effect of Surface Texturing on Friction Reduction between Ceramic and Steel Materials under Lubricated Sliding Contact[J]. *Wear*, 2003, 254(3-4): 356-363.
- [21] 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.
- [22] WANG Yan-qing, WU Gao-feng, HAN Qing-gong, et al. Tribological Properties of Surface Dimple-Textured by Pellet-Pressing[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2009, 1(1): 1513-1518.
- [23] ZHOU Rui, CAO Jian, WANG Q J, et al. Effect of EDT Surface Texturing on Tribological Behavior of Aluminum Sheet[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(10): 1643-1649.
- [24] AMANOV A, CHO I S, PYOUN Y S, et al. Micro-Dimpled Surface by Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification and Its Tribological Effects[J]. *Wear*, 2012, 286-287: 136-144.
- [25] BATHE R N, PADMANABHAM G, THIRUMALINI S, et al. Impact of Laser Surface Texturing (LST) on the Tribological Characteristics of Piston Rings and Cylinder Liners-A Review. Part 1: Development of LST Technology[J]. *Transactions of the IMF*, 2021, 99(5): 231-237.
- [26] AMANOV A, TSUBOI R, OE H, et al. The Influence of Bulges Produced by Laser Surface Texturing on the Sliding Friction and Wear Behavior[J]. *Tribology International*, 2013, 60: 216-223.
- [27] ETSION I. State of the Art in Laser Surface Texturing[J]. *Journal of Tribology*, 2005, 127(1): 248-253.
- [28] NANDAKUMAR M B, SUDHAKAR K G, NATU H, et al. Experimental Investigation of the Effect of Laser Texturing on the Used IC Engine Piston Skirt[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(1): 2773-2780.
- [29] ETSION I. Surface Texturing for In-Cylinder Friction Reduction[M]. Amsterdam: Elsevier, 2010: 458-470e.
- [30] RYK G, ETSION I. Testing Piston Rings with Partial Laser Surface Texturing for Friction Reduction[J]. *Wear*, 2006, 261(7-8): 792-796.
- [31] EZHILMARAN V. Pulsed ND<sup>3+</sup>: YAG Laser Assisted Micro-Dimple Formation in Chromium Films under Different Ambient Conditions[J]. *Journal of Laser Micro*, 2016, 11(2): 179-184.
- [32] MATHEW M M, BATHE R N, PADMANABHAM G, et al. A Study on the Micromachining of Molybdenum Using Nanosecond and Femtosecond Lasers[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104(9): 3239-3249.
- [33] 周志杰, 许磊, 杜彦斌, 等. 20Cr13 钢表面激光熔覆铁/镍基合金熔覆层的组织与性能研究[J]. *重庆工商大学学报(自然科学版)*, 2021, 38(2): 69-74.
- ZHOU Zhi-jie, XU Lei, DU Yan-bin, et al. Microstructure and Properties of Laser Cladding Fe/Ni Base Alloy Coating on 20Cr13 Surface Steel[J]. *Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition)*, 2021, 38(2): 69-74.
- [34] SUAREZ M A, FIGUEROA I, CRUZ A, et al. Study of the Al-Si-X System by Different Cooling Rates and Heat Treatment[J]. *Materials Research*, 2012, 15(5): 763-769.
- [35] PATEL V K, RAMANI B M. Investigation on Laser Surface Texturing for Friction Reduction in Multi Cylinder Internal Combustion Engine[J]. *International Journal of Ambient Energy*, 2022, 43(1): 1192-1197.
- [36] ZHANG Wei, ZHANG Lei, WANG Ben, et al. Finite Element Simulation Analysis of Bionic Ball-End Milling Cutter[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 103(5): 3151-3161.
- [37] 宋文涛, 陈文刚, 谢永, 等. 织构化纹理对于 45 钢摩擦学性能的数值模拟及试验分析[J]. *材料保护*, 2021, 54(3): 75-80.
- SONG Wen-tao, CHEN Wen-gang, XIE Yong, et al. Numerical Simulation and Experimental Analysis of Tribological Properties of 45 Steel with Surface Texture[J]. *Materials Protection*, 2021, 54(3): 75-80.
- [38] 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.
- [39] ZAVOS A, NIKOLAKOPOULOS P G. Tribology of New Thin Compression Ring of Fired Engine under Controlled Conditions-A Combined Experimental and Numerical Study[J]. *Tribology International*, 2018, 128: 214-230.
- [40] 马旋. 表面织构参数对活塞/缸套摩擦副润滑行为的影响及优化方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- MA Xuan. Study on the Effect of Surface Texture Parameter on the Lubrication Performance of Piston/Cylinder Interface and Optimization Method[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [41] AHMED A, MASJUKI H H, VARMAN M, et al. An Overview of Geometrical Parameters of Surface Texturing for Piston/Cylinder Assembly and Mechanical Seals[J]. *Meccanica*, 2016, 51(1): 9-23.
- [42] KLIGERMAN Y, ETSION I, SHINKARENKO A. Improving Tribological Performance of Piston Rings by Partial Surface Texturing[J]. *Journal of Tribology*, 2005, 127(3): 632-638.
- [43] BABU P V, ISMAIL S, BEN B S. Experimental and Numerical Studies of Positive Texture Effect on Friction Re-

- duction of Sliding Contact under Mixed Lubrication[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2021, 235(2): 360-375.
- [44] 尹红泽, 陈文刚, 李谿冰, 等. 3D 打印 ABS 材料表面楔形织构的摩擦性能[J]. 中国表面工程, 2021, 34(4): 158-166.
- YIN Hong-ze, CHEN Wen-gang, LI Rong-bing, et al. Friction Performance of Wedge-Shaped Texture on the Surface of 3D Printed ABS Materials[J]. China Surface Engineering, 2021, 34(4): 158-166.
- [45] VENKATESWARA BABU P, SYED I, SATISH BEN B. Optimization of Texture Geometry for Enhanced Tribological Performance in Piston Ring-Cylinder Liner Contact under Pure Hydrodynamic and Mixed Lubrication[C]//Deepak B, Parhi D, Jena P. Innovative Product Design and Intelligent Manufacturing Systems. Singapore: Springer, 2020: 799-808.
- [46] 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.
- [47] SUH M S, CHAE Y H, KIM S S, et al. Effect of Geometrical Parameters in Micro-Grooved Crosshatch Pattern under Lubricated Sliding Friction[J]. Tribology International, 2010, 43(8): 1508-1517.
- [48] 刘伟. 活塞裙部表面织构的模型实验与有限元模拟研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- LIU Wei. Research on Surface Texture of Piston Skirt by Model Test and FEM Simulation[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [49] 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.
- [50] ZHONG Ying-hui, ZHENG Long, GAO Yi-hang, et al. Numerical Simulation and Experimental Investigation of Tribological Performance on Bionic Hexagonal Textured Surface[J]. Tribology International, 2019, 129: 151-161.
- [51] FLEGLER F, NEUHÄUSER S, GROCHE P. Influence of Sheet Metal Texture on the Adhesive Wear and Friction Behaviour of EN AW-5083 Aluminum under Dry and Starved Lubrication[J]. Tribology International, 2020, 141: 105956.
- [52] DENG Hai-shun, HE Shi-ju, MAO Fei-yu, et al. Effects of Micropit Depths on Tribology Performance of Textured Port Plate Pair[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018: 1-7.
- [53] QIU Y, KHONSARI M M. Experimental Investigation of Tribological Performance of Laser Textured Stainless Steel Rings[J]. Tribology International, 2011, 44(5): 635-644.
- [54] GUO Chao, SONG Qing-hua, LIU Zhan-qiang, et al. Hydrodynamic Lubrication Analysis of Two-Dimensional Section between Piston Skirt and Textured Cylinder Wall Considering Slip Boundary Conditions[J]. Tribology International, 2019, 140: 105879.
- [55] MISHRA S K, GHOSH S, ARAVINDAN S. 3D Finite Element Investigations on Textured Tools with Different Geometrical Shapes for Dry Machining of Titanium Alloys[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 141: 424-449.
- [56] 程林凯. 表面织构特征参数及分布对润滑性能的影响[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- CHENG Lin-kai. The Influence of Surface Texture Characteristic Parameters and Distribution on Lubrication Performance[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [57] ZAVOS A B, NIKOLAKOPOULOS P G. Simulation of Piston Ring Tribology with Surface Texturing for Internal Combustion Engines[J]. Lubrication Science, 2015, 27(3): 151-176.
- [58] LI Wen-hua, YU Bai-hong, YE Bin, et al. Effects of Cast-Iron Surface Texturing on the Anti-Scuffing Performance under Starved Lubrication[J]. Materials, 2019, 12(10): 1586.
- [59] RAO Xiang, SHENG Chen-xing, GUO Zhi-wei, et al. Effects of Textured Cylinder Liner Piston Ring on Performances of Diesel Engine under Hot Engine Tests[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 146: 111193.
- [60] YIN Bi-feng, XU Bo, JIA He-kun, et al. Experimental Research on the Frictional Performance of Real Laser-Textured Cylinder Liner under Different Lubrication Conditions[J]. International Journal of Engine Research, 2022, 23(4): 693-704.
- [61] RAO Xiang, SHENG C, GUO Zhi-wei, et al. Influence of Surface Groove Width on Tribological Performance for Cylinder Liner-Piston Ring Components[J]. Tribology Transactions, 2019, 62: 239-248.
- [62] RAO Xiang, SHENG Chen-xing, GUO Zhi-wei, et al. Effects of Thread Groove Width in Cylinder Liner Surface on Performances of Diesel Engine[J]. Wear, 2019, 426-427: 1296-1303.
- [63] MISHRA P, RAMKUMAR P. Effect of Additives on a Surface Textured Piston Ring-Cylinder Liner System[J]. Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces, 2019, 13(2): 67-75.
- [64] 崔增霸. 表面织构对活塞环-缸套系统摩擦性能的影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- CUI Zeng-ba. Effect of Surface Texture on Friction Performance of Piston Ring-Cylinder Liner System[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020.