

仿生表面织构研究进展及其在油气装备领域的应用前景

王国荣, 廖代胜, 江士凯, 何霞, 廖文玲, 钟林, 蒋龙, 杨昌海

(西南石油大学 a.机电工程学院 b.能源装备研究院, 成都 610500)

摘要: 机械系统中, 摩擦磨损不仅消耗大量的能源, 且是导致设备磨损和提前失效的主要因素之一。作为摩擦学的一个重要分支, 仿生表面织构已被证实是改善润滑及摩擦性能的有效手段。基于国内外表面织构润滑减磨的理论研究, 概述了流体动压润滑理论的发展历程, 对比分析了 Reynolds 方程和 N-S 方程的优缺点, 介绍了几种润滑理论研究常用的数值求解方法, 包括有限差分法、有限元法、有限体积法等, 探讨了 Reynolds 方程的适用性范围和流体控制方程的选择, 同时, 综述了混合润滑理论的研究进展。此外, 从国内外表面织构润滑减磨的试验研究着手, 总结了当前的研究成果及其存在的不足。在此基础上, 阐述了开展针对实际工况的表面织构参数优化设计研究的必要性, 并结合特殊工况下油气装备的摩擦磨损机理, 表明了表面织构化对油气装备的重大意义, 论述了仿生表面织构技术提高油气装备润滑及摩擦学性能的可行性及其在油气装备领域的应用前景。最后指出了仿生表面织构未来发展的方向。

关键词: 表面织构; 理论研究; 试验研究; 润滑减磨; 优化设计; 油气装备

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)08-0014-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.08.003

Research Progress of Bionic Surface Texture and Its Application Prospect in Oil and Gas Equipment Field

WANG Guo-rong, LIAO Dai-sheng, JIANG Shi-kai, HE Xia, LIAO Wen-ling,
ZHONG Lin, JIANG Long, YANG Chang-hai

(a.School of Mechanical Engineering, b.Institute of Energy Equipment,
Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

ABSTRACT: In the mechanical system, friction and wear not only consume a lot of energy, but also become one of the main factors that lead to the wear and premature failure of equipment. As an important branch of tribology, bionic surface texture has been proved to be an effective means to improve the lubrication and friction properties. Based on the theoretical study of the influence of surface texture on lubrication and abrasion reduction at home and abroad, the development course of hydrodynamic lubrication theory was summarized, the advantages and disadvantages of the Reynolds equation and Navier-Stokes equation were compared and analyzed, and several common numerical methods for lubrication theory research were introduced, including finite difference method, finite element method, finite volume method, etc.. Moreover, the applicability scope of Reynolds equation and the selection of fluid control equation were discussed, and the research progress of the mixed lubrication theory

收稿日期: 2018-01-26; 修订日期: 2018-03-30

Received: 2018-01-26; Revised: 2018-03-30

基金项目: 国家自然科学基金(面上项目 51775463)

Fund: The National Nature Science Foundation of China (General Program 51775463)

作者简介: 王国荣(1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为石油矿场机械和牙轮钻头轴承的摩擦磨损。

Biography: WANG Guo-rong (1977—), Male, Doctor, Professor, Research focus: friction and wear of oil mine machinery and roller bit bearings.

was also summarized. In addition, based on the domestic and international experimental research on the lubrication and abrasion reduction of surface textures, the current research results and their deficiencies were summarized. On this basis, the necessity of the research on the optimization design of surface texture parameters for the actual working conditions was stated and the significance of surface texture on oil and gas equipment was clarified according to the friction and wear mechanism of oil and gas equipment under special conditions. The feasibility to improve lubrication and tribological properties of oil and gas equipment by bionic surface texture technology and its application prospect in oil and gas equipment field were discussed. Finally, the future development direction of bionic surface texture was proposed.

KEY WORDS: surface texture; theoretical research; experimental research; lubrication and abrasion reduction; optimization design; oil and gas equipment

据不完全统计,每年因机械设备摩擦副的摩擦磨损而引起的能量消耗约占一次能源的 33%,并直接或间接造成约 70%的机械设备损坏^[1-2],因此,如何降低相对运动摩擦副表面的润滑及磨损具有重要的研究意义。目前,大量的研究人员从机械结构优化、表面涂层技术、表面硬度处理、润滑介质改良等方面着手并取得了不错的成果,但随着润滑减磨性能要求的提高及实际工况的复杂化(如高温、高压、重载工况),亟需新的润滑减磨技术。

仿生学研究发现,许多生物体表皮并不非常光滑,而是具有一定形状、分布和尺度的微观结构^[3],这些微观结构使得生物在运动过程中所受阻力减小,耐磨性提高,甚至具有超疏水性能和自清洁功能^[4]。基于这一现象,仿生表面织构技术(采用一些方法在摩擦副表面加工出一定尺寸、形状和分布的微结构阵列)作为改善摩擦学性能的一个重要手段而被提出,近年来,更是成为摩擦学的研究热点之一。鉴于表面织构对摩擦学的重要意义,本文主要对国内外表面织构润滑减磨的研究现状进行调研,并探讨其在油气装备领域的应用前景。

1 表面织构润滑减磨的理论研究

1.1 流体动压润滑理论

对于表面织构在润滑状态下表现出来的减磨效应应有很多种理论解释,其中最主要的就是流体动压润滑效应。润滑理论的研究起源于 1886 年,英国的 Reynolds 基于研究结果首次阐述了流体动压产生的机理,并通过流量连续条件和力平衡原理推导出了 Reynolds (雷诺)方程,为流体动压润滑奠定了理论基础^[5]。而表面织构产生流体动压润滑效应的发现要追溯到 1936 年, JR^[6]基于 Reynolds 方程对活塞环润滑性能进行分析计算,发现表面带有外凸结构的活塞环能和缸套之间产生一定厚度的油膜,并使其处于流体润滑状态。而 Hamilton^[7]又于 1966 年通过研究,发现旋转轴颈密封表面不规则的微凹坑能够产生流体动压效应。此后,普遍认为物体表面的微结构阵列,即表面织构,能够产生流体动压,从而改善摩擦学性

能,大量关于表面织构对流体动压润滑影响的理论研究相继展开^[8-17]。

在流体动压润滑理论模型的建立中,有的学者采用 Reynolds 方程^[8-10,14-17],有的学者采用纳维斯托克斯方程^[11-17](Navier-Stokes equations,简称 N-S 方程)。Reynolds 方程是在 N-S 方程的基础上,通过忽略流体的体积力、惯性效应以及假设沿流体厚度方向压力不变而推导来的。对比以上两种方程:Reynolds 方程计算简单,便于求解,但它是经假设简化而推导得来的,无法描述流体的惯性效应等;N-S 方程计算精度高,准确性好,更加贴近实际工况,可以描述完整的流体流动状态,但计算量大,求解耗时且困难,通常都是利用计算流体力学 CFD 进行求解。

两种方程各有优缺点,部分学者也做了相关的对比研究。文献[14]在考虑活塞环外部油膜影响下,使用 2D 自由编码求解了可压缩 N-S 方程,发现求解结果与 Reynolds 方程大致相同。文献[15]指出,在计算织构区域压力时,N-S 方程和 Reynolds 方程稍有不同,但表面总承载力差别不大。文献[16]发现当凹坑型表面织构的深度远大于油膜厚度时,利用 Reynolds 方程和 Half-Sommerfeld 空化边界条件就可得到较为精确的结果;而当织构深度等于或小于油膜厚度时,采用 N-S 方程更准确。文献[17]分别用 N-S 方程和 Reynolds 方程模拟二维表面织构的流线及压力分布情况,发现在织构深度较浅时,两种方程的结果差异较大。目前的流体动压润滑理论已经比较成熟,但在研究过程中,还须根据实际情况正确地选择流体控制方程。

1.2 流体动压润滑理论数值解法

随着计算机的发展,数值模拟技术逐渐运用到流体动压润滑的理论研究中,主要用来求解流体控制方程。由于 N-S 方程计算复杂,求解困难,常规的数值解法难以找到它的基本解,因此,数值解法主要针对 Reynolds 方程。比较常用的有:有限差分法、有限元法、有限体积法以及多重网格法等。

从 1950 年 Von Neumann 等^[18]发表关于数值解法的论文以来,有限差分法快速发展,并在流动场分析

中得到很好的运用。有限差分法基于数学逼近理论,其优点在于概念清晰,便于理解,计算公式程序化,易于计算机实现,具有高度通用性。但有限差分法所需网格节点多,对节点的分布也有一定要求,不适用于复杂的几何形状区域,在计算域概化和数值精度方面,存在根本性困难^[19]。有限元法是有限差分法和变分法相结合而形成的,易于计算机实现,能适应复杂几何形状的求解域,但在处理局部质量守恒等问题时,没有有限差分法灵活,计算量较大,计算速度不如有限差分法和有限体积法,还会产生数值震荡,解决大变形间断问题较困难。有限体积法又称控制体积法,该方法发展于20世纪80年代,在一定程度上吸收了有限差分法和有限元法的优点,克服泰勒级数展开离散缺点的同时,又具有良好的守恒性,网格适应性能好,易于处理对流控制方程,计算速度快,内存需求小,但二次网格重建需耗费大量时间,且存在计算精度与数值弥散相互制约等问题^[20]。多重网格法则具有迭代途径好,收敛性稳定,收敛速度快,计算精度高等优点。至于其他方法,如神经细胞法、多尺度计算方法等,限于篇幅就不做介绍了。

以上所述的数值计算方法在流体动压润滑理论研究中都有广泛的运用。文献[21]采用有限元法和 Reynolds 边界条件,求解了二维 Reynolds 方程,并得到活塞环-缸套间的油膜厚度。文献[22]利用有限差分法求解了基于 Reynolds 方程建立的织构化机械密封流体动压润滑理论模型。文献[23]通过有限单元法及摄动法分析了旋转人字形沟槽对流体动压润滑轴承系统稳定性的影响。文献[24-26]利用有限差分法求解了带有不同类型表面织构的径向滑动轴承数值模型。文献[27]则采用多重网格法求解了无限宽条形织构化表面动压润滑理论模型。在运用不同数值解法时,不少学者也做了相应的对比研究。文献[28]对比了有限差分法和有限元法在计算精度、计算复杂程度以及计算成本等方面的差异。文献[29]对比了有限细胞法和有限元法在计算效率和计算尺度等方面的差异,结果都发现,各种数值解法各有优缺,其擅长的领域也不尽相同。笔者建议,在选择数值计算方法时应了解充分,以免影响研究结果。对于 N-S 方程,至今没有数值解法能够找到它的基本解,可以尝试将各种数值解法的优势集合,开发一种新的数值解法,以期能够更好地求解复杂问题。

1.3 雷诺方程有效性研究

作为流体动压润滑理论研究的基石,Reynolds 方程的正确性至关重要,而在其推导过程中做的一些假设可能会影响研究结果。1979年,Elrod等^[30]通过论文表示,Reynolds 方程并非对所有润滑问题都适用,当表面粗糙度为“雷诺粗糙度”,即表面粗糙度要比润滑膜厚小一个数量级时才适用。此后,部分学

者^[31-37]开始对 Reynolds 方程的有效性展开研究。文献[31-32]表明,对于表面织构润滑问题,当表面粗糙度高度超过油膜厚度的10%或者考虑惯性项的影响时,则不适合用 Reynolds 方程。文献[33-34]在各自的研究中,分别对比 Reynolds 方程和 N-S 方程、Reynolds 方程和 CFD 的计算结果,发现在某些工况下,Reynolds 方程不再适用。文献[35]基于表面织构润滑模型探究 N-S 方程和 Reynolds 方程的适用性范围,研究发现,当流体域长度和油膜厚度比值小于46时,不能忽略惯性项的影响,必须采用 N-S 方程;而当该比值大于46时,在合理处理空化边界条件的情况下,可以采用 Reynolds 方程。文献[36]和文献[37]通过研究对比分析了 JFO、雷诺和其他空化模型,结果均发现 JFO 空化模型计算结果与实验更加吻合。

上述文献表明,Reynolds 方程的适用范围有限,在进行理论研究时,应根据实际情况选择合适的流体控制方程。此外,Reynolds 方程和 N-S 方程都有一定的局限性,保证流体控制方程正确性的同时,扩大其适用范围也应是未来理论研究的重要内容。

1.4 混合润滑理论

除了流体动压润滑理论,混合润滑理论也是表面织构润滑理论研究的重点。混合润滑理论的研究始于19世纪末,但真正意义上的开端在20世纪60年代,人们开始考虑零件表面粗糙度的影响,并开展了相关研究。到了1978年,Patir等^[38]通过对粗糙表面设定压力和剪切流量因子,推导了平均 Reynolds 方程,打开了混合润滑理论研究的大门。随后,文献[39]基于平均 Reynolds 方程和表面微凸体接触模型,建立活塞环-缸套混合润滑模型,使活塞环的润滑理论研究发展到混合润滑领域。到了20世纪90年代末,混合润滑理论主要有统计学和确定性两种代表性模型^[40],由于统计学模型不能详细描述接触面的加工形貌,难以揭示混合润滑的局部接触信息,确定性模型的研究成为主流。除了平均 Reynolds 方程外,文献[41]提出了一种基于点接触面上混合弹流润滑的全数值解法,在考虑表面粗糙度、忽略热效应对油膜黏度影响情况下,引入流体的非牛顿特性,推导了统一 Reynolds 方程。基于统一 Reynolds 方程建立的模型可同时解决粗糙峰接触问题和流体润滑问题,此后的混合润滑理论研究进入热潮。文献[42]基于混合润滑状态下的径向滑动轴承,提出了一种分析表面织构对轴承性能影响的微宏观多尺度方法,结果表明,表面织构在混合润滑接触情况下主要有凹坑流动效应和挤压效应。文献[43]利用耦合分析法,在考虑润滑油的黏温变化、燃烧室燃气泄漏、表面粗糙度、油膜破裂位置以及气缸套圆周方向上的非轴对称性等影响因素下,建立活塞环-缸套三维非稳态热混合润滑模型,研究了活塞环传热摩擦润滑问题。文献[44]则基于环-环摩擦副开

展混合润滑状态下织构化表面机械密封的数值分析,研究了表面粗糙度对织构表面摩擦学性能的影响规律。文献[45]基于弹流润滑和边界润滑,建立混合润滑状态下的动态摩擦系数数学模型和以瞬时压力角为变量的齿轮滑动和滚动摩擦功耗数学模型,解决了现有功耗模型存在原理误差的问题。文献[46]采用统一 Reynolds 方程建立有限长线接触混合润滑模型,研究了横向、纵向和二维规则表面粗糙度的波长、幅值及工况变化对润滑性能的影响规律。文献[47]利用平均 Reynolds 方程、K-E 弹塑性接触模型和单一织构几何模型,建立混合润滑状态下表面织构摩擦学行为的力学模型,然后利用有限元法计算了润滑区域和接触区域的压力分布。

不难看出,流体动压润滑或混合润滑理论研究的方法、手段以及用到的数值求解方法大致相同,区别在于,在流体动压润滑状态下,织构表面全部处于流体润滑状态;而在混合润滑状态下,织构表面则要区分流体润滑区域和粗糙峰接触区域,其理论研究要多考虑一个粗糙峰接触问题。目前,关于表面织构的流体动压和混合润滑理论研究很多,但研究对象、方法多样,研究成果杂乱,未来应该把重点放在具体研究理论体系的构建和完善上。

2 表面织构润滑减磨的试验研究

理论研究表明,表面织构能够在流体动压润滑或混合润滑状态下改善摩擦学性能,因此,有必要开展表面织构润滑减磨的相关试验研究。利用表面微观造型来改善摩擦学性能的试验研究最早始于 1950 年,Salama 等^[48]在推力轴承的试验中发现,粗糙的轴承表面能够产生流体动压,使得轴承处于流体润滑状态。但限于当时的加工技术以及难以表征物体表面的微观形貌,表面织构的试验研究并不多,直到 20 世纪 90 年代,随着加工工艺的提高和试验设备的完善,这种情况才得以转变。表面织构的加工方法有很多,主要包括机械加工技术^[49]、激光加工技术^[50]、反应离子刻蚀技术^[51]、超声加工技术^[52]、表面喷丸技术^[53]、LIGA 技术^[54]等,激光加工技术因加工速度快、质量好等优点而被广泛应用。目前,试验研究大多是利用摩擦磨损试验机进行^[55-58],文献[55-56]利用摩擦磨损试验机分别研究了在不同的运动接触状态下和不同工况下,表面织构对摩擦学性能的影响规律。文献[57-58]则开展了研究不同形状、不同分布方式的表面织构以及不同形状的复合织构对摩擦副表面摩擦性能影响规律的摩擦试验。为了提高结果的准确性,部分研究也采用计算机仿真与试验相结合的方法。文献[59]利用 Fluent 和摩擦磨损试验对比分析了非规则对称葫芦形织构、圆凹坑织构及光滑试样对摩擦学性能的影响差异。文献[60]选用球-面/面-面两种接触模

式来进行摩擦实验并与 ABAQUS 进行对比,探究了摩擦界面沟槽的存在对界面振动及摩擦磨损特性的影响规律。某些考虑因素较多的试验也常采用正交设计方法,如文献[61-62]。

对于表面织构的理论研究来说,试验研究受于条件限制,不论是广度,还是深度,都远远不够,但试验研究证实了表面织构所具有的润滑减磨作用,论证了理论研究的正确性,给表面织构的研究者们带来了信心,因此,试验的重要性毋庸置疑。随着试验条件的改善,试验研究的方法、对象越来越多,获得的成果也比较丰硕。目前,表面织构已广泛应用于密封^[22]、轴承^[63]、活塞环^[64]、自动化组件^[65]、磁盘^[66]、切削工具^[67]等领域,但对于生物医学等领域以及极端工况下的相关研究还相对欠缺。特别指出,对于某些特定的工况,由于条件限制,只能通过忽略某些因素或做一些假设来近似替代,即单元试验,其试验结果与真实情况可能有差异,在进行单元试验之前必须考虑充分,保证替代试验结果的可靠性。

3 表面织构参数优化设计研究

理论和实验研究都表明,表面织构确实能够改善摩擦学性能,并且在研究过程中发现,不同几何形状、尺寸、位置分布及排列方式的表面织构对摩擦学性能的影响也不相同,必然存在最佳的表面织构参数组合可获取最优的摩擦学性能,因此,有必要开展表面织构的参数优化设计研究。表面织构是三维的结构特征,其涉及的参数较多,在进行参数优化设计研究时,很难考虑全部参数。目前的研究一般都着重于一个或几个参数的优化选择。对于表面织构的几何形状,文献[25]、文献[68]、文献[69]、文献[70]分别建立了相应的理论模型或摩擦试验,研究了不同织构几何形状对摩擦副表面润滑及摩擦性能的影响。对于表面织构的形状、分布方式、织构面积比等多个因素,文献[71]建立单一织构动压润滑理论模型,分析了织构几何形状、分布方式、分布方向和面积比对织构动压润滑性能的影响规律。文献[72]研究了织构的几何形状、截面类型、尺寸对织构表面动压润滑性能的影响。文献[73]和文献[74]则分别考虑了织构几何形状、数目和织构深度以及织构不同排列方式、不同类型对摩擦学性能的影响。除此之外,不同几何形状表面织构的组合方式以及表面织构的不同复合方式(如图 1 所示)的研究更加复杂。

表面织构参数优化设计涉及的因素虽然很多,目前的研究成果也比较杂乱,但基本都表明,合理的表面织构参数能显著地改善摩擦学性能,存在最佳的织构参数组合可获得最优的织构润滑减磨效果,而织构参数设计不当同样将对摩擦副表面产生消极影响。因此,为了让仿生表面织构技术在工程项目中更好地运

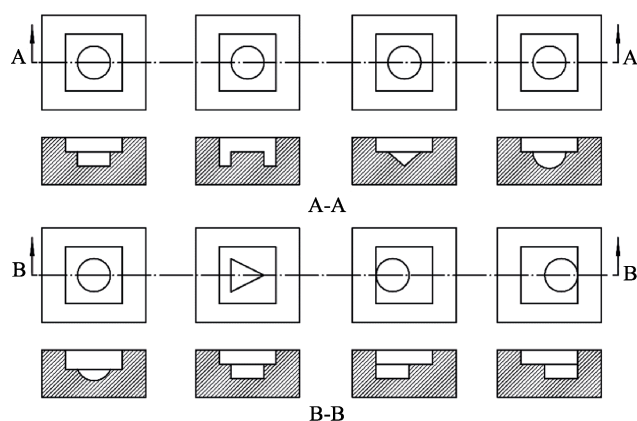


图1 织构复合方式及其横截面形状示意图
Fig.1 Schematic diagram of the texture compounding method and its cross section shape

用,针对实际工况下的织构参数优化设计是非常有必要的。现在的研究大多是为了降低摩擦和减少磨损,但在某些领域则不然,如汽车刹车盘上的表面织构可以增大摩擦、降低噪声^[75],因此,研究时应多方面着手,利用好表面织构的每一种特性。

4 表面织构在油气装备领域的应用前景

油气装备和井下工具是实现油气资源可持续钻采的关键技术装备,其寿命、工作性能直接影响油气资源的勘探开发效率,更关系到系统的安全和整个钻采作业的成败。国内外对钻采设备的失效研究表明,在低速重载、冲击振动、润滑条件差和高温高压等复杂恶劣工况制约下,摩擦磨损现象广泛存在于油气装备和井下工具的滑动摩擦副界面,设备的寿命和可靠性都与摩擦副界面的摩擦学行为和磨损情况紧密相关^[76]。对于压裂柱塞泵和牙轮钻头为典型代表的油气装备和井下工具,其主要失效形式分别为腐蚀环境下的磨粒磨损及粘着磨损。随着钻采向深井、超深井方向发展,勘探开发向海洋深处、沙漠腹地转移,油气装备工作环境进一步恶化所导致的摩擦磨损失效将更加严重,因此亟需把力学、摩擦学、制造工艺学、材料学以及现代设计理论等领域的最新研究成果引入到油气装备和井下工具设计中,提高油气装备和井下工具领域摩擦副的减磨性能和使用寿命。结合典型油气装备的主要失效形式以及国内外学者针对表面织构润滑减磨研究所得的结论,本研究团队从油气装备摩擦磨损机理出发,创新性地提出了将表面织构技术引入油气装备领域(特别是牙轮钻头滑动轴承和压裂柱塞泵)用于改善其润滑及摩擦学性能。

对于牙轮钻头滑动轴承,文献[77]结合牙轮钻头滑动轴承及表面织构几何模型,在雷诺方程基础上推导出织构化牙轮钻头滑动轴承非牛顿介质流体动压润滑理论模型,并根据8 1/2"牙轮钻头滑动轴承结构

尺寸^[78],应用该模型,系统性地研究了织构尺寸、面积比和分布区域对轴承油膜压力的影响,研究结果表明最优参数织构提升钻头轴承承载力能达60%以上。文献[79-82]通过织构化牙轮钻头滑动轴承销-盘单元实验表明,在载荷430~600 N,转速60~120 r/min,温度15~120 ℃的牙轮钻头轴承模拟工况下,合理参数的圆形、椭圆形和微沟槽形织构均能有效提升钻头滑动轴承的摩擦学性能,降低轴承的粘着磨损失效。文献[83]也指出,存在密封泄漏条件下,基于捕获磨屑的工作机理,合理参数的表面织构同样能改善钻头滑动轴承的摩擦学性能。因此,数值仿真和单元实验研究结果证实了表面织构提升牙轮钻头滑动轴承润滑及摩擦学性能的有效性,也为后续的进一步研究奠定了基础。为开展全尺寸的织构化钻头滑动轴承摩擦学实验研究,织构加工方法的选择及有效的轴承曲面织构加工工艺设计是非常有必要的。文献[77]从织构加工效率、加工质量及加工成本角度综合考虑,详细地探讨了飞秒激光、纳秒激光及精密雕刻三种织构加工技术的优劣性,并指出纳秒激光技术适用于牙轮钻头滑动轴承表面的织构加工。文献[84]则在选择纳秒激光技术作为轴承表面织构的加工方法后,设计了相应的钻头轴承表面织构加工平台和加工工艺方案,并形成对应的织构加工质量测量评价方法;开展的全尺寸轴承台架实验同样也表明,合理参数织构对提升钻头轴承的摩擦学性能非常有利。

通过理论和试验研究发现,织构化牙轮钻头滑动轴承和织构化压裂柱塞泵等油气装备的摩擦磨损都得到有效降低,承载力、寿命以及润滑性能都得到有效改善,目前的加工技术也较易实现油气装备表面织构化,因此,利用仿生表面织构技术来提高油气装备的润滑及摩擦学性能是可行的。此外,改进现有的理论分析模型以及试验平台,开展更加适合实际工况油气装备的表面织构参数优化设计,必将为仿生表面织构在油气装备领域的应用和推广提供广阔的前景。

5 结论

1) 在表面织构的研究中,要注意 Reynolds 方程的适用性范围,以及流体控制方程的正确选择。对于一些复杂的理论模型如 N-S 方程,可以尝试开发高效的数值计算方法。同时,在进行实际工况的替代试验时一定要保证结果的正确性。

2) 表面织构的理论和试验研究都已取得了不错的成果,涉及的领域也很广泛,但在极端工况以及生物医学等方面还相对欠缺,而研究对象、所用的方法也各不相同。因此,可以制定一些研究标准,统一规范,有利于在具体的研究点上形成一个较为完善的理论体系,对今后的研究工作也有重要意义。

3) 表面织构的参数优化设计研究已经很多,但

大多是为了润滑减磨, 可以发散思维, 充分发掘表面织构的潜在功能, 而且目前的研究比较散乱, 可以考虑将有效的研究结果整合, 构建一个数据库并逐渐完善, 以期能根据不同的对象及其实际工况从库中选出最优的表面织构参数组合。不少实例已经表明, 合理参数的表面织构能显著改善油气装备摩擦副的润滑和摩擦性能, 鉴于油气装备对油气行业甚至国民经济的重要作用, 未来应大力扶持和加强表面织构在油气装备领域的研究及应用。

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.
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.
- [2] HOLMBERG K, ANDERSSON P, ERDEMIR A. Global energy consumption due to friction in passenger cars[J]. Tribology international, 2012, 47: 221-234.
- [3] 孙久荣, 戴振东. 非光滑表面仿生学(I)[J]. 自然科学进展, 2008, 18(7): 241-246.
SUN Jiu-rong, DAI Zhen-dong. Non-smooth surface bionics(I)[J]. Progress in natural science, 2008, 18(7): 241-246.
- [4] 余祖新, 牟献良, 王玲, 等. 超疏水表面在提高镁合金耐腐蚀性能上的研究进展[J]. 装备环境工程, 2016, 13(6): 120-129.
SHE Zu-xin, MOU Xian-liang, WANG Ling, et al. Research progress of the superhydrophobic surfaces for improving the corrosion resistance of magnesium alloy[J]. Equipment environmental engineering, 2016, 13(6): 120-129.
- [5] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 第 4 版. 北京: 清华大学出版社, 2012.
WEN Shi-tao, HUANG Ping. Tribology principle[M]. 4th edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
- [6] JR R A C. A hydrodynamical theory of piston ring lubrication[J]. Physics, 1936, 7(9): 364-367.
- [7] HAMILTON D B. A theory of lubrication by micro-irregularities[J]. Journal of basic engineering, 1966, 88(1): 177.
- [8] BIBOULET N, BOUASSIDA H, LUBRECHT A A. Cross hatched texture influence on the load carrying capacity of oil control rings[J]. Tribology international, 2015, 82: 12-19.
- [9] TALA-IGHIL N, FILLON M. A numerical investigation of both thermal and texturing surface effects on the journal bearings static characteristics[J]. Tribology international, 2015, 90: 228-239.
- [10] 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 Guo-liang, WANG Xiao-lei. Lubrication properties of surface texture on PDMS[J]. Tribology, 2010, 30(3): 262-267.
- [11] JING Han, LIANG Fang, SUN Jia-peng, et al. Hydrodynamic lubrication of micro-dimple textured surface using three-dimensional CFD[J]. Tribology transactions, 2010, 53(6): 860-870.
- [12] 王洪涛, 李艳, 朱华. 椭圆柱形织构几何参数和排布模式对其润滑减摩性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(1): 77-83.
WANG Hong-tao, LI Yan, ZHU Hua. Effect of geometry parameters and patterns on tribological properties of textured surface with elliptical dimples[J]. Tribology, 2016, 36(1): 77-83.
- [13] SYED I, SARANGI M. Hydrodynamic lubrication with deterministic micro-textures considering fluid inertia effect[J]. Tribology international, 2014, 69(1): 30-38.
- [14] FELTER C L. Numerical simulation of piston ring lubrication[J]. Tribology international, 2008, 41(9): 914-919.
- [15] FELDMAN Y, KLIGERMAN Y, ETSION I. A hydrostatic laser surface textured gas seal[J]. Tribology letters, 2006, 22(1): 21-28.
- [16] DE KRAKER A, VAN OSTAYEN R A J, RIXEN D J. Development of a texture averaged reynolds equation[J]. Tribology international, 2010, 43(11): 2100-2109.
- [17] KRAKER A. A multiscale method modeling surface texture effects[J]. Journal of tribology, 2007, 129(2): 485-497.
- [18] VONNEUMANN J, RICHTMYER R D. A method for the numerical calculation of hydrodynamic shocks[J]. Journal of applied physics, 1950, 21(3): 232-237.
- [19] 李付鹏. 基于有限差分法和有限体积法的水流动画模拟[D]. 合肥: 安徽大学, 2004.
LI Fu-peng. Flow animation simulation based on finite difference method and finite volume method[D]. Hefei: Anhui University, 2004.
- [20] 张芮菡. 基于有限元-有限体积方法的裂缝性油藏数值模拟研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
ZHANG Rui-han. Numerical simulation of fractured reservoir based on finite element-finite volume method[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [21] MILTSIOS G K. Lubrication and friction of piston and piston rings in internal combustion engines[D]. United States: University of Michigan, 1987.
- [22] ETSION I, BURSTEIN L. A model for mechanical seals with regular micro-surface structure[J]. Tribology transactions, 1996, 39(3): 677-683.
- [23] JANG G H, YOON J W. Stability analysis of a hydrodynamic journal bearing with rotating herringbone grooves[J]. Journal of tribology, 2003, 125(2): 291-300.
- [24] TALA-IGHIL N, MASPEYROT P, FILLON M, et al. Effects of surface texture on journal-bearing characteristics under steady-state operating conditions[J]. Journal of engineering tribology, 2007, 221(6): 623-633.
- [25] TALA-IGHIL N, MASPEYROT P, FILLON M, et al. Hydrodynamic effects of texture geometries on journal

- bearing surfaces[C]//10th international conference on tribology ROTRIB'07. Bucharest, Romania: [s. n.], 2007: 47-52.
- [26] TALA-IGHIL N, FILLON M, MASPEYROT P. Effect of textured area on the performances of a hydrodynamic journal bearing[J]. Tribology international, 2011, 44(3): 211-219.
- [27] JI J, FU Y, BI Q. Influence of geometric shapes on the hydrodynamic lubrication of a partially textured slider with micro-grooves[J]. Journal of tribology, 2014, 136(4): 041702.
- [28] GERO L R, ETTLES C M M. An evaluation of finite difference and finite element methods for the solution of the reynolds equation[J]. A S L E Transactions, 1986, 29(2): 166-172.
- [29] PEI S, MA S, XU H, et al. A multiscale method of modeling surface texture in hydrodynamic regime[J]. Tribology international, 2011, 44(12): 1810-1818.
- [30] ELROD H G. A general theory for laminar lubrication with reynolds roughness[J]. Journal of the franklin institute, 1979, 101(1): 8-14.
- [31] ARGHIR M, ROUCOU N, HELENE M, et al. Theoretical analysis of the incompressible laminar flow in a macro-roughness cell[J]. Journal of tribology, 2003, 125(2): 309-318.
- [32] LI J, CHEN H. Evaluation on applicability of reynolds equation for squared transverse roughness compared to CFD[J]. Journal of tribology, 2007, 129(4): 963-967.
- [33] DOBRICA M B, FILLON M. About the validity of reynolds equation and inertia effects in textured sliders of infinite width[J]. Journal of engineering tribology, 2009, 223(1): 69-78.
- [34] MARIAN V G, PREDESCU A, PASCOVICI M D. Theoretical analysis of an infinitely wide rigid cylinder rotating over a grooved surface in hydrodynamic conditions[J]. Journal of engineering tribology, 2010, 224(8): 757-763.
- [35] 马晨波, 朱华, 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): 95-100.
- MA Chen-bo, ZHU Hua, SUN Jian-jun. Applicable equation study of lubrication calculation of surface texture based on CFD analysis[J]. Journal of mechanical engineering, 2011, 47(15): 95-100.
- [36] QIU Y, KHONSARI M M. On the prediction of cavitation in dimples using a mass-conservative algorithm[J]. Journal of tribology, 2009, 131(4): 041702.
- [37] ZHANG J, MENG Y. Direct observation of cavitation phenomenon and hydrodynamic lubrication analysis of textured surfaces[J]. Tribology letters, 2012, 46(2): 147-158.
- [38] PATIR N, CHENG H S. An average flow model for determining effects of three-dimensional roughness on partial hydrodynamic lubrication[J]. Journal of lubrication Technology, 1978, 100(1): 12-17.
- [39] ROHDE S M. A mixed friction model for dynamically loaded contacts with application to piston ring lubrication[J]. Winter annual meeting of ASME, 1980: 262-280.
- [40] REN N. Advanced modeling of mixed lubrication and its mechanical and biomedical applications[D]. Evanston, Illinois: Northwestern University, 2009.
- [41] HU Y Z, ZHU D. A full numerical solution to the mixed lubrication in point contacts[J]. Journal of tribology, 2000, 122(1): 1-9.
- [42] KRAKER A. A multiscale method modeling surface texture effects[J]. Journal of tribology, 2007, 129(2): 485-497.
- [43] 周龙, 白敏丽, 吕继组, 等. 用耦合分析法研究内燃机活塞环-气缸套传热润滑摩擦问题[J]. 内燃机学报, 2008, 26(1): 69-75.
- ZHOU Long, BAI Min-li, LV Ji-zu, et al. Study of heat transfer lubrication and friction of piston ring-liner in internal combustion engines using the coupled methods[J]. Transactions of CSICE, 2008, 26(1): 69-75.
- [44] BRUNETIERE N, TOURNERIE B. Numerical analysis of a surface-textured mechanical seal operating in mixed lubrication regime[J]. Tribology international, 2012, 49(11): 80-89.
- [45] 王斌, 陈辛波. 混合润滑状态下渐开线直齿轮啮合效率分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(12): 1904-1911.
- WANG Bin, CHEN Xin-bo. Analysis of meshing efficiency of involute spur gears based on mixed elastohydrodynamic lubrication[J]. Journal of Tongji University (natural science), 2014, 42(12): 1904-1911.
- [46] 刘明勇, 刘怀举, 朱才朝, 等. 粗糙度纹理对有限长线接触混合润滑影响[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(6): 690-698.
- LIU Ming-yong, LIU Huai-ju, ZHU Cai-chao, et al. Effects of rough surface topography on the characteristics of mixed lubrication in finite line contact[J]. Tribology, 2015, 35(6): 690-698.
- [47] ZHANG H, HUA M, DONG G N, et al. A mixed lubrication model for studying tribological behaviors of surface texturing[J]. Tribology international, 2016, 93: 583-592.
- [48] SALAMA M E. The effect of macro-roughness on the performance of parallel thrust bearings[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, 1950, 163(1): 149-161.
- [49] MARTINI A. Rolling contact fatigue performance of vibro-mechanical textured surfaces[J]. Tribology transactions, 2010, 53(4): 610-620.
- [50] VILHENA L M, SEDLACEK M, PODGORNIK B, et al. Surface texturing by pulsed Nd:YAG laser[J]. Tribology international, 2009, 42(10): 1496-1504.
- [51] WANG X, KATO K. Improving the anti-seizure ability of SiC seal in water with RIE texturing[J]. Tribology letters, 2003, 14(4): 275-280.
- [52] 张云电, 赵峰, 黄文剑. 摩擦副工作表面微坑超声加工方法的研究[J]. 中国机械工程, 2004, 15(14): 1280-1282.

- ZHANG Yun-dian, ZHAO Feng, HUANG Wen-jian. Study on ultrasonic machining method of micro-pits of working surface between friction pairs[J]. China mechanical engineering, 2004, 15(14): 1280-1282.
- [53] UEHARA Y, WAKUDA M, YAMAUCHI Y, et al. Tribological properties of dimpled silicon nitride under oil lubrication[J]. Journal of the european ceramic society, 2004, 24(2): 369-373.
- [54] STEPHENS L S, SIRIPURAM R, HAYDEN M, et al. Deterministic micro asperities on bearings and seals using a modified LIGA process[J]. Journal of engineering for gas turbines & power, 2004, 126(1): 573-580.
- [55] TANDON N. Tribological studies of lubricated laser-textured point contacts in rolling/sliding reciprocating motion with investigations of wettability and nanohardness[J]. Tribology transactions, 2015, 58(4): 625-634.
- [56] 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.
- [57] 何霞, 廖文玲, 王国荣, 等. 织构边缘凸起对压裂泵柱塞密封副摩擦性能的影响[J]. 润滑与密封, 2016, 41(7): 96-101.
- HE Xia, LIAO Wen-lin, WANG Guo-rong, et al. Influence of edges bulge of texture on tribological performances of plunger-seal pair in fracturing pump[J]. Lubrication engineering, 2016, 41(7): 96-101.
- [58] SEGUN D Z, HWANG P. Friction control by multi-shape textured surface under pin-on-disc test[J]. Tribology international, 2015, 91: 111-117.
- [59] 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.
- [60] 朱章杨, 莫继良, 王东伟, 等. 沟槽对界面振动及摩擦磨损特性的影响[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(4): 551-557.
- ZHU Zhang-yang, MO Ji-liang, WANG Dong-wei, et al. Effect of groove on interface vibration and friction and wear behaviors[J]. Tribology, 2017, 37(4): 551-557.
- [61] 江汪彪, 胡亚辉, 苏哩莉, 等. 凹坑型微织构对不锈钢/皮质骨摩擦副摩擦性能的影响[J]. 天津理工大学学报, 2017, 33(4): 62-64.
- JIANG Wang-biao, HU Ya-hui, SU Li-li, et al. Surface texture and its influence on tribological properties of stainless steel/cortical bone[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2017, 33(4): 62-64.
- [62] 程香平, 康林萍, 张友亮, 等. 润滑条件下菱形孔织构端面摩擦学特性研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(6): 658-664.
- CHENG Xiang-ping, KANG Lin-ping, ZHANG You-liang, et al. Tribological characteristics of end faces with diamond macro-pores textured under lubrication[J]. Tribology, 2015, 35(6): 658-664.
- [63] BRIZMER V, KLIGERMAN Y, ETSION I. A laser surface textured parallel thrust bearing[J]. A S L E Transactions, 2003, 46(3): 397-403.
- [64] KLIGERMAN Y, SHINKARENKO A, ETSION I. Improving tribological performance of piston rings by partial surface texturing[J]. Journal of tribology, 2005, 127(3): 632-638.
- [65] 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(3): 1-6.
- [66] ZHOU L, KATO K, VURENS G, et al. The effect of slider surface texture on flyability and lubricant migration under near contact conditions[J]. Tribology international, 2002, 36(4): 269-277.
- [67] WU Z, DENG J, SU C, et al. Performance of the micro-texture self-lubricating and pulsating heat pipe self-cooling tools in dry cutting process[J]. International journal of refractory metals & hard materials, 2014, 45: 238-248.
- [68] ISMAIL S, SARANGI M. Effects of texture shape and fluid-solid interfacial slip on the hydrodynamic lubrication performance of parallel sliding contacts[J]. Journal of engineering tribology, 2014, 228(4): 382-396.
- [69] SHEN C, KHONSARI M M. Effect of dimple's internal structure on hydrodynamic lubrication[J]. Tribology letters, 2013, 52(3): 415-430.
- [70] QIU M, MINSON B R, RAEYMAEKERS B. The effect of texture shape on the friction coefficient and stiffness of gas-lubricated parallel slider bearings[J]. Tribology international, 2013, 67(4): 278-288.
- [71] SIRIPURAM R B, STEPHENS L S. Effect of deterministic asperity geometry on hydrodynamic lubrication[J]. Journal of tribology, 2004, 126(3): 527-534.
- [72] 丁行武, 王家序, 郭胤, 等. 基于滑动摩擦的摩擦副表面织构优化分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013(s1): 183-188.
- DING Xing-wu, WANG Jia-xu, GUO Yin, et al. Optimization analysis of the surface texture of friction pair based on sliding friction[J]. Journal of Sichuan University (engineering science edition), 2013(s1): 183-188.
- [73] GHERCA A R, MASPEYROT P, HAIJAM M, et al. Influence of texture geometry on the hydrodynamic performances of parallel bearings[J]. Tribology transactions, 2013, 56(3): 321-332.
- [74] MENG X, BAI S, PENG X. Lubrication film flow control by oriented dimples for liquid lubricated mechanical seals[J]. Tribology international, 2014, 77(6): 132-141.
- [75] 阳江舟, 莫继良, 盖小红, 等. 制动盘材料表面织构化处理对摩擦噪声影响的试验分析[J]. 摩擦学学报, 2015,

- 35(3): 322-327.
YANG Jiang-zhou, MO Ji-liang, GE Xiao-hong, et al. Experimental study on the effect of groove-textured surface on the friction-induced noise of brake disc materials[J]. Tribology, 2015, 35(3): 322-327.
- [76] 谭凯文, 肖华平, 刘书海. 4 种钻采装备的减磨抗磨损技术研究进展[J]. 石油矿场机械, 2016, 45(5): 102-110.
TAN Kai-wen, XIAO Hua-ping, LIU Shu-hai. Recent advances in friction reduction and anti-wear technology of four kinds of equipment in oil and gas exploration[J]. Oil field equipment, 2016, 45(5): 102-110.
- [77] 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 antifricition mechanism of the rock bit journal bearing[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [78] 杨迎新, 王希勇, 陈炼, 等. 一种螺旋浮动套滑动轴承: 中国, CN102032267A[P]. 2011-04-27.
YANG Ying-xin, WANG Xi-yong, CHEN Lian, et al. A spiral floating sleeve sliding bearing: China, CN102032267A [P]. 2011-04-27.
- [79] WANG G R, ZHONG L, HE X, et al. Experimental study of tribological properties of surface texture on rock bit sliding bearings[J]. Journal of engineering tribology, 2014, 228(12): 1392-1402.
- [80] HE X, ZHONG L, WANG G, et al. Tribological behavior of femtosecond laser textured surfaces of 20CrNiMo/beryllium bronze tribo-pairs[J]. Industrial lubrication & tribology, 2015, 67(6): 630-638.
- [81] WANG G, ZHONG L, LIU Q, et al. Effect of microgrooves generated by machining on tribological properties of 20CrNiMo/beryllium bronze tribopairs under low-speed and heavy-load conditions[J]. Journal of engineering tribology, 2015, 230(7): 208-210.
- [82] WANG G, JIANG L, HE X, et al. Effect of rectangular surface texture on tribology properties of beryllium bronze/20CrNiMo under different loads[J]. Journal of the balkan tribological association, 2015, 21(2): 329-338.
- [83] 何霞, 廖文玲, 王国荣, 等. 密封泄漏工况下钻头轴承磨损机理及织构对磨损的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2017(3): 12-16.
HE Xia, LIAO Wen-lin, WANG Guo-rong, et al. Wear mechanism of rock bit bearing and influence of texture on wear under working condition of seal leakage[J]. Ordnance material science and engineering, 2017(3): 12-16.
- [84] 蒋龙. 牙轮钻头轴承表面织构加工及其对摩擦学性能影响的研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
JIANG Long. Study on surface texture machining of roller bit bearing and its effect on tribological properties[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.