

高分子材料机械密封磨损特性及 表面织构的影响

赵 帅^{1,2}, 王晓雷^{1*}

(1 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016;

2 中航商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241)

摘 要: 为提高金属/高分子材料机械密封的抗磨损性能, 采用光刻-电解技术在316不锈钢表面制作微凹坑阵列形式的表面织构, 与5种不同弹性模量的高分子材料组成摩擦副进行磨损试验。试验结果表明, 对弹性模量最小的UHMWPE材料, 表面织构起到了增磨作用, 对其他四种弹性模量较高的材料, 表面织构起到减磨作用, 而且, 随着高分子材料弹性模量的增大, 表面织构表现出的减磨作用也随之增大。为解释这个现象, 利用ANSYS有限元分析软件对摩擦副接触面进行了应力和变形分析, 结果表明: 织构化表面在接触过程中会产生应力集中和表面形变, 材料的弹性模量越小, 凹坑引起的变形越明显, 可能产生的切削作用越显著。

关键词: 机械密封; 高分子材料; 表面织构; 磨损

中图分类号: TH117.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595(2015)06-0761-07

The Effects of Surface Texture on the Wear Properties of Mechanical Seals Made of Metal and Polymers

ZHAO Shuai^{1,2}, WANG Xiao-lei^{1*}

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,
Nanjing 210016, China

2. Avic Commercial Aircraft Engine Co Ltd, Shanghai 200241, China)

Abstract: In order to improve the anti-wear properties of mechanical seals made of metal and polymer, surface texture of dimple patterns was fabricated by photolithography and micro-electrochemical machining on 316 stainless steel, the wear tests of textured stainless steel against five different polymer materials were carried out. It is found that surface texture increased wear while the lowest Young's modulus material UHMWPE was used, as well as decreased wear to other four materials whose Young's modulus were higher, and the wear rate decreased significantly as the Young's modulus of polymer materials raised. Then, the FEM software ANSYS was employed to analyze the stress and deformation of contact surfaces to explain the mechanisms. The results show that textured surface increased the contact stress and deformation at the edges of texture. And the deformation became more obvious to results in cutting wear possibly while the Young's modulus was low.

Key words: mechanical seal, polymer material, surface texture, wear

机械密封是流体机械中用于旋转轴端密封的重
要部件。传统的接触式机械密封利用弹性元件对密封

端面施加一定压力, 使动、静环相互贴紧, 从而达到
密封的效果。为满足密封端面在相互运动过程中良好

Received 25 April 2015, revised 10 June 2015, accepted 23 June 2015, available online 28 November 2015.

* Corresponding author. E-mail: WXL@nuaa.edu.cn, Tel: +86-25-84893630.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China(51175246).

国家自然科学基金项目(51175246)资助。

的摩擦相容性和物理力学性能要求,一般情况下采用软、硬材料组成摩擦副.常用的密封端面软材料有碳石墨和铜合金,硬质材料有合金钢和工程陶瓷等.

虽然在理论上,由于表面宏观波纹度和微观粗糙度的存在会产生一定的流体动压效应,表面流体介质在热的作用下产生相变等原因能够提供一定的开启力^[1],但随着密封 PV 值的提高,这种形式机械密封的摩擦系数大,摩擦生热程度高,容易因磨损过度而导致密封失效,影响设备的可靠性,并有可能造成安全事故.某航天器用液体泵的机械密封为实现轻量化以及保持水介质的纯净度,采用了高分子材料与金属材料组成机械密封.但目前存在的问题是,由于密封面的磨损,泵的寿命和可靠性不能达到实际需求,制约了我国载人航天的发展.

实现密封非接触化是解决上述问题的有效途径.非接触式密封利用流体静压或动压作用,使密封端面间形成一层完整的流体膜,动、静环之间不直接接触,从而达到减小摩擦,降低磨损的效果.典型的非接触式密封有螺旋槽气膜密封、上游泵送机械密封等.密封端面的表面织构化能为密封端面提供额外的流体动压力,促进流体膜的形成,是机械密封的一个新的发展方向.

1989年Kaneko^[2]对织构化密封端面的静态和动态特性开展了研究,发现表面织构能增加流体膜刚度,提高密封动环的稳定性.Etsion等^[3-4]利用激光技术在密封表面加工了微凹坑阵列,从理论和试验两方面研究了密封的摩擦学特性,结果表明,表面织构能够降低密封端面的摩擦力矩,有效地提高密封的最高 PV 值.纪敬虎等^[5]利用激光在密封端面上加工了跨尺度的微凹坑和宏观上游泵送槽结构,与无织构机械密封相比,摩擦转矩最大可减小65%.万铁等^[6]的研究结果表明,多孔端面密封可将最大 PV 值提高2.5倍左右.于海武等^[7-8]的研究结果表明,通过对表面织构的形状和排布形式的优化可以进一步提升流体动压效应.彭旭东等^[9-10]研究了不同形状微凹坑对机械密封性能的影响,发现倾斜的椭圆形凹坑具有反向泵吸效应,可

以实现零泄露.

在对软质材料表面织构特性的研究方面,Dong等^[11]研究了织构化UHMWPE人工关节臼/钢球的温度场及磨损特性,发现表面织构会影响接触面温度的分布,进而导致不同的磨损形式.姜亮等^[12]通过试验研究了PDMS表面织构的摩擦学特性,结果表明,软材料表面织构设计原则与硬质材料有很大的不同.Zhang等^[13-14]分别在金属和UHMWPE的表面进行织构加工,并进行摩擦学试验,结果表明,当织构加工在软材料表面时,容易获得低的摩擦系数,而当织构加工在金属表面时,在织构边缘容易产生高的接触应力,从而增加摩擦.

从上述的研究及相关文献检索可知,目前在密封表面织构特性的研究方面,针对硬质材料的较多,针对软质材料的较少;针对摩擦性能的较多,针对磨损特性的较少;特别是织构化机械密封中软质材料磨损机理方面的研究几乎还是一个空白.为此,为提高上述航天用密封的寿命和可靠性,本研究中选择五种不同软硬的高分子材料,分别与织构化金属材料组成摩擦副,以磨损率作为评价指标,探讨材料特性对织构化密封表面磨损特性的影响.

1 试验部分

1.1 试样制备

当摩擦副由软硬材料组成时,虽然将表面织构加工在软材料表面可以避免高接触应力,但将表面织构加工在硬材料表面时,可以避免由于磨损导致的表面织构形态的变化.本文中选用316不锈钢作为硬质材料,采用光刻—电解加工工艺,将表面织构加工在其接触表面.图1为表面织构加工工艺流程:(a)打磨、抛光试样至表面粗糙度 R_a 为50 nm左右,并清洁试样表面;(b)利用旋转涂胶工艺在试样表面涂覆厚度均匀的光刻胶;(c, d)通过紫外线曝光、显影等过程在金属表面制作具有一定几何参数的光刻胶掩膜;(e, f)利用电解去除金属材料,得到所需参数的表面织构.图2是织构化316不锈钢试样的表面形貌.本文中采用的表面

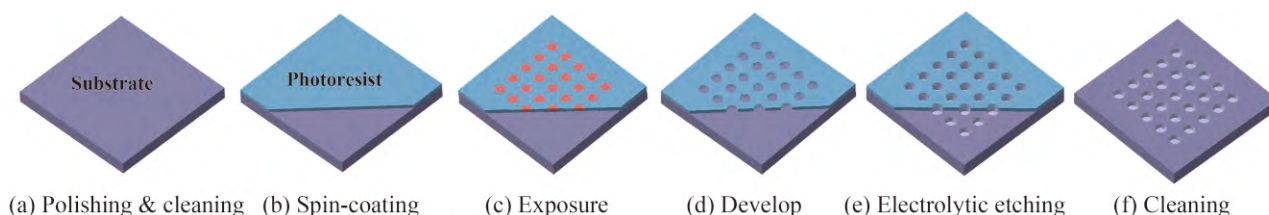


Fig. 1 The process of photolithography and micro-electrolytic machining

图1 光刻—电解加工工艺流程

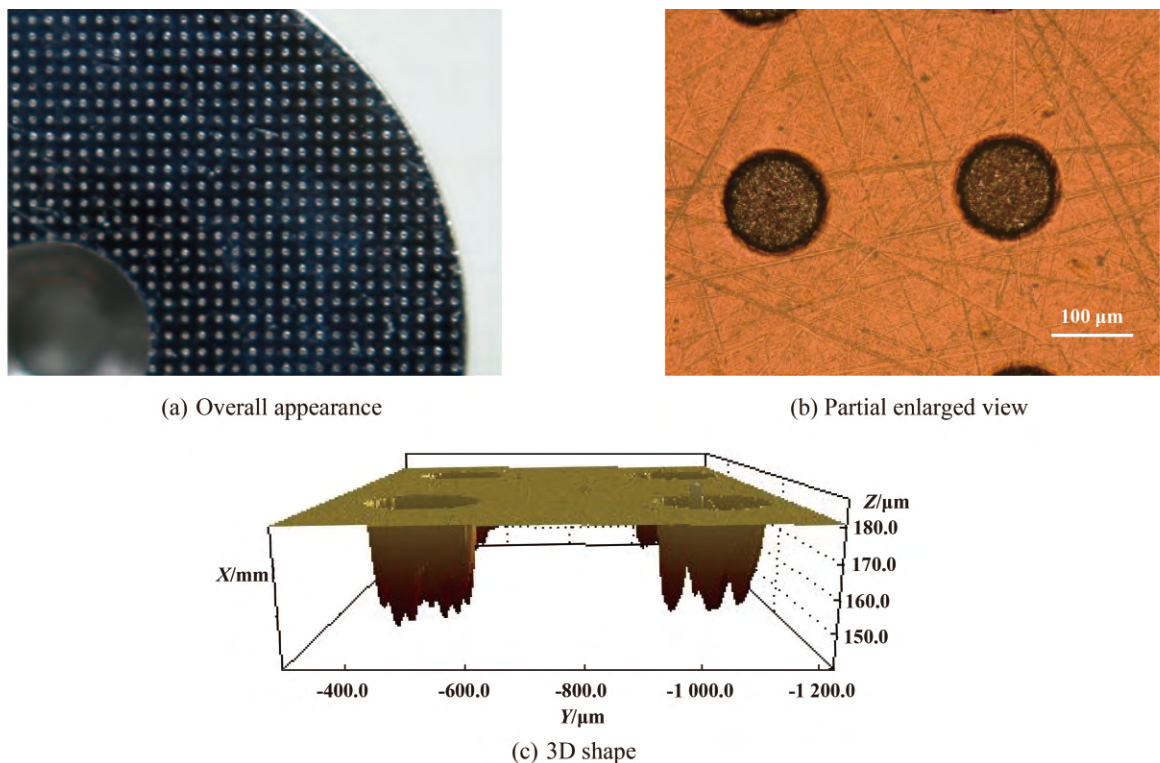


Fig. 2 The morphology of the surface texture on the stainless steel
图2 织构化不锈钢表面形貌

织构均为圆形凹坑阵列, 微凹坑直径 d 为100和200 μm , 面积率 r 分别为10.3%、19.6%、29.9%和40.1%, 凹坑深度 h 统一为10 μm .

本文的研究中选用5种高分子材料试样, 模拟机械密封中的静环. 高分子材料试样采用成品材料通过机加工方法得到, 其表面粗糙度 R_a 为400~800 nm. 5种材料分别为超高分子量聚乙烯(UHMWPE)、聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET)、聚甲醛(POM)、聚己二酰己二胺(PA66)和聚醚醚酮(PEEK), 其主要物理特性如表1所示.

表1 高分子材料主要物理特性

Table 1 The main physical properties of the polymer materials

Materials	Elasticity modulus/GPa	Shore hardness (D)	Density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
UHMWPE	1.1	63	0.94
PET	2.2	78	1.38
POM	2.6	76	1.43
PA66	8.3	82	1.15
PEEK	21.1	90	1.35

1.2 试验设计

采用MMW-1A型万能摩擦磨损试验机在室温25 $^{\circ}\text{C}$, 湿度60%左右条件下进行磨损试验. 如图3所示, 该试验机采用电机驱动弹簧加载, 电机带动皮带轮驱

动主轴实现旋转运动. 由于机械密封的磨损发生在混合或边界摩擦条件, 本试验采用高载低速的加速试验方式. 选取试验载荷为280 N(0.6 MPa), 转速为200 r/min (13.2 m/min), 采用去离子水作为润滑介质, 试验时间为12 h. 试验前后均对高分子材料进行清洁和干燥并用分析天平称量试样质量. 试验前后的质量差值即为试样的磨损量, 试样的磨损率可通过公式得出, 即:

$$W_s = \frac{V_d}{F \cdot L}$$

其中: V_d 为磨损体积, 由磨损质量换算得到, mm^3 ; F 为法向载荷, N; L 为滑行总距离, m.

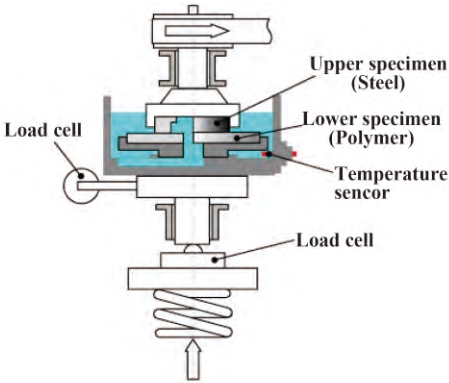


Fig. 3 Schematic of the test apparatus
图3 试验机原理图

2 试验结果

图4为不同高分子材料与不同参数的结构化316不锈钢在载荷280 N、转速200 r/min、去离子水介质、经过12 h磨损试验的磨损率,其中横坐标为表面结构面积率,纵坐标为磨损率,图中“non”表示非结构化试样。

图4(a)为UHMWPE与不同参数的结构化316不锈钢磨损试验后测得的磨损率。可以看出,相对无结构表面,表面结构的引入起到了强烈的增磨作用。凹坑直径为100 μm 时,磨损率随面积率增大而增大,凹坑直径为200 μm 时,磨损率呈现先减小后增大的趋势,磨损率上升可达14.33~62.25倍。

图4(b)为PET与不同参数表面结构化316不锈钢磨损试验后测得的磨损率。图中可以看出凹坑直径100 μm ,面积率10%以及凹坑直径200 μm ,面积率30%两组试样表现出一定的减磨效果,相对无结构试样,磨损率分别下降了14.89%和17.02%。对凹坑直径100 μm 试样,磨损率随着面积率增加而增加,对直径200 μm 的试样,磨损率呈现先增大后减小的趋势。

图4(c)为POM与不同参数结构化316不锈钢磨损试验后测得的磨损率。从整体来看,磨损率先降低后增高,表面结构的引入能有效地降低磨损率。当表面结构的面积率在10%~30%时,表现出明显的减磨效

果,磨损率相比无结构试样下降23.6%~33.2%。其中凹坑直径100 μm ,面积率20%时,减磨效果最明显,磨损率相比无结构试样下降了33.2%。

图4(d)为PA66与不同参数结构化316不锈钢磨损试验后测得的磨损率。表面结构的引入起到了降低磨损率的作用,在各个凹坑直径下,随着面积率的升高,磨损率呈现先减小后略微增大的趋势。表面结构最大减磨效果出现在参数为凹坑直径200 μm ,面积率20%时,试样的减磨效果最明显,磨损率相比无结构试样下降了76.68%。

图4(e)为PEEK与不同参数结构化316不锈钢磨损试验后测得的磨损率。图中可以看出,表面结构的减磨效果十分明显,当凹坑直径100 μm ,面积率10%时,磨损率相比无结构试样下降达到87.5%。

从以上的磨损率试验结果中可以看出,随着高分子材料弹性模量的增加,表面结构起到的减磨作用越来越明显。由不同材料组成的摩擦副的最优减磨结果如图5所示。当弹性模量最低的高分子材料UHMWPE与316不锈钢组成摩擦副时,表面结构的引入带来了剧烈的磨损,磨损率相比无结构试样上升了13.33倍,随着高分子材料弹性模量的升高,表面结构带来的减小磨损的作用逐渐增强,弹性模量最大的PEEK与316不锈钢组成摩擦副时,磨损率下降达到87.5%,减磨效果十分显著。

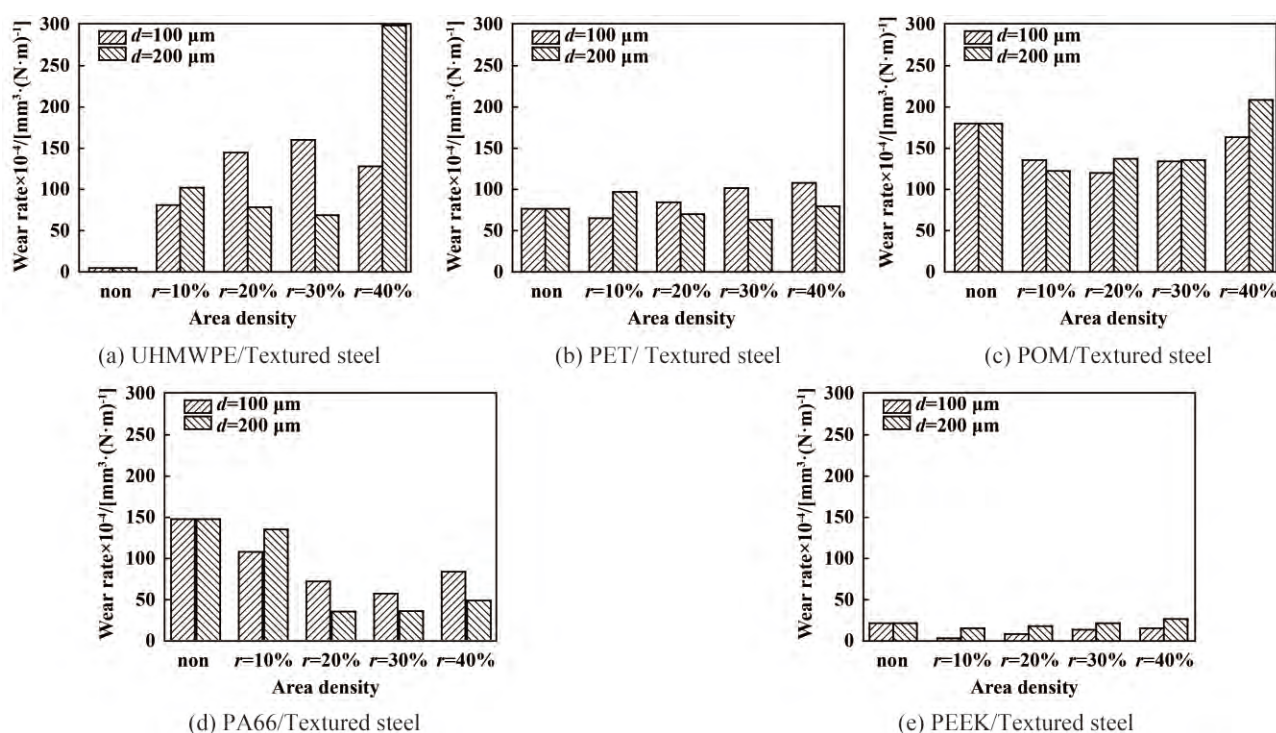


Fig. 4 The wear rates of different materials

图4 不同材料的磨损率

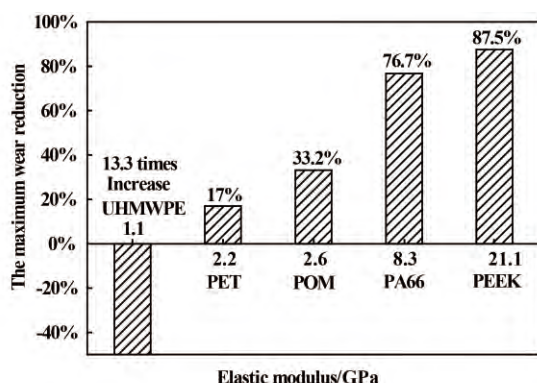


Fig. 5 The maximum wear reduction ratio for the tribo-pairs made of different materials

图5 不同材料摩擦副的最大减磨率

3 结果讨论

现有研究表明, 表面织构减摩机理主要包括附加流体动压效应^[15], “二次润滑”效应^[16]和容纳磨屑作用^[17]. 然而, 研究者发现, 表面织构的引入也会造成接触面应力升高, 引起摩擦系数增大, 磨损增加^[14,18]. 本文中的研究表明, 在同样的织构参数下, 磨损率随着材料弹性模量的增加而减小. 尽管磨损与材料的强度、对偶材料的粘附特性等多种因素相关, 本文中利用ANSYS分析软件对织构化表面进行接触应力和变形分析, 重点关注接触应力和变形可能对磨损产生的影响.

为便于计算, 本文中以一个凹坑单元作为分析模型. 如图6所示, 带有凹坑的316不锈钢为上试样, 光滑的高分子材料作为下试样, 分析类型为静力分析, 单元类型为体单元. 模拟过程中通过变化凹坑直径、单元边长控制表面织构的面积率. 根据实际工况, 设定上试样的上表面为全固定约束; 上、下试样的四个侧面均定义法向位移约束; 下试样下表面施加0.6 MPa的法向载荷.

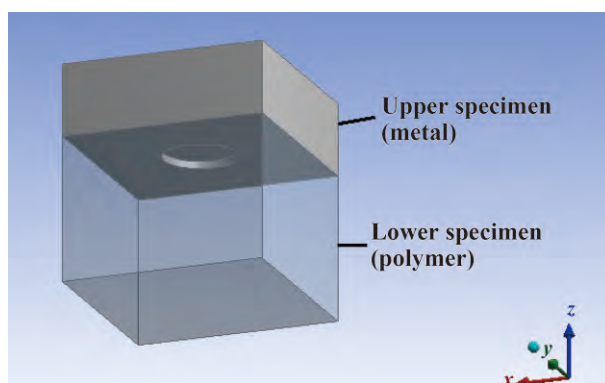


Fig. 6 The contact model of the frictional pair

图6 摩擦副接触分析模型

图7(a)为试样受压后的应力云图, 从图中可以明显地看出, 微凹坑以及微凹坑所对应的区域出现了应力集中现象. 图7(b)为下试样受压后的变形云图, 微凹坑所对应的光滑表面发生了凸起的现象. 结合两张图可以判断, 在摩擦副相互运动的过程中, 由于接触应力的作用会使软材料发生凸起的形变, 当形变较大又存在相对运动时, 金属表面的微凹坑易对对偶软质光滑试样产生微切削作用, 同时导致摩擦系数的增大, 如图7(c)所示.

图8是下试样弹性模量与凸起高度的关系图. 当凹坑深度为10 μm , 面积率为10%~40%, 直径为100 μm 和200 μm 时, 从图8中可以看出, 随着试样的弹性模量增加, 试样表面的凸起高度减小明显. 以本研究中弹性模量最小的UHMWPE和弹性模量最大的PEEK为例, 在相同参数的表面织构下, 其凸起高度的差值可达到20倍. 而如图9所示, 以凹坑深度10 μm , 面积率10%为例, 可以观察到随着凹坑直径的增加, 凸起高度随之增加的现象, 而且弹性模量越小, 凸起高度对于凹坑直径越敏感. 在摩擦过程中, 表面织构对变形产生的凸起可能会产生切削效应. 切削效应会导致

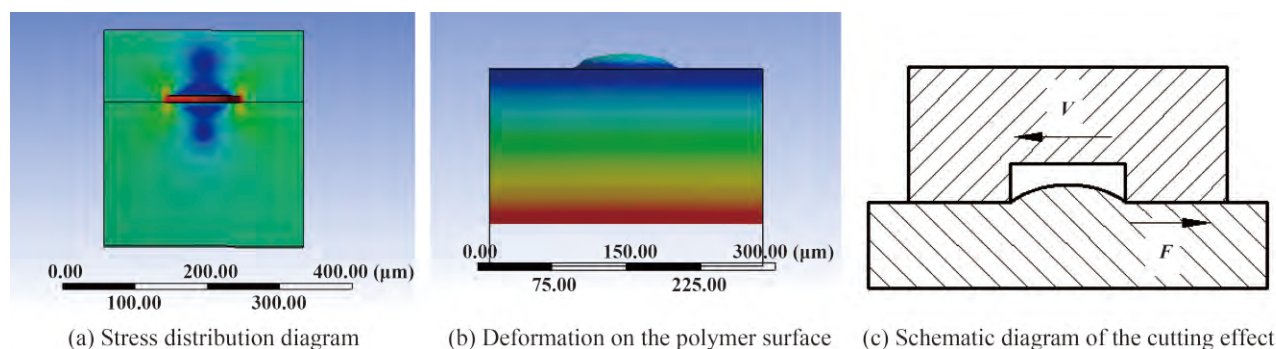


Fig. 7 The stress and deformation on the contacting textured surfaces

图7 织构化表面接触过程中的应力和变形

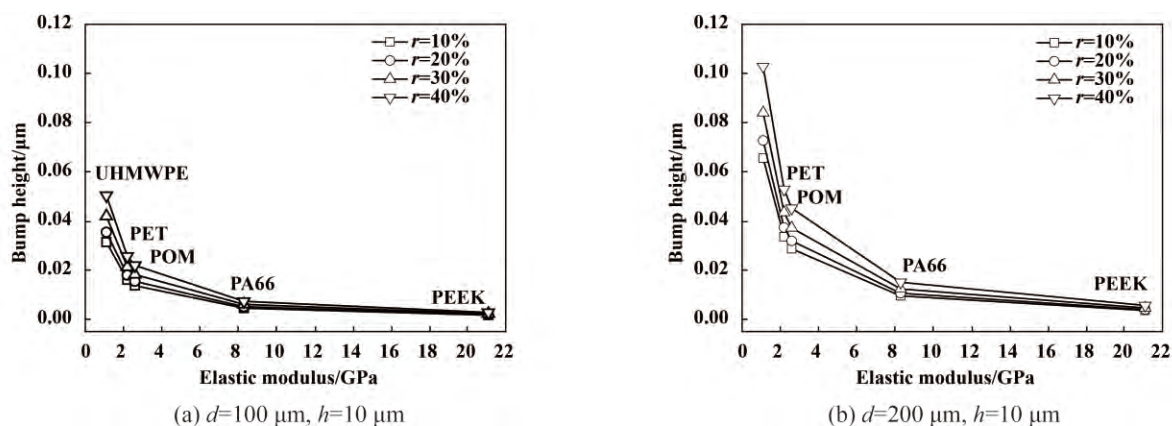


Fig. 8 The height of hump as the function of Young's modulus

图8 表面凸起高度与材料弹性模量的关系

摩擦过程中摩擦系数的上升,磨损量的增加以及摩擦热的产生.而摩擦热会使材料表面软化,从而加剧凸起变形现象,造成接触条件的进一步恶化.当切削作用造成的增摩作用大于表面织构产生的减摩作用时,表面织构对整个摩擦过程表现出增加摩擦系数和磨损率的作用,因此在利用表面织构时,不但要考虑表面织构参数的优化,还要结合摩擦副材料的性质,避免因应力集中和接触变形可能引起的切削作用.

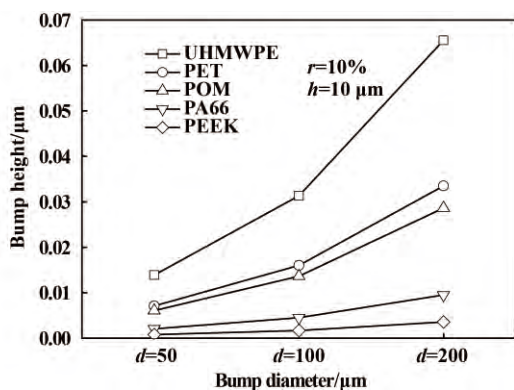


Fig. 9 The height of hump as the function of the dimple diameter

图9 凸起高度与凹坑直径的关系

4. 结论

针对航天器用机械密封轻量化和高可靠性的需求,本文中采用高分子材料与316不锈钢组成摩擦副,并在不锈钢表面加工凹坑型表面织构,通过磨损试验,得出以下结论:

a. 对于低弹性模量的UHMWPE,表面织构表现出增大磨损的效果,随着高分子材料弹性模量的增加,表面织构减小磨损的作用越来越明显.对PET、POM、PA66和PEEK四种材料,表面织构均有减小磨

损的作用,相对于无织构试验,磨损率最大可分别下降17%、33.2%、76.7%和87.5%;

b. 表面织构的引入会在织构边缘产生应力集中的现象,当对偶材料较软时,会产生显著的凸起,可能会导致微切削作用的发生,这是表面织构对摩擦副的摩擦学性能不利的方面,随着高分子材料的弹性模量增加,表面织构造成的微切削作用逐渐减弱.

参考文献

- [1] Ludwig L P, Greiner H F. Designing mechanical face seals for improved performance part 2 lubrication[J]. Mechanical Engineering, 1978, 100(12): 18-23.
- [2] Kaneko S. Application of porous materials to annular plain seals: part 1-static characteristics[J]. Journal of Tribology, 1989, 111(4): 655-660.
- [3] Etsion I. Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing[J]. Tribology Letters, 2004, 17(4): 733-737.
- [4] Etsion I, Halperin G, Greenberg G. Increasing mechanical seals life with laser-textured seal faces[C]. Proceeding of 15th International Conference on Fluid Seal. London: Professional Engineering Publishing Limited, 1997: 3-10.
- [5] Ji J H, Fu Y H, Wang Z Q, et al. Tribological property of mechanical seal with laser-induced multi-scale surface texturing[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(4): 452-456(in Chinese)[纪敬虎,符永宏,王祖权,等.激光表面跨尺度结构化机械密封摩擦性能[J].排灌机械工程学报, 2012, 30(4): 452-456].
- [6] Wan Y, Xiong D S. Laser surface micropored improving tribological properties of face seals[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(2): 29-31(in Chinese)[万轶,熊党生.激光表面微孔化改善端面密封的摩擦学性能[J].润滑与密封, 2007, 32(2): 29-31].
- [7] Yu H W, Yuan S H, Sun Z, et al. Effect of micro-dimple shapes on tribological properties of specimen surfaces[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2011,

- 39(1): 106–110(in Chinese)[于海武, 袁思欢, 孙造, 等. 微凹坑形状对试件表面摩擦特性的影响[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2011, 39(1): 106–110].
- [8] Yu H, Deng H S, Huang W, *et al.* Effect of micro-dimple arrangements on tribological performance of sliding surfaces[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(6): 943–948(in Chinese)[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].
- [9] Peng X D, Du D B, Li J Y. Effect of different section profile micro-pores on seal performance of a laser surface textured mechanical seal[J]. Tribology, 2006, 26(4): 367–371(in Chinese) [彭旭东, 杜东波, 李纪云. 不同型面微孔对激光加工多孔端面机械密封性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2006, 26(4): 367–371].
- [10] Meng X, Bai X, Peng X. Lubrication film flow control by oriented dimples for liquid lubricated mechanical seals[J]. Tribology International, 2014, 77: 132–141.
- [11] Dong G N, Hua M, Li J, *et al.* Temperature field and wear prediction for UHMWPE acetabular cup with assumed rectangular surface texture[J]. Materials & Design, 2007, 28(9): 2 402–2 416.
- [12] Jiang L, Ma G L, Wang X. Lubrication properties of surface texture on PDMS[J]. Tribology, 2010, 30(3): 262–267(in Chinese) [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].
- [13] Zhang B, Huang W, Wang J, *et al.* Comparison of the effects of surface texture on the surfaces of steel and UHMWPE[J]. Tribology International, 2013, 65: 138–145.
- [14] Zhang B, Huang W, Wang X. Biomimetic surface design for ultrahigh molecular weight polyethylene to improve the tribological properties[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2012, 226(8): 705–713.
- [15] Hamilton D, Walowit J, Allen C. A theory of lubrication by microirregularities[J]. Journal of Fluids Engineering, 1966, 88(1): 177–185.
- [16] Wang X, Adachi K, Otsuka K, *et al.* Optimization of the surface texture for silicon carbide sliding in water[J]. Applied Surface Science, 2006, 253(3): 1 282–1 286.
- [17] Suh N P, Mosleh M, Howard P S. Control of friction[J]. Wear, 1994, 175(1): 151–158.
- [18] Wang X, Wang J, Zhang B, *et al.* Design principles for the area density of dimple patterns[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2015, 229(4): 538–546.