

综述·专论

液体空间润滑剂蠕爬流失机理及对策研究进展

戴庆文¹, 黄巍¹, 王晓雷^{1,2}

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016; 2. 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 南京 210016)

摘要: 润滑失效已逐渐成为限制空间机械系统寿命的主要因素之一。综述了空间润滑方法, 分析了空间液体润滑的利弊以及蠕爬流失产生的机理。讨论了抑制润滑剂蠕爬的方式, 展望了表面织构技术在控制液体空间润滑剂蠕爬流失研究中的应用前景。

关键词: 空间润滑; Marangoni 现象; 蠕爬流失; 表面张力; 表面织构

中图分类号: TH117

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2014)06-0125-06

Research Process in Mechanism and Solution of Liquid Lubrication Migration in Space

DAI Qing-wen¹, HUANG Wei¹, WANG Xiao-lei^{1,2}

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

2. Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-manufacturing Technology, Nanjing 210016, China)

ABSTRACT: Lubrication failure has become one of the main reasons that limit the lifetime of mechanical system in space. Brief review of several methods in space lubrication was presented. Advantages and disadvantages of liquid lubrication were introduced and the mechanisms of liquid lubrication migration was demonstrated. Some effective anti-creep methods were introduced. Application outlook of surface texture in preventing the liquid lubrication migration in space was proposed.

KEY WORDS: space lubrication; Marangoni effect; lubrication migration; surface tension; surface texture

随着航天事业的发展,空间润滑这一基础性技术的重要性日益凸显。NASA 早期的研究报告指出,相当比例的空间机械部件失效与润滑失效有关^[1]。我国统计结果也表明,近年来发生的多起空间机械部件失效与特殊环境下的润滑和磨损失效密不可分^[2]。

如何实现空间活动部件长寿命、高可靠性润滑是现阶段空间摩擦学研究的热点之一。

目前空间润滑方式主要有固体润滑和液体润滑两种。固体润滑性能稳定,无挥发和爬行迁移,对温度的变化不敏感,和液体润滑相比,存在摩擦阻力大、

收稿日期: 2014-10-09; 修订日期: 2014-11-14

Received: 2014-10-09; Revised: 2014-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(51475241, 51175246); 江苏省研究生培养创新工程(中央高校基本科研业务费专项资金资助, KYLX_0239)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51475241 and 51175246) and Funding of Jiangsu Innovation Program for Graduate Education (the Fundamental Research Funds for the Central Universities, KYLX_0239)

作者简介: 戴庆文(1988—), 男, 江苏泰州人, 博士研究生, 主要研究方向为表面工程与润滑设计。

Biography: DAI Qing-wen (1988—), Male, from Taizhou, Jiangsu, Doctoral candidate, Research focus: surface texture and lubrication design.

通讯作者: 王晓雷(1963—), 男, 江苏徐州人, 博士, 教授, 主要从事表面工程及摩擦学的研究。

Corresponding author: WANG Xiao-lei (1963—), Male, from Xuzhou, Jiangsu, Ph. D., Professor, Research focus: surface engineering and tribology.

不能自修复等缺陷^[3]。特别是对于处在高速、重载,且要求极小转矩等条件下的空间部件,如卫星动量轮、陀螺马达中的轴承组件等,依然选择液体润滑^[4]。液体润滑具有自修复能力强、摩擦系数低、能耗低、使用寿命长等诸多优点^[5],由于微重力、真空运动部件基体材料浸润性的变化^[4],极易造成液体润滑剂的蠕爬流失,导致空间部件在轨寿命降低,甚至污染整个空间系统^[6]。

对于空间液体润滑剂,如何避免润滑剂的蠕爬流失,使其长久保持在润滑部位,实现长寿命,高可靠性的润滑,已经成为空间液体润滑研究的重点^[7-12]。

1 蠕爬产生的机理

蠕爬现象在 19 世纪初由意大利物理学家 Marangoni 首次观察提出并解释了其机理^[13-19]。液体润滑剂的蠕爬与其表面张力有紧密联系,对于处于润滑剂浸润下的表面,温度梯度、挥发引起的浓度梯度等均能导致表面张力的变化,进而引发液体的蠕爬。图 1 简要概括了几种引起润滑剂蠕爬的机制^[20-23]。

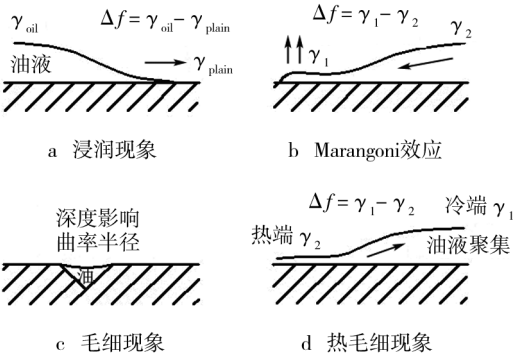


图 1 液体润滑剂的几种蠕爬机制

Fig. 1 Migration mechanisms for liquid lubricant on surfaces

图 1 中 γ 表示为表面张力。图 1a 表示当润滑剂和固体表面张力不同时,若固体表面的表面张力 γ_{plain} 大于润滑油表面张力 γ_{oil} 时,产生“浸润现象”^[20]。图 1b 表示当自由液滴表面存在挥发时,挥发会使油液表面张力不同并形成张力梯度 Δf ,从而导致了液体的流动并在内部形成对流。图 1c 表示的蠕爬流失类似于毛细现象^[24-25],固体表面的微凹坑起到毛细管的作用,润滑油从微凹坑内部沿着凹坑壁爬移,当爬过微凹坑边缘后慢慢蠕爬流失。图 1d 表示产生的蠕爬流失,当油液表面存在温度梯度时,温度梯度会在油液表面形成张力梯度 Δf ,从而导致液体内部的对流

动^[26],由于温度梯度引起的表面张力不平衡导致液体毛细流动,因此被称为热毛细现象^[27]。

图 2 为温度梯度引起的蠕爬流失的机理,当一液体置于固体表面时,可以视为气、液、固三相共存的系统。此系统具有 3 个界面张力 γ_{LV} , γ_{SL} 和 γ_{SV} ,分别对应于气-液、固-液及气-固界面。当系统达到平衡时,这 3 个张力间的关系满足杨氏方程^[28],见式(1)。

$$\gamma_{\text{SV}} = \gamma_{\text{SL}} + \gamma_{\text{LV}} \cos \theta \tag{1}$$

式中: θ 为接触角,是固—液界面与液体表面在交点处的切平面之间的夹角。固体表面温度梯度的存在会改变固-液界面张力 γ_{SL} 和接触角 θ ,使得三相界面处受力不再平衡,从而产生了驱使液体运动的驱动力。

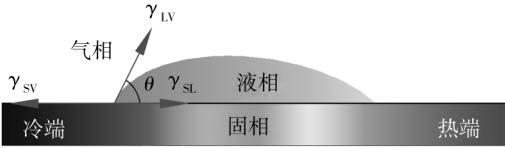


图 2 静置液滴三相界面处表面张力

Fig. 2 Interfacial tensions at the three-phase contact line force of a sessile droplet

液体表面张力的变化将会驱使其自身流动,并在其液体内部形成对流。由表面张力驱动的液体对流又称“Marangoni”对流^[29]。当液态流体界面的表面温度变化时,其表面张力会随之变化,由表面各点处表面张力不平衡产生的作用力会将液体从高温区向低温区牵引。这时热毛细力会驱使液体从高温区向低温区爬移直到达到最终的平衡状态。

综上所述,由于外部环境因素的变化使得润滑剂表面产生了表面张力梯度,表面张力的不同驱使润滑剂产生蠕爬流失。

2 蠕爬流失的试验研究

Kannel 早期的探索性试验就已经表明,润滑剂蠕爬受温度梯度影响。图 3 显示了超精矿物油 KG-80 在热梯度和零重力环境下蠕爬过程,当存在温度梯度时,润滑剂从热区向冷区爬移^[30]。

Fote 等^[31]对空间润滑剂爬移的研究表明,微小的温度梯度能够导致润滑油薄膜从高温区向低温区迅速迁移。润滑剂由于温度作用而产生的迁移速度可以由式(2)得出:

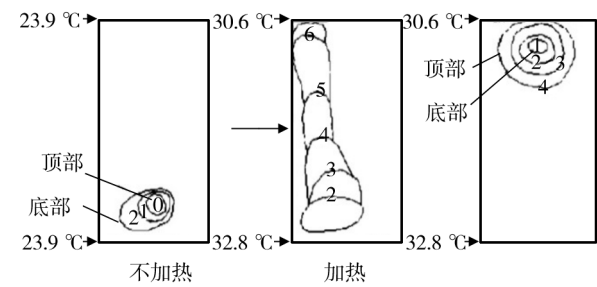


图3 超精炼矿物油 KG-80 的爬移过程

Fig.3 Migration process of ultra-fining mineral oil KG-80

$$v=\frac{h}{2\eta}\cdot\frac{d\gamma}{dT}\cdot\frac{dT}{dx}\tag{2}$$

式中: h 是油膜厚度, η 是润滑剂动力粘度, γ 是润滑剂的表面张力, T 是润滑剂温度^[32]。

表面纹理对液体流动有着重要的影响^[33—37]。为了探究温度梯度作用下表面形貌对润滑剂油膜蠕爬的影响,笔者研究了温度梯度、表面磨痕及其方向等因素对润滑剂蠕爬的影响^[38]。图4所示为温度梯度为2℃/mm时润滑剂在水平方向磨痕表面的蠕爬过程和速度变化趋势,时间间隔为1s。可以看出,蠕爬过程初始阶段速度较快,随着时间的推移,蠕爬速度迅速降低,并最终趋于静止。这是由于初始阶段温度高,温度变化引起的表面张力和接触角的变化速度快,所以初始阶段速度相对较快。

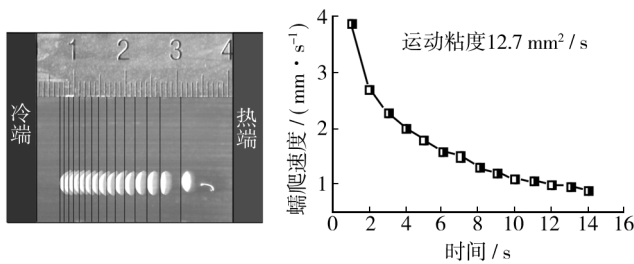


图4 平面液滴单位时间蠕爬过程

Fig.4 Detailed migration behavior and migration velocities recorded with the time interval of one second

表面纹理特征对润滑剂蠕爬有着显著的影响^[39—40]。当表面纹理与温度梯度方向有一定角度时,润滑剂同样会顺着温度梯度和表面纹理方向发生蠕爬。笔者研究了润滑剂在水平方向、45°方向和垂直方向纹理表面蠕爬特性,并采用4种不同黏度的液态石蜡作为对比,图5中 β 为表面纹理与温度梯度方向夹角。

研究表明,相同粘度下,润滑剂在水平方向磨痕表面蠕爬速度较快;在垂直方向磨痕表面速度最慢,

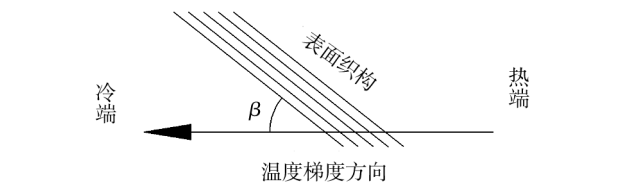


图5 表面纹理方向

Fig.5 Orientation of surface texture

且随着温度梯度的升高,蠕爬速度变快;对于具有同种磨痕方向的表面,在相同温度梯度下,粘度增大,蠕爬速度降低。

3 蠕爬的抑制

液体润滑剂发生蠕爬流失的本质在于其表面张力的变化。因此,对于抑制润滑蠕爬的方法研究主要从抑制表面张力的角度来考虑,主要通过提高润滑剂的表面张力、降低接触摩擦表面的表面张力、改善表面结构等方法来间接改变液体润滑剂的表面张力。

3.1 采用化学涂层

在润滑区域涂覆具有超低表面能的表面涂层,能够对润滑液的蠕爬有显著的阻碍作用。表面涂层能使得金属表面与油分子间的粘附功降低,液相与固相之间的相互作用效果降低,此时润滑剂分子间的内聚功起主要作用,润滑液能够凝聚保持在润滑部位^[7]。氟碳化合物是最常用的表面活性剂之一,它是以氟原子取代碳氢键上的氢原子而形成的碳氟链表面活性剂,碳氟化合物具有极低的表面活性,在摩擦表面直接涂覆一层氟基表面活性剂,可以有效阻止润滑剂的蠕爬扩散,从而有效控制润滑剂防止其污染相关设备^[42]。

3.2 提高润滑剂性能

在实际应用中,由于空间润滑环境的复杂性,使得机械部件对润滑剂要求越来越高,具有很好热稳定性、粘温特性。高黏度的润滑剂,在机械部件的运动过程中,能够有效抑制润滑剂的蠕爬流失。如多烷基环戊烷(multiply alkylated cyclopentanes,MACs),由于可在极宽的温度范围内使用,且能保持很高的黏度指数,作为一种潜在的高性能润滑剂,被广泛应用于航空航天工业等相关领域^[43]。此外,MACs 润滑剂具有很高的表面张力,这些性能使得 MACs 可以很好地铺

展在润滑区域,同时又能够有效的抑制爬移^[44]。

3.3 改善表面结构

机械加工形貌,比如说尖角区域也能够减小爬移导致的润滑液流失。可以通过改变其表面结构来获得很好的密封抑制蠕爬的效果,图6是几种典型的防止基础油蠕爬的结构^[32]。假设表面相当光滑,且表面温度从左向右逐渐升高。由于温度梯度的作用,润滑剂会在表面发生蠕爬迁移,而这种棱边结构能够有效地阻止润滑剂在温度作用下迁移的发生。

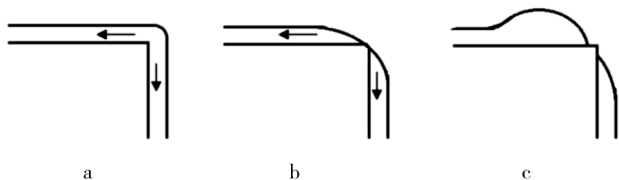


图6 防止润滑剂蠕爬的棱边结构

Fig. 6 An edge structure for prevention of lubrication migration

可以用理论公式解释这种棱边结构的工作原理,由式(3)可知,液体内部压力 P 、液气界面的曲率半径 R 和油液表面张力 γ 之间存在如下关系:

$$P = P_0 + \gamma/R \quad (3)$$

忽略在棱角处温度梯度影响,对上式变形可得:

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{\gamma}{R^2} \frac{dR}{dx} \quad (4)$$

由式(4)可知,棱边附近润滑剂油膜内部压力大于远离棱边油膜内部压力,如图6b和图6c所示,内部压力驱使着润滑向远离棱边方向移动,可以有效阻止油膜的蠕爬。

表面织构,即在摩擦副表面上加工出具有一定尺寸和排列的微坑或微沟槽,已被证明是改善表面摩擦学特性的一种有效手段^[45-51]。目前,人们对表面织构的作用机理研究主要集中在容纳磨损颗粒、产生附加流体动压效应、提供二次润滑等方面,而在润滑剂蠕爬流失方面的研究开展较少^[52]。根据上述棱边结构的分析,可以加工出如图7所示的表面微沟槽来改善润滑剂的蠕爬性能。这种表面微沟槽结构即为上述棱边结构的规则排列,该结构能够改变润滑剂的接触角 θ 以及气—液、固—液界面张力,从而促使三相界面处的杨氏方程平衡的改变,最终产生促进或者抑制润滑剂在其表面蠕爬流失的附加力。

基于这种表面织构的设计在形貌、几何参数及排列规律有着各种各样的变化形式,并能获得不同的抑

制润滑剂蠕爬流失的效果。由此可以推断,表面织构技术在控制润滑剂蠕爬流失领域的有着广阔的研究前景和应用价值。

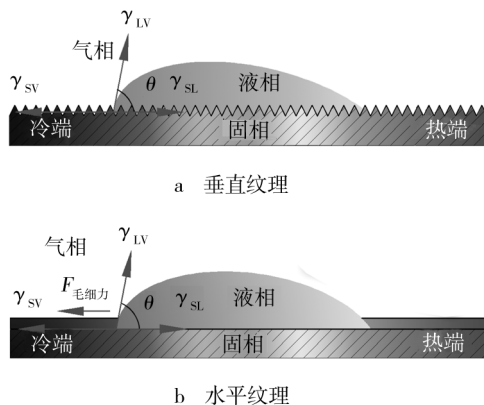


图7 静置液滴在垂直和水平纹理表面三相界面处表面张力

Fig. 7 Interfacial tensions at the three-phase contact line force of a sessile droplet on surface with perpendicular and parallel texture

4 结语

长寿命、高可靠性、高性能、无污染的润滑系统对航天技术的发展尤为重要。通过表面化学涂层、表面结构改进及采用新型高性能润滑剂等可以抑制润滑剂的蠕爬,特别是表面织构技术在控制液体空间润滑剂蠕爬流失研究中具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] FUSARO R L. Preventing Spacecraft Failures due to Tribological Problems [R]. NASA/TM-2001-210806, 2001.
- [2] 于德洋,薛群基. 空间摩擦学研究的前沿领域 [J]. 摩擦学学报, 1997, 17(4): 380—384.
YU De-yang, XUE Qun-ji. Frontiers for Space Tribology Investigation [J]. Tribology, 1997, 17(4): 380—384.
- [3] 姬芬竹. 空间润滑剂和液体润滑系统的研究进展 [J]. 润滑与密封, 2010, 35(9): 122—126.
JI Fen-zhu. Research Progress of Lubricants and Liquid Lubrication System in Space [J]. Lubrication Engineering, 2010, 35(9): 122—126.
- [4] 刘维民,翁立军,孙嘉奕. 空间润滑材料与技术手册 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
LIU Wei-ming, WEN Li-jun, SUN Jia-yi. Handbook of Space Lubrication Materials and Technology [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [5] JONES W R, JANSEN M J. Tribology for Space Applications

- [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2008, 222(8): 997—1004.
- [6] ZARETSKY E V. Liquid Lubrication in Space[J]. Tribology International, 1990, 23(2): 75—93.
- [7] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- WEN Shi-zhu, HUANG Ping. Principles of Tribology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [8] 杜红世, 孟永刚, 温诗铸. 脂润滑轴承静置状态下漏油机理及对策[J]. 润滑与密封, 1999(2): 33—35.
- DU Hong-shi, MENG Yong-gang, WENG Shi-zhu. Lubricant Loss Mechanism in Bearings Lubricated with Grease[J]. Lubrication Engineering, 1999(2): 33—35.
- [9] BRZOSKA J B, WYART F B, RODELEZ F. Motions of Droplets on Hydrophobic Model Surfaces Induced by Thermal Gradients[J]. Langmuir, 1993, 9(8): 2220—2224.
- [10] BROCHARD F. Motions of Droplets on Solid Surfaces Induced by Chemical or Thermal Gradients[J]. Langmuir, 1988, 5: 432—438.
- [11] WASAN D T, NIKOLOV A D, BRENNER H. Droplets Speeding on Surfaces[J]. Science, 2001(5504): 605—606.
- [12] DANIEL S, CUHAUDHURY M K, CHEN J C. Fast Drop Movements Resulting from the Phase Change on a Gradient Surface[J]. Science, 2001(5504): 633—636.
- [13] SCRIVEN L E, STERNLING C V. The Marangoni Effects[J]. Nature, 1960, 187: 186—188.
- [14] HU H, LARSON R G. Analysis of the Effects of Marangoni Stresses on the Microflow in an Evaporating Sessile Droplet[J]. Langmuir, 2005, 21(9): 3972—3980.
- [15] HU H, LARSON R G. Analysis of the Microfluid Flow in an Evaporating Sessile Droplet[J]. Langmuir, 2005, 21(9): 3963—3971.
- [16] DARDELLE G, ERNI P. Three-phase Interactions and Interfacial Transport Phenomena in Coacervate/Oil/Water Systems[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2014, 206: 79—91.
- [17] TADMOR R. Marangoni Flow Revisited[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2009, 332(2): 451—454.
- [18] LANGEVIN D, MONROY F. Marangoni Stresses and Surface Compression Rheology of Surfactant Solutions Achievements and Problems[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2014, 206: 141—149.
- [19] PRATAP V, MOUMEN N, SUBRAMANIAN R S. Thermocapillary Motion of a Liquid Drop on a Horizontal Solid Surface[J]. Langmuir, 2008, 24(20): 5185—5193.
- [20] SEVENO D, VAILLANT A, RIOBOO R, et al. Dynamics of Wetting Revisited[J]. Langmuir, 2009, 25(22): 13034—13044.
- [21] ROBERTS E W, TODD M J. Space and Vacuum Tribology[J]. Wear, 1990, 136(1): 157—167.
- [22] ERBIL H Y. Evaporation of Pure Liquid Sessile and Spherical Suspended Drops[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2012, 170(1/2): 67—86.
- [23] CHANDRA D, YANG S. Dynamics of a Droplet Imbibing on a Rough Surface[J]. Langmuir, 2011, 27(22): 13401—13405.
- [24] BOINOVICH L, EMELYANENKO A. Wetting and Surface Forces[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2011, 165(2): 60—69.
- [25] BICO J, THIELE U, QUERE D. Wetting of Textured Surfaces[J]. Physicochemical and Engineering Aspects, 2002, 206: 41—46.
- [26] SUMNER L B S. Lubrication Analysis of Thermocapillary-induced Nonwetting[J]. Physics of Fluids, 2003, 15(10): 2923—2933.
- [27] KARAPETSAS G, SAHU K C, SEFIANE K, et al. Thermocapillary-driven Motion of a Sessile Drop: Effect of Non-monotonic Dependence of Surface Tension on Temperature[J]. Langmuir, 2014, 30(15): 4310—4321.
- [28] RAMIASA M, RALSTON J, FETZER R, et al. The Influence of Topography on Dynamic Wetting[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2014, 206: 275—293.
- [29] BONN D, EGGERS J, INDEKEU J, et al. Wetting and Spreading[J]. Reviews of Modern Physics, 2009, 81(2): 739—805.
- [30] KANNEL J W, DUFRANE K F. Rolling Element Bearings in Space[C]. 20th Aerospace Mechanisms Symposium, 1986.
- [31] FOTE A A, SLADE R A, FEUERSTEIN S. Thermally Induced Migration of Hydrocarbon Oil[J]. Journal of Lubrication Technology, 1977, 99(2): 158—162.
- [32] FOTE A A, SLADE R A, FEUERSTEIN S. The Prevention of Lubricant Migration in Spacecraft[J]. Wear, 1978, 51(1): 67—75.
- [33] ZHANG P, LIU H, MENG J, et al. Grooved Organogel Surfaces Towards Anisotropic Sliding of Water Droplets[J]. Advanced Materials, 2014, 26(19): 3131—3135.
- [34] KANUNGO M, METTU S, LAW K Y, et al. Effect of Roughness Geometry on Wetting and Dewetting of Rough Pdms Surfaces[J]. Langmuir, 2014, 30(25): 7358—7368.
- [35] QUÉRÉ D. Wetting and Roughness[J]. Annual Review of Materials Research, 2008, 38(1): 71—99.
- [36] HERMINGHAUS S, BRINKMANN M, SEEMANN R. Wetting and Dewetting of Complex Surface Geometries[J]. Annual Review of Materials Research, 2008, 38(1): 101—121.

- [37] 谢华,陈东,黄健萌. 双涂层界面接触应力分析[J]. 表面技术,2014,43(2):1—5.
XIE Hua, CHEN Dong, HUANG Jian-meng. Analysis of the Contact Stress at Interface of Double Coatings[J]. Surface Technolog 2014, 43(2):1—5.
- [38] DAI Q W, HUANG W, WANG X L. Surface Roughness and Orientation Effects on the Thermo-capillary Migration off a Droplet of Paraffin Oil[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 57:200—206.
- [39] GERDES S, CAZABAT A-M, STROM G, et al. Effect of Surface Structure on the Spreading of a Pdms Droplet[J]. Langmuir, 1998, 14:7052—7057.
- [40] GERDES S, CAZABAT A M, STROM G. The Spreading of Silicone Oil Droplets on a Surface with Parallel Shaped Grooves[J]. Langmuir, 1997, 13(26):7258—7264.
- [41] KALDONSKI T, WOJDYNA P P. Liquid Lubricants for Space Engineering and Methods for Their Testing[J]. Journal of Kones, 2011, 18(1):163—184.
- [42] TAKAHASHI O, KUME M. A Study on Non-oil Diffusive Greases[J]. Nlgi Spokesman, 1993, 57(3):25—30.
- [43] SANDERS J H, CUTLER J N, MILLER J A, et al. In Vacuo Tribological Investigations of Metal Ceramic and Hybrid Interfaces for High-speed Spacecraft Bearing Applications[J]. Tribology International, 1999, 32(11):649—659.
- [44] FUSARO R L, KHONSARI M M. Liquid Lubrication for Space Applications[J]. Tribological Materials and NDE, 1992, 4:59—92.
- [45] 李继红, 乔正阳, 乔奇光. 表面处理技术在机械加工中的应用[J]. 表面技术, 2013, 42(3):97—98.
LI Ji-hong, QIAO Zheng-yang, QIAO Qi-guang. Application of Surface Treatment Technology in the Mechanical Processing[J]. Surface Technology, 2013, 42(3):97—98.
- [46] 张培耘, 华希俊, 符永宏. 激光表面微织构工艺试验及应用研究[J]. 表面技术, 2013, 42(5):55—58.
ZHANG Pei-yun, HUA Xi-jun, FU Yong-hong. Experimental Investigations on Laser Surface Micro-texturing Technology and Application[J]. Surface Technology, 2013, 42(5):55—58.
- [47] WANG X L, 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.
- [48] YU H W, HUANG W, WANG X L. Dimple Patterns Design for Different Circumstances[J]. Lubrication Science, 2013, 25(2):67—78.
- [49] HUANG W, WANG X L. Biomimetic Design of Elastomer Surface Pattern for Friction Control under Wet Conditions[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2013, 8(4):46001—46006.
- [50] 华希俊, 刘凯, 周万. 45#钢表面激光织构淬火减摩抗磨复合处理技术研究[J]. 表面技术, 2014, 43(4):86—91.
HUA Xi-jun, LIU Kai, ZHOU Wan. Research of Antifriction and Wear Resistance Composite Technology by Laser-texturing and Quenching on 45# Steel Surface[J]. Surface Technology, 2014, 43(4):86—91.
- [51] 徐中, 王健, 李颖. 仿生涂层磨损及其与表面形貌的关联性研究[J]. 表面技术, 2013, 42(4):9—11.
XU Zhong, WANG Jian, LI Ying. Research of Abrasion of Bionic Coatings and Its Relevance with Surface Morphology[J]. Surface Technology, 2013, 42(4):9—11.
- [52] BRUZZONE A G, COSTA H L, LONARDO P M, et al. Advances in Engineered Surfaces for Functional Performance[J]. Annals Manufacturing Technology, 2008, 57(2):750—769.

~~~~~  
(上接第 89 页)

- [16] 项坤, 王维, 杨光, 等. 钛合金单道激光熔覆工艺的研究[J]. 表面技术, 2013, 42(1):91—93.  
XIANG Kun, WANG Wei, YANG Guang, et al. Study on Titanium Alloy Single Track Laser Cladding Process[J]. Surface Technology, 2013, 42(1):91—93.
- [17] 曹艳, 李涌泉, 褚芳芳. 45 钢表面 Ni20 合金激光熔覆层的组织及抗高温氧化性能[J]. 表面技术, 2012, 41(3):54—56.  
CAO Yan, LI Yong-quan, CHU Fang-fang. Microstructure and High Temperature Oxidation Resistance of Laser Cladding Ni20 Alloy on 45 Steel[J]. Surface Technology, 2012, 41(3):54—56.
- [18] 高亚丽, 杨森, 张海波, 等. 激光功率对 Al-Cu 合金熔覆层组织和性能的影响[J]. 应用激光, 2011, 31(2):107—111.  
GAO Ya-li, YANG Sen, ZHANG Hai-bo, et al. Influence of the Laser Powers on Microstructure and Property of the Al-Cu Alloy Coating[J]. Applied Laser, 2011, 31(2):107—111.