

液体空间润滑剂蠕爬流失机理及对策

戴庆文, 黄巍, 王晓雷

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

5 **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。本文简要回顾了空间润滑的几种方法, 介绍了空间液体润滑的利弊。对引起空间液体蠕爬流失的机理进行了分析, 随后介绍了几种可有效抑制润滑剂蠕爬的方法。

关键词: 空间润滑; Marangoni 现象; 蠕爬流失; 表面张力

中图分类号: TB

10

Mechanisms and Solutions of Liquid Lubricant Creep in Space

Dai Qingwen, Huang Wei, Wang Xiaolei

(Nanjing University Of Aeronautics And Astronautics, NanJing 210016)

15 **Abstract:** Lubrication failure has become one of the main reasons that limits the lifetime of mechanical system in space. Brief review of several methods in space lubrication is presented. Analysis on the mechanisms of liquid lubricant creep is carried out. Some effective anti-creep methods are introduced subsequently in this paper.

Keywords: Space lubrication; Marangoni effect; Lubricant creep; Surface tension

20

0 引言

近年来, 随着我国航天事业的蓬勃发展, 空间润滑技术的重要性得到越来越普遍的认识, 严酷的空间环境也使得润滑问题遇到前所未有的挑战^[1]。电子科技的进步使得空间系统中电子元件、电池、光和热系统的寿命得到了很大的提高, 而机械部件失效正逐渐成为限制空间系统太空寿命的主要障碍^[2]。空间机械部件的失效, 相当一部分是空间极端复杂环境下润滑故障所导致^[3]。因此, 针对空间环境下的高效稳定润滑的研究变得越来越重要。

目前空间润滑方式主要有三种, 即固体润滑、半固体润滑和液体润滑。固体润滑具有性能稳定, 无挥发和爬行迁移, 对温度的变化不敏感等优越的性能, 但是相比于流体润滑, 固体润滑存在摩擦阻力大、不能自修复等难以克服的缺陷^[4]。特别是对于处在重载、高速, 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, 则依然倾向于选择液体润滑^[5]。液体润滑具有自修复能力强、摩擦因数低、能耗低、使用寿命长等诸多优点, 其研究和应用价值也变得越来越重要^[6]。然而对于液体润滑, 由于微重力、真空等复杂环境因素, 润滑液缺少回流补充的机制、存在一定的挥发性, 而且由于液体润滑材料与运动部件基体材料浸润性的变化, 极易造成液体润滑剂的蠕爬流失, 轻者降低空间部件在轨寿命, 重者, 长年积累的润滑剂甚至将会污染整个空间系统^[7]。

35 除此之外, 现代工业应用中, 很多高精仪表和电机中轴承部件的润滑剂也极易产生蠕爬流失。在普通轴承中, 由于接触区处于粗糙峰接触, 接触区的瞬时温度很高, 接触中心与两侧区域之间必然存在一个较高的温度梯度, 这就造成了润滑剂由接触中心向两侧方向的迁移现象, 其实质是温度梯度导致了润滑剂发生的蠕爬流失^[8]。

基金项目: 博士点基金(20123218110018); 自然科学基金(No.51105199)

作者简介: 戴庆文, (1988-), 男, 博士研究生, 空间摩擦学。

通信联系人: 王晓雷, (1963-), 男, 南京航空航天大学教授, 主要研究方向: 1.微纳米表面工程 2.表面摩擦及润滑设计 3.微机电系统设计。 E-mail: wxl@nuaa.edu.cn

40 这里谈到的蠕爬 (creep), 是指润滑剂在接触表面, 不受外力作用而不断扩展的现象^[9]。对于空间液体润滑材料, 如何尽可能的避免润滑液的蠕爬, 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。针对润滑液的蠕爬现象, 科研工作者也已经做了大量的理论和试验研究。

1 蠕爬产生的机理和理论研究

45 1.1 产生蠕爬的机理

“Marangoni”现象, 也被称之为“葡萄酒的眼泪”, 这一物理现象在 19 世纪初由意大利物理学家 Marangoni 首次观察提出^[10]。在一个玻璃杯中装有葡萄酒, 静置后酒精的挥发会在葡萄酒表面产生张力梯度, 张力梯度形成了一个牵引力使得杯中葡萄酒沿着玻璃杯壁向上爬移, 从而产生液态薄膜。液态薄膜会逐渐积累, 最终汇聚成液滴, 在自身重力作用下如同眼泪般流回酒杯之中。Marangoni 同时还给出了表面张力梯度作用下液滴表面移动的详细描述, 并揭示了这一现象产生是自由表面温度变化所导致的^[11]。

提到润滑剂的蠕爬, 首先得介绍表面张力和表面能的概念。所谓表面张力(surface tension), 是指液体表面层由于分子引力不均衡而产生的沿表面作用于任一界线上的张力。表面张力是物质的固有属性, 其大小与温度和界面两相物质的性质有关^[12]。表面能(surface energy)是指一凝聚相产生单位面积的自由表面时所需的能量, 由于表层分子相对于体分子受力不均匀, 体分子相对于表层分子的引力有使表面缩小的趋势, 外界使物系的表面积增加所需要做的功即为表面能^[13]。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^[14]。

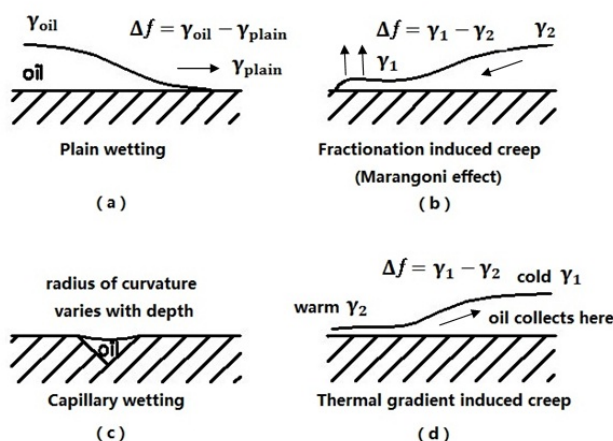


图 1 润滑油的几种蠕爬机制^[14]

60 图中 γ 皆为表面张力, 图 1.a 表明当润滑油和固体表面张力不同时, 由于固体表面的表面张力大于润滑油表面张力, 驱使着油液向固体表面延展浸润。这就是人们常说的“浸润现象”^[15]。图 1.b 表明当自由液滴表面存在挥发时, 挥发导致了油液表面张力不同而形成张力梯度, 从而导致了液体的流动并在内部形成对流。

70 另一个是毛细现象, 毛细现象又称毛细管作用, 是指液体在细管状物体内侧, 由于液体和固体间附着力大于液体内部聚力而引起的液体流动的现象, 其实质是液体表面张力不平衡引起的液体内部流动^[16]。图 1.c 油液的蠕爬流失现象就类似于毛细现象。固体表面的微凹槽就像一个微小的毛细管, 润滑油从微凹坑内部沿着凹坑壁不断爬移, 爬过微凹坑边缘后慢慢蠕

爬流失。图 1.d 表明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, 从而导致液体内部的对流流动。这个现象本质上这也类似于毛细现象, 区别在于这是由温度梯度引起的表面张力不平衡产生而产生液体流动, 所以称之为热毛细现象。

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, 表面张力驱动对流是基础物理学界面流中一个非常重要的现象。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。这种热毛细机制会导致液体流动并产生不稳定的非等温自由表面, 从而导致液态膜不稳定分布, 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^[17]。

1.2 蠕爬流失的理论研究

液体内部 Marangoni 对流能否产生主要可以由两个物理现象从发生到平衡所需时间之间的关系来衡量^[18]。第一个为热毛细现象从产生到平衡状态所需要的时间。热毛细力的产生原因是液体表面张力随着温度的变化而变化, 液体表面张力可以由下式计算得出:

$$\sigma(T) = \sigma_0 - \sigma_T \cdot (T - T_0) \quad (1)$$

公式 1 变化可得:

$$\sigma_T = \frac{\sigma_0 - \sigma(T)}{T - T_0} \quad (2)$$

其中, σ_T 为张力随温度变化的系数, $\sigma(T)$ 是液体表面张力, σ_0 是液体在参考温度下的表面张力, T 是液体的实际温度, T_0 是参考温度^[19]。

热毛细管现象从产生到平衡状态所需时间 t_{therm} 可由以下公式计算获得:

$$t_{therm}^2 = \frac{\rho \cdot d^3}{\sigma_T \cdot \Delta T} \quad (3)$$

其中, ρ 为油液密度, d 是自由表面的特征长度 σ_T 是表面张力随着时间的变化率, ΔT 是油液表面的温度变化值。

第二个为液滴从自由扩散产生到平衡状态所需要的时间 t_{diff} , t_{diff} 可以由以下公式计算获得:

$$t_{diff}^2 = \frac{d^4}{\nu \cdot \kappa} \quad (4)$$

其中, ν 为运动粘度, κ 为热扩散系数, 结合公式 3、4, 可以计算得到 Marangoni 系数 M ^[20]:

$$M = \frac{t_{diff}^2}{t_{therm}^2} = \frac{\sigma_T \cdot \Delta T \cdot d}{\rho \cdot \nu \cdot \kappa} \quad (5)$$

Person 通过理论建模研究表明, 当 $M > 80$ 时, 热毛细力足以克服液滴的自身扩散作用而移动, 形成 Maragoni 流动, 使得润滑剂发生蠕爬流失^[21]。

1.3 蠕爬流失的试验研究

Kannel 早期的探索性试验就已经表明, 润滑剂爬移是受温度梯度的影响的。图 2 显示了超精矿物油 KG-80 在热梯度和零重力环境下的爬移模式^[22]。此图表明, 当存在温度梯度时, 润滑油从热的区域向冷的区域爬移。

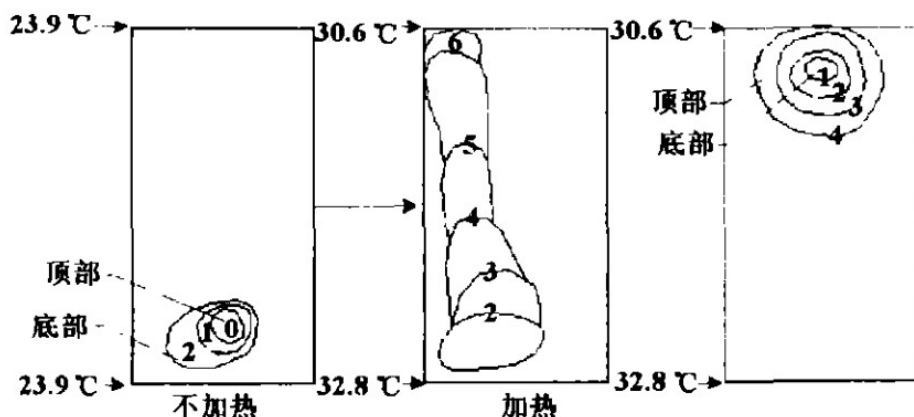


图2 温度梯度2.2摄氏度时，超精炼矿物油 KG-80 的爬移模式^[22]

Fote 等人对空间润滑剂的爬移流失做了深入的研究。研究表明，微小的温度梯度能够导致润滑油薄膜从高温区快速向低温区迁移^[23]。润滑油由于温度作用而产生的迁移速度可以由以下式推算得出：

$$V = \frac{h}{2\eta} \cdot \frac{d\gamma}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

其中 h 为油膜厚度， η 是润滑油动力粘度， γ 是润滑油的表面张力， T 是润滑油温度^[24]。

此外，油液的爬移还会受其他外力的作用。在太空中，对于高速从动轮中的润滑液，重力的作用显得微不足道，离心力的作用将会加速其蠕爬流失^[25]。

为了探究在温度梯度作用下表面粗糙度和表面形貌对润滑剂油膜蠕爬的影响，Klien 等人做了进一步的试验。他们对温度梯度、表面纹理特性，液滴尺度等对润滑油蠕爬特性的影响进行了探究。结果表明，当表面纹理平行于温度梯度方向时，由于温度梯度热毛细力的作用，润滑剂顺着温度梯度方向爬移速度会变快；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方向爬移，且在表面纹理方向，也会发生爬移（图3所示）。上述实验结果表明，表面纹理对润滑液的爬移流失有着重要的影响。由于喷丸加工表面无方向性，Klien 还对喷丸加工的表面进行了试验。试验表明，当表面不存在温度梯度时，由于表面各向同性，不会产生具有一定方向性的毛细力，润滑剂滴上后会以同样的方式各向扩散、浸润^[26]。

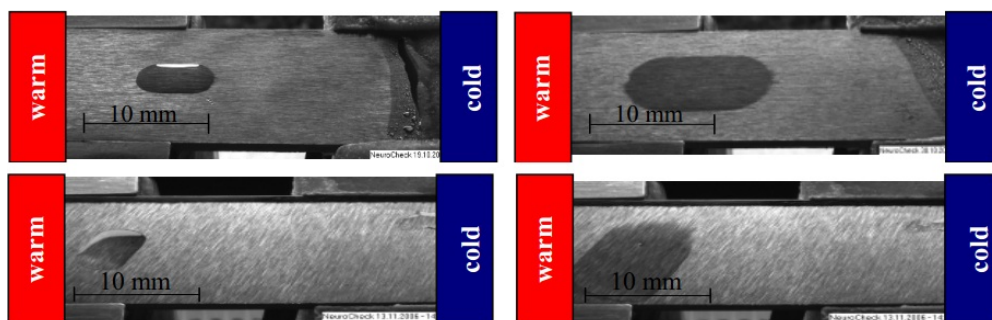


图3 顺着温度梯度方向纹理和有一定角度纹理式样的爬移现象^[26]

综上所述，蠕爬产生的根源，在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，由于表面张力的不同而驱使润滑剂产生蠕爬流失^[27]。

2 控制蠕爬的几种方法

上述理论研究表明，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

于控制润滑蠕爬的方法研究主要从表面张力的角度来展开, 可以通过提高润滑剂的表面张力、降低接触摩擦表面表面张力、改善表面结构等方法来间接改变液体润滑剂的表面张力, 从而获得很好的控制蠕爬效果^[28]。

2.1 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很显著的阻碍作用。常用的 P 基润滑剂具有较高的表面张力 (如氯苯基硅油的表面张力为 $2.06 \times 10^{-2} \text{ N/m}$), 但对于大多数金属而言, 其表面张力达到 1 N/m 以上, 两者相差 10^2 数量级。表面涂层的涂覆能够降低摩擦表面表面能, 从而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, 此时润滑油分子间的内聚功起主要作用, 润滑液就能够很好的凝聚保持在润滑部位。如一种官能团为高氟烷基的硅烷涂层, 当形成高氟十二烷酸单分子膜时, 其临界表面张力只有 $6 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ ^[9]。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, 且化学稳定性好。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^[29]。

2.2 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 4 就是一种典型的防止基础油蠕爬的结构^[25]。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油在温度作用下迁移的发生。

可以用理论公式解释这种棱边结构的工作原理, 由公式可知, 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:

$$P = P_0 + \gamma / R \quad (7)$$

忽略在棱角处温度梯度影响, 对上式变形可得:

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{\gamma}{R^2} \frac{dR}{dx} \quad (8)$$

$dp/dx > 0$, 则棱边附近润滑油膜内部压力大于远离棱边油膜内部压力, 内部压力驱使着润滑油向远离棱边方向移动 (图 4.b), 有效阻止了油膜的爬移 (图 4.c)。

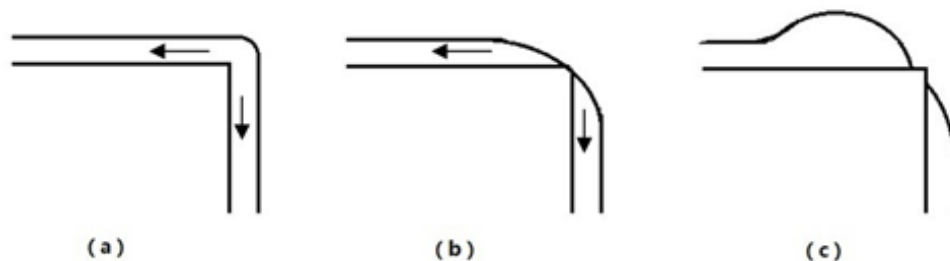


图 4 防止润滑油蠕爬的结构^[25]

2.3 提高润滑剂的性能

试验表明, 高粘度液体润滑剂的爬移速度比低粘度液体润滑剂慢得多^[14]。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, 很高粘度的润滑剂, 在机械部件的运动过程中, 能够有效的抑制润滑剂的蠕爬流

失。如多烷基环戊烷(multiply alkylated cyclopentanes , MACs), 它是一种潜在的高性能润滑剂, 已经被广泛应用于航空航天工业等相关领域^[30,31], 由于其可在极宽的温度范围内使用, 且能保持很高的黏度指数^[32], 此外 MACs 润滑剂具有很高的表面张力, 这些性能使得 MACs 可以很好的铺展在润滑区域, 同时又能够有效的抑制爬移^[33]。

3 总结

随着航天技术飞速发展, 未来空间应用对润滑系统的要求会越来越高, 设计长寿命、高可靠性、高性能、无污染的润滑系统也会变得尤为重要。本文简要分析了空间环境机械部件中润滑剂的蠕爬流失机理。针对润滑剂的不同蠕爬机制, 介绍了几种能够有效控制其蠕爬的措施, 包括表面化学涂层、表面结构改进及采用新型高性能润滑剂等。这些改进方法对空间环境中运动部件的设计有一定的实际指导价值。

175 [参考文献] (References)

- [1] 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.
- [2] P.D. Fleischauer, M.R. Hiron. Assessment of the tribological requirements of advanced spacecraft mechanisms[J]. MRS Proceedings, 140, 9 doi:10.1557/PROC-140-9.
- [3] W.R. Jones, J.R. The preliminary evaluation of liquid lubricants for space applications by vacuum tribometry[J]. 28th Aerospace Mechanisms Symposium, 1994 :265-277.
- [4] 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 (9): 122-126.
- [5] 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.
- [6] W.R. Jones, J.R., B.A. Shogrin, M.J. Jansen. Research on Liquid Lubricants for Space Mechanisms[J]. Journal of Synthetic lubrication, 2000, 17(2): 109-122.
- [7] 姚志雄, 黄立峰, 黄健. 影响空间液体润滑的环境因素[J]. 润滑与密封, 2005, 5 (3): 155-157.
- [8] 杜世红, 孟永刚, 温诗铸. 脂润滑轴承润滑剂迁移机理[J]. 润滑与密封, 1998, 7: 15-17.
- [9] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [10] L.E. Scriven, C.V. Sterliling. The marangoni effect[J]. Nature, 1960, 7:186-188.
- [11] Hua Hu, Ronald G, Larson. Analysis of the Effects of Marangoni Stresses on the Microflow in an Evaporating Sessile Droplet[J]. Langmuir, 2005, 21:3972-3980.
- [12] 李寿松, 胡经国. 物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [13] 温诗铸, 黄平. 界面科学与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [14] E.W. Roberts, M.J. Todd. Space and Vacuum Tribology[J]. Wear, 1990, 136: 157-167.
- [15] 黄祖洽, 丁鄂江. 表面浸润和浸润相变[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1994.
- [16] 高世桥, 刘海鹏. 毛细力学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [17] S.J. VanHook, et al. Long-wavelength surface-tension-driven Benard convection: experiment and theory[J]. Fluid Mech, 1997, 345:45-78.
- [18] M.G. Velarde. Interfacial Phenomena and the Marangoni effect[M]. Berlin: Springer Verlag, 2002.
- [19] H. Oertel jr. Prandtl-Führer durch die strömungslehre[M]. Brunswick: Vieweg Verlag, 2001.
- [20] P. Colinet, et al. Nonlinear Dynamics of Surface-Tension-Driven Instabilities[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2001.
- [21] J.R.A. Pearson. On convection cells induced by surface tension[J]. Fluid Mech, 1958, 4: 489-500.
- [22] J.W. Kannel, K.F. Dufrane. Rolling Element Bearings in Space[J]. The 20th Aerospace Mechanism Symposium, NASACP-2423, 1986: 112-321.
- [23] A.A. Fote, R.A. Slade, S. Feuerstein. Thermally induced migration of hydrocarbon oil[J]. Transaction of the ASME, Journal of lubrication technology, 1977, 4: 158-162.
- [24] A.A. Fote, L.M. Dormant, S. Feuerstein. Migration of hydrocarbon oil on metal substrates under the influence of temperature gradients[J]. Lubric.Eng., 1976, 32: 542-545.
- [25] A.A. Fote, R.A. Slade, S. Feuerstein. The prevention of lubricant migration in spacecraft[J]. Wear, 1978, 51: 67-75.
- [26] Klien Stefan, et al. Temperature driven lubricant migration on tribological surface[J]. ECOTRIB 2007, 6: 12-15.
- [27] Jianfeng Wang, Chao Yang and Zaisha Mao. Numerical simulation of Marangoni effects of single drops induced by interphase mass transfer in liquid-liquid extraction systems by the level set method[J]. Science in China Series B: Chemistry, 2008, 51(7): 684-694.
- [28] Tadeusz Kaldonski, Piotr Pawel, Wojdyna. Liquid lubricants for space engineering and methods for their testing[J]. Journal of KONES Powertrain and Transport, 2011, 1(18):163-184.
- [29] Isao Takahashi, A study on non-oil diffusive greases[J]. NLGI Spokesman, 1993, 57(3): 25-30.
- [30] 马剑琪. 多羟基环戊烷的合成及性质表征[D]. 兰州: 中科院兰州化学物理研究所, 2007.

- 220 [31] J.H. Sanders, J.N. Cutler, J.A. Miller, et al. In vacuo tribological investigations of metal ceramic and hybrid
interfaces for high-speed spacecraft bearing applications[J]. Tribology International, 2000(32): 649-659.
[32] 陈晓伟, 梁宇翔. 液体空间润滑剂的现状与发展[J]. 润滑与密封, 2006, 6 (4): 176-178.
[33] W.R. Jones J.R., M.J. Jansen. Tribology for space applications[J]. Engineering Tribology, 2008, 222:
225 997-1004.