

空间技术与固体润滑材料

吴伟忠

(中国科学院兰州化学物理研究所)

摘 要

在发展空间技术的同时,世界各先进工业国家的固体润滑材料的研究十分活跃,发展也相当迅速。由于固体润滑材料可在高温、高负荷、超低温、超高真空、强氧化或还原、强辐射等环境条件下有效地润滑,突破了油脂润滑的有效极限,为人造卫星、宇宙飞船、星际探测器等空间飞行器的发展所不可缺少。本文简要地叙述了空间环境中的固体润滑问题;介绍了国外有关固体润滑材料在空间飞行器的天线驱动系统、太阳电池帆板机构、滑动电接点、光学仪器驱动机构、温控机构等具体零部件上的应用情况。说明了固体润滑材料在解决空间技术中的润滑问题,以保证空间飞行器上的仪器和设备能完成必要的机械动作中的重要作用。

前 言

从1957年苏联发射第一颗人造地球卫星到今年美国航天飞机试飞成功,仅经历了24年。在这期间发射的卫星、飞船、探测器等空间飞行器数以千计,其用途日益广泛,从通讯导航到地表观察,从空间气象探测到地下矿产资源调查,它涉及到了每个国家的经济、军事和科学技术。由于空间技术的这种重要地位促使它在这20多年的时间内发展异常迅速。

卫星、飞船、探测器的各机械部件能否正常运转和达到预期的寿命,在很大程度上取决于飞行器内各机械部件的润滑状况如何。由于空间飞行器所遇到的空间环境非常特殊,对于很多作连续运转和间歇运动的摩擦部件,如天线驱动机构或太阳电池转向机构,由于它们直接受到真空、辐射、高低温等诸因素的作用,润滑油脂是很难胜任的。所以在已发射的卫星、飞船上的许多机械部件都采用固体润滑。在发展空间技术的同时,固体润滑材料的研究也受到了一定的重视。

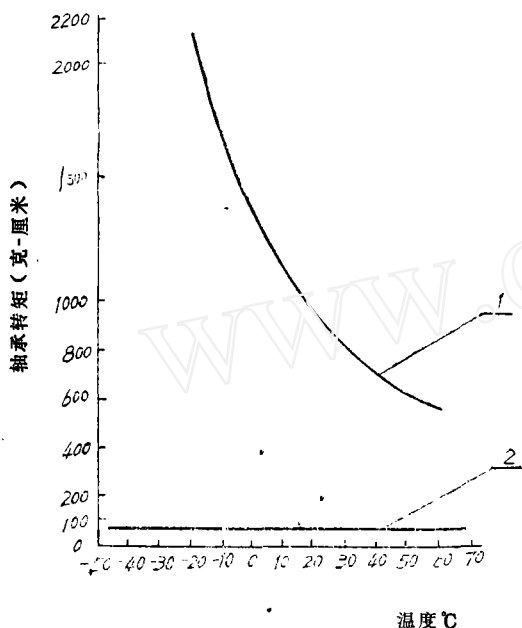
下面将空间环境中的固体润滑问题以及固体润滑材料在空间飞行器上的应用情况作一简要介绍。

一、空间环境中的固体润滑

空间飞行器所处的环境是一个非常特殊的环境,在此环境中运转的机械必须采用特殊的润滑。空间环境与润滑有直接关系的因素,主要是真空、高温和超低温、辐射和失重等几个方面。

1. 真空中的固体润滑

真空是空间飞行器所遇到的最基本环境。空间飞行器通常是在 500 公里以上的高空飞行和工作,其真空度往往高于 10^{-10} 托。在此条件下,常规润滑油脂将会急剧地蒸发。如果部件所处位置的温度高于 100°C 时,油脂的蒸发率将会远远超过通常所规定的极限蒸发率—— 10^{-7} 克/厘米²·秒,致使油脂难于长期使用。油脂在真空中除了因蒸发减量而失去润滑效果外,它的蒸发物还会污染附近的仪器仪表和光学元件,导致仪器仪表的指示失真,甚至可能会使光学元件完全失灵。所以在真空环境中,飞行器中很多部件是忌用油脂润滑的。



铅膜润滑和油脂润滑轴承各种
温度下低速转矩的比较

1. Molnkyte BR 2-S 润滑脂润滑 2. 铅膜润滑

固体润滑材料在真空中的蒸发率极小,它能克服油脂的上述缺点。而且其润滑性能在真空中通常是比较稳定而良好的,尤其是二硫属化合物,它们在真空中的润滑性往往比在大气中更好,例如以 MoS_2 擦涂膜润滑的滚动轴承在真空度为 10^{-11} 托下其摩擦系数为 0.0016[1],几乎可以与用油润滑时的摩擦系数 (0.0013) 相比拟。 MoS_2 溅射膜润滑的滚动轴承在真空度 10^{-8} 托,转速 3000 转/分,负荷 2 公斤的条件下其寿命超过 1500 小时。 MoS_2 的粘结膜在真空中同样具有良好的摩擦磨损性能。 MoS_2 和金属粉的热压复合材料作为空间长期使用的润滑材料受到了很大的重视[2、3],所以 MoS_2 及其复合材料已被广泛地用于真空润滑。

离子镀金、银膜润滑的滚动轴承,在转速 3000 转/分,负荷 2 公斤,真空度 10^{-8} 托下运转寿命均超过 1000 小时。离子镀铅膜的滚动轴承在上述条件下运转寿命达到 1800 小时,欧洲空间摩擦学实验室将以真空沉积

0.25 微米厚铅膜润滑的轴承与以油脂润滑的轴承进行了转矩对比试验,其结果如上图所示[4],图中的曲线表明在整个工作范围内铅膜润滑都优于油脂润滑,它避免了润滑油脂所产生的诸如蒸发,热-粘度效应等问题。

2. 高低温条件下的固体润滑

空间飞行器所遇到的高低温给润滑提出了又一个难题。空间飞行器操纵翼外部控制系统的各种轴承在重返大气层时由于空气的摩擦被加热到 1000°C 以上的高温;火箭核发动机的控制杆作动器轴承是处于 650°C 高温环境中;空间飞行器上有些轴承的转速可达 20000~50000 转/分,轴承工作温度超过 500°C 。如此高的温度下显然必须采用固体润滑材料。再如空间飞行器辅助核动力系统(SNAP),为了达到高的热效率,通常采用液体金属——钠、钾以及它们的低共熔合金作为高温传热介质。其轴承的摩擦副材料大致采用 (1) 金属-金属, (2) 金属-陶瓷, (3) 陶瓷-陶瓷, (4) 金属-碳石墨, (5) 陶瓷-碳石墨五类。前三类摩擦副在运转中的摩擦系数随温度上升而增大,而且还会发生咬粘。如果在它们的滑动面上薄薄

地涂上一层硅酸钠粘结的 MoS_2 、石墨干膜,其摩擦系数就立即下降,且会防止摩擦副的咬粘,这种干膜已经用于SNAP-8和SNAP-10A上了〔5〕。

石墨可润滑540℃以下的轴承,但不宜用于真空环境; MoS_2 在真空或惰性气氛下可使用到400℃以上; PbO 基的金属陶瓷涂层可作700℃左右的润滑材料; CaF_2 基的陶瓷涂层在1000℃时显示出良好的润滑性能。

低温环境下的固体润滑主要是液体燃料火箭用的各种超低温液化气体涡轮泵轴承的润滑与密封,以及在月球背面工作的摩擦副的润滑等。液氧泵、液氢泵轴承通常采用自润滑材料作保持架,提供薄转移膜来润滑轴承,到目前为止,低温下应用最佳的润滑材料为聚四氟乙烯(PTFE)。由于它的机械强度低,通常以15~25%的玻璃纤维增强后使用〔6~10〕。在液氢中的球轴承也有采用镀铅膜的青铜保持架来润滑的〔11〕。在液氟中的球轴承有采用氟化钙-氟化锂涂层来润滑的〔12〕。液氟涡轮泵端面密封有采用氧化铅和镍结碳化钛摩擦副来实现,镍结碳化钛与液氟反应后形成氟化镍表面层,由它起固体润滑作用〔8〕。

3. 辐射和失重的影响

空间环境中存在着诸如宇宙射线、紫外线、x-射线、 γ -射线等多种辐射,在它们的长期照射下油脂将会分解或交联而损失其润滑性能,所以在要求长寿命的部件上一般不采用油脂润滑。固体润滑材料的抗辐射能力远大于油脂材料,而且它的种类繁多,有充分的选择余地。值得注意的是有人发现,某些固体润滑剂受射线照射后引起了它的超低摩擦效应,这有可能为空间的固体润滑提供一条新的途径。

失重对于流体润滑会带来很大的麻烦,因为失重,不能采用通常所用的重力供油或循环供油的润滑方法。而对于固体润滑不但无甚影响,而且由于失重减轻了摩擦副的自重负荷,这有利于部件的润滑,又能延长润滑材料的使用寿命。

4. 空间环境中的直接试验

除了大量的地面模拟试验外,美国喷气推进研究所在1961年发射的“徘徊者”I和II号两颗卫星上安装了一台栓-盘型滑动摩擦试验机。“徘徊者”I号卫星是在离地面504~170公里的高度运行的,其空间的真空度为 $8 \times 10^{-9} \sim 2 \times 10^{-8}$ 托。所试验的材料除铜、镍、银、铝、钨等纯金属外,还有A286铁合金、铝青铜、2024铝合金、4340钢、440C不锈钢、氧化铝、聚四氟乙烯、玻璃纤维填充聚四氟乙烯、碳化钨等。其中一半使用 MoS_2 、润滑脂或银、金的电镀层润滑,另一半不用润滑剂(即干摩擦)。试验所获得的摩擦系数列于表1〔13〕。

1968年美国国家宇航局的Goddard空间飞行中心在轨道飞行器1-13号卫星上装载了由试验轴承组成的四组小型发动机,在真空度为 $5 \times 10^{-9} \sim 5 \times 10^{-12}$ 托的宇宙空间进行了试验,结果表明,SR-2型球轴承采用Duroid5813自润滑材料其寿命为3240小时,超过了实验室的试验寿命。这类轴承广泛用于空间飞行器的太阳电池帆板驱动机构、天线驱动机构、记录仪器驱动机构和姿态控制组件上〔14〕。Goddard空间飞行中心在卫星润滑方面的工作都是针对固体润滑进行的,通过地面模拟试验、空间直接试验和卫星上的实际应用,他们认为模拟试验与人造卫星上实际使用情况的对应性很好〔15〕。

二、固体润滑材料在空间飞行器上的应用

由上述分析可见,由于空间环境的特殊性,空间飞行器中很多部件的润滑是不希望或不能使用油脂材料的。为了确保飞行器的工作正常可靠,在已发射的飞行器中已广泛地采用了

表 1

各种对偶材料在不同条件下的摩擦系数

栓	盘	润滑剂	摩 擦 系 数			
			空气中(a) 15~30分钟	实验室真空中 50~100分钟	徘徊者 I 号 卫星上 800~1300分钟	文献数据, 真空中
Ni	Cu	—	0.20	0.67 0.22和1.12(b)	0.56 0.42和1.0	10 ⁵ ~10 ⁸ 转后达1.50
Al	Cu	—	0.23	0.04	0.66	
Ag	Cu	—	0.38	0.22	0.70	
W	Cu	—	0.34	0.16	0.40	10 ⁵ ~10 ⁸ 转后达0.41
A286铁合金	A286铁合金	—	0.26	0.50	0.62	
铜合金	铜合金	—	0.28	0.73	0.43	10 ⁸ 次后为0.6~0.75(黄铜)
2024铝合金	2024铝合金	—	0.56	0.67	0.33	10 ⁸ 次后为0.32~0.57
440C钢	440C钢	—	0.07	0.18	0.10	10 ⁸ 转后为0.44
A286铁合金	铜合金	—	0.32	0.53	0.44	
2024铝合金	A286铁合金	—	0.23	0.32	0.27	
4340钢	A286铁合金	—	0.33	0.38	0.60	
440C钢	WC	—	0.20	0.16	0.12	
Al ₂ O ₃	440C钢	—	0.11	0.16	0.07	10 ⁸ 转后为0.36
PTFE(c)	A286铁合金	—	0.02	0.04	0.02	
PTFE	2024铝合金	—	0.02	0.06	0.08	
PTFE	WC	—	0.03	0.05	0.02	
440C钢	碳纤维-PTFE	MoS ₂	0.04	0.05	0.05	
2024铝合金	A286铁合金	盘上浸渍MoS ₂	0.01	0.07	0.01	
A286铁合金	A286铁合金	盘上酚醛粘结 MoS ₂	0.14	0.09	0.03	440C对440C酚醛粘结 MoS ₂ , 10 ⁵ 转后为0.025
4340钢	A286铁合金	盘上酚醛粘结 MoS ₂	0.17	0.08	0.07	MoS ₂ 压块对不锈钢, 4 × 10 ⁸ 转后为0.06~0.10
2024铝合金	A286铁合金	盘上酚醛粘结 MoS ₂	0.09	0.14	0.02	
铜合金	A286铁合金	盘上酚醛粘结 MoS ₂	0.15	0.09	0.01	
A286铁合金	A286铁合金	盘上镀Ag	0.25	0.17	0.46	对440C, 10 ⁵ 转后为0.06
A286铁合金	A286铁合金	盘上镀Au	0.12	0.17	0.13	对440C, 10 ⁵ 转后为0.10
A286铁合金	A286铁合金	润滑脂	0.16(d)	0.20	0.24(d)	
4340钢	A286铁合金	润滑脂	0.08	0.24	0.05	
铜合金	A286铁合金	润滑脂	0.12(d)	0.17	0.14	
2024铝合金	A286铁合金	润滑脂	0.15	0.11	0.11	

注: (a) 3 转/分 (b) 低摩擦和高摩擦最频值的平均数

(c) 聚四氟乙烯 (d) 数据被排除, 因为栓上没有正常地涂上润滑剂

固体润滑材料。下面对一些具体应用的典型作一简单介绍。

1. 天线驱动系统

美国探险者 7 号卫星天线伸展系统的铝和不锈钢齿轮采用聚四氟乙烯干膜润滑剂润滑。水手 2 号卫星天线驱动系统的齿轮使用 Electro-film 4396 干膜润滑剂润滑^[13]。国际通信卫星 IV 号天线定向机构的铝制枢轴衬套采用 MoS₂ 擦涂膜润滑, 减速齿轮用 MoS₂ 润滑^[16]。

2. 太阳能电池帆板机构

导航卫星 6 号的太阳能电池绞链采用酚醛-聚四氟乙烯自润滑复合材料。在 TRIAD 卫星、小型天文卫星和地球同步轨道环境卫星的太阳能电池帆板驱动机构上采用了干膜润滑剂^[17]。

3. 滑动电接点材料

滑环、电刷是传递功率和输送讯号的重要元件；这类材料不仅在电性能方面有严格的指标，而且还要求它具有良好的摩擦磨损性能。它们的某些实际使用列于表 2。

表 2 一 些 卫 星 用 滑 动 电 接 点 材 料

卫 星	材 料	工 作 状 态
轨道太阳观测卫星 (OSO I-Ⅵ) 滑 环 电 刷 扭矩马达整流子 马达电刷	币银 (90Ag-10Cu) 75Ag-20石墨-5 MoS ₂ Cu 50Ag-50石墨	- 10℃~+35℃ 30转/分 电刷压力, 16~28克 电刷压力, 5克
雨云气象卫星 (Nimbus I-Ⅲ) 滑 环 电 刷 AVCS*相机光圈马达整流子 马达电刷	Cu上镀Ag镀Re 88Ag-12MoS ₂ Cu 50Ag-50石墨	- 10℃~+55℃ 0.01转/分 >100转/分
雨云气象卫星 (Nimbus IV) 滑 环 电 刷 电位计换向器 电 刷	Cu上镀Ni镀Au 88Ag-12.5MoS ₂ -2.5Cu Cu上镀Ag镀Au Paliney 7	0.01转/分 电刷压力 1~2 盎司 0.01转/分
国际通讯卫星 IV号 滑 环 电 刷	币银 (90Ag-10Cu) Stackpote SM-476 复合材料 [16]	
轨道天文观测卫星 (OAO-1) 跟踪系统马达整流子 电 刷 跟踪系统转速计整流子 电 刷	Cu 88Ag-12MoS ₂ Cu 88Ag-12MoS ₂	- 10F~100F 高频振动 旋转 (1/4 转/分) 电刷压力 40克
泰罗斯气象卫星 (ITOS-M) 动量轮马达整流子 电 刷	Cu 50Ag-50石墨	150转/分 电刷压力 16~19磅/英寸 ²

*AVCS—先进 光导摄影系统

4. 光学仪器的驱动机构

雨云B-2号气象卫星上的红外分光计SR-118球轴承采用PFM自润滑材料保持架来转移. 润滑。光调制盘303不锈钢传动齿轮与2024-T4阳极氧化铝齿轮用有机硅树脂粘结的MoS₂干膜润滑，满意地运转了15936小时^[18]，Apollo17飞船上的紫外分光计（UVS），其驱动马达有2个R₂轴承，光栅有2个R₂轴承，这四个轴承都采用MLF-5干膜润滑；而凸轮上用MLR-2干膜润滑^[17]；泰罗斯1号卫星照相机快门机构采用石墨填充尼龙材料和阳极氧化铝的滑动组件^[13]均获得了成功。

5. 温控机构的润滑

电星1号卫星主动温控机构的铝缸体和钢活塞之间用环氧树脂粘结的MoS₂干膜来润滑，水星-阿特拉斯卫星环境控制系统也采用干膜润滑^[13]。也有一些百叶窗温控系统上的轴

承采用80% Ag、20% MoS₂复合材料和MoS₂干膜的配合获得了成功^[19]。

6. 其它

TRIAD 卫星悬臂部件采用 MLF-5 和 MLR-2 干膜润滑, 其球面轴承座用 100 毫微米厚的 MoS₂ 溅射膜润滑^[47]; 同步气象卫星和地球同步轨道环境卫星上的万向接头轴承用 MoS₂ 溅射膜润滑, 其保持架为 MoS₂ 填充 PTFE 材料; 探险者 8 号卫星的电场计采用镀金的不锈钢球轴承, 碳刷用 MoS₂ 润滑; 泰罗斯 1 号卫星上的继电器开关用 MoS₂ 润滑^[13]。

根据实验和实际使用的结果, Goetzel 将空间飞行器中的某些部件可采用润滑材料作了推荐, 其内容列于表 3^[13]。

表 3 推荐的固体润滑材料

应用部位	工作条件	固体润滑材料
小型球轴承 (3/4 英寸孔径, 2 英寸外径)	温度: -65~400F 速度: ~8000 转/分 真空度: 10 ⁻⁹ 托 放射性: 1 × 10 ⁸ 拉德 其它: 靠近照相机窗口这样的表面部位	Hi-T-Lube 干膜润滑剂
	温度: -65~350F 放射性: 1 × 10 ⁸ 拉德 其它条件同上	Rulon C 材料作轴承保持器
	温度: -65~400F 速度: ~8000 转/分 真空度: 10 ⁻⁹ 托 放射性: 1 × 10 ⁸ 拉德 其它: 要求输送电流	满球轴承, 球为工具钢材料, 球上镀银
较大型低速轴承	温度: -65~150F 速度: ~1800 转/分 真空度: 10 ⁻⁹ 托 放射性: 1 × 10 ⁸ 拉德	Rulon C 材料或 Durcid 5813 材料作轴承保持器
	温度: -65~400F 速度: ~1800 转/分 真空度: 10 ⁻⁹ 托 放射性: 1 × 10 ⁸ 拉德	银基或铜基自润滑复合材料作轴承保持器
一般轴承	暴露于低温下, 放射性 1 × 10 ⁸ 拉德 暴露于强氧化剂中 (液氧、N ₂ O ₄) 放射性 1 × 10 ⁸ 拉德	Rulon C 材料作轴承保持器
轻负荷滑动表面	暴露于真空中 温度 -65~165F	硬金属表面上 MoS ₂ 或 PTFE 润滑剂, 尼龙、酚醛层压材料、聚甲醛等塑料, 多孔金属浸渍油或 MoS ₂
重负荷滑动表面	暴露于真空中 温度 -65~1200F	Electro-film 4858 干膜加上 Versilube F-50 或 Aero-shell 15 油脂 Electro-film 77-S 干膜 Molykote Type G MoS ₂ 润滑剂
小螺距齿轮	暴露于真空中 温度 -65~350F	银基或铜基自润滑复合材料作齿轮
	温度 -45~165F	PTFE、聚甲醛、尼龙等塑料齿轮

上面所介绍的仅是固体润滑材料在空间技术中获得实际应用中的一部分,就此已足以说明固体润滑材料是空间工业中不可缺少的材料之一。

结 束 语

空间技术经过20多年的发展,已积累了相当的经验,很多润滑问题可参照解决。但随着通讯、探测技术的发展和宇宙空间的进一步开发,对空间润滑技术和润滑材料的要求日益增高,由此美国国家宇航局Lewis研究中心、欧洲空间摩擦学研究室在空间润滑的研究和应用方面仍然非常活跃。在空间技术上尚处于后进地位的我国,更需重视和加强这方面的研究工作,以适应我国四化建设的需要。

致 谢

本文在编写过程中承蒙党鸿辛、朱才录同志热情指正,在此表示谢意。

参 考 文 献

- [1] Brewster, D.E., et al., NASA TN D-7023 (1970).
- [2] Vest, C.E., Lub.Eng., 30 (1974), 5 : 249~251.
- [3] McConnell, B.D., Lub.Eng., 33 (1977), 10 : 544~551.
- [4] Todd, M.J., Tribology, 8 (1975), 3 : 99~104.
- [5] 高本理逸, 润滑(日), 17 (1971), 5 : 271~278.
- [6] Brewster, D.E., et al., NASA TN D-3730 (1966).
- [7] Coe, H.H., et al., NASA TN D-5607 (1970).
- [8] Scibbe, H.W., SAE 680550 (1968).
- [9] Schmidt, H.W., et al., NASA SP-3090 (1975).
- [10] Keller, R.B., Jr., NASA SP-8048 (1971).
- [11] Brewster, D.E., et al., ASME paper, 73-Lub-22 (1973).
- [12] Sliney, H.E., NASA TM X-2033 (1970).
- [13] Goetzel, C.G., et al., Space Materials Handbook (1965).
- [14] Devire, E.J., et al., NASA TN D-6035 (1970).
- [15] Campbell, M.E., NASA SP-5059 (01) (1972).
- [16] Bargellini, P.L., et al., 国际通信卫星Ⅳ专集, 国防工业出版社, 1976, 53, 91~92.
- [17] Matthey, R.A., Lub.Eng., 34 (1978) 2 : 79~84.
- [18] Smith, G.R., et al., ASLE/ASME Lub.Confer., 1971, 19~24.
- [19] Heindl, J.C., et al., 1963 Trans., 10th Nat. Vacuum Sympos. Amer. Vacuum Soc. Oct 1963, 27~31.