

超低温环境固体润滑研究的发展现状

古乐, 王黎钦, 李秀娟, 齐毓霖

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 根据研究工作积累和文献资料调研, 对 120 K 以下超低温环境固体润滑研究的发展现状进行了归纳和分析, 介绍了超低温环境的特性及相应的摩擦学测试手段, 将超低温环境按照超低温液体介质和超低温真空 2 种情况分类, 结合在超低温滚动轴承中的应用情况分别阐述了在不同超低温环境下常用固体润滑剂的摩擦学特性. 认为超低温固体润滑研究领域必将成为摩擦学研究的热点问题之一, 现已取得一些有应用价值的成果, 但对其研究还应进一步深入和系统化.

关键词: 超低温; 固体润滑剂; 轴承; 摩擦学

中图分类号: TH117.2; TH133.3

文章标识码: A

文章编号: 1004-0595(2002)04-0314-07

一般将温度在 120 K 以下的环境称为超低温环境. 目前超低温固体润滑技术主要集中在空间以及超导领域, 如超导装置、空间红外探测器以及液体火箭发动机燃料泵中的流量阀、各种端面密封、径向密封以及滑动和滚动轴承等, 其中有很多摩擦部件工作在超低温环境下, 由于受温度限制无法采用油脂润滑而只能采用固体润滑^[1-6]. 近年来随着对清洁型环保能源的开发, 以液氢作为汽车和飞机燃料的研究也成为热点, 其应用不但要求性能可靠, 而且要求长寿命(> 40 000 h). 国外对超低温环境的摩擦学研究十分重视, 美、欧、俄以及日本等都建立了专门的低温摩擦学实验室, 而国内在航天领域虽然有一些成功应用, 但相应的基础研究还十分缺乏^[5,6]. 本文结合超低温液氧泵轴承开发中固体润滑的研究, 对国内外尤其是国外超低温固体润滑研究成果和应用进行了介绍, 以期促进国内相关领域的研究与发展.

1 超低温环境及其特性分析

超低温摩擦学研究表明, 影响超低温环境下相对运动部件之间摩擦学性质的因素除温度外, 还包括相应气氛介质、材料表面物理机械性能以及以上因素的相互作用与相互影响. 超低温流体介质主要是液氢(LH₂)、液氧(LO₂)、液氮(LN₂)、液氦(LHe)及其蒸发气体. 其中 LH₂ 和 LO₂ 是液体火箭发动机比推力大且无污染的燃料, LHe 则是超导装置以及空间装

置中常用的低温密封介质, 而 LN₂ 由于其惰性特征、价格低廉以及介于 LH₂ 和 LO₂ 之间的热力学性质而常用于低温试验和作为预冷介质. LH₂、LO₂ 和 LN₂ 的理化特性如表 1 所示^[3], 由于三者化学活性不同, 相应对摩擦副行为的影响亦不同. LO₂ 因氧化性而易在摩擦表面形成氧化膜, 且磨损后能够再生, 对表面既能起到保护作用也可能产生腐蚀作用; LH₂ 的还原气氛会去除表面保护膜, 气态氢还会导致表面层的脆化; 而 LN₂ 的中性气氛则在当保护膜破裂时起到阻止其再生的作用. 并且由于低温流体的粘度均不到水粘度的 1/4^[7], 在相对运动表面间难以建立起有效的流体动压润滑膜, 低温流体只能起到带走摩擦热量而不能起到润滑作用, 因此低温摩擦副需要固体润滑膜来实现可靠润滑.

超低温环境下摩擦学测试也是利用超低温流体完成的, 常采用销(球)与盘接触方式. 一种方式是通过将摩擦副直接浸没在超低温液体 LHe、LH₂ 及 LN₂ 中, 测试温度和低温液体沸腾温度相同, 摩擦热不仅通过热传导被带走, 而且液体蒸发也带走一部分热量; 另一种方式是将摩擦副置于真空或密封的低温低压气态环境中(常常是 He 气), 而循环的低温液体通过换热器与摩擦副进行热交换以调节环境温度, 此时只能测量较低的摩擦功耗^[8-11]. 表 2 列出了几种低温摩擦试验机技术数据, 其中前 3 种为德国联邦材料研究测试中心研制^[8,9], 后 3 种为乌克兰低温技术研发

基金项目: 哈尔滨工业大学校基金资助项目(HIT. 2000. 62).

收稿日期: 2001-11-12; 修回日期: 2002-01-25/ 联系人古乐, E-mail: cerc@hope.hit.edu.cn.

作者简介: 古乐, 男, 1975 年生, 博士研究生, 讲师, 目前主要从事陶瓷轴承技术和低温摩擦学的研究.

表 1 LO₂, LH₂ 及 LN₂ 的理化特性Table 1 Physical and chemical properties of LO₂, LH₂ and LN₂

	Thermal aspects				Density /kg · m ⁻³	Viscosity at atmospheric pressure/Pa · s	Chemical activity	Safety aspects	Cost
	Boiling point /K	Specific Heat /J · (g · K) ⁻¹	Heat of vaporization /J · K ⁻¹	Thermal conductivity /mW · (cm · K) ⁻¹					
LO ₂	90	1.7	213	1.52	1140	0.20 × 10 ⁻³	Oxidizer	Excess heating can cause violent fire	1
LN ₂	77	2.1	199	1.63	810	0.16 × 10 ⁻³	Neutral agent	High safety of use	1
LH ₂	20	9.7	446	1	71	0.013 × 10 ⁻³	Reducing agent	Excess heating can cause explosion	8

表 2 低温摩擦试验机技术参数

Table 2 Technical data of cryotribometers

Tribometer	CT1	CT2	CT3	UTITV-100	UTITV-10	KMT
Body 1/mm	Cylinder, ball Φ ₃ ~10	Cylinder, ball Φ ₃ ~10	Cylinder, ball Φ ₃ ~10	Ball/pin Φ ₁₀	Ball/pin Φ ₁₀	Ball/pin Φ ₁₀
Body 2/mm	Disc Φ ₄₂	Disc Φ ₄₂	Disc Φ ₄₂	Disc Φ ₇₀	Disc Φ ₄₅	Disc Φ ₄₅
Environment	Hegas, LN ₂	LHe, LH ₂ , LN ₂	He, H ₂ , N ₂ , LH ₂ , LN ₂	Vacuum gaseous medium air	Vacuum gaseous medium air	LHe, LH ₂ , LN ₂ Vapours of cryogenic liquids, air
Normal force / N	10	500	100	100	10	30
No. of revolutions / min ⁻¹	500	3 000	3 000	2 000	2 000	32
Relative velocity / m · s ⁻¹	1	7	7	0.01~5.00	0.01~5.00	0.06
Frictional power / W	0.3	1 000	1 000	-	-	-
Temperature / K	4.2~300	4.2, 20, 77	10~300	77, 120, 220, 293	77, 120, 220, 293	4.2, 20, 77, 293
Pressure / Pa	10 ⁻¹ ~10 ⁵	10 ⁵	10 ⁻¹ ~10 ⁶	2 × 10 ⁻⁵ ~10 ⁵	2 × 10 ⁻⁵ ~10 ⁵	10 ⁵

署摩擦学实验室研制^[10,11]. 在低温摩擦副中作为摩擦部件的金属通常是选用不锈钢, 如应用较多的有 AISI 440C 和 52100 钢等, 试验研究中也常用经过热处理的 45[#] 钢代替.

2 超低温固体润滑剂摩擦磨损特性及应用

2.1 不同超低温下常用固体润滑剂摩擦磨损特性

在超低温环境下研究和应用较多的固体润滑剂仍然是石墨、MoS₂、PTFE 以及其它聚合物和软金属等. 但超低温液体介质中的摩擦与超低温真空或低压气体中的有一些差别. 接触区中因低温液体介质的存在具有更强烈的热量去除作用, 在摩擦热作用下接触区形成的气蚀也将影响摩擦过程^[10].

2.1.1 超低温液体中固体润滑剂摩擦磨损特性

尽管低温液体的润滑性能较差, 但与同一温度下该液体的蒸汽环境相比较, 摩擦区内存在该液体, 在

某些情况下能提高摩擦部件的耐久性^[10,12]. 表 3 中几种材料在 LN₂ 下摩擦系数均较在相同温度下氮蒸汽 (GN₂) 中的低. 另外, 石墨在真空下几乎失去润滑性

表 3 几种材料在液态氮和气态氮介质中与 45[#] 钢对磨时的摩擦系数

Table 3 Friction coefficient of varied materials against 45[#] steel in liquid nitrogen and gas nitrogen

Compositions	Low temperature environment	
	LN ₂	GN ₂
Polystyrene	0.33~0.35	0.35~0.37
PTFE	0.09~0.10	0.11~0.14
Polyvinyl chloride (PVC)	0.20~0.22	0.21~0.24

能, 但在低温中仍然可以广泛应用^[12]. 以 MoS₂ 作为润滑剂利用粘结剂形成的干膜在 LN₂ 和 LH₂ 中的摩擦系数比室温空气中的低约 1 倍, 且在 LH₂ 中的摩擦系数略小于 LN₂ 中的. 而以石墨+聚酰亚胺作为

润滑成分的干膜在 LN_2 及 LH_2 中的摩擦系数高于室温空气中的^[10].

纯 PTFE 材料在 LO_2 和 LN_2 中以及温度从沸点不断上升时的摩擦及磨损性能如图 1 所示^[13]. 可见

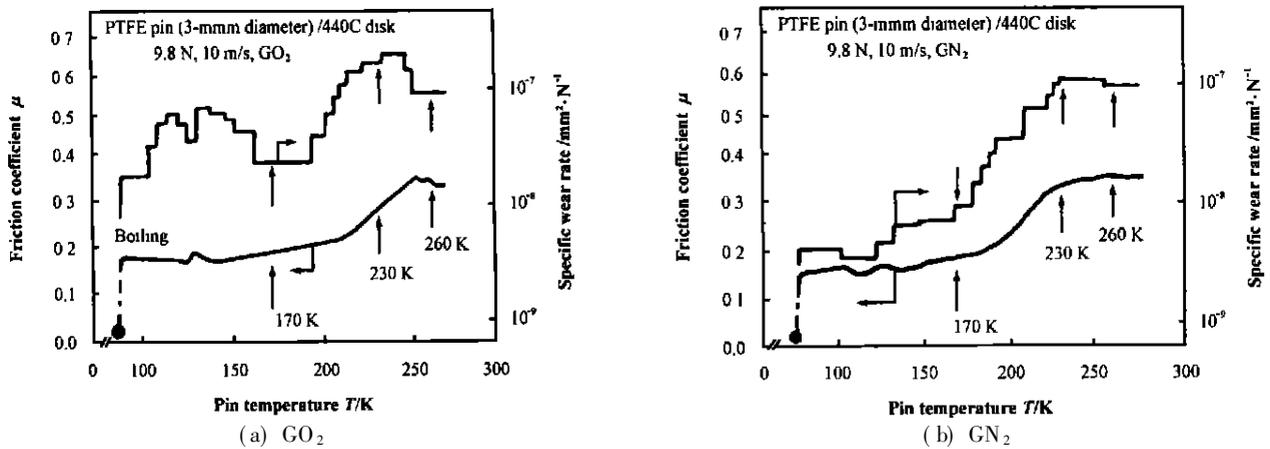


Fig 1 Change of friction coefficient and specific wear rate of PTFE in cryogenic oxygen/nitrogen gas vs. pin temperature

图 1 纯 PTFE 在低温氧/氮气气氛下摩擦系数和磨损率随温度变化的关系曲线

在氧气氛(GO_2)中从液相转变为气相时,摩擦系数增大,磨损开始产生;从蒸发温度到 170 K,摩擦系数相对较低并保持常值,但磨损较大且波动很大;温度从 170 K 升高到 230 K,摩擦系数逐渐增大,磨损则逐渐增大至最大值;温度继续升高到 260 K,摩擦系数和磨损均相应降低。氮气氛(GN_2)中摩擦系数的变化规律和氧气氛中基本相似,磨损随温度增加呈逐渐增加趋势,但始终小于 GO_2 中的,温度升高到 260 K 后,摩擦系数和磨损基本保持不变。可见纯 PTFE 材料在温度变化过程中其结构可能发生相应变化。聚合物分子多数存在松弛现象,即在特定温度下某些分子片段能够自由地移动^[14];在玻璃态转变温度下的行为即是一种松弛现象;另外一些分子松弛发生在低温下和分子片段相关的移动和侧链等处。这些现象会严重影响其摩擦性能,可能会阻止剪切薄层的形成。低温下 PTFE 的摩擦和磨损特性不如常温下的好,最可能的原因就是 PTFE 链上的分子片段的移动受到限制^[13, 14]。

由于润滑膜变脆以及低温介质的浸入,润滑薄膜破裂以后不具有自修补能力,而利用射频溅射生成的 $1 \mu\text{m}$ 左右的 MoS_2 和 PTFE 膜层在低温下的寿命要低于常温空气中的^[2]。但在 LN_2 环境中与 440C 不锈钢组成摩擦副时,溅射 MoS_2 润滑膜仍具备优良的润滑性和较长的耐磨寿命。溅射 PTFE 薄膜由于真空溅射过程中 F 的损失和 C 浓度的上升,摩擦系数较高,但大量 PTFE 转移将会阻止粘着发生。而当溅射 MoS_2 薄膜与 PTFE 组成摩擦副时,摩擦和磨损都远

大于溅射 PTFE 薄膜与 PTFE 摩擦副。在 LH_2 和 LO_2 中, MoS_2 由于 S 的脱氧或氧化而降低了润滑性能,而溅射 PTFE 在 LH_2 和 LO_2 中均能够保持较好的润滑性能。

DLC 高硬度涂层在低温中的摩擦性能也受到关注^[15],在 LN_2 中测试经过滤的高速碳等离子体流真空弧沉积 DLC 膜性能时发现,大颗粒石墨被滤掉,膜层中氢含量小于 1%,厚度为 3~4 μm 。根据沉积过程中偏压不同获得硬、软 2 种 DLC 膜,其机械物理性能分别与金刚石和石墨相似;2 种润滑膜的摩擦系数均高于常温下的,都具有较高的抗磨性以及和基体的强结合力,而硬 DLC 膜层的摩擦系数甚至要高于表面未处理摩擦副的。其主要磨损机理是基于表面粗糙微峰被切削的平滑作用和高度弥散磨损颗粒转移。磨粒主要成分为 α -earbyne 单晶、金刚石多晶或石墨等碳晶体的变体。

2.1.2 超低温真空下固体润滑剂的摩擦磨损特性

在常温真空环境下,固体润滑剂中过渡金属硫化物 MoS_2 、 WS_2 和 NbSe_2 等的摩擦系数低且使用寿命比较长,且真空度越高,摩擦系数越低。而石墨和氟化石墨则在真空中没有润滑作用。在聚合物中,PTFE 在大气和真空中都具有良好的润滑性能,而 PI 在真空下的润滑性比大气中的要好。另外离子镀铅膜在真空下也具有较好的润滑性能^[16, 17]。在超低温真空条件下研究最多的固体润滑剂仍然是 MoS_2 、石墨、各种聚合物以及其二元和多元混合物。

用 MoS_2 、PTFE 及石墨单体润滑剂以及其二元

或三元混合物作为固体润滑剂,以脲甲醛树脂(UFAR)作为粘结剂,在热处理 45# 钢表面制备喷涂涂层,并将其同轴承钢组成摩擦副,在 10^{-5} 真空及 120 K 温度下进行摩擦磨损性能评价,结果如表 4 所示^[18].可见,相比于常温下几乎所有润滑膜的耐磨寿

命都增加而摩擦系数增大.单体润滑剂中以 MoS_2 作为润滑成分的固体润滑膜的摩擦系数最低且耐磨寿命最长,而以石墨和 PTFE 作为润滑成分的耐磨寿命较短,石墨基润滑膜的磨损形式属于剧烈磨损.二元混合润滑膜则体现出单体润滑剂成分特性的算术

表 4 不同成分固体润滑膜的摩擦系数和耐磨寿命

Table 4 Antiwear life and coefficient of friction for solid lubricant coatings of varied compositions

Com position of coating	293 K		120 K	
	Antiwear life/ min	Friction coefficient	Antiwear life/ min	Friction coefficient
MoS_2 + UFAR	1100	0.02	1500	0.02
Graphite+ UFAR	40 ~ 100	0.02 ~ 0.10	50 ~ 110	0.05 ~ 0.15
PTFE+ UFAR	180	0.05 ~ 0.10	290	0.07 ~ 0.11
MoS_2 + graphite+ UFAR	290	0.02	650	0.07
MoS_2 + PTFE+ UFAR	370	0.03	730	0.03
MoS_2 + graphite+ PTFE+ UFAR	480	0.02	2500	0.02

平均,而三元混合润滑膜则体现出优异复合效应,这种复合效应可能是 MoS_2 与石墨的优化比例组合及 PTFE 聚合物的增塑共同作用结果^[18].

对采用其它粘结剂的 MoS_2 干膜的研究表明,其低温下的摩擦系数普遍大于常温下的摩擦系数,但直到 77 K 下仍具备优异的润滑性能,而耐磨性则与粘结剂成分有关^[1].进一步研究表明,耐磨性受温度降低后的物理机械性能(如与金属粘着强度、断裂强度及相对延伸率等)变化影响,如果温度降低导致机械物理性能变差(如变脆),则耐磨性降低,如果机械物理性能能够保持则耐磨性增大.

文献[10]中测试了几种不同聚合物在温度降低时的断裂强度和相对延伸率,对于具有功能团侧链的聚合物(如 PTFE 及 polyacrylate 等),随温度降低强度增加,伴随因功能团侧链移动导致的内部应力松弛.而无功能团侧链的聚合物在低温下变脆且机械物理性能变差.说明具有弹性聚合基体的材料在低温下更有效,因为他们在温度降低后的机械物理性能不会下降.如 PTFE 基复合材料在温度降低时抗磨性增加,而高温聚合物复合材料(聚硅氧烷 polysiloxane 和 PI)在室温和低温下的磨损率都很高.而通过在复合材料中添加具有塑化作用的聚合物材料能够提高复合材料的超低温抗磨性,如在含 PI 材料中添加 PTFE,其在真空 120 K 下仍具有很高抗磨性.

一般地,在相同条件下固体润滑剂的抗磨性与磨损寿命是相互依赖的,已经发现,降低温度可使润滑剂的摩擦系数和磨损寿命增加,但其耐磨性变化却不同^[18]:由 PTFE 组成润滑剂的抗磨性增加,而由 MoS_2 组成润滑剂的抗磨性减小.另外,含热塑性线

性结构 PTFE 固体润滑膜,在温度降低时其强度增加同时由于 PTFE 的存在而保持了一些塑性,在低温下虽然粘结剂变脆,但其抗磨性增加.在 77 K 下, MoS_2 填充固体润滑膜在稳定磨损阶段的磨损率要比 293 K 下低好几倍,但其跑合阶段的高磨损率使其整体抗磨性降低.

几种固体润滑剂在低温下的磨损机理与常温基本相同^[18],其跑合阶段磨损是由正压力作用下的压缩以及微切削作用构成的,在稳定磨损阶段磨损来源于因疲劳作用的表面破坏,该机理对所有涂层均相同,但其破坏特征则与涂层成分相关.层状晶体结构涂层的工作表面破坏会产生局部疤痕,并在反复滑动下相应破裂,疤痕密度和尺寸则随其成分不同而变化.而对于聚合物涂层的破坏则是一层层的,在跑合中光滑磨损轨道上出现碎片和鳞片状磨屑,接着发生大面积雪崩状剥落,下面层则暴露出来,又在往复作用下出现跑合阶段磨损,然而基于 PTFE 涂层破坏表明,在该涂层中的应力分配更加均匀.在剧烈磨损阶段,金属的直接接触导致表面硬化,在常温下磨损是由于大面积金属微突峰直接接触,而低温下则是更多数量金属点相接触,其硬化程度更大,同时低温下基体摩擦硬化导致粘着作用减小.因此低温下的磨损小于常温下的磨损,即由层状晶体和聚合物润滑成分组成的二元和三元混合物的磨损机理与层状晶体涂层相似,几乎所有涂层在低温下的磨损寿命都长于常温下的.

2.2 超低温滚动轴承中固体润滑剂应用实例

2.2.1 在超低温液体介质中的应用

液体火箭发动机液氢/液氧涡轮泵轴承直接工作

在超低温液体介质 LH_2/LO_2 中,常采用自润滑保持架与滚动体和套圈表面固体润滑膜相结合的润滑方式来保证稳定摩擦和较低磨损^[19-22]。

对低温下自润滑保持架材料的研究始于20世纪50年代末期,NASA^[23]的Lewis研究中心通过在 LH_2 和 LN_2 环境下的轴承材料匹配试验发现,低温环境下最好的润滑剂是PTFE.迄今为止PTFE也仍然是超低温轴承中实际应用最多的自润滑材料.然而PTFE的低强度、受载后冷流动和导热性差限制了其在高速重载轴承中的应用,相应地开发出在PTFE基体中添加增强填料的保持架,如玻璃布与PTFE层压复合材料(Armalon)、85%PTFE+15%玻璃纤维(质量分数,下同)、75%PTFE+20%玻璃纤维+5% MoS_2 和青铜粉填充PTFE(Salox)等.其中,Armalon是应用较多的一种保持架材料,具有最佳抗磨性和机械强度,但由于保持架兜孔磨损后暴露出来的玻璃布端头与轴承球发生磨粒磨损使PTFE膜层剥落,最终使轴承产生大量摩擦热造成轴承部件严重磨损^[2].该现象已被许多研究证实,在我们开发超低温轴承中采用玻璃纤维增强PTFE保持架试验时也发现相同现象.Masataka等^[2,19,20]采用HF浸蚀保持架兜孔表面(深度0.10~0.15 mm),以去除暴露在保持架兜孔表面的玻璃纤维端头,经处理后的保持架在 LN_2 、 LH_2 和 LO_2 中均表现出良好的润滑性能.但是需要注意,在处理过程中应避免因毛细作用使HF和 Na_2CO_3 吸附在保持架表面,致使残液留在保持架上腐蚀轴承球和套圈.该保持架已在日本J-2型火箭上得到成功应用.

Salox材料在低温介质中也具有很好摩擦磨损性能且更容易在接触面形成稳定转移膜,但不具备足够的机械强度^[21],可以采用多种改进增强方法,如采用铍青铜/磷青铜薄层+PTFE薄层交替层压烧结成型来达到所要求的拉伸强度,但会产生层间粘接困难,其各层润滑剂的转移特征不一致;也可采用铆接侧肋板的方法进行增强,由于受到尺寸限制,直径很小铆钉很难满足其剪切强度要求;采用金属保持架而在兜孔表面和引导面上嵌入Salox层,则具备了充分的强度和良好润滑性,但加工比较困难.文献[24]也给出了 LH_2 中几种滚动轴承保持架实验结果.可见,除青铜粉填充PTFE以外,青铜粉填充PI以及银-硒化钨-聚酰亚胺等复合材料的性能较好.另外,铅-青铜或440C不锈钢上镀铅等用作滚动轴承的保持架材料效果也是不错的.

我们在低温轴承台架试验中采用一种添加新型

增强成分的PTFE复合材料保持架,已取得良好效果,并通过了某型号液体火箭 LH_2/LO_2 发动机的地面点火试车,现正在对其性能进行进一步研究.

利用PVD方式在滚动体和套圈表面生成固体润滑薄层也是超低温轴承润滑的来源方法之一,除溅射PTFE和 MoS_2 外,软金属Au、Ag及Pb等也常用作固体润滑剂.离子镀Pb膜和Ag膜的减摩耐磨性能良好,但抗氧化性和抗能力差;离子镀Au薄膜的减摩耐磨性能一般,而化学稳定性优良,并能够承受各种恶劣环境而保持摩擦学特性基本不变^[16].在日本LE-7型发动机 LO_2 泵轴承上,采用滚道和球表面离子镀0.4 μm 的Au膜和溅射PTFE复合膜层,通过实际运转发现该涂层均被很快磨损掉,但在启动跑合时期可以提供良好润滑^[20].而作者利用全方位离子注入技术在套圈表面注入Ag和DLC后,在 LN_2 轴承实验台架上均取得了很好润滑效果^[5,25].

2.2.2 超低温真空环境下应用

空间红外望远镜中的轴承需要在高真空超低温下可靠润滑,不仅要求磨损最小,防止卡死,而且要求摩擦热生成最小.对某望远镜中应用的ED20(直径20 mm)轴承自润滑保持架以及球和套圈表面改性采用了3种方案^[23]:①钢制保持架、套圈和球表面均溅射0.5 μm 的 MoS_2 ;②青铜保持架和套圈表面离子镀Pb膜,球表面不处理;③75%PTFE+20%玻璃纤维+5% MoS_2 保持架,52100钢制套圈和球表面溅射厚0.5 μm 的 MoS_2 .3种组合除第一组外在室温真空状态下跑合100万转,然后温度降到18 K,又运转二百万转.结果表明,轴承1在低温下转矩最小且保持不变,轴承2从室温到20 K转矩保持不变,稍高于轴承1,轴承3在室温下转矩同1但降温到18 K后轴承转矩升高.但三者均成功运转二百万转.

3 结束语

在空间技术不断发展的带动下,超低温环境固体润滑技术在润滑剂成分选择以及润滑膜形成方式等方面已取得一定进展,尤其在具体的应用工况领域已取得具有实用价值的成果.但是已有的研究工作还不够系统和深入,润滑剂的选择基本局限于常温下成熟应用的润滑剂,超低温下测试技术也大多是在孤立的温度点上的静态测试,而对于连续变化的低温环境条件下许多润滑机理还尚未涉及.另外,随着陶瓷轴承在低温下的应用,新型陶瓷基润滑剂的不断开发,离子技术、激光技术和表面改性复合技术在润滑上的应用,以及空间技术日益扩展的需求和空间技术民用化

的趋势下^[4, 5, 26~28], 超低温润滑技术必将成为迫切需要解决的问题之一。

参考文献:

- [1] Yuhno T P, Vvedensky Yu V, Sentyurikhina L N. Low temperature investigations on frictional behavior and wear resistance of solid lubricant coatings[J]. Tribology International, 2001, 34: 293-298.
- [2] Masataka Nosaka, Mamoru Oike, Kenjiro Kamijo, *et al.* Experimental study on lubricating performance of self-lubricating ball bearings for liquid hydrogen turbopumps[J]. Lubrication Engineering, 1988, 44 (1): 30-44.
- [3] Jean-Luc Bozet. Modeling of friction and wear for designing cryogenic valves[J]. Tribology International, 2001, 34: 207-215.
- [4] Wang L, Snide R W, Gu L. Rolling contact silicon nitride bearing technology: a review of recent research[J]. Wear, 2000, 246: 159-173.
- [5] Wang L Q (王黎钦), Qi Y L (齐毓霖), Jiang H Y (姜洪源), *et al.* Tribo-characteristics of hybrid ceramic ball bearing in liquid nitrogen(混合式陶瓷球轴承在液氮中的摩擦学性能研究)[J]. Tribology(摩擦学学报), 1999, 19 (2): 122-125.
- [6] Dang H X (党鸿辛), Gao J T (高金堂). A review of solid lubrication for space application(空间技术用固体润滑的发展现状与展望)[J]. Tribology(摩擦学学报), 1992, 12 (1): 1-7.
- [7] Hall P B, Thom R, Chang L. An experimental/analytical study of high-speed, high-load rolling/sliding contacts with ultra-low viscosity fluids[J]. Tribology Transaction, 1997, 40 (1): 41-48.
- [8] Gradt T, Borner H, Schneider T. Low temperature tribometers and the behaviour of ADLC coatings in cryogenic environment[J]. Tribology International, 2001, 34: 225-230.
- [9] Hubner W, Gradt T, Schneider T, *et al.* Tribological behaviour of materials at cryogenic temperatures[J]. Wear, 1998, 216: 150-159.
- [10] Ostrovskaia Ye L, Yuhno T P, Gamulya G D, *et al.* Low temperature tribology at the B. Verkin institute for low temperature physics & engineering (historical review)[J]. Tribology International, 2001, 34: 265-276.
- [11] Kuleba V I, Ostrovskaia Ye L, Pustovalov V V. Effect of superconducting transition on tribology properties of materials[J]. Tribology International, 2001, 34: 237-246.
- [12] Kragelsky I V, Alisin V V. Tribology handbook I: friction wear and lubrication[M]. Yu M S (余梦生), Wu Y W (吴永伟) Translated. Beijing(北京): Mechanical Industry Press(机械工业出版社), 1986.
- [13] Masataka Nosaka, Kamoru Oike, Masataka Kikuchi, *et al.* Self-lubricating performance and durability of ball bearing for the LE-7 liquid oxygen rocket-turbopump[J]. Lubrication Engineering, 1993, 49 (9): 677-688.
- [14] Fusaro R L. Self-lubricating polymer composites and polymer transfer film lubrication for space applications[J]. Tribology International, 1990, 23 (2): 105-122.
- [15] Ostrovskaia Ye L, Strel'nikskij V E, Kuleba V I, *et al.* Friction and wear behaviour of hard and superhard coatings at cryogenic temperatures[J]. Tribology International, 2001, 34: 255-263.
- [16] Yu D Y (于德洋), Weng L J (翁立军), Ouyang J L (欧阳锦林). Recent progress of the space mechanism lubrication () [J]. Tribology(摩擦学学报), 1996, 16 (1): 89-96.
- [17] Shi M S (石淼森). Solid lubrication materials(固体润滑材料)[M]. Beijing(北京): Chemical Industry Press(化学工业出版社), 2000.
- [18] Gamulya G D, Kopteva T A, Lebedeva I L, *et al.* Effect of low temperatures on the wear mechanism of solid lubricant coatings in vacuum[J]. Wear, 1993, 160: 351-359.
- [19] Masataka Nosaka, Mamoru Oike, Masataka Kikuchi, *et al.* Tribo-characteristics of self-lubricating ball bearings for the LE-7 liquid hydrogen rocket-turbopump[J]. Tribology Transactions, 1993, 36 (3): 432-442.
- [20] Masataka Nosaka, Mamoru Oike, Masataka Kikuchi, *et al.* Evaluation of durability for cryogenic high-speed ball bearings of LE-7 rocket turbopumps [J]. Lubrication Engineering, 1996, 52 (3): 221-233.
- [21] Kannel J W, Dufrane K F, Barber S A, *et al.* Development of improved self-lubricating cages for SSME HPOTP bearings [C]. In Advanced Earth-to-Orbit Technology, NASA, Huntsville, AL. NASA Conference Publication # 3012, 1988 (1): 175-189.
- [22] Chase T J. Wear modes active in angular contact ball bearings operating in liquid oxygen environment of the space shuttle turbopumps [J]. Lubrication Engineering, 1993, 49 (4): 313-322.
- [23] Roberts E W. Thin solid lubricant films in space[J]. Tribology International, 1990, 23 (2): 95-104.
- [24] Yuko TSU YA. Handbook of solid lubrication(固体润滑手册)[M]. Fan Y (范煜) Translated. Beijing(北京): Mechanical Industry Press(化学工业出版社), 1986.
- [25] Zeng Z M, Zhang T, Tang B Y, *et al.* Improvement of tribological properties of 9Cr18 bearing steel using metal and nitrogen plasma immersion ion implantation [J]. Surface Coating Technology, 1999, 115: 234-238.
- [26] Masataka Nosaka, Masataka Kikuchi, Mamoru Oike, *et al.* Tribo-Characteristics of cryogenic hybrid ceramic ball bearings for rocket tuibopumps: bearing wear and transfer film[J]. Tribology Transaction, 1999, 42 (1): 106-115.
- [27] Xue Q J (薛群基), Liu H W (刘惠文). Tribology of ceramic I : lubrication of ceramics(陶瓷摩擦学: 陶瓷材料的润滑)[J]. Tribology(摩擦学学报), 1996, 16 (2): 184-192.
- [28] Xue Q J (薛群基), Lu J J (吕晋军). Research status and developing trend of solid lubrication at high temperatures(高

温固体润滑研究的现状及发展趋势[J]. Tribology(摩擦学学报), 1999, 19(1): 91-96.

Research Status of Cryogenic Solid Lubrication

GU Le, WANG Li-qin, LI Xiu-juan, QI Yu-lin

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A review on the recent progress of cryogenic solid lubrication is given. The properties of cryogenic environments and suited test methods of tribological characteristics are presented. The cryogenic environments have been classified as cryogenic liquid media and vacuum cryogenic conditions. Under above two different conditions, the tribological properties of common solid lubricants, as well as lamellar solids, polymers, soft metals, are presented associated with their application on cryogenic ball bearings. The research field of cryogenic solid lubrication certainly should be one of the most research hotspot in the future. Though valuable application progress has obtained, it still needs profound and systematic research.

Key words: : cryogenic; solid lubricant; bearing; tribology

Author: GU Le, male, born in 1975, Ph.D. student, lecturer, E-mail: cerc@hope.hit.edu.cn.