

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.11.021

润滑油与多孔聚酰亚胺保持架的相容性

楚婷婷^{1,2}, 李媛媛^{1,2}, 买楠楠^{1,2}, 孙小波^{1,2}, 胡甫^{1,2}, 席博伦^{1,2}, 董胤喆^{1,2}

(1. 洛阳轴承研究所有限公司, 河南洛阳 471039; 2. 河南省高性能轴承技术重点实验室, 河南洛阳 471039)

摘要:采用自制的聚酰亚胺 (PI) 模塑粉, 制备出一种轴承保持架用多孔 PI 材料, 进行了多孔 PI 保持架材料与两类用于空间长寿命轴承系统的典型润滑油多烷基化环戊烷 (MACs)、聚 α -烯烃 (PAO) 的相容性研究, 并进行了跑合验证。结果表明, 两类润滑油与保持架材料相容性良好, 保持架材料及润滑油的性能在浸油前后无明显变化; 未浸渍润滑油的保持架摩擦系数为 0.147, 浸渍 PAO 油的保持架摩擦系数为 0.061, 浸渍 MACs 油的保持架摩擦系数为 0.042, 浸渍润滑油后保持架摩擦系数明显变小; 浸渍两种润滑油后, 保持架的含油保持能力基本一致, 含油保持率均大于 94%, 含油保持能力强; 轴承跑合电机转速稳定在 6 000 r/min, 电机电流稳定在 0.34 A, 电流变化不超过 10 mA, 轴承跑合情况良好, 保持架可反复多次浸渍使用。

关键词: 润滑油; 相容性; 多孔聚酰亚胺; 保持架; 轴承

中图分类号: TH133.33, TQ323.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)11-0113-06

Compatibility of Lubricating Oil and Porous Polyimide Cage

Chu Tingting^{1,2}, Li Yuanyuan^{1,2}, Mai Nannan^{1,2}, Sun Xiaobo^{1,2}, Hu Fu^{1,2}, Xi Bolun^{1,2}, Dong Yinzhe^{1,2}

(1. Luoyang Bearing Research Institute Co., Ltd., Luoyang 471039, China;

2. Henan Key Laboratory of High Performance Bearing Technology, Luoyang 471039, China)

Abstract: Self-made polyimide (PI) molding powder was used to prepare a porous PI material for bearing cage. The compatibility of porous PI cage materials with two typical lubricating oils (MACs and PAO) used in space long-life bearing systems was studied, and the running-in test was carried out. The results show that the two kinds of lubricating oil have good compatibility with the cage material, the performance of the cage material and lubricating oil has no obvious change before and after oil immersion; the friction coefficient of cage without lubricating oil is 0.147, the friction coefficient of cage impregnated with PAO oil is 0.061, the friction coefficient of cage impregnated with MACs oil is 0.042, the friction coefficient of the cage is small after impregnating the lubricating oil; after soaking the two lubricating oils, the oil holding capacity of the cage is basically the same, the oil retention rate is more than 94%, and the oil holding ability is strong; the bearing running in motor speed is stable at 6 000 r/min, the motor current is stable at 0.34 A, current variation shall not exceed 10 mA, the running in condition of bearing is good, the cage can be used repeatedly by impregnating.

Keywords: lubricating oil; compatibility; porous polyimide; cage; bearing

多孔聚酰亚胺 (PI) 保持架坯料是以 PI 为基体原料, 采用特殊工艺在材料内部形成相互贯通的微孔^[1]。多孔含油保持架既是轴承的重要运动部件, 又是润滑油的载体, 对轴承的精度及寿命有很大影响^[2]。轴承运转过程中, 保持架内部润滑油在离心力和热的作用下通过钢球转移到沟道, 形成润滑油

膜; 而轴承沟道上多余的润滑油则通过毛细作用由微孔吸入保持架, 完成润滑油的储存和释放^[3]。润滑油与保持架的相容性及二者匹配后形成的润滑系统是保证轴承高精度、长寿命的关键^[3-4]。

相容性指润滑油对与其接触的各种材料无侵蚀作用, 同时这些材料也不会使油污染变质^[5-7]。不

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB2000602), 国家自然科学基金项目 (U1837602)

通信作者: 李媛媛, 高级工程师, 主要研究方向为特种工程材料的设计制备与性能

收稿日期: 2021-08-20

引用格式: 楚婷婷, 李媛媛, 买楠楠, 等. 润滑油与多孔聚酰亚胺保持架的相容性 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(11): 113-118.

Chu Tingting, Li Yuanyuan, Mai Nannan, et al. Compatibility of lubricating oil and porous polyimide cage[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(11): 113-118.

相容会导致保持架材料性能变化^[8-9]、力学性能下降、润滑油污染变质,从而影响保持架材料含油润滑性能。

随着航天事业的日益发展,对长寿命润滑的需求越来越高,要求航天润滑材料要具备长期可靠的使用寿命^[10]。空间润滑油的发展与应用大致分为三代:第一代主要是矿物油和精制矿物油;第二代主要代表是酯类油和全氟聚醚合成油;第三代空间润滑油主要是一些低挥发性合成烃油,如聚 α -烯烃(PAO)、碳氢硅油(SiHC)和多烷基化环戊烷(MACs)^[11]。在航天器上进行应用研究和使用的合成烃主要是PAO和MACs。它们与载荷添加剂相容性较好,具有优良的稳定性。通过控制合成工艺条件和精制处理,可得到宽黏度范围和低蒸气压系列产品。MACs是一种接近单分子的化合物,分子结构是环状的,比线性分子结构的全氟聚醚具有更好的抗磨损性能,具有很低的挥发性和饱和蒸气压,优良的高低温性能,以及对添加剂感受性良好,基于以上原因,MACs的研究成为国际液体空间润滑油的热点和发展趋势。

在多孔PI保持架浸渍润滑油过程中,一般需在容器内倒入大量的润滑油,完全浸渍保持架,由于多孔含油保持架配套轴承多用于航空航天领域,为保证其精度和可靠性,目前浸渍的空间润滑油大多仅用一次,是否能重复使用的研究未见报道。

笔者考察了空间长寿命轴承系统用典型润滑油(MACs, PAO)与多孔PI保持架的相容性,并通过跑合试验进一步评判润滑油与保持架形成的润滑系统的跑合效果。

1 实验部分

1.1 主要原料

4,4-氧双邻二甲酸酐(ODPA):纯度 $\geq 99\%$,天津市科密欧化学试剂有限公司;

4,4-二氨基二苯醚(ODA):纯度 $\geq 99\%$,天津市科密欧化学试剂有限公司;

N,N-二甲基乙酰胺(DMAc):分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

乙酸酐:分析纯,杭州天裕化工仪器有限公司;

吡啶:分析纯,无锡市晶科化工有限公司;

聚四氟乙烯:4S02,山东华氟化工有限责任公司;

MACs润滑油:RP4750,北京石油化工科学研究院;

PAO润滑油:SR-29,中石化润滑油分公司。

1.2 主要仪器及设备

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Spex 100型,美国PerkinElmer公司;

石油产品运动黏度测定仪:TSY-1109A型,大连特安技术有限公司;

多功能低温测定仪:TSY-1156型,大连特安技术有限公司;

四球摩擦试验机:DSL-062B型,大连世隆电子设备有限公司;

电子万能试验机:CMT6503型,美特斯工业系统(中国)有限公司;

邵氏硬度计:5410型,北京时代之峰科技有限公司;

场发射扫描电子显微镜(SEM):SIRION 200型,荷兰FEI公司;

表面性能测量仪:CFT-1型,兰州中科凯华科技开发有限公司;

真空浸油机组、离心机、跑合试验机:自制。

1.3 试样制备

(1) 原材料粉制备。

将一定量的ODA单体加入四口烧瓶中,并进行磁力搅拌,在氮气保护下加入适量的DMAc溶剂,搅拌使其溶解,将等量的ODPA溶解于一定量的DMAc溶剂中,在氮气保护下,用恒压滴液漏斗将其缓慢加入四口烧瓶,磁力搅拌后得到聚酰胺酸溶液。将一定比例的乙酸酐、吡啶混合物加入四口烧瓶中,升温搅拌后得到粘稠状PI溶液,将该溶液冷却至室温并缓慢倒入甲醇溶液中,过滤后用乙醇和去离子水洗涤干净,真空干燥即可得PI淡黄色粉末^[12]。

(2) 多孔PI保持架材料制备。

将上述原材料过500目筛后,取适量PI和聚四氟乙烯于高速搅拌机中混合均匀,采用冷压-热烧成型工艺制得多孔PI保持架材料^[13]。调控成型工艺,使得孔隙率控制在18%~19%,孔直径控制在1.8~2.0 μm 。

按照Q/ZYS J064-2013加工出拉伸强度试验用试样,试样外径33 mm、内径29 mm、高10 mm;硬度试验用试样与拉伸强度试样尺寸相同。多孔PI保持架成品依据某型号轴承图纸要求加工。

1.4 测试与分析方法

按照Q/ZYS J067-2015规定方法,将保持架

材料分别置于 PAO 油和 MACs 油中,在 90℃、常压条件下浸渍 120 h,试验结束后去除试样表面浮油,测试浸渍前后保持架材料和润滑油的性能变化,考察二者相容性。

采用 FTIR 仪分析保持架材料和润滑油的结构。

采用石油产品运动黏度测定仪按 GB/T 265-1988 测定润滑油的运动黏度、按 GB/T 2541-1981 测定黏温性能;采用多功能低温测定仪按 GB/T 3535-2006 测定润滑油的低温性(倾点);采用四球摩擦试验机按 GB/T 3142-2019 测定润滑油的极压性(PB 值)。

室温环境下,采用微机控制电子万能试验机测试试样拉伸强度,拉伸速率 5 mm/min;采用邵氏硬度计测定材料硬度。

采用 SEM 观察多孔 PI 保持架材料表面形貌,利用附带的 EDS 能谱对保持架材料中元素进行定性和半定量分析。

采用摩擦磨损试验机进行摩擦学性能测试,条件为往复摩擦,往复距离 5 mm,对磨钢球直径 4 mm,试验频率 20 Hz,载荷 20 N,时间 60 min。

采用自制的设备进行含油保持率测试,条件为温度 60℃、甩油速度 4000 r/min、甩油时间 100 min。

2 结果与分析

2.1 保持架材料对润滑油性能的影响

(1) 红外光谱。

图 1 为浸渍 PI 保持架材料的两种润滑油试验前后红外谱图。对于 PAO 润滑油的谱图,其中波数 2953 cm^{-1} 和 2852 cm^{-1} 处为 C—H 伸缩振动峰;波数 1464 cm^{-1} 处为 $-\text{CH}_2-$ 弯曲振动峰;波数 1377 cm^{-1} 处为 $-\text{CH}_3$ 弯曲振动峰;波数 721 cm^{-1} 处为 $-\text{CH}_2-$ 摆动峰;波数 1746 cm^{-1} 处为 C=O 伸缩振动;波数 1259, 1155, 1112 cm^{-1} 处为 C—O

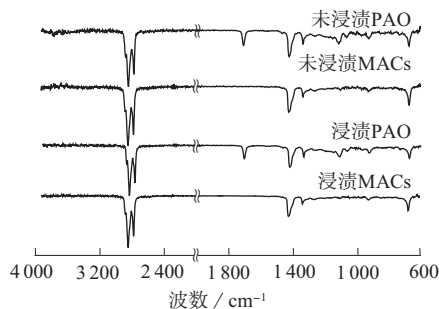


图1 润滑油浸泡保持架材料前后的红外谱图

伸缩振动。由 MACs 润滑油的红外谱图可以看出,波数 2953 cm^{-1} 和 2852 cm^{-1} 处为 C—H 伸缩振动峰;波数 1460 cm^{-1} 处为 $-\text{CH}_2-$ 弯曲振动峰;波数 1375 cm^{-1} 处为 $-\text{CH}_3$ 弯曲振动峰;波数 721 cm^{-1} 处为 $-\text{CH}_2-$ 摆动峰。比较浸渍保持架材料前后润滑油的红外谱图可以看出,润滑油红外谱图特征峰位置及相对峰高完全一致,浸渍保持架材料后的谱图中未出现任何新峰,说明润滑油与保持架材料未发生化学反应。

(2) 理化性能。

空间润滑油适用性的重要指标是其饱和蒸气压、黏温性能、低温性能以及润滑性能。黏度的大小影响流体动压润滑区域摩擦体系的摩擦学行为,润滑油的黏度随温度变化的关系称为黏度指数,常用倾点评价润滑油使用的温度最低限指标。由于近年来一些机械部件暴露在宽温度环境下工作,对液体润滑剂提出了高黏度指数和低倾点的要求。

表 1 为润滑油浸渍保持架材料前后性能测试结果。由表 1 可以看出,浸渍前后 MACs 油和 PAO 油的运动黏度、黏温性能(黏度指数)、低温性(倾点)和极压性(PB 值)均在允许范围内,未发生明显变化,说明保持架材料对两类润滑油无反应。

表1 润滑油浸渍保持架材料前后性能对比

项目	MACs 油		PAO 油	
	浸渍前	浸渍后	浸渍前	浸渍后
运动黏度 / 100°C ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	14.2	15.06	14.82	15.76
	108	109.84	104.32	106.11
黏度指数	133	134.65	148	150.04
倾点 / $^\circ\text{C}$	-55	-56	-45	-45
PB 值 / kg	100	100	120	120

2.2 润滑油对保持架材料性能的影响

(1) 红外光谱。

图 2 为浸渍前后保持架材料的红外谱图。可以看出浸渍前后保持架材料谱图的特征峰位置及相对峰高完全一致,浸渍后谱图中未出现任何新峰,说明润滑油与保持架材料未发生化学反应。

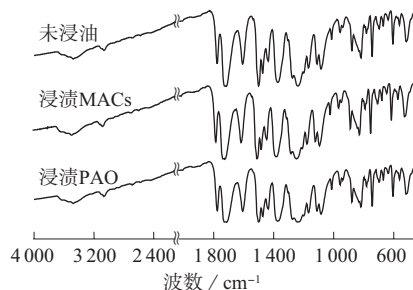


图2 浸油前后保持架材料的红外谱图

(2) 能谱。

图3为浸渍前后保持架材料的EDS能谱,表2为元素含量对比。由图3和表2可知,三种情况下C、O含量接近。但浸渍MACs油的保持架材料没有检测到N元素,主要是因为N元素特征峰与C元素特征峰接近,易受C元素强峰干扰,从而影响测定结果^[13]。浸渍MACs油的保持架材料F元素含量略大,这是由于SEM附带的EDS能谱扫描范围由点构成面,分析深度有限,测量面积小,导致元素定量分析有区域性;加上由于保持架制坯过程混料造成聚四氟乙烯在不同深度范围内分布不均匀,因此,EDS只适用于微区定性分析和半定量分析^[14]。综合以上分析可知,浸油前后元素含量差别不大,结合红外谱图中特征峰位置及相对峰高完全一致,浸油后并未发现新峰,可知浸渍后保持架材料未发生化学反应。

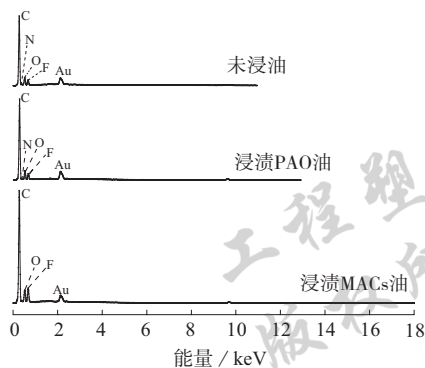


图3 浸渍润滑油前后保持架材料的EDS能谱

表2 元素含量对比

元素	未浸渍	浸渍 PAO 油	浸渍 MACs 油	%
C	73.04	71.46	75.82	
N	6.57	7.04		
O	14.5	14.21	13.24	
F	5.89	7.3	10.93	

(3) 力学性能。

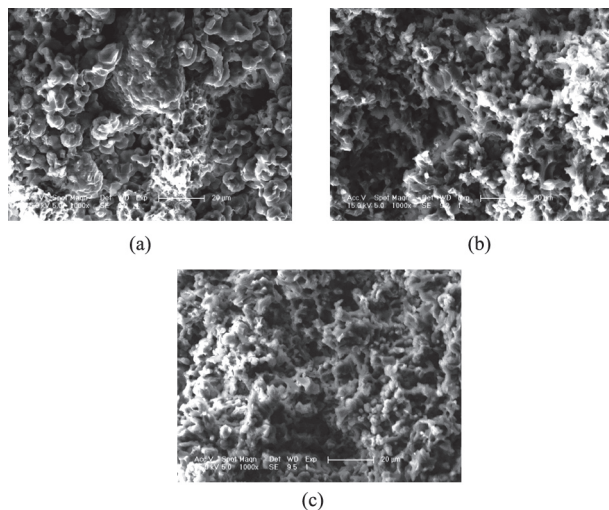
表3为浸油前后保持架材料的力学性能。由表3可以看出,保持架材料的拉伸强度和硬度基本与浸渍前一致,并未发生明显变化,即润滑油对保持架材料力学性能无影响。

表3 润滑油浸渍前后保持架材料性能

项目	MACs 油		PAO 油	
	浸渍前	浸渍后	浸渍前	浸渍后
拉伸强度 / MPa	54.2	55.0	53.9	53.5
硬度 / HD	80.2	80.1	80.1	80.3

(4) 微观形貌。

图4为保持架在润滑油中浸渍前后的SEM照片。由图可知浸油前后保持架材料微观无差异。



a—未浸渍润滑油; b—浸渍 PAO 油; c—浸渍 MACs 油

图4 浸渍两种润滑油前后保持架材料 SEM 照片

2.3 多孔含油 PI 保持架性能

(1) 含油保持率。

轴承实际运转过程中的润滑失效多是由于保持架出油速率过快导致电流波动较大,从而保持架运转失稳导致磨损进一步加剧,致使轴承润滑性能失效,严重影响空间高速机构的速度与位置的精确控制^[15]。含油保持率是多孔含油PI保持架的重要技术指标,指在一定温度和离心加速度作用一段时间后,保持架内含油率与初始含油率之间的比值,表示保持架对润滑油的保持能力,决定出油速率大小,是评判保持架与润滑油相容性的一个重要指标^[15]。

图5为多孔含油PI保持架的含油保持率。由图5可知,浸渍MACs油和PAO油后保持架的含油保持能力基本一致,含油保持率均大于94%。

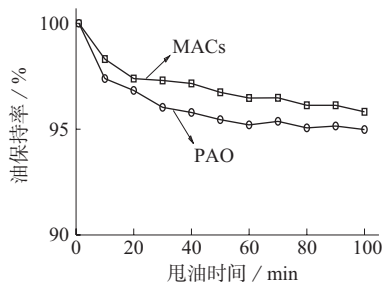


图5 多孔含油 PI 保持架含油保持率

(2) 摩擦学性能。

比较浸渍润滑油前后保持架的摩擦磨损性能,结果见表4。由表4可知,浸渍前保持架干摩擦时磨损量为 0.035 mm^3 ,浸渍润滑油后磨损量太小,超过摩擦试验机的检测下限,故检测不到磨损量大小。

浸渍前保持架干摩擦系数为 0.147,浸渍后的摩擦系数大幅降低,说明两种润滑油减摩效果均较好。

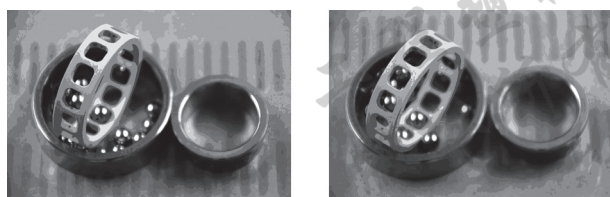
表 4 保持架浸油前后摩擦磨损测试结果

保持架状态	摩擦系数	磨损量 / mm^3
未浸渍润滑油	0.147	0.035
浸渍 PAO 油	0.061	
浸渍 MACs 油	0.042	

2.4 跑合试验

多孔 PI 保持架安装时要在钢球和沟道上涂一层润滑油,该润滑油品种与保持架内所浸的相同,之后进行轴承跑合试验,跑合过程中润滑油在轴承的滚动面上铺展形成油膜,将相互运动的两个表面隔开,避免金属的直接接触,减少磨损。如果轴承性能合格,即可转入下一道工序。安装后最初跑合的 200 h 是关键,出现问题往往在该阶段,如果轴承在这段时间内性能稳定可靠,则寿命就会较长^[16]。

将浸渍后的保持架与轴承合套,进行跑合试验。跑合 200 h 后拆分,外观如图 6 所示,保持架仅兜孔处有四个黑点,该四个黑点为保持架与钢球接触正常产生,其它地方无磨损痕迹,跑合后保持架外观良好。



(a) 浸渍 PAO 油; (b) 浸渍 MACs 油

图 6 保持架跑合后图片

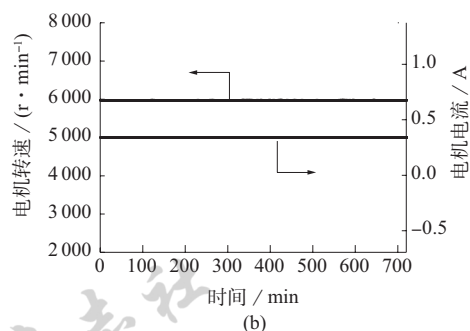
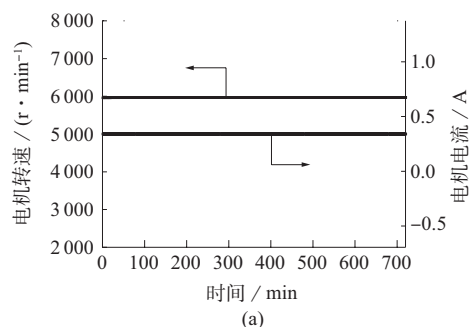
图 7 为轴承部分跑合曲线。由图 7 可知,电机转速均稳定在 6000 r/min 附近,电机电流均稳定在 0.34 A 左右,电流变化不超过 10 mA,跑合情况良好。

通过上述表征可知,浸渍前后保持架材料和润滑油的性能均未发生明显变化,润滑油与保持架组成的润滑系统跑合情况良好,可以用于后续稳定供油,认为二者相容性良好。根据现有多孔含油保持架的生产工艺,浸渍润滑油一次需约 24 h,可认为上述两种润滑油,可反复浸渍多孔 PI 保持架 5 次。

3 结论

(1) MACs 和 PAO 润滑油与多孔 PI 保持架材料相容性良好。

(2) 浸渍 MACs 和 PAO 润滑油后保持架摩擦系数小,且含油保持能力较强。



a—浸渍 PAO 油; b—浸渍 MACs 油

图 7 保持架跑合曲线

(3) 浸渍 MACs 和 PAO 润滑油后,保持架跑合电流及转速平稳,拆分后保持架外观良好,无磨损。

(4) 根据现有多孔含油保持架的生产工艺,认为上述两种润滑油,可反复浸渍多孔 PI 保持架 5 次。

参考文献

- [1] 赵华俊,王晓雷,黄巍. 多孔聚酰亚胺保持架对轴承贫油润滑性能研究[J]. 机械制造,2018(3):31-34.
Zhao Huajun, Wang Xiaolei, Huang Wei. Study of effect of porous polyimide retainer on bearing at starved lubrication[J]. Machinery, 2018(3):31-34.
- [2] 阮洪伟,张韶华,王廷梅,等. 多孔聚酰亚胺含油轴承保持架的磨损机理研究[J]. 空间控制技术与应用,2019,45(3):64-70.
Ruan Hongwei, Zhang Shaohua, Wang Tingmei, et al. Study on wear mechanism of porous polyimide oil-containing bearing cage[J]. Aerospace Control and Application, 2019, 45(3):64-70.
- [3] 郭金芳,李娟. 多孔含油保持架对陀螺电机轴承性能的影响[J]. 轴承,2000(3):34-36.
Guo Jinfang, Li Juan. Effect of porous oil-bearing cage on the performance of gyro motor bearing[J]. Bearing, 2000(3):34-36.
- [4] 孙小波,王枫,葛世军,等. 航天长寿命轴承润滑技术[J]. 轴承,2012(3):60-64.
Sun Xiaobo, Wang Feng, Ge Shijun, et al. Long-life lubricating technology for bearings used in aerospace[J]. Bearing, 2012(3):60-64.

- [5] 吴福丽,杨传富,崔海涛,等. 润滑油橡胶相容性的研究[J]. 润滑与密封,2011,36(5):92-96.
Wu Fuli, Yang Chuanfu, Cui Haitao, et al. The study on elastomer compatibility of lubricants[J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(5):92-96.
- [6] 杨传富,吴福丽,李贺然,等. 润滑油橡胶相容性测定法的建立[J]. 润滑油,2015,30(6):50-58.
Yang Chuanfu, Wu Fuli, Li Heran, et al. Establishment of lubricating oil-elastomer compatibility test[J]. Lubrication Oil, 2015, 30(6):50-58.
- [7] 周少鹏,尹开吉,唐红金,等. 润滑油与橡胶相容性的研究现状[J]. 润滑油,2018,33(1):1-11.
Zhou Shaopeng, Yin Kaiji, Tang Hongjin, et al. Research status of the compatibility between lubricants and rubber[J]. Lubrication Oil, 2018, 33(1):1-11.
- [8] 华平,凌付军,朱忠华. 橡胶与润滑油的相容性考察[J]. 合成润滑材料,2011,38(1):7-9.
Hua Ping, Ling Fujun, Zhu Zhonghua. Study on the compatibility of rubber and lubricating oil[J]. Synthetic Lubricants, 2011, 38(1):7-9.
- [9] 史艳梅,邢彬,马羽飞,等. 一种耐高温润滑油与橡胶的相容性考察[J]. 橡塑技术与装备(塑料),2016,42(18):52-54.
Shi Yanmei, Xing Bin, Ma Yufei, et al. Study on compatibility of a high temperature lubricating oil and rubber[J]. China Rubber / Plastics Technology and Equipment (Plastics), 2016, 42(18):52-54.
- [10] 徐增闯,崔维鑫,贺景坚,等. 硅碳氢润滑油的空间长寿命润滑性能分析[J]. 摩擦学学报,2020,40(4):504-509.
Xu Zengchuang, Cui Weixin, He Jingjian, et al. Long life lubrication performance of silicon hydrocarbon lubricating oil for space application[J]. Tribology, 2020, 40(4):504-509.
- [11] 刘泊天,张静静,高鸿,等. 空间用润滑材料研究进展[J]. 材料导报,2017,31(30):290-292.
Liu Botian, Zhang Jingjing, Gao Hong, et al. Research progress of lubricants for space application[J]. Materials Reports, 2017, 31(30):290-292.
- [12] 景晓辉,马海燕. 一种醚酐型可溶性聚酰亚胺的合成与表征[J]. 化工新型材料,2005(5):44-46.
Jing Xiaohui, Ma Haiyan. Synthesis and characterization of a soluble ether anhydride polyimide[J]. New Chemical Materials, 2005(5):44-46.
- [13] 王枫,孙小波,王子君,等. 多孔聚酰亚胺复合保持架管坯预加热限位压制工艺:1310480892.5[P].2014-01-15.
Wang Feng, Sun Xiaobo, Wang Zijun, et al. Porous polyimide composite maintain pipe semifinished product pre-heating limit pressing process:1310480892.5[P].2014-01-15.
- [14] 周浩然. PI/ Al_2O_3 杂化薄膜 Al 含量分析方法、电晕老化及热老化寿命研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2011.
Zhou Haoran. Study on the analysis methods for Al content, corona aging and thermal aging of PI/ Al_2O_3 hybrid films[D]. Harbin:Harbin University of Science and Technology, 2011.
- [15] 卿涛,周宁宁,周刚,等. 空间摩擦学在卫星活动部件轴系的应用研究现状及发展[J]. 润滑与密封,2015(2):100-108.
Qing Tao, Zhou Ningning, Zhou Gang, et al. Application research status and development of space tribology in shafting of satellite moving parts[J]. Lubrication Engineering, 2015(2):100-108.
- [16] 王子君. 陀螺轴承用多孔含油聚酰亚胺保持架研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2004.
Wang Zijun. The study of oil-impregnated porous polyimide retainers used for gyroscope bearing[D]. Hefei:Hefei University of Technology, 2004.