聚集润滑技术基础研究， 助推轴承行业高质量发展

中国石化润滑油有限公司润滑脂分公司 陈治 刘建龙 冯强 吴宝杰

摘要：随着我国装备制造业的快速发展，高端轴承领域持续革新，润滑技术基础研究迫在眉睫。轴承润滑油脂关系到轴承的运转性能和使用寿命。基于高端轴承长疲劳寿命、耐微动磨损和抗电腐蚀等差异化润滑需求，中国石化润滑油有限公司润滑脂分公司搭建全国润滑脂工程研究中心平台，专注摩擦润滑基础应用研究，实现高端轴承润滑技术国产化，保障高端装备行业高效发展。

关键词：高端装备、轴承、基础研究、润滑

1.前言

随着我国高端轴承的快速发展，特别是在高档数控机床、人形机器人、新能源汽车、轨道交通、风电等领域，润滑需求不断发生变化。轴承行业高质量发展引领润滑技术不断突破。润滑脂被称为滚动轴承除内圈、外圈、滚动体和保持架外的第五大元件^[1]，润滑不良是造成轴承损伤最常见的原因。

ISO 将轴承失效模式分为六大类：滚动接触疲劳、磨损、腐蚀、电蚀、塑性变形、以及裂纹和断裂。本文聚焦高端轴承润滑需求差异化特点，介绍中国石化润滑油公司在长疲劳寿命、耐微动磨损、耐电腐蚀等轴承润滑领域所开展的基础应用研究工作，助力高端轴承全产业链高质量发展。

2.润滑技术研究

2.1 长疲劳寿命研究

疲劳寿命是评价滚动轴承质量先进性的重要指标之一。滚动轴承的疲劳寿命与轴承材料特性、轴承部件的功能表面特性以及油、脂润滑的摩擦学特性相关。滚动轴承的疲劳失效大致可以分为两类：一类是裂纹起源于亚表层材料缺陷处的亚表层疲劳失效；另一类是由于表面切应力集中引起的表层材

料剥落失效。

脂润滑条件下润滑膜厚是影响滚动轴承可靠性的关键因素之一，稠化剂是影响润滑脂在轴承内分布、流动、分油的主要因素，而润滑脂的这些特性与脂润滑轴承的寿命密切相关。聚脲润滑脂被认为是 21 世纪具有发展潜力的润滑脂之一^[2]。聚脲润滑脂稠化剂在摩擦副表面吸附形成“垫层”，阻碍了润滑脂乏油润滑引起的润滑膜厚持续减小，对于延长表面起源型剥落的轴承疲劳寿命具有重要意义。聚脲稠化剂的类型、含量对表面起源型剥落的轴承疲劳寿命有显著影响，合理选择稠化剂参数可显著延长轴承疲劳寿命，这可能与聚脲稠化剂的回流特性相关。

经过近两年的科研攻关，采用稠化剂垫层机理，成功开发长城乘用车电装轴承润滑脂，获多家汽车轴承厂技术认可，配套国产及合资乘用车整车厂。

2.2 耐微动磨损研究

微动磨损主要是微小振动挤出油膜，导致两基体微凸体接触出现黏着，振动幅值大于微凸体黏着，内部剪短。轴承微动磨损主要呈长椭圆形，且等间距间隔。

家用电器电机轴承微动磨损是其主要噪音原因之一^[3]。针对空调电机轴承微动磨损产生机理，优化润滑技术路线，降低轴承微动磨损概率。风力发电机的偏航及变桨轴承几乎一直处于微动磨损状态，并伴随有微动疲劳^[4]。乘用车轮毂轴承随整车运输过程中，因路面的低频颠簸而引起轴承滚道发生微动磨损。

以不同聚脲稠化剂润滑脂为分析对象，采用 FALEX 微动磨损测试仪测试润滑脂抗微动磨损性能，并从油膜厚度、流变性能等方面分析因稠化剂组成不同造成的抗微动磨损性能差异。

不同稠化剂配方的聚脲润滑脂的抗微动磨损测试结果有明显差异；不同稠化剂配方的聚脲润滑脂在接触区形成油膜的厚度不同，能够快速在接触区

形成较厚油膜并具有油膜保持能力的润滑脂具有更好抗微动磨损性能；不同稠化剂配方的聚脲润滑脂因稠化剂结构的差异造成润滑脂流动性能的区别，稠化剂结构强度较小，可恢复能力较强，更容易流动的润滑脂的抗微动磨损性能更优。

经过多年的技术研发和台架试验，完全掌握轴承耐微动磨损润滑技术，可提升不同温度环境下不同类型轴承耐微动磨损性能，所开发的耐微动磨损家电轴承润滑脂、风电轴承润滑脂和轮毂轴承润滑脂产品，获多家轴承企业和主机厂技术认可。

2.3 耐电腐蚀研究

交流发电机和驱动电动机是普遍使用的动力设备，而电动机轴承润滑脂则是保证电动机稳定、高效运转的关键。电蚀是造成交流发电机、驱动电动机轴承过早失效的因素之一，这是因为电蚀产生的金属粒子导致滚动面粗糙，润滑脂变质，从而增大轴承的振动和噪声。

针对滚动轴承轴电流问题，现阶段主要从电导通和电绝缘两方面解决：电导通方面，通过绝缘薄油膜参数最小化，采用导电脂和导电密封等降低击穿电压；电绝缘方面，通过绝缘薄油膜参数最大化，采用绝缘材料等提高击穿电压。油膜参数的控制随润滑剂、转速、温度及载荷而变化，难以控制。选取导电密封，密封圈会与运动轴承内圈或外圈接触磨损，导致导电性失效，而绝缘材料的使用对于加工精度、成本控制有着较高要求。因此，在保证润滑脂抗漏失性、导电衰减率低的前提下，应用导电脂是抑制轴电流最简单直接的有效办法。

由于测试形式的不同以及导电材料在润滑脂内的聚集态影响，静态体积电阻率测试方法并不适合用于滚动轴承导电润滑脂导电性能评价，开发的脂润滑滚动轴承动态导电性能试验机能够有效地评价普通润滑脂、导电润滑脂的导电特性差异。不同导电材料对润滑脂在轴承内的动态击穿电压减小作用

不同。润滑脂的击穿电压均随导电材料添加量的增大而下降，低击穿电压伴随着低击穿电流，与高击穿电压相比具有更低的击穿放电功率。在脂润滑滚动轴承动态导电性能测试中存在“导电环”现象，润滑膜被击穿后即使降低电压润滑膜依然处于导体状态，导电环的面积大小可用于评价润滑脂的导电性能，导电环面积越小导电性能越好。

基于固体粒子导电机理研究的基础上，完成离子液体型导电润滑脂开发，离子液体型导电润滑脂可缓解固体粒子型导电润滑脂导电性衰减情况。

3.总结

1、聚焦高端轴承核心润滑技术，联合科研院所和轴承企业，发挥全国润滑脂工程中心平台优势，开展“轴承+润滑”基础应用研究，多项研究成果实现技术产业化，打破国外核心润滑技术封锁，助推轴承行业高质量发展。

2、基于轴承长疲劳寿命、耐微动磨损、抗电腐蚀等润滑需求，开展基础研究，建立润滑脂配方、生产和应用技术，完善长城精密轴承润滑脂产品线，打造全系列汽车、家用电器和工业电机等领域轴承润滑脂产品。

【参考文献】

[1] 李兴林，吴宝杰，刘庆廉.低噪音密封轴承润滑脂选用及机理分析[J].轴承，2004(4):39-42.

[2] 栗志彬，董禄虎，高艳青.聚脲润滑脂研究现状及发展趋势[J].石油商技，2013(5):18-22.

[3] 魏全顺，秦海燕，赵智聪.空调电机轴承微动磨损产生机理分析及探究[J]，2024(5):74-78.

[4] 高峰，张晓凯，刘亚春.风力发电机偏航及变桨轴承脂微动磨损性能评价[J]，2021，48(1):38-41.