

# 多工况下润滑脂弹流摩擦特性演变规律与稳定性的研究

王燕霜<sup>1</sup> 于景康<sup>1</sup> 张明宇<sup>1,2\*</sup> 曹鑫<sup>1</sup>

1 齐鲁工业大学(山东省科学院)机械工程学部

2 山东省机械设计研究院

DOI:10.32629/etd.v6i7.18247

**[摘要]** 润滑脂在滚动轴承中的摩擦特性直接影响设备能耗与寿命,然而其润滑机理及工况适应性仍缺乏系统性研究。本研究借助MTM2微牵引力试验机,系统测试了三种商用润滑脂在不同赫兹接触应力与环境温度条件下的弹流摩擦系数,并结合红外光谱数据,探究不同工况下润滑脂的摩擦行为演变规律。研究发现,三种润滑脂摩擦系数均随滑滚比增加而增加且摩擦系数随滑滚比增大呈先快后慢的增长趋势;卷吸速度变化时,2#脂摩擦稳定性能最佳,3#脂次之,1#脂最差;载荷变化时,3#脂摩擦性能最好,1#脂次之,2#脂最差;温度变化时,1#脂摩擦稳定性能最好,3#脂次之,2#脂最差。同时,红外光谱分析表明高温下润滑脂成分未变,仅含量降低。本研究为不同工况下选择合适润滑脂提供了数据支持与理论依据。

**[关键词]** 润滑脂; 弹流摩擦特性; MTM2微牵引力试验机; 红外光谱仪; 摩擦稳定性

**中图分类号:** TH117.2 **文献标识码:** A

## Study on the Evolution Law of Elastohydrodynamic Friction Characteristics and Friction Stability of Grease Under Multiple Working Conditions

Yanshuang Wang<sup>1</sup> Jingkang Yu<sup>1</sup> Mingyu Zhang<sup>1,2\*</sup> Xin Cao<sup>1</sup>

1 School of Mechanical Engineering, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences)

2 Shandong Institute of Mechanical Design and Research

**[Abstract]** The friction characteristics of grease in rolling bearings directly affect the energy consumption and service life of equipment. However, systematic research on its lubrication mechanism and adaptability to working conditions is still insufficient. In this study, a MTM2 was employed to test the elastohydrodynamic friction coefficients of three commercial greases under different Hertzian contact stresses and ambient temperatures. Combined with infrared spectroscopy data, the evolution law of the friction behavior of grease under different working conditions was explored. The results show that the friction coefficients of the three greases all increase with the increase of the slide-roll ratio, presenting a trend of rapid increase first and then slow increase. When the entrainment speed changes, the 2# grease exhibits the best friction stability, followed by the 3# grease, while the 1# grease shows the worst. When the load changes, the 3# grease has the best friction performance, followed by the 1# grease, and the 2# grease has the worst. When the temperature changes, the 1# grease demonstrates the best friction stability, followed by the 3# grease, and the 2# grease has the worst. Meanwhile, infrared spectroscopy analysis indicates that the composition of grease does not change at high temperatures, and only its content decreases. This study provides data support and a theoretical basis for selecting appropriate grease under different working conditions.

**[Key words]** Grease; Elastohydrodynamic Friction Characteristics; MTM2 Micro-Traction Tester; Infrared Spectrometer; Friction Stability

### 引言

在实际应用中,润滑脂广泛应用在滚动轴承上<sup>[1]</sup>。为了提高轴承的性能,我们可以针对不同的工作条件选择合适的润滑脂,

从而有效降低摩擦磨损。在广泛的实验分析和台架试验的基础上,逐步形成了一套针对润滑脂选择的指导原则。然而,目前对于不同润滑脂在不同轴承工作条件下的摩擦影响机制仍缺乏全

面而系统的认识。因此,亟需对相关知识进行深入研究和整合,以制定一个科学的决策框架,为润滑脂在多种工况下的应用提供理论指导。

润滑脂是一种半固体润滑剂,主要由基础油、稠化剂和添加剂组成<sup>[2]</sup>。在受到应力作用时,稠化剂主要抵抗弹性力,而基础油则抵抗粘性力<sup>[3]</sup>。润滑脂的弹性特性能够有效防止其泄漏,而其流动性对于润滑触点的润滑性能至关重要。在高剪切速率和压力条件下,润滑基础油表现出非牛顿行为<sup>[4]</sup>,而润滑脂由于其两相特性,即使在最低剪切速率下也会表现出非牛顿行为。Mubashshir<sup>[5]</sup>的研究表明,稠化剂的稠度或种类变化会显著影响润滑脂的无限剪切粘度和结构稳定性。在轴承润滑脂油膜的检测研究中发现,稠化剂并非仅起承载基础油的作用,而是直接参与到润滑过程当中<sup>[6]</sup>。尤其在低速运转的轴承中,除基础油外,稠化剂也会通过滚动体与滚道的接触区域,进而对摩擦行为产生调控作用<sup>[7]</sup>。近年来,随着测试技术的不断进步,众多学者借助先进仪器设备对润滑脂的流变特性展开了深入研究。例如,周等<sup>[8]</sup>选用不同粘度的基础油制备了多种润滑脂,并对其流变性能参数进行了系统测试,结果表明基础油粘度越低,锂基润滑脂的粘弹性越显著,结构稳定性也更强。此外,部分研究者还通过弹流润滑试验,对润滑脂的理化性能进行了检测,并探讨了试验工况对摩擦系数及油膜厚度的影响规律<sup>[9-11]</sup>。

目前,国内外学界虽已围绕润滑脂的流变性能与摩擦学性能开展了大量研究,但针对润滑脂摩擦特性的内在机制及润滑机理的阐释仍不够充分。基于此,本研究采用多功能摩擦磨损试验机(MTM)对三种商用润滑脂的弹流摩擦系数进行测试,并结合红外光谱分析技术对滚道上的润滑脂成分进行了研究,以期为润滑脂的摩擦特性与润滑机理提供更多的参考依据。

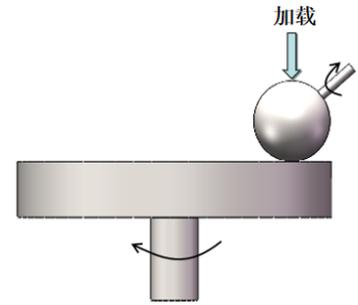
## 1 试验装置和试验方案

### 1.1 试验设备

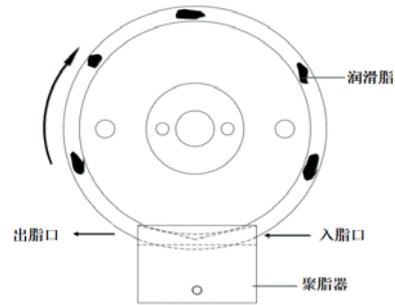
采用MTM2微牵引力试验机测量润滑脂的弹流摩擦性能,其测试部位采用球盘结构,如图1所示。该试验台由一个可控温的钢制外壳装置容纳球和盘,球和盘可以独立驱动,以实现各种滑滚比范围下的测试条件。图2(a)展示了工作测试部位的结构图。试验用球的材质为GCr15轴承钢,直径为19.08mm,并通过中间的通孔连接至伺服电机;试验盘同样采用GCr15轴承钢制造,直径为40mm。实验开始前,如图2(b)所示,采用聚脂器均匀涂抹润滑脂,从而保证测试结果的准确性和重复性。



图1 微牵引力试验机工作部位图



(a) 球盘接触示意图



(b) 润滑脂涂抹图

图2 微牵引力试验机接触副结构图

### 1.2 润滑脂的选择

本次采用的润滑脂样品为3种商业用脂。其中,1#润滑脂主要成分包括脂肪酸锂皂、深度精制的矿物油和石油添加剂;2#润滑脂主要成分包括锂皂基稠化剂、矿物油和抗磨抗氧化添加剂;而3#润滑脂成分包括二聚脲稠化剂、由矿物油和聚 $\alpha$ 烯烃混合而成的基础油。如表1所示。

表1 润滑脂成分表

编号	基础油	稠化剂	锥入度(0.1mm)	添加剂
1#	矿物油	锂基	280	二苯胺
2#	矿物油	锂基	220-250	MMSN、T307
3#	矿物油+聚 $\alpha$ 烯烃	聚脲	260	无

### 1.3 试验方案

试验设定的赫兹接触应力分别为0.5GPa、1.0GPa、1.2GPa,对应的载荷条件为5N、40N、60N;卷吸速度选取0.1m/s、1.5m/s、3.0m/s;环境温度控制在40℃与100℃两种工况。

滑滚比测试范围设定为0~30%,考虑到低滑滚比阶段摩擦系数变化较为显著,在0~10%区间内每隔1%设置一个数据采集点;而高滑滚比阶段摩擦系数变化趋于平缓,因此在10%~30%区间内每隔2%设置一个数据采集点,以确保测试数据的代表性与经济性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 卷吸速度的影响

图3、图4和图5分别呈现了三种润滑脂在载荷40N、环境温度40℃条件下,不同卷吸速度(0.1m/s、1.5m/s、3.0m/s)工况下摩擦系数随滑滚比的变化曲线。从图中可以清晰地观察到,三种

润滑脂的摩擦系数均随滑滚比的增大而呈现上升趋势,且在滑滚比较低阶段,摩擦系数的增长速率较快,随着滑滚比的进一步增大,增长速率逐渐放缓。对比不同卷吸速度下的测试结果发现,1#脂与3#脂的摩擦系数均随卷吸速度的提高而呈现下降趋势。这一现象的主要原因在于,卷吸速度的提升使得单位时间内从入口区被卷吸进入接触区的润滑脂量增加,更有利于在接触区形成油膜,从而有效降低摩擦系数。与之相反,2#脂的摩擦系数却随卷吸速度的增大而上升,这主要是由于2#脂所形成的润滑油膜抗剪切强度较低,在高卷吸速度下,油膜易发生剪切失效,导致接触表面的实际接触面积增大,进而使摩擦力上升,摩擦系数增大。此外,三种润滑脂的摩擦系数对卷吸速度变化的敏感程度存在明显差异。其中,2#脂的摩擦系数随卷吸速度变化的幅度最小;1#脂与3#脂在卷吸速度从1.5m/s增至3.0m/s区间内,摩擦系数变化幅度相近,但在0.1m/s至1.5m/s区间内,1#脂的摩擦系数变化幅度显著大于2#脂。综合来看,在卷吸速度波动工况下,1#脂的摩擦稳定性最差,2#脂次之,3#脂的摩擦稳定性最优。

2.2 载荷的影响

图6、图7和图8分别展示了三种润滑脂在卷吸速度1.5m/s、环境温度40℃条件下,不同载荷(5N、40N、60N)工况下摩擦系数随滑滚比的变化规律。从测试结果可以看出,在不同载荷条件下,三种润滑脂的摩擦系数均随滑滚比的增大而上升,当滑滚比达到特定值后,摩擦系数逐渐趋于稳定或呈现轻微下降趋势,这一变化规律具有普遍性。进一步分析载荷对摩擦系数的影响发现,三种润滑脂的摩擦系数均随载荷的增大而上升。这是因为载荷增加会使接触区域内润滑脂所承受的挤压应力增大,导致油膜厚度减小,从而使摩擦系数上升。在摩擦系数对载荷变化的敏感程度方面,三种润滑脂表现出明显差异。当载荷从40N增至60N时,三种润滑脂的摩擦系数变化幅度基本一致;而在载荷从5N增至40N的过程中,1#脂的摩擦系数变化幅度最小,2#脂次之,3#脂的变化幅度最大。由此可见,在从轻载到中高载的工况转换过程中,1#脂的摩擦稳定性最优,2#脂次之,3#脂最差;而在高载区间(40N至60N),3#脂的摩擦性能优于1#脂和2#脂,1#脂处于中等水平,2#脂表现最差。

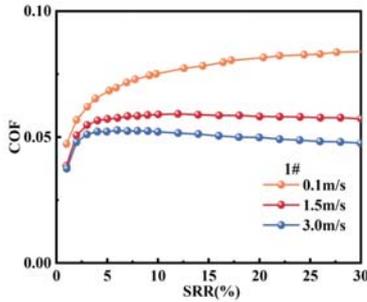


图3 40℃、40N时1#脂的摩擦特性曲线

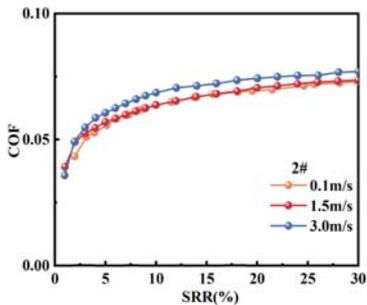


图4 40℃、40N时2#脂的摩擦特性曲线

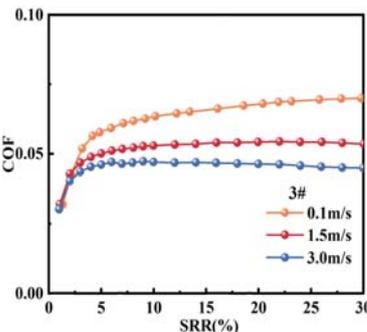


图5 40℃、40N时3#脂的摩擦特性曲线

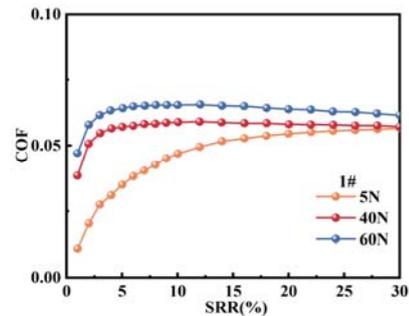


图6 40℃、1.5m/s时1#脂的摩擦特性曲线

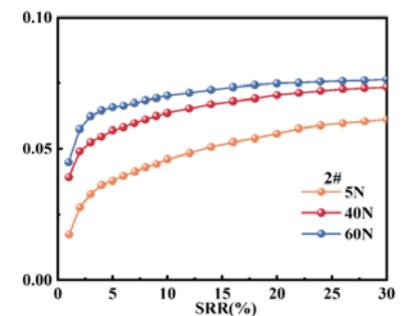


图7 40℃、1.5m/s时2#脂的摩擦特性曲线

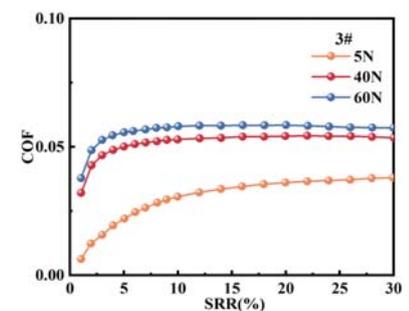


图8 40℃、1.5m/s时3#脂的摩擦特性曲线

2.3环境温度的影响

图9、图10和图11分别呈现了三种润滑脂在卷吸速度1.5m/s、载荷40N条件下,不同环境温度(40℃、100℃)工况下摩擦系数随滑滚比的变化曲线。测试结果表明,三种润滑脂的摩擦系数均随环境温度的升高而下降。这是由于温度升高会降低润滑脂的表观粘度,增强其分油性能,更有利于在接触表面形成均匀有效的润滑油膜,从而降低摩擦系数。通过对比40℃和100℃的工况,可以进一步观察到不同润滑脂对温度变化的响应特性。其中,1#脂的摩擦系数在低滑滚比时随温度升高的下降幅度较大,但随着滑滚比增加,其下降幅度逐渐减小。此外,在低温(40℃)条件下,1#脂的热效应显著,表现为摩擦系数随滑滚比增加呈下降趋势。相比之下,3#脂的摩擦系数下降幅度总体上比1#脂更大,而2#脂的摩擦系数下降幅度最大。这一结果表明,2#脂对环境温度变化的敏感性最强,3#脂次之,1#脂的敏感性最弱。综合来看,在温度交替工况下,1#脂的摩擦稳定性最优,3#脂次之,2#脂的稳定性最差。

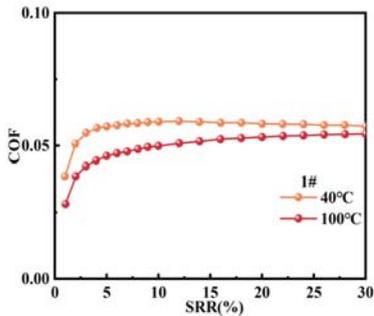


图9 40N、1.5m/s时1#脂的摩擦特性曲线

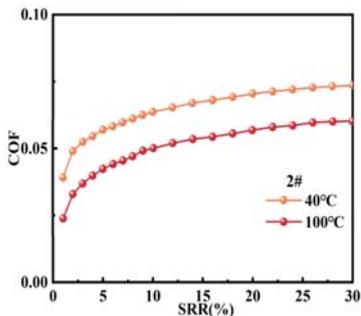


图10 40N、1.5m/s时2#脂的摩擦特性曲线

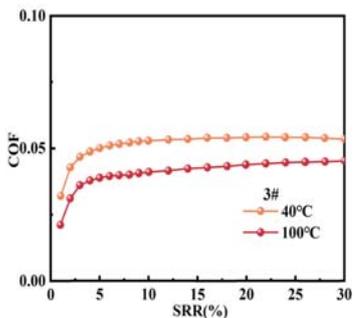
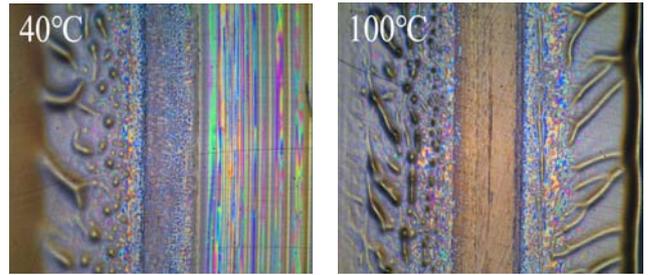
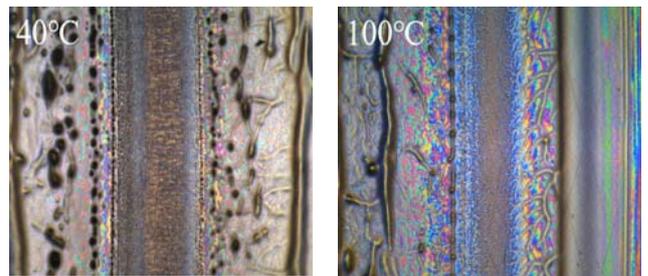


图11 40N、1.5m/s时3#脂的摩擦特性曲线

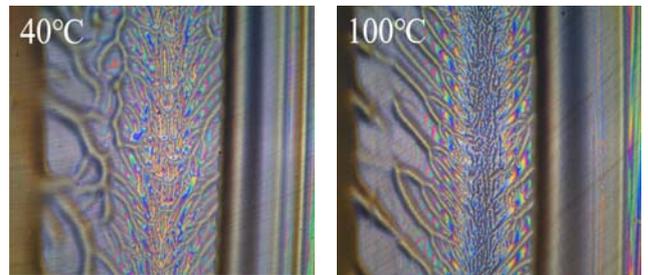
图12展示了三种润滑脂在环境温度40℃或100℃、载荷40N、卷吸速度1.5m/s工况下试验结束后滚道表面的显微镜放大照片。通过对比可以发现,100℃工况下滚道表面的油点分布明显少于40℃工况。这是因为温度升高会使润滑脂的表观粘度下降,分油能力增强,同时稠化剂在高温下会变软。在实验过程中,基础油更易随流动被剪切并挤压出滚道。此外,基础油黏度随温度升高进一步降低,其流动性能大幅增强,从而在高温工况下,更多的润滑脂被挤出滚道表面,导致试验结束后滚道上的基础油分布显著少于在40℃工况下的分布。



(a) 1#脂在40℃与100℃下的润滑脂滚道



(b) 2#脂在40℃与100℃下的润滑脂滚道



(c) 3#脂在40℃与100℃下的润滑脂滚道

图12 试验后滚道的显微照片

图13、图14和图15分别为三种润滑脂在不同温度工况下试验后滚道表面残留润滑脂的红外光谱图。从光谱图可以看出,三种润滑脂的红外光谱具有较高的相似度,这是因为它们的基础油均以矿物油为主要成分。其中,锂基稠化剂的特征波峰主要出现在1559cm<sup>-1</sup>和1579cm<sup>-1</sup>处,聚脲稠化剂的特征波峰则主要位于1579cm<sup>-1</sup>和1630cm<sup>-1</sup>处。

从图13中可以发现,在3000-2800cm<sup>-1</sup>区间的两个强吸收峰源于直链烷烃中亚甲基(=CH<sub>2</sub>)的伸缩振动;1456cm<sup>-1</sup>和1375cm<sup>-1</sup>处的吸收峰分别由CH<sub>3</sub>的不对称弯曲振动和对称弯曲振动产生;720cm<sup>-1</sup>处的吸收峰为CH<sub>2</sub>的面内摇摆弯曲振动所致;1580cm<sup>-1</sup>处的

弱吸收峰是脂肪酸锂皂基稠化剂的特征峰;  $1301\text{cm}^{-1}$ 和 $821\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰分别对应添加剂二苯胺上的C-N振动吸收和苯环对位双取代烷基的特征振动。红外光谱的峰值强度反映了对应成分的含量,由此可知1#脂中基础油的含量远高于稠化剂。对比 $40^\circ\text{C}$ 和 $100^\circ\text{C}$ 工况下的光谱图可以发现,  $100^\circ\text{C}$ 时各特征峰的强度均有所减弱,表明高温下滚道表面基础油和稠化剂的含量均有所下降,这与图12的显微镜观察结果一致。

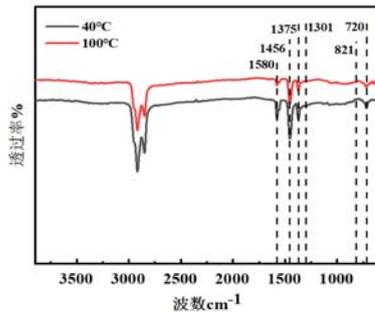


图13 1#脂在试验后的红外光谱图

从图14中可发现,在 $3000\text{--}2800\text{cm}^{-1}$ 波段处的两个较强的吸收峰为烷烃中的 $\text{CH}_2$ 伸缩振动产生的。波峰段 $1745\text{cm}^{-1}$ 是由防锈添加剂746中的C=O伸缩运动产生的,波峰段 $1579\text{cm}^{-1}$ 是锂基稠化剂的特征峰,波段 $1453\text{cm}^{-1}$ 和 $1375\text{cm}^{-1}$ 两处的吸收峰主要是由 $\text{CH}_2$ 的不对称弯曲振动和对称弯曲振动产生的,波峰段 $1128\text{cm}^{-1}$ 是由添加剂MMSN中的C=S振动产生的,波峰段 $1071\text{cm}^{-1}$ 是由添加剂T307中的P-N振动产生的,波峰段 $721\text{cm}^{-1}$ 是由 $\text{CH}_2$ 的面内摇摆弯曲振动产生的。

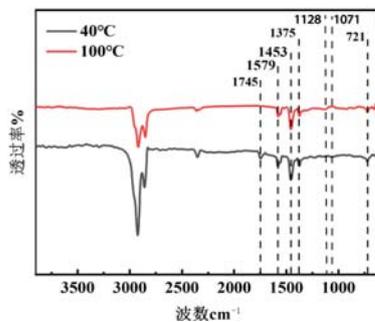


图14 2#脂在试验后的红外光谱图

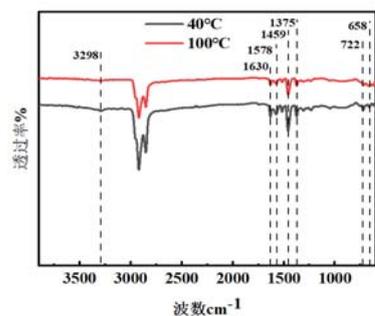


图15 3#脂在试验后的红外光谱图

从图15中可发现,由于3#润滑脂的基础油为矿物油与聚 $\alpha$ 烯烃的混合体系(二者均为碳氢化合物), $3000\text{--}2800\text{cm}^{-1}$ 区间的

强吸收峰主要由 $\text{CH}_2$ 的伸缩振动产生;  $1630\text{cm}^{-1}$ 处为二聚脲稠化剂的特征峰;  $1459\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰源于烷烃中 $\text{CH}_2$ 的变角振动;  $1375\text{cm}^{-1}$ 处为烷烃中 $\text{CH}_2$ 的对称弯曲振动所致;  $722\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰是烷烃中 $\text{CH}_2$ 的面内摇摆弯曲振动产生;  $658\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰由=C-H的面外弯曲振动产生;  $1300\text{cm}^{-1}$ 左右的微弱特征峰为烷烃中 $\text{CH}_2$ 的变角振动所致。

### 3 结论

采用MTM2微牵引力试验机在不同工况下对三种润滑脂的摩擦系数进行测试,得出的试验结果表明:

- (1) 三种脂的摩擦系数均随着滑滚比的增加而增加;
- (2) 当卷吸速度变化时,2#脂的摩擦稳定性能最好,3#脂次之,1#脂的摩擦稳定性最差;
- (3) 当载荷变化时,3#脂的摩擦性能最好,1#脂次之,2#脂的摩擦性能最差;
- (4) 当温度变化时,1#脂的摩擦稳定性能最好,3#脂次之,2#脂的摩擦稳定性能最差。
- (5) 高温情况下润滑脂的成分没有发生改变,但滚道上润滑脂的含量有所降低。

### 【基金项目】

泰山产业领军人才工程资助(tscx202312171)。

### 【参考文献】

- [1] LUGT P M. Grease lubrication in rolling bearings[M]. John Wiley & Sons, 2012.
- [2] WANG Y, ZHANG P, LIN, GAO X. Rheological and Tribological Properties of Lithium Grease and Polyurea Grease with Different Consistencies[J]. Coatings, 2022, 12(4): 527
- [3] SALOMONSSON L, STANG G, ZHMUD B. Oil/thickener interactions and rheology of lubricating greases[J]. Tribology Transactions, 2007, 50(3): 302–309.
- [4] LUGT P M. A review on grease lubrication in rolling bearings[J]. Tribology Transactions, 2009, 52(4): 470–480.
- [5] MUBASHSHIR M, SHAUKAT A. The role of grease composition and rheology in elastohydrodynamic lubrication[J]. Tribology Letters, 2019, 67(4): 104.
- [6] CANN P M. Grease lubrication of rolling element bearings—role of the grease thickener[J]. Lubrication Science, 2007, 19(3): 183–196.
- [7] WANG Y, WU B. Friction characteristics and mechanisms of two lithium greases in elastohydrodynamic lubrication[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2020, 20(4): 1266–1273.
- [8] 周维贵, 郭小川, 林璐, 等. 基础油对锂基润滑脂流变性的影响[J]. 润滑与密封, 2016, 41(09): 88–92+120.
- [9] COUSSEAU T, BJÖRLING M, GRAÇA B, et al. Film thickness in a ball-on-disc contact lubricated with greases, bleed oils and base oils[J]. Tribology International, 2012, 53: 53–60.

[10]YAMANAKA M, KUMAGAI K, INOUE K, et al. Evaluation of property difference between traction oil and traction grease [J].Journal of Advanced Mechanical Design,Systems,and Manufacturing,2009,3(4):366-377.

[11]CHEN J, TANAKA H, SUGIMURA J. Experimental study of starvation and flow behavior in grease-lubricated EHD contact[J].Tribology Online,2015,10(1):48-55.

**作者简介:**

王燕霜(1972--),女,汉族,天津市河西区人,博士,齐鲁工业大学(山东省科学院),教授,主要从事开展轴承设计与制造关键技术研究。