

分类号: TH117.2

学校代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2220110164



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 润滑脂服役全周期流变学演化规律

与成膜行为关联性研究

论 文 作 者 王锦

校 内 导 师 潘家保 教授

校 外 导 师 艾和金 高级工程师

专业学位类别 机械

研究方向(领域) 机械润滑

论文提交日期: 2025 年 5 月 11 日

分类号：TH117.2

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2220110164

安徽工程大学

润滑脂服役全周期流变学演化规律
与成膜行为关联性研究

Study on rheological evolution law and film-forming
behavior of grease in full service cycle

学生姓名：_____王 锦_____

指导教师：_____潘家保 教授_____

校外教师：_____艾和金 高级工程师_____

专 业：_____机械_____

研究方向：_____机械润滑_____

论文答辩日期：2025 年 5 月 11 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：

王锦

日期： 2025 年 5 月 11 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：

王锦

指导教师签名：

蒋家集

日期： 2025 年 5 月 11 日

日期： 2025 年 5 月 11 日

润滑脂服役全周期流变学演化规律与成膜行为关联性研究

摘 要

润滑脂作为一种广泛应用的半流体润滑剂，在工业机械中扮演着不可或缺的关键角色，其性能优劣直接关系到机械设备的运行稳定性、使用寿命以及工作效率。在现代工业生产中，机械设备的高效、稳定运行是保障生产连续性和产品质量的基础，而润滑脂作为重要的润滑介质，其作用贯穿于机械设备的整个生命周期。润滑脂作为一种胶体体系，在服役过程中承受剪切作用、温度效应和老化行为等直接影响其服役效果，对其可靠服役构成挑战。流变学行为、成膜行为是评价润滑脂性能与服役效果的关键指标，二者的内在联系机制是构建润滑脂服役评价方法的基础。

本文以工业中常用的复合锂基润滑脂为研究对象，对润滑脂的流变特性和成膜特性开展测试分析，结合旋转流变仪和润滑油膜测量仪探究润滑脂在不同服役温度下润滑特性变化情况。在此基础上，进一步深入剖析了润滑脂在其服役全周期内的流变学演化规律以及成膜行为的研究机理。为系统地研究温度对润滑脂润滑性能的影响，本文从润滑脂成膜的角度出发，探究不同热效应温度和时间下的膜厚变化情况，并结合流变学行为揭示其中的变化机理。主要研究内容如下：

（1）采用静态热老化方法模拟润滑脂服役过程中承受的高温热作用。以不同老化程度样品映射润滑脂不同服役阶段，用于后续流变学行为与成膜性能的研究。选取 80℃、120℃ 和 150℃ 三个温度条

件，分别进行 4 h、8 h 和 24 h 的静态热处理，为不同温度和时间组合下润滑脂性能的影响研究构建研究对象。

（2）系统开展润滑脂流变学行为研究，得出不同老化阶段样品的流变学变化规律。润滑脂的皂纤维结构体系在承受热作用后，其结构体系在承受剪切和剪切去除后的结构恢复性能会发生改变，对服役构成潜在影响。

（3）利用光弹流润滑油膜测量仪对不同实验条件下的润滑脂膜厚变化规律进行研究。选取最小油膜厚度为评价成膜性能的研究指标。最小油膜厚度直接反映润滑脂在摩擦副表面形成有效润滑膜的能力，直接影响其在实际应用中的减摩抗磨效果。结构体系承受高温热作用的影响，直接影响了润滑脂的成膜性能，二者之间存在内在的关联性。

（4）对不同老化阶段润滑脂的成膜规律展开研究，结合流变学行为分析润滑脂性能的变化机理。流变学行为是润滑脂性能的核心特征，其变化反映了润滑脂微观结构的演变。分析流变学参数（屈服应力、塑性粘度和流变指数）与最小膜厚变化规律的相关性，以揭示润滑脂服役全周期流变学演化规律与成膜行为关联性。

本文通过系统分析润滑脂在服役全周期内的成膜行为和流变学演化规律，揭示了其微观结构变化与成膜行为之间的内在关联。研究结果为润滑脂的性能优化和寿命预测提供了理论依据，对提升机械设备的润滑可靠性和运行效率具有重要意义。

关键词：润滑脂，服役全周期，流变特性，成膜性能，结构体系

STUDY ON RHEOLOGICAL EVOLUTION LAW AND FILM-FORMING BEHAVIOR OF GREASE IN FULL SERVICE CYCLE

ABSTRACT

As a widely used semi-fluid lubricant, grease plays an indispensable key role in industrial machinery. Its performance is directly related to the operation stability, service life and work efficiency of mechanical equipment. In modern industrial production, the efficient and stable operation of mechanical equipment is the basis for ensuring production continuity and product quality. As an important lubricating medium, grease plays an important role throughout the whole life cycle of mechanical equipment. As a colloidal system, grease is subjected to shear action, temperature effect and aging behavior during service, which directly affects its service effect and poses a challenge to its reliable service. Rheological behavior and film-forming behavior are the key indicators to evaluate the performance and service effect of grease. The internal relationship mechanism between the two is the basis for constructing the service evaluation method of grease.

In this paper, the rheological properties and film-forming properties of the composite lithium-based grease commonly used in the industry are tested and analyzed, and the lubricating properties of the grease at different service temperatures are investigated by combining the rotary rheometer and the lubricating oil film measuring instrument. On this basis, the rheological evolution law of grease in its full service cycle and the research mechanism of film forming behavior were further analyzed. In order to systematically study the effect of temperature on the lubrication performance of grease, this paper explores the change of film thickness under different thermal effect temperature and time from the perspective of grease film formation, and reveals the change mechanism in combination with rheological behavior. The main research contents are as follows.

(1) The static thermal aging method was used to simulate the high temperature thermal effect of grease during service. Samples with different aging degrees were mapped to different service stages of grease for subsequent research on rheological behavior and film-forming properties. Three temperature conditions of 80 °C, 120 °C and 150 °C were selected, and static heat treatment for 4 hours, 8 hours and 24 hours was carried out respectively to study the influence of different temperature and time combinations on the performance of grease.

(2) The rheological behavior of grease was systematically studied, and the rheological changes of samples at different aging stages were obtained. After the soap fiber structural system of the grease is subjected to heat, the structural recovery performance of the structural system after shear and shear removal will change, which will have a potential impact on service.

(3) The variation law of grease thickness under different experimental conditions was studied by using photoelastic flow lubricating oil film measuring instrument. The minimum oil film thickness was selected as the research index to evaluate the film-forming performance. The minimum oil film thickness directly reflects the ability of grease to form an effective lubricating film on the surface of the friction pair, which directly affects its anti-friction and anti-wear effect in practical application. The structural system is affected by high temperature heat, which directly affects the film forming performance of grease. There is an inherent correlation between the two.

(4) The film forming law of grease at different aging stages was studied, and the change mechanism of grease performance was analyzed in combination with rheological behavior. Rheological behavior is the core characteristic of grease performance, and its change reflects the evolution of grease microstructure. The correlation between the rheological parameters (yield stress, plastic viscosity and rheological index) and the minimum film thickness was analyzed to reveal the correlation between

the rheological evolution law of the whole service cycle and the film forming behavior of the grease.

In this paper, the intrinsic relationship between microstructure changes and film-forming behavior was revealed by systematically analyzing the film-forming behavior and rheological evolution of grease during the whole service cycle. The research results provide a theoretical basis for the performance optimization and life prediction of grease, which is of great significance to improve the lubrication reliability and operation efficiency of mechanical equipment.

Wang Jin(School of Mechanical and Automotive Engineering)

Supervised by Professor Pan Jiabao

KEY WORDS: Grease, Full service life, Rheological properties, Film-forming properties, Structural system

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 研究内容	10
1.4 章节安排	10
第 2 章 润滑脂服役工况分析与实验设计	12
2.1 润滑脂服役工况分析	12
2.2 热效应温度对润滑脂服役性能影响的实验设计	13
2.3 剪切作用对润滑脂服役性能影响的实验设计	15
2.4 润滑性能评价方法与实验设计	17
2.5 本章小结	18
第 3 章 热作用对润滑脂流变学行为的影响	19
3.1 热作用对润滑脂流动性能的影响	19
3.2 热作用对润滑脂触变性的影响	21
3.3 热作用对润滑脂粘弹特性的影响	23
3.4 热作用对润滑脂流变学行为的影响规律	26
3.5 本章小结	27
第 4 章 热作用对润滑脂成膜性能的影响	29
4.1 载荷对润滑脂膜厚的影响	29
4.2 热效应温度对润滑脂膜厚的影响	31
4.3 热作用时间对润滑脂膜厚的影响	40
4.4 热作用对润滑脂成膜的影响规律	42
4.5 本章小结	43
第 5 章 润滑脂流变和成膜行为关联性研究	45
5.1 流变与成膜关联性分析方法	45
5.2 流变参数与膜厚关联性分析	47

5.3 结构体系与膜厚关联性分析.....	52
5.4 流变行为演化对成膜影响的机理.....	55
5.5 本章小结.....	56
第 6 章 结论与展望.....	58
6.1 结论.....	58
6.2 展望.....	59
参考文献.....	61
攻读硕士学位期间学术成果及参研项目.....	69
致谢.....	70

插图清单

图 1-1 润滑脂全周期服役过程	1
图 1-2 轴承润滑失效	2
图 1-3 润滑油膜干涉图	4
图 1-4 润滑油膜厚度测量方法原理图	5
图 1-5 不同状态时的稠化剂	7
图 1-6 不同测试手段下润滑脂的微观形貌	8
图 1-7 皂纤维结构随剪切速率变化情况	9
图 1-8 主要技术路线	11
图 2-1 传动系统零部件润滑示意图	12
图 2-2 静态热处理实验流程	14
图 2-3 恒温干燥箱及部分样品	15
图 2-4 润滑脂 FESEM 样品制备流程图	15
图 2-5 旋转流变仪及测试模块	16
图 2-6 Peltier 半导体控温系统	16
图 2-7 光弹流润滑油膜测量仪	17
图 3-1 新鲜润滑脂在各实验温度下流动曲线	19
图 3-2 热效应 80℃下各实验温度润滑脂流动曲线	20
图 3-3 热效应 120℃下各实验温度润滑脂流动曲线	21
图 3-4 热效应 150℃下各实验温度润滑脂流动曲线	21
图 3-5 不同热处理时间和温度下润滑脂的触变性曲线	22

图 3-6 不同热老化时间和温度下润滑脂的触变环面积	23
图 3-7 实验温度 20℃下各热老化时间和温度下润滑脂应变扫描曲线图	24
图 3-8 实验温度 40℃下各热老化时间和温度下润滑脂应变扫描曲线图	24
图 3-9 实验温度 60℃下各热老化时间和温度下润滑脂应变扫描曲线图	24
图 3-10 实验温度 80℃下各热老化时间和温度下润滑脂应变扫描曲线图	24
图 3-11 实验温度 100℃下各热老化时间和温度下润滑脂应变扫描曲线图	25
图 3-12 润滑脂电镜扫描图	26
图 3-13 润滑脂流变特性机理图	27
图 4-1 不同速度和载荷下的干涉图像	30
图 4-2 不同载荷的实际轮廓曲线图	31
图 4-3 $U_e=50$ mm/s 实验样品的油膜光干涉图随载荷的变化情况	32
图 4-4 $U_e=300$ mm/s 实验样品的油膜光干涉图随载荷的变化情况	33
图 4-5 $U_e=500$ mm/s 实验样品的油膜光干涉图随载荷的变化情况	33
图 4-6 实验样品的油膜光干涉图对应膜厚曲线	34
图 4-7 $U_e=50$ mm/s 实验样品的油膜光干涉图随载荷的变化情况	35
图 4-8 $U_e=300$ mm/s 实验样品的油膜光干涉图随载荷的变化情况	36
图 4-9 $U_e=500$ mm/s 实验样品的油膜光干涉图随载荷的变化情况	36
图 4-10 热效应 120℃实验样品的油膜光干涉图对应膜厚曲线	37
图 4-11 $U_e=50$ mm/s 实验样品的油膜光干涉图随载荷的变化情况	38
图 4-12 $U_e=300$ mm/s 实验样品的油膜光干涉图随载荷的变化情况	38
图 4-13 $U_e=500$ mm/s 实验样品的油膜光干涉图随载荷的变化情况	39
图 4-14 热效应 150℃ 实验样品的油膜光干涉图对应膜厚曲线	39

图 4-15 热效应 4 h 各温度条件下膜厚随载荷变化曲线	41
图 4-16 热效应 8 h 各温度条件下膜厚随载荷变化曲线	41
图 4-17 热效应 24 h 各温度条件下膜厚随载荷变化曲线	42
图 5-1 平台模量推算方法	46
图 5-2 不同高温热效应时间和温度下的平台模量变化曲线	46
图 5-3 不同热效应时间及温度下剪切屈服应力与油膜厚度曲线	50
图 5-4 不同热效应时间及温度下稠度系数与油膜厚度曲线	51
图 5-5 不同热效应时间及温度下剪切稀化指数与油膜厚度曲线	51
图 5-6 实验温度 20℃下各热老化时间和温度下润滑脂频率扫描曲线图	53
图 5-7 实验温度 40℃下各热老化时间和温度下润滑脂频率扫描曲线图	53
图 5-8 实验温度 60℃下各热老化时间和温度下润滑脂频率扫描曲线图	53
图 5-9 实验温度 80℃下各热老化时间和温度下润滑脂频率扫描曲线图	53
图 5-10 实验温度 100℃下各热老化时间和温度下润滑脂频率扫描曲线图	54
图 5-11 不同热效应时间及温度下平台模量与油膜厚度曲线	55
图 5-12 高温热效应对润滑脂成膜性能的影响机理	56

插表清单

表 2-1 热处理后的润滑脂样品编号 14

表 2-2 锂基润滑脂的性能参数 17

表 2-3 实验条件 18

表 4-1 各试验样品在不同卷吸速度、不同载荷下的油膜厚度 31

表 5-1 热处理 80℃ 不同温度和时间下 H-B 模型参数 48

表 5-2 热处理 120℃ 不同温度和时间下的 H-B 模型参数 48

表 5-3 热处理 150℃ 不同温度和时间下的 H-B 模型参数 49

第1章 绪论

1.1 研究背景与意义

全球能源消耗中超过三分之一与摩擦直接相关，同时约 80 % 的机械零件失效归因于摩擦磨损。研究表明，大多数机械零件的损坏主要是由于摩擦副之间的过度磨损所导致。因此，降低摩擦与磨损尤为重要^[1]。一方面，可以通过改善接触副之间的材料^[2]以及接触形式^[3]；另一方面也可以通过添加润滑剂达到降低摩擦磨损的目的^[4-5]。润滑脂因其优异的密封性能、便捷的使用方式以及加注次数少等优势，在工业领域得到了广泛应用。它被广泛应用于机床、航空、汽车等行业，尤其在轴承润滑中占据重要地位。轴承润滑的核心目标是通过隔离接触表面来减少摩擦，从而延长轴承的使用寿命。与润滑油相比，润滑脂能够形成更厚的润滑膜，具有更高的承载能力，因此在复杂工况下更适用于轴承润滑。图 1-1 为润滑脂的全周期服役过程。在服役过程中，润滑脂会经历从正常运行到因温度过高导致润滑性能失效的不同阶段变化。



图 1-1 润滑脂全周期服役过程

润滑脂因其独特的流变特性，在各类机械润滑中得到了广泛应用。然而，在重载、高速、高温等恶劣工况下，润滑脂的性能会受到严重影响。在运行过程中，轴承等关键部件因短时间内温度急剧升高，加之外部杂质的侵入，导致润滑脂发生热老化现象，其润滑性能大幅衰减甚至完全丧失。这种现象不仅加速了轴承的磨损与失效，还对设备的整体运行安全性和可靠性造成了严重威胁。图 1-2 显示了因润滑脂失效而导致的轴承失效图片。



图 1-2 轴承润滑失效

在高温工况下，润滑脂的性能衰退机制尤为复杂。聚脲基润滑脂^[6]在高温热老化过程中，稠化剂分子间的缔合程度会先增加，之后稠化剂网络结构的交联程度下降，对基础油的束缚能力减弱，润滑脂结构稳定性减弱。随着老化程度的加剧，稠化剂发生氧化，基础油大量流失，导致润滑脂硬化加剧。此外，温度越高，润滑脂的老化速度越快，氧化安定性和结构稳定性越差。因此，在高温工况下确保润滑剂能够长效服役，从而延长摩擦副部件的使用寿命，已成为摩擦学研究中亟待解决的问题。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 润滑脂静态热老化方面的研究现状

润滑脂在服役过程中不可避免地会出现温升现象，温度对润滑脂的性能影响较大，润滑脂的高温服役性能是其重要性能指标^[7-8]。国内外学者开展了以下相关研究。Chatra 等^[9]研究发现脂润滑轴承搅拌过程中的老化现象是由宏观流动引起的高剪切和温度造成的，搅拌过程中施加的高能量密度或传热熵密度会导致润滑脂寿命缩短。胡金涛等^[10]研究表明，在高温环境下，热效应对润滑脂的微观结构造成了更严重的破坏，润滑脂的性能也发生更加显著的变化。潘家保等^[11]研究发现，润滑脂内部纤维结构会被热老化行为破坏，高温热作用后润滑脂结构特性会对其成膜性能产生直接影响，并且持续热效应行为会导致润滑脂性能下降，从而缩短其使用寿命。Yang 等^[12]通过滚动轴承实验获取机械老化后的润滑脂样品，

研究了老化时间、径向载荷和转速对润滑脂性能的影响。实验结果表明,随着老化时间的增加,润滑脂的有效粘度降低,油膜形成能力减弱,接触面积和载荷比增加。Zhao 等^[13]研究了轴承滚动元件接触区外润滑脂的热老化与轴承润滑失效之间的关系,揭示了润滑脂热老化导致的性能劣化是轴承润滑失效的重要因素。Zhang 等^[14]研究了 Ti_3C_2 MXenes 添加剂对不同温度下锂基润滑脂摩擦学性能的影响。结果表明,当温度为 40°C 且 MXenes 含量为 2 wt% 时,表现出最佳的减摩抗磨性能。MXenes 能够与摩擦表面发生反应,吸附到磨痕中,并形成润滑层,提高润滑脂的摩擦学性能。沈铁军等^[15]通过静态热老化模拟锂-钙基润滑脂的热老化过程,研究发现,热老化会使润滑脂基础油分子碳链断裂、稠化剂浓度下降、氧化产物增加、晶体和皂纤维结构破坏、结构稳定性变差,剪切后恢复速率降低。老化时间超过 288 小时后,润滑脂易流失,导致润滑失效。王川等^[16]通过模拟 150°C 和 200°C 连续及间断运转模式下的润滑脂热老化过程,分析其理化性能和流变性能变化规律,发现润滑脂的锥入度、滴点、分油量等指标随热老化时间延长而变化,为润滑脂的使用和维护提供了理论依据。胡明华等^[17]研究发现,随着热老化时间延长,锂-钙基润滑脂的离心分油率和滴点逐渐减小,酸值逐渐增加。通过扫描电镜分析发现,皂纤维间作用力减弱,纤维变得松散导致分油率降低、滴点下降。李秀荣等^[18]采用静态热老化方法模拟锂基润滑脂在 150°C 极限使用温度下的热老化行为,利用流变学手段探究老化时间对其皂纤维缠结程度、剪切性能及结构恢复性能的影响。结果表明,热老化过程中,皂纤维缠结程度呈现先降低后升高的趋势,其表观粘度也表现出类似的变化规律。与此同时,润滑脂逐渐硬化,且其恢复性能显著下降,导致整体润滑性能劣化。Deldago 等^[19]研究通过不同的流变技术研究了锂基润滑脂在 $0\text{-}175^\circ\text{C}$ 温度范围内的热流变行为。结果表明,在超过 110°C 润滑脂的粘弹性能会急剧下降,而低于此温度则变化不大, 110°C 被认为是最高推荐工作温度。

1.2.2 润滑脂成膜行为的研究现状

润滑脂油膜厚度直接反映了轴承的承载能力^[20],其变化能够体现接触区的润滑状态。图 1-3 描述了润滑油膜干涉图在不同测量技术下的形态。油膜的形成受多种因素影响,包括基础油、稠化剂和添加剂等组成成分,以及环境因素,如温度、载荷和转速等。通常情况下,润滑脂形成的油膜比相应基础油厚,这种差

异主要是由于稠化剂类型和浓度、基础油粘度、添加剂类型或接触区入口供应等因素导致的^[21-23]。也有研究认为与接触区入口的流变特性有关^[24]。

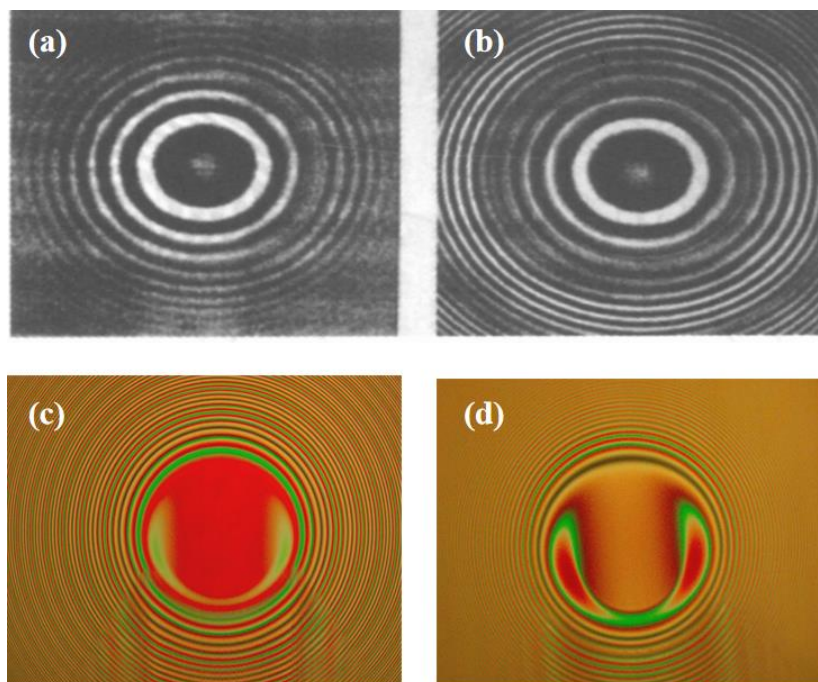


图 1-3 润滑油膜干涉图

(a)静态白光干涉图；(b)静态三光干涉图；

(c)低卷吸速度红绿双光干涉图；(d)高卷吸速度红绿双光干涉图

润滑脂油膜厚度的测试方法有很多种，如光干涉法^[25]、电容法^[26]、电阻法^[27]、超声波法^[28]和电涡流法^[29]等。光干涉法和电容法因其成熟度高且操作简便被广泛应用。光干涉法基于光的干涉原理，当光波在油膜表面和底面反射时，反射光会发生干涉现象，形成干涉条纹。通过分析干涉条纹的分布和变化，结合光的波长和折射率等参数，可以计算出油膜的厚度。这种方法具有非接触、高精度以及适用于动态测量等优点。电容法是通过测量两电极之间的电容值来确定油膜厚度。油膜的介电常数与电容值相关，当油膜厚度变化时，电容值也会相应改变。通过已知的介电常数和电容值变化，可以计算出油膜的厚度。电阻法利用油膜的导电性来测量厚度。当油膜厚度发生变化时，其电阻值也会相应改变。通过测量油膜的电阻值，并结合油的电导率，可以间接计算出油膜的厚度。超声波在油膜与固体界面之间反射时，会产生回波信号。通过测量回波信号的时间差或频率变化，可以计算出油膜的厚度。这种方法适用于在线检测。电涡流法利用电磁感应原理测量膜厚。当高频电磁场作用于导电材料时，会在材料中感应出涡流。油膜的存在

在会影响涡流的分布和强度，通过测量涡流的变化，可以推算出油膜的厚度。图 1-4 显示了这五种膜厚测量方法。

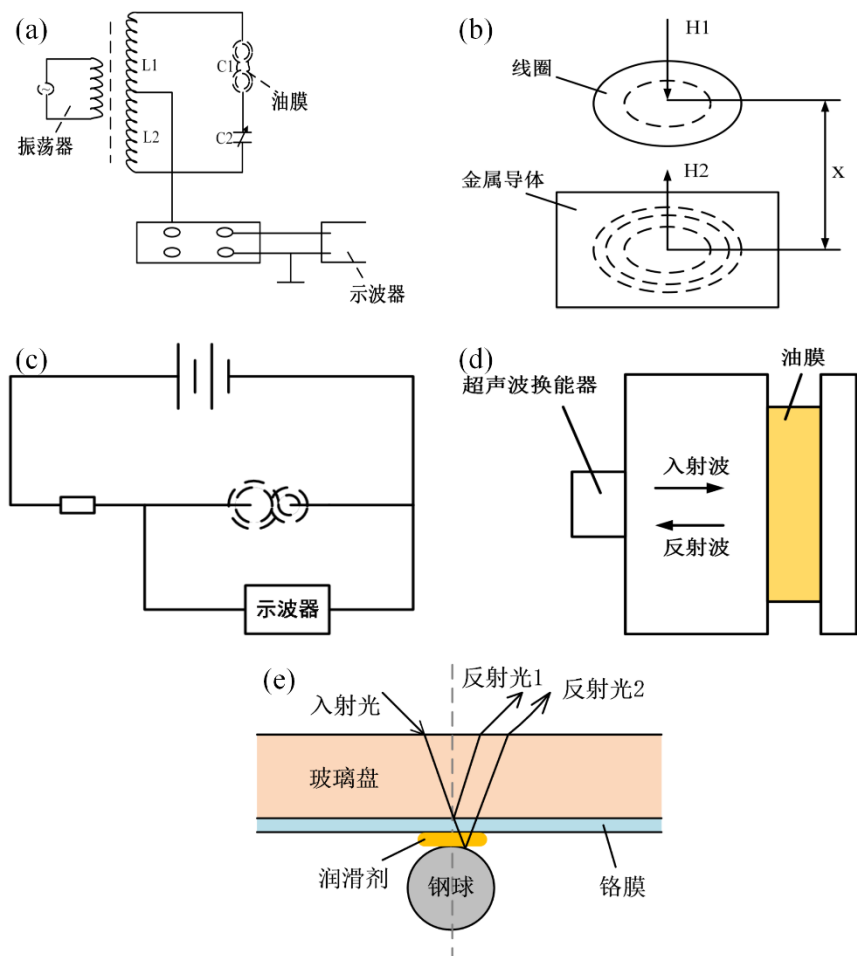


图 1-4 润滑油膜厚度测量方法原理图

(a)电容法原理图；(b)电涡流法原理图；(c)电阻法原理图
(d)超声波法原理图；(e)光干涉法原理图

实际上，润滑脂在服役过程中润滑效果与其在摩擦副表面形成的润滑油膜有直接关联，探究润滑成膜性能对研究其润滑性能和揭示润滑机理有重要意义^[30-31]。润滑脂作为一种常用工业润滑剂，是基础油与稠化剂通过皂化反应形成的胶体分散体系，添加不同类型添加剂可提升润滑脂的服役效果。针对基础油、稠化剂和添加剂对润滑脂润滑性能及机理的影响，研究人员已经做了长期研究^[32-35]。

基础油作为润滑脂中分散最多的介质被部分学者认为能够从润滑脂中缓慢释放，用于接触区的润滑。Mubashshir 等^[36]研究发现润滑脂中基础油对润滑性能的影响十分显著。基础油特性直接决定润滑脂成膜行为与流动阻力。Fischer 等^[37]研究了两种润滑脂，发现其渗油性质受润滑脂成分及油的提取方法影响。还指出

润滑脂的化学特性会影响 EHD 接触中的脂膜形成。牛明等^[38]研究了不同粘度基础油对润滑脂性能的影响,发现基础油粘度的增大对润滑脂的屈服极限、触变性能、粘度和抗剪切能力都有显著的正面影响。黎小辉等^[39]研究了基础油对聚脲润滑脂性能的影响,发现基础油的种类和粘度对润滑脂的流变性能、热稳定性和机械安定性有显著影响。研究表明,选择合适的高粘度基础油可以提高润滑脂的综合性能,适用于高温、高负荷等苛刻工况。张恩惠等^[40]以不同粘度的矿物基础油为原料制备锂基润滑脂,结果表明基于高粘度基础油的润滑脂兼具较好的高温稳定性和抗磨减摩性能。于泓渊等^[41]发现以聚 α 烯烃合成油为基础油制备的复合锂基润滑脂表现出优越的触变性能和粘温性能;添加中间基矿物油的润滑脂内部纤维结构较规整,具有较强的稳定性;添加石蜡基矿物油的润滑脂内部纤维结构细长,同时具有较高规整度,抗剪切性能和胶体稳定性能。基础油的粘度是影响润滑脂性能的关键因素,它不仅决定了润滑脂的油膜厚度、承载能力和流动性,还对其在不同工况下的润滑效果、抗磨性能以及使用寿命产生深远影响^[42-43]。

润滑脂的稠度受稠化剂类型和剂量的显著影响。稠化剂与基础油相互作用,其纤维或颗粒在基础油中分散,吸附基础油并构建结构骨架,实现稠化。图 1-5 为不同状态时的稠化剂。Cen 等^[44]研究了增稠剂对润滑脂润滑表面油膜厚度的影响,结果表明,卷吸速度低于过渡速度(随着速度增加,膜厚降低到最小值时的速度)时,油膜厚度随着速度的降低而增加;高于过渡速度时,膜厚随着速度的增加而增加。在较高速度下,膜厚主要由基础油决定且根据基础油的粘度计算出油膜厚度。刘成龙等^[45]研究发现粗纤维润滑脂所形成润滑油膜的厚度高于细纤维润滑脂,主要是因为润滑脂含有粗纤维结构时,其稠化剂连续性较好,在滚道上可以形成较厚沉积层。Li 等^[46]研究发现速度较低时,具有粗细两种纤维的润滑脂形成的油膜更厚;中速时会出现乏油现象导致膜厚降低;高速条件下,细纤维的润滑脂被充分降解后的粘度更大,因此产生较厚油膜。上述研究证实了润滑脂的组成成分会对其性能产生一定影响。Dixena 等^[47]研究了再生和原生 HDPE 对 PP 和 mPP 增稠润滑脂的渗油抑制及流变性能影响。研究发现,随着温度升高,PP 增稠润滑脂的渗油倾向增加,限制了其高温应用。通过在增稠体系中加入原生和再生 HDPE,可降低渗油量。此外,润滑脂的稠化剂类型不同,其渗油趋势也不同,稠化剂纤维在接触区不仅参与润滑脂的流动,还影响成膜特性。

Hoshi 等^[48]通过红外光谱仪对脲基润滑脂进行原位观察,发现 EHL 接触区的润滑脂油膜厚度与稠化剂类型密切相关,并进一步讨论了稠化剂浓度对润滑脂成膜特性的影响。Åström 等^[49]和 Kaneta 等^[50]观察到在运动过程中,稠化剂团块会不断地进入接触区,所得到的充分供脂条件下的油膜厚度要比充分供油时的油膜厚度高出很多。Cann 和 Lubrecht^[51]、韩一鸣等^[52]、Kanazawa 等^[53]通过实验研究发现脂润滑在低速阶段的膜厚要高于基础油膜厚,而速度升高后脂润滑膜厚逐渐接近基础油膜厚。

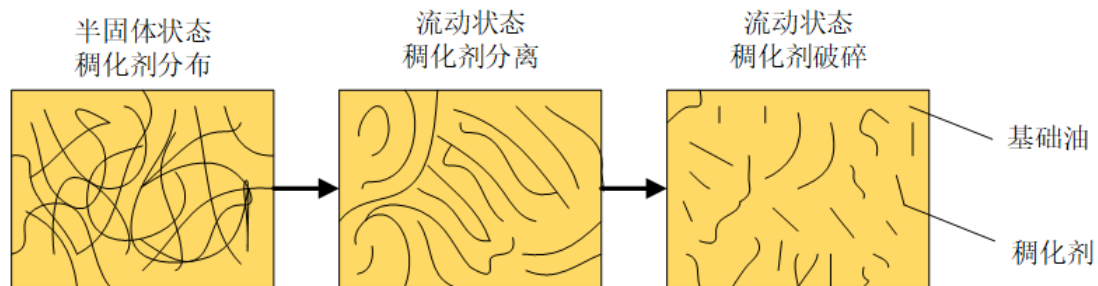


图 1-5 不同状态时的稠化剂

润滑脂的添加剂通过改善胶体结构和抗氧化性、抗磨损性、调节粘度等,提升润滑脂的综合性能。余瑞等^[54]发现添加极压抗磨剂能提高基础脂的减摩抗磨性能。关强等^[55]发现通过向锂基润滑脂里添加含有 WS_2 和 $h-BN$ 的纳米添加剂可以显著提高润滑性能,且二者都可以使润滑脂的极压性能得到有效提升。Khemchandani 等^[56]开发了以离子溶液为添加剂的可生物降解润滑剂,并进行了摩擦性能及油膜厚度对比。研究发现,这些离子溶液润滑剂能显著提升摩擦性能,形成较厚的油膜和更强的承载能力。Bartolomé 等^[57]对比了不同浓度的离子液体添加剂润滑脂与基础润滑脂在不同温度下的油膜厚度。研究发现,在低温条件下,含有较高浓度 IL2 添加剂的 G1 润滑脂能够形成较厚的油膜。Wu 等^[58]研究了 MoS_2 对润滑脂油膜厚度的影响,发现油膜厚度的增加源于接触区形成的摩擦膜。现代润滑剂中使用的添加剂通常为纳米级别,研究还对这些添加剂形成的摩擦膜厚度进行了分析。Singh 等^[59-60]对 3 种纳米添加剂在润滑脂中的应用进行了研究,探讨了它们对润滑脂微观结构及油膜厚度的作用。结果表明,纳米添加剂能够改变润滑脂的稠化剂结构,其中石墨烯润滑脂在特定滚动速度区间内形成更厚的油膜。添加剂在润滑脂中起着至关重要的作用,它们能显著提升润滑脂的抗磨损、抗氧化、防腐蚀等性能,使润滑脂在苛刻工况下仍能保持优异的润滑效果^[61-65]。

通过以上研究可以发现,以往主要从合成新型润滑脂^[66-67]和改变润滑介质^[68]两方面对润滑脂成膜特性进行研究,但尚未系统研究高温热效应下润滑脂成膜行为与流变特性之间的关联性。然而,在实际服役过程中,润滑脂会因温度升高而发生微观结构变化,当温度达到临界值时,其内部纤维结构会遭到破坏,导致润滑性能失效。因此,高温热效应是影响润滑脂服役寿命的关键因素,深入研究其对润滑脂性能的影响机制具有重要意义。

1.2.3 润滑脂流变学行为的研究现状

润滑脂在承受剪切外力作用时所表现出来的流动和形变特性,称为润滑脂的流变特性。由于润滑脂是一种非牛顿流体^[69],因此其流变特性较为复杂。并且这种流变特性与其内部的纤维结构有很大关联,如图 1-6 所示为润滑脂在不同测试手段下的皂纤维结构图片。润滑脂内部的皂纤维结构是一种特殊的缠结结构、遭到剪切后可恢复原有状态^[70-72]。其润滑特性与服役寿命有直接关联^[73]。因此,考虑润滑脂全周期服役寿命需充分考虑润滑脂流变特性的影响^[74-77]。

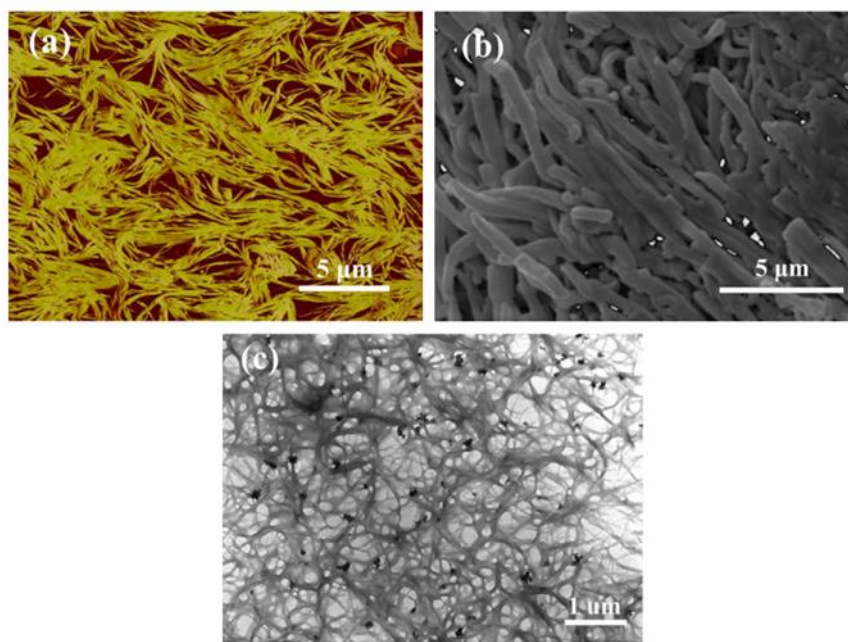


图 1-6 不同测试手段下润滑脂的微观形貌^[70-72]

图 1-7 给出了皂纤维结构随剪切速率的变化情况^[78-79]。观察发现润滑脂的流变特性受外力影响显著。静止时,其内部结构稳定,保持固体特性。外力增大时,皂纤维结构破坏,发生粘性变形并开始流动。随着剪切速率和应力的增加,皂纤维趋于定向,表观粘度降低,最终趋于常数。剪切应力撤去后,皂纤维结构可恢

复，但在长时间或高压剪切下，结构可能出现不可逆变化，影响润滑脂的状态。

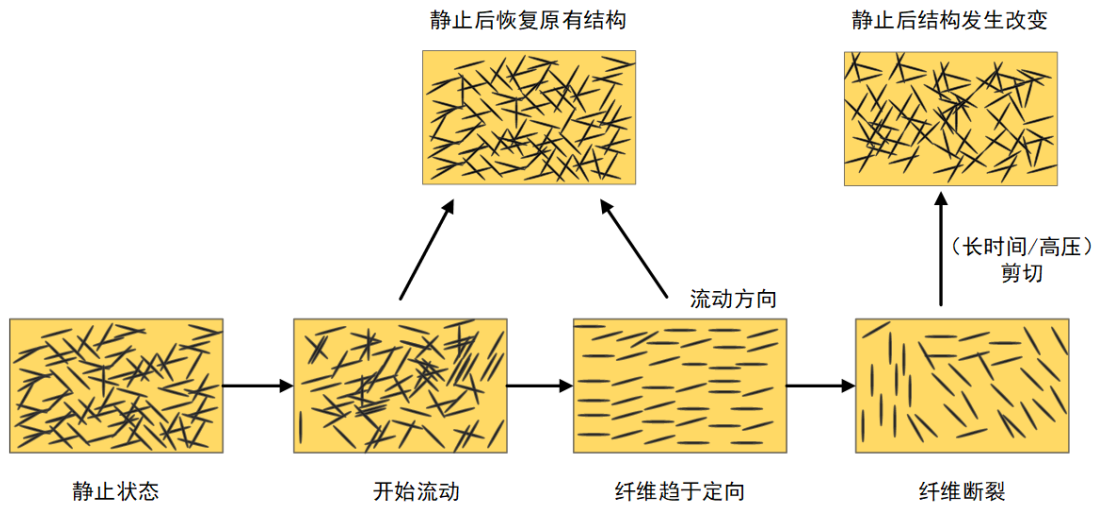


图 1-7 皂纤维结构随剪切速率变化情况

毛菁菁^[80]、Couronne^[81]和 Sánchez 等^[82]研究了锂基润滑脂的流变学特性。Paszkowski 等^[83]研究了润滑脂增稠剂和表面材料对边界层流变性能的影响。通过旋转流变仪在平板-平板系统中进行实验，发现吸附材料的种类与附近锂基和钙基润滑脂的结构粘度存在依赖关系。Fan 等^[84]研究结果表明，增稠剂的网络结构对润滑脂的流变性能和润滑行为有显著影响，为高性能润滑脂的开发提供了理论依据。Cousseau 等^[85]研究结果表明，选择具有最佳流变性能的润滑脂对于减少摩擦力矩和提高轴承效率至关重要。Marek 等^[86]研究三种不同润滑脂的流变特性，结果表明，滴点温度最高的润滑脂具有较好的机械稳定性。姚立丹等^[87-88]对锂基润滑脂表观粘度的影响进行了研究。锂基润滑脂具有优良的综合性能，在润滑领域应用广泛。润滑脂在实际工作过程中不可避免地会出现温升现象。此现象会直接影响润滑脂的物理和化学性质，尤其是粘度。根据粘温效应^[89-92]，润滑脂的粘度与温度呈负相关关系，即随着温度的升高，润滑脂的粘度会相应降低。

温度的变化会影响润滑脂的粘度，导致润滑脂的流动性能发生改变，从而影响润滑脂膜厚度。温度升高会导致粘度降低，从而导致润滑脂在润滑接触区域形成的油膜变薄，降低其抗磨损和承载能力，影响设备的运转稳定性。因此，温度被认为是影响润滑脂性能的重要因素。

润滑脂服役过程中通常会经历三个阶段：常温下的稳定服役阶段、温度逐渐上升的屈服阶段和高温下的失效阶段。常温下，润滑脂表现出较为稳定的润滑特

性，能够有效地减少摩擦和磨损。随着温度逐渐升高，润滑脂的粘度开始下降，导致其在接触表面形成的润滑膜变薄，润滑性能逐渐减弱。最终，当温度达到一定水平时，润滑脂因粘度过低或皂纤维结构破坏而失去润滑功能，进入失效阶段。然而，润滑脂服役全周期流变学规律缺乏系统研究，结构体系引起的流变学性能变化进而导致成膜性能的变化机理尚不明确。

1.3 研究内容

(1) 热作用对润滑脂流变学行为的影响。阐述润滑脂流变特性及评价方法，探讨温度和作用时间这两个关键热效应因素对润滑脂流变特性所产生的具体影响。结合润滑脂的粘弹特性和触变性，挖掘并揭示润滑脂流变特性背后的内在机理，为润滑脂的性能优化与应用拓展提供数据参考。

(2) 热作用对润滑脂成膜性能的影响。阐述润滑脂成膜特性及评价方法，系统探讨热效应温度和时间对润滑脂成膜特性产生的具体影响。探究载荷对润滑脂成膜特性的具体影响。为润滑脂在实际工况中的应用提供了实验借鉴。

(3) 基于润滑脂流变特性与成膜特性的实验研究，分析二者之间的关联性。比较分析流变与成膜实验的结果，讨论润滑脂流变行为对其成膜能力的影响机制。

1.4 章节安排

目前的研究主要聚焦在润滑脂的流变特性和成膜特性两个方面，但这两个领域通常被独立探讨，缺乏系统性关联分析。润滑脂的润滑特性受多种因素共同影响，包括其微观结构、基础油与稠化剂的相互作用、以及外部工况条件（温度、载荷和剪切速率）等。因此，单一因素的研究难以全面揭示润滑脂在实际工况下的性能演变规律。为了更准确地评估润滑脂的综合性能，有必要将流变特性与成膜特性结合起来，并充分考虑温度对其性能的动态影响。这种多因素耦合的研究方法不仅能够深入理解润滑脂的微观力学行为与宏观润滑性能之间的关系，还能为润滑脂的配方优化提供更为科学的理论依据。

基于此，本文采用理论分析与实验研究相结合的系统方法，以复合锂基润滑脂为研究对象，全面开展其性能表征与机理分析。首先，通过静态热处理模拟润滑脂在不同服役阶段（初期、中期和末期）的热老化状态，以模拟实际工况下的

性能演变过程；其次，利用旋转流变仪和光干涉膜厚测量技术，分别对润滑脂的流变特性和成膜行为进行定量表征；最后，结合实验数据与理论分析，探究润滑脂在热效应、剪切作用及时间因素下的微观结构演变规律，揭示其性能退化的内在机理，并得出结论。这一研究框架不仅为润滑脂的性能优化提供了科学依据，也为复杂工况下的润滑设计探索了初步的理论基础。

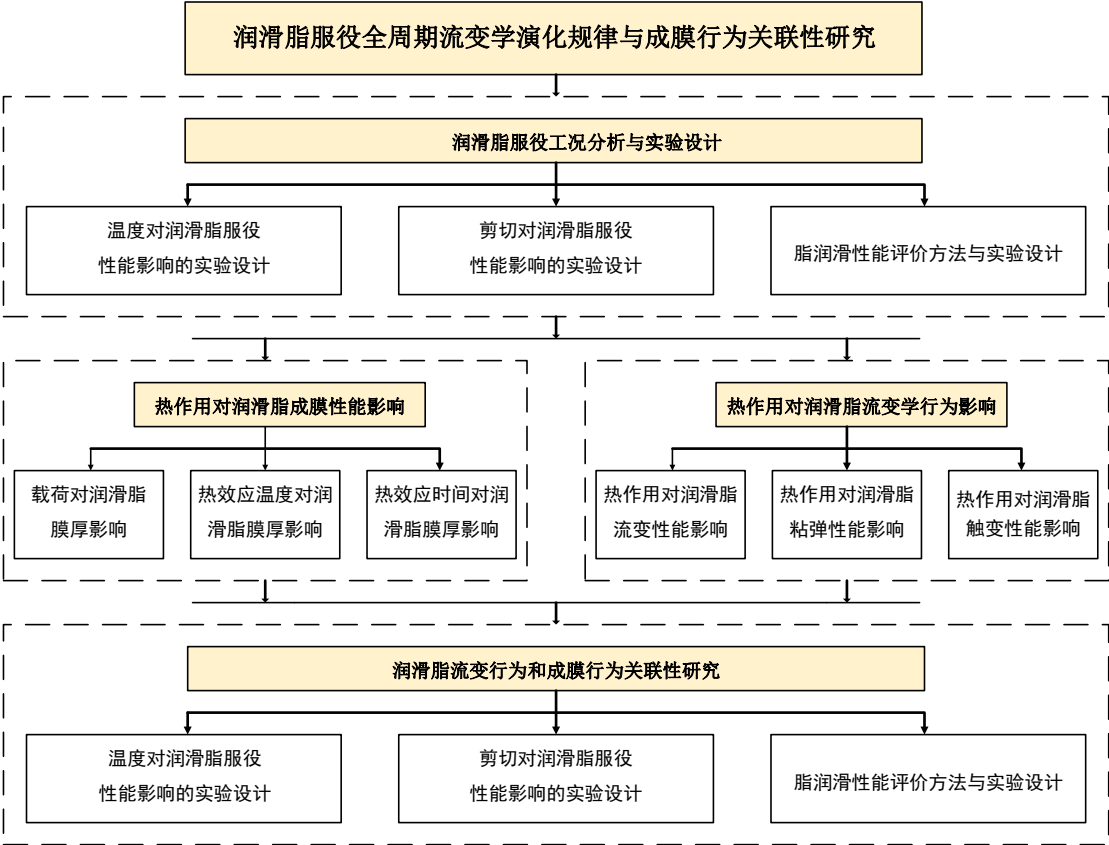


图 1-8 主要技术路线

本文主要技术路线如图 1-8 所示，论文的主要安排工作有以下五个部分。第一章绪论，分析润滑脂研究现状；第二章关于润滑脂服役工况分析与实验设计，主要包括润滑脂服役工况分析、温度对润滑脂性能影响分析、流变实验和成膜实验设计；第三章热作用对润滑脂流变学行为的影响；第四章热作用对润滑脂成膜性能的影响；第五章润滑脂流变行为和成膜行为关联性研究，并进行相关分析，研究其内部机理。

第2章 润滑脂服役工况分析与实验设计

润滑脂作为一种重要的润滑剂,在各种机械设备和工业应用中发挥着至关重要的作用。其独特的性能能够在多种复杂的工况下提供持久而有效的润滑。润滑脂的服役工况分析与实验设计是确保其在实际应用中发挥最佳性能的关键步骤。通过对润滑脂在不同工况下的性能进行深入研究,可以更好地理解其在实际工作中的表现,从而为润滑脂的配方优化和应用提供科学依据。

本研究旨在通过对润滑脂服役工况的分析,并结合实验方案,探讨润滑脂在不同工况下的润滑性能和失效机制。通过实验数据的收集和分析,揭示润滑脂的性能变化规律,为润滑特性研究提供理论支持和实践指导。

2.1 润滑脂服役工况分析

润滑脂在服役过程中会受到各种环境因素的制约,其中温度、载荷和剪切等因素的影响较为显著,图 2-1 展示了传动系统零部件润滑的示意图。在轴承运行过程中,通过向啮合齿轮注入适量的润滑脂,可有效降低齿轮间的摩擦系数、减少磨损,延长其服役寿命。

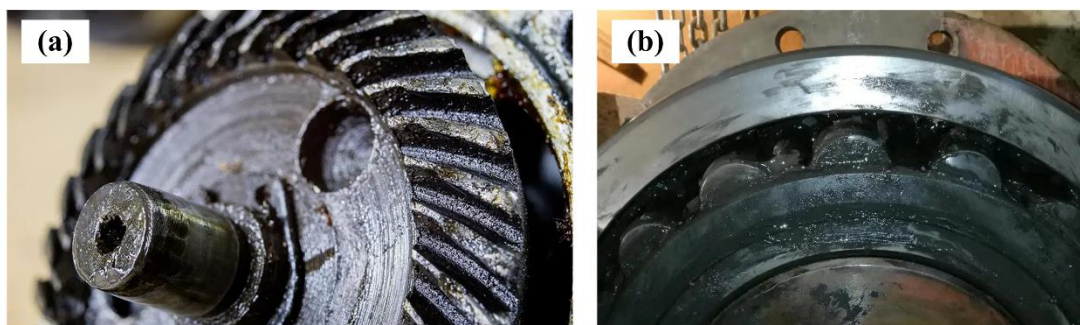


图 2-1 传动系统零部件润滑示意图

(a)齿轮润滑; (b)轴承润滑

在温度方面,高温会导致润滑脂粘度降低、附着力下降,流动性能提高,并加速氧化变质过程,从而缩短其使用寿命;而低温则会使润滑脂变稠,流动性变差,增加设备启动时的摩擦阻力和磨损风险。载荷方面,润滑脂需要具备良好的极压性能和抗磨性能,以在高负荷条件下形成有效的润滑膜,防止金属表面发生

咬合和磨损，确保机械设备的正常运转。剪切稳定性对润滑脂的性能同样重要，润滑脂在受到剪切作用时，其内部结构会逐渐被破坏，导致粘度下降和稠度降低，若剪切稳定性差，润滑脂容易流失，无法持续提供润滑保护。综上所述，润滑脂的服役性能是多方面因素综合作用的结果，温度、载荷和剪切等因素相互影响，共同决定了润滑脂在实际应用中的表现和寿命。为了确保机械设备的可靠运行，选择具有良好温度适应性、优异极压抗磨性能和高剪切稳定性的润滑脂至关重要。

本文将通过一系列实验来模拟润滑脂在服役过程中的实际工况，以深入分析其在不同温度、不同载荷和不同剪切速度下的性能表现。首先，在温度方面，采用静态热处理方法，将润滑脂放入恒温干燥箱，热处理不同的温度和时间，模拟润滑脂在高温下的性能表现。其次，在载荷方面，利用光弹流润滑油膜测量仪，施加不同的载荷，测试润滑脂的油膜厚度，观察其在高负荷条件下的油膜图片和膜厚数值，以评估其在重载工况下的润滑效果。最后，在剪切速度方面，采用旋转流变仪，设定不同的剪切速率，研究润滑脂的流变特性，如粘度、剪切应力和剪切应变等随剪切速率变化的关系，分析其在不同剪切速度下的抗剪切性能和稳定性。通过这些实验模拟，可以全面了解润滑脂在实际服役过程中的性能变化规律，为其在不同工况下的应用提供科学依据和指导。

2.2 热效应温度对润滑脂服役性能影响的实验设计

润滑脂在服役过程中经历以下几个阶段：首先是运行初期，当设备开始转动时，润滑脂会受到剪切力作用，其表观粘度降低，流动性增强。润滑脂的纤维结构会被暂时破坏，使其能够更好地流入设备的关键区域。润滑脂在设备表面形成润滑膜，提供初始的润滑保护。此时润滑脂的流变特性对其润滑效果至关重要。运行中期，在设备正常运行过程中，润滑脂的润滑膜保持稳定，提供持续的润滑。润滑脂的基础油和增稠剂之间的相互作用决定了其润滑性能。运行后期，随着时间的推移，润滑脂的性能会逐渐衰退。基础油的氧化、增稠剂的降解等因素会导致润滑脂的粘度变化和润滑性能下降。润滑脂的基础油可能会逐渐析出，导致润滑脂的稠度增加。这种现象会影响润滑脂的流动性和润滑效果。终止阶段，当润滑脂的性能无法满足设备的润滑要求时，就会失效。此时需要对润滑脂进行更换，以保证设备的正常运行。

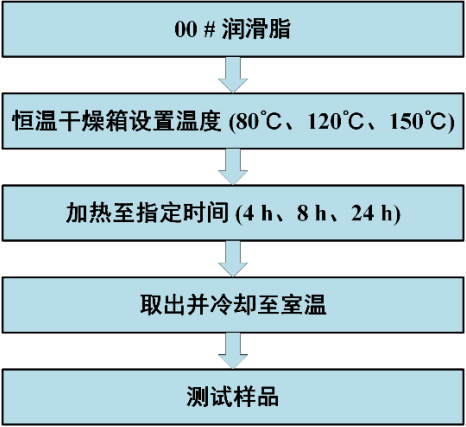


图 2-2 静态热处理实验流程

为了模拟润滑脂的服役全周期工况，选择不同温度下的新鲜润滑脂进行静态热处理，图 2-2 为热效应润滑脂样品制备流程。参考文献确定热处理的时间和温度。具体热处理方式如下：根据热效应温度和时间将润滑脂均匀地分成 9 份，尽可能薄厚均匀地涂抹在烧杯内部，使样品获得充分的受热，最后分别按照设置好的条件置于恒温干燥箱中进行静态热处理，制备好的样品编号如表 2-1 所示。同时添加一组新鲜样品作为对照组，共 10 组样品。图 2-3 为恒温干燥箱及处理之后的部分实验样品。

表 2-1 热处理后的润滑脂样品编号

热效应温度/℃	热效应时间/h	样品编号
80	4	80℃-4 h
	8	80℃-8 h
	24	80℃-24 h
120	4	120℃-4 h
	8	120℃-8 h
	24	120℃-24 h
150	4	150℃-4 h
	8	150℃-8 h
	24	150℃-24 h

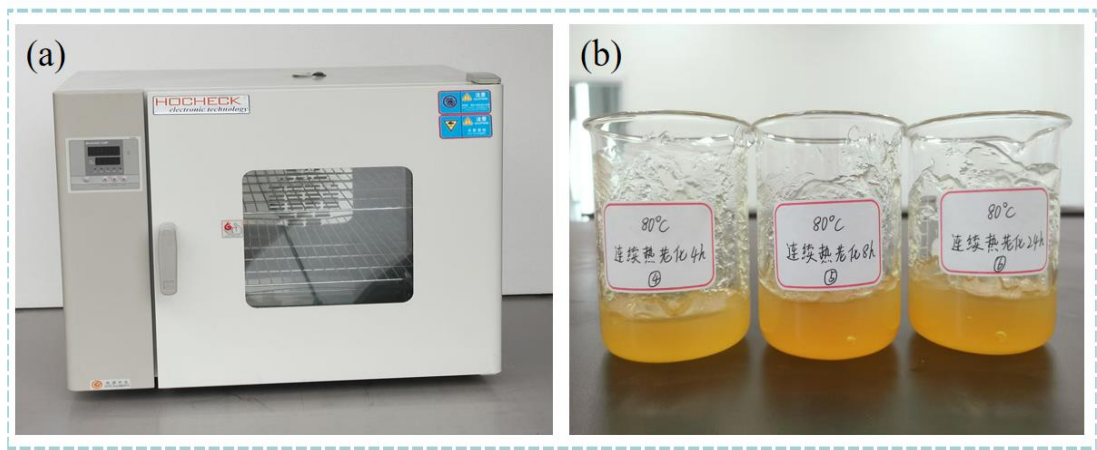


图 2-3 恒温干燥箱及部分样品
(a)恒温干燥箱；(b)实验样品

润滑脂内部的皂纤维结构变化是反映其润滑特性的重要手段。皂纤维的大小、形状、排列方式以及网状结构骨架的强度都会直接影响润滑脂性能。通过微观形貌仪可以清晰地观察到皂纤维的微观结构变化。图 2-4 给出了润滑脂 FESEM 样品制备流程图。实验过程中，溶解试剂采用石油醚；溶解过程中，每次超声处理 10 min；离心机的离心速度选用 10000 r/min，离心时间为 10 min；承载样品的铜片尺寸：1 cm×1 cm。实验的测试条件：10 kV，高真空模式，放大倍数为 20000。

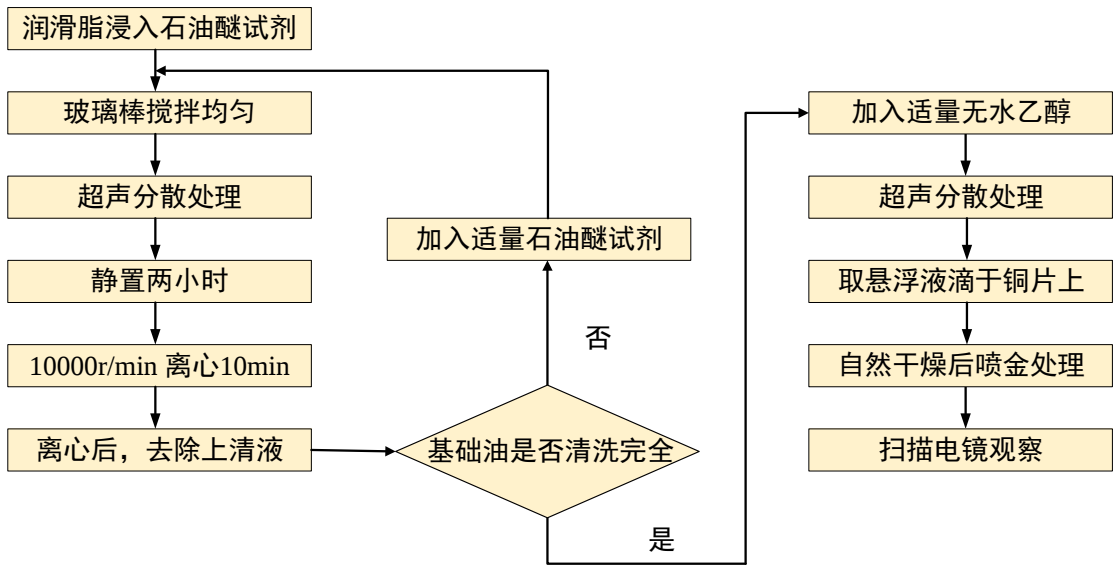


图 2-4 润滑脂 FESEM 样品制备流程图

2.3 剪切作用对润滑脂服役性能影响的实验设计

润滑脂的剪切特性和流变实验是深入探究润滑脂服役性能的重要手段。锂基

润滑脂的流变特性测试采用安东帕（德国）Physica MCR-302 旋转流变仪，测试采用平板模块测量（平板直径 50 mm，测试间距 1 mm），如图 2-5、图 2-6 所示。锂基润滑脂的流变特性测试主要涵盖流动特性和粘弹性两个方面。流动特性测试通过连续剪切实验，分析剪切应力随剪切速率的变化趋势，反映锂基润滑脂流动的难易程度；粘弹性测试则通过振荡剪切实验，研究润滑脂在动态剪切过程中粘性和弹性参数的演变规律，反映锂基润滑脂黏性和弹性转变的难易程度。

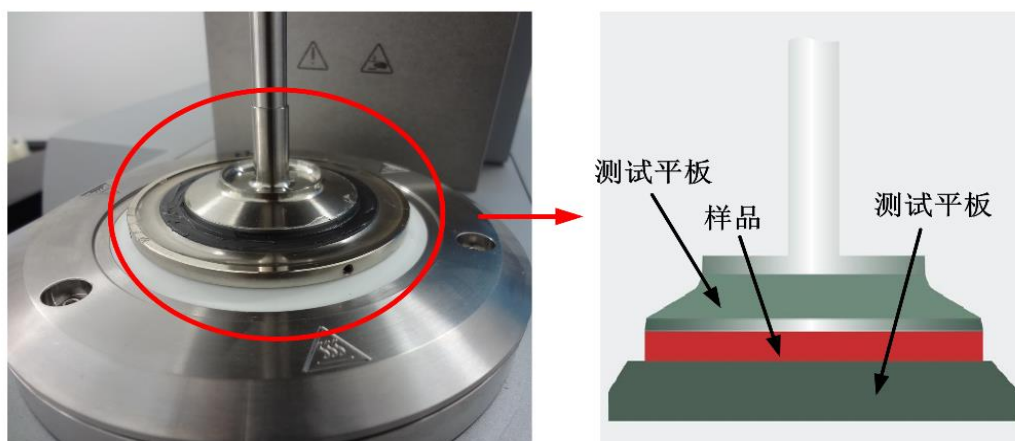


图 2-5 旋转流变仪及测试模块

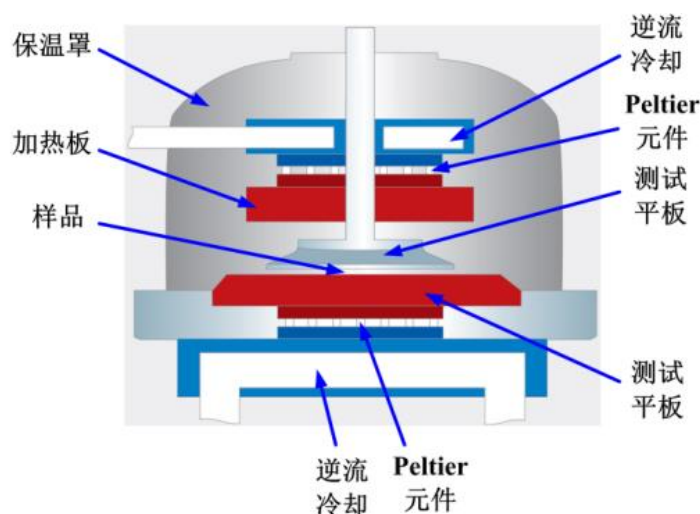


图 2-6 Peltier 半导体控温系统

在旋转剪切模式下，分别进行触变性测试以及表观粘度测试。具体测试条件如下：剪切速率先由 10^{-2} s^{-1} 递增至 10^2 s^{-1} ，再递减至 10^{-2} s^{-1} 。触变性试验所选用的温度条件为 20°C、40°C、60°C、80°C 和 100°C。对不同温度和热处理条件下的测试结果进行统计分析，以评估高温热作用对润滑脂触变性的影响。

在振荡剪切模式下，分别进行应变扫描测试及频率扫描测试。具体测试条件

如下：应变扫描中，剪切频率为 1 Hz，控制应变幅值从 0.01 %-100 %；频率扫描中，取应变幅值为 0.1 %，控制剪切频率从 1 rad / s-100 rad / s。实验温度为 20℃、40℃、60℃、80℃和 100℃。

2.4 润滑性能评价方法与实验设计

润滑脂膜厚的测量方法有很多种，目前常用的方法包含电阻法、电容法、X 射线法、超声波测量法、光干涉法等。本文采用光干涉法测量润滑脂油膜厚度，该方法能够在动态条件下实现油膜厚度的精准测量，并且其测量结果与理论计算值具有高度一致性，已被众多学者广泛认可和应用。光干涉法中，双色光干涉技术是在传统单色光和白光干涉的基础上进行改进的先进方法。与传统方法相比，双色光干涉具有显著优势：其颜色变化更为丰富，便于精确推算膜厚；同时随着膜厚的增加，光强不会迅速衰减，从而保证了测量的高精度和可靠性。本实验台选用红绿双色光源，基于光干涉原理，对润滑油膜厚度进行测量。

实验所用润滑脂为复合锂基润滑脂（GP-A）00 号(中国石化润滑油有限公司天津分公司产品)，主要组成和技术参数如表 2-2 所示。

表 2-2 锂基润滑脂的性能参数

基础油	稠化剂类型	锥入度 / 0.1 mm	滴点 / °C	工作锥入度 / 0.1 mm
矿物油	皂锂基	449	202	403

润滑脂油膜厚度测量设备为图 2-7 所示的光弹流润滑油膜测量仪，材质为 K9 的玻璃盘，盘表面粗糙度约为 20 nm，直径为 150 mm。接触盘面镀有析光 Cr 膜。钢球为 G5 精度，表面粗糙度为 14 nm，直径为 25.4 mm。

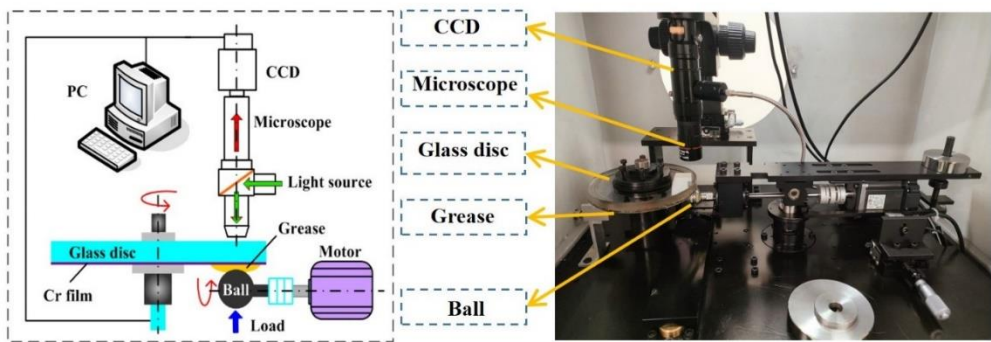


图 2-7 光弹流润滑油膜测量仪

润滑脂油膜厚度的测量基于光干涉原理，采用红绿双色光源进行交替照射。实验时，光源照射至玻璃盘的铬镀膜，部分光线反射形成第一束光信号，另一部分穿透油膜并在滚动体表面反射形成第二束光信号。通过对比两束反射光的干涉数据，生成红绿光干涉曲线。随后，利用特定算法对干涉曲线进行计算，得出油膜厚度分布。最终，通过对接触区全区域的测量，生成润滑脂油膜的干涉图像。

润滑脂膜厚测量设备选择光弹流润滑油膜测量仪。实验速度选择 50 mm/s、300 mm/s 和 500 mm/s，涵盖了低速、中速、高速等三种速度；实验载荷选择 3 N、9 N、15 N、21 N、27 N、30 N、45 N、60 N、75 N 和 90 N。实验开始之前，将润滑脂涂抹在钢球和玻璃盘接触的区域。随后启动仪器，使润滑脂均匀涂抹在玻璃盘表面，此时开始测量不同工况下的润滑膜厚。实验条件如表 2-3 所示，具体操作方法见文献^[93]。润滑脂膜厚度由软件 DIIM 处理可得。

表 2-3 实验条件

参数	数值
速度 U_e (mm/s)	50/300/500
载荷(N)	3/9/15/21/27/30/45/60/75/90

2.5 本章小结

本章的主要内容是通过实验模拟润滑脂在服役过程中的变化情况，并探究其性能变化规律。得到的主要结论如下：

(1) 使用恒温干燥箱对润滑脂进行静态热处理后发现，经过不同温度和时间热处理后的润滑脂样品外观出现明显变化。

(2) 经过静态热处理之后的样品，进一步开展流变和成膜实验。

通过对这些样品的流变特性和成膜特性实验分析，能够全面了解润滑脂在服役过程中的性能变化规律，为预测其使用寿命、优化其配方提供重要的理论依据和实验数据支持。相关实验结果与结论将在后文中详细描写，届时将深入探讨润滑脂在不同老化程度下的性能差异，以及这些差异对其在实际应用中表现的影响，为润滑脂的性能研究提供理论依据。

第3章 热作用对润滑脂流变学行为的影响

润滑脂是一种半固体胶体润滑剂，具有独特的皂纤维结构。该结构在剪切过程中表现出良好的可逆性，即剪切力作用下结构被破坏，剪切力消失后迅速恢复，展现出优异的触变性能。这种性能使其在机械部件间形成稳定润滑膜，减少摩擦和磨损。然而，高温会削弱皂纤维结构的稳定性，导致润滑脂稠度降低、分油，影响其润滑效果和寿命。

为深入研究高温对润滑脂结构的影响，需开展流变学行为研究。通过测量不同温度和剪切速率下的粘度、弹性模量等参数，探究润滑脂内部的润滑特性机理。锂基润滑脂的流变特性测试包括流动特性和粘弹性测试。流动特性测试分析剪切应力与剪切速率的关系，反映润滑脂流动难易程度及内部结构变化；粘弹性测试则分析振荡剪切下粘性和弹性参数的演变，评估其在周期性剪切下的稳定性。

3.1 热作用对润滑脂流动性能的影响

图 3-1 给出了新鲜润滑脂在各温度下润滑脂剪切应力和表观粘度随剪切速率的变化规律。其中，图 3-1(a)给出了润滑脂剪切应力随剪切速率的变化规律，图 3-1(b)给出了润滑脂表观粘度随剪切速率的变化规律。需要特别指出的是，润滑脂具有独特的非牛顿特性，即剪切变稀的性质。这种特性意味着润滑脂的粘度并非恒定不变，而是会随着剪切速率的变化而发生相应的变化。

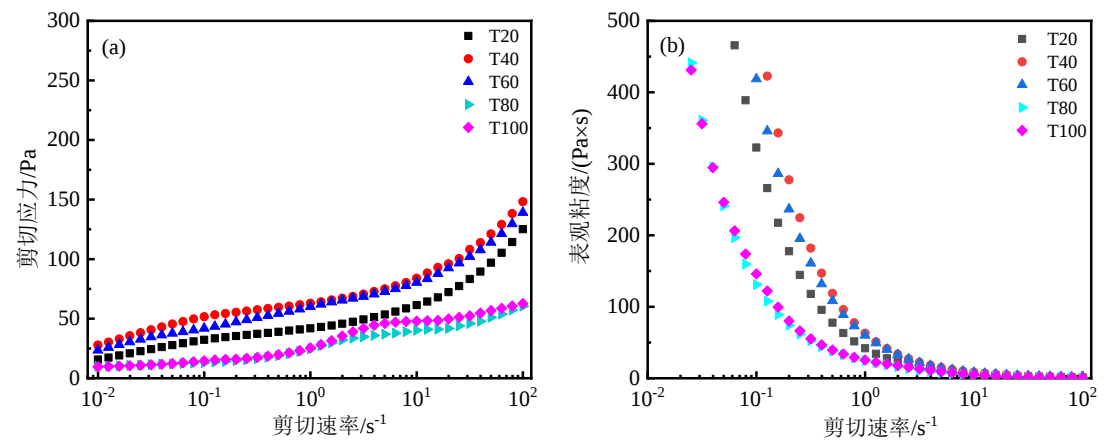


图 3-1 新鲜润滑脂在各实验温度下流动曲线

(a)剪切应力随剪切速率变化规律；(b)表观粘度随剪切速率变化规律

图 3-1(a)显示, 锂基润滑脂的剪切应力随剪切速率增加呈非线性增长, 存在剪切屈服现象。在剪切速率一定范围内, 剪切应力保持恒定, 形成平台区域, 对应的应力值为剪切屈服应力。锂基润滑脂为结构性胶体分散体系, 皂纤维结构可承受一定外力, 当外力超过结构强度时, 发生剪切屈服。屈服前, 剪切应力随剪切速率单调增加, 初始阶段因壁面滑移效应而略有下降, 且在高温下该效应更显著。此时, 润滑脂以弹性变形为主, 表现为固体不流动特性。屈服后进入黏性流动区, 流动曲线符合幂律变化规律, 且随温度升高, 剪切应力和屈服应力均降低, 流动阻力减小, 更易流动。同时, 高温下平台区域对应的剪切速率升高, 与皂纤维缠结程度随温度降低有关。图 3-1(b)表明, 润滑脂表观粘度随剪切速率增加呈非线性下降。一方面, 相同剪切速率下, 温度越高, 粘度越低, 符合经典粘弹理论; 另一方面, 低剪切速率下粘度变化更快。根据 Barnes^[94]分析, 皂纤维尺寸越小, 剪切变稀程度越低。随着剪切速率增加, 皂纤维被剪断、尺寸减小且结构定向, 高剪切速率下表观粘度变化不明显, 最终趋向定值。

图 3-2 是热效应 80℃ 下各实验温度流动曲线, 和图 3-1 对比发现剪切应力随着剪切速率的增加呈持续增加, 这与新鲜样品的变化趋势相同。进一步观察可知, 剪切应力的最大值出现在实验温度为 80℃, 且在相同剪切速率下, 表观粘度的最大值同样出现在实验温度为 80℃。这一现象表明, 在此热效应温度下, 润滑脂的性能得到了显著的正向促进作用。

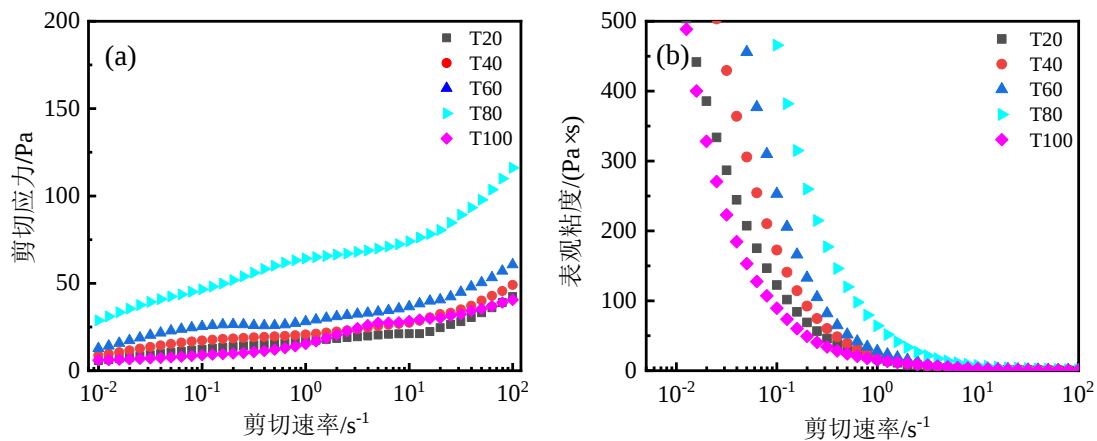


图 3-2 热效应 80℃ 下各实验温度润滑脂流动曲线

(a)剪切应力随剪切速率变化规律; (b)表观粘度随剪切速率变化规律

图 3-3 是热效应 120℃ 下各实验温度流动曲线, 图 3-4 是热效应 150℃ 下各实验温度流动曲线。二者整体变化趋势与图 3-1 相似, 由于润滑脂特殊的触

变性能，其内部的皂纤维结构在此温度下基本恢复。此时的剪切应力最大值和表观粘度最大值在 40℃ 时出现，与新鲜润滑脂相同。

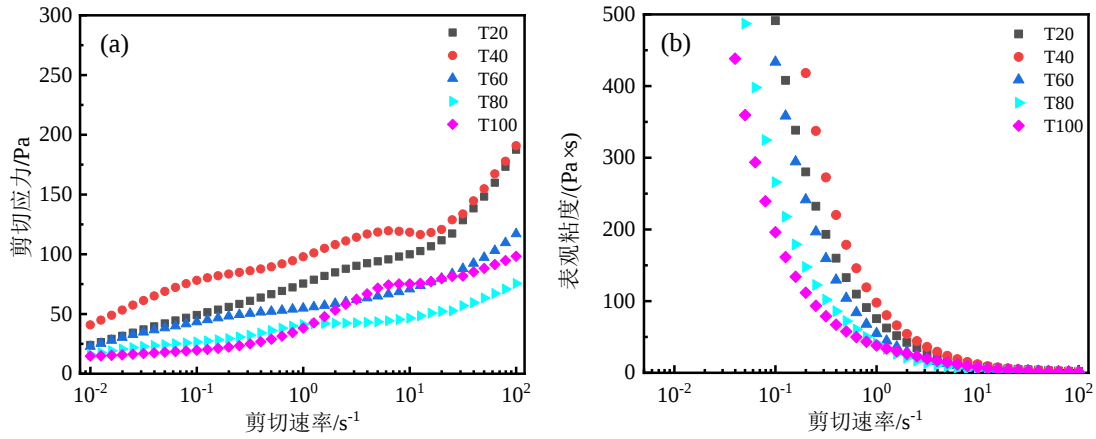


图 3-3 热效应 120℃下各实验温度润滑脂流动曲线

(a)剪切应力随剪切速率变化规律；(b)表观粘度随剪切速率变化规律

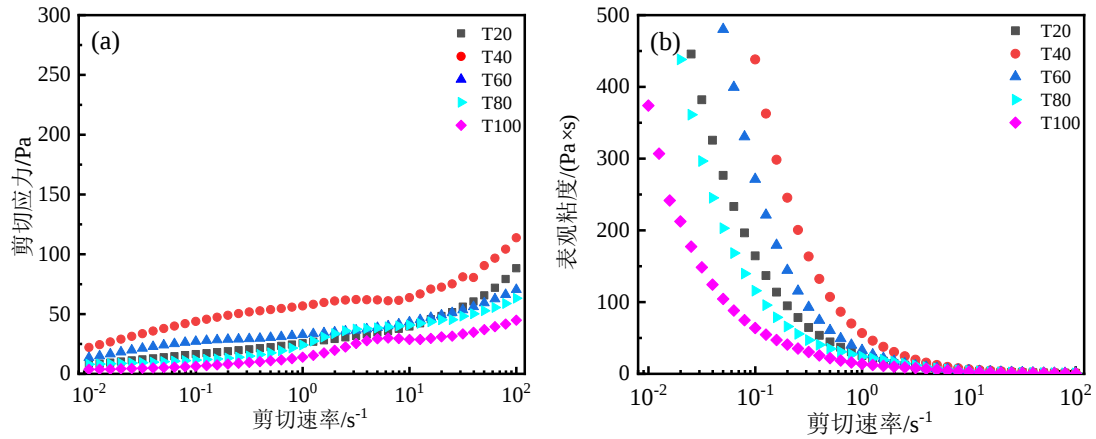


图 3-4 热效应 150℃下各实验温度润滑脂流动曲线

(a)剪切应力随剪切速率变化规律；(b)表观粘度随剪切速率变化规律

3.2 热作用对润滑脂触变性的影响

图 3-5 给出了各实验条件下润滑脂样品的剪切应力随剪切速率的变化规律。在实验过程中，对润滑脂样品所施加的剪切速率是先增加（ 0.01 s^{-1} 至 100 s^{-1} ），达到设定最高剪切速率后再降低（ 100 s^{-1} 至 0.01 s^{-1} ），对比增加阶段和降低阶段剪切应力随剪切的变化曲线，并进一步计算二者所围的区域面积，以衡量各热作用实验条件下润滑脂的触变性能。从图中可以看出，新鲜润滑脂样品（图 3-5 中 0 h 的实验结果）施加剪切作用阶段和撤去剪切作用的数值非常接近，这表明润

滑脂在承受剪切作用后展现出良好的结构恢复性能。

图 3-5(a)给出了 80°C 下热作用 4 h、8 h 和 24 h 后润滑脂样品的剪切实验结果,从图中看出,在 4 h 后,润滑脂的剪切应力变得最小;随着热作用时间延长,剪切应力值逐渐增加,但总体而言,剪切速率增加和下降阶段的剪切应力值均接近,这也意味着润滑脂胶体结构体系的触变性能依然得到了较好保持。图 3-5(b)给出了 120°C 温度下热作用 4 h、8 h 和 24 h 后润滑脂样品的剪切实验结果,4 h 作用后,剪切应力值最高,随着温度升高并未呈现出明显规律,但各组实验结果展现出类似的实验结果,即剪切速率增加和下降阶段的剪切应力值存在较大差距,二者所围的面积较大,这说明在该实验条件下,润滑脂承受剪切后结构体系的恢复性能变差。图 3-5(c)给出了 150°C 温度下热作用 4 h、8 h 和 24 h 后润滑脂样品的剪切实验结果,与 80°C 、 120°C 所展现的规律均不同,剪切速率上升阶段的应力值呈现出随热作用时间的延长而增加,明显有润滑脂呈现出硬化的现象;剪切速率下降阶段,各实验条件下的应力值接近,这说明施加了剪切作用后,在恢复阶段润滑脂的结构体系状态是相似的。从以上分析可以看出, 80°C 、 120°C 和 150°C 热作用后润滑脂样品结构体系呈现出不同的触变性能变化规律,这与润滑脂成膜性能中三种实验条件呈现出不同实验结果是相对应的。

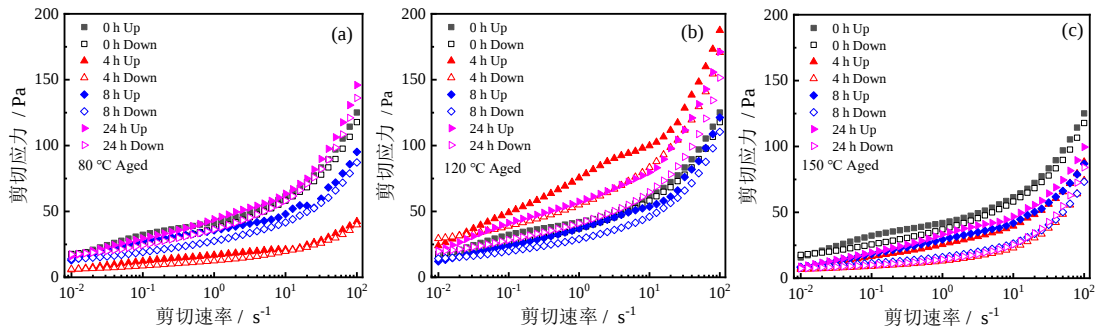


图 3-5 不同热处理时间和温度下润滑脂的触变性曲线

图 3-6 是根据图 3-5 中各实验条件下润滑脂施加剪切作用和撤去剪切作用后,剪切速率上升和下降阶段实验结果所围成的触变环面积。从图中可以看出,在 80°C 热作用下,触变环面积先减小后增加,总体而言与新鲜润滑脂样品接近;在 150°C 热作用下,触变环面积基本呈现出增加到一个较大的数值,明显高于新鲜润滑脂样品的触变环面积;在 120°C 热作用下,并未呈现出明显的规律性,4 h 热作用后触变性能就很不理想,而在 8 h 热作用后触变性虽然得到改善,在 24 h 热作用后润滑脂触变性能再次变差。这些结果表明,在 80°C 作用下,润滑

脂样品即使承受较长时间的热作用对其结构体系总体而言并未出现明显的变化；在 120℃ 作用下，润滑脂样品皂纤维结构体系稳定性变差，触变性能出现了非规律性变化；在 150℃ 作用下，无论是剪切速率上升还是下降阶段，虽然在 4 h、8 h 和 24 h 作用后接近，但触变环面积均较大，整体而言抗剪切能力较差。结合作者早期对锂基润滑脂结构热老化的研究结果，在该温度下，润滑脂皂纤维结构已经遭到了破坏，而且这种影响是不可逆的影响。

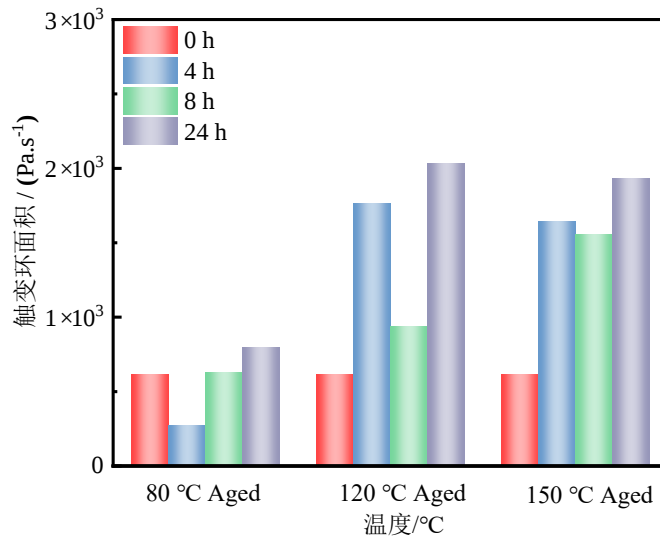


图 3-6 不同热老化时间和温度下润滑脂的触变环面积

3.3 热作用对润滑脂粘弹特性的影响

为研究润滑脂粘弹特性，引入复数模量进行描述。润滑脂复数模量 (G^* , Pa) 可以通过式 (3-1) 进行描述^[95]：

$$G^* = G' + iG'' \quad (3-1)$$

式中， G' 为储能模量，表征润滑脂弹性变形所储存的能量，Pa； G'' 为损耗模量，表征润滑脂粘性变形所损耗的能量，Pa；对于两者的比值 $\tan\delta = G''/G'$ 为损耗因子，反映了润滑脂承受剪切时能量的耗损程度，量纲为 1； i 为虚数。

图 3-7、图 3-8、图 3-9、图 3-10 和图 3-11 展示了不同热效应时间和温度条件下润滑脂的储能模量 (G') 与损耗模量 (G'') 随应变扫描变化的曲线图。从这些曲线图中可以清晰地观察到，在不同温度以及不同热老化时间的实验条件下，润滑脂的储能模量曲线始终位于损耗模量曲线之上。这一现象明确地说明了锂基润滑脂在不承受剪切力作用时，展现出较为明显的固体特性。也就是说，当锂基

润滑脂处于静止状态或者未受到外力剪切作用时，其内部结构相对稳定，具有一定的刚性和形状保持能力，类似于固体物质的性质。而当锂基润滑脂开始流动时，需要承受足够大的外力来克服这种固有的固体特性，才能使其发生流动变形，这表明其流动过程并非轻易就能实现，需要克服一定的阻力。

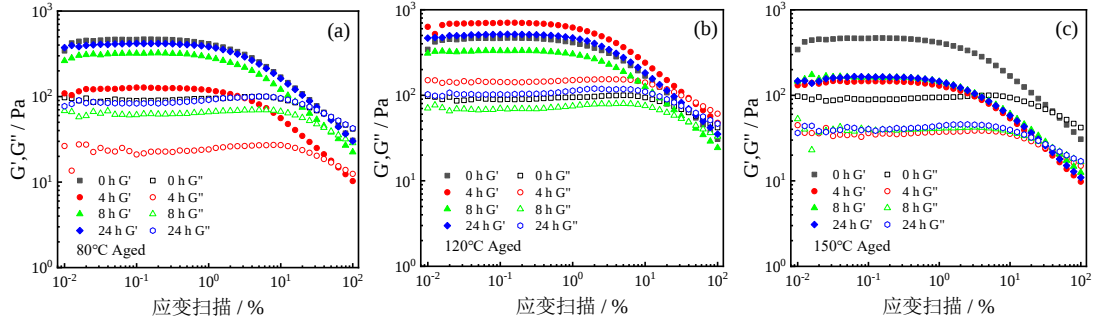


图 3-7 实验温度 20°C 下各热老化时间和温度下润滑脂应变扫描曲线图

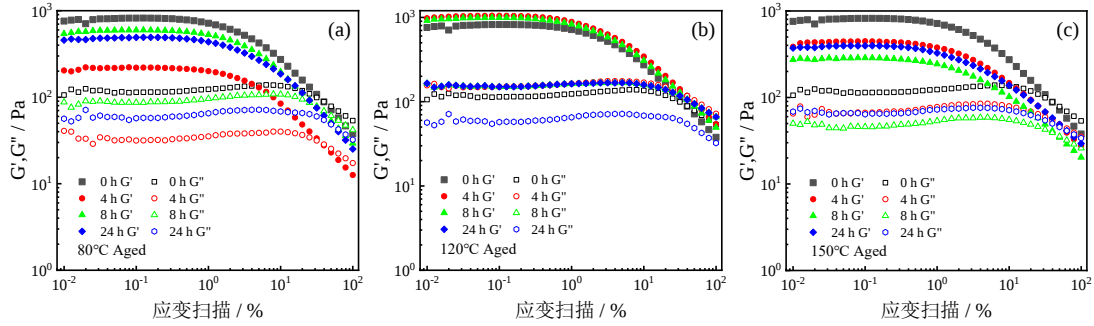


图 3-8 实验温度 40°C 下各热老化时间和温度下润滑脂应变扫描曲线图

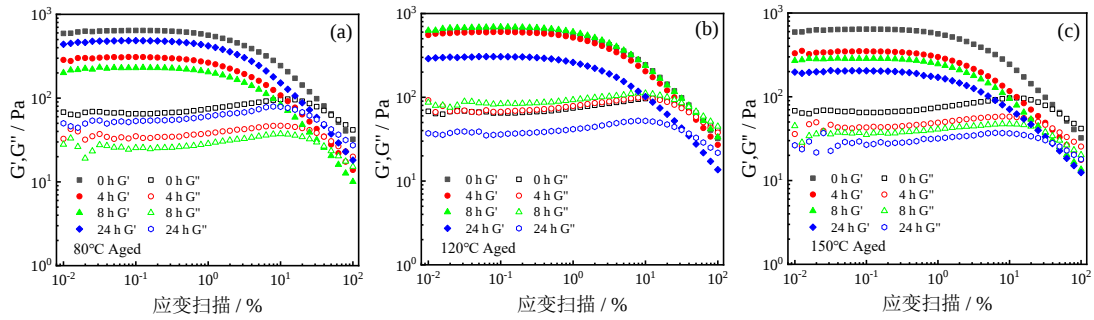


图 3-9 实验温度 60°C 下各热老化时间和温度下润滑脂应变扫描曲线图

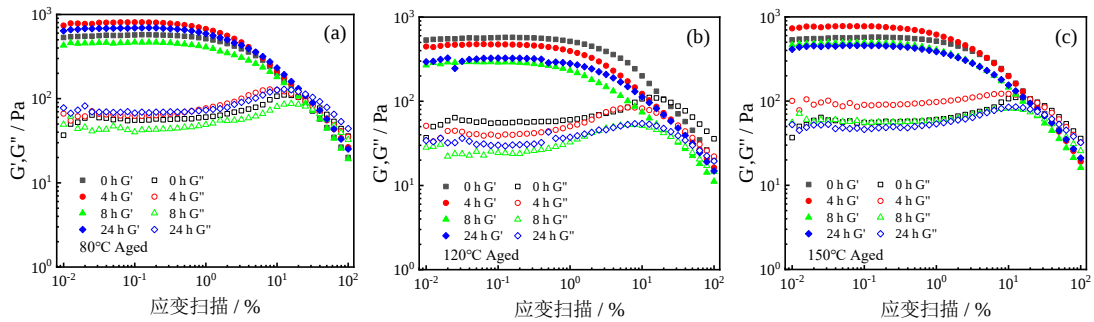


图 3-10 实验温度 80°C 下各热老化时间和温度下润滑脂应变扫描曲线图

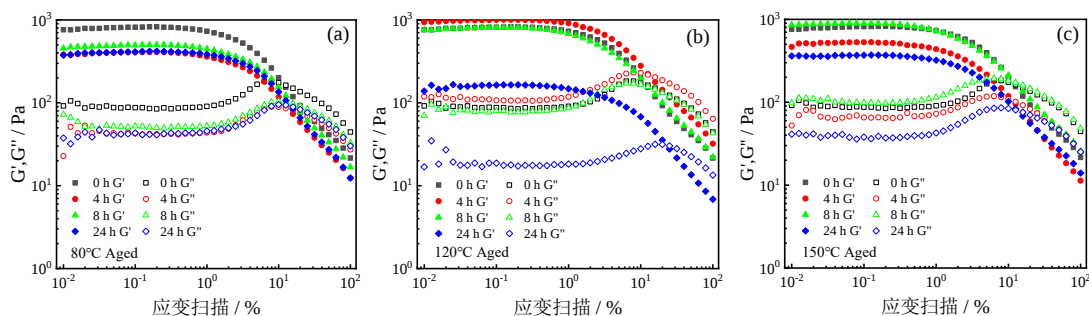


图 3-11 实验温度 100°C 下各热老化时间和温度下润滑脂应变扫描曲线图

进一步分析曲线图可以发现,在实验温度保持一致的情况下,储能模量随着应变的增加呈现出一种先缓慢增加,随后又骤然下降的趋势。这种变化趋势可能与润滑脂内部结构在应变作用下的逐步调整和破坏有关。在应变初期,润滑脂内部的结构在一定程度上能够适应外力作用,储能模量缓慢上升,反映出其内部结构的逐渐变形和能量的储存。然而,当应变达到一定程度时,内部结构可能发生了较为剧烈的破坏或者重组,导致储能模量突然下降。与此同时,损耗模量在前期基本保持不变,呈现出一个相对稳定的平台区域。这可能是因为在应变初期,润滑脂内部的能量损耗相对较小,结构变化较为缓慢,不足以引起损耗模量的明显变化。但随着剪切应变的不断增大,损耗模量开始逐渐与储能模量交汇,说明此时润滑脂内部的能量损耗逐渐增大,结构破坏程度不断加深,其流动特性开始逐渐显现,固体特性逐渐减弱。

从热老化时间相同的角度来看,储能模量在这一条件下出现了先上升后下降再上升的复杂变化趋势。这种变化可能与热老化过程中润滑脂内部结构的动态演变有关。在热老化初期,可能由于温度的作用,润滑脂内部的一些结构缺陷得到一定程度的修复或者优化,使得储能模量有所上升。但随着热老化时间的进一步延长,内部结构可能又开始遭受破坏,储能模量随之下降。然而,在后续过程中,可能又发生了某种结构的重新调整或者稳定化过程,使得储能模量再次上升。而损耗模量在热老化时间相同时基本不发生变化,这表明在这一阶段,润滑脂的内部能量损耗相对稳定,其流动特性没有发生显著变化。但从整体角度来看,这一阶段润滑脂的流动性得到了有效改善,这可能是由于储能模量的变化导致其内部结构的可变形性增强,使得润滑脂在受到外力作用时能够更加容易地发生流动变形,从而提高了其流动性能。

3.4 热作用对润滑脂流变学行为的影响规律

图 3-12 给出了润滑脂电镜扫描图, (a)为 80°C-4 h、(b)为 80°C-8 h、(c)为 80°C-24 h、(d)为 120°C-4 h、(e)为 120°C-4 h、(f)为 120°C-4 h、(g)为 120°C-4 h、(h)为 120°C-4 h、(i)为 120°C-4 h。观察发现, 热效应 80°C 下, 皂纤维结构表现出较为紧密的缠结状态, 由于润滑脂具有触变性, 皂纤维结构在该温度下展现出良好的恢复性能。此时热效应温度对皂纤维结构的影响相对较小, 这一现象与图 3-6 的实验结果高度一致。热效应 120°C 下, 皂纤维结构开始出现断裂, 其缠结结构逐渐变得松散, 恢复性能也随之变差。热效应 150°C 下, 皂纤维结构造成较大程度破坏, 电镜图片变得模糊不清, 且基础油被堵塞, 难以顺利流出。这进一步影响了润滑脂的流动性和润滑性能。这一现象表明, 在高温条件下, 润滑脂的皂纤维结构稳定性受到严重挑战, 进而影响其在实际应用中的性能表现。

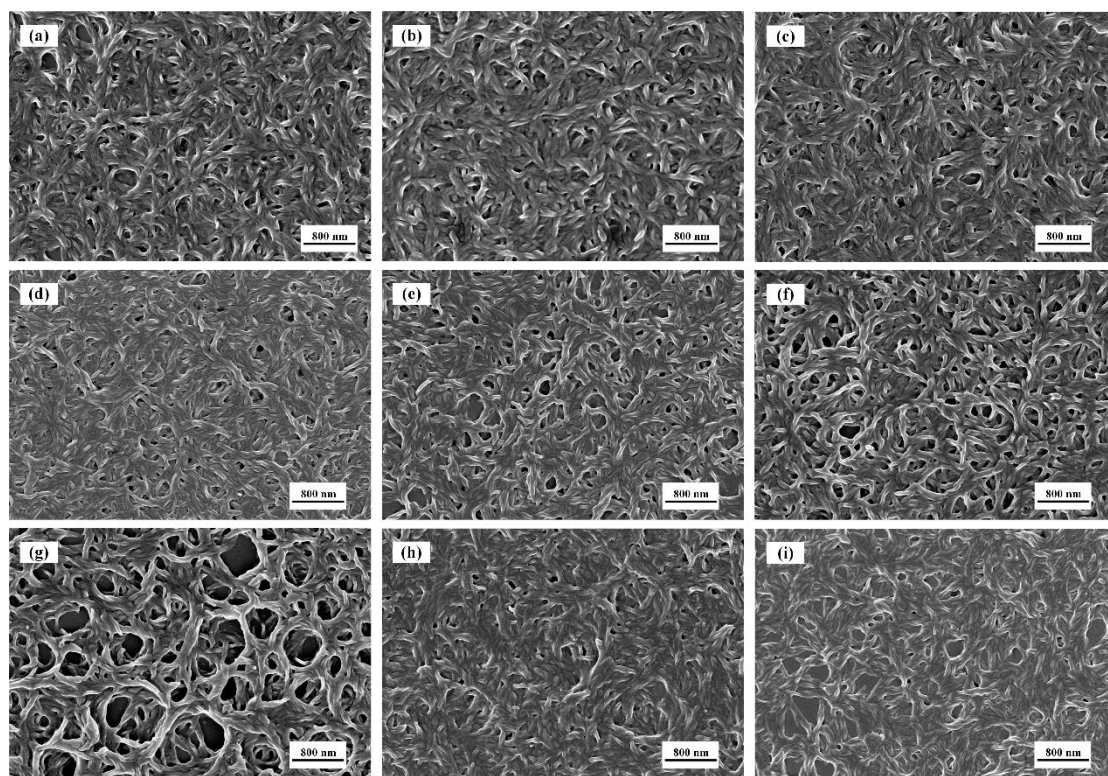


图 3-12 润滑脂电镜扫描图

图 3-13 给出了润滑脂流变特性机理图, 该机理是基于润滑脂静态热老化、触变性实验结果, 得到的温度效应对润滑脂流变特性影响。高温热效应作用于润滑脂, 将会对其结构体系产生影响。具体而言, 润滑脂内部的皂纤维结构会因热作用而遭到破坏。这种破坏主要表现为皂纤维的缠结程度的改变, 甚至在极端条

件下可能出现皂纤维的氧化分解。然而，由于润滑脂具有特殊的触变性能，其皂纤维结构在热作用去除后能够逐渐恢复，展现出一定的可逆性。这种触变性能使得润滑脂在剪切过程中表现出独特的流变特性：在剪切应力未达到其结构强度时，润滑脂表现出固体弹性特征；当剪切应力超过结构强度时，润滑脂发生剪切屈服；而剪切去除后，其结构又能快速恢复。研究表明，温度是影响润滑脂老化和流变特性的重要因素。在较低温度或短时间热作用下，润滑脂的皂纤维结构仅发生物理变化，表现为缠结程度的改变，这种变化是可逆的。然而，当温度过高或热作用时间过长时，润滑脂会发生化学老化，皂纤维结构出现不可逆的破坏，导致润滑性能显著下降。因此，润滑脂在高温环境下的使用性能不仅取决于其皂纤维结构的稳定性，还与其触变性能的恢复能力密切相关。

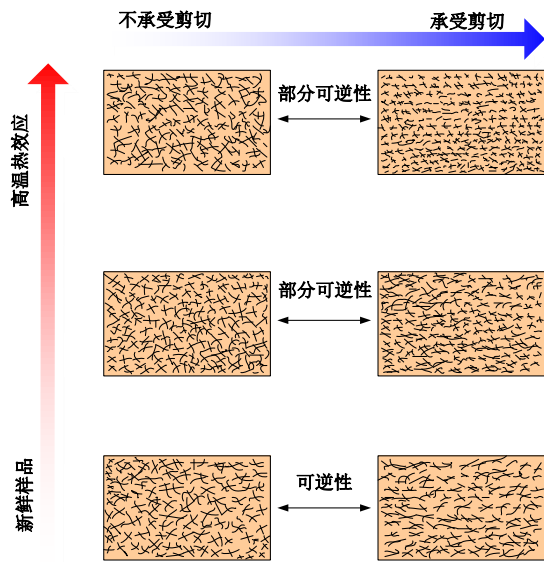


图 3-13 润滑脂流变特性机理图

3.5 本章小结

使用 Anton Phsica MCR-302 型旋转流变仪，对样品润滑脂在旋转剪切和振荡剪切模式下进行流变特性研究。结果表明：

- （1）随着温度的升高，锂基润滑脂的剪切应力值逐渐下降，对应的屈服应力也下降。这说明随着温度升高，锂基润滑脂在剪切过程中所承受的流动阻力减小，更易流动。此外，随着温度升高，出现平台区域所对应的剪切速率升高。
- （2）应变扫描变化曲线中，温度相同时，储能模量呈缓慢增加再骤然下降的趋势；损耗模量前期基本不变，出现一个平台区域后再随着剪切应变的增加与

储能模量逐渐交汇。热老化时间相同时，储能模量出现先上升后下降再上升的变化趋势，损耗模量基本不发生变化。

热作用不仅显著改变了润滑脂的流变性能，还对其成膜性能产生了影响。随着温度升高，润滑脂内部皂纤维结构的破坏和基础油的析出会直接影响其在摩擦表面的成膜能力。因此，研究热作用对润滑脂成膜性能的影响，对于全面评估其润滑特性至关重要。

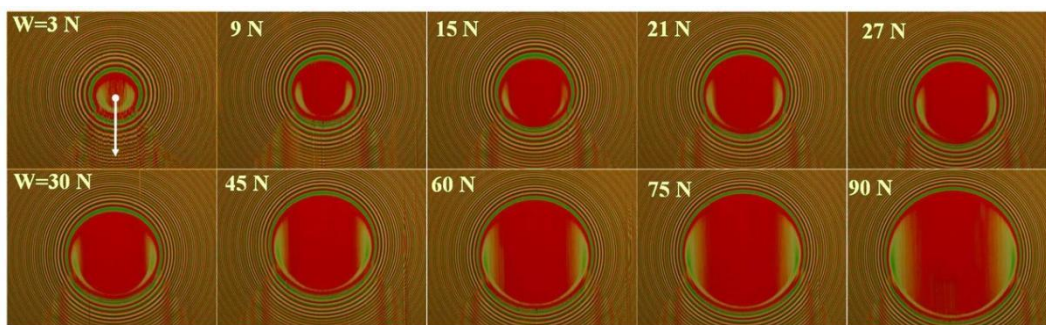
第4章 热作用对润滑脂成膜性能的影响

润滑脂的成膜能力是其核心性能之一，直接影响机械设备的润滑效果与运行稳定性。润滑脂通过其皂纤维结构在摩擦表面形成一层薄膜，从而减少金属间的直接接触，降低摩擦与磨损。然而，润滑脂的成膜能力受到多种因素的综合影响，包括粘度、皂纤维结构以及工作环境温度等。在高温条件下，润滑脂的黏度降低，导致润滑膜厚度减小，承载能力下降。此外，基础油的性质和稠化剂的种类也对润滑脂的成膜性能有着显著影响。因此，深入研究润滑脂的成膜能力及其影响因素，对于优化润滑脂配方、提高机械设备的运行效率和可靠性具有重要意义。实验结果将重点揭示润滑脂在滚动工况下的膜厚变化规律及其与载荷、速度、热处理条件的关联性，探究温度和时间对皂纤维结构演变的定量关系。这些研究不仅能够深入阐明热效应对润滑脂内部微观结构的作用机制，还可为润滑脂的配方优化和高温工况下的应用设计提供理论指导和实践参考。

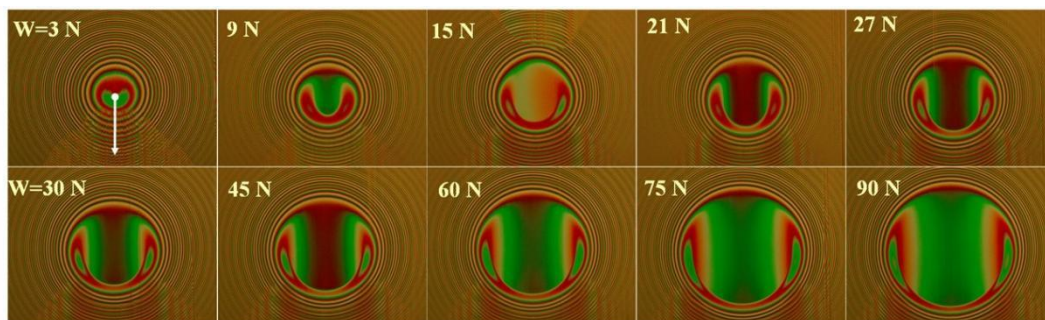
4.1 载荷对润滑脂膜厚的影响

图 4-1 显示新鲜润滑脂在不同卷吸速度（50 mm/s、300 mm/s 和 500 mm/s）和载荷条件下形成的油膜干涉图，其中箭头标注了润滑脂的流动方向。可以观察到，在卷吸速度为 50 mm/s、300 mm/s 和 500 mm/s 的条件下，仅当载荷为 3 N 时，油膜呈现出不太稳定的状态，而在其他载荷下（如 9 N、15 N 和 21 N），润滑脂均能稳定成膜，呈现出经典的弹性流体动力润滑（EHL）油膜特征^[96]。这表明润滑脂在一定卷吸速度和载荷范围内能够形成稳定的润滑油膜，以保障摩擦副的润滑性能，提高轴承的使用寿命。对于摩擦副而言，润滑剂的作用是在摩擦副间隙之间形成稳定润滑膜，从而降低接触表面的摩擦和磨损，改善摩擦性能。润滑油膜厚度是评价润滑脂成膜性能的重要指标，其稳定性和均匀性也会影响润滑效果。图 4-2 进一步展示了不同卷吸速度（50 mm/s-500 mm/s）下润滑脂油膜的实际轮廓曲线。可以看出，在载荷为 3 N 时，油膜的弹流特征不明显，而在其他载荷下（如 9 N 及以上），油膜呈现出典型的弹流油膜形态。这一结果与图 4-1 中 3 N 载荷下油膜不稳定的现象相一致，揭示了在较低载荷下，润滑脂在接触区域

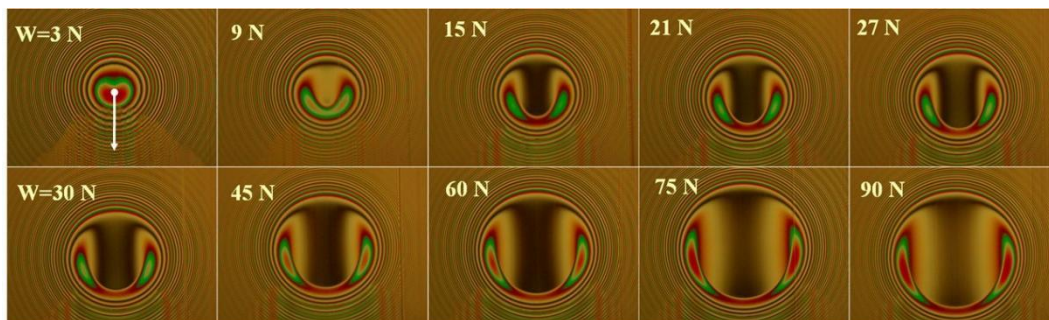
内图像不稳定、成膜能力较弱的原因。



(a) $U_e=50$ mm/s



(b) $U_e=300$ mm/s



(c) $U_e=500$ mm/s

图 4-1 不同速度和载荷下的干涉图像

进一步选取油膜的最小膜厚进行量化分析，表 4-1 给出了不同载荷和卷吸速度下的膜厚值。从表中可以发现，当载荷增加至 15 N 后，油膜厚度的变化趋于稳定，载荷对油膜厚度的影响不再显著。然而，随着卷吸速度的增加，油膜厚度呈现出明显的增长趋势。这一现象可以解释为：随着卷吸速度的提高，更多的润滑脂被卷吸进入接触区域，增大了润滑脂的供给量，从而形成了更厚的润滑膜。结合图 4-1 和图 4-2 的分析结果，可以看出润滑脂在不同工作条件下的成膜特性受到卷吸速度和载荷的双重影响。对于低载荷（如 3 N）条件，由于接触区域内的压力不大，润滑脂的流动和成膜能力较弱，导致油膜形态不稳定。而当载荷增

大至一定值（如 9 N 及以上）时，润滑脂在接触区域内受到的压力显著增强，形成了典型的弹流油膜特征。此外，较高的卷吸速度能够进一步改善润滑脂的供给，油膜厚度也随之增加。

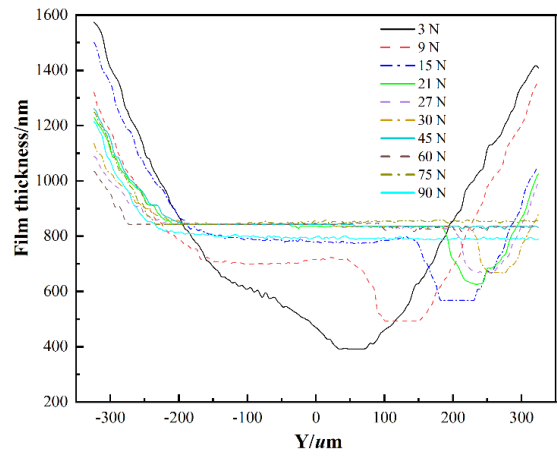


图 4-2 不同载荷的实际轮廓曲线图

表 4-1 各试验样品在不同卷吸速度、不同载荷下的油膜厚度

载荷(N)	膜厚(nm)		
	50 mm/s	300 mm/s	500 mm/s
3	77.688	214.778	395.511
9	111.4934	416.0294	555.258
15	114.782	350.893	583.18
21	113.87	473.36	655.696
27	107.461	449.954	750.468
30	121.3279	443.1339	745.205
45	112.187	493.97	746.934
60	110.219	425.948	752.808
75	111.5177	419.9127	774.084
90	123.7009	419.3249	778.073

4.2 热效应温度对润滑脂膜厚的影响

4.2.1 热效应 80℃ 时对润滑脂成膜能力的影响

图 4-3、图 4-4 和图 4-5 给出了各实验样品油膜干涉图随载荷（3 N~90 N）

的变化规律，反映了变载工况下各润滑样品的动态成膜性能。明显看出，载荷为 3 N 时，润滑脂膜不够稳定，随着载荷的增加膜厚逐渐稳定且接触面积越来越大。这和前面介绍的新鲜润滑脂样品的变化规律相似。说明热效应 80 °C 时对润滑脂膜厚的影响较小，和新鲜润滑脂比较无明显变化。图 4-3 展示了卷吸速度为 50 mm/s 时的油膜光干涉图。从图中可以观察到，油膜厚度较为稳定，且随着载荷的增加，接触面积相应增大，膜厚也随之增加。这表明在该工况下，油膜厚度对载荷变化具有一定的适应性。同时，热效应时间对油膜厚度的影响相对较小，说明在较短的热作用时间内，润滑脂的成膜能力能够保持相对稳定。

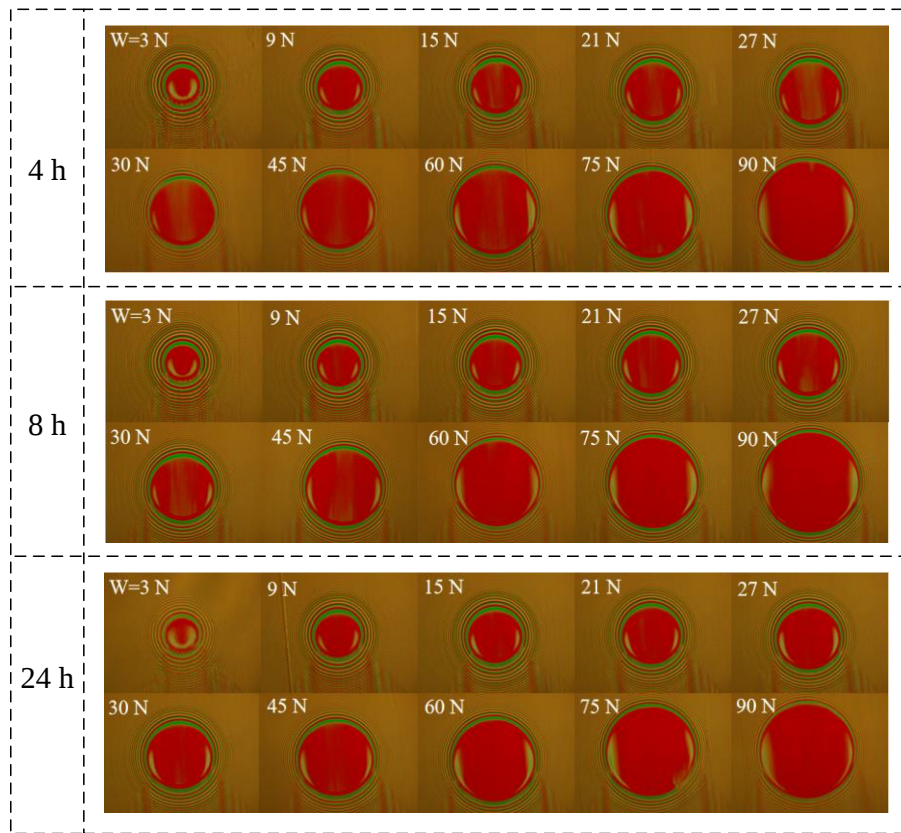


图 4-3 $U_e=50$ mm/s 实验样品的油膜光干涉图随载荷的变化情况

图 4-4 展示了卷吸速度为 300 mm/s 时的油膜光干涉图。图中呈现出典型的“马蹄形”弹流特征，表明润滑状态较为充分。此时，油膜厚度高于低卷吸速度（如 50 mm/s）工况下的膜厚，且随着载荷的增加，接触面积相应增大，进一步促使膜厚提升。图 4-5 展示了卷吸速度为 500 mm/s 时的油膜光干涉图。在该工况下，油膜厚度显著增加，表明润滑状态良好。高卷吸速度促使更多润滑剂流入接触区，从而在接触表面形成更厚的润滑膜，增强了润滑效果。进一步探究润滑脂膜厚的变化情况，图 4-6 给出了油膜干涉图中对应的润滑脂膜厚的具体数据。

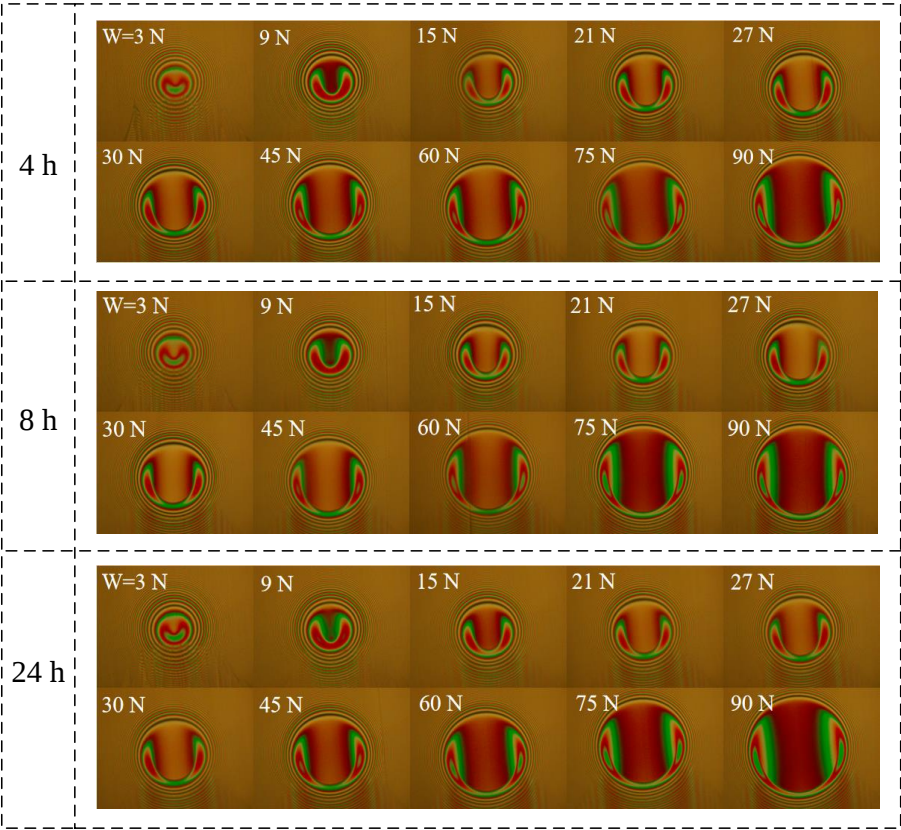


图 4-4 $U_e=300 \text{ mm/s}$ 实验样品的油膜光干涉图随载荷的变化情况

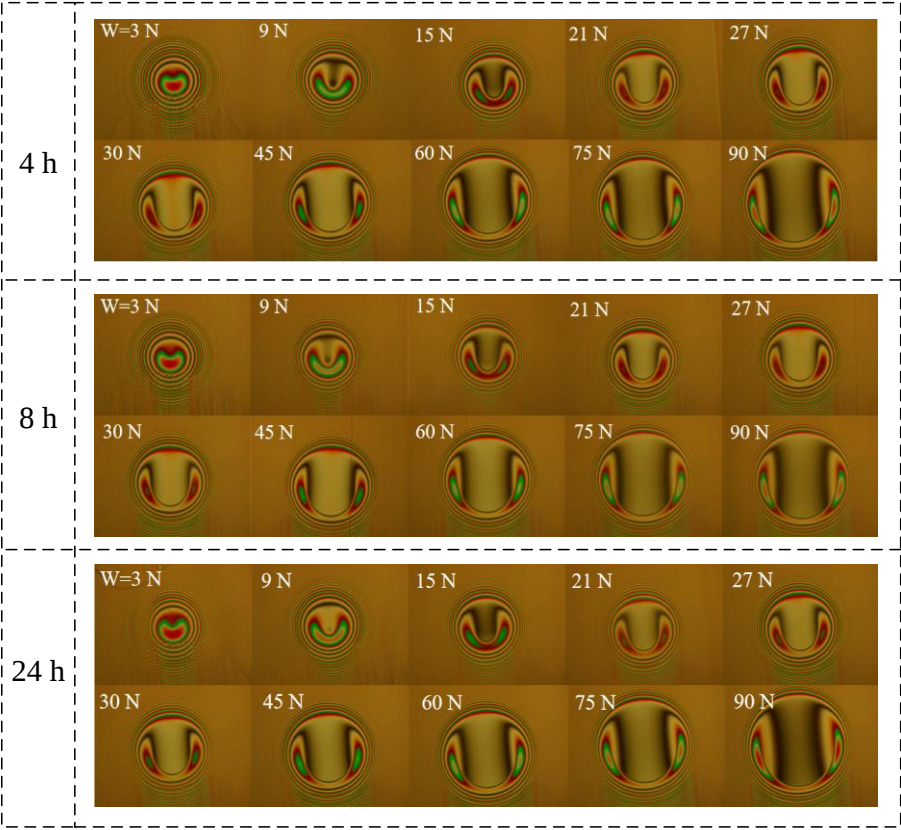


图 4-5 $U_e=500 \text{ mm/s}$ 实验样品的油膜光干涉图随载荷的变化情况

图 4-6 展示了不同热处理时间、卷吸速度和载荷条件下润滑脂最小油膜厚度的变化情况。通过对图中数据的分析可以发现，在所有实验条件下，最小油膜厚度随着载荷的增加呈现出先增加后趋于稳定的变化规律。这种趋势与新鲜润滑脂样品的表现相一致，表明无论是否经过热处理，润滑脂在低载荷条件下的油膜成膜能力较弱，但当载荷增加到一定程度后，油膜厚度逐渐趋于稳定，载荷对油膜厚度的进一步影响变得不显著。这种现象可归因于润滑脂在接触区域内的流动特性和润滑机理。初始载荷较小时，润滑脂在接触区域内的压缩和剪切作用不足，无法形成稳定的油膜。随着载荷的增加，润滑脂受到的压缩作用增强，弹性流体动力润滑（EHL）效应逐渐显现，导致油膜厚度显著增加。然而，当载荷达到一定阈值后，润滑脂的流动和形变已达到平衡状态，进一步增加载荷对油膜厚度的影响有限，因而油膜厚度趋于稳定。

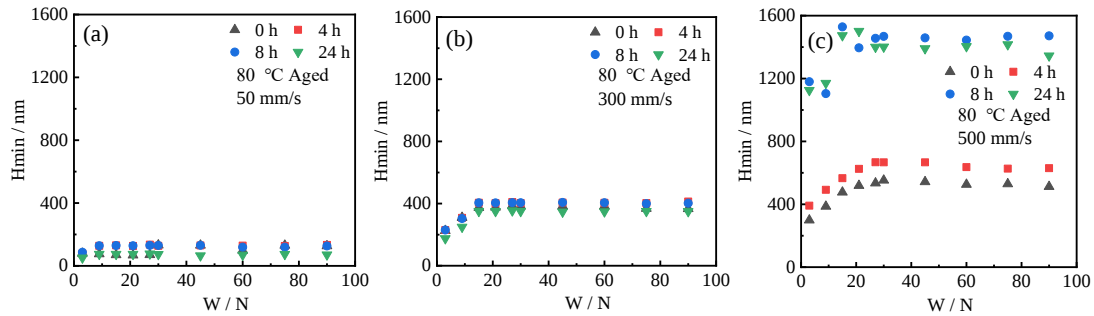


图 4-6 实验样品的油膜光干涉图对应膜厚曲线

图 4-6 给出了 80°C 下热作用不同时间后的最小膜厚实验结果，在 50 mm/s 的低卷吸速度下最小油膜厚度值非常接近，最小膜厚的最大值不超过 200 nm；在 300 mm/s 的中等卷吸速度下，最小油膜厚度呈先增加后基本保持不变的趋势，此时不同热处理时间下的膜厚值依旧非常接近，最小膜厚的最大值到达了 400 nm；在 500 mm/s 的高卷吸速度下，随着热作用时间的延长，润滑脂样品的最小膜厚值发生明显改变，最小膜厚的最大值超过 1200 nm。变化趋势由之前的先上升后不变转变为先上升后下降。这是因为此时速度较高，卷吸进入接触区的润滑脂越多，膜厚会随滚动速度的增加而增加。运行一段时间后，膜厚还是随滚动速度的增加而增加，但增加速率变慢，这是因为膜厚增加到一定值，形成稳定的压力，接触区充满润滑脂，更多的润滑脂将无法进入接触区，油膜厚度变化很小甚至会出现逐渐衰减的现象。

4.2.2 热效应 120°C 时对润滑脂成膜能力的影响

图 4-7、图 4-8 和图 4-9 给出了各实验样品油膜干涉图随载荷（3 N~90 N）的变化规律，反映的是变载工况下各润滑样品的动态成膜性能。可以看出低卷吸速度下，润滑脂变化情况和图 4-1 中的新鲜样品类似，表现出良好的成膜稳定性。然而，随着卷吸速度的增加，润滑脂的膜厚开始变得不稳定。这是由于热效应温度的增加导致其内部皂纤维结构发生变化，从而改变其膜厚的稳定性。润滑脂的皂纤维结构在润滑过程中起着关键作用，其缠结程度和稳定性直接影响润滑脂的成膜性能。在低速工况下，润滑脂的皂纤维结构能够较好地维持其初始状态，表现出与新鲜样品类似的成膜特性。然而，随着卷吸速度的提高，润滑脂内部的热效应加剧，导致皂纤维结构发生物理或化学变化从而改变膜厚的稳定性。

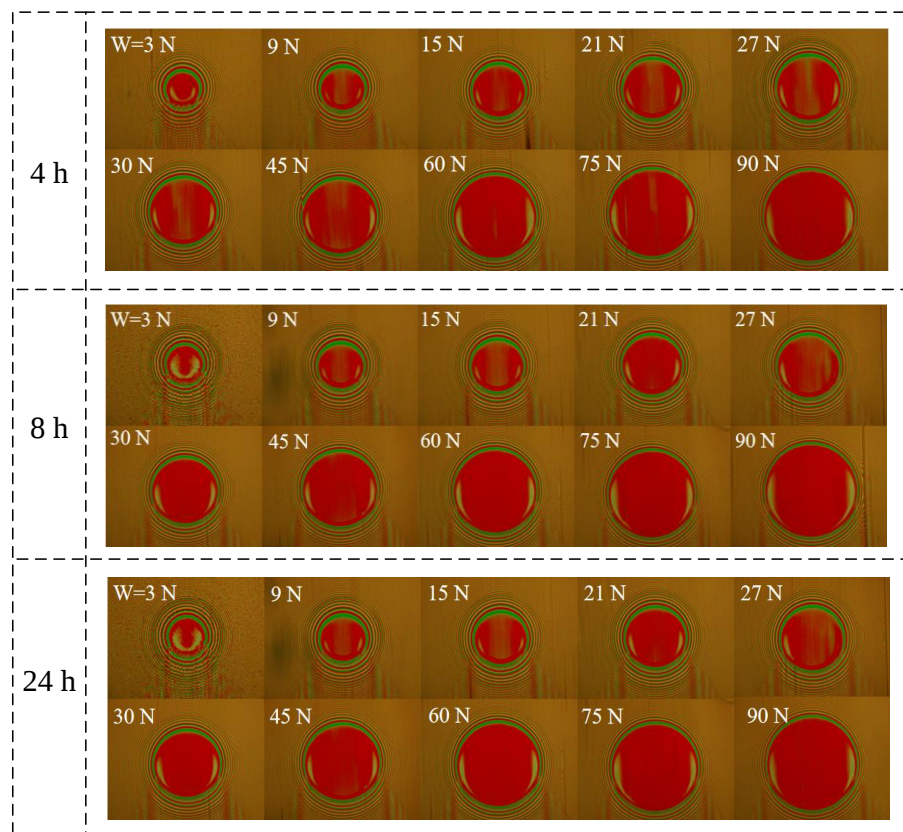


图 4-7 $U_e=50$ mm/s 实验样品的油膜光干涉图随载荷的变化情况

图 4-7 展示了卷吸速度为 50 mm/s 时的油膜光干涉图。与图 4-1 和图 4-3 对比发现变化情况高度一致，说明低卷吸速度下热效应温度和时间对膜厚的影响较小。究其原因，低卷吸速度导致基础油流入接触区的量相对较少，难以形成足够厚度的润滑膜，因此热效应对其膜厚的进一步影响也较为微弱。

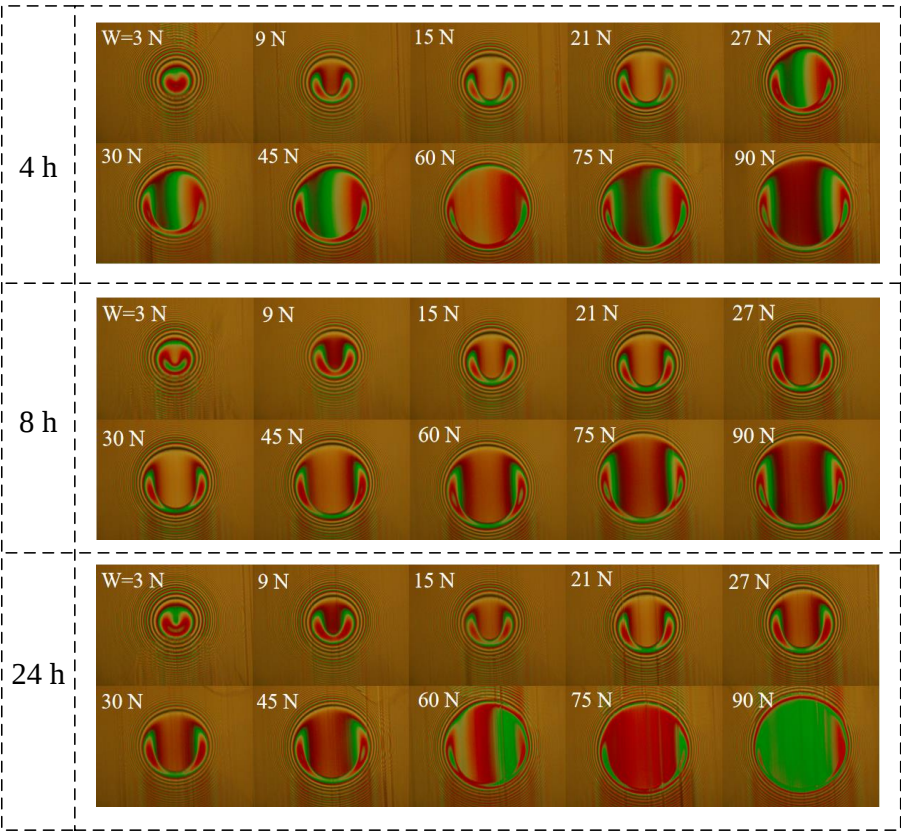


图 4-8 $U_e=300 \text{ mm/s}$ 实验样品的油膜光干涉图随载荷的变化情况

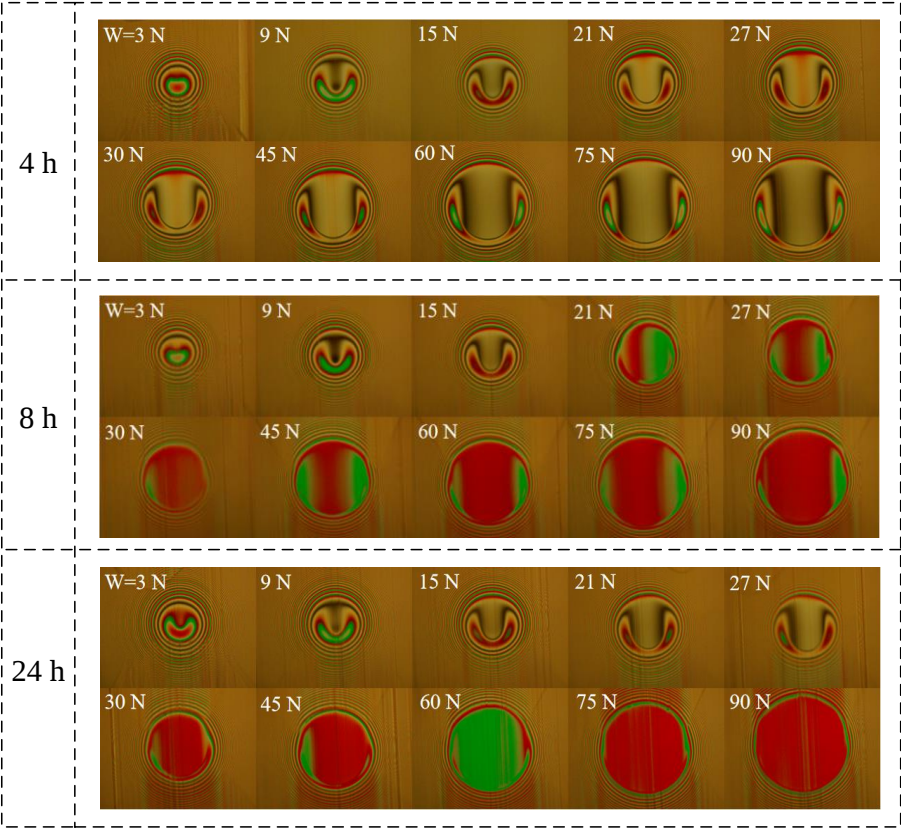


图 4-9 $U_e=500 \text{ mm/s}$ 实验样品的油膜光干涉图随载荷的变化情况

图 4-8 展示了卷吸速度为 300 mm/s 时的油膜光干涉图像。从图中可以观察到，油膜厚度随卷吸速度的增加而增大，但其稳定性呈现下降趋势。这种现象主要归因于热效应温度和作用时间的累积，导致润滑脂内部皂纤维结构发生剪切破坏，基础油析出量增加，从而引起膜厚波动和稳定性降低。膜厚也随之增加。

图 4-9 展示了卷吸速度为 500 mm/s 时的油膜光干涉图。通过观察可以发现，油膜厚度随卷吸速度的提升而显著增加，但随着热效应作用时间的延长，膜厚稳定性逐渐降低。

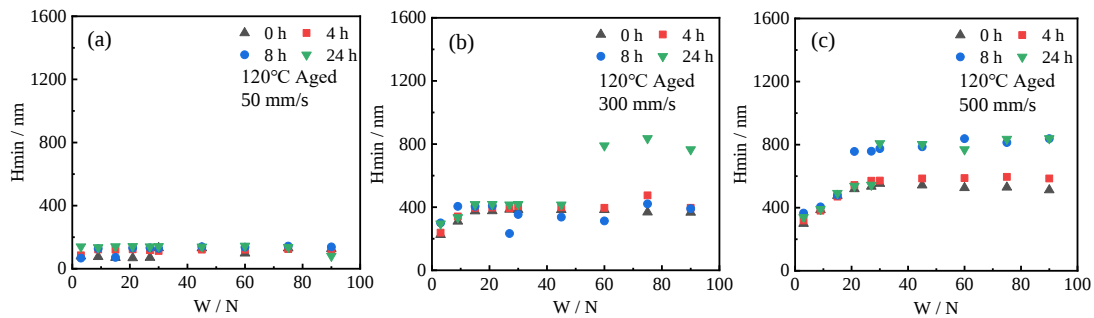


图 4-10 热效应 120°C 实验样品的油膜光干涉图对应膜厚曲线

图 4-10 给出 120°C 下热作用不同时间后的最小膜厚实验结果，在 50 mm/s 的低卷吸速度下，热处理 24 h 后最小油膜厚度值最大为 190 nm；在 300 mm/s 的中等卷吸速度下，最小膜厚的最大值达到了 800 nm，热处理时间仍然是 24 h；在 500 mm/s 的高卷吸速度下，最小膜厚的最大值为 800 nm。热处理 8 h 和 24 h 后，膜厚变化情况基本相同。高温热作用对润滑脂成膜产生了一定的影响，特别是在一定条件下，能够改善润滑脂的成膜性能，在较低温度的热作用、较高剪切速率下，这种影响效果尤为明显。

4.2.3 热效应 150°C 时对润滑脂成膜能力的影响

图 4-11、图 4-12 和图 4-13 给出了各实验样品油膜干涉图随载荷(3 N~90 N)的变化规律，反映的是变载工况下各润滑样品的动态成膜性能。可以明显看出，随着热效应时间的增加，膜厚出现明显变化。当热效应时间较短时，润滑脂的膜厚变化趋势与新鲜样品相似，表现出良好的成膜稳定性和触变性能。然而，随着热效应时间的延长，润滑脂的膜厚开始出现不稳定的情况。这是因为在长时间高温作用下，润滑脂内部的皂纤维结构发生了不可逆的破坏。皂纤维结构在高温下逐渐失去其原有的缠结状态和恢复性能，导致润滑脂的流变特性和成膜能力下降。

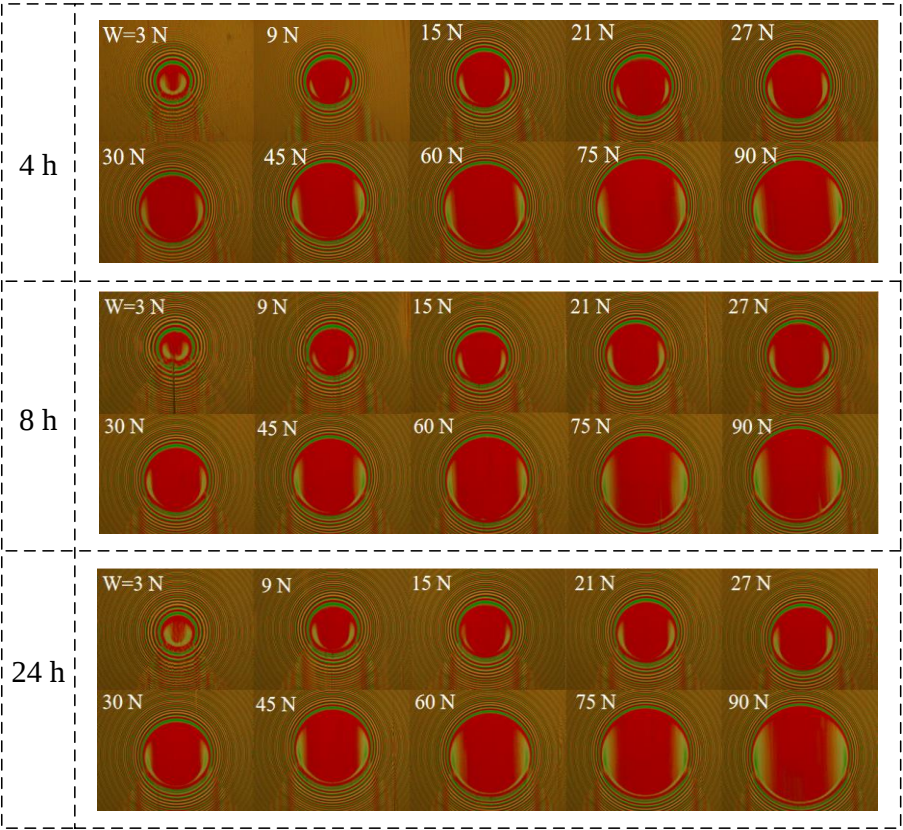


图 4-11 $U_e=50 \text{ mm/s}$ 实验样品的油膜光干涉图随载荷的变化情况

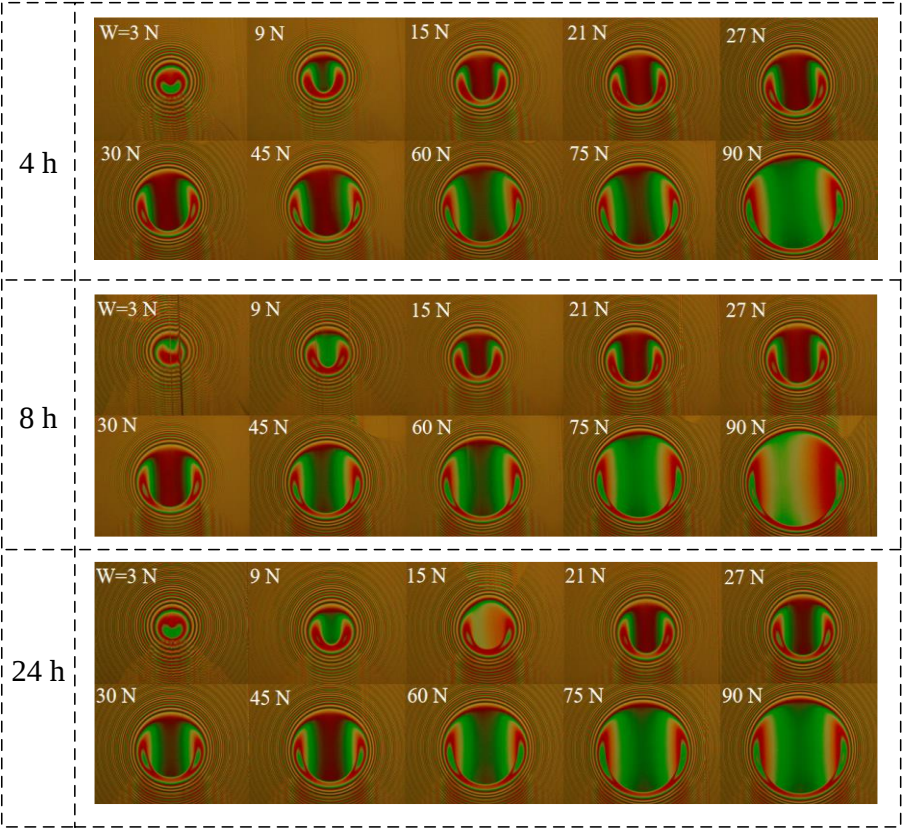


图 4-12 $U_e=300 \text{ mm/s}$ 实验样品的油膜光干涉图随载荷的变化情况

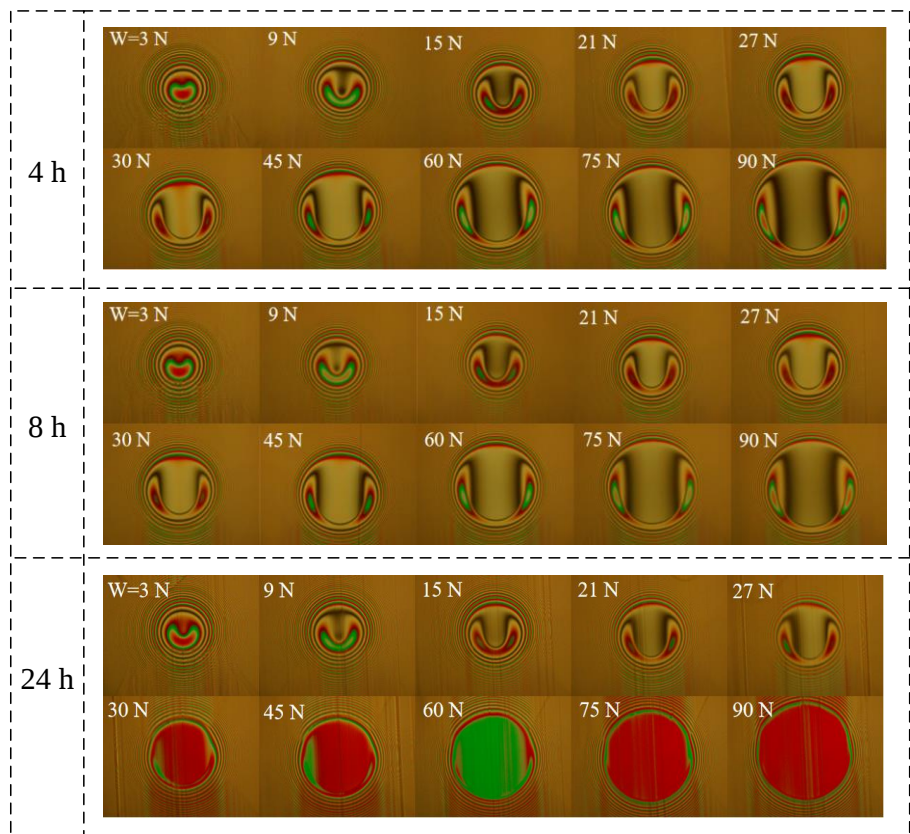


图 4-13 $U_e=500 \text{ mm/s}$ 实验样品的油膜光干涉图随载荷的变化情况

图 4-11 展示了卷吸速度为 50 mm/s 时的油膜光干涉图像。可以看出其变化趋势与图 4-1 相似，此时润滑脂膜表现出较高的稳定性，且热效应对膜厚的影响相对较小。图 4-12 为卷吸速度提升至 300 mm/s 时的油膜光干涉图像，随着卷吸速度的增加膜厚显著增大。图 4-13 进一步展示了卷吸速度为 500 mm/s 时的油膜光干涉图像，随着热效应作用时间的延长，膜厚出现明显的不稳定现象，表明高温和剪切作用对润滑脂膜的结构和性能产生了显著影响。

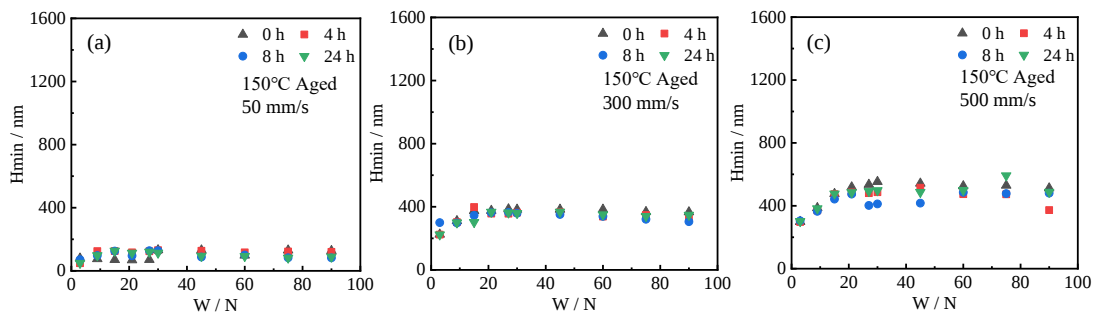


图 4-14 热效应 150°C 实验样品的油膜光干涉图对应膜厚曲线

图 4-14 给出 150°C 下热作用不同时间后的最小膜厚实验结果，在 50 mm/s 的低卷吸速度下，最小膜厚的最大值为 180 nm ；在 300 mm/s 的中等卷吸速度下，

最小膜厚的最大值为 400 nm；在 500 mm/s 的高卷吸速度下，最小膜厚的最大值为 480 nm。此时可以发现，热效应对膜厚的影响较小，随着热效应时间的增加，膜厚基本不发生变化。

从图 4-3 到图 4-14 中不同实验条件的对比结果可以看出，润滑脂最小油膜厚度的变化受载荷、卷吸速度和热处理条件的综合作用影响。低载荷和低卷吸速度条件下，润滑脂成膜能力较弱，油膜厚度不稳定；而在高载荷和高卷吸速度条件下，润滑脂能够形成更稳定且较厚的油膜，从而有效降低摩擦表面间的接触压力，减少磨损和能量损失。

4.3 热作用时间对润滑脂膜厚的影响

图 4-15、图 4-16 和图 4-17 展示了在卷吸速度为 500 mm/s 时，不同热效应时间下润滑脂膜厚的变化情况。可以看出，润滑脂膜厚在初始阶段会随着热效应时间的增加而有所增长，但随后会趋于稳定。这种现象与之前关于载荷对润滑脂膜厚影响的研究结果一致。随着热效应温度的升高，润滑脂膜厚曲线整体呈现下降趋势。当热效应温度达到 80℃ 时，润滑脂膜厚达到最大值。这表明，温度升高会破坏润滑脂内部的纤维结构，从而提高基础油的流动性能。

图 4-15 展示了热效应 4 h 后，在不同温度条件下润滑脂膜厚随载荷变化的曲线图。在低载荷区间，三种不同温度下的膜厚曲线几乎完全重合，呈现出一种明显的线性增加趋势。这说明在较低载荷作用下，润滑脂膜厚对载荷变化的响应较为敏感，且不同温度对润滑脂膜厚的影响差异不大。润滑脂的纤维结构在这一阶段能够较好地适应载荷的变化，基础油的流动性能也相对稳定，使得膜厚能够随着载荷的增加而线性增长。然而，当载荷逐渐增大时，膜厚曲线趋于平稳，不再随载荷的增加而发生显著变化。这是因为在较高载荷下，润滑脂内部的纤维结构已经达到了其承载的极限状态，进一步增加载荷时，纤维结构无法再发生显著的变形或破坏，导致膜厚不再增加。此外，润滑脂的触变性也可能在一定程度上抑制了膜厚的进一步变化。在高载荷下，润滑脂内部的纤维结构可能会发生重组或重新排列，以适应载荷的变化，从而在一定程度上保持膜厚的稳定。同时，润滑脂的基础油在高载荷下可能会受到更大的剪切作用，但其流动性变化对膜厚的影响相对较小，因为润滑脂的纤维结构在一定程度上限制了基础油的流动。

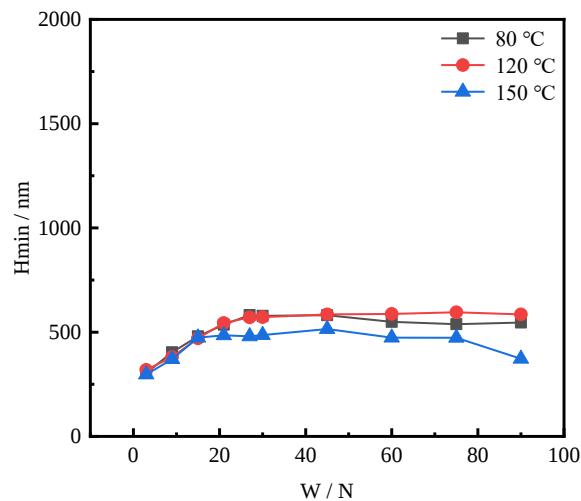


图 4-15 热效应 4 h 各温度条件下膜厚随载荷变化曲线

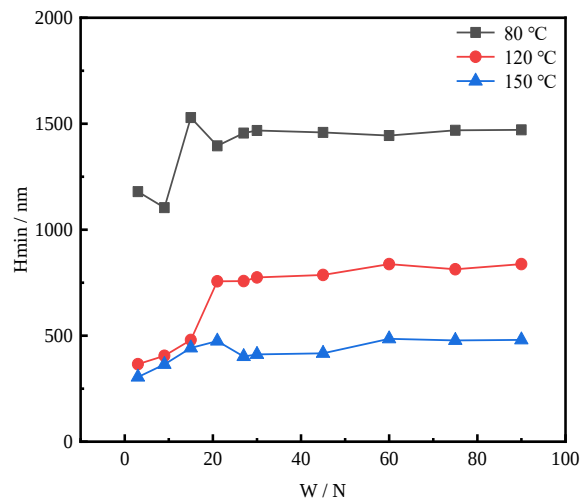


图 4-16 热效应 8 h 各温度条件下膜厚随载荷变化曲线

图 4-16 展示了热效应 8 h 后，在不同温度下润滑脂膜厚随载荷变化的曲线图。与图 4-15 相比，可以看出在相同温度条件下，8 h 后的膜厚曲线整体位置有所上升，即在相同载荷下，润滑脂膜厚的值相对较大。这表明随着热效应时间的延长，润滑脂内部的纤维结构可能发生了某种程度的松弛或重组，使得基础油更容易在接触区域形成更厚的润滑膜。同时，不同温度下的膜厚曲线在低载荷时仍然基本重合，呈线性增加；但在高载荷时，膜厚同样趋于稳定，不再随载荷的增加而显著变化，这一变化规律与图 4-15 保持一致。

图 4-17 则是热效应 24 h 后，在不同温度下润滑脂膜厚随载荷变化的曲线图。从图中可以明显看出，24 h 后的膜厚曲线整体位置进一步上升，即在相同载荷和温度条件下，润滑脂膜厚的值比热处理 4 h 要大。这进一步说明，随着热效应时

间的不断增加, 润滑脂内部的纤维结构和基础油的相互作用发生了更为显著的变化, 导致润滑脂的润滑性能在一定程度上得到了增强。然而, 与前两个图相同的是, 不同温度下的膜厚曲线在低载荷时基本重合且呈线性增加, 在高载荷时膜厚趋于稳定, 不再随载荷的增加而发生显著变化, 这一规律在不同热效应时间下均保持一致。

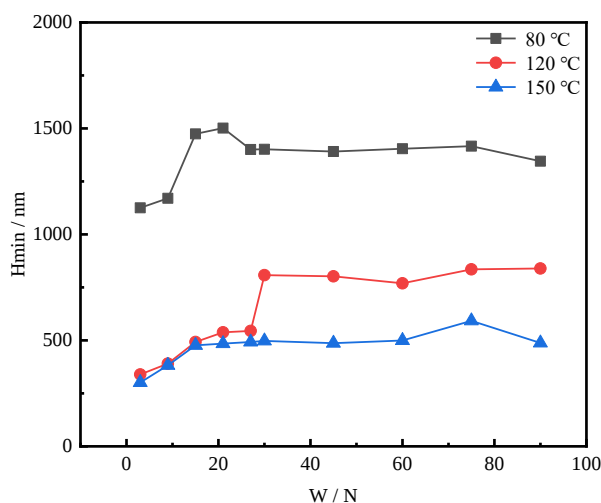


图 4-17 热效应 24 h 各温度条件下膜厚随载荷变化曲线

值得注意的是, 虽然 8 h 和 24 h 的最小膜厚的最大值均高于 4 h, 但这并不意味着润滑脂的性能在热效应时间延长后一定更好。实际上, 这可能是由于润滑脂内部结构在长时间热效应下发生了复杂的变化, 导致其在不同载荷和温度条件下的润滑特性发生了改变。在实际应用中, 需要综合考虑润滑脂的承载能力、膜厚稳定性以及润滑性能等多个因素, 以确定最佳的润滑脂使用条件和热处理时间。

4.4 热作用对润滑脂成膜的影响规律

高温热作用对润滑脂成膜性能的影响是一个复杂且多因素耦合的过程, 其影响机制不仅与温度、剪切速率等外部条件密切相关, 还取决于润滑脂内部的结构特性。研究表明, 在一定条件下, 高温热作用能够显著改善润滑脂的成膜性能, 尤其是在较低温度热作用与较高剪切速率协同作用下, 这种改善效果更为显著。这是因为在热效应和剪切力的共同作用下, 润滑脂内部的皂纤维结构会发生部分破坏, 促使基础油从皂纤维网络中释放出来, 从而在摩擦表面形成更为均匀且稳定的润滑油膜。

（1）载荷对润滑脂膜厚的影响

不同载荷下，润滑脂膜厚度的变化主要受到弹流润滑理论的影响。随着载荷的增加，润滑脂膜厚度会有所减小，但这种减小幅度较小。这是因为载荷增加导致接触表面的弹性变形和润滑脂的粘度效应增强，从而抵消了部分膜厚的减小。实验结果表明，在一定范围内，载荷的增加会导致润滑脂膜厚度的变化幅度增大。

（2）卷吸速度对润滑脂膜厚的影响

卷吸速度对润滑脂膜厚度的影响主要体现在润滑脂的流变特性上。随着卷吸速度的增加，润滑脂的剪切速率也随之增加，从而影响润滑脂的流变行为。对于剪切变稀的润滑脂，卷吸速度的增加会导致润滑脂膜厚度减小。实验研究表明，不同卷吸速度下，润滑脂膜厚度随速度的变化规律基本一致，即速度越高，膜厚越薄。这种现象可以通过润滑脂的非牛顿性和流变指数的变化来解释。

（3）热效应时间和温度对润滑脂膜厚的影响

热效应时间和温度对润滑脂膜厚度的影响主要体现在润滑脂的粘度变化上。随着温度的升高，润滑脂的粘度会降低，从而导致润滑脂膜厚度减小。此外，热效应时间的增加也会导致润滑脂膜厚度的变化。实验研究表明，在高温条件下，润滑脂膜厚度随时间的变化幅度较大，温度越高，膜厚减小越显著。这是因为高温加速了润滑脂的热降解和流变特性的变化。

润滑脂润滑成膜机理是一个复杂的过程，Cann^[96]提出的润滑填充机理表明，脂润滑过程中滚动轴承接触区的润滑过程，润滑脂承受剪切作用，结构体系内皂纤维结构被剪断后，基础油被释放出来进行回流填充，进而促进润滑油膜的形成。对于脂润滑而言，润滑脂的结构体系在其成膜过程中起着至关重要的作用。润滑脂的皂纤维网络结构决定了其基础油的保持能力和释放特性，而这些特性又直接影响了润滑膜的厚度和稳定性。因此，研究高温热效应对润滑脂成膜机理的影响，必须结合其结构体系的变化进行深入分析。

4.5 本章小结

在本章中，采用锂基润滑脂经过静态热处理后得到的样品进行了一系列实验，以探究热处理对润滑脂膜厚的影响。实验中使用了光弹流润滑油膜测量仪对不同样品进行膜厚测量。该仪器能够精确测量润滑膜的厚度和形状，为研究提供了可

靠的数据支持。研究结果如下：

（1）高温热作用会对润滑脂成膜性能产生影响。在低于其最高服役温度下，润滑脂成膜性能并未受到影响。在高卷吸速度下，呈现出膜厚增加的变化趋势。

（2）随着热作用温度的提高，润滑脂结构体系的恢复性能变差，进而影响润滑脂的成膜性能，高温热作用下润滑脂成膜性能明显弱于低温热作用后润滑脂样品的成膜性能。

（3）润滑脂静态热处理 80℃、热处理时间为 8 h 和 24 h 时，润滑脂膜厚最大，此时润滑脂的润滑效果最佳。

第5章 润滑脂流变和成膜行为关联性研究

润滑脂的流变与成膜行为之间存在着紧密且相互影响的关联。润滑脂的屈服应力影响其初始流动和成膜速度，屈服应力低的润滑脂能更快铺展成膜，减少摩擦副干摩擦时间。触变性使润滑脂在摩擦副运动时粘度降低，便于成膜。运动停止后粘度恢复，维持膜的稳定。流变指数和塑性粘度也至关重要，流变指数小的润滑脂剪切变稀明显，易于成膜；塑性黏度大的润滑脂承载能力强，能保持膜的完整性。润滑脂的微观结构决定了其流变特性，进而影响成膜的均匀性和稳定性。反过来，成膜行为也会影响润滑脂的流变性，较厚稳定的润滑膜使流变特性稳定，而膜厚变化或稳定性下降则会导致流变参数如黏度、屈服应力等改变，二者相互作用，共同决定了润滑脂在实际工况下的润滑效果和使用寿命。

5.1 流变与成膜关联性分析方法

本节探究润滑脂损耗因子随温度的变化规律，以研究温度对其粘弹特性的影响规律。结合 Martin-Alfonso 等^[97]的研究内容，皂纤维缠结程度受纤维硬化、持续剪切和热效应等混合影响，可以通过平台模量（ G_N^0 ，Pa）来描述，润滑脂平台模量可以通过频率扫描实验数据，利用外推法直接获得，具体方法如式（5-1）：

$$G_N^0 = [G']_{\tan\delta \rightarrow \text{minimum}} \quad (5-1)$$

式中， $\tan\delta$ 为损耗因子，损耗因子的数值为损耗模量和储能模量的比值，润滑脂平台模量的数值等于在损耗因子取得最小值时润滑脂的储能模量数值。

依据公式可得，平台模量的数值是当润滑脂的损耗因子达到最小时所对应的储能模量数值，图 5-1 给出了一组数据的平台模量推算方法，各温度下润滑脂平台模量的获得方法均通过该方法获得。通过频率扫描实验获取储能模量和损耗因子随频率变化的曲线，然后确定损耗因子最小值对应的频率点，最后读取该频率点对应的储能模量值作为平台模量。本研究采用这一标准方法，系统测定了不同温度条件下润滑脂的平台模量，为分析温度对润滑脂微观结构稳定性的影响提供了定量依据。

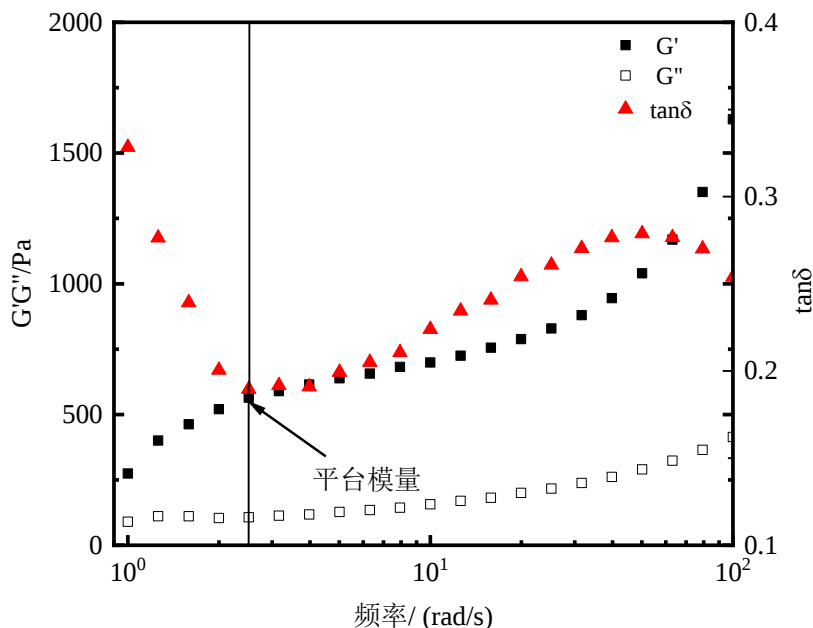


图 5-1 平台模量推算方法

图 5-2 给出了不同实验条件下各样品平台模量的变化曲线。(a)为热效应 80°C 时,不同热效应时间和不同实验温度下的平台模量曲线;(b)为热效应 120°C 时,不同热效应时间和不同实验温度下的平台模量曲线;(c)为热效应 150°C 时,不同热效应时间和不同实验温度下的平台模量曲线。从宏观角度出发,可以发现平台模量基本上是呈先上升达到峰值后再下降的变化趋势。峰值普遍出现在实验温度为 40°C 时,说明此时润滑脂皂纤维的缠结结构最紧密,润滑脂流动过程中所受到的阻力最大。随着温度的进一步升高,平台模量逐渐下降,皂纤维的缠结结构被破坏导致缠结程度下降,承受剪切过程中流动阻力变小。

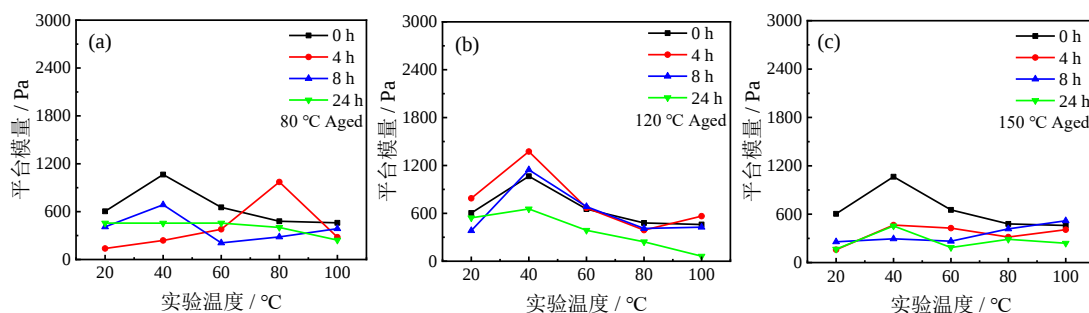


图 5-2 不同高温热效应时间和温度下的平台模量变化曲线

图 5-2(a)为高温热效应 80°C , 热处理时间为 0 h、4 h、8 h 和 24 h 的平台模量曲线图。新鲜润滑脂样品的平台模量曲线先上升后下降,说明高温热效应会影响润滑脂内部的皂纤维结构以及流动特性。当实验温度大于 40°C 时,新鲜样品

的平台模量随着温度的上升不断下降,也就是说润滑脂内部的纤维结构缠结程度下降,承受的流动阻力变小。静态热处理 4 h 后得到的样品,变化趋势与新鲜样品相同;实验温度在 20℃~80℃ 之间时,平台模量逐步上升。静态热处理 8 h 后得到的样品,在实验温度 60℃ 时出现谷值,此时润滑脂承受的流动阻力最小。静态热处理 24 h 后得到的样品,其流动特性比较稳定,平台模量基本保持不变。当温度大于 80℃ 时,平台模量出现轻微下降。图 5-2(b)为高温热效应 120℃ 时,热处理 0 h、4 h、8 h 和 24 h 的平台模量曲线图。四条曲线的变化趋势基本相同,当实验温度大于 40℃ 时,平台模量开始下降。图 5-2(c)为高温热效应 150℃ 时,热处理 0 h、4 h、8 h 和 24 h 的平台模量曲线图,可以发现润滑脂经过静态热处理之后,平台模量比新鲜样品更低。说明热处理之后的润滑脂内部纤维结构发生改变,同时受到的流动阻力随之减小。

5.2 流变参数与膜厚关联性分析

润滑脂的流变参数是定量表征其流变特性的关键指标,为深入理解润滑脂在不同工况下的流动与变形行为提供了重要依据。通过精确测量和计算这些参数,能够系统评估润滑脂的力学响应特性,从而为其性能优化和应用选型奠定科学基础。在本研究中,基于式(5-2)对润滑脂的流变特性进行了详细分析与计算,并将实验数据代入该公式,精确获得了表 5-1、表 5-2 和表 5-3 中的相关数据,为后续研究提供了可靠的定量支持。这些数据不仅反映了润滑脂在不同剪切应力、剪切应变和温度条件下的流变行为,还为后续的性能优化提供了关键的参考信息。

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n \quad (5-2)$$

式中, τ 为剪切应力,单位为 Pa; τ_0 为剪切屈服应力,单位为 Pa; k 为稠度系数,单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$, $\dot{\gamma}$ 为剪切速率,单位为 s^{-1} ; n 为剪切稀化指数。如表 5-1、表 5-2 和表 5-3 所示。

表 5-1 热处理 80℃ 不同温度和时间下 H-B 模型参数

温度/℃	流变参数	热效应时间/h			
		0 h	4 h	8 h	24 h
20	屈服应力/Pa	20.61	6.48	16.57	20.76
	稠度系数/Pa s ⁿ	19.00	8.90	16.31	18.52
	剪切稀化指数	0.36	0.28	0.32	0.40
40	屈服应力/Pa	31.47	10.00	21.93	5.09
	稠度系数/Pa s ⁿ	29.09	10.16	25.23	20.57
	剪切稀化指数	0.29	0.28	0.27	0.28
60	屈服应力/Pa	16.00	14.97	10.16	20.89
	稠度系数/Pa s ⁿ	40.90	12.93	9.90	15.86
	剪切稀化指数	0.22	0.26	0.27	0.28
80	屈服应力/Pa	0.01	5.13	0.01	0.01
	稠度系数/Pa s ⁿ	35.72	54.83	28.52	46.87
	剪切稀化指数	0.14	0.13	0.18	0.15
100	屈服应力/Pa	0.01	0.01	0.01	0.01
	稠度系数/Pa s ⁿ	63.60	27.29	36.36	26.44
	剪切稀化指数	0.10	0.14	0.12	0.15

表 5-2 热处理 120℃ 不同温度和时间下的 H-B 模型参数

温度/℃	流变参数	热效应时间/h			
		0 h	4 h	8 h	24 h
20	屈服应力/Pa	20.61	11.53	15.26	26.05
	稠度系数/Pa s ⁿ	19.00	58.25	17.91	26.62
	剪切稀化指数	0.36	0.22	0.37	0.35
40	屈服应力/Pa	31.47	0.01	35.23	20.66
	稠度系数/Pa s ⁿ	29.09	100.76	46.38	37.85
	剪切稀化指数	0.29	0.12	0.22	0.23
60	屈服应力/Pa	16.00	17.66	18.31	14.47

续表 5-2

	稠度系数/ Pa s^n	40.90	35.72	40.64	12.05
	剪切稀化指数	0.22	0.21	0.22	0.30
	屈服应力/ Pa	0.01	0.01	0.01	0.01
80	稠度系数/ Pa s^n	35.72	37.26	26.33	30.92
	剪切稀化指数	0.14	0.14	0.15	0.15
	屈服应力/ Pa	0.01	0.01	0.01	0.01
100	稠度系数/ Pa s^n	63.60	88.46	78.73	10.68
	剪切稀化指数	0.10	0.11	0.08	0.16

表 5-3 热处理 150°C 不同温度和时间下的 H-B 模型参数

温度/ $^\circ\text{C}$	流变参数	热效应时间/h			
		0 h	4 h	8 h	24 h
20	屈服应力/ Pa	20.61	6.48	16.57	20.76
	稠度系数/ Pa s^n	19.00	8.90	16.31	18.52
	剪切稀化指数	0.36	0.28	0.32	0.40
40	屈服应力/ Pa	31.47	10.00	21.93	5.09
	稠度系数/ Pa s^n	29.09	10.16	25.27	20.57
	剪切稀化指数	0.29	0.28	0.27	0.28
60	屈服应力/ Pa	16.00	12.38	9.70	-3.5
	稠度系数/ Pa s^n	40.90	19.55	15.01	24.57
	剪切稀化指数	0.22	0.22	0.24	0.16
80	屈服应力/ Pa	0.01	0.01	0.01	0.01
	稠度系数/ Pa s^n	35.72	44.84	33.52	49.69
	剪切稀化指数	0.14	0.13	0.14	0.11
100	屈服应力/ Pa	0.01	0.01	0.01	0.01
	稠度系数/ Pa s^n	63.60	31.51	77.69	32.00
	剪切稀化指数	0.10	0.14	0.11	0.13

图 5-3、图 5-4 和图 5-5 是通过流变参数以及润滑脂油膜厚度相结合的曲线

图,反映了不同热效应时间和温度下的润滑脂样品剪切屈服应力、稠度系数以及剪切稀化指数的变化情况。图 5-3 展示了在不同热效应时间和温度条件下,剪切屈服应力与油膜厚度的变化曲线。从图中可以明显观察到,随着热效应温度的升高,剪切屈服应力和油膜厚度均呈现出先上升后下降的趋势。这一现象可以从热效应对润滑脂结构和性能的影响角度进行解释。当温度升高时,润滑脂中的皂纤维结构会发生变化,导致其剪切屈服应力和油膜厚度发生变化。在初始阶段,温度的升高可能使润滑脂的皂纤维结构更加紧密,从而提高剪切屈服应力和油膜厚度;然而,当温度进一步升高时,皂纤维结构可能会因热老化而逐渐解体,导致润滑性能下降。此外,随着热效应时间的增加,剪切屈服应力和油膜厚度均表现出短暂下降后又上升的趋势。这种变化规律可能与润滑脂的皂纤维结构在长时间热作用下的动态变化有关。在热效应初期,皂纤维结构可能因热应力而发生部分解缠,导致剪切屈服应力和油膜厚度短暂下降。然而,随着时间的延长,基础油的析出量增加,油膜厚度逐渐增大,从而使得润滑性能得到一定程度的恢复。这种现象也与润滑脂在热老化过程中的皂纤维缠结程度和恢复性能有关。

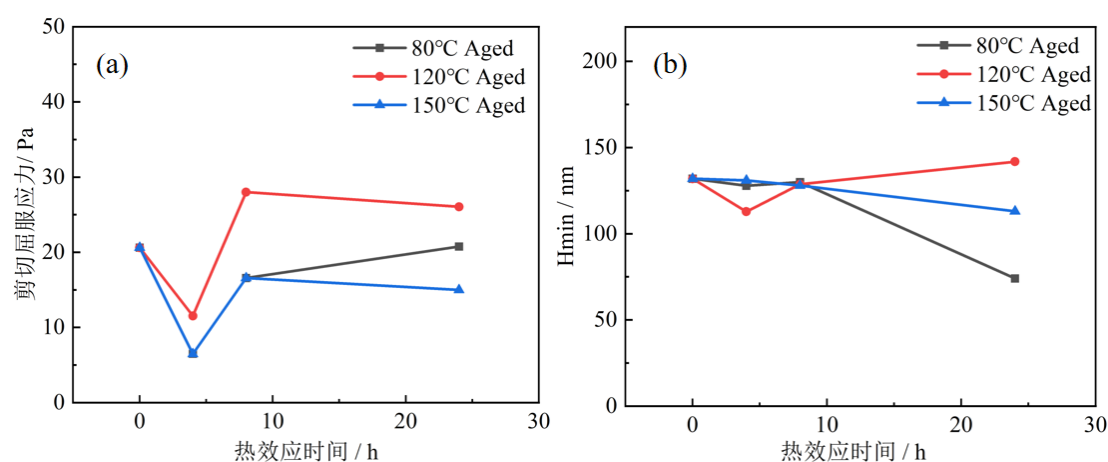


图 5-3 不同热效应时间及温度下剪切屈服应力与油膜厚度曲线

(a)不同热效应时间及温度下剪切屈服应力曲线; (b)不同热效应时间及温度下膜厚曲线

图 5-4 展示了不同热效应时间和温度条件下润滑脂的稠度系数与油膜厚度的变化曲线。从图中可以观察到,在热效应作用 4 h 时,稠度系数出现了一个明显的谷值。随后,随着热效应时间的进一步增加,稠度系数逐渐上升。这一现象表明,润滑脂的稠度系数对热效应时间具有显著的依赖性。稠度系数的变化反映了润滑脂内部结构在热效应下的动态演变。在热效应初期,润滑脂的皂

纤维结构可能因热应力而发生部分解缠或松散，导致其增稠能力下降，从而使得稠度系数降低。随着热效应时间的延长，皂纤维结构逐渐重新排列或部分恢复，使得润滑脂的增稠能力增强，稠度系数也随之上升。

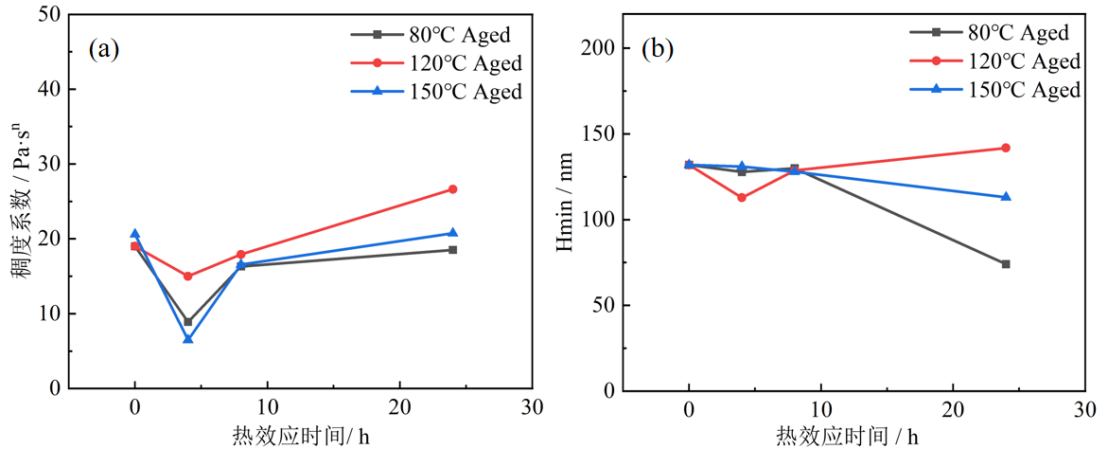


图 5-4 不同热效应时间及温度下稠度系数与油膜厚度曲线

(a)不同热效应时间及温度下稠度系数曲线；(b)不同热效应时间及温度下膜厚曲线

从图 5-4 中还可以看出，油膜厚度的变化与稠度系数的变化趋势一致，表明稠度系数的变化直接影响了油膜的形成和稳定性。当稠度系数降低时，油膜厚度可能因润滑脂的增稠能力下降而变薄；而稠度系数增加时，油膜厚度则相应增加，从而提高了润滑脂的润滑性能。

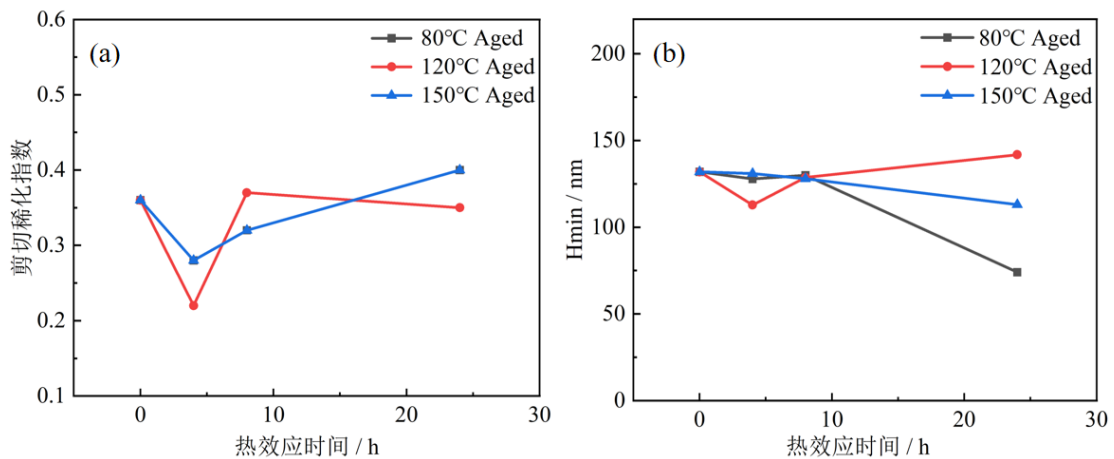


图 5-5 不同热效应时间及温度下剪切稀化指数与油膜厚度曲线

(a)不同热效应时间及温度下剪切稀化指数曲线；(b)不同热效应时间及温度下膜厚曲线

图 5-5 展示了在不同热效应时间和温度条件下润滑脂的剪切稀化指数与油膜厚度的变化曲线。从图中可以看出，当热效应温度分别为 80°C 和 150°C 时，

润滑脂的剪切稀化指数曲线完全重合，这表明在该温度范围内，润滑脂的剪切稀化行为不受温度影响。随着热效应时间的增加，润滑脂的剪切稀化指数呈现出先减小后增加的趋势。在热效应时间较短时，剪切稀化指数的减小表明润滑脂的粘度增大，油膜厚度减小。这是因为在初期，润滑脂中的分子结构在热效应下逐渐发生变化，导致其内部的分子间作用力增强，从而使得粘度上升，油膜厚度变薄。然而，当热效应时间持续增加时，剪切稀化指数逐渐增大，粘度下降，油膜厚度增加。这一现象可能是由于润滑脂在长时间的热效应下发生了结构上的重新排列或部分降解，导致其粘度降低，油膜厚度相应增加。这种变化对于润滑脂的润滑性能具有重要意义，因为油膜厚度的变化直接影响润滑脂在机械部件中的润滑效果和使用寿命。

5.3 结构体系与膜厚关联性分析

图 5-6 到图 5-10 详细描绘了在不同热老化时间和温度条件下，润滑脂的储能模量 (G') 与损耗模量 (G'') 随频率扫描变化的曲线图。通过仔细观察这些曲线图，可以发现润滑脂的储能模量和损耗模量在整体上呈现出随着环境温度升高而先上升后下降的趋势。这一现象表明，润滑脂在不同温度条件下的力学性能会发生显著变化，其内部结构对温度变化十分敏感。

在温度较低时，润滑脂的内部结构相对较为紧密，皂纤维之间的相互作用较强，因此储能模量和损耗模量相对较高。随着温度的逐渐升高，润滑脂内部的分子运动加剧，皂纤维结构开始发生一定程度的松散和重组，这使得润滑脂的储能模量和损耗模量有所上升，反映出其在这一温度区间内弹性变形和塑性变形的能力有所增强。然而，当温度继续升高超过一定阈值后，润滑脂内部的皂纤维结构可能遭受较为严重的破坏，导致其整体结构稳定性下降，储能模量和损耗模量也随之下降。这说明润滑脂在高温环境下，其内部结构的完整性难以维持，力学性能逐渐变差。进一步分析可以看出，随着热老化时间的不断增加，润滑脂的储能模量和损耗模量上升的幅度逐渐降低。这表明热老化行为对润滑脂的性能产生了显著影响。在热老化过程中，润滑脂内部的皂纤维结构不断受到热效应的破坏，其结构逐渐变得松散，分子间的相互作用减弱。这使得润滑脂在剪切过程中弹性变形产生的储存能量（即储能模量所反映的能量）以及塑性变形产生的损耗能量

(即损耗模量所反映的能量)都受到了抑制,上升幅度降低。从宏观角度来看,润滑脂的粘度在热老化过程中逐渐变低,流动性能得到增强。这是因为皂纤维结构的破坏使得润滑脂内部的阻力减小,分子之间的相对运动更加容易,从而提高了润滑脂的流动性。

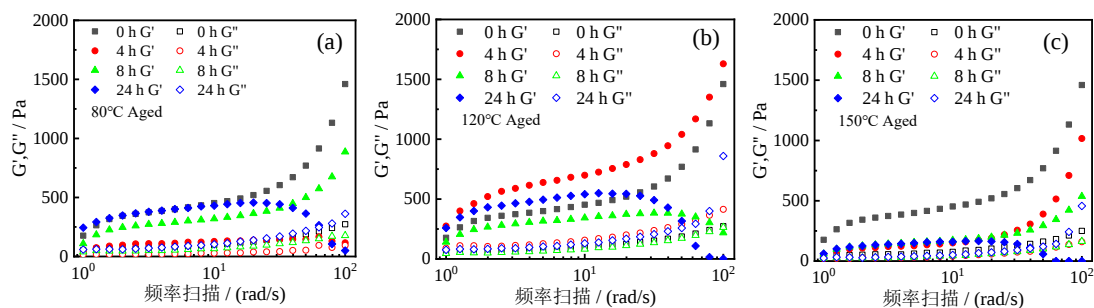


图 5-6 实验温度 20°C 下各热老化时间和温度下润滑脂频率扫描曲线图

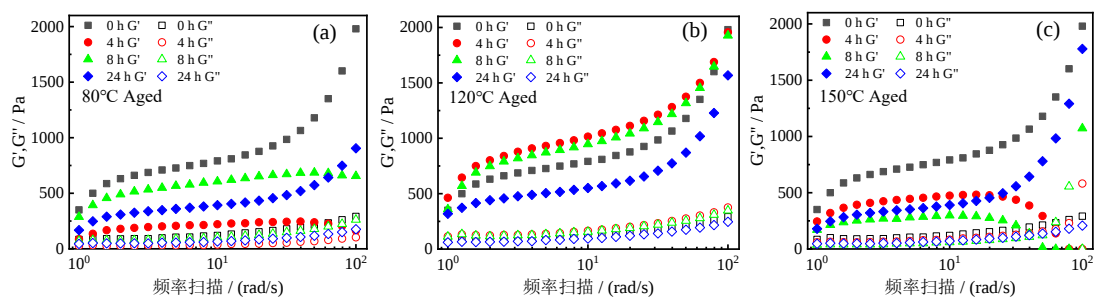


图 5-7 实验温度 40°C 下各热老化时间和温度下润滑脂频率扫描曲线图

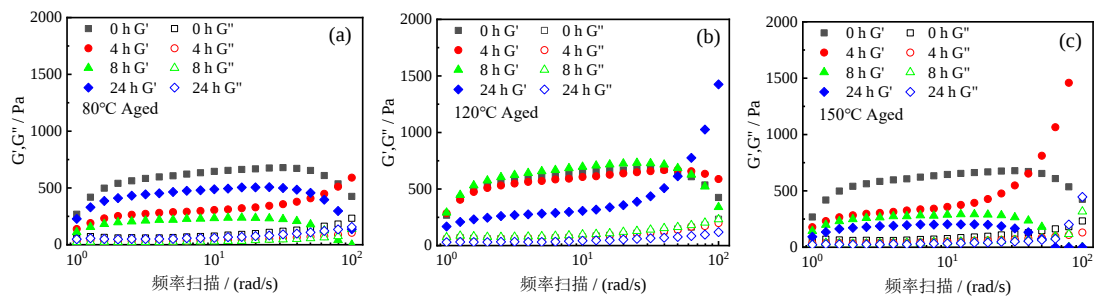


图 5-8 实验温度 60°C 下各热老化时间和温度下润滑脂频率扫描曲线图

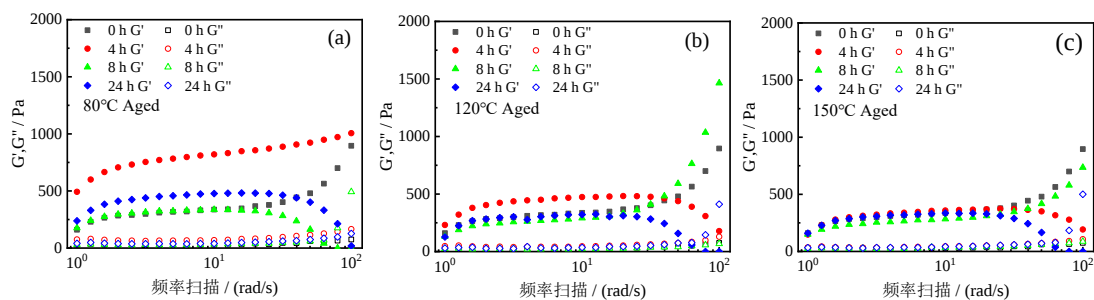


图 5-9 实验温度 80°C 下各热老化时间和温度下润滑脂频率扫描曲线图

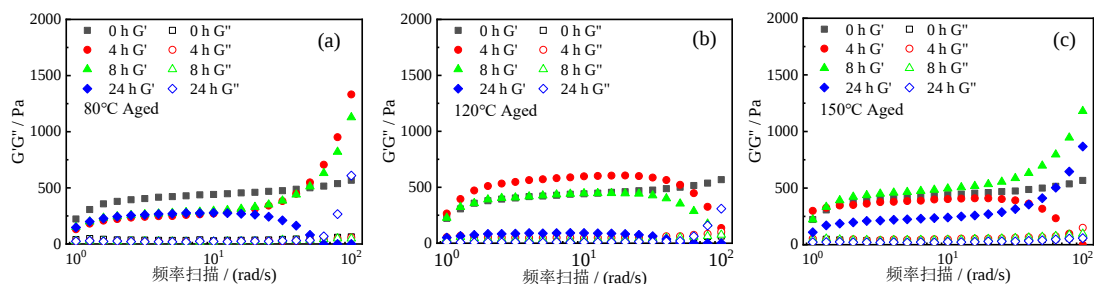


图 5-10 实验温度 100°C 下各热老化时间和温度下润滑脂频率扫描曲线图

在较低环境温度以及高频率扫描的条件下，频率扫描曲线的波动较大。这种较大的波动可能与润滑脂在测试过程中存在的较为严重的壁面滑移现象有关。壁面滑移是指润滑脂在剪切过程中，其与测试设备壁面之间的接触处发生相对滑动，导致测试结果出现偏差。这种壁面滑移现象的存在，说明润滑脂在这一条件下的内部结构可能较为松散，无法与壁面形成稳定的接触和相互作用。而且，这种波动一直存在并未随着时间的推移而消失，这进一步表明润滑脂的内部结构在这一过程中遭受了无法恢复的破坏。也就是说，润滑脂在经过热老化以及在特定测试条件下的作用后，其内部的皂纤维结构已经发生了不可逆的损伤，无法恢复到初始状态，从而对其整体性能产生了长期的负面影响。

图 5-11 详细展示了在不同热效应时间和温度条件下，润滑脂的平台模量与油膜厚度的变化曲线。从图中可以清晰地观察到，随着热效应温度的升高，润滑脂的平台模量呈现出逐渐上升的趋势。这一现象表明，温度的升高对润滑脂的分子结构和流变性能产生了显著影响。具体而言，温度的升高可能促进了润滑脂内部皂纤维的缠结和分子间相互作用的增强，从而导致平台模量的增加。平台模量的上升反映了润滑脂在高温下更稳定的结构和更高的弹性模量，这在一定程度上意味着润滑脂在高温环境下的机械稳定性和承载能力得到了提升。然而，随着热效应时间的增加，平台模量出现了先下降再上升的变化趋势。这一复杂的动态变化揭示了润滑脂在长时间热效应下的分子结构演变过程。在热效应初期，润滑脂内部的皂纤维结构可能因热能的输入而发生部分松弛或解缠结，从而导致平台模量下降。这种现象可能与润滑脂内部的分子运动加剧有关，使得原本紧密缠结的皂纤维网络变得松散，从而降低了润滑脂的弹性模量。随着时间的进一步延长，润滑脂内部的分子结构逐渐重新调整和稳定，皂纤维之间可能重新形成更稳固的缠结网络，使得平台模量再次上升。这一过程表明，润滑脂在长时间的热效应下

经历了一个从不稳定到重新稳定的动态平衡过程。润滑油膜厚度的变化曲线也呈现出类似的先下降后上升的趋势。在热效应初期，油膜厚度的下降可能与润滑脂黏度的降低有关。高温下，润滑脂的基础油黏度降低，导致油膜变薄。此外，皂纤维结构的松弛也可能使得润滑脂的油膜形成能力减弱。然而，随着热效应时间的延长，润滑脂的分子结构重新调整后，油膜厚度逐渐恢复并增加。这一变化可能与润滑脂内部皂纤维的重新缠结有关，重新形成的稳定网络结构增强了润滑脂的油膜保持能力，从而使得油膜厚度增加。

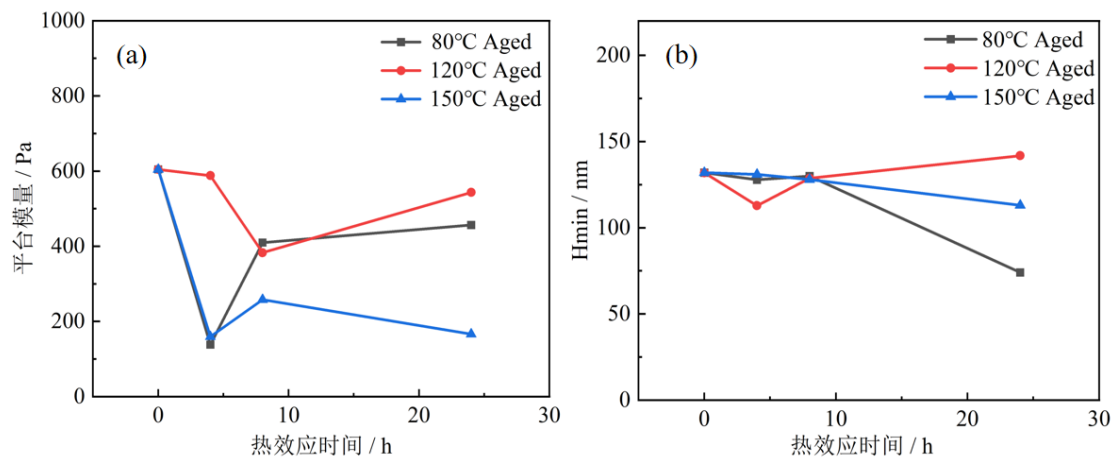


图 5-11 不同热效应时间及温度下平台模量与油膜厚度曲线

(a)不同热效应时间及温度下平台模量曲线；(b)不同热效应时间及温度下膜厚曲线

5.4 流变行为演化对成膜影响的机理

图 5-12 给出了高温热效应对润滑脂成膜性能影响的机理图。该机理是基于润滑脂成膜性能、触变性实验结果，并结合 Cann^[96]提出的脂润滑成膜机理，得到的温度效应对润滑脂成膜性能影响的规律图。高温热效应作用于润滑脂，将会对其结构体系产生影响，进而影响到润滑脂的成膜性能。实际上，润滑脂在成膜过程中，皂纤维、基础油均发挥了重要作用。在起始阶段或压力较低的情况下，卷吸过程中的外力不足以将基础油挤压出来，此时皂纤维结构扮演重要角色（图 5-12 中的机理I），动压油膜甚至难以形成，图 4-1 中低载荷下呈现的就是此机理；当皂纤维被剪断后基础油释放出来后，皂纤维和基础油共同作用，促使润滑油膜厚度增大（图 5-12 中的机理II），因此在图 4-6、图 4-10 和图 4-14 中均呈现出随着载荷增加，油膜厚度增加的阶段，之后维持在一定数值；而当皂纤维结构一旦

被破坏，基础油被释放出来，皂纤维在成膜过程中作用弱化，基础油扮演重要角色（图 5-12 中的机理Ⅲ），这是高温热作用后结构体系破坏，展现的成膜结果，即图 4-6、图 4-10 和图 4-14。结合上述机理图，对高温热作用对润滑脂成膜性能的影响机理分析如下：

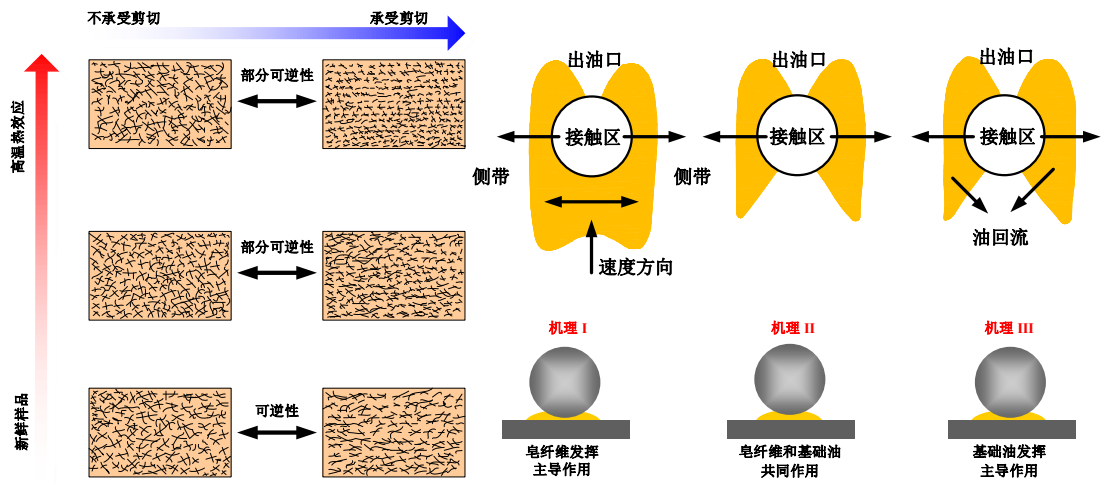


图 5-12 高温热效应对润滑脂成膜性能的影响机理

在低于其最高服役温度下，润滑脂的结构体系并不会产生破坏，在承受剪切过程中会趋于定向，并展现出非常好的结构恢复性能。对应的，润滑脂成膜性能好，皂纤维和基础油的回流效应在高卷吸速度下均发挥了较好作用，进而使得润滑脂膜厚最大。这里需要特别指出，新鲜润滑脂样品中心膜厚之所以低于热作用润滑脂样品，可以理解为新鲜润滑脂样品的皂纤维缠结程度高，图 3-6 中 80℃热作用的触变环结果可以验证此观点，此时是皂纤维在成膜中占据了主导作用。随着温度的升高（120℃），润滑脂结构体系遭到了一定的破坏，出现了触变环面积变大，结构性能恢复变差的现象。对应的，皂纤维在润滑脂成膜过程中的影响变弱，润滑脂由皂纤维和基础油共同影响润，滑脂成膜向着皂纤维影响减弱方向过渡。在更高温度的热作用下（150℃），润滑脂结构体系会被破坏，这种情况下，润滑脂承受剪切后，皂纤维恢复性能依然变差，但剪切后皂纤维结构被破坏，参与成膜的作用更弱。此情况下，基础油承担成膜的主要角色，从图 4-14 中显示出的是 150℃ 高温热作用膜厚均低于 80℃和 120℃ 高温热作用的数值。

5.5 本章小结

本章着重对流变实验中基于 Herschel-Bulkley（H-B）模型所求得三种关键

参数以及平台模量参数进行具象化分析,并将其与成膜实验中的具体数据进行详细对比。通过这一过程,揭示了流变性能与成膜行为之间的内在机理联系。

(1) 润滑脂的屈服应力是影响其初始流动和成膜速度的重要因素。润滑脂的流变指数和塑性黏度对其成膜行为和润滑效果具有显著影响。流变指数较小的润滑脂在剪切作用下表现出更明显的剪切变稀特性,这使得润滑脂更容易在摩擦表面形成均匀的润滑膜。而塑性黏度较大的润滑脂则具有更强的承载能力,能够有效保持润滑膜的完整性,从而提高润滑脂在高负荷工况下的润滑性能。

(2) 成膜行为不仅受润滑脂流变性的影响,也会反过来影响润滑脂的流变特性。较厚且稳定的润滑膜能够使润滑脂的流变特性保持稳定,而润滑膜的厚度变化或稳定性下降则会导致润滑脂的黏度、屈服应力等流变参数发生改变。这种相互作用决定了润滑脂在实际工况下的润滑效果和使用寿命。

润滑脂的流变性与成膜行为相互作用,共同决定了其在实际工况下的润滑效果和使用寿命。在润滑脂的设计和应用中,需要综合考虑屈服应力、触变性、流变指数、塑性黏度以及微观结构等因素,以优化润滑脂的性能,满足不同工况下的润滑需求。

第 6 章 结论与展望

6.1 结论

润滑脂是一种兼具流变特性和理化性能的半流体润滑材料，广泛应用于工业领域。其在常温下呈膏状，兼具流动性与塑性，能在机械表面形成稳定的润滑膜，有效减少摩擦磨损，降低耗能并延长设备寿命。润滑脂的流变特性使其在宽温域和不同剪切应力下均表现出良好的适应性，即使在高温、低温、高负荷或高转速等极端条件下也能稳定发挥作用。此外，其优异的理化性能可抵御环境侵蚀，防止变质失效。本文通过模拟润滑脂在实际服役过程中的工况变化，深入研究了其在不同温度、载荷等条件下的性能演变。研究采用流变实验和成膜实验相结合的方法，揭示了润滑脂内部的机理变化，主要结论如下：

（1）润滑脂的结构体系由皂纤维网络和基础油组成，二者在成膜过程中相互协同，共同发挥作用。在适宜的温度范围内，皂纤维网络能够有效吸附和固定基础油，使其在润滑表面形成均匀且稳定的润滑油膜。然而，随着温度升高，润滑脂的皂纤维结构逐渐发生变化。皂纤维的热稳定性降低，其网络结构开始松散甚至部分断裂，导致皂纤维与基础油之间的协同作用减弱。在这种情况下，润滑脂的成膜机制逐渐从皂纤维与基础油的协同作用转变为以基础油为主的单一作用。由于基础油的粘度随温度升高而显著降低，其在润滑表面的附着力减弱，导致润滑油膜厚度减小。当温度进一步升高至接近润滑脂的滴点时，皂纤维结构遭到严重破坏，基础油大量流失，润滑脂的成膜性能显著下降。此时，润滑脂的润滑能力主要依赖于残留的基础油形成的边界润滑膜，但这种润滑膜的厚度和稳定性远不如协同作用下的润滑膜，导致润滑效果大幅减弱。

（2）当载荷发生变化时，润滑脂与摩擦副之间的接触面积和润滑状态会发生显著变化。在低载荷条件下，润滑脂与摩擦副的接触面积相对较小，此时润滑脂的皂纤维结构和基础油难以充分展开，难以形成稳定且连续的润滑膜。摩擦副表面的微观凸起部分可能会直接接触，导致润滑效果较差，磨损加剧。随着载荷的逐渐增加，润滑脂与摩擦副的接触面积逐渐增大，润滑脂中的基础油和皂纤维结构开始更好地发挥作用。此时，润滑脂表现出经典的弹流润滑特征，即润滑脂

在弹性变形和流体动力学作用下形成具有一定承载能力的油膜。这种油膜能够有效隔离摩擦副表面的直接接触，显著降低摩擦和磨损。在这一过程中，润滑脂的膜厚也会随着载荷的增加而逐渐增大。这是因为更高的载荷促使润滑脂中的皂纤维结构进一步变形，基础油更容易在摩擦副表面铺展，从而形成更厚的润滑膜。这种膜厚的增加有助于提高润滑脂的承载能力和润滑性能，使其能够更好地适应高载荷工况。然而，当载荷超过润滑脂的承载能力时，润滑脂的皂纤维结构可能会被过度压缩，导致润滑膜的稳定性下降，甚至出现局部失效。因此，在实际应用中，需要根据润滑脂的性能和工况条件合理选择载荷范围，以确保润滑脂能够充分发挥其润滑作用，延长设备的使用寿命。

(3) 随着温度上升，锂基润滑脂的剪切应力及屈服应力均呈现下降趋势，表明其在高温下的流动阻力减小，流动性增强。同时，平台区对应的剪切速率随温度升高而增大，进一步证实了高温条件下润滑脂流变行为的显著改变。在应变扫描变化曲线中，当温度相同时，锂基润滑脂的储能模量 (G') 表现出缓慢增加后骤然下降的趋势，这反映了润滑脂从弹性状态向流动状态的转变。损耗模量 (G'') 在前期基本保持不变，出现一个平台区域，随后随着剪切应变的增加逐渐与储能模量交汇，这表明润滑脂在高应变下的塑性变形逐渐增强。在热老化时间相同时，储能模量呈现先上升后下降再上升的变化趋势，而损耗模量基本保持不变，这说明热老化对润滑脂的弹性变形影响较大，但对塑性变形的影响相对较小。在频率扫描变化曲线中，热效应显著影响锂基润滑脂在剪切过程中弹性变形产生的储存能量（储能模量）和塑性变形产生的损耗能量（损耗模量）。热老化行为会导致润滑脂的粘度降低，流动性能增强。同时，润滑脂中的皂纤维结构随着热老化时间的增加而逐渐降解，导致润滑脂的整体性能下降。这种结构的变化不仅影响润滑脂的流变特性，还可能导致润滑脂的承载能力和润滑效果减弱。

6.2 展望

本文以复合锂基润滑脂作为实验样品，并对此开展热效应下的成膜行为和流变行为的关联性研究，揭示了其润滑特性机理。首先将锂基润滑脂进行静态热老化处理，然后利用光弹流润滑油膜测量仪和旋转流变仪进行相关实验研究，最后对实验结果进行分析，探究各热效应温度和时间下润滑脂流变特性和成膜特性变

化规律。本文虽然做了一些研究，还存在一些不足需要改进，具体如下：

（1）润滑脂组分种类多样，除复合锂基润滑脂外，还包括钙基、钠基和聚脲基等多种类型，后续研究可扩展至其他类型润滑脂的性能分析。

（2）采用轴承台架、流变与成膜实验相结合的多维度实验方法，深入探究轴承润滑过程中流变特性与成膜行为的内在机制。

参考文献

- [1] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 2008, 北京: 清华大学出版社, 8: 241.
- [2] Zhan Y Z, Zhang G D. Elevated temperature friction and wear behavior of SiC-reinforced copper matrix composites[J]. International Journal of Materials Research, 2022, 95(11): 1040-1045.
- [3] 冀运东, 张鹏伟, 崔唐茵, 等. 芳纶纤维对铝基复合材料制动盘配套闸片摩擦磨损性能的影响[J/OL]. 材料导报, 2025, 1-18.
- [4] 王宇, 张斌, 张向军, 等. 纳米 CaCO_3 颗粒对润滑脂性能影响的研究[J]. 润滑与密封, 2024, 49(9): 88-93.
- [5] 申玉海. 抗磨减摩添加剂对锂基润滑脂摩擦磨损性能的影响[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2023.
- [6] 杨露露. 聚脲基润滑脂制备工艺及性能研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2023.
- [7] Rosenkranz Laura, Richter Silvia, Jacobs Georg, et al. Influence of temperature on wear performance of greases in rolling bearings[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2021, 73(6): 862-871.
- [8] 沙光荣, 来冰冰, 赵启龙, 等. 聚脲润滑脂静态热氧老化条件下性能衰退机制研究[J]. 摩擦学学报, 2024, 44(08): 1074-1083.
- [9] Chatra K R Sathwik, Osara Jude A, Lugt Piet M. Thermo-mechanical aging during churning in grease lubricated bearings and its impact on grease life[J]. Tribology International, 2023, 181: 108248.
- [10] 胡金涛, 张安生, 张恩惠, 等. 高温热效应对复合锂基润滑脂性能影响规律研究[J]. 摩擦学学报, 2021, 41(04): 447-454.
- [11] Pan J B, Cheng Y H, Yang J G. Structural degradation of a lithium lubricating grease after thermal ageing[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2016, 49(7): 579-587.
- [12] Yang J, Zhang Y, Wang Z, et al. Research on mechanical aging behavior of grease in rolling bearing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2025, 38(1): 4-

4.

- [13] Zhao Q L, Zhao Q, Zhang E H, et al. Research on the relationship between thermal aging of lubricating grease outside the contact area of bearing rolling elements and bearing lubrication failure[J]. Engineering Failure Analysis, 2025, 168: 109127.
- [14] Zhang K P, Tang H T, Shi X L, et al. Effect of Ti_3C_2 MXenes additive on the tribological properties of lithium grease at different temperatures[J]. Wear, 2023, 526: 204953.
- [15] 沈铁军, 胡明华, 刘瑞刚, 等. 静态热老化对锂-钙基润滑脂微观结构和流变性的影响[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(06): 581-586.
- [16] 王川, 蒋明俊, 郭小川, 等. 复合钛基润滑脂静态热老化性能的研究[J]. 石油炼制与化工, 2020, 51(03): 73-79.
- [17] 胡明华, 刘艳升, 沈铁军, 等. 静态热老化对锂-钙基润滑脂胶体性能的影响[J]. 润滑与密封, 2008, (10): 55-57+60.
- [18] 李秀荣, 潘家保, 王玲娟, 等. 静态热老化对润滑脂皂纤维缠结及恢复性能的影响[J]. 润滑与密封, 2016, 41(12): 93-97.
- [19] Delgado A M, Valencia C, Sánchez C M, et al. The rheological behaviour of a lithium lubricating grease[J]. Tribology Letters, 2006, 23(1): 47-54.
- [20] Lu D X, Zhang Y S, Lu J J. Numerical study on the bearing capacity of lubricant film in journal bearing with micro-textured surface[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2477(1):012039.
- [21] 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.
- [22] Cen H, Lugt P M. Film thickness in a grease lubricated ball bearing[J]. Tribology International, 2019, 134: 26-35.
- [23] Lugt P M. Modern advancements in lubricating grease technology[J]. Tribology International, 2016, 97: 467-477.
- [24] 陈琪, 杨萍, 栗心明, 等. 不同滑滚比条件下脂润滑膜剪切特性试验观察[J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50(03): 361-368.

-
- [25] Liu H C, Guo F, Guo L, et al. A dichromatic interference intensity modulation approach to measurement of lubricating film thickness[J]. Tribology Letters, 2015, 58(1):1-11.
 - [26] Wilson A R. The relative thickness of grease and oil films in rolling bearings[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1979, 193(1): 185-192.
 - [27] Crook A W. Simulated gear-tooth contacts: some experiments upon their lubrication and subsurface deformations[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1957, 171(1): 187-214.
 - [28] Dwyer-Joyce R S, Drinkwater B W, Donohoe C J. The measurement of lubricant-film thickness using ultrasound[J]. Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2003, 459(2032): 957-976.
 - [29] 刘圣华, 周龙保, 赵慧, 等. 电涡流法测量活塞环组最小润滑油膜厚度[J]. 车用发动机, 1995, (06): 41-45+55.
 - [30] Pan J B, Wu H B, Wang A, et al. Effect of high-temperature thermal action on the film-forming properties of a lithium grease[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2022, 74(5): 481-487.
 - [31] 潘家保, 钱明, 周彬, 等. 连续与间断热作用对复合锂基润滑脂流变特性的影响[J]. 石油学报(石油加工), 2018, 34(03): 552-560.
 - [32] 何垒垒, 苏朔, 龙军. 聚 α -烯烃合成基础油分子结构与性能关系研究进展[J]. 石油学报(石油加工), 2024, 40(01): 266-276.
 - [33] 楼高波, 刘丽娜, 傅深渊, 等. 润滑脂生物基稠化剂的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2024, 44(08): 1151-1172.
 - [34] 徐状, 蔡浩鹏, 王哲, 等. 过量稠化剂组分对锂基润滑脂微观结构和性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2024, 44(04): 542-550.
 - [35] Jiang N, Nan F. Applications of phyllosilicates mineral powder as anti-wear lubricating materials in lubricating oil and grease: a review[J]. Lubricants, 2024, 12(9): 12090324.
 - [36] Mubashshir M, Shaukat A. The role of grease composition and rheology in elastohydrodynamic lubrication[J]. Tribology Letters, 2019, 67(4): 1-20.

-
- [37] Fischer D, Jacobs G, Stratmann A. Effect of thickener type in lubricating greases on the film formation in EHD contacts[M]. Universitätsbibliothek der Rwth Aachen, 2020.
 - [38] 牛明, 郜云波, 王新宇. 基础油黏度对复合钛基润滑脂流变性能的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2024, 46(06): 786-791.
 - [39] 黎小辉, 秦珂臻, 杨露露, 等. 基础油对聚脲润滑脂性能的影响研究[J/OL]. 润滑与密封, 2024, 1-13.
 - [40] 张恩惠, 李维民, 赵改青, 等. 不同黏度矿物基础油对锂基润滑脂微观结构及性能的影响研究[J]. 摩擦学学报, 2022, 42(6): 1258-1266.
 - [41] 于泓渊, 刘敬宇, 苏怀刚, 等. 基础油对复合锂基润滑脂微观形貌及流变行为的影响[J]. 润滑与密封, 2023, 48(09): 193-198.
 - [42] 李帅, 徐状, 蔡浩鹏, 等. 基础油黏度对复合钡基润滑脂摩擦学性能与轴承振动性能的影响[J/OL]. 润滑与密封, 2025, 1-14.
 - [43] 王燕霜, 张璞, 王东峰, 等. 基础油黏度对锂基脂和聚脲脂流变特性的影响[J]. 轴承, 2022, (11): 47-52.
 - [44] Cen H, Lugt P M, Morales-Espejel Guillermo. On the film thickness of grease-lubricated contacts at low speeds[J]. Tribology Transactions, 2014, 57(4): 668-678.
 - [45] 刘成龙, 张玉萌, 栗心明, 等. 润滑脂纤维结构对弹流油膜影响的试验研究[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(01): 68-74.
 - [46] Li X M, Guo F, Poll Gerhard, et al. Grease film evolution in rolling elastohydrodynamic lubrication contacts[J]. Friction, 2021, 9: 179-190.
 - [47] Dixena R, Sayanna E, Badoni R. Recycled and virgin HDPEs as bleed inhibitors and their rheological influences on lubricating greases thickened with PP and mPP[J]. Lubricants, 2014, 2(4): 237-248.
 - [48] Hoshi Y, Takiwatari K, Nanao H, et al. In situ observation of EHL films of greases by micro infrared spectroscopy[J]. Tribology Online, 2019, 14(2): 53-59.
 - [49] Åström H, Isaksson O, Höglund E. Video recordings of an EHD point contact lubricated with grease[J]. Tribology International, 1991, 24(3): 179-184.
 - [50] Kaneta M, Ogata T, Takubo Y, et al. Effects of a thickener structure on grease

- hr/>
- elastohydrodynamic lubrication films[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2000, 214(4): 327-336.
- [51] Cann P, Lubrecht A A. An analysis of the mechanisms of grease lubrication in rolling element bearings[J]. Lubrication Science, 1999, 11(3): 227-245.
- [52] 韩一鸣. 往复—微动点接触脂润滑多周期成膜机理与磨损失效研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.
- [53] Kanazawa Y, Sayles R S, Kadiric A. Film formation and friction in grease lubricated rolling-sliding non-conformal contacts[J]. Tribology International, 2017, 109: 505-518.
- [54] 余瑞, 来冰冰, 刘焕晨, 等. 含 ZDDP 锂基润滑脂摩擦学性能和润滑机理研究[J/OL]. 摩擦学学报, 2024, 1-22.
- [55] 关强, 张绪伟, 何娇, 等. WS₂ 和 h-BN 纳米添加剂对半流体锂基润滑脂极压抗磨性能影响研究[J]. 表面技术, 2022, 51(08): 233-242.
- [56] Khemchandani B, Somers A, Howlett P, et al. A biocompatible ionic liquid as an antiwear additive for biodegradable lubricants[J]. Tribology International, 2014, 77: 171-177.
- [57] Bartolomé M, Gonçalves D, Tuero A G, et al. Greases additised with phosphoniumbased ionic liquids-Part I: Rheology, lubricant film thickness and Stribeck curves[J]. Tribology International, 2021, 156: 106851.
- [58] Wu H, Wang L, Dong G. Origin of the tribofilm from MoS₂ nanoparticle oil additives: Dependence of oil film thickness on particle aggregation in rolling point contact[J]. Friction, 2021, 9: 1436-1449.
- [59] Singh J, Kumar D, Tandon N. Rheological and film forming behavior of the developed nanocomposite greases under elastohydrodynamics lubrication regime[J]. Journal of Tribology, 2019, 141(2): 021804.
- [60] Singh J, Kumar D, Tandon N. Tribo-dynamics of nanocomposite grease lubricated point contact under elastohydrodynamics lubrication regime[J]. Journal of Tribology, 2019, 141(3): 031501.

-
- [61] 黎小辉, 张泽, 杨露露, 等. 添加剂对聚脲润滑脂性能的影响[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2024, 44(02): 7-13.
 - [62] 李自颖, 荆兆刚, 郭峰, 等. 离子液体添加剂对润滑脂导电性及摩擦学性能影响的研究[J]. 摩擦学学报(中英文), 2024, 44(07): 903-911.
 - [63] 夏延秋, 杨阔, 冯欣, 等. 添加剂在聚脲润滑脂中的感受性[J]. 石油炼制与化工, 2021, 52(12): 79-86.
 - [64] 夏迪, 陈国需, 赵立涛, 等. 二烷基二硫代磷酸氧钼多效润滑油添加剂性能[J]. 石油学报(石油加工), 2015, 31(06): 1338-1344.
 - [65] 梁超旭, 卢乐民, 梁逸昊, 等. 碳酸钙在润滑脂中的应用[J]. 当代化工, 2023, 52(04): 947-952.
 - [66] 韩露娟, 郭峰, 栗心明, 等. 硬脂酸界面修饰对油膜润滑影响的试验研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(09): 182-189.
 - [67] 樊赛生, 荆兆刚, 郭峰. 球-环接触下油性添加剂对聚 α -烯烃油润滑性能的影响[J]. 润滑与密封, 2022, 47(07): 26-32.
 - [68] 易双, 葛翔宇, 李津津. 液体超滑技术发展现状及展望[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60(8): 617-629.
 - [69] Salomonsson L, Stang G, Zhmud B. Oil/thickener interactions and rheology of lubricating greases[J]. Tribology & Lubrication Technology, 2007, 63(12): 38-46.
 - [70] Sánchez M C, Franco J M, Valencia C, et al. Atomic force microscopy and thermo-rheological characterisation of lubricating greases[J]. Tribology letters, 2011, 41: 463-470.
 - [71] Delgado M A, Valencia C, Sánchez M C, et al. Influence of soap concentration and oil viscosity on the rheology and microstructure of lubricating greases[J]. Industrial & engineering chemistry research, 2006, 45(6): 1902-1910.
 - [72] Wang L, Wang B, Wang X, et al. Tribological investigation of CaF₂ nanocrystals as grease additives[J]. Tribology International, 2007, 40(7): 1179-1185.
 - [73] 潘家保, 杨广鑫, 褚甜甜, 等. 热老化行为对磁流变脂流变学性能的影响[J]. 石油学报(石油加工), 2023, 39(01): 174-182.
 - [74] Liu Y, Dong J, Ye X, et al. Comparative analysis of dynamic characteristics

- between magnetorheological grease and graphite magnetorheological grease[J]. *Materials Today Communications*, 2025, 42: 111322.
- [75] Janabi A A, Hussin M, Htwe Y, et al. Experimental investigation on the tribological and rheological properties of graphene and fmwcnt based nanolubricants with CTAB surfactants[J]. *Synthetic Metals*, 2024, 308117726-117726.
- [76] 高旭东. 少层石墨烯对聚脲润滑脂及复合锂基润滑脂的流变特性及摩擦特性的影响研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2023.
- [77] 杨广鑫, 潘家保, 周陆俊, 等. 热磁耦合作用下磁流变脂剪切稳定性及其机理[J]. *化工进展*, 2021, 40(08): 4428-4437.
- [78] 陈绍澧. 润滑脂[M]. 北京: 石油工业出版社, 1957.
- [79] 张澄清, 孙洪伟. 陈绍澧先生文选——润滑脂部分[M]. 北京: 中国石化出版社, 2013.
- [80] 毛菁菁, 程型国, 张遂心. 复合锂基润滑脂的流变特性与微观结构的关系研究[J]. *润滑与密封*, 2013, 38(12): 79-83.
- [81] Couronne I, Blettner G, Vergne P. Rheological behavior of greases: part I-effects of composition and structure[J]. *Tribology Transactions*, 2000, 43(4): 619-626.
- [82] Sánchez M C, Franco J M, Valencia C, et al. Atomic force microscopy and thermorheological characterisation of lubricating greases[J]. *Tribology Letters*, 2010, 41(2): 463-470.
- [83] Paszkowski M. Effect of grease thickener and surface material on rheological properties of boundary layer[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2015, 480: 462-467.
- [84] Fan X, Li W, Li H, et al. Probing the effect of thickener on tribological properties of lubricating greases[J]. *Tribology International*, 2018, 118128-139.
- [85] Cousseau T, Graça M B, Campos V A, et al. Influence of grease rheology on thrust ball bearings friction torque[J]. *Tribology International*, 2011, 46(1): 106-113.
- [86] Marek W, Adam R, Magdalena L, et al. Some rheological properties of plastic greases by carreau-yasuda model[J]. *Tribology International*, 2023, 183.
- [87] 姚立丹, 杨海宁, 孙洪伟, 等. 锂基润滑脂流变学的特性[J]. *石油学报(石油*

- 加工), 2011, 27(S1): 1-5.
- [88] 姚立丹, 杨海宁, 孙洪伟, 等. 复合锂基润滑脂和脲基润滑脂成脂机理的差异[J]. 石油学报(石油加工), 2010, 26(05): 747-754.
- [89] 李敏, 于禾苗, 赵末炎, 等. 协同固化作用下石油污染土的粘温效应研究[J/OL]. 岩土工程学报, 2024, 1-10.
- [90] 刘江. 考虑粘温特性的轴向柱塞泵空化射流特性分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- [91] Zhang X H, Chen X M, Yan K, et al. Transient thermal properties investigation for precision bearing-spindle system considering fixed-position preload and lubricant viscosity-temperature effect[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 9641-53.
- [92] Yun Y Y, Bowen Z, Sun J Y, et al. Analysis of lubrication performance and flow field for lead-bismuth bearings considering the temperature-viscosity effect[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2024, 238(3): 272-290.
- [93] 刘海超, 郭峰, 赵国垒. 润滑膜厚测量的双色光干涉强度调制方法[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(3): 282-287.
- [94] Barnes Howard A. The yield stress-a review or ‘ $\pi\alpha\nu\tau\alpha \rho\epsilon\iota$ ’-everything flows? [J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1999, 81(1-2): 133-178.
- [95] Brown R. Handbook of polymer testing: physical methods[M]. CRC Press: 1999.
- [96] Cann M P. Starvation and reflow in a grease-lubricated elastohydrodynamic contact[J]. Tribology Transactions, 2008, 39(3): 698-704.
- [97] Martín-Alfonso E J, Valencia C, Sánchez C M, et al. Evaluation of thermal and rheological properties of lubricating greases modified with recycled LDPE[J]. Tribology Transactions, 2012, 55(4): 518-528.

攻读硕士学位期间学术成果及参研项目

一、已发表(录用)论文

- [1] 王锦,汪俊杰,王韵昕,等.高温热效应对锂基润滑脂成膜性能的影响[J/OL], 化工进展, 2025, 1-12.

二、参研项目

- [1] 国家自然科学基金项目（52375227）
[2] 安徽省高校优秀青年科研项目（2022AH030099）

致谢

行文至此，心中感慨万千。二十年的求学生涯即将画上圆满的句号。回首往昔二十余载的求学之路，仿若一场跌宕起伏的漫漫征程，如今终于迎来了曙光初现的时刻。此时此刻，我怀着无比感恩的心情，向那些在我求学路上给予我帮助和支持的亲人、朋友、老师和同学们，致以最诚挚的谢意。

首先，我要衷心的感谢我的导师，潘家保教授。在论文的整个过程中，从选题到研究方法的选择，实验的设计，再到论文的撰写和修改，他都给予了细致的指导和无私的帮助。每当我的研究进展不顺利时，他总是耐心地为我答疑解惑，从不过分苛责，并给予我鼓励和支持。他的教导不仅帮助我完成了这篇论文，也让我在学术和人生的道路上更加坚定。他的教诲我将永远铭记于心，并以此为动力，继续努力前行。

其次，我要感谢课题组闫伟老师，徐锐老师，吴波文老师，赵文老师，叶东东老师。他们每次组会对我的指导，都让我醍醐灌顶，进步颇大。感谢我的师兄杨广鑫，汪奥，叶锦，武怀彪，李贻良，李瑞，汤天成，周焰生，王子辉，科研之路因为有他们的带领而不再崎岖难行。感谢我的同门许书恒、吴飞翔、傅学宾、陆金龙、张锦程、王文静和陈晴晴，科研之路因为有他们的陪伴而不再孤独难捱。感谢我的师弟汪俊杰，王韵昕，徐耀宗等，师妹杨忆文等人，科研之路因为有他们的参与而不再单调乏味。感谢我的室友张含真以及我的大学同学谢震宇，给我的硕士生涯添上了一抹靓丽的色彩，不仅在学习上、生活中也助我良多。与她们一起度过的时光，我将永远铭记，珍藏在记忆深处。

最后，我要感谢我的家人，感谢他们二十年如一日对我的支持与奉献。感谢他们永远做我的后盾，不求回报。他们的爱铸就了我、养育了我、包容了我，让我有勇气去面对所有的艰难险阻。我还要特别感谢我的姐姐，王超女士。感谢她包容我的一切，不管是我心烦意乱时的冷漠，还是科研受阻时的暴躁，她都照单全收。感谢她总是照顾我，宽慰我，开解我，给我提供源源不断的情绪价值。以后换我当她的情绪垃圾桶。

最后的最后，祝愿家人平安健康、朋友万事顺遂、国家繁荣昌盛。

尚德敏学 唯实惟新

