

纤维素/SiO₂ 润滑脂的制备及性能分析

楼高波^{1,2,3}, 刘丽娜¹, 傅深渊¹, 李 亮², 曹森科³, 程型国³

(1. 浙江农林大学 化学与材料工程学院, 浙江 杭州 311300; 2. 中国科学院 合肥物质科学研究院, 安徽 合肥 230031; 3. 杭州得润宝油脂股份有限公司, 浙江 杭州 311305)

摘要: 【目的】旨在以可再生的天然纤维素为稠化剂制备可持续发展的环保型润滑脂产品。【方法】分别以纯纤维素、气相二氧化硅 (SiO₂) 以及纤维素/SiO₂ 为稠化剂制备了 3 组稠度等级为 2# 的润滑脂产品, 并对其进行了锥入度测试、滴点测试、分油率测试、流变性能测试以及摩擦学性能测试。【结果】SiO₂ 表面的硅羟基与纤维素羟基可以发生氢键作用, 改善了润滑脂的理化性质、流变性能以及摩擦学性能。理化性质方面: 相较于纤维素润滑脂和 SiO₂ 润滑脂, 纤维素/SiO₂ 润滑脂具有较低的分油率, 胶体安定性得到提高, 并且在 327 °C 时出现了滴点, 改善了 SiO₂ 润滑脂在高温下易失去流动性的缺点。流变特性方面: 纤维素/SiO₂ 润滑脂的黏温性能和抗剪切能力较 SiO₂ 润滑脂得到了提高, 且剪切破坏后的结构恢复速度更快, 结构体系更加稳定。摩擦学性能方面: 纤维素/SiO₂ 润滑脂相较于纤维素润滑脂和 SiO₂ 润滑脂, 其减摩性能得到了提高, 具有最低的摩擦系数和摩擦力。【结论】获得了具有实用前景的纤维素基润滑脂, 符合国家低碳及可持续发展战略。图 7 表 2 参 32

关键词: 润滑脂; 纤维素; 流变; 摩擦; 改性

中图分类号: TH117.2 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2024)03-0644-07

Preparation and properties of cellulose/SiO₂ grease

LOU Gaobo^{1,2,3}, LIU Li'na¹, FU Shenyuan¹, LI Liang², CAO Senke³, CHENG Xingguo³

(1. College of Chemistry and Materials Engineering, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Heifei 230031, Anhui, China; 3. Hangzhou Derunbao Grease Co. Ltd., Hangzhou 311305, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] With the increasing depletion of petrochemical resources and the environmental pollution caused by the extraction and use process, sustainable and environmentally friendly lubricating grease products have been prepared using renewable natural cellulose as a thickener. [Method] Three sets of lubricating grease products with a viscosity grade of 2# were prepared using pure cellulose, gas-phase SiO₂, and cellulose/SiO₂ as thickeners, and their penetration, drop point, oil separation rate, rheological properties, and tribological properties were tested. [Result] The silicon hydroxyl groups on the surface of SiO₂ can undergo hydrogen bonding crosslinking with the hydroxyl groups of cellulose, improving the physicochemical properties, rheological properties, and tribological properties of lubricating grease. In terms of physicochemical properties, compared to cellulose grease and SiO₂ grease, cellulose/SiO₂ grease has a lower oil separation rate and improved colloidal stability; And a drop point appeared at 327 °C, which improved the fluidity at high temperatures of silicone grease. In terms of rheological properties, the viscosity temperature performance and

收稿日期: 2023-10-04; 修回日期: 2024-03-02

基金项目: 浙江农林大学人才启动项目 (2022LFR103); 浙江省科技厅领雁项目 (2022C03128); 浙江省自然科学基金探索项目 (Y21C160015)

作者简介: 楼高波 (ORCID: 0000-0002-4645-7546), 讲师, 博士, 从事生物质复合材料的制备与性能研究。E-mail: 1142673814@qq.com。通信作者: 程型国, 高级工程师, 博士, 从事新型润滑脂的开发与研究。E-mail: chengxingguo@derunbao.com

shear resistance of cellulose/SiO₂ lubricating grease have been improved, and the structural recovery speed is faster than that of silicone grease, and the structural system is more stable. In terms of tribological performance, compared to cellulose grease and SiO₂ grease, cellulose/SiO₂ grease has an improved friction reduction effect, with the lowest friction coefficient and friction force. [Conclusion] A cellulose based grease with practical prospects has been obtained, which is in line with the national low-carbon and sustainable development strategy. [Ch, 7 fig. 2 tab. 32 ref.]

Key words: lubricating grease; cellulose; rheology; friction; modification

全球每年有 1/3~1/2 的能源以各种形式消耗在摩擦上, 不仅造成了能源浪费与经济损失, 甚至会引起生产事故^[1-2]。使用合适的润滑剂可以在相互作用的摩擦表面上形成油膜, 降低摩擦与磨损, 减少能源的浪费, 延长机械使用寿命。润滑脂是一种将稠化剂分散到基础油中进行增稠得到的半固态润滑剂产品, 具有黏度大、耐压性强、密封性好以及减震降噪等优点, 在钢铁、化工、采矿以及冶金等行业得到了广泛的应用^[3-5]。现在市面上的润滑脂是以不可再生的石化资源为原料生产的。随着全球石化资源的日益枯竭以及开采和使用过程中带来的环境污染问题, 以可再生的生物基材料为原料制备润滑脂近年来成为了研究热点^[6-8]。润滑脂主要由基础油 (65%~95%)、稠化剂 (5%~35%) 以及添加剂 (0~10%) 组成。目前, 关于生物基润滑脂的相关研究尚处于起步阶段, 主要在基础油的开发, 通常的做法是以植物油代替矿物油制备生物基润滑脂。用于制备润滑脂的常见植物油包括蓖麻油^[9-11], 大豆油^[12-14] 和菜籽油^[15-17] 等。RAWAT 等^[18] 以蓖麻油为基础油制备了锂基润滑脂, 并用二硫化钼 (MoS₂) 和氧化石墨烯纳米片作为添加剂, 发现二维片状纳米材料可以显著改善蓖麻油基润滑脂的摩擦学性能。LIU 等^[13] 以环氧大豆油为基础油, 锂皂和三乙醇胺聚皂的混合物为稠化剂制备了润滑脂, 发现聚皂结构中的交联可以提供润滑脂更高的抗变形能力, 并且摩擦系数显著低于未添加聚皂的润滑脂。但目前关于润滑脂生物基稠化剂的研究还较少, 且以金属皂和聚脲稠化剂为主^[19-22]。金属皂和聚脲稠化剂的价格不稳定, 限制了润滑脂行业的可持续发展。在“碳达峰”和“碳中和”的背景下, 纤维素凭借可再生可降解、绿色环保以及储量丰富等优点受到了人们的青睐^[23-25]。本研究以天然纤维素和二氧化硅 (SiO₂) 为稠化剂, 利用硅羟基与纤维素羟基通过氢键物理交联制备了一种新型生物基润滑脂, 并对其理化性质、流变特性以及摩擦性能进行了测试, 旨在对生物降解型润滑脂的发展进行补充和完善, 实现环保型润滑脂的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

气相 SiO₂、矿物油由杭州得润宝油脂股份有限公司提供; 纤维素由北方世纪 (江苏) 纤维素有限公司提供。锥入度仪 (DFYF-308, 大连分析仪器厂); 宽温度范围滴点测定仪 (ST3498-2, 武汉研润科技发展有限公司); 扫描电镜 (SU 8010, 株式会社日立制作所); 流变仪 (MCR 302, 安东帕中国有限公司); 四球摩擦试验机 (MS-10JS, 厦门天机自动化有限公司)。

1.2 制备与分析方法

纤维素润滑脂的制备: 用电子秤称量 320 g 矿物油和 225 g 纤维素, 在搅拌下将纤维素逐次加入矿物油中进行充分混匀, 后将润滑脂放入三辊研磨机中反复研磨 3 次, 得到质地均一的纤维素润滑脂。

SiO₂ 润滑脂的制备: 用电子秤称量 550 g 矿物油和 30 g 气相 SiO₂, 将 SiO₂ 逐次加入矿物油中经过上述相同的搅拌和研磨操作后得到 SiO₂ 润滑脂。

纤维素/SiO₂ 润滑脂的制备: 用电子秤称量 450 g 矿物油, 15 g 气相 SiO₂ 以及 165 g 纤维素, 将 SiO₂ 和纤维素逐次加入矿物油经过上述相同的搅拌和研磨操作后得到纤维素/SiO₂ 润滑脂。

应用 SPSS 26.0 进行单因素完全方差分析比较 3 种润滑脂的分油率、锥入度以及摩擦学性能差异, 用 Duncan 法进行显著性检验 ($\alpha=0.05$)。

1.3 测试与表征

1.3.1 扫描电子显微镜 (SEM) 表征 对气相 SiO₂ 和纤维素表面喷金, 用扫描电镜观察样品表面形貌。

1.3.2 锥入度测试 锥入度是指在规定的负荷、时间和温度条件下锥体落入试样的深度,可以衡量润滑脂的稠度等级。按照 GB/T 269—1991《润滑脂和石油脂锥入度测定法》,使用全尺寸的锥体测试 3 种润滑脂的锥入度,均为 2#脂。

1.3.3 滴点测试 滴点是在规定的试验条件下,润滑脂在高温下从半固态转换为液态时第 1 次形成液滴并滴落下来的温度,可判断润滑脂的耐高温性能。采用标准 GB/T 3498—2008《润滑脂宽温度范围滴点测定法》测定 3 种润滑脂的滴点。

1.3.4 钢网分油率测试 钢网分油率是指润滑脂在受热条件下析出基础油的趋势,可体现润滑脂在受热条件下的胶体安定性。采用 NB/SH/T 0324—2010《润滑脂分油的测定 锥网法》测定润滑脂的分油率。

1.3.5 流变性能测试 润滑脂的流变特性主要研究润滑脂黏度、剪切应力和剪切应变等性能随温度和剪切速率变化的关系。采用安东帕(奥地利)MCR 302 型旋转流变仪,测试过程中选择流变仪的控制应变、控制剪切速率以及控制应力模式。

1.3.6 摩擦学性能测试 采用四球摩擦试验机测试润滑脂的摩擦学性能,载荷为 $40 \times 9.806\ 65\ \text{N}$,转速为 $1\ 200\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$,运行时间为 60 min。使用光学显微镜观察钢球的磨斑直径。

2 结果与分析

2.1 微观形貌

图 1A~B 为气相 SiO_2 和纤维素的 SEM 照片,气相 SiO_2 为纳米颗粒状,比表面积大,有利于与基础油的充分接触,具有良好的增稠作用。纤维素呈现微米级的短棒状,其表面的羟基可与 SiO_2 的硅羟基形成氢键交联网络结构(图 1C),改善润滑脂的胶体安定性,提升润滑脂的黏温性能和分油率。

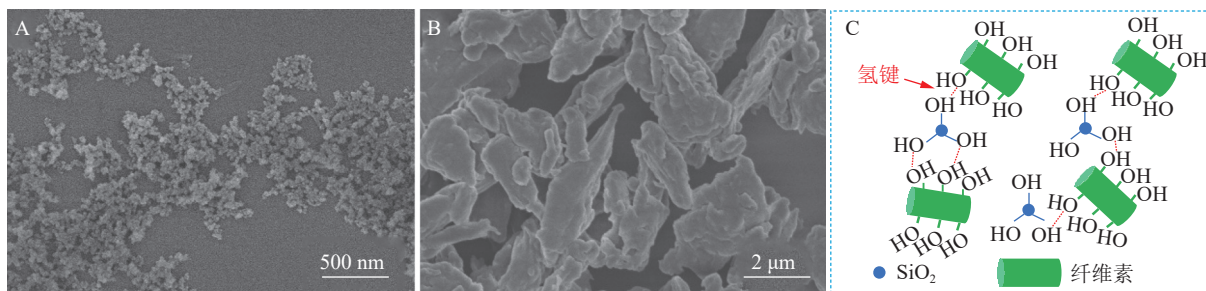


图 1 气相 SiO_2 (A) 和纤维素 (B) 的 SEM 图,及两者的氢键作用示意图 (C)

Figure 1 SEM images of fumed SiO_2 (A) and cellulose (B), and schematic diagram of hydrogen bonding between SiO_2 and cellulose (C)

2.2 润滑脂的理化性质

润滑脂锥入度、分油率以及滴点等相关理化性质见表 1,3 种润滑脂的外观如图 2 所示。纤维素/ SiO_2 润滑脂的分油率仅为 0.6%,较 SiO_2 润滑脂的 3.6% 有显著下降 ($P < 0.05$)。微量的分油可以保持设备润滑,对润滑有利;但过度的分油则会使润滑脂变稠变硬,破坏胶体结构,使润滑脂失去润滑作用,不能满足润滑要求。分油率测试结果表明:纤维素与 SiO_2 的氢键作用赋予了润滑脂优异的胶体安定性。此外,在滴点测试中,纤维素润滑脂和 SiO_2 润滑脂没有滴点(即 $330\ ^\circ\text{C}$ 下无滴点),而纤维素/ SiO_2 润滑脂的滴点为 $327\ ^\circ\text{C}$,这说明纤维素的引入改善了 SiO_2 润滑脂在高温下易失去流动性的缺点。

表 1 润滑脂的理化性质

Table 1 Physicochemical properties of greases

样品	SiO_2 添加量/%	纤维素添加量/%	锥入度(0.1 mm)	稠度等级	分油率/%	滴点/ $^\circ\text{C}$
纤维素润滑脂	0	41.3	$290 \pm 5\ \text{a}$	2#	$0.0 \pm 0.0\ \text{c}$	—
SiO_2 润滑脂	5.2	0	$282 \pm 2\ \text{a}$	2#	$3.6 \pm 0.4\ \text{a}$	—
纤维素/ SiO_2 润滑脂	2.4	26.2	$284 \pm 6\ \text{a}$	2#	$0.6 \pm 0.1\ \text{b}$	327

说明:锥入度和分油率数据为平均值 $\pm$ 标准差。同列不同字母表示不同润滑脂间差异显著($P < 0.05$)。—表示无。

2.3 润滑脂的流变特性

2.3.1 黏温性 图 3 为 3 种润滑脂在剪切速率为 $300\ \text{s}^{-1}$ 下的黏度-温度曲线。在 $0\ ^\circ\text{C}$ 以下时,纤维素润

滑脂的黏度出现了剧烈的抖动,其原因可能是纤维素润滑脂在此温度下发生了冻结,说明纯纤维素润滑脂的低温性能较差。其中,纯纤维素和 SiO₂ 润滑脂分别在 80 和 60 ℃ 发生黏度升高的现象,这是因为稠化剂与基础油发生了溶胶-凝胶转变,导致黏度升高。纤维素/SiO₂ 润滑脂在温度扫描过程中,其黏度在 90 ℃ 以内始终高于纯纤维素和纯 SiO₂ 润滑脂,显示出了优异的黏温性能。

2.3.2 黏弹性 图 4 为 3 种润滑脂的应变扫描图。可以看出,应变值较小时,润滑脂的储能模量和损耗模量基本维持在一个恒定值,应变超过一定值时(A 点),储能模量和损耗模量的线性规律不再保持,两者变化趋于相交。A 点为润滑脂线性黏弹区和非线性黏弹区的临界点,其对应的应变为临界应变^[26]。储能模量和损耗模量相交的 B 点称为润滑脂的流动点^[27],此时润滑脂的储能模量和损耗模量相等。应变继续增加,损耗模量就开始大于储能模量,表示润滑脂黏性流动所消耗的能量大于弹性变形所存储的能量,呈流动状态^[28]。从图 4 可以看出,纤维素/SiO₂ 润滑脂的流动点所对应的应变值最大,表明润滑脂承受更大的应变时才能由固态转变为流动态。

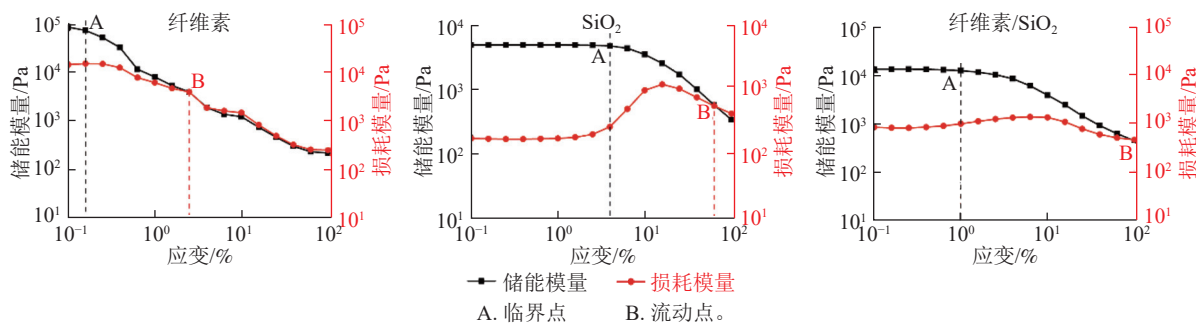


图 4 3 种润滑脂的应变扫描
Figure 4 Strain sweep of 3 types of greases

2.3.3 触变性 触变环是剪切速率按先增大后减小的规律变化时所形成的剪切应力变化曲线围成的封闭环。表明润滑脂结构的破坏速度显著高于恢复能力,即润滑脂的可恢复性较差。反之,表明润滑脂结构被破坏后的可恢复性越好。图 5 为 3 种润滑脂在 25 ℃ 下的触变环曲线。可以看到,纤维素/SiO₂ 润滑脂的面积为 17 636 Pa·s⁻¹,小于纯纤维素润滑脂的 72 250 Pa·s⁻¹ 和 SiO₂ 润滑脂的 21 998 Pa·s⁻¹,表明纤维素与 SiO₂ 复配后,润滑脂受剪切作用后的结构恢复性能得到了提升。

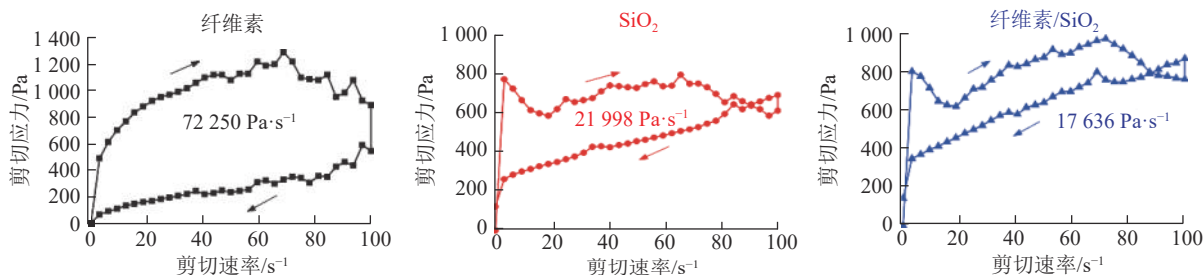


图 5 3 种润滑脂的触变性测试
Figure 5 Thixotropic test of 3 types of greases

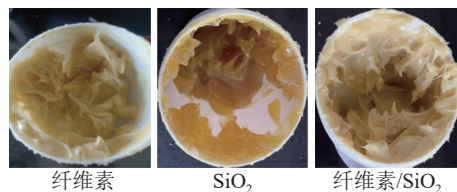


图 2 3 种润滑脂的外观
Figure 2 Appearance of three types of greases

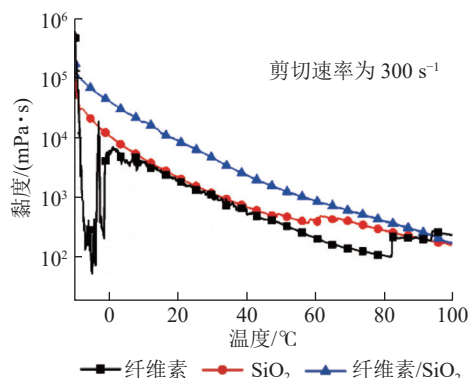


图 3 3 种润滑脂的黏度-温度曲线
Figure 3 Viscosity-temperature curve of 3 types of greases

2.3.4 黏剪切性 图 6A 为纤维素、SiO₂ 以及纤维素/SiO₂ 润滑脂黏度的剪切速率扫描图。随着剪切速率的增加, 润滑脂的黏度下降, 呈现出剪切变稀的特征, 并且纤维素和纤维素/SiO₂ 润滑脂的黏度高于 SiO₂ 润滑脂。图 6B 为 3 种润滑脂剪切应力随剪切速率的变化关系, 3 种润滑脂的剪切应力随着剪切速率的增加而增加, 且纤维素/SiO₂ 润滑脂的剪切应力在剪切过程中是始终高于纯 SiO₂ 润滑脂的, 表明其能承受的剪切应力更大。

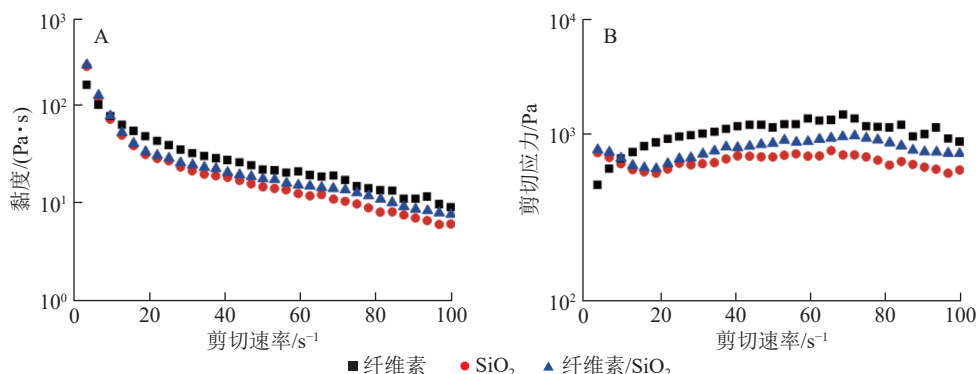


图 6 3 种润滑脂的剪切速率扫描
Figure 6 Shear rate sweep of 3 types of greases

2.4 润滑脂的摩擦学性能

由表 2 可见: 纤维素/SiO₂ 润滑脂的摩擦系数和摩擦力平均值为 0.078 和 3.798 N, 显著低于纯纤维素润滑脂的 0.093 和 4.578 N 以及 SiO₂ 润滑脂的 0.095 和 4.664 N ($P < 0.05$)。其可能的减摩机制如图 7 所示, 相比于纯纤维素润滑脂和 SiO₂ 润滑脂, 纤维素/SiO₂ 润滑脂在摩擦过程中受剪切力作用, 纤维素与 SiO₂ 颗粒之间发生相对移动, 进而发挥了协效作用, 提高了润滑脂的减摩性能。但纤维素/SiO₂ 润滑脂的磨斑直径显著高于纤维素润滑脂和 SiO₂ 润滑脂 ($P < 0.05$), 这可能是因为纤维素与 SiO₂ 在相对运动摩擦表面会两相分离, 在摩擦副表面发生团聚, 产生了更大的磨损体积。

表 2 润滑脂的摩擦性能表

Table 2 Friction performance of 3 types of greases			
润滑脂样品	摩擦系数	摩擦力/N	磨斑直径/mm
纤维素	0.093 ± 0.020 a	4.578 ± 0.200 a	0.633 ± 0.030 c
SiO ₂	0.095 ± 0.030 a	4.664 ± 0.300 a	0.744 ± 0.040 b
纤维素/SiO ₂	0.078 ± 0.030 b	3.798 ± 0.200 b	0.848 ± 0.040 a

说明: 数据为平均值±标准差。同列不同字母表示不同润滑脂间差异显著 ($P < 0.05$)。

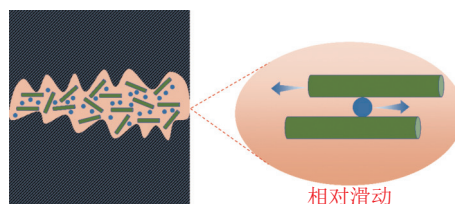


图 7 纤维素/SiO₂ 润滑脂的减摩机制示意图

Figure 7 Schematic diagram of the friction reduction mechanism of cellulose/SiO₂ grease

3 讨论

黏温性方面, 纤维素、SiO₂ 以及纤维素/SiO₂ 润滑脂的黏度均随温度升高而呈现下降趋势, 这是因为温度升高, 油脂分子的运动加剧, 使得粒子间的内摩擦力减小, 润滑脂的黏度也随之降低^[29]。纤维素与 SiO₂ 复配后, 两者之间的氢键作用提高了稠化剂结构的强度。因此, 纤维素/SiO₂ 润滑脂的黏温性能优于纤维素和 SiO₂ 润滑脂。

黏弹性方面, 纤维素与 SiO₂ 复配后, 其流动点对应的应变值最大。这是因为纤维素与 SiO₂ 复配后, 通过氢键交联构成了一个三维空间网络结构, 在其受到应力产生变形直至流动的过程中, 会受到氢键作用的约束, 只有纤维素/SiO₂ 润滑脂发生更大的变形, 才能克服纤维素与 SiO₂ 之间的氢键作用力, 使之趋于定向, 进而流动。

触变性方面, 润滑脂在受剪切作用时, 其内部的微结构会逐渐被破坏, 黏度会逐渐下降, 而去除剪切应力后, 其黏度又会逐渐恢复。不同的润滑脂在结构恢复中的速度及恢复程度不同, 因此触变环的面积可以反映润滑脂结构恢复的快慢^[30-31]。纤维素与 SiO₂ 复配后, 氢键交联网络减缓了润滑脂结构的破坏速度, 使得润滑脂受剪切作用后的结构更易恢复。因此, 纤维素/SiO₂ 润滑脂的触变环面积最小。

黏剪切性方面, 3 种润滑脂呈现相似的变化规律, 即随着剪切速率的增加, 润滑脂的黏度降低, 并且在低剪切速率下黏度的下降趋势更为明显, 而当剪切速率较高时, 黏度趋于稳定。这是因为高剪切速率下, 稠化剂粒子间趋于定向, 黏度因此也趋于定向, 剪切变稀效应逐渐变弱^[32], 并且由于纤维素之间以及纤维素与 SiO₂ 的氢键作用, 使得纤维素和纤维素/SiO₂ 润滑脂能够承受更高的剪切速率。

4 结论

本研究利用 SiO₂ 表面的硅羟基与纤维素羟基之间的氢键相互作用制备了生物基润滑脂, 探究了纤维素、SiO₂ 以及纤维素/SiO₂ 等 3 种润滑脂的理化性质、流变行为以及摩擦性能。结果表明: ①纤维素/SiO₂ 润滑脂的分油率较低, 胶体安定性得到提高, 并且在 327 °C 附近出现了滴点, 改善了 SiO₂ 润滑脂高温下易失去流动性的缺点。②纤维素/SiO₂ 润滑脂黏温性能和抗剪切能力较 SiO₂ 润滑脂得到了提升, 且剪切破坏后润滑脂的结构恢复速度变快, 结构体系更加稳定。③纤维素/SiO₂ 润滑脂具有较低的摩擦系数和摩擦力, 减摩效果较纤维素和 SiO₂ 润滑脂有所提升, 但磨损体积却较大, 抗磨性能有待改进。本研究以天然大宗的纤维素为原料开发出性能可以与商用 SiO₂ 润滑脂相媲美的环保型润滑脂产品, 具有很强的实际应用前景, 有利于生态效益和经济效益的统一, 符合国家的可持续发展战略。

5 参考文献

- [1] LIANG Zhao, WANG Siyuan, ZHU Kaiji, *et al.* Enhancing the tribological properties and corrosion resistance of graphene-based lubricating grease via ultrasonic-assisted ball milling[J/OL]. *Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, **633**: 127889[2023-10-04]. doi: 10.1016/j.colsurfa.2021.127889.
- [2] SHAHNAZAR S, BAGHERI S, ABD HAMID S B. Enhancing lubricant properties by nanoparticle additives [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, **41**(4): 3153 – 3170.
- [3] SUN Zheng, XU Chunming, PENG Yuxing, *et al.* Fretting tribological behaviors of steel wires under lubricating grease with compound additives of graphene and graphite[J/OL]. *Wear*, 2020, **454/455**: 203333[2023-10-04]. doi: 10.1016/j.wear.2020.203333.
- [4] WEI Xiaofeng, LI Wen, FAN Xiaoqiang, *et al.* MoS₂-functionalized attapulgite hybrid toward high-performance thickener of lubricating grease[J/OL]. *Tribology International*, 2023, **179**: 108135[2023-10-04]. doi: 10.1016/j.triboint.2022.108135.
- [5] SENATORE A, HONG H, D'URSO V, *et al.* Tribological behavior of novel CNTs-based lubricant grease in steady-state and fretting sliding conditions[J/OL]. *Lubricants*, 2021, **9**(11): 107[2023-10-04]. doi: 10.3390/lubricants9110107.
- [6] SU Chang, GUO Jianfang, CHENG Jue, *et al.* Heterogeneous epoxidation of microcrystalline cellulose and the toughening effect toward epoxy resin [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2023, **62**(6): 2671 – 2686.
- [7] WU Zhipeng, THORESEN P P, MATSAKAS L, *et al.* Facile synthesis of lignin-castor oil-based oleogels as green lubricating greases with excellent lubricating and antioxidation properties [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2023, **11**(34): 12552 – 12561.
- [8] BORREGO M, MARTÍN-ALFONSO J, VALENCIA C, *et al.* Impact of the morphology of electrospun lignin/ethylcellulose nanostructures on their capacity to thicken castor oil[J/OL]. *Polymers*, 2022, **14**(21): 4741[2023-10-04]. doi: 10.3390/polym14214741.
- [9] MARTÍN-ALFONSO J E, MARTÍN-ALFONSO M J, VALENCIA C, *et al.* Rheological and tribological approaches as a tool for the development of sustainable lubricating greases based on nano-montmorillonite and castor oil [J]. *Friction*, 2021, **9**(2): 415 – 428.
- [10] VAF AEI S, JOPEN M, JACOBS G, *et al.* Synthesis and tribological behavior of bio-based lubrication greases with bio-based polyester thickener systems[J/OL]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, **364**: 132659[2023-10-04]. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132659.
- [11] CHEN Jiale, YU Jinying, LIU Danlian, *et al.* Tribological properties and synergistic lubrication mechanism of 3D graphene/nano-TiO₂ (G@TiO₂) composite castor oil: a microscopic view and molecular dynamics perspective[J/OL]. *Tribology International*, 2023, **188**: 108821[2023-10-04]. doi: 10.1016/j.triboint.2023.108821.
- [12] KOZDRACH R. The tribological properties of lubricating greases based on renewable oils [J]. *Tribologia*, 2016, **266**(2): 61 – 72.

- [13] LIU Zengshe, BIRESAW G, BISWAS A, *et al.* Effect of polysoap on the physical and tribological properties of soybean oil-based grease [J]. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 2018, **95**(5): 629 – 634.
- [14] SAXENA A, KUMAR D, TANDON N. Development of eco-friendly nano-greases based on vegetable oil: an exploration of the character via structure[J/OL]. *Industrial Crops and Products*, 2021, **172**: 114033[2023-10-04]. doi: 10.1016/j.indcrop.2021.114033.
- [15] KREIVAITIS R, PADGURSKAS J, GUMBYTĖ M, *et al.* An assessment of beeswax as a thickener for environmentally friendly lubricating grease production [J]. *Lubrication Science*, 2015, **27**(6): 347 – 358.
- [16] 何忠义, 朱星星, 唐骏, 等. 纳米氧化镧在纯菜籽油锂基脂中的摩擦学性能研究[J]. 稀土, 2017, **38**(4): 23 – 29.
HE Zhongyi, ZHU Xingxing, TANG Jun, *et al.* Study on the tribological properties of nano lanthanum oxide in pure rapeseed oil lithium based fats [J]. *Chinese Rare Earth*, 2017, **38**(4): 23 – 29.
- [17] 康健, 赵玉贞, 宗明. 生物降解型润滑脂的进展[J]. 合成润滑材料, 2012, **39**(1): 21 – 24.
KANG Jian, ZHAO Yuzhen, ZONG Ming. Progress in biodegradable lubricating greases [J]. *Synthetic Lubricants*, 2012, **39**(1): 21 – 24.
- [18] RAWAT S S, HARSHA A P, KHATRI O P. Tribological investigations of two-dimensional nanostructured lamellar materials as additives to castor-oil-derived lithium grease[J/OL]. *Journal of Tribology-transactions*, 2022, **144**(9): 091902[2023-10-04]. doi: 10.1115/1.4054102.
- [19] KUMAR N, SAINI V, BIJWE J. Tribological investigations of nano and micro-sized graphite particles as an additive in lithium-based grease[J/OL]. *Tribology Letters*, 2020, **68**(4): 124[2023-10-04]. doi: 10.1007/s11249-020-01362-1.
- [20] WANG Tao, LI Zhanjun, LI Jingbin, *et al.* Impact of boron nitride nanoparticles on the wear property of lithium base grease [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020, **29**(8): 4991 – 5000.
- [21] KUMAR N, SAINI V, BIJWE J. Exploration of talc nanoparticles to enhance the performance of lithium grease[J/OL]. *Tribology International*, 2021, **162**: 107107[2023-10-04]. doi: 10.1016/j.triboint.2021.107107.
- [22] REN Guanlin, ZHOU Changjiang, FAN Xiaoqiang, *et al.* Investigating the rheological and tribological properties of polyurea grease via regulating ureido amount[J/OL]. *Tribology International*, 2022, **173**: 107643[2023-10-04]. doi: 10.1016/j.triboint.2022.107643.
- [23] LOU Gaobo, MA Zhewen, DAI Jinfeng, *et al.* Fully biobased surface-functionalized microcrystalline cellulose via green self-assembly toward fire-retardant, strong, and tough epoxy biocomposites [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, **9**(40): 13595 – 13605.
- [24] AZIZ T, FARID A, HAQ F, *et al.* A review on the modification of cellulose and its applications[J/OL]. *Polymers*, 2022, **14**(15): 3206[2023-10-04]. doi: 10.3390/polym14153206.
- [25] LI Jingwen, LIN Ning, DU Chen, *et al.* Tribological behavior of cellulose nanocrystal as an eco-friendly additive in lithium-based greases[J/OL]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, **290**: 119478[2023-10-04]. doi: 10.1016/j.carbpol.2022.119478.
- [26] LI Yong, ZHOU Weidong, XUE Wanan, *et al.* The enhancement of overall performance of lubricating grease by adding layered double hydroxides[J/OL]. *Lubricants*, 2023, **11**(6): 260[2023-10-04]. doi: 10.3390/lubricants11060260.
- [27] BARTOLOMÉ M, GONÇALVES D, TUERO A G, *et al.* Greases additised with phosphonium-based ionic liquids - Part I: Rheology, lubricant film thickness and stribeck curves[J/OL]. *Tribology International*, 2021, **156**: 106851[2024-03-04]. doi: 10.1016/j.triboint.2020.106851.
- [28] ZAKANI B, ANSARI M, GRECOV D. Dynamic rheological properties of a fumed silica grease [J]. *Rheologica Acta*, 2018, **57**: 83 – 94.
- [29] PENG Han, LI Songyin, SHANGGUAN Linjian, *et al.* Research on the rheological characteristics of wind power grease based on rheological parameters[J/OL]. *Lubricants*, 2023, **11**(7): 299[2023-10-04]. doi: 10.3390/lubricants11070299.
- [30] DAI Wenting, ZUO Jinghao, LIU Dehao, *et al.* Tribological properties and seasonal freezing damage evolution of rotating spherical hinge self-lubricating coating[J/OL]. *Applied Science*, 2022, **12**(16): 8329[2023-10-04]. doi: 10.3390/app12168329.
- [31] REN Guanlin, ZHOU Changjiang, WANG Siyuan, *et al.* Improving the rheological and tribological properties of lithium complex grease via complexing agent[J/OL]. *Tribology International*, 2022, **175**: 107826[2023-10-04]. doi: 10.1016/j.triboint.2022.107826.
- [32] WANG Yanshuang, ZHANG Pu, LIN Jianghai, *et al.* Rheological and tribological properties of lithium grease and polyurea grease with different consistencies[J/OL]. *Coatings*, 2022, **12**(4): 527[2023-10-04]. doi: 10.3390/coatings12040527.