

分类号: TH117.1

学校代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2210110119



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 剪切模式下磁流变脂热老化特
性及其失效机理研究

论 文 作 者 李贻良
指 导 教 师 潘家保 教授
学 科 (专 业) 机械工程
研 究 方 向 磁流变脂热流变研究

论文提交日期: 2024 年 4 月 10 日

分类号：TH117.1

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2210110119

安徽工程大学

剪切模式下磁流变脂热老化特性及其失效机理研究

Thermal aging characteristics and failure mechanism of
magnetorheological grease in shear mode

学生姓名：_____李 贻 良_____

指导教师：_____潘家保(教授)_____

专 业：_____机械工程_____

研究方向：_____磁流变脂热流变研究_____

论文答辩日期：2024 年 5 月 17 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：李昭良

日期：2024年 5月 31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：刘良

日期：2024年 5月 31日

指导教师签名：唐国群

日期：2024年 5月 31日

剪切模式下磁流变脂热老化特性及其失效机理研究

摘 要

磁流变脂是一种在磁场调节下实现毫秒级、固液逆变化的新型智能材料，其由磁性颗粒和胶状基体润滑脂混合制备而成，在磁流变阻尼器、离合器和制动器等领域具有广阔应用场景。磁流变器件在服役过程中因摩擦副间流体摩擦而出现热量堆积，不同服役强度下产生的热效应与润滑介质服役性能紧密相关。正常服役强度下良好的散热条件需要磁流变脂提供良好的剪切稳定性，以降低磁流变器件调控过程中润滑系统的干扰。而高强度工作下，因散热不足引起的热量聚集，磁流变脂受高温热效应影响，其流变性能发生显著变化，对磁流变脂继续服役性能构成挑战。并且，在热效应演变过程中，磁流变脂服役工况趋于多元耦合，传统单因素试验不足以明晰机理。

基于此，本研究以磁流变器件不同服役强度下，热效应行为对磁流变脂流变性能的影响为研究主体，针对基载液稠度、持续热效应、高温热效应和流变特性预测进行系统探究，结合磁学性能和流变特性试验对磁流变脂流变学行为进行探讨，为磁流变器件可靠性服役提供基础实验和理论支撑。主要研究内容如下：

（1）润滑脂特有的皂纤维结构可以有效防止颗粒沉降，并且作为高稠度胶体静态储存性能较优。以平均直径 3~5 μm 羰基铁粉作为离散相，NLGI 1 通用锂基润滑脂作为连续相制备磁流变脂，采用旋转流变仪探究磁流变脂不同磁场激励下磁控性能影响。

（2）磁流变器件正常服役强度下，对润滑介质持续可靠服役性能要求较高。磁流变脂在服役过程中主要受到持续热效应、持续剪切

和磁场激励的影响，通过不同温度和磁场下的流变试验，探究基载液稠度和持续热效应对磁流变脂剪切稳定性的影响规律。

（3）磁流变器件高强度服役下，纤维结构遭受破坏，磁流变脂继续服役性能遭受考验。对磁流变脂进行静态热处理模拟服役过程中介质性能衰退变化。通过不同热效应温度、时间的流变试验，探究磁流变脂继续服役性能受高温热效应的影响规律。

（4）磁流变脂在服役过程中受到多场耦合作用，传统单因素试验不足以解析规律。建立 SSA-BP 预测模型，用于表征和预测试验温度、磁场、热效应时间、剪切速率与磁流变脂流变学性能之间的关系。

关键词：磁流变脂，持续热效应，高温热效应，磁学性能，流变特性

THERMAL AGING CHARACTERISTICS AND FAILURE MECHANISM OF MAGNETORHEOLOGICAL GREASE IN SHEAR MODE

ABSTRACT

Magnetorheological grease(MRG) is a new intelligent material that can realize millisecond level, solid-liquid inverse change under magnetic field regulation. It is prepared by mixing magnetic particles and colloid-like matrix grease, and has wide application in magnetorheological dampers, clutches and brakes. Magnetorheological devices in service due to fluid friction between the friction sub-friction and heat accumulation, different service intensity of the thermal effect and lubrication media service performance is closely related. Good heat dissipation under normal service strength requires magnetorheological grease to provide good shear stability to reduce the interference of the lubrication system in the regulation process of magnetorheological devices. However, under high-intensity work, due to the gathering of heat caused by insufficient heat dissipation, the rheological properties of MRG are significantly changed by the high-temperature thermal effect, which poses a challenge to the continued service performance of MRG. Moreover, during the evolution of thermal effect, the service conditions of MRG tend to be multi-coupled, and the traditional single-factor test is not enough to clarify the mechanism.

(1) The unique soap fibre structure of the grease can effectively prevent particle settling, and it has better static storage performance as a high consistency colloid. The MRG was prepared by using carbonyl iron powder with an average diameter of 3~5 μm as the discrete phase and

NLGI 1 general-purpose lithium grease as the continuous phase, and the effect of magnetocontrol properties of the MRG was investigated by using a rotational rheometer with different magnetic excitations.

(2) Under the normal service intensity of magnetorheological devices, the lubricant medium has high requirements for continuous and reliable service performance. MRG is mainly affected by continuous thermal effect, continuous shear and magnetic field excitation during the service process. Through the rheological test under different temperatures and magnetic fields, the influence of base carrier fluid consistency and continuous thermal effect on the shear stability of magnetorheological grease is investigated.

(3) Under the high-intensity service of magnetorheological devices, the fibre structure suffers damage, and the performance of MRG is tested for continued service. The static heat treatment of MRG simulates the degradation of media properties during service. Through the rheological test with different thermal effect temperature and time, the continued service performance of MRG is investigated by the influence of high temperature thermal effect.

(4) MRG is subject to multi-field coupling during service, and the traditional one-factor test is not sufficient to resolve the law. An SSA-BP prediction model is developed to characterise and predict the relationship between test temperature, magnetic field, thermal effect time, shear rate and rheological properties of MRG.

KEY WORDS: magnetorheological grease, sustained thermal effect, high temperature thermal effect, magnetic properties, rheological properties

目录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状及发展趋势.....	2
1.2.1 磁流体研究现状.....	3
1.2.2 磁流变液研究现状.....	4
1.2.3 磁流变脂研究现状.....	5
1.3 本文的主要研究内容和章节安排.....	8
1.3.1 研究内容.....	9
1.3.2 章节安排.....	9
第 2 章 磁流变脂制备研究.....	11
2.1 引言.....	11
2.2 试验方案设计.....	11
2.2.1 试验材料.....	11
2.2.2 磁流变脂制备.....	12
2.2.3 试验设备.....	13
2.3 磁控性能试验.....	15
2.4 本章小结.....	16
第 3 章 持续热效应对磁流变脂剪切稳定性的影响研究.....	17
3.1 引言.....	17
3.2 试验方案设计.....	17
3.2.1 试验材料.....	17
3.2.2 流变特性测试.....	17
3.3 结果与讨论.....	18
3.3.1 磁学性能分析.....	18
3.3.2 旋转剪切模式下的流变特性.....	19
3.3.3 振荡剪切模式下的流变特性.....	26
3.4 本章小结.....	30

第 4 章 高温热效应对磁流变脂流变学行为的影响研究.....	32
4.1 引言.....	32
4.2 试验方案设计.....	32
4.2.1 试验材料及样品制备.....	32
4.2.2 流变学性能测试.....	33
4.3 结果与讨论.....	34
4.3.1 磁学性能分析.....	34
4.3.2 稳态剪切模式下的流变特性.....	35
4.3.3 动态剪切模式下的流变特性.....	39
4.4 本章小结.....	43
第 5 章 磁流变脂热效应行为的分析与预测.....	44
5.1 引言.....	44
5.2 试验方案设计.....	44
5.2.1 试验材料.....	44
5.2.2 流变学性能测试.....	45
5.2.3 试验结果.....	45
5.3 高温热效应磁流变脂流变性能预测模型.....	46
5.3.1 BP 神经网络.....	47
5.3.2 SSA 算法.....	48
5.3.3 SSA-BP 神经网络.....	50
5.3.4 预测结果分析.....	51
5.4 本章小结.....	53
第 6 章 总结与展望.....	54
6.1 全文工作总结.....	54
6.2 工作展望.....	55
参考文献.....	57
攻读学位期间取得的学术成果.....	66

插图清单

图 1-1	润滑脂失效.....	1
图 1-2	磁流变效应示意图.....	2
图 1-3	$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}$ 的合成过程示意图.....	4
图 1-4	半主动式磁流变阻尼器及爆炸视图.....	5
图 1-5	挤压-剪切混合模式磁流变离合器	5
图 1-6	磁性颗粒不同质量分数下磁流变脂性能.....	7
图 1-7	锂-钙基润滑脂皂纤维形态图	8
图 1-8	主要技术路线.....	9
图 2-1	一步法接触器制备过程.....	12
图 2-2	一步法连续皂化制备过程.....	13
图 2-3	磁流变脂制备流程及制备设备.....	13
图 2-4	MCR-301 旋转流变仪实物图及测试原理图	14
图 2-5	试验设备装配示意图.....	14
图 2-6	变磁场剪切应力.....	15
图 2-7	固定磁场下磁流变脂性能.....	16
图 3-1	不同温度下磁流变脂磁场扫描曲线.....	18
图 3-2	磁性颗粒的磁畴随磁场的变化示意图.....	19
图 3-3	磁流变脂触变性曲线.....	20
图 3-4	磁流变脂屈服应力.....	23
图 3-5	磁流变脂触变环面积.....	24
图 3-6	磁流变脂表观黏度曲线和表观黏度平均值.....	25
图 3-7	不同磁场强度和温度下磁流变脂应变扫描曲线.....	26
图 3-8	不同磁场强度和温度下磁流变脂频率扫描曲线.....	27
图 3-9	不同磁场下各样品平台模量的变化曲线.....	29
图 3-10	不同温度下各样品平台模量的变化曲线.....	30

图 4-1	热效应磁流变脂样品制备流程.....	33
图 4-2	磁流变脂磁学性能.....	34
图 4-3	磁流变脂触变性.....	36
图 4-4	磁流变脂的触变环面积.....	37
图 4-5	磁流变脂的表观黏度曲线和表观黏度平均值.....	38
图 4-6	磁流变脂的储能和损耗模量随剪切应变规律.....	40
图 4-7	磁流变脂的储能和损耗模量随剪切频率规律.....	41
图 4-8	180°C-4h 的平台模量随磁场强度和温度的变化曲线	42
图 4-9	热效应磁流变脂的平台模量随加热时间和温度的变化曲线.....	42
图 5-1	磁流变脂剪切速率扫描曲线.....	46
图 5-2	BP 神经网络的架构.....	47
图 5-3	数据打乱操作示意图.....	48
图 5-4	SSA-BP 预测模型流程图	50
图 5-5	预测误差随迭代周期变化曲线.....	51
图 5-6	磁流变脂流变性能预测曲线.....	52

插表清单

表 1-1	磁流变材料种类.....	3
表 2-1	锂基润滑脂主要参数.....	11
表 2-2	磁性颗粒主要指标.....	11
表 3-1	不同连续相下磁流变脂主要内容.....	18
表 3-2	00#MRG 不同温度和磁场下 H-B 模型参数.....	21
表 3-3	0#MRG 不同温度和磁场下 H-B 模型参数.....	21
表 3-4	1#MRG 不同温度和磁场下 H-B 模型参数.....	22
表 4-1	热处理后的磁流变脂样品编号.....	33
表 5-1	BP 神经网络的初始参数.....	47
表 5-2	SSA 优化算法的参数	48
表 5-3	不同数据集预测误差统计表.....	52
表 5-4	预测曲线误差统计表.....	53

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

工业进程发展至今，摩擦副间的直接接触传动效率高，热损耗也高，新兴的磁作用力器械以隔空传力的优势打破常规，降低了热能损耗，但效率较低。而润滑剂伴随着工业进程不断迭代更新，将干摩擦转为流体摩擦，既保留了传递效率高的优势，又极大的降低了热能损耗。工程器械中传统润滑介质主要分为润滑油和润滑脂，根据其所处工业环境的运转速度、承载负荷、工作温度和工作环境来进行油品选择。传统润滑介质随着工程器械的迭代更新面临的问题也逐渐增多，变速运转、变载荷及多耦合工况等复杂服役环境使得传统润滑品作为摩擦介质出现润滑不充分的问题明显增加。图 1-1 所示为轴承运转过程中因摩擦发热而引起的润滑失效，持续流体摩擦引起热量持续堆积进而导致润滑脂胶体变质。磁流变介质是一种通过磁场调节，可以实现自身流变性能可逆变化的智能材料，其由微米级磁性颗粒和润滑介质混合而成^[1-2]。其特有的磁流变效应(如图 1-2)表现为无磁场下，磁流变介质的流变性能与润滑介质相似，此时磁流变脂无法使用磁控特性，进行流变性能调节；施加外部磁场后，磁性颗粒在磁场作用下形成柱状或簇状磁链，与润滑脂特有的皂纤维结构交织缠结，既具备结构增强作用，同时流变性能稳定可控的优势使其在润滑领域具有广阔应用场景。磁流变介质具备的流变性能可控的显著特点使其应用广泛，有效解决了传统润滑介质受复杂工况引起的润滑不足问题，然而多元的应用场景对磁流变脂的可靠服役仍是挑战。



图 1-1 润滑脂失效

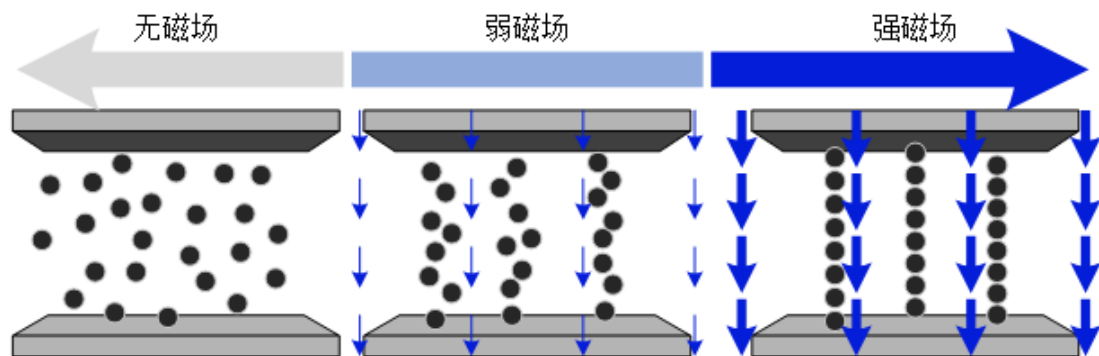


图 1-2 磁流变效应示意图

磁流变器件包括磁流变阻尼器、磁流变轴承和磁流变离合器等器械以摩擦方式划分为往复剪切型、旋转剪切型。其在服役过程中因摩擦副间的频繁剪切不可避免的产生大量热量，尤其在以油封性能好的密闭器件中会堆积较多的热量，工作环境的巨大变化对于润滑介质的服役稳定性和流变性能带来极大挑战。并且恶劣的工况会加剧润滑品的损耗，导致工程机械出现异常磨损，进而降低了器件的使用寿命。

磁流变介质能够在减震器、离合器、传动机构等工程器械中进行应用，服役环境复杂多变，并且磁流变脂作为润滑介质面临持续剪切、热磁耦合、高温热效应等多重耦合工况^[3-4]。所以本文通过对磁流变脂展开持续热效应和高温热效应下流变性能和热效应行为预测的研究，总结磁流变脂流变学行为随温度、磁场、热效应温度和热效应时间的一般性规律。

1.2 国内外研究现状及发展趋势

磁流变材料是一种通过调节磁场强度可以实现毫秒级、固液态可逆变化的智能材料，通过磁场控制，可以实现工作区域充分润滑，克服常规润滑脂遭遇温升时与腔壁黏性不足的问题，在减震器、离合器、传动机构等磁流变器械中具有巨大应用前景^[5-8]。自 1948 年 Rabinow 提出流变特性在外磁场激励下可控响应的磁流变材料后，通过将其布局于磁流变离合器中测试流体的力传递特性，引起智能材料的研究热潮。由于磁流变材料的快速响应性、低噪音运转及便于调控等优势得到广泛应用。磁流变材料通过将微米或纳米级磁性颗粒与基载液和添加剂进行混合形成悬浮液样品，添加剂可以有效降低混合物的沉降速率。表 1-1 为根据基载液的不同得到的磁流变材料种类，目前主要研究热点围绕磁流变材料的基载液进行展开。

表 1-1 磁流变材料种类

磁流体	磁流变液	磁流变脂	磁流变凝胶	磁流变弹性体
有机溶剂、油、水	合成油、矿物油	润滑脂	凝胶	高分子聚合物

1.2.1 磁流体研究现状

磁流体是以微米级磁性颗粒分散在合适的液态基载液中形成的悬浮液。磁性微粒一般选取直径 1~10 nm，通过适合的表面活性剂将微粒悬浮分散在基载液中。由于其微粒尺寸较小，布朗运动可以有效抑制微粒的沉降和团聚，并且微粒受外加磁场激励形成的磁链对液态磁流变材料复合强度有一定的增强作用^[9-10]。

Daniela 等^[11]在考虑没有分散微粒的试验条件下通过磁铁矿纳米颗粒的疏水稳定进行制备煤油基磁流体，结合磁学性能分析发现，在外加磁场激励下，微型聚集体会靠拢形成大的液滴状颗粒团聚体，撤去外加激励后，团聚体消散。表现出显著的磁流变效应。Gu 等^[12]通过纳米 $\text{SiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ 与地质聚合物基体制备的磁流体对其电磁和机械行为研究发现，纳米颗粒有效增强了聚合物内部相邻磁矩间的磁交换能。并且聚合物样品在 9.4 vol% 纳米颗粒浓度时，电磁和机械行为具有较好的平衡。Bai 等^[13]通过以碳层改性磁铁矿(Fe_3O_4)纳米球($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}$)作为纳米微粒制备磁流体，图 1-3 给出了 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}$ 的合成过程示意图。结合流变学性能和颗粒级动态模拟方法发现，碳层改性颗粒相对基础样品的剪切应力得到极大的增加，并且 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}$ 纳米球的核壳结构和多孔结构使其具有较高的饱和磁化强度，表现出较好的流变学性能和稳定性。恭飞等^[14]采用水基 NiFe_2O_4 磁流体作为新型液压介质解决叶片-定子副磨损问题，与传统液压介质对照试验发现。无磁场下，磁流体浓度为 5% 时表现出较好的润滑性能。饱和磁场下，6% 浓度的磁流体流体性能变化较小，剪切稳定性好，相较传统液压介质具有良好的润滑性能。对磁流体在液压传动领域有较好的借鉴作用。王优强等^[15]采用水基磁流体与 TC4 钛合金进行摩擦磨损试验，与传统基液水润滑进行比较。研究发现 1.2 vol% 磁流体的减摩效果最好。在外加磁场下，不同质量分数的水基磁流体磨损量更多，随着磁场强度增加，磨损量降低。梁天祥等^[16]探究了纳米 NiFe_2O_4 磁流体的金属铜片腐蚀行为。研究发现磁流体中的纳米磁性颗粒促进了铜片的腐蚀速率，而磁场可以有效降低铜片的腐蚀速率，并随着磁场强度的增加而减小。邢美波等^[17]研究了水基磁性碳纳米管($\text{MWCNT-Fe}_3\text{O}_4$)流体受磁场强度和 MWCNT 排列方向对其光热

转换性能影响。研究发现在低浓度下, 0.01 vol%磁流体的光热转换效率较高, 比纯水提高了 30%。高浓度时由于透光率的降低转换效率随之下降。垂直磁场时, 由于 MWCNT 排列方向与温度梯度的一致性, 转换效率提高。水平磁场时, 效率降低。纳米级颗粒使得磁流体防沉降性能较好, 然而在磁流变器件的应用中, 磁流体的屈服应力相对大尺寸颗粒的磁流变液较小, 剪切力矩小。

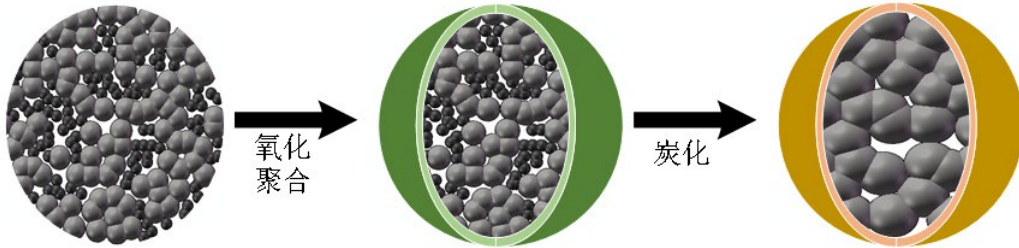


图 1-3 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}$ 的合成过程示意图^[13]

1.2.2 磁流变液研究现状

磁流变液是以 0.1~500 μm 直径的磁性颗粒和基载液混合, 在辅以添加剂稳定颗粒悬浮状态, 大尺寸的磁性颗粒在磁场作用下聚拢形成的磁链可以有效增强磁流变液复合结构强度, 极大的提高剪切阻力, 对于磁流变器件在传动、阻尼等领域具有良好的应用场景^[18-20]。Genç 等^[21]研究了不同直径的磁性颗粒对磁流变液流变性能的影响。研究发现颗粒直径在 7~9 μm 的磁流变液的饱和磁化强度为 2.03 T, 而直径 2 μm 时为 1.89 T。并且粗颗粒屈服应力在不同质量分数条件下均高于细颗粒。杨三锋等^[22]设计新型双出杆磁流变-剪切增稠阻尼器, 并对其动态性能测试试验。研究发现在 110 mT 外磁场的主动控制下可以提升 34.3% 的阻尼力。阻尼力随着振荡频率的增加呈现显著提升。冯钰琦等^[23]以半主动式磁流变阻尼器在往复压缩机管路振动试验平台进行振动模拟试验, 如图 1-4 所示为磁流变阻尼器结构示意图。研究发现磁流变阻尼器取得较好的减振效果, 在 1.8 A 激励电流时效果最好。董小闵等^[24]提出双模式变间隙磁流变阻尼器结构满足隔振和抗坠毁双模式的复杂工况。研究发现阻尼器在冲击工况下阻尼力稳定可控, 并且隔振单元动态范围广。胡国良等^[25]提出多液流通道的旋转式磁流变制动器, 搭建了旋转式磁流变制动器制动转矩特性测试试验台对磁流变制动器进行转矩性能试验。结果表明磁流变制动器转矩基本不受转速影响。该特性对于相关磁流变制动器的设计有一定的指导作用。王道明等^[26]探究不同制动工况对磁流变液制动器温度特性影响。研究发现相同的激励磁场下, 磁流变液制动器具有较好的恒减

速度制动特性，并且温升幅度随着制动初速度 and 外磁场的增加而增加。王鸿云等^[27]设计了一种基于挤压-剪切混合模式磁流变离合器，如图 1-5 所示为磁流变离合器结构示意图，并搭建传动性能试验测试装置，探究磁流变离合器的静态传动性能和动态响应特性。研究发现转速对磁流变离合器的转矩影响较小，受激励电流和挤压应力的影响较大。响应时间与挤压应力和转速的增长呈现负相关。黄禹铭等^[28]提出多极式磁流变离合器，以永磁体和线圈叠加的激励提高磁流变离合器的传递扭矩。仿真结果表明磁流变离合器的输出扭矩得到极大提升，为后续大传递扭矩的磁流变离合器提供了知道作用。大尺寸颗粒赋予了磁流变液较大的传递力矩，应用领域广泛，但颗粒沉降制约着磁流变器件的应用，磁流变介质可靠性服役将是磁流变器件遇到的重要难题之一^[29-31]。

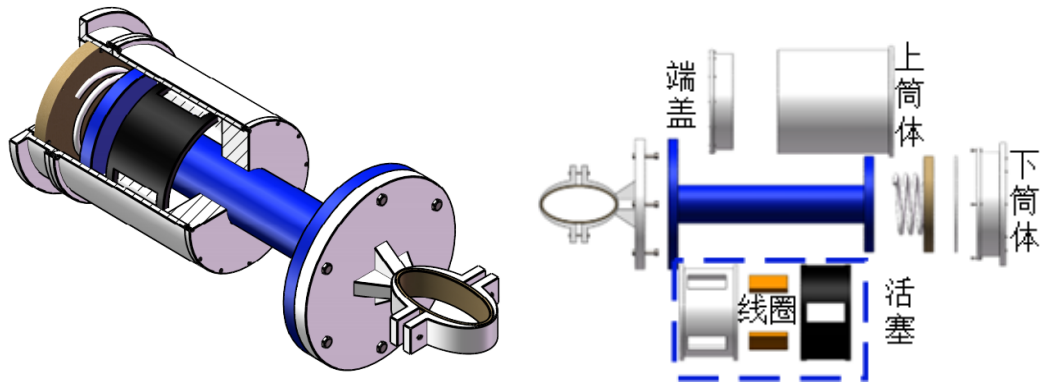


图 1-4 半主动式磁流变阻尼器及爆炸视图^[23]

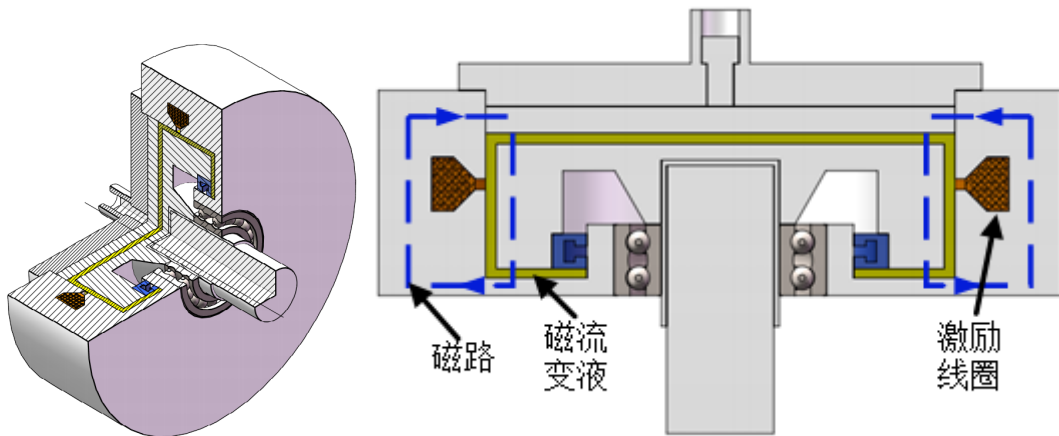


图 1-5 挤压-剪切混合模式磁流变离合器^[27]

1.2.3 磁流变脂研究现状

磁流变脂以润滑脂为连续相基体，润滑脂是结构性的胶体分散体系，其特有的皂纤维结构可极大改善磁性颗粒的沉降问题，对于改善磁流变介质可靠性服役具有突出优势^[32-33]。国内外对于磁流变脂的研究主要为组分、添加剂和制备方式

等对其流变学性能的研究。汪辉兴等^[34-37]通过对磁流变脂中羰基铁粉的含量进行稳态剪切测试试验发现。图 1-6 给出了磁性颗粒不同质量分数下磁流变脂性能曲线。在一定范围内，磁流变脂中羰基铁粉的含量越高，其稳态剪切模式下的剪切黏度和剪切应力可调范围越广。通过对磁流变脂磁性颗粒含量试验发现，磁流变脂屈服应力与颗粒含量具有极大相关性，随着磁性颗粒含量的增加，磁场极大削弱了磁流变脂的最大屈服应力下的剪切速率相关性。以及利用傅里叶变换-切比雪夫分析探究了大振荡剪切下磁流变脂非线性黏弹特性，发现磁流变脂在磁激作用下剪切增厚引起 MRG-70 非线性变化。Sahin 等^[38]基于磁流变脂中的润滑脂成分对温度的敏感特性，通过不同温度和磁场对磁流变脂的流变特性分析发现，温度对磁流变脂场致屈服应力有显著影响。Kim 等^[39]通过在磁流变脂加入添加剂对软羰基铁颗粒的流变特性研究发现，添加 5 wt%煤油的情况下，同等磁场强度下，磁流变脂的剪切黏度随剪切速率的曲线大大降低。何国田等^[40-41]通过建立体心立柱状模型分析磁性颗粒大小对磁流变脂的研究发现，当颗粒尺寸在一定范围内时，磁流变脂剪切屈服应力随颗粒尺寸的增加而提高较快。Mohamad 等^[42-44]通过板状羰基铁颗粒对磁流变脂在连续剪切和振荡剪切模式下磁场依赖性流变特性研究发现，由于板状颗粒的表面接触面积较大，使得颗粒之间的磁矩作用强烈，相对球形颗粒具有更高的表观黏度。由板状磁性颗粒组成的磁流变脂相对球形颗粒具有较低的储能模量。Tarmizi 等^[45]以 CoFe_2O_4 作为添加剂探究磁流变脂磁学响应特性，发现有 CoFe_2O_4 的磁流变脂响应速度快 5~6 秒，并且磁链与磁场的一致性显著提高了磁流变效应。Raj 等^[46]以 PTFE 和 MoS_2 作为添加剂探究磁流变脂流变学特性，发现 MoS_2 与 MRG 相互作用形成单层引起剪切应力随温升增加，PTFE 粒子团降低了局部散热导致 MRG 屈服应力的随温升增加。胡志德等^[47-50]通过不同质量分数的羰基铁粉在动态剪切模式下对磁流变脂流变特性研究发现，提高羰基铁粉的质量分数可有改善磁流变脂流变学性能。同时还研究了羰基铁粉加入方式对磁流变脂皂纤维影响和冷却条件对磁流变脂微观结构的影响，结果表明羰基铁粉在皂化反应后再加入，磁流变脂具有更好的长期沉降稳定性。冷却条件对磁流变脂磁学性能影响较小，而对流变特性影响较大。通过稠化剂含量对磁流变脂的磁流变特性试验发现，通过对调整磁流变脂中的稠化剂含量，可以有效改善其磁流变效应，提高其磁学性能。

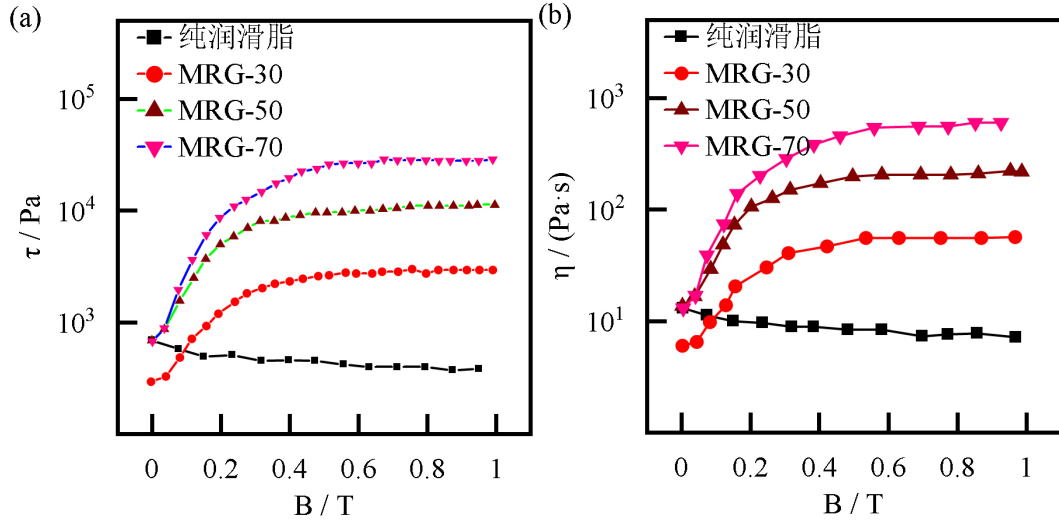


图 1-6 磁性颗粒不同质量分数下磁流变脂性能^[34]

(a)剪切应力; (b)黏度

实际上,磁流变器件在工作过程中,介质内摩擦生热,出现温升效应不可避免,这将会对磁流变介质的可靠服役构成挑战。潘家保等^[51-54]分析了高温热效应对润滑脂的流变特性影响,结果表明 120 °C 热处理后的润滑脂具有较好的抗摩擦性能,150 °C 下的润滑脂出现了皂纤维结块的现象。并以复合锂基润滑脂的工作温度和极限温度进行热效应试验,发现极限温度热处理后的润滑脂结构破坏显著,持续热作用的影响更加显著。由此可见,润滑脂在持续热效应影响下,流变特性将发生改变,而磁流变脂是以润滑脂为基载液,润滑脂在高温作用下存在性能衰退、热效应等现象。Wang 等^[55]通过不同黏度基础油对磁流变脂流变性能研究发现,以润滑脂为载体的磁流变脂胶体稳定性随着基础油的表观黏度降低而变差,甚至出现存储泄露问题。Ye 等^[56-57]通过磁性颗粒的质量分数为 70%磁流变脂受温度和磁场的影响发现,磁场在一定程度上可以削弱温升对流变性能的影响。并通过各温度下磁流变脂的动态流变响应行为,验证了其黏弹特性。Dai 等^[58]将磁流变脂中磁性颗粒的质量分数取 10%至 90%,在剪切稀化试验中发现剪切稀化行为随着磁性颗粒的质量分数增加而增加。接着在磁流变脂制动器的应用研究中发现,低质量分数的磁流变脂在低磁场下减速效果较好。Dong 等^[59]通过以不同质量分数的石墨添加剂制备的磁流变脂受温度和磁场的响应研究发现,磁流变脂屈服应力随着石墨添加比的增加而增加,在温升的影响下逐渐降低增强效果。并结合支持向量机预测模型,以石墨质量分数、温度、磁场、剪切速率作为特征输入,以剪切应力作为特征输出,表明机器学习的运用相比传统非流体特征方程可

以包含较多的考察因素。沈铁军等^[60]以 120 °C对锂-钙润滑脂进行静态热老化研究发现。图 1-7 给出了锂-钙基润滑脂皂纤维形态图，热老化后润滑脂胶体结构遭到破坏，表现为基础油纤维断裂，稠化剂浓度降低。胡金涛等^[61]以 120、150 °C对复合锂基润滑脂的热处理研究发现，高温热效应对润滑脂造成结构性破坏，触变性明显变差。

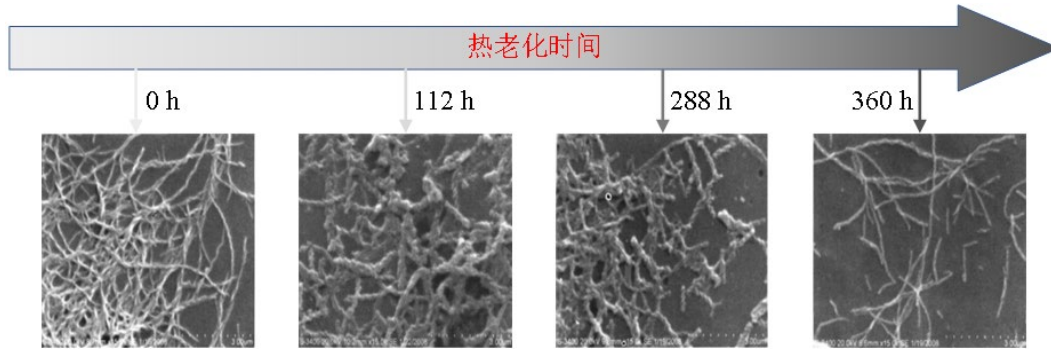


图 1-7 锂-钙基润滑脂皂纤维形态图^[60]

由上述研究发现，目前对于磁流变脂流变性能研究以单一因素的研究居多，较少涉及多因素耦合作用的研究，尤其是高温热效应这一影响因素的加入，使得磁流变脂流变性能研究更加困难。近年来，机器学习在各个领域被广泛运用，BP神经网络是其中一种最基础、应用最广泛的预测模型。Saharuddin 等^[62]提出了一种磁流变弹性体黏弹性行为的本构模型，并使用人工神经网络和极限学习机来预测剪切应变、磁通密度与储能模量、损耗因子之间的非线性关系，结果发现人工神经网络预测储能模量效果较好，极限学习机则是适用于预测损耗因子。Lv 等^[63]为建立准确的磁流变液流变模型以指数线性混合分析模型为主体，无限黏度和非线性项衰减率为边界约束，用于磁流变介质在极高剪切速率下流变行为预测，与磁流变阻尼器动态试验结果比较误差较低。Bahiuddin 等^[64-65]通过粒子群优化算法结合极限学习机预测模型对磁流变液不同区域内剪切速率下的屈服应力和塑性黏度进行预测。

1.3 本文的主要研究内容和章节安排

本课题来源于国家自然科学基金项目“润滑脂宽温域服役磁控主动润滑基础研究” (编号：52005004)。以磁流变脂为主要研究对象，探究温度和磁场强度对其流变特性及摩擦学性能的影响，目的在研究多场作用下磁流变脂流变学性能和剪切稳定性能的变化规律。具体研究内容和章节安排如下。

1.3.1 研究内容

本文的研究主要围绕磁流变脂在热磁耦合作用下的流变学行为展开，最终得到温度和磁场等因素对磁流变脂流变特性的影响情况。首先是对磁流变脂进行热磁耦合条件下的流变学试验，利用旋转流变仪探究温度和磁场强度对磁流变脂流变特性及剪切稳定性的影响。通过加速热老化试验考察磁流变脂流变特性随热老化行为的变化规律。在以上研究的基础上，结合机器学习方法，探究持续剪切、热磁耦合、高温热效应等多场耦合工况下磁流变脂流变学行为影响规律。

本文主要技术路线如图 1-8 所示。

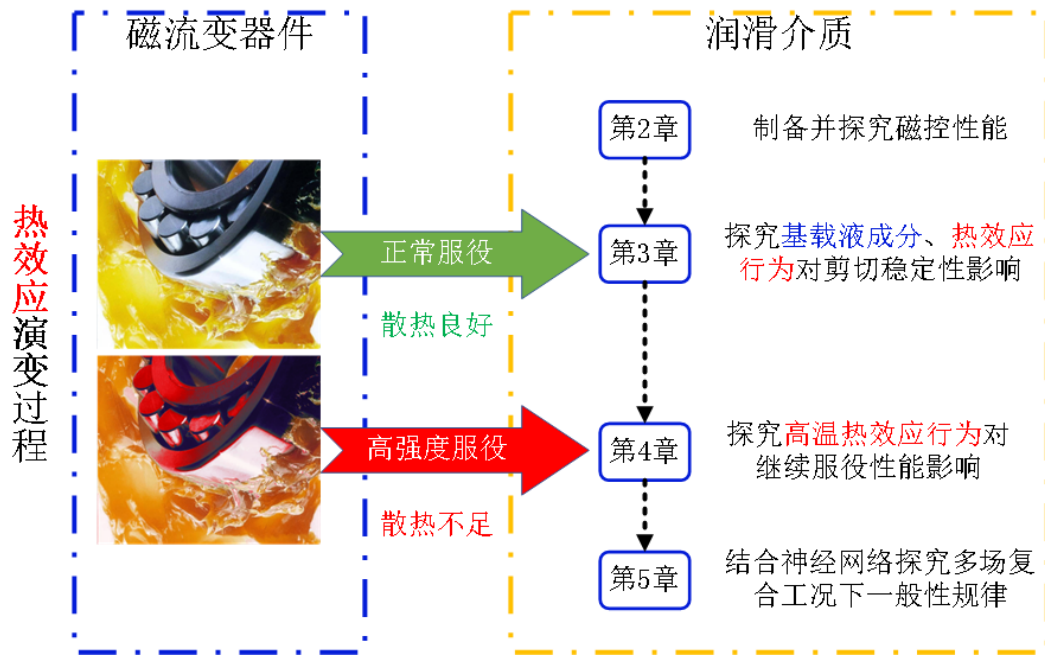


图 1-8 主要技术路线

1.3.2 章节安排

第 1 章：绪论。阐述本文的选题背景与意义，以基载液差异的角度总结了流变材料的主要类别，介绍了磁流体、磁流变液和磁流变脂的主要研究现状，重点综述了磁流变脂润滑研究以及磁流变器件的应用情况，分析了磁流变脂在润滑领域存在的关键问题，最后提出本文的主要研究内容与目标。

第 2 章：磁流变脂制备研究。磁性颗粒在外磁场激励作用对磁流变脂起到结构增强作用，通过调节磁场激励方式，探究磁场强度对其磁控调节稳定性的影响规律。

第 3 章：持续热效应对磁流变脂剪切稳定性的影响研究。磁流变介质作为磁流变器件的重要组成部分，良好的服役稳定性是磁流变脂性能表征的重要指标

之一。通过磁学性能和流变性能试验，探究基载液稠度和持续热效应对磁流变脂剪切稳定性的影响。

第 4 章：高温热效应对磁流变脂流变学行为的影响研究。磁流变器件在高强度服役过程中，热量大量堆积对介质性能产生极大影响。通过静态热老化试验，探究高温热效应温度、时间对磁流变脂继续服役性能的影响。

第 5 章：磁流变脂热效应行为的分析与预测。磁流变脂在服役过程中受到多因素耦合作用，传统单因素试验较难辨析机理。建立 SSA-BP 预测模型对磁流变脂流变性能进行预测，探究多场复合工况下一般性规律。

第 6 章：总结与展望。磁流变脂是本文研究的主体对象，本章总结了对其所开展的研究工作，并对本课题更深层次的研究内容进行展望。

第 2 章 磁流变脂制备研究

2.1 引言

磁流变脂是由微米级磁性颗粒和锂基润滑脂混合制备而成。其磁流变效应使得其润滑性能受磁控稳定控制，并且润滑脂特有的皂纤维结构极大的降低磁性颗粒的物理沉降。一方面缓解了摩擦领域润滑材料紧缺问题，即随着航天、深海、极低等险地开发，工程机械面临真空、高压、超低温等复杂工况，对于润滑材料产生了润滑性能多变的要求。另一方面锂基润滑脂在重载领域的应用优势，结合磁控的稳定调节，极大的拓宽了磁性智能材料的应用领域。持续剪切及外部磁场激励等对磁流变脂流变特性的磁控调节稳定性带来挑战。

本章以实验室制备的磁流变脂作为研究对象，采用 MCR301 旋转流变仪探究磁流变脂磁学和流变学性能，分析磁场强度对其磁控调节稳定性的影响规律。

2.2 试验方案设计

2.2.1 试验材料

本节所研究的磁流变脂选用黏度中等的润滑脂作为基载液，降低沉降引起的干扰影响。作为连续相的润滑脂选型为 NLGI 1 通用锂基润滑脂，由中国石化润滑油有限公司天津分公司生产，主要参数如表 2-1 所示。作为离散相的羰基铁粉选型为 MRF-15，平均直径 3~5 μm ，由江苏天一超细金属粉有限公司生产，主要指标如表 2-2。

表 2-1 锂基润滑脂主要参数

稠化剂类型	ω (稠化剂)%	基础油	v_{40} $/(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	滴点/ $^{\circ}\text{C}$	工作锥入度 $/(0.1 \text{ mm})$	适用温度/ $^{\circ}\text{C}$
12-羟基硬脂酸锂	9.3	矿物油	100	178	325	-20~120

表 2-2 磁性颗粒主要指标

平均粒径/ μm	表观密度/ (g/cm^3)	振实密度/ (g/cm^3)	Fe/%	C/%	N/%	O/%
≤ 4	1.5~3.0	≥ 4.0	≥ 99.5	≤ 0.05	≤ 0.01	≤ 0.2

2.2.2 磁流变脂制备

润滑脂的制备工艺分为两步法和一步法。两步法工艺是过去较为流行的制备方法，其制备过程需要严格控制分步皂化流程，并重点关注脱水、成脂的温度和时间，工艺复杂，较为耗时、耗能。此外采用 12-羟基硬脂酸和壬二酸、水杨酸或硼酸、水杨酸的三组分一步法皂化工艺，也有少量应用，此工艺步骤比较简便。近年来，采用接触器、压力釜以及高速湍流下连续皂化的工艺，在激烈反应条件下，二组分稠化剂也可一步皂化形成高滴点脂。

接触器是一种带有特殊混合装置的压力反应釜。图 2-1 给出了一步法接触器制备过程。采用接触器制脂，反应物在密封搅拌机构作用下增加了混合粒子间的接触机会，强化了传热和传质的过程，使反应周期大大缩短，从而提高了生产效率。制得的成品脂具有极压、防锈、抗氧、耐高温等流变性能。

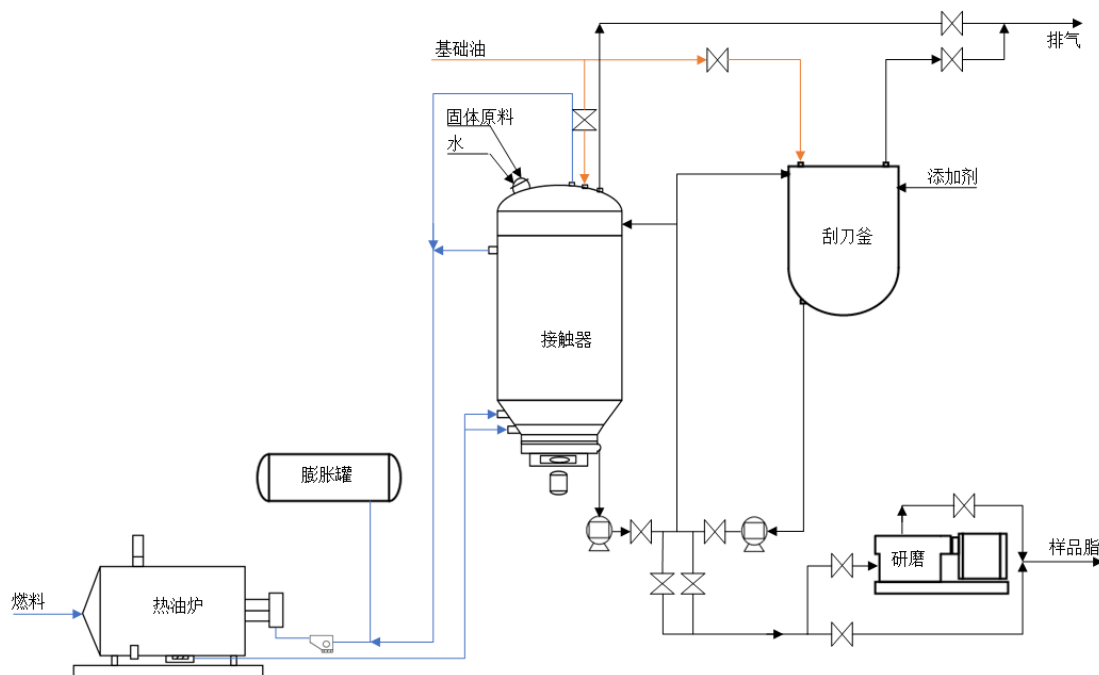


图 2-1 一步法接触器制备过程

连续皂化工艺是通过连续供给原料和持续搅拌，实现了高效、稳定的生产。图 2-2 给出了一步法连续皂化制备过程，其原理基于化学反应的连续进行。在传统的离散式皂化工艺中，原料与碱液在反应釜中反应一段时间，然后通过人工操作将反应物转移到下一流程步骤。而在连续皂化工艺中，原料和碱液通过连续供给的方式，以一定比例不断地混合和反应，同时在反应过程中进行搅拌与传统的离散式皂化工艺相比，连续皂化工艺具有更高的生产效率和产品质量的稳定性。

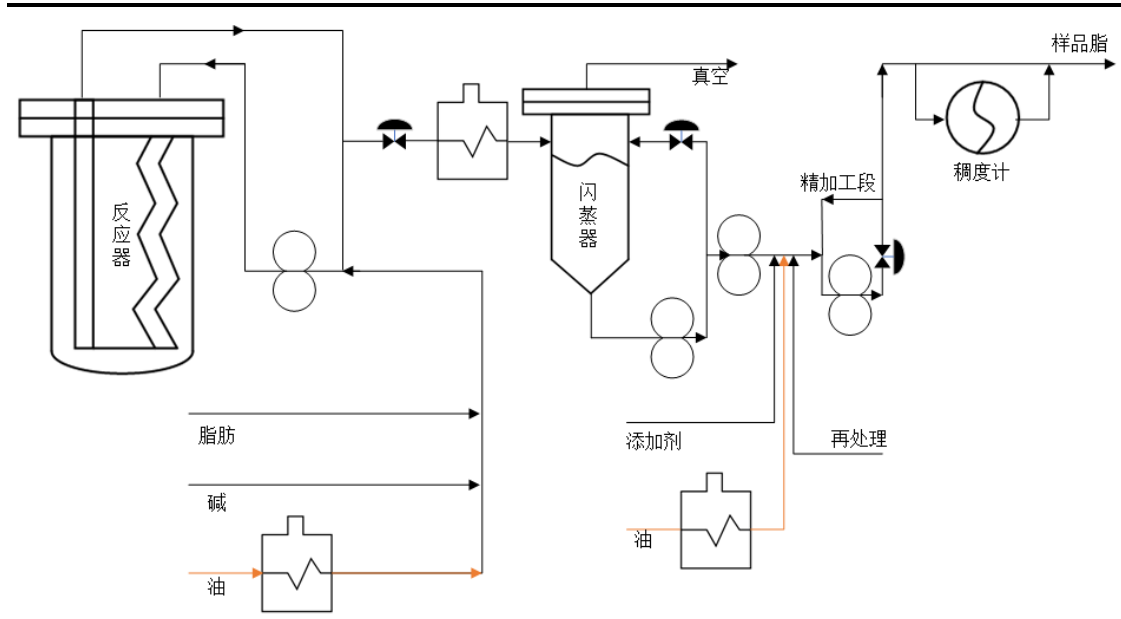


图 2-2 一步法连续皂化制备过程

磁流变脂制备方式结合 Mohamad 等^[44]所提出的方法。具体制备流程如图 2-3 所示。首先将已经称量好的锂基润滑脂(质量分数为 70%)倒入事先准备好的 250 mL 烧杯(直径略微大于搅拌器转子直径)中,接着将恒温水浴锅升温至 80 ℃,对润滑脂进行一定时间的预热,随着将电动搅拌器以 1000 r/min 持续搅拌 10 min,然后将称量好的羰基铁粉(质量分数为 30%)倒入已经预热好的锂基润滑脂中,3000 r/min 搅拌 1 h,促使锂基润滑脂和羰基铁粉较为充分的混合,冷却后即可得到磁流变脂样品。

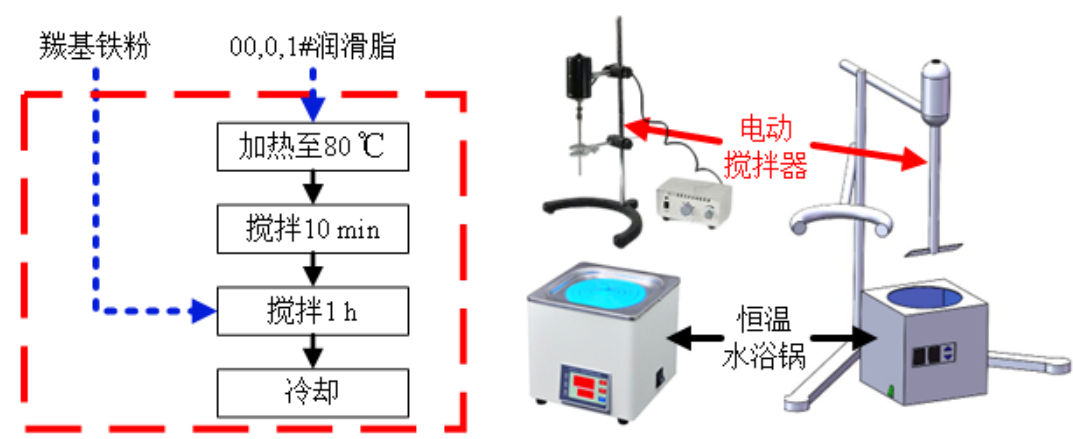


图 2-3 磁流变脂制备流程及制备设备

2.2.3 试验设备

采用德国 Anton Paar 公司 Physica MCR-301 型旋转流变仪(如图 2-4)对磁流变脂进行旋转剪切模式和振荡剪切模式下流变特性试验。试验中流变仪的测试转子选用 PP20/MRD, 转子与测试平台间的间隙选取 1 mm。图 2-5 给出了试验设

备装配示意图。其配备的磁场控制模块为 PS-MRD，温度控制模块为水域加热设备 VISCOTHERMVT2。通过温度控制模块模拟磁流变脂在服役过程中摩擦副产生的热量对其流变性能影响。以磁场控制模块调节外界磁场激励，获取磁流变脂在外界激励下的磁学性能以及磁场作用下磁流变脂流变行为稳定性。在试验过程中，由于选用的是水蒸气加热方式，热量流失速度与环境温度有关，根据流变仪中温度传感器的数显，需要微量调节温度模块的温度，以便较为精准的得到目标试验温度。

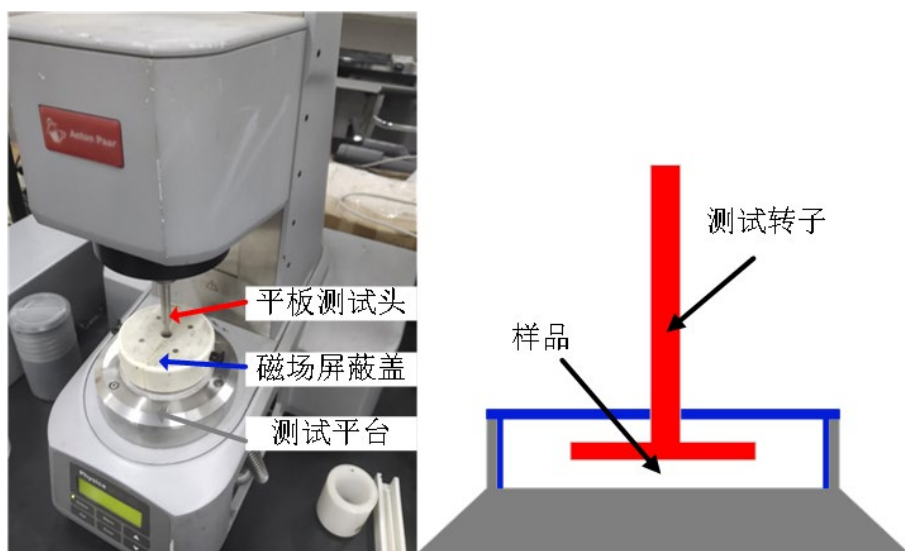


图 2-4 MCR-301 旋转流变仪实物图及测试原理图

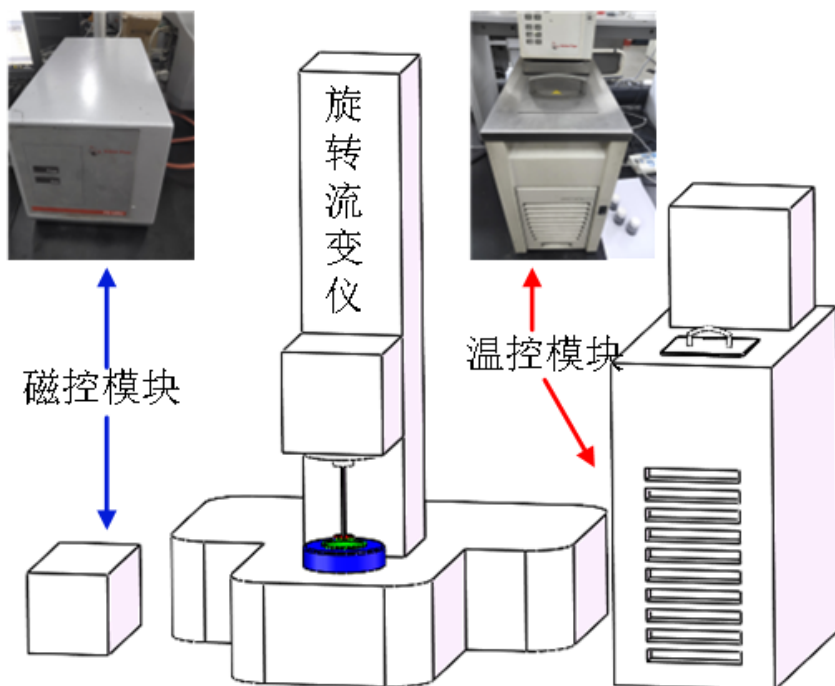


图 2-5 试验设备装配示意图

2.3 磁控性能试验

图 2-6 给出了磁流变脂在室温下 10 s^{-1} 固定剪切速率、变磁场的磁控性能试验。可以看出，磁流变脂剪切应力随着磁场强度的增加逐渐增大，在达到 440 mT 后，趋于稳定，一段时间后又呈现逐渐下降的趋势。因为磁性颗粒在外界磁场激励下聚拢形成磁链，在磁场强度增强至饱和磁场后，内部磁畴方向一致，极大的增强了磁链与润滑脂中皂纤维结构交互形成的复合结构强度，表现为磁流变脂剪切阻力大幅增加。皂纤维结构在持续剪切过程中，结构反复经历断裂重组，在一定时间后不足以维持颗粒悬浮稳定性，进而引起局部磁链断裂，使得复合强度降低。变磁场曲线有效验证了磁流变脂磁控特性，磁场激励下磁流变脂剪切应力相较于零磁场有显著增加，进一步探究固定磁场下磁流变脂持续服役稳定性能。

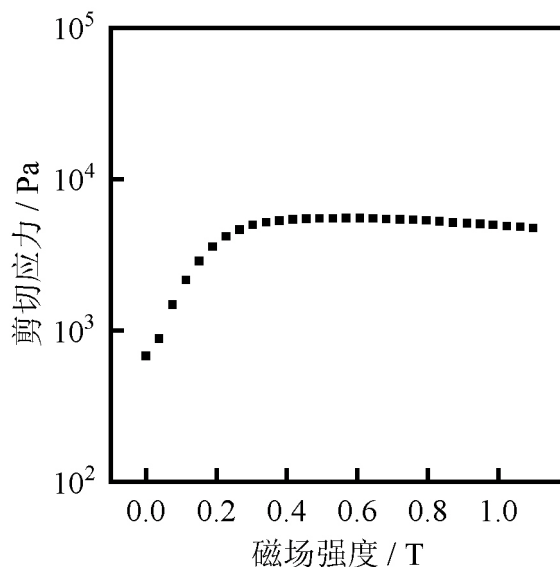


图 2-6 变磁场剪切应力

图 2-7 给出了磁流变脂在室温下固定磁场、变剪切时间和变剪切速率的磁控性能试验。图 2-7(a)为固定 100 s^{-1} 下磁流变脂持续服役曲线，表现出较好的稳定服役状态。进一步探究剪切工况下磁流变脂服役状态，由图 2-7(b)可以看出，在整个剪切速率范围内，磁流变脂剪切应力随磁场强度的变化规律同变磁场试验相一致，表明磁链对复合强度的性能加成掩盖了持续剪切引起皂纤维结构损坏的影响。并且各磁场下磁控曲线整体变化趋势相仿，表明磁流变脂在磁控领域具有优异的应用前景。然而在各磁场强度梯度下磁流变脂剪切应力增幅比例不同，与工程中精确指标不符，需要科研工作者进一步研究。

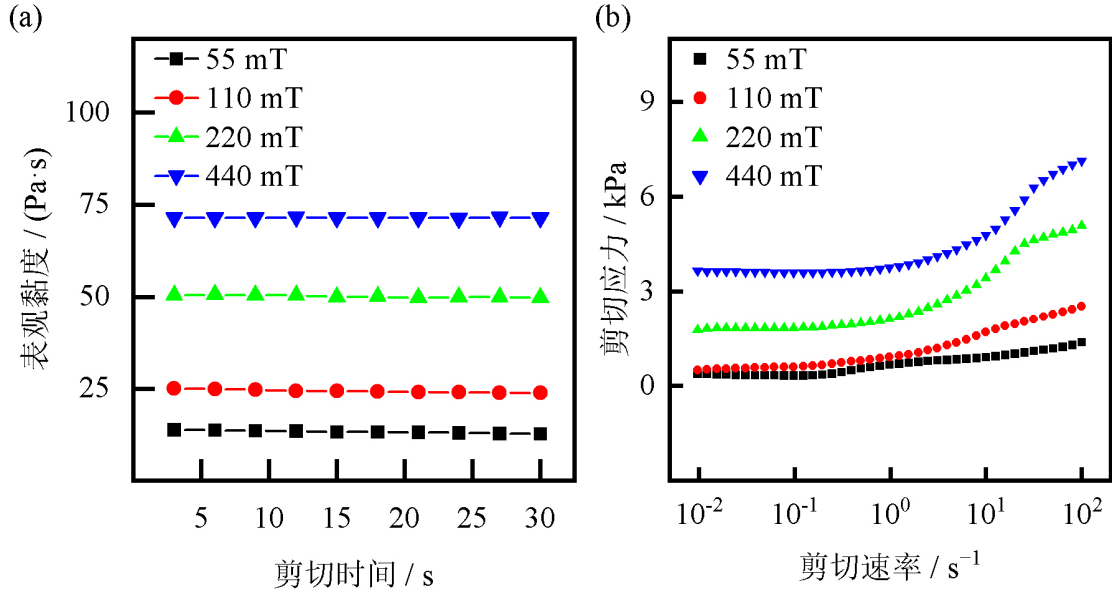


图 2-7 固定磁场下磁流变脂性能

(a)剪切时间; (b)剪切速率

2.4 本章小结

本章以实验室制备的磁流变脂，结合 Physica MCR-301 型旋转流变仪探究磁流变脂在固定磁场和变磁场下磁控性能影响。得到的主要结论如下：

(1) 在变磁场条件下，磁流变脂剪切应力随着磁场强度的增加而增加，在达到饱和磁场 440 mT 后趋于饱和。磁性颗粒受外磁场激励聚拢成的磁链显著增强了复合强度，而持续剪切对皂纤维结构造成了一定损坏，表现为磁流变脂剪切阻力在饱和磁场后降低的问题。

(2) 在固定磁场条件下，磁流变脂磁控性能曲线在不同磁场条件下整体变化趋势相仿，磁链对复合强度的增幅特性掩盖了持续剪切造成的皂纤维结构强度降低问题。

第3章 持续热效应对磁流变脂剪切稳定性的影响研究

3.1 引言

润滑脂相较于润滑油有着更高的黏稠度，具备较高的剪切阻力，承担较大的载荷，并且类固体特性赋予其较好的密封性能，使其在大载荷机械中得以广泛应用。以锂基润滑脂作为基载液制备磁流变脂可以有效提高沉降稳定性，并可以满足磁流变轴承等密封性高的要求^[66-67]。然而机械设备在平移、转动等机械运转过程中，摩擦副间的频繁接触产生了大量热量，磁流变材料作为润滑介质在温升过程中润滑性能不明。润滑脂在受温度影响过程中表现出热流变特性，而持续剪切、持续热效应等耦合作用进一步影响着磁流变脂在服役过程中剪切性能稳定性。

本章以不同稠度锂基润滑脂制备磁流变脂，采用 MCR-301 对其进行磁学性能和流变学性能的试验，探究持续热效应对磁流变脂剪切稳定性的影响。结合磁学结果和流变学结果分析基载液稠度对磁流变脂剪切性能的影响规律，为后续进一步开展高温热效应研究做好铺垫。

3.2 试验方案设计

3.2.1 试验材料

通过第2章可知，磁流变脂表现出较好的磁控性能。本章为了进一步探究磁流变脂中重要组分润滑脂对其正常服役过程中剪切稳定性能的影响，选用中国石化润滑油有限公司天津分公司产品中的通用锂基润滑脂，分别使用稠度等级为00、0、1制备磁流变脂，其主要内容如表3-1所示。

3.2.2 流变特性测试

在旋转剪切模式下，分别进行磁场扫描测试、触变性测试以及表观黏度测试。具体测试条件如下：① 磁场扫描测试将剪切速率固定为 10 s^{-1} ，磁感应强度的变化范围为从 0 mT 线性增加至 1100 mT （流变仪配件中磁场模块 1 A 电流等于 220 mT 磁感应强度）；② 触变性测试中，剪切速率先从 0.01 s^{-1} 上升至 100 s^{-1} ，再从 100 s^{-1} 下降至 0.01 s^{-1} ；③ 表观黏度测试将剪切速率固定为 100 s^{-1} 。

在振荡剪切模式下，分别进行频率扫描测试以及应变扫描测试。具体测试条件如下：① 频率扫描测试中，取应变幅值为 0.1% ，控制剪切频率从 1 rad/s 到

100 rad/s; ② 应变扫描测试中, 取剪切频率为 1 Hz, 控制应变幅值从 0.01%到 100%。测试条件中, 分别取磁感应强度为 55、110、220、440 mT, 温度为 20、40、60、80 °C。

表 3-1 不同连续相下磁流变脂主要内容

属性	内容		
编号	00#MRG	0#MRG	1#MRG
增稠剂种类	12-羟基硬脂酸锂		
基础油	矿物油		
稠度等级	00	0	1
工作锥入度/0.1mm	400~430	355~385	310~340
室温下的外观	流体	半流体	软固体

3.3 结果与讨论

3.3.1 磁学性能分析

图 3-1 给出了在不同温度下磁流变脂的磁场扫描曲线。可以看出, 各磁流变脂样品随着磁感应强度的升高, 其剪切应力增加幅度较大, 在磁场强度达到 440 mT 后逐渐趋于平稳, 此时磁流变脂达到磁化饱和。磁流变脂磁化饱和时的磁学性能随着连续相稠度等级的提高变化较小, 表明连续相的稠度对于磁流变脂磁学性能影响有限。

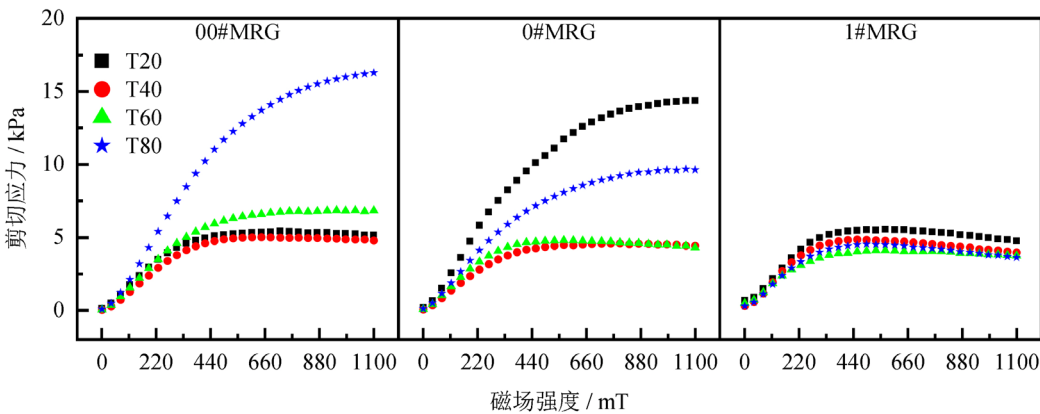


图 3-1 不同温度下磁流变脂磁场扫描曲线

此外, 00#MRG 和 0#MRG 的磁场扫描曲线离散度较大, 因为与连续相稠度等级线性相关的皂纤维缠结程度较低, 并且高温促进了皂纤维结构解缠, 极大的

缓解了皂纤维结构阻碍磁性颗粒运动的行为^[68]。表明持续热效应对磁流变脂流变学性能具有较大的影响。而 1#MRG 具有较小的离散度,可能说明以较高稠度的润滑脂作为连续相的磁流变脂具有较好的热稳定性。因此为进一步考察磁流变脂受持续热效应的影响机理,需结合恒定磁场下流变学试验展开讨论。

图 3-2 给出了磁性颗粒的磁畴随磁场的变化示意图。磁流变脂中润滑脂所特有的高度缠结的皂纤维结构,可有效抑制磁性颗粒的沉降,有利于维持磁流变脂胶体的稳定性^[69-71]。根据磁学性能分析结果,作为磁性材料的磁性颗粒对于磁流变脂的旋转剪切应力影响极大^[72-74]。在无磁场激励下,磁性颗粒混合于锂基润滑脂中,磁畴方向呈现非同向性,磁流变脂的流变性能主要受到温度变化的影响^[75]。在较低磁场强度下,磁性颗粒在旋转剪切外力和磁场作用下,磁性颗粒剧烈运动,磁畴方向发生变化。随着磁场强度逐渐增大至饱和磁场强度后,磁畴方向与磁场方向一致,磁性颗粒突破皂纤维结构的阻拦形成磁链。而 1#MRG 连续相具有较高的皂纤维缠结程度,对磁性颗粒的运动产生极大的阻力,磁流变脂胶体表现出较好的剪切稳定性。

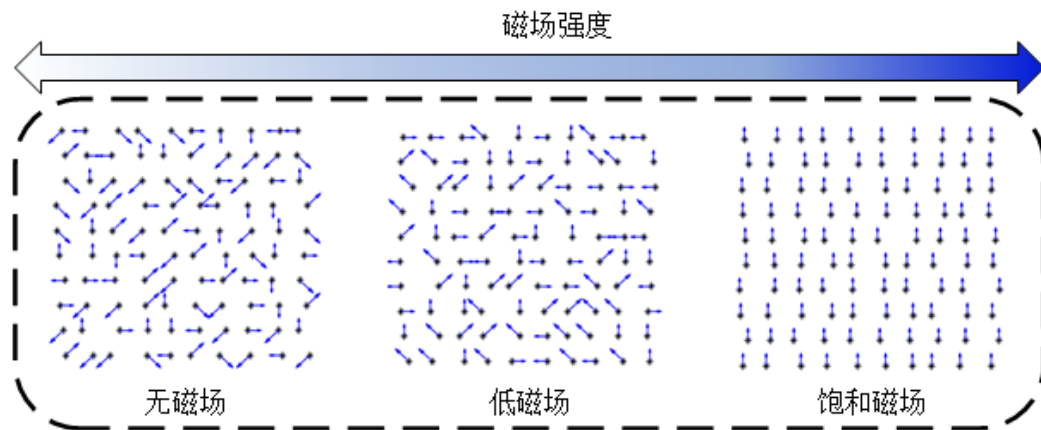


图 3-2 磁性颗粒的磁畴随磁场的变化示意图

3.3.2 旋转剪切模式下的流变特性

图 3-3 给出了不同磁场强度和温度下磁流变脂触变性曲线。触变性是一种可逆的溶胶现象,通过触变性曲线的离散性可以表征磁流变脂的剪切稳定性。各磁流变脂样品的剪切应力在低剪切速率下增加缓慢,呈现平台区域,因为低速率下的外力不足以克服皂纤维结构和磁链构成的复合结构。

与此同时,00#MRG 平台区域的剪切应力在不同磁场强度下相差较大,在 80 °C下达到最大,表明磁链极大的增幅了磁流变脂的剪切阻力,并且高温进一步解缠皂纤维结构,加速了磁链的形成。而 1#MRG 不同磁场强度和温度下的触

变性曲线离散度相较 00#MRG 较低，表明稠度较高的连续相面对持续剪切工况具有较好的稳定性。为了深入探究磁流变脂在高温下的剪切稳定性，结合触变环面积分析连续相稠度等级对磁流变脂剪切触变性的影响。

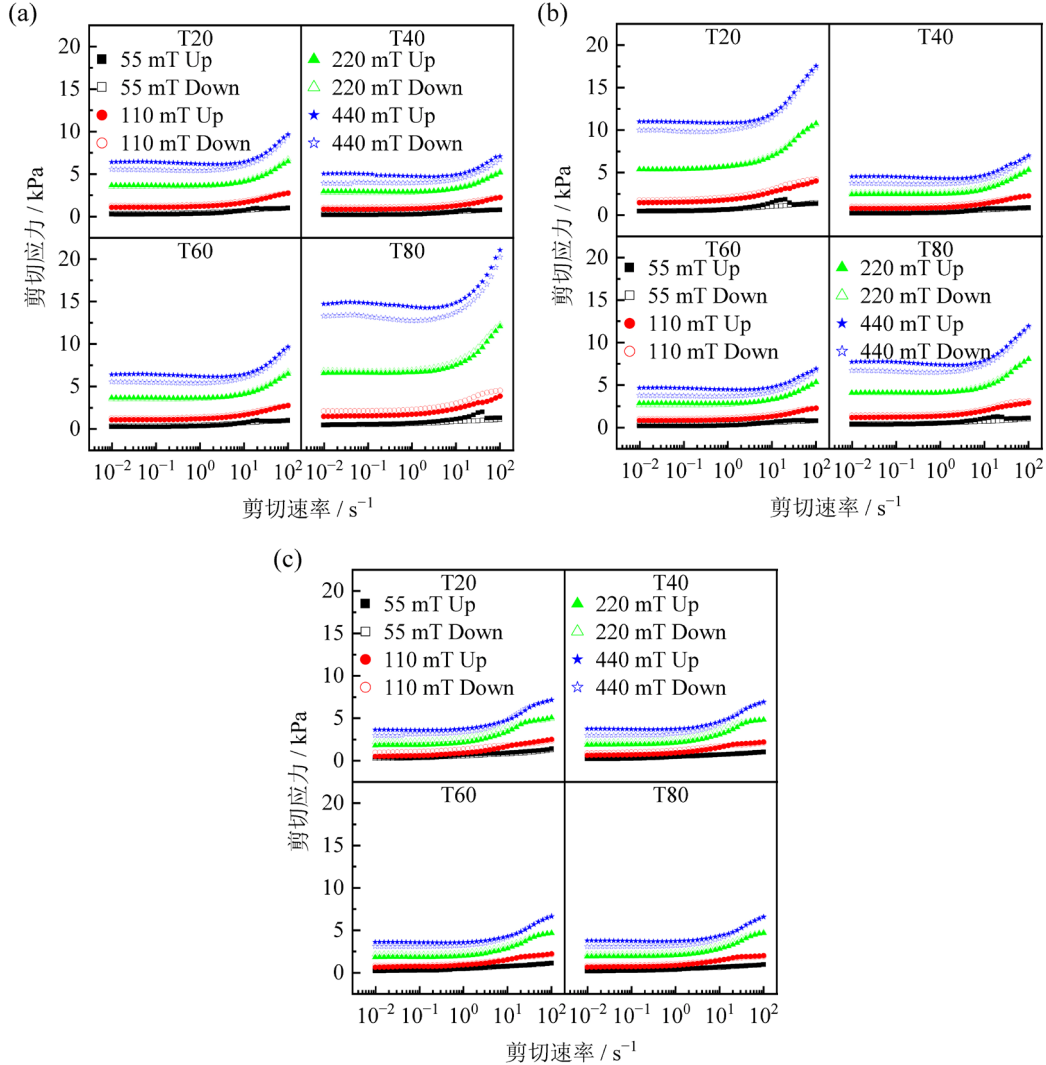


图 3-3 磁流变脂触变性曲线

(a)00#MRG; (b)0#MRG; (c)1#MRG

剪切屈服应力是磁流变脂运动时，为克服磁链和皂纤维结构组成的复合体系而产生的剪切阻力。为了探究不同剪切速率和剪切应力的关系，通过 Herschel-Bulkley(H-B)模型对磁流变脂的黏弹特性进行描述，如式(3-1)^[77-78]：

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n \quad (3-1)$$

式中， τ 为剪切应力，Pa； τ_0 为剪切屈服应力，Pa； k 为稠度系数， $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ； $\dot{\gamma}$ 为剪切速率， s^{-1} ； n 为剪切稀化指数，量纲为 1。为进一步讨论磁流变脂流动特性，通过数据拟合得出流变参数(τ_0, k, n)，如表 3-2，表 3-3 和表 3-4 所示。

表 3-2 00#MRG 不同温度和磁场下 H-B 模型参数

温度/°C	流变参数	磁场强度/mT			
		55	110	220	440
20	屈服应力/Pa	0.01	793.85	2481.31	4745.32
	稠度系数/ $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$	431.48	318.23	331.38	144.25
	剪切稀化指数	0.21	0.40	0.53	0.71
40	屈服应力/Pa	80.87	824.84	2902.15	4859.76
	稠度系数/ $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$	227.33	130.40	71.65	19.43
	剪切稀化指数	0.28	0.53	0.76	1.06
60	屈服应力/Pa	113.90	1022.53	3609.67	6285.68
	稠度系数/ $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$	285.17	214.67	90.71	29.22
	剪切稀化指数	0.28	0.47	0.77	1.05
80	屈服应力/Pa	173.38	1407.11	6513.63	14559.84
	稠度系数/ $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$	600.97	375.69	189.78	45.33
	剪切稀化指数	0.20	0.41	0.75	1.09

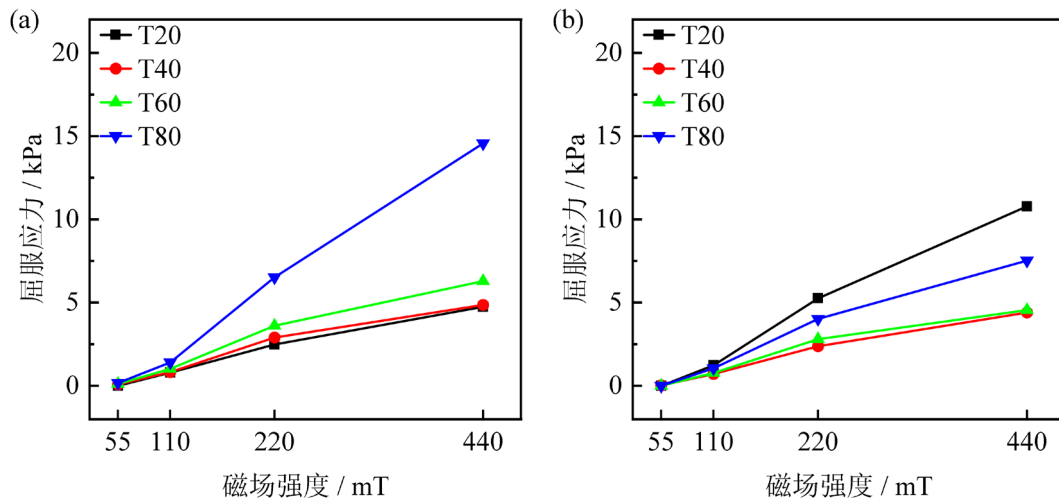
表 3-3 0#MRG 不同温度和磁场下 H-B 模型参数

温度/°C	流变参数	磁场强度/mT			
		55	110	220	440
20	屈服应力/Pa	0.01	1236.06	5248.00	10778.45
	稠度系数/ $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$	817.31	660.08	517.67	254.06
	剪切稀化指数	0.15	0.32	0.53	0.73
40	屈服应力/Pa	28.74	710.67	2378.14	4403.05
	稠度系数/ $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$	318.46	222.05	151.70	59.23
	剪切稀化指数	0.24	0.44	0.66	0.84
60	屈服应力/Pa	0.01	779.84	2804.16	4545.53
	稠度系数/ $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$	321.17	177.85	94.92	42.05
	剪切稀化指数	0.24	0.48	0.72	0.90
80	屈服应力/Pa	0.01	1050.27	4021.07	7518.83
	稠度系数/ $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$	584.61	390.97	164.01	72.06
	剪切稀化指数	0.17	0.36	0.71	0.92

表 3-4 1#MRG 不同温度和磁场下 H-B 模型参数

温度/°C	流变参数	磁场强度/mT			
		55	110	220	440
20	屈服应力/Pa	0.01	182.40	1439.25	3429.39
	稠度系数/ $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$	630.43	803.62	891.62	480.69
	剪切稀化指数	0.17	0.24	0.33	0.47
40	屈服应力/Pa	0.01	347.13	1663.67	3602.06
	稠度系数/ $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$	624.33	657.22	559.72	271.65
	剪切稀化指数	0.15	0.25	0.41	0.57
60	屈服应力/Pa	0.01	461.85	1668.16	3501.13
	稠度系数/ $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$	558.00	531.16	431.22	196.89
	剪切稀化指数	0.18	0.28	0.45	0.62
80	屈服应力/Pa	0.01	452.18	1810.31	3666.26
	稠度系数/ $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$	486.18	508.46	322.33	154.11
	剪切稀化指数	0.17	0.27	0.50	0.66

表中部分样品屈服应力在拟合过程中低于下限,故取 0.01 Pa。图 3-4 给出了不同温度和磁场下磁流变脂屈服应力变化曲线。可以看出,在相同温度下,00#MRG 屈服应力随磁场强度增加而非线性增加,并且温升越高,增幅越大。因为较低温度下,皂纤维受热效应作用破坏程度较低,磁链受纤维结构阻力较大,此时复合结构以皂纤维结构为主。在高温下,皂纤维遭受严重破坏,磁链大量聚拢极大增强磁流变脂复合结构强度,磁链成为主导。而 1#MRG 在不同温度和磁场下均表现出卓越的剪切稳定性,这与其连续相较高的缠结程度相关。



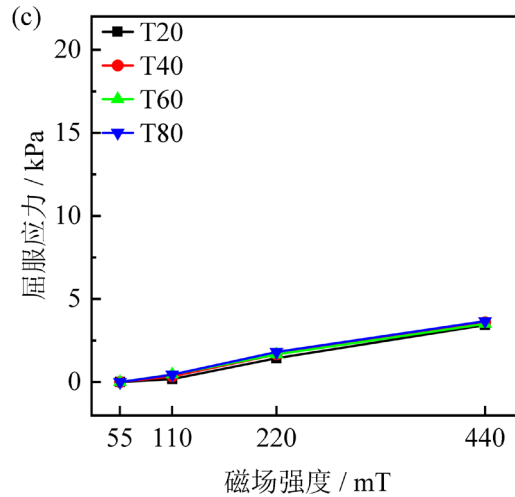


图 3-4 磁流变脂屈服应力

(a)00#MRG; (b)0#MRG; (c)1#MRG

图 3-5 给出了不同磁场强度和温度下磁流变脂触变环面积。触变环面积是指剪切速率上升曲线与下降曲线围成的面积，剪切速率上升曲线和下降曲线重合度越高，触变环面积越小，表明材料的剪切稳定性能越好，材料面对复杂工况稳定性优良。相同温度下，00#MRG 的触变环面积随着磁场强度的增加呈现非线性增加^[76]，因为 NLGI 00 润滑脂皂纤维缠结程度低，磁链的形成受到的阻碍较小，随着磁场强度的增加，逐渐以磁场为主导的复合结构对于磁流变脂的剪切阻力影响较大。在 440 mT 下，00#MRG 触变环面积随着温度升高非线性增加，因为高温促进了皂纤维解缠，加速了复合结构中磁链的主导作用，表现为 440 mT、80 °C 下 00#MRG 的触变环面积取得极大值。皂纤维的断裂重组与磁流变器械的剪切运动密切相关。低稠度连续相的皂纤维缠结程度较低，其皂纤维结构对于因磁场作用大量聚拢的磁链产生的阻力较小，表现为皂纤维结构受到磁链运动的破坏。并且介质中矿物油占比较高，高温会在一定程度上引起矿物油的析出，极大的破坏皂纤维结构，进而引起皂纤维断裂重组。

另外，1#MRG 在各试验条件下的触变环面积都较小，因为 NLGI 1 润滑脂的皂纤维缠结程度高，复合结构在受剪过程中一直以皂纤维结构为主导，且其工作温度最高达 120 °C，1#MRG 受高温热作用的影响有限。因此，磁流变脂中连续相的稠度等级越高，面对持续剪切和持续热效应的复杂工况时，具备更为优良的剪切稳定性。

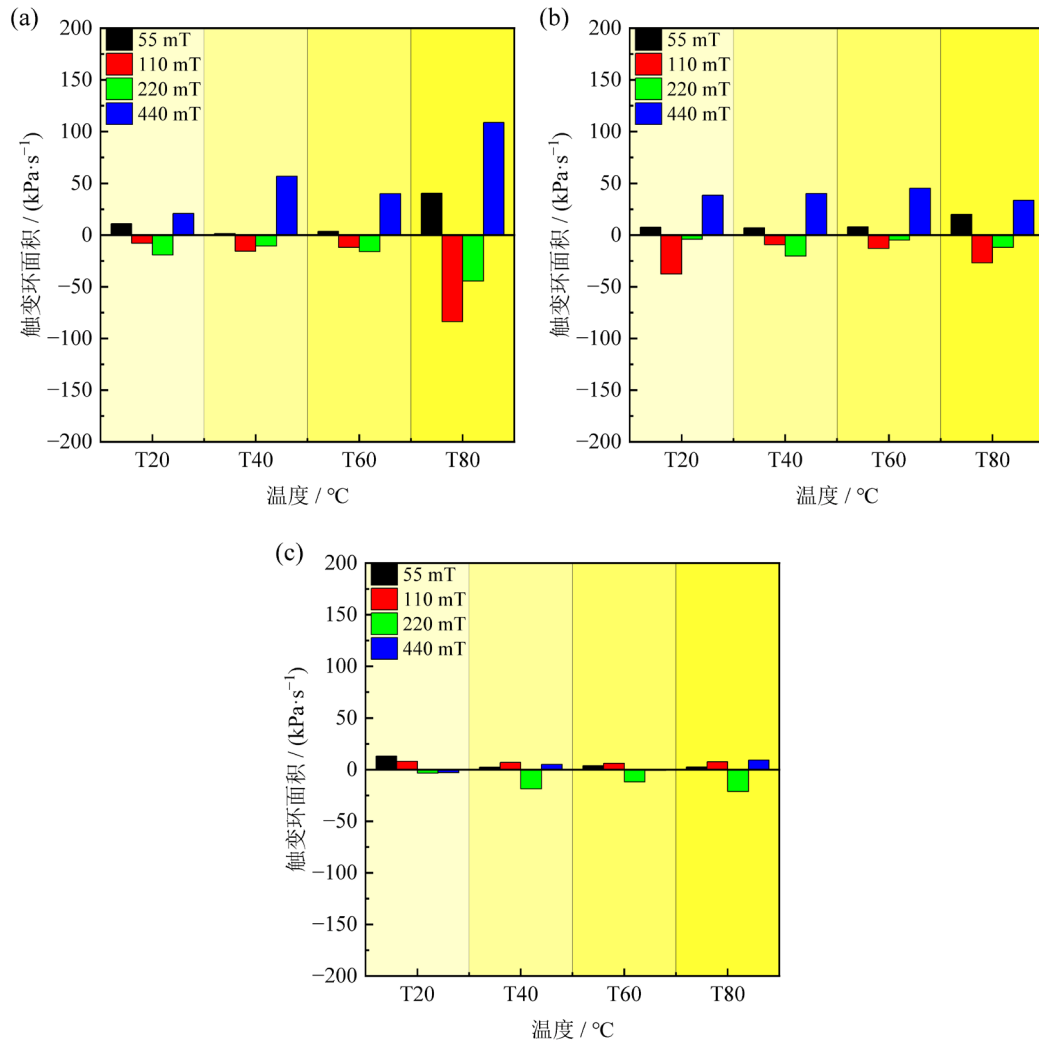


图 3-5 磁流变脂触变环面积

(a)00#MRG; (b)0#MRG; (c)1#MRG

图 3-6 给出了不同磁场强度和温度下磁流变脂表观黏度曲线和表观黏度平均值。在旋转剪切模式下，对磁流变脂施加固定剪切速率 100 s^{-1} ，黏度不随剪切时间发生明显的变化，这表明试验所用的三种磁流变脂在低剪切速率下储存性能较好。根据流体力学的理论，表观黏度是由内摩擦产生的，皂纤维被剪切时所需的外力即为润滑脂的流动阻力^[52]。磁性颗粒想在磁场作用下聚拢形成磁链需要温度场和持续剪切引起的剧烈变化，即皂纤维结构遭受巨大破坏，进而表观黏度上升，复合强度中磁链成主导因素。

相同温度下，00#MRG 表观黏度随着磁场强度的升高趋于增加。因为 00 号锂基润滑脂较低的皂纤维缠结程度，应对磁性颗粒受磁场的作用，无法提供较强的阻力。而 1#MRG 表观黏度随温度和磁场的变化不大，这表明高缠结程度的连续相会极大的阻止磁性颗粒受磁场的运动，高稠度磁流变脂的流变性能在稳态模

式下受热磁耦合场的影响较小。为了进一步探究动态模式下磁流变脂受热磁耦合场的影响，将结合剪切应变和频率扫描试验对其流变特性的影响。

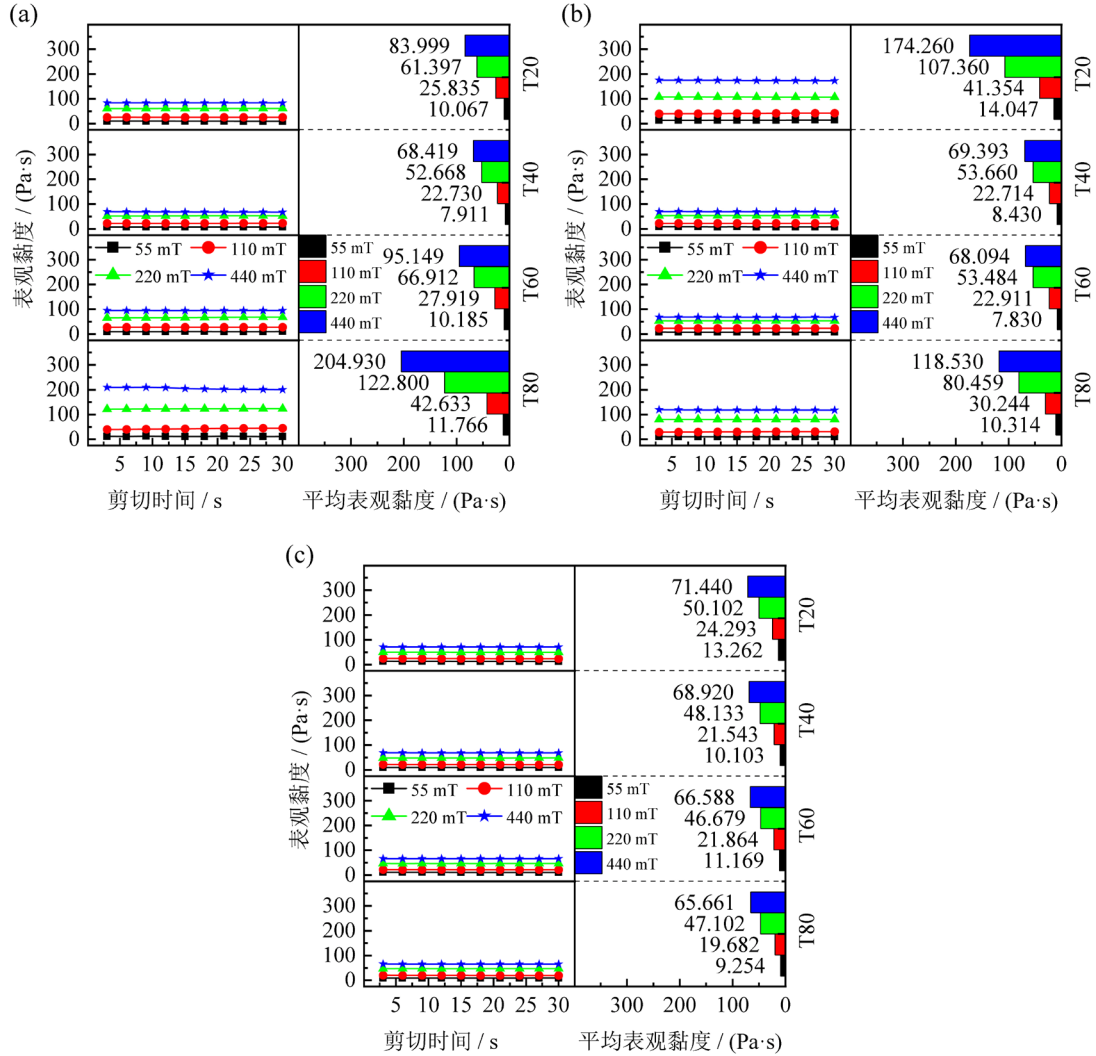


图 3-6 磁流变脂表观黏度曲线和表观黏度平均值

(a)00#MRG; (b)0#MRG; (c)1#MRG

为了研究动态模式下磁流变脂的黏弹特性，引入复数模量(G^* , Pa)，通过式(3-2)进行描述^[100]：

$$G^* = G' + iG'' \quad (3-2)$$

式中， G' 为储能模量，表征磁流变脂弹性变形所储存的能量，Pa； i 为虚数； G'' 为损耗模量，表征磁流变脂黏性变形所损耗的能量，Pa；另外对于其两者的比值 $\tan \delta = G''/G'$ 称为损耗因子，表征磁流变脂受到剪切运动时能量的损耗程度，量纲为 1。

3.3.3 振荡剪切模式下的流变特性

图 3-7 给出了不同磁场强度和温度下磁流变脂应变扫描曲线。在低剪切应变下，各磁场和温度下磁流变脂的储能模量 G' 均高于损耗模量 G'' ，这表明低剪切应变时的外力不足以克服其自身固体特性^[51]。随着剪切应变的增加，不同试验条件下样品的储能和损耗模量曲线逐渐交汇，这表明磁流变脂固体特性在高剪切应变下发生变化，流动性能变好。不同温度下，00#MRG 的储能模量随着磁场强度的增加而显著变化，意味着磁场可以有效提升磁流变脂的自身阻力，即需要外界更大的剪切应变改变其固体特性。而 1#MRG 在各温度梯度下剪切应变曲线变化幅值接近，说明较高稠度的磁流变脂受磁场变化的影响较小，对于温度变化的抗性较高。

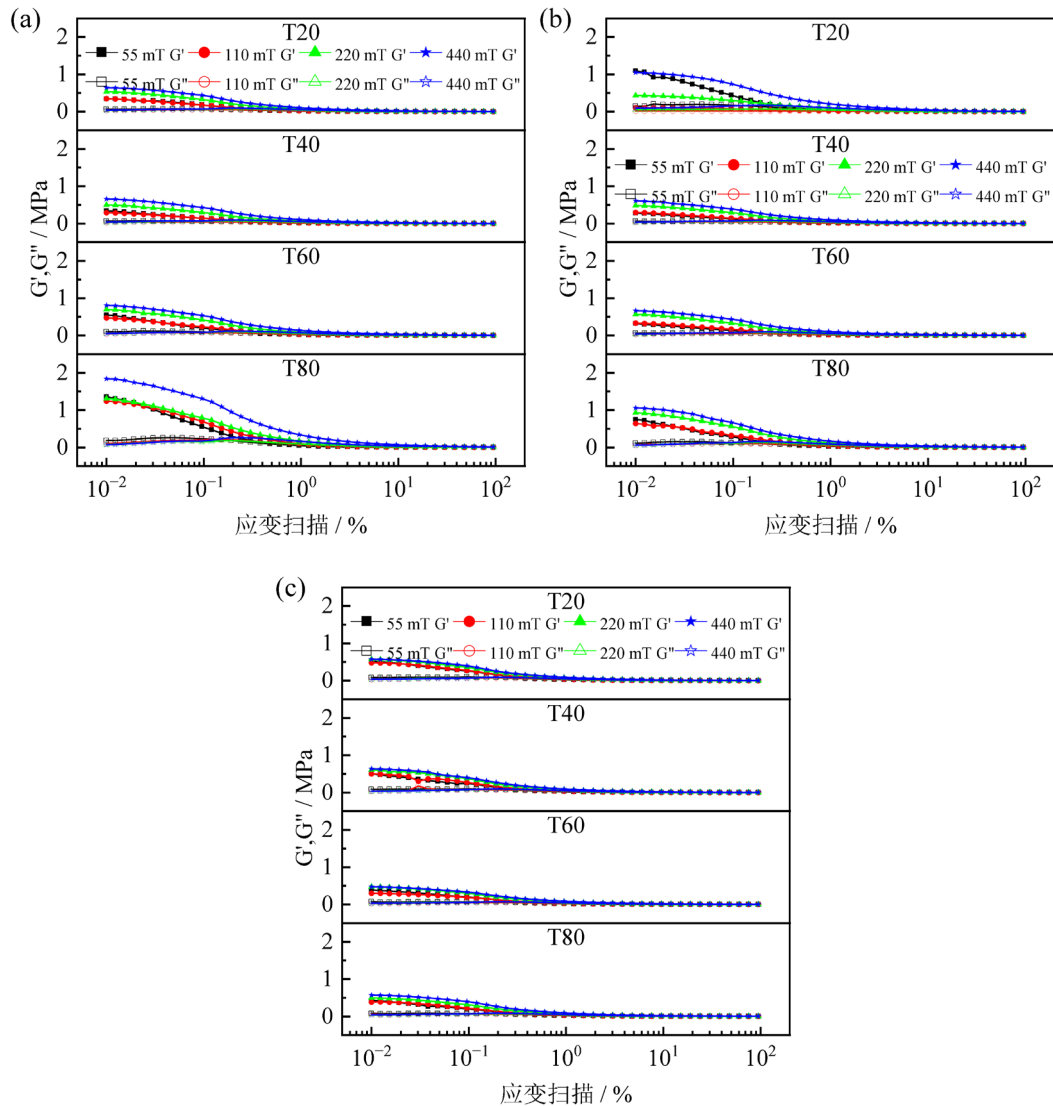


图 3-7 不同磁场强度和温度下磁流变脂应变扫描曲线

(a)00#MRG; (b)0#MRG; (c)1#MRG

图 3-8 给出了不同磁场强度和温度下磁流变脂频率扫描曲线。较低试验温度下 00#MRG 储能和损耗模量变化幅度较小，表明磁流变脂在测试频率范围内所受的外力不足以克服自身的固体特性，想要改善磁流变脂的流体性能需要较高的剪切应变。而在 80 °C 下，储能和损耗模量在低剪切频率下发生较为剧烈的变化，因为高温引起磁流变脂中皂纤维结构的解缠重组，部分磁性颗粒得以释放，在磁场作用下形成柱状或簇状结构，进而提升了磁流变脂复合结构强度^[79-81]。

此外，1#MRG 在剪切频率扫描中各磁场和温度梯度下的储能和损耗模量变化幅度较小，这与动态模式下剪切应变试验结果相似，表明稠度高的连续相在温升变化较大的恶劣工况有着极大的应用场景，可以有效降低高温引起的润滑不充分等问题。结合稳态试验的分析结果，面对热磁耦合的复杂工况，较高缠结程度的磁流变脂具备较好的剪切稳定性。

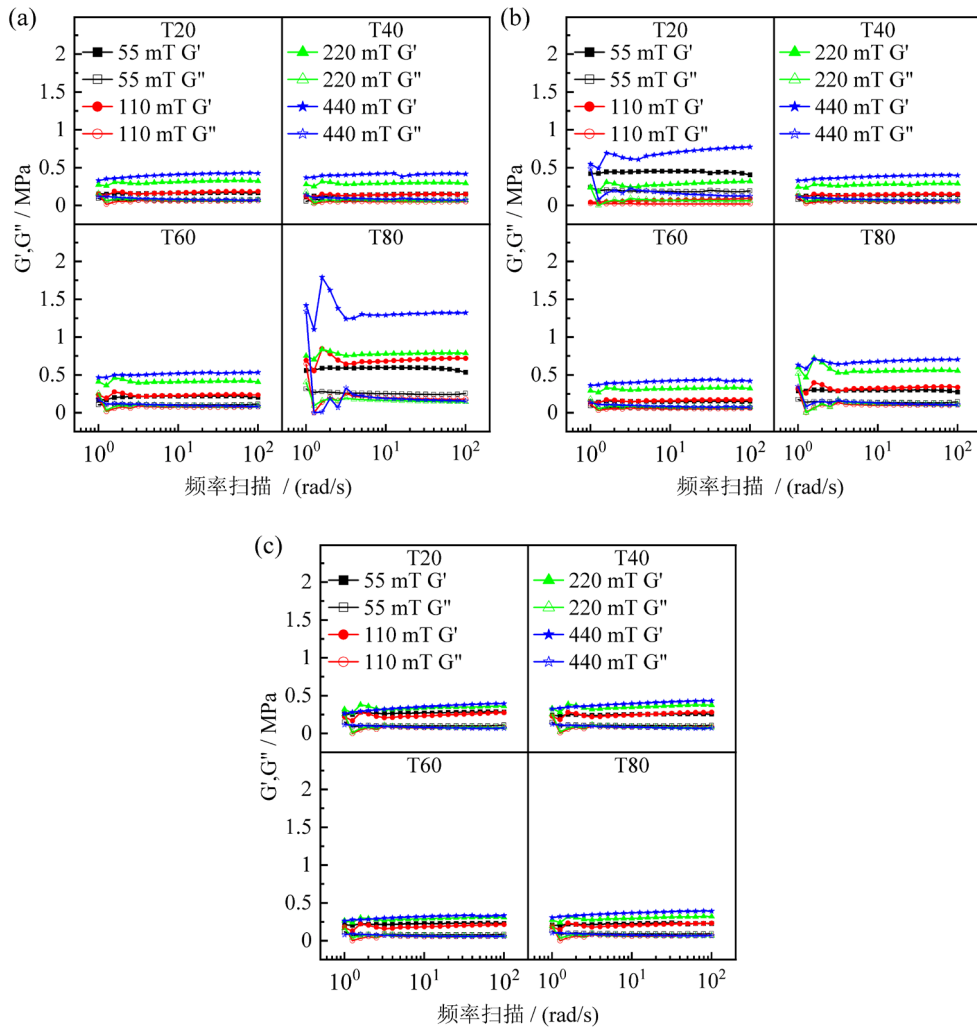


图 3-8 不同磁场强度和温度下磁流变脂频率扫描曲线

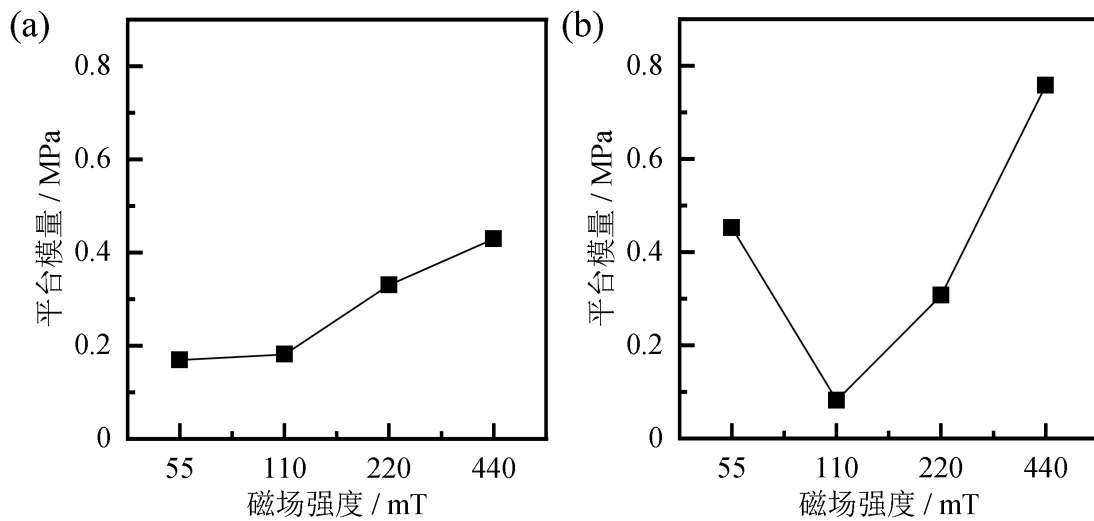
(a)00#MRG; (b)0#MRG; (c)1#MRG

结合 MARTIN-ALFONSO 等^[82]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, 其与磁链的交互构成磁流变脂复合体系, 磁流变脂的缠结程度可以通过平台模量(G_N^0 , Pa)来描述。磁流变脂平台模量可通过频率扫描试验数据利用外推法直接获得, 具体方法如式(3-3):

$$G_N^0 = [G']_{\tan \delta \rightarrow \min imum} \quad (3-3)$$

式中, $\tan \delta$ 为损耗因子。磁流变脂的平台模量的数值等于在损耗因子取得最小值时磁流变脂的储能模量数值。

图 3-9 给出了不同磁场下各样品平台模量的变化曲线。在固定 20 °C 下, 00#MRG 的缠结程度随着磁场强度的增加呈现稳定增长的趋势。因为 00 号锂基润滑脂较低的黏稠度, 在持续剪切作用下出现剪切稀化迹象, 皂纤维结构不足以抑制磁性颗粒在磁场激励下的运动, 进而形成柱状磁链, 磁链与皂纤维构成的复合结构有效的提升了自身强度^[83]。而 1#MRG 在较低磁场下的平台模量要比 00#MRG 大。这是因为磁场强度较弱时, 磁性颗粒聚集形成磁链的规模较小, 并且 1 号锂基润滑脂较高缠结程度的皂纤维结构对磁性颗粒的运动产生了极大阻力, 磁流变脂复合强度以连续相为主导。随着磁场强度的增加, 1#MRG 的平台模量总体趋于不变, 表明磁链对于 1#MRG 的复合强度影响有限。考虑到磁流变脂在实际工况下受到温度、磁场和持续剪切的多重影响, 结合固定磁场下平台模量受温度变化的影响分析其流变特性的演变规律。



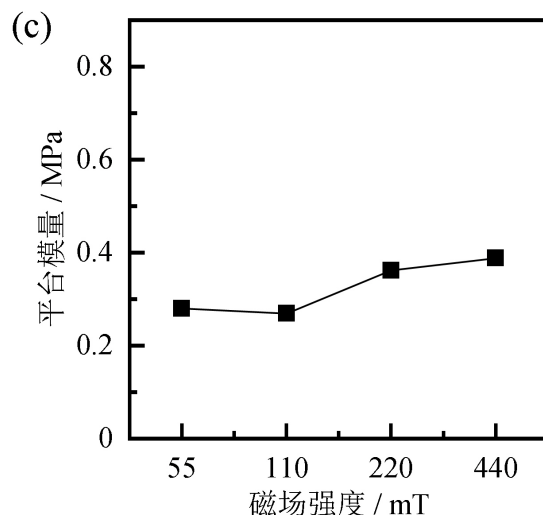
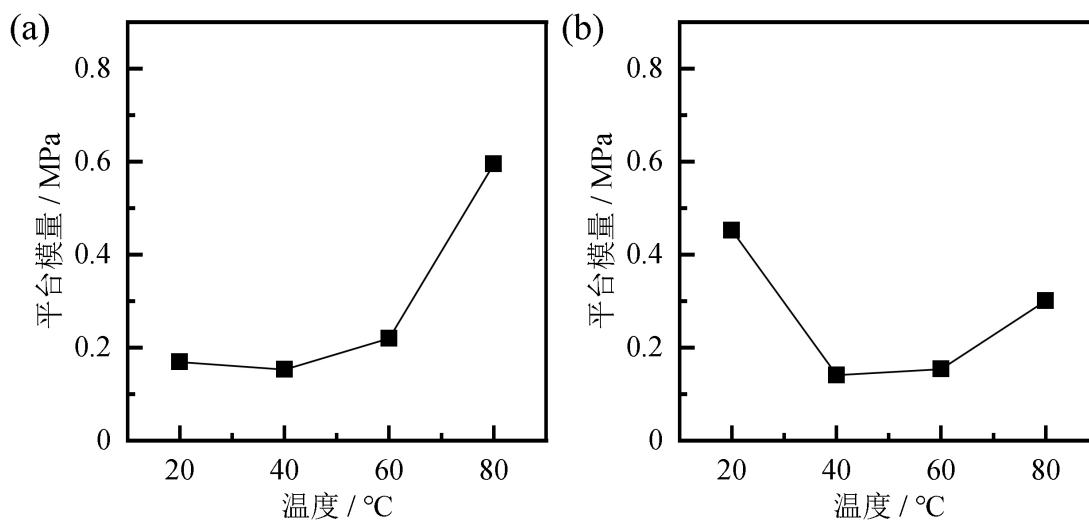


图 3-9 不同磁场下各样品平台模量的变化曲线

(a)00#MRG; (b)0#MRG; (c)1#MRG

图 3-10 给出了不同温度下各样品平台模量的变化曲线。在固定磁场 55 mT 下, 00#MRG 的平台模量随着温度的升高出现大幅增加。说明随着温度升高, 磁流变脂中皂纤维结构出现解缠断裂重组的现象, 连续相无法提供足够的外力束缚磁性颗粒的运动, 因而在磁场作用下所形成的大规模磁链可以有效增强复合结构^[84]。在低温度场下, 00#MRG 的平台模量变化幅度较低, 在试验温度达到 80 °C 时, 00#MRG 出现明显的增长。表明皂纤维结构在 80 °C 时受到极大的破坏, 大量的磁性颗粒得以释放, 磁流变脂复合强度以离散相为主导。1#MRG 在整个试验温度范围内, 平台模量的变化曲线趋于平缓。表明单一温度影响的条件下, 稠度较高的连续相对于温度变化的抗性也会提高。



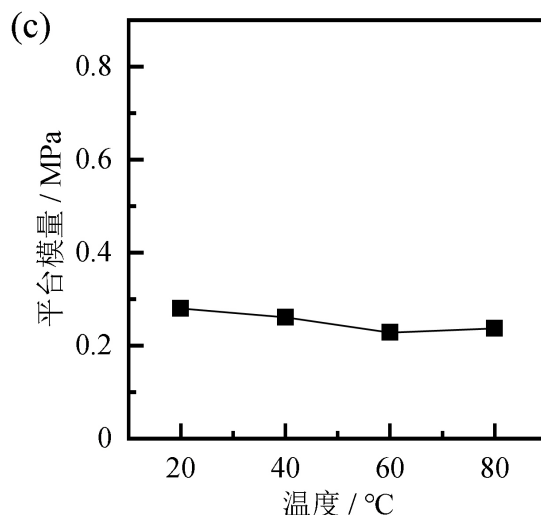


图 3-10 不同温度下各样品平台模量的变化曲线

(a)00#MRG; (b)0#MRG; (c)1#MRG

连续相中皂纤维缠结程度与磁链运动时的外界阻力直接相关,对磁流变脂的磁学性能和流变性能均有较为明显的影响。综合考虑热磁耦合工况时,平台模量较低的 00#MRG 在受到高温或强磁场的外部激励后,表观黏度大幅增加,触变环面积降低,剪切稳定性变差。平台模量较高的 1#MRG 在整个试验周期内,对于外部的激励没有明显的剧烈变化,表现出较为良好的剪切稳定性。

3.4 本章小结

采用羰基铁粉作为磁性颗粒,以不同稠度等级的锂基润滑脂为连续相制备磁流变脂,并通过 Anton Paar 公司 Physica MCR-301 型旋转流变仪对其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) 相同温度条件下,随着磁场强度增加,磁流变脂表观黏度上升,剪切流动阻力增加。磁链和皂纤维结构的交互作用对磁流变脂复合体系有结构增强作用。而 1#MRG 在定温变磁过程中,流变特性变化不明显,这与其较高的皂纤维缠结程度相关,磁性颗粒在饱和磁场作用下仍无法充分剪切皂纤维,进而聚拢形成磁链。

(2) 相同磁场条件下,随着温度升高,磁流变脂受温升影响皂纤维结构发生解缠,连续相结构强度降低,磁性颗粒得以释放,在磁场作用形成柱状磁链,极大的增强了复合结构强度。1#MRG 在温升过程中流变特性变化较小,具有良好的剪切稳定性。而 00#MRG 连续相稠度较低,耐热程度较低,在 80 °C 时复合强度大幅增加,皂纤维结构因高温遭受巨大破坏,剪切稳定性变差。

(3) 热磁耦合工况下,磁流变脂受到温升和持续剪切的混合影响。在低温、低磁场工况下,磁性颗粒在低磁场作用下不足以突破皂纤维结构的阻碍形成大规模磁链,对流变性能影响有限。随着温度上升至 80 °C, 较低缠结程度的磁流变脂受到高温破坏,其流变性能随着皂纤维结构的断裂重组出现明显变化。然而伴随着磁场强度的增加,较高缠结程度的磁流变脂具备较好的温升抗性,较高的稠度对磁链聚拢形成很好的遏制,剪切性能较为稳定。

第 4 章 高温热效应对磁流变脂流变学行为的影响研究

4.1 引言

磁流变器件(如减振器、磁流体轴承等)服役过程中因往复剪切而引起温升效应,对磁流变材料作为润滑介质时的服役性能稳定影响较大^[85-86]。课题组以往研究表明,润滑脂在长时间的高温下会出现相处的性能衰退现象^[51]。高温热作用会加剧润滑脂的性能衰老,持续高温热作用会对润滑介质微观结构造成极大的破坏。磁流变脂在工作温度范围内稳定运行是重要指标,而实际工况中,长时间高温服役时磁流变材料的可靠性服役也是重要关注点。因此,有必要进行高温热效应对磁流变脂流变学行为的影响研究。

由第 3 章研究内容可知, NLGI 1 锂基润滑脂作为基载液制备的磁流变脂在复杂工况下仍然具备较好的服役稳定性。本章进一步以该润滑脂为连续相,通过静态热处理方式模拟磁流变器件中介质受不同程度高温热效应的影响。分析磁流变脂流变学行为受高温热效应的作用机理,为磁流变器件的设计研发提供参考。

4.2 试验方案设计

4.2.1 试验材料及样品制备

结合第 3 章热效应演变初期磁流变脂基载液稠度对剪切性能的研究可知, NLGI 1 锂基润滑脂作为磁流变脂连续相使其具备较高的剪切稳定性,其随温度变化时剪切性能曲线变化较好。并且经过流变仪稳态和动态模式下流变性能测试,发现同另外这种低稠度润滑脂仍然具备较高的剪切稳定性。因此,选取 NLGI 1 锂基润滑脂作为本章节的基载液,以此制备热老化磁流变脂,进一步探究热效应演变过程中磁流变脂流变性能变化规律。

结合第 2 章磁流变脂制备方式,通过恒温干燥箱对磁流变脂进行静态热处理,图 4-1 为热效应磁流变脂样品制备流程。具体热处理方式为:在制备好的磁流变脂冷却后,根据热效应温度和时间将磁流变脂均匀的分成 9 份,尽可能厚薄一致的涂抹在 200 mL 烧杯内壁上,使得样品获得充分的受热,最后分别按不同热效应条件置于恒温干燥箱中进行静态热处理,制备好的热效应磁流变脂样品编号如表 4-1 所示。

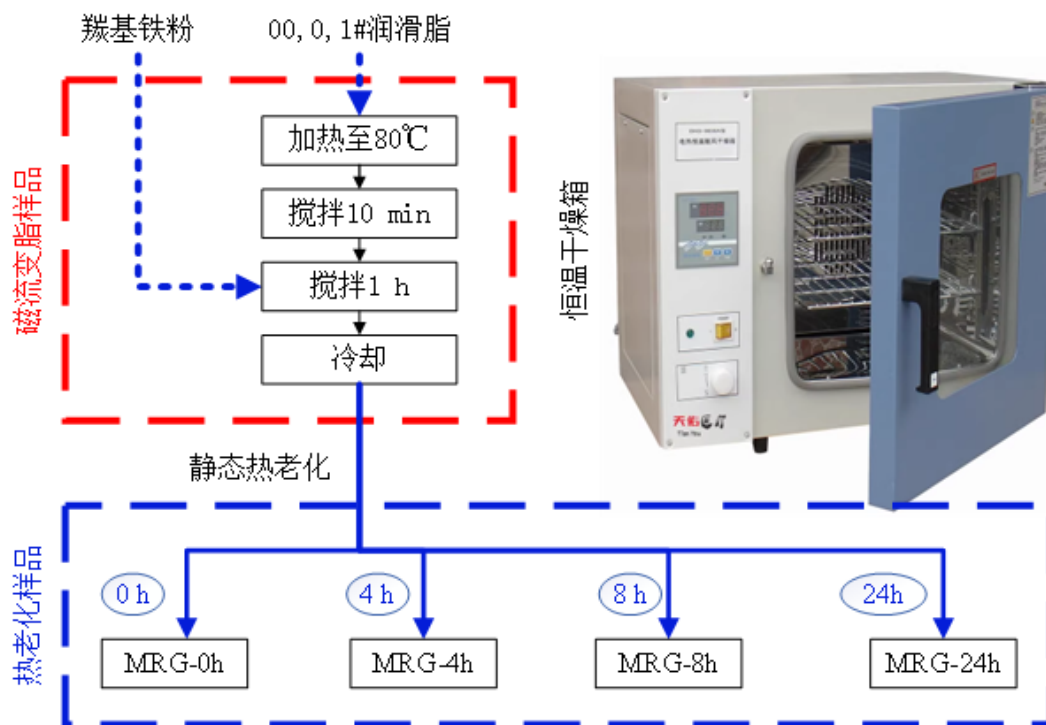


图 4-1 热效应磁流变脂样品制备流程

表 4-1 热处理后的磁流变脂样品编号

热效应温度/°C	热效应时间/h	样品编号
100	4	100°C-4h
	8	100°C-8h
	24	100°C-24h
120	4	120°C-4h
	8	120°C-8h
	24	120°C-24h
180	4	180°C-4h
	8	180°C-8h
	24	180°C-24h

4.2.2 流变学性能测试

磁场扫描、触变性试验、表观黏度试验选用 MCR-301 的稳态模式，应变扫描试验、频率扫描试验采用动态模式。具体试验内容：在磁场扫描中，固定 10 s^{-1} 剪切速率，磁场强度由 0 升至 1100 mT；在触变性试验中，剪切速率先从 0.1 s^{-1} 增加至 100 s^{-1} ，再从 100 s^{-1} 下降到 0.1 s^{-1} ；在表观黏度试验中，恒定 100 s^{-1} 剪切

速率；在应变扫描试验中，固定 1 Hz 剪切频率，应变幅值从 0.01% 升至 100%；在频率扫描试验中，固定 0.1% 应变幅值，剪切频率从 1 rad/s 升至 100 rad/s；磁场强度为 55、110、220、440 mT，测试温度为 20、40、60、80 °C，记为 T20、T40、T60、T80。

4.3 结果与讨论

4.3.1 磁学性能分析

图 4-2 给出了各样品不同温度下磁流变脂的磁场扫描结果。可以看出，各磁流变脂样品的剪切应力均随磁场强度增加而增加，在磁场强度达到 440 mT 左右趋于稳定，此时磁流变脂中磁性颗粒趋于磁化饱和。不同热效应温度和时间下磁流变脂达到磁化饱和时的磁场强度变化较小，这表明热效应行为对于磁流变脂磁性性能影响有限。

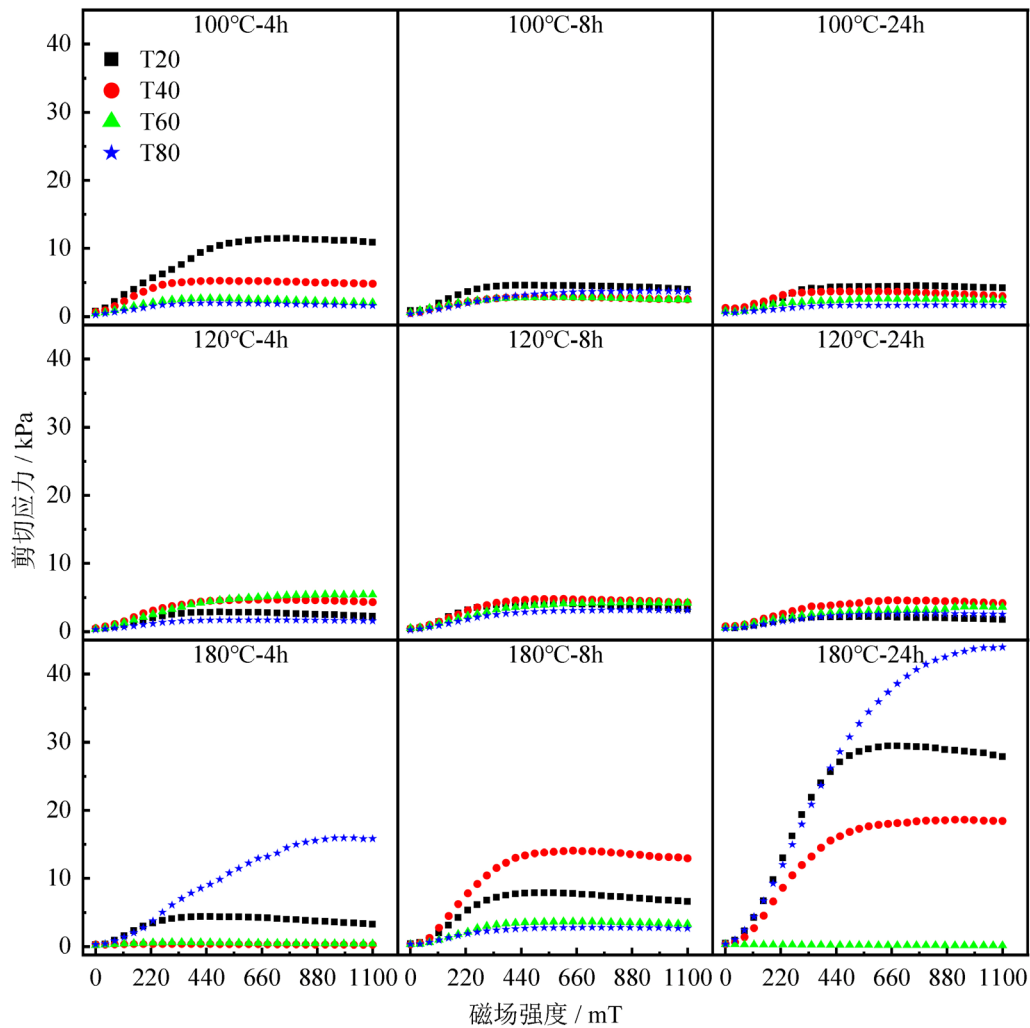


图 4-2 磁流变脂磁学性能

此外, 100、120 °C 静态热处理下各样品的磁场扫描曲线较为接近, 这是因为 NLGI 1 锂基润滑脂的工作温度为 -20~120 °C, 120 °C 内短时间热处理方式, 磁流变脂能够保持较好的复合结构稳定性。180 °C 热效应下磁流变脂剪切应力随着热效应时间出现明显变化, 这是因为受热效应行为影响的润滑脂, 会出现皂纤维缠结程度降低和皂纤维部分结块的现象, 其对磁流变脂流变性能影响较大^[60]。为探明磁流变脂受高温热效应的影响机理需要结合稳态磁场下磁流变脂流变试验展开讨论。

4.3.2 稳态剪切模式下的流变特性

图 4-3 给出了不同试验条件下磁流变脂的触变性结果。各磁流变脂样品的剪切应力随剪切速率的变化曲线整体趋于增加趋势, 且均出现一个平台区域。磁流变脂以润滑脂为基载液, 高度缠结的皂纤维结构使得润滑脂在受剪过程中存在剪切屈服现象。

与此同时, 在 20 °C、440 mT 时, 100 °C-4h 的触变性曲线于剪切速率 1 s^{-1} 附近结束平台区域, 而随着温度的增加, 其平台区域跨度延长, 因为连续剪切作用使得磁流变脂出现剪切屈服现象形成了触变性曲线中的平台区域, 因为在低速率下的外力不足以克服磁流变脂复合体系的阻力。并且 100 °C-4h 皂纤维结构随着温度升高发生解缠, 磁链和皂纤维结构交互形成的复合结构中, 磁链逐渐占主导作用, 产生极大的阻力^[34]。120 °C-4h 触变性曲线随温升呈现先升后降的趋势, 因为皂纤维结构在解缠断裂重组混合作用下影响了复合体系的强度。值得注意的是, 180 °C-24h 剪切应力相较 100、120 °C 出现明显增加, 这与磁学性能规律一致, 因为高温热效应使得磁流变脂中皂纤维出现硬化, 磁流变脂复合结构发生改变, 使得以皂纤维结构为骨架的磁流变脂复合体系剪切应力大幅增加。此外, 在 80 °C、440 mT 下, 180 °C-24h 的剪切速率上升和下降阶段的流动曲线离散型较小, 表明持续剪切破坏对于高温热效应后的复合结构影响较小, 说明当磁场主导复合结构时, 在一定程度上可以缓解纤维硬化对磁流变脂流变性能的影响。为进一步考察磁流变脂触变性能, 将通过触变环面积探究热效应行为对磁流变脂触变性能的影响。

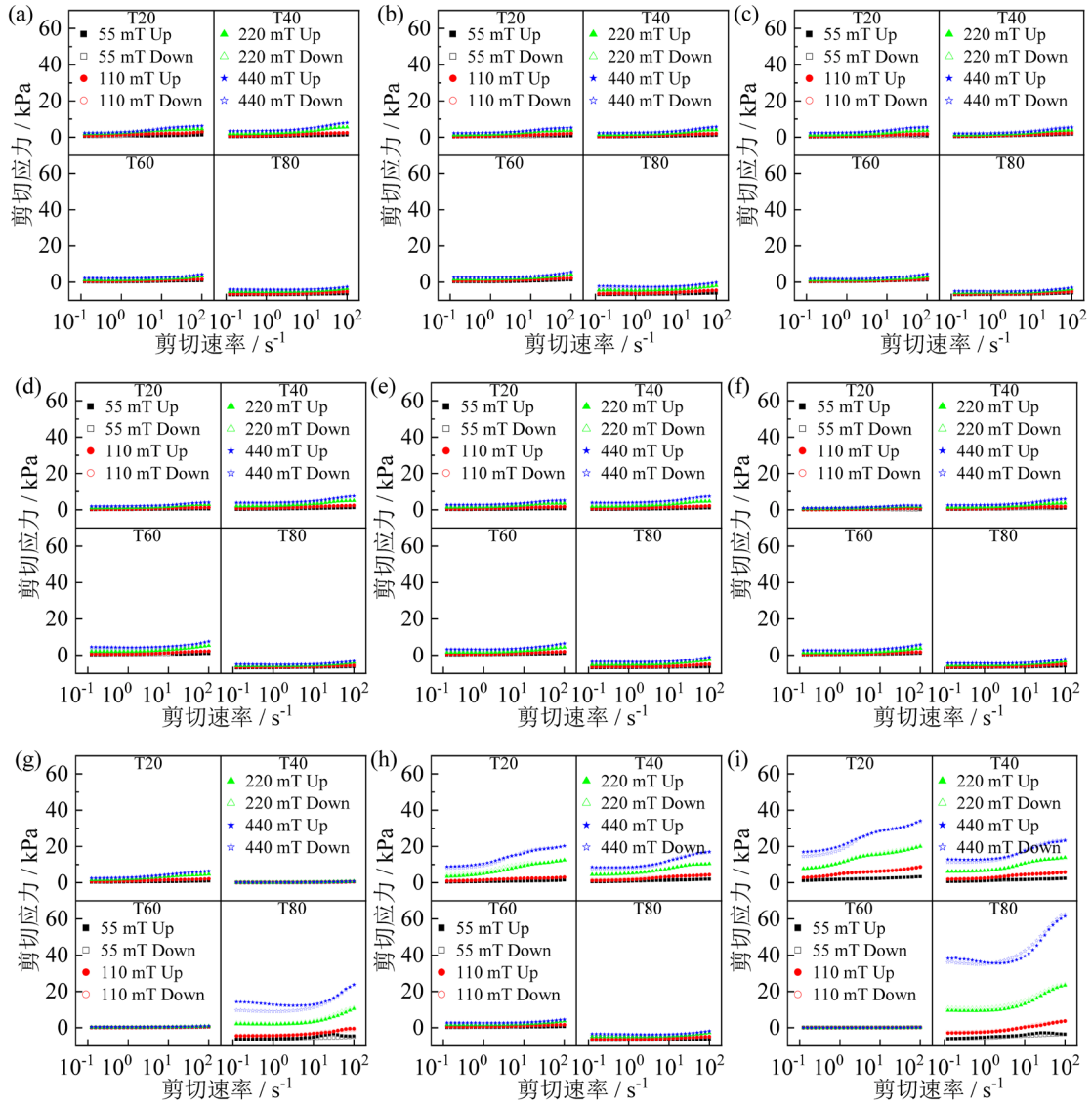


图 4-3 磁流变脂触变性

(a)100°C-4h; (b)100°C-8h; (c)100°C-24h; (d)120°C-4h; (e)120°C-8h; (f)120°C-24h;

(g)180°C-4h; (h)180°C-8h; (i)180°C-24h

图 4-4 给出了不同试验条件下磁流变脂的触变环面积变化规律。上升阶段的剪切速率曲线和下降阶段重合度越高，触变环面积越小。触变环面积可有效体现润滑脂遭受频繁剪切后的剪切稳定性能^[87-88]。相同温度下，100°C-4h 触变环面积随磁场强度增加呈现先增后减的规律；相同磁场强度下，100°C-4h 触变环面积随温度升高而非线性降低。在 100、120 °C 热效应时，磁流变脂触变环面积随热效应时间的增加总体非线性增加；而在 4 h 热效应时，磁流变脂触变环面积随热效应温度的提高总体非线性减小。

具体而言，在温度 20 °C 下，100°C-4h 触变环面积随磁场强度的增加呈现先增后减的趋势，并且在磁场强度 440 mT 时，出现了反触变性现象^[89]。因为磁流

变脂受到持续热效应和持续剪切引起的剪切稀化,使得皂纤维结构缠结程度降低进而降低了皂纤维结构对磁性颗粒的束缚,导致磁流变脂复合体系的剪切应力下降^[90]。值得关注的是,在 180 °C 热效应下,磁流变脂触变环面积在相同磁场下随着温度增加而非线性增加,在 80 °C、440 mT 下达到最大值,具体成因可能在于 180 °C 静态热处理使得磁流变脂出现皂纤维结块的现象,持续的热效应和剪切稀化效应令纤维硬化得到缓解,进而使得磁性颗粒流动性随纤维缠结程度的降低而提高,使得高温热处理后的磁流变脂剪切应力大幅增加,但是纤维硬化改变了磁流变脂复合结构,恢复性能变差。

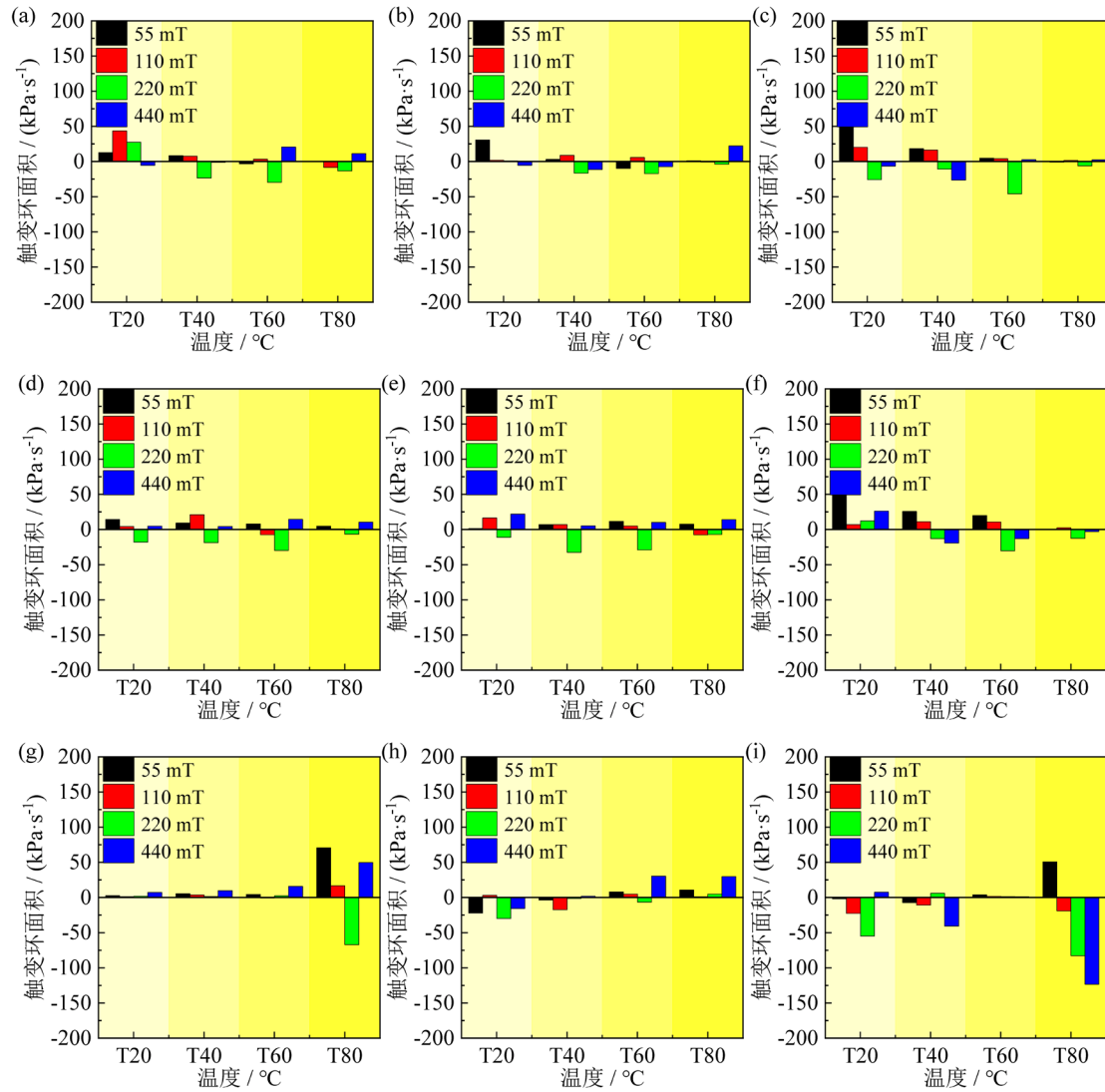


图 4-4 磁流变脂的触变环面积

(a)100°C-4h; (b)100°C-8h; (c)100°C-24h; (d)120°C-4h; (e)120°C-8h; (f)120°C-24h;
(g)180°C-4h; (h)180°C-8h; (i)180°C-24h

图 4-5 给出了不同试验条件下磁流变脂的表观黏度曲线和表观黏度平均值。可以发现,磁流变脂表观黏度随剪切时间的增加不发生明显的变化,这说明磁流变脂的剪切稳定性在剪切速率恒定下较好。各温度下,100℃-4h 表观黏度随着磁场强度的增加而增加,其中 40℃时黏度增长幅度最大。在 100、120℃热效应下,磁流变脂表观黏度在 40℃、440 mT 取得较大值,在 20℃、55 mT 取得较小值。具体成因可能在于持续的热效应破坏了磁流变脂皂纤维结构使得磁性颗粒流动性增强,而较高温度加剧了皂纤维结构性能衰退引起磁流变脂中磁性颗粒析出^[77]。在 80℃、440 mT 下,100℃-24h 和 120℃-24h 的表观黏度平均值为 30.3 Pa·s 和 36.7 Pa·s,而 180℃-24h 的黏度达到 492 Pa·s,并且 180℃-24h 在 40℃、440 mT 的黏度为 234 Pa·s,这一结果表明 180℃静态热效应处理使得磁流变脂受到纤维硬化的影响,使得磁流变脂表观黏度大幅提高,而持续的加热使得皂纤维解缠,磁性颗粒流动性能得到改善。

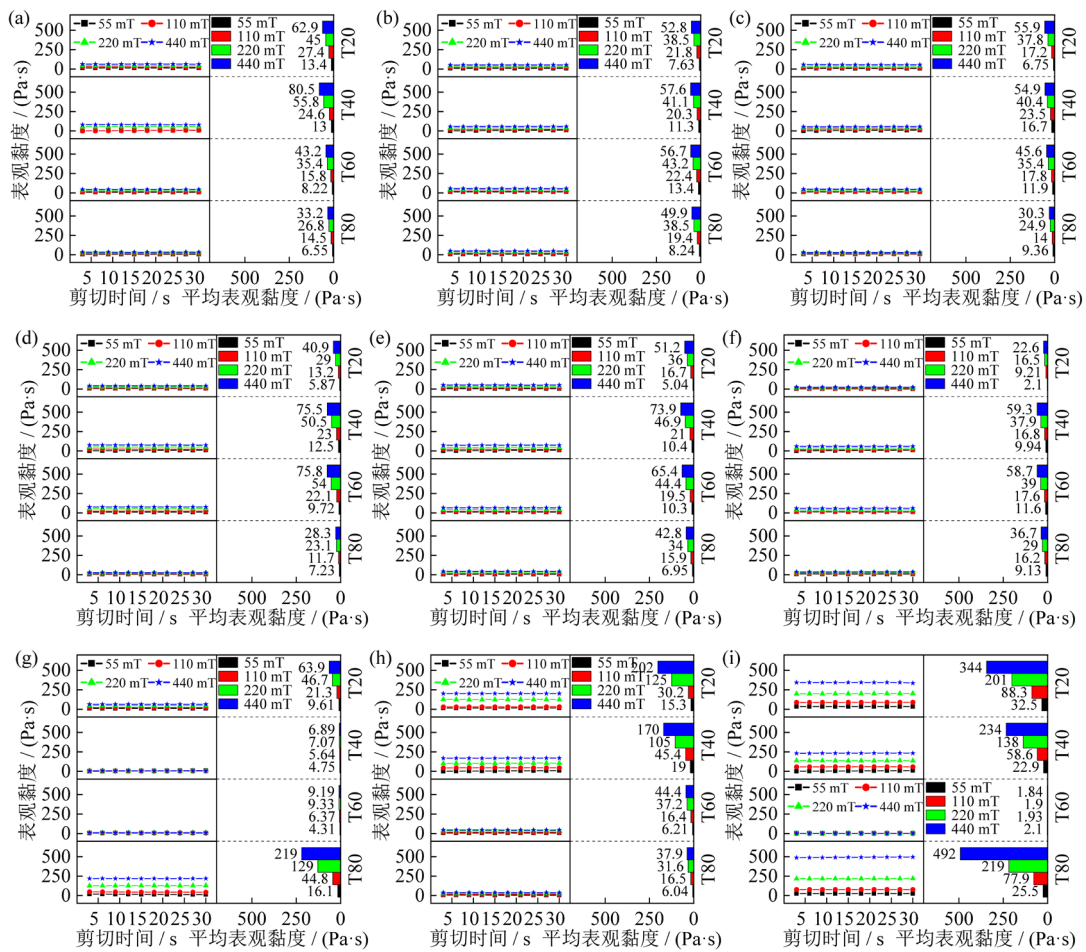


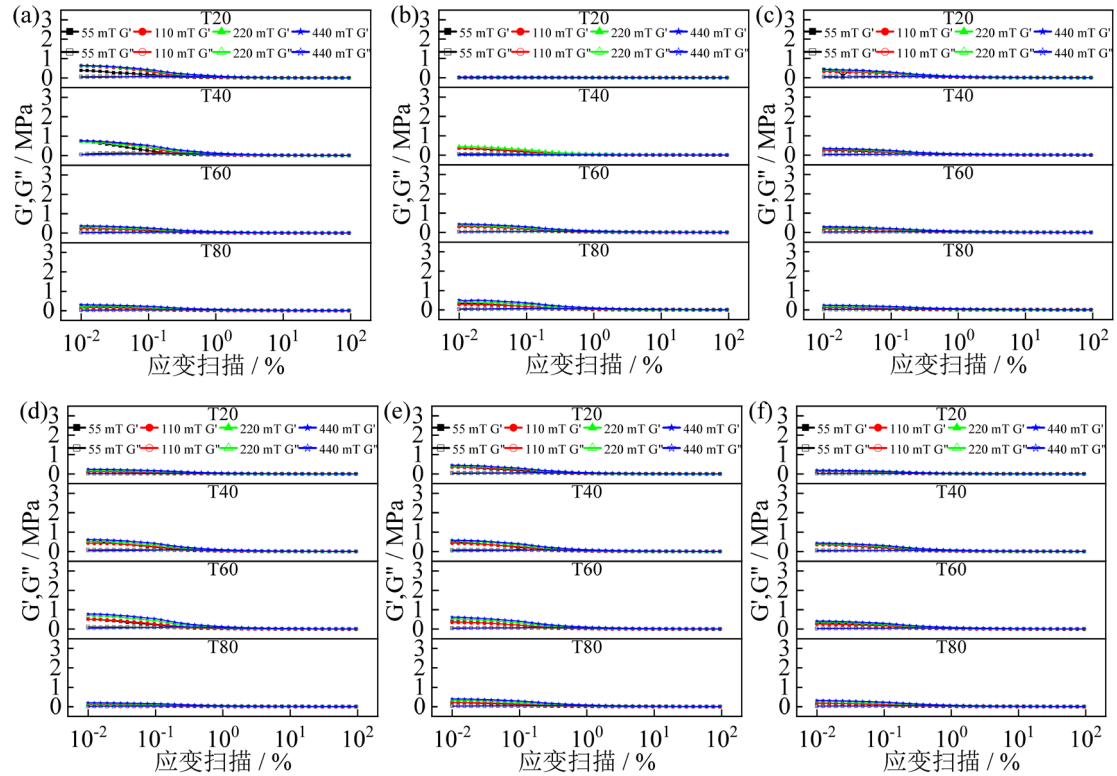
图 4-5 磁流变脂的表观黏度曲线和表观黏度平均值

(a)100℃-4h; (b)100℃-8h; (c)100℃-24h; (d)120℃-4h; (e)120℃-8h; (f)120℃-24h;
(g)180℃-4h; (h)180℃-8h; (i)180℃-24h

4.3.3 动态剪切模式下的流变特性

图 4-6 给出了不同试验条件下磁流变脂储能模量和损耗模量随剪切应变规律。相同温度下，磁流变脂储能模量随着磁场强度的增加而非线性增加；相同磁场强度下，磁流变脂储能模量随温度升高呈现先升高后降低的趋势。100℃-4h 在 20℃下储能模量曲线在较低应变时高于损耗模量曲线，随着剪切应变的增加而逐渐交汇。

除此之外，100℃-4h 在 20℃下储能模量曲线与损耗模量曲线的交汇点随着磁场强度的增加而逐渐后移，因为较强的磁场强度促进了磁链的产生，增强了磁流变脂复合体系的强度，使得磁流变脂趋于类固体特性。100℃-4h 在 20℃储能模量曲线与损耗模量曲线的交汇点随着温度的增加没有明显变化，这可能是因为在应变扫描试验中，较低温度下持续热效应对磁流变脂复合体系影响较小，而 180℃-24h 出现了显著变化，因为高温热效应使得磁流变脂中皂纤维出现了结块现象，提高了其剪切阻力。为验证持续热效应对动态模式下磁流变脂流变特性的影响，进一步开展磁流变脂频率扫描试验，研究磁流变脂流变特性及皂纤维缠结程度受持续热效应的影响情况。



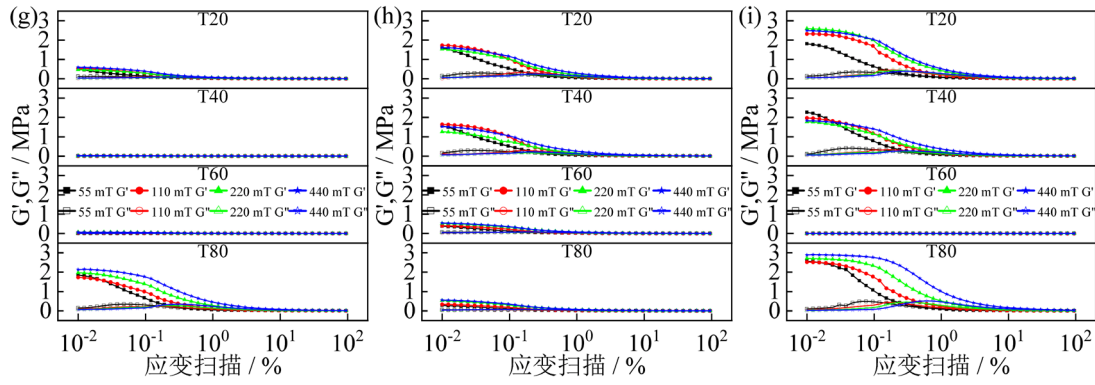


图 4-6 磁流变脂的储能和损耗模量随剪切应变规律

(a)100°C-4h; (b)100°C-8h; (c)100°C-24h; (d)120°C-4h; (e)120°C-8h; (f)120°C-24h;
(g)180°C-4h; (h)180°C-8h; (i)180°C-24h

图 4-7 给出了不同试验条件下磁流变脂储能和损耗模量随剪切频率的变化规律。不同温度和磁场强度下，磁流变脂储能模量曲线均高于损耗模量曲线。具体的，100 °C热效应下磁流变脂储能模量曲线随着温度增加而没有明显变化，而120 °C下磁流变脂储能模量曲线随温度增加而呈现先升后降的趋势。因为磁流变脂皂纤维结构随着热效应温度的增加缠结程度降低以及持续热效应进一步破坏皂纤维结构，使得磁性颗粒流动性增强，进而提升磁流变脂流变性能。另外，在较高剪切应变下，100°C-4h 在不同磁场强度和温度下随剪切频率的增加而变化较小，而在应变扫描中，随着剪切应变的增加，磁流变脂储能模量和损耗模量曲线逐渐交汇，这可能是因为由持续的加热和剪切破坏的共同作用破坏了磁流变脂皂纤维结构，进而影响磁流变脂流变性能，而在频率扫描试验中，固定 0.1%的剪切应变很难充分剪切磁流变脂皂纤维结构，即当持续热效应占主导作用，导致剪切频率变化带来的变化较小。

此外，发现 180°C-24h 在 T60 下的储能和损耗模量与其它温度存在较大差异。具体原因可能是经过高温热效应处理后，磁流变脂中矿物油含量大量降低引起皂纤维硬化的出现，进而磁流变脂其它热效应温度梯度的流变性能出现大幅增加的规律。而令 T60 下磁流变脂的储能和损耗模量出现大幅降低的原因可能是在动态模式的试验中，由于旋转流变仪的加热配件采用水浴加热，60 °C下纤维硬化趋于解离，水蒸气弥补油脂流失的空隙，而水和油的不相溶性削弱了皂纤维结构强度。

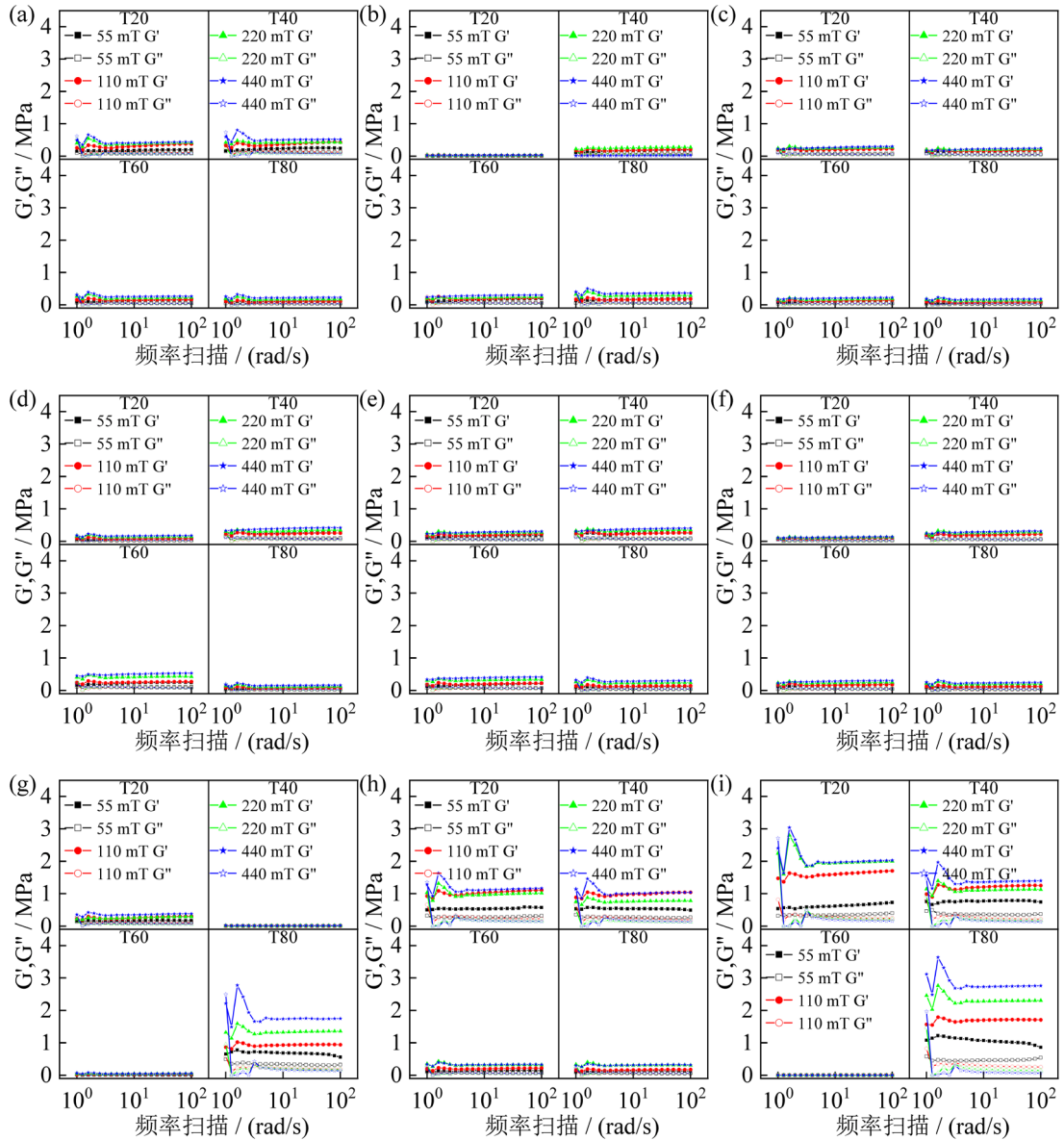


图 4-7 磁流变脂的储能和损耗模量随剪切频率规律

(a)100°C-4h; (b)100°C-8h; (c)100°C-24h; (d)120°C-4h; (e)120°C-8h; (f)120°C-24h;
(g)180°C-4h; (h)180°C-8h; (i)180°C-24h

根据式(3-3)所述推算平台模量的方法。图 4-8 给出了 180°C-4h 平台模量随磁场强度和温度的变化曲线。随着温度升高，磁流变脂的平台模量先下降后大幅上升。因为磁流变脂经过高温热处理发生了纤维硬化，表现为初始平台模量较高。在持续高温剪切过程中，皂纤维解缠重组，表现为 40、60 °C 下平台模量微量降低。而随着温度上升至 80 °C，此时复合结构以磁链为主导，饱和磁场的激励显著提高了磁流变脂平台模量。随着磁场强度的增加，平台模量不断增加，磁性颗粒聚集形成的磁链极大的提升了磁流变脂的强度，这一现象表明磁场变化引起的磁链聚散可以有效影响皂纤维缠结程度。

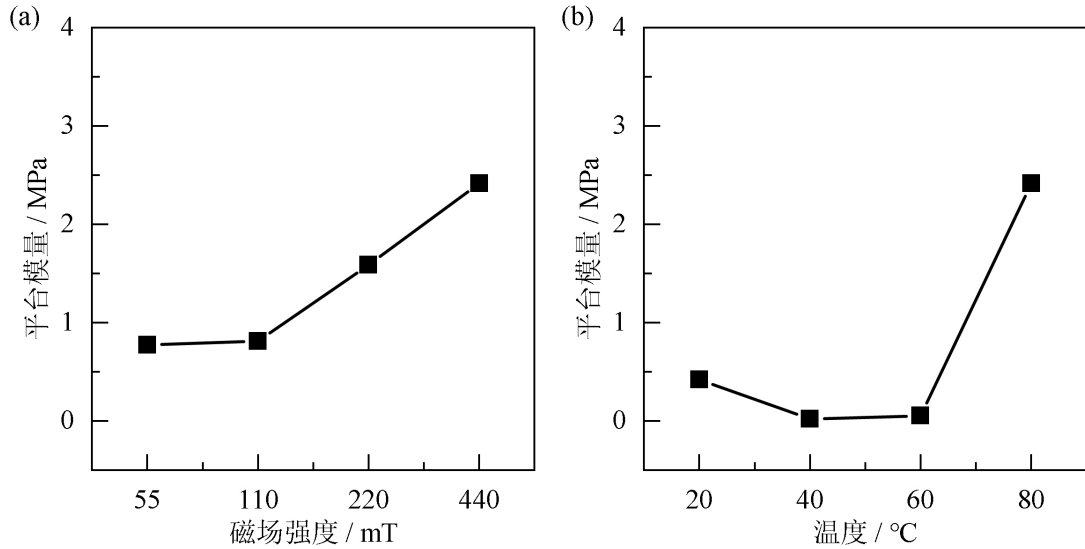


图 4-8 180°C-4h 的平台模量随磁场强度和温度的变化曲线

(a)磁场强度, T80; (b)440mT, 温度

图 4-9 给出了平台模量随热效应时间和温度的变化曲线。图 4-9(a)为 120 °C 热效应下磁流变脂平台模量随热处理时间的变化规律, 皂纤维程度随着加热时间呈现增加趋势。图 4-9(b)为磁流变脂以 100、120 和 180 °C 加热 4 h 时的平台模量, 平台模量在 100、120 °C 变化较小, 而 180 °C 出现了显著增加, 这与动态模式的试验结果相似。这是因为在短时间的热处理下, 磁流变脂皂纤维结构解缠使得平台模量降低, 在热效应时间达到 24 h 时, 皂纤维出现了结块现象, 平台模量得到大幅增加, 但是结合触变性试验发现此时磁流变脂恢复性能大幅降低。

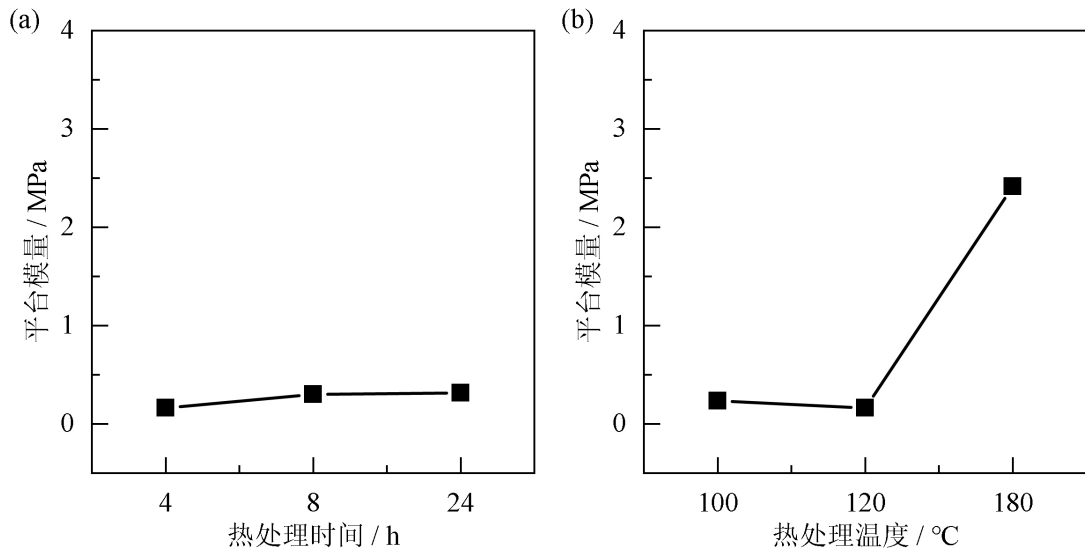


图 4-9 热效应磁流变脂的平台模量随加热时间和温度的变化曲线

(a)热处理时间, 120 °C; (b)热处理温度, 4 h

4.4 本章小结

通过对实验室制备磁流变脂在温度 100、120 和 180 °C 下进行 4、8、24 h 静态热处理，结合流变学和磁学性能对介质磁流变脂流变性能演变机理的讨论，结论如下：

（1）磁链与皂纤维结构的交互改善了磁流变脂复合结构。其中 100、120 °C 时的热效应温度对磁流变脂复合结构影响有限，而经过 180 °C 热效应处理后的磁流变脂流变性能发生巨大改变。

（2）180 °C 热效应处理对磁流变脂的影响主要表现为磁流变脂中皂纤维硬化，具体为磁流变脂的剪切应力随热效应温度和时间的增加而呈现增加趋势，皂纤维结构受到纤维硬化、剪切破坏和持续热效应的混合影响，对于热磁耦合工况下的磁流变脂流变性能影响巨大。

（3）静态热效应处理使得磁流变脂皂纤维硬化，其缠结程度发生变化。随着热效应温度的增加，磁流变脂皂纤维结构的剪切稳定性变差。磁场在一定程度上有利于缓解高温热效应引起剪切稳定性下降的问题，但持续的热效应仍对磁流变脂的服役存在巨大危害。

第 5 章 磁流变脂热效应行为的分析与预测

5.1 引言

磁流变介质在服役过程中因流体摩擦而出现温升，对其流变性能影响较大。润滑介质受高温热效应影响发生性能演变，其可靠性服役面临挑战。磁流变脂在服役过程中受到持续剪切、磁场、温度以及高温热效应等多场耦合作用，对其流变性能影响较大。通过 120、150 °C 对复合锂基润滑脂的热处理研究，结果表明高温热效应对润滑脂造成结构性破坏，触变性明显变差^[54,60]。此外以复合锂基润滑脂的工作温度和极限温度进行热效应试验，发现极限温度热处理后的润滑脂结构破坏显著，持续热作用的影响更加显著^[100]。目前对于磁流变脂流变性能研究以单一因素的研究居多，较少涉及多因素耦合作用的研究，尤其是高温热效应这一影响因素的加入，使得磁流变脂流变性能研究更加困难^[91-92]。

基于此，本课题组所选锂基润滑脂的工作温度为-10~120 °C，将该基载液和磁性颗粒混合制备磁流变脂，进行 100 °C 静态热处理，可以较好模拟流体机械在运转过程中摩擦副间的持续热能损耗，同时避免出现流变性能异常离散。采用 MCR-301 进行流变学试验，探究高温热效应对磁流变脂流变行为的性能变化。进一步以试验温度、磁场、热效应时间、剪切速率作为输入特征，剪切应力作为输出特征，通过 SSA-BP 预测模型为多场耦合下磁流变脂流变性能进行预测，为磁流变器件的设计和研发提供理论基础和数据支持。

5.2 试验方案设计

5.2.1 试验材料

磁流变脂因磁流变器件在服役过程中往复剪切而不可避免出现大量热量堆积，其润滑介质受热效应影响。在热效应演变过程中，当热效应温度在润滑脂工作温度内，所出工况下主要干扰因素较小，主要为温度、磁场和持续剪切。当器械不停机的持续工作，则会出现持续热效应问题，对润滑脂持续服役稳定性带来较大的考虑。而根据第 4 章分析结果可知，当热效应演变后期，即器件高强度工作，润滑介质受到摩擦副间大量堆积的热量影响，润滑脂内部结构被破坏，流变性能发生显著变化，对磁流变脂剪切稳定性影响极大。

本节所研究磁流变脂样品是结合第 4 章高温热效应磁流变脂的制备方式, 进一步探索热效应时间和热效应温度对磁流变脂的服役性能影响。具体样品制备方式如下: 首先根据第 2 章磁流变脂制备方式, 等待半成品样品冷却后。将其均分成 4 份, 接着将其置于干燥箱中, 以 100 °C 分别干燥 4 h, 8 h, 24 h。等待各自冷却后得到热效应磁流变脂, 将其编号为 MRG-0h, MRG-4h, MRG-8h, MRG-24h。

5.2.2 流变学性能测试

为探究多场耦合工况下磁流变脂流变性能, 使用旋转流变仪对磁流变脂在不同温度下进行剪切速率扫描。具体试验条件为, 磁场强度取 55、110、220、440 mT, 测试温度为 20、40、60、80 °C。对各高温热效应样品分别进行剪切速率扫描试验, 在剪切速率扫描试验中, 剪切速率从 0.1 s^{-1} 增加至 100 s^{-1} , 测试不同磁场强度和温度下, 高温热效应磁流变脂剪切应力随剪切速率的变化规律。

5.2.3 试验结果

图 5-1 给出了不同试验温度和磁场强度下磁流变脂剪切速率扫描曲线。磁流变脂剪切应力整体随着磁场强度的增加呈现较小的增幅, 在 440 mT 出现明显的增长。因为 NLGI 1 锂基润滑脂具有较高的皂纤维缠结程度, 磁性颗粒的运动受到皂纤维结构极强的阻力, 无法在较低磁场下形成柱状或簇状磁链, 而 440 mT 下磁链大量聚拢, 极大的增加了磁流变脂复合强度^[34,39]。随着试验温度的增加, 磁流变脂剪切应力整体波动较小。这与其自身较高皂纤维缠结程度有关, 高稠度连续相削弱了磁链对复合结构增强的作用, 同时有效的提高磁流变脂剪切稳定性。

在低磁场激励下, 不同热效应时间下的速率扫描曲线离散性低, 整体流变性能变化较小, 磁流变脂在低磁场下表现出较好的剪切稳定性。在外部激励达到 440 mT 时, 速率曲线离散性增大, 并随着温度增加, 各曲线层次感更清晰。因为由磁链和皂纤维结构交互形成的复合结构, 在高磁场激励下, 磁链趋于主导地位, 极大的增强了结构强度。在 80 °C, 440 mT 下, 速率曲线随着热效应时间的增加, 出现了曲线分层现象。因为长时间的高温热处理过程中, 矿物油的析出量随着热处理时间增加, 皂纤维结构遭到破坏, 甚至出现纤维局部硬化问题, 极大的阻碍了磁链大量聚拢, 此时复合结构以皂纤维结构为主导^[43]。考虑到磁流变脂在实际工况下受到持续剪切、磁场和温度的耦合作用, 结合神经网络预测磁流变脂在复杂工况下流变性能的变化规律, 为磁流变器件的应用和研发提供数据支撑。

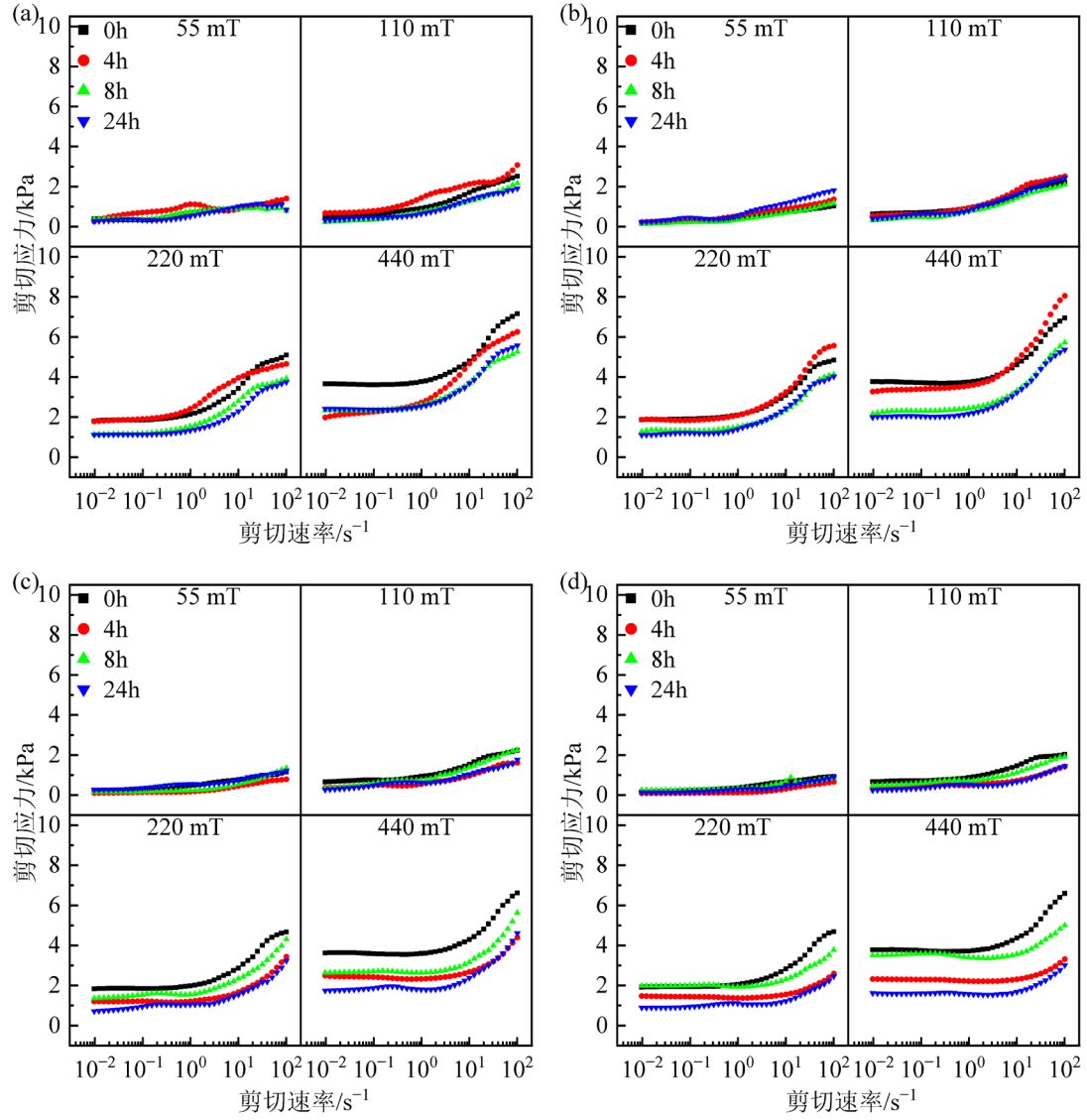


图 5-1 磁流变脂剪切速率扫描曲线

(a)20°C; (b)40°C; (c)60°C; (d)80°C

5.3 高温热效应磁流变脂流变性能预测模型

为了获得不同磁场强度和温度下高温热效应磁流变脂剪切速率、热效应时间和剪切应力的关系,建立一种 SSA-BP 预测模型,该模型近似于某个非线性函数,如式(5-1)所示:

$$F \approx f_{T,m,t}(\dot{\gamma}) \quad (5-1)$$

式中, F 为剪切应力, T 为试验温度, m 为磁场强度, t 为热效应时间, $\dot{\gamma}$ 为剪切速率。

5.3.1 BP 神经网络

BP 神经网络是一种基于误差修正的非线性映射学习网络，具备较强的非线性映射能力，但是训练过程中容易因初始权值和阈值取值不当而导致收敛于局部极值^[93-94]。输入特征为试验温度、磁场强度、热效应时间和剪切速率共 4 种类型，输出特征为剪切应力预测值。BP 神经网络的初始参数如表 5-1 所示。

表 5-1 BP 神经网络的初始参数

训练集占比/%	验证集占比/%	测试集占比/%	最大迭代次数	学习步长	目标误差
70	15	15	200	0.01	0.00001

结合 Kolmogorov 定理^[95]，隐含层节点个数 P_h 如式(5-2)：

$$P_h = 2 \cdot P_i + 1 \quad (5-2)$$

式中， P_i 为输入层节点个数。BP 神经网络的架构如图 5-2 所示，为 4×9×1。隐含层通过 $\tan sig$ 函数(如式(5-3))进行映射，输出层通过 $purelin$ 函数(如式(5-4))进行映射，损失函数为 MSE 函数(如式(5-5))。

$$\tan sig(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \quad (5-3)$$

$$purelin(x) = x \quad (5-4)$$

$$E_{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y - y')^2 \quad (5-5)$$

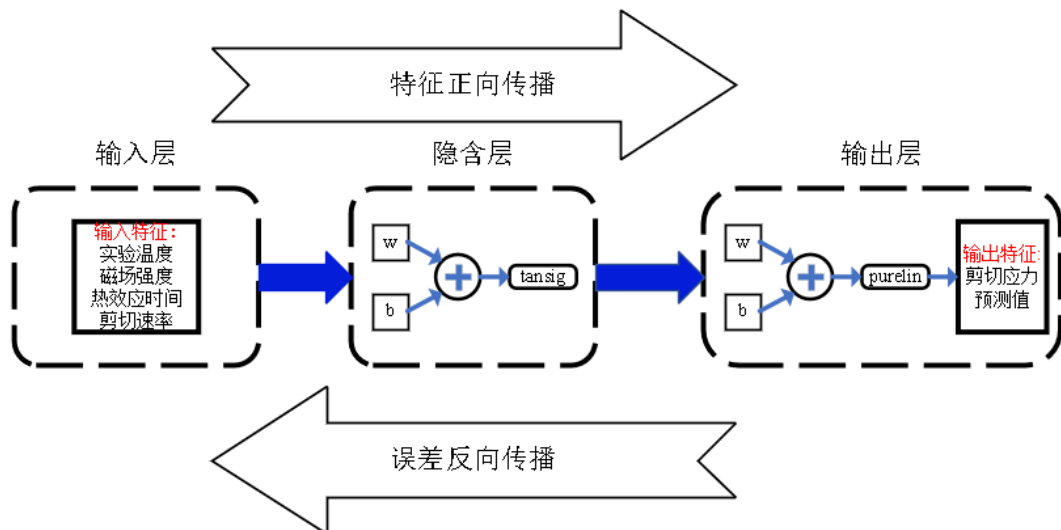


图 5-2 BP 神经网络的架构

考虑到特征值的离散性较大, 为了便于模型收敛, 需要采用 `mapminmax` 函数(如式(5-6))将试验表征结果进行归一化处理, 映射到[0,1]区间内。

$$x^* = \frac{(y_{\max} - y_{\min})(x - x_{\min})}{x_{\max} - x_{\min}} + y_{\min} \quad (5-6)$$

式中, x 和 x^* 分别为归一化前的特征数据和归一化后的特征数据。 $y_{\min}$ 和 $y_{\max}$ 分别为 0 和 1。 $x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 分别为特征数据最小值和最大值。同时为了进一步提高模型的泛化能力, 需要对数据进行打乱操作。数据打乱操作示意图如图 5-3 所示。

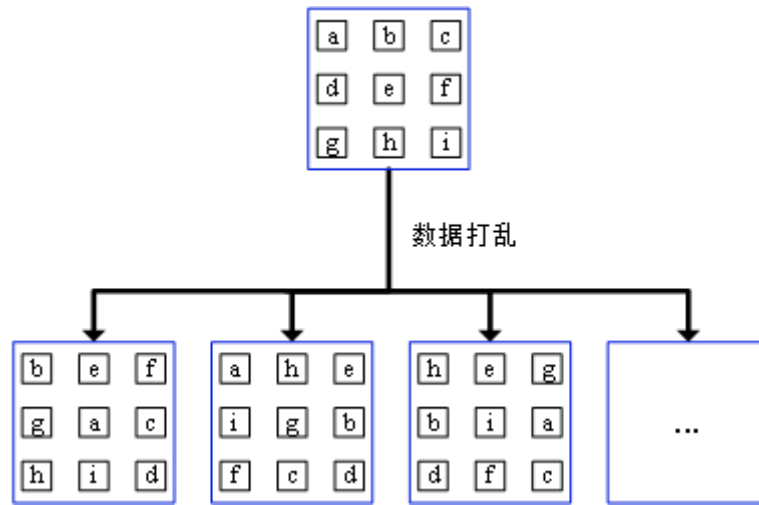


图 5-3 数据打乱操作示意图

5.3.2 SSA 算法

麻雀搜索算法(SSA)是一种模仿麻雀群体在觅食过程中觅食行为和躲避天敌行为的群体智能算法, 具有寻优精度高, 全局搜索能力好和快速收敛等优点^[96-97]。SSA 优化算法的参数如表 5-2 所示。

表 5-2 SSA 优化算法的参数

麻雀种群数量	最大迭代次数	发现者比例	警戒者比例	鸟群预警值
40	20	0.4	0.2	0.8

麻雀种群中每只麻雀觅食位置均代表一个解, 麻雀位置的更新伴随着觅食能力的变化, 迭代结束后最优觅食位置的麻雀极为全局最优解。麻雀在觅食过程中存在 3 种行为, 发现者职能为寻找食物, 跟随者职能为跟随发现者觅食, 而作为警戒者需要警戒种群当前觅食环境的安全性。发现者职能赋予其进行群体觅食范围的开拓, 具有较高的适应度值。跟随者在跟随发现者觅食过程中, 会出现夺取

食物进而提升自身适应度的情况。警戒者在察觉到天敌等危险时，会及时提醒种群离开危险区域。

发现者位置更新描述如下：

$$X_{ij}^{t+1} = \begin{cases} X_{ij}^t \cdot \exp(\frac{-i}{\alpha \cdot t_{\max}}), R_2 < ST \\ X_{ij}^t + Q \cdot L, R_2 \geq ST \end{cases} \quad (5-7)$$

式中， α 为(0,1]之间的均匀随机数。 t 和 $t_{\max}$ 分别为当前迭代次数和最大迭代次数。 Q 和 β 均为服从标准正态分布的随机数。 L 为单位行向量。 $R_2 \subseteq [0,1]$ 为警戒值。 $ST \subseteq [0.5,1]$ 为安全值。当 $R_2 < ST$ 时，此时种群附近没有出现天敌的踪迹，发现者职能驱使其扩大觅食区域；当 $R_2 \geq ST$ 时，警戒者提醒种群危险袭来，麻雀个体迅速离开当前位置。

跟随者位置更新描述如下：

$$X_{ij}^{t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp(\frac{X_{\text{worst}}^t - X_{ij}^t}{i^2}), i > \frac{n}{2} \\ X_p^{t+1} + |X_{ij}^t - X_p^{t+1}| \cdot A^+ \cdot L, otherwise \end{cases} \quad (5-8)$$

式中， X_{worst} 和 X_{best} 为麻雀群体中最差和最好觅食能力的麻雀位置， X_p 为发现者中具有最好觅食能力的麻雀位置。 A 为元素随机取-1或1的 $1 \times D$ 矩阵，其中， $A^+ = A^T (A A^T)^{-1}$ 。当 $i > n/2$ 时，此时跟随者觅食位置较差，需要飞往其它区域觅食，否则继续跟随发现者觅食。

警戒者位置更新描述如下：

$$X_{ij}^{t+1} = \begin{cases} X_{\text{best}}^t + \beta \cdot |X_{ij}^t - X_{\text{best}}^t|, f_i > f_{\text{best}} \\ X_{ij}^t + K \cdot (\frac{|X_{ij}^t - X_{\text{worst}}^t|}{(f_i - f_{\text{worst}}) + \varepsilon}), f_i = f_{\text{best}} \end{cases} \quad (5-9)$$

式中， K 为[-1,1]的随机数。 ε 取 10^{-8} ，用于避免除零问题。 f_i 为麻雀个体的适应度值， f_{best} 为麻雀群体的最优适应度值， f_{worst} 为麻雀群体最差适应度值。在警戒者察觉危险袭来的时候，种群触发躲避天敌信号。即当 $f_i > f_{\text{best}}$ 时，麻雀的觅食位置较差，会趋于种群最优位置；当 $f_i = f_{\text{best}}$ 时，此时麻雀正处于种群最优位置，通过靠近其它麻雀来躲避危险。

5.3.3 SSA-BP 神经网络

借助 SSA 优化算法优异的全局搜索能力弥补反向传播(BP)神经网络容易局部收敛的问题,将 BP 神经网络的权值和阈值构成麻雀位置,通过 SSA 群体智能算法的迭代优化,对预测结果的精度有较大提高。SSA-BP 预测模型流程图如图 5-4 所示。

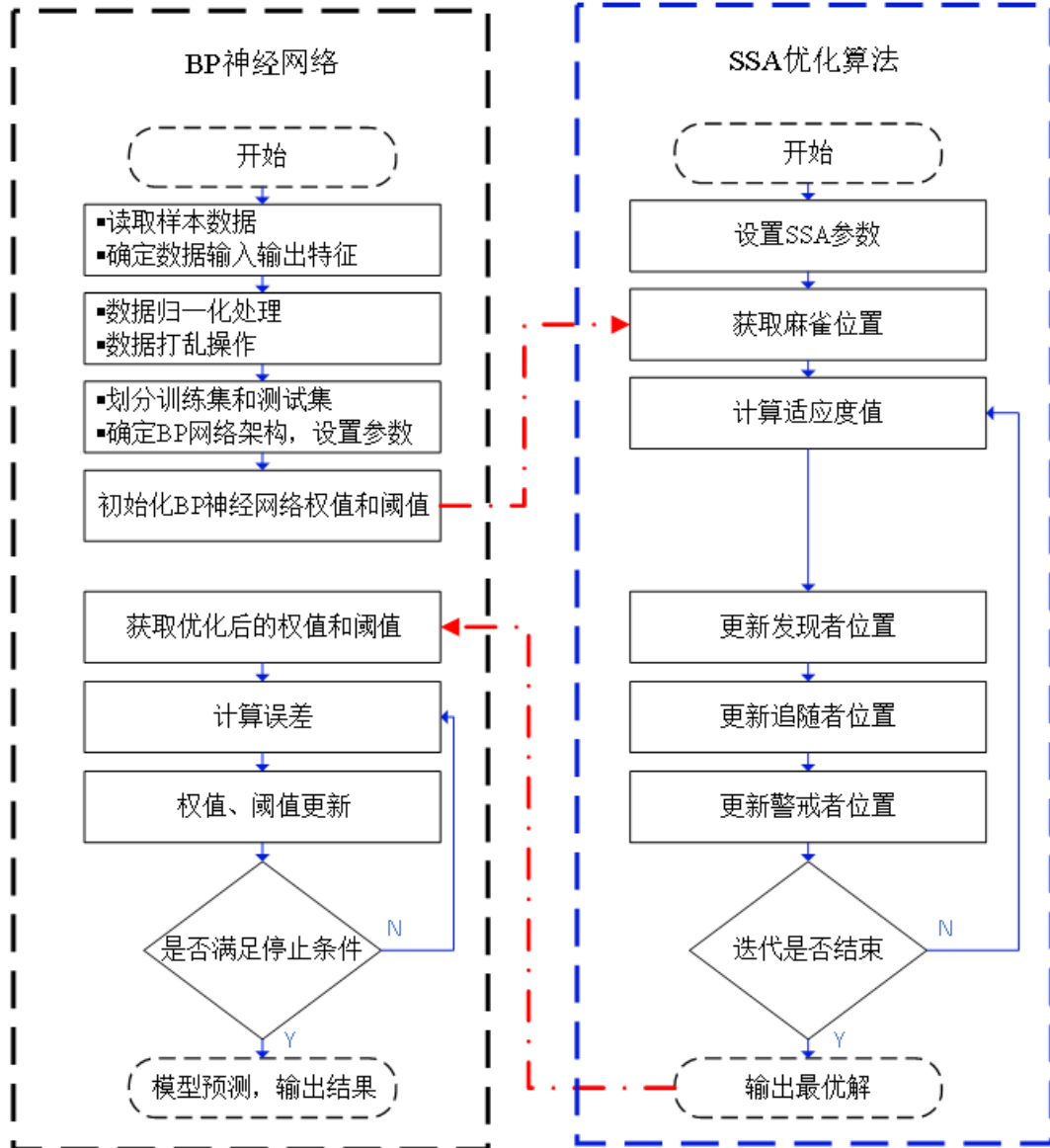


图 5-4 SSA-BP 预测模型流程图

为了综合评价高温热效应磁流变脂流变性能预测模型的预测精度,选取平均绝对百分比误差评估函数(MAPE)和决定系数评估函数(R^2)作为模型预测精度评估指标。

$$E_{MAPE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y - y'}{y} \right| \cdot 100\% \quad (5-10)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y - y')^2}{\sum_{i=1}^N (y - \bar{y})^2} \quad (5-11)$$

式中， N 为样本数量。 y 、 $\bar{y}$ 和 y' 为输出特征的实际值、实际值均值和预测值。 $E_{MAPE} \in [0, +\infty)$ 为结果准确度， E_{MAPE} 值趋于 0，表明模型误差小，适用于特征值量纲差距较大的数据集。 $R^2 \in [0, 1]$ 为模型拟合效果， R^2 值越趋于 1，表明模型拟合效果越好。

5.3.4 预测结果分析

图 5-5 给出了 BP 神经网络优化前后的预测误差随迭代周期变化曲线。BP 神经网络在 50 次迭代收敛，收敛误差为 14.9760×10^{-4} ，经 SSA 优化后的 BP 神经网络在 70 次迭代收敛，误差达到 9.0757×10^{-4} 。因为 BP 神经网络在进行模型训练过程中存在容易陷入局部优化的问题，而麻雀搜索算法具有较好的全局搜索能力。具体表现为经 SSA 优化后的 BP 神经网络初始误差较低，并且收敛迭代次数增加，收敛误差降低。并且 SSA-BP 预测模型在测试集和验证集的误差曲线贴合，表明 SSA-BP 模型对于当前试验条件下的流变性能具有较高的预测精度。

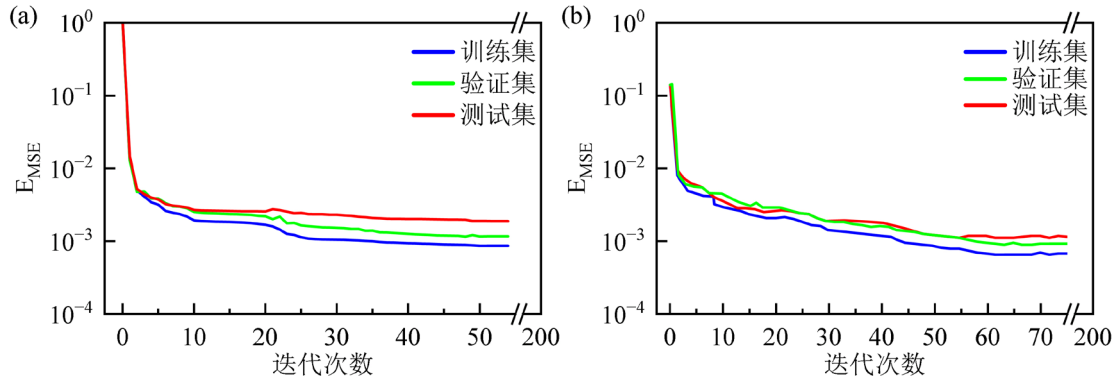


图 5-5 预测误差随迭代周期变化曲线

(a)BP; (b)SSA-BP

表 5-3 给出了不同类型数据集预测统计表。训练集和测试集预测误差值极为接近，并且各类型数据集的决定系数 R^2 达到 0.9，表明模型预测性能整体较好^[98]。此外，SSA-BP 相较于 BP 的各项预测误差指标显著降低，进一步反映了 SSA-BP 模型预测性能较优。为了提高预测模型的泛化性能，试验结果选取的是离散性较小和较大的两组曲线。BP 神经网络存在容易陷入局部优化的问题，而 SSA 具有全局搜索能力，SSA-BP 可以有效改善局部优化问题。此外，由于预测模型包含

4 种输入特征，由 3 种离散性特征和 1 种连续性特征构成，数据相关性较强，模型拟合较为复杂，想要进一步提高预测模型性能，需要极大的增加试验数据量，进一步提高预测模型的泛化能力。考虑到由不同梯度试验条件得到的试验数据与传统连续性数据拟合不同，取部分不同离散性数据对预测模型作进一步评估。

表 5-3 不同数据集预测误差统计表

数据集类型	BP		SSA-BP	
	MAPE	R ²	MAPE	R ²
训练集	21.59%	0.9657	15.05%	0.9736
测试集	22.56%	0.9593	15.58%	0.9701
总数据集	21.88%	0.9640	15.21%	0.9726

图 5-6 给出了磁流变脂流变性能部分预测曲线。图 5-6(a)和图 5-6(b)中试验值为磁流变脂剪切速率扫描试验中离散性较小和较大的两组试验数据。40°C-110mT 下磁流变脂剪切速率曲线同 BP 预测曲线和 SSA-BP 预测曲线的离散性整体极小，而 80°C-440mT，4 h 下预测曲线与实际值曲线离散性较大。表明不同温度、磁场下磁流变脂在不同热效应时间的剪切速率曲线离散性同速率扫描试验规律有一定的关联性。

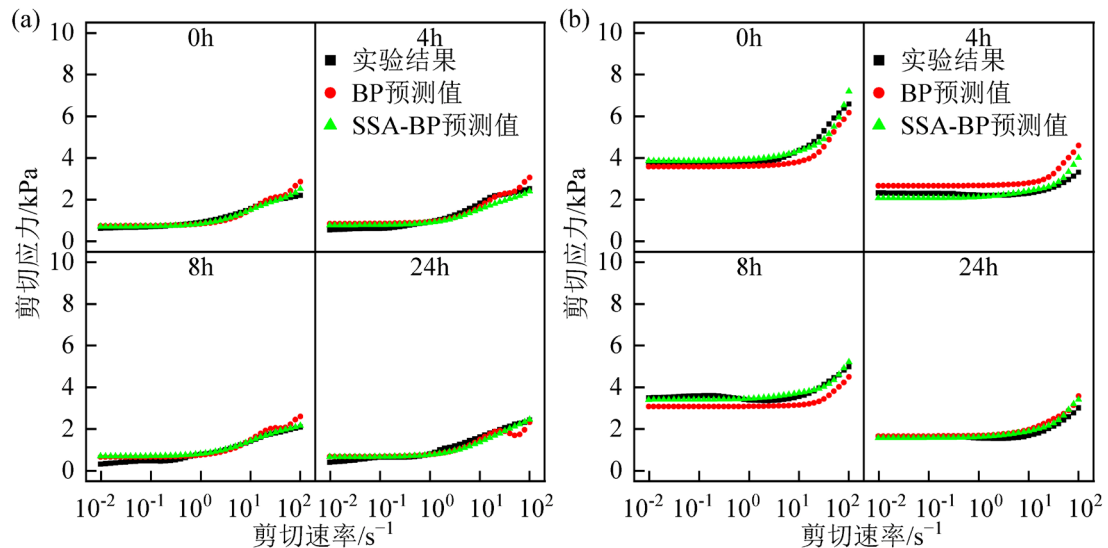


图 5-6 磁流变脂流变性能预测曲线

(a)40°C-110mT; (b)80°C-440mT

表 5-4 给出了预测曲线误差统计表。可以看出，预测模型在不同试验条件下非连续型试验数据同样具有较好的拟合效果。注意到，在 80°C-440mT 中，4 h 和 8 h 的决定系数出现了负值，这意味着 BP 预测模型在该试验条件数据的预测效

果很不理想。BP 神经网络对离散性较大的数据预测时存在泛化能力不足，容易陷入局部极值问题^[99]。而 SSA-BP 借助麻雀搜索算法全局搜索优点，从局部优化跳转为全局优化，从而降低预测误差，增加预测模型鲁棒性。

表 5-4 预测曲线误差统计表

热效应时间	40°C-110mT				80°C-440mT			
	BP		SSA-BP		BP		SSA-BP	
	MAPE	R ²	MAPE	R ²	MAPE	R ²	MAPE	R ²
0h	9.30%	0.9052	6.20%	0.9722	6.64%	0.7926	3.92%	0.9347
4h	19.60%	0.9128	16.71%	0.9140	20.56%	-3.8627	7.34%	0.2035
8h	26.84%	0.8730	27.72%	0.9044	12.20%	-0.3873	3.54%	0.8766
24h	16.63%	0.9012	15.26%	0.9366	8.96%	0.6327	6.09%	0.8057

5.4 本章小结

通过对实验室制备的磁流变脂在 100 °C 下进行 4 h、8 h、24 h 持续热处理，并通过旋转流变仪在不同温度、磁场下对磁流变脂持续剪切。探究高温热效应对磁流变脂流变行为的影响，并建立一种 SSA-BP 预测模型，用来预测磁流变脂在温度、磁场、热效应时间、剪切速率等多因素作用下的流变性能。得出以下结论：

(1) 磁场较低时，磁流变脂中连续相具有较高的皂纤维缠结程度，对磁性颗粒受磁场作用的运动构成极大阻碍。在磁场增加至 440 mT 时，磁流变脂流变性能出现明显的增加，80°C-440mT 剪切速率曲线离散性较大。并且 MRG-24h 的速率曲线整体较低，高温热效应对磁流变脂造成了一定的结构性破坏。

(2) 引入 SSA-BP 预测模型用于对磁流变脂剪切应力的预测，将试验温度、磁场、热效应时间、剪切速率作为输入特征，剪切应力作为输出特征，借助麻雀搜索算法较好的全局搜索性能，极大的提高了模型预测的准确性。神经网络在整体数据上 R² 都在 0.9 以上，表现出较好的预测性能。在局部离散性较大的数据，BP 中 R² 出现了负值，而 SSA-BP 中 R² 仍较高。SSA 可以在一定程度上避免 BP 神经网络陷入局部优化。

(3) 磁流变介质在服役过程中会遭遇温升、磁场、持续剪切等多场耦合的影响，通过 SSA-BP 预测模型可以用于磁流变介质受高温热效应下流变学性能变化预测，为相关磁流变器件的设计和研发提供数据支持。

第 6 章 总结与展望

6.1 全文工作总结

磁流变脂是以润滑脂为连续相，磁性颗粒为离散性进行混合制备。在外磁场激励下可以实现毫秒级、固液可逆变化，借助润滑脂特有的皂纤维结构具备较好的防沉降性能，并且相较于油基润滑品具有较高的黏稠度，使其在密封类器件应用较广。然而，在工程机械服役过程中，频繁摩擦引起的升温及机器长时间工作等会出现热量堆积，因此对运动结构中的润滑介质有必要进行不同温升条件下流变性能稳定性研究，并且磁流变器件面临持续剪切、持续热效应以及磁场激励等多场复合问题，传统试验方法探究内部机理较难进行。借助机器学习方法可以有效提高试验进程。

本文围绕流变性能受磁控影响的磁流变脂展开。为探究磁流变脂在服役过程中热效应演变下磁学性能和流变学性能稳定性，分别开展持续热效应试验和高温热效应试验探究影响磁流变脂剪切稳定性性能的关键影响因素。并借助 SSA-BP 预测模型进行多复合场下磁流变脂的流变性能。本文通过大量磁学和流变学性能测试和试验分析，可以得出以下结论：

（1）在外磁场激励下，磁性颗粒聚拢形成磁链极大的增强了磁流变脂复合强度，表现出明显的磁流变效应。在变磁场条件下，磁流变脂剪切性能随磁场强度非线性增加，当磁场强度越过饱和磁场后，皂纤维结构受持续剪切影响，内部结构遭受破坏，引起复合强度降低。在固定磁场条件下，各磁场条件下磁控曲线变化均表现为类似趋势，这与饱和磁场激励内，磁流变脂复合强度受磁链的显著增幅弱化了持续剪切破坏引起的强度降低问题。

（2）基载液作为磁流变脂的重要组成部分，润滑脂保证了制备样品时磁性颗粒可以较均匀悬浮，并且较高的黏稠度使其具有较宽广的工作温度。在探究基载液稠度和热效应温度对磁流变脂性能的影响后，发现在相同试验温度下，磁流变脂流变性能均随磁场强度非线性增长，而 1#MRG 的增长幅度相对于其它磁流变脂较小，高稠度等级使得其具有较好的剪切稳定性。磁链随着磁场增强仍无法大面积突破高稠度皂纤维结构，基载液稠度在相同温升下对磁流变脂剪切稳定性

起主导作用。在相同试验磁场条件下，皂纤维结构受温升影响出现解缠重组，00#MRG 较低的缠结程度使其皂纤维结构因持续剪切、热效应等因素而遭受破坏，复合结构受磁链大量聚拢而增强，剪切稳定性降低。因此在热效应演变初期，高稠度基载液所具备的较高缠结程度提供了较宽广的工作温度范围，并在磁激下对磁链具有强烈的抑制作用，保证服役时较好的剪切稳定性。

(3) 以高稠度润滑脂为基载液探究高温热效应对磁流变脂性能的影响后。发现当高温热处理温度处于润滑脂工作范围内时，磁流变脂受到持续热效应温度和持续服役时间的作用下仍具有较好的剪切稳定性，高缠结程度赋予了皂纤维结构较高的温抗性能。当以 180 °C 对磁流变脂进行热处理时，出现明显的硬化反应，此热处理温度下多数样品的剪切应力均出现显著提升，少部分样品出现明显的剪切应力大幅降低，其差异与水浴加热产生的水蒸气和油脂中油的不相溶性有关。高温热效应借助纤维硬化可以极大的提高磁流变脂剪切阻力，而皂纤维结构因高温引起的结构破坏使得其恢复性能变差。

(4) 磁流变机械在高强度服役过程中对磁流变脂的影响因素主要包括高温热效应、持续剪切、磁场激励等，通过引入 BP 预测模型分析多场耦合工况下磁流变脂流变性能的一般性规律，并以 SSA 优异的全局搜索能力对其进行优化。SSA-BP 预测模型输入特征包括温度、磁场强度、高温持续热效应时间、剪切速率，输出特征选取剪切应力，各数据集 R^2 整体均大于 0.9，具有较高的预测精度，可以为磁流变机械的设计研发提供较好的数据支持。

6.2 工作展望

磁流变器械在服役过程中，会出现不同的工作状态。在热效应演变过程中，其润滑介质会面临持续热效应、高温热效应以及热效应演变后期的问题。本文分别关于持续热效应和高温热效应通过磁学性能和流变学性能探究其剪切稳定性和继续服役性能的影响规律。结合现有对磁流变脂的研究，为新型磁流变器件的设计和研发提供数据支撑。然而在磁流变脂研究过程中，还是存在需要完善和提高的地方，对本课题更深层次的研究可以从以下几个方面开展：

(1) 磁流变脂在热处理过程中，出现部分纤维硬化，引起 180 °C 下磁流变脂差异较大，这与热处理过程中润滑脂中油脂流失有关。并且磁性颗粒受纤维硬化影响可能会出现提前聚拢，在微弱磁场下就可形成强度较强的磁链，而某些样

品中磁性颗粒则会随油脂流失，经流变试验后会出现误导研究人员的试验规律，具体试验机理尚不明确。

（2）在热效应演变后期，磁流变脂性能不足以继续服役，而此段时间磁流变脂继续服役寿命、服役过程中磁流变脂剩余流变性能等均需要进行一定的探索。此外，大面积的纤维硬化会进一步增强磁流变脂剪切应力，并极大阻碍磁性颗粒的聚拢，降低了磁链对复合结构的增强作用。

（3）磁流变脂性能变化是一个连续过程，并且工况为多场耦合，单因素试验不足以探明多场耦合工况下磁流变脂继续服役寿命及剩余流变性能的一般性规律。通过 SSA-BP 预测模型可以有效降低试验难度，当然，实际工况中需要考虑制备过程中介质流失情况、流变试验中水蒸气填充等情况，需要对预测模型添加其它参数，以获得较高精度的拟合模型，为磁流变器械的设计提供有效的预测数据。

参考文献

- [1] Raj A, Sarkar C, Kumar P, et al. Investigation of magnetorheological grease flow under the influence of a magnetic field[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 361: 119682.
- [2] Kavlicoglu B M, Gordaninejad F, Wang X J. Study of a magnetorheological grease clutch[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22: 125030.
- [3] Ashtiani M, Hashemabadi S H, Ghaffari A. A review on the magnetorheological fluid preparation and stabilization[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, 374: 716-730.
- [4] De Vicente J, Klingenberg D J, Hidalgo-Alvarez R. Magnetorheological fluids: a review[J]. *Soft Matter*, 2011, 7(8): 3701-3710.
- [5] Sohn J W, Gang H G, Choi S-B, et al. An experimental study on torque characteristics of magnetorheological brake with modified magnetic core shape[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(1): 1-8.
- [6] Liao C R, Zhao D X, Xie L, et al. A design methodology for a magnetorheological fluid damper based on a multi-stage radial flow mode[J]. *Smart Materials and Structures*. 2012, 21(8): 085005.
- [7] Zheng J, Li Z, Koo J, et al. Magnetic circuit design and multiphysics analysis of a novel MR damper for applications under high velocity[J]. *Advances in Mechanical Engineering*. 2014, 6: 402501.
- [8] Alghamdi A A, Lostado R, Olabi A-G. Magneto-rheological fluid technology[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014: 43-62.
- [9] Ghaffari A, Hashemabadi S H, Ashtiani M. A review on the simulation and modeling of magnetorheological fluids[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2015, 26(8): 881-904.
- [10] Shahrivar K, Ortiz A L, De Vicente J. A comparative study of the tribological performance of ferrofluids and magnetorheological fluids within steel–steel point contacts[J]. *Tribology International*, 2014, 78: 125-133.
- [11] Daniela S R, Malaescu I, Marinica O, et al. Magnetorheological properties of a kerosene-based ferrofluid with magnetite particles hydrophobized in the absence

- of the dispersion medium[J]. *Physica B: Physics of Condensed Matter*, 2020, 587: 412150.
- [12] Gu G, Ma T, Chen F, et al. Controlling electromagnetic and mechanical behaviors of geopolymer matrix with nano-SiO₂@Fe₃O₄ magnetofluid for soft magnetic applications[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2024, 145: 105370.
- [13] Bai L F, Pei L, Cao S S, et al. A high performance magnetic fluid based on carbon modified magnetite(Fe₃O₄)nanospheres[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, 505: 166734.
- [14] 恭飞, 吴张永, 朱启晨, 等. NiFe₂O₄磁流体润滑性实验研究[J]. *材料导报*, 2019, 33(S1): 126-131.
- [15] 王优强, 徐莹, 莫君, 等. 磁场作用下水基磁流体对TC4与Si₃N₄摩擦学性能影响的实验研究[J/OL]. *机械工程学报*: 1-10.
- [16] 梁天祥, 吴张永, 蒋佳骏, 等. 磁场对纳米铁酸镍(NiFe₂O₄)磁流体金属腐蚀行为研究[J]. *功能材料*, 2023, 54(8): 8134-8139.
- [17] 邢美波, 丁宪喆, 贾朝富, 等. 磁场作用下Fe₃O₄包覆碳纳米管磁流体光热转换性能[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(8): 338-344.
- [18] 李昊鹏. 磁流变液本构模型及剪切传动特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [19] 华德正. 磁流变软体胶囊机器人关键技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [20] Ashour O, Rogers C A, Kordonsky W. Magnetorheological fluids: materials, characterization, and devices[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 1996, 7(2): 123-130.
- [21] Genç S, Phulé P P. Rheological properties of magnetorheological fluids[J]. *Smart Materials and Structures*, 2002, 11(1): 140.
- [22] 杨三锋, 黄向明, 明阳, 等. 新型磁流变-剪切增稠阻尼器的力学模型及试验研究[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(16): 418-426.
- [23] 冯钰琦, 赵杰, 姚冉, 等. 基于磁流变阻尼器的往复压缩机管系减振技术研究[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(15): 101-107.
- [24] 董小闵, 邓雄, 王陶, 等. 双模式变间隙磁流变阻尼器研究[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(3): 129-138.

-
- [25] 胡国良, 李林森, 喻理梵. 多液流通道旋转式磁流变制动器结构设计 with 特性分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 420-426.
 - [26] 王道明, 姚兰, 邵文彬, 等. 汽车磁流变液制动器温度特性仿真与试验研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(6): 100-107.
 - [27] 王鸿云, 毕成, 赵爽, 等. 基于挤压-剪切模式的高转矩磁流变离合器设计与实验[J]. 光学精密工程, 2017, 25(9): 2413-2420.
 - [28] 黄禹铭, 吴杰, 邓兵兵. 永磁体和线圈叠加下多极式磁流变离合器的设计研究[J]. 现代制造工程, 2022(10): 119-124+157.
 - [29] 孙晖. 大功率磁流变液联轴器关键技术及试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.
 - [30] 王宁宁. 磁流变液传动系统动力传递机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
 - [31] 李斌. 磁流变液阻尼器复合动力学模型研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.
 - [32] Lee J Y, Kwon S H, Choi H J. Magnetorheological characteristics of carbonyl iron microparticles with different shapes[J]. Korea-Australia Rheology Journal, 2019, 31: 41-47.
 - [33] Roman C, Valencia C, Franco J M. AFM and SEM assessment of lubricating grease microstructures: influence of sample preparation protocol, frictional working conditions and composition[J]. Tribology Letters, 2016, 63: 1-12.
 - [34] 汪辉兴, 张广, 欧阳青, 等. 磁流变脂在剪切模式下的流变特性[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(3): 380-386.
 - [35] Wang H, Li Y, Zhang G, et al. Effect of temperature on rheological properties of lithium-based magnetorheological grease[J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(3): 035002.
 - [36] Wang H, Zhang G, Wang J. Quasi-static rheological properties of lithium-based magnetorheological grease under large deformation[J]. Materials, 2019, 12(15): 2431.
 - [37] Wang H, Chang T, Li Y, et al. Characterization of nonlinear viscoelasticity of magnetorheological grease under large oscillatory shear by using fourier transform-chebyshev analysis[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2021, 32(6): 614-631.

-
- [38] Sahin H, Wang X, Gordaninejad F. Temperature dependence of magnetorheological materials[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2009, 20(18): 2215-2222.
 - [39] Kim J E, Ko J D, Liu Y D, et al. Effect of medium oil on magnetorheology of soft carbonyl iron particles[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(11): 3442-3445.
 - [40] 何国田, 廖昌荣, 邓绍更, 等. 磁流变酯机理模拟研究[J]. *功能材料*, 2011, 42(3): 550-552+556.
 - [41] 何国田, 廖昌荣, 王平, 等. 非圆形磁性颗粒对磁流变脂剪切应力的影响及其计算模型研究[J]. *功能材料*, 2011, 42(9): 1694-1697.
 - [42] Mohamad N, Ubaidillah, Mazlan S A, et al. A comparative work on the magnetic field-dependent properties of plate-like and spherical iron particle-based magnetorheological grease[J]. *PloS One*, 2018, 13(4): e0191795.
 - [43] Mohamad N, Ubaidillah, Mazlan S A, et al. The effect of particle shapes on the field-dependent rheological properties of magnetorheological greases[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, 20(7): 1525.
 - [44] Mohamad N, Mazlan S A, Choi S B, et al. The field-dependent rheological properties of magnetorheological grease based on carbonyl-iron-particles[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(9): 095043.
 - [45] Tarmizi S M A, Nordin N A, Mazlan S A, et al. Improvement of rheological and transient response of magnetorheological grease with amalgamation of cobalt ferrite[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 23: 1285-1295.
 - [46] Raj A, Sarkar C, Pathak M. Magnetorheological characterization of PTFE-based grease with MoS₂ additive at different temperatures[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2021, 57(7): 1-10.
 - [47] 胡志德, 赵湖钧, 王大伟. 羰基铁粉对锂基磁流变脂动态流变行为的影响[J]. *材料导报*, 2019, 33(S2): 630-633.
 - [48] 胡志德, 晏华, 王雪梅, 等. 羰基铁粉对磁流变脂皂化和成纤结构的影响[J]. *功能材料*, 2014, 45(21): 21045-21049+21054.
 - [49] 胡志德, 晏华, 王雪梅, 等. 冷却条件对磁流变脂微观结构及动态流变行为的影响[J]. *功能材料*, 2014, 45(24): 24082-24086.

-
- [50] 胡志德, 晏华, 王雪梅, 等. 稠化剂含量对磁流变脂流变行为的影响[J]. 功能材料, 2015, 46(2): 2105-2108+2114.
 - [51] Jiabao P, Yanhai C, Jinyong Y. Effect of heat treatment on the lubricating properties of lithium lubricating grease[J]. RSC Advances, 2015, 5(72): 58686-58693.
 - [52] 潘家保, 周彬, 钱明, 等. 静态热处理时间对轮毂轴承用复合锂基润滑脂流变特性的影响[J]. 润滑与密封, 2018, 43(1): 61-66.
 - [53] Jiabao P, Guangxin Y, Jianping W, et al. Thermorheological properties of magnetorheological grease and its thermomagnetic coupling mechanism[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2022, 33(3): 432-444.
 - [54] 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(3): 552-560.
 - [55] Wang W, Zhang G, Wang H, et al. Influence of kinematic viscosity of base oil on magnetorheological grease[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2023, 28(5): 676-685.
 - [56] Ye X, Wang W, Wang J. The influence of temperature on the rheological properties of composite lithium-based magnetorheological grease[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2022, 33(18): 2336-2345.
 - [57] Ye X, Wang J, Wang X, et al. An experimental study on thermo-field rheological properties of lithium-based magnetorheological grease[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 648: 129047.
 - [58] Dai J, Chang H, Zhao R, et al. Investigation of the relationship among the microstructure, rheological properties of MR grease and the speed reduction performance of a rotary micro-brake[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 116: 741-750.
 - [59] Dong J, Ye X, Lv Z, et al. Temperature effects and a prediction method of field-dependent yield stress in graphite magnetorheological grease[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2023, 673: 131850.
 - [60] 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(6): 581-586.
 - [61] 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(4): 447-454.

-
- [62] Saharuddin K D, Ariff M H M, Bahiuddin I, et al. Constitutive models for predicting field-dependent viscoelastic behavior of magnetorheological elastomer using machine learning[J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(8): 087001.
 - [63] Lv J, Wu M, Zhao T, et al. Accurate prediction of magnetorheological damper characteristics based on a new rheological constitutive model[C]. *Structures*. Elsevier, 2023, 50: 108-117.
 - [64] Bahiuddin I, Wahab N A A, Shapiai M I, et al. Prediction of field-dependent rheological properties of magnetorheological grease using extreme learning machine method[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2019, 30(11): 1727-1742.
 - [65] Bahiuddin I, Mazlan S A, Shapiai M I, et al. A new platform for the prediction of field-dependent yield stress and plastic viscosity of magnetorheological fluids using particle swarm optimization[J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 76: 615-628.
 - [66] 杨健健, 晏华, 代军, 等. 磁流变液材料的性能与应用综述[J]. *化工进展*, 2017, 36(1): 247-260.
 - [67] Kumar S, Sehgal R, Wani M F, et al. Stabilization and tribological properties of magnetorheological (MR) fluids: a review[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2021, 538: 168295.
 - [68] Segovia-Gutiérrez J P, Berli C L A, De Vicente J. Nonlinear viscoelasticity and two-step yielding in magnetorheology: a colloidal gel approach to understand the effect of particle concentration[J]. *Journal of Rheology*, 2012, 56(6): 1429-1448.
 - [69] 许俊, 徐楠, 王晓波, 等. 冰水浴和自然冷却条件下锂基润滑脂的流变学性能[J]. *摩擦学学报*, 2013, 33(4): 406-412.
 - [70] Park B O, Park B J, Hato M J, et al. Soft magnetic carbonyl iron microsphere dispersed in grease and its rheological characteristics under magnetic field[J]. *Colloid and Polymer Science*, 2011, 289: 381-386.
 - [71] Yang C, Liu Z, Yu M, et al. The influence of thixotropy on the magnetorheological property of oil-based ferrofluid[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2020, 320: 114425.
 - [72] 李佩, 卢川, 尹剑飞, 等. 磁流变液响应时间检测方法及装置研究[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(11): 290-299.

-
- [73] 郭源帆, 尹韶辉, 黄帅. Halbach阵列与不同励磁方式的磁流变抛光特性及机理研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(15): 341-353.
 - [74] 李治澎, 解明利. 一种磁流变液性能测试用的凹字型磁路结构设计与研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(7): 62-73.
 - [75] Rendos A, Li R, Woodman S, et al. Reinforcing magnetorheological fluids with highly anisotropic 2d materials[J]. ChemPhysChem, 2021, 22(5): 435-440.
 - [76] Li Z, Li D, Dong J, et al. Study of temperature influence on the rheological behavior of magnetic fluids[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2022, 545: 168757.
 - [77] Yeong S K, Luckham P F, Tadros T F. Steady flow and viscoelastic properties of lubricating grease containing various thickener concentrations[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2004, 274(1): 285-293.
 - [78] 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(8): 4428-4437.
 - [79] Hemmatian M, Sedaghati R, Rakheja S. Characterization and modeling of temperature effect on the shear mode properties of magnetorheological elastomers[J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(11): 115001.
 - [80] Thiagarajan S, Price E, Connors L, et al. Study of n-alkanethiol self-assembly behavior on iron particles: effect of alkyl chain length and adsorption solvent on resulting iron-based magnetorheological fluids[J]. Langmuir, 2022, 38(44): 13506-13521.
 - [81] Aruna M N, Rahman M R, Joladarashi S, et al. A study on magnetorheological and sedimentation properties of soft magnetic Fe₅₈Ni₄₂ particles[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2022, 563: 169934.
 - [82] Martín-Alfonso J E, Valencia C, Sánchez M C, et al. Evaluation of thermal and rheological properties of lubricating greases modified with recycled LDPE[J]. Tribology transactions, 2012, 55(4): 518-528.
 - [83] Contreras-Mateus M D, López-López M T, Ariza-León E, et al. Rheological implications of the inclusion of ferrofluids and the presence of uniform magnetic field on heavy and extra-heavy crude oils[J]. Fuel, 2021, 285: 119184.
 - [84] Aziz S A A, Mazlan S A, Ismail N I N, et al. Rheological properties of carbon nanotubes-reinforced magnetorheological elastomer[C]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2017, 795(1): 012074.

-
- [85] Kumar J S, Paul P S, Raghunathan G, et al. A review of challenges and solutions in the preparation and use of magnetorheological fluids[J]. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2019, 14: 1-18.
 - [86] Kariganaur A K, Kumar H, Arun M. Influence of temperature on magnetorheological fluid properties and damping performance[J]. *Smart Materials and Structures*, 2022, 31(5): 055018.
 - [87] Bui C M, Ho T X. Influence of thixotropic parameters on a non-newtonian fluid flow[J]. *AIP Advances*, 2020, 10(3): 035303.
 - [88] Du M, Liu P, Wong J E, et al. Colloidal forces, microstructure and thixotropy of sodium montmorillonite (SWy-2) gels: Roles of electrostatic and van der Waals forces[J]. *Applied Clay Science*, 2020, 195: 105710.
 - [89] 丁松燕, 刘红柱, 柏莲桂, 等. 羟乙基纤维素溶液的触变性与反触变性[J]. *材料导报*, 2013, 27(20): 78-83.
 - [90] 汪辉兴. 锂基磁流变脂流变特性及在隔振悬置中的基础应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
 - [91] Song W, Wang S, Choi S B, et al. Thermal and tribological characteristics of a disc-type magnetorheological brake operated by the shear mode[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2019, 30(5): 722-733.
 - [92] El Wahed A, Balkhoyor L. Characteristics of magnetorheological fluids under single and mixed modes[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2017, 231(20): 3798-3809.
 - [93] Hu H Y, Lee Y C, Yen T M, et al. Using BPNN and DEMATEL to modify importance-performance analysis model—a study of the computer industry[J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(6): 9969-9979.
 - [94] Moghaddam M A, Golmezgeri R, Kolahan F. Multi-variable measurements and optimization of GMAW parameters for API-X42 steel alloy using a hybrid BPNN-PSO approach[J]. *Measurement*, 2016, 92: 279-287.
 - [95] Wu Y, Yuan X. On the Kolmogorov theorem for some infinite-dimensional hamiltonian systems of short range[J]. *Nonlinear Analysis*, 2021, 202: 112120.
 - [96] Xue J, Shen B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. *Systems Science and Control Engineering*, 2020, 8(1): 22-34.

- [97] Gharehchopogh F S, Namazi M, Ebrahimi L, et al. Advances in sparrow search algorithm: a comprehensive survey[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2023, 30(1): 427-455.
- [98] Gedik E, Kurt H, Pala M, et al. An experimental and artificial neural network investigation on the laminar flow of magnetorheological fluids through circular pipes[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2022, 546: 168893.
- [99] Gong W, Tan P, Xiong S, et al. Experimental and numerical study of the forward and inverse models of an MR gel damper using a GA-optimized neural network[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2023, 34(18): 2172-2191.
- [100] 潘家保. 润滑脂热流变特性及管路减阻研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.

攻读学位期间取得的学术成果

已发表(录用)论文

- [1] 李贻良, 潘家保, 戴庆文, 胡焰. 高温热效应对磁流变脂流变学行为的影响研究[J/OL]. 润滑与密封, 1-17.
- [2] 潘家保, 李贻良, 王锦. 磁流变脂热效应行为的分析与预测[J/OL]. 化工进展, 1-13. (EI)

已进入实审阶段发明专利

- [1] 李贻良, 潘家保, 等. 一种磁流变液静态匀强低磁场体积测试装置. 公开号: CN116182980A, 公开日: 2023.05.30.
- [2] 潘家保, 李贻良, 等. 一种通过磁流变液削弱水锤效应的装置. 公开号: CN116989205A, 公开日: 2023.11.03.
- [3] 潘家保, 李贻良, 等. 一种可拆卸四轴中心校正装置. 公开号: CN117400057A, 公开日: 2024.01.16.

致谢

岁月匆匆，3年时光眨眼而过。转眼间校园生活截止时间又一次来临，回首三年的学习生活，心里有着莫大的喜悦，也有着淡淡的忧伤。喜悦的是四年的辛勤学习终于有了收获，论文里记录着我平时生活的点点滴滴；忧伤的是我即将离开校园这个象牙塔，走入社会这个熔炉中去，回首灯火阑珊，心里不禁感慨万千。此时此刻，我无法找到合适的言语来表达我内心深处最真挚的情意。

不以为然，曾以为毕业遥遥无期，如今却是毕业在即。人生没有白走的路，每一步都算数，这3年各种滋味，尽在心头。借此机会，向多年来给我帮助和鼓励的所有人表达无尽的感激之情，并致以最真挚的敬意。很庆幸，在校期间遇到的良师益友，无论在学习上，工作上还是生活上，都给予了我无私的帮助，陪我一起品尝求学的艰辛欢乐，受益匪浅。

在此我要感谢我的导师潘家保教授，他优秀的人格品质，严谨的治学态度和忘我的工作精神让我折服。本文从选题、试验、撰写、修改到完成，都得到了导师的悉心指导、鼓励和资金上的大力支持，凝结了导师心血与智慧。硕士期间，收获颇丰，感触亦深，得遇良师，此生无憾。在此谨向我的导师致以衷心的感谢和深深的敬意。

漫漫求学路，感谢课题组吴波文老师、徐锐老师、叶东东老师、闫伟老师、胡焰老师、沈阳成明老师、周彬老师等给予的关心、指导和帮助。衷心祝愿各位老师工作顺利，身体健康。

感谢汤天成、李瑞、柯启迪、王锦、王文静、陈晴晴等同学，感谢各位同门师兄弟，在学习和生活中给予的帮助和关心，感谢他们陪我度过硕士学习阶段的时光。感谢我的家人对我的关心、理解和支持，他们无私的奉献和默默的辛苦是我前行的动力和勇气，在未来的日子里我仍将怀着一颗感恩的心，去报答他们。

最后，向在我这几年在学习和生活中曾给予我支持和教导、扶持和帮助的老老师和同学表示深深的谢意。感谢所有在生活和学习中给予我帮助的人们！

尚德敏学 唯实惟新

