

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2022.122

磁流变脂组分对其动态流变性能的影响

胡志德¹, 张寒松¹, 张时豪², 赵湖钧¹, 许春霞¹, 蒋昊洋¹

(1. 中国人民解放军陆军勤务学院, 重庆 401311; 2. 中央军委后勤保障部, 北京 100036)

摘要: 采用原位皂化工艺制备了基于不同类型载液和磁性颗粒的磁流变脂, 使用智能磁流变仪分别考察了基础油类型及黏度、磁性颗粒粒径对磁流变脂流变性能的影响, 并用自然沉降法考察了基于不同组分的磁流变脂的沉降稳定性。实验结果表明, 通过改变基础油类型和调节基础油的黏度可控制磁流变脂的内部骨架结构, 有效地改善磁流变脂的磁流变性能和沉降稳定性; 增大磁性颗粒的粒径可提高磁流变脂的流动性, 增大磁场下磁流变脂的结构强度, 增强其磁流变效应。

关键词: 智能材料; 磁流变脂; 基础油; 流变性能; 沉降稳定性

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)05-037-10

Influences of the components of magnetorheological grease on its dynamic magnetorheological performances

HU Zhide¹, ZHANG Hansong¹, ZHANG Shihao², ZHAO Hujun¹, XU Chunxia¹, JIANG Haoyang¹

(1. Army Logistics University of PLA, Chongqing 401311, P. R. China; 2. Logistics Support Department of the Central Military Commission, Beijing 100036, P. R. China)

Abstract: Magnetorheological grease (MRG) consisting of different types of carriers and magnetic particles was prepared with the in-situ saponification method, and the influences of different carriers and magnetic particles on the magnetorheological performances of MRG were tested with a rheometer. The suspension stability of MRG was tested by direct observation. The experimental results indicate that the skeleton microstructures inside MRGs can be controlled by changing the type of base oil and its viscosity, so as to effectively improve the magnetorheological performance and suspension stability of MRG; and larger magnetic particles are likely to improve the mobility of MRGs, contribute to stronger microstructures, and thus enhance the magnetorheological response of MRGs.

Keywords: smart material; magnetorheological grease; base oil; magnetorheological performance; suspension stability

磁流变脂是一种新型磁流变材料, 由磁性颗粒、基础油、稠化剂和添加剂组成^[1], 因具有稠化剂形成的内部骨架结构而表现出较好的稳定性^[2]。其流变学特性与磁流变液相似, 通过外部磁场可控制磁性颗粒的排列

收稿日期: 2022-05-07 网络出版日期: 2022-09-22

基金项目: 重庆市教育委员会科学技术研究项目 (KJZD-K201912901)。

Supported by the Science and Technology Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (KJZD-K201912901).

作者简介: 胡志德(1987—), 男, 博士, 副教授, 从事智能材料与结构相关研究, (E-mail) huzd6503@163.com。

通信作者: 张寒松, 男, 博士, (E-mail) 645320820@qq.com。

方式,从而使其黏度发生显著变化^[3]。与磁流变液不同的是,磁流变脂还具有较好的稳定性、自密封特性和润滑性等优点^[4]。

自磁流变脂诞生起,其应用前景就表现出较大的优势,磁流变脂器件设计受到学者们的长期关注^[5-10]。但从实际应用来看,磁流变脂效能的发挥除了与器件有关外,还与其自身的性能有着密切联系。材料的性能往往取决于它的组成和结构,而组分不同将使其结构和性能产生差异。Kim等^[11]使用煤油作为稀释剂加入磁流变脂,发现稀释润滑脂可以降低磁流变脂的零场黏度和剪切模量,但使磁流变脂的剪切屈服应力下降。Premalatha等^[12]研究了润滑脂含量对磁流变液稳定性的影响,发现在润滑脂含量较高时,随润滑脂含量增加,磁流变液的沉降稳定性将不再有明显的改善。Shetty等^[13]使用润滑脂制备了稳定的磁流变悬浮液,发现在高磁场下颗粒百分数对屈服应力的影响比在低磁场下更明显。对传统润滑脂而言,基础油在其内部有3种存在形式:处于皂纤维内部的膨化油、介于两个皂分子层之间的毛细管吸附油和在皂纤维外部的游离油。基础油作为磁流变脂不可缺少的液体组分,其黏度、类型,以及与磁性颗粒组分的配伍性均影响它在磁流变脂内部的存在形式,进而对磁流变脂的结构稳定性、磁流变效应和流动性等性能产生较大的影响^[14]。

本研究中选用3种不同类型的基础油和2种粒径的羰基铁粉(carbonyl iron, CI)颗粒,采用原位皂化工艺制备了6种基础油黏度不同的磁流变脂和2种含有不同粒径羰基铁粉的磁流变脂。分别采用小振幅振荡剪切测试方法考察了基础油类型及黏度、磁性颗粒大小对磁流变脂流变性质的影响,并采用自然沉降法记录了磁流变脂的沉降稳定性。引入传统润滑脂皂-油凝胶体系概念对实验结果进行了分析,探究了磁流变脂组分配伍性对其结构稳定性和磁流变效应的影响规律,旨在为磁流变脂的配方设计优化提供参考。

1 实验部分

1.1 实验原材料及磁流变脂制备方法

所用原材料包括成都格雷西亚化学技术有限公司生产的十二羟基硬脂酸和成都市科龙化工试剂厂的氢氧化锂。选用矿物油HVI150和HVI650以及合成油乙基硅油和聚 α -烯烃油(PAO)作为制备磁流变脂的基础油。基础油黏度如表1所示。所用羰基铁粉由陕西兴化化学股份有限公司提供。图1给出了2种铁粉颗粒的粒径分布,小颗粒的中值粒径约为5.2 μm ,大颗粒的中值粒径约为18.0 μm 。

表1 室温下基础油的黏度

Table 1 Viscosities of base oils at room temperature

基础油种类	HVI150	HVI650	PAO4	PAO8	PAO10	乙基硅油
黏度/($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	49.7	225.2	23.9	72.5	121.2	182.5

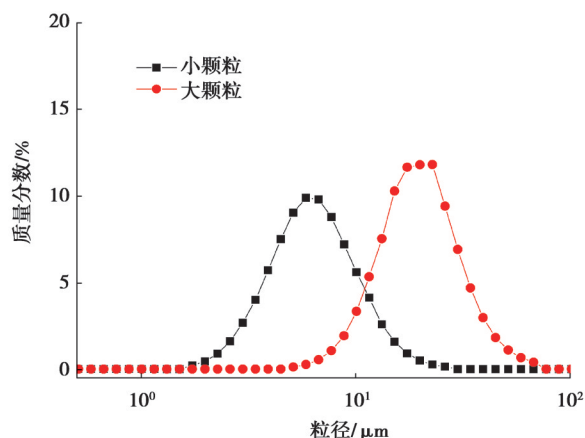


图1 不同粒径羰基铁粉的粒径分布

Fig. 1 The size distribution of carbonyl iron

采用原位皂化工艺法制备磁流变脂,制备的磁流变脂稠化剂含量为4.2%,羰基铁粉质量分数为30.0%。原位皂化工艺的基本步骤如下:将一定量的基础油分为3份,取1份升温至60℃,加入12-羟基硬脂酸,继续升温至80~100℃,使之融化,再缓慢加入饱和氢氧化锂水溶液,皂化1~3h;升温至120~130℃,脱水30min;加入第2份基础油,升温至最高炼制温度190~220℃,保温5~7min;加入第3份基础油,使体系温度降低;加入羰基铁粉,冷却后研磨,即得到磁流变脂。

1.2 流变性能测试

采用奥地利安东帕公司的Physica MCR302流变仪测试磁流变脂的流变性能。平板系统的型号为PP20/MRD/Ti,其测试直径为20mm,测量间隙为1mm。振荡测试包括振幅扫描和磁场扫描2部分:首先进行不同磁场强度下的振幅扫描测试,该模式下应变的扫描范围设置为0.01%~100%,呈对数变化,频率固定为1Hz,从而确定线性黏弹区范围;随后,在线性黏弹区内固定应变为0.10%和频率1Hz,考察磁流变脂的动态力学性能随磁场强度的变化关系,磁场强度的扫描范围为7.36~61.85kA/m,计算磁流变脂的磁流变效应。

1.3 微观形貌观测

用HITACHI S-3700N型扫描电子显微镜观测羰基铁粉颗粒的微观形貌。扫描电子显微镜通过多级电磁透镜将电子枪发射的电子汇聚成电子束,聚焦后的电子束照射样品,激发样品产生二次电子、背散射电子等,这些样品信息被接收器接收后经过电脑调制形成放大图像。本研究中观测的对象羰基铁粉具有良好的导电性,无需进行喷金处理,经过石油醚清洗干燥后的样品可直接黏附于导电胶表面进行观察,输入电压固定为15kV,放大倍数为1000倍和5000倍。

1.4 沉降稳定性测试

采用自然沉降观察法测试磁流变脂的沉降稳定性。取20mL磁流变脂样品置于25mL规格的量筒内,在重力作用下磁流变脂中磁性颗粒下沉,基础油析出,在量筒内可观察到分层现象,读取分界面的刻度值记为a mL,观察并记录该值随时间的变化,磁流变脂的沉降率可表示为: $S=a/20 \times 100\%$ 。

2 结果与讨论

2.1 基础油类型对磁流变脂性能的影响

分别以矿物油HVI150、PAO10和乙基硅油为基础油,考察了基础油类型对磁流变脂性能的影响。图2给出了基于不同基础油的磁流变脂在无磁场、固定频率1Hz下损耗模量 G'' 与储能模量 G' 随剪切应变的变化关系。从图2中可以看出,基于HVI150的磁流变脂储能模量最大,基于PAO10的磁流变脂储能模量最低。振荡剪切模式下,振幅较低时磁流变脂的储能模量大于损耗模量,且两者下降均不明显,这一段区域称为线性黏弹区,一般认为在线性黏弹区内,磁流变脂内部的微观结构保持完整,弹性特征更突出。3种磁流变脂在较宽的应变范围内均具有较稳定的储能模量和损耗模量,这表明磁流变脂均具有较宽的线性黏弹区。在线性黏弹区内,3种磁流变脂的储能模量均远高于损耗模量,说明基于不同类型基础油的磁流变脂中可恢复形变占主导,表现出似固体的性质,无论基于何种基础油类型磁流变脂中均有骨架结构存在。3种磁流变脂线性黏弹区的边界应变值均大于0.10%,且磁流变脂的边界应变值大小依次为乙基硅油>PAO10>HVI150。

损耗因子是损耗模量与储能模量的比值,反映了物质弹性和黏性的大小关系,当损耗因子较大时,一般表现出黏性特征,流动性较好,反之则表现出弹性特征,表现出类固体的性质。从损耗因子来看,在线性黏弹区内,3种磁流变脂的损耗因子表现为:乙基硅油>PAO10>HVI150。表明乙基硅油磁流变脂具有较显著的黏性特征,磁流变脂样品的流动性较好。这与基础油分子的结构及基础油在磁流变脂内部结构中的存在形式有关。一般认为,基础油在传统润滑脂中有3种存在形式:处于皂分子羧基端离子力场范围内的膨化油、皂分子烃基末端之间的范德华力场内的吸附油以及处于皂纤维表面的游离油(图3)。皂纤维与膨化油、吸附油构成了皂-油凝胶粒子,分散于游离油中形成润滑脂。磁流变脂中同样存在皂-油体系结构,所不同的是羰基铁粉的加入使磁流变脂的内部结构较传统皂-油体系结构发生了变形,形成了含羰基铁粉的凝胶粒结构,如图3(c)所示。含羰基铁粉的凝胶粒之间由皂纤维通过范德华力和离子力的作用,相互吸引结合进一步形成了磁流变脂的结构骨架。

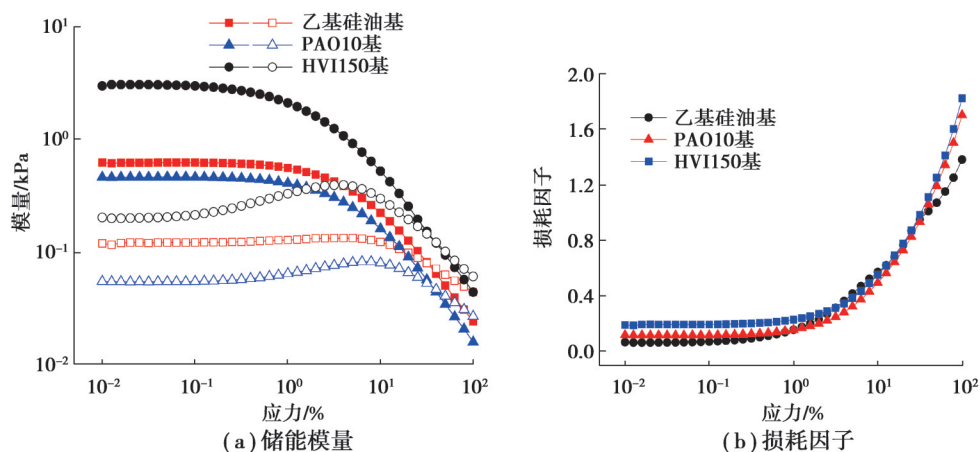


图 2 不同类型基础油的磁流变脂储能模量(实心符号)、损耗模量(空心符号)及损耗因子随应变的变化

Fig. 2 Dynamic modulus (solid symbols) and damping factor (hollow symbols) of MR greases as a function of strain amplitude without a magnetic field

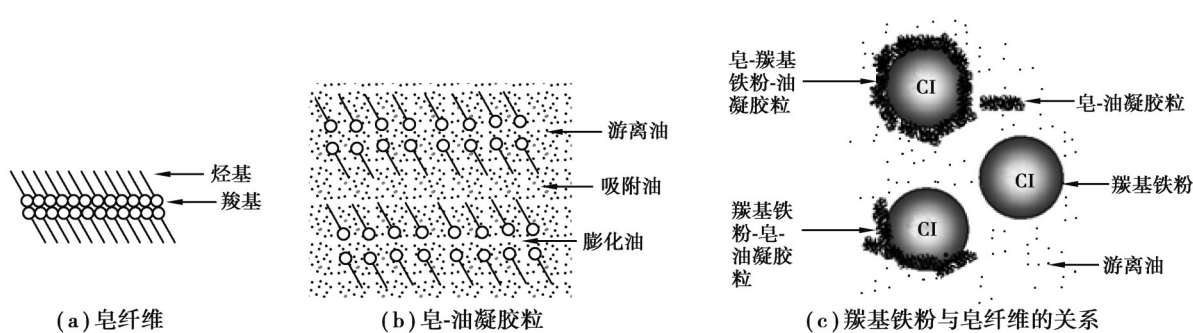


图 3 磁流变脂内部结构示意图

Fig. 3 The structure schematic diagram of MR grease

乙基硅油与PAO10分别为聚硅氧烷和聚 α -烯烃液体,而矿物油分子多是烷烃、环烷烃和芳香烃的混合物,聚硅氧烷和聚 α -烯烃的分子较大,较难进入皂纤维与铁粉颗粒形成的骨架结构中形成膨化油,更易在磁流变脂的骨架结构外面形成游离油或吸附在皂纤维层之间形成吸附油,使制备的磁流变脂的黏性与弹性的比例值较高。矿物油分子如环烷烃、芳香烃含有刚性基团,单个分子较小,在外界应变刺激下的可恢复形变较大,且进入皂纤维内部转化为膨化油的数目较多,使矿物油基磁流变脂具有较高的储能模量。

图 4 显示了不同类型基础油的磁流变脂储能模量随磁场的变化。可以看出,随磁场变化,基于不同类型基础油的磁流变脂的储能模量都呈现 3 个区域^[15]的变化。在磁场强度小于 10 kA/m 时,随着磁场强度增大磁流变脂的储能模量几乎无变化,表现为平坦区。在磁场强度大于临界磁场时,3 种磁流变脂的储能模量均随磁场强度增大迅速增大,出现第二区,即迅速增长区。当磁场强度较大时,3 种磁流变脂的储能模量变化趋于稳定,出现第三区,即缓慢增加区。

3 种磁流变脂的磁流变效应从高到低顺序依次为乙基硅油基磁流变脂、PAO10 基磁流变脂、HVI150 基磁流变脂,其磁流变效应数值分别为 12 134%、9 969% 和 2 349%,与汪辉兴等^[16]所报道的实验结果具有相同数量级,证明锂基磁流变脂具有明显的磁流变效应。这与 3 种磁流变脂在线性黏弹区内的损耗因子值相对应,损耗因子越大,流动性越好,对应的磁流变脂的磁流变效应越高。从磁流变机理来看,乙基硅油基或 PAO10 基磁流变脂中基础油的存在形式以游离油或吸附油为主,使磁流变脂内的碳基铁粉-皂-油凝胶粒在磁场的作用下较容易沿磁场方向移动,磁性颗粒在磁场作用下迅速排列成链,使磁流变脂对磁场的响应比较敏感。而基于矿物油 HVI150 的磁流变脂的基础油存在形式以膨化油为主,在磁流变脂内部较易形成较大的碳基铁粉-皂-油凝胶粒,磁性颗粒在磁场作用下的移动受阻,导致对磁场的敏感性下降,磁流变效应较低。

图 5 描述了不同类型基础油的磁流变脂沉降稳定性随时间的变化关系。从图中可以看出,随着时间延

长,基于乙基硅油、PAO10 和 HVI150 的磁流变脂出现了不同程度的沉降,其中乙基硅油基磁流变脂在 6 d 时开始出现沉降,在 32 d 时沉降稳定性仍保持在 98% 左右,具有较好的沉降稳定性。PAO10 基磁流变脂在前 10 d 的沉降稳定性好于 HVI150 基磁流变脂,但 10 d 后的沉降稳定性较差,在 32 d 时沉降稳定性为 83%,表明 PAO10 基磁流变脂的长期稳定性较差。因此,乙基硅油基磁流变脂既具有较好的沉降稳定性,又具有较好的磁流变效应。

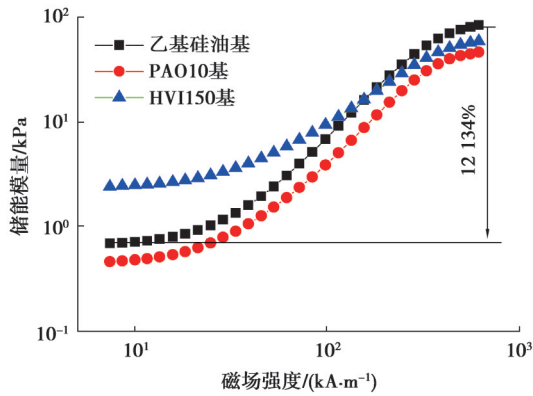


图 4 不同类型基础油的磁流变脂储能模量随磁场的变化
Fig. 4 Storage modulus of MR greases based on different base oil as a function of magnetic field

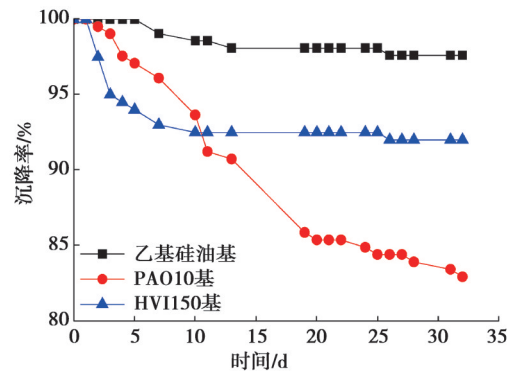


图 5 不同类型基础油的磁流变脂的沉降量随时间的变化
Fig. 5 Sedimentation test of MR greases based on different base oil

上述结果与两方面的原因有关,一方面基础油的黏度大小顺序为乙基硅油>PAO10>HVI150,使基础油承载凝胶颗粒的能力有差异;另一方面,由于基础油分子结构不同导致其在磁流变脂中的存在形式不同,与羰基铁粉和皂纤维形成的凝胶粒大小不同,分析认为基于乙基硅油、PAO10 的磁流变脂中基础油以游离油、吸附油为主,使形成的羰基铁粉-皂-油凝胶粒含膨化油较少,胶粒的密度较大,而基于矿物油 HVI150 的磁流变脂中基础油主要以膨化油为主,形成的羰基铁粉-皂-油凝胶粒中含膨化油较多,使胶粒的密度减小。这二者的综合作用导致了基于不同类型基础油磁流变脂在沉降稳定性上的差异。

2.2 基础油黏度对磁流变脂性能影响

在零场、固定频率 1 Hz 下对基于不同黏度矿物油和 PAO 的磁流变脂进行了振幅扫描,结果如图 6 所示。

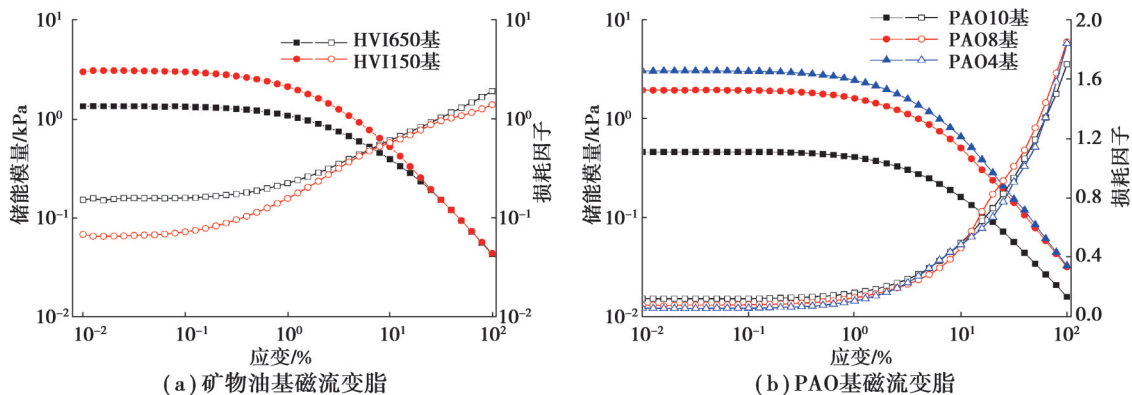


图 6 不同磁流变脂储能模量(实心符号)、损耗因子(空心符号)随应变的变化

Fig. 6 Storage modulus (solid symbols) and damping factor (hollow symbols) of MR greases based on different viscosity of base oil as a function of strain amplitude without a magnetic field

从图6中可以看出,基于2种基础油的磁流变脂的线性黏弹范围比较接近,均大于0.10%。无论是矿物油基磁流变脂,还是PAO基磁流变脂,随着基础油黏度增大,对应磁流变脂的损耗因子增大,储能模量下降,在线性黏弹区内这种变化更明显。矿物油磁流变脂中,较大的基础油黏度差使线性黏弹区内2种磁流变脂的损耗因子差距较大,但储能模量差异较小。对PAO基磁流变脂而言,在线性黏弹区内磁流变脂的损耗因子随基础油黏度的变化差异较小,但储能模量差异较大。3种PAO基础油的差异主要是组分中多聚体的含量不同,低聚物含量较高的基础油具有较低的黏度,且对聚合物而言,链段越短,聚合物的柔性越好,在制备磁流变脂时更容易移动到皂纤维与铁粉颗粒形成的骨架结构中或吸附在皂分子层之间,形成膨化油或吸附油,因此制备的磁流变脂具有更高的储能模量。但在骨架结构之外的游离油减少使磁流变脂的黏性与弹性的比例降低。

图7给出了不同基础油黏度的磁流变脂储能模量随磁场的变化关系。基于不同基础油黏度的磁流变脂储能模量随磁场的变化规律相似,都存在3个区域。对基础油黏度差距较大的2种矿物油而言,所对应的损耗因子相差很大,黏度较大的HVI650制备的磁流变脂的损耗因子高于基于低黏度矿物油HVI150的磁流变脂,且HVI650基磁流变脂的磁流变效应值为3411%,高于HVI150基磁流变脂。从PAO基础油制备的磁流变脂中可以发现相同的规律,基础油的黏度越高,所制备的磁流变脂损耗因子越高,样品的流动性越好,对应的磁流变效应越高。

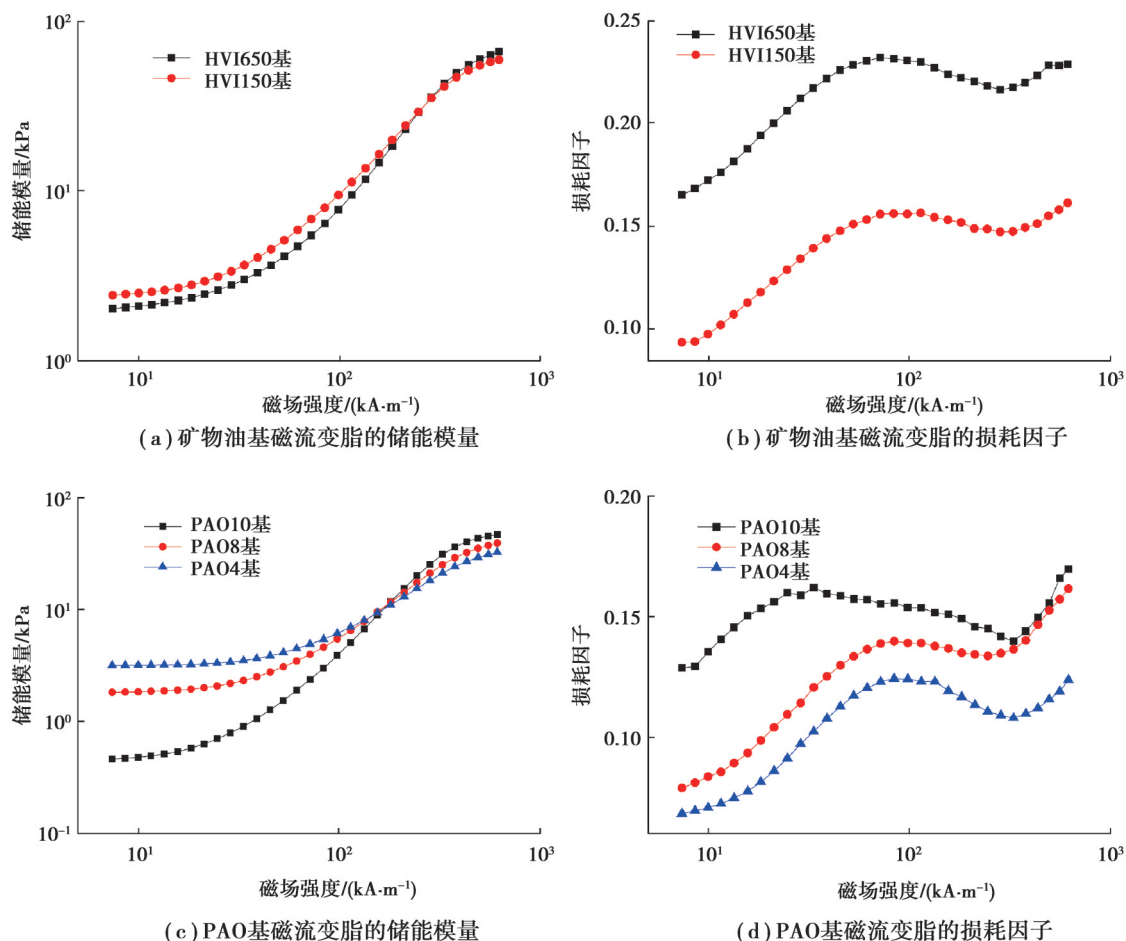


图7 不同基础油黏度的磁流变脂储能模量与损耗因子随磁场的变化关系

Fig. 7 Storage modulus and damping factor of MR greases based on different viscosity of base oil as a function of magnetic field strength

从自然沉降稳定性来看,基于PAO4、PAO8和HVI650的磁流变脂一个月内几乎无沉降发生,而基于PAO10和HVI150的磁流变脂的沉降稳定性分别为83%、92%。这表明随着基础油黏度增大,基础油在磁流

变脂中的存在形式逐渐从膨化油转化为吸附油,直至游离油,沉降稳定性变差。但当基础油的黏度增大到一定程度时,制备的磁流变脂在一定时间内具有较好的沉降稳定性,甚至不会发生沉降。

表 2 是基于不同基础油的磁流变脂的磁流变效应和沉降稳定性与其损耗因子之间的关系。可以看出,对于 PAO 基础油而言,随基础油黏度增大,制备的磁流变脂损耗因子逐渐增大,流动性提高,磁流变效应显著增大,但沉降稳定性下降。从矿物油来看,大幅增加基础油的黏度可提高磁流变脂的流动性,改善磁流变脂的磁流变效应,增强磁流变脂的稳定性。用乙基硅油制备的磁流变脂既具有较高的磁流变效应,又具有较好的沉降稳定性,较好地解决了磁流变脂沉降稳定性与流动性之间的矛盾。

表 2 基于不同基础油的磁流变脂的磁流变效应和沉降稳定性随损耗因子的变化关系

Table 2 Sedimentation and MR effect of MR greases based on different base oil as a function of damping factor

基础油类型	损耗因子	磁流变效应/%	沉降率/%
PAO4	0.053 5	917.394	100
PAO8	0.076 9	2 038.292	100
PAO10	0.118 0	9 969.354	83
HVI150	0.071 6	2 348.963	92
HVI650	0.158 0	3 411.147	100
乙基硅油	0.197 2	12 134.596	98

2.3 铁粉粒径对磁流变脂流变性质的影响

图 8 是基于 2 种不同粒径的磁流变脂的动态剪切模量和损耗因子随剪切应变的关系。从图 8 中可以看出,基于 2 种颗粒的磁流变脂均具有较宽的线性黏弹区,边界应变值比较接近。基于小颗粒的磁流变脂储能模量明显高于大颗粒的磁流变脂。从损耗因子来看,在整个剪切应变范围内基于大颗粒的磁流变脂损耗因子高于基于小颗粒的磁流变脂,二者的差异在线性黏弹区内表现得更为明显。这是由于粒径增大,在磁流变脂中形成的羰基铁粉-皂-油凝胶粒中磁性颗粒表面吸附的皂纤维数量减少,凝胶粒中膨化油的含量降低,使基础油主要以吸附油或游离油的形式存在于磁流变脂中,使无磁场条件下磁流变脂的储能模量降低,黏性与弹性的比例增大。

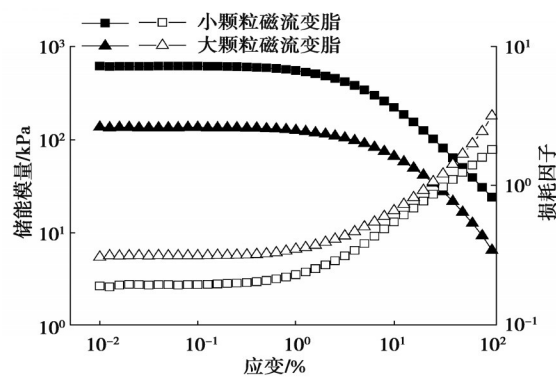


图 8 基于不同粒径羰基铁粉的磁流变脂储能模量(实心符号)及损耗因子(空心符号)随应变的变化

Fig. 8 Dynamic modulus (solid symbols) and damping factor (hollow symbols) of MR greases as a function of strain amplitude without a magnetic field

图 9 是基于不同颗粒粒径的磁流变脂的储能模量和损耗因子随磁场的变化关系曲线。可以看出,随着磁场变化,基于小颗粒的磁流变脂储能模量曲线呈现 3 个区域的变化,而基于大颗粒的磁流变脂储能模量曲线在实验磁场范围内仅有第 2 区和第 3 区,几乎无平坦区出现,表明基于大颗粒的磁流变脂对磁场的响应比小颗粒磁流变脂更敏感,在较小磁场下磁流变脂的储能模量即可迅速发生变化。上述现象一方面是由于基于大颗粒的磁流变脂中基础油的存在形式利于磁性颗粒在磁场刺激下的移动,使磁流变脂对磁场的敏感度

提高;另一方面,大颗粒的粒径较大(图10),多为圆柱形,在磁场下聚集成单链的宽度比小颗粒大,使磁流变脂的储能模量迅速增大,磁流变效应显著增强。

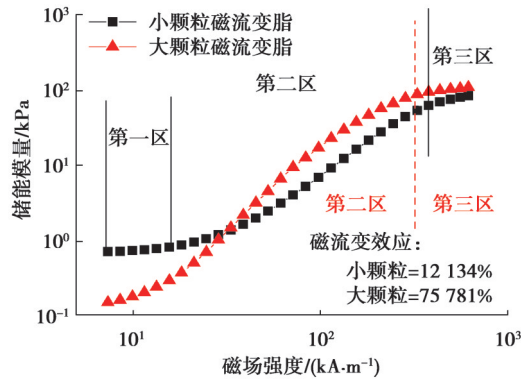
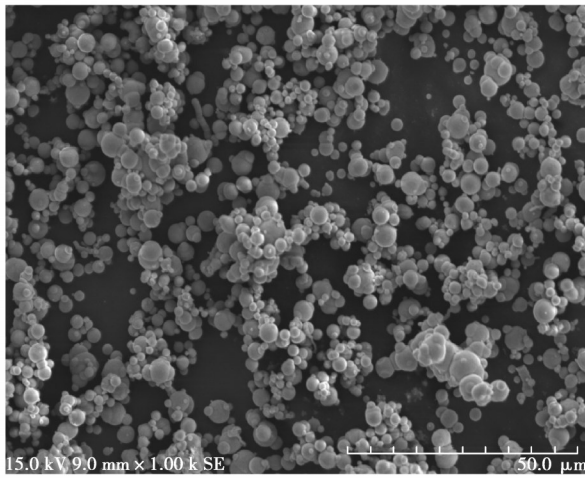
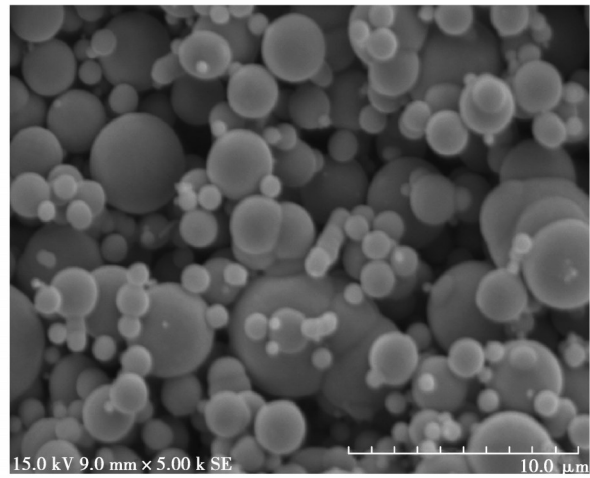


图9 基于不同颗粒粒径的磁流变脂储能模量随磁场强度的变化关系

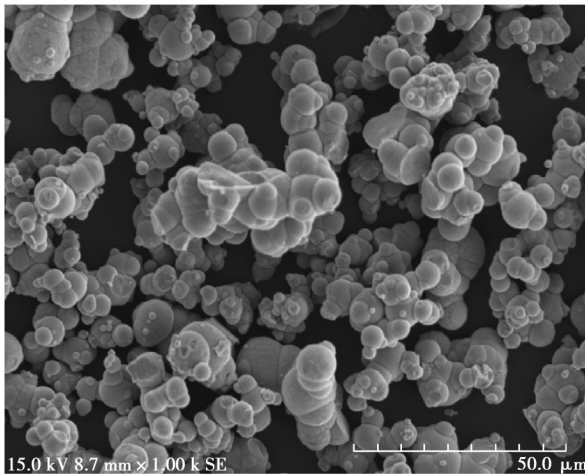
Fig. 9 Storage modulus of MR greases of different particle size as a function of magnetic field strength



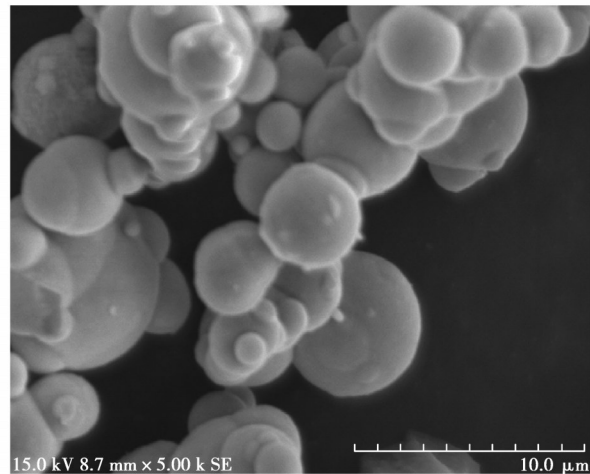
(a) 小颗粒1 000倍



(b) 小颗粒5 000倍



(c) 大颗粒1 000倍



(d) 大颗粒5 000倍

图10 不同粒径羰基铁粉的形貌照片

Fig. 10 The morphological photographs of carbonyl iron particles of different size

在线性黏弹区内对2种铁粉粒径的磁流变脂进行频率扫描,从频率扫描曲线中读取描述磁流变脂结构强度的参数稳定区模量 G_N^0 值,观察稳定区模量随磁场强度的变化,结果如图11所示。可以看出,在无磁场条件下,基于大颗粒磁流变脂的稳定区模量小于小颗粒磁流变脂,这是由于基于大颗粒的磁流变脂中形成的羰基铁粉-皂-油凝胶粒中磁性颗粒吸附皂纤维的数量较少,使基础油在磁流变脂中以膨化油存在的数量减少,以游离油或吸附油形式存在的数量增多,导致磁流变脂的结构强度降低,稳定区模量下降。但基于大颗粒的磁流变脂稳定区模量随磁场增大迅速增大,高于小颗粒磁流变脂的稳定区模量,表明在磁场的作用下,基于大颗粒的磁流变脂结构迅速增强,表现出较高的稳定区模量。对磁流变脂的稳定区模量进行处理,绘制 G_N^0/H 与磁场强度 H 的曲线(图11(b))。由图可见, G_N^0/H 在较低磁场下随磁场增大迅速增大,在高磁场下随着磁场增大逐渐降低,表明在低磁场下, G_N^0/H 随磁场增大能够迅速增大,随着磁场强度的进一步增大,磁场能引起磁流变脂结构强度增大的趋势逐渐减小。可以预测当磁场的强度足够大到使铁粉颗粒达到磁饱和强度时, G_N^0 将不再随磁场强度的变化而变化。基于大颗粒和小颗粒的磁流变脂的 G_N^0/H 随磁场的变化规律相同,但基于大颗粒的磁流变脂具有更高的 G_N^0/H 值,在高磁场强度下基于小颗粒的磁流变脂 G_N^0/H 随磁场下降较快,表明磁场强度更容易改变大颗粒磁流变脂的结构强度,而小颗粒磁流变脂随磁场强度增大结构强度值降低,随磁场的可调节范围较窄。

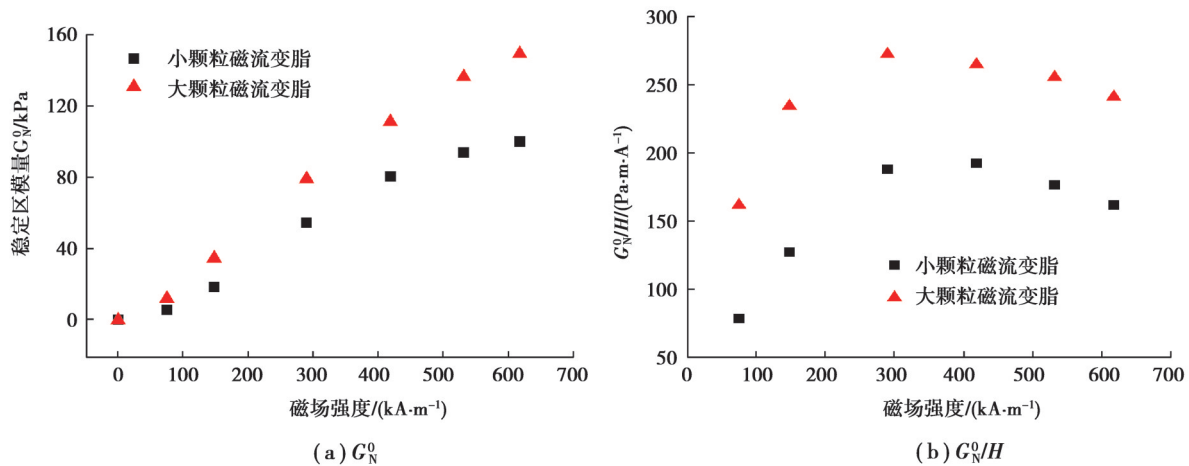


图11 基于不同颗粒粒径的磁流变脂的稳定区模量随磁场的变化关系

Fig. 11 Magnetic field strength dependence of plateau storage modulus for MR greases based on different particle size

3 结论

通过原位合成法制备了锂基磁流变脂,并研究了基础油和羰基铁粉对磁流变脂宏观性能的影响,主要得出了如下结论:

- 1) 乙基硅油制备的磁流变脂呈现出比聚 α 烯烃、矿物油基磁流变脂更优的沉降稳定性和磁流变效应。
- 2) 对矿物油或PAO基础油体系而言,随着基础油黏度增大,对应磁流变脂的损耗因子增大,储能模量下降,流动性提高,磁流变效应显著增大。
- 3) 增大磁性颗粒的粒径能够改善磁流变脂的流动性,增强磁场下磁流变脂的结构强度,提高其磁流变效应。

参考文献

- [1] 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.
 - [2] 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.
- Yang G X, Pan J B, Zhou L J, et al. Shear stability and mechanism of magnetorheological grease under thermo-magnetic

- coupling[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(8): 4428-4437. (in Chinese)
- [3] Wang D W, Hu Z D, Yan H, et al. The oxidation stability and magnetorheological properties of MR grease based on different kinds of base oil[J]. *Materials Performance and Characterization*, 2019, 8(1): 20180167.
- [4] 杨广鑫, 潘家保, 周陆俊, 等. 磁流变脂材料及其应用研究进展[J]. *材料导报*, 2021, 35(23): 23183-23191.
Yang G X, Pan J B, Zhou L J, et al. Research progress and application of magnetorheological grease materials[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(23): 23183-23191. (in Chinese)
- [5] Ye X, Mao R, Wang J. Analysis of magnetorheological grease normal force characteristics in static and dynamic shear modes [J]. *Materials Research Express*, 2020, 8(1): 015701.
- [6] Wang K J, Dong X M, Li J L, et al. Yield dimensionless magnetic effect and shear thinning for magnetorheological grease[J]. *Results in Physics*, 2020, 18: 103328.
- [7] Tarmizi S M A, Nordin N A, Mazlan S A, et al. Incorporation of cobalt ferrite on the field dependent performances of magnetorheological grease[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(6): 15566-15574.
- [8] 廖昌荣, 赵丹侠, 刘琼. 面向轨道车辆抗蛇行振动的磁流变脂阻尼器设计与台架测试[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(4): 54-58, 70.
Liao C R, Zhao D X, Liu Q. A design method of magneto-rheological grease damper for railway vehicle anti-hunting vibration and tests[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(4): 54-58, 70. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] 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.
He G T, Liao C R, Deng S G, et al. Mechanism simulation of magnetorheologic grease[J]. *Journal of Functional Materials*, 2011, 42(3): 550-552, 556. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] Premalatha S E, Chokkalingam R, Mahendran M. Magneto mechanical properties of iron based MR fluids[J]. *American Journal of Polymer Science*, 2012, 2(4): 50-55.
- [13] Shetty B G, Prasad P S S. Rheological properties of a honge oil-based magnetorheological fluid used as carrier liquid[J]. *Defence Science Journal*, 2011, 61(6):583-589.
- [14] 闫敏杰, 蒙恺悦, 武志杰, 等. 基于聚 α -烯烃合成润滑油的复合锂基磁流变脂流变特性[J]. *机械工程材料*, 2021, 45(8): 20-24, 31.
Yan M J, Meng K Y, Wu Z J, et al. Rheological property of composite lithium based magnetorheological grease based on poly-alpha olefin synthetic base oil[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2021, 45(8): 20-24, 31. (in Chinese)
- [15] 叶绪丹, 王旻, 黄学功. 振荡剪切模式下磁流变脂法向力特性分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2020, 47(4): 49-56.
Ye X D, Wang J, Huang X G. Analysis of normal force characteristics for magnetorheological grease in oscillatory shear mode [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2020, 47(4): 49-56. (in Chinese)
- [16] 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.
Wang H X, Zhang G, Ouyang Q, et al. Rheological properties of magnetorheological grease under shear mode[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2019, 53(3): 380-386. (in Chinese)

(编辑 罗 敏)