

# 磁性流体的制备方法及应用现状综述

迟佳龙, 黄波, 李鹏, 杨帆

(黑龙江省科学院高技术研究院, 哈尔滨 150000)

**摘要:** 磁性流体是一种功能化的纳米级智能材料, 可以通过磁场改变自身流体状态, 目前已被大规模应用并实现了工业化及产业化。综述了纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的制备方式及水基磁性流体、酯基磁性流体、烃基磁性流体、全氟聚醚油基磁性流体等不同基液磁性流体的制备方法, 介绍了磁性流体在密封、扬声器、阻尼抛光、生物医学等领域中的应用及主要的生产企业与产品。

**关键词:** 磁性流体;  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ; 水基磁性流体; 酯基磁性流体; 烃基磁性流体; 全氟聚醚油基磁性流体

中图分类号: TB383.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-8646(2024)14-0001-07

## Preparation Method and Application Status of Magnetic Fluid

Chi Jialong, Huang Bo, Li Peng, Yang Fan

(Institute for Advanced Technology of HAS, Harbin 150000, China)

**Abstract:** Magnetic fluid is a functionalized nanoscale intelligent material. It is possible to change its own fluid state through a magnetic field, and it has been widely applied and industrialized. The study focuses on the preparation methods of nano  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  and different base fluid magnetic fluids, such as water-based magnetic fluids, ester based magnetic fluids, hydrocarbon based magnetic fluids, and perfluoropolyether oil-based magnetic fluids. Then the study introduces the enterprises, products, and application status of magnetic fluids in key fields such as sealing, speaker, damping polishing, and biomedical fields.

**Key words:** Magnetic fluid;  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ; Water-based magnetic fluid; Ester based magnetic fluid; Hydrocarbon-based magnetic fluid; Perfluoropolyether oil based magnetic fluid

磁性流体是一种智能化的磁性纳米材料胶体功能性液体, 在无磁场条件下呈现一般的流体性能, 具有一定的流动性和黏度。加入磁场后会呈现超顺磁性, 随着磁场强度和方向改变自身流体性能, 呈现类固态, 具有一定的剪切力并随着磁场方向运动。20世纪60年代, 美国国家航天局(NASA)为了解决航天服旋转部位动密封而研制出第一种磁性流体<sup>[1]</sup>。磁性流体在磁场中具有固液转换的特性及独特的磁学、电磁学、流体动力学、电学及光学特性<sup>[2-3]</sup>, 受到了广泛关注。目前, 磁性流体在真空动密封<sup>[4]</sup>、扬声器<sup>[5]</sup>、航空航天、采矿冶金、仪器仪表、石油化工、生物医学、科学研究等领域都有广泛的应用<sup>[6]</sup>。

磁性流体是由磁核(即磁性颗粒)、表面活性剂和载液组成的纳米材料胶体功能性液体。磁性流体的磁核主要为尖晶石结构的纳米颗粒, 包括铁氧体、氮化铁

等。表面活性剂主要是阳离子表面活性剂、阴离子表面活性剂、偶联剂等。载液是水、基础油、酯类机油、烃类机油等。磁性流体通常按照载液进行分类, 目前主要的磁性流体有水基磁性流体、基础油基磁性流体、酯基磁性流体和烃基磁性流体。本研究综述了这几种磁性流体的制备方法及其应用。

### 1 磁性流体的制备方法

#### 1.1 水基磁性流体的制备方法

化学共沉淀法采用球磨法、热分解法、溶胶凝胶法和水热法等制备水基磁性流体, 是制备水基磁性流体及整个磁性流体最主要、最普遍的方法, 操作过程如下。采用可溶性铁盐、 $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Fe}^{3+}$ , 通过一定量的摩尔比混合, 加入一定量的沉淀剂, 通过调节 pH 值、反应温度和反应时间制备出纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性颗粒。采用亲水性表面活性剂、双亲性表面活性剂或偶联剂, 对纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性颗粒表面进行修饰, 在表面活性剂的作用下制备出水基磁性流体。Wang 等<sup>[7]</sup>采用双层表面活性剂修饰, 以油酸作为第一层表面活性剂包覆磁粉, 以吐温 80 作为表面活性剂, 制备得到了稳定性较好的水基磁性流体。Li 等<sup>[8]</sup>在高温条件下, 通过共沉淀方法制备的纳米磁性粒子粒径为 4.5 nm, 表面活性剂采

收稿日期: 2024-03-07

基金项目: 黑龙江省科学院院基金项目(KY2023GJS01)

作者简介: 迟佳龙(1981-), 男, 硕士, 高级工程师。研究方向: 磁性材料。

通讯作者: 黄波(1980-), 男, 硕士, 正高级工程师。研究方向: 磁性材料。E-mail: 147989610@qq.com。

用巯基化聚甲基丙烯酸,制备水及磁性流体,阐述其应用潜力。闫东等<sup>[9]</sup>选择  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  为磁性颗粒、水为基载液制备磁性液体,通过高速机械搅拌制备出性能稳定的水基磁性液体,研究影响磁性液体的因素和水平,结果发现,饱和磁化强度为 11.75 emu/g 的磁性液体具有良好的磁学性能。潘婷婷<sup>[10]</sup>制备了纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  颗粒,采用共沉淀法并进行微波陈化,制备出晶体结构更完整、饱和磁化强度更高的纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  颗粒,表面活性剂采用硅烷偶联剂 KH-570,制备出重力场中测试稳定的水基  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性流体,饱和磁化强度为 17.42 mT,饱和磁化强度为 665.4 mT。

化学共沉淀法制备水基磁性流体的优点是方法简单、材料来源广泛、价格便宜,可以大规模生产。缺点是粒径控制较差、粒径分布宽、易氧化、易团聚等。除化学共沉淀法外,还有采用球磨法、热分解法、溶胶凝胶法和水热法等来制备水基磁性流体。Asuha 等<sup>[11]</sup>将金属盐  $[\text{Fe}(\text{CON}_2\text{H}_4)_6](\text{NO}_3)_3$  通过热分解,在高压反应釜中制备出饱和磁化强度 0.366 ~ 0.462 A/m、粒径 37 ~ 50 nm 的磁性  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米颗粒,在水中分散  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  制得水基磁性流体。此种方法可以制备出饱和磁化强度较高的水基磁性流体,但稳定性较差。Kikuchi 等<sup>[12]</sup>采用  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液作为沉淀剂,边搅拌边滴加一定量、一定浓度的  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,表面活性剂采用抗坏血酸维生素 C,进行高压水热反应,经过过滤烘干得到饱和磁化强度 0.027 A/m 和粒径 5 nm 的纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  颗粒。张莲枝<sup>[13]</sup>采用行星球磨机制备水基  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁流体,通过实验确定转速为 200 r/min、介质填充率为 0.5、研磨时间为 110 h,制备出了性能较好的水基磁性流体。Lemine 等<sup>[14]</sup>采用溶胶 - 凝胶法,取一定量的乙酰丙酮铁溶解在甲醇中,在高压反应釜中以乙醇超临界条件下制备得到饱和磁化强度 0.243 A/m、粒径 8 nm 的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性纳米颗粒。Gyergyek 等<sup>[15]</sup>采用水热法制备纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  粒子,改变水热法的实验反应条件,将磁性粒子的粒径控制在 9 ~ 30 nm,饱和磁化强度为 0.466 A/m,当蓖麻油酸作为表面改性活性剂时,不仅可以对纳米粒子的粒径大小进行控制,由纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性颗粒制备出的磁性流体还具有良好的胶体稳定性。

采用球磨法、热分解法、溶胶凝胶法和水热法等制备水基磁性流体,其优点是粒径容易控制、分布窄,制备出的磁性微粒饱和磁化强度高。缺点是对实验条件和设备要求高,产量少,不容易进行大规模生产。

## 1.2 油基磁性流体的制备方法

油基磁性流体的制备多采用化学共沉淀法、球磨法、热分解法、溶胶凝胶法和水热法等。目前,主要的油基磁性流体基液有煤油、酯类基础油、烃类基础油、全氟聚醚油、硅油等<sup>[16-17]</sup>。

### 1.2.1 燃料油基磁性流体

燃料油是指煤油、柴油、汽油等可燃油料。任志强等<sup>[18]</sup>制备了煤油基  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性流体,铁氧体为  $\text{FeCl}_3$  和  $\text{FeSO}_4$ ,载液为煤油,表面改性剂为油酸,通过一步法制出。研究发现,磁性粒子表面可被油酸包覆在上面,平均粒径为 10 ~ 20 nm,晶型不变,磁化强度为 20.9 emu/g。车如心<sup>[19]</sup>选择胶溶法并进行改进,制备了  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  和  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  两种磁性纳米颗粒,以这两种磁性粒子作磁种,制得了 3 种磁性液体,载液分别为水、辛烷、煤油。研究了多种影响磁种分散的因素,确定了磁性液体的最佳制备条件:油酸为表面活性剂,改性温度 80 °C,改性时间 1 h。史丹<sup>[20]</sup>采用化学共沉淀法,在 Massart 和滴定水解法的基础上改进技术,制备出纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性微粒,确定了最佳实验工艺:采用 0.6 mol/L 浓度的反应前躯体溶液,反应温度 70 °C,反应时间 1 h。采用油酸为表面活性剂,对纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性微粒进行包覆实验,包覆后纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性微粒的粒径为 12 nm 左右。通过机械搅拌与超声波分散相结合的方式,制备了饱和磁化强度 625 Gs、室温黏度 34 mPa·s 的柴油基  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性液体,通过实验得出影响磁性液体磁性能的重要因素是磁性粒子粒径和分散性。

燃料油基磁性流体的优点是制作简单、黏度小、饱和磁化强度高。缺点是基液易挥发、不易存放、应用范围小。

### 1.2.2 酯类基础油磁性流体

吕建强<sup>[21]</sup>利用沉淀剂,采用共沉淀法制得磁性纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  粒子,研究了不同反应因素对颗粒粒径和磁性能的影响,包括  $\text{Fe}^{3+}$  和  $\text{Fe}^{2+}$  的摩尔配比、反应前驱溶液浓度、溶液 pH 值、反应速度、制备温度等。以纳米磁粉为磁核,制备了二酯基和煤油基磁性流体,对磁性流体重要影响因素进行实验分析。研究表明:反应前驱溶液浓度为 0.6 mol/L,  $\text{Fe}^{3+}$  和  $\text{Fe}^{2+}$  摩尔比为 4:7、反应温度 50 °C ~ 60 °C、pH 值大于 13 时,在此条件下制备的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米粒子粒径均匀,饱和磁化强度最高。张伟<sup>[22]</sup>利用沉淀剂,用超声辅助共沉淀法制得磁性纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  粒子,明确了影响粒子磁性能和形貌的反应条件是反应温度及大功率超声,确定了制备 10 nm 粒径和饱和磁化强度 55 emu/g 的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米球形颗粒的最佳工艺参数为:在 65 °C 的反应温度下进行机械搅拌并辅以低功率超声。纳米磁性粒子采用 NaAC 包覆,于 DIOS 进行分散,得到的磁性流体含有不同质量分数,研究了磁性颗粒含量对磁流体密度、黏度、磁性能的影响。

酯类基础油磁性流体的优点是具有较高的温度稳定性,在高温条件下性能稳定,可延长磁性流体的使用

寿命,具有优异的低温性能,能够在极低温度下维持润滑油的流动性,保证寒冷条件下具备正常的工作能力。缺点是成本较高,相较于矿物油更易受水分和氧化的影响,一旦受到这些外部因素的干扰,会导致油脂变质,丧失基本性能。

### 1.2.3 烃类基础油磁性流体

何彦等<sup>[23]</sup>以纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性粒子为磁核,以航空基础油( $\text{PAO}_3$ )为基液,制备出磁性液体,采用震动磁强计(VSM)、场透射电镜(TEM)、X射线透射仪(XRD)等分析方法进行表征,将基础油磁性流体与基础油  $\text{PAO}_3$  进行润滑对比,考察针对不同摩擦物质的摩擦学性能。采用 12CrNi4A 钢/304 钢、12CrNi<sub>4</sub>A 钢/ $\text{GCr}_{15}$  钢对 12CrNi<sub>4</sub>A 钢/ $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷进行摩擦,通过扫描电子显微镜(SEM)、能谱仪(EDS)、轮廓仪和光学显微镜等分析手段,研究其摩擦学性能,探究其润滑机理。结果表明:磁性液体能够稳定分散,达到磁性液体标准。与基础油相比,磁性液体的摩擦性能受到多种因素的影响,纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  粒子可以对摩擦副表面氧化膜进行去除与修复,研究浓度和磁场对纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  粒子分散性与团聚性的影响,使其在一定条件下具有优异的减摩和抗磨性能。费菲<sup>[24]</sup>利用沉淀剂,采用共沉淀法制得磁性纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  粒子,其以低黏度的烃做基载液,制备烃基纳米磁性液体。测试了其黏磁性和稳定性,结果表明:制备的磁性流体具有较低的表观黏度和较好的磁性能,实验需要的磁场强度范围可以根据测试结果来确定。布和巴特尔等<sup>[25]</sup>利用沉淀剂,将  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  水溶液共沉淀,采用 pH 值调节,控制纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁粉粒径,采用多元醇酯和聚 a 烯烃做基液,通过表面活性剂分散磁粉得到磁性液体并应用于扬声器。

烃类基础油磁性流体的优点是黏度指数稳定,黏度梯度大,适应范围广,低温流动性好,可达到 -40 °C。高温稳定性和安全抗氧化性较好,可以在较高温度下保持工作状态,挥发性较低,寿命较长。缺点是边界润滑性差,会对橡胶密封产生一定的收缩性。

### 1.2.4 全氟聚醚油磁性流体

张晓萌等<sup>[26]</sup>采用热分解法制备纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  粒子,磁种分散采用相转移方法。此粒子具有单分散、结晶高、尺寸小的特点,对其表面进行修饰后,制备了几种全氟聚醚油基磁性流体,具有不同固含量。通过 VSM、TEM 和 XRD 对纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  粒子进行测试表征,对磁性流体进行测试分析。结果表明,随着不同固含量的增大,其磁性流体黏度、饱和磁化强度、比重等均相应变大,当固含量为 60% 时,达到最大值。刘汉勇等<sup>[27]</sup>利用沉淀剂,采用共沉淀法制得氟醚油基磁性流体,以密封实际情况为标准,测试其磁性能、挥发性、耐

高低温性、耐腐蚀性及摩擦性、导热性等,与进口产品对比。结果表明:制得的氟醚基磁性流体饱和磁化强度为 16.33 emu/g,大于进口氟醚基磁性流体的 14.56 emu/g,其挥发性强弱取决于基液温度和分子量,相比于硅油基磁性液体,其耐酸碱腐蚀性能更好。在 200 °C 高温下性能稳定,对煤油和甲苯基磁性液体的耐高温性能优越。在 -70 °C 低温下依然可以保持流动性,操作温度为 -70 °C ~ 200 °C,与各种常规亲油和亲水溶剂不相溶,摩擦系数比基础液体高得多,热导率随着颗粒含量的增加而增加。此结果可为其在各种环境下的工业密封应用提供依据,从而扩大其应用范围。Hiroaki Yoshioka 等<sup>[28]</sup>将带有聚氧乙烯基团的丙烯酸二甲酯单体与含氟烷基过氧化物混合反应,在严格控制反应条件的情况下生成含氟表面活性剂,其端基为交联多氟。纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  粒子采用这种含氟表面活性剂进行改性,改性后的磁性粒子能够稳定悬浮在水和有机溶剂中,可在 PMMA 膜的改性中应用这种改性后的磁性纳米粒子。

全氟聚醚油磁性流体最大的优点是分子结构稳定,故其高温性、耐火性、耐辐射性和耐化学性优异,化学稳定性优于其他润滑油基磁性流体,具有极高的热氧化稳定性和较大的使用温度范围,具有很好的低温流动性、抗燃、低蒸发性和较高的辐射稳定性。缺点是价格较高,导致其应用受限,全氟聚醚油与一些金属和塑料材料不兼容,需要注意选择合适的材料来避免腐蚀和损坏。

### 1.2.5 硅油基磁性流体

段培松<sup>[29]</sup>以硅油为载体液体,结合超声波分散技术,研制了一种硅油基磁性液体,制备了纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性粒子,研究了制备工艺对磁性粒子的影响。在水浴中以四乙氧基硅烷和聚乙烯硅氧烷为原料,包裹颗粒制备硅油基磁性液体。结果表明,影响硅油基磁性液体性能的关键因素是基体载体的结合性能及磁性粒子粒径。该工艺制备的磁性液体饱和磁化强度为 51.13 Gs,室温下黏度为 111.2 mPa·s,高温黏温性较好。柏乐等<sup>[30]</sup>采用四乙氧基硅烷水解法,利用沉淀剂,通过共沉淀法制备  $\text{Fe}_3\text{O}_4 @ \text{SiO}_2$  核壳磁性粒子。设计并优化实验,利用高能球磨振荡辅以超声波分散方法,采用硅烷偶联剂 A1120 分散包覆材料,在硅油基载体液中分散磁性  $\text{Fe}_3\text{O}_4 @ \text{SiO}_2$  颗粒,得到硅油基磁性液体。采用透射电子显微镜(TEM)、X 射线衍射(XRD)、红外光谱学(IR)和振动样品磁强计(VSM)等不同方法测试纳米磁性颗粒。得到的纳米磁性粒子粒径为 1520 nm,具有较高的分散性和超顺磁性,硅油基磁流体的饱和磁化强度达到  $2.51 \times 10^{-2}$  T。

硅油基磁性流体的优点如下:①良好的黏温性,在

较宽的温度范围内有较低的黏度变化。②良好的热氧化稳定性,蒸发损失小。③良好的电绝缘性,在室温~130 °C 体积和电阻基本不变。④良好的剪切稳定性,具有阻尼功能。缺点是润滑性不好,尤其是对钢铁摩擦的润滑性,热膨胀系数较大,具有吸湿性和较大的气体溶解度,表面张力小。

### 1.2.6 其他基液种类的磁性流体

氮化铁磁性流体的饱和磁化强度小于氧化铁磁性流体,大于铁酸盐系基磁流体,化学稳定性较好,是磁性流体应用中性能较好的功能材料<sup>[31~32]</sup>。王瑞金<sup>[33]</sup>用等离子体化学气相沉积法制备了含氮化铁磁流体。磁性液体中的纳米颗粒平均粒径为 8 nm,磁性液体具有明显的超顺磁性,未出现磁滞现象,饱和磁化强度为 820 GS。研究了磁流体悬浮液的稳定性,包括活性剂用量、低场沉降、载体黏度、颗粒浓度等。结果表明,表面活性剂的最佳用量为 5% 左右,低场沉降能显著提高稳定性,而当颗粒浓度较小或载体黏度较高时,稳定性较好。金浩宇<sup>[34]</sup>将纳米 Ni 粒子和纳米 Fe-Ni 合金粒子被 SiO<sub>2</sub>/SiC 包覆后做为磁种,分别制备机油基磁性流体并进行了黏度和饱和磁化强度分析测试。结果表明:随着纳米粒子浓度的增大,磁性液体黏度随之增大,但随着温度的升高,黏度反而降低。随着纳米粒子浓度的增大,机油基磁性液体的饱和磁化强度增大,但温度低于 200 °C 时,机油基磁性液体的饱和磁化强度几乎不随温度变化。倪翔宇<sup>[35]</sup>实验制备了粒径小、均匀、球形的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 纳米颗粒及磁性液体,纳米颗粒团聚不明显,6~8 个月后才能观察到微量沉淀,表明其具有良好的稳定性。实验确定了磁性液体理想的制备条件:前驱体溶液为 0.4 mol/L,油酸为 2.24 mL,磁性液体性能较好。在 70 °C 下搅拌 40 min 直至反应完成,超声处理 20 min,以硝酸酸化,用丙酮洗涤多次,将颗粒分散到变压器油中。当 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 颗粒分散到变压器油中时,选择反应温度为恒温 100 °C ~ 105 °C、反应时间为 40 min 和超声波 15 min 来分散纳米颗粒。钟伟

等<sup>[36]</sup>采用化学工艺方式制备了粒径均匀( < 10 nm) 的纳米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 微粒,其表面进行一层表面活性剂包覆并将其分散到自制的 ZDW 基液中,制备出一种全新的憎油型磁性液体。屈晶苗<sup>[37]</sup>制备了高稳定性的热油基磁流体,沉淀剂为氨水,表面改性剂为油酸。结果表明,制备的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 颗粒具有完整的晶体结构、均匀的粒径和高饱和磁化强度。表面改性油酸成功包覆 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 颗粒,制备的热油基磁流体磁性强、稳定性高。

以上磁性流体的优点是易于制备,在某一方面优点突出,但使用范围较窄,无法实现产业化。

## 2 磁性流体的应用

磁性流体是一种磁性智能化材料,近几十年来发展迅速,从最开始的学术研究发展到诸多应用领域,其中,密封、扬声器、抛光、减振、研磨、阻尼器等已实现产业化应用,在医药生物、选矿、环保等方面的应用研究也越来越成熟<sup>[38]</sup>。

### 2.1 磁性流体在密封领域中的应用

磁性流体密封的介质主要是真空和气体,密封模式为动密封,优点是零泄漏、无磨损、寿命长、修复性好、传输效率高、传递速度快、无污染等<sup>[39~42]</sup>。目前主要的真空密封应用是光伏产业中的真空设备,如单晶炉真空泵、真空密封传动装置、真空机电设、真空密封轴承、真空电子加工设备、半导体真空焙烧装置、高压输电设备中的真空绝缘气体 SF<sub>6</sub> 开关等。还有一些气体密封,如各种薄膜沉积、腐蚀等装置及机器人连接处的密封、等离子蚀剂密封和气泵、压缩机、风动机、压力机、激光器中的气体密封。此外,还有一些防尘密封也应用了磁性流体密封,如计算机硬盘的防尘密封、X 射线管和 X 射线机等。

国内有很多高校、研究机构和企业从事磁性流体密封研究。如北京交通大学、北京化工大学、哈尔滨工业大学、西安石油大学、北京钢铁研究院、黑龙江省科学院高技术研究院等。具体内容见表 1。

表 1 国内部分研究机构及研究内容

Tab. 1 Some domestic research institutions and research contents

学校和机构名称	研究内容
北京交通大学	磁性流体密封设计,磁路传导及优化分析
北京化工大学	磁性流体密封耐压数值分析、磁脂的密封设计
哈尔滨工业大学	磁性流体密封整体结构设计与分析,密封介质与解耦计算研究
西安石油大学	磁性流体密封性能有限元分析及磁场磁值架构数值仿真计算
黑龙江省科学院高技术研究院	密封用磁性流体及多种基液的磁性流体研究和制备。主要产品为 GSZ 系列产品

目前国内从事磁性流体密封的企业有杭州大和热磁电子有限公司、湖南朗润磁电科技有限公司、湖南汉高磁电科技有限公司、株洲众欣磁性密封科技有限公司、株洲维格磁性科技有限公司、北京华远臻达磁性流

体技术有限公司等。具体内容见表 2。

国外从事磁性流体密封经营的企业主要有美国的 FerroLabs, Inc. 公司、英国的 Liquids Research 公司、日本的 Ferrotec 公司和 NOK 公司等。具体内容见表 3。

表 2 国内部分经营磁性流体密封的公司及经营内容

Tab. 2 Some domestic companies engaged in magnetic fluid sealing and their business activities

企业名称	经销内容
杭州大和热磁电子有限公司	Ferrotec 中国子公司,从事磁流体传动装置的设计、生产和销售。主要产品为 SML 系列、HTL 系列、SFL 系列等
湖南朗润磁电科技有限公司	专业从事磁流体密封装置及真空零部件的研发制造和技术服务。主要产品为 CTN 系列、CTA 系列等
湖南汉高磁电科技有限公司	从事磁流体密封装置的制造和销售,提供各类密封装置的改造维修服务。主要产品为 KF 系列、SF <sub>6</sub> 真空开关等
株洲众欣磁性密封科技有限公司	主要从事磁流体密封装置及铁路货车自动化集成系统的产品研发和技术服务。主要产品有磁性流体真空传动装置、烧结炉系列等
株洲维格磁性科技有限公司	专业从事磁流体技术及其相关产品的研发、生产和销售。主要产品为磁性流体密封传动装置等
北京华远臻达磁性流体技术有限公司	主要从事磁性流体、磁性流体密封装置的研发和制造,代理进口轴承,进口 O 型密封圈、骨架油封、V 型防尘圈,承揽各种精密加工、钣金、焊接业务。主要产品为 MF 系列、HY 系列等

表 3 国外部分从事部分经营磁性流体密封的公司和经营内容

Tab. 3 Some foreign companies engaged in partial operation of magnetic fluid seals and their business content

公司名称	经营内容
FerroLabs, Inc. (美国)	磁性动态密封、生物医学技术和仪器、磁性传感器等。主要产品是 FLU300、FLS040、FLS450 等
Liquids Research(英国)	磁性真空密封、磁选分离、生物磁性标记等。主要产品是 SHGS - 4 系列、SPBF26 系列等
Ferrotec(日本)	磁性流体密封、扬声器密封、磁性分离等。主要产品是 AFS 系列等
NOK(日本)	日本最早从事油封的企业,包括磁流体密封、磁脂密封等。主要产品是 LBH 系列、DWI 系列等

磁性流体密封具有优越的性能,但也存在一些缺点,如大压差动密封和活性气体长时间密封、高速密封时的热传导问题等,需进一步拓展磁性流体密封研究,扩大其应用范围。

## 2.2 磁性流体在扬声器领域中的应用

磁性流体用于扬声器是磁性流体用于密封领域的拓展,随着磁性流体在扬声器中的应用量逐渐增加,目前已发展为仅次于密封的第二大应用领域。

在扬声器的磁气隙中加入少量的磁性流体,可改善扬声器性能,在不减小输出功率的情况下扩大音频范围,因此很多中高音扬声器都应用了磁性流体。磁性流体具有良好的导热性,在扬声器中应用可减少音圈机械噪音,降低音圈烧毁程度。在扬声器的磁气隙中,由于磁性流体的存在,磁场下磁性流体形成了静态磁力,可抑制音圈晃动。音圈气隙中央磁场内的磁性流体与弹簧作用类似,可维持同心度,而静态磁力部分的悬浮作用可降低音圈碰撞和蜂音,减少音圈中和周围的机械噪音。扬声器应用磁性流体后,音质会变得更稳定。

目前,国内外从事扬声器用磁性流体研发的企业和机构主要有杭州大和热磁电子有限公司、埃慕迪磁电科技(上海)有限公司、黑龙江省科学院高技术研究院、美国的 FerroLabs, Inc. 公司、英国的 Liquids Research 公司、日本的 Ferrotec 公司等。主要产品见表 4。

但应用于扬声器的磁性流体价格高昂,只有高端扬声器才会应用。扬声器中的磁性流体需要适当维

护,以提高其稳定性。目前,扬声器用磁性流体品质良莠不齐,国家尚未出台统一标准。

表 4 国内外部分扬声器用磁性流体产品

Tab. 4 Magnetic fluid products for some domestic and foreign speakers

机构名称	产品
杭州大和热磁电子有限公司	AGP 系列
埃慕迪磁电科技(上海)有限公司	P 系列
黑龙江省科学院高技术研究院	GCL 系列
FerroLabs, Inc. (美国)	FLA 系列
Liquids Research(英国)	LFH 系列
Ferrotec(日本)	AGP 系列

## 2.3 磁性流体在阻尼、研磨和抛光领域中的应用

磁流变液是磁性流体的一个变种,磁性流体在磁场作用下黏度变大,产生剪切力,阻止运动部件的相对运动,从而达到阻尼效果,可根据磁场强度改变剪切力的大小,从而实现对运动部件的可控阻尼。其具有动态响应快、阻尼范围广、能耗低等优点<sup>[43-45]</sup>,已被广泛应用于汽车减震器、磁流变离合器、磁流变制动器、桥梁阻尼减震中。兰博基尼 evo rwd、凯迪拉克 CT6 等车系应用了磁流变悬挂系统。Carlson 和美国 Lord 公司申请了关于磁流变液装置和阻尼控制方法的专利,可将其应用于健身设备上。

磁流变研磨是磁性流体在阻尼中的另一种应用,磁流变研磨抛光是在磁性流体中添加磨料和抗沉剂,形成磁流变抛光液,通过对磁场的控制,使磁流变抛光液在通过磁场控制区域时形成不同剪切力的抛光区

域,从而对被抛光物件进行精密研磨抛光。磁流变抛光液通过磁场对抛光区域局部进行控制,可对被抛光件的粗糙点进行精确抛光研磨。传统抛光对非球面和内部结构复杂的抛光件进行研磨抛光十分困难,而磁流变抛光可解决此问题,具有无亚表面损伤、抛光精度高、去除率高、刀具无磨损、无堵塞现象等优点。在磁流变液中加入磨料颗粒,磁流变液与工件在一定磁场作用力下做相对运动,进行表面精确研磨。各种非磁金属和非金属材料的加工都可应用磁流变研磨,加工形状包括平面、圆柱里外面、圆锥里外面、球里外面、螺纹、齿面及其他非规则型面。目前,主要的磁流变抛光机生产商是美国 QED 公司,已受到国内外的关注<sup>[46]</sup>。我国于 2018 年成功制造出磁流变抛光机,可应用该机抛光 4.03 m 大口径碳化硅反射镜。

磁性流体阻尼、研磨和抛光可用于计量仪表、传感器、平台减震、机器人制造、马达定位等领域。但也存在一些缺点,如磁性流体在阻尼应用中在作用力的作用下会产生大量的热,导致磁性流体黏度变低,令阻尼作用下降。磁流变研磨、抛光过程中产生的细小碎屑混淆在抛光液中,不容易分离,影响抛光效果。未来,还需进一步解决这些问题。

#### 2.4 磁性流体在生物医学领域中的应用

$\text{Fe}_3\text{O}_4$  无毒无害,具有良好的生物相容性,逐渐被应用于生物医学领域。磁性流体在生物医学领域中的应用主要包括 DNA 提取、靶向药物、清理血栓、医学造影成像、生物标记等<sup>[47-49]</sup>。以  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  为磁核,在  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的外围枝接上官能团,通过官能团与生物基因或药物的结合,通过磁场达到定向移动、定向分离或定向给药的目的。例如将不同生物分子,如蛋白质、多肽、抗体、生物素和卵白素等,通过一些功能端基化学耦合直接或间接束缚在  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米粒子表面,赋予这些生物分子磁场靶向特性。通过磁场将这些结合生物分子后的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米微粒富集,通过解析、洗脱、提纯达到提取 DNA 的目的。

磁性纳米微粒表面将药物通过一定手段固定,形成具有磁性的靶向药物,送入生物体内,通过磁场引导,移动到病变部位,通过外界设备释放药物,从而实现对病变部位的定向治疗。这种技术与传统药物治疗技术相比,药的浓度在病灶部位更加集中有效,降低了药物用量和副作用。在癌症治疗方面,柏林沙里特临床医院采用纳米磁性微粒,在动物实验中获得了不错的效果。2001 年,阿列克西沃在磁性液体国际性会议上初步介绍了磁性液体疗法。该方法可令抗癌药物准确达到肿瘤位置,在磁场与亚铁离子溶液的作用下,准

确地将药物瞄准病变,改善治疗效果,显著减少药物剂量,从而有效减少化疗过程对人体造成的副作用<sup>[50-52]</sup>。磁热疗也是近些年兴起的研究方向,它将水基磁性流体经过特殊处理注入到生物体内,通过磁场聚集在病灶周围,改变磁场的强度,使磁性流体的热量发生变化,从而达到治疗肿瘤细胞的目的<sup>[53-54]</sup>。这些具有一定生物分子功能的纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  粒子的生物相容性很高,在 DNA、细胞、辅助蛋白质、生化产品分离等方面具有很大的发展前景。但还有些问题有待解决,如  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  释放药剂后如何排出、药剂与  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  稳定性等。

#### 2.5 其他应用领域

磁性流体在其他领域中还有诸多应用,如磁性流体润滑、磁性流体选矿、薄膜轴承、印刷、磁性流体陀螺、磁性染料、环境保护、车辆制动、磁流体微泵、磁共振显像、电感磁芯、磁热泵等。未来,其在磁学、热学、化学、光学、电磁学、声学等领域都将得到进一步发展<sup>[55-60]</sup>。

### 3 结束语

磁性流体是一种大规模应用于工业领域的纳米智能磁性液体,除了应用于密封、扬声器、抛光、研磨中,还在航空航天、化工机械、环保水质处理、金属探伤、智能机器人等方面有着广阔的应用前景。随着国家科技投入的增加,很多高校、科研院所和企业都将对其展开更加深入的研究,磁性流体的性能、制备技术及应用也将日益完善。

#### 参考文献:

- [1] Papell SS. Low viscosity magnetic fluid obtained by the colloidal suspension of magnetic particles [P]. USP 3215572, 1965.
- [2] Yang JL, Huang W. Progress of magnetic fluids lubrication technology [J]. Surface Technology, 2017, 46(06):61-68.
- [3] 杨金霖, 黄巍. 磁性液体润滑技术的进展简述 [J]. 表面技术, 2017, 46(06):61-68.
- [4] 王瑞金, 曹森龙. 磁流体密封的原理和应用 [J]. 通用机械, 2005(02):54-58.
- [5] 黄波, 李鹏. 高性能磁性流体的制备与性能研究 [R]. 哈尔滨: 黑龙江省科学院高技术研究院, 2019.
- [6] Odenbach S. Ferrofluids magnetically controlled suspensions [J]. Colloid Surfa A, 2003, 217:171-178.
- [7] Wang YM, Cao X, Liu GH, et al. Synthesis of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , magnetic fluid used for magnetic resonance imaging and hyperthermia [J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2011, 323(23):2953-2959.
- [8] Li Z, Tan B, Allix M, et al. Direct coprecipitation route to monodisperse dual-functionalized magnetic iron oxide nanocrystals without size selection [J]. Small, 2008, 4(02):231-239.

- [9] 闫东,李占贤.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  水基磁性液体的制备及性能研究[J]. 南方农机,2021,52(05):174–175.
- [10] 潘婷婷. 水基磁性流体的合成及特性研究[D]. 苏州:苏州大学,2006.
- [11] Asuha S,Suyala B,Siqintana X, et al. Direct synthesis of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanopowder by thermal decomposition of Fe-urea complex and its properties[J]. Journal of Alloys & Compounds,2011,509(06):2870–2873.
- [12] Kikuchi T,Kasuya R,Endo S,et al. Preparation of magnetite aqueous dispersion for magnetic fluid hyperthermia[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials,2011,323(10):1216–1222.
- [13] 张莲枝. 高能球磨法制备水基  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁流体的仿真与实验研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2016
- [14] Lemine OM,Omri K,Zhang B, et al. Sol-gel synthesis of 8 nm magnetite( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) nanoparticles and their magnetic properties[J]. Superlattices & Microstructures,2012,52(04):793–799.
- [15] Gyergyek S,Makovec D,Jagodic M, et al. Hydrothermal growth of iron oxide NPs with a uniform size distribution for magnetically induced hyperthermia: structural, colloidal and magnetic properties [J]. Journal of Alloys & Compounds,2017,694:261–271.
- [16] Segal V,Nattrass D,Raj K,et al. Accelerated thermal aging of petroleum-based ferrofluids[J]. J Magn Magn Mater,1999,201:70–72.
- [17] Shen L,Stachowiak A,Fateen SK, et al. Structure of alkanoic acid stabilized magnetic fluids a small angle neutron and light scattering analysis[J]. Langmuir,2001,17:288–299.
- [18] 任志强,洪若愈. 煤油基  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性流体的制备及表征[J]. 化工新型材料,2008,36(09):47–48,59.
- [19] 车如心. 纳米复合磁性材料的制备及磁性能研究[D]. 大连:大连交通大学,2008.
- [20] 史丹. 柴油基磁性液体的制备[D]. 北京:北京交通大学,2012.
- [21] 吕建强. 纳米磁性液体的制备及性能研究[D]. 北京:北京交通大学,2006.
- [22] 张伟. 二酯基纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁流体的制备及性能研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2012.
- [23] 何彦,王优强,莫君,等. PAO<sub>3</sub> 基磁性流体的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报,2023,43(08):855–867.
- [24] 费菲. 介观尺度 MEMS 器件的纳米磁性液体磁控润滑研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2016.
- [25] 布和巴特尔,林顺达. 扬声器用磁性流体[J]. 化学工程师,2010(17):40–43.
- [26] 张晓萌,布和巴特尔. 全氟聚醚基磁性流体的制备及性能分析[J]. 化学工程师,2023(03):8–11.
- [27] 刘汉勇,颜招强,陈芳. 氟醚油磁性液体及其密封相关性能[J]. 磁性材料及器件,2020,52(07):50–54.
- [28] Yoshioka H,Narum T,Sawada H. Synthesis of novel crosslinked fluorinated cooligomeric nanoparticle: synthetic approach to colloidal stable fluorinated magnetic nanocomposites[J]. J Oleo Sci,2007,56:377–383.
- [29] 段培松. 硅油基磁性液体的制备与性能研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
- [30] 柏乐,张志力.  $\text{Fe}_3\text{O}_4 @ \text{SiO}_2$  硅油基磁性液体制备及其性能研究[J]. 功能材料,2017,48(11):11103–11107.
- [31] Rosensweig RE. Ferrohydrodynamiceng[M]. Cambridge: Cambridge University Press,1995.
- [32] Raj K,Moskowitz BC. Advance in ferrofluid technology[J]. J Magn and Magn Mater,1995,149:174–180.
- [33] 王瑞金. 氮化铁磁流体的制备与稳定性[J]. 科技通报,2005,21(03):342–346.
- [34] 金浩宇. 机油基磁性液体的制备及热磁性能研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2015.
- [35] 倪翔宇. 变压器油剂磁性液体的制备及散热性能的研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2013.
- [36] 钟伟,都有为. 新型憎油基磁性液体的制备及其应用[C]//第四届中国功能材料及其应用学术会议,2001:803–805.
- [37] 屈晶苗,洪若瑜. 高稳定性导热油基磁性流体的制备[J]. 材料导报,2010,24(22):99–101,108.
- [38] 张秀敏. 磁性流体产业现状与发展趋势[J]. 精细与专用化学品,2012,20(11):8–14.
- [39] Odenbach S. Recent progress in magnetic fluid research[J]. J Phys,2004(16):1135–1150.
- [40] Scherer C,Figueiredoneto AFM. Ferrofluids: properties and applications [J]. Braz J Phys,2005,35(03):718–727.
- [41] Raj K,Moskowitz B,Casciari R. Advances in ferrofluid technology [J]. J Magn Magn Mater,1995,149(1–2):174–180.
- [42] Holm C,Weis JJ. The structure of ferrofluids: a status report[J]. Curr Opin Colloid In Sci,2005,10:133–140.
- [43] 马来鹏,尹衍升. 磁性液体的研究现状[J]. 四川化工,2005,8(03):16–20.
- [44] Li K,Yang SQ,Li WD, et al. Research on stability improvement of nano-silica on fluid magnetic abrasives[J]. Mechanical Management and Development,2009,24(05):14–15.
- [45] 张再,李唯东. 水基液体磁性磨具复合分散剂配方实验研究[J]. 润滑与密封,2018,43(07):78–82+89.
- [46] 曾鑫龙. 磁性流体抛光研磨机床研制与加工工艺研究[D]. 厦门:厦门大学,2021.
- [47] Widder KJ. Magnetic microspheres:a vehicle for selective targeting of drugs[J]. Pharmacol Ther,1983,20(03):337–395.
- [48] Hong X,Li J,Wang M, et al. Fabrication of magnetic luminescent nanocompositesites by alayer-by-layer self-assembly approach [J]. Chem Mater,2004,16(21):4022–4027.
- [49] Zhang Y,Zhang J. Surface modification of monodisperse magnetite-nanoparticles for improved improved intracellular uptake to breast cancer cells[J]. Journal of Colloid and Interface Science,2005,283(02):352–357.
- [50] 闫君,丁永玲. 磁性荧光复合纳米的研究进展[J]. 综述与述评,2015,147(01):18–25.
- [51] Wang SC,Neoh KG,Kang ET, et al. Her-2-mediated endocytosis of magnetic nanospheres and the implications in cell targeting and particle magnetization[J]. Biomaterials,2008,29(14):2270–2279.
- [52] Arvand M,Sanayeei M,Hemmati S. Label-free electrochemical DNA biosensor for guanine and adenine by ds-DNA/ poly (L-cysteine)/  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles-graphene oxide nanocomposite modified electrode [J]. Biosensors & Bioelectronics,2017,102:70–79.
- [53] 付绒,胡燕燕. 核壳型磁性荧光纳米复合材料制备及其应用研究进展[J]. 化工进展,2019,38(08):3742–3755.
- [54] Singh LP,Singh NP,Srivastava SK. Terbium doped  $\text{SnO}_2$  nanoparticles as white emitters and  $\text{SnO}_2: 5\text{Tb}/\text{Fe}_3\text{O}_4$  magnetic luminescent nanohybrids for hyperthermia application and biocompatibility with Hela cancer cells[J]. Dalton Trans,2015,44(14):6457–6465.

(下转第 10 页)

现以下四个阶段：离子交换、水解、网格分解、Si 和 Al 释放。

TP-AACM 与 OP-AACM 之间的一个重要区别是 Si 和 Al 的释放速度和可用性。在 OP-AACM 中使用的固体二氧化硅源比双组分总可溶性硅酸盐溶液反应更慢<sup>[21]</sup>，正如 Duxson 等<sup>[22]</sup>指出活性 Al 是影响产物性能的重要参数之一，对力学性能、耐酸性、微观结构等具有重要影响。

## 4 讨论

与双组分制备方法相比，单组分制备方式在实际生产应用中更加安全，运输方便，为建筑领域在 OP-AACM 现场应用中的产品开发提供了理论指导。但这项技术尚未得到生产验证，关于 OP-AACM 还有许多潜在应用技术需要进一步探索：①在不牺牲性能和经济效益的情况下选择对环境潜在影响较小的原料，如用赤泥、碳酸钠或氧化钙代替氢氧化钠，用硅灰、稻壳灰等代替硅酸钠。此外，选择二氧化硅和氧化铝源，通过机械力调节原料的粒径调整这些元素的释放速度，从而改变其强度。②在化学成分、水/胶比、固化条件和固化时间等方面对 OP-AACM 进行优化以及将两种方法的机理进行对比，同时对两种方法制备的 AACM 微观组织演变、腐蚀机理等因素进行深度探究。③单组分法在加水的瞬间会大量放热，过快升温对 AACM 产生收缩和孔隙，影响单组分制备的工艺性能，需对适当延长凝固时间做进一步探究。

## 参考文献：

- [1] Andrew R. Global CO<sub>2</sub> emissions from cement production, 1928 – 2018 [J]. Environmental Science Earth System Science Data Discussions, 2019, 11: 1675 – 1710.
- [2] Assi L, Carter K, Deaver EE, et al. Sustainable concrete: building a greener future[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 198: 1641 – 1651.
- [3] De Oliveira LB, De Azevedo ARG, Marvila MT, et al. Durability of geopolymers with industrial waste [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16: 839.
- [4] E. Adesanya, Ohenoja K, Luukkonen T, et al. One-part geopolymer cement from slag and pretreated paper sludge[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 185: 168 – 175.
- [5] Luukkonen T, Abdollahnejad Z, Yliniemi J , et al. One-part alkali-activated materials: a review [J]. Cement and Concrete Research, 2017, 103: 21 – 34.
- [6] Hajimohammadi A, Van Deventer JSJ. Characterisation of one-part geopolymers binders made from fly ash [J]. Waste Biomass Valor, 2017, 8: 225 – 233.
- [7] Abdollahnejad Z, Miraldo S, Pacheco-Torgal F, et al. Cost-efficient one-part alkali-activated mortars with low global warming potential for floor heating systems applications [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2017, 21: 412 – 429.
- [8] Matalkah F, Xu L, Wu W , et al. Mechanochemical synthesis of one-part alkali aluminosilicate hydraulic cement [J]. Materials and Structures, 2017, 50: 96 – 100.
- [9] Rakesh Kumar Reddy R, Yaragal SC, Srinivasa AS. One-part eco-friendly alkali-activated concrete – an innovative sustainable alternative [J]. Construction and Building Materials, 2023, 08: 133741.
- [10] Singh B, Ishwarya G, Gupta M, et al. Geopolymer concrete: a review of some recent developments[J]. Construction and Building Materials, 2015, 85: 78 – 90.
- [11] Taha B, Nounu G. Using lithium nitrate and pozzolanic glass powder in concrete as ASR suppressors [J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30: 497 – 505.
- [12] Ma C, Zhao B, Guo S, et al. Properties and characterization of green one-part geopolymer activated by composite activators[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 220: 188 – 199.
- [13] 曹辉林. 减水剂类型对赤泥—矿渣基地聚物注浆材料性能的影响及机理研究[J]. 金属矿山, 2022(02):231 – 236.
- [14] Qin Y, Qu C, Ma C, et al. One-part alkali-activated materials: state of the art and perspectives[J]. Polymers, 2022, 14: 5046.
- [15] 陈海明,张亚东,吴鹏,等. 玄武岩纤维对单组分碱激发矿渣粉砂浆性能的影响[J]. 建井技术, 2023, 44(06):46 – 50.
- [16] Myers RJ, Bernal SA, Provis JL. A thermodynamic model for C-(N-)A-S-H gel: CNASH\_ss. Derivation and validation[J]. Cement and Concrete Research, 2014, 66: 27 – 47.
- [17] Oderji SY, Chen B, Shakya C, et al. Influence of superplasticizers and retarders on the workability and strength of one-part alkali-activated fly ash/slag binders cured at room temperature [J]. Construction and Building Materials, 2019, 229: 116891.
- [18] Coppola L, Coffetti D, Crotti E, et al. The durability of one-part alkali-activated slag-based mortars in different environments [J]. Sustainability, 2020, 12: 3561.
- [19] 王远达. 机械力化学制备单组分碱激发材料抗硫酸盐侵蚀性能研究[D]. 福州:福州大学,2021.
- [20] Matalkah F, Xu L, Wu W , et al. Mechanochemical synthesis of one-part alkali aluminosilicate hydraulic cement [J]. Materials and Structure, 2017, 50: 97.
- [21] Hajimohammadi A, Provis JL, van Deventer JSJ. The effect of silica availability on the mechanism of geopolymerisation [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41: 210 – 216.
- [22] Duxson P, Provis JL. Designing precursors for geopolymer cements[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2008, 91: 3864 – 3869.

(上接第 7 页)

- [55] 韩世达,崔红超. 磁性液体制备方法及几类特种磁性液体简介[J]. 功能材料,2021,52(10):10061 – 10068.
- [56] 陈辉军. 磁性纳米颗粒及磁性流体的制备与性能研究[D]. 苏州:苏州大学,2012.
- [57] 封士彩. 纳米磁性流体应用的研究现状及发展[J]. 科技与创新,

2017(21):3 – 7.

- [58] 韩会,李德才. 磁流体对技术的研究现状与发展方向[J]. 机械工程师,2007(02):25 – 27.
- [59] 武倩,刘慧勇. 纳米磁性流体的制备与应用进展[J]. 中国粉体技术,2018,24(05):13 – 19.
- [60] 巨婷婷,李晓东. 磁性纳米复合材料的应用研究进展[J]. 应用化工,2022,51(04):1202 – 1206.