DOI：10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202602002

磁流变液的核心性能与应用研究综述

桑媛园，冯永保*，张艺萱，韩小霞，邓宜琳
（火箭军工程大学，西安 710025）

摘　要：磁流变液作为一种典型的智能可控材料，具有响应速度快、力学性能优异、控制方式简便等优势，在工程领域具有广泛的应用前景。本文系统梳理了近年来国内外有关磁流变液的研究成果。首先，对磁流变液的组成成分进行深入剖析；其次，着重阐述了磁流变液的稳定性、磁特性以及流变性能，并深入分析了其中需重点解决的沉降分层、温度适应性和剪切稀化等问题；最后，总结了磁流变液在减振缓冲、精密加工等工程中的典型应用，进一步提出了材料制备工艺优化和器件设计升级等未来发展方向。本文可为磁流变液的配方优化、性能调控与工程化应用提供参考。

关键词：磁流变液；稳定性；磁特性；流变性；减振缓冲；精密加工
中图分类号：TB381　　**文献标志码**：A　　**开放科学标识码**（OSID）：
文章编号：2097-2741（2026）02-0017-15

听语音　聊科研　与作者互动

磁流变液是一种将磁性颗粒混合并均匀分散在非磁性基载液中的智能材料[1]。在无磁场作用时，磁流变液呈现出牛顿流体的典型特征，能够自由流动；一旦施加磁场，材料中的磁性颗粒便会在数毫秒内迅速定向排列成链状结构，形成高黏度类固体状态；撤去磁场后，磁流变液又可迅速恢复其原有的流动特性[2-3]。1948 年，美国学者 Rabinow[4]首次发现磁流变效应，通过将铁磁性颗粒均匀分散于基础油中设计出基于磁流变液的电磁控制流体离合器，开启了磁流变液的工程应用探索。此后数十年研究中，磁流变液在多元应用场景下的稳定性、流变特性、动态响应速度、精准调控精度和复杂环境适应性[5]等关键性能上都有了显著提升，在车辆减振缓冲[6-7]、机械精密抛光[8-9]、生物医疗康复[10-11]等方面具有广泛的应用前景。

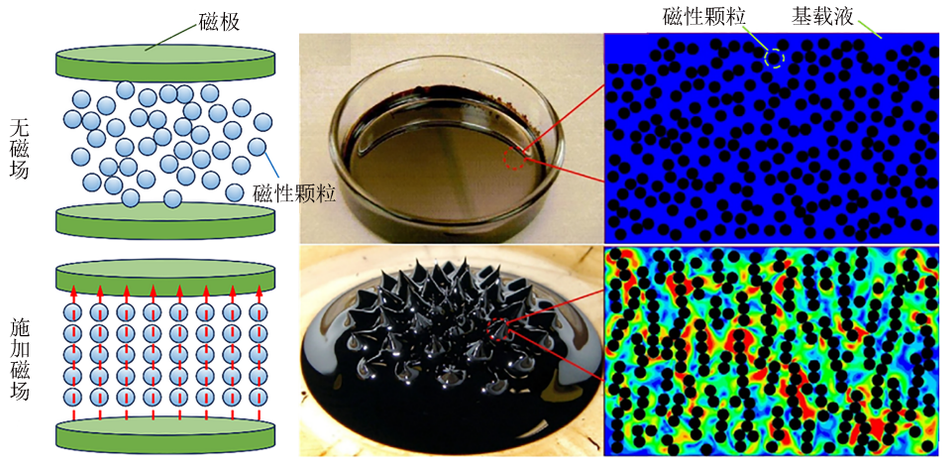
本文围绕磁流变液这一智能材料，系统分析了磁流变液的组成成分和基本特性，对磁流变液在减振缓冲和精密加工领域的应用进行总结和评述，并结合材料配方与制备工艺优化、器件设计升级与工程化应用拓展等方向，对未来工程应用提出发展建议。

1　磁流变液的关键组成研究现状

磁流变液主要由磁性颗粒、基载液和添加剂构成[1]。其中，磁性颗粒作为磁流变效应的功能核心，在磁场作用下可迅速响应产生磁偶极矩，并沿磁场方向有序排列；基载液作为材料的承载介质，能为磁性颗粒提供稳定的分散环境，使磁流变液在无磁场作用时具有普通牛顿流体的流动性，而当外部磁场作用时，基载液会随着磁性颗粒的排列变化，与磁性颗粒共同体现出非牛顿流体的特征；添加剂作为辅助功能组分,可通过特定的化学或物理作用优化磁流变液的性能。因此，磁性颗粒、基载液、添加剂的材料选择、成分配比以及制备工艺，共同决定了磁流变液的性能[3]，也是影响其磁响应速度、沉降稳定性与流变性的关键因素。施加磁场前后的磁流变液对比如图 1 所示。

收稿日期：2025-10-17　　**修回日期**：2025-12-02　　**录用日期**：2026-01-09
基金项目：国家自然科学基金（52472464）；国家自然科学基金青年科学基金（52505076）
第一作者：桑媛园（1995—），女，讲师，博士，主要从事磁流变智能材料研究。E-mail：809223666@qq.com
***通信作者**：冯永保（1971—），男，教授，主要从事液压检测技术研究。E-mail：fyb1213@sina.com

引用格式：桑媛园，冯永保，张艺萱，等. 磁流变液的核心性能与应用研究综述[J]. 火箭军工程大学学报，2026，40（2）：17-31.
SANG Yuanyuan，FENG Yongbao，ZHANG Yixuan，et al. Review on the core properties and applications of magnetorheological fluids[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering，2026，40（2）：17-31.



（a）原理示意 （b）实物 （c）微观结构示意[12]

图 1 施加磁场前后的磁流变液

Fig. 1 Magnetorheological fluids before and after applying a magnetic field

磁流变液的组成成分及特点如表 1 所示。

表 1 磁流变液的组成成分及特点

Table 1 Composition and characteristics of magnetorheological fluids

组成成分	选材	特点
磁性颗粒	羰基铁颗粒、铁钴合金颗粒、铁氧体颗粒等	具有高磁导率、低矫顽力，在磁场作用下能快速产生磁偶极矩并沿磁场方向有序排列，是磁流变效应的核心触发物质。
基载液	硅油、矿物油、合成油、水等	为磁性颗粒提供稳定的分散环境，基于黏度、稳定性以及与其他组分的相容性。
添加剂	表面活性剂、触变剂、纳米颗粒	增加黏度以降低磁性颗粒的沉降以及减少磁性颗粒间的团聚，提升磁流变液长期储存稳定性，优化其综合性能。

1.1 磁性颗粒

磁性颗粒是磁流变液中实现智能响应的核心功能组分，其力学性能直接决定了磁流变效应的响应灵敏度。目前，主流的磁性颗粒材料以铁系金属及合金为主，如羰基铁颗粒（CI）、Fe_3O_4、Fe-Co 或 Fe-Ni 合金颗粒等[13-14]。这类材料具有高饱和磁化强度与低矫顽力的特性，既能在外部磁场作用下快速形成链状、柱状等有序结构，产生显著的剪切屈服强度跃升，又能在磁场移除后迅速恢复至分散状态，确保磁流变液的可逆性与循环使用性能。磁流变液常用磁性颗粒的分类如表 2 所示，其中，羰基铁因其较高的饱和磁化强度，在磁流变材料中应用最为广泛。此外，部分研究还尝试采用复合磁性颗粒，如表面包覆磁性层的二氧化硅颗粒[15]、磁性纳米片[16]等，其原理是通过调控颗粒的成分与微观结构，平衡磁流变液的磁响应速度与长期稳定性，拓展其在复杂工况下的应用潜力。

表 2 磁流变液常用磁性颗粒类型、成分及特点对比

Table 2 Comparison of commonly used magnetic particle types, composition, and characteristics of magnetorheological fluids

磁性颗粒类型	核心成分	特点
羰基铁粉（CI）	Fe	饱和磁化强度高，磁场作用下剪切屈服强度高，响应速度快，制备工艺成熟，密度较大，易沉降。
四氧化三铁	Fe_3O_4	化学稳定性较好，可通过化学共沉淀法制备，适合中低性能需求场景。
羟基铁粉（HI）	Fe（表面含-OH）	表面羟基易与极性载体或添加剂作用，分散性优于普通铁粉。
铁钴合金	Fe-Co（Co 含量 10%～50%）	饱和磁化强度高，磁滞损耗小，磁响应灵敏度高，能匹配精密控制的高频、高精度需求，制备成本较高。
铁镍合金	Fe-Ni（Ni 含量 30%～80%）	饱和磁化强度低，但磁导率高，矫顽力低，能适应高频磁场下的快速磁化和退磁循环，镍含量高时易氧化。

磁性颗粒的尺寸、形貌及表面改性状态对磁流变液的力学性能具有至关重要的影响。从尺寸维度来看，1～10 μm 的微米级颗粒的磁化强度高、磁偶极相互作用强，是当前工业应用中最广泛的选择，但其密度远高于矿物油、硅油等基液，易因重力作用发生沉降分层；而 10～100 nm 的纳米

级磁性颗粒虽分散稳定性更优，却存在饱和磁化强度较低、磁流变效应较弱的问题。近年来，微纳复合颗粒[17-18]的设计成为研究热点，通过协同两种尺寸颗粒的优势，可有效改善磁流变液的稳定性与磁致流变效率。在形貌与表面改性方面，球形颗粒虽分散性好，但颗粒间接触面积较小，易发生沉降，且材料的动态剪切模量偏低；而片状、针状颗粒可通过增大与载液间的接触面积减缓沉降，利用表面接枝偶联剂、包覆高分子聚合物等方式[19-25]，可显著降低颗粒间的团聚，改善其在基液中的润湿性与分散均匀性，为磁流变液的长期稳定循环利用提供保障。然而，颗粒形貌表面改性的效果不佳，复合颗粒制备工艺复杂、成本较高，如何兼顾磁响应速度与长期稳定性依然是当前的核心挑战。

1.2 基载液

基载液作为磁性颗粒的分散介质，其物理化学性质将直接影响颗粒的分散状态、抗沉降能力、温度稳定性以及与其他材料的相容性。磁流变液的基载液可分为水基和油基两类。对于水基磁流变液，通过引入聚乙烯醇PVA、聚丙烯酰胺PAM等亲水性聚合物调节基液黏度，并通过羟基、酰胺基与颗粒表面亲水基团形成氢键网络。而油基磁流变液则可通过添加脂肪酸、有机胺等极性添加剂提升基液极性，与油酸包覆等颗粒表面疏水改性层形成氢键或偶极作用。烃类油具有优异的润滑性和耐久性[26-27]，由矿物油制成的硅油可用于获得较宽的温度范围和与其他系统组分[28-29]的相容性。与此同时，为了提升材料的性能，Liu等[30]还采用磁性液体作为基载液，增强了磁流变液的剪切屈服应力。

为了提升磁流变液的性能，研究人员对基载体的形态展开优化。从流体形式的磁流变液转变为研究介于流体和固体之间的磁流变脂材料[31]，再到固体形式的磁流变弹性体[32-33]。在此过程中，基载体的材质从传统的水或油体系，升级为脂类和橡胶类弹性体。通过将磁性颗粒嵌入固体材料中，有效解决了传统磁流体体系中磁性颗粒易沉降的技术难题，使材料稳定性得到显著提升。不同基载体形态磁流变材料的表观特征不同，其工程应用范围也不同，如磁流变弹性体因其固体状态特点在密封件的应用中展现出独特优势。然而，该材料需在其屈服阶段前工作，一旦达到屈服极限，材料中磁性颗粒形成的链状有序结构容易被破坏，影响其性能表现。

1.3 添加剂

在磁流变液中加入添加剂，能够防止颗粒沉降、减少颗粒间腐蚀磨损和避免颗粒氧化，从而增强磁流变液的长期稳定性。较为常用的添加剂主要有表面活性剂、触变剂和纳米颗粒等。

离子型表面活性剂溶于水后，亲水基团可使吸附于颗粒表面的表面活性剂分子携带同种电荷，进而在颗粒表面形成双电层结构，相邻颗粒因带同种电荷产生静电排斥力，有效阻止颗粒相互靠近和聚结，从而保持分散状态[34]。相较于水基磁流变液，当载液为油时，固体颗粒具有较高的表面势能，颗粒分散难度显著增加[35]，但油会随着时间的推移发生聚合降解，同时也会促进细菌生长，导致磁流变液性能劣化。当以水为载体时，非离子型表面活性剂因在溶液中为非离子状态，不仅稳定性高，且不易受pH值的影响，因而具有更广泛的适用性[36]。

触变剂可以使非固态磁流变材料在静态或低剪切速率下形成网状结构，这种网络将固相颗粒机械地“捕获”在网格中，既能有效阻止颗粒因重力作用发生沉降，又能抑制其因布朗运动发生聚集[37]。添加触变剂后，材料呈现出高黏度或凝胶状特性。在高剪切力作用下，网络结构被破坏，黏度迅速降低，当剪切力移除后结构又可逐渐恢复。通过这种动态可逆的物理交联机制，触变剂能够抑制体系中颗粒的沉降或聚集，从而提升磁流变材料的稳定性。

表面活性剂和触变剂的添加制备方法简单，在低剪切速率下对材料的抗沉降稳定性提升效果明显，且对材料的磁流变特性的影响不大。但这两种添加剂的加入会使得磁流变液的沉淀物变得更加致密，导致其再分散稳定性变差。

粒径为1～100 nm的纳米颗粒通常具有高比表面积、量子效应和表面活性等特性，也常作为提升磁流变材料稳定性的固体添加剂。纳米颗粒吸附在固相颗粒表面，形成物理屏障，阻止颗粒因布朗运动发生直接接触和聚结[38]，可以减弱大颗粒间的短程吸引力作用，从而形成软沉降状态。纳米级颗粒聚集在较大颗粒周围形成“云”结构，以防止大颗粒表面相互吸引接触，提高其沉降和再分散稳定性能[39]；同时，在磁场作用下，纳米颗粒填充孔隙，有助于形成更规则和稳定的磁链结构，进而提高屈服应力实现稳定性和流变性的平衡[16]，应用于工程实际抛光或减振效果更佳。相比传统添加剂，纳米颗粒形成的界面层更牢固，

可耐受高温、高盐等恶劣条件。

2 磁流变液的稳定性

在理想状态下，磁流变材料中的磁性颗粒会均匀分布于基载体中。但是，在磁流变液中，由于磁性颗粒的密度显著高于基载液，颗粒在悬浮液中极易发生沉降。当磁流变液静置时，在重力作用下会逐渐形成浓度梯度不同的多个分区，沉降问题便是影响磁流变材料实际应用的关键因素[40]。与此同时，磁流变材料在沉积区内会发生团聚并趋于板结，导致磁流变器件重新启动时难以恢复额定性能，甚至出现功能失效。因此，材料的再分散性能成为其实际应用的另一核心指标[2]。随着磁流变材料在汽车等高端领域的广泛应用，探究磁流变器件的正常工作温度范围，以及其在高低温环境下的性能表现，已成为当前研究的热点方向。

2.1 沉降稳定性

因基载液和固相颗粒之间存在着较大的密度差，颗粒在重力的作用下易发生沉降，导致磁流变液出现分层现象。因此，沉降稳定性是评估磁流变液稳定性能的一个关键指标。沉降率[41]是表征磁流变液沉降稳定性的重要参数，将试样注入试管中密封，测得溶液初始高度为 h_1。溶液静置后，每隔一段时间记录上层清液的高度 h_2，可得到沉降率 $V=h_2/h_1$。一般采用目测观察法[42]和多重光散射法[43]来测量其沉降率。目测观察法即用标尺来测量溶液的高度变化，具有操作快速简便的特点，但测量精度受人为判断影响较大。多重光散射法是一种通过分析光在样品中多次散射后的信号变化，进而研究磁流变材料的粒径分布和浓度的检测技术。借助 Turbisca 光学法稳定性分析仪可实现对样品的背向散射光和透射光强度的实时监测，通过计算颗粒的迁移速率和沉淀层的厚度等参数来获得沉降率指标。此外，利用多重光散射法还可实现对材料沉降行为的早期预测，为磁流变材料稳定性评估提供更全面的动态数据支持。

磁流变液的沉降稳定性主要取决于基载液黏度、磁性颗粒限制作用及颗粒与载液密度差三者的协同效应。对于水或油类基载液而言，其较低的黏度难以有效抵消磁性颗粒在重力作用下的沉降趋势，导致磁流变液在长期静态放置过程中易出现显著的分层现象与压实沉降问题。图 2 为磁流变液沉降过程的目视观测结果，该体系最终沉降率约为 67%，在静态放置 8 662 h 后，其沉降线下降幅度达 54.2 mm[44]。

2.2 再分散性

固相颗粒在相互接触过程中，在范德华力和静磁力的作用下易相互吸引，发生团聚。团聚使得颗粒尺寸增大，更易发生沉降。随着时间的增长，团聚和沉降后的固相颗粒结块成团，很难再均匀地分散在基载体中，这将直接影响材料的力学性能，进而影响磁流变器件的正常使用。因此，除沉降稳定性之外，颗粒间的再分散稳定性也是磁流变材料稳定性能的关键指标[45]。磁流变材料的再分散性是指其沉降后，在进行某种机械分散后恢复至初始浓度分布的能力。固相颗粒发生沉降后，传统的方法是使用机械搅拌和超声振荡的

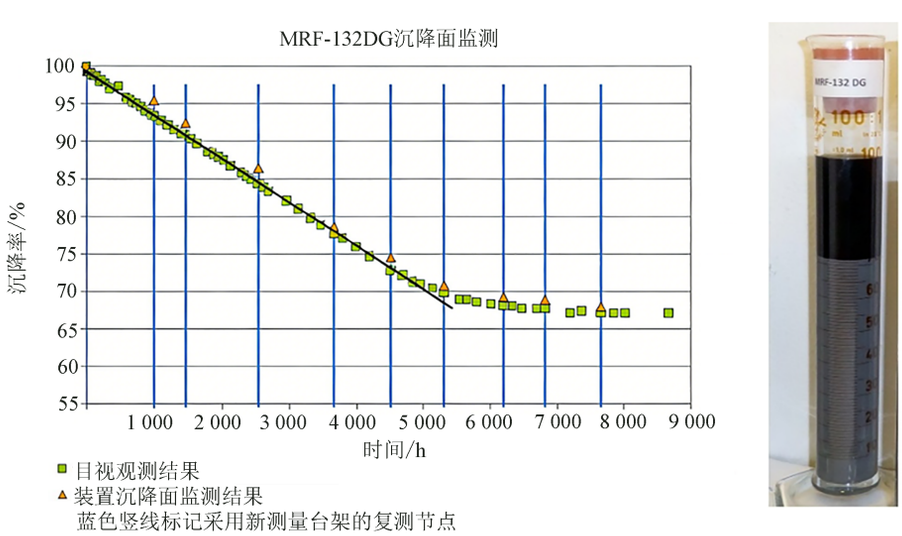


图 2 利用目测观察法测量磁流变液的沉降率[44]

Fig. 2 Measurement of the sedimentation rate of a magnetorheological fluid using the visual observation method[44]

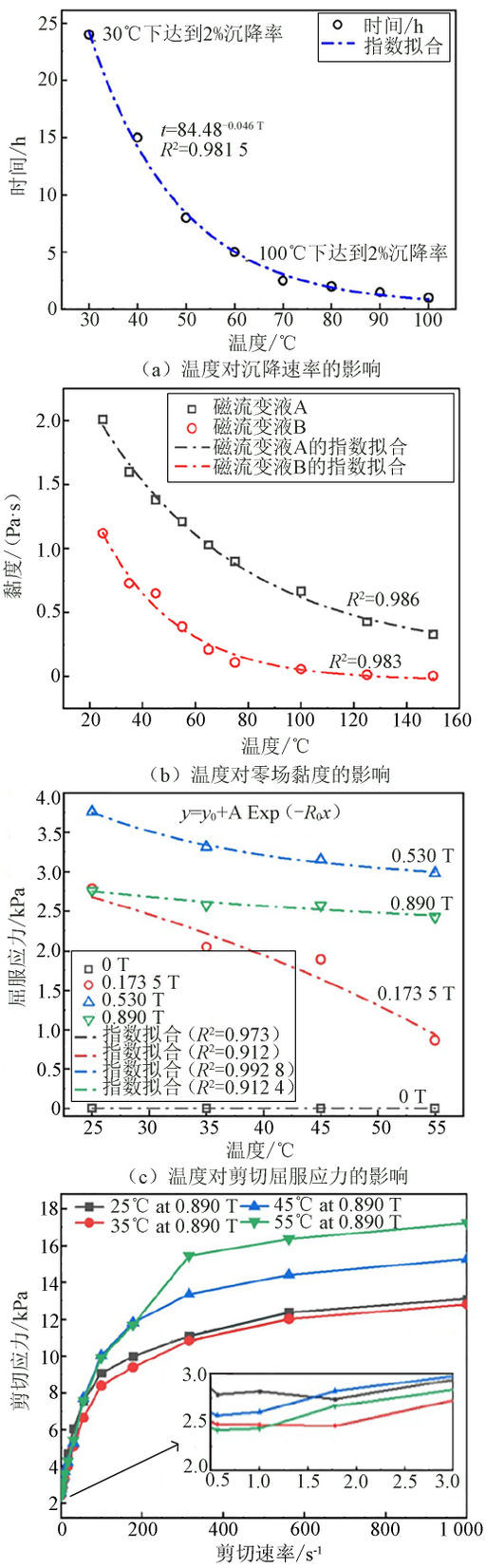
方法将团聚颗粒进行再次分散。在大部分的应用场景中可通过器件本身的运动恢复材料的均匀分散状态，例如，磁流变制动器中制动盘的剪切作用和磁流变阻尼器中活塞的往复运动等。通常情况下，使用固定时间段内再分散后样品的沉降率与初始沉降率的比值作为再分散性系数[11]，来表征再分散稳定性。

2.3　温度稳定性

在工程实际应用中，极端高温或低温环境时常存在。磁流变器件在工作过程中会出现发热现象，随着温度的升高，磁流变材料内部颗粒的运动加剧，导致在磁场作用下材料内部链段强度减弱，出现“剪切稀化”现象，材料的剪切屈服应力减小，磁流变效应也会有不同程度的降低[46]，高温还会导致磁性颗粒被氧化。同时，在高温状态下，基载体对磁性颗粒的支撑力减弱，还会导致磁流变材料的沉降稳定性降低[47-48]。

另一方面，在低温状态下，磁流变液的黏度会急剧升高，刚度显著增大，导致其动态响应速度大幅下降[49]，这一特性极大地限制了磁流变液在减振缓冲等领域的应用。具体而言，磁流变器件在低温条件下会丧失原有工作能力，如磁流变减振器在低温下会因阻尼特性消失而表现出刚度特性。针对这一问题，梁冠群等[50]提出一种新型磁流变减振器变温参数化双曲滞回模型，该模型不仅可以进行温度补偿，还可有效提升电流控制精度。齐晓杰等[51]基于低温试验舱设计了一套磁流变缓速制动装置低温运行性能测试系统，测试了低温时磁流变缓速制动装置的启动稳定性。试验表明，低温环境下装置的启动冲击会对其使用寿命产生显著影响。目前，关于磁流变材料低温失效机制的研究较为有限，未来可考虑从材料成分优化和外部激励升温两个方面进行研究。

温度对磁流变液性能影响的变化曲线如图3所示。在沉降稳定性方面，30～100 ℃内达到2%沉降率的时间随温度升高呈指数衰减，高温会显著加速颗粒的沉降，导致体系内稳定性下降；磁流变液的零场黏度随温度升高整体呈下降趋势，在较宽温度区间内仍能保持良好的温度响应特性。在流变性能方面，磁场诱导的屈服应力随温度升高呈现不同程度的衰减，弱场下变化更为明显，而在0.890 T强场及中高剪切速率下，适度升温可明显提高剪切应力，使磁流变液展现出更强的剪切响应能力。综合现有研究可知，水基磁流变液的热稳定性易受基载液高温蒸发或低温冻结影响



（a）温度对沉降速率的影响

（b）温度对零场黏度的影响

（c）温度对剪切屈服应力的影响

（d）不同温度下剪切速率与剪切应力的关系特性

图3　磁流变液性能随温度变化的多维度特性分析[40]

Fig. 3　Multidimensional characteristic analysis of magnetorheological fluid properties with temperature variations[40]

导致性能劣化，而油基磁流变液具有更宽的适用温度范围，但过高温度仍会因为表面活性剂降解引发颗粒团聚，从而导致体系稳定性下降[49]。

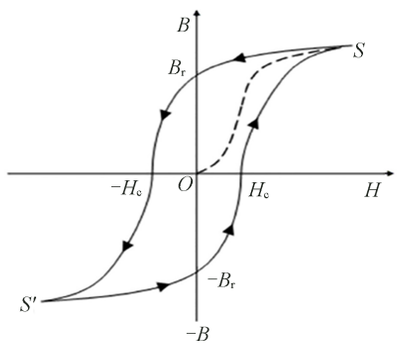
3 磁流变液的磁特性

磁流变液的磁特性会随着外加磁场强度的变化呈现出不同的现象，具体可分为3个阶段：当外加磁场强度较低时，磁流变液表现出近似线性特性，此时，其磁化强度M与外加磁场强度H之间呈正比关系，可用公式$M=\chi_0 H$来描述[52]，式中的χ_0表示材料的磁化率；随着外加磁场强度的增大，磁感应强度会快速上升，材料逐步达到磁饱和状态，这一阶段可用公式$M=(\mu_r-1)H$来表示，式中的μ_r为相对磁导率，需要注意的是，μ_r会受到外加磁场强度和磁流变液中颗粒体积分数的影响；当外加磁场进一步增大到一定程度后，磁流变液的磁化强度达到完全饱和状态，磁特性不再随着外加磁场强度的增大而发生显著变化。

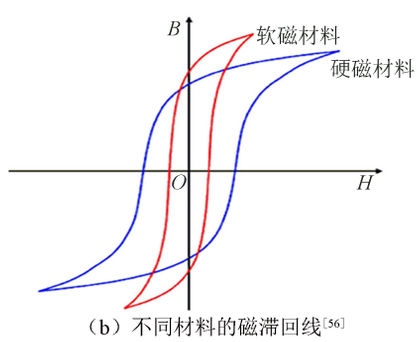
磁性颗粒的含量和粒径与材料的磁化强度呈线性关系[53]。随着铁颗粒体积分数和尺寸的增大，磁流变液的剪切应力也随之增大，与使用单一粒径颗粒相比，使用不同粒径的磁性颗粒可以表现出更好的效果。

磁流变液的磁特性还可以用磁滞回线（B-H曲线）[54]来表示，如图4（a）所示。当施加一个正向的外加磁场时，随着磁场强度H的增大，磁性颗粒的磁通密度B增强，逐渐达到饱和状态（S点），当H减弱趋近于0时，磁通密度不会降为0，而是降至B_r点，B_r对应的就是剩磁；当施加反向的外加磁场H时，曲线向$-H_c$移动，直至材料的磁通密度B降为0，在负方向上，随着H的增大，材料会达到磁饱和，到S'点，这时候磁性在负方向上增强。反过来，当H回到0时，曲线从S'点移到$-B_r$点，当H变为正值，曲线会向H_c移动，H继续增大，曲线回到S点，完成一个循环。磁滞回线的形状取决于材料的类型，软磁材料更容易被磁化，磁滞回线较窄，磁滞回线所围成的面积与材料产生的最大磁密度有关，如图4（b）所示。

当前磁流变液磁特性优化的核心研究热点集中于高饱和磁化强度、低矫顽力磁性颗粒的筛选与适配。高饱和磁化强度可使材料在合理磁场强度下快速达到磁饱和，提升磁流变效应的响应幅值与调控上限，而低矫顽力能减少磁滞损耗，确保磁场切换时磁特性无残留、响应更敏捷，二者共同决定了磁流变液在动态工况下的调控精度与能量效率。因此，未来研究需进一步聚焦颗粒表面改性、多元复合颗粒设计等方向，通过优化磁性颗粒与基液的相容性及磁学协同效应，实现高磁性能与良好稳定性的兼顾，为复杂工况下磁流变器件的性能突破提供材料基础。



（a）磁滞回线原理[55]



（b）不同材料的磁滞回线[56]

图 4 磁滞回线

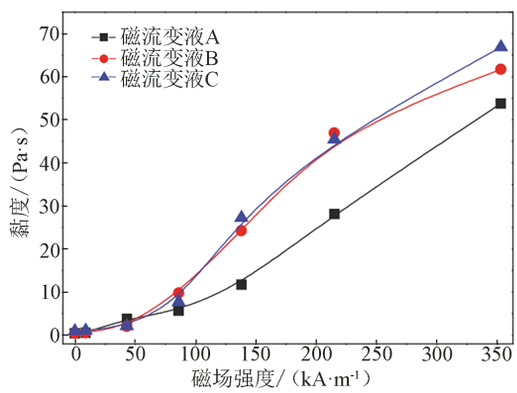
Fig. 4 Hysteresis loops

4 磁流变液的流变性

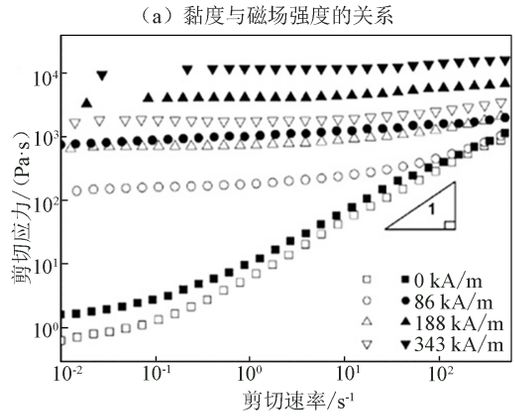
在外部磁场的作用下，磁流变液中的磁性颗粒会发生定向聚集并形成链状结构，这一过程使其表观黏度迅速增大，磁流变液失去原有的流动性，同时体系产生的剪切应力也相应提升。随着磁场强度的不断增加，磁流变液最终会转变为类固体状态，而当磁场强度达到磁性颗粒的饱和磁化强度时，磁流变液中颗粒结构趋于稳定，其黏度和剪切屈服应力也进入动态平衡阶段；撤去磁场后，磁流变液又可快速变为具有良好流动性的液体状态[57]。

磁流变液的动态流变力学性能是其实现智能调控功能的核心基础，也是当前磁流变材料领域的研究焦点之一。该性能通常借助流变仪进行系统表征，如图5所示[58-60]，相关试验结果可清晰揭示其流变特性规律。图5（a）为磁流变液黏度与磁场强度的关系，其中，磁流变液A为添加硬脂

酸铝的基础配方，磁流变液B为添加复合聚合物型黏度调节剂的稳定化配方，磁流变液C为引入铁磁流体纳米颗粒作为载体的改性配方。无外磁场作用时，3种磁流变液的黏度维持在低水平基线，呈现典型的流体流动特性；随着磁场强度逐步提升，磁性颗粒的定向聚集与链状结构的渐进致密化，驱动体系黏度呈非线性急剧升高，且磁场强度越高，黏度的增幅梯度越显著；而当磁场强度趋近磁性颗粒的饱和磁化强度阈值后，颗粒聚集结构趋于热力学稳定状态，黏度的增长速率逐渐趋缓并进入动态平衡区间，这一变化规律与磁致颗粒聚集体的演化机制高度契合。



（a）黏度与磁场强度的关系



（b）磁场作用下剪切应力与剪切速率的关系

图5 流变特性曲线[58-60]

Fig. 5 Rheological characteristic curves[58-60]

图5（b）为不同磁场强度条件下，纯羰基铁（CI）悬浮液与羰基铁/聚苯乙烯（CI/PS）复合悬浮液的流变响应差异。其中，实心数据点代表纯CI悬浮液，空心数据点代表CI/PS复合悬浮液。在低剪切速率区间，两类磁流变体系的屈服应力随磁场强度的升高显著增大，体现了磁致链状结构的形成与强化过程。与纯CI悬浮液相比，CI/PS复合悬浮液在相同磁场下的剪切屈服应力明显降低，这是由于聚苯乙烯非磁性层削弱了羰基铁颗粒间的直接磁相互作用，导致磁致结构的强度下降。

当前，磁流变液流变特性的研究热点集中于剪切屈服应力提升与零场黏度控制，以及模型的精细化优化。一方面，针对传统提升屈服应力的方法易导致零场黏度过高的问题，研究聚焦于双粒度颗粒体系构建、高饱和磁化强度颗粒选型、磁性基载液应用及磁电多场协同调控等创新路径[61-63]，同时规避高剪切速率下的“剪切稀化”现象。另一方面，从基础模型出发，向更贴合实际流变过程的精细化模型推进，通过引入动态参数精准描述颗粒链的破坏与重构机制，为不同工况下磁流变器件的设计优化提供更可靠的理论支撑。

5 磁流变液的典型应用

磁流变液是一种典型的智能流体材料，利用其对外加磁场快速、可逆的响应特性，可以精准控制磁流变液的黏度、剪切屈服应力等关键力学参数。这一独特性能使其在减振缓冲和精密加工等工程技术领域展现出不可替代的应用潜力[64-65]。从流变学作用机制来看，磁流变液的基本工作模式可分为流动模式、剪切模式与挤压模式3种，不同模式对应着磁流变液在器件中的受力状态与能量传递方式差异，其结构原理与应用场景也各具特点。

在流动模式下，磁流变液依赖于器件内极板两端的压力差驱动流动，通过磁场调控流体流动阻力来实现性能的调节。其核心特征是磁场方向与流体流动方向垂直，磁性颗粒在磁场中聚集成链状或柱状结构，直接阻碍流体运动，进而改变系统的阻尼或流量特性[66]。典型应用场景包括磁流变液阻尼器、磁流变阀等，在车辆悬架、建筑减振等领域的大位移调控中优势显著。

在剪切模式下，磁场方向与材料运动方向垂直，磁流变液在两相对运动部件之间靠自身黏性力与磁场下的屈服应力来传递动力。无磁场时，材料呈低黏度状态，部件间摩擦阻力极小；施加磁场后，磁性颗粒快速形成跨接两部件的链状结构，剪切屈服应力随磁场强度线性提升，从而产生可控的剪切阻力[67]。该模式下磁流变液响应速度快，调控范围广，广泛应用于离合器、制动器、锁紧装置、脱钩安全装置等场景。

在挤压模式下，两平行极板对磁流变液间隙进行挤压或拉伸，磁性颗粒在磁场中形成的链状结构随极板运动发生拉伸、断裂与重组，进而产

生可控的挤压力。此时磁场方向与磁流变液的挤压变形方向平行[68]。因磁流变液的可压缩性极差，且能量密度较高，适用于微小运动、大阻尼力场合，常用于大型设备吸收冲击载荷等场景。

5.1 减振缓冲

在外加磁场的作用下，磁性颗粒快速聚集呈链状结构，剪切屈服应力随磁场强度线性提升，进而产生可控阻尼力。在车辆悬挂系统的振动控制研究领域，随着智能悬架技术的发展，传统的被动悬架逐渐被减振效果更佳的主动悬架和能耗较小的半主动悬架所代替。主动悬架由传感器、控制器以及由反馈信号控制的主动执行器、弹簧等组成。主动悬架系统的力执行器能够向系统增加能量或从系统耗散能量。但由于其结构复杂、成本高、能耗大等原因，在车辆工程领域仍未得到广泛应用[69]。半主动悬架系统结构组成简单，工作过程功耗小、失效安全性高，成为目前车辆悬架系统中颇具应用前景的减振方式。磁流变阻尼器作为半主动悬架系统的执行器件，可通过改变通入阻尼器内部电磁线圈电流的大小实时调节阻尼力来抑制车身振动，成为改善车辆动力学性能的关键。

特种车辆因其工作环境复杂多变，常常需要在高低起伏不平的越野路面高速行驶。一方面，由于载员载物的变化，特种车辆的载荷会在短时间内发生较大的改变；另一方面，某些载有武器的特种车辆在工作时，车体具有较小的垂直、俯仰和侧倾振动等特点，但其对车身平稳性的要求更高。因此，特种车辆的行驶安全性、平顺性及操纵稳定性是车辆运载性能的关键指标[70]。悬架系统是车辆的重要组成部分，起着弹性支承车体、缓和并衰减车辆行驶时路面不平引起的车体振动、以保证车辆平稳行驶的作用。1993 年，Hoogterp 等[71]首次将半主动悬架技术引入军用车辆领域，通过试验和仿真证明，搭载磁流变减振器半悬挂系统的 M2Bradley 步兵战车可具备与 M1A1Abrams 主战坦克相当的机动性。此后，美国陆军坦克汽车研究开发工程中心（TARDEC）和 Rod Millen 特种车辆公司（RMSV）展开合作，共同研发出基于磁流变半主动悬挂系统的“悍马”军用越野车[72]，由美国陆军 Yuma 试验场测试得出，在各种路况条件下，该车的行驶稳定性显著提升，极限行驶速度较原型提高了 35%。孙露等[73]针对特种车辆行驶舒适性提升的需求，基于多体系统传递矩阵法，建立了特种车辆被动与半主动悬架系统动力学模型，采用天棚阻尼控制策略构建了基于簧载质量速度的半主动悬架负反馈控制方法；通过频域和时域响应特性分析与被动控制对比，验证了该策略能有效改善车辆振动，提升行驶舒适性与操纵稳定性，同时指出天棚阻尼系数需结合性能指标进一步进行优化。杨森[74]针对特种车辆面临的振动与爆炸冲击双重问题，提出了基本 RC 算子磁滞非线性模型及前馈跟踪控制策略，用以精确控制磁流变能量吸收器的阻尼力，建立了包含坐姿人体四自由度集中参数模型的座椅悬架动力学模型，进而设计了兼顾振动减振与冲击缓冲的混合控制器及切换单元，实现了两种控制模式的自适应切换，相比单一振动控制，进一步拓展了磁流变悬架的适用场景。Wang 等[75]建立了旋转叶片磁流变阻尼器的力学、等效磁路及等效电路多场模型，基于 NSGA-II 算法开展多目标优化，通过瞬态电磁场分析与力学性能、响应时间试验验证，最终使优化后的阻尼器在输出扭矩、动态范围及响应能力上显著优于初始模型及以往研究中的同类阻尼器。Majdoub 等[76]针对全车辆半主动悬架的非线性控制难题，采用非线性 Bouc-Wen 模型表征磁流变阻尼器的磁滞特性，设计了 4 个观测器在线估计磁滞内部状态变量，构建了适配全车辆七自由度模型（垂向、俯仰、侧倾及四车轮垂直运动）的自适应状态反馈控制器，同时通过参数自适应律来补偿系统参数不确定性，进一步提升了磁流变悬架控制的工程适配性与鲁棒性。甄亮等[77]以特种车辆悬架系统为研究对象，深入分析了流动模式和剪切模式下阻尼力的产生机制，设计出一款满足悬架系统减振需求的磁流变阻尼器，为特种车辆的行驶性能优化提供了硬件支撑。从纵向发展来看，磁流变悬架系统的研究方法从单一控制策略逐渐转向多模型融合、多算法协同，性能需求从基础减振拓展到高扭矩、宽动态范围、快速响应及多工况适配的综合指标，不断贴近实际工程应用的复杂需求。

在武器缓冲装置领域，Hmadian 等[78]基于磁流变阻尼器设计出一款前冲炮，对比测试表明，该前冲炮的减振缓冲性能明显优于传统液压缓冲结构。王加刚等[79]将磁流变缓冲器应用于口径为 7.62 mm 的 AKMS 型卡宾枪后坐系统，实际使用中展现出良好的减振效果，有效优化了枪械的射击稳定性。欧阳青等[80]为实现火炮后坐系统阻尼力的多维灵活调控，创新设计出长行程多阶并联式磁流变缓冲器，该缓冲器可通过调整几何维度

参数及时间维度上的电流加载方式，实现多样化阻尼特性输出，且在后坐速度较小时，能稳定呈现优良的后坐阻尼“平台效应”，进一步优化了火炮后坐过程的平稳性。此外，在控制算法优化层面，刘非等[81]针对装甲车磁流变半主动悬架控制算法控制精度不高的问题进行研究，提出采用两级变论域模糊控制方法进行调控。对比试验表明，该方法有效提升了装甲车行驶平稳性与乘坐舒适性。为解决传统火炮反后坐装置阻尼不可控、难以适应复杂作战环境的问题，张广[82]等选用抗沉降性和稳定性更优的磁流变胶替代磁流变液，基于Bingham本构模型建立了剪切流动与压力流动耦合的平行板混合流动模型，理论推导阻尼器有效阻尼系数的影响规律，以某型号火炮后坐炮膛时期为研究场景，构建单自由度动力学模型，通过仿真分析不同磁感应强度下阻尼器对后坐位移的可控性，明确了磁流变阻尼器在火炮反后坐系统中的应用潜力。从纵向发展来看，磁流变阻尼器在武器装备减振缓冲领域的应用，始终围绕复杂工况下装备动力学性能优化的核心需求展开，实现了材料选择与场景需求的精准匹配，应用需求也从单纯的性能改善向精准可控升级，但现有研究多以理论仿真为主，试验验证数据相对较少。

针对地震、强风等极端载荷下的结构振动问题，磁流变阻尼器也被应用于建筑结构的振动控制中，并展现出优异的自适应调节能力。建筑结构在地震作用下会产生水平方向、竖直方向以及扭转振动，若振动幅值过大，易导致结构构件开裂、变形甚至倒塌；强风则可能引发高层建筑的低频涡激振动或颤振，影响结构安全性与居住舒适性。磁流变阻尼器通常通过节点连接方式安装于建筑结构的层间、支撑框架或抗侧力构件中，形成半主动控制体系——当地震或强风作用使结构产生振动时，布置在结构关键位置的振动传感器实时监测结构振动位移、速度及加速度信号，控制单元根据结构动力学模型与振动控制策略计算所需阻尼力，通过调节磁流变阻尼器的励磁电流实现阻尼力的快速切换，将结构振动能量转化为磁流变液的热能消耗掉，从而抑制结构振动响应[83]。磁流变阻尼器还聚焦于微米级甚至纳米级的微振动抑制需求，为光学精密仪器的高精度加工与测量提供稳定的工作环境[84]。

在磁流变器件的减振缓冲应用领域，节能化与轻量化是突破技术瓶颈、拓展应用场景的核心方向。这一目标的实现，需从两方面协同发力：一是优化器件结构设计并提升磁流变材料的综合性能，为减振缓冲效果奠定硬件基础；二是创新控制策略，通过更精准的算法调控，在降低电流供应的同时，确保器件输出更高的减振效力，最终实现低能耗和高效能的应用平衡，推动磁流变减振缓冲技术向精准化、低成本化方向发展。

5.2 精密抛光

随着机械制造领域对零件精度要求的不断提升，传统的加工技术已难以满足生产要求，无法达到微米级、纳米级的表面加工质量。磁流变液作为一种智能材料，在外加磁场的作用下可瞬间实现由液态到类固态的流变特性转变，且剪切应力、黏度等力学参数能随磁场强度进行线性调控，这种优异性能使其成为突破精密加工技术瓶颈的关键。磁流变光整加工具有加工表面形状精度高、表面粗糙度和亚表面损伤小、光整过程易于控制等明显优势。基于此，近年来磁流变液在研磨抛光、工装夹具、切削辅助等精密加工场景中展现出广阔应用前景，成为智能制造领域的研究热点之一[85-86]。

磁流变研磨抛光是利用外加磁场来调控磁流变液中磁性颗粒的分布状态，进而调节磁流变液与工件表面的相对运动来实现材料的微量去除。通过调整磁场强度、研磨液的流速、加工间隙等参数，来精准控制材料的去除率，同时消除了传统刚性研磨对工件表面的划伤与亚表面损伤[87]。

在表面抛光设备方面，毫秒级转换的磁流变液在需要加工的零件上形成固态，在带走碎屑的同时转变为液态，保证了加工的精度，提高了加工的效率。磁流变液抛光加工与传统抛光工艺相比具有不可替代的优势，在精密和超精密加工中得到了广泛的应用。未来还需加强对非球面的磁流变抛光研究，进一步拓宽未来磁流变液抛光设备加工适应性、提高加工效率、降低加工成本。

当前，磁流变液在精密加工领域的应用仍面临三方面的挑战：一是磁场调控系统的响应速度有待进一步提升，现有技术难以充分适配超高速加工场景下对动态磁场的精准、快速调控需求；二是针对非球面等复杂曲面的磁流变抛光研究较为薄弱，加工适应性较窄，且加工效率未能满足高精度制造的实际需求；三是磁流变液在长期循环使用中存在疲劳寿命短、性能易衰减的问题，直接影响其加工稳定性。对此，可通过以下措施来突破：一是优化磁场调控技术，结合永磁体与电磁线圈的协同控制，实现毫秒级响应与均匀磁

场分布，满足超高速加工的动态需求；二是改进磁流变液材料的性能，在磁性颗粒表面包覆耐剪切、耐高温的复合涂层，有效扩展性能衰减周期，延长其疲劳寿命；三是推动加工方法与装备创新，开发更低成本、更高加工精度、更高效的加工方法和装置。

6 结论

磁流变液凭借其可精准调控的流变特性，已在减振缓冲、精密加工等领域实现技术突破。当前核心挑战集中于两方面：一是材料层面受沉降分层、温度敏感性及剪切稀化现象的制约，存在磁性颗粒与基液相容性差、包覆层易脱落、长期服役稳定性不足等问题；二是器件层面需解决节能、轻量化、复杂工况适应性及调控精度等方面问题。因此，关于磁流变液的研究仍具有广阔的发展空间。

1）磁流变液的材料配方与制备工艺优化

在磁流变液制备过程中，磁性颗粒与添加剂的选择种类丰富多样，但与之适配的理论模型较为匮乏。基于此，可从宏观性能、介观结构演化及微观分子作用三个尺度构建系统性的理论模型，探究稳定性与流变性的内在规律，为材料配方优化提供理论支撑。通过磁性颗粒表面改性、添加触变剂与表面活性剂、优化制备工艺等技术路径，提升材料综合性能与极端温度适应性。随着材料的智能化发展，引入温敏或磁敏高分子聚合物、刺激响应型纳米颗粒等智能添加剂，赋予材料动态响应特性，已成为拓展其极端环境与复杂载荷应用的重要方向。

2）磁流变器件的设计升级与工程化应用拓展

针对节能轻量化与复杂工况适配需求，可结合磁流变器件结构特性，通过多维度优化设计及关键部件的材料与结构创新，适配复杂工况。针对极端温度、高频振动、变载荷等复杂工况，可对阻尼器密封、流道结构进行优化，并设计多工作模式动态调控切换功能，提升器件通用性。推动其工程化应用拓展，如非球面精密加工中依托剪切力精准调控解决曲面加工难题；针对小型化场景优化内部布局，在缩小体积的同时维持稳定磁流变效应，拓宽微型装备应用空间。

参考文献

[1] 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.

[2] Lee C H，Jang M G. Virtual surface characteristics of a tactile display using magneto-rheological fluids[J]. Sensors，2011，11(3)：2845-2856.

[3] Chauhan V，Kumar A，Sham R. Magnetorheological fluids：a comprehensive review[J]. Manufacturing Review，2024，11：6.

[4] Rabinow J. The magnetic fluid clutch[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers，1948，67(2)：1308-1315.

[5] Zhai Quan，Zhai Wenjie，Gao Bo. Investigation on the relationship between apparent viscosity of Fe_3O_4@SiO_2 abrasive-based magneto-rheological fluid and material removal rate of sapphire in magneto-rheological polishing[J]. Colloids and Surfaces A：Physicochemical and Engineering Aspects，2022，640：128420.

[6] Zhao Feng，Zhang Zhenyu，Yang Jianjun，et al. Advanced nonlinear rheology magnetorheological finishing：a review[J]. Chinese Journal of Aeronautics，2024，37(4)：54-92.

[7] 甄亮，冯永保，韩小霞，等. 磁流变阻尼器多物理场耦合的温升特性分析[J]. 热科学与技术，2023，22(2)：125-134.
Zhen Liang，Feng Yongbao，Han Xiaoxia，et al. Analysis of temperature rise characteristics of magnetorheological dampers under multi-physical field coupling[J]. Journal of Thermal Science and Technology，2023，22(2)：125-134.

[8] Hua Dezheng，Liu Xinhua，Sun Shuaishuai，et al. A magnetorheological fluid-filled soft crawling robot with magnetic actuation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics，2020，25(6)：2700-2710.

[9] 李赵春，李思豪，董帅. 磁流变弹性体的制备及其摩擦磨损特性测试[J]. 功能材料，2019，50(12)：12148-12156.
Li Zhaochun，Li Sihao，Dong Shuai. Preparation of magnetorheological elastomers and measurement of friction and wear characteristics[J]. Journal of Functional Materials，2019，50(12)：12148-12156.

[10] 王亮. PAM-MRB柔性下肢外骨骼机器人结构设计与控制策略研究[D]. 重庆：重庆交通大学，2024：11-14.
Wang Liang. Research on structural design and control strategy of PAM-MRB flexible lower limb exoskeleton robot[D]. Chongqing：Chongqing Jiaotong University，2024：11-14.

[11] Li Lin，Sun Yunquan，Gong Yi，et al. Magneto-

rheological fluid for adaptive soft robotics[J]. IEEE robotics and automation letters, 2025, 10(1): 620-627.

[12] Yu Binyan, Ma Jian, Zhao Xuan, et al. Numerical simulation of magnetorheological fluid with a combined DEM-IMB-LBM scheme[J]. Computers & Fluids, 2022, 246: 105605.

[13] Choi J, Han S, Kim J, et al. Strong and stable magnetorheological fluids based on flaky sendust-$Co_{0.4}Fe_{0.4}Ni_{0.2}$ nanocomposite particles[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(22): 26581-26589.

[14] Du Tianxiang, Zhao Penghui, Tong Yu, et al. Magnetorheological properties of Fe-Co nanoparticles with high saturation magnetization and low coercivity[J]. Nanotechnology, 2023, 34(11): 115701.

[15] Chae H S, Kim S D, Piao S H, et al. Core-shell structured Fe_3O_4@SiO_2 nanoparticles fabricated by sol-gel method and their magnetorheology[J]. Colloid and Polymer Science, 2016, 294(4): 647-655.

[16] 朱启晨，吴张永，蒋佳骏. 纳米复合磁流变液制备与流变特性研究[J]. 功能材料，2024，55(10)：10112-10120.
Zhu Qichen, Wu Zhangyong, Jiang Jiajun. Preparation and rheological properties of nano-composite magnetorheological fluids[J]. Journal of Functional Materials, 2024, 55(10): 10112-10120.

[17] Munteanu A, Plachý T, Munteanu L, et al. Bidisperse magnetorheological fluids utilizing composite polypyrrole nanotubes/magnetite nanoparticles and carbonyl iron microspheres[J]. Rheologica Acta, 2023, 62(9): 461-472.

[18] Pang Haoming, Gao Yinduan, Xuan Shouhu, et al. Effect of secondary particles on the microstructure and mechanical properties of magnetorheological plastomers[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2022, 153: 106747.

[19] Lee J H, Choi H J. Synthesis of core-shell formed carbonyl iron/polydiphenylamine particles and their rheological response under applied magnetic fields [J]. Colloid and Polymer Science, 2018, 296(11): 1857-1865.

[20] Fu Yu, Yao Jianjun, Zhao Honghao, et al. Bidisperse magnetic particles coated with gelatin and graphite oxide: magnetorheology, dispersion stability, and the nanoparticle-enhancing effect[J]. Nanomaterials, 2018, 8(9): 714.

[21] Tong Yu, Dong Xuefeng, Qi Min. High performance magnetorheological fluids with flower-like cobalt particles[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(2): 025023.

[22] Jiang Wanquan, Zhang Yanli, Xuan Shouhu, et al. Dimorphic magnetorheological fluid with improved rheological properties[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2011, 323(24): 3246-3250.

[23] Bell R C, Karli J O, Vavreck A N, et al. Magnetorheology of submicron diameter iron microwires dispersed in silicone oil[J]. Smart Materials and Structures, 2008, 17(1): 015028.

[24] Shilan S T, Mazlan S A, Ido Y, et al. A comparison of field-dependent rheological properties between spherical and plate-like carbonyl iron particles-based magnetorheological fluids[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(9): 095025.

[25] Machovsky M, Mrlik M, Kuritka I, et al. Novel synthesis of core-shell urchin-like ZnO coated carbonyl iron microparticles and their magnetorheological activity[J]. RSC Advances, 2014, 4(2): 996-1003.

[26] Prajapati H, Lakdawala A. Phenomenological model for rheological characterization of magnetorheological fluids[J]. Rheologica Acta, 2025, 64(2): 133-150.

[27] Al-Rashed A A A A, Ranjbarzadeh R, Aghakhani S, et al. Entropy generation of boehmite alumina nanofluid flow through a minichannel heat exchanger considering nanoparticle shape effect[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2019, 521: 724-736.

[28] Olabi A G, Grunwald A. Design and application of magnetorheological fluid[J]. Materials & Design, 2007, 28(10): 2658-2664.

[29] Thiagarajan S, Koh A S. Performance and stability of magnetorheological fluids: a detailed review of the state of the art[J]. Advanced Engineering Materials, 2021, 23(6): 2001458.

[30] Liu Taixiang, Gong Xinglong, Xu Yangguang, et al. Magneto-induced stress enhancing effect in a colloidal suspension of paramagnetic and superparamagnetic particles dispersed in a ferrofluid medium[J]. Soft Matter, 2014, 10(6): 813-818.

[31] Wang D, Li D, He X, et al. Theoretical analyses and experimental research on micro-nano composite magnetorheological grease for sealing liquids with different viscosities[J]. Tribology International, 2025, 201: 110265.

[32] Do X P, Choi S B. A state-of-the-art on smart materials actuators over the last decade: control aspects for diverse applications[J]. Smart Materials and Structures, 2022, 31(5): 053001.

[33] 于凌涛，聂洪帅，袁华营，等. 面向软体机器人的磁流变弹性体变刚度模型研究[J]. 哈尔滨工程大学学报，2024，45(11)：2259-2265.
Yu Lingtao，Nie Hongshuai，Yuan Huaying，et al. Study on variable stiffness model of magnetorheological elastomers for soft robots[J]. Journal of Harbin Engineering University，2024，45(11)：2259-2265.

[34] Ping Ma. The study of the anti-precipitation of the magnetorheological fluid[J]. Machine Tool & Hydraulics，2007(10)：98-100.

[35] Suryaprabha T，Choi C，Chandio Z A，et al. A brief review of surface modification of carbonyl iron powders (CIPs) for magnetorheological fluid applications[J]. Journal of Polymer Materials，2023，40(3/4)：191-204.

[36] 舒龙飞，倪磊，向北平，等. 非离子型表面活性剂对水基磁流变抛光液形貌及性能的影响[J]. 磁性材料及器件，2021，52(5)：73-78.
Shu Longfei，Ni Lei，Xiang Beiping，et al. Effect of nonionic surfactant on the stability of water-based-magnetorheological polishing[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices，2021，52(5)：73-78.

[37] Zhang Hansong，Hua Yan，Hu Zhide，et al. Magnetorheological fluid based on thixotropic PTFE-oil organogel[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials，2018，451(4)：102-109.

[38] Munteanu A，Plachý T，Munteanu L，et al. Bidisperse magnetorheological fluids utilizing composite polypyrrole nanotubes/magnetite nanoparticles and carbonyl iron microspheres[J]. Rheologica Acta，2023，62(9)：461-472.

[39] Huang Hongzhi，Li Haitao，Wang Wencai，et al. Analysis on the enhancement mechanism of bidisperse magnetorheological fluid based on the local microstructural models[J]. Rheologica Acta，2022，61(2)：87-98.

[40] 吕彤辉，魏镜弢，李伊伦，等. 结合布朗力与范德华力的磁流变液沉降模拟[J]. 功能材料，2024，55(6)：6095-6100.
Lyu Tonghui，Wei Jingtao，Li Yilun，et al. Simulation of magnetorheological fluid sedimentation considering Brownian and Van der Waals forces[J]. Journal of Functional Materials，2024，55(6)：6095-6100.

[41] Di Giovanni B A，Mahdi F M，Starov V M，et al. Particulate clusters and permeability in porous media[J]. Chemical Engineering Research and Design，2012，90(9)：1168-1176.

[42] Kynch G J. A theory of sedimentation[J]. Transactions of the Faraday Society，1952，48：166-176.

[43] 刘琴，冷冬梅，赵忠山，等. 采用多重光散射法研究含聚合物原油乳状液稳定性[J]. 油气田地面工程，2022，41(11)：41-44.
Liu Qin，Leng Dongmei，Zhao Zhongshan，et al. Research on the stability of crude oil emulsion containing polymer by multiple light scattering method[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering，2022，41(11)：41-44.

[44] Roupec J，Berka P，MazRek I，et al. A novel method for measurement of MR fluid sedimentation and its experimental verification[J]. Smart Materials and Structures，2017，26(10)：107001.

[45] 刘奇，唐龙，张平，等.磁流变体材料稳定性和润滑性能研究[J]. 功能材料，2005，36(8)：56-59.
Liu Qi，Tang Long，Zhang Ping，et al. Study on stability and lubricating property of magnetorheological fluid[J]. Journal of Functional Materials，2005，36(8)：56-59.

[46] Gordaninejad F，Breese D G. Heating of magnetorheological fluid dampers[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures，1999，10(8)：634-645.

[47] Zhen Liang，Feng Yongbao，Han Xiaoxia，et al. Temperature rise characteristics and experimental study of magnetorheological dampers under different excitations[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer，2023，37(3)：594-605.

[48] Pan Jiabao，Yang Guangxin，Wang Jianping，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.

[49] Kariganaur A，Kumar H，Arun M. Influence of temperature on magnetorheological fluid properties and damping performance[J]. Smart Materials and Structures，2022，31(5)：055018.

[50] 梁冠群，赵通，吕靖成，等. 磁流变减振器极限高低温特性及变温正逆模型[J]. 中国公路学报，2022，35(10)：280-289.
Liang Guanqun，Zhao Tong，Lyu Jingcheng，et al. Magnetorheological damper extreme high and low temperature characteristics and variable temperature forward and reverse models[J]. China Journal of Highway and Transport，2022，35(10)：280-289.

[51] 齐晓杰，安永东，吕德刚，等. 磁流变缓速制动装置低温运行性能测试研究[J]. 黑龙江工程学院学报，2017，31(6)：24-28.
Qi Xiaojie，An Yongdong，Lyu Degang，et al. Op-

eration performance test Research on magnetorheological retarder device under the condition of low temperature[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2017, 31(6): 24-28.

[52] Yang Yongbo, Li Lin, Chen Guang, et al. Synthesis and characterization of iron-based alloy nanoparticles for magnetorheological fluids[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2008, 320(15): 2030-2038.

[53] Hato M J, Choi H J, Sim H H, et al. Magnetic carbonyl iron suspension with organoclay additive and its magnetorheological properties[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2011, 377(1/3): 103-109.

[54] Viota J, De Vicente J, Duran A, et al. Stabilization of magnetorheological suspensions by polyacrylic acid polymers[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, 284(2): 527-541.

[55] Goncalves F D, Ahmadian M, Carlson J D. Behavior of MR fluids at high velocities and high shear rates[J]. International Journal of Modern Physics B: Condensed Matter Physics; Statistical Physics; Applied Physics, 2005, 4(19): 1395-1401.

[56] Switonski E, Mezyk A, Duda S, et al. Prototype magnetorheological fluid damper for active vibration control system[J]. Achievements in Materials & Manufacturing Engineering, 2007, 21(1): 103-122.

[57] Rabbani Y, Hajinajaf N, Tavakoli O. An experimental study on stability and rheological properties of magnetorheological fluid using iron nanoparticle core-shell structured by cellulose[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019, 135(3): 1687-1697.

[58] Choi J, Nam K T, Kim S, et al. Synergistic effects of nonmagnetic carbon nanotubes on the performance and stability of magnetorheological fluids containing carbon nanotube-$Co_{0.4}Fe_{0.4}Ni_{0.2}$ nanocomposite particles[J]. Nano Letters, 2021, 21(12): 4973-4980.

[59] Portillo M A, Iglesias G R. Magnetic nanoparticles as a redispersing additive in magnetorheological fluid[J]. Journal of Nanomaterials, 2017, 2017(1): 9026219.

[60] Fang Feifei, Yang M S, Choi H J. Novel magnetic composite particles of carbonyl iron embedded in polystyrene and their magnetorheological characteristics[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(11): 4533-4536.

[61] Zhang Xiang, Fan Zenhua, Yang Zihao, et al. Experimental investigations on chemical-assisted magnetorheological shear thickening polishing for zirconia ceramics tubes[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2025, 629: 173264.

[62] Dubey N K, Sidpara A, Lakkaraju R. Research on the mechanism of particles separation in magnetorheological fluid-based finishing process[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2024, 238(5): 759-769.

[63] Patel D, Upadhyay R V, Mazlan S A, et al. Magnetic field-induced dynamic viscoelastic properties of isotropic and pre-structured magnetorheological elastomers having non-spherical shaped iron particles: impact of particle-particle and particle-matrix interactions[J]. Journal of Polymer Research, 2025, 32(4): 124.

[64] He Dongping, Xu Huidong, Wang Yiping, et al. Research on vertical vibration characteristics of rolling mill based on magnetorheological fluid damper absorber[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 224: 112203.

[65] Bajkowski J M, Bajer C I, Dyniewicz B, et al. Performance of a vibration damper using a new compressible magnetorheological fluid with microspheres [J]. Smart Materials and Structures, 2025, 34(1): 015041.

[66] Cruze D, Hemalatha G, Jebadurai S V S, et al. A review on the magnetorheological fluid, damper and its applications for seismic mitigation[J]. Civil Engineering Journal, 2018, 4(12): 3058-3074.

[67] Liu Gaoyu, Gao Fei, Wang Daihua, et al. Medical applications of magnetorheological fluid: a systematic review[J]. Smart Materials and Structures, 2022, 31(4): 043002.

[68] Vishwakarma P N, Mishra P, Sharma S K. Characterization of a magnetorheological fluid damper a review[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 56: 2988-2994.

[69] Puneet N P, Saini R S T, Kumar H. Design and fabrication of cost effective semi-active vehicular suspension system and testing on full scale quarter car suspension rig[J]. Smart Structures and Systems, 2024(2): 34.

[70] 张进秋，黄大山，姚军. 车辆悬架系统振动控制[M]. 北京：国防工业出版社，2020：22-36.
Zhang Jinqiu, Huang Dashan, Yao Jun. Vibration control of vehicle suspension systems[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020: 22-36.

[71] Hoogterp F B, Saxon N L, Schehl P J. Semiactive suspension for military vehicles[J]. SAE Trans-

actions，1993，102：47-52.

[72] Wray A C，Hoogterp F B，Garabedian S，et al. Magnetorheological fluid semiactive suspension performance testing[R]. Huntington Beach CA：Rod-Millen Special Vehicles，2003.

[73] 孙露，王国平，芮雪. 特种车辆振动半主动控制策略[J]. 兵工自动化，2016，35(12)：56-59.
Sun Lu，Wang Guoping，Rui Xue. Semi-active control strategy for vibration of special vehicle[J]. Ordnance Industry Automation，2016，35(12)：56-59.

[74] 杨森. 减振抗爆磁流变半主动座椅悬架系统控制方法研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2019：23-49.
Yang Sen. Research on control strategy of magnetorheological semi-active seat suspension systemfor both shock and vibration mitigation[D]. Hefei：Hefei University of Technology，2019：23-49.

[75] Wang Jiaqi，Wang Guoping，Wei Min，et al. Optimization design and performance analysis of a rotary vane magnetorheological damper for vehicle suspension based on NSGA-II[J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines，2025，53(6)：4761-4785.

[76] Majdoub K E，Ammari O，Giri F. Adaptive backstepping control design for semi-active suspension of full vehicle with magnetorheological damper[J]. Franklin Open，2025，12：100305.

[77] 甄亮，冯黎成，方占萍，等. 特种车辆悬架系统磁流变阻尼器阻尼特性分析[J]. 机床与液压，2025，53(16)：189-196.
Zhen Liang，Feng Licheng，Fang Zhanping，et al. Analysis of damping characteristics of magnetorheological damper for special vehicle suspension system[J]. Machine Tool & Hydraulics，2025，53(16)：189-196.

[78] Hmadian M，Appleton R J，Norris J A. Designing magnetorheological dampers in a fire out-of-battery recoil system[J]. IEEE Transactions on Mag-netics，2003，39(1)：480-485.

[79] 王加刚，余永刚，廖昌荣，等. 考虑边界滑移和惯性效应的磁流变液缓冲器特性分析[J]. 兵工学报，2018，39(4)：672-680.
Wang Jiagang，Yu Yonggang，Liao Changrong，et al. Characteristic analysis magnetorheological fluid damper considering slip boundary and inertial effect[J]. Acta Armamentarii，2018，39(4)：672-680.

[80] 欧阳青，李赵春，郑佳佳，等. 多阶并联式磁流变缓冲器可控性分析[J]. 浙江大学学报(工学版)，2017，51(5)：961-968.
Ouyang Qing，Li Zhaochun，Zheng Jiajia，et al. Controllability characteristics of magnetorheological damper with multi-stage parallel coil under impact load[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science)，2017，51(5)：961-968.

[81] 刘非，李以农，郑玲. 装甲车辆磁流变半主动悬架变论域模糊控制[J]. 汽车工程，2013，35(8)：735-739.
Liu Fei，Li Yinong，Zheng Ling. Variable universe fuzzy control for magneto-rheological semi-active suspension in armored vehicles[J]. Automotive Engineering，2013，35(8)：735-739.

[82] 张广，汪辉兴，王炅. 磁流变阻尼器对火炮后坐炮膛时期阻尼特性分析[J]. 振动与冲击，2019，38(20)：172-180，187.
Zhang Guang，Wang Huixing，Wang Jiong. Analysis of damping characteristics of magnetorheological dampers for the artillery recoil during bore period[J]. Journal of Vibration and Shock，2019，38(20)：172-180，187.

[83] Truong H T，Nguyen X B，Komatsuzaki T. Semi-active composite adaptive PPF controller for three-story building structure using magnetorheological elastomer[J]. Structures，2025，74：108509.

[84] Zhan Liu，Xu Xiaowei，Guo Xiaofeng，et al. Deep reinforcement learning-based smart vibration control for magnetorheological suspension considering nonlinear dynamics[J]. Smart Materials and Structures，2025，34(6)：065012.

[85] Li Junye，Wang Chunyu，Liu Jianhe，et al. Research on quality control technology of magnetorheological ultra-precision machining of calcium fluoride crystal[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2025，139(1)：289-311.

[86] Gu Yan，Zhou Weidong，Lin Jieqiong，et al. Mechanistic study on the enhancement of vibration-impact effect by high-concentration carbonyl iron MRF to improve SiCp/Al surface quality[J]. Journal of Manufacturing Processes，2025，146：399-426.

[87] Miao Chunlin，Lambropoulos J C，Jacobs S D. Process parameter effects on material removal in magnetorheological finishing of borosilicate glass[J]. Applied Optics，2010，49(10)：1951-1963.

Review on the Core Properties and Applications of Magnetorheological Fluids

SANG Yuanyuan, FENG Yongbao*, ZHANG Yixuan,
HAN Xiaoxia, DENG Yilin
(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

ABSTRACT: As typical intelligent controllable materials, magnetorheological fluids possess advantages such as fast response speed, excellent mechanical properties, and simple control methods: thus they have broad application prospects in the engineering field. This paper systematically summarized the research achievements in magnetorheological fluids in recent years. First, an in-depth analysis of the composition of the magnetorheological fluids was conducted. Subsequently, this study focused on expounding the stability, magnetic properties, and rheological properties of magnetorheological fluids and conducted an in-depth analysis of the key issues to be addressed, including sedimentation and stratification, temperature adaptability, and shear thinning. Finally, typical applications of magnetorheological fluids in engineering fields, such as vibration reduction and precision machining, were summarized. Future development directions, such as optimization of material preparation processes and upgrading of device design, were proposed, with the aim of providing theoretical references and technical guidance for formula optimization, performance regulation, and engineering applications of magnetorheological fluids.

KEYWORDS: magnetorheological fluid; stability; magnetic property; rheological property; vibration reduction; precision machining

（编辑：夏菁）