

[综述·专论]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.06.001

磁流变液沉降稳定性研究综述

李玉青, 罗一平*, 王莹, 骆佼, 仇俊

(上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:磁流变液(Magnetorheological Fluid, MRF)的沉降稳定性是磁流变领域的一个重要研究方面,同时也是反映磁流变液品质的一个重要指标,优良的稳定性对于磁流变液的保存和应用具有重要意义。笔者基于重力沉降理论导出了磁性颗粒的匀速沉降速度,结合基于斯托克斯公式的颗粒沉降速度公式,分析讨论了沉降稳定性的影响因素,包括颗粒直径和颗粒与基础液密度差等,并阐述了前人为提高其稳定性在颗粒、基础液及添加剂等方面所做的工作;对目前磁流变液沉降稳定性常用的表征方法进行了系统论述。最后,笔者提出:探索更具代表性的表征方法并弄清楚其作用机理,以及探究更为有效的改善稳定性并以不牺牲其他性能为代价的方法将会成为日后研究工作的重点。

关键词:磁流变液;沉降稳定性;重力沉降理论;斯托克斯公式

中图分类号:TH140;TM271 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2020)06-0001-04

Research in Sedimentation Stability of Magnetorheological Fluids

LI Yuqing, LUO Yiping*, WANG Ying, LUO Jiao, QIU Jun

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: The sedimentation stability of magnetorheological fluid (MRF) is an important research aspect in the field of magnetorheological science and an important indicator of the quality of MRF. Excellent stability is of great significance for the preservation and application of MRF. The uniform sedimentation velocity of magnetic particles was derived based on the gravity sedimentation theory. In combination with the Stokes formula, the influencing factors of sedimentation stability, including the particle diameter, the density difference between the particles and the basic fluid, were analyzed and discussed. The previous work to improve its stability in the aspect of particle, base liquid and additive were expounded and the current characterization methods commonly used for the sedimentation stability of MRF were systematically discussed. Finally, to explore more representative characterization methods and to understand their mechanism of action, and to explore more effective methods to improve stability at the cost of no other performance were proposed as the future research emphases.

Keywords: MRF (magnetorheological fluid); sedimentation stability; gravity sedimentation theory; Stokes formula

在智能材料中,磁流变材料是非常重要的一个分支,当有磁场激励时,该材料会作出毫秒级灵敏响应,其力学特性表现出连续的、无级的可逆变化,即磁流变效应。目前,磁流变液作为研究和应用最广泛的磁流变材料,被广泛地应用于汽车^[1]、抛光^[2-3]和医疗^[4]等领域。磁流变液一般包括3部分:磁性颗粒、添加剂和基础液。磁性颗粒是磁流变效应的主导者和磁流变液智能特性的表现者,其在基础液中的沉降速度一定程

度上反映了磁流变液的沉降稳定性,而其稳定性直接影响磁流变液的保存和磁流变装置或器件的使用寿命。目前,磁流变液的稳定性研究主要集中在沉降稳定性表征以及沉降稳定性的优化2方面。沉降稳定性是衡量磁流变液性能的关键标准之一,当前对磁流变液沉降稳定性的评价主要依据沉降过程中表现出的物理变化特征,如体系密度不均、电势和电感等。如何改善磁流变液的沉降稳定性也是国内外学者的研究热

收稿日期:2020-06-08;修回日期:2020-09-25

基金项目:上海市地方能力建设基金项目(19030501100)。

第一作者简介:李玉青(1993),男,安徽宿州人,硕士,主要进行磁流变液相关研究。通信作者:罗一平(1966),男,上海人,教授,硕士生导师,主要研究方向为智能材料与汽车悬架。E-mail:lyp777@sina.com

点,主要包括改变添加剂、改变基液、改变分散颗粒等方面。陈维清等^[5]分别在磁流变液中添加了油酸、聚乙二醇以及油酸与聚乙二醇的混合物,通过静置观测提出复合使用表面活性剂能够很大程度上提高磁流变液的稳定性。唐龙等^[6]通过气体氮化技术在磁性颗粒表面生成具有较高硬度和良好抗氧化性能的氮化层,改善了磁性颗粒抗磨耐蚀性能,采用硅铝酸盐作为触变剂,改善了磁流变液的抗沉降稳定性。张寒松等^[7]利用纳米二氧化硅/黄原胶复合触变剂制备磁流变液,研究表明黄原胶大分子在纳米二氧化硅颗粒表面形成了稳定的有机包覆层,通过自然沉降对磁流变液的稳定性进行测试,结果发现添加复合触变剂的磁流变液沉降稳定性得到了进一步提升。Armijo等^[8]使用纳米级氮化铁作为分散颗粒,并在粒子表面包覆羧基-聚乙二醇后加入硅油形成磁性载液,制备出纳米级氮化铁磁流变液,其稳定性得到有效改善。

1 磁流变液沉降稳定性影响因素

一般情况下,磁流变液稳定性是指静态时的沉降比率、沉降速度和团聚结块的程度。当磁流变液较长时间处于静止状态时,磁性粒子会逐渐下沉,致使磁流变液出现上下密度差异,进而导致磁流变液性能下降。

基于重力沉降理论,分析零磁场时磁性颗粒的匀速沉降速度。假设颗粒均为规则球形且不考虑粒子沉降过程中的碰撞,则粒子主要受重力 G 、浮力 F 和运动阻力 f 3 个力的作用。即:

$$G = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2 g\rho = \frac{\pi}{6}gd^3; \quad (1)$$

$$F = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3 g\rho_0 = \frac{\pi}{6}\rho_0gd^3; \quad (2)$$

$$f = A\varepsilon\frac{\rho_0u^2}{2}。 \quad (3)$$

式中: d 为磁性颗粒平均粒径; ρ 为磁性颗粒密度; g 为重力加速度; ρ_0 为基液密度; ε 为流体阻尼系数; A 为磁性颗粒表面积; u 为磁性颗粒沉降速度。

磁性颗粒在基液中的沉降过程通常为先加速后匀速,匀速沉降时磁性颗粒受力平衡,此时速度为 u_1 ,即

$$G = F + f。 \quad (4)$$

化简后得

$$u_1 = \sqrt{\frac{4gd(\rho - \rho_0)}{3\varepsilon\rho_0}}。 \quad (5)$$

另外,依据斯托克斯公式计算磁流变液中磁性颗粒的沉降速度 V ,即

$$V = \frac{2d^2g(\rho - \rho_0)}{9\eta}。 \quad (6)$$

式中 η 为基础液的黏度。

根据以上公式可知,磁性颗粒直径、磁性颗粒与基液密度差、基液密度、流体阻尼系数及基液黏度都会影响沉降速率。对比式(5)和(6),基于重力沉降理论所推导沉降速度式(5)具有一定的参考意义。2 个公式反映的对颗粒沉降速度,即磁流变液的沉降稳定性的影响因素基本一致,具体如下:

1) 磁性粒子的直径大小

磁性粒子沉降速率与磁性粒子的直径正相关,通常粒子直径越大沉降速度越快,粒径是沉降稳定性最明显的影响因素^[9]。因此,适当减小磁性粒子直径是减缓沉降的有效措施。此外,磁流变液中的磁性颗粒是单一粒径还是多种粒径,其沉降稳定性也会有所差别^[10]。

2) 颗粒与基础液密度差

磁性粒子沉降速率正比于颗粒与基础液的密度差,改良磁性颗粒或基础液的配方,使两者的密度无限接近,这对于改善磁流变液的沉降稳定性效果显著。纳米级金属铁钴合金粉的加入,减小了分散介质和磁性颗粒间的密度差,显著改善了磁流变液的沉降稳定性并且明显提高了 MRF 的磁流变效应^[11]。通过制备复合磁性粒子,将磁性粒子与有机或无机物复合,得到与基液更加匹配的粒子,也可以减小两者间的密度差,提高磁流变液的稳定性^[12-13]。

3) 基础液黏度

磁性粒子沉降速率反比于基础液黏度,一般情况下黏度越大,颗粒沉降速度越慢。所以,适当增大基础液黏度也是提高磁流变液稳定性的措施之一^[14]。

此外,适当增大磁性粒子的体积分数,可使磁性粒子的运动阻力增大、相互碰撞的机率增加,使粒子更容易分散在悬浮体系中,进而改善磁流变液的沉降稳定性。表面活性剂的加入使得亲油基与基础液接触,增加了磁性粒子间的排斥力,避免了团聚现象的发生,这对于提高磁流变液的沉降稳定性有一定作用^[15-17]。

2 磁流变液沉降稳定性表征方法

2.1 静置观察法

当磁流变液静置一段时间后,可观察到明显的基液与磁性颗粒分层现象^[18]。该方法多数是将磁流变液放入透明容器中沉降一段时间后,观察上层清液与下层磁性物质高度变化,如图 1 所示。通过测量不同时间段内上层基液所占整体的高度比例,来表示磁流变液的沉降率,记为:

$$c = \frac{a}{a+b} \times 100\%。 \quad (7)$$

式中: a 为上层基液的高度, b 为下层磁性物质的高度。

显然,该值越大,沉降情况越严重。此种方法的优点在于一定程度上可以用来表征磁流变液的实际沉降情况,原理简单、沉降结果直观且便于实际操作,但要求容器必须是透明、易观察的。此种方法观测周期长,且当涉及到磁流变液的团聚、板结、失效等情况时,该方法作用不明显。程海斌^[19]和陶剑青^[20]等利用静置沉降观察法分析了磁流变液的抗沉降稳定性。

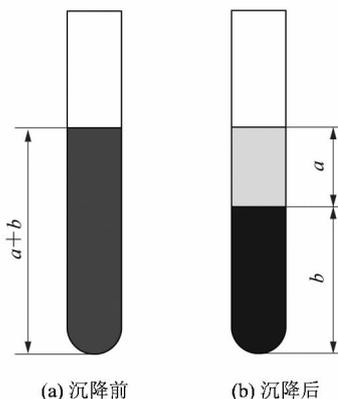


图 1 静置观察法示意图

Figure 1 Schematic diagram of static observation method

2.2 沉降电势法

在重力的作用下,磁流变液的磁性颗粒会发生沉降,导致磁流变液沿重力方向存在体积分数差,越靠近容器的底部,磁性颗粒的体积分数越大。由于磁性颗粒带有电荷,因此处于不同高度位置的磁性颗粒间存在电势差,这种由于颗粒沉降产生的电势差称为沉降电势差,可用电压表进行测量,其原理如图 2 所示。

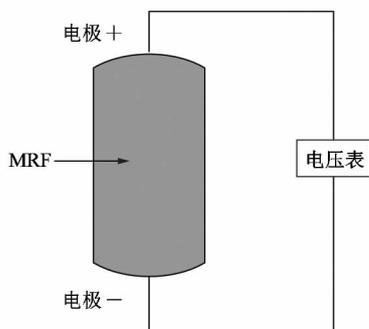


图 2 沉降电势法示意图

Figure 2 Schematic diagram of sedimentation potential method

该方法将待测磁流变液充满整个玻璃容器,容器

上、下两端的电极与磁流变液直接接触,用电压表测出不同沉降时间的沉降电势。当磁流变液未发生沉降时,磁性颗粒分布较为均匀,此时电势差较小;随着沉降时间的延长,沉降电势差会逐渐增大。该方法的优点是可以实现磁流变液沉降性能的自动测量,但测量结果只能反映两极板间磁流变液的总体沉降特性,而无法判别磁流变液样品的局部沉降特性。胡林等^[21]基于上述原理,设计了一种沉降电势仪用来检测磁性颗粒的沉降情况。

2.3 电感法

当磁流变液发生沉降时,整个磁流变液样品局部体积分数不一,导磁性发生变化,直接导致包围 MRF 样品的电感线圈的电感量有所差异。表现为靠近液面的磁流变液磁导率降低,包围该段液体的电感线圈的电感量降低,因此可以通过电感量的变化反映磁流变液的沉降过程。原理示意图如图 3 所示。

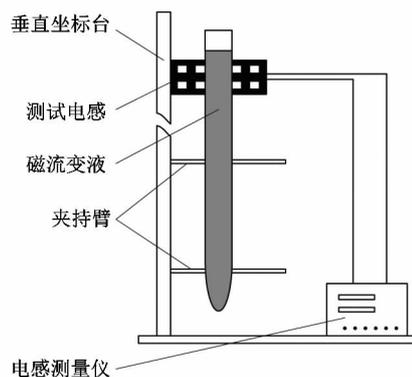


图 3 电感法示意图

Figure 3 Schematic diagram of inductance method

Gorodkin 等^[22]为测量磁流变液沉降系数,设计了一种电感离心装置加速 MRF 沉降。与静置观察法相比,此方法大幅度缩短了观测的时间成本,但该方法在离心条件下测量的 MRF 沉降系数的误差较大。陈乐生等^[23]针对 Gorodkin 等人的研究中有关电感测量区域和电感结构设计的不合理之处,提出一种改进方法来测量电感;并相应地设计出一种测量装置,该装置克服离心电感法中存在的不足,测量误差较小。Ngatu^[24]提出用单线圈电感法测量 MRF 的沉降速度,这种方法重点是测试样品管外部一个或者多个螺线管感应系数随时间的变化关系。

2.4 电容法

当导电颗粒分散在绝缘聚合物基液中时,导电体的空间排布变化会引起基液的介电常数发生变化^[25]。

磁性颗粒作为磁流变液的分散相,具有导电性;当磁流变液发生沉降时直接导致磁性颗粒的空间分布发生变化,悬浮颗粒的体积分数与其介电常数正相关,介电常数与电容值之间存在直接关系。基于上述原理,邵向阳^[26]分别设计了圆环-芯轴型和正对双圆弧型电容传感器,用来测量磁流变液在沉降过程中电容的变化,并监测 MRF 的介电常数,进而间接表征其沉降稳定性。该方法与电感法相比,避免了电感法中的磁场对磁流变液沉降的影响。同时,该技术尚不成熟,电容传感器易受边缘效应影响,造成测量数据不稳定且误差较大。

2.5 透光率脉动检测法

当磁流变液的粒子体积分数不太高时,由于颗粒在基础液中运动及其分布的不均匀性,即颗粒具有随机脉动特性,当流动的磁流变液连续通过合适的光路(如特定的波长、灵敏度等)时,光路内的颗粒数目会发生随机变化(服从泊松分布),表现为透过 MRF 的光的强度呈随机波动。因此可通过透过的光线强度反映一定体积 MRF 内的平均颗粒数目,进而表征其沉降性能。该方法可以用来分析和检测颗粒的聚集状态及其沉降变化过程,不受透光壁粘污和电子漂移的影响,可检测的体积分数和粒径范围较广,具有非直接接触光透射式的特点^[27]。

2.6 定时定量采样化学分析法

该方法通过化学滴定分析间接获得磁流变液样品中未沉降铁颗粒的质量分数,进而用以表征其沉降稳定性。将新制备的磁流变液转移至圆柱形玻璃管中,间隔一定的时间利用微型取样器在玻璃管中的相应位置进行取样,每次取约 1 ml 样品,然后将处理过后的样品用 $K_2Cr_2O_7$ 标准溶液滴定,记录 $K_2Cr_2O_7$ 的消耗量,计算出样品中未沉降铁颗粒的质量分数并换算成粒子的沉降量。具体操作过程参见文献^[28]。值得注意的是,该方法中应选用直径较大的玻璃管,这样可以尽量消除毛细现象对颗粒沉降所带来的影响。另外,在对磁流变液进行取样时,为了避免玻璃管上层出现只含有基液的情况,取样位置应尽量偏下或进行多点固定位置取样。

3 结语

磁流变液的沉降稳定性是评价磁流变液品质的重要标准之一,其好坏直接关系到磁流变液的保存和商业应用。笔者依据推导出的磁性颗粒匀速沉降时的速度,对磁流变液沉降稳定性的影响因素进行了分析讨论,并对前人从不同方面为提高其沉降稳定性而做的各种尝试工作进行了阐述。由于目前对磁流变液的沉

降稳定性表征还没有公认的评价体系,笔者仅对当前常见的表征方法进行了系统论述,阐明并讨论了这些方法的原理、注意事项和特点等,其中对电感法的研究尚不深入,其表征机理有待进一步探讨。随着对磁流变液特别是其沉降稳定性的研究的深入,探索更具代表性的表征方法并弄清楚其作用机理,以及探究更为有效的改善稳定性并以不牺牲其他性能为代价的方法将会成为日后研究工作的重点。有理由相信,磁流变液的沉降稳定性若得到显著提高,其应用装置或器件将会更加稳定和长寿,其应用领域也会更加广阔。

参考文献:

- [1] WANG Daoming, ZI Bin, ZENG Yishan, et al. Simulation and experiment on transient temperature field of a magnetorheological clutch for vehicle application [J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(9): 095020.
- [2] 秦北志, 杨李茗, 朱日宏, 等. 光学元件精密加工中的磁流变抛光技术工艺参数[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(9): 111-116.
- [3] 高春甫, 郑强, 杨青彤. 圆柱型永磁体磁流变抛光头设计及其参数优化[J]. 机电工程, 2019, 36(12): 1286-1289.
- [4] FU Qiang, WANG Daihua, XU Lei, et al. A magnetorheological damper-based prosthetic knee (MRPK) and sliding mode tracking control method for an MRPK-based lower limb prosthesis [J]. Smart Material Structures, 2017, 26(4): 045030.
- [5] 陈维清, 杜成斌, 万发学. 表面活性剂与触变剂对磁流变液沉降稳定性的影响[J]. 磁性材料及器件, 2010, 41(2): 55-57.
- [6] 唐龙, 卢利平, 岳思, 等. 高稳定磁流变液的制备和性能分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2014, 37(3): 41-46.
- [7] 张寒松, 胡志德, 晏华, 等. 纳米 SiO_2 /黄原胶复合触变剂对磁流变液性能的影响[J]. 材料导报, 2019(6): 1052-1056.
- [8] ARMILIO L M, AHURE-POWELL L A, WERELEY N M. Rheological characterization of a magnetorheological ferrofluid using iron nitride nanoparticles [J]. Journal of Applied Physics, 2015, 117(17): 555-569.
- [9] 赵明媚, 张进秋, 姚军, 等. 磁流变液沉降稳定性影响因素分析[J]. 金属功能材料, 2017, 24(3): 29-32.
- [10] 龚志伟, 杜成斌, 于国军. 单一粒径与两种粒径羧基铁粉磁流变液特性的实验比较研究[J]. 功能材料, 2011, 42(增刊5): 809.
- [11] 程海斌, 李立春, 官建国, 等. 纳米铁钴磁流变液的流变特性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 26(8): 5-7.
- [12] 江万权, 朱春玲, 陈祖耀, 等. 微米级高聚物包埋型金属铁复合粒子的球磨法制备及其磁流变效应[J]. 化学物理学报, 2001, 14(5): 543-547.
- [13] 龚荣洲, 官建国, 袁润章. 酞菁钴/铁纳米填充母粒组成的磁流变液性能[J]. 化学物理学报, 2000, 13(4): 508-512.
- [14] 关新春, 欧进萍, 李金海. 磁流变液组分选择原则及其机理探讨[J]. 化学物理学报, 2001, 14(5): 592-596.
- [15] 陈维清, 杜成斌, 万发学. 表面活性剂与触变剂对磁流变液沉降稳定性的影响[J]. 磁性材料及器件, 2010, 41(2): 55-57.

(下转第 10 页)