[综述·专论]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.05.001

工作过程中磁流变液热量产生机理及其影响

方启波，罗一平*，王世成，宋世崇

（上海工程技术大学 机械与汽车工程学院，上海 201620）

摘 要：在磁流变液工作过程中不可避免会产生热量，使工作温度升高并影响磁流变液相关性能。笔者从电磁、摩擦和磁热效应等方面综述了磁流变液工作过程中热量产生机理，并且阐述了工作环境温度升高后对磁流变液各组成成分、黏度和剪切应力等主要特性的影响。温度的升高不仅会使磁流变液各成分发生相应变化，也会使黏度和剪切应力减小，导致磁流变液性能降低甚至发生不可逆变性。因此笔者认为：为了有效延长磁流变液使用寿命，一方面可以优化磁流变液配方，配制出具有良好温度适应能力的磁流变液，另一方面可以通过建立包含温度参数的剪切屈服应力模型来预测磁流变液性能随温度变化情况，从而更加精确控制磁流变液工作温度；当温度大幅上升不可避免时，应及时采取冷却措施。

关 键 词：磁流变液；热量；温升；黏度；剪切应力

中图分类号：TB381 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-2895(2022)05-0001-07

Mechanism and Influence of Heat Generation in Magnetorheological Fluid During Working

FANG Qibo, LUO Yiping*, WANG Shicheng, SONG Shichong

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

Abstract: Heat is inevitably generated in the working process of the magnetorheological fluid, which increases the working temperature and affects the related properties of the magnetorheological fluid. The mechanism of heat generation in the working process of magnetorheological fluids was reviewed from the aspects of electromagnetism, friction and magnetocaloric effect. And the influence of the working environment temperature on the main properties such as the composition, viscosity and shear stress of the magnetorheological fluid was expounded. The increase of temperature will not only cause corresponding changes in the components of the magnetorheological fluid, but also decrease the viscosity and shear stress, leading to the reduction of the performance of magnetorheological fluids and even irreversible degeneration. In order to effectively prolong the service life of magnetorheological fluid, on the one hand, the formulation of magnetorheological fluid can be optimized to formulate the magnetorheological fluid with good temperature adaptability; and on the other hand, the change of the properties of magnetorheological fluids with temperature can be predicted by establishing a shear yield stress model including temperature parameters, thus to control the working temperature of the magnetorheological fluid more precisely. When a significant temperature rise is unavoidable, cooling measures should be taken in time.

Keywords: magnetorheological fluid; heat; temperature rise; viscosity; shear stress

磁流变液(magnetorheological fluid, MRF)是一种含有非胶质体极细颗粒的稳定悬浮液，主要由微米级的磁性颗粒、各种添加剂以及非磁性基液组成[1]。磁流变效应具有速度快、可逆和范围广等良好特点，且磁流变液工作装置结构简单、易于装配、能耗低，所以磁流变液已经广泛应用于机械工程、建筑结构振动控制和军工等领域以及车辆的减振、刹车、离合和高精度抛光等场合[2-5]。目前国外 Lord 公司在磁流变液的研究

收稿日期：2022-04-03；**修回日期**：2022-07-07

第一作者简介：方启波(1998)，男，江西鄱阳人，硕士研究生，主要研究方向为磁流变液智能材料。**通信作者**：罗一平(1966)，男，上海人，教授，硕士生导师，主要研究方向为磁流变液智能材料。E-mail：yipingluo@sues.edu.cn

上一直走在前列,已经拥有了成熟的磁流变液商业化产品。

由于磁流变液多是用在阻尼器、传动装置等存在摩擦和压力的场合,且很多器件使用的是电磁发生装置,不可避免地会产生热量,这些原因导致磁流变液工作环境温度存在一定的复杂性,所以有必要对磁流变液温度特性展开研究。田祖织等[6]对磁流变传动装置温度场进行分析,发现热变形对传动影响较大,随着温度的升高,磁流变液的动屈服应力呈下降趋势。高春甫等[7]搭建了流变测试平台,测量温度在不同磁场强度下对剪切应力的影响,发现随着温度的升高,磁场强度越大时剪切应力下降越快。Wang 等[8]研究了磁流变液经过高低温循环后剪切屈服应力的变化情况,发现磁流变液经过低温—高温—低温循环后,最后的剪切屈服应力小于最初的剪切屈服应力。

温度的变化会影响磁流变液的相关性能,为了研究温度的影响机理,首先根据磁流变液在工作过程中的发热机理,找到其发热的根本原因,才能更好地掌握磁流变液工作过程中的温度变化情况。其次,要研究温度上升后对磁流变液微宏观性能的影响以及减振和传动装置的工作变化情况。笔者基于以上两方面研究现状,阐述了磁流变液发热机理和温度对磁流变液装置相关性能影响,为磁流变液的进一步研究提供一定的指导。

1 磁流变液工作发热机理

根据磁流变液的工作模式与场景的不同,磁流变液中热量产生的来源主要有以下几部分:①使用电磁铁作为磁场发生装置时,电磁线圈通电产生热量;②在减振和传动装置工作过程中,装置零部件之间、磁流变液内部以及磁流变液与装置之间的摩擦产生热量;③外界环境、磁热效应和压强等方面的影响也会产生一定的热量。

1.1 电磁生热

电磁铁是绝大多数磁流变减振传动设备的磁场发生装置[9],并且将线圈置于磁流变液内部以减少磁场泄漏[10],这样导致线圈产生的热量直接传至磁流变液。当需要提供更大的剪切应力时,将给线圈通更大的电流,导致更多热量的产生。由于线圈产生的热量在磁流变装置内部,并且是源源不断的,所以对于磁流变液而言,线圈产生的热量是其温度升高的重要原因。

1.2 摩擦生热

在磁流变减振、离合和传动等装置中,除了有密闭性等要求,还因活塞与缸筒、传动轴与轴承之间的工差配合要求高,因此在工作过程中会发生摩擦并产生大量的热量。此外,在传动装置启动、调速或者由于打滑等失效情况所发生的滑差,也会产生热量。王建等[11]有限元分析了磁流变传动装置在不同滑差功率下的温度情况,结果表明滑差功率越大,传动装置温度就越高,传动装置可正常运行的时间越短。Wang 等[12]研究了磁流变液促动器温度随加载时间与滑移功率变化关系,发现加载时间与滑移功率越大,促动器温度越高,滑移功率越大,温度上升得越快。

磁流变液的工作模式主要有流动、剪切和挤压[13],如图 1 所示。在流动状态时,磁流变液黏度较小,磁流变液内部磁性颗粒粒子间存在的碰撞、摩擦作用力比较小,所以产生的热量相对较少,几乎可以忽略;在剪切模式下,由于外加磁场的作用,磁性颗粒均按照磁场方向形成链状结构[14],而磁流变液在剪切过程中,磁性颗粒链不断地被切断并重组[15],所以会导致磁性颗粒之间的强有力的碰撞与摩擦,从而产生大量的热量;挤压工作模式[16]中施加的外部作用力与磁场方向平行,垂直作用到极板上,在磁场作用下形成的磁链受到来自极板的挤压,使得颗粒之间的作用力增大,从而导致颗粒之间、颗粒与载液之间的摩擦更加剧烈,产生更多的热量。

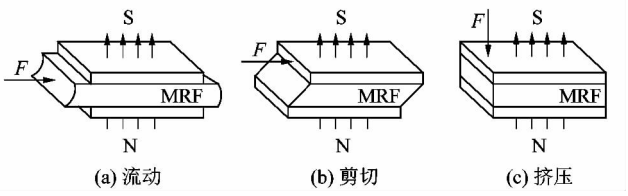

图 1 磁流变液工作模式

Figure 1 Work mode of MR fluid

除上述现象会产生热量外,磁流变液与其接触的壁面之间的摩擦也会产生热量。在磁流变减振器中,磁流变液在活塞的往复运动中不断与活塞和缸筒壁面之间发生摩擦[17];在磁流变传动装置中,磁流变液与

主、从动轴以及周围壁面之间发生摩擦[18]。并且磁流变液在工作过程中可能会发生壁面滑移现象[19],也会导致热量的产生。

摩擦生热是磁流变液温度升高的主要原因,在3种工作模式中,剪切模式下磁性颗粒链的不断切断和重组,颗粒链之间、颗粒链和壁面之间不断地发生摩擦,所以会产生更多的热量;另外如果磁流变装置滑差太大,也将导致磁流变液热量明显变化。

1.3　磁热效应与压强的影响

磁热效应是指磁性材料在外加磁场变化时温度发生相应变化的物理现象[20]。如图2所示,磁矩在没有磁场时是无序的,施加磁场后变成有序,磁熵 S 减小,温度 T 升高;当撤去磁场,磁性粒子发生热运动,导致其磁矩由有序变为无序,磁熵增大,温度降低[21-22]。所以在磁场增大的过程中,磁性颗粒温度会随之升高。

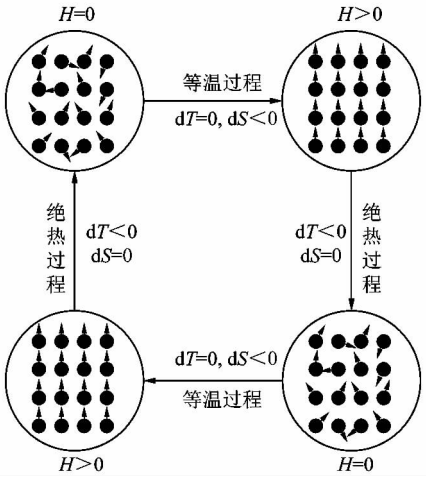

图2　磁热效应

Figure 2　Magnetothermal effect

压强的影响主要是指当磁流变液在承受外界压力时,磁性颗粒之间和磁性颗粒与接触壁面之间的作用力增大,导致颗粒和壁面的剧烈摩擦,从而产生热量,主要发生在挤压模式中。

虽然磁热效应会给磁性颗粒带来一定的热量变化,但对于磁流变液温升而言其贡献并不是很大,而压强的作用主要在挤压状态下发生,在其他工作模式下并不是磁流变液热量主要来源。

2　温度对磁流变液性能的影响

根据磁流变液的组成,先分析磁流变液各个组成成分的温度特性,再研究温度对磁流变液黏度、流变特性等方面的影响。

2.1　温度对磁流变液组成成分的影响

磁流变液主要由磁性颗粒、添加剂和载液3部分组成[23],随着磁流变液温度的升高,各个组成部分的相关性质会发生一定的改变,进而影响磁流变液宏观性能。

2.1.1　磁性颗粒

磁性颗粒是磁流变液的重要组成部分,对磁流变液的流变特性影响显著。理想的磁性颗粒应该具有较大的磁饱和强度和磁导率[24]。但是,随着温度的上升,磁性颗粒的磁化率、磁化强度和矫顽力等方面会发生变化,当温度上升到一定程度时,颗粒表面氧化也将严重影响磁流变液的性能。

磁化率 χ 是用来衡量材料磁化性能的物理量:

$$\chi = \frac{M}{H}。\tag{1}$$

式中:M 为颗粒磁化强度,A/m;H 为磁场强度,kA/m。

对于铁磁性材料来说,温度越高,磁化率越小,一旦温度超过材料的居里温度,磁体内部分子剧烈运动并出现退磁的现象,材料将从铁磁状态转变为超顺磁状态。满足温度变化规律的磁化率可使用居里-外斯定律表示:

$$\chi(T) = \frac{C}{T - T_c}。\tag{2}$$

式中:C 为居里常数,与材料有关;T 为热力学温度,K;T_c 为材料的居里温度,K。

陈飞等[25]20096研究了温度对颗粒饱和磁化强度的影响,发现随着温度的升高,饱和磁化强度下降幅度加快。Wang等[26]研究了温度对羰基铁颗粒的磁化强度、矫顽力的影响,发现随着温度的升高,羰基铁颗粒的磁化强度和矫顽力都有一定的下降。唐龙等[27]研究了铁粉氧化情况,发现在300 ℃以下铁粉抗氧化性良好,300 ℃以上铁粉被严重氧化,因此为了防止磁性颗粒因氧化而失效,有必要限制磁流变液工作温度范围。

2.1.2　添加剂

磁流变液中添加剂在液体中所占的质量分数较小,一般小于5%,但是添加剂对于改善磁流变液的性

能起着重要的作用[28-30]。添加剂主要分为表面活性剂、润滑剂、稳定剂和触变剂等,常用的有油酸、聚乙二醇、OP 乳化剂、SiO_2、石墨以及其他非离子型添加剂[31]。由于部分使用的添加剂是有机物,对温度变化比较敏感,有的在 100 ℃左右便会发生分解,甚至在经过高、低温循环后会使磁流变液不可逆稠化,从而影响磁性颗粒在磁场作用下的成链效果。因此需要根据磁流变器件工作的不同温度工况和环境,选择具有合适添加剂配方的磁流变液来满足使用要求。

2.1.3 载液

载液是磁流变液的主要成分,其作用是使磁性颗粒均匀分散在其中而形成悬浮液[32]。一般而言,为了扩大磁流变液工作温度范围,载液应该具有凝固点低和沸点高的特点,并且具有适当的黏度。硅油具有抗氧化能力强、工作范围宽和不易挥发等特点,所以被广泛使用。

温度对载液的影响主要是二方面:①温度对载液黏度的影响,随着温度的升高,分子热运动加剧,吸引力与内摩擦减小,黏度下降,导致磁流变液的黏度也下降;②随着温度的升高,载液会表现出一定的膨胀性,导致磁流变液在工作过程中体积变大。张进秋等[33]分别实验研究了磁流变液体积随温度的变化情况,发现磁流变液在低温时膨胀稳定性良好,高温稳定性差。陈飞等[25]20097对硅油和硅油基磁流变液分别进行了热膨胀实验研究,实验结果发现硅油和磁流变液膨胀趋势基本一致,证明磁流变液在高温下的膨胀主要由载液引起。所以当磁流变液工作环境为密闭空间时,尤其要考虑工作过程温升导致磁流变液体积增大带来的影响。

2.2 温度对黏度的影响

温度会影响磁流变液的黏度,而黏度又会影响剪切应力,进而影响磁流变液的传输性能。为了得到磁流变液黏温特性,不少研究者从理论和实验两方面对其进行了研究。

理论方面主要是为了建立磁流变液黏度与温度的数值变量关系,目前常用 Arrhenius 经验公式来描述黏温特性:

$$\eta(T) = Ae^{E_a/RT}。 \tag{3}$$

式中:A 为特定磁流变液的前因子;E_a 为特定磁流变液的流动活化能,kJ/mol;R 为摩尔气体常数,J/(mol·K);η 为黏度,Pa·s。

根据相关研究,磁流变液在 -40 ℃到 120 ℃范围内黏温变化曲线如图 3 所示。黏度随温度的变化主要在 -40 ~ 20 ℃范围内,在此范围内黏度随温度的升高显著减小;在 20 ~ 120 ℃范围内随着温度的升高黏度基本不发生变化。分析认为低温时载液凝固并且随着温度升高逐渐溶解,而 20 ℃之后磁流变液中的磁性颗粒和触变剂之间形成复杂的空间网状结构,使黏度趋于稳定。

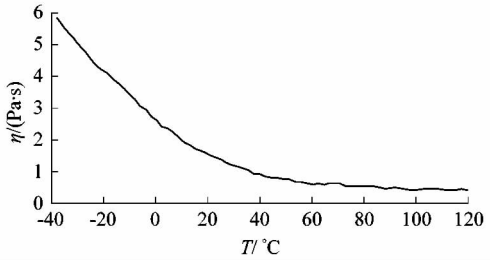

图 3 磁流变液黏温特性

Figure 3 Viscosity-temperature characteristics of MR fluid

Chen[34], Donado[35], Zschunke[36], McKee[37] 等多位研究者都实验研究了磁流变液黏度随温度的变化情况。研究表明磁流变液实际黏温变化与 Arrhenius 经验公式描述的基本一致,但当温度高于 120 ℃后,黏度会有所上升,这有可能是温度太高使得载液挥发;添加剂分解导致磁流变液稠化。

2.3 温度对剪切应力的影响

剪切屈服应力是评价磁流变液流变性能的主要指标之一[38]。描述屈服应力宏观模型主要有 Bingham 模型、双黏度模型、Eyring 模型和 Herschel-Bulkley 模型等,但是在这些模型中都没有给出温度的影响规律,而温度对磁性颗粒磁化强度和载液黏度等均有一定的影响,势必会对剪切应力造成影响。高春甫等[39]研究了磁流变液剪切屈服应力的温度特性,发现在低于 17 ℃时剪切屈服应力随着温度的上升而下降,17 ~ 150 ℃范围内剪切屈服应力近似不变,温度超过 150 ℃时,磁流变液的剪切屈服应力随温度的升高而

下降。也有不少研究者从理论的角度综合研究了磁场和温度对剪切应力的影响,并建立磁-温耦合模型,从而更加准确地预测磁流变液剪切应力的变化情况。Sahin 等[40]研究发现 Herschel-Bulkley 模型中的流体塑性黏度系数 $k(T)$ 和流动特性指数 $n(T)$ 均与温度有关,为了描述磁流变脂的温度动态特性,建立了包含温度参数的 Herschel-Bulkley 模型。Liu 等[41]使用改进的 Herschel-Bulkley 模型预测磁流变液在零场和外加磁场时的流变特性,并根据磁流变液的微观结构,提出了一个预测屈服应力的理论模型。

根据磁流变液黏温特性的理论和实验可知,尽量使磁流变液工作温度范围控制在 20 ~ 120 ℃,对于温度极低的地区,将导致磁流变液黏度显著增大,甚至出现冻结现象;另外为了避免磁流变液的不可逆稠化,尽量避免磁流变器件长时间工作或工作温度太高。虽然剪切应力受外加磁场作用很大,但温度对磁流变液剪切应力的影响不可忽略,建立通用的剪切应力的磁-温耦合模型仍是研究重点。

2.4 其他方面

除了研究温度对磁流变液流变性能的影响之外,不少研究者还研究了温度对磁流变液其他性能的影响。Bica[42]研究了磁流变悬浮液在纵向磁场中的导电情况,在固定磁场下,温度从 300 K 升高到 400 K 时,电导率提高了约96.8%。McKee 等[43]实验研究了温度对磁流变液和可压缩磁流变悬浮系统性能的影响,包括体积模量、刚度以及能量耗散等,发现随着温度的升高,降低了体积模量,压缩了磁流变悬浮系统的刚度同时也减小了能量耗散。侯鹏[44]对不同温度下(-25 ℃,25 ℃,60 ℃)磁流变液沉降性能进行了研究并分析原因,发现沉降速度随着温度的升高而变快,分析认为温度升高导致分子运动加剧从而促进了粒子的碰撞聚结以及破坏了粒子与添加剂之间的网格结构,从而颗粒沉降加速。Hemmatian 等[45]研究了温度对磁流变液存储模量和损耗模量的影响,发现在没有外加磁场作用下,温度对磁流变液储能模量和损耗模量影响最大。

3 结语

在磁流变液工作过程中,热量的来源有摩擦、电磁线圈发热、磁热效应及挤压等,磁流变液温度升高后,磁性颗粒的磁化强度和磁化率有所下降,表面可能会发生氧化,此时添加剂和载液的稳定性也会受到一定的影响。这是因为磁性颗粒磁化率的降低会导致外加磁场后颗粒成链效果变差,在温度达到一定程度后,载液可能会挥发,添加剂发生分解。因此可以从配方入手寻找温度稳定性更好的材料来配置性能更好的磁流变液。

从宏观角度看,温度的变化对磁流变液黏度和剪切应力会造成影响,黏度在一定温度范围内基本遵循 Arrhenius 经验公式,但当温度升高到一定程度后,磁流变液将会发生不可逆的稠化;剪切应力是磁流变液的一项重要指标,为了更加准确地预测磁流变液剪切屈服应力,包含温度参数并且通用的剪切屈服应力模型的建立是目前研究的重点。

为了保证磁流变液的性能稳定,延长其使用寿命,可以选择具有温度稳定性良好的磁性颗粒、添加剂和载液以及使用合适的磁流变液配方。当磁流变液温度升高不可避免时,有必要采取冷却措施来维持磁流变液的温度稳定。

参考文献:

[1] WANG W C, LUO Y P, JI M. Experimental study on tensile mechanical properties of magnetorheological fluid[J]. International Journal of Modern Physics B, 2020, 34(8):2050070.

[2] 赵旭,张展飞,罗跃辉,等. 磁流变液技术在车辆座椅悬架系统中的应用[J]. 农业机械,2018(3):98 - 100.

[3] 苏德发,袁发鹏. 考虑离心挤压的磁流变离合器传动性能研究[J]. 机械设计与制造,2018(4):40 - 43.

[4] YU H J, SUN X T, XU J, et al. The time-delay coupling nonlinear effect in sky-hook control of vibration isolation systems using magneto-rheological fluid dampers[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(9):4157 - 4166.

[5] KIM B C, CHUNG J H, CHO M W, et al. Magnetorheological fluid polishing using an electromagnet with straight pole-piece for improving material removal rate[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32(7):3345 - 3350.

[6] 田祖织,侯友夫,王因因. 磁流变传动装置温度特性研究[J]. 仪器仪表学报,2012,33(3):596 - 601.

[7] 高春甫,周崇秋,郑强,等. 温度对磁流变液剪切应力特性的影响[J]. 应用力学学报,2020,37(4):1724 - 1730.

[8] WANG D M, ZI B, ZENG Y S, et al. Measurement of temperature-dependent mechanical properties of magnetorheological fluids using a

parallel disk shear stress testing device[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, 231(9):1725 - 1737.

[9] 彭虎,张进秋,刘义乐,等.磁流变减振器结构优化设计、性能试验及力学建模[J].科学技术与工程,2018,18(11):162 - 169.

[10] SASSI S, SASSI A, CHERIF K, et al. Magnetorheological damper with external excitation for more efficient control of vehicles′dynamics [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2018, 29(14):2919 - 2932.

[11] 王建,汪永强,魏忠才,等.磁流变液传动装置瞬态温度场分析[J].煤矿机械,2015,36(10):129 - 131.

[12] WANG D M, HOU Y F. Design and experimental evaluation of a multidisk magnetorheological fluid actuator[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2013,24(5):640 - 650.

[13] 汪建晓,孟光.磁流变液装置及其在机械工程中的应用[J].机械强度,2001,23(1):50 - 56.

[14] XU Z D, SUN C L. Single-double chains micromechanical model and experimental verification of MR fluids with MWCNTs/GO composites coated ferromagnetic particles[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2021,32(14):1523 - 1536.

[15] 赵春伟.基于微结构的磁流变液力学性能研究[D].重庆:重庆大学,2014:30.

[16] GSTÖTTENBAUER N, KAINZ A, MANHARTSGRUBER B, et al. Experimental and numerical studies of squeeze mode behavior of magnetic fluid [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2008, 222(12):2395 - 2407.

[17] WILSON N L, WERELEY N M, HU W, et al. Analysis of a magnetorheological damper incorporating temperature dependence [J]. International Journal of Vehicle Design,2013,63(2/3):137 - 158.

[18] 黄金,乔臻.形状记忆合金驱动的圆盘式磁流变液变速传动装置磁场有限元分析[J].机械传动,2015,39(7):126 - 130.

[19] JIANG J, HU G, ZHANG Z M, et al. Stick-slip behavior of magnetorheological fluids in simple linear shearing mode [J]. Rheologica Acta, 2015,54(9):859 - 867.

[20] TISHIN A M. Magnetocaloric effect in the vicinity of phase transitions[J]. Handbook of Magnetic Materials, 1999, 12: 395 - 524.

[21] TEGUS O, BRÜCK E, BUSCHOW K H J, et al. Transition-metal-based magnetic refrigerants for room-temperature applications[J]. Nature, 2002, 415(6868):150 - 152.

[22] 郑新奇,沈俊,胡凤霞,等.磁热效应材料的研究进展[J].物理学报,2016,65(21):1 - 34.

[23] MARGID A J, WEISS K D, CARLSON J D. Magnetorheological materials based on iron alloy particles[J]. International Journal of Modern Physics B, 1996, 10(23n24):3335 - 3341.

[24] 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.

[25] 陈飞,田祖织,王建.温度对磁流变液流变性能的影响研究[J].功能材料,2014,45(20):20095 - 20098.

[26] WANG D M, ZI B, ZENG Y S, et al. Temperature-dependent material properties of the components of magnetorheological fluids [J]. Journal of Materials Science, 2014, 49(24):8459 - 8470.

[27] 唐龙,岳恩,罗顺安,等.磁流变液温度特性研究[J].功能材料,2011,42(6):1065 - 1067.

[28] FANG F F, CHOI H J, JHON M S. Magnetorheology of soft magnetic carbonyl iron suspension with single-walled carbon nanotube additive and its yield stress scaling function[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2009, 351(1/2/3):46 - 51.

[29] 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(1/2/3):103 - 109.

[30] CHAE H S, PIAO S H, MAITY A, et al. Additive role of attapulgite nanoclay on carbonyl iron-based magnetorheological suspension[J]. Colloid and Polymer Science, 2015, 293(1):89 - 95.

[31] 江泽琦,刘坪,方建华.磁流变液的研究综述[J].合成润滑材料,2018,45(2):27 - 30.

[32] 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(2):55 - 57.

[33] 张进秋,张建,王洪涛,等.基于正交试验法的磁流变液制备及其特性分析[J].新技术新工艺,2010(3):59 - 63.

[34] CHEN S, HUANG J, JIAN K L, et al. Analysis of influence of temperature on magnetorheological fluid and transmission performance[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2014,2015:1 - 7.

[35] DONADO F, SANDOVAL U, CARRILLO J L. Viscosity enhancement in dilute magnetorheological fluids through magnetic perturbations[J]. Revista Mexicana De Fisica, 2011, 57(5):426 - 434.

[36] ZSCHUNKE F, RIVAS R, BRUNN P O. Temperature behavior of magnetorheological fluids[J]. Applied Rheology, 2005,15(2): 116 - 121.

[37] MCKEE M, WANG X J, GORDANINEJAD F. Effects of temperature on performance of a compressible magnetorheological fluid damper-liquid spring suspension system [C]//Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2011. SanDiego,

California: International Society for Optics and Photonics, 2011, 7977: 797712.

[38] BOSSIS G, LACIS S, MEUNIER A, et al. Magnetorheological fluids[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 252:224 – 228.

[39] 高春甫,张广,陈卫增,等.非均匀磁场下磁流变液剪切屈服应力的温度特性[J].磁性材料及器件,2015,46(6):9 – 11.

[40] SAHIN H, WANG X J, GORDANINEJAD F. Temperature dependence of magneto-rheological materials [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2009, 20(18):2215 – 2222.

[41] LIU J R, WANG X J, TANG X, et al. Preparation and characterization of carbonyl iron/strontium hexaferrite magnetorheological fluids[J]. Particuology, 2015,22:134 – 144.

[42] BICA I. The influence of temperature and of a longitudinal magnetic field upon the electrical conductivity of magnetorheological suspensions[J]. Physica B: Condensed Matter, 2006, 371(1):145 – 148.

[43] MCKEE M, GORDANINEJAD F, WANG X. Effects of temperature on performance of compressible magnetorheological fluid suspension systems[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2018,29(1):41 – 51.

[44] 侯鹏.磁流变液稳定性的评价研究[D].武汉:武汉理工大学,2008:42 – 43.

[45] HEMMATIAN M, SEDAGHATI R, RAKHEJA S. Temperature dependency of magnetorheological fluids′ properties under varying strain amplitude and rate[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020, 498:166109.

欢迎订阅 2023 年《中国特种设备安全》杂志

《中国特种设备安全》(原《中国锅炉压力容器安全》)是国家市场监督管理总局主管,中国特种设备检测研究院、中国特种设备检验协会和中国锅炉与锅炉水处理协会主办的国家级别科技期刊。创刊于 1985 年 5 月,是我国特种设备领域级别最高的优秀科技期刊,本刊论文目前已经被中国学术期刊网络出版总库、中国知识资源总库、中国核心期刊(遴选)数据库和万方数据——数字化期刊群等数据库确认收录。

《中国特种设备安全》自创刊以来,遵循办刊宗旨,坚持社会效益第一,兼顾经济效益的原则,多层次、多角度、全方位地反映了特种设备领域科学技术的进步,全面和客观地记录了我国特种设备安全工程进展的历程。在“政策导向”“专论与综述”“法规标准”“试验研究与应用”“管理与检测技术”“检验评价”“风险评估与安全分析”“水处理”“材料与设计”“事故与缺陷分析”“节能减排”等栏目中,您会第一时间了解国家相关政策法规,同时也可获取特种设备行业的最新科技信息与动态,享受高端阅读的愉悦。

《中国特种设备安全》刊号 CN 11-5345/TK、ISSN 1673-257X。月刊,大 16 开,每期定价 55.00 元,全年定价 660.00 元,邮发代号 82 – 411,全国各地邮局均可订阅或直接向本刊发行部订阅。

户名:《中国特种设备安全》杂志社有限公司
纳税人识别号:91110105MA01U4AY4K
地址:北京市朝阳区和平街西苑 2 号 B 座 B506/B508
开户银行:交通银行股份有限公司北京和平里支行
银行帐号:110060224018800037260

联系人:王 源 010 – 59068616
孙海祥 010 – 59068612
传 真:010 – 59068616 或 84279798
电子邮箱:zzs@csei.org.cn
网 址:http://www.csespub.cn
淘宝书店:《中国特种设备安全》杂志社有限公司

《中国特种设备安全》公众号

淘宝书店二维码