

引用格式: 齐明燕, 滕旭东, 王晓彧. 声波反射法测量电流变液参数[J]. 声学技术, 2023, 42(2): 152-155. [QI Mingyan, TENG Xudong, WANG Xiaoyu. Measurement of electrorheological fluid parameters by acoustic reflection method[J]. Technical Acoustics, 2023, 42(2): 152-155.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2023.02.004

声波反射法测量电流变液参数

齐明燕¹, 滕旭东¹, 王晓彧²

(1. 上海工程技术大学电子电气工程学院, 上海 201610; 2. 南京工业职业技术大学航空工程学院, 江苏南京 210023)

摘要: 电流变(Electrorheological, ER)液是一种新型智能材料, 在外部电场作用下其物理特性可调节。文章设计了一种电流变液的声学测量系统, 利用声波反射法测量电流变液的反射系数和相位差, 根据声阻抗率与弹性模量关系, 得到电流变液储能模量、耗能模量和损耗角等参数。实验结果表明: 声阻抗率、储能模量和损耗角等参数与所施加外部电场的电压有关, 采用电极绝缘漆处理工艺能有效兼顾电流变液对较大剪切应力和快速响应时间的性能要求。

关键词: 电流变液; 声反射法; 声阻抗率

中图分类号: TB52

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2023)-02-0152-04

Measurement of electrorheological fluid parameters by acoustic reflection method

QI Mingyan¹, TENG Xudong¹, WANG Xiaoyu²

(1. Shanghai University of Engineering Science, School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai 201610, China;

2. Nanjing Vocational University of Industry Technology College of Aeronautical Engineering, Nanjing 210023, Jiangsu, China)

Abstract: Electrorheological Fluid (ERF) is a kind of novel intelligent material with adjustable physical parameters under the action of an applied electric field. By applying different electrical voltages, the storage modulus, loss modulus and loss angle of ERF change simultaneously. In this paper an acoustic impedance measuring system based on ultrasonic (shear) wave reflection method is designed to measure such changes of ERF parameters. Furthermore, the relationships between viscoelastic parameters obtained by acoustical impedance and electrical field intensity can be determined and analyzed so as to realize accurate control for ERF. In addition, the processing technology involved with electrode insulation is tested to explain its influence on measuring acoustic impedance and loss modulus of ERF.

Key words: electrorheological fluid (ERF); acoustic reflection method; acoustic impedance

0 引言

电流变(Electrorheological, ER)液是由高介质常数的固体颗粒与低介质绝缘液态基体(如橄榄油、硅油及食用油等)混合而成的复杂悬浮体系。在外电场的作用下, 电流变液中的介电颗粒极化成为电偶极子, 沿着电场方向连接成链状进而形成柱状结构, 使得电流变液由类液状态转变成类固状态^[1-3], 这个过程极为迅速, 时长通常为毫秒级^[3]。当撤去外加电场时, 电流变液可以快速从类固状态转变为类液状态, 而且整个过程能耗极小, 因此电流变液作为智能材料在机械、汽车和控制工程等领域得到广泛应用^[4]。

评估电流变液特性的关键指标是剪切应力和响应时间(恢复时间)^[5-7], 这两个参数分别反映了黏弹性材料形变过程储能模量和耗能模量大小。通常采用流变仪可以测量材料的黏度、弹性模量和流变等特性, 然而电流变液性能测试需要使用外加的高压电场测力装置, 容易产生较大的漏电流, 因而制约了流变仪的适用范围。考虑到剪切波传播特性与介质的黏度、剪切模量和密度等相互关联, 通过测量声波传播参量来标定弹性模量的方法被引入^[8-9]。Bellin等测量了电流变液在零电场及电场强度为 $1.5\text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ 时超声剪切波声速变化^[10]。Guicking提出了在不锈钢阻抗管中测量电流变液纵波阻抗的测量方法^[11]。文献[12-13]测量了沸石/硅油体系的电流变液在频率为 62.6 kHz 、电场强度低于 $1.4\text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ 时剪切波阻抗。

本文设计一种电流变液声学测试系统, 研究了成分为30%体积分数的二氧化钛与聚二甲硅烷混合形成的电流变液材料的物理特性。通过改

收稿日期: 2021-07-07; 修回日期: 2021-08-21

作者简介: 齐明燕(1996—), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 研究方向为纳米光子学。

通信作者: 滕旭东, E-mail: txdl9@163.com

变电场强度测量一次反射波幅度和零点位置时差, 获得电流变液的反射系数和声阻抗率。根据声阻抗率与弹性模量关系, 得到不同外加电场强度下材料的储能模量和损耗角等参数, 并测试电极绝缘处理工艺对耗能模量等测量影响。本研究为工程中灵活地配置电流变液参数提供一种简便且实用的设计方法。

1 声波反射法

超声波垂直入射到电流变液, 在界面处的反射系数定义为^[8]

$$r = |r|e^{-j(\pi+\varphi)} = \frac{P_{\text{psr}}}{P_{\text{psi}}} = \frac{Z_c - Z_{\text{ps}}}{Z_c + Z_{\text{ps}}} \quad (1)$$

其中: P_{psr} 和 P_{psi} 分别为入射声波声压和反射声波声压, $|r|$ 和 φ 分别为反射系数的模和相位, Z_c 为电流变液的声阻抗率, Z_{ps} 为压电换能器匹配层声阻抗率。由此可推导出电流变液声阻抗率 Z_c :

$$Z_c = R + jX = Z_{\text{ps}} \frac{1 - |r|e^{-j\varphi}}{1 + |r|e^{-j\varphi}} = Z_{\text{ps}} \frac{1 - |r|^2 + 2j|r|\sin\varphi}{1 + |r|^2 + 2|r|\cos\varphi} \quad (2)$$

其中: R 和 X 分别为声阻率和声抗率。电流变液材料的黏弹性特性采用储能模量 G_s 和耗能模量 G_L 来表征, 它们与电流变液声阻抗率的关系为^[12,7]

$$\begin{cases} G_s = \frac{R^2 - X^2}{\rho} \\ G_L = \frac{2RX}{\rho} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ρ 为电流变液密度。电流变液储能模量 G_s 越大, 电流变液的剪切应力也越强, 而耗能模量 G_L 越小, 则电流变液对外加电场的变化响应更加迅速。因此, 为评估电流变液的综合效率, 常用损耗角 δ 来表征电流变液材料特性, 其定义为

$$\delta = \text{atan}(G_L/G_s) \quad (4)$$

在超声波垂直入射条件下, 可以采用发射法测量电流变液的反射波幅度比和过零点时刻差^[14-15], 近似得到反射系数的模值和相位, 计算电流变液的声阻抗率, 进而可以计算得到电流变液的储能模量和耗能模量以及损耗角等参数。

2 反射系数实验测量

图1为所设计的声学测量系统, 由脉冲信号发生器(Olympus 5072PR)、示波器(Tektronix TDS

3012C)、1 MHz 剪切波换能器(Olympus V153)、电流变液测试盒、高压电源和电阻组成。电流变液测试盒结构如图2所示, 测试盒的材料为聚苯乙烯材, 其声阻抗率与电流变液的声阻抗率接近, 厚度仅为4 mm, 可有效降低对入射波的衰减。测试盒的内部上下表面分别为厚度20 nm的铜电极(间隔为1 mm), 它们分别接高压电源正负极。

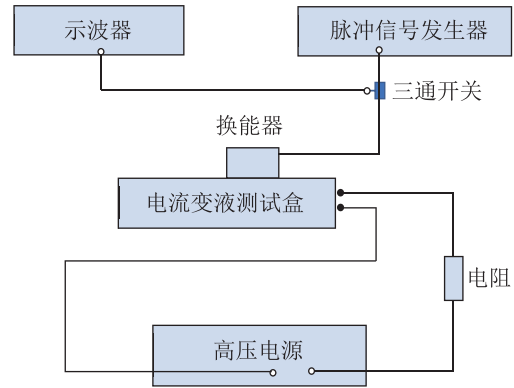


图1 声学测量系统

Fig.1 Schematic diagram of acoustical test system

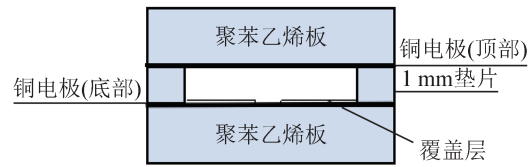


图2 电流变液测试盒结构

Fig.2 Structure of ERF test box

被测介质选用体积分数为30%的二氧化钛与聚二甲硅氧烷混合悬浮液, 密度为 $1.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。测试盒内注满被测介质且被密封。超声换能器用水杨酸苯酯黏接在测试盒的上表面而不与被测介质直接接触, 黏接层厚度小于0.1 mm, 远小于换能器振动波长, 可以忽略黏接层影响。电阻器串联在高压回路中, 可实时检测被测介质漏电流的变化情况。换能器工作在自发自收模式, 脉冲信号发生器向换能器提供测量信号, 示波器可实时采集换能器接收的反射波信号。

测量分两步进行: (1) 测试盒不加被测介质(即空载状态), 脉冲信号源输出宽频单脉冲信号(重复周期为10 ms), 激励换能器产生剪切波。由于没有被测介质, 剪切波在测试盒顶部全反射, 回波由换能器接收, 并经三通开关送入示波器, 采集得到一次反射波峰峰值幅度记为 A_0 , 波形零点位置时刻记为 t_0 。(2) 将测试盒内注满被测介质(即有载状态), 使用单脉冲信号激励换能器, 示波器分时采集回波信号, 记录一次反射波峰峰值幅度 A_1 和零点位置时刻 t_1 , 代入式(5), 则可计算被测介质的反射系数

模 $|r|$ 和相位差 φ , 即:

$$\begin{cases} |r| = \frac{A_1}{A_0} \\ \varphi = 2\pi f(t_1 - t_0) = \omega(t_1 - t_0) \end{cases} \quad (5)$$

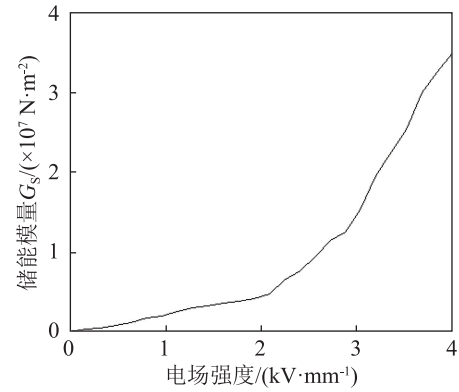
式中: 调整外接电场电压, 重复有载测量过程, 将结果代入式(2)则得到不同电场强度下的声阻抗率。

3 结果分析

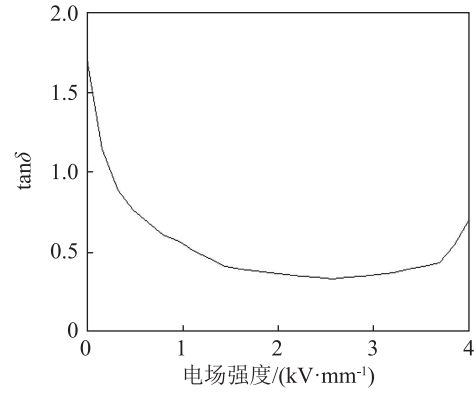
图3给出了不同电场强度下反射系数模值和相位的变化曲线。由图3可见电场强度越低, 电流变液反射系数越大, 说明电流变液弹性模量变化越不显著。但随电场强度升高, 反射信号幅度变小, 当电场强度达到 $4 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ 时, 反射系数模值下降到0.65以下, 表明材料特性更接近类固态; 图3(b)中, 反射系数相位随着电场强度升高在变大, 电场强度为0时相位小于 0.03 rad , 但当电场强度超过 2.5 kV , 相位则快速上升, 表明声抗率随电场强度上升不断增大。

图4给出了根据声阻抗率计算得到的被测介质的储能模量和损耗角的正切值 $\tan\delta$ 随电场强度的变

化曲线。由图可知, 施加电场强度越大, 被测介质的储能模量也越大, 当电场强度超过 $2 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$, 被测介质的储能模量增长速度明显增加。随着电场强度的增加, 损耗角的正切值 $\tan\delta$ 先减小, 然后再增大; 在 $2.5 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ 附近, 损耗角的正切值 $\tan\delta$ 存在一个最小值, 该区域是被测介质合适的工作电压区间, 低于或超过该区间, 被测介质耗能模量的增长速度会高于储能模量的增长速度。小的损耗角的正切值 $\tan\delta$, 相同的耗能模量下被测介质储能模量会更大, 而且在同等的响应时间内可以获得更强的剪切应力。



(a) 储能模量 G_s



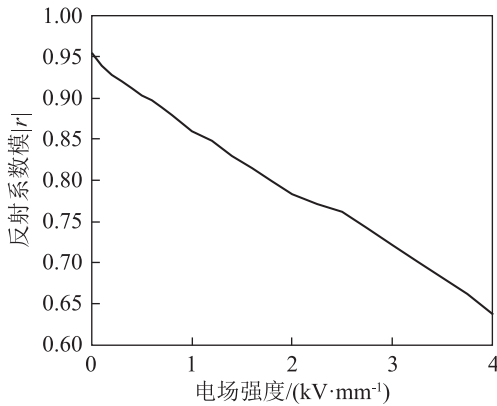
(b) $\tan\delta$

图4 随施加电场强度变化, 电流变液储能模量 G_s 和 $\tan\delta$ 变化曲线

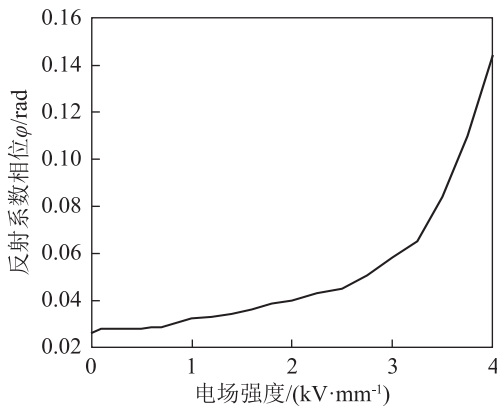
Fig.4 Variation curves of storage modulus and $\tan\delta$ of ERF with applied electric field strength

实验还发现电极处理工艺对测试结果也会产生影响。在测试盒纯铜(底部)电极表面喷涂 KF 1280-ND 绝缘漆, 测量得到被测介质材料参数会有所不同, 测量曲线如图5所示。

由图5可知, 随着电场强度增大, 反射系数呈下降趋势, 储能模量则在增大。相比纯铜极, 底部电极表面绝缘处理后, 反射系数以及耗能模量 G_L 随着电场强度变化较小。原因是电极表面覆盖了一层薄膜, 降低了加载在电流变液盒中的实际电场强度, 从而电流变液的剪切应力随施加电场强度改变



(a) 反射系数模 $|r|$



(b) 反射系数相位 φ

图3 施加的电场强度与声反射系数模和相位的关系图

Fig.3 Applied electric field strength versus acoustic reflection coefficient modulus and phase

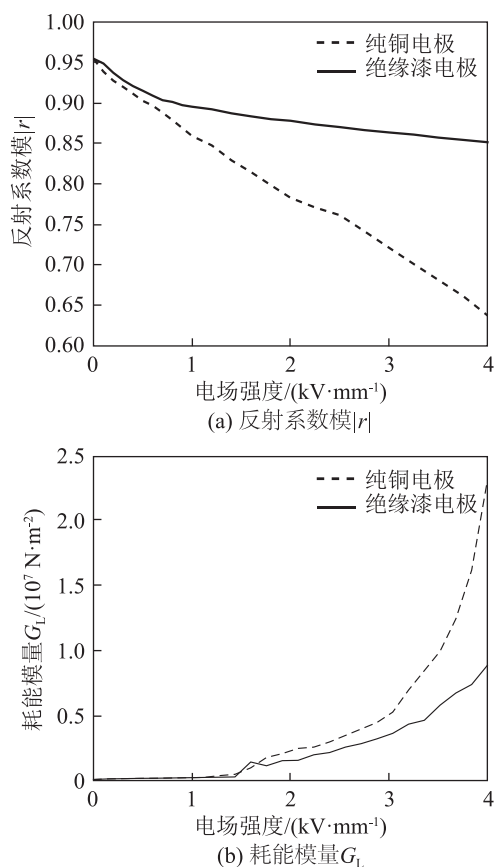


图5 不同电场强度下使用绝缘电极和纯铜电极测量的反射系数模和耗能模量 G_L 的曲线对比

Fig.5 Comparison curves of acoustic reflection coefficient modulus and energy dissipation modulus G_L measured by using insulated electrode and pure copper electrode under different electric field strengths

相对较小。无绝缘漆纯铜电极,随着施加电场强度的增加储能模量迅速增大,但会产生较大的漏电流,导致耗能模量 G_L 迅速增加,造成损耗角的正切值 $\tan\delta$ 较大。因此,合理处理电极绝缘性工艺能有效控电流变液的漏电流,降低耗能模量,确保施加加大电场强度下电流变液仍有较快响应速度。

4 结论

本文采用声波反射法,设计了一种电流变液黏弹性参数包括储能模量、耗能模量和损耗角等的声学测量系统。通过测量电流变液的反射系数,计算和分析电流变液在不同电场强度下变化情况。实验结果表明:电流变液声阻抗率与施加电场强度成正比,电场强度越大入射波反射系数越小,但相位差会逐渐变大。在大电场作用下,电流变液储能模量增大,剪切力增强,结构也相对更稳定,但电流流变液转变(响应)时间会增加。采用电极绝缘处理工艺能有效兼顾电流变液对较大剪切应力和快速响应时间的性能要求。当施加电场强度大于 $2 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$

时,使用绝缘电极,反射系数的斜率变化平缓,耗能模量较小,能保持电流变液的快速响应,较好地实现对电流变液的智能操控。

参 考 文 献

- [1] 徐佩弦. 高聚物流变学及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [2] 梁宇岱, 徐志超, 袁欣, 等. 电流变液智能材料的研究进展[J]. 中国材料进展, 2018, 37(10): 803-810, 816.
LIANG Yudai, XU Zhichao, YUAN Xin, et al. Research progress of electrorheological smart fluid[J]. Materials China, 2018, 37(10): 803-810, 816.
- [3] WEN W J, MA H R, TAM W Y, et al. Frequency-induced structure variation in electrorheological fluids[J]. Applied Physics Letters, 2000, 77(23): 3821-3823.
- [4] 郑杰, 马苹苹, 周凯运, 等. 电流变液的研究与应用进展[J]. 功能材料, 2015, 46(S2): 19-27.
ZHENG Jie, MA Pingping, ZHOU Kaiyun, et al. Advances in research and application of electrorheological fluids[J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(S2): 19-27.
- [5] 魏宸官. 电流变技术: 机理·材料·工程应用: 国家自然科学基金资助项目[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2000.
- [6] 丁律辉. 电流变液声传播机理及特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
DING Lvhui. Study on the acoustic propagation mechanism and characteristics of electrorheological fluid[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
- [7] 赵晓鹏, 尹剑波. 电场调控的智能软材料[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [8] 王晓戡. 空气耦合超声换能器及其应用的研究[D]. 南京: 南京大学, 2019.
WANG Xiaoyu. Investigation on air-coupled ultrasonic transducer and its application[D]. Nanjing: Nanjing University, 2019.
- [9] 祖群, 黄三喜, 张焱, 等. 玻璃及玻璃纤维模量测试方法 I: 超声回波法[J]. 玻璃纤维, 2019(5): 1-7, 12.
ZU Qun, HUANG Sanxi, ZHANG Yan, et al. Testing method I for module of glass and glass fibers: ultrasonic echo method [J]. Fiber Glass, 2019(5): 1-7, 12.
- [10] BELLIN J L, HOLSINGER R, CHOW A W. The measurement of ultrasonic shear wave properties in electrorheological fluids[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1992, 92(2): 1174-1176.
- [11] GUICKING D, WICKER K, EBERIUS C. Electrorheological fluids as an electrically controllable acoustic medium: I. experimental arrangement and application to an absorber of underwater sound [J]. Acta Acustica United with Acustica, 2002, 88(6): 886-895.
- [12] DUAN X D, WU W, ZHOU T Y, et al. Evidence of nematic phases in electrorheological fluid by acoustic impedance measurement[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2000, 33(7): 57-59.
- [13] INOUE M, YOSHINO K, MORITAKE H, et al. Electrorheological properties of chiral smectic-C liquid crystals observed by using shear horizontal wave propagation[J]. Ferroelectrics, 2002, 277(1): 47-58.
- [14] KIM J W, CHO M S, CHOI H J, et al. Electrorheological fluid characterization via a vertical oscillation rheometer[J]. Polymer Testing, 2001, 20(8): 913-918.
- [15] 牛金海. 超声原理及生物医学工程应用: 生物医学超声学[M]. 2版. 上海: 上海交通大学出版社, 2020.