

知识介绍

电流变液及其应用

马会茹 官建国 卢国军 袁润章

(武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430070)

摘要: 电流变液是一种由纳米至微米尺寸的介电粒子分散在绝缘油中组成的一种新型智能材料,在外加电场的作用下其流变特性可以发生快速、显著、可逆的变化。对电流变液材料的种类,电流变液在汽车工程、减震、抗震、生物医学上的应用,以及制约电流变技术应用的关键性问题等进行了简要的介绍。

关键词: 电流变材料;智能结构;应用

中图分类号:TB39

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2004)05-0062-03

Electrorheological fluids and their application

MA Hui-ru, GUAN Jian-guo, LU Guo-jun, YUAN Run-zhang

(State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Electrorheological fluid is a kind of novel smart fluids composed of dielectric nano-meter or micrometer size particles and insulating oil. It has extensive application prospects in the engineering field due to its fast, remarkable, reversible changes of rheological properties upon the application of an external field. Its applications in automotive engineering, shock-reduction, antiknock and bioiatrology and the key problems hindering the development of electrorheological technology were briefly introduced.

Key words: electrorheological fluid; smart structure; application

电流变液被称为是一种新型的智能流体,在外加电场的作用下,其剪切强度随电场强度的增加而变大,可以实现液固之间快速、连续、可逆的转变,且能耗很低,是智能材料结构与系统中驱动部件的首选材料之一。电流变液具有剪切强度连续可调、快速响应和可逆转变的奇特性质,是软硬程度可调节的智能材料,具有广泛和重要的应用价值。电流变液一直没有得到普遍应用,主要是由于其剪切强度低,不能满足工程应用的要求。最近香港科技大学的科学家们研制出了一种由纳米颗粒与硅油组成的具有巨电流变(Giant-Electrorheological)效应的电流变液^[1],它的剪切强度高达 130 kPa,较目前的世界记录高出 10 倍以上,这一伟大创举令电流变液走出实验室发展成为商品的构想即将成为现实,也为电流变液的研究开辟了新的途径。

1 电流变液材料

自从美国 Winslow^[2] 1947 年首先发现并报道了

电流变液之后,很多国家的科学工作者投入了对电流变液的研究与开发,并在电流变液的材料制备、结构和性能的研究方面取得了很大的进展,开发了数百种电流变液,出现了电流变液相关商品。目前广泛研究与应用的电流变液主要有两相悬浮体系电流变液和均相体系电流变液。

1.1 悬浮体系电流变液材料

由可在电场中产生极化的固体粒子、低介电常数的绝缘油和添加剂 3 部分组成的电流变液称为悬浮体系电流变液。早期对电流变材料的研究主要集中在含水电流变材料上,例如 Klass^[3] 研制的聚甲基丙烯酸锂盐聚合物电解质电流变材料。以 Strangroom^[4] 为代表的“水桥理论”对含水电流变材料的电流变效应机理进行了解释。但含水电流变材料由于含有水而存在材料性能受温度限制大(低于 0℃ 或高于 100℃ 电流变效应消失)、漏电流密度大、耐击穿电压低等难以克服的缺点。

20 世纪 80 年代 Block^[5] 最先研制出了稠环芳烃

收稿日期:2004-02-11;修回日期:2004-03-01

基金项目:国家自然科学基金重点项目(59832090)和面上项目(29904005)资助

作者简介:马会茹(1973-),女,博士生;官建国(1969-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事有机-无机纳米复合材料在高性能电/磁流变液和微波吸收材料中的应用研究。

类无水电流变材料,克服了含水型电流变材料的不足,标志着电流变材料的研究进入了新的阶段。目前对无水电流变液电流变效应的解释还没有一个十分明确、统一的观点,主要有分子极化与最低能态理论和双电层极化理论^[6],普遍认为电流变效应的产生是由于悬浮液中固体粒子在电场诱导下的极化。Tao R.^[7]认为颗粒介电损耗越大,颗粒表面电荷越多,在电场下界面极化越显著。最近,温维佳^[1]等人用他们新建立的“表面极化饱和”物理模型圆满地解释了他们研制的纳米粒子悬浮型电流变液产生的巨电流变效应。

根据组成的无水分散相粒子的种类不同,无水电流变材料主要包括无机电流变液材料、高分子电流变液材料和复合型电流变液材料。

1.1.1 无机电流变液材料

无机电流变材料基本上都是离子型的金属和非金属化合物,包括金属氧化物和金属盐类,其特点是具有较高的介电常数,组成的电流变液具有较大的力学值。Filisko^[8]研制的无水硅铝酸盐-沸石电流变液被认为是第一种无机电流变材料,这种材料在无水和高温下均具有较高的电流变活性。清华大学田煜等^[9]所配制的基于沸石的电流变液剪切屈服强度可以达到 20 kPa 以上。中科院物理所张玉琴^[10]等合成的由钛酸锶组成的无水电流变液最大剪切应力达 5 kPa,漏电流密度小于 $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$,并具有良好的悬浮稳定性。目前无机电流变液材料还普遍存在密度大、硬度大、颗粒的悬浮稳定性差、对器件的磨损大等缺点,其综合性能有待提高。

1.1.2 高分子电流变液材料

目前用于电流变液的高分子材料主要有电解质高分子材料和有机半导体高分子材料。有机高分子电流变材料具有较高的力学值、优良的疏水特性,且密度小,质地软,可有效解决电流变液的沉降和材料对器件的磨损问题,因而倍受研究者的青睐。高分子电流变材料已有商品试售,如日本 Nippon^[11]公司的 TX-ER 系列,德国 Bayer 公司的 RHEOBAY TPAI3566 等。此外,聚苯胺由于具有密度小、电性能可通过酸碱调节、物理化学性质稳定的特点,因此对由聚苯胺及其共聚物^[12]组成的电流变液进行了广泛研究;但直接用聚苯胺作电流变液,在高电场作用下因电子跃迁而存在漏电流密度较大的弊端,官建国^[13-15]等用 3 种方法对聚苯胺粒子进行改性,均得到了漏电流密度小、具有较高电流变效应的电流变液。

1.1.3 复合型电流变液材料

复合型电流变液材料是当今电流变材料发展的主流,一般由 2 种或 2 种以上不同性质的材料组成,其典型结构为核/壳结构。通过对复合颗粒介电常数和电导率的设计,可提高电流变液在电场作用下的剪切应力,H. Conrad 等^[16]利用不同方式包裹的双层复合结构分散相验证了电导和介电常数在电流变液中的作用,并从理论上预言了由高介电常数的绝缘外层包裹高导电核心结构的粒子组成的电流变液剪切屈服应力的理论值有望达到 20 ~ 100 kPa。

1.2 均相电流变液材料

以液晶高分子材料为基础的均相电流变液的开发是电流变材料研究的另一热点。均相电流变液克服了悬浮型电流变液的粒子沉降、聚集和电极磨损的弊端,特别是由于不存在颗粒结构,使用中两电极板可做得很薄,从而在光学仪器和液压装置上有良好的应用前景。

2 电流变液的应用

由于电流变液具有响应速度极快、黏度可调、液固转变所需能耗低、可进行实时监控等特点,因而为新一代电-机耦合系统提供了良好的接口,并有可能在诸如汽车工业、液压工业、机械制造业、传感器技术等许多部门引起革命性的变化。

2.1 在汽车工程上的应用

汽车有线控制转向系统是根据电流变技术的原理,构成液-机耦合的机理,从而设计出的一种全新的汽车转向系统。与传统的机械产品相比,具有设计简化、应用方便、灵敏度高、噪声小、寿命长、成本低、易于实现微机控制和智能化等突出特点。该装置被认为可能淘汰传统的动力转向、齿轮齿条、蜗轮蜗杆机械结构,因而引起国际汽车界的广泛关注。

电流变技术在汽车上的又一应用^[20]是利用它在电场下黏度连续变化的特性制造汽车离合器装置,主要原理为:汽车引擎与转子连接,车轮与圆筒连接,转子与圆筒之间充满电流变液,当未施加电场时,电流变液成液态,汽车引擎驱动转子旋转而不传递力矩;当施加电场时,电流变液变稠(或固化),从而将转矩传递给圆筒以驱动车轮。用该装置取代传统的齿轮传动装置,不仅体积可缩小到原来的 1/10,而且只需控制电压就可以达到调速的目的,维修及更换也非常简单。同时,由于离合器的工作介质是电流变液体,在工作过程中,能吸收系统的振动,降低噪音和磨损,符合环保原则而且延长了器件的工

作寿命。此外,将电流变阻尼器应用于汽车悬挂系统,可以缓和路面冲击,减小冲击所引起的振动。

2.2 在减振、抗震上的应用

ER 智能材料-减震结构体系是一种新兴的多学科交叉的智能结构体系。由于地震给人类带来很大的灾害,对工程结构进行抗震加固已成为一种广泛应用的工程技术^[17]。用参数可调的电流变智能结构构件加固常规抗震结构而成的结构系统,当地震袭来之时,它可根据“感觉神经”——动力传感器测得的结构的瞬时振动状态,由电流变智能结构构件中的电流变调节器按某种控制策略自动调整电流变智能结构构件的参数,减小主体结构上的地震反应,实现“间接加固”主体结构的作用。美国内华达大学(University of Nevada)正在研究如何在桥梁及高速公路支架下安装电流变减振器,以减少地震带来的损失。美国北卡罗莱纳大学(University of North Carolina)的 Conrad 等^[18]人正在研究用电流变液充注的智能梁板结构。当梁板振动时,用传感器探头探测振动信号,并输送给计算机,由计算机根据振动情况对梁板施加电压,使液体固化,从而使梁板更加强韧。振动减弱后,电压消除,电流变体恢复液态,梁板又变得很有柔性。还有人提出,在高层建筑中放置电流变液减振装置,在狂风中使电流变液固化,增强建筑物的抗风能力,地震时电流变液液化,让建筑物浮在上面,以获得最好的抗震能力。

2.3 在生物医学上的应用

为改善膝上假肢系统的性能,清华大学的金德闻^[19]教授研制了应用电流变液的阻尼器及相应的微型数控高压电源,实现对膝力矩的控制。通过对步行状态信号的获取,所研制的智能假肢系统可识别步行状态,发出与步速相适应的关节力矩控制信息,使关节力矩变化适应步速要求。利用电流变液原理,还可以对生物细胞形成的自组织结构及其形变进行模拟,重现细胞组织在外场作用下的组织结构,可望对脑血栓等疾病的成因及其治疗找到高效而简便的方法。此外,利用电流变液传动技术制作的超微型马达耦合系统,可以控制微型手术刀进入人体内,进行消除脂肪等的治疗手术。

3 存在的问题

电流变技术具有广阔的应用前景,是多学科、多领域交叉的一项新技术,涉及物理、化学、材料学、力学、流变学、计算机工程学、机械控制工程学等多方

面的知识。经过半个多世纪多学科领域科学家们的共同努力,在电流变效应机理的了解、电流变粒子的制备、电流变器件的研制等方面都有了很大的进展。但电流变器件一直还没有大规模走向市场,这主要是因为:①电流变液的剪切应力较小,一般小于 15 kPa;②电流变液的使用温度范围不够宽,性能受温度影响较大;③分散相粒子与基础液之间存在着较为严重的相分离现象;④目前的研究工作多是在电流变液处于静止状态、低剪切速率的条件下进行的,与实际应用中的动态情况、高剪切速率条件存在差别;⑤数学模型精确、结构合理、实用、成本低、可充分发挥电流变效应的电流变器件的研制有待加强。

参考文献

- [1] US Department of Energy. Electrorheological (ER) fluids, A Research Needs Assessment Final Report[R]. Washington: US Government Printing Office DC, 1993.
- [2] Wen Weijia, Huang Xianxiang, Yang Shihe, *et al.* [J]. *Nature Materials*, 2003, (2): 727 - 730.
- [3] Klass D L, Martinek T W. [J]. *J Appl Phys*, 1967, 38(1): 67 - 80.
- [4] Strangroom J E. [J]. *Phys Tech*, 1983, 14(2): 290 - 293.
- [5] Block H, Kelly J, Qin A, *et al.* [J]. *Langmuir*, 1990, 6(1): 6 - 14.
- [6] 魏震官. [J]. *兵工学报*, 1995, (1): 45 - 64.
- [7] Tao R, Sun J M. [J]. *Phys Rev Lett*, 1991, 67(3): 398 - 401.
- [8] Fillisko F E, Radzilowski L H. [J]. *J Rheol*, 1990, 34(4): 539 - 550.
- [9] Tian Yu, Meng Yonggang, Wen Shizhu. [J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, 90(1): 493 - 496.
- [10] 张玉苓, 陆坤权, 饶光辉, 等. 复合型钛酸钡电流变液及制备方法[P]. CN 97100449.8, 1998 - 08 - 12.
- [11] 尹剑波. [J]. *江苏化工*, 2000, 28(7): 19 - 22.
- [12] Jan Trlica, Otakar Quadrat, Jaroslav Stejskal, *et al.* [J]. *European Polymer Journal*, 2000, 36(11): 2313 - 2319.
- [13] Xie Hongquan, Guan Jianguo, Guo Junshi. [J]. *Appl Polym Sci*, 1997, 64(8): 1641 - 1647.
- [14] 官建国, 马永梅, 王长胜, 等. [J]. *高分子学报*, 1997, (3): 277 - 282.
- [15] 官建国, 谢洪泉, 过俊石. [J]. *高等学校化学学报*, 1996, 17(6): 965 - 967.
- [16] Conrad H, Sprecher A F. [J]. *Statistical Phys*, 1991, 64(5 - 6): 1073 - 1091.
- [17] 张敏政. [J]. *工程抗震*, 2001, (1): 11 - 15.
- [18] 瞿伟廉, 李爱群, 项海帆. [J]. *东南大学学报*, 1998, 28(6): 101 - 105.
- [19] 金德闻, 王人成, 白彩勤, 等. [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 1998, 38(2): 40 - 43. ■