

场诱导软物质智能材料研究进展

巫金波 温维佳

Research progress of field-induced soft smart materials

Wu Jin-Bo Wen Wei-Jia

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 188301 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.188301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.188301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I18>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

液体火箭有机凝胶喷雾液滴蒸发模型及仿真研究

Model and simulation of liquid rocket organic gel spray droplet evaporation

物理学报.2012, 61(14): 148201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.148201>

Nb/SnO₂ 复合薄膜的制备、结构及光电性能

Preparation and structure and optical-electrical properties of the Nb/SnO₂ composite thin film

物理学报.2011, 60(3): 038203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.038203>

专题: 软物质研究进展

场诱导软物质智能材料研究进展*

巫金波¹⁾ 温维佳^{1)2)†}

1)(上海大学材料基因组工程研究院, 上海 200444)

2)(香港科技大学物理系, 香港)

(2016年6月28日收到; 2016年8月2日收到修改稿)

场诱导软物质智能材料是指一类能够响应场作用并引起整个系统的量乃至质的改变的软物质材料. 在场(磁场、电场、温度或者光等)的诱导下, 材料内部微结构发生化学或者物理变化, 从而导致材料某些宏观性质(机械、光学等)出现较大的变化, 以达到某种智能控制的目的. 本文系统介绍了磁流变液、电流变液以及高分子凝胶等几种典型的场诱导软物质智能材料, 回顾了该领域近几年的研究及其应用进展, 探讨了研究的前沿问题及发展趋势, 特别指出了软物质智能材料的研究及应用呈现出的复杂性和跨学科性, 需要各个学科的协同发展, 才可能取得突破性进展.

关键词: 软物质, 智能材料, 场诱导, 电流变液

PACS: 83.80.Gv, 83.85.Cg, 61.82.Pv, 82.70.Gg

DOI: 10.7498/aps.65.188301

1 引言

软物质是指处于固体和理想流体之间的物质. 从物理学角度来看, 固体的组成结构是长程有序的, 而软物质可以总结为短程有序而长程无序^[1]. 这一区别的本质在于两者内部原子动能的不同: 软物质中的基本单元(原子或者分子)的动能接近热运动能量 $k_B T$; 而固体的基本单元的动能远小于热运动能量. 软物质的组成复杂, 其运动并不取决于组成单元中的原子或分子尺度的量子力学作用, 而主要是热涨落和熵导致了软物质体系复杂物相的变化, 这些驱动作用比原子或分子间键能弱得多, 表现出“复杂性”、“软”和“易变性”. 只要运用得当, 一些微弱的刺激就能引起整个软物质系统的量乃至质的改变(如图1所示).

随着社会的发展和科技的进步, 人类不再满足于简单地使用原始材料, 而是想根据自己的意愿合成制备具有功能或者智能特性的材料. 智能材料是指具有可感知外部刺激, 如压力、温度、湿度、pH

值、电场或磁场等的改变而判断并处理这些外部刺激的新型功能特性^[2]. 软物质“小作用, 大响应”的特点预示着它对于外部刺激可以具有特定而显著的响应, 它的属性中的某些参量可通过一个外部条件而改变, 并且这种变化是可逆的, 还可以重复多次. 如果将软物质的这些特殊的性质加以研究和利

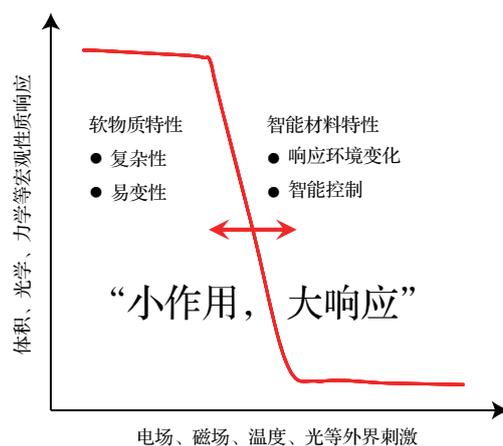


图1 软物质智能材料的共性

Fig. 1. General characteristics of soft smart materials.

* 上海市科委科技基金(批准号: 16111107402)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: phwen@ust.hk

用, 就可以制备出具有智能特性的软物质材料 (如图 1 所示).

智能材料是 20 世纪 80 年代中后期由美国和日本科学家先后提出的, 是继天然材料、合成高分子材料、人工设计材料之后的第四代材料, 是现代高技术新材料发展的重要方向之一. 概念形成初期, 日本高木俊宜教授和美国 R. E. Newnham 教授将对环境具有可感知可响应等功能的新材料定义为智能材料^[3,4]. 发展至今, 智能材料这一概念得以不断扩充拓展.

一般来说, 材料根据发展的先后顺序分为一般材料、功能材料和智能材料. 功能材料是指那些具有优良的电学、磁学、光学、热学、声学、力学、化学、生物学功能, 特殊的物理、化学、生物学效应, 能完成功能相互转化, 主要用来制造各种功能元器件而被广泛应用于各类高科技领域的高新技术材料. 而智能材料是功能材料高级的形式, 是新型功能材料, 它不仅能够感知环境变化, 还能根据这些属性做出相应的响应, 以达到某种智能控制的目的. 智能材料拥有传感功能、反馈功能、信息识别与积累功能、响应功能、自诊断能力、自修复能力和自适应能力七大功能. 由此可见, 智能材料是目前材料领域最前沿的研究领域. 智能材料的物理机理的研究和大规模应用将导致材料物理科学发展的重大革命. 而软物质的基础研究特别是场诱导软物质的物理研究将大大促进功能以及智能材料的发展和运用.

近年来, 软物质科学迅速发展, 软物质的研究横跨化学、生物、物理三大学科, 化学和生物学构成了软物质科学的实验基础, 物理学为软物质科学提供理论依据和发展的方向. 软物质材料更是成为化学、物理、材料和生物等学科交叉融合的重要领域和天然桥梁, 同时又与许多技术和工程问题密切

相关. 智能材料可以根据其化学成分分为智能金属材料、智能无机非金属材料 and 智能高分子材料. 其中智能高分子材料属于软物质智能材料范畴, 例如高分子凝胶. 高分子凝胶是指三维高分子网络与溶剂组成的体系, 其大分子主链或侧链上有离子解离性、极性和疏水基团, 类似于生物体组织. 此类高分子凝胶可因溶剂种类、盐浓度、pH 值、温度的不同以及电、磁刺激和光辐射而产生可逆的、非连续的体积变化^[5-7].

为此, 研究人员从智能材料接受外界响应和应用范围的不同将场诱导软物质智能材料分为电、磁响应软物质材料、温度响应软物质材料、光响应软物质材料等几类.

电、磁响应软物质材料也已经应用在我们生活之中, 比如磁响应软物质——磁流变液和电响应软物质——电流变液, 不加外场时, 它们表现出类似 Newton 流体行为; 加外场时, 它们表现出 Bingham 流体特性, 随着外场的增强, 其屈服应力随着增大.

2 磁流变液

美国学者 Rabinow 在 1948 年发明了磁流变液 (magnetorheological fluid, MRF), 它是一种包含磁性纳米至微米颗粒的胶体悬浮液 (如图 2 所示)^[8,9]. 这种胶体悬浮液在外加磁场的的作用下, 纳米颗粒会产生很强的磁偶极相互作用力, 该结构会大幅增加流体的黏度, 可由液体变为“固体”, 当外磁场去掉之后, 磁流变液会迅速地从“固体”状态恢复为一般的液体状态并且是可逆的. 磁流变液主要分为经典的磁流变液 (conventional MRF)、反相的磁流变液 (inverse ferrofluids, 又称磁性洞, magnetic holes) 和磁性乳浊液 (ferrofluid emulsions) 三种^[10] (图 3).

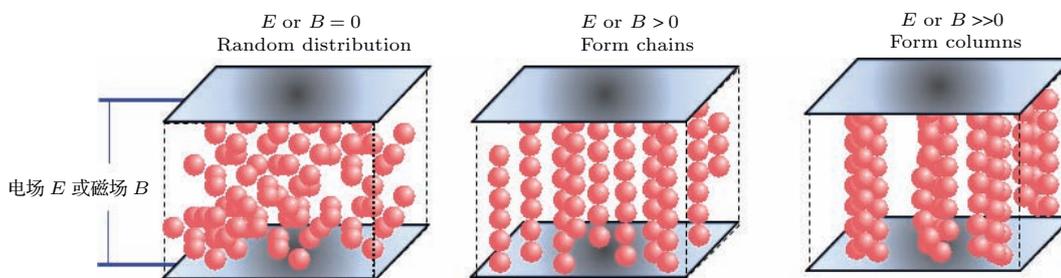


图 2 磁 (或者电) 流变液的工作机理 磁流变液, 红色颗粒为磁性纳米至微米颗粒; 电流变液, 红色颗粒为介电纳米至微米颗粒

Fig. 2. Working mechanism of Magnetorheological (or Electrorheological) fluid. In magnetorheological fluid (MRF) red particles are magnetic nano to micro particles; In electrorheological fluid (ERF), red particles are the dielectric nano to micron particles.

典型的磁流变液由3部分组成: 顺磁性或软磁性颗粒、低磁导率载液和添加剂.

制备磁流变液的软磁性颗粒, 即分散相, 一般有羰基铁粉、 Fe_3O_4 [11]、铁合金 [12]、铁钴合金及镍锌合金等. 其中羰基铁粉具有高饱和磁化强度 ($\mu_0 M_s = 2.1 \text{ T}$) 和低矫顽力, 成为应用最为普遍的磁性颗粒. 除上述软磁性颗粒之外, 最近研究人员采用以下新技术制备出复合软磁性颗粒.

第1类: 用聚合物包覆铁粉. 该方法可以减小软磁性颗粒的密度, 增加颗粒的表面积, 提高所制备磁流变液的沉降稳定性和再分散性 [13]. Park 等 [14] 用聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 包覆羰基铁粉制备出复合磁性颗粒.

第2类: 用软磁性颗粒包覆非金属材料. 该方法能减少颗粒的密度, 提高所制备磁流变液的沉降稳定性. Jun 等 [15] 以聚合物为核, 以氧化铁颗粒为壳, 制备出理想的球形颗粒.

第3类: 用金属颗粒包覆软磁性颗粒. 该方法可以增强颗粒的磁饱和强度, 进而增强所制备磁流变液的屈服强度. Ulicny 等 [16] 用化学镀的方法在羰基铁粉表面包覆一层镍粉.

对比以上几种颗粒, 羰基铁粉是制备磁流变液常用的软磁性颗粒, 目前商品化的磁流变液大多采用普通羰基铁粉制备, 颗粒体积分数可以高达50%, 但采用聚合物包覆的羰基铁粉是目前各国专家研究的热点. 微米级磁性颗粒由于是多畴磁性颗粒, 所以具有较高的磁饱和度, 一旦处于外加磁场中会有较强的相互作用, 进而有很强的磁流变效应. 但为了改进沉淀稳定性以及颗粒磁性, 相对于广泛应用的微米级球状磁性颗粒, 更小尺寸的磁性颗粒的研究也受到了相当的关注 [17-20]. 此外, 棒状或线状等非传统球形的磁性材料也被认为是改善沉降性和磁流变效应的有效手段 [21,22].

载液是软磁性颗粒所能悬浮的连续媒介, 也称连续相, 是磁流变液的重要组成部分. 如合成油、矿物油、水等液体 [23] 都可以作为载液, 其基本要求是非易燃、温度稳定性好、污染小. Bose 和 Roder [24] 报道了用胶体作为载液制备出的一种磁流变弹性体, Fuchs 等 [25] 以聚合胶体为载液制备出了一种磁流变聚合胶体.

添加剂包括分散剂和防沉降剂等, 其作用主要是改善磁流变液的沉降稳定性、再分散性、零场黏度和剪切屈服强度, 但过多的添加剂会影响磁性颗粒在外加磁场中的反应. 分散剂主要有: 油酸及油酸盐、环烷酸盐、磺酸盐 (或酯)、磷酸盐 (或酯)、硬脂酸及其盐、单油酸丙三醇、脂肪醇、二氧化硅等. 防沉降剂主要有: 高分子聚合物、亲水的硅树脂低聚物、有机金属硅共聚物、超细无定形硅胶以及有机黏土和含氢键的低聚物等. 此外, Chin 等 [26] 用纳米级的磁性颗粒 ($\text{Co-}\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, CrO_2) 作为添加剂, 提高了磁流变液的沉降稳定性.

反相的磁流变液是将非磁性的颗粒分散在磁性载液中制成的 [27,28]. 磁性液体 (magnetic fluids), 也称为铁流体 (ferrofluids), 指的是全部使用纳米尺寸的铁磁性颗粒作为分散相制备而成的体系. 每个纳米磁性颗粒仅包含单一磁畴并由于布朗运动可以具有极为良好的稳定性. 在外加磁场时, 铁磁流体中的微小磁性颗粒可以与非磁性颗粒结合进而形成类凝胶的网状, 从而增强磁流变效应. 由于有大量可选择及调控的非磁性颗粒, 相应地也存在很多修饰的方案, 反相磁流变液具有相当多的可调性 [29], 并且铁流体作为药物载体在医疗方面有着诸多潜力 [30,31]. 但此种磁流变液即使在很强的磁场下仍然不能具有很高的屈服应力, 总体磁流变效应偏低, 离实际生产尚有很大距离.

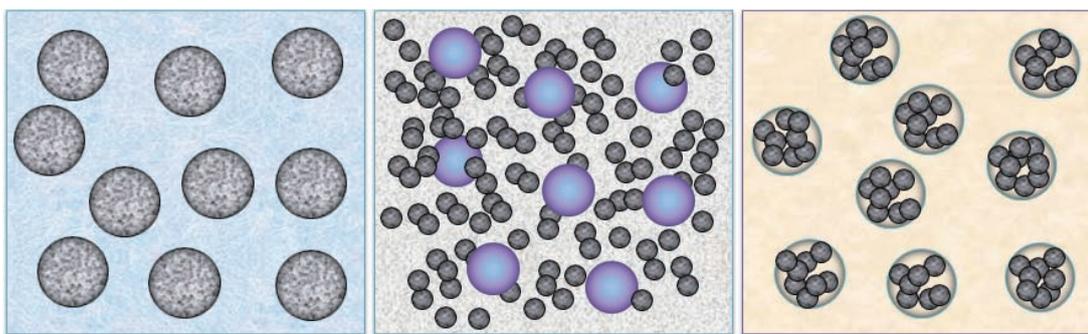


图3 磁流变液分类 从左到右依次为: 经典的磁流变液、反相磁流变液、磁性乳浊液

Fig. 3. The classification of MRF. From left to right: classic MRF, inverse MRF, magnetic emulsion.

然而,作为一种衍生自铁流体的体系,磁性乳浊液具有离散、分离和磁性转运反应物等能力,因此在微流控等领域有着多种应用^[32,33].磁性乳浊液是由两种互不相容的液体组成,其中一种需具有磁性^[34].传统的制备方法是剧烈搅拌两种液体,然后通过多次提纯和分离得到单一分散的产物.Montagne等^[33]提出可以将事先制备的粗分散乳浊液注入剪切乳化搅拌机(couette mixer),通过控制剪切,再在磁场下进行筛选得到单一尺寸分散的磁性乳浊液.2011年,新加坡南洋理工大学的Tan和Nguyen^[35]则通过微流控制备的方式,利用T型结构(T-junction)和流动汇聚型(flow-focusing)提出了简易可控的磁性乳浊液制备法.

经过多年发展,磁流变液研究已经获得很多有价值的理论、实验和应用的成果.磁流变液的制备是工程应用的基础,磁流变液在最初应用过程中遇到了稠化、沉降及磨损等难题,提高以再分散性和沉降稳定性在内的性能指标对工程应用将产生重要意义.当前应在以下几个制约工程应用的问题上开展深入研究:如何提高磁流变液的再分散性、如何利用表面改性技术提高磁流变液的沉降稳定性、如何制备出高性能的磁流变弹性体以及如何利用纳米级添加剂改善磁流变液的综合特性等.但

随着稠化等问题的解决,各工业国竞相展开了对磁流变液及器件的研究,加速了磁流变液在汽车工业的应用(如图4所示).美国Lord公司的Carlson在磁流变液性能研究和应用开发方面取得了较为突出的成就,该公司先后报道了多种合金制备的磁流变液并有多种商品化磁流变液产品上市^[36-39].2002年,雪佛莱汽车首次将Lord公司生产的磁流变液减震器应用于汽车悬挂系统中.之后的十几年中,随着日新月异的技术改良和创新,越来越多的高档轿车纷纷使用磁流变减震器,它的优点是能耗低、反应迅速和连续可调.作为减震器核心的磁流变阻尼器,是一种半主动(semi-active)的机械装置,在仅仅需要电池电力的提供下可以实现可控的阻尼力^[40].

由于磁流变液需要磁场来控制,需要电流较大,能源消耗也较大,所以科学家们研究出了另一种能耗非常低的电响应软物质材料——电流变液(如表1所列).电流变液(electrorheological fluid, ERF)与磁流变液工作原理类似,只是悬浮的颗粒为介电性材料,外加电场控制,它们之间的相互作用力为电偶极相互作用(如图2(电流变液)所示)^[41].

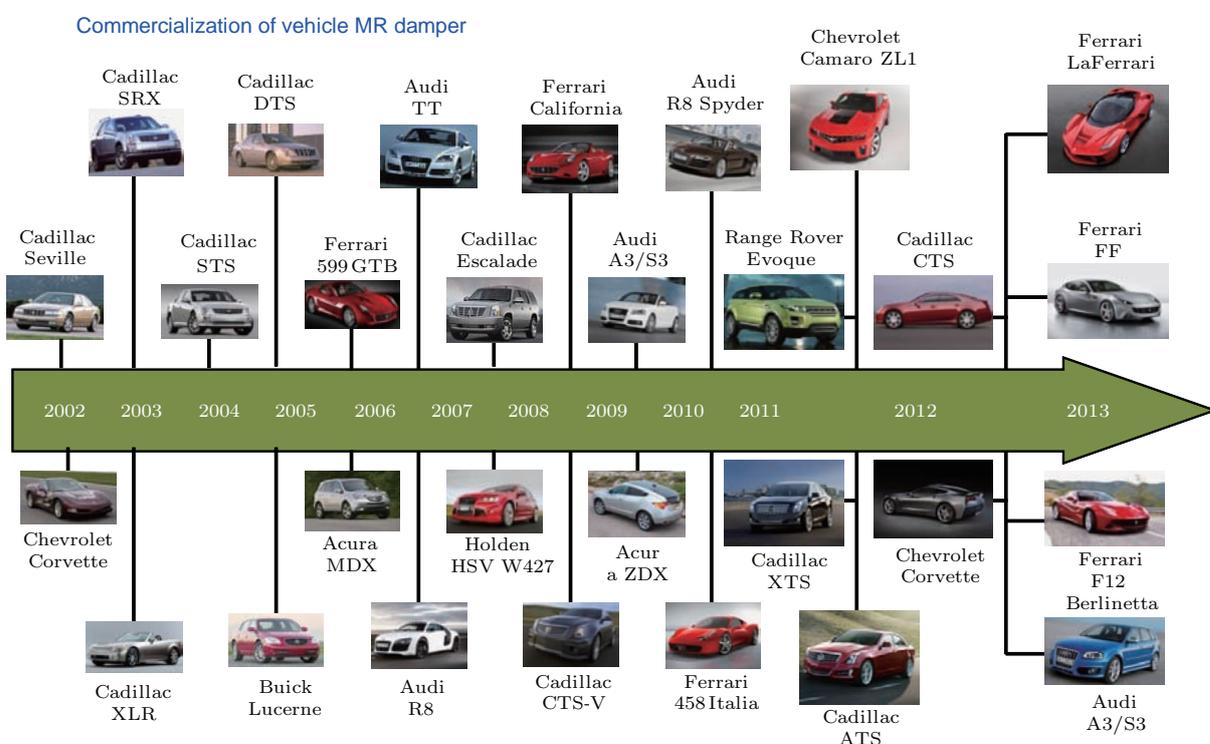


图4 磁流变液在汽车工业的使用情况

Fig. 4. The applications of MRF in the automotive industry.

表1 磁流变液与电流变液特性比较
Table 1. Feature Comparison of MRF and ERF.

特性	磁流变液	电流变液
最大屈服应力/kPa	50—100	40—120
电压	2—25 V(1—2 V)	2—5 kV(1—10 mA)
场强	~ 250 kA/m	~ 4 kV/mm
反应时间	毫秒级	毫秒级
密度/g·cm ⁻³	3—4	1—2
稳定性	不受大多数杂质影响	受水和导电杂质影响
温度范围/°C	-50—+150	-25—+150
耗能/J·cm ⁻³	0.1	0.001

电流变液的黏度会随着电场强度的增大而明显增大, 随着电场增大到一个阈值, 该液体就会发生由液相向固相的转变, 这一过程十分迅速, 通常发生在几毫秒的过程内 [42]. 而且这样的转变过程具有可逆性. 这一过程也就意味着电流变液的流变特性会随着电场的变化而发生变化. 在不外加电场时, 流体呈现出牛顿流体的特性, 但是在电场强度足够高的外加电场下, 对外呈现出宾汉流体的性质 (如图 5 (a) 所示).

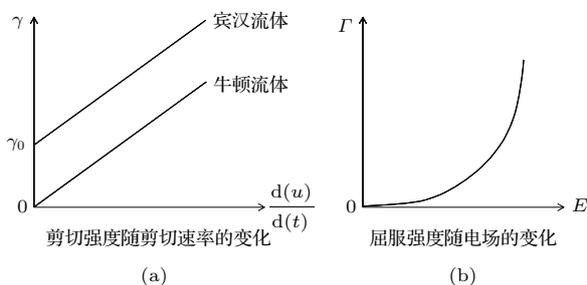


图5 (a) ERF 剪切强度随剪切速率的变化; (b) 屈服强度随电场的变化

Fig. 5. (a) Shear stress versus shear rate; (b) yield stress versus electric field strength.

表2 四种极化形式的比较
Table 2. Response time of four kinds of polarization.

极化形式	具有这种极化形式的电解质	极化所用时间/s	与温度的关系
电子位移式极化	气体、液体、固体	10 ⁻¹⁴ —10 ⁻¹⁵	在气体中温度上升极化削弱
离子位移式极化	离子式结构固体介质	10 ⁻¹² —10 ⁻¹³	温度升高极化增强
电偶极子转向极化	极性电介质	10 ⁻² —10 ⁻¹⁰	在某些温度出现最大值
双电层极化	固液两相悬浮液	10 ⁻² —10 ⁻⁴	温度升高极化削弱

同时, 实验数据表明, 高频时的电流变效应远远高于低频时的电流变效应, 这说明偶极子转

3 电流变液

3.1 电流变液的成分

当前普遍应用的电流变液体主要是组分复杂的悬浊液 [43], 其组分大致由以下三个部分组成: 1) 组成电流变液分散相的固体颗粒, 称之为分散相, 分散相颗粒具有高介电常数、较强的极化能力, 目前的分散相颗粒有无机材料, 例如金属氧化物、金属氢氧化物等, 一般来说颗粒尺寸在纳米到微米级别; 2) 用来分散固体颗粒的连续相液体, 称之为连续相, 作为连续相的基础液应具备较低的相对介电常数以及绝缘性能; 3) 改善电流变液体系的稳定性以及增强电流变效应的添加剂.

3.2 电流变液的微观原理

电流变效应的大致过程 [44]: 电场作用下分散相粒子发生极化, 形成偶极子现象. 带偶极矩的粒子产生定向排列, 粒子从无序到有序, 成链成束或形成某种结构, 对外呈现电流变效应.

由于电流变液是一种构成十分复杂的悬浮液, 所以导致电流变效应的原因也十分复杂. 但是绝大多数的科研工作者都认为电流变效应产生的原因是来自于极化, 表 2 列出了几种极化类型 [42].

不难发现, 电子和离子极化是一种快速极化过程, 其时间在 10⁻¹²—10⁻¹⁵ s 之间, 而偶极子转向极化和双电层极化是一种慢极化过程, 其时间在 10⁻²—10⁻¹⁰ s 之间.

实验证明, 在高频电场下只发生电子极化和离子极化, 电流变效应是很微弱的. 但是在低频和直流电场作用下, 由于各种极化同时发生作用, 电流变效应明显增强, 这是由于在低频率下都能跟上电场的变化, 从而对极化做出贡献.

向极化和双电层极化是产生电流变效应的主要原因.

3.3 纤维理论

纤维理论^[45]是由Winslow在1949年提出^[46]. 该理论认为, 原本无序的颗粒在电场的作用下会有序地排列形成纤维结构. 该理论的基础是基于颗粒之间的相互作用力, 但是这种作用力显然远远地低于研究人员在实验中测量到的实际值, 所以是不能很好地解释电流变效应的.

3.4 “水桥”理论

水桥理论由Stangroom在1983提出^[47]. “水桥”现象就是当我们给两杯加满水的杯子通电后, 慢慢把两个杯子分开, 两个杯子之间溢出的水不会由于重力作用向下流, 而是在两个杯子之间形成一个“水桥”.

“水桥”理论认为, 对于具有水的电流变液体来说, 电流变效应产生的原因主要是由于基础液里的水分子之间的相互作用. 当加上一个外加电场后, 原本在颗粒的空隙中自由流动的离子向空隙的两端运动. 而在这些离子的周围就汇聚了许多水分子, 离子与离子之间聚集的水分子就产生类似于“水桥”的结构, 而正是这种“水桥”结构促使悬浮在液体中的小颗粒产生了紧密的联系. 当外加电场消失之后, 原本聚集的水分子又快速散开, 电流变效应随之消失. 但是这种理论有个致命缺点就是完全没有办法解释疏水性的半导体颗粒作为分散相的电流变液的电流变效应.

3.5 双电层极化理论

双电层极化理论由Klass和Martinek在1967年提出^[48]. 在电流变悬浮液中, 由于大量的固体粒子和连续相基础液相接处, 在它们接触的表面上都会带上电荷, 从而形成带电粒子. 当然, 固体粒子带电可能是因为本身的电离, 其他离子在固体粒子表面的吸附也可能是固体粒子表面离子的溶解. 带电的固体粒子从而可以吸引基础液中的异性离子, 排斥同性离子. 使同性离子远离颗粒而在基础液中扩散. 所以在粒子的表面形成了一个正或者负电荷和在基础液中被吸引的负或者正电荷形成的双电层. 在没有施加外电场时, 这个双电层会均匀地分布在颗粒的表面. 当施加外电场时, 原本均匀分布的双电层开始发生变化. 颗粒上吸附的反离子受到电场的作用而发生定向偏移, 产生类似于离子的位

移极化, 形成类偶极子结构, 而这个类偶极子结构在电场下开始定向移动, 有序排列. 目前很多学者都认为这是引起电流变效应的主要原因.

3.6 介电理论

在电流变液机理的研究过程中, 早期的双层理论和水桥理论可以在一定程度上解释含水的电流变液机理. 但是1985年Block和Kelly^[49]制备出无水的电流变液后, 上述理论就不能很好地解释电流变效应了. 介电理论认为, 电流变效应的主要原因是电流变液中极性分子在强电场下发生诱导极化, 且分散相粒子远大于连续相液体的介电常数^[50]. 但此阶段研制的电流变材料的力学性能、悬浮稳定性和温度使用范围距实际应用仍有较大差距, 难以满足工业、工程应用的实际需求.

介电理论认为, 由于分散相颗粒具有较大的介电常数, 正负电荷分布不均匀, 在较强的电场作用下发生诱导极化, 正电荷向负电极一方移动而负电荷向正电极一方移动, 形成偶极子, 相邻偶极子之间由于静电力相互吸引形成链状结构, 随着电场的增大, 链状结构变成柱状结构, 对外呈现出较强的屈服强度. 马红孺等运用第一性原理计算出介电型电流变液屈服强度的理论极限大约为10 kPa. 其屈服强度随电场的变化呈现二次关系 (如图5(a)所示).

3.7 巨电流变液的重大突破

3.7.1 巨电流变液的材料

实验发现, 如果电流变液中的介电颗粒含水, 其电流变效应将会有显著提高. 而由于水的易挥发性, 这种电流变液难以实际应用, 但这启发了研究人员通过设计一种具有大分子电偶极矩的材料来增强电流变效应. 研究人员把具有巨电流变 (giant electrorheological, GER) 效应的纳米颗粒电流变液称之为巨电流变液, 此类电流变液在外加电场作用下所表现出的剪切强度远远超过了通常理论所预测的“上限”, 达到了100 kPa以上, 且响应时间小于10 ms, 同时还具有温度稳定性好、介电常数大、电流密度低和不沉淀等优点^[51].

巨电流变流体由表面包裹尿素薄层的钛氧基草酸钡 (化学式为 $\text{BaTiO}(\text{C}_2\text{O}_4)_2$) 纳米颗粒与硅油混合而成. 尿素薄层的存在, 改变了纳米颗粒的表面特性. 图6为外层含有尿素薄层

的BaTiO(C₂O₄)₂ 纳米颗粒的透射电子显微镜 (TEM) 图像. 从图中可以看出, 纳米颗粒的尺寸在 30—70 nm 范围内, 表面尿素薄层的厚度在 2—5 nm 范围内. 当有外加电场作用于巨电流变

液时, 纳米颗粒便沿电场方向排列成柱状结构, 如图 6 (b) 所示. 图 6 (c) 为某一柱状结构的放大图, 可以看到两颗粒的接触界面 (contact areas) 趋于平整, 说明尿素薄层具有一定的柔软度 (softness).

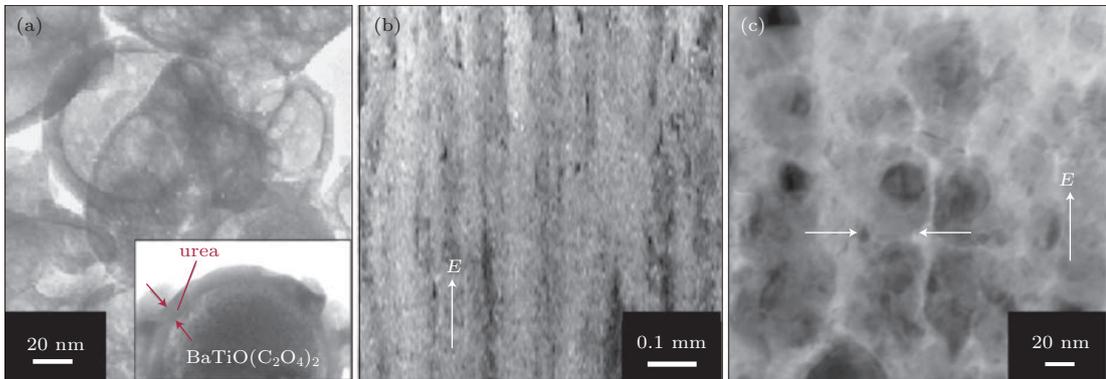


图 6 (a) 为表面包裹尿素薄层的 BaTiO(C₂O₄)₂ 纳米颗粒的 TEM 图像; (b) 和 (c) 为加上电场后巨电流变液的结构, (c) 中箭头所示为某一平整接触界面 [51]

Fig. 6. (a) TEM image of coated BaTiO(C₂O₄)₂ nanoparticles; (b) and (c) are the structures of giant ERF (GERF) under an applied field, The arrows in (c) indicate one of the flattened interfaces.

3.7.2 巨电流变液的机理

研究发现, 巨电流变液剪切强度与外加电场呈线性变化关系, 而不是通常的二次方关系. 如图 7 所示, 随着电场强度的线性增加, 巨电流变液的剪切强度也随之线性增长. 对于浓度为 30% 的巨电流变液, 当外加 4 kV/mm 的电场强度时, 其剪切强度大于 100 kPa. 图中圆圈所示为实验测得的在线性增长的外加电场下, 巨电流变液的剪切强度随电场变化的关系, 实线为有限元模拟结果. 由图可见, 有限元模拟结果与实验测量结果十分符合. 对于此类电流变液, 无论是剪切强度的大小还是剪切强度随外加电场的变化规律, 都与普通电流变液有着本质的不同. 利用传统的介电理论模型已经无法解释其作用机理, 其中必有传统电流变模型未考虑到的因素在起作用.

为解释巨电流变液的作用机理, 研究人员提出了“表面极化饱和”模型. 当有外加电场作用于巨电流变液时, 纳米颗粒先被极化, 沿电场方向排列成有序的结构. 当颗粒间相互接触、且电场增大到某个阈值时, 这些颗粒便会在接触部分形成饱和的极化层, 如图 8 所示. 饱和极化层之间的相互作用, 使得巨电流变液的剪切强度得到很大提高. 基于此模型, 研究人员通过数值模拟得到其中的静电场能量为

$$w_{es} = -\frac{1}{8\pi} \int_{V_0} D \cdot E dV - \frac{1}{4\pi} \int_{V_S} dV \int_0^E D \cdot \delta E.$$

颗粒接触时的弹性相互作用能为

$$w_{el} = (\Delta L)^{5/2} \frac{2}{5D} \left(\frac{R}{2}\right)^{1/2}.$$

由这两种能量的作用导出相应电场下剪切强度的大小, 结果如图 7 中实线所示, 计算结果与实验结果十分匹配. 表面极化饱和模型的提出, 很好地解释了巨电流变液的作用机理.

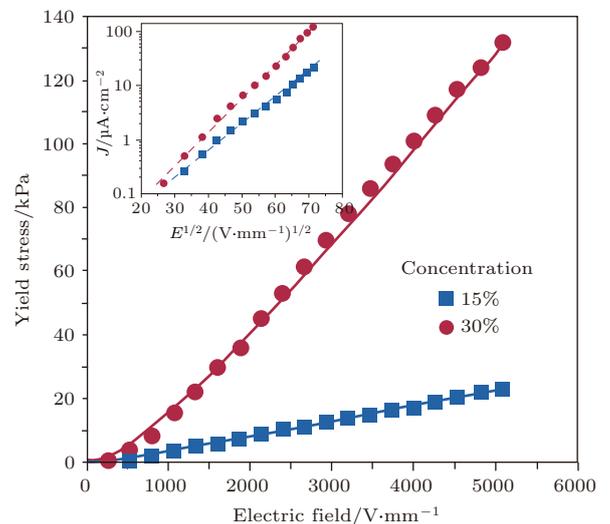


图 7 巨电流变流体的剪切屈服强度随外加电场变化关系 [51]

Fig. 7. Static yield stress plotted as a function of applied electric field of GERF for two solid concentrations.

巨电流变液的发现引起了国内外的广泛关注, 英国出版的《新科学家》杂志发表了题为“硬”液

体很快就应用于汽车刹车上》的文章. 美国福特汽车公司高级工程研究部的物理学家 John Ginder 称“这一技术为智能的电流变液体的应用找到了一条途径”, 标志着电流变材料研究的第 3 次浪潮的到来. 美国“联邦科学工程和技术协调会”的报告中, 将电流变液研究列为一个重要领域, 美国能源部“关于电流变液研究需求估量的最终报告”中指出, “电流变液有潜力成为电气-机械转换中能源效率最高的一种, 而且价格合理、结构紧凑、响应快速、经久耐用以及动态范围可变, 这些特性是任何其他电气-机械转换方法都无法做到的”. 巨电流变液的发现向人们展示出了电流变液的巨大应用价值. 一些西方国家的国防及工业部门也投入数以亿计的资金, 进行电流变材料及其阻尼器件的研究. 电流变液和磁流变液都可以应用在减震器、汽车离合器、机器人甚至健身器材等领域. 如果将来的减震器都是使用基于电流变液或者磁流变液的减震器, 市场前景无疑是巨大的, 将带来巨大的效益.

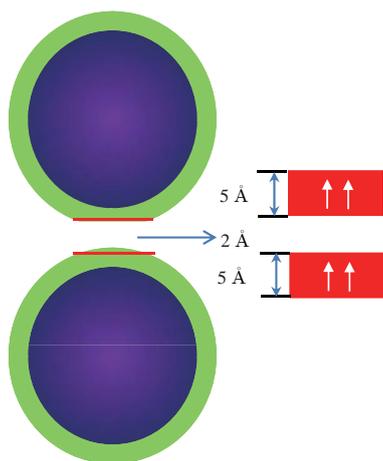


图 8 表面极化饱和模型, 图右侧所示为饱和极化层 [51]

Fig. 8. The model of saturation surface polarization [51].

4 智能水凝胶

水凝胶是一种能显著地溶胀于水、但在水中并不能溶解的亲水性聚合物凝胶, 是由高聚物的三维交联网络结构和介质共同组成的多元体系. 其大分子主链或侧链上含有离子解离性、极性或疏水性基团, 当水凝胶所处的环境刺激因素(光、温度、电场等)发生变化时, 水凝胶的形状、相力学、光学、渗透速率和识别性能随之发生敏锐响应, 即突跃性变化, 并随着刺激因素可逆性变化, 水凝胶的突跃性变化也具有可逆性(如图 9 所示). 具有上述性质

的水凝胶统称为智能水凝胶. 根据外界响应刺激不同, 智能水凝胶可以分为温度、光、化学和电响应水凝胶. 智能水凝胶在药物控释 [52,53]、物质分离 [54,55]、化学传感器 [56,57]、化学反应开关 [58,59] 等领域有重要的应用价值. 因此, 智能水凝胶的研究备受关注.

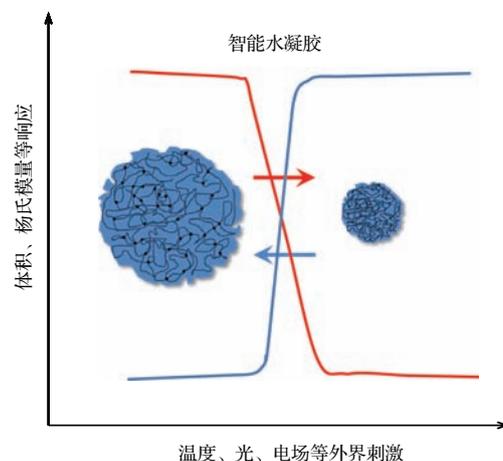


图 9 智能水凝胶刺激-响应示意图

Fig. 9. Schematic stimulus-response diagram of smart hydrogel.

含有醚键、取代的酰胺、羟基等功能团的高分子凝胶是温度响应软物质中最具代表性的一种, 如聚(N-异丙基烯酰胺)(PNIPAm)、聚氧化烯醚(PEO)、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)等. 其中 PNIPAm 由于其广阔的应用前景, 成为当前温度响应软物质材料研究的热点, 其大分子链上同时具有亲水性的酰胺基和疏水性的异丙基, 使线型 PNIPAm 的水溶液及交联后的 PNIPAm 水凝胶呈现出温度敏感特性. 在常温下, 线型 PNIPAm 溶于水形成均匀的溶液, 当温度升高至 30—35 °C 之间时, 溶液发生相分离, 表现出最低临界溶液温度(LCST). 在 PNIPAm 聚合过程中加入交联剂或经处理产生化学交联后, 就成为 PNIPAm 水凝胶. 它在室温下溶胀, 而在 33 °C 左右发生体积相变而收缩. 这种由温度敏感性而引起高聚物产生的智能型和记忆效应引起了人们很大的兴趣. 在对 PNIPAm 的研究中, 人们最关心的一个问题是 PNIPAm 产生这种热敏特性的机理, 这也是当前对 PNIPAm 研究的一个重点. 目前较容易被人接受的观点是: PNIPAm 分子内具有一定比例的疏水和亲水基团, 它们与水在分子内、分子间会产生相互作用. 在低温时, PNIPAm 与水之间的相互作用主要是酰胺基团与水分子间氢键的作用. PNIPAm 分子链在 LCST 以下溶于水

时, 由于氢键及范德瓦耳斯力的作用, 大分子链周围的水分子将形成一种由氢键连接的、有序化程度较高的溶剂化壳层. 随着温度上升, PNIPAm 与水的相互作用参数突变, 其分子内及大分子间疏水相互作用加强, 形成疏水层, 部分氢键被破坏, 大分子链疏水部分的溶剂化层被破坏, 水分子从溶剂化层的排出表现为相变, 产生体积收缩即温度响应性的体积变化. 基于以上软物质材料设计的智能膜可以广泛用于智能玻璃. 这种玻璃能够感应和响应外部环境的变化, 在周围光、热或者电场的作用下, 智能玻璃能够从最初完全透明的状态转变为半透明或者不透明的状态^[60,61]. 这种透光度改变的过程是可逆的, 并且透光度是可以随着温度、光强或者电场的变化而变化. 由于智能玻璃可以任意可逆地调节光的透过性, 所以它在工业和日常生活中的应用正受到越来越多的重视.

在水凝胶中引入对光敏感的基团或者分子即可制成光敏感型水凝胶.^[62] 光响应水凝胶一般有三类: 1) 在分子主链或者侧链引入感光基团, 感光基团吸收一定能量的光子后会发生异构化作用, 引起分子构型的变化, 同时改变了分子链间的距离及体系内亲疏水平衡导致相变发生; 2) 将感光性化合物添加到温度敏感型水凝胶中, 感光性化合物吸收光子后将光能转化为热能, 使得凝胶内部局部温度升高, 当温度高于凝胶的相转变温度引起凝胶相变响应; 3) 将遇光能够分解的光敏分子添加到分子凝胶中, 在光刺激作用下凝胶体系中将产生大量离子引起凝胶内部渗透压的突变, 使得凝胶发生相转变. 光响应高分子材料(例如液晶高分子、凝胶以及形状记忆高分子材料)可以产生光致形变或具有形状记忆功能, 完成伸缩、弯曲、爬行、转动等一系列复杂的运动, 并且可以制作成多种柔性智能执行器, 在人工肌肉、微型机器人、微泵及微阀等领域有着广泛的应用前景^[63].

软物质智能材料所包含的内容相当宽广, 而在实际中也已经有相当广泛的应用, 比如液晶, 它在显示器中有着不可取代的作用. 从20世纪70年代开发出第一台液晶显示器开始, 它经历了动态散射模式到旋转向列场效应模式的发展. 液晶显示器有很多优点, 比如说机身薄节省空间、省电不产生高温、低辐射以及画面柔和不伤眼睛. 在软物质中, 有一类材料, 在光照作用下, 分子内或者分子间会发生一系列的物理的或者化学的变化, 研究人员称之为具有光响应软物质材料. 伴随着分子结构与形

态的改变, 材料表现出某些宏观性质的变化, 最具有代表性的就是光致变色材料和光响应高分子材料. 同时光能具有远程可控性、瞬时性等优异的特性, 因此光响应软物质智能材料受到了越来越多的关注. 光致变色材料在实际应用中有广泛的用途, 可以用来制备低能耗的显示器、可调波长滤光片和智能楼宇的变色玻璃等. 最近在光控智能软物质材料方面, 利用溶胶凝胶制备钒系氧化物复合物的方法, 提高溶胶凝胶过程中钒钨氧化物纳米材料的络合能力, 可以大大增强电子迁移概率, 提高光电转换效率. 在光电致变过程中, 可产生双氧水. 负载有二氧化钛和钒酸盐的氧化物会均匀地分散在溶胶中, 其中在紫外线照射之前和之后的吸收率变化明显. 在可见光照射下表现出高的活性, 从而用于抗细菌、抗肿瘤和光催化降解有机污染物方面, 功能明显^[64,65].

5 总结与展望

软物质智能材料的发展呈现出的复杂性和跨学科性, 需要各个学科的协同发展, 才可能取得突破性进展. 软物质智能材料已经发展了30多年, 但是大部分研究成果只是停留在实验室, 未能推向工业化应用, 主要原因是因为软物质智能材料在应用过程中遇到的问题未能解决, 需要制备出高性能的软物质智能材料, 这是当前软物质智能材料的前沿研究.

例如电流变液的制备不仅涉及分散质的选择, 还需要选择合适的分散相以及添加剂. 特别是高性能巨电流变液的制备, 需要综合考虑各方面的因素. 电流变液之前的研究注重于分散质即介电颗粒材料的选择, 较少关注介电颗粒表面极化分子、分散相和添加剂的作用. 然而, 分散相以及添加剂会影响到纳米颗粒表面饱和极化, 不同的分散剂和添加剂会有不同的电流变效应. 目前大部分的实验结果是用硅油作为分散剂, 并没有系统地研究不同种类的分散剂对电流变液的影响, 需要实验上测试不同分散相对巨电流变液的影响, 同时也需要对其影响做进一步科学分析和解释, 探讨固-液相的最佳匹配机理.

介电颗粒表面的极性分子在电场作用下的极化是巨电流变液机理的基础. 目前研究人员利用分子模拟的方法, 发现巨电流变液的极性分子在电场的作用下, 能够在分散相中形成按照电场取向的分

子链, 这进一步描述了极性分子的具体作用及其微观机理, 但是仍然需要实验的证实^[66].

电流变液的纳米介电材料的制备是当前电流变液的另一个研究前沿. 研究人员证实了介电材料的尺寸效应, 即尺寸越小电流变效应越大. 研究人员进一步制备除了中空多层多孔的纳米介电颗粒, 发现其电流变效应更好, 而且大大减小了其密度和沉淀效应, 为制备性能更强、稳定性更好的电流变液开辟了一条新的道路^[67].

提高水凝胶的响应速度和力学性能是智能水凝胶应用研究的重要方向之一, 且已经研究出具有快速响应特性的智能水凝胶^[68]和高强度智能水凝胶^[69]. 但是响应速度和力学性能两个参数往往不能同时提高, 同时具有快速响应特性和高机械性能的智能水凝胶是当前的研究热点及难点^[70]. PNIPAm 的水凝胶热敏性相转变是由交联网络的亲水性/疏水性平衡受外界条件变化而引起的, 是大分子链构象变化的表现. 虽然人们对温度响应性的机理已有初步的认识, 但就疏水基团相互作用机理及其与相转变温度的关系而言, 定量方面尚有许多问题有待澄清, 重复性也有待提高.

介电弹性体是目前已经商业化的软物质智能材料, 使用电场能够控制弹性体的压缩形变. 这种材料的优点是分散剂为固体, 比磁/电流变液和高分子水凝胶更加稳定、重复性更好, 不会出现沉淀等问题, 其缺点就是需要极高的电场(约 100 kV/mm). 将聚苯胺导电聚合物颗粒加入到聚二甲基硅氧烷弹性体中, 发现能够降低其所需电压. 其物理机理有待建立和研究^[71,72].

软物质智能材料在应用过程中遇到的许多实际问题需要解决, 总结起来包括合成简单、成本低、稳定性好、响应快速、性能增强、可重复使用、无环境污染等方面. 在实际应用中, 科研人员需要提出一些简单的合成方法以制备有一定智能特性的软物质材料, 因为对于工业应用来说, 简单的合成方法将制备出合格率高和廉价的材料, 方便应用于现实生活中; 软物质本身的特性——液体溶液的流动性决定了它的稳定性要弱于固体, 而它的稳定性主要集中体现在化学物质的抗氧化、抗腐蚀、化学降解以及沉降性等方面, 于是如何提高软物质材料的功能稳定性是一个非常重要的问题; 对部件的腐蚀性、与容器/密封圈的相容性等也是软物质材料

实际应用需要解决的问题; 智能材料会感知并响应环境的变化, 在特殊的条件下, 例如高速列车上, 快速响应是非常重要的条件, 在一般的应用中也需要比传统材料更短的响应时间; 在工业应用中, 除了成本是一个重要的阻碍因素之外, 另一个就是软物质材料的性能, 由于这是一个新兴的领域, 许多材料的性能与传统的材料相比还有很大的提升空间. 例如, 在电流变液发展的初期, 它的强度不能达到工业应用最低 30 kPa 的要求, 而在当时, 磁流变液具有这一强度, 因此在汽车减震器的应用中磁流变液的使用更早, 但是在 2003 年巨电流变液发明之后, 电流变液的强度经过短时间的发展, 现在已经超过了磁流变液的最高强度(巨电流变液可以达到 250 kPa 以上)^[41]. 因此, 材料性能的提高也是软物质材料发展道路上亟待解决的问题; 材料的多次重复使用也需要在今后的科研中解决, 因为不能多次重复使用会提高使用成本, 同时也会引入新的不稳定性; 无环境污染是对现代材料提出的新的要求, 在以前粗放式的发展模式中, 环境承受了太大的压力, 导致很多地区污染严重, 近年来我国非常重视环境保护, 对工业企业提出了严格的要求. 软物质材料中的有机污染物、重金属以及纳米颗粒等可能对环境造成的污染需要予以重视.

先进材料是我国制造业强国战略的物质基础, 改革开放以来我国科技事业取得了显著进展, 为国家经济发展提供了基础和驱动力. 目前我国正在推进“中国制造 2025”, 目的是要将中国制造全面升级为中国创造, 主攻方向是智能制造. 智能制造的实现离不开材料的创新与发展. 其中软物质智能材料的发展与应用具有特别重要的特性, 特别是面向工业化应用, 把材料与器件集成化, 做成可以实际应用的智能化器件. 同时, 智能材料的研究一直以来都是国家高精尖领域的热门项目, 而软物质的智能特性又是新兴发展起来的方向, 它的发展必将推动整个工程应用领域的许多技术革命及产品的升级换代. 图 10 以电流变液为例, 展示了软物质智能材料的发展路线图. 例如巨电流变液被认为是现在最有希望在高铁、国防、军工等方面获得广泛应用的软物质智能材料, 它可以用来制作性能优良新一代智能减震器, 而在这三个领域中, 智能减震是一个科研上的难点, 而巨电流变液正好符合装置简单、响应速度快、减震效果好等要求.

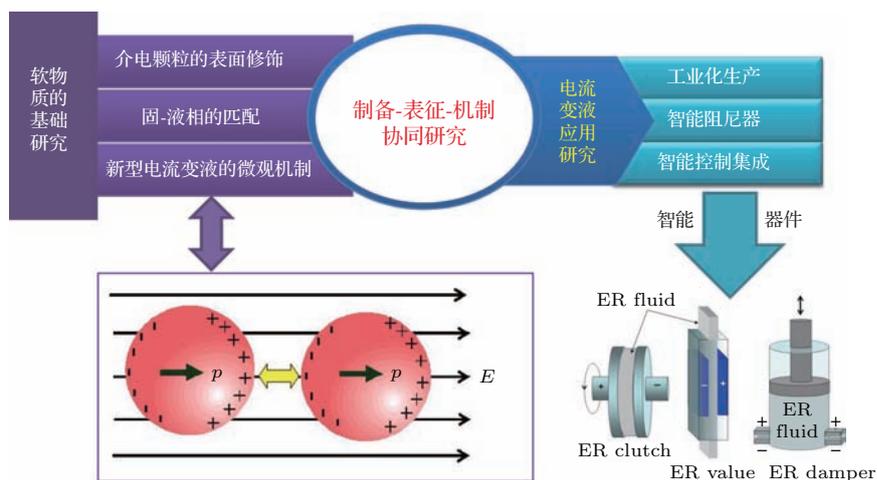


图10 电流变液软物质智能材料的发展路线图

Fig. 10. Development roadmap of ERF smart soft material.

当然,软物质智能材料在智能制造的应用仍然遇到了许多问题,其中包括基础科学问题和工程技术问题.未来5—10年,软物质智能材料学科重点发展包括:

- 1) 电、磁流变体固-液相的匹配及分散相的选择多样性,其应用与环境保护问题;
- 2) 纳米颗粒材料的表面修饰以及表面活性剂对电、磁流变液性能的提高的基础物理机理;
- 3) 固相纳米材料颗粒沉淀及极限应用下物理特性评价;
- 4) 制备具有快速响应特性和高机械强度的智能水凝胶;
- 5) 软物质智能材料在不同的应用条件过程中的服役、失效问题.

随着社会经济的迅速发展,人们对新材料的需求日益增加,世界各国在材料的研发方面都投入了巨大的人力、物力和财力.虽然我国在软物质智能材料研究领域取得了许多进步,但是与发达国家相比,在软物质智能材料的种类、数量和性能上尚有一定的差距.希望集众多研究者的智慧,促进我国软物质和材料科学在今后的发展过程中牢牢把握住软物质智能材料这一新的领域,结合国家发展战略需求,研发出响应性更灵敏、更快、重复性更好的软物质智能材料.

参考文献

[1] de Gennes P G, Badoz J (translated by Lu D W, Tang Y L, Sun D K) 2000 *Soft Matter and Hard Science* (Hunan: Hunan Education Press) (in Chinese) [P-G. 德热

纳, J. 巴杜 著 (卢定伟, 唐玉立, 孙大坤 译) 2000 软物质与硬科学 (湖南: 湖南教育出版社)]

[2] Jiang C B, Zhao X P, Wang S B, Li Y 2006 *New Materials Industry Development Report in China-Aerospace Materials Special Issue* (in Chinese) [蒋成保, 赵晓鹏, 王树彬, 李岩 2006 中国新材料产业发展报告航空航天材料专辑]

[3] Yao K D, Xu M X 1993 *Mater. Rev.* **9** 1 (in Chinese) [姚康德, 许美萱 1993 材料导报 **9** 1]

[4] Takagi T 1990 *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **1** 149

[5] Osasa Y, Matsuda A 1995 *Nature* **376** 219

[6] Chen L 2004 *Intelligent High Polymer Materials* (Beijing: Beijing Industry Press) (in Chinese) [陈莉 2004 智能高分子材料 (北京: 化学工业出版社)]

[7] Lyon L A, Meng Z, Singh N, Sorrell C D, John A S 2009 *Chem. Soc. Rev.* **38** 865

[8] Lemaire E, Grasselli Y, Bossis G 1992 *J. Phys. II (France)* **2** 359

[9] Rabinow J 1948 *AIEE Trans.* **67** 1308

[10] Morillas J R, Carreón-González E, de Vicente J 2015 *Smart Mater. Struct.* **24** 125005

[11] Lopez-Lopez M T, Kuzkir P, Meunier A, Bossis G 2009 *J. Phys. Conf. Ser.* **49** 1

[12] Margida J A, Weiss K D, Carlson J D 1996 *Int. J. Mod. Phys. B* **10** 3335

[13] Choi H J, Park B J, You J L, Cho M S 2006 *Proc of the 10th Int Conf on ER Fluids and MR Suspensions* (Lake Tahoe, USA: World Scientific) p121

[14] Park B J, Park C W, Yang S W, Kim H M, Choi H J 2009 *J. Phys. Conf. Ser.* **49** 1

[15] Jun J B, Uhm S Y, Ryu J H, Suh K D 2005 *Coll. Surf. A* **260** 157

[16] Ulicny J C, Mance A M 2004 *Mater. Sci. Eng. A* **369** 309

[17] Kormann C, Laun H M, Richter H J 1996 *Int. J. Mod. Phys. B* **10** 3167

[18] Shah K, Choi S B, Choi H J 2015 *Smart Mater. Struct.* **24** 057001

- [19] Poddar P, Wilson J L, Srikanth H, Yoo J H, Wereley N M, Kotha S, Barghouty L, Radhakrishnan R 2004 *J. Nanosci. Nanotechnol.* **4** 192
- [20] Yamanaka S, Abe H, Naito M, Fujimoto T, Kuga Y 2012 *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* **415** 239
- [21] López-López M T, Vertelov G, Bossis G, Kuzhir P, Durán J D 2007 *J. Mater. Chem.* **17** 3839
- [22] Bell R C, Karli J O, Vavreck A N, Zimmerman D T, Ngatu G T, Wereley N M 2008 *Smart Mater. Struct.* **17** 015028
- [23] Barber D E, Carlson J D 2009 *J. Phys. Conf. Ser.* **149** 1
- [24] Bose H, Roder R 2009 *J. Phys.: Conference Ser.* **49** 1
- [25] Fuchs A, Gerdaninejad F, Wang X J, Gregory H H, Hatice G, Cahit E, George K 2004 *J. Appl. Polym. Sci.* **92** 1176
- [26] Chin B D, Park J H, Kwon M H, Park O O 2001 *Rheol. Acta* **40** 211
- [27] Rosensweig R E 1997 *Ferrohydrodynamics* (Cambridge: Cambridge University Press)
- [28] Skjeltorp A T 1983 *Phys. Rev. Lett.* **51** 2306
- [29] Ramos J, de Vicente J, Hidalgo-Alvarez R 2010 *Langmuir* **26** 9334
- [30] Rusetski A N, Ruuge E K 1990 *J. Magn. Magn. Mater.* **85** 299
- [31] Ganguly R, Gaiind A P, Sen S Puri I K 2005 *J. Magn. Magn. Mater.* **289** 331
- [32] Sun Y, Kwok Y C, Nguyen N T 2007 *Lab on a Chip* **7** 1012
- [33] Montagne F, Mondain-Monval O, Pichot C, Mozzanega H, Elaissari A 2002 *J. Magn. Magn. Mater.* **250** 302
- [34] Bibette J 1993 *J. Magn. Magn. Mater.* **122** 37
- [35] Tan S H, Nguyen N T 2011 *Phys. Rev. E* **84** 036317
- [36] Carlson J D, Catanzarite D M, Clair K A 1996 *Proc of the 5th Int Conf on ER Fluids and MR Suspensions and Associated Technology* (Singapore: World Scientific) p20
- [37] Carlson J D 2000 *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **10** 589
- [38] Carlson J D, John C 1998 *US Patent* 5842547
- [39] Carlson J D, Clair St K A, Chrzan M J 1999 *US Patent* 5878851
- [40] Du H, Lam J, Cheung K C, Li W, Zhang N 2013 *Smart Mater. Struct.* **22** 105016
- [41] Halsey T C 1992 *Science* **258** 761
- [42] Wei C G 2000 *Electrorheological Technology: the Mechanism of Material, the Engineering Application* (Beijing: Beijing University of Science and Technology Press) (in Chinese) [魏宸官 2000 电流变技术: 机理, 材料, 工程应用 (北京: 北京理工大学出版社)]
- [43] Gong L H, Cui Z S 2002 *Lubrication Engineering* **27** 66 (in Chinese) [龚烈航, 崔占山 2002 润滑与密封 **27** 66]
- [44] Lu K Q, Shen R 2007 *Physics* **36** 742 (in Chinese) [陆坤权, 沈容 2007 物理 **36** 742]
- [45] Zhang D H 2011 *Lubricating Oil* **26** 9 (in Chinese) [张东恒 2011 润滑油 **26** 9]
- [46] Winslow W M 1949 *J. Appl. Phys.* **20** 1137
- [47] Stangroom J E 1983 *Phys. Technol.* **14** 290
- [48] Klass D L, Martinek T W 1967 *J. Appl. Phys.* **38** 67
- [49] Block H, Kelly J P 1985 *GB Patent* 21750510
- [50] Lu Y 2009 *Mater. Rev.* **3** 2 (in Chinese) [路阳 2009 材料导报 **3** 2]
- [51] Wen W J, Huang X X, Yang S H, Lu K Q, Sheng P 2003 *Nature Mater.* **2** 727
- [52] Seliktar D 2012 *Science* **336** 1124
- [53] Liu Z, Liu L, Ju X J, Xie R, Zhang B, Chu L Y 2011 *Chem. Commun.* **47** 12283
- [54] Stuart M A C, Huck W T S, Genzer J 2010 *Nat. Mater.* **9** 101
- [55] Nagase K, Kobayashi J, Okano T 2009 *J. R. Soc. Interface* **6** S293
- [56] Beebe D J, Moore J S, Bauer J M, Yu Q, Liu R H, Devadoss C, Jo B H 2000 *Nature* **404** 588
- [57] Dong L, Agarwal A K, Beebe D J, Jiang H 2006 *Nature* **442** 551
- [58] He X M, Aizenberg M, Kuksenok O, Zarzar L D, Shastri A, Balazs A C, Aizenberg J 2012 *Nature* **487** 214
- [59] Kumacheva E 2012 *Nat. Mater.* **11** 665
- [60] Gong X Q, Li J X, Chen S Y, Wen W J 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 251907
- [61] Li X, Gong X, Yi X, Sheng P, Wen W 2011 *Smart Mater. Struct.* **20** 075005
- [62] Juodkazis S, Mukai N, Wakaki R, Yamaguchi A, Matsuo S, Misawa H 2000 *Nature* **408** 178
- [63] Wang W, Wang X Z, Cheng F T, Yu Y L, Zhu Y T 2011 *Prog. Chem.* **23** 6 (in Chinese) [王威, 王晓振, 程伏涛, 俞燕蕾, 朱玉田 2011 化学进展 **23** 6]
- [64] Wang C, Zhou B P, Zeng X P, Hong Y Y, Gao Y B, Wen W J 2015 *J. Mater. Chem. C* **3** 177
- [65] Wang C, Gao X H, Gao Y B, Cao W B, Tian J X, Wu X X, Ye Z R, Zeng X P, Zhou B P, Wu J B, Fang Z Y, Wan J, Qin J H, Wen W J 2015 *J. Mater. Chem. B* **3** 8115
- [66] Chen S Y, Huang X X, Nico F A, van der Vegt, Wen W J, Sheng P 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 046001
- [67] Lee S G, Lee J S, Hwang S H, Yun J Y, Jang J S 2015 *ACS Nano* **9** 4939
- [68] Cho C E, Kim J W, Fernandez-Nieves A, Weitz D A 2008 *Nano Lett.* **8** 168
- [69] Liu Z, Xie R, Ju X J, Wang W, Chu L Y 2016 *Chem. Indust. Engineer. Prog.* **35** 1812 (in Chinese) [刘壮, 谢锐, 巨晓洁, 汪伟, 褚良银 2016 化工进展 **35** 1812]
- [70] Xia L W, Xie R, Ju X J, Wang W, Chen Q, Chu L Y 2013 *Nature Commun.* **4** 2226
- [71] Pelrine R, Kornbluh R, Pei Q, Joseph J 2000 *Science* **287** 836
- [72] Opris D M, Molberg M, Walder C, Ko Y S, Fischer B, Nüesch F A 2011 *Adv. Funct. Mater.* **21** 3531

SPECIAL TOPIC — Progress in Soft Matter Research

Research progress of field-induced soft smart materials*

Wu Jin-Bo¹⁾ Wen Wei-Jia^{1)2)†}

1) (*Materials Genome Institute, Shanghai University, Shanghai 200444, China*)

2) (*Department of Physics, the Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China*)

(Received 28 June 2016; revised manuscript received 2 August 2016)

Abstract

The field-induced soft smart material is a kind of soft matter whose macroscopic properties (mechanical, or optical) can be significantly and actively controlled and manipulated by external field such as magnetic field, electric field, temperature or light. In this paper, we briefly review the research and application progress of the field-induced soft smart materials in recent years and discuss the development problems and trend in this research area. In particular, we focus on three typical field-induced soft materials of smart materials: magnetorheological fluid, electrorheological fluid, and temperature and light sensitive polymer gel.

Keywords: soft matter, smart materials, field-induced, electrorheological fluid

PACS: 83.80.Gv, 83.85.Cg, 61.82.Pv, 82.70.Gg

DOI: [10.7498/aps.65.188301](https://doi.org/10.7498/aps.65.188301)

* Project supported by the Shanghai Committee of Science and Technology, China(Grant No. 16111107402).

† Corresponding author. E-mail: phwen@ust.hk