

# 电流变液和电流变效应

朱克勤

中国科学技术大学力学与机械工程系, 合肥 (邮政编码230026)

Tao Rongjia (陶荣甲)

[美国] Southern Illinois 大学物理系

**提要** 电流变液是一种极有发展前景的新颖材料, 通常由不导电的母液和均匀散布在其中的电介质微粒组成。对于外加电场的变化, 它的力学性能可以作出迅速的响应, 因而在工业上极具应用前景。本文将就电流变液的研究进行综述, 涉及的内容有: 电流变效应的机理、电流变液材料及其力学性能、应用和展望。

**关键词** 电流变液; 电流变效应; 粘弹性; 宾汉模型; 屈服应力; 介电常数; 电偶极矩。

## 1 引言

电流变液 (electrorheological fluid) 是这样一类流体的总称: 在外加电场的作用下, 液体的粘性会随电场强度的增加而明显增大; 当电场强度达到某一临界值时, 它会发生相变而迅速固化。固化过程在瞬间即可完成, 所需时间通常在千分之一秒。该过程具有可逆性, 即在电场撤消之后, 电流变液又马上会从固态变成液态。以上在电场作用下流变特性发生变化的现象称为电流变效应。通常, 电流变液是一种两相悬浮体系, 由不导电的母液和均匀散布在其中的电介质微粒组成。

电流变液的研究自从 1947 年被报道并获得首项专利以来, 至今只有不到 50 年的历史。当时, Winslow<sup>[1]</sup> 就发现某些配方的悬浮液在电场中会随场强增加而变稠甚至固化的现象。比如, 他以一定数量的谷物淀粉或二氧化硅微粒与矿物油混合, 在施加以 4 kV/mm 的电场后, 悬浮液即迅速呈现出固体的特性。这一发现尽管立即引起某些科学家的兴趣, 但在其后相当长的一段时间内, 电流变液的研究并未能迅速形成高潮。在应用中面临的一些严重技术问题限制了它的发展。比如, 为了稳定弥散度, 早期的电流变液配方中所加的水基表面活性剂常常含有水分, 这会导至运行温度范围过窄、局部电流变效应消失和过早发生电击穿等问题。

最近几年, 特别是 1987 年第一届国际电流变液会议以来, 在电流变液的机理、力学性能、材料和应用研究上有了一系列重大的进展。电流变液的研究作为一种边缘学科受到了物理学、力学、化学、数学、材料学和机械工程等领域科学工作者的极大关注<sup>[2-5]</sup>。对此, 在《Science》, 《Nature》, 《Scientific American》等美英著名科学杂志上均已作了报

道<sup>[6-9]</sup>。目前,电流变液已成为商品进入了市场,在工业发达国家已出现了专营电流变液的公司。最近,美国能源部的一份报告指出,到1995年,电流变液与电流变器件的市场规模预期将达到200亿美元<sup>[9]</sup>。目前,电流变液已迅速成为一个引人注目的研究热点,这一研究正以极大的活力和步伐开展起来。被誉为“灵巧液体”的电流变液具有对电场变化作出迅速反应的能力。通过调节电场强度,它的粘性及屈服应力等力学性能可以快速灵敏地按设计要求变化,从而实现对工况及时精确的控制。一些学者已经预言,利用这种优良的电-机械耦合特性设计出的电流变器件,将会在技术上引起一场革命。

本文的目的是介绍电流变液这一新材料的研究现状及近年来的某些进展。主要涉及的内容有:电流变效应的机理,电流变液材料及其力学性能、在工业中应用的一些典型例子和展望。

## 2 电流变效应的机理

自从在实验中发现电流变效应以来,人们首先要搞清的问题是:电流变液为什么会在电场增强时变稠?在场强超过临界值时为什么会发生相变?电流变液的固态结构怎样?尽管由于电流变现象的复杂性和多学科性,要对这些现象作出令人满意的解释还有许多工作要做,但是近年来这方面的研究已有相当进展。

根据目前的认识,电流变液的机理跟电场中介电粒子的极化现象及它们相互作用后的进一步链化密切相关。当外电场不存在时,由于电介质微粒的密度与母液的密度十分接近,作用在粒子上的浮力与重力相当。在这种微重力环境下,热运动使粒子在空间随机分布形成均匀的悬浮液。在施加电压之后,介电粒子表面出现极化电荷形成电偶极子,它们的感生偶极矩是

$$\mathbf{P} = \alpha \vec{E} \quad (1)$$

其中 $\alpha$ 为粒子的极化率, $\mathbf{E}$ 为当地有效电场。在粒子体积浓度较低的情况下,可以用外加电场来近似。一般情况下,极化率是一个二阶张量,只有当粒子形状球形对称时,它才是一个标量。这时, $\mathbf{P}$ 与 $\mathbf{E}$ 平行。在电流变液的极化理论中,大多采用理想的球形粒子假定。若以 $a$ 表示它的半径,这时极化率

$$\alpha = \beta a^3 \epsilon_f \quad (2)$$

其中 $\beta = (\epsilon_p - \epsilon_f) / (\epsilon_p + 2\epsilon_f)$ , $\epsilon_p$ 和 $\epsilon_f$ 分别是粒子和母液的介电常数。电偶极子之间的相互作用会使它们沿电场方向排列,形成类链状结构。图1给出的是直径 $27\mu\text{m}$ 的玻璃珠与硅油混合后(体积比为0.4),在 $2\text{kV}/\text{mm}$ 的直流电场中类链结构的放大照片<sup>[10]</sup>。实验研究表明,玻璃珠在电场中会迅速沿电场方向排列,但两端与电极相联的粒子链的形成是在 $0.5\text{kV}/\text{mm}$ 的电场强度下才开始出现。在电场中,类链状结构形成的速度很快,眼睛无法直接观察到其形成过程。但迅速形成的类链状结构不是完全有规则的,除与电场方向一致并连接两电极的链状结构外,还存在链的横向连接和链段。其后,可以观察到不断发生粒子的调正。链中相邻极子之间的吸引是电流变液在电

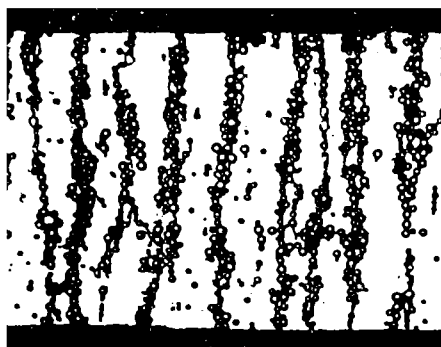


图1 直径为 $27\mu\text{m}$ 的玻璃珠在硅油中(体积比为0.4),施以 $2\text{kV}/\text{mm}$ 的直流电场后形成的类链结构的放大照片

场中粘性增加并产生屈服应力的重要原因。电场变强，偶极子之间的吸引也变强。电流变液的物态由库仑力和热运动之间的强弱决定。

用以下方法可以估出相变时的临界电场强度<sup>[11]</sup>。介电粒子热运动动能的平均值是  $3NKT/2$ ，其中  $N$ ， $K$  和  $T$  分别是粒子总数、Boltzmann 常数和温度。偶极子相互作用的势能是

$$Np^2n/\epsilon_f = N\beta^2 a^6 E^2 n \epsilon_f \quad (3)$$

其中  $n$  是粒子数密度。在较低电场强度下，若满足条件

$$3NKT/2 \gg N\beta^2 a^6 E^2 n \epsilon_f \quad (4)$$

则热运动占主导地位，电流变液保持液态。随电场的增强，当偶极子相互作用超过热运动时，电介质微粒停止运动，开始沿电场方向排列，在两个电极之间形成链状结构。从以上分析，得到的临界场强是

$$E_c = \sqrt{3KT/(2\beta^2 n a^6 \epsilon_f)} \quad (5)$$

基于考虑电流变液自由能的更详细计算，得到的结果则是

$$E_c = \sqrt{8\pi T K(1-\Phi)/(\beta^2 v \Phi \epsilon_f)} \quad (6)$$

其中  $v = 4\pi a^3/3$ ，而  $\Phi = nv$  是电流变液中粒子的体积浓度。当  $E \geq E_c$  时电流变液呈固态。

实验研究表明，在某些组分的电流变液中加入适量的水作为活化剂，可以大大提高电流变液效应。其机理可以通过水键化理论来加以解释。在日常生活中我们都有这样的经验：松散

的干面粉加入水之后变得粘稠了。这是因为水在粒子的表面之间形成连接键，要把它们分开需要克服水的表面张力(见图2)。在电流变液中，在无电场的情况下，含有活动离子的水分子被吸附在多孔粒子的孔隙内，介电粒子之间不因水发生关联。在强电场的作用下，活动离子聚到粒子的一端，与相邻粒子连接成键。正是这种连接键的形成使得电流变液在静止时可以承受切应力，变得粘稠。这就解释了为什么对某些电流变液，加入必要的

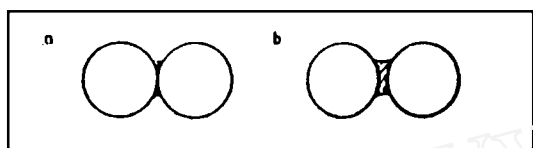


图2 水键化理论示意图

散散的干面粉加入水之后变得粘稠了。这是因为水在粒子的表面之间形成连接键，要把它们分开需要克服水的表面张力(见图2)。在电流变液中，在无电场的情况下，含有活动离子的水分子被吸附在多孔粒子的孔隙内，介电粒子之间不因水发生关联。在强电场的作用下，活动离子聚到粒子的一端，与相邻粒子连接成键。正是这种连接键的形成使得电流变液在静止时可以承受切应力，变得粘稠。这就解释了为什么对某些电流变液，加入必要的

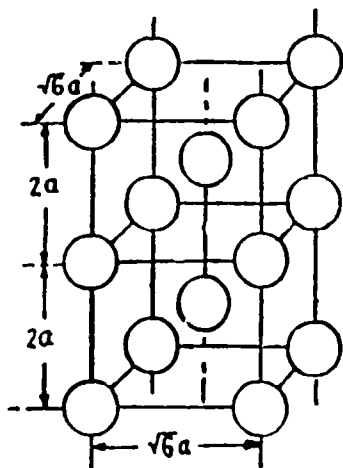


图3 电流变液的体心正方结构

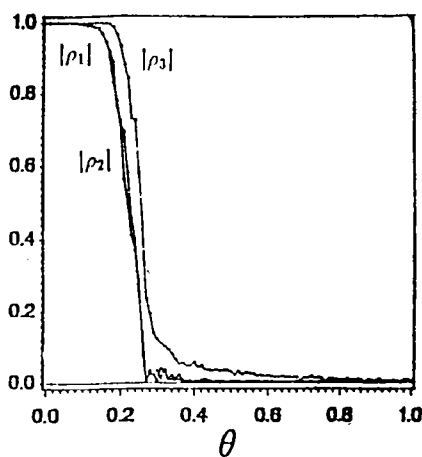


图4 序参数随无量纲参数 $\theta$ 的变化曲线

水分作为活化剂会大大增强电流变液效应。基于以上的水键化理论，电流变液的母液应该是疏水的，介电粒子应该是亲水和多孔的，以在粒子中吸收一定数量的水分。散布在玉米油中的谷物淀粉、矿物油中的硅胶、变压器油中的纤维素以及硅油中的沸石都是这一类电流变液介电粒子的例子，而氧化烃油中的聚甲基丙酸钠和硅油中涂有高聚物的金属粒子都是无水电流变液介电粒子的例子。

研究电流变液固化后介电粒子形成的结构是一个重要的问题，它决定着固态电流变液的物理特性。Halsey 和 Toor<sup>[12]</sup> 基于单链之间相互作用的近似分析，认为其形成的结构是面心立方晶格。最近这方面的一个重要进展是 Tao 以能量极小化为基本出发点的研究，已经证明：只有体心正方晶格才是最稳定的结构，处于最低能态（见图 3）。这一结论也被用计算机的蒙特卡罗模拟和激光散射实验所证实<sup>[11]</sup>。采用全新的散射原理进行的激光散射实验对电流变液结构上述假定的证明，已作为重大科研成果在《Nature》杂志上报道<sup>[7]</sup>。以体心立方晶格为基础，可以引入序参数

$$\rho_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \exp(i\mathbf{b}_j \cdot \mathbf{r}_i) \quad j=1,2,3 \quad (7)$$

其中  $\mathbf{b}_1 = 2\pi x/\sqrt{6}a - \pi z/a$ ,  $\mathbf{b}_2 = 2\pi y/\sqrt{6}a - \pi z/a$ ,  $\mathbf{b}_3 = 2\pi z/a$ ，而  $\mathbf{r}_i$  是粒子的位移矢量。引入无量纲参数表征热运动的动能与偶极子作用能之比

$$\theta = 8a^3 KT \epsilon_i / p^2 \quad (8)$$

图（4）是一组典型的数值结果。从中可以看到：在  $0 \leq \theta \leq \theta_1$  时， $\rho_j$  都不为零，电流变液呈固态；在  $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$  时， $\rho_1 = \rho_2 = 0$  而  $|\rho_3| > 0$ ，在  $z$  方向有序形成单链；在  $\theta > \theta_2$  时， $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = 0$ ，均无序，呈液态。

### 3 电流变液的力学性能

电流变液的力学性能比较复杂。在没有电场的情况下，电流变液基本上是一种牛顿流体，在流动时，其切应力与切应变率成正比（见图 5 曲线 A）。在外加电场作用下，只有当切应力  $\tau$  超过某一临界值  $\tau_B$  后，电流变液才开始流动。这时，其应变率  $\dot{\gamma}$  一般与  $(\tau - \tau_B)$  成正比，即服从宾汉模型（见图 5 曲线 B）：

$$\tau = \tau_B + \eta_B \dot{\gamma} \quad (9)$$

其中  $\eta_B$  为宾汉粘性系数， $\tau_B$  为宾汉屈服应力。在  $\tau < \tau_B$  时，电流变液呈固体特性，可在静止状态下承受切应力。当  $\tau > \tau_B$  之后，它呈液体特征，具有易流动性，已不能在静止时承受切应力。

宾汉模型的缺点是它完全不能描述切应力小于屈服应力时电流变液的一些重要力学特性。Gamota 和 Filisko<sup>[13]</sup> 对屈服前区的应力响应所作的一系列动态测量表明，这一区域电流变液表现为线性粘弹性体。输入正弦应变时，电流变液产生的应力也是正弦变化，

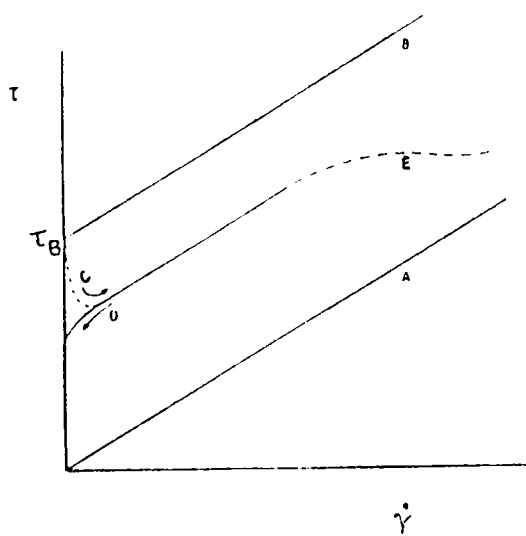


图 5 电流变液的应力和应变率变化曲线

只是相角不同。包括储能模量、损耗模量和相角在内的粘弹性参数是电场强度、电流变液组分、应变频率和振幅的函数。随着场强的增加，损耗模量增大而相角减小。由于相角的正切等于损耗模量与储能模量之比，这样相角的减小意味着电流变液变得更具弹性。

在屈服应力区，一个可能发生的现象是， $\tau-\gamma$  关系并不沿图 5 的曲线 B 线性变化，而是沿曲线 C 变化后进入曲线 E。这说明引起电流变液流动所需的最小应力不必是宾汉屈服应力，而是静态屈服应力。表征材料流变性质的有三种屈服应力（见图 6）。第一种是弹性极限屈服应力  $\tau_e$ ，这通常在固体力学中使用，超过  $\tau_e$  之后，材料就不会复元而有一个永久性的应变  $\gamma_e$ 。在弹性极限后的应变是弹性和塑性变形的过渡。弹性极限屈服应力不是线性变化的极限，而是材料可逆变的极限，线性的失去通常在弹性极限之前。在图上表出的最大应力是静

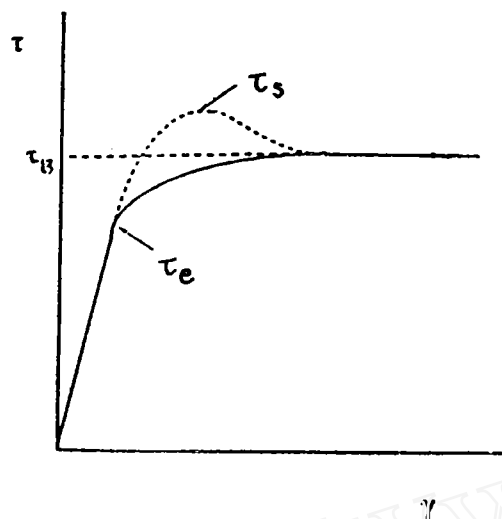


图 6 电流变液的应力和应变关系

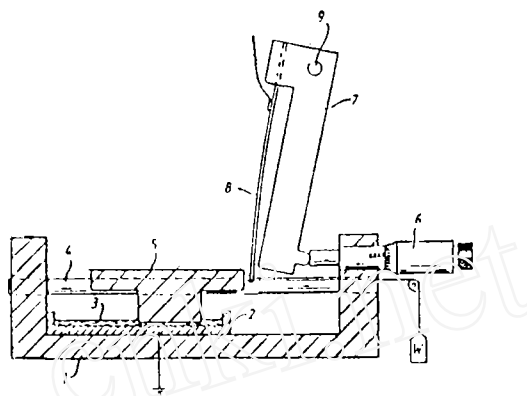


图 7 电流变液的静态屈服应力测定仪

态屈服应力  $\tau_s$ ，这是材料发生无限变形的最小应力。最后，大应变的平稳应力是宾汉屈服应力  $\tau_B$ 。图 6 只是粘弹性材料的一个例子，以说明三种屈服应力的概念。事实上，对于各种电流变液，可能  $\tau_s$  与  $\tau_B$  是同一值。作为临界值，屈服应力在表征电流变液的力学性质和工程应用上具有重要的地位。在实验中可以用各种直接的和非直接的方法确定屈服应力。非直接方法是指从已有的  $\tau$  与  $\gamma$  的实验数据（常常是在  $\gamma$  较高的情况下得到的）用外推法来确定  $\gamma$  趋近于零时的  $\tau$  值即宾汉屈服应力。图 7 给出了一种静态屈服应力测定仪的示意图。槽 2 用以存放被测的电流变液，部件 1 和 5 分别是正负电极，形成等宽度的狭缝，电极 5 可以沿水平绝缘导轨无摩擦地移动。加上电压之后，槽中的电流变液固化。千分尺 6 通过弹簧片 8 及电极 5 给固化的电流变液施以切应力。直至电极 5 开始运动的瞬间，电流变液所能承受的最大切应力可由贴在簧片上的应变片通过应变仪测定下来。该仪器结构简单，操作方便，由 Block<sup>[14]</sup> 等人设计并已获得美国专利。关于在直接法中所使用的各种测量技术和仪器以及误差来源的详细讨论可以参阅有关屈服应力测量的专题述评<sup>[15]</sup>。一般地说， $\tau_B$  随电场强度增大而增大。根据实验测定，其值一般与电场强度的平方成正比。

通过电流变液的已知物理参数，从理论上估算屈服应力是一件有意义而又困难的工作。在电场中，粒子链化后粒子间的相互作用力是产生电流变效应的重要原因，链状结构的强度

对电流变液的力学性能特别是屈服应力有直接的影响。可采用的最简单的模型是点偶极子。这时，中心相距  $R$  半径为  $a$  的两个球形粒子之间的作用力是

$$f_d = 24\pi a^6 \epsilon_1 (\beta E)^2 / R^4 \quad (10)$$

其中  $E$  是外加电场强度。与实验相比，上式的计算结果过于偏低，特别是在介电粒子相距较近时。Conrad<sup>[10]</sup> 等人给出了一种改进的数值方法，并进一步估算了屈服应力。他们基于满足拉普拉斯方程的电位的高阶展开式，在场强分布中计入了全链粒子影响的高阶效应，导致在粒子附近的当地有效电场明显增强，使计算结果有了改善。图 8 给出的一组典型计算结果表明：比值  $R/a$  对极化力的影响较大，只有当粒子中心分开到两倍粒子直径时，点偶极子近似才可以给出很好的结果；在  $R/a$  较小时，点偶极子近似的计算结果过于偏低。基于数值结果，他们同时给出了一个适用于  $R/a \geq 2.05$  范围的介电粒子之间相互作用力的拟合公式。考虑到单链在切应变下力的平衡关系可以进一步求出切应力  $f_\tau$  与  $R/a$  的函数关系。图 9 给出的计算结果表明，随着  $R/a$  的增大， $f_\tau$  有一个极大值，它给出了链发生断裂的临界点。由此可以进一步从理论上确定静态屈服应力。Bonnecaze 和 Brady<sup>[16]</sup> 提出了一种模型，把宾汉屈服应力与电流变液的静电能联系起来。他们发现：在低 Mason 数下，动态屈服应力等于平均能跃和它频率的乘积；在电流变液的体积比在 40% 时会有极大值存在。这一理论，他们估算了电流变液的最大屈服应力。

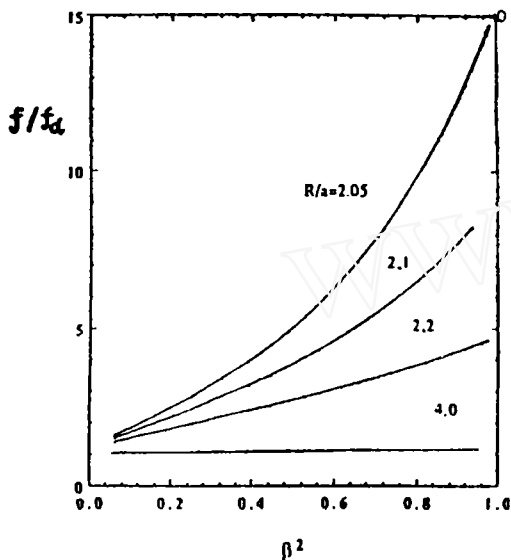


图 8 介电粒子间引力与距离的变化曲线

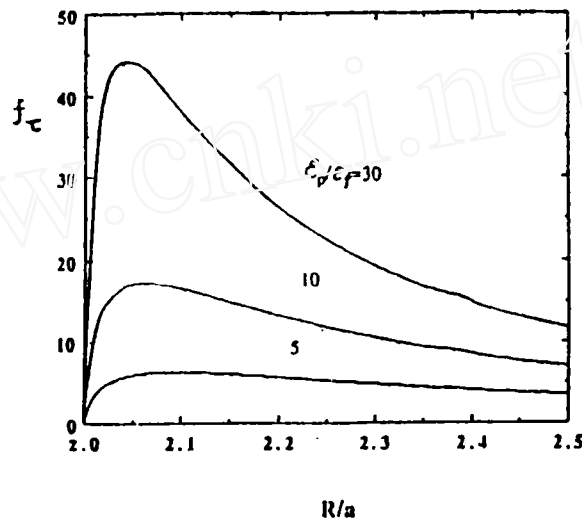


图 9 介电粒子间切应力与距离的变化曲线

由于电流变液的高度商业价值，材料配方对其力学性能影响的研究具有一定的保密性，这里我们仅作一些原则性的讨论。所有的电流变液均由介电粒子悬浮在母液中组成，为了维持电场，母液必须是绝缘的。有时在配方中加入适当的水份作为活化剂可以大大增强电流变效应，但过量的水会导致电击穿而适得其反。考虑到在高温条件使用时，水的迅速蒸发会导致液体干燥，从而使基于水键化理论的那部分电流变效应消失。这时，应使用无水配方的电流变液。在电流变液中，介电粒子的体积比  $\phi$  是影响其效应的另一个重要因素。迄今为止的研究表明，电流变效应对  $\phi$  的依赖性尚无明确规律。一般认为， $\phi < 0.1$  的低浓度电流变液

已不会发生固化；对于  $\phi > 0.4$  的情况，无电场时粘度已过大，也很少有实际的使用价值。因而  $\phi$  在 0.1—0.4 的范围为宜。母液的粘性并不会明显地影响电流变液的屈服应力，然而会影响系统发生相变的特征时间。在大多数实际应用中，都要求尽可能缩短这一特征时间。关于粒子尺寸、形状和表面粗糙度对电流变效应的影响目前还不十分清楚，通常使用的粒子特征尺寸为 5—50  $\mu\text{m}$ 。粒子最大尺寸的限制在于，当电场消失时，粒子的布朗运动应得到保证。在电流变液中，介电粒子的沉淀会大大影响正常的电流变效应，这就需要粒子与母液的密度十分接近。通常我们可以在某一温度下实现这一点，但温度变化之后，由于液固两相的热膨胀系数不同，会破坏已建立的微重力环境。解决该问题的途径有减小介电粒子尺寸，增加粒子的浓度和母液的粘性，但这时必须同时考虑所带来的副作用。比如过高的母液粘性会使高速旋转的空载工况耗能增加。这时，抓住主要矛盾，作出正确的选择是十分重要的。

最近，新一代的溶液型电流变液已见报道<sup>[15]</sup>。作为非两相的均匀溶液，它彻底解决了悬浮液中长期无法消除的固相沉淀问题，是电流变技术发展史上的一个重要进展。目前尚需要解决的问题是毒性较大，溶剂有腐蚀性，温度不能过高等。其产生电流变效应的机理也有待进一步研究。

#### 4 电流变液的应用和展望

电流变效应为在工业中实现新一代的电-机耦合系统提供了良好的前景。利用这一性质设计出的新一代的传动离合器、减震器、制动器、阀门、卡盘和机器人控制系统等可通称为电流变器件。与传统的产品相比，电流变器件具有重量轻、灵敏度高、响应快、噪音小和能耗低等一系列突出的优点，特别适用于用计算机控制的新一代机电产品，因而在工业部门有广泛的应用前景。

目前已设计出的电流变器件主要有两大类型。在第一种类型中，电流变液位于有相对运动的机械部件之间。通过施加电压，改变电流变液的粘性，即可控制机械部件之间传递力或力矩的大小。在这一类型的电流变器件中，离合器、制动器和阻尼器都是典型的例子。图10是用电流变效应设计的汽车传动离合器机构示意图。汽车引擎与转子联结，车轮与圆筒联结，转子与圆筒之间充满电流变液。当电场不存在时，电流变液呈液态，汽车引擎驱动转子旋转而不向圆筒传递任何可以察觉的力矩。当向液体施加一定电场时，电流变液变稠（或固化），从而将转矩传递给圆筒，随后驱动车轮。在这种新型的离合器中，放弃了传统的齿轮传动系统，因而有结构简单、机械磨损小和噪音低的特点。特别是电流变液的固化在毫秒瞬间即可完成，因此它还具有响应迅速的良好性能<sup>[17]</sup>。与此十分类似的制动器是另一个典型的例子。最近的研究表明，汽车工业是电流变器件最巨大的潜在市场，这一高新技术将在未来新一代的汽车中得到广泛地使用。大至传动离合器和减震器等关键部件，小至车门和后舱盖的定位系统都可以利用电流变效应，从而使这些部件的性能得到明显的改善<sup>[18]</sup>。目前国际上福特和丰田等汽车公司均已纷纷在这一领域开展了一系列研究活动。

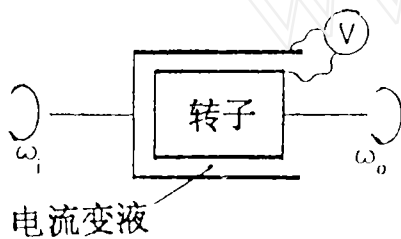


图 10 电流变离合器示意图

另一种类型的电流变器件的原理是，电流变液在静止的管道中运动，用电压改变流体的

粘度，从而实现控制流体运动速度的目的。液压阀是这一类器件的典型例子，在电场的作用下，电流变液的粘性可以按需要变化，以控制流量或完全阻断流动，使用起来相当方便。目前电流变阀已有多种设计<sup>[19]</sup>，图11中给出了一种设计的示意图。电流变液在锯齿形通道中流动，通过施加电压就可以方便地阻断流动，开闭阀门。

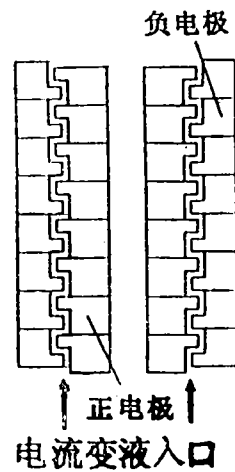


图 11 电流变阀示意图

电流变液还可以与复合材料和光纤传感器相结合，形成光纤智能化复合材料。以它制成的光纤智能化监控系统，既可以通过光纤传感器实时监测使用中的复合材料结构，又可通过电流变效应按需要适时地调整材料的性能，作出主动响应以适应外界环境变化的需要<sup>[20]</sup>。在建筑材料中提出的一种利用电流变效应的新方案具有不需使用高压电源的优点。基本的作法是在建筑材料中混入一种装有催化剂的管状纤维。当外部环境变化时，由于温升、冲击或振动等因素导致管状纤维裂开，释放出的催化剂会使材料的局部性能得以改善。这是一种不需要电的被动式系统，对于建筑物抵抗过载开裂、液体的渗透、冻裂和腐蚀等均具有良好的前景<sup>[21]</sup>。

作为商品进入市场的电流变液应该具有稳定、耐用、节能、无腐蚀性、与密封材料兼容和价廉等特点。从工程应用的角度来看，不同的电流变器件对电流变液的物理性能有不同的要求，其中最重要的性能参数是屈服应力和零电场时的粘性系数。现阶段的电流变液性能已完全可以满足制造引擎减震支架或冲击阻尼器的需要。但用于汽车离合器的更高性能要求的电流变液还在进一步的研制之中。关于这方面的详细情况可以参见文献[18]。

目前电流变液研究作为一种革命性的技术开发项目正日益受到科技界的高度重视，经过近50年不懈的努力，从机理、材料性能和应用研究的角度都有了相当的进展。然而，电流变液的研究和技术开发还没有进入一个完全成熟的阶段，从基础理论到应用技术还有许多问题有待解决。目前，还不能提供用于传动离合器这一类大扭矩电流变器件的足够可靠的电流变液。在电流变液的屈服应力、零电场粘度和最大电流密度等这些主要性能参数上还有待进一步改善。为了实现这一目的，除了要在实验基础上逐步解决有关技术难题之外，还应该继续重视电流变液基础理论的研究，特别是建立更加合理的物理和力学模型，寻求计算其各种性能的足够精确的理论方法。可以预期，在不久的将来，电流变液这一高新技术必将在汽车、机械、航空、石油、化工和其它工业部门得到广泛的应用。

### 参 考 文 献

- 1 Winslow W M. U.S. Patent No. 2, 417, 1947 (Mar. 25, 1947); *Induced fibrillation of suspensions*, *J. Appl. Phys.*, **20** (1949) 1137—1140
- 2 Proceedings of the First International Symposium on ER Fluids (North Carolina State University Engineering Publications 1989)
- 3 Proceedings of the 2nd International Conference on ER Fluids, ed. by Carson J D, Sprecher A F, and Conrad H (Technomic, Lancaster, PA 1990)
- 4 Proceedings of the 3rd International Conference on ER Fluids, ed. by Tao R (World Scientific, Singapore 1992)
- 5 Proceedings of the 4th International Conference on ER Fluids, ed. by Tao R (World Scientific, Singapore) to be published



- 6 Halsey T C. Electrorheological Fluids, *Science*, 258 (30 Oct. 1992) : 761—776
- 7 Whittle M and Bullough W A. The structure of smart fluids, *Nature*, 358 (30 June, 1992) : 373
- 8 Halsey T C and Martin J E. Electrorheological Fluids, *Scientific American* (Oct. 1993) : 58—64
- 9 DE-RP03-91ER30172, Department of Energy, USA, 1992
- 10 Conrad H, Chen Y and Sprecher A F. The strength of ER fluids, *Int. J. of Modern Physics B*, 6, 15 & 16 (1992) : 2575—2594
- 11 Tao R. Order parameter and phase transitions in ER fluids, *Int. J. of Modern Physics B*, 6, 15 & 16 (1992): 2635—2649
- Tao R and Sun J M. Ground state of ER fluids from Monte Carlo simulation, *Phys. Rev. A*, 44, 10 (1991) : 6181—6184
- Tao R and Sun J M. Three-dimensional structure of induced ER solid, *Phys. Rev. Letters*, 67, 3 (1991) : 398—401
- Chen T, Zitter R N and Tao R. Laser diffraction determination of the crystalline structure of an ER fluids, *Physical Review Letters*, 68, 16 (1992) 2555—2558
- 12 Halsey T C and Toor W. Structure of ER fluids, *Phys. Rev. Letter*, 65, 22 (1990) : 2820—2823
- 13 Gamota D R and Fil'sko F E. Linear/nonlinear mechanical properties of electrorheological materials, *Int. J. of Modern Phys. B*, 6, 15 & 16 (1992) : 2595—2607
- 14 Block H, U.S. Patent No. 4, 687, 589 (Aug. 18, 1987)
- 15 Nguyen Q D and Boger D V. Measuring the flow properties of yield stress fluids, *Ann. Rev. of Fluid Mechanics*, 24 (1992) : 47—88
- 16 Bonnecaze R T and Brady J F. Yield stresses in electrorheological fluids, *J. of Rheology*, 36, 1 (1992) : 73—116
- 17 Jhonson A R et al. Testing on high speed ER clutch, *Int. J. of Modern Physics B*, 6, 15 & 16 (1992) : 2731—2747
- 18 Hartsock D L, Novak R F and Chaundy G J. ER fluid requirements for automotive devices, *J. of Rheology*, 35, 7 (1991) : 1305—1326
- 19 Brooks D A. Design and development of flow based ER devices, *Int. J. of Modern Physics B*, 6, 15 & 16 (1992) 2715—2730
- 20 杜善义, 冷劲松, 光纤智能化复合材料及其监控系统的研究, *力学进展*, 22, 4 (1992) : 496—501
- 21 Gry C. Passive tuneable fibers and matrices, *Int. J. of Modern Physics B*, 6, 15 & 16 (1992): 2763—2771

## ELECTRORHEOLOGICAL FLUIDS AND ELECTRORHEOLOGICAL EFFECTS

Zhu Ke-qin

University of Science and Technology of China, Hefei 230026

Tao Rongjia

Southern Illinois University at Carbondale, Illinois 62901, USA

**Abstract** Electrorheological (ER) fluid is a kind of new promising material. Usually, it consists of a suspension of fine dielectric particles in a non-conductive base liquid. Its mechanical characteristics change rapidly in the presence of an applied electric field. This phenomenon has potential applications in industries and technologies. In the present paper, the studies on ER fluids are reviewed including its physical mechanism, mechanical characteristics, materials technology, application and prospects.

**Keywords** *ER effect; viscoelasticity; Bingham model; yield stress; dielectric constant; dipole moment*