

上为数不多的几个实验室。我国国家超导实验室虽然开展这方面的工作较晚,但已取得不少成果。到目前为止,尽管可通过多种掺杂方式获得无限层结构超导体,但所得到的样品都不是由无限层结构单相组成。杂相的存在影响了一些基本物理性能的测量,如超导体中载流子类型的直接测定。虽然由价态分析、晶格常数变化以及制备工艺条件可以间接推断载流子类型,但到目前为止始终缺少直接的实验证据。霍尔系数、热电势的测量往往因杂相的干扰而得不到确定的结果。杂相的存在还妨碍了样品中超导相的确定。虽然无限层化合物的平均理想结构最简单,但实际样品中往往可以观察到无限层结构在  $a-b$  面或沿  $c$  方向存在调制结构,还存在与无限层结构相关的其他相,如  $\text{Sr}_{n-1}\text{Cu}_{n+1}\text{O}_{2n}^{[32]}$ 。这就使超导电性和显微结构之间的对应关系的判别发生困难。

因此,今后的工作除了进一步探索新的系列无限层结构超导体外,优化制备工艺以获得单相甚至单晶的无限层结构样品也是一个重要方面。由这样的样品获得的性能方面的数据,无疑会促进人们对高温超导电性机理的认识。

- [1] R. S. Roth et al., *J. Am. Ceram. Soc.*, **72** (1989), 1545.
- [2] T. Siegrist et al., *Nature* (London), **334**(1988), 231.
- [3] T. Kijima and A. Okazaki, *J. Solid State Chem.*, **102**(1993), 562.
- [4] X. J. Zhou et al., submitted to *J. Mat Sci.*
- [5] D. Vaknin et al., *Phys. Rev. B*, **39**(1989), 9122.
- [6] H. Matsuo, et al., *Physica C*, **196**(1992), 276.
- [7] M. Takano et al., *Physica C*, **159** (1989), 375.
- [8] M. G. Smith et al., *Nature* (London), **351** (1991), 549.
- [9] X. J. Zhou et al., *Chinese Science Bulletin*, **38-1** (1993), 24.
- [10] Y. S. Yao et al., *Physica C*, **210**(1993), 80.
- [11] J. Q. Li et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32-9** (1993), 3432.
- [12] X. J. Zhou et al., *Chinese Phys. Lett.*, **10** (1993), 503.
- [13] G. Er, et al., *Physica C*, **196** (1992), 275.
- [14] J. D. Jorgenson, et al., *Phys Rev. B* **47**(1993), 14654.
- [15] W. Korczak et al., *Physica C*, **193**(1992), 303.
- [16] X. J. Zhou et al., *Physica C*, **219** (1994), 123.
- [17] M. Takano et al., *Physica C*, **176** (1991), 441.
- [18] Z. Hiroi et al., *Physica C* **185-189**(1991), 523.
- [19] M. Azuma et al., *Nature* (London), **356** (1992), 775.
- [20] Z. Hiroi et al., *Physica C*, **202** (1993), 286.
- [21] S. Adachi, et al., *Physica C*, **212** (1993), 164.
- [22] Z. Hiroi et al., *Nature* (London), **364** (1993), 315.
- [23] P. Radaelli and J. D. Jorgenson, *Nature* (London), **364**(1993), 286.
- [24] K. Kobayashi, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **30** (1991), L1931.
- [25] I. Yazawa, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **4** (1990), L566.
- [26] N. Terada, et al., *Physica C*, **185-189** (1991), 2019.
- [27] X. M. Li *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31** (1992), L217.
- [28] H. Adachi, et al., *Physica C*, **196** (1992), 14.
- [29] B. R. Zhao et al., *Modern Phys. Lett.*, **7**(1993), 1585.
- [30] C. M. Niu and C. M. Lieber, *Appl. Phys. Lett.* **61**(1992), 1712.
- [31] X. M. Li et al., *Jpn. J. appl. Phys.*, **31**(1992), L934.
- [32] Z. Hiroi et al., *J. Solid State Chem.*, **95** (1991), 230.

## 电流变液的研究进展及应用前景

周鲁卫 叶聚丰

(复旦大学李政道物理学综合实验室、物理系, 上海 200433)

唐颐

(复旦大学化学系, 上海 200433)

电场致流变液体(电流变液)是一些高介电小颗粒和低介电油液的混合物,它在高电场作用下呈现液体与固体间的变换,变换时间为几毫秒,而且变换可逆。阐明了电流变液的原理,综述了电流变液在

机制、材料及应用等方面的研究现状,并介绍了电流变液在技术和工业上广泛的应用前景。

**关键词** 电流变液,悬浮液

### Abstract

Electrorheological (ER) fluids formed with small particles of high dielectric constant in fluids of low dielectric constant exhibit transitions between liquid and solid states upon applying high electric fields. The transition rate is of the order of milliseconds, and the transition is reversible. The novel properties of ER fluids make them attractive for many future technologies and applications in industry. The mechanism, types and various applications of ER fluids are reviewed.

**Key words** electrorheological (ER) fluids, suspension

## 一、什么是电流变液

电流变液是具有高介电常数的小颗粒和低介电常数油液的均匀悬浮状液体。当外加电场强度大大低于某个临界值(通常是几 kV/mm 左右,电流密度  $10^{-6}$ — $10^{-3}$  A/cm<sup>2</sup>),电流变液呈液态;大大高于这个临界值,就变成固态。两态之间转变的时间,可以达到毫秒的量级,而且这种转变是可逆的。在临界场附近,可以很有效地用外加电场来控制这种悬浮体的粘滞性。图 1(a) 左图表明当电场  $E$  大于临界场  $E_c$  时,两极板间的电流变液固化,而不会从两极板间落下。图 1(b) 是一种电流变液 FD-1 的屈服应力随电场变化的实验曲线。

早在 40 年代, Winslow<sup>[1]</sup> 就发现某些材料具有这种电致流变性质。在 Winslow 之前,人们曾经把电场施加在纯净液体或单相材料上,发现极化液体的粘滞性有所增加,而非极化液体的粘滞性没有增加。Winslow 使用了弥散相 (dispersed) 和驱散相 (dispersing) 材料的混合物,发现在高电场作用下这些材料的屈服应力可以变为高达几十 Pa。在传统的电流变液(如淀粉)中,水是不可缺少的成分,温度过高或者过低都会使这类电流变液的性能大大减弱,另外,水的腐蚀作用也很大,这些都限制了含水电流变液的应用。1986 年和 1988 年,英国的 Block 和 Kelly<sup>[2]</sup> 以及美国的 Filisco 和

物理

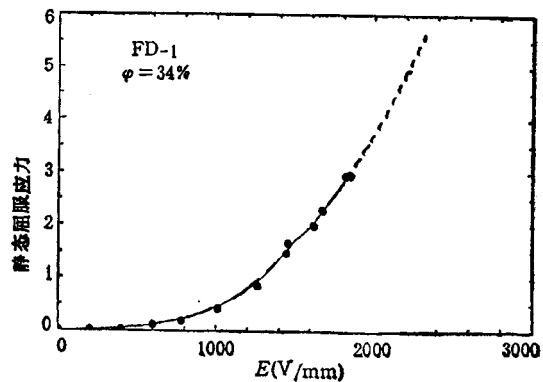
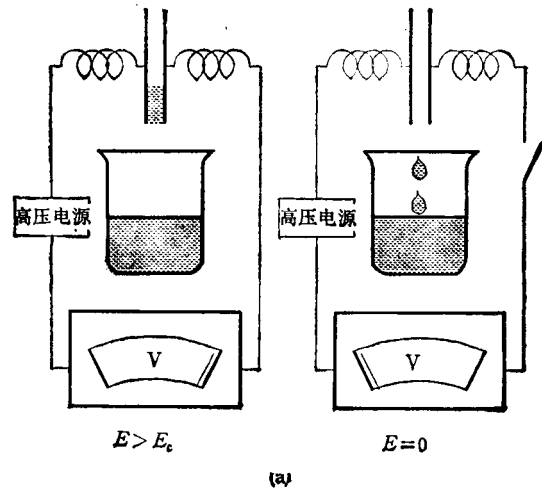


图 1

Armsyrong<sup>[3]</sup> 相继发现了“基本无水”和“基本上无吸附水”的电流变液,这大大提高了电流变液的应用范围。

无水电流变液的发现使这一研究领域重新

引起人们极大的兴趣。最近几年,在西方国家,尤其是美国、日本、英国和德国,大力开展了电流变液在电场感应下液态和固态间的相变研究。目前我国关于电流变液的研究也发展十分迅速。到1993年7月为止,国际上已经召开了四届由基础研究工作者和工业界搞应用开发的人员一起参加的电流变液研讨会。有人预料,这项研究将在近年内导致一场工业上的技术革命。

## 二、国内外研究现状

### 1. 机制研究

人们在理论和实验上对电流变液的形成机制进行了较为深入的研究,认为电流变液的本质就是电场导致的固体颗粒的极化。在外加电场作用下,电流变液体系中的固体颗粒获得感应偶极矩  $p = \alpha a^3 \epsilon_f E_{loc}$ , 其中  $a$  是颗粒半径,  $\alpha = (\epsilon_p - \epsilon_f) / (\epsilon_p + 2\epsilon_f)$  为介电错配参量,  $\epsilon_p, \epsilon_f$  分别是颗粒和液体的介电常数,  $E_{loc}$  是施加在颗粒上的局域有效场。

在电场下,两个偶极矩之间会产生相互作用。库仑相互作用和热运动之间的竞争决定了电流变液系统的状态。热能为  $3NkT/2$ , 其中  $T$  为温度,  $k$  为玻耳兹曼常数,  $N$  为颗粒总数。偶极矩相互作用可近似为

$$Np^2n/\epsilon_f = N\alpha^2 a^6 E_{loc}^2 n \epsilon_f.$$

低电场下热运动为主,系统为液态;当电场上升使得偶极矩相互作用克服了热运动,介电颗粒突然开始沿电场方向排列并在两个极板之间形成链状等结构。电流变液的本质就是电场导致的固化。由此而得的临界电场为

$$\sqrt{3kT/(2\alpha^2 n a^6 n \epsilon_f)}.$$

考虑了体系的自由能后,电流变液的临界电场为

$$E_c = \sqrt{8\pi kT(1-\varphi)^2/\alpha^2 V \varphi \epsilon_f}, \quad (1)$$

其中  $V = 4\pi a^3/3$  为单个固体颗粒体积,  $\varphi = nV$  为介电颗粒在电流变液体系中的体积比。当  $E > E_c$  时,电流变液体系呈固态;  $E < E_c$  时,体系为液态。关于  $E_c$  的实验结果同上式符

合得相当好。在电流变液的材料技术中很难使固体颗粒的比重和液体的比重相同,在应用中,为克服沉淀人们通常搅拌电流变液悬浮体或者强迫它流动。这时的固化就是偶极矩相互作用和动能之间竞争的结果,而临界电场也将大大提高(上式中的  $kT$  将用  $m\nu^2/3$  代替,其中  $\nu$  为固体颗粒的平均速度)。

当电场上升时,电流变液中固体颗粒首先在两极间排成“链”,随着电场进一步加强,链之间的相互作用又使链排成“柱”。柱体的宽度约为  $a(L/a)^{2/3}$ ,  $L$  是两电极之间的距离<sup>[4]</sup>。在样品上施加了几  $kV/mm$  的电场后,我们观察到悬浮颗粒有规则地排列起来,形成了有一定粗细并相隔一定距离的圆柱系列,从而由液相进入固相。人们以偶极矩相互作用取极小为出发点,进行理论计算,结果表明,如果固体颗粒是均匀的球状颗粒,那么电流变液固态的理想结构是体心四方(bct)<sup>[5]</sup>。实验时是用水化的高均匀玻璃微珠置于硅油中制成电流变液样品,然后把单模激光光束照射在“柱”上,观察衍射光斑<sup>[6]</sup>。理论计算和实验结果都证实 bct 的三个基矢为  $\sqrt{6}ax, \sqrt{6}ay, 2az$ , 电场沿  $z$  方向。

序参量被定义为

$$\rho_j = \sum_{i=1}^N \exp(ib_j r_i) \quad (j = 1, 2, 3)^{[7]}.$$

当电流变液体系为理想的体心四方结构时,这三个序参量都等于1;当介电颗粒无序分布,即电流变液体系处于液态时,  $\rho_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ) 都等于0。  $\rho_3$  表征  $z$  方向上链的形成,  $\rho_1$  和  $\rho_2$  则表征体系在  $x-y$  平面上的结构。蒙特卡罗计算机模拟运算中还发现,随着电场由零增加,电流变液先从液态变为液晶态,然后才转入固态。

根据链状结构模型,链中颗粒间的相互作用对提高电流变液的强度是至关重要的。Conrad等<sup>[8]</sup>计算了当颗粒间距  $R$  和颗粒半径  $a$  之比  $R/a \geq 2.05$  时,单链中相邻颗粒间的轴向作用力  $F_x$ 、切向作用力  $F_t$  和多链情况下的屈服应力  $\tau'_y$ , 这里

$$F_x = F_s \sin \theta,$$

$$\tau'_y = A_i N_s F_{i, \max}.$$

其中结构因子  $A$ , 随电流变液颗粒体积比  $\varphi$  和剪切率而变, 也因样品不同而不同; 单位面积链的数目  $N_s = 3\chi \varphi / 2\pi a^2$ ; 对于硅油和水化玻璃微珠形成的模型电流变液, 链中颗粒的比例  $\chi = \pi/4$  到  $\pi/6$ . 可以得到屈服应力

$$\tau_y' = 44.1 A_s \varphi \epsilon_0 \epsilon_f (\alpha E)^2 \times \{ \exp[(14.84 - 6.16R/a)\alpha^2] \} \times \sqrt{1/(R/a)^8 - 4/(R/a)^{10}} \Big|_{\max}, \quad (2)$$

式中  $\epsilon_0$  为真空介电常数. (2) 式表明屈服应力和外加电场强度的平方成正比. 当  $\epsilon_p/\epsilon_f = 15$  时, 单列链中颗粒之间的相互作用力最大. 从理论和实验上考虑, 若取  $\epsilon_f = 12.5$ ,  $\epsilon_p = 187.5$ ,  $\varphi = 0.5$ ,  $E = 5\text{kV/mm}$ ,  $R/a = 2.05$ ,  $A_s = 15$  时, 这种电流变液的屈服应力  $\tau_y'$  可以接近  $50\text{kPa}$ .

极化模型在本质上是电流变效应的线性模型, 自由电荷的存在、交流极化机制以及与时间有关的现象都无法包含在简化的极化模型中. 这一模型不能成功地预言电流变液的响应时间, 也不能描述电流变悬浮液的非欧姆响应<sup>[9]</sup>. 要使电流变液获得广泛应用, 就必须深入进行电流变液的机制研究.

## 2. 材料研究

材料研究中人们总结出电流变液的液体部分要求具有低介电常数, 如石油油料、矿物油、硅油、液氮等, 而固体颗粒部分则要求具有高介电常数, 不导电而且密度同液体部分匹配. 实际应用还要求电流变液材料性能稳定, 长期使用和储存时有良好的重复性; 在实际运转的剪切率范围内,  $1\text{kV/mm}$  的电场下屈服应力不小于  $1\text{kPa}$  量级; 电场通、断时的应力变化至少为  $100:1$ ; 漏电流小, 在电场为  $1\text{kV/mm}$  时, 电流密度不大于  $100\mu\text{A/cm}^2$ , 即其电阻率为  $100\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ , 电力消耗为  $1\text{W/cm}^3$ ; 对电场的响应快速 (达到  $\text{ms}$  量级); 工作温度为  $-40$  到  $200^\circ\text{C}$ ; 零电场下粘滞系数要低, 如对减震器的要求是  $25\text{mPa} \cdot \text{s}$ . 优良的电流变液还应无毒、耐火、不沉淀、耐磨、不腐蚀、价格低廉等. 为符合上述应用的条件, 必须测量动态剪切应力, 而不只是静态剪切应力, 防止在颗粒连锁的情况

下出现虚假的高剪切应力值.

固体颗粒材料的种类很多. 半导体高分子材料的比重容易调节得和液体相当, 材料具有优良的可塑性, 可制成尺寸随意的微球, 所得到的屈服应力也较大, 很有发展前途; 结晶或层状硅铝酸盐材料具有一定的电流变效应, 没有毒性, 价格低廉, 在我国含量丰富; 金属材料颗粒具有强烈的电流变性质, 为克服密度大的问题, 日本已研制成空心的金属微珠, 但是表面绝缘层仍然很容易被磨蚀; 制备比重适当而且耐磨蚀的金属膜微粒也是十分吸引人的; 铁电体的自发极化强度导致某些铁电体具有极强的电流变特性, 某些铁电体当颗粒体积百分比为  $40\%$  时, 在  $1\text{kV/mm}$  电场下的屈服应力为  $1.2\text{kPa}$ . 目前国际上电流变液的水平是在  $4\text{kV/mm}$  的场强下动态剪切应力为  $1-5\text{kPa}$ . 美国洛德公司向市场推出了三种电流变液, 在场强  $E=3\text{kV/mm}$  时的动态剪切应力分别为  $0.85-1.10\text{kPa}$ ,  $1.6-2.2\text{kPa}$  和  $3.00-3.50\text{kPa}$ . 在材料研究中人们还十分重视单相电流变液<sup>[10]</sup>, 比如弥散在溶剂中的液晶高分子电流变液的研究. 实验已经证实有的液晶电流变液在  $3\text{kV/mm}$  的电场强度下法向应力接近  $7\text{kPa}$ <sup>[11]</sup>. 正因为只有一个相, 所以不存在两相材料中难以避免的沉积问题; 又因为不含水, 所以一切与水有关的难题又不攻自破. 但目前液晶电流变液的液态向固态转变所需的时间太长, 液晶小分子是  $0.01-0.1\text{s}$ , 液晶高分子则可能长达几小时; 另外, 温度适用范围也较小.

寻找临界电场比较低, 在同一电场下屈服应力比较大而功耗小的电流变液是目前研究工作的一个热点. 这涉及到固体颗粒的合成与成型, 以及适当液体的选择. 为了提高材料的剪切力, 人们往往在油液中放入较多的固体颗粒, 但这会使零电场下的粘滞系数变得很大. 另外不少材料的漏电流还太大, 人们仍在寻求在高电场下不易被击穿且零电场屈服应力低于  $0.05\text{kPa}$  的电流变液. 硅、铝或其他相似元素的氧配位四面体或八面体可以构成层状或三维伸展的微孔骨架, 结晶硅铝酸盐就是由这种骨架和位

于层间或微孔内的电平衡阳离子构成的。对 Y 类、A 类和 M 类硅铝酸盐,在高电场的作用下,阳离子可以克服与骨架间的电作用力,沿电场方向移动。实验表明,这类硅铝酸盐油液有相当的电流变性。我们发现随交换的离子不同,在电场作用下,它的屈服应力和漏电流都按  $Ba < Mg \ll Na \approx K$  的顺序变化,与它们的电导顺序基本一致。因此,可以认为这类硅铝酸盐的电流变性主要来自阳离子的极化。但我们也发现,某些类型的硅铝酸盐也可能在电场中畸变,发生骨架极化。这类硅铝酸盐中阳离子数目很少,但它的屈服应力却相当大,而且随电场增加很快,漏电流也很小。这可能是由于这类材料的骨架容易变化,详细原因还在进一步研究。不少硅铝酸盐非常亲水,太多水分导致漏电流太大,需要进行各种改性,同时还需要从理论上深入了解该材料的有关结构特性。通常认为油液的选择关系不大,但是不少固体颗粒在一些油液中有较强的电流变效应,在另一些油液中却几乎不显示效应,弄清其原因是很有意义的,然而在这方面至今还没有一项工作能清楚地说明这一问题。

磁流变液(磁场致流变液体)以及电磁流变液(同时受外加电场和磁场作用的流变液)也受到人们很大的重视。美国洛德公司研制成功的磁流变液在 3000Oe 的磁场强度下动态剪切应力为 93kPa,工作温度区间为 -40—150℃。

### 三、电流变液的应用

由于电流变液已显示出十分重大的应用前景,因此立即受到一些西方国家国防部门和工业部门的重视,投入了大笔的经费,使这项研究通过最近多年的努力已接近商品应用的阶段。美国“联邦科学、工程和技术协调会”于 1992 年向美国国会提交的报告中,电流变液被列为一个重要的领域。美国能源部曾延聘一家独立公司,评估电流变液的应用前景,研究应在多大强度上对这一领域进行投资。结果,根据这一公司的调查,美国能源部于 1993 年 5 月发表了一

项对电流变液研究需求进行评估的最终报告。该报告称“电流变液将使工业和技术的若干部门出现革命化的变革”,这些部门包括:(1)自动化设备工业(生产的设备包括液体阀门、离合器、制动器、控制设备、伺服机械、螺旋管、碾磨机、计算机控制力矩测试系统、阻尼系统等);(2)通用及专用机械工业(如建筑机械、农场机械、油田机械等);(3)油压工业(如液压油缸、液压活塞、液压提升、阀门、闭环控制系统等);(4)交通工业(如航天航空、力矩转换器、液体阀门、离合器、发动机底座避震器、变速器、无级变速器、油压动力方向盘系统、撞击吸收器、电子控制悬置系统、耦合、制动系统等)。

电流变液的应用范围可以分为两大类:一类是液体阀门;另一类是离合器。动态剪切应力为 5—6kPa 的电流变液对于液体阀门和轻型辅助离合器一类的应用已经足够;而对于有市场前景广阔、需求量大的强力矩离合器的应用,则需要动态剪切应力高达 20kPa 的电流变液。

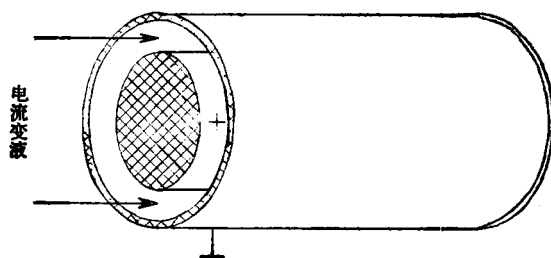


图 2 电流变液阀门  
(中间深色是正电极,外层是接地电极)

人们测试了多种电流变液阀门,其中平板阀的零电场压力降比较小,而同心圆筒阀在高电场下的压力降十分明显。图 2 为同心圆筒阀的示意图。无电场时,电流变液可以从作为正电极的内圆筒和作为接地电极的同心外圆筒之间的夹层通过;高电场下,两圆筒间的流体固化,电流变液不能通过。

美国施乐公司以前制造的复印机,以及美国波音公司使用的飞机自动喷漆设备就应用了电流变液阀门。在复印机中,把墨水制成电流

变液,由原图得到信号,信号控制电压,改变墨水的粘滞程度,即控制流出量而制出复印图。在自动喷漆设备中,喷漆被制成电流变液,由小型图稿得到数字化信号,信号控制电压,改变不同颜色喷漆的粘滞程度,从而自动获得大面积的彩色喷漆图案。

电流变液阀门可以制成减振装置。活塞缸和阀门形成回路。在高电场下,流体无法通过阀门,活塞就受到很大的压力;反之,在低电场下,活塞就能很轻易地向下运动。计算机可以自动选取最佳电压,控制阀门的关闭程度,把车辆、电机底座等处的振动尽快地吸收掉。美国的联邦铁路局目前正在启动全国磁悬浮列车的研究计划,用于列车避震的电流变液已经列入该计划的材料开发研究中。美国、日本还特别注重在汽车上使用电流变液,有的汽车公司已把电流变液避振器装在轿车上进行试验。汽车振动剧烈时,现在驾驶员一般是通过加速或减速,使振动频率偏离汽车的自然频率(共振频率)来克服汽车的振动。而主动式的电流变液减振器则是反其道而行之,即通过改变电流变液的粘滞系数而改变汽车悬架系统的共振频率,达到克服汽车剧烈振动的目的。这类减振器没有运动部件,流动液体体积很少,声音也很轻。有人还提出,在高层建筑或者核反应堆的地基中放置这类电流变液减振装置阵列,在狂风中使电流变液固化,增强建筑物的抗风能力,地震时使电流变液液化,让建筑物浮在上面,以获得最好的抗地震效果。

做成桥路的四单元或二单元的电流变液阀门网络系统,可以控制机器人手臂或飞行控制面伺服机构。在四单元的情况下,液体由油泵强迫流通,两个独立的电压源及相应的反馈回路控制两对电流变液阀门的关闭或开启,指导手臂中的活塞向上或向下运动,从而牵拉机器人的手臂。这种伺服机构可以广泛用于航天器、飞机、舰艇、潜艇、核反应控制系统和其他任何需要高性能伺服机构的通用工业场合。在通常的液压飞行面控制系统中,伺服机构耗资巨大,质量又大,且不可靠。伺服机构如采用电流变

物理

液系统,则具有以下优点:它易于制造,结构简单,装配容易,故价格降低;由于液体较少,阀体轻便,总体质量大大减少;由于它对自身的污染不敏感,设计简单,又无运动部件,所以极为可靠;它的动作频率可以高达 1000Hz,而现有机构仅达 50Hz。在电流变液阀门方面,同心圆柱阀在 2.5kV/mm 高场下的压力降可以达到 9bar。这种阀门系统制成了飞行控制面伺服机构,这一机构的推力可达 400N。

电流变液阀门还能在造纸机、印刷机、汽轮机、飞机叶轮等等旋转机械的平衡过程中大显身手,使得平衡机械变得轻便、便宜,而且平衡精确,更重要的是平衡时不必停机。电流变液阀门还可用于输油管道中控制油液的流量和流向。

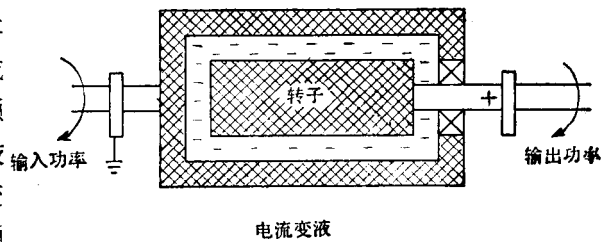


图3 电极为同心圆柱形的电流变液离合器示意图  
在内外电极之间的夹层中施加电场后,电流变液固化,离合器处于“合”的状态;反之,离合器处于“离”的状态

电流变液另一类应用是制成用电压控制离合程度的离合器。电流变液离合器离合程度无级可调,而且容易用计算机加以控制,实验表明它相当可靠,性能优于磁性器件。在电极结构上,一种是圆片形的,另一种是同心圆柱形的。电流变液就置于作为电极的两圆片或两圆柱之间。一般以同心圆柱形电极结构的性能比较好,当然也可制成多重圆片型或多重同心圆柱型,以提高离合器的效率,如图3所示。离合器中使用的电流变液要求在 4000V/mm 电场下的屈服应力为 40kPa,而零电场下的粘滞系数为 5mPa·s。此外,还要求剪切力不能随剪切率上升而下降很多,并且必须在转速为 3000 转/min 的情况下仍然有良好的离合性能。国外的汽车制造商提出了许多当电流变液用于汽车离合器

时要受到的限制,其中包括最高允许电压、叶片厚度、极板间隙、离合器外半径以及允许的叶片表面数等。

电流变液设备具有许多传统机械无法比拟的优点:主要是它可以提高计算机控制能力;响应速度可以大大提高;控制速度范围宽;阻尼设备可精确调节;在某些设备中可以减少甚至取消运动部件;可以减少重量,提高能耗效率;增加燃油经济性。

在大型光学透镜和超薄壳型工件的加工上需要使用特殊的夹具,剪切应力巨大的磁流变液已在这类工件的夹具上显示出常规夹具无法比拟的优点。

许多国家在进行基础理论研究和应用基础研究的同时都在加紧应用研究。上述应用都有了长足的发展。在我国,这项研究虽然在前几年已经起步,但至今还没有得到广泛地开展。我

们应立即组织队伍,力争尽早赶上国际上这一具有十分重要应用前途的领域。

- [1] W. M. Winslow, *J. Appl. Phys.*, **20** (1949) 1137.
- [2] H. Block and J. P. Kelly, GB Patent 2170510 (1986); US Patent 4687589 (1987).
- [3] F. E. Filisco and W. F. Armsyrong, US Patent 4744914 (1988).
- [4] T. C. Kalsey and W. Toor, *Phys. Rev. Lett.*, **65** (1990), 2820.
- [5] R. Tao and J. M. Sun, *Phys. Rev. Lett.*, **67** (1991), 398.
- [6] Tian-jie Chen, R. N. Zitter, and R. Tao, *Phys. Rev. Lett.*, **68** (1992), 2555.
- [7] R. Tao, *Int. J. Mod. Phys. B*, **6** (1992), 2635.
- [8] H. Conrad, Y. Chen and A. F. Sprecher, *Int. J. Mod. Phys. B*, **6** (1992), 2575.
- [9] C. F. Zukoski, *Electrorheological (ER) Fluids, A Research Needs Assessment, Final Report*, U. S. Department of Energy, (1993), p.5.3-1.
- [10] Wissbrum, 同[9], p. 5. 10-1.
- [11] I. K. Yang and A. D. Shine, *J. Rheology*, **36** (1992), 1079.

## 新型 THz 电磁脉冲源及其应用

张希成<sup>1)</sup> 金亚红

(美国 Rensselaer 综合技术学院物理系)

介绍了一种新型 THz 辐射源和它在电子学与光电子学方面的应用。THz 脉冲电磁辐射已成为研究电子学、准光学和光电子学的有力工具。该技术可用于研究物理学、电子工程、化学以及生物学等领域中的瞬态现象。

**关键词** THz 辐射,超快脉冲,瞬态现象

### Abstract

We present new THz sources and their current applications in electronics and optoelectronics. THz pulsed electromagnetic radiation has become a powerful tool for the study of electronic, quasi-optic, and optoelectronic properties. It is expected to be ideal for the study of transient phenomena in physics, electrical engineering, chemistry, and biology.

**Key words** THz radiation, ultra-fast pulse, transient phenomena

THz 电磁脉冲在自由空间的辐射和传播是超快电子学、光子学和光电子学领域中一个迅速发展的分支学科。80 年代初期,随着皮秒、

飞秒激光源的迅速发展,几种不同的产生宽带

1) 中国科学院半导体研究所客座教授。