

电流变效应及其应用前景

鄢红春 李定国 周骏 康颖

在英国设菲尔德市举行的第五届国际电流变液研讨会上,美国 Lubrizol 公司的代表播放了一段录像,录像显示:在美国福特汽车公司的试验场上,装备普通减振器的轿车开进一个大坑时,车体下沉和上抬很厉害.而装备有被人们誉为“灵巧液体”的减振器的轿车,经过同一大坑时,车体下沉和上抬大大减少,车身只是稍稍起伏,车子就开过去了.试验还表明:在试验场的正弦型特制的道路上,普通轿车的速度超过 56Km/h 时,车子颠簸不已,无法继续行驶.

而装备有“灵巧液体”的减振器的轿车却行驶平稳,可以开到 96Km/h.据说,到 Lubrizol 公司去的人可以坐一坐这种车子,亲身体会一下.

那么,这种“灵巧液体”究竟是什么?为什么它有如此神奇的作用呢?

1. 电流变液及其电流变效应

“灵巧液体”是电流变液 (Electrorheological fluid, 以下简称 ERF) 的一种别称 (有时也称机敏流体). 电流变液是一种新颖的智能材料. 它是这样一类液体的总称: 在外加电场的作用下, 液体的粘性随电场的增强而明显增大; 当电场强度达到某一临界值时, 它会迅速由液体变为固体. 固化过程在瞬时即可完成, 所需时间为毫秒量级. 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体变为液体. 后来人们发现, 这种体系在外电场的作用下不只是粘度发生突变, 体系的其他流变学特性如屈服应力 (电流变液在电场作用下固化后可像固体材料那样承受机械力, 屈服应力为使其发

生破坏的应力大小) 等也会随着电场的增强而明显增大. 后来, 人们把这种可逆的表观粘度及屈服应力等流变学特性突变效应称为电流变效应 (ER 效应) 或 Winslow 效应. 图 1(a) 表明, 当电场强度 E 大于临界值 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 的屈服应力随电场强度变化的实验曲线.

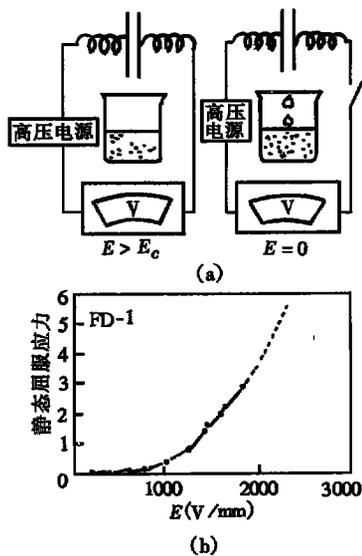


图 1

人们为什么把电流变效应称为 Winslow 效应呢? 这还得从 ERF 的研究历史谈起.

ERF 的研究起源于 19 世纪末期人们对电粘效应 (electroviscous effect) 的探索. 而由电粘效应所引起的粘度增大一般在 2 倍之内, 它与电流变效应所引起的粘度突变有本质区别. 1949 年美国科学家 Winslow 系统地报道了他用 8 年时间研究的某些悬浮体在电场作用下粘度

增大的实验结果,并申请了专利。他在低粘不导电的液体(如硅油等)中加入定量的固体颗粒(如淀粉等)制成悬浮体,当施加一定的电场(如4kv/mm)时,其表观粘度可增加几个数量级,出现明显的固化现象,且响应时间极短(毫秒量级)。当去掉电场后,体系又迅速恢复到原来的液态。一般认为,Winslow这一工作标志着ERF研究的开始。所以,ER效应又称Winslow效应。

但是,早期的ERF配方中,所加水基表面活性剂常含有水分,从而导致运行温度范围过窄,出现局部ER效应消失,过早发生电击穿,以及对容器有一定的腐蚀性问题。此外,早期的ERF容易发生沉淀,ER效应较弱,综合性能指标低等问题,难以满足实际应用的要求,因此,极大地限制了电流变技术的应用。

1985年英国人Block首先研制成功了有机半导体非水型ERF,它克服了含水型ERF的不足,提高了综合性能指标,使之接近实用水平。这一发现使得ERF的研究重新引起了人们极大的兴趣。近十多年来,人们在ERF的材料、性能、机制及应用研究等方面都取得了相当的进展。ERF日益显示出广阔的应用前景。

2. ERF的组成及影响ER效应的主要因素

ERF一般是由微米量级的固体颗粒(分散相)和不导电的液体(连续相)组成。分散相粒子常用的有半导体高分子材料、结晶或层状硅铝酸盐、无机化合物、金属及铁电体等。连续相是一些绝缘的油类物质,常用的有硅油、矿物油及石油油料等。ERF中除了连续相和分散相以外,一些体系中添加剂也是不可少的,含水体系中的水实际就是一种添加剂。

最近,日本Asahi化工公司研制出一种单相新型高分子液晶ERF材料。因为这种材料只有一个相,故不存在普通ERF中难以避免的颗粒沉降的问题;又因为不含水,所以一切与水有关的问题不攻自破。英国Hull大学研制的液晶,还改善了以往剪切应力较低的问题。实验测得20℃,剪切率为 1000s^{-1} ,电场是4kv/mm时,剪切力达12kPa,这一结果引人注目。因

此,液晶的ERF材料是值得人们研究的。

通常,ERF的响应时间很短,但其剪切应力较低;而与ERF类似的磁流变液(EMRF)的剪切应力比ERF大一个数量级,但响应时间长,故复合的电-磁流变液受到人们的关注。白俄罗斯传热传质研究所的Kordonski在实验中发现,对电-磁流变液同时加电场和磁场比单独加电场或磁场的效果的总和来得好。日本山形大学的K. Koyama比较细致地研究了这种增效效应。他发现当电场和磁场方向相同时,增效效应最强;当电场和磁场方向垂直时,颗粒形成网络结构,但对剪切力的值的增长却无多大帮助。另外,磁场极化漂浮的磁粒子被认为可减少液体的沉淀问题。因此,复合的电-磁流变液是一种很有发展前途的新ER材料。

影响ER效应的因素很多,有些已经清楚,有些还需进一步研究。对于由固体颗粒分散在非极性液体中制成的ERF来说,影响其效应的主要因素有:颗粒的形状和大小、颗粒的电导和介电性质、悬浮体的浓度和温度、外电场的大小和频率、水分及油类介质的性质等。

从材料角度来看,性能优良的ERF应该具有以下特点:导电性低、消耗功率小和介电击穿电压高,工作温度范围宽,性能稳定、不沉降;开/关特性好,响应时间快,不通电,粘度尽量小。

3. 电流变效应的机理

自从在实验中发现ER效应以来,人们从理论和实验上对ER效应的机理进行了大量深入的研究,提出了若干个物理和力学模型。但由于电流变现象的复杂性和多学科性,这些模型都有其局限性。要对复杂的电流变现象作出令人满意的解释还有许多工作要做。在人们所提出的若干模型中,偶极子极化模型最具代表性。下面简述之。

人们在实验中发现,当不加电场时,ERF中颗粒的运动之间没有关系。当液体在电场作用下变成固态时,微粒联结成肉眼可见的“细链”和“粗柱”,如图2所示。这是ERF的典型特征之一。基于此,人们提出了偶极子极化模型,认为ERF的本质是电场导致的固体颗粒的极

化。当外电场不存在时,由于颗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。在施加电场后,粒子表面出现极化电荷,形成电偶极子,电偶极子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ERF的物态。低电场下,热运动为主,系统为液态;当电场上升使得偶极子间相互作用克服了热运动,介电颗粒便开始沿电场方向排列,并在两极板间形成链状结构。随着电场进一步加强,链之间的相互作用又使“链”排成了“柱”。链中颗粒间的相互作用是ERF在电场中粘性增加并产生屈服应力的重要原因。

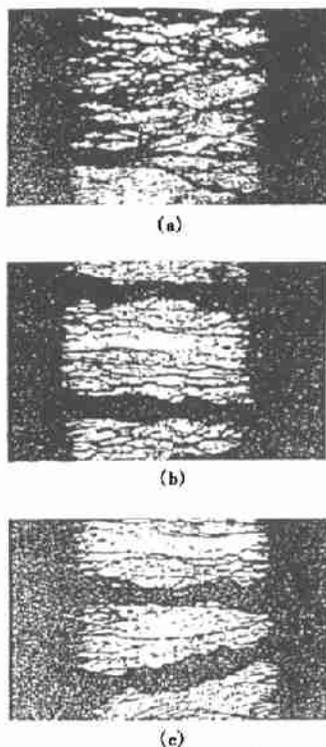


图2 微粒联结成的“细链”和“粗柱”

人们还从偶极子相互作用取极小出发,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,ERF固态的理想结构是体心四方。如图3所示。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。

应当指出的是,偶极子极化模型本质是ER

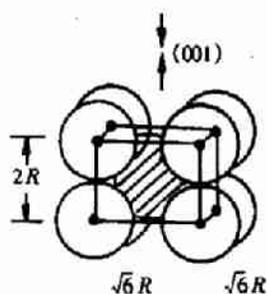


图3 电流变液的体心四方结构

要的。

4. 令人振奋的应用前景

ERF的特点是:在无电场时,基本是牛顿流体。当电场强度增大到一定数值时,ERF迅速由液态向固态转变。这种转变连续、可逆、易于控制。ERF所呈现的这些特点在许多领域有着广阔的应用前景,令人振奋。有专家认为,若能使目前ERF的综合指标再上一个台阶,必将使若干工业和技术部门出现革命性的变革。目前,ERF的应用发展很快,范围在逐渐扩大。下面介绍国内外ER技术工程应用的若干进展及发展前景。

(1) 电流变减振器

电流变减振器是目前有较好实验结果的ER装置。美国福特公司已有ER减振器出售。图4是两种基本类型的ER减振器的示意图:滑动平板型和固定电极阀型。在滑动平板型减振器中,来源于两滑动板间流体的ER效应的阻力产生剪切力,并由此引起压力增大。在同心圆筒固

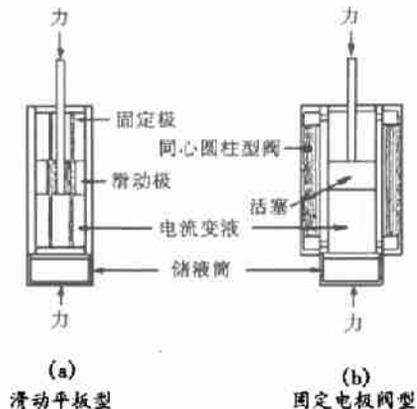


图4 两种基本类型的减振器

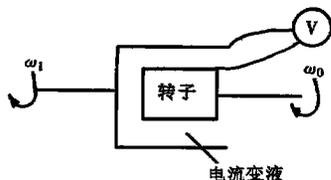
定电极阀型减振器中,来源于 ER 效应的阻力阻止了流体在同心圆筒中的流动,当活塞运动时,微机即可调节电极电压以改变流体的粘度,随后流体变稀薄而迅速复原。可见,一种减振器就能适用于各种车辆和各种工作环境的需要。

美国 Lubrizol 公司已制造出半主动型电流变汽车悬挂系统,并已经在福特公司的汽车上进行了道路试验。如本文开头所述。这种 ER 减振器设计前轮最大减振力为 3KN,其最大功耗为 20W。

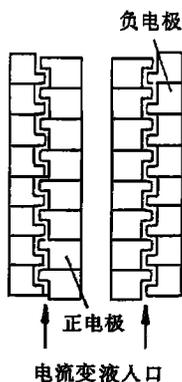
此外,在美国制定的磁悬浮列车研究计划中,已把用于列车减震的 ERF 列入该计划的材料开发中。美国内达华大学正在研究如何在桥梁及高速公路支架下安装 ER 减振器,以减少地震带来的损失。还有人提出,在高层建筑或核反应堆的基地中放置这类 ER 减振装置阵列,在狂风中使 ERF 固化,增强建筑物的抗风能力。地震时使 ERF 液化,建筑物浮在上面,以获得最好的抗震效果。

(2) 电流变离合器

电流变离合器的原理是:ERF 位于有相对运动的机械部件之间,通过控制电压,改变 ERF 的粘度,从而控制机械部件传递力或力矩的大小。图 5 是用 ER 效应设计的汽车传动离合器机构示意图。汽车引擎与转子联接,车轮与圆筒联接,转子与圆筒之间充满 ERF。当电场不存在时,ERF 呈液态,汽车引擎驱动转子旋转而不传递任何可以觉察的力矩。当向液体施加一定的电场时,ERF 变稠(或固化),从而将转矩传递给圆筒,随后驱动车轮。这种新型的离合器与传统离合器相比,其主要优点是结构简单、机械磨损小、噪声低、响应快、无级可调、无传统的齿轮传动系统。



(3) 电流变阀门



电流变阀门的原理是:ERF 在静止的管道中流动,用电压改变流体的粘度,从而实现控制流动速度的目的。目前,ER 阀门有多种设计。图 6 是一种 ER 阀门的示意图。无电场时,ERF 可以从锯齿型狭缝之间的通道中通过;高电场下,通道中的流体固化,ERF 不能通过,起到开关的作用。

美国施乐公司制造的一种复印机和美国波音公司的飞机自动喷漆设备中均应用了 ER 阀门。在复印机中,把墨水制成 ERF,用由复印原图得到的信号控制电压,改变墨水的粘度,即控制流出量而制出复印图。在自动喷漆设备中,把喷漆制成 ERF,由小型模型图得到数字化信号控制电压,来改变不同颜色喷漆的粘度而自动获得大面积彩色喷漆图案。在石油传输方面,ER 阀门可用于输油管道中控制油液的流量和流向。

最近,德国 Bayer 公司研制出了一种电流变制动器,在这种制动器中,只使用了 1 套 ER 阀门及高压系统,而不像以往使用 2 套或 4 套 ER 阀门及高压系统。

ER 阀门还能应用于汽车车轮、汽轮机、飞机叶轮等旋转机械的平衡中,使得平衡机械变得轻便、便宜、而且平衡精确。更重要的是平衡不必停机。

一般 ERF 所达到的屈服应力是 5-10kPa。对于像发动机支座和减振器(一般要求 5-6kPa)已经能满足要求,而像大扭矩的离合器(一般要求 20kPa)ER 材料的屈服应力过低,还不能满足。

(4) 电流变工件夹具及油墨

白俄罗斯的 Korobko 研制出了 ER 工作夹具,他们使用的 ERF 是由加了添加物硅藻土和变压器油组成。这是一种水激活材料,在室温下使用水的含量不会改变。一般磨床的工件是铁磁性的,对非铁磁材料有时可用真空吸住工

件,但对表面高低不平的或有孔洞的工作,真空法就不适用。但任何情况下都可方便使用 ER 夹具。另外,他们还研制出了具有 ER 效应的油墨。在施加电场时,这种油墨液滴落于电极之间会聚成球体而不摊平,待液滴干燥后撤去电场,即可获得永久性球形油墨。使用 ER 油墨有利于印刷出线条精美的图象、文字等。

(5) 电流变光纤智能化复合材料

电流变液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。以它制成光纤智能化监控系统既可以通过光纤传感器实时监测,又可以通过 ER 效应按需要适当调整材料的性能,作出主动响应以适应外界环境变化的需要。

(6) 电流变复合梁

ER 复合梁是把 ERF 夹在结构的两夹层之间,通过控制电压,调节 ERF 的粘度,使其在瞬间改变结构的刚度和阻尼的大小,以达到减振的目的。据报道,这种梁的自然频率可以变化 25%,而阻尼比可以变化 45%。

(7) 低温电流变流体与火箭燃料

一种高能燃料是把铝粉放在液态氧中制成的悬浮液。铝粉外层自然形成的氧化膜使铝粉不会在电场中短路。由于铝的介电常数大,液态氧的介电常数小,二者相差极大,故其 ER 效应较强。由于这种燃料可通过计算机迅速精确地控制流动,不需要机械传动部分,因而对于低温的应用具有特殊的魅力。它的另一诱人之处就是利用 ER 材料固态与液态变化的可逆性,在运输时使其固化,而在燃烧时再把它变成液体。并可利用控制电压大小有效地控制燃料的粘度,这无疑给火箭燃料的发展带来新的突破点。另外,为了避免氧可能引起的燃烧事故,还可以用液态氧代替。这方面工作虽然还处于定性描述阶段,但低温 ER 流体的应用将是有前途的。

(8) 电流变隔声材料

美国海军一研究部门(NSWC)基于 ER 技术,已成功地研制出一种轻型的多孔吸声材料。这种材料可应用于核潜艇的吸附式保护层以抵抗声纳的搜索,还可应用于汽车、舰船、飞机上

的隔音等。

(9) 电流变触觉屏

目前,随着个人电脑和 CD-ROM 数据图书馆的发展,有大量消息存入磁盘、光盘中。而盲人无法接触这些消息。NASA 报告的 ER 触觉屏装置使触觉输出系统又翻开了新的一页。这种装置利用 ER 效应,在电场作用下使 ERF 固化,在装置外屏上形成盲人可以触及的点、线,从而使盲人可以靠触觉辨字。该 ER 触觉屏的主要优点是可以使用印刷电子技术,结构简单和造价低。

(10) 电流变虚拟现实手套

虚拟现实是一种较新的高技术,但目前缺少补充的触觉、动觉反馈系统数据。用 ER 技术实现虚拟环境的表面反馈目前正在研制中。它是通过 ERF 改变结构的刚度,以达到虚拟环境中实现触觉反馈。为了方便更灵活地得到触觉反馈,把 ER 装置做成手套,可以灵活地跟随手运动。这种技术的应用有较大的市场,如训练模拟、制造工序及娱乐活动等。

(11) 电流变可控光学器件

西北工业大学赵晓鹏等研究了 ERF 和 EMRF 的光学特性。他们发现,ERF 透光率随电场和悬浮液的浓度而改变。他们还观察到 ERF 散射谱是由明暗相间的带组成,EMRF 的散射谱也被观察到。这些现象为设计可控光学器件提供了新的设想。

(12) 电流变技术的其他应用

ER 技术在生物医学工程方面、润滑、抽丝、高压电源和流体密封等领域也有广泛的应用前景。

ERF 经过人们 50 多年不懈的探索和研究,在材料的性能、机理及应用等方面都取得了长足的进展,ER 技术正开始向诸多领域渗透,已显示出十分广阔的应用前景。然而 ERF 的研究和技术开发还没有进入到完全成熟的阶段,从基础理论到应用技术还有许多问题有待解决。可以预期,随着电流变液材料综合性能的进一步提高,ERF 这一高新技术必将得到更加广泛的应用。