

## 奇异的电磁流变液体

王振东

(天津大学力学系, 天津 300072)

**摘要** 介绍电流变液体、磁流变液体的奇异性能, 展望它们的应用前景。

**关键词** 电流变液体, 磁流变液体, 智能性材料

“T-1000型终结者”是在电影“终结者之二: 世界末日(Terminator 2: Judgment Day)”里出现的机器人, 它几乎是不可摧毁的, 能够毫不费力地使液态和固态相互转换。它的液态金属皮肤, 如果被子弹射穿, 就能马上使弹孔融合; 如果被打成碎片, 也能马上熔化并再凝结恢复原样。电或磁流变液体为影片制作者的这一科学幻想, 提供了实现的可能。本文介绍可能实现这种科学幻想的智能性材料——电流变液体和磁流变液体。它们是一种在电场或磁场里可发生状态变化的物质, 视所受场强的不同, 可像水一样流动, 也可像蜂蜜那样粘稠, 还可以像骨胶一样固化。而这种物质从一种状态转变成另一种状态, 所需时间又很短。

### 1 磁流变制动器的小实验

图1为简单的磁流变制动器的示意图。实验用的磁流变液体(Magnetorheological Fluids, 以下简称MRF), 由铁屑和玉米油组成。铁屑用放大镜应能鉴别出单个颗粒, 但其长度应全部小于0.5 mm。MRF由按重量计的25份玉米油对100份铁屑搅拌混合而成。杆由不可能被磁化的材料做成, 如塑料或铝。为更好

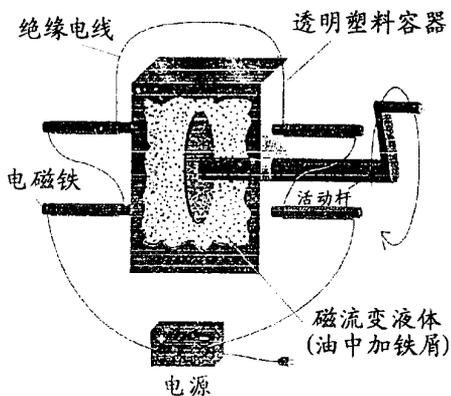


图1 磁流变制动器示意图

地观察实验结果, 可用一塑料盘与位于MRF中的杆端相连接。杆与透明塑料容器间放橡皮环, 以使液体不泄漏。电磁铁可用几伏特的电源供电。也可以用强有力的永久磁铁来取代电磁铁。

在未施加磁场之前, 杆的旋转几乎没有阻力; 当磁场加上时, 液体马上就固化了, 杆已很难转动; 一旦去除磁场, 容器内的MRF材料又立即液化, 杆又可自由旋转了。这就是花钱虽不多, 却能在几秒钟之内将液体固化, 然后又将其液化的磁流变制动器的小实验。

### 2 电流变液体及其性能

美国科学家W. M. Winslow在1947年以专利形式公布了他用8年时间研究发现的电流变液体(Electrorheological Fluids, 以下简称ERF)。他将一些半导体型的固体颗粒分散在低粘、绝缘性良好的油中, 再添加一些分散剂制得悬浮体, 当加上一定的电场场强时, 很薄一层ERF的表观粘度就能增大几个数量级, 甚至出现明显的固化现象。当去掉电场后, 液体的表观粘度又迅速恢复原样。后来人们将这种可逆的粘度突变效应称为电流变效应或Winslow效应。

人们对ERF的重视, 是在80年代之后。这主要是逐渐看到了ERF有许多可供发展技术和工程应用的奇异性能。这些可被利用的主要特性是:

(1) 在电场作用下, 液体的表观粘度或剪切应力能有明显的突变, 可在毫秒瞬间产生相当于从液态属性到固态属性间发生变化。

(2) 这种变化是可逆的, 即一旦去掉电场, 可恢复到原来的液态。

(3) 这种变化是连续和无极的, 即在液-固、固-液的变化过程中, 表观粘度或剪切应力是无级连续变化的。

(4) 这种变化是可控制的, 并且控制变化的方法简单, 只需加一个电场, 所需的控制能耗也很低。因此运用微机进行自动控制有广阔的前途。

由以上奇异的特性, 人们将ERF称为“智能性材

料”,也有人称它为“聪明流体”。

今天的电流变液体已不再是 40 年代时那种较简单的混合体。除了介电常数和粘度较低的基液、极化特性很高的固体微粒两种关键成份之外,往往还含有活化剂和分散剂。分散剂的作用,是防止微粒在无电场时相互粘合。活化剂的作用机制还不清楚。活化剂(往往使用水,有时用酒精)里含有杂质,通常是溶解盐。一般认为水受油质悬浮液排斥而聚集在微粒表面,而溶解盐在电场作用下被极化,其电荷增强了微粒的固有极化。

电流变液体是有复杂性质的悬浮体系,是一种既典型又复杂的非牛顿流体。

1987 年以前,ERF 的研究只在英、美和前苏联等少数国家保密进行,目前世界上已有英、美、日、德、法、俄和中国等十多个国家都在进行研究。对电流变现象的机理已了解得越来越清楚,在 ERF 材料的选择上也有长足的进展,对其工程应用,已提出许多诱人的设想。

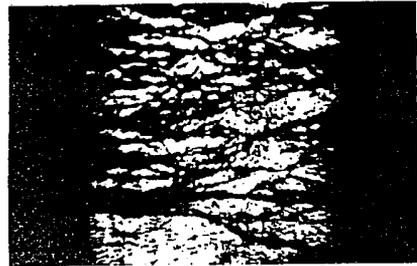
### 3 电流变现象的机理

电流变现象引起科学家们的极大兴趣,不只是因为 ERF 这种材料具有实用的物理性能,而且还因其有错综复杂的结构。当流体自由流动时,ERF 中微粒的运动相互之间没有关系,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状(图 2)。

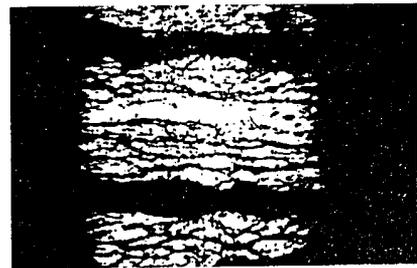
微粒在电场的作用下,不论其运动方向如何,其两极或上或下始终指向电极,从而使微粒吸合在一起,首尾相连,排列成行,构成长链。这种情况就好像铁屑在电磁铁或条形磁铁形成的磁场内沿磁力线的排列一样。电流变液体内的微粒链迅速形成,并在容器内从一端延伸至另一端,这是流体迅速固化的关键因素。

在试验中发现柱状体的形成要比预期的快,这与微粒的布朗运动有关。布朗运动是 1827 年由苏格兰植物学家 R. 布朗首先发现的液体内悬浮微粒不停顿的随机运动,其成因是微粒和大量液体分子之间的碰撞。在 ERF 中,悬浮微粒在受到液体分子从各方向的冲撞时,就围绕其在链中的平均位置作不规则运动。因此尽管微粒链总的来说可能是直线,但在某一时刻却因布朗运动的影响而发生弯曲。这种轻微变形却增强了各链间的相互吸引力,并促使各链聚集成柱状体。

ERF 在电场作用下固化后可承受机械力。像别的固体材料那样,其发生破坏的应力大小称为屈服应力,此时微粒链断裂,材料开始流动。为了某种工程



(a)



(b)



(c)

图 2 微粒联成细链和粗柱状的照片

应用,希望屈服应力尽可能大些。但在研究过程中,人们还不满意现有 ERF 的屈服应力不够高,近几年已开始研究屈服应力更高的磁流变液体(MRF)。流变学是研究材料流动与变形的学科,深入地研究这些问题正是流变学的研究范围。

### 4 令人振奋的应用前景

电或磁流变液体的应用前景是十分令人振奋的,已见到申请专利的元器件有离合器、液压阀、减振器等。下面就其原理作简单的介绍。

#### 4.1 电流变离合器

可以想象制造一种电流变离合器(图 3)。可将电流变液体充在两个圆筒或平板间,当 ERF 形成固态时,就迫使传动轴转动;而变成液态时,就使发动机脱离传动轴而自由旋转,好象处于空档一样,两个筒或板之间的转速比也可以调节。这样的离合器几乎不

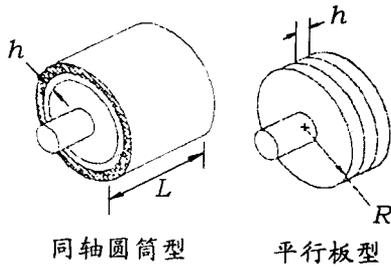


图3 同心圆筒型和平板型的离合器示意图

存在零件磨损或损坏的问题,而且结构简单,噪音低,反应时间仅千分之几秒,使纯机械的离合器望尘莫及。

#### 4.2 电流变减振器

图4是两种电流变振动吸收装置的示意图:滑动平板型和固定电极阀型。在同心圆筒固定电极阀式减振器中,来源于电流变效应的阻力阻止了流体在同心圆筒间的流动。当活塞运动时,微机可立即调节电极电压以改变流体的稠度。如用在汽车上,毫秒级时间的迅速控制,有可能在冲程的中途提高流体的稠度,以减缓道路不平造成的颠簸。随后流体又可变稀薄而迅速复原。因此一种减振器就可适合各种车辆和工作环境。在滑动平板型减振器中,来源于两滑动板间流体的电流变效应的阻力产生剪切力,并由此引起压力增大。

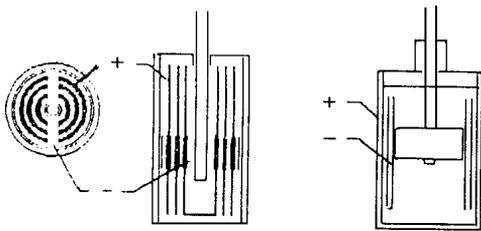


图4 固定电极阀型和滑动平板型的减振器示意图

#### 4.3 电流变液阀

将电流变液体注入一狭缝容器中(图5),通过电场控制 ERF 的稠度,以起到节流阀和开关作用。当 ERF 固化时,就使流动完全停止,从而关闭了流经细管段的液流。这种电流变液阀通路“阀”也可设计成同心圆筒型和平板型的。还可将几个 ERF 通路按一定的方式组合在一起,作成特殊用途的装置。液压系统有希望采用 ERF 通路“阀”而成为新的液压系统,它比传统的液压系统反应更迅速。

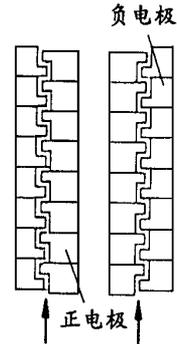


图5 电流变通路“阀”示意图

#### 4.4 机器人的活动关节

在机器人领域中,可用 ERF 制造出体积小、响应快、动作灵活,直接用微机控制的活动关节。如今简易的机器人已在从事工业中的许多工作。如果有非常灵巧的电流变活动关节,就可以完成能迅速作出反应的更复杂的事,比如说接棒球,绕精细金属丝等。“T-1000 型终结者”那样的科学幻想机器人会更早地出现。

目前有人提出,寻找一种既具有电流变效应,又具有磁流变效应的微粒,制造电磁流变液体(EMRF)。这种粒子和悬浮液不仅可以受电场的作用产生电流变效应,而且还可以受磁场的作用产生磁流变效应。电流变液体、磁流变液体、电磁流变液体的研究和技术正刚刚开始,还没有进入成熟的阶段,从基础理论到应用技术都还有许多问题有待研究解决。但可以预期,电磁流变液体这一高新技术必将会在汽车、机械、航空、航天、石油化工和其他工业部门得到广泛的应用。

#### 参考文献

- 1 Klingenberg D J. 用磁铁将液体制成固体. 科学, 1994, 2: 75~76, 80
- 2 郝田, 陈一泓等. 电流变学研究进展. 力学进展, 1994, 24 (3): 315~335
- 3 朱克勤. 电流变液和电流变效应. 力学进展, 1994, 24(2): 154~162
- 4 魏宸官. 一门新兴学科——电流变学的研究与进展. 中国科学基金, 1994, 1: 34~40
- 5 Halsey T C, Martin J E. 电流变液体. 科学, 1994, 2: 29~33, 80
- 6 王振东. 奇妙的非牛顿流体. 力学与实践, 1998, 20(1): 72~74