电流变液在两平行电极板间 流动行为的实验研究

唐新鲁 吴烽 张培强 伍小平 (中国科学技术大学力学和机械工程系, 合肥 230026)

摘要 通过实验的方法研究了电流变液流经两间距为1.1mm 的平行电极板的流动行为. 实验所观测到的由于电流变液在电场作用下非均匀固化所引起的固相颗粒淤积与饱和过 程、河道分岔和失稳等现象,对现有的有关电流变阀均匀流动模型提出了质疑,这为进一 步深入理解电流变液的力学行为,建立新的理论模型提供了实验依据.

关键词 电流变液、电流变阀、流场分岔与失稳、结构演化

引 言

电流变液 (Electrorheological Fluids) 是一种流变学特性可受电场调制的新型智能材料 . 电流变液的研究始于本世纪40年代美国科学家W in slow 的开创性工作[1]. 80年代. 由干材 料科学的迅速发展,电流变液在材料制备方面取得了一系列的突破性进展,加上响应时间 短(一般在ms量级)结构简单,能耗低,减噪等常规器件无法比拟的优点^[2,3],电流变液 器件日益显示出广阔的应用前景.目前已有数以百计的关于电流变液在汽车工业、液压控 制、机器人控制、减振防噪、机械加工等方面的应用专利,电流变液形成机理的基础理论研 究,近十年来日益受到各国科学家的重视. 有关综述性的文献请参阅 [1~3].

电流变液是由在电场作用下极化性能高的固体颗粒(μm 量级)分散于绝缘母液(油) 中的悬浮液组成.实验表明^[3]没有电场作用的状态下,电流变液符合牛顿流体的本构关系并 具有较低粘度,而当它处于电场作用下时,其中的固体颗粒因极化而相互作用,形成平行 于电场的链状结构,进而演化成更为宏观的柱状结构,从而阻止了原有的流动性、表现为 一种具有一定屈服应力的类似于固体的本构状态.目前国际上普遍采用宾汉 (Bingham) 塑 性模型来描述电流变液在稳态条件下的流变学本构关系

$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}$

其中 т的大小决定着电流变液的固化强度,在电流变液应用中起着关键作用.

将电流变液用泵驱动流过无相对运动的两个平行设置的电极板,即构成了电流变阀,由 于阀两端的压力差和流量皆为电场强度的函数。即其流阻受电场控制。电流变阀在机械控 制、阻尼减振等方面具有广阔的应用前景. 目前关于电流变阀的理论研究模型主要是应用连 续介质力学的概念方法和上述的宾汉本构关系,假设电流变液在阀中的流动是均匀的,各 向同性的,从而解出压力差与流量、电场强度之间存在的关系^[4,5]。

本文用实验的方法研究了电流变液在由一对平行设置的透明电极构成的电流变阀之间

1994-04-18收到第一稿。1996-02-27收到修改稿。

的流动行为,发现了电流变液固相颗粒在阀中淤积而造成流动的非均匀性,以及"河道"失 稳、分岔等新的现象,对上述均匀流动的模型提出了质疑,对进一步深入理解电流变液的 力学行为,建立新的理论模型提供了实验依据.

1 实验方案

本实验所用电流变液由重量比为20%的聚甲基丙烯酸钠颗粒(200目左右)和变压器油 混合而成.透明电极是在玻璃表面制备一层均匀导电的薄膜而成.这层导电膜与玻璃表面以 共价键结合,十分牢固且耐磨损.

实验原理如图1所示,用微量计量泵驱动电流变液流经平行设置的透明电极对(间距 1.10 mm)的电流变阀,并形成闭合回路,其中电流变阀的宽为40.0 mm,长为52.0 mm. 在透明电极对的后面放置一均匀白光光源,光线透过电极对,通过CCD 摄像机沿电场方向 观察电流变液在透明电极对间的流动图案,并将图像信号通过录像机记录在盒式录像带中, 然后送至计算机图像处理系统分析处理电流变液在流动状态下的结构演化规律.

图1 实验布置框图

Fig. 1 Schematic diagram of the experiment arrangement

2 结果与讨论

实验结果表明,电流变液流经电流变阀的结构演化过程存在着行为不同的两个阶段: 初始阶段,固相颗粒在电场作用下凝聚并于阀中淤积滞流, 后期屈服阶段,固相颗粒 淤积达到一定饱和后,由于电流变液固化的非均匀性导致其冲破原有结构并造成流场重新 分布.下面就实验中的各种现象进行简要报告和讨论.

2.1 淤积与饱和

电流变液流经平行电极板时,在电场作用下固相颗粒相互作用迅速形成链状或更粗的 柱状结构,与母液(油)发生相分离,并淤积、滞流在阀中,而母液则流出阀.实验观测表 明,在强电场作用下和其固相颗粒淤积达到饱和之前的初始阶段中,大部分固相颗粒都将 滞流在阀中而不随母液流出,从而增加了电流变液通过阀的流阻,并使电流变液固相颗粒 在阀中的局部体积浓度远大于所使用的电流变液的实际体积浓度.而Conrad 等人^[6]的研究 表明,电流变液的固化屈服应力与其固相颗粒的体积浓度密切相关,因此,考虑固相颗粒 的淤积过程,将是正确建立有关电流变阀的理论分析模型的首要因素. 第5期

2.2"河道"的分岔与失稳

图2所示为电流变液初始阶段进入电极对时固相颗粒迅速凝聚(图2(a))、扩展(图



图2 沿电场方向观察时在流量为100 m l/m in 和电场为1.87 kV/mm 时固相颗粒发生淤积并 形成分岔 (a),扩展 (b) 和以至饱和 (c) 的情景 Fig.2 A ccum ulation proceed of the solid particles of ERF between two parallel electrodes: flow rate Q is 100 m l/m in and electric field E is 1.87 kV/mm. (observed along the field direction) (a) branching, (b) spreading, (c) after saturation 图3 和流体传动方向平行的"河道"
失稳前(a),失稳分岔(b)和继续演化(c)的过程
Fig. 3 Evolution of a straight ER river parallel to the pumping direction:
Q = 100 m l/m in, E = 1.32 kV/mm

(a) straight ER river,
(b) branching,
(c) further evolution

2 (b))时产生的树状分岔的典型结构.随着时间的推移,电流变液不断进入阀中,这类树 状结构不断延伸,互相分岔,最终充满整个阀内空间而达到饱和状态.整个过程充分显示了 电流变液在初始阶段流动的不均匀性.电流变液在固相淤积达到饱和的后期阶段,阀内的空 间分成了流动的电流变"河道"和不流动的固化区域两部分.其中"河道"往往分裂成数个 分支,从而在分岔处形成不动的岛,如图2 (c)所示.电流变液的流动似乎总是选择能量耗 散最低或已固化结构最易打破的路径,而且依赖于其在初始阶段固化非均匀性的初始条件

电流变液的后期流动行为相对于其初期阶段比较稳定.其原因与电流变液的触变性^[7,8] 有关. 然而,由于电流变液的冲积效应和其内部结构的不断演化,也存在"河道"失稳、改 道的现象.这种失稳是突发性的,在"河道"改变后,原有的"河道"会立即被淤积的电流 变液固相颗粒所堵塞. 图3.图4就是两个典型的例子。

值得注意的是,"河道"的失稳过程,可能会使电流变阀入口和出口的压力差产生波动. . 如何通过改进设计以减少压力脉动,也是电流变阀在精密控制工程应用中应注意的问题.

> 图4 和流体传动方向倾斜的"河道"失稳前、失稳后变得更加倾斜的过程 Fig. 4 Evolution of a tilt ER river relative to the pumping direction (Q = 100 m l/m in, E = 2.65 kV /mm) (a) before instability, (b) after instability

2.3 不同实验条件下电流变液的行为对比

本文实验共分两组, 电流变液在回路中的流量分别为10 m l/m in 和100 m l/m in, 每组结 果中电场强度分别是: 0.90 kV /mm, 1.32 kV /mm, 1.87 kV /mm, 2.23 kV /mm 和2.65 kV /mm.

当流量保持不变时,电场强度低,则电流变液的固化强度也低,阀中不流动的部分的 平行链状结构比较容易打破,导致河道失稳较为频繁.随着电场强度的逐步增加,由于其固 化强度随场强的平方成正比^[1~3],阀中电流变液河道也将变窄,而在流量保持不变的情况 下,河道变窄,意味着河道边缘剪切率的增加,这样就增加了河道的冲积力,构成了强电 场下电流变液固化强度迅速提高的情况下河道失稳、改道的主要原因.

从图5可知电流变液的淤积过程达到饱和所需的时间主要取决于流量的变化, 与电场强度没有明显的依赖关系. 流量越大, 所需时间越短.

随着流量的不断增加, 电流变液在阀中的冲积力也会不断加强. 可以预料, 当流量足 © 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图5 不同实验条件下淤积过程到达饱和所需时间

Fig.5 Duration for accumulation process of ERF under various experimental conditions 够大时,以至于任何孤立不动的"岛"状结构都将被强大的冲积所破坏,但是这是否意味 着在大流量的情况下,电流变液在平行电极板间的运动将趋于均匀呢?由于实验条件所限, 作者没作更加深入的实验验证.然而值得注意的是,电流变液的成链响应时间在毫秒量级, 而为了获得较大的压力下降,实用的电流变阀的长度一般都在1m 以上,如果电流变液流经 阀的驰豫时间远大于毫秒量级时,有理由认为,电流变液的流动行为仍将表现出很强的不 均匀性.

2.4 现有电流变阀的流动模型的局限性

娄征等^[4]人运用连续介质力学的方法和 宾汉塑性本构方程,分析了电流变液在两平 行板间的流动行为,在流动各向同性的大前 提下得到了如图6所示的流场剖面速度分布, 并由此计算了电流变阀的压力下降,流量、电 场强度,功率效率和响应带宽等一系列参数 之间的关系.

本文实验结果则展示了电流变液在阀中 流动的很强的不均匀性,固相颗粒的淤积效 应和河道的失稳现象,是上述均匀模型无法 解释的.因而对上述实验现象,建立起电流变 液在阀中非均匀流动的理论模型是十分必要的. 图6 均匀流动模型中电流变液在 两平行电极板间的流速剖面分布 Fig.6 Flow field of ERF betw een

two parallel electrodes

3 结 论

本文通过实验的方法研究了电流变液流经两间距为1.1 mm 的平行电极板的流动行 为,发现了由于电流变液在电场作用下非均匀固化所引起的固相颗粒淤积与饱和过程、河 道分岔和失稳等现象,得到以下结论:

1) 电流变液固相颗粒的淤积过程使其在电流变阀中的体积浓度远大于电流变液的实际
 值,并严重影响着电流变阀的后期流动行为;

报

2) 电流变液的淤积和饱和行为中电流变液的流场分岔和失稳等现象表明: 电流变液在 阀中的流动表现出很强的非均匀性, 而现有的有关电流变阀均匀流动的理论模型具有一定 的局限性.

参考文献

1 Winslow WM . J App l Phys, 1949, 20: 1137

2 Block H, Kelly JR. J Phys D: App l Phys, 1988, 21: 1661

- 3 Electrorheological (ER) Fluids— A Research Needs Assessed Assessment. Final Report, Prepared for U.S. Dept. of Energy, DOE/ER/30172, May, 1993
- 4 Lou Z et al. Behaviors of ER values and bridges. Proc. 3rd Int. Conf. on ER Fluids, Carbondale L, Oct, 1991, World Scientific Publishers, 1992
- 5 Brook DA. A model for ER fluids in poiseuill flow. 63rd Ann. Meet. Soc. of Rheology, Rochester NY: 1991

6 Conrad H et al. Int J M odern Physics B, 1992, 6: 2575

7 Carlson JD · U · S · Patent No · 4772407, 1988

8 Shulman ZP. Inzh Fiz Zh, 1990, 59: 34

EXPERMENTAL RESEARCH ON FLOW BEHAVIORS OF AN ELECTRORHEOLOGICAL FLUID BETWEEN TWO PARALLEL ELECTRODES

Tang Xin lu Wu Feng Zhang Peiqiang Wu Xiaop ing (Dept. of Mech. & Mech. Eng., Univ. of Sci. & Tech. of China, Hefei 230026, China)

Abstract The flow behaviors of an electrorheological (ER) fluid between two parallel transparent electrodes are studied experimentally. Some new phenomena caused by electric-field-induced non-homogeneously solification ae found, such as solid phase accumulation and saturation process, instability and anisotropism, of ER rivers, which has provided the experimental basis for further understanding of the mechanical behaviors of ER fluids and setting up a new theoretical model of ER valves instead of the present isotropic flow model.

Key words electrorheological fluids, ER valves, branching and instability of flow field, structural evolution