

文章编号:1000-582X(2002)02-0096-03

电流变流体的本构模型^{*}

司 鹤, 彭 向 和

(重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044)

摘 要: 电流变流体是由一种基液, 加入非导电介质微粒和高分子表面活性剂混合而成的液体, 因其独特的电流变效应成为材料科学领域的研究热点。在外加电场作用下, 电流变流体的力学性质可迅速发生变化甚至相变固化, 流体的力学性能依赖于外加电场的强度、介质微粒的体积百分比浓度以及介质微粒的大小。文章基于一个类似 Maxwell 模型的简单机械系统, 采用非连续介质力学的内蕴时本构理论, 在仅考虑电场强度对电流变流体力学性能的影响下, 发展了一种描述电流变流体的本构模型, 预言了电流变流体的力学行为随电场强度的变化, 描述了材料在不同电场强度下应力随应变的变化规律。

关键词: 电流变流体; 粘塑性; 电流变效应; 本构模型

中图分类号: O 34

文献标识码: A

电流变(ER)流体是近几十年发展的一种新兴智能材料, 电流变流体由基液、非溶性绝缘介质和高分子表面活性剂组成的混合液体, 在外加电场的作用下, 流体具有一种特殊的物理效应—电流变效应, 成为人们关注的热点。所谓电流变效应是指在流体中加入一种非导电的、非溶性介质, 在外部电场的作用下, 流体的流变性质发生突变, 迅速固化而失去流动性, 固化是一个瞬变过程, 在毫秒内即可完成, 同时又是可逆的, 在电场撤去后马上又恢复流动性。这种转换使得流体的流变性(弹性、塑性、粘性)、导电性、传热性, 以及其它的机械性质和物理性质皆发生显著的改变。液态和固态的转换是可逆的、可控的, 并且这种转换的能量消耗低, 温度稳定。由于电流变流体独特电流变效应, 自上世纪中叶 Winslow 发现这一效应以来, 成为材料科学领域的研究热点。电流变流体的特性使得其具有十分诱人的开发前景, 且在液压、制动振动、驱动密封等的主动和自适应控制中具有广阔的应用前景^[1,2]。

近年来, 对电流变流体性能的研究已取得很大进展。主要工作是采用实验手段研究流体的流变特性, 以及影响流体流变性能的因素。根据实验观测, 将电流变流体简单地当作 Bingham 体, 用 Bingham 方程描述流体的本构行为。1992 年 Tomas C^[3] 通过对电流变流体的流变性能测试, 发现流体表现出明显的粘塑性,

Bingham 模型不能准确地描述流体的力学性能。本文基于一种简单的机械模型(如图 1 所示), 采用非连续介质力学的内蕴时本构理论, 仅考虑电场强度对电流变流体的粘塑性性能的影响, 提出在小变形、小变温、塑性不可压缩假设下电流变流体的一种三维本构模型, 描述流体的力学行为, 其结果与实验的结果基本是一致的。

1 本构模型

ER 流体的力学行为是随 ER 流体的极化率而动态变化的, 极化率又随外加电场的强度, 加入介质微粒的体积百分率, 介质微粒直径大小等因素变化。在塑性不可压缩假设下, 采用简单机械模型, 建立了 ER 流体随极化率动态变化的本构方程。

早在 60 年代, Lwan^[4] 就提出了采用由弹性和塑性元件组成的类似 Maxwell 模型的并联系统描述材料的塑性行为。本文将其推广为图 1 所示的简单机械模型以获得 ER 流体对塑性和粘性的宏观响应。图 1 中弹性元件 $C_p^{(i)}$ 、 $C_v^{(j)}$ 与随机内部微结构相联系 ($i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$), $C_p^{(i)}$ 、 $C_v^{(j)}$ 分别对应于塑性变形和粘性变形开始时, 由于变形不均匀所应引起的弹性变形, 塑性阻尼器 $D_p^{(i)}$ (其宏观平均塑性阻尼系数为 $a_p^{(i)}$) 和粘性阻尼器 $D_v^{(j)}$ (其宏观平均粘性阻尼系数为 $a_v^{(j)}$)

* 收稿日期: 2001-10-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59636140)

作者简介: 司鹤(1964-), 女, 四川营山人, 重庆大学副教授, 博士生。主要从事固体力学的教学和研究。

分别用于描述第 i 种塑性和第 j 种粘性耗散机制。 e 为偏应变张量, $Q_p^{(i)}$ 为第 i 个内变量 $q_p^{(i)}$ 对应的广义力, $Q_v^{(j)}$ 为第 j 个内变量 $q_v^{(j)}$ 对应的广义力, 它们满足耗散不等式:

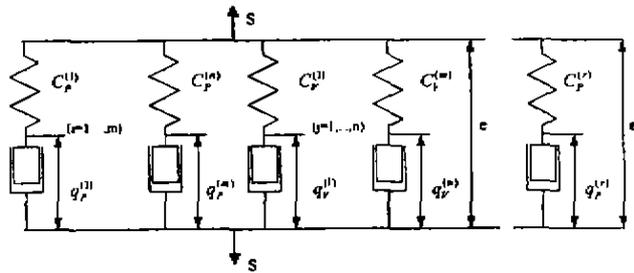


图 1 机械模型

$$Q_p^{(i)} : dq_p^{(i)} \geq 0, Q_v^{(j)} : dq_v^{(j)} \geq 0$$

$$(i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

从图(1)可得:

$$S = S_p + S_v \quad (2)$$

$$S_p = \sum_{i=1}^m Q_p^{(i)} \quad S_v = \sum_{j=1}^n Q_v^{(j)} \quad (3)$$

式中: S_p, S_v 分别表示塑性和粘性的宏观应力响应。

对应于偏应变 e , 弹性元件 $C_p^{(i)}$ 和塑性阻尼器 $D_p^{(i)}$ 的响应分别满足:

$$Q_p^{(i)} = C_p^{(i)}(\xi)(e - q_p^{(i)}),$$

$$Q_p^{(i)} = a_p^{(i)} \frac{de}{dz} \quad (4)$$

式中: ξ 为材料的极化率, z 为广义时间, 由下式确定^[5]:

$$dz = \frac{d\xi}{f(z)}, d\xi^2 = de : de \quad (5)$$

$f(z)$ 为材料的强化函数, 用以描述塑性阻尼器阻尼特性的变化。

由(4)式可得:

$$dQ_p^{(i)} = C_p^{(i)}(\xi) de + \left(\frac{1}{C_p^{(i)}(\xi)} dC_p^{(i)}(\xi) - a_p^{(i)} dz \right) Q_p^{(i)}$$

$$(6)$$

式中:
$$a_p^{(i)} = \frac{C_p^{(i)}(\xi)}{a_p^{(i)}(\xi)}$$

对应于偏应变 e , 弹性元件 $C_v^{(j)}$ 和粘性阻尼器 $D_v^{(j)}$ 的响应满足:

$$Q_v^{(j)} = C_v^{(j)}(\xi) \cdot (e - q_v^{(j)}),$$

$$Q_v^{(j)} = a_v^{(j)} \frac{de}{dt} \quad (7)$$

由(7)式可得:

$$dQ_v^{(j)} = C_v^{(j)}(\xi) de +$$

$$\left(\frac{1}{C_v^{(j)}(\xi)} dC_v^{(j)}(\xi) - a_v^{(j)} dt \right) Q_v^{(j)} \quad (8)$$

式中:
$$a_v^{(j)} = \frac{C_v^{(j)}(\xi)}{a_v^{(j)}(\xi)}$$

将(6)、(8)代入(2)式的微分形式:

$$dS = dS_p + dS_v = \sum_{i=1}^m dQ_p^{(i)} + \sum_{j=1}^n dQ_v^{(j)} \quad (9)$$

2 对 ER 流体力学行为的描述

利用所发展的本构方程对 ER 流体在不同电场强度下的特性进行了描述。本文仅考虑磁场强度对极化率的影响, 在一定的电场强度下, 则 $C_p^{(i)}, C_v^{(j)}$ 为常数, (6)、(8)式为:

$$dQ_p^{(i)} = C_p^{(i)} de - a_p^{(i)} \cdot dz \cdot Q_p^{(i)} \quad (10)$$

$$dQ_v^{(j)} = C_v^{(j)} de - a_v^{(j)} \cdot dz \cdot Q_v^{(j)} \quad (11)$$

解(10)、(11)得:

$$Q_p^{(i)} = \int_0^e C_p^{(i)}(\xi) e^{-a_p^{(i)}(z-z')} \frac{\partial e}{\partial z'} dz' \quad (12)$$

$$Q_v^{(j)} = \int_0^t C_v^{(j)}(\xi) e^{-a_v^{(j)}(t-t')} \frac{\partial e}{\partial t'} dt' \quad (13)$$

取强化函数 $f(z) = 1$ 使计算过程简化并易于分析模型的预言能力。在式(12)、(13)中取 $m = 3, n = 3$, 即可保证在工程实际问题的分析中具有足够的精度。在简单加载条件下, 积分(12)、(13)式, 代入(3)得:

$$S_p = \sum_{i=1}^3 Q_p^{(i)} = \sum_{i=1}^3 \frac{C_p^{(i)}(\xi)}{a_p^{(i)}} (1 - e^{-a_p^{(i)} z}) \quad (14)$$

$$S_v = \sum_{j=1}^3 \frac{C_v^{(j)}(\xi)}{a_v^{(j)}} (1 - e^{-a_v^{(j)} t}) \quad (15)$$

$$S = S_p + S_v = \sum_{i=1}^3 \frac{C_p^{(i)}(\xi)}{a_p^{(i)}} (1 - e^{-a_p^{(i)} z}) + \sum_{j=1}^3 \frac{C_v^{(j)}(\xi)}{a_v^{(j)}} (1 - e^{-a_v^{(j)} t}) \quad (16)$$

在给定的电场强度下的一组实验数据, 可求得相应的一组材料常数。进一步, 假设材料常数 $C_p^{(i)}$ 和 $a_p^{(i)}$ 随极化率的变化服从相同的规律, 则材料常数 $a_p^{(i)}$ 与极化率无关, 同样可得 $a_v^{(j)}$ 与极化率无关, 也就与电场强度无关。若假设: 材料常数随极化率线性变化, 即:

$$S(\xi) = S_p(\xi) + S_v(\xi)$$

$$C_p^{(i)} = \xi C_p^{(i)}, C_v^{(j)} = \xi C_v^{(j)}$$

$$\xi = A_1 \ln(E - E_0)$$

$$S = [A_1 \ln(E - E_0)] \cdot$$

$$\left(\sum_{i=1}^3 \frac{C_p^{(i)}}{a_p^{(i)}} (1 - e^{-a_p^{(i)} z}) + \sum_{j=1}^3 \frac{C_v^{(j)}}{a_v^{(j)}} (1 - e^{-a_v^{(j)} t}) \right) \quad (17)$$

E — 电场强度, E_0 — 初始电场强度

利用(17)可以得到宏观应力在不同电场强度下的变化规律。图2为不同电场强度下ER流体的宏观应力随应变变化响应特性曲线,当电场强度有一个增幅,宏观应力响应也有一增值,反映了增加外加电场能提高ER流体的力学强度。

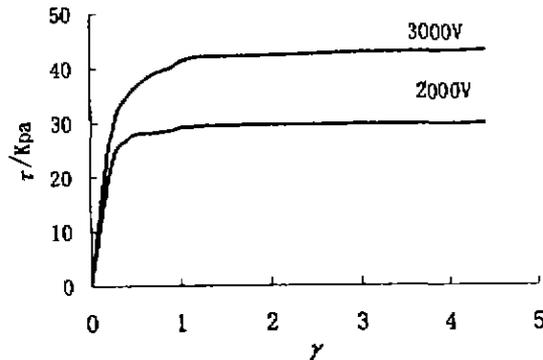


图2 宏观应力随应变变化响应曲线

3 结论

电流变流体是一种力学性能,特别是流变性能可调、可控的智能材料。本文基于一个类似Maxwell模型的简单机械系统,采用非连续介质力学的内蕴时本构

理论,在仅考虑电场强度对电流变流体力学性能的影响下,发展了一种描述电流变流体的本构模型,预言了电流变流体的力学行为随电场强度的变化,较好的描述材料在不同电场强度下应力随应变的变化规律。对电流变流体的实验表明,该本构模型基本描述电流变流体的力学性能。

参考文献:

- [1] JOHN P COULTER, KEITH D WEISS, DAVID CARLSON J. Engineering Applications of Electrorheological Materials[J]. *Int Mater Sys*, 1993,4:248-257.
- [2] SIMS N D, STANWAY R, PEEL D J, et al. Controllable viscous damping: an experimental study of an electro-rheological long-stroke damper under proportional feedback control[J]. *Smart Mater Struct*, 1999,8:601-615.
- [3] TOMAS C HALSEY. Rheology of Electrorheological Fluids[J]. *Phy Rev Let*, 1992,68:1519-1522.
- [4] LIAN W D. On a class of models for the yield behavior of continuous and composite systems[J]. *Appl Mech*, 1987,6:12-617.
- [5] 范镜弘,高芝辉.非线性连续介质力学基础[M].重庆:重庆大学出版社,1987.

Constitutive Model for Electrorheological Fluid

SI Hu, PENG Xiang-he

(College of Resource & Environment Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Electrorheological(ER) fluid is a mixed fluid, which consists of a fluid, non-electronic particles, and some additive. ER fluid causes the strong interest in the material field due to the particular Electrorheological effect. This paper discusses the mechanical property of ER fluid and presents a constitutive model to describe the rheological property with an applied electronic field based on a simple mechanical partten. The experimental result agrees with the model of ER fluid.

Key words: electrorheological fluids; viscoplasticity; electrorheological effect; constitutive model

(责任编辑 姚飞)