

电流变离合器内屈服面瞬态特性研究*

彭 杰, 朱克勤**, 席葆树

(清华大学工程力学系, 北京 100084)

摘 要: 研究同心圆筒型电流变离合器内流动屈服面的瞬态响应规律。结果表明: 在突加电场情况下, 电流变液屈服应力公式中的参数 β 对流动屈服面的动态特性规律有重要影响。初始时刻, 屈服面在筒壁生成, 在向间隙内移动的过程中, 若 $\beta > 2.0$, 屈服面总是先产生于内筒外壁; 若 $\beta < 2.0$, 屈服面总是先产生于外筒内壁。

关键词: 电流变离合器; 瞬态响应; 屈服面

中图分类号: O373 文献标识码: A

1 引 言

同轴圆筒型电流变离合器是电流变器件中常见的一种, 通常外桶静止, 内筒旋转, 两个圆筒的间隙内充满电流变液。未施加电场时, 间隙内电流变液的 Couette 流动具有牛顿流体的流动特性, 传递的扭矩较小。施加电场后, 电流变液呈现出屈服应力流体的特性, 传递的扭矩明显增加。

实验研究表明, 电流变液的屈服应力 τ_0 与电场强度 E 之间服从的关系为 $\tau_0 = \alpha E^\beta$, 其中系数 α 、 β 由实验确定。对不同的电流变液, 通常 β 的取值范围是 $1.52 \sim 5^{[1,2]}$ 。Whittle 等人对 $\beta = 2.0$ 的特殊情况研究了同轴圆筒型电流离合器的动力学响应特性^[3], 在他们的数学模型中, 没有涉及流场中的屈服面问题。在高速转动的离合器中, 电流变液宾汉模型的表现粘度随电场强度的变化已不十分明显, 屈服面的形成和位置等对电流变效应具有非常重要的影响。本文在 $\beta \neq 2.0$ 的一般情况下, 通过数值模拟的方法研究电流变离合器内的流动特性, 重点是流场中屈服面对突加电场的动力学响应问题。

2 数学模型

引入极坐标系 (r, θ) , 原点位于圆筒中心, 间隙内为二维轴对称非定常剪切流, 动量方程的周向投影为

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} \quad (1)$$

其中, u 为周向速度, $\tau_{r\theta}$ 为剪切应力, 使用修正的宾汉模型可表示为

$$\begin{aligned} \tau_{r\theta} &= \tau_0(E) \operatorname{sgn} \dot{\gamma} + \mu \dot{\gamma} & (|\tau_{r\theta}| > \tau_0) \\ \dot{\gamma} &= 0 & (|\tau_{r\theta}| \leq \tau_0) \end{aligned} \quad (2)$$

而剪切应变率为

* 国家自然科学基金(19834020)和清华大学基础研究基金(JC2000037)资助项目。

** 通讯联系人, Email: zhukq@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2001-08-20; 修回日期: 2001-09-2。

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} = r \frac{\partial \omega}{\partial r} \quad (3)$$

这里 $\omega = u/r$ 为角速度。将本构方程(2)代入动量方程(1)整理后得到

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{3}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} \right) + \frac{2-\beta}{r^{\beta+2}} \operatorname{sgn} \dot{\gamma} \alpha \left[\frac{\Delta U}{\ln(R_2/R_1)} \right]^\beta \quad (4)$$

其中, R_1 、 R_2 为内、外筒半径; ΔU 为间隙间电位差。在 $\beta = 2$ 时, 上式右边的第二项为零^[3]。本问题的初始条件为

$$\omega(r, 0) = \frac{R_1^2(R_2^2 - r^2)}{r^2(R_2^2 - R_1^2)} \omega_1 \quad (5)$$

其中 ω_1 是内筒旋转的角速度。固壁边界条件为

$$\omega|_{r=R_1} = \omega_1, \quad \omega|_{r=R_2} = 0 \quad (6)$$

根据本构方程(2)可知, 在屈服面上剪切应变率为零, 屈服面处边界条件为

$$\frac{\partial \omega}{\partial r} \Big|_{r=R_y(t)} = 0 \quad (7)$$

其中 $R_y(t)$ 为屈服面位置。在突加电场瞬间, 流场中不存在屈服面; 在其后各时刻, 屈服面在筒壁上形成, 并逐渐向狭缝内移动。因此本问题成为方程(4)带有未知动边界的数值求解问题。单位长内桶或外桶所受的扭矩与 β 的取值有关, 推导出:

$$M_{\text{inner}} = 2\pi R_1^2 \tau(R_1), \quad M_{\text{outer}} = 2\pi R_y^2 \tau_0 \quad (\text{对于 } \beta < 2.0) \quad (8)$$

$$M_{\text{inner}} = 2\pi R_y^2 \tau_0, \quad M_{\text{outer}} = 2\pi R_2^2 \tau(R_2) \quad (\text{对于 } \beta > 2.0) \quad (9)$$

其中 M_{inner} 、 M_{outer} 分别代表单位长度内桶和外桶所受扭矩。

为了验证前述基于动边界屈服面模型分析方法的有效性, 在本文中采用有限差分法直接对控制方程(1)进行数值求解。这里将电流变液本构方程(2)写成

$$\tau_{\theta} = \left[\mu + \frac{\tau_0(E)}{|\dot{\gamma}| + \delta} \right] \dot{\gamma} \quad (10)$$

其中, $\delta \ll 1.0$ 称为调整因子, 可防止在未屈服区($\dot{\gamma} = 0$)出现表观粘度无穷大的情况, 避免计算上产生困难。方程(1)的数值计算采用了 Crank - Nicolson 差分离散格式。由于直接数值模拟模糊了屈服区和未屈服区的边界, 为了从计算结果中确定屈服面位置, 根据本构方程的调整因子模型(10), 将流动屈服区认定为满足以下条件

$$|\dot{\gamma}| \geq \dot{\gamma}_0 = \sqrt{\frac{\delta^2}{4} + \frac{\delta \tau_0}{\mu}} - \frac{\delta}{2} \quad (11)$$

3 结果和分析

本文中使用的参数为: 电位差 $\Delta U = 10 \text{ kV}$, 内筒半径为 $R_1 = 0.050 \text{ m}$, 外筒半径为 $R_2 = 0.052 \text{ m}$, 内筒旋转速度 $\omega_1 = 5.0 \text{ rad/s}$, 电流变液密度 $\rho = 1.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 粘度 $\mu = 0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。当 $\beta = 1.8$ 时, $\alpha = 2.0 \times 10^{-8}$; 当 $\beta = 2.2$ 时, $\alpha = 6.0 \times 10^{-11}$ 。

图1给出了狭缝内电流变液在不同时刻的角速度随 r 的变化曲线。从图1a可以看到屈服面从外桶内壁开始出现, 然后随时间向狭缝内部延伸, 直至达到定常态^[4]。所有的计算结果表

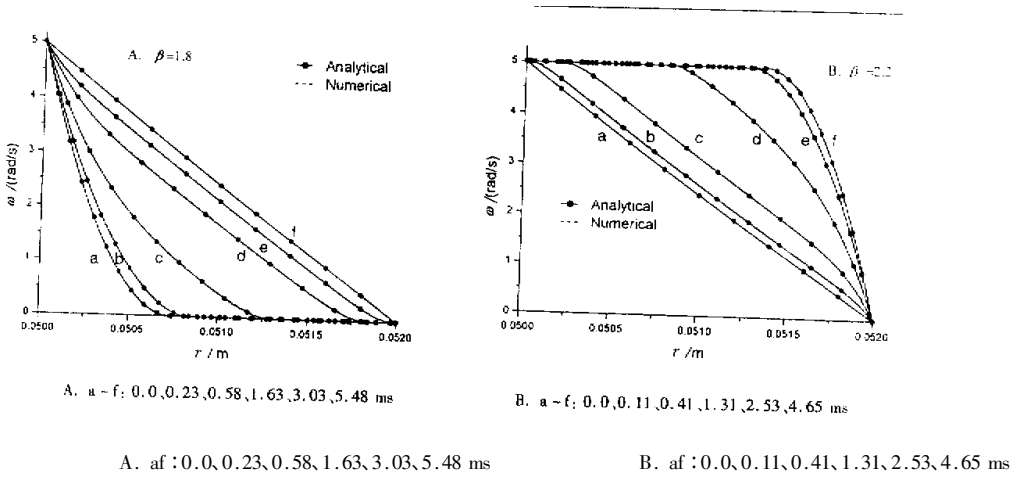


图 1 角速度分布曲线

Fig.1 Angular speed profiles

明,只要 $\beta < 2.0$ 非定常屈服面的变化均服从与此相同的规律。图 1b 表明屈服面从内桶外壁开始生成,然后随时间向狭缝内部延伸,直至达到另一种定常态^[4]。所有的计算结果表明,只要 $\beta > 2.0$ 非定常屈服面的变化均服从与此相同的规律。图中还给出了两种方法计算结果比较,基于方程(4)的结果称为解析结果,基于方程(1)的结果称为数值结果,两者在图中几乎是完全重合的。

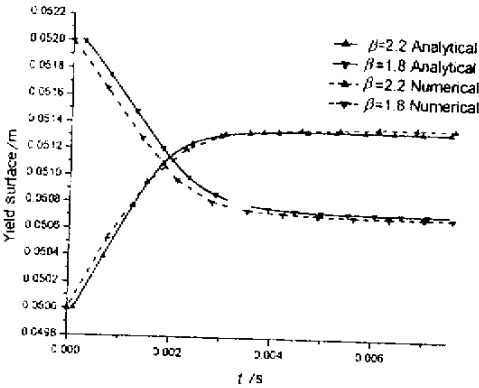


图 2 屈服面位置随时间的变化

Fig.2 Position of yield surface vs time

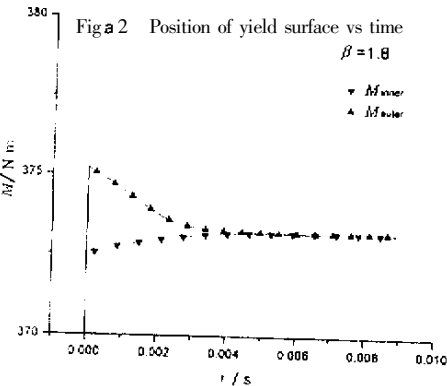


图 3 为电场作用下电流变离合器内、外桶所受扭矩随时间的变化曲线。在突加电场瞬间,内桶和外桶所受扭矩突然增大。图 3a 是

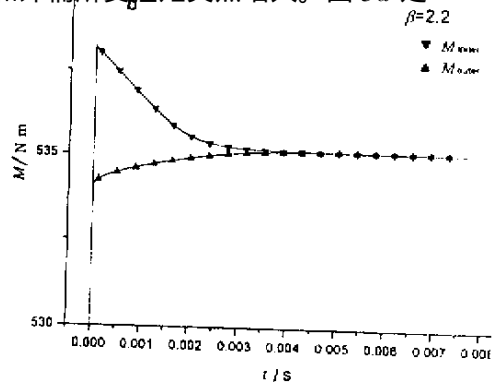


图 3 单位长内外桶所受力矩

Fig. 3 Torque per unit length on cylinders vs time

$\beta = 1.8$ 的情况,初始突加电场后,内桶所受扭矩随时间不断增大,外桶所受扭矩随时间不断减小,在趋于终态时两者逼近相同的值。图 3b 是 $\beta = 2.2$ 的情况,初始突加电场后,外桶所受扭矩随时间不断增大,内桶所受扭矩随时间不断减小,在趋于终态时两者逼近相同的值。

图 4 为终态时单位长离合器所受力矩随外加电压变化曲线,此时内桶和外桶所受力矩大小相同方向相反。从图中可知,终态时离合器内、外桶所受力矩随所施加电压的增高而增大。

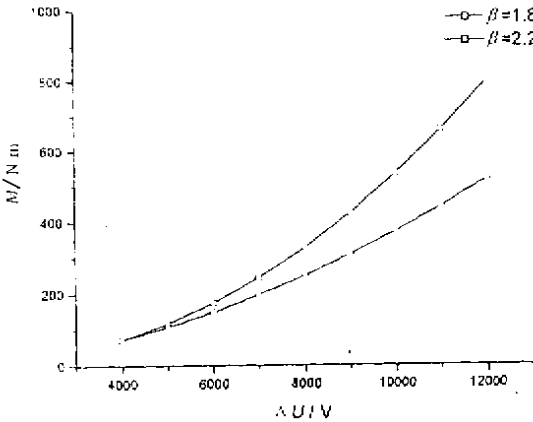


图 4 单位长离合器终态所受扭矩随外加电压的变化

Fig.4 Torque per unit length on cylinder vs extra electric pressure at final state

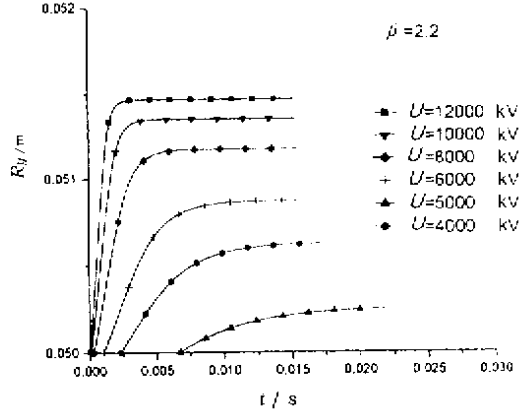


图 5 不同电压下屈服面随时间的变化

Fig.5 Yield surface position vs time at different extra electric pressure

图 5 为不同外加电压作用下离合器中屈服面随时间的变化曲线,可知外加电场越强,出现屈服面的滞后时间就越短,离合器达到稳态的响应时间也越短,反之越长。当外加电场足够弱时,出现屈服面的滞后时间趋于无穷大,即流场中将不再有屈服面出现。

4 结 论

本文对圆筒型电流变离合器的动态响应问题进行了研究,重点是针对 β 不同取值情况下的动态屈服面位置进行跟踪,得出结论如下:

1. 突加外电场,离合器中并未瞬时产生未屈服区,而存在一个滞后;外加电场越强,滞后时间越短。
2. 在 β 取不同值时,以 2 为临界值,当 $\beta > 2.0$ 时,屈服面首先在内筒壁出现,并迅速向外移动,未屈服区总是与内筒壁相连;当 $\beta < 2.0$ 时,屈服面首先在外筒壁出现,并迅速向内移动,未屈服区与外筒壁相连;
3. 在修正的 Bingham 模型中引入调整因子 δ ,可消除在数值计算过程中存在的奇异性。从对动量方程直接数值模拟的计算结果来看,与基于动边界分析的计算结果是一致的。

参 考 文 献

[1] Atkin R J, Bullough W A, Xiao Shi. *J. Rheol.*, 1991, **35**: 1441
 [2] Klingenberg D J, Frank Van Swol, Zukoski C F. *J. Chem. Phys.*, 1991, **94**: 6171
 [3] Whittle M, Atkin R J, Bullough W A. *J. Non - Newtonian Fluid Mech.*, 1995, **57**: 61
 [4] Peng Jie, Zhu Keqin, Xi Baoshu. *Chin. Phys. Lett.*, 2000, **17**: 298

Transient Characteristics of the Yield Surface of Electrorheological Clutch *

Peng Jie , Zhu Keqin ** , Xi Baoshu

(*Department of Engineering Mechanics , Tsinghua University , Beijing 100084*)

Abstract The characteristic of transient yield surface in electrorheological clutch has been studied. It shows that the characteristics of clutch are dependent on the parameter β , which is in the yield stress formula of ERF , when extra electric field was applied suddenly. In the case of $\beta > 2$, the yield surface generates from the inner cylinder. In the case of $\beta < 2$, the yield surface generates from the outer cylinder. The direct numerical results deriving from the Crank – Nicolson finite difference method with the regulation parameter model are also presented.

Key words Electrorheological clutch , Transient response , Yield surface

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (19834020) and fundamental research foundation of Tsinghua University (JC2000037).

** To whom correspondence should be addressed , Email : zhukq@tsinghua.edu.cn.