

在介观尺度研究多相复杂流体 ——四辊流变仪及其应用

杨健茂¹, 许元泽^{1*}, 胡云涛²

(1 复旦大学高分子科学系, 聚合物分子工程教育部重点实验室, 上海 200433;

2 Unilever 公司研发部, 40 Merritt Boulevard, Trumbull, Connecticut, US 06611)

摘要:研究多相复杂流体的流变学需要介观尺度下基本力学过程的信息。四辊流变仪可以产生旋转、剪切、拉伸等多种流场, 且在流场中心形成一个停滞点, 适于实时观察和测量介观尺度范围内与基质不相容的液滴的形变、破裂和聚并, 或纤维、固体粒子、液晶等与液体组成的多相复杂流体的流变性质, 还可以和多种仪器联用进一步扩展应用范围。本文综述了四辊流变仪的发展、主要部件、理论基础、用途以及应用四辊流变仪所做的主要研究, 最后与其它流变仪器加以比较并总结了它的优缺点。

关键词:复杂流体; 介观; 四辊流变仪; 组成; 应用

为了得到高性能的高分子材料, 必须对加工过程中流动类型、流场强度与组分的分散和成形的关系加以研究, 但是加工过程中材料的移动速度很快, 难以实时观察其形态, 如果仪器中存在停滞点就便于对物料的动力学和对流场的响应进行测量, 适合此用途的仪器就是四辊流变仪, 而且, 在四辊流变仪上能开展介观尺度的实验, 研究多相复杂流体的流动形变与结构变化的相互耦合。四辊流变仪主要部件是浸在一个样品池中的四个辊子, 在计算机控制下可以产生拉伸、剪切、旋转、振荡、瞬态流场以及混合流场, 且在仪器中心可形成一个停滞点, 便于实时观察样品在流场中的形变、取向等行为。

利用四辊流变仪在研究流场诱导的分子取向^[1]、结晶^[2], 分散相的形变、破裂、聚并^[3~5], 确定蛋白质^[6]、高分子链^[7]等的构象等多方面已有许多工作, 其研究对象不仅是互不相溶的液体, 也可以是纤维^[8]、固体粒子^[9]、胶囊^[10]、凝胶^[11]、液晶^[12]、LB 膜^[13]等与液体组成的乳液、悬浮体, 甚至加入或在液滴表面生成表面活性剂对液滴的形变造成的影响, 在加热的条件下还可以扩展到两种可以熔融但互不相溶的固体。四辊流变仪主要用于研究单个粒子的旋转; 单个液滴的形变和破裂; 一个粒子或质心在停滞点上的两个粒子或液滴之间的相互作用等。四辊流变仪还可以和光散射、流动双折射、圆二色等仪器联用, 同时测定多种物理量来研究物质的内部结构。本实验室组装了一台四辊流变仪, 并取得了一些初步研究成果。

1 四辊流变仪的发展

四辊流变仪首先由 Taylor 研制成功^[14], 当时是用电灯照亮流场, 手动控制辊子的转动, 直接用一个放大 2.5 倍的长焦距相机成像, 只能形成纯拉伸流场, 而产生 $0 < \alpha < 1$ (α 为流动类型) 的流场就需要四个辊子的转速根据研究对象的位置独立变化, 手动操作难以胜任。Bentley 和 Leal^[15]使用了点光源, 透镜组, 在一个分束棱镜后有一动一静两个相机, 在成像距离为 40cm 时放大 1.34 倍, 但只能记录二维图像, 并编制相应程序由计算机控制步进马达以产生各种流场, 克服了控制上的困难。Hu 等^[16]和 Yang 等^[17]改用卤素灯, 改进图象处理, 对 Bentley 等编制的控制一个液滴的程序加以改进, 能够控制两个液滴在流场中心进行液滴聚并实验, 并增加自动记录数据功能。以前都是用阈值的方法来确定液滴边缘, Hu 等^[18]采用

基金项目:国家自然科学基金(No. 20490220)和 973 项目(No. 2003CB615604);

作者简介:杨健茂(1971—), 男, 复旦大学博士研究生, 主要从事介观流变学研究;

* 通讯联系人; Tel: 021-65643836, E-mail: yuanzexu@fudan.edu.cn.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

了微分的方法来确定液滴边缘,可以更明确地辨别研究对象的边缘,仪器控制更精确,而且增加了观测液滴侧面形态的相机,用以研究三维变形。

2 四辊流变仪的结构

四辊流变仪主要分为样品池、光学系统、转动控制系统、微机 and 软件等部分,其中最重要的是样品池和软件,示意图(见图 1):

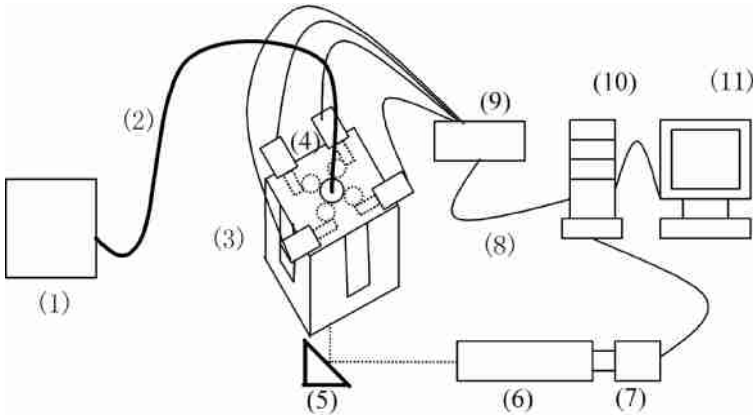


图 1 四辊流变仪示意图

(1) 光源;(2) 光纤;(3) 样品池;(4) 步进马达;(5) 反光镜;(6) 透镜组;(7) 数码相机;(8) 电缆;(9) 马达控制器;(10) 计算机;(11) 显示器

Figure 1 The schematic illustration of four roll mill: (1) light source; (2) light fiber; (3) sample chamber; (4) step motors; (5) reflecting mirror; (6) lens; (7) digital camera; (9) motor controller; (10) computer; (11) monitor

2.1 样品池

样品池的横截面可以是圆形也可以是正方形。作者使用的样品池为一个立方体,由六块金属板组成,板内有互通的管道供恒温用的循环液体流动,以消除环境因素的影响,可在不同温度下进行实验,增强了仪器的适用性,还可以把研究对象扩展到熔体。侧面的四块金属板的中间都镶嵌一块玻璃,便于直接观察流场内液滴的位置,或用数码相机和图像采集卡在计算机显示器上成像跟踪流场内的情况。样品池内均匀分布了四个可转动的竖直辊子(见图 2),由辊子的不同转动方式产生不同速度、旋度从无穷大到零的一系列旋转、拉伸、剪切等多种流场,使悬浮在液态基质中的小液滴发生形变、松弛、破裂、聚并等流变现象。样品池固定在一块由四根柱子支撑的平板上,柱子和光学系统中的反射镜、成像系统一起固定在防震平台上。

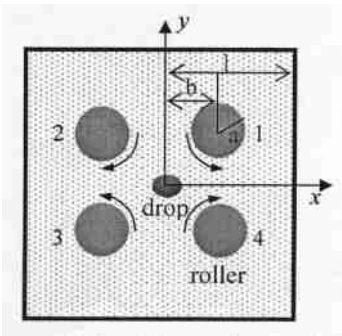


图 2.1 俯视图

Figure 2.1 Top view

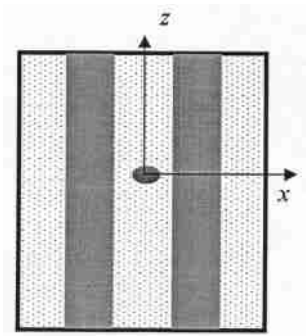


图 2.2 侧面图

Figure 2.2 Side view

辊子的长度要足够长,液滴所在位置的流场才能不受上下面板的影响,也可在辊子两端加上半径为 b 的薄片来消除末端效应^[19]。辊子之间的距离决定了液滴的最大拉伸比,应根据研究对象和目的,样品池的大小来决定,不能随意设定辊子间的距离。若辊子的半径为 a ,两个辊子中心间的距离为 $2b$,样品池的宽度为 $2l$,离样品池几何中心的距离为 x ,Higdon 经数值计算得出 $a/b=0.625$ 且 $l/b \geq 3.0$ 时,所产生的流场最近似于纯拉伸流场, $x/b \leq 0.5$ 的范围内拉伸速率保持常数,误差不超过 1%。他还对 Rumscheidt 和 Mason, Fuller, Bentley 和 Leal, Talor 等制作的样品池中 a/b , l/b 值作了比较,最优的配置为 $a/b=0.625$, $l/b=3.05$ 。Bentley 和 Leal 制作了可以调整 l 和 b 值的样品池,辊子间距可在一定范围内变化^[20]。因为粒子或液滴的尺度与整个流场相比很小,对研究对象来说可近似认为流场是线性的。优良的控制能够做到既使液滴或粒子保持在流场中心的停滞点上,同时又保证剪切速率和旋度与应变速率的比值不变。

Andreotti 等采用圆形样品池以避免方形样品池的四角环流,简化流场,并且在四个辊子与圆形样品池壁最靠近处加了四个楔子,阻止了 Couette 结构的产生^[19]。

2.2 光学系统

光学系统由冷光源、光纤、反射镜、透镜组和数码相机组成。样品池在实验过程中一直被照亮,为避免温度的变化应采用能调节光强的冷光源。光源发出的光线经过光纤从流场的上方穿过样品池中的液体照到反射镜上,反射后进入透镜组,最后到达数码相机成像,经图像采集卡转换后输出到显示器上呈现出来便于观察和控制流场中液滴的位置。反射镜的作用在于改变光线传播方向,降低仪器高度。实验对象的尺寸下限由变焦透镜组和相机的分辨率决定,本实验室的仪器可以在弱流场中观察 $10\mu\text{m}$ 大小的目标。

光学系统的矫正很重要,如果光线是倾斜的,相机拍到的图像就不是液滴的水平截面的形状,对液滴的形变的测量就不准确,由形变计算出的所有物理量如:表面张力等都会出现较大的误差。

2.3 四辊转动控制系统

流场中形变速率的稳定性由四辊传动系统的机械精度决定。四个辊子转动的动力来自固定在样品池上与步进控制器相连的四个马达。马达转动轴上的齿轮和辊子上端的齿轮相啮合。由实验软件设定流场类型和持续时间,软件再转换为流经四个步进马达电流的通断、大小和变化方式来控制辊子的转动,产生相应的流场。可通过软件任意设定多种流动速率,产生稳态的或阶跃的拉伸、剪切、旋转等流场,也可产生由预设的时间的函数所决定的流场。实验时,计算机先拍摄一帧液滴的画面,计算液滴质心的位置,根据操作者所设定的流场控制四个辊子的运转,若液滴位置发生改变,计算机根据液滴位置调整马达的速度,在实验结束前一直重复这个过程,悬浮的液滴始终被控制在流场的中心,而不会很快移动到视野之外,这样可以方便地在各种流场下对液滴加以观察和测量。本实验室仪器可设定的形变速率在 $8.73 \times 10^{-6} \sim 8.73 \text{ s}^{-1}$ 之间。

2.4 计算机和软件

计算机既有输出图像、数据的作用,又有运行实验软件、控制悬浮液滴运动和流场变化。软件的作用在四辊流变仪的应用中是至关重要的,液滴的观测、流场的控制、数据的记录与处理等都依赖于软件。例如:根据图像中液滴的直径可转换成实际直径,设定实验初始条件和实验过程,以及根据液滴位置的实时反馈控制液滴位于流场的中心等。跟踪液滴的技术有微分边缘检测方法和等值线算法,前者较为先进。

3 理论基础

四辊流变仪样品池中的线性二维流场的速度梯度张量写为

$$L = \frac{G}{2} \begin{bmatrix} 1+\alpha & 1-\alpha & 0 \\ -1+\alpha & -1-\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (-1 \leq \alpha \leq 1) \quad (1)$$

式中: G —标量速度梯度或流场强度; α —流场类型。

流场的旋度分量与应变速率分量之比为 $(1-\alpha)/(1+\alpha)$ 。 $\alpha=1$ 表示平面拉伸流场； $\alpha=0$ 表示简单剪切流场，在速度分量旋转 45° 后与通常定义的简单剪切流场相同； $\alpha=-1$ 表示纯旋转流场；对于流场因子 α 在这些特殊值之间时，就产生由纯旋转到无旋的纯拉伸之间的复合流动类型^[21]。

流场中各点的速度是速度梯度与到坐标原点的距离的乘积，所以

$$u = (G/2)/[(1+\alpha)x + (1-\alpha)y]$$

(2)

$$v = -(G/2)/[(1-\alpha)x + (1+\alpha)y]$$

(3)

$$w = 0$$

(4)

u 为 x 轴方向速度， v 为 y 轴方向的速度， w 为 z 轴方向的速度。

四辊流变仪所产生的拉伸流场中的流线呈双曲线型，由方程(5)确定。

$$(x+y)^2 - \alpha(x-y)^2 = c^2$$

(5)

当 α 在 0 和 1 之间时，形成的混合流场的流线与水平方向的夹角由下式确定：

$$\sin(2\theta_e) = \frac{\alpha-1}{\alpha+1}$$

(6)

形成剪切流场时流线与水平方向的夹角为 -45° ，当 α 分别等于 0.8, 0.6, 0.4, 0.2 时，流线与水平方向的夹角分别为 $-3.2^\circ, -7.2^\circ, -12.7^\circ, -20.9^\circ$ 。

成功的四辊流变仪实验要求研究对象尽可能保持在样品池中心的停滞点(非平衡位置)上，做尽量小的改变和调整使其尽量接近仪器中心，这就要求调整后的流场有把研究对象移动到原来位置的能力。设编号为 1、2、3、4 的四个辊子(见图 2.1)的角速度分别为 $\omega_1、\omega_2、\omega_3、\omega_4$ 。形成剪切流场时，只要 ω_1 和 ω_3 的总和不变，流场的剪切速率就不变。流场类型由 $-\frac{\omega_2+\omega_4}{\omega_1+\omega_3}$ 来决定(见图 3)^[15]。流场中实际停滞点的位置为 $(\frac{\omega_3}{\omega_1}, \frac{\omega_4}{\omega_2})$ ，若停滞点发生偏离，唯一的控制方法就是通过调整辊子的转速来改变流场(速率和流动类型等)。

当 $\alpha=1$ 时，停滞点向左偏离只需相对增大右边一对辊子的速度即可；当 $0<\alpha<1$ 时，停滞点偏离样品池中心后，自动反馈控制系统就要调整处于对角的辊子的相对速度，但保持处于对角的两对辊子的速度总和的比不变，这样既可以使停滞点回到样品池中心，又可以保持流场的性质不变。偏离样品池几何中心 0.02cm，辊子的转速改变不超过 2%。由图 4^[15]可知，只要对角的两个辊子的速率之和不变，流场强度不变，且流场类型与辊子的速率之和无关。

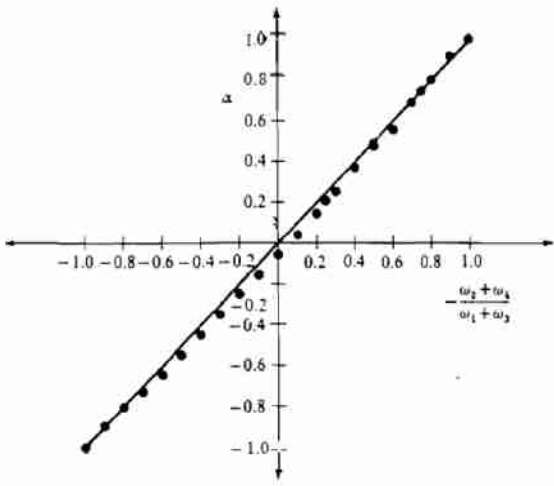


图 3 四辊流变仪中辊子速度比与流场类型的关系

Figure 3 The flow type versus the speed ratio of crossover pair rollers

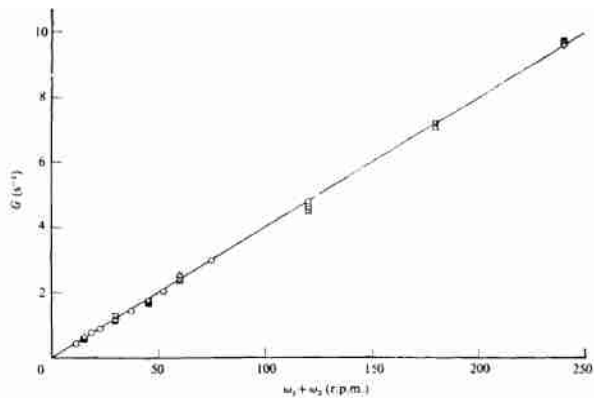


图 4 剪切速率与转动较快一对辊子的转速的关系
○, $\alpha=1$; $\triangle$, $\alpha=0.75$; $\square$, $\alpha=0.5$; ∇ , $\alpha=0.45$ 。
Figure 4 Measured shear rate vs. speed of fastest pair of rollers.
○, $\alpha=1$; $\triangle$, $\alpha=0.75$; $\square$, $\alpha=0.5$; ∇ , $\alpha=0.45$ 。

Lagnado 等^[22]对四辊流变仪产生的线性流场的稳定性进行了理论分析,发现 $0 \leq \alpha \leq 1$ 时流动对于无限小周期性扰动是稳定的,并得到了关联扰动波矢 λ 与稳态流动形变速率、运动粘度 ν 和流动类型的稳定标准。除了 $\alpha=0$ 且扰动波矢等于 0 时和 $0 < \alpha \leq 1$, $(-1 + \alpha^{0.5}) \lambda_1 + (1 + \alpha^{0.5}) \lambda_2 = 0$ 且 $\lambda_3 < (G \alpha^{0.5} / \nu)^{0.5}$ 时流场是不稳定的,其余情况都是稳定的。Andreotti 等认为流场的 Reynolds 数小于 17 时,流场是稳定的;大于 17 时,在辊子中间区域竖直方向形成方向交替的旋涡^[19]。

最常用的是拉伸流场和剪切流场。四个辊子的角速度都相同,对角两个辊子的转动方向相同与另外一对相反,形成的是拉伸流场, $\alpha=1$, 属于强流场,没有旋转分量,也称无旋流场,液滴沿水平或竖直方向伸长,另一方向被压缩。只有 1、3 两个辊子以同方向同速率旋转时形成剪切流场,流场的方向与水平方向成 135° 或 -45° 角, $\alpha=0$, 拉伸分量与旋转分量大小相等。

Wereley 和 Gui^[23]用经过校正的粒子图像测速法(PIV)测定了四辊流变仪的拉伸流场(见图 5a),并计算出各点的速度向量(见图 5b),向量的方向即速度方向,向量的长短表示速度的大小,可以看到中流场中心速度非常小,即存在一个停滞点。

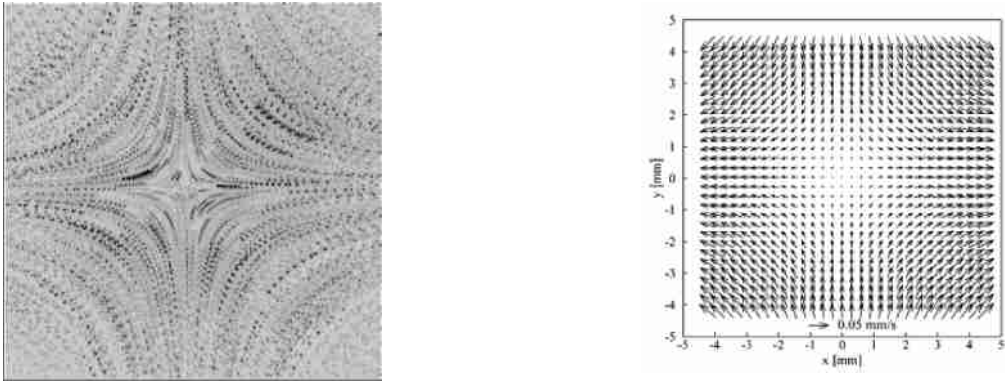


图 5 a 重叠的四辊流变仪流场的 PIV 图像 b. 四辊流变仪流场的向量图(转速 10steps/s)
Figure 5 a Overlapped PIV images (inverted) from the four-roll mill flow; b, Vector map of the four-roll mill flow at cylinder rotation speed of 10 steps/s

4 四辊流变仪的实际应用

4.1 国际上利用四辊流变仪所做研究

多种多相流体体系都可以应用四辊流变仪进行研究,较简单的是两相的粘度都不随形变速率变化的

牛顿流体,即牛顿流体液滴在牛顿基质中,若一相或两相为粘度随形变速率变化而变化的非牛顿流体,就会观察到不同的现象,进行理论解释也比较复杂,如牛顿液滴在非牛顿基质中,当 Ca 超过某个临界值后,基质的弹性越大,液滴的初始形变速率越慢,最终的形变程度会越大。非牛顿液滴在牛顿基质中以及非牛顿液滴在非牛顿基质中, Ca 较大时,液滴的弹性越大,液滴的初始形变速率越快,但最终的形变程度会下降。以前的研究对象主要是基质和液滴都是牛顿流体或分散相是非牛顿流体而基质是牛顿流体,对两相都是非牛顿流体的研究较少,对分散相是其它状态的研究更少,最近呈增多趋势。

Leal 在四辊流变仪的改进及应用方面做出了突出贡献。Bentley 和 Leal 对液滴的形变、破裂和聚并研究较多,并与小形变、大形变理论、数值计算在各种粘度比和流场类型下的对液滴形变和破裂条件作了比较。Tretheway 和 Leal^[24]发现增加介质的弹性会使液滴形变度更大,降低液滴破裂的临界毛细管数,延缓了液滴的松弛。Hu 等^[16]首次测定了液滴聚并的临界毛细管数,研究了表面活性剂对液滴形变的影响。Hu 和 Lips^[18]发明了根据液滴形变测定流体粘度的新方法,还把观察到的液滴在瞬态和稳态下的三维形状与多种形变理论作比较,发现 Maffettone 和 Minale 的二阶小形变理论与实验符合较好。并用改进后的四辊流变仪建立了估算表面活性剂在液滴表面的覆盖度的新方法,研究了表面活性剂对液滴形变的三种因素:稀释效应、末端聚集、Marangoni 效应对液滴形变的影响,并把这三种因素的作用加以分离,分别定量计算^[25]。Ha 和 Leal^[5]研究了在毛细管数大于临界毛细管数时的拉伸场中液滴的形变和破裂,发现牛顿流体的液滴在牛顿介质中的临界拉伸程度不是连续的,存在“再稳定”现象,而在粘弹介质中比在牛顿介质中更稳定。

Yang 等^[17]对二维线性流场中两个相等大小的液滴的研究表明在聚并过程中排液时间和应变速率的积不随毛细管数和液滴半径而变化。Park 等^[26]研究了分子量对聚并过程的影响,发现基质分子量的增大有利于聚并时液膜在两个液滴间的滑移,有表面活性剂存在时这种现象被抑制。Leal^[27]还发现在两个液滴正向碰撞时,一般都能聚并;如果两个液滴不是正向碰撞,稍微偏离时,聚并常常发生在它们将要被拉开时。加入表面活性剂之后,破裂变易,聚并更加困难。Baldessari 和 Leal^[28]对在单轴拉伸流场中两个大小相等相互接触的液滴的聚并过程进行了数学分析,发现液滴内部的流动速度与流场的毛细管数有关,对聚并过程没有影响。

Pignon 等^[9]把四辊流变仪与小角光散射、圆二色谱仪联用研究了硬棒状的海泡石粘土粒子在悬浮液中拉伸流场下的取向动力学。Hamberg 等^[29]认为四辊流变仪结合共聚焦激光扫描显微镜是研究蛋白质包覆的聚苯乙烯乳胶粒子团聚的有力工具。Walther 等^[11]利用四辊流变仪研究了凝胶的形成和形变,并做了解释。Bushman 等^[2]研究了由四辊流变仪产生的流场诱导的高密度聚乙烯熔体结晶行为。

由于流场会影响高分子的构象,对四辊流变仪实验的模拟和比较会对评价发展分子水平的本构方程起重要的促进作用。Feng 和 Leal^[30]利用 FENE 模型研究了四辊流变仪流场中的高分子稀溶液,如果在 Chilcott-Rallison 改进的 FENE 模型(FENE-CR)基础上考虑粘性附加应力可能会使计算结果与实验更接近。Innings 等^[31]发展了 Taylor 的静态锥形液滴形变模型,可以计算各种大小的液滴在不同拉伸速率下的形变,与四辊流变仪实验相比较符合很好。

4.2 作者所做的研究

4.2.1 水滴在环氧中的拉伸形变 用注射器注入少量水于液体环氧树脂中,形成直径为 238, 439, 731 μm 的液滴,分别施加一系列拉伸流场,然后停止,记录其形变 D ,其中直径为 238 μm 的水滴的形变如图 6 所示:

$$D = \frac{L-B}{L+B}$$

L —水滴的长轴, B —水滴的短轴。

随拉伸速率的增大,水滴的形变也增大。拉伸速率定为 100 steps/s,对于不同直径的水滴,在相同的拉伸速率下形变大小不同。直径越大的水滴形变越大。加入质量分数为 0.02% 表面活性剂聚乙二醇-双酚 A-聚乙二醇,发现与水滴有相同的规律,随拉伸速率的增大或液滴直径的增大,形变增大。但与水相比增大更明显^[32]。

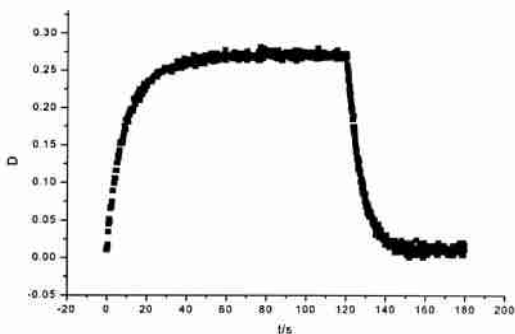


图 6 水滴在环氧中的形变曲线

Figure 6 The deformation curve of water drop in epoxy

4.2.2 液滴的破裂和聚并过程 作者曾利用组装的四辊流变仪研究水滴在环氧中的破裂情况,对理解相反转的机理起到了帮助作用,图 7 是实验观察到的聚异丁烯 PIB 1300 (牛顿液体)在硅油 PDMS 12500 (牛顿液体)中的破裂过程,与水滴在环氧中的破裂过程明显不同^[32]。水滴在拉伸流场中破裂时是在两端拉出很多小水滴,而 PIB 1300 在硅油中受到拉伸时不发生破裂,拉伸停止后在液滴的收缩过程中发生破裂,生成的小液滴的数目相对较少。还对悬浮在硅油中的两个聚异丁烯液滴加以垂直方向的流场,使其在水平方向受到挤压,然后去除流场,观察聚并过程(见图 8),经过了界面膜的形成(见图 8.c),破裂(见图 8.d),聚并(见图 8.e~g)等阶段,符合牛顿液滴聚并的一般规律。

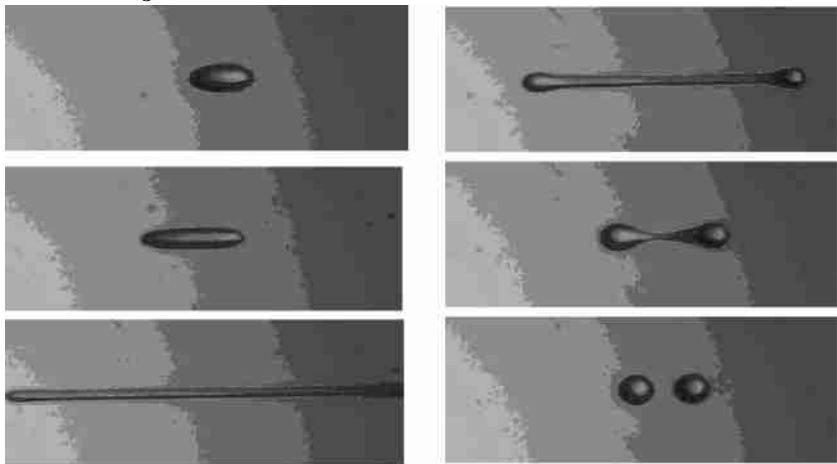


图 7 PIB 1300 液滴在 PDMS12500 中的破裂过程

Figure 7 The breakup of PIB 1300 drop suspended in PDMS 12500

4.2.3 细丝液滴现象 将高分子量(粘均 260000)聚异丁烯(PIB)溶于低分子量 PIB 中形成的具有粘弹性的非牛顿液体作为分散相,聚二甲基硅氧烷作为基质,发现粘弹液滴经反复拉伸后由于高分子量 PIB 的存在形成由细丝相连的两个液滴,形状类似哑铃,中间的细丝若直径小于 $16\ \mu\text{m}$,则在回缩过程中不断裂且直径保持不变,若细丝直径大于 $16\ \mu\text{m}$,则细丝直径在回缩时增大。这两种情况下细丝长度指数衰减,两端液滴都不经过液膜形成和破裂即可聚并,与由 Marangoni 效应和范德华力等因素造成液膜不稳定引起的完全分开的牛顿液滴的聚并过程机理不同(见图 8),且哑铃状的粘弹液滴一定能聚并,故两者聚并几率也不同。在聚并过程中熵弹力、Laplace 力和粘性阻力达到平衡,提出的细丝牵动的粘弹液滴模型基本与实验相符^[33]。这一现象对分散相的分散及粒径分布有重要影响。

5 四辊流变仪的优缺点

常规的流变仪往往需要机械传感器来测定力矩或压力降,必须精确地校正这些传感器,测量时所用

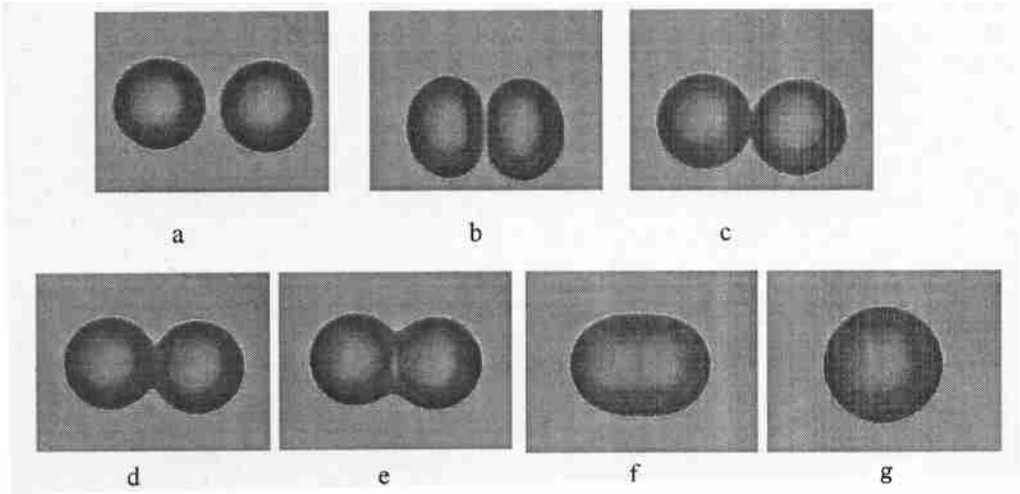


图 8 PIB 1300 液滴在 PDMS 12500 中的聚并过程
Figure 8 The coalescence of PIB 1300 drop suspended in PDMS 12500

的样品的量一般也比较大,而四辊流变仪测量时不是用机械传感器而是用液滴的图像,它是一种光流变方法,在样品量很少时和机械流变仪相比更不容易产生误差。据我们所知,现在还没有一种常规流变仪测量液体的粘度时只用微升级的样品,而这台四辊流变仪则可测量体积为纳升的小液滴的粘度和小液滴与悬浮液之间的表面张力。和 Taylor 发明的四辊流变仪相比,经 Bentley 和 Leal 改进后,不管流场是稳态的或是随时间变化的都能自动把研究对象停留在停滞点上,而对当初的四辊流变仪来说这是不容易做到的。由于停滞点的存在,四辊流变仪可以方便地研究粒子的旋转、取向,液滴的形变、破裂、聚并,以及粒子间、液滴间的相互作用。和正交流变仪相比,四辊流变仪能够产生强流场^[34],研究的粘度比和旋度与形变速率比的范围都很宽,而正交流变仪只能产生旋度大于形变的弱流场,用于研究液滴的小形变。

四辊流变仪的不足之处在于样品池中存在轻微的次级流动,流场中 Reynolds 数较大时有旋涡出现。液滴和基质的密度不可能总是完全一样,所以液滴在实验过程中会向上或向下移动位置。由于研究对象一般很小,这两个问题比较轻微。在测定 100 μm 以下的对象时为了使对象边缘清晰,放大倍数较高,由震动引起的对象位置的变化就比较明显。通过在马达与样品池之间加上橡胶垫,将光学系统和样品池部分放在防震台上或在基质液体下放一薄层水银^[2]等方法,震动可以明显消除。

四辊流变仪对多相复杂流体的研究有独特的应用价值,随着科技的发展,其缺点会被逐步克服,在探索新知的过程中发挥更大的作用。

参考文献:

[1] Sasaki N. Seibutsu Butsuri, 2003, 43(5): 223~227.
[2] Bushman A C, McHugh A J. J Appl Polym Sci, 1997, 64: 2165~2176.
[3] Leal L G. Phys Fluids, 2004, 16(6): 1883~1851.
[4] Hu Y T, Lips A. J Rheol, 2003, 47(2): 349~369.
[5] Ha J W, Leal L G. Phys Fluids, 2001, 13(6): 1568~1576.
[6] Hayakawa I, Sasaki N, Hikichi, et al. J Appl Polym Sci, 1995, 56(6): 661~665.
[7] Lee E C, Muller S J. Macromolecules, 1999, 32(10): 3295~3305.
[8] Rahnama M, Koch D L, Cohen C. Phys Fluids, 1995, 7(8): 1811~1817.
[9] Pignon F, Magnin A, Piau J M, et al. J Rheol, 2003, 47(2): 371~388.
[10] Chang K S, Olbricht W L. J Fluid Mech, 1993, 250: 587~608.
[11] Walther B, Walkenstrom P, Hermansson A M. Food Hydrocolloids, 2002, 16: 633~643.
[12] Forest M G, Wang Q, Zhou R H, et al. J Non-Newtonian Fluid Mech., 2004, 118: 17~31.
[13] Maruyama T, Friedenber M, Fuller G G, et al. Thin Solid Films, 1996, 273: 76~83.
[14] Taylor G I. Proc Roy Soc London Ser A, 1934, 146: 501~523.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

- [15] Bentley B J, Leal L G. J Fluid Mech, 1986, 167; 219~240.
- [16] Hu Y T, Pine D J, Leal L G. Phys Fluids, 2000, 12(3); 484~489.
- [17] Yang H, Park C C, Hu Y T, et al. Phys Fluids 2001, 13; 1087~1106.
- [18] Hu Y T, Lips A. J Rheol, 2001, 45(6); 1453~1463.
- [19] Andreotti B, Douady S, Couder Y. J Fluid Mech, 2001, 444; 151~174.
- [20] Higdon J J L. Phys Fluids A, 1993, 5(1); 274~276.
- [21] 周持兴, 俞炜. 聚合物加工理论. 北京: 科学出版社. 2004, 169.
- [22] Lagnado R R, Phan-Thien N, Leal L G. Phys Fluids, 1984, 27(5); 1094~1101.
- [23] Wereley S T, Gui L. Exp Fluids, 2003, 34; 42~51.
- [24] Tretheway D C, Leal L G. J Non-Newtonian Fluid Mech, 2001, 99; 81~108.
- [25] Hu Y T, Lips A. Phys Rev Lett, 2003, 91(4); 044501-1~4.
- [26] Park C C, Baldessari F, Leal L G. J Rheol, 2003, 47(4); 911~942.
- [27] Leal L G. Studies of droplet coalescence and breakup with application to polymer blending. in PRCR⁴. 2005. Shanghai; Science Press USA Inc.
- [28] Baldessari F, Leal L G. J Colloid Interf Sci, 2005, 289; 262~270.
- [29] Hamberg L, Walkenström P, Stading M, et al. Food Hydrocolloids, 2001, 15; 139~151.
- [30] Feng J, Leal L G. J Non-Newtonian Fluid Mech, 1997, 72; 187~218.
- [31] Innings F, Hamberg L, Traegardh C. Chem Eng Sci, 2005, 60; 4771 ~ 4779.
- [32] Xu Y Z, Wu Y Z, and Yang J M. Chinese J Polym Sci, 2006, 24(2); 155~161.
- [33] 杨健茂, 许元泽. 细丝牵动的粘弹液滴的聚并过程. in 流变学进展 2006. 济南: 2006.
- [34] Bentley B J, Leal L G. J Fluid Mech, 1986, 167; 241~283.

The Meso-scale Investigation of Multiphase Fluids ——Four-roll Mill and its Application

YANG Jian-mao¹, XU Yuan-ze^{1*}, HU Yun-tao²

(1. Department of Macromolecular science, Fudan University, The Key Laboratory of Molecular Engineering of Polymers of Ministry of Education Shanghai 200433, China;

2. Unilever research & development, 40 Merritt Boulevard, Trumbull, Connecticut US 06611)

Abstract: The research of the rheology of multiphase complex fluids needs the information of basic mechanic process. Four-roll mill, able to generate Variety flow fields such as rotation, shear, extension and having a stagnation point at the centre of flow field, is suitable to research the deformation, breakup and coalescence of a drop immiscible with matrix or the rheological properties of complex fluids composed of fibers, solid particles, liquid crystal etc and liquids. The application scope of four-roll mill can be extended by combining with other instruments. In this paper, the development, theory basis, main components, application of four roll mill and the main work done with it are presented. Compared with other rheological apparatus, its merits and shortcomings were summarized at this paper end.

Key words: Complex fluid; Meso-scale; Four-roll mill; Component; Application