

使用旋转流变仪，利用法向力测试，评估沐浴露的非线性粘弹性效应

文件编号: AN 165

简介

粘弹性材料的变形伴随着三个方向的尺寸变化，可以通过 3x3 张量进行描述（见图 1）。

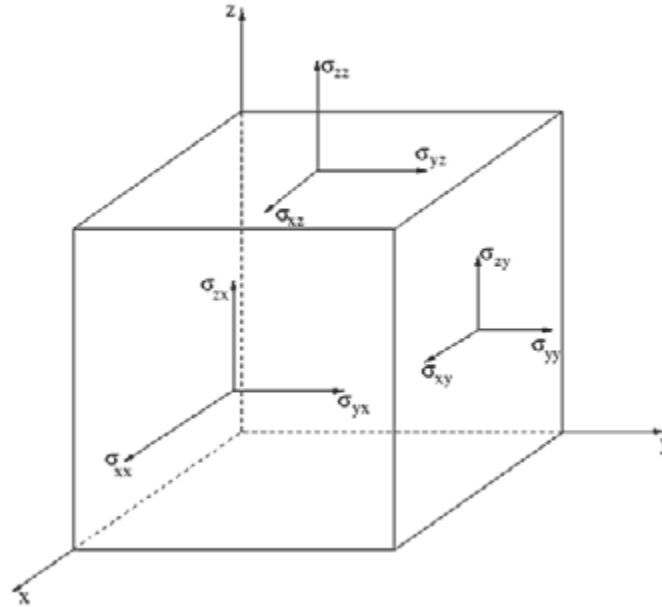


图 1、由 3x3 张量描述的三维形变

这一张量包含 3 个法向应力（又称正应力） $\sigma_{xx}$ 、 $\sigma_{yy}$ 、 $\sigma_{zz}$ ，另外 6 个分量是剪切应力。在粘性行为主导（如流体流动）的情况下，则只有一个剪切应力分量，其他分量可以忽略不计。

第一法向应力差可以定义为：

$$N_1 = \sigma_{XX} - \sigma_{YY}$$

其中  $\sigma_{xx}$  代表与加载的剪切力方向平行的正应力。 $\sigma_{yy}$  代表与剪切平面垂直方向上的正应力，即流变测试中沿轴向向上作用在夹具与轴承上的力。与剪切应力相比，法向应力差对剪切速率的依赖性通常更大，随剪切速率增大而显著增大。

除了  $N_1$ ，还可以定义第一法向应力系数如下：

$$\psi_1 = \frac{N_1}{\dot{\gamma}^2}$$

该值随剪切速率  $\dot{\gamma}$  的变化规律与表观粘度相似，可以认为是粘度对应的粘弹性。

法向应力差与非线性效应相关，这是在流动状态下材料内部微观结构变成各向异性的结果。法向流变效应有 Weissenberg 效应（即爬杆效应），口模膨胀效应，挤出后膨胀效应等。

许多产品，包括聚合物熔体、溶液、表面活性剂体系和乳液，都会表现出法向应力。多数情况下，法向应力为正，少数情况下也有负应力报道，如层状凝胶。

正确测量第一法向应力差的最优夹具为锥板系统，因为这种模式下样品受到的剪切速率处处一致，沿夹具轴向上的力仅与  $N_1$  相关。

## 实验

- 本应用案例分析了沐浴露的非线性粘弹性行为。
- 使用 Kinexus 流变仪 + Peltier 板盒 + 锥板测量系统，进行了旋转流变测量，在 rSpace 软件中调用了标准预配置的测试程序。
- 使用标准的装样序列，以确保样品遵循一致且可控的装样方法。
- 所有流变测量均在 25°C 下进行。
- 使用剪切速率在  $0.1 \dots 1000 \text{ s}^{-1}$  范围内的平衡表，获取了流动曲线，并测定了法向力。

## 结果与讨论

图 2 显示了沐浴露的粘性剪切速率曲线。这一产品可归类为剪切致稀液体，因为它在低剪切速率下显示了牛顿行为，随后在超出一定的临界剪切速率时粘度曲线出现快速下降。在这一临界速率之上，出现法向力的明显增大，由对形变结构的拉伸导致的非线性粘弹性行为所致。

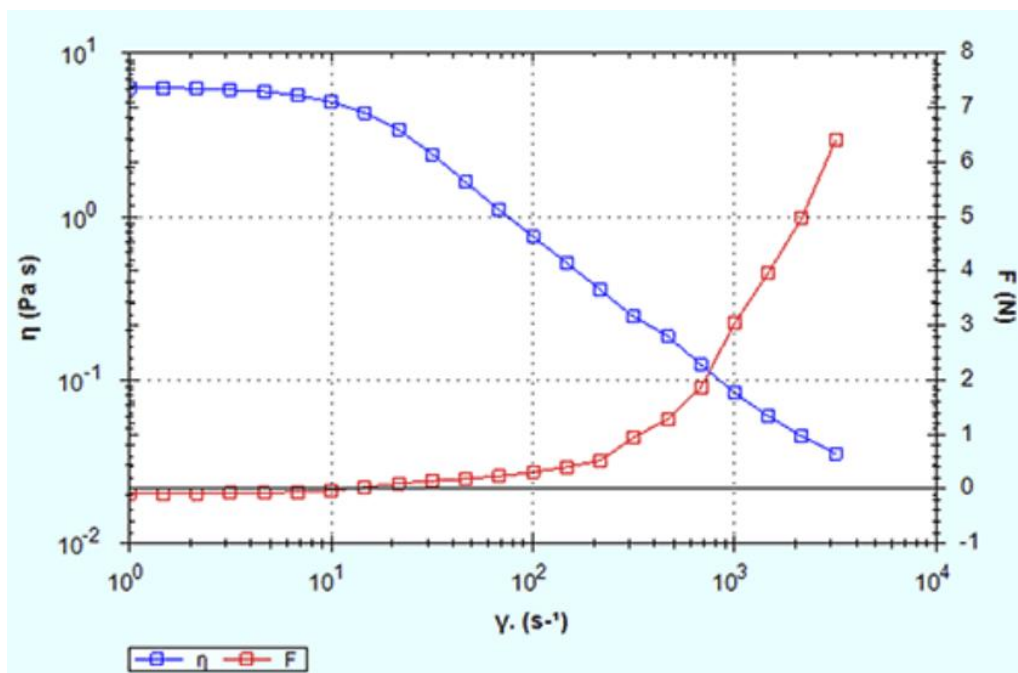


图2、剪切粘度与法向力作为剪切速率的函数

当在图 3 中对剪切应力与法向应力进行直接比较时，这一点变得更加明显。在剪切应力趋于恒定的点上，法向应力超越了剪切应力。这与弹性主导的流动行为相关，并解释了为什么表面活性剂结构的沐浴露在使用过程中显得更为“高弹性”与“稠丝状”。最终，这一弹性主导的行为将导致在高剪切速率下的流动不稳定性，样品将爬出上下板之间的间隙。

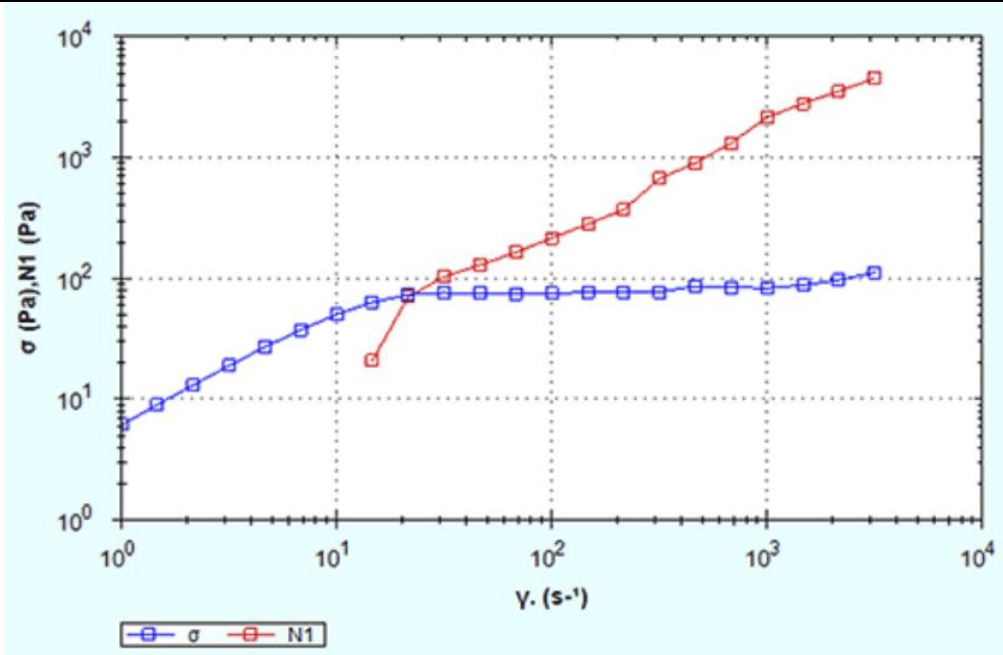


图3、剪切应力与法向力作为剪切速率的函数

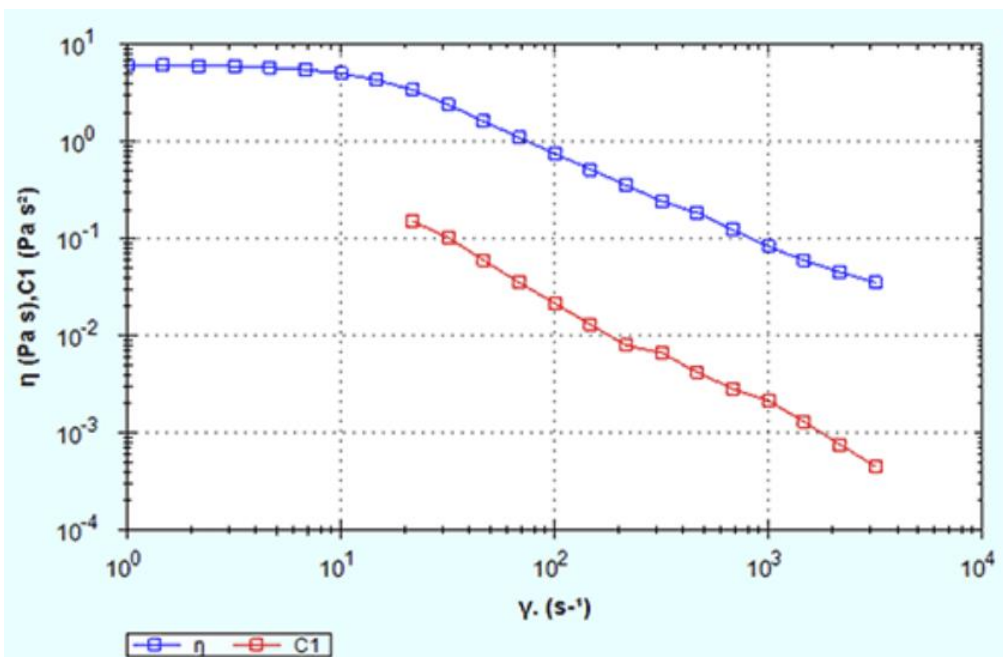


图4、剪切粘度与第一法向应力系数作为剪切速率的函数

## 结论

非牛顿材料的非线性粘弹性行为可以通过使用锥板测量系统、测量法向力随剪切速率的函数关系来获取。可以计算等效于剪切应力与剪切粘度的第一法向应力差与第一法向应力系数。

注意：该测试必须使用锥板测量系统进行。

## 参考文献

[1] An introduction to Rheology – Barnes