

研究背景

界面的膨胀或扩张流变描述了界面如何对面积变化（增加或减小）做出响应。该反应可以是弹性的，也可以是粘性的。通过震荡滴方法，可以相应的得到界面流变的参数，即量粘弹性模量 E ，弹性模量 E' 和粘性模量 E'' [1, 2]。

实验方法

2.1 样品

用三种不同的样品进行测试，这些样品在测量之前已经根据用途准备成水溶液（表 1）。这三个样品都是食品中典型的表面活性添加剂。水解蛋白可用作增味剂，且适用于过敏患者。Quillaia 提取物用于非酒精饮料中，以支撑泡沫特性，而甘露酸丙二醇酯作为增稠剂，乳化剂或泡沫增强剂存在于雪糕，调味料或啤酒中。

样品	原料	浓度
1	水解蛋白	20%
2	Quillaia 提取物 (E 999)	1%
3	甘露酸丙二醇酯 (E 405)	2%

表1 实验样品及浓度

2.2 测试方法

振荡滴法用于确定量粘弹性模量 E ，弹性模量 E' 和粘性模量 E'' 。将样品吸进玻璃注射器中，与 DSA100 的振荡液滴模块 ODM 相连接。注射器活塞的自动检测和耦合以及 ADVANCE 软件的高度自动化，可以实现高精度和出色的测量重复性。注射器下方悬挂一个特定体积的液滴，通过压电陶瓷的方式，对液滴体积进行正弦振荡，由于液滴中表面活性剂的迁移，液滴的表面张力也随之呈现正弦变化（图 1）。根据表面张力，液滴面积的变化，以及相位角，即可计算出 E , E' 和 E'' ，所有这些都是使用 ADVANCE 软件自动完成的。

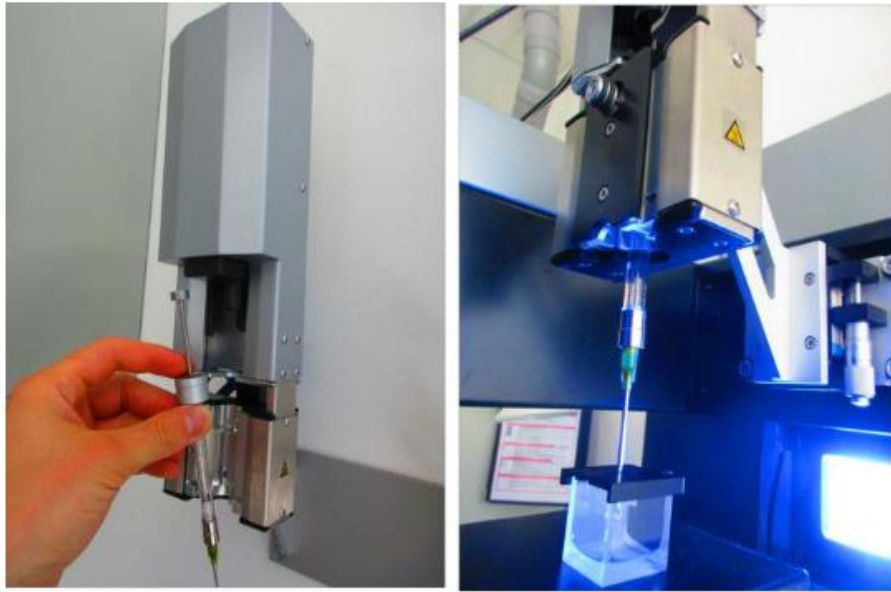


图1: DSA100 振荡滴模块 ODM 的实验装置。左: 装入液体的注射器插入模块中。右: 固定注射器后即可开始测量。

在 0.5、1.0 和 3.0 Hz 的频率以及 3.6% 和 4.8% 的振幅（相对于初始区域的变形）下进行测量（数据未显示）。诸如此类的频率和幅度变化以前很复杂，现在可以借助 ADVANCE 软件轻松设置。每个液滴执行十个连续的振荡周期，并用于评估。

结果

3 个样品测得的平衡时表面张力值分别为 37.8、35.5 和 53.4 mN/m。图 2 展示了振荡过程中样品 1 液滴面积和表面张力正弦变化过程。ADVANCE 软件可以直观的查看原始数据（蓝色），以及面积（黄色）和表面张力（蓝色）曲线。

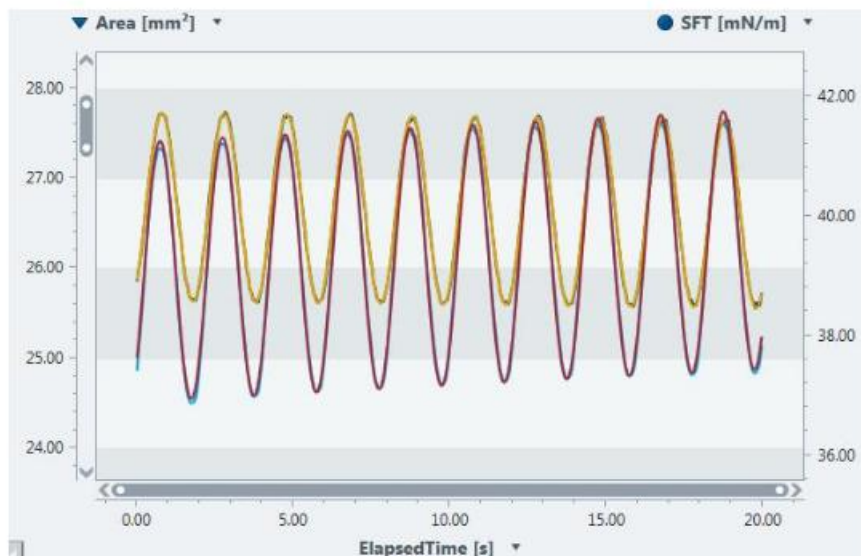


图2: 样品 1 的面积振荡曲线（深蓝色）和得到的表面张力（浅蓝色），频率为 0.5 Hz，频率幅度为 3.6%。还显示了优化后的正弦函数（面积曲线为黄色，表面张力为红色）。

图 3a 和 3b 显示了 3 个样品的弹性模量 E' 和粘性模量 E'' 。误差条对应于两次测量的标准偏差，并且在大多数情况下小于相应的符号。ODM 及其测量的高度自动化程度表明了这种高水平的可重复性。

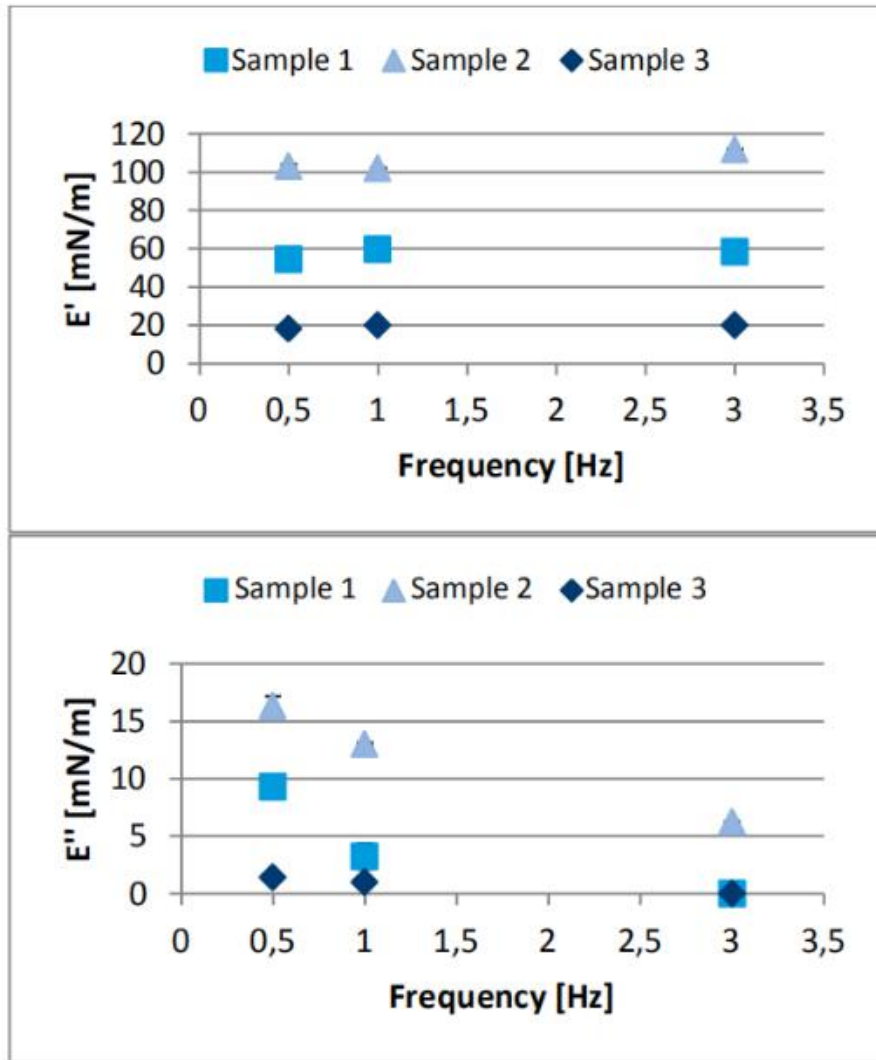


图3a (上), 3b (下): 所有三个样品的弹性模量 E' 和粘性模量 E'' 与振动频率的关系。表面形变幅度为 $3.6 \pm 0.4\%$ 。

在所有三个样品中，弹性部分主导了界面流变行为（ $E' \gg E''$ ）。在不同的频率下，每个样品的弹性模量变化较小，但是它们彼此之间结果差别很大，其中样品 2 弹性模量最大，约 100 mN/m。样品 3 的弹性模量最小，约 20 mN/m。随着频率的增加，3 个样品的粘性模量 E'' 均有所降低。

测试结果对于食品生产过程非常有意义。例如样品 2，可根据弹性模量 E' 和表面张力计算出比值 $E'/\sigma = 2.8$ ，根据 Kloek 等人的模型，如果 $E'/\sigma > 1$ ，泡沫中初始气泡尺寸的分布非常稳定，并且奥斯特瓦尔德熟化的分解过程可以减缓或甚至停止。样品 2，具有高 E'/σ 的物质非常适合于稳定食品工业中的泡沫。

最后，值得注意的是，这里提到的所有测量都是在大约两个半小时的时间内进行的。现在，能够快速，轻松且高精度地确定这些关键指标的仪器，正在为研究界面流变学的用户打开大门。

总结

经过测试，三种乳化剂的弹性模量 E' 差别较大，范围在 20-110 mN/m 之间。通过新型振荡滴模块（ODM）与 ADVANCE 软件相结合，可以轻松、快速和准确地测定这些关键参数。频率和振幅范围内简单直观地测量，以及软硬件结合实现的高度自动化，可以用来全面表征界面性质而不仅局限于食品工业中。

参考文献：

- [1] F. Thomsen, Stretching exercises for drops, KRÜSS application report AR246, 2005.
- [2] G. Schwinn, Characterization of liquid foams KRÜSS application report AR249, 2005.