

应用报告

应用报告: AR299
 行业分类: 个人护理
 作者: Fiona Mary Antony, Stefan Benn,
 Daniel Frese
 日期: 2025 年 4 月



方法:



动态泡沫分析仪 – DFA100FSM

关键词:

洗发水、个人护理、起泡性、泡沫稳定性、泡沫结构

优化洗发水泡沫分析：测量技术的比较研究

评估气流发泡法、Foam Flash 及改良型 Foam Flash 的有效性

泡沫是洗发水配方的一项关键属性，既是清洁过程中的功能性要素，也是决定消费者满意度的关键因素。虽然洗发水的主要作用是去除皮脂、污垢和造型残留物，但感官体验——尤其是泡沫的质量——对用户的感知有着深远的影响。丰富、稳定的泡沫通常被视为功效的体现，这推动了市场对泡沫性能稳定产品的需求。然而，分析泡沫行为颇具挑战性，因为泡沫高度、稳定性和气泡结构等特性会受到表面活性剂化学性质、稳定剂以及应用动力学的影响。

能够控制起泡行为对于开发兼具理想感官特性和有效清洁性能的洗发水至关重要。本研究利用动态泡沫分析仪（DFA100）对四种不同的洗发水配方进行了起泡行为研究。研究旨在评估不同的起泡生成方法，并确定其在表征泡沫高度、结构、稳定性和排水行为方面的有效性。本研究获得的见解有助于配方优化和产品性能的提升。



背景

现代洗发水的演变始于 20 世纪初，1927 年推出了液体配方，20 世纪 30 年代又出现了合成表面活性剂。这些创新为先进配方奠定了基础，例如 20 世纪 80 年代的硅酮护发洗发水，它将清洁功效与顺滑秀发功效相结合。如今，洗发水配方种类繁多，从基础清洁剂到富含护发剂、蛋白质、维生素及专用活性成分的多功能产品应有尽有。尽管成分各异，但所有洗发水都必须满足核心性能标准，包括高效起泡、彻底冲洗，以及让头发触感柔软、易于打理。

泡沫作为气体气泡在液体基质中的分散体系，是影响洗发水性能和消费者感知的关键属性。泡沫的形成由表面活性剂主导——这些两亲性分子吸附在气液界面，降低表面张力，并促进气液界面的稳定。主要表面活性剂（如月桂醇硫酸钠（SLS））通过乳化油脂发挥清洁功效，而次级表面活性剂（如椰油酰胺丙基甜菜碱）和泡沫稳定剂则能改善泡沫的质地、密度和持久性。这些成分协同作用，产生丰富、稳定的泡沫，消费者通常将此与卓

越的清洁效果和产品品质联系在一起。尽管泡沫本质上是短暂的——因为洗发水泡沫只需在使用过程中保持稳定——但其结构和稳定性对用户满意度有着显著影响。

泡沫的稳定性取决于界面性质和胶体动力学。由于其固有的高界面自由能，泡沫在热力学上是不稳定的，会通过液体渗出（液体受重力驱动从泡沫中流出）、气泡聚并（气泡合并）以及气相不均化（气体从较小气泡向较大气泡扩散）等过程而消散。关键参数包括排水半衰期（液体从泡沫中排出半数所需的时间）和平均气泡尺寸（衡量气泡粗化和结构完整性的指标），这些参数是泡沫稳定性的定量指标。尺寸均匀、更细小的气泡可提高泡沫密度并增强其丝滑感，而液体快速排出和气泡过度增长则表明泡沫稳定性较差。借助 KRÜSS 动态泡沫分析仪（DFA100）等先进分析技术，可通过模拟实际使用中的搅动过程，并采集泡沫高度、体积及衰减动力学的时间分辨数据，对泡沫行为进行精确表征。高速成像与图像分析技术进一步深入揭示了泡沫形态特征，生成的气泡尺寸分布直方图将配方成分与泡沫质量联系起来。

配方科学与消费者感知之间的相互作用，凸显了泡沫分析在洗发水开发中的重要性。

实验部分

选取四份洗发水样品（标记为样品 1 至样品 4），使用 KRÜSS 动态泡沫分析仪——DFA100 进行分析。采用了三种不同的方法——气流发泡法、Foam Flash 以及改良型 Foam Flash——以确定区分泡沫特性的最佳方法。每项实验均在 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温条件下进行，并在 30 分钟内实时监测泡沫高度、气泡尺寸分布及液体排水情况，以评估泡沫的稳定性和结构完整性。DFA100 系统配合 ADVANCE 软件，确保了数据的准确采集。每个样品均进行两次测试，以确保结果的可重复性。

气流发泡

气流发泡法是通过多孔纸滤膜（孔径 $12\text{--}25\text{ }\mu\text{m}$ ，型号 FL4551）以受控方式通入空气来产生泡沫。将洗发水样品按 1:4（洗发水/水）的比例稀释，使样品总体积达到 50 mL，并在 CY4572 型 40 mm 棱柱形测量柱内进行混合。以 0.3 L/min 的流速通入空气，直至泵入的气体总体积达到 100 mL。

Foam Flash

“Foam Flash”是 ADVANCE 软件中提供的一种方法，该方法与搅拌模块配合使用，主要用于分析高起泡液体。该方法通过循环搅拌模拟反复搅拌的过程。

洗发水样品按 1:2 的洗发水/水比例稀释，总样品体积为 60 毫升。使用 SR4501 搅拌器以 3000 转/分钟的速度进行搅拌，共 30 个循环，每个循环包括 5 秒的搅拌，随后是 5 秒的暂停。

改良型 Foam Flash 法

改进型 Foam Flash 法旨在确保此特定任务中泡沫生成和测量的可重复性。洗发水样品按 1:2 的比例稀释，并在总容量为 60 mL 的测量柱（SH4512 + SR4501）中直接混合。均质阶段仅以 400 rpm 转速进行 15 秒，以防止过早起泡；随后以 3000 rpm 转速进行高速搅拌，以 5 秒为一个振荡周期，持续 20 秒，以诱导起泡。

结果与讨论

气流发泡法

气流发泡法在所有样品中均产生了均匀且较高的泡沫体积（约 100 mL），泡沫高度或结构上的差异极小。强力气流导致了粗大气泡的形成，且不同配方间的气泡粒径分布和均质化特性相似。虽然该方法证实所有洗发水均属于“高起泡型”并产生了大量泡沫，但其较高的气体保留率限制了对配方特异性差异的敏感性，因为在所有受测洗发水中均观察到一致的高测量值。

为进一步了解泡沫特性，对关键参数进行了分析。泡沫高度（ h_{foam} ）代表实验过程中产生的泡沫层高度，是衡量泡沫随时间推移稳定性的一项关键指标。较高的 h_{foam} 表明泡沫持久性更好，这在需要持久泡沫的应用中是理想的。液面高度（ h_{liquid} ）对应于泡沫下方残留的液相。该测量值尤为重要，因为它反映了泡沫的排水行为； h_{liquid} 的快速下降可能表明泡沫稳定性较差，这是由于液体过度排出所致。总高度（ h_{total} ）是泡沫高度与液体高度之和，可全面反映测试装置内泡沫结构的状况。综合来看，这些高度参数有助于评估不同起泡方法在区分洗发水配方方面的效率。

除了泡沫高度测量外，还通过气泡计数（BC）和平均气泡面积（MBA）来表征气泡结构。BC 代表单位面积内的气泡数量，是衡量泡沫密度的指标。较高的 BC 表明泡沫更细腻、更稳定，含有大量小气泡；而较低的 BC 则表明泡沫较粗糙，气泡数量较少但体积较大。MBA 量化了泡沫中气泡的平均大小，并有助于了解气泡随时间推移的聚合并液体的排出情况。

MBA 的持续增加通常表明泡沫不稳定，因为较小的气泡合并会形成较大的气泡，从而导致泡沫更快坍塌。通过分析这些参数，可以有效评估不同洗发水配方在泡沫结构和持久性方面的差异。

Foam Flash 法

采用“Foam Flash 法”进行循环搅拌后，所有样品的泡沫高度和衰减规律几乎完全一致，最大泡沫高度集中在较窄的范围内，排水行为的差异极小。反复的机械搅拌施加了高剪切力，通过导致气泡均匀破裂和排水，加速了泡沫坍塌并降低了其稳定性。这种强烈的搅拌“粉碎”了泡沫结构，使结果趋于均匀，并掩盖了配方本身的差异。尽管“Foam Flash 法”会引入周期性机械应力，但它仍然

是一种有价值的工具——特别是用于区分高发泡剂的起泡性能。然而，在此特定情况下，“Foam Flash 法”导致所有样品的曲线特征相似，因此对于区分这些特定的洗发水配方而言，其有效性较低。

图 1 和图 2 展示了这些趋势，分别呈现了“气流发泡法”和“Foam Flash 法”在不同时间点下泡沫稳定性、气泡动力学及液体排水的演变情况。

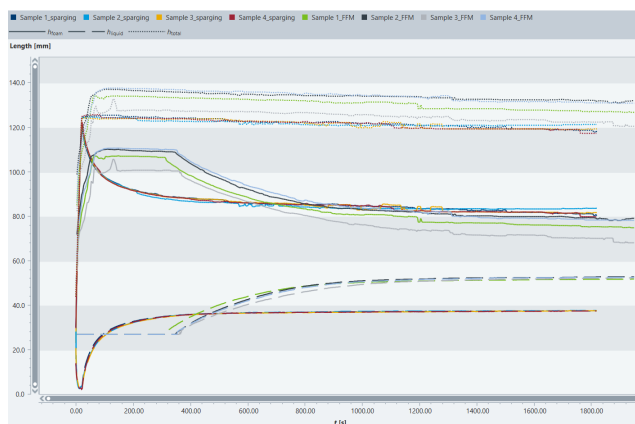


图 1：气流发泡法和 Foam Flash 法中观察到的泡沫高度趋势。

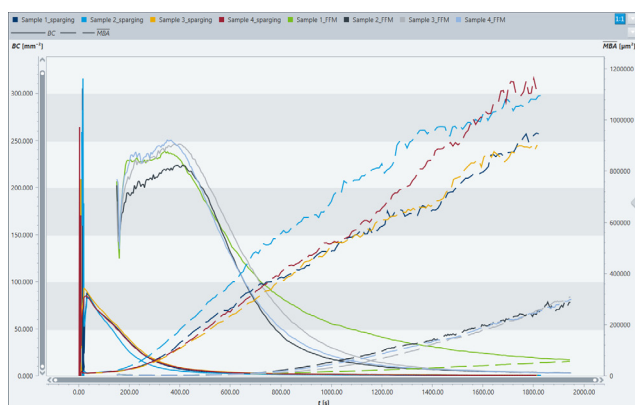


图 2：采用“气流发泡法”和“Foam Flash 法”测得的泡沫结构对比。

改良型“Foam Flash 法”

改良型“Foam Flash 法”在区分洗发水配方方面提供了最可靠的依据。样品 2 产生的泡沫最高，而样品 3 产生的泡沫最少。这种差异可归因于配方中表面活性剂浓度和聚合物添加剂的差异。

气泡尺寸分布分析表明，样品 3 起初呈现最大气泡，表明其初期起泡膨胀迅速。在 200 秒时（起泡后 160 秒）进行的结构成像证实了这些趋势：样品 2 的泡沫保持致密且均匀，而样品 3 则出现了明显的气泡合并现象。然而，10 分钟后，样品 1 和 4 展现出最稳定的泡沫结构，气泡尺寸均匀，合并现象极少。这种行为表明表面活性剂在气液界面上的排列更为优异，从而增强了泡沫的持久性。

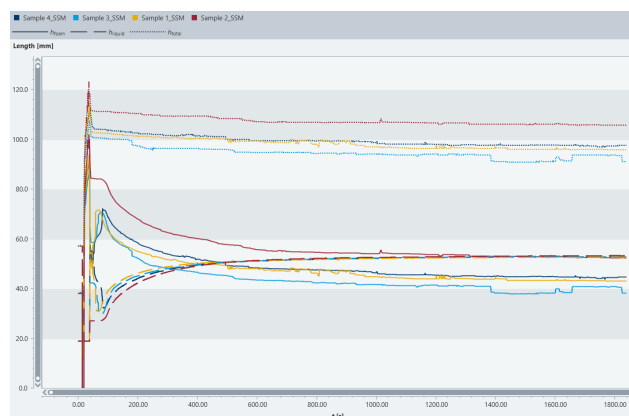


图 3：采用改良型 Foam Flash 法测得的泡沫高度对比。

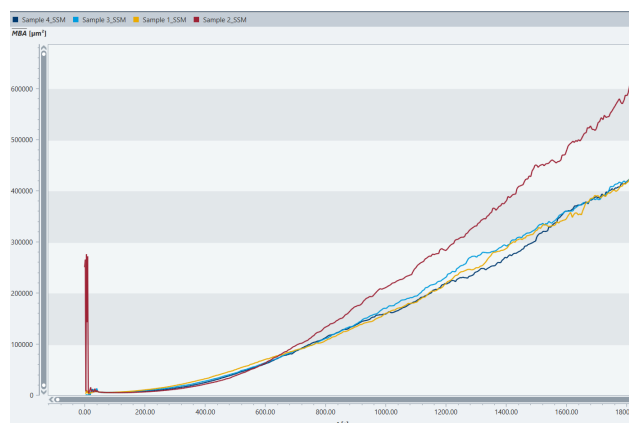


图 4：采用改良型 Foam Flash 法测得的 MBA（=平均气泡面积）比较（单位： μm^2 ）。

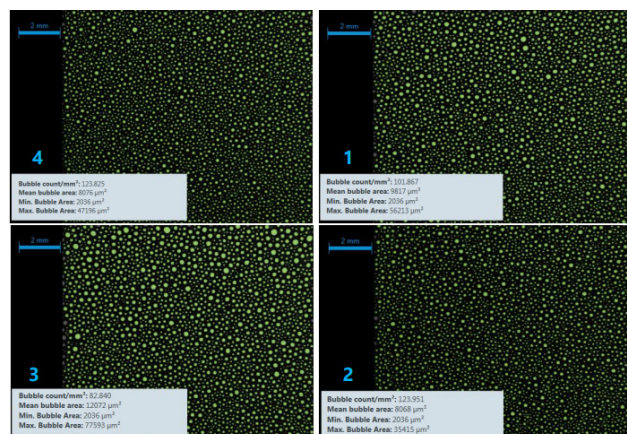


图 5：采用改良型 Foam Flash 法，在精确 200 s（泡沫生成后 160 s）时拍摄的气泡结构图像对比。

改良型 Foam Flash 法提供了清晰的区分。如图 3 所示，各样品的泡沫稳定性存在显著差异。样品 2 起始时初始液体体积最小，并迅速达到平台期，表明在整个测量期间其排水速率较快。然而，在约 300 秒时，样品 1 显示出最高的排水体积，其次是样品 3、4，然后是样品 2，这表明样品 2 在初始阶段在泡沫中保留了最多的液体。气泡动力学进一步突显了这些差异：

- 初始阶段（0–5 分钟）：平均气泡面积（MBA）的排序为样品 3 > 样品 1 > 样品 4 ≈ 样品 2，表明样品 3 中的气泡较大。

- 后期（10 分钟）：MBA 值的变化顺序为样品 2 > 样品 3 > 样品 4 ≈ 样品 1，表明样品 2 中出现了气泡的动态生长。
- 气泡计数：样品 1 保持了最高的气泡密度，表明其泡沫细腻且稳定，而样品 2 中的泡沫则退化为较大且不均匀的气泡。

这些发现突显了选择适当测量技术进行泡沫表征的重要性。改良型 Foam Flash 法已成为区分配方特性并确保结果可重复性的最有效方法。

结论

本研究对洗发水配方的起泡行为进行了全面分析，强调了测量技术对数据解读的影响。气流发泡法虽能有效产生高泡沫体积，但缺乏区分能力。Foam Flash 法虽然在本研究中导致了明显的泡沫坍塌，但为周期性搅拌条件下的泡沫稳定性提供了有价值的见解，并可应用于涉及反复搅拌的场景。改良型 Foam Flash 法被证明是最合适的技术，能在泡沫高度、稳定性和结构方面对样品进行清晰区分。该方法能够根据泡沫高度、排水性和气泡动力学对样品进行区分，因此非常适合研发和质量控制。该方法实现了对泡沫性质的精确区分。

样品 2 虽然泡沫体积最大，但因气泡快速聚合而稳定性较差，这很可能是由于聚合物稳定剂不足或气泡过度合并所致。样品 1 在泡沫稳定性和气泡均匀性之间达到了平衡，这些特性符合高端产品的预期，且归因于表面活性剂与聚合物之间最佳的相互作用。样品 3 泡沫高度较低，且随时间推移出现了明显的气泡聚合现象。

这些发现对配方优化、质量控制和消费者感知具有实际意义。通过添加阳离子聚合物、两性表面活性剂或有机硅来延长泡沫寿命并提高界面膜强度，可改善样品 2 的稳定性。本案例中采用的改良型 Foam Flash 法作为常规质量控制工具，能够再现实际使用条件，因此具有重要价值。

此外，细腻稳定的泡沫与高端感官体验之间的关联表明，可通过调整配方来满足消费者的期望。泡沫结构与消费者偏好之间的这种一致性，凸显了制定针对性营销策略和进行高端产品定位的机遇。未来的研究可探索表面活性剂组成及添加剂相互作用对泡沫特性的影响，并整合泡沫高度趋势、排水曲线和气泡尺寸分布的可视化呈现，以增强比较分析。

参考文献

D'Souza, P. 和 Rathi, S.K., 2015. 洗发水和护发素：皮肤科医生应了解什么？《印度皮肤病学杂志》，60(3)，第 248-254 页。

您可以在我们的网站上找到更多有趣的应用报告，位于

<https://www.kruss-scientific.com/zh-CN/how/application-reports>