应用报告

应用报告：	AR304
行业分类：	包装、印刷、表面处理、油墨、粘合
作者：	Dr. Andrew Mellor（KRÜSS）
日期：	2026 年 11 月
方法：	
关键词：	数字达因 (Digital Dyne), 测试墨水, 达因笔, PP, PE, 后退接触角, 去润湿, 质量控制, 表面活化, 等离子, 电晕, 火焰处理



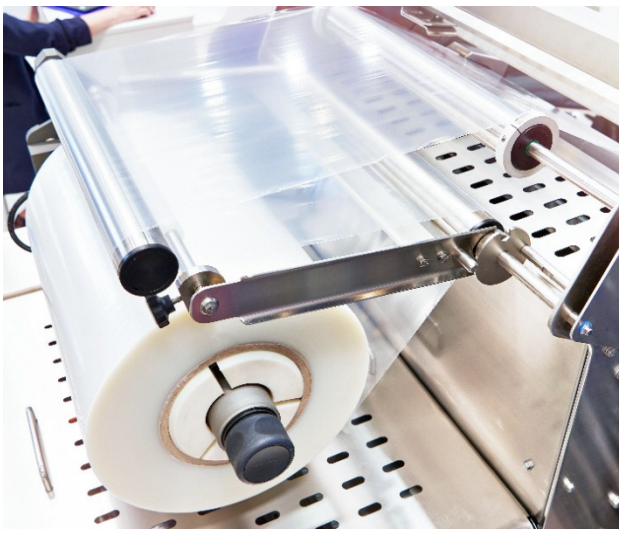


液滴形状分析仪 – DSA25
配备收缩液滴法 Stood-up Drop®测量单元

构建数字达因 (Digital Dyne)

21 世纪的表面测试

70 多年来，达因笔和测试墨水一直是生产中验证表面处理水平的行业标准。达因测试于 20 世纪 50 年代开发，是一种用于评估材料的印刷适性以及在粘合和涂层方面的“表面准备状态”的简单工具，现已广泛应用于全球众多行业。 尽管应用广泛，达因测试仍面临若干重大挑战，最显著的包括：主观解读、结果不一致、缺乏数字化可追溯性，而最重要的是其毒性问题。迄今为止，用现代替代方案取代达因测试的尝试仍十分有限，这主要是因为将新参数、工作流程和规范引入现有系统需要付出巨大努力，同时还存在无法满足客户期望的担忧。 数字达因 (Digital Dyne)是首款具有科学依据、可替代达因笔的现代替代方案，它提供了一种快速、简便、客观且无毒的途径来获得相同的结果，即所谓的数字达因 (Digital Dyne)值，该值已通过与实际达因测试的验证。



背景

笔和墨水安全吗？

传统上，30–58 mN/m 范围内的达因笔和测试墨水，都是由两种组分——甲酰胺和 2-乙氧基乙醇（乙基赛洛溶）——以及一种着色染料配制而成的混合物系列。 事实上，现行的达因测试标准（ASTM D2578、ISO 8296）都直接规定了使用这些混合物来测定聚乙烯（PE）和聚丙烯（PP）薄膜的“润湿张力”[1, 2]。 鉴于此，达因测试的广泛应用在许多实验室和生产环境中引发了对职业健康的重大担忧。甲酰胺和 2-乙氧基乙醇均被归类为*生殖毒性物质*（1B 类）。二者均可通过皮肤或呼吸道轻易被人体吸收。已有证据表明，二者均会对 胎儿的发育产生影响，其中 2-乙氧基乙醇还被证实会影响生育能力。 2012 年，欧洲化学品管理局将甲酰胺列入其“高度关注物质”清单[3]。尽管如此，对欧洲 15 家制造商进行的一项非正式调查显示，80%的企业仍在使用以甲酰胺为基础的测试油墨，其中 58%的企业每天进行一次或多次测试。

虽然确实存在无毒的笔/墨水替代品，但由于两个主要障碍，其采用率一直很低：1）测试结果与现有测试不一致；

2）它们不符合国际标准。 现行的 ASTM D2578 和 ISO 8296 标准分别于 60 年前和 40 年前首次发布。自那时起，虽然曾尝试推广替代方法，但这些方法通常无法可靠地再现预期的达因值，因此未能在业界得到广泛采用。

达因笔无法测试润湿性

考虑进行达因测试的操作流程（图 1）：

1) 将墨水以直线形式涂布在表面上。
2) 测试人员等待固定时间。
3) 测试人员评估该线条是否已收缩成单独的液滴，还是仍保持为平坦的薄膜。

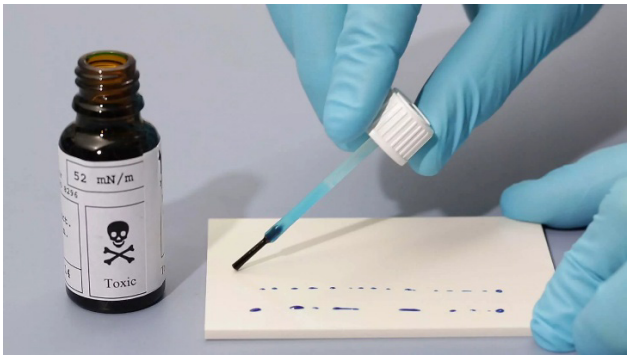


图 1：使用 52 mN/m 测试墨水在 PTFE 上进行测试的示意图。

一种常见的误解是，达因测试用于评估表面的*润湿性*，但实际上它评估的是表面的"去润湿性"（图 2）[4]。润湿性和去润湿性之间的区别看似微妙，但这两个术语不能互换使用，特别是对于经活化处理的表面（等离子体、电晕、火焰等）。

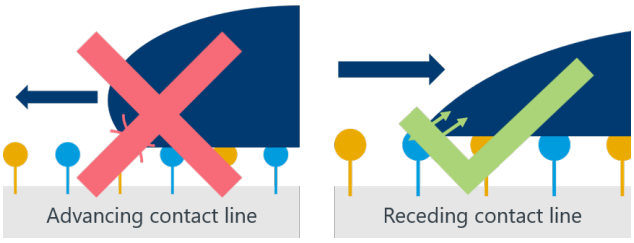


图 2：水滴在润湿（左）和去润湿（右）过程中与表面的相互作用。

这种误解导致了许多试图将水接触角（WCA）与达因值建立关联的尝试均告失败，例如 ASTM D5946（1996）和 ISO 15989（2004）标准中的相关尝试。 与达因测试相比，WCA 测试作为一种客观、无毒且定量的替代方法，具有特别的吸引力。通常，WCA 涉及评估水滴在表面铺展后的形状（"当前前进"的 WCA），因此它是*润湿性的*衡量指标，而非*去润湿性*。这也解释了为何观察到从 WCA 转换为达因的大多数结果都不够可靠。

若要通过 WCA 检测*去润湿性*，则必须测量已从表面去润湿的液滴（"当前后退"的 WCA）。 文献中对生成此类液滴的技术已有详细描述，但这些方法往往比传统的 WCA 测试复杂得多且耗时更长。事实上，有研究指出，典型的液滴前进/后退测试流程每个样品可能需要 1–2 小时左右[5, 6, 7]。据我们所知，此前尚未有人尝试将聚丙烯（PP）和聚乙烯（PE）薄膜的"当前后退"WCA 值与达因值建立直接关联。

新近开发的 KRÜSS 收缩液滴法 Stood-up Drop® 通过采用一种获得专利的滴定单元，该滴定单元可将液滴高动态地喷射到样品上，液滴会先在样品上铺展，然后迅速收缩，形成一个稳定的液滴。 这项创新将典型的测量时间从数小时缩短至不到两秒，同时实现了完全自动化、无需人工干预的测试。

在本报告中，我们旨在证明使用 KRÜSS 收缩液滴法 Stood-up Drop® 进行的所谓数字达因 (Digital Dyne)测量结果，与实际工作环境中操作人员记录的传统达因值之间的一致性。

实验部分

数字达因(Digital Dyne)测量

为获取数字达因 (Digital Dyne) 测试结果，采用 KRÜSS 收缩液滴系统记录了水滴在 PP 和 PE 薄膜上形成的当前后退接触角。每个数字达因结果均为两次独立测量的平均值，共记录了 2,244 次独立测量。每个数字达因 (Digital Dyne) 值均以精确数值形式报告，并四舍五入至小数点后一位。

达因 (Dyne)测试评估

在本研究中，由多名实际操作人员按照不同生产现场既定的达因测试规范进行了达因测试。所有操作人员均在达因测试方面经验丰富。按照标准操作规程，测试采用了一系列以甲酰胺-2-乙氧基乙醇为基料的测试油墨，其张力范围为 30 至 58 mN/m，每级张力差为 2 mN/m。超出给定范围的结果，根据其超出范围的方向，分别记录为<32 或>58 mN/m。测试中同时使用了达因笔和刷子/瓶装涂布器。由于每次张力测试均以 2 mN/m 的容差范围作为合格/不合格的判定标准，因此测试结果被解释为从标定值延伸至该值上方 2 mN/m 的区间。 例如，38 mN/m 的达因测试结果意味着该样品的预期达因范围为 38-40 mN/m。

在本研究中，每个样品的达因值和数字达因(Digital Dyne) 测试结果均由同一操作员在相同条件下、大致同一时间记录。

结果与讨论

数字达因 (Digital Dyne) 的实际应用评估

包装行业内的三家独立公司生产并测试了 1,138 个单独的 PP 和 PE 薄膜样品。在正常生产条件下，测量数据收集周期为 1-3 个月。为了代表广泛的工业 PP/PE 薄膜，研究中纳入了各种混合物和取向，以及不同的表面活化方法。

在所有样品中，较低的后退接触角始终与较高的达因测试值相关。通过最小二乘回归分析，建立了"收缩液滴法法" 后退接触角与达因测试结果之间的定量关系，从而实现了两种测量尺度之间的直接换算（图 3）。所得的相关性在不同公司、操作人员、聚合物牌号及表面处理方法

之间均保持稳定，这表明该关系在工业薄膜生产环境中具有广泛的适用性。

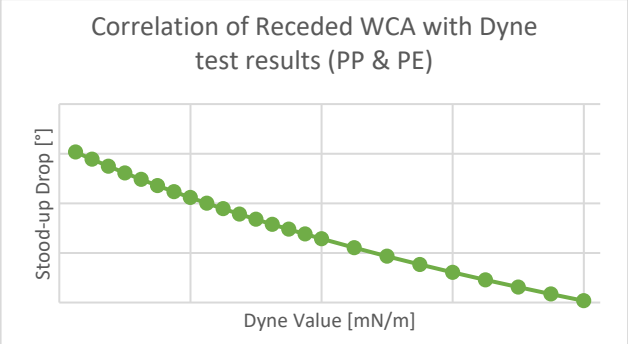
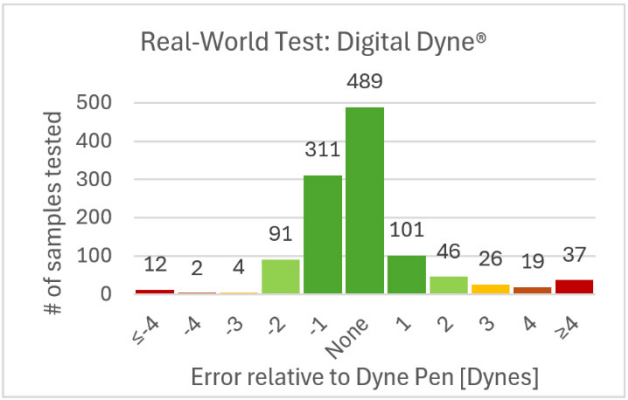


图 3：聚丙烯（PP）和聚乙烯（PE）薄膜近期后退接触角测量值与相应的达因测试结果之间的相关性。

与工业参考结果的一致性

数字达因 (Digital Dyne) 的测试结果与传统测试结果高度一致。虽然 43%的测量值直接落在标称测试范围内，但在报告值的±1 mN/m 范围内，一致性显著提高至 79%；而在±2 mN/m 范围内，一致性则达到约 91%（图 4）。



Error (mN/m)	< ± 1 Dyne	± 2 Dyne	± 3 Dyne	> ± 4 Dyne
# of Tests	901	137	30	70
%	79 %	12 %	3 %	6 %

图 4：数字达因 (Digital Dyne)与传统达因测试结果的一致性。直方图显示了样本级误差的分布情况，而附表则汇总了落在规定误差范围内的测量值所占的百分比。

与标称达因测试值的偏差符合测试本身存在的局限性，该测试受施测技术、环境条件、污染物以及操作人员判断的显著影响。行业报告指出，在生产环境中，达因测试的重复性约为±4 mN/m [8]。 换言之，达因测试本身的不确定性很可能是本研究中最大的限制性因素。因此，数字达因 (Digital Dyne) 为在生产过程中对聚合物薄膜进行更可靠的测试提供了一条途径。

所有参与本研究的公司均认为，达因测试与数字达因值之间观察到的一致性（在 1-2 mN/m 范围内的一致性超过 90%）处于可接受的公差范围内。

超越达因测试

部分样品测得的数字达因 (Digital Dyne) 值低于传统达因测试的下限（32 mN/m）。这些材料的达因测试结果被记录为“<32 mN/m”，这表明数字达因 (Digital Dyne)能够准确识别低能表面，甚至超越了达因测试的测量极限。这凸显了提供连续测量刻度而非依赖传统达因测试固定刻度的实际优势。

在验证过程中，还发现了进一步证明数字达因 (Digital Dyne)方法稳健性的证据：有一组数据被发现系统性地偏离了既定的相关性。调查显示，所有有问题的测量数据均来自同一家公司，且使用了同一批测试油墨。随后对该批次进行了重新测试，确认其受到污染，这导致了错误结果的产生。 该批次的数据已被排除在最终分析之外，也不属于完整的 1,138 个样本数据集。数字达因 (Digital Dyne)能够正确识别错误的达因结果这一事实表明，该方法不仅能重现达因测试，还能检测出那些否则可能被忽视的可疑测量结果。

总结

数字达因 (Digital Dyne) 已被证明能够对经处理的聚丙烯（PP）和聚乙烯（PE）薄膜的达因测试结果进行稳定可靠的重现，从而用自动化的水基测量方法取代了对有毒测试液的主观解读。当前后退接触角提供了准确模拟达因测试所需的关键去润湿信息，而 KRÜSS 收缩液滴法 Stood-up Drop® 系统则通过快速的一键式工作流程实现了测量。 对 1,138 个实际样品的验证表明，该方法与传统的达因测试具有极佳的一致性，约 92% 的结果与报告的测试墨水值偏差在 ±2 mN/m 范围内。这相当于约 1-2 mN/m 的实际分辨率，并证实了客观接触角测量与既定达因测试之间存在稳健的关联。 数字达因 (Digital Dyne) 提供了一种切实可行的途径，可在无需更改现有规格的情况下，实现可追溯且不受操作人员影响的测试。因此，该方法为企业提供了可信的途径，使其能够逐步淘汰达因笔和测试墨水。

参考文献

[1] ASTM International: ASTM D2578-23, Standard Test Method for Wetting Tension of Polyethylene and Polypropylene Films, 2023.

[2] International Organization for Standardization: ISO 8296:2003, Plastics - Film and sheeting - Determination of wetting tension, confirmed 2023.

[3] European Chemicals Agency: Support document for identification of formamide as a substance of very high concern because of its CMR properties.

[4] D. Diaz, A. Bhargava, F. Walz, A. Sharifi, S. Summaly, R. Berger, M. Kappl, H.-J. Butt, D. Lohse, T. Willers, V. Sanjay, D. Vollmer: Stood-up Drop to Determine Receding Contact Angles. In: Soft Matter, 2025. DOI: 10.1039/d5sm00985e.
→ Free access

[5] H.-J. Butt et al.: Contact angle hysteresis. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 59, 2022, 101574.

[6] KRÜSS: Stood-up Drop - optical determination of the recently receded contact angle.
https://www.kruss-scientific.com/zh-CN/know-how/glossary/stood-up-drop

[7] T. Huhtamäki, X. Tian, J. T. Korhonen, and R. H. A. Ras: Surface-wetting characterization using contact-angle measurements. Nature Protocols, 13, 2018, 1521–1538.

[8] Vetaphone A/S: Guide to Dyne Testing and Surface Energy Measurement. Technical article, Vetaphone Knowledge Centre, accessed November 2026.

您还可以在我们的网站上找到更多有趣的应用报告，请访问
https://www.kruss-scientific.com/zh-CN/know-how/application-reports