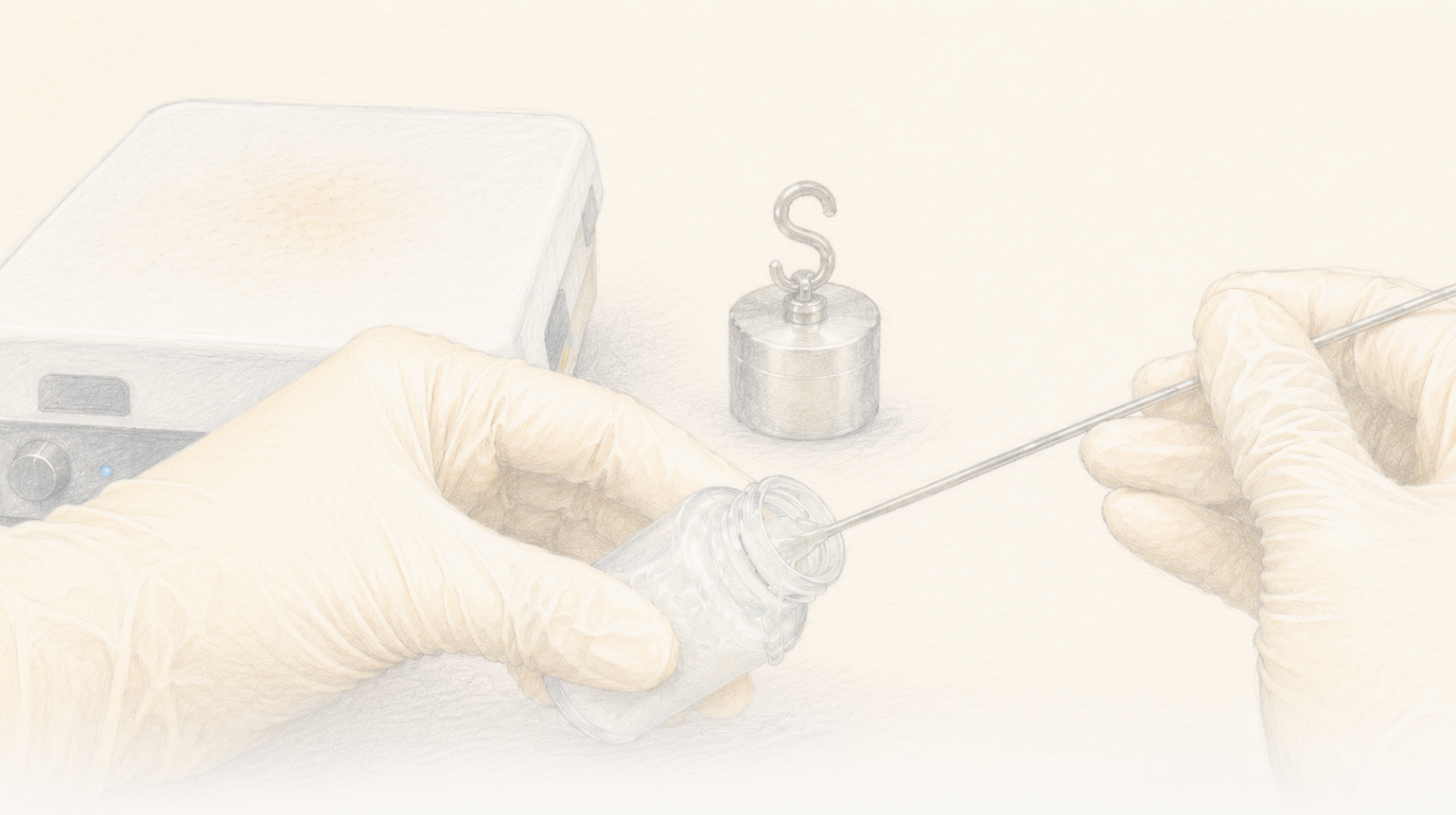


The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

一种小分子能粘住未经处理的 PTFE，之后又可以用乙醇洗掉

一篇 *JACS* 论文报道了一类含氟冠醚磷酸酯胶黏剂：在实验室搭接剪切测试中，它们能粘接以难粘著称的 *PTFE*，同时又能用乙醇洗去。*CyclicFP-fmoc* 在未经处理的 *PTFE* 上达到 *1.3 MPa*，并表现为具有延性的内聚破坏；相关变体最高达到 *2.3 MPa*。光谱证据支持这样的机制：*PTFE* 界面存在氟—氟相互作用，而胶黏剂内部还依靠氢键和 π–π 堆积。这是一项很有前景的材料结果，但还不是商业胶水、通用回收方案，也不是完整的环境安全评估。

Written by Cinzia Vaglio · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Michele Renda and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Small-Molecule Adhesives with Strong and Ductile Adhesion to PTFE, Yet Allowing Easy Wipe-Off Removal*, Kohei Kikkawa, Abir Goswami, Kiyoshi Morishita, Hao Wang, Takashi Nakamura, and Takuzo Aida, Journal of the American Chemical Society 148, 29138-29145 (2026) · DOI: 10.1021/jacs.6c07886

PTFE 难粘，是有物理原因的

聚四氟乙烯更常被简称为 PTFE，也以 Teflon 等商品名销售。它之所以有用，部分正因为它“不爱和别人发生作用”。它的表面能很低，很多液体落上去会缩成珠，很多胶黏剂也粘不住，除非先把表面蚀刻、粗化、做等离子处理，或者搭配专用底涂剂。

这种抗相互作用能力非常适合不粘涂层和化学惰性部件。但如果工程师想把 PTFE 与另一个零件连接起来，又不希望永久损伤表面，它就成了麻烦。

一篇发表于 Journal of the American Chemical Society 的论文，从一个不太常见的方向解决这个问题。Kohei Kikkawa、Abir Goswami 及同事设计了一类含氟冠醚磷酸酯小分子：它们可以牢固粘住未经处理的 PTFE，在失效前表现出延性形变，而且之后还能用乙醇把胶从 PTFE 板上洗掉。

主打分子叫 **CyclicFP-fmoc**。在搭接剪切测试中，它对未经处理 PTFE 的粘接强度达到 **1.3 ± 0.1 MPa**，脱粘功为 **1300 N/m**。因为 1 MPa 等于每平方毫米 1 牛顿，1.3 MPa 的峰值应力在压强上，相当于每一个平方毫米都承受大约一个 130 克苹果的重量。这只是帮助理解“单位面积应力”的类比，并不是试样实际受到的总力，也不是测试件的接触几何。论文报告的 1300 N/m 脱粘功，则等价于每平方米需要约 1300 焦耳分离能。作为直观演示，而不是工程载荷额定值，论文还展示了一个面积为 7 cm^2 的接头吊起 8 kg 重物。最终破坏发生在胶黏剂层内部，而不是 PTFE 界面上。这一点很重要：至少在这个测试里，界面并不是最弱环节。

根据论文中胶条悬挂砝码的照片（图 2 左）绘制的铅笔风格示意图。它不是原始照片，也不是按比例绘制的工程载荷额定图。

AI-generated adaptation —The Clean Paper; source photograph: Kikkawa et al., JACS 2026, Figure 2 (left) Fair-use assertion

结果并不意味着 “PTFE 粘接问题已经解决”。它仍是一项受控的实验室材料结果。但它清楚展示了一个很难同时实现的组合：强粘接、延性失效，以及从以难粘著称的表面上擦洗去除。

为什么 “很牢” 和 “容易拆” 通常互相打架

胶黏剂通常要做取舍。刚性的交联聚合物胶可以很强，但往往会突然脆断，而且很难干净移除。较软、像胶带一样的胶黏剂可以拉伸并耗散能量，却通常要牺牲强度。

这种矛盾来自分子层面。强度要求应力能够高效传递；延性需要分子可以移动、重排并耗散能量；容易拆除则要求键可以被打断，同时不破坏基材。这几项要求天然拉向不同方向。

小分子胶黏剂很吸引人，因为原则上更容易做成可移除、可回收材料。它们不会形成传统胶中常见的长链缠结聚合物网络。但这也是弱点：没有分子链缠结，小分子通常很难同时获得高强度和有延性的粘接。

这篇 JACS 论文试图用一组可逆的非共价相互作用，代替聚合物链缠结。分子把含氟冠醚磷酸酯区域与一个通过氨基甲酸酯连接的 fmoc 基团结合起来。直白地说，含氟环可以与富含氟的 PTFE 表面作用；氨基甲酸酯基可以在相邻胶黏剂分子间形成氢键；平面的芴基则能彼此堆积。设计目标不是找到一种 “魔法键”，而是让多种弱而可逆的相互作用协同工作：

- 靠近 PTFE 表面的氟—氟相互作用；
- 胶黏剂分子之间的氢键；
- 芴基之间的 π–π 堆积；
- 以及足够的分子运动能力，让材料能够松弛应力，而不是立刻开裂。

PTFE 主测试显示了什么

作者把 CyclicFP-fmoc 放在没有经过表面处理、甚至没有清洗的 PTFE 板之间，加热胶黏剂，然后在室温放置 10 分钟后进行测试。

定量测试采用搭接剪切。用 CyclicFP-fmoc 粘接的 PTFE 板达到 **1.3 ± 0.1 MPa** 的拉伸应力，数值为三次测量的平均值 ± 标准差。如果用吹风机在大约 **50 C** 下施胶，也得到相近结果 **1.1 ± 0.1 MPa**，说明并不只有高温熔融一种使用方式。

作者还在同一套 PTFE 搭接剪切装置中，与商业环氧、丙烯酸、硅酮和聚氨酯胶黏剂比较。这些对照大约达到 **0.1–0.7 MPa**，而 CyclicFP-fmoc 为 **1.3 ± 0.1 MPa**。在同一种基材、同一种测试方法下比较，远比把不同材料、不同几何条件下的 MPa 数值直接排成排行榜更有参考价值。

储存后，数值基本没有变化。在环境条件下放置 30 天后，粘接强度仍为 **1.3 ± 0.2 MPa**。强行把两块

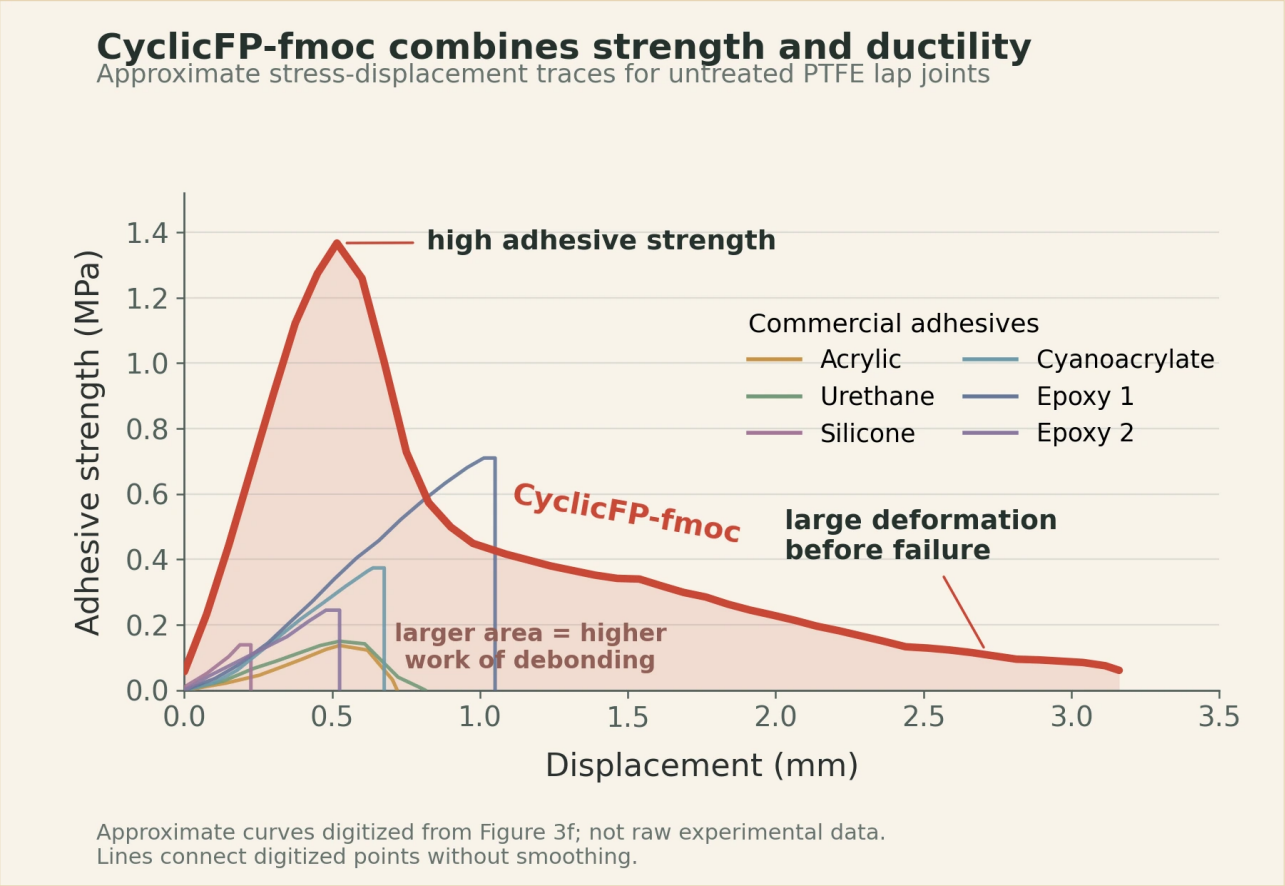
板分开，再重新搭接并加热后，强度为 **1.2 ± 0.2 MPa**。重复这个循环 10 次，仍得到约 **1.3 ± 0.3 MPa**。

性能最强的变体并不是主打分子。另一个含三个 fmoc 基团的相关分子 **CyclicFP-fmoc3**，在 PTFE 上达到 **2.3 ± 0.2 MPa**。论文仍把大量篇幅放在 CyclicFP-fmoc 上，因为它同时展示了强度、延性、机制证据和可擦洗去除这几项特征。

延性是这项主张的另一半

只有强度还不够。脆性胶黏剂也可能达到很高峰值应力，然后突然失效。这篇论文更有特色的主张，是 CyclicFP-fmoc 同时表现出延性。

在搭接剪切曲线中，CyclicFP-fmoc 达到最大应力之后，随着位移继续增加，应力逐渐下降。论文测试的商业胶更像脆性接头：达到峰值后不久就失效。



CyclicFP-fmoc 同时具有较高应力峰值和很长的峰后尾部；阴影面积是编辑性示意，用来提示它较大的脱粘功。曲线为根据图 3f 数字化得到的近似值，不是原始实验数据。

Chart by The Clean Paper; approximate values digitized from Kikkawa et al., JACS 2026, Figure 3f (source figure not relicensed) CC BY 4.0

作者把应力—位移曲线下的面积量化为脱粘功。CyclicFP-fmoc 在 PTFE 上为 **1300 N/m**；测试的商业胶黏剂范围是 **26–314 N/m**。

破坏模式也与这种解释一致。CyclicFP-fmoc 的 PTFE 接头发生的是内聚破坏，也就是胶层内部断裂。

这说明胶黏剂可以通过内部形变耗散能量，而在这些实验里，PTFE 界面的强度反而高于胶层本体。

应力松弛实验还给出了分子运动的时间尺度。在 20 C 时，特征松弛时间为 **60 ms**；Arrhenius 分析得到活化能 **33.8 kJ/mol**。用更直白的话说，胶层内部重排得足够快，可以缓解突然出现的应力集中，而不是像静态脆性固体那样直接断裂。

为什么作者认为 “氟” 很重要

PTFE 由碳—氟键构成，而 CyclicFP-fmoc 带有含氟冠醚基团。作者认为，**F–F 相互作用**帮助胶黏剂抓住 PTFE；其他相互作用则帮助胶层内部保持在一起并发生延性形变。

几组对照实验支持这个方向。如果把 CyclicFP-fmoc 中的氟原子换成氢，得到的 CyclicP-fmoc 对 PTFE 的粘接强度只剩约 **0.1 ± 0.0 MPa**。线性的含氟醚磷酸酯 AcyclicFP-fmoc 也只达到 **0.3 ± 0.1 MPa**。缺少 π 堆积或氢键单元的其他变体同样表现更差。

论文随后用光谱和晶体结构支持这幅相互作用图景。在 CyclicFP-fmoc 晶体中，相邻分子上的氟原子间距为 **2.49–2.91 埃**，小于两个氟原子的 **2.94 埃**范德华半径之和。FT-IR 和变温 NMR 支持无定形胶黏剂内部存在氢键、F–F 相互作用和 π–π 堆积。

与 PTFE 最直接相关的证据来自固态 **19F MAS NMR**：当 CyclicFP-fmoc 与 PTFE 纳米颗粒或薄 PTFE 片混合时，谱线会发生位移；不含氟的对照则不会产生同样变化。这说明胶黏剂中的含氟部分确实与 PTFE 发生相互作用，而不只是设计图上看起来应该如此。

即便这样，也不能把机制简化成 “F–F 键解决了 PTFE”。论文自己的模型更分层：界面上的 F–F 相互作用帮助粘接 PTFE；胶层内部的氢键和 π–π 堆积则贡献内聚力和延性。

“擦掉” 是真的，但有明确边界

可移除性是最吸引实际应用的部分。作者用乙醇清洗已经拆开的 PTFE 板，并报告在他们的演示中可以把 CyclicFP-fmoc 完全洗去、不留残余。他们还回收胶黏剂并反复再利用；再利用测试中，粘接强度仍维持在约 **1.2 ± 0.1 MPa**。

这很重要，因为传统强力胶往往很难干净移除。一种既能粘住 PTFE、之后又能洗掉的胶，对维修、拆解和重复利用都有潜在价值。

但边界同样重要。论文测试的是受控样品，并不是所有受到污染的工业表面、经历风吹日晒的接头、各种溶剂暴露或长期老化条件。能从 PTFE 板上用乙醇擦洗去除，并不等于已经证明一套适用于多材料组件的完整回收流程。

论文还说 CyclicFP-fmoc 不是一种 PFAS “永久化学品”。这句话也不能被扩展成完整环境风险评估。持久性、毒性、制造规模、释放路径和法规要求都是另外的问题。

这项研究不能证明什么

- 它**没有**展示一种已经可以上市的胶黏剂产品。
- 它**没有**证明在所有工业环境中，PTFE 都可以不做表面处理而可靠粘接。
- 它**没有**证明乙醇在每种基材、每种表面条件或老化接头上都能同样有效地去除胶。
- 它**没有**证明仅靠 F–F 相互作用就能解释粘接。论文机制同时包含 F–F、氢键和 π–π 堆积。
- 它**没有**展示完整塑料回收流程。
- 它**没有**建立这些胶黏剂分子的完整环境或毒理安全档案。
- 它**不意味着**商业胶一般都更差。比较只适用于本文测试的具体材料以及 PTFE 搭接剪切条件。

这个结果有多强?

作为一篇实验室材料论文，这个结果相当扎实，因为作者并不只是报出一个很高的数字。他们测试了强度、延性、30 天耐久性、耐水性、反复重新粘接、乙醇去除、多个分子变体，并用光谱证据支持提出的相互作用机制。

最有说服力的是破坏模式加上对照实验。如果最先坏的是 PTFE 界面，主张会弱得多；实际却是在胶层内部发生内聚破坏。而当含氟环状结构被移除或改变时，PTFE 粘接强度又明显下降。

剩下的问题主要是规模和使用场景。搭接剪切测试标准化程度高，也很有用；但真实接头还会遇到剥离、冲击、疲劳、污染、温度循环和混合材料。一种在受控实验板之间表现漂亮的小分子，还必须变成配方、工艺和完整耐久性数据集，才能成为工程胶黏剂。

为什么重要

PTFE 正好处在一个尴尬的材料边界。它的惰性是它有价值的原因；同一个性质又让它很难被整合进可维修或可回收的组件中。

这篇论文提供的是一条化学上有针对性的路线，而不是蛮力处理。它不去粗化或化学侵蚀 PTFE 表面，而是设计一个能够与该表面发生作用、同时在内部保持延性和可逆性的胶黏剂小分子。

如果这种设计逻辑能够推广，它可能帮助开发更容易拆除和再利用、同时又不必放弃全部力学性能的胶黏剂。真正值得期待的不是 “这一种分子已经是一款完成品胶水”，而是一种构建强韧、延性、又可脱粘胶黏剂的分子策略。

简明总结

Kikkawa、Goswami 及同事报道了一类含氟冠醚磷酸酯小分子，用作 PTFE 和其他基材的胶黏剂。主打分子 CyclicFP-fmoc 在 PTFE 搭接剪切测试中，对未经处理的板材达到 1.3 ± 0.1 MPa；破坏发生在

胶层内部而不是 PTFE 界面；脱粘功为 1300 N/m；储存和反复重新粘接后仍能保持性能；而且可以用乙醇从 PTFE 板上洗掉。相关变体最高达到 2.3 ± 0.2 MPa。光谱和对照分子支持一种多层机制：F–F 相互作用帮助 PTFE 界面粘接，氢键和 π–π 堆积则帮助胶层耗散应力。这是一项很有前景的实验室演示：PTFE 上可以同时实现强、具有延性且可擦洗去除的粘接；但它还不是商业胶水、通用回收方案，也不是完整的环境安全评估。

来源

Kikkawa et al., Small-Molecule Adhesives with Strong and Ductile Adhesion to PTFE, Yet Allowing Easy Wipe-Off Removal, Journal of the American Chemical Society 148, 29138-29145 (2026)
https://doi.org/10.1021/jacs.6c07886