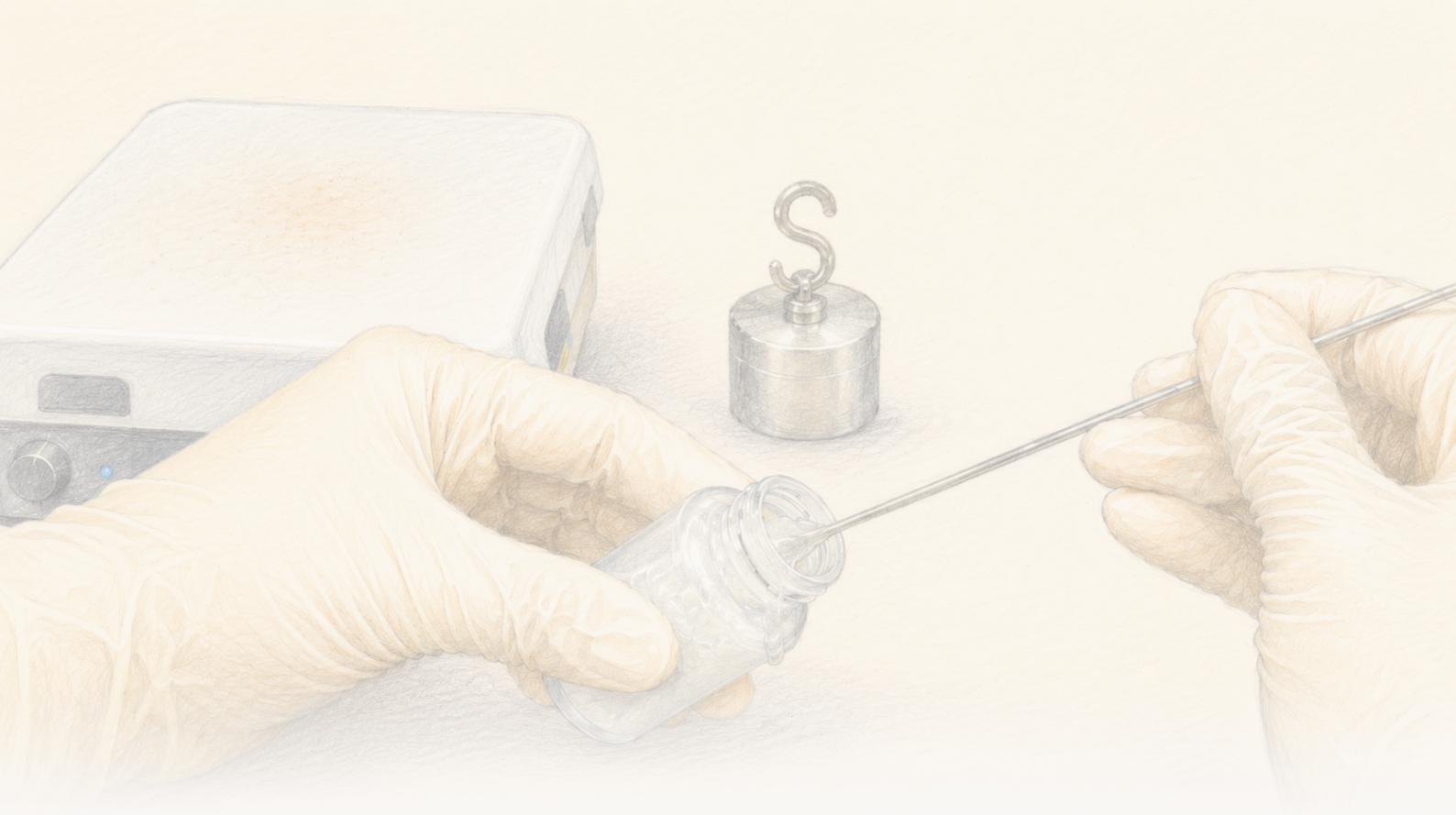


The Clean Paper

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

一種小分子能黏住未經處理的 PTFE，之後又可以用乙醇洗掉

一篇 *JACS* 論文報告了一類含氟冠醚磷酸酯膠黏劑：在實驗室搭接剪切測試中，它們能黏著以難黏著稱的 *PTFE*，同時又能用乙醇洗去。*CyclicFP-fmoc* 在未經處理的 *PTFE* 上達到 *1.3 MPa*，並表現為具有延性的內聚破壞；相關變體最高達到 *2.3 MPa*。光譜證據支持這樣的機制：*PTFE* 界面存在氟—氟相互作用，而膠黏劑內部還依靠氫鍵和 π–π 堆積。這是一項很有前景的材料結果，但還不是商業膠水、通用回收方案，也不是完整的環境安全評估。

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 難黏，是有物理原因的

聚四氟乙烯更常被簡稱為 PTFE，也以 Teflon 等商品名銷售。它之所以有用，部分正因為它「不愛和別人發生作用」。它的表面能很低，很多液體落上去會縮成珠，很多膠黏劑也黏不住，除非先把表面蝕刻、粗化、做電漿處理，或者搭配專用底塗劑。

這種抗相互作用能力非常適合不黏塗層和化學惰性部件。但如果工程師想把 PTFE 與另一個零件連接起來，又不希望永久損傷表面，它就成了麻煩。

一篇發表於 Journal of the American Chemical Society 的論文，從一個不太常見的方向解決這個問題。Kohei Kikkawa、Abir Goswami 及同事設計了一類含氟冠醚磷酸酯小分子：它們可以牢固黏住未經處理的 PTFE，在失效前表現出延性形變，而且之後還能用乙醇把膠從 PTFE 板上洗掉。

主打分子叫 **CyclicFP-fmoc**。在搭接剪切測試中，它對未經處理 PTFE 的黏著強度達到 **1.3 ± 0.1 MPa**，脫黏功為 **1300 N/m**。因為 1 MPa 等於每平方毫米 1 牛頓，1.3 MPa 的峰值應力在壓強上，相當於每一個平方毫米都承受大約一個 130 克蘋果的重量。這只是幫助理解「單位面積應力」的類比，並不是試樣實際受到的總力，也不是測試件的接觸幾何。論文報告的 1300 N/m 脫黏功，則等價於每平方米需要約 1300 焦耳分離能。作為直觀演示，而不是工程負載額定值，論文還展示了一個面積為 7 cm^2 的接頭吊起 8 kg 重物。最終破壞發生在膠黏劑層內部，而不是 PTFE 界面上。這一點很重要：至少在這個測試裡，界面並不是最弱環節。

根據論文中膠條懸掛砝碼的照片（圖 2 左）繪製的鉛筆風格示意圖。它不是原始照片，也不是按比例繪製的工程負載額定圖。

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

結果並不意味著「PTFE 黏著問題已經解決」。它仍是一項受控的實驗室材料結果。但它清楚展示了一個很難同時實現的組合：強黏著、延性失效，以及從以難黏著稱的表面上擦洗去除。

為什麼「很牢」和「容易拆」通常互相打架

膠黏劑通常要做取捨。剛性的交聯聚合物膠可以很強，但往往會突然脆斷，而且很難乾淨移除。較軟、像膠帶一樣的膠黏劑可以拉伸並耗散能量，卻通常要犧牲強度。

這種矛盾來自分子層面。強度要求應力能夠高效傳遞；延性需要分子可以移動、重排並耗散能量；容易拆除則要求鍵可以被打斷，同時不破壞基材。這幾項要求天然拉向不同方向。

小分子膠黏劑很吸引人，因為原則上更容易做成可移除、可回收材料。它們不會形成傳統膠中常見的長鏈纏結聚合物網路。但這也是弱點：沒有分子鏈纏結，小分子通常很難同時獲得高強度和有延性的黏著。

這篇 JACS 論文試圖用一組可逆的非共價相互作用，代替聚合物鏈纏結。分子把含氟冠醚磷酸酯區域與一個經由胺基甲酸酯連接的 Fmoc 基團結合起來。直白地說，含氟環可以與富含氟的 PTFE 表面作用；胺基甲酸酯基可以在相鄰膠黏劑分子間形成氫鍵；平面的芴基則能彼此堆積。設計目標不是找到一種「魔法鍵」，而是讓多種弱而可逆的相互作用協同工作：

- 靠近 PTFE 表面的氟—氟相互作用；
- 膠黏劑分子之間的氫鍵；
- 芴基之間的 π–π 堆積；
- 以及足夠的分子運動能力，讓材料能夠鬆弛應力，而不是立刻開裂。

PTFE 主測試顯示了什麼

作者把 CyclicFP-fmoc 放在沒有經過表面處理、甚至沒有清洗的 PTFE 板之間，加熱膠黏劑，然後在室溫放置 10 分鐘後進行測試。

定量測試採用搭接剪切。用 CyclicFP-fmoc 黏著的 PTFE 板達到 **1.3 ± 0.1 MPa** 的拉伸應力，數值為三次測量的平均值 ± 標準差。如果用吹風機在大約 **50 C** 下施膠，也得到相近結果 **1.1 ± 0.1 MPa**，說明並不只有高溫熔融一種使用方式。

作者還在同一套 PTFE 搭接剪切裝置中，與商業環氧、丙烯酸、矽酮和聚氨酯膠黏劑比較。這些對照大約達到 **0.1–0.7 MPa**，而 CyclicFP-fmoc 為 **1.3 ± 0.1 MPa**。在同一種基材、同一種測試方法下比較，遠比把不同材料、不同幾何條件下的 MPa 數值直接排成排行榜更有參考價值。

儲存後，數值基本沒有變化。在環境條件下放置 30 天後，黏著強度仍為 **1.3 ± 0.2 MPa**。強行把兩

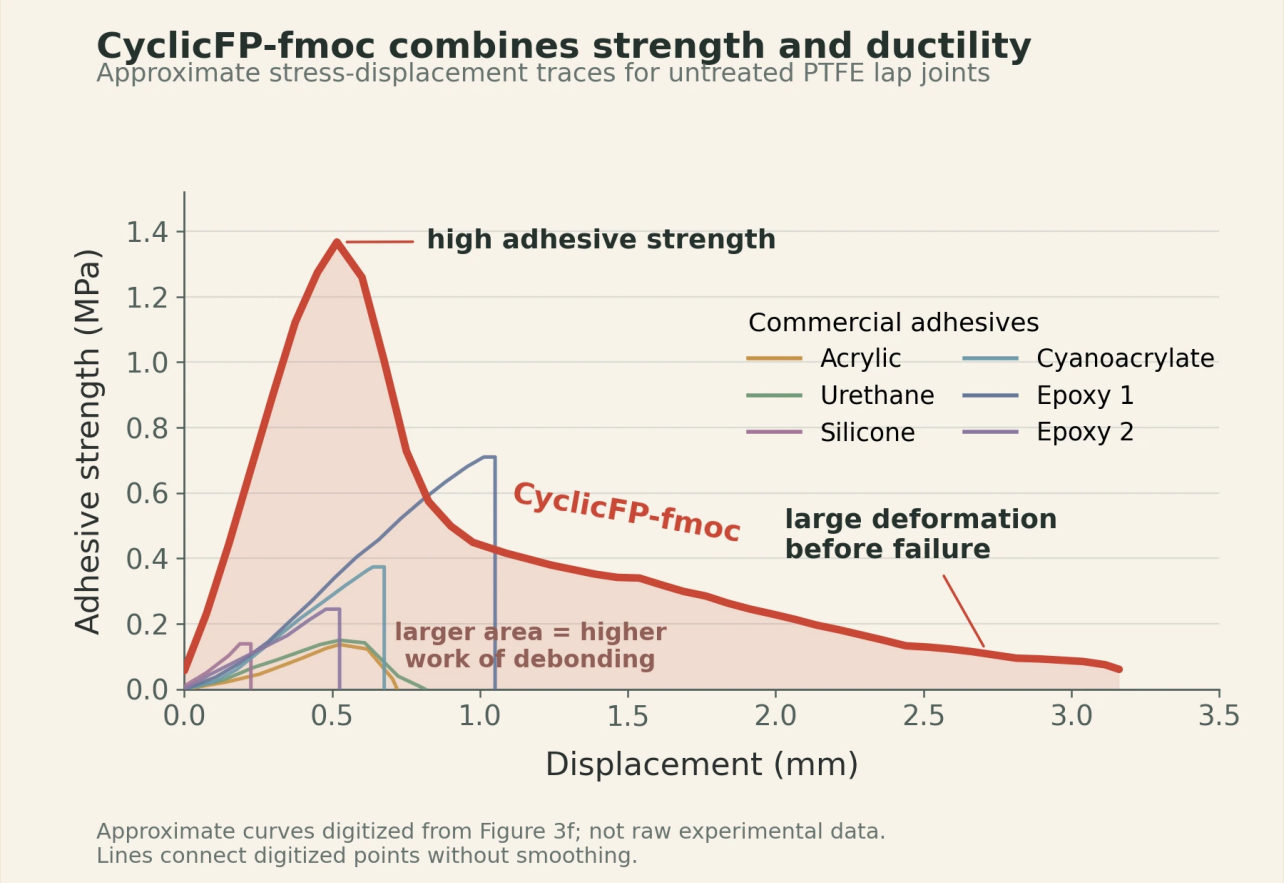
塊板分開，再重新搭接並加熱後，強度為 **1.2 ± 0.2 MPa**。重複這個循環 10 次，仍得到約 **1.3 ± 0.3 MPa**。

性能最強的變體並不是主打分子。另一個含三個 Fmoc 基團的相關分子 **CyclicFP-fmoc3**，在 PTFE 上達到 **2.3 ± 0.2 MPa**。論文仍把大量篇幅放在 CyclicFP-fmoc 上，因為它同時展示了強度、延性、機制證據和可擦洗去除這幾項特徵。

延性是這項主張的另一半

只有強度還不夠。脆性膠黏劑也可能達到很高峰值應力，然後突然失效。這篇論文更有特色的主張，是 CyclicFP-fmoc 同時表現出延性。

在搭接剪切曲線中，CyclicFP-fmoc 達到最大應力之後，隨著位移繼續增加，應力逐漸下降。論文測試的商業膠更像脆性接頭：達到峰值後不久就失效。



CyclicFP-fmoc 同時具有較高應力峰值和很長的峰後尾部；陰影面積是編輯性示意，用來提示它較大的脫黏功。曲線為根據圖 3f 數字化得到的近似值，不是原始實驗資料。

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

作者把應力—位移曲線下的面積量化為脫黏功。CyclicFP-fmoc 在 PTFE 上為 **1300 N/m**；測試的商業膠黏劑範圍是 **26–314 N/m**。

破壞模式也與這種解釋一致。CyclicFP-fmoc 的 PTFE 接頭發生的是內聚破壞，也就是膠層內部斷裂。這說明膠黏劑可以透過內部形變耗散能量，而在這些實驗裡，PTFE 界面的強度反而高於膠層本體。

應力鬆弛實驗還給出了分子運動的時間尺度。在 20 C 時，特徵鬆弛時間為 **60 ms**；Arrhenius 分析得到活化能 **33.8 kJ/mol**。用更直白的話說，膠層內部重排得足夠快，可以緩解突然出現的應力集中，而不是像靜態脆性固體那樣直接斷裂。

為什麼作者認為「氟」很重要

PTFE 由碳—氟鍵構成，而 CyclicFP-fmoc 帶有含氟冠醚基團。作者認為，**F–F 相互作用**幫助膠黏劑抓住 PTFE；其他相互作用則幫助膠層內部保持在一起併發生延性形變。

幾組對照實驗支持這個方向。如果把 CyclicFP-fmoc 中的氟原子換成氫，得到的 CyclicP-fmoc 對 PTFE 的黏著強度只剩約 **0.1 ± 0.0 MPa**。線性的含氟醚磷酸酯 AcyclicFP-fmoc 也只達到 **0.3 ± 0.1 MPa**。缺少 π 堆積或氫鍵單元的其他變體同樣表現更差。

論文隨後用光譜和晶體結構支持這幅相互作用圖景。在 CyclicFP-fmoc 晶體中，相鄰分子上的氟原子間距為 **2.49–2.91 埃**，小於兩個氟原子的 **2.94 埃**範德華半徑之和。FT-IR 和變溫 NMR 支持無定形膠黏劑內部存在氫鍵、F–F 相互作用和 π–π 堆積。

與 PTFE 最直接相關的證據來自固態 **19F MAS NMR**：當 CyclicFP-fmoc 與 PTFE 奈米顆粒或薄 PTFE 片混合時，譜線會發生位移；不含氟的對照則不會產生同樣變化。這說明膠黏劑中的含氟部分確實與 PTFE 發生相互作用，而不只是設計圖上看起來應該如此。

即便這樣，也不能把機制簡化成「F–F 鍵解決了 PTFE」。論文自己的模型更分層：界面上的 F–F 相互作用幫助黏著 PTFE；膠層內部的氫鍵和 π–π 堆積則貢獻內聚力和延性。

「擦掉」是真的，但有明確邊界

可移除性是最吸引實際應用的部分。作者用乙醇清洗已經拆開的 PTFE 板，並報告在他們的演示中可以把 CyclicFP-fmoc 完全洗去、不留殘餘。他們還回收膠黏劑並反覆再利用；再利用測試中，黏著強度仍維持在約 **1.2 ± 0.1 MPa**。

這很重要，因為傳統強力膠往往很難乾淨移除。一種既能黏住 PTFE、之後又能洗掉的膠，對維修、拆解和重複利用都有潛在價值。

但邊界同樣重要。論文測試的是受控樣品，並不是所有受到污染的工業表面、經歷風吹日曬的接頭、各種溶劑暴露或長期老化條件。能從 PTFE 板上用乙醇擦洗去除，並不等於已經證明一套適用於多材料組件的完整回收流程。

論文還說 CyclicFP-fmoc 不是一種 PFAS 「永久化學品」。這句話也不能被擴展成完整環境風險評估。持久性、毒性、製造規模、釋放路徑和法規要求都是另外的問題。

這項研究不能證明什麼

- 它**沒有**展示一種已經可以上市的膠黏劑產品。
- 它**沒有**證明在所有工業環境中，PTFE 都可以不做表面處理而可靠黏著。
- 它**沒有**證明乙醇在每種基材、每種表面條件或老化接頭上都能同樣有效地去除膠。
- 它**沒有**證明僅靠 F–F 相互作用就能解釋黏著。論文機制同時包含 F–F、氫鍵和 π–π 堆積。
- 它**沒有**展示完整塑料回收流程。
- 它**沒有**建立這些膠黏劑分子的完整環境或毒理安全檔案。
- 它**不意味著**商業膠一般都更差。比較只適用於本文測試的具體材料以及 PTFE 搭接剪切條件。

這個結果有多強？

作為一篇實驗室材料論文，這個結果相當扎實，因為作者並不只是報出一個很高的數字。他們測試了強度、延性、30 天耐久性、耐水性、反覆重新黏著、乙醇去除、多個分子變體，並用光譜證據支持提出的相互作用機制。

最有說服力的是破壞模式加上對照實驗。如果最先壞的是 PTFE 界面，主張會弱得多；實際卻是在膠層內部發生內聚破壞。而當含氟環狀結構被移除或改變時，PTFE 黏著強度又明顯下降。

剩下的問題主要是規模和使用場景。搭接剪切測試標準化程度高，也很有用；但真實接頭還會遇到剝離、衝擊、疲勞、污染、溫度循環和混合材料。一種在受控實驗板之間表現漂亮的小分子，還必須變成配方、製程與完整的耐久性資料集，才能成為工程膠黏劑。

為什麼重要

PTFE 正好處在一個尷尬的材料邊界。它的惰性是它有價值的原因；同一個性質又讓它很難被整合進可維修或可回收的組件中。

這篇論文提供的是一條化學上有針對性的路線，而不是蠻力處理。它不去粗化或化學侵蝕 PTFE 表面，而是設計一個能夠與該表面發生作用、同時在內部保持延性和可逆性的膠黏劑小分子。

如果這種設計邏輯能夠推廣，它可能幫助開發更容易拆除和再利用、同時又不必放棄全部力學性能的膠黏劑。真正值得期待的不是「這一種分子已經是一款完成品膠水」，而是一種構建強韌、延性、又可脫黏膠黏劑的分子策略。

重點摘要

Kikkawa、Goswami 及同事報告了一類含氟冠醚磷酸酯小分子，用作 PTFE 和其他基材的膠黏劑。主打分子 CyclicFP-fmoc 在 PTFE 搭接剪切測試中，對未經處理的板材達到 1.3 ± 0.1 MPa；破壞發生在

膠層內部而不是 PTFE 界面；脫黏功為 1300 N/m；儲存和反覆重新黏著後仍能保持性能；而且可以用乙醇從 PTFE 板上洗掉。相關變體最高達到 2.3 ± 0.2 MPa。光譜和對照分子支持一種多層機制：F–F 相互作用幫助 PTFE 界面黏著，氫鍵和 π–π 堆積則幫助膠層耗散應力。這是一項很有前景的實驗室演示：PTFE 上可以同時實現強、具有延性且可擦洗去除的黏著；但它還不是商業膠水、通用回收方案，也不是完整的環境安全評估。

來源

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