

高分子材料在刑事偵查實務中的應用研究進展

董大林、朱青、劉晉隆、趙鵬程、黃麗*

摘要：刑事偵查作為打擊犯罪、維護社會公平正義的關鍵環節，其技術手段的革新與科學技術的發展密切相關。高分子材料因其獨特的物理化學性能、可設計性及功能多樣性，在刑事偵查領域的應用日益廣泛且深入，為解決複雜案件與提升偵查效率提供了重要技術支撐。本文系統梳理了高分子材料在刑事偵查實務中的應用，包括物證提取與保存、痕跡顯現與增強、偵查器材製備、毒品等違禁品檢測、現場防護與污染控制等方面，詳細闡述了各類高分子材料的作用機制、技術優勢及應用實例。同時，分析了當前高分子材料應用在刑事偵查實務中所面臨的問題與挑戰，並結合材料科學與偵查學的發展趨勢，展望了未來的研究方向與應用前景，旨在為推動高分子材料與刑事偵查的深度融合、促進偵查技術現代化提供參考。

關鍵詞：高分子材料 刑事偵查 物證技術 成分檢驗 偵查器材

Progress in Applied Research of Polymeric Materials in Criminal Investigation Practices

Dong Dalin; Zhu Qing; Liu Jinlong; Zhao Pengcheng; Huang Li

Abstract: Innovations in the technical means of criminal investigation, a crucial link in combating crimes and safeguarding social fairness and justice, are closely intertwined with advances in science and technology. Owing to their unique physical-chemistry properties, designability, and functional diversity, polymeric materials have been increasingly applied in criminal investigation, widely and deeply, providing significant technical support for solving complex cases and improving investigation practices efficiency. This paper systematically summarizes applications of polymeric materials in criminal investigation practices, which include physical evidence extraction and preservation, trace development and enhancement, investigation equipment fabrication, inspection of contraband such as drugs, on-site protection and contamination control. It elaborates on the mechanism of actions, technical advantages, and application cases of various polymeric materials. Additionally, current issues and challenges faced in the application of polymeric materials in criminal investigation practices, are analyzed. Combining the development trends of material science and criminalistics, further research directions and application prospects are predicted. The above predictions aim to provide references for promoting in-depth integration between polymeric materials and criminal investigation, as well as modernization of investigation techniques.

Keywords: Polymeric Materials; Criminal Investigation; Physical Evidence Technology; Component Analysis; Investigative Equipment

* 董大林，中國刑事警察學院，刑事科學技術學院，講師。

* 朱青，中國刑事警察學院，刑事科學技術學院，講師。

* 劉晉隆，中國刑事警察學院，刑事科學技術學院，講師。

* 趙鵬程，中國刑事警察學院，刑事科學技術學院副院長，教授。

* 黃麗，遼寧省公安廳，刑事偵查總隊，理化實驗室主任，正高級職稱。

一、前言

刑事偵查的核心使命是精準發現、提取並檢驗犯罪相關物證，還原案件真相，為司法審判提供科學依據。隨著犯罪手段日趨智慧化、隱蔽化，傳統偵查技術逐漸暴露出諸多不足：物證提取環節，針對血液及爆炸殘留物等微量物證的富集效率低下，易受複雜基質干擾導致目標物質流失；痕跡顯現方面，粉末法及化學試劑法等傳統手段操作繁瑣，對粗糙及多孔客體表面的潛指紋與掩蓋字跡顯現效果模糊，且易破壞物證原始狀態；檢測分析中，傳統技術靈敏度不足，難以快速識別複雜樣品中 ng 級以下的毒品、毒物與藥物成分；偵查裝備則受限於金屬與玻璃等傳統材料，存在重量大、便攜性差、耐腐蝕與防護性能不足等問題，難以適配複雜偵查場景。這些缺陷導致傳統技術未能應對新型複雜案件的偵破需求，亟需跨學科技術革新破解困境。

高分子材料科學作為一門聚焦高分子化合物合成、結構與性能的學科，近年來在多領域取得突破性進展，^[1] 其技術成果正加速向刑事偵查領域滲透。這類材料具備分子量高、結構可設計與性能可調節等核心優勢，通過分子設計與改性可實現高吸附性、特异性識別、熒光響應與輕質高強等定制化功能，能針對性解決傳統偵查技術的痛點：高吸附性高分子材料可實現微量物證的高效富集，^[2] 熒光高分子能讓潛在痕跡可視化顯現，^[3] 分子印跡聚合物（MIPs）可精準識別目標檢測物，高性能複合材料則能打造輕便耐用的偵查裝備。

目前，高分子材料已廣泛應用於物證處理、檢測分析、裝備製備及現場防護等刑事偵查實務的各個環節，成為推動刑事偵查技術升級的核心力量。本文通過系統梳理相關研究文獻，全面綜述高分子材料在刑事偵查中的應用現狀，解析其技術原理與應用效果，探討當前存在的問題與發展潛力，為後續相關研究與實踐提供理論參考。

二、高分子材料在物證提取與保存中的應用

物證是刑事偵查中認定犯罪事實的關鍵依據，其提取與保存的科學性直接影響案件的偵破質量。犯罪現場的物證種類繁多，包括微量生物物證（如血液、唾液及毛髮等）、化學物證（如毒品、爆炸殘留物及油漆碎片等）及痕跡物證（如指紋、足跡及纖維等）等，^[4] 這些物證往往具有含量低、易受污染及穩定性差等特點，給提取與保存帶來了挑戰。高分子材料憑藉其高吸附性、高選擇性及防污染等特性，在物證提取與保存中得到了廣泛應用。

（一）微量物證提取用高分子材料

高分子吸附材料能夠通過物理吸附或化學吸附作用富集目標物質，可分為離子交換樹脂、吸附樹脂及 MIPs 等，在微量化學物證與生物物證的提取中發揮着重要作用。^[5]

離子交換樹脂是一種具有離子交換功能的高分子化合物，通過樹脂骨架上的可交換離子與溶液中的目標離子發生交換反應，實現對目標物質的選擇性吸附。在刑事偵查中，離子交換樹脂可用於提取爆炸

[1] EL-Ghoul, Yassine, Alminderej, et al. Recent Advances in Functional Polymer Materials for Energy, Water, and Biomedical Applications: A Review, *Polymers*, 13, 24, 2021: 4327.

[2] Pandey V, Sharma N, Pandey T. Mechanistic Insights into Nano-enabled Forensic Sensing: Advanced Nano-material Platforms for Trace Evidence Detection, *Luminescence*, 40, 11, 2025, e70362.

[3] Bashir K, Amin M, Majid M, et al. From Invisible to Visible: A Concise Review on Conjugated Polymer Materials in Latent Fingerprint Analysis, *Journal of Polymer Research*, 31, 8, 2024: 235.

[4] Morgan, Ruth M, Meakin, et al. Crime Reconstruction and the Role of Trace Materials From Crime Scene to Court, *Wires Forensic Science*, 2, 1, 2020, e1364.

[5] Belbruno J J. Molecularly Imprinted Polymers, *Chemical Reviews*, 119, 1, 2019: 94–119.

殘留物中的無機離子（如硝酸根及氯離子等）、毒品中的有機胺類化合物等。^[6] 例如，陽離子交換樹脂可通過與毒品中的胺基形成靜電作用，實現對海洛因及甲基苯丙胺等毒品的富集，提高後續檢測的靈敏度。

吸附樹脂是一類不具有離子交換功能，但具有多孔結構和高比表面積的高分子材料，通過范德華力及氫鍵等物理作用吸附目標物質。^[7] 非極性吸附樹脂（如聚苯乙烯型吸附樹脂）可用於吸附油漆中的有機溶劑等非極性物質；極性吸附樹脂（如聚丙烯酸型吸附樹脂）可用於吸附血液中的蛋白質及唾液中的核酸等極性生物大分子。

MIPs 是一種具有特異性識別功能的高分子材料，通過在模板分子存在下，功能性單體與交聯劑發生聚合反應，形成具有與模板分子空間結構互補的特異性結合位點，能夠對目標物質進行高選擇性吸附。MIPs 製備方法如表 1 所示。MIPs 具有製備簡單、穩定性好及特異性強等優點，在微量物證的選擇性提取中具有顯著優勢。例如，以海洛因為模板分子製備的 MIPs，可在複雜樣品（如尿液、血液及污水等）中特異性識別並富集海洛因及其代謝產物，有效排除干擾物質的影響；以爆炸殘留物中的 TNT 為模板分子的 MIPs，可從土壤及灰塵等樣品中高效提取微量 TNT，^[8] 檢出限由高效液相色譜法的 $\mu\text{g/L}$ 級別提升至 $10^{-10}\mu\text{g/L}$ 級別。^[9] 此外，MIPs 還可用於提取縱火案件中的助燃劑（如汽油及柴油等）、毒品案件中的新型精神活性物質等微量物證，為案件偵破提供關鍵線索。

製備方法	優點	缺點
本體聚合法	技術簡單，成本低，適用性廣。	顆粒不規則，模板殘留高，傳質慢。
沉澱聚合法	球形均一，模板易洗脫，傳質快。	聚合體系受限，交聯度難控制。
懸浮聚合法	粒徑可控，產物易分離，負載量高。	操作複雜，洗脫時間長，分散劑殘留。
乳液聚合法	納米粒徑，傳質最快，可功能化。	乳化劑殘留，體系敏感，成本高。
溶膠－凝膠法	耐高溫耐溶劑，孔徑可控，生物相容。	周期長，脆性大，單體有限。
電化學聚合法	薄膜可控，直接傳感，反應溫和。	基底受限，模板範圍窄，穩定性一般。

表1 MIPs聚合物製備方法

（二）生物物證保存用高分子材料

生物物證（如血液、唾液及組織樣本等）中含有 DNA 及蛋白質等生物大分子，其穩定性較差，易受溫度、濕度及微生物等因素影響而降解。高分子材料因其良好的密封性、生物相容性及防腐性能，在生物物證保存中得到了廣泛應用。^[10]

傳統的生物物證保存多採用玻璃容器，但玻璃容器存在易碎及密封性不佳等缺點。高分子材料（如聚乙烯、聚丙烯及聚四氟乙烯等）製成的密封容器具有輕便、耐腐蝕及密封性好等優點，能夠有效隔絕空氣、水分和微生物，防止生物物證降解。為進一步提高生物物證的保存效果，可在保存容器中添加高

[6] Johns C, Shellie R A, Potter O G, et al. Identification of Homemade Inorganic Explosives by Ion Chromatographic Analysis of Post-blast Residues, *Journal of Chromatography A*, 1182, 2, 2008: 205–14.

[7] Zhang Z L, Chen J Y, Gao Y P, et al. A Coupled Technique to Eliminate overall Nonpolar and Polar Volatile Organic Compounds from Paint Production Industry, *Journal of Cleaner Production*, 185, 2018: 266–74.

[8] Zarejousheghani, Mashaalah, Lorenz, et al. Molecularly Imprinted Polymer Materials as Selective Recognition Sorbents for Explosives: A Review, *Polymers*, 11, 5, 2019: 888.

[9] Shahdost-fard F, Roushani M. Impedimetric Detection of Trinitrotoluene by Using a Glassy Carbon Electrode Modified with a Gold Nanoparticle@fullerene Composite and an Aptamer-imprinted Polydopamine, *Microchimica Acta*, 184, 10, 2017: 3997–4006.

[10] Oleksy, Małgorzata, Dynarowicz, et al. Advances in Biodegradable Polymers and Biomaterials for Medical Applications—A Review, *Molecules*, 28, 17, 2023: 6213.

分子保存劑。^[11] 這類保存劑通常具有良好的生物兼容性，能夠抑制微生物生長並防止生物大分子降解。例如，聚乙二醇（PEG）是一種常用的高分子保存劑，具有保濕及防腐等作用，可用於保存組織樣本和生物流體樣本，減少 DNA 的降解；殼聚糖作為一種天然高分子材料，具有抗菌及生物可降解等特性，^[12] 可用於製備生物物證保存膜，延長血液及唾液等樣本的保存時間。此外，基於海藻酸鈉及明膠等天然高分子的複合保存劑，通過交聯反應形成凝膠狀結構，能夠將生物物證包裹其中，提供穩定的保存環境，適用於現場快速保存微量生物物證。

三、高分子材料在痕跡顯現與增強中的應用

痕跡物證（如指紋、足跡、字跡及彈痕等）是犯罪現場最常見的物證類型，^[13] 其顯現與增強是刑事偵查中的關鍵環節。傳統的痕跡顯現材料存在顯現效果差、操作複雜及易破壞物證等缺點。高分子材料憑藉其熒光特性、成膜性及黏附性等特點，在痕跡顯現與增強中展現出獨特的優勢，能夠實現潛在痕跡的高效顯現與細節增強。

（一）指紋顯現用高分子材料

指紋是刑事偵查中身份認定的重要依據，潛指紋的顯現是痕跡檢驗的核心技術之一。高分子材料在指紋顯現中的應用主要基於熒光顯現及成膜顯現等原理，能夠有效提高指紋的顯現靈敏度和清晰度。^[14]

熒光高分子材料是一類能夠吸收特定波長的光並發射出熒光的高分子化合物，其熒光強度高、穩定性好、毒性低，在潛指紋顯現中具有廣泛應用。例如，聚噻吩及聚苯乙炔等共軛高分子材料具有良好的熒光性能，可通過靜電作用或疏水作用與指紋殘留物中的油脂及蛋白質等成分結合，在紫外光或藍光照射下發射出強烈的熒光，實現潛指紋的可視化顯現。與傳統的熒光染料相比，熒光高分子材料可以通過改變分子結構來調節發光波長，穩定性好不易發生熒光猝滅，易於實現多功能化，使其能夠顯現出更清晰的指紋細節特徵。

此外，基於 MIPs 的熒光高分子顯現劑具有特異性識別功能，能夠選擇性結合指紋殘留物中的特定成分（如膽固醇及脂肪酸），進一步提高顯現的特異性和靈敏度。例如，以膽固醇為模板分子製備的熒光 MIPs，可在複雜背景（如紙幣、塑料及金屬等表面）中特異性顯現潛指紋，有效排除干擾物質的影響，顯現效果優於傳統的顯現材料。

（二）其他痕跡顯現與增強用高分子材料

除指紋外，高分子材料還可用於足跡、字跡及彈痕等其他痕跡的顯現與增強。

在足跡顯現中，高分子發泡材料（如聚氨酯泡沫及聚苯乙烯泡沫）可用於提取立體足跡。這類材料具有輕質及易成型等特點，能夠快速填充足跡的凹陷部分，形成與原始足跡一致的模型，便於後續的測量與分析。此外，基於高分子材料的足跡增強劑（如聚丙烯酸酯乳液）可用於增強灰塵足跡及血足跡的對比度，通過噴塗在足跡表面形成一層黏性薄膜，吸附灰塵或血液成分，使足跡更加清晰可見。

在字跡顯現中，高分子染料（如聚甲基丙烯酸甲酯接枝熒光染料）可用於顯現被塗抹及掩蓋的字跡。這類材料能夠滲透到紙張的纖維中，與字跡中的墨水成分發生相互作用，在特定波長的光照射下發射出

[11] Sorokulova I, Olsen E, Vodyanoy V. Biopolymers for Sample Collection, Protection, and Preservation, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99, 13, 2015: 5397–406.

[12] Smola-Dmochowska, Anna, Lewicka, et al. Biodegradable Polymers and Polymer Composites with Antibacterial Properties, *International Journal of Molecular Sciences*, 24, 8, 2023: 7473.

[13] Wiltshire P E J, Hawksworth D L, Webb J A, et al. Two Sources and Two Kinds of Trace Evidence: Enhancing the Links Between Clothing, Footwear and Crime Scene, *Forensic Science International*, 254, 2015: 231–42.

[14] Assis, Alexandro M L, Costa, et al. From Nanomaterials to Macromolecules: Innovative Technologies for Latent Fingerprint Development, *Wiley Interdisciplinary Reviews Forensic Science*, 5, 2, 2022, e1475.

熒光，從而顯現出被掩蓋的字跡內容。與傳統的化學顯現法相比，高分子染料顯現法具有操作簡單及對紙張損傷小等優點。

在彈痕顯現中，高分子複合材料（如環氧樹脂基複合材料）可用於製備彈痕複製模型。這類材料具有高強度、高硬度及耐磨損等特點，能夠精確複製彈痕的形態特徵（如膛線痕跡及彈孔邊緣痕跡），為槍支鑒定提供準確的樣本。此外，高分子熒光探針可用於檢測彈痕周圍的微量金屬離子（如鉛離子及銅離子），通過熒光強度的變化判斷槍支的類型和射擊距離。

四、高分子材料在毒品、毒物、藥品與違禁品檢測中的應用

毒品、毒物、藥品與違禁品的快速及準確檢測是刑事偵查中的重要任務，對於打擊犯罪及維護社會秩序具有重要意義。高分子材料因其高選擇性、高靈敏度及易功能化等特點，在毒品、毒物、藥品與違禁品檢測中得到了廣泛應用，推動了檢測技術的快速發展。

（一）毒品、毒物與藥品檢測用高分子材料

MIPs 具有特異性識別功能，^[15] 能夠在複雜樣品中選擇性識別並結合目標分子，是毒品、毒物與藥品檢測中的理想材料。MIPs 可作為固相萃取吸附劑及傳感器敏感組件等用於毒品、毒物與藥品的分離與檢測。

在固相萃取中，^[16] MIPs 可用於樣品前處理，富集複雜樣品（如尿液、血液、毛髮及污水等）中的微量化合物及其代謝產物，排除干擾物質的影響。例如，以甲基苯丙胺為模板分子製備的 MIPs，可用於尿液樣品中甲基苯丙胺的固相萃取，回收率最高可達 96.4%，^[17] 將顯著提高後續檢測方法（如高效液相色譜法及質譜法）的靈敏度。此外，MIPs 還可用於毛髮樣品中毒品的提取，毛髮中的毒品分子可與 MIPs 的特異性結合位點結合，實現高效分離與富集，為長期吸毒人員的認定提供依據。

在傳感器檢測中，MIPs 可作為敏感組件製備電化學傳感器及光學傳感器等，^[18] 實現毒品、毒物與藥品的快速檢測。例如，將 MIPs 修飾在電極表面製備電化學傳感器，毒品分子與 MIPs 結合後會引起電極表面的電信號變化，通過測量電流及電位等信號可實現對毒品的定性和定量檢測。這類傳感器具有響應速度快、檢出限低及操作簡單等優點，可用於現場快速篩查毒品。基於 MIPs 的熒光傳感器，毒品分子與 MIPs 結合後會導致熒光強度的變化，通過測量熒光信號可實現對毒品的快速檢測，檢出限覆蓋 nmol/L 至 mmol/L 的範圍。^[19]

除 MIPs 外，其他高分子材料也在毒品、毒物與藥品檢測中發揮着重要作用。例如，導電高分子（如聚吡咯及聚苯胺）可用於製備毒品檢測傳感器，^[20] 毒品分子與導電高分子之間的相互作用會導致導電高分子的電導率變化，通過測量電導率的變化可實現對毒品的檢測。此外，高分子水凝膠可用於製備毒品檢

[15] Bergmann N M, Peppas N A. Molecularly Imprinted Polymers with Specific Recognition for Macromolecules and Proteins, *Progress in Polymer Science*, 33, 3, 2008: 271–88.

[16] Lasáková M, Jandera P. Molecularly Imprinted Polymers and Their Application in Solid Phase Extraction, *Journal of Separation Science*, 32, 5–6, 2009: 799–812.

[17] Murakami T, Iwamuro Y, Ishimaru, et al. Molecularly Imprinted Polymer Solid-phase Extraction of Synthetic Cathinones From Urine and Whole Blood Samples, *Journal of Separation Science*, 41, 24, 2018: 4506–14.

[18] Ahmad O S, Bedwell T S, Esen C, et al. Molecularly Imprinted Polymers in Electrochemical and Optical Sensors, *Trends in Biotechnology*, 37, 3, 2019: 294–309.

[19] Yarman A, Kurbanoglu, Senvic, et al. Electrochemical Mip-sensors for Drugs, *Current Medicinal Chemistry*, 25, 33, 2018: 4007–19.

[20] Wang Y M, Liu A P, Han Y Q, et al. Sensors Based on Conductive Polymers and Their Composites: A Review, *Polymer International*, 69, 1, 2020: 7–17.

測試紙，^[21] 水凝膠中含有能夠與毒品分子發生特異性反應的試劑，當樣品中含有目標毒品時，水凝膠會發生顏色變化或熒光變化，實現快速定性檢測。

（二）違禁品檢測用高分子材料

違禁品包括爆炸物及易燃品等。高分子材料在爆炸物檢測中的應用主要基於吸附、熒光猝滅及電化學響應等原理。MIPs 可用於爆炸物的選擇性吸附與檢測。以三硝基甲苯（TNT）、黑索金（RDX）等常見爆炸物為模板分子製備的 MIPs，能夠在複雜環境中特異性識別並富集爆炸物分子，檢測的靈敏度可達 $10\mu\text{g/L}$ 。^[22] 此外，基於 MIPs 的固相萃取柱可用於提取土壤及灰塵中的微量 TNT，為爆炸案件的偵破提供關鍵物證。熒光高分子材料也可用於爆炸物檢測。許多爆炸物分子（如 TNT）具有強電子親和性，能夠與熒光高分子發生電子轉移反應，導致熒光猝滅。例如，聚噻吩及聚苯乙炔等共軛熒光高分子與 TNT 蒸氣接觸後^[23]，熒光強度會顯著降低，通過測量熒光猝滅程度可實現對 TNT 的定性和定量檢測。這類熒光高分子材料具有響應速度快、靈敏度高及成本低等優點，可用於製備便攜式爆炸物檢測裝置，用於機場及車站等人員密集場所的安全檢查。在易燃品檢測中，高分子氣體傳感器可用於檢測易燃氣體（如甲烷及乙醇蒸氣）。基於導電高分子的氣體傳感器能夠快速響應氣體濃度變化，實現對易燃品的快速檢測。

五、高分子材料在偵查器材製備中的應用

偵查器材的性能直接影響偵查工作的效率與質量。高分子材料因其輕質、高強度、耐腐蝕及易加工等優點，推動了偵查器材的輕量化、便攜化及高性能化發展。

（一）防護類偵查器材

刑事偵查人員在現場勘查及抓捕等工作中面臨着各種安全風險，如爆炸、有毒氣體及尖銳物體傷害等，需要配備專業的防護器材。高分子材料在防護器材中的應用主要體現在防彈、防刺及防毒等方面。用於防彈衣製備的高分子纖維種類及各自特點如表 2 所示。傳統的防彈器材多採用金屬材料，但金屬材料存在重量大及靈活性差等缺點。高分子複合材料（如芳綸纖維及超高分子量聚乙烯（UHMWPE）纖維增強複合材料）具有高強度、高模量及輕質等特點，已成為防彈器材的首選材料。^[24] 芳綸纖維（如凱夫拉纖維）的強度是鋼材的 5–6 倍，重量僅為鋼材的 1/5，具有良好的抗衝擊性能和韌性，可用於製備防彈衣、防彈頭盔及防彈盾牌等器材。UHMWPE 纖維的強度比芳綸纖維更高，^[25] 且具有良好的耐腐蝕性和耐磨性，適用於製備高性能防彈器材，能夠有效抵禦手槍及步槍等武器的射擊。防刺器材通常採用高強度高分子材料與金屬網複合製成，如芳綸纖維與不銹鋼絲複合的防刺服，既具有芳綸纖維的輕質及柔性特點，又具有不銹鋼絲的防刺性能，能夠有效抵禦匕首及三棱刀等銳器的穿刺。

（二）檢測類偵查器材

檢測類偵查器材是用於現場快速檢測物證的重要工具，如毒品檢測儀、爆炸物檢測儀及酒精檢測儀等。高分子材料在檢測類偵查器材中的應用主要體現在傳感器及檢測芯片等核心部件的製備上。

[21] Chen Y T, Goudar V, Wu R G, et al. A UV-sensitive Hydrogel Based Combinatory Drug Delivery Chip (uv Gel-drug Chip) for Cancer Cocktail Drug Screening, *Rsc Advances*, 6, 50, 2016, 44425–34.

[22] Karadurmus L, Bilge S, Sinağ A, et al. MIP-based Sensing for Detection of Explosives: Current Perspectives and Future Applications, *Trac Trends in Analytical Chemistry*, 155, 2022, 116694.

[23] Yang J S, Swager T M. Fluorescent Porous Polymer Films as Tnt Chemosensors: Electronic and Structural Effects, *Journal of the American Chemical Society*, 120, 46, 1998, 11864–73.

[24] Colombo P, Zordan F, Medvedovski E. Ceramic-polymer Composites for Ballistic Protection, *Advances in Applied Ceramics*, 105, 2, 2006, 78–83.

[25] Nawaz K A, Gupta M, Mahajan P, et al. UHMWPE Textiles and Composites, *Textile Progress*, 53, 4, 2021, 183–335.

1. 高分子傳感器

高分子傳感器是一類以高分子材料為敏感組件的傳感器，能夠通過高分子材料與目標物質的相互作用（如吸附、化學反應及離子交換等）將目標物質的濃度轉化為可檢測的電信號或光學信號。導電高分子的電導率會隨着吸附目標氣體分子而發生顯著變化，通過測量電導率的變化可實現對目標氣體的定性和定量檢測。這類傳感器具有響應速度快、靈敏度高及體積小等優點，可集成到便攜式爆炸物檢測儀中，用於現場快速篩查爆炸物。在刑事偵查中，基於熒光高分子的光學傳感器已廣泛應用於毒品、爆炸物及酒精等物質的快速檢測。^[26]

纖維種類	優點	缺點
UHMWPE 纖維	密度 (0.97 g/cm^3) 是所有防彈纖維中最輕的；拉伸強度 ($3.5\text{--}4.5 \text{ GPa}$) 和比強度遠超鋼材；抗衝擊性優異，子彈撞擊時不易斷裂；耐化學腐蝕性強、耐潮濕；柔韌性好，穿戴靈活性高。	耐熱性較差，連續使用溫度不超過 100°C ；抗切割性略遜於芳綸，部分場景需搭配抗割層。
芳綸纖維	拉伸強度 ($2.8\text{--}3.5 \text{ GPa}$) 僅次於 UHMWPE，比強度是鋼材的 5 倍以上；耐熱性優異，連續使用溫度可達 $200\text{--}250^\circ\text{C}$ ，不燃、不熔，能承受高溫環境；抗切割、抗撕裂性能強，耐磨性能好，使用壽命長；柔韌性好，成型性佳。	密度 (1.44 g/cm^3) 高於 UHMWPE，相同防護等級下重量略重；吸濕性較強，需做防潮處理；成本高於 UHMWPE。
聚對苯撐苯並二惡唑纖維	拉伸強度 ($5.8\text{--}6.5 \text{ GPa}$) 和拉伸模量 ($180\text{--}200 \text{ GPa}$) 高；耐熱性極佳，連續使用溫度可達 300°C 以上；抗衝擊性和能量吸收效率突出，適合高防護等級需求。	成本極高（是芳綸的 3–5 倍）；耐紫外光性能較差；柔韌性略遜於芳綸和 UHMWPE，穿戴舒適性稍差。

表2 用於防彈衣製備的高分子纖維種類及各自特點

2. 高分子檢測芯片

微流控芯片是一種用於微量樣品分析的微型器件，其結構與功能如表 3 所示。其核心部件通常採用高分子材料（如聚二甲基矽氧烷 (PDMS) 及聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)）製備。^[27]PDMS 具有良好的生物兼容性、透氣性和易加工性，可通過軟光刻技術製備出具有微通道及微反應器等結構的微流控芯片，用於生物物證（如 DNA 及蛋白質）的快速檢測。例如，基於 PDMS 的微流控芯片可實現 DNA 的快速擴增與檢測，^[28] 整個檢測過程可在幾十分鐘內完成，適用於現場快速認定犯罪嫌疑人身份。PMMA 具有透明、耐磨損及成本低等特點，可用於製備便攜式檢測芯片的基板，與傳感器及微通道等結構集成，形成一體化的檢測裝置。例如，PMMA 材質的檢測芯片，可通過芯片上的高分子敏感組件與樣品中的特徵分子發生特異性反應，實現對化合物的檢測，檢出限可達 $10\mu\text{g/mL}$ ，^[29] 為現場快速篩查毒品提供了高效工具。

六、高分子材料在現場防護與污染控制中的應用

偵查人員在現場勘查時可能需要穿戴個人防護裝備 (PPE)，以防止有毒有害物質（如毒品、爆炸殘留物及生物病原體等）的接觸與吸入。防護服通常採用聚丙烯、聚乙烯及聚氯乙烯等高分子材料製成，具

[26] Melnikov P, Bobrov A, Marfin Y, et al. On the Use of Polymer-based Composites for the Creation of Optical Sensors: A Review, *Polymers*, 14, 20, 2022, 4448.

[27] Ren K N, Zhou J H, Wu H K. Materials for Microfluidic Chip Fabrication, *Accounts of Chemical Research*, 46, 11, 2013, 2396–406.

[28] Zhang C S, Xu J L, Ma W L, et al. PCR Microfluidic Devices for DNA Amplification, *Biotechnology Advances*, 24, 3, 2006, 243–84.

[29] Al-aqbi, Zaidon T, Yap, et al. Integrated Microfluidic Devices Fabricated in Poly(methyl Methacrylate) (PMMA) for On-site Therapeutic Drug Monitoring of Aminoglycosides in Whole Blood, *Biosensors*, 9, 1, 2019, 19.

有防水、防滲透及防污染等特點，能夠有效隔離現場的有毒有害物質並保護偵查人員。手套採用乳膠、丁腈橡膠及聚乙烯等高分子材料製成，具有良好的貼合性和防護性能，能夠防止偵查人員手部直接接觸物證和有毒有害物質。口罩採用聚丙烯無紡布及含活性炭纖維等高分子材料製成，能夠過濾空氣中的顆粒物和有毒氣體，保護偵查人員的呼吸系統。為防止非相關人員進入犯罪現場，保護現場的完整性，需要使用隔離與警示材料。高分子材料（如聚乙烯、聚丙烯及聚氯乙烯等）製成的隔離帶及警示標志具有輕便、耐用及易部署等特點，廣泛應用於犯罪現場的隔離與警示。但是低溫脆性限制了上述材料在部分場景中的使用。

犯罪現場還可能存在毒品、爆炸殘留物及有毒化學試劑等有毒有害物質，需要及時進行處理，防止污染擴散。高分子吸附材料（如吸附樹脂、活性炭纖維及 MIPs 等）能夠高效吸附這些有毒有害物質，實現現場污染的控制。^[30] 在物證提取與運輸過程中，為防止物證受到污染，需要使用防護材料對物證進行包裝和隔離。高分子材料（如聚乙烯袋、聚丙烯盒及聚氯乙烯保鮮膜等）具有良好的密封性和防污染性能，是物證包裝的常用材料。

微流控芯片結構	各部分功能
微通道網絡	微流控芯片的核心結構，尺寸通常在十至數百微米之間。它是流體傳輸、混合、反應和分離的核心路徑，可引導樣品、試劑及緩衝液等流體在芯片內流動。
驅動與控制部件	包括微泵、微閥以及外部驅動源，用於提供流體流動所需的動力，並精確控制流速、流向和時序。
微混合器	通過設計蛇形通道、障礙物及混沌對流結構等特殊結構，或利用聲波及電動擾動等方式，來增強混合效果，加速試劑與樣品的混合，提升反應效率和檢測靈敏度。
微反應腔室	芯片上設計的特定區域，用於容納流體進行孵育、化學反應、細胞培養及核酸擴增等。

表3 微流控芯片結構

七、存在的問題與挑戰

儘管高分子材料在刑事偵查實務中的應用取得了顯著進展，但仍存在一些問題與挑戰，制約了其進一步推廣與發展。^[31]

目前，部分高分子材料的性能仍無法完全滿足刑事偵查的特殊需求。在物證提取中，部分高分子吸附材料的選擇性仍需提高，對於複雜樣品中的微量物證提取效率較低。例如，MIPs 針對新烟鹼類農藥的檢測效率與檢測準確度有待進一步提高。^[32] 在痕跡顯現中，部分熒光高分子材料的熒光穩定性較差，易受環境因素（如溫度、濕度及光照等）影響，導致顯現效果不佳。例如，羅丹明類染料作為常見的痕跡顯現熒光材料，其光穩定性較差，易發生光漂白，需借助矽基等基質改善穩定性。^[33] 在偵查器材製備中，部分高分子複合材料的強度、耐磨性和耐腐蝕性仍需提升，難以適應惡劣的現場環境。

部分高性能高分子材料（如芳綸纖維、UHMWPE 纖維及 MIPs）的製備工藝複雜，成本較高，導致相關偵查器材和檢測設備的價格昂貴，難以在基層偵查部門廣泛推廣應用。例如，基於 MIPs 的毒品檢測芯片和傳感器，由於製備成本較高，目前主要應用於實驗室檢測，難以實現現場大規模普及。

[30] Lim J Y C, Goh S S, Liow S S, et al. Molecular Gel Sorbent Materials for Environmental Remediation and Waste water Treatment, Journal of Materials Chemistry A, 7, 32, 2019, 18759–91.

[31] Díez-Pascual, Ana M. Perspectives of Polymers in Forensic Analysis, Macromol, 3, 2, 2023, 108–19.

[32] 鹿萌、張若楠、柳慧芳等：〈分子印跡技術在新菸鹼類農藥殘留分析中的應用研究進展〉，《食品工業科技》，2019年，第40卷，第21期，第307–314頁。

[33] Demchenko A P. Photobleaching of Organic Fluorophores: Quantitative Characterization, Mechanisms, Protection, Methods and Applications in Fluorescence, 2020, 8, 2, 2020, 022001.

部分基於高分子材料的偵查設備操作較為複雜，對偵查人員的專業知識和操作技能要求較高。例如，微流控芯片檢測技術需要偵查人員掌握芯片的使用方法和檢測原理，否則難以保證檢測結果的準確性；MIPs 的製備需要專業的實驗設備和技術人員，基層偵查部門難以獨立完成。

部分高分子材料（如塑料及橡膠）在使用後難以降解，導致一次性高分子防護裝備的大量使用會產生白色污染。部分高分子顯現劑和檢測試劑含有重金屬離子，使用過程中可能會對人體健康和環境造成危害。

八、未來發展趨勢與展望

隨著高分子材料科學與刑事偵查學的不斷發展，高分子材料在刑事偵查實務中的應用具有廣闊的發展前景。^[34] 未來的研究方向將主要集中在以下幾個方面。

（一）高性能、多功能高分子材料的研發

針對刑事偵查對材料性能的精準需求，構建“場景定制化 – 結構功能化”研發路徑。在物證提取領域，通過分子鏈修飾與交聯度調控，優化 MIPs 的特異性結合位點密度，開發對 ng 級毒品與爆炸殘留物的高選擇性吸附材料，結合磁性納米粒子複合技術，實現“吸附 – 分離 – 富集”一體化，解決複雜基質中微量物證提取效率低的問題；在痕跡顯現方面，採用共軛高分子與熒光探針接枝改性，提升材料抗光漂白性與環境穩定性，研發適配粗糙客體與多孔表面的長效熒光顯現劑，同時集成疏水防污塗層，避免顯現過程中物證破壞；在器材製備領域，通過纖維界面改性與多元複合工藝，研發兼具超高強度及耐極端環境（高低溫與腐蝕）的輕量化複合材料，突破傳統材料在防護器材與偵查裝備中的性能瓶頸。此外，聚焦多場景協同需求，開發集吸附、顯現與檢測功能於一體的智能響應材料，如 pH/ 溫度敏感型高分子凝膠，實現現場物證的快速識別與固定，大幅提升偵查效率。

（二）低成本、便攜式檢測技術與設備的開發

為推動高分子材料在基層偵查部門的廣泛應用，未來將重點開發低成本及便攜式的檢測技術與設備。例如，簡化 MIPs 的製備工藝，降低其生產成本；開發基於高分子材料的快速檢測試紙及便攜式傳感器等設備，實現現場快速及準確檢測。此外，還將推動檢測設備的小型化及一體化發展，提高設備的便攜性和操作簡便性，使基層偵查人員能夠快速掌握並使用。

以“工藝簡化 – 器件小型化 – 操作便捷化”為核心，推動高分子材料檢測技術的基層普及。在材料製備端，優化 MIPs 合成工藝，採用水溶液聚合替代有機溶劑聚合，簡化模板分子洗脫流程，降低原料成本與製備難度；開發低成本熒光高分子複合材料，通過天然高分子（澱粉與殼聚糖）改性替代昂貴合成單體，在保證檢測靈敏度的同時降低材料成本。在設備開發方面，聚焦現場快速檢測需求，設計基於高分子敏感膜的便攜式傳感器，集成微型電化學工作站與藍牙傳輸模塊，實現毒品與爆炸物的實時定性定量分析；開發一次性高分子檢測試紙，將 MIPs 與顯色試劑複合固化，通過顏色變化直觀呈現檢測結果，無需專業操作技能。此外，推動檢測設備一體化集成，以 PMMA 與 PDMS 等低成本高分子為基底，製備微型化微流控芯片，集成樣品預處理與反應檢測等功能模塊，壓縮檢測時間，降低設備重量，適配基層偵查現場的便攜化使用需求。

（三）智能化、自動化技術的融合

隨着人工智能、物聯網及微機電系統技術的飛速發展，高分子材料與智慧化、自動化技術的深度融合將成為突破傳統偵查模式的關鍵路徑。在物證處理流程中，研發搭載高分子複合材料外殼的自動化勘查設備，其內置的高分子吸附模塊可按默認路徑完成現場微量物證的定點採集、自動富集與密封保

[34] Anuradha, Bhatia T. Novel Nanomaterials in Forensic Investigations: A Review, Materials Today: Proceedings, 50, 2022, 1071–9.

存，通過物聯網技術與實驗室檢測系統無縫銜接，實現物證信息的全流程數字化追蹤。在檢測環節，將MIPs、熒光高分子等功能材料與柔性傳感器集成，結合機器學習算法構建智能檢測系統，可實現對毒品及爆炸殘留物等物證的自動識別、定量分析及數據溯源，通過傳感器實時採集的光學、電化學信號，由算法模型快速匹配特徵數據庫，大幅縮短檢測周期並降低人為誤差。此外，基於高分子水凝膠、形狀記憶聚合物的智能執行部件，可賦能偵查機器人完成複雜場景下的痕跡提取與彈痕複製等精細操作，結合機器視覺技術實現潛在痕跡的自動定位與增強顯現，推動偵查工作從“人工主導”向“智慧協同”轉型，顯著提升勘查效率與證據鏈完整性。

（四）環境友好型高分子材料的發展

為應對環境污染問題，環境友好型高分子材料具有良好的發展前景。例如，研發可降解的高分子材料，替代傳統的不可降解高分子材料，減少白色污染；研發無毒環保的高分子顯現劑和檢測試劑，降低對人體健康和環境的危害。此外，還可推動高分子材料的回收利用，提高資源利用率，實現可持續發展。

九、結論

高分子材料已全面滲透刑事偵查實務各個環節，憑藉高吸附性及特異性識別等獨特性能，有效破解了微量物證提取難、痕跡顯現模糊及檢測靈敏度不足等傳統痛點，成為推動刑事偵查技術現代化的核心支撐。當前應用仍面臨材料性能與實戰需求不匹配、高端技術成本高、基層操作門檻高及環境友好性不足等突出矛盾。對此，本文提出差異化發展路徑：摒棄泛化追求高性能的研發邏輯，轉向“偵查場景定制化”，開發適配複雜環境的一體化功能材料；構建“技術－成本－環保”協同模式，通過簡化工藝及研發可降解材料破解推廣瓶頸。未來，隨著高分子材料與人工智能、微機電系統的深度融合，需以“實戰效能”為核心，推動技術從“被動適配”向“主動引領偵查模式革新”轉變，形成技術創新與實戰應用深度耦合的良性循環，為打擊新型犯罪提供更具針對性的技術保障。