

氨基功能化聚对亚苯基亚乙烯在指纹显现中的应用*

王乐¹, 王亚琳¹, 徐杰², 马荣梁³, 丁斌⁴, 范丽娟⁵, 樊智楠⁵, 刘捷⁴

1. 南京警察学院刑事科学技术学院, 江苏 南京 210023
2. 张家港市公安局, 江苏 苏州 215600
3. 公安部物证鉴定中心, 北京 100010
4. 兰州铁路公安处警务支援支队, 甘肃 兰州 730050
5. 苏州大学材料与化学化工学部, 江苏 苏州 215123

摘要:以氨基功能化聚对亚苯基亚乙烯(PPV-brPEI NPs)材料为研究对象,采用控制变量法系统评估其对潜指纹的显现效果,探索一种新型潜指纹显现方法。结果表明,使用PPV-brPEI NPs通过点滴法可实现最优的指纹显现清晰度,在硬币、粗糙手机壳、胶带等疑难客体表面均可清晰显现指纹的一级和二级特征;相较于传统的粉末法和502熏显法,该方法能有效克服承痕客体凹凸不平、复杂花纹或粘连性等因素对指纹显现的干扰。实验发现,指纹连续按捺次数(1~5次)、指纹按捺作用力的大小(0.2~0.7 N)以及指纹遗留时间(1~12 d)对显现效果未有显著影响,但PPV-brPEI NPs试剂对于DNA检测存在一定的抑制作用。该材料尤其适用于油脂类潜指纹的显现,在粗糙复杂背景或黏性表面等疑难客体上表现出良好的显现效果,为解决此类疑难客体的指纹显现问题提供了可行方案;其对DNA检测的抑制作用为后续试剂的性质改良提供方向。

关键词:氨基功能化聚对亚苯基亚乙烯;指纹显现;疑难客体;DNA检测;法庭科学

中图分类号:TQ422;O611.3 文献标志码:A 文章编号:2097-0137(XXXX)XX-0001-08

Application of amino-functionalized poly(*p*-phenylene vinylidene) nanoparticles in latent fingerprint development

WANG Le¹, WANG Yalin¹, XU Jie², MA Rongliang³, DING Bin⁴, FAN Lijuan⁵, FAN Zhinan⁵, LIU Jie⁴

1. College of Criminal Science and Technology, Nanjing Police University, Nanjing 210023, China
2. Zhangjiagang Public Security Bureau, Suzhou 215600, China
3. Physical Evidence Identification Center of the Ministry of Public Security, Beijing 100010, China
4. Criminal Technology Detachment of Lanzhou Railway Public Security Division, Lanzhou 730000, China
5. College of Chemistry, Chemical Engineering and Materials Science, Soochow University, Suzhou 215123, China

Abstract: The study aimed to explore new methods for revealing latent fingerprints by using amino-functionalized poly(*p*-phenylene vinylene) fluorescent

* 收稿日期:2025-12-03 录用日期:2026-01-04 网络首发日期:2026-01-XX

基金项目:公安部重点实验室项目(2023FMKFKT03);江苏省高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师培养项目(苏教师函[2025]4号)

作者简介:王乐(1989年生),女;研究方向:法庭科学;
E-mail:wangle@nfpc.edu.cn;wang131yue@163.com

通信作者:马荣梁(1975年生),男;研究方向:潜指纹显现;
E-mail:rongliang.ma@cifs.gov.cn;marl2013@163.com



nanoparticles (PPV-brPEI NPs) as the research object. The results showed that the drop method using PPV-brPEI NPs yields the clearest fingerprints, and the number of consecutive fingerprint impressions (1~5 times), the force applied (0.2~0.7 N), and the age of the fingerprint (1~12 d) have little effect on the revelation effect. PPV-brPEI NPs can clearly reveal the morphological and detailed features of fingerprints on several difficult substrates such as coins, rough phone cases, and tape surfaces. Compared with traditional powder methods and 502 fuming methods, this method has advantages in eliminating the interference of uneven surfaces, complex patterns, and adhesion on fingerprint revelation. However, PPV-brPEI NPs have an inhibitory effect on DNA detection. All together suggested that PPV-brPEI NPs have certain advantages in revealing oily latent fingerprints, especially on difficult substrates such as rough and complex backgrounds and sticky surfaces, with good revelation effects. It can provide a solution to the problem of fingerprint revelation on difficult substrates. At the same time, the inhibitory effect of this reagent on DNA detection also suggested subsequent reagent improvement in the future.

Key words: PPV-brPEI NPs; fingerprint revelation; difficult substrate; DNA detection; forensic science

犯罪现场勘验中,以指纹为代表的生物性形象痕迹作为关键物证,在提供侦查方向、确定犯罪嫌疑人、构建完整证据链条等方面具有关键作用(郑方等,2016)。尽管传统的指纹显现技术在实战中积累了丰富的经验,但其局限性也日益突显(Wang et al., 2018)。例如,金属表面的光学反射干扰和复杂纹理的背景噪点常导致纹线显现完整度不高等情况出现(赵慧民,2010)。在此背景下,开发适配疑难客体的新型指纹显现技术,并扩展至掌纹、肤纹等其他形成原理相同的生物性形象痕迹,既是法庭科学发展的理论需求,更是提升破案效率与司法时效的重要实践课题。

潜指纹中通常含有汗液与油脂,在伤害类案件中还可能含有血液成分。根据物质含量及遗留环境,潜指纹主要可分为汗潜指纹、血潜指纹与油脂指纹3类。汗潜指纹主要由汗腺分泌的水分、无机盐、氨基酸和尿素构成;血潜指纹主要由血红蛋白、血小板等血液成分与皮肤分泌物混合形成;油脂指纹的成分包括角鲨烯、蜡脂、甘油三酯、胆甾醇脂、脂肪酸、长链脂肪脂及胆固醇等(Greene et al., 1970)。由于油脂成分在指纹残留物中占比达60%~80%,且其形成受个体代谢水平、饮食结构及接触频率等因素影响,在光滑非渗透性表面(如玻璃、金属)留存时间较长,因此本研究选用油脂指纹开展显现效果的探究实验,以期以油脂指纹为代表的生物性形象类痕迹的显现提供新的技术路径。

近年来,荧光纳米材料的突破为指纹显现技术带来了革新动力。相较于传统荧光粉末法,荧光纳米材料能有效克服承痕客体在形貌、花纹和颜色方面对显现效果造成的干扰,获得更好的对比度(王

晨,2022;翟佳丽,2024)。纳米尺寸赋予材料优异的表面特性与独特的微观形貌,使其表现出特异性吸附特点,具有更高的显现灵敏度(Jasuja et al., 2008)。在此背景下,各类量子点、荧光硅纳米粒子和荧光染料已被应用于潜指纹的显现研究领域(Wolfbeis, 2009)。量子点材料诸如SnO₂量子点(Kumar, 2022)、碳量子点(Wang et al., 2022)和ZnO量子点(Upadhyay et al., 2023),具有窄荧光发射光谱、高量子产率和良好的光稳定性等光学特性,在潜指纹成像中产生良好的荧光信号输出,表现出高对比度的荧光呈像(Stanisavljevic et al., 2015; Wegner et al., 2015; Nsibande et al., 2016; 吴风等, 2024);TiO₂纳米颗粒悬浮液对潜在手印表面的脂类等物质表现出良好的靶向吸附能力(陈世韬等, 2022; Syrti et al., 2025; Singha et al., 2025)荧光染料掺杂的SiO₂纳米粒子(Wang et al., 2017; Wang et al., 2018)以及聚集诱导发光(AIE)材料(Mei et al., 2015; Wang et al., 2016)因其良好的光学性能、电子性能和表面可修饰性而受到关注(Chen et al., 2017; 刘俊等, 2021)。PPV-brPEI NPs作为荧光纳米材料的一种,凭借其良好的发光性能、无毒性及表面可修饰性等优势(Greene et al., 1970; Chen et al., 2018),可应用于潜指纹的显现领域,具有进一步开展研究的价值。

本研究使用的氨基功能化聚对亚苯基亚乙烯(PPV-brPEI NPs)纳米粒子溶液按照苏州大学范丽娟教授团队采用的Wessling法制备:首先合成PPV-brPEI NPs的前驱体溶液,随后向其加入表面活性剂,最后经热消除反应获得PPV-brPEI NPs溶液(陈红,2017)。

1 材料与方法

1.1 目的

本研究以 PPV-brPEI NPs 为指纹显现试剂, 将其作为显现指纹的方法简称为 PPV 显现法。研究选取硬币、手机壳、胶带 3 类疑难客体, 比较 PPV 显现法与传统显现方法的优劣。硬币因其凹凸不平表面导致传统显现方法显现效果欠佳; 手机壳作为常见的客体, 因其表面具有复杂花纹使其成为显现较为困难的客体; 胶带因其粘连性使其对显现技术的要求高, 且显现效果差。尽管通过照相法可有效固定透明胶带上的指纹, 但针对有色胶带的研究仍显不足(于捷年, 2012)。为此, 本研究特选用有色胶带作为典型疑难客体之一, 以评估 PPV 显现法的适用性。

1.2 试剂与仪器

PPV-brPEI NPs 溶液、乙醇(红岩试剂厂, 中国)、聚苯乙烯混悬液(实验室自制)、生理盐水(科伦药业有限公司, 中国)、去离子水(实验室自制)、金粉(铜、锌、锡、锑混合制成的合金粉末)、502 胶(foster+freeman); 手印熏显仪(foster+freeman MVC3000)、离心机(平凡仪器, 中国)、离心管(Nest, 美国)、涡旋振荡器(Scientific Industries, 美国)、IDplus 扩增试剂盒、移液枪(Thermo, 美国)、尼康相机(D90)、毛鼠刷、钢板、手机壳、硬币、胶带(红色、黄色、黑色)。

1.3 显现试剂的制备

PPV-brPEI NPs 按照已有的合成方法(Chen et al., 2015)制备。首先, 将干燥的 50.0 mL 两口圆底烧瓶经 3 次抽真空-氩气置换循环以去除氧气, 然后向烧瓶中加入 pre-PPV 水溶液(2.0 mL)、去离子水(18.0 mL)以及十二烷基磺酸钠(SDS, 0.052 g, 1.81×10^{-4} mol)。在 40 °C 下搅拌混合物直至体系澄清, 随后向烧瓶中加入 brPEI(0.357 g)。然后将混合物升温至 60 °C, 持续搅拌反应 3 h。反应结束后, 将所得的 PPV-brPEI NPs 胶体水溶液(20 mL)转移至透明玻璃瓶中密封避光保存, 作为后续实验用原液。观察可见, PPV-brPEI NPs 胶体水溶液自然光下呈黄绿色, 365 nm 紫外光下呈蓝绿色荧光, 冷冻干燥后的 PPV-brPEI NPs 溶液纳米粒子为球形, 平均直径约为 60 nm, 有良好的分散性, 窄粒径分布, 此外, PPV-brPEI NPs 胶体溶液的荧光量子产率大于 60.0%(樊智楠, 2023)。

显现液配制: 首先, 用移液枪取 4 份 100 μ L 的 PPV-brPEI NPs 原液于 4 只试管中, 然后, 分别向 4

只试管中加入 800、900、1 000、1 100 μ L 的去离子水混合, 晃匀, 得到 11%、10%、9%、8% 的 PPV-brPEI NPs 溶液。

1.4 方法

首先, 将清洗干净并擦干的双手在耳后摩擦获取油脂。其次, 将砝码放置在指尖, 以固定作用力逐次将油脂潜指纹按压至承痕客体。再次, 使待显油脂指纹与 PPV-brPEI NPs 溶液接触并充分反应。最后, 将显现指纹置于通风处自然风干, 紫外线灯照射观察, 并拍照固定。

PPV-brPEI NPs 溶液作为指纹显现液, 与承痕客体接触作用显现指纹。显现方式有点滴法、蘸涂法、雾化法、喷洒法、棉片法等。

棉片法指将棉片放入显现指纹所需的液体材料中浸泡, 待棉片被完全浸湿后, 用镊子取出棉片, 将其放在待显承痕客体上, 并用镊子轻轻按压棉片, 确保液体材料与指纹充分接触, 作用 1 min 后用镊子去除棉片, 待干燥后固定观察; 点滴法是使用胶头滴管吸取显现液, 滴于承痕客体上, 确保溶液能够完全覆盖待显指纹的范围, 多余液体以重力作用让其从客体上滑落, 也可用棉片在客体边缘处将溶液吸走, 待残余液体晾干后固定观察; 蘸涂法是使用棉签、棉花等中介质蘸取液体(确保完全浸湿), 用镊子夹取浸湿的中介质轻柔地点在指纹上, 使显现液与指纹充分反应, 后晾干固定进行观察; 雾化法是利用雾化器将显现液通过雾化作用打散为小分子均匀喷洒, 以雾状落在承痕客体上的显现方式, 将显现液加入雾化器中, 将雾化器置于待显承痕客体约 10 cm 处, 持续雾化 30 s, 待晾干后拍照观察; 喷洒法是将显现液放入喷壶, 在遗留指纹承痕客体的正上方 20 cm 处按压喷雾瓶, 确保溶液覆盖指纹, 晾干后, 拍照固定、观察。

1.5 DNA 检测

首先, 用棉签在口腔内刮取口腔上皮细胞, 并将已蘸取口腔上皮细胞的棉签放入离心管内, 加入去离子水。其次, 用震荡仪将离心管震荡, 获得口腔上皮细胞的混悬液。再次, 将混悬液转移至新的离心管内, 以去除载体棉签; 后将混悬液离心, 获得口腔上皮细胞的沉淀, 去除含有水溶性杂质的上层清液。在获取的沉淀中加入适量去离子水, 震荡获得相对纯净的口腔上皮细胞混悬液。接着, 将 10 μ L 等量混悬液分装至 6 个离心管内, 分别将 3 个离心管设为实验组、3 个离心管设为对照组。最后实验组离心管中加入 40 μ L 的 PPV-brPEI NPs 溶液, 对照

组中加入等量的去离子水。

使用聚苯乙烯二乙烯基苯树脂法提取DNA,向实验组、对照组离心管内加入250 μL 的聚苯乙烯混悬液,95 $^{\circ}\text{C}$ 加热15 min,破坏细胞膜、核膜,确保细胞中的DNA可以析出。再次,将离心管高速离心,此时细胞内蛋白质等杂质已与聚苯乙烯结合后沉淀,上层清液为较纯净DNA模板。将获得的DNA模板经荧光定量PCR确定浓度后取4 μL 利用IDplus扩增试剂盒进行复合扩增。最后,取扩增产物1 μL 经ABI3500XL电泳仪电泳处理获得数据。采取3份不同的口腔上皮细胞重复以上实验3次,以确保数据的稳定性。

2 结果与讨论

2.1 PPV-brPEI NPs 显现条件

2.1.1 荧光发射光谱的优势波段 PPV-brPEI NPs作为荧光纳米粒子,其紫外-可见光吸收光谱如图1所示。从图1中可以看出,PPV-brPEI NPs荧光纳米粒子溶液在300~480 nm范围内具有吸收,其最大吸收波长位于325~370 nm之间,这表明PPV-brPEI NPs在325~370 nm的特定激发波长下能发

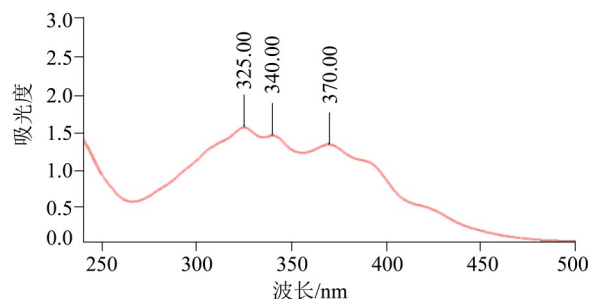


图1 PPV-brPEI NPs的紫外-可见光吸收光谱图

Fig. 1 UV-Visible absorption spectrum of PPV-brPEI NPs

射强荧光。同时,溶液荧光发射波长范围在400~600 nm(樊智楠,2023)。因此本研究选用较为常见的365 nm紫外光作为激发光源。

2.1.2 PPV-brPEI NPs 溶液的浓度 经试验可知,浓度过高的PPV-brPEI NPs溶液会冲散指纹,导致原本清晰的乳突纹线模糊,浓度过低的PPV-brPEI NPs溶液产生的荧光较弱,不利于观察乳突纹线。综合对比,稀释10倍和稀释11倍的PPV-brPEI NPs溶液显现效果差别不大(图2),出于成本的考虑,在后续实验中使用稀释11倍的PPV-brPEI NPs溶液开展显现条件的探究。

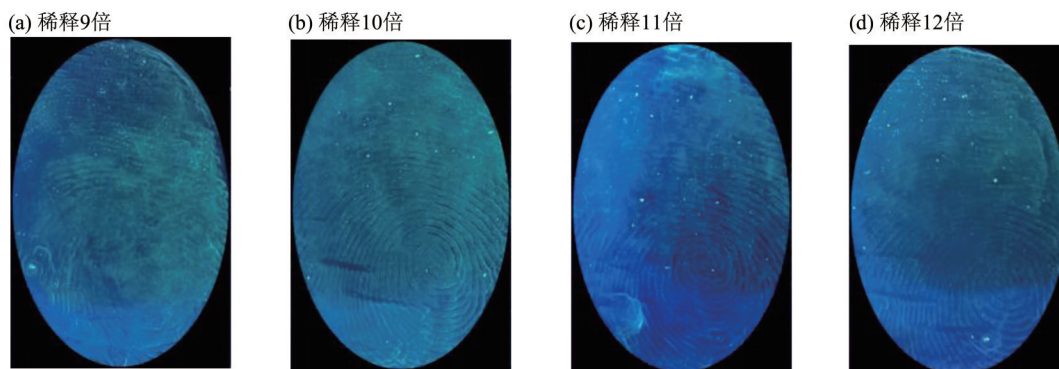


图2 不同PPV-brPEI NPs溶液浓度显现效果

Fig. 2 Comparison of visualization effects at different concentrations of PPV-brPEI NPs solution

2.1.3 荧光显现影响因素 油性潜指纹的荧光显现影响因素包括显现方式、油量、作用力、指纹新旧程度等多个方面。如图3所示,在显现方式探究过程中发现点滴法效果最好。棉片法易因气泡导致显现不完全,且接触指纹的过程可能会污染指纹表面遗留的生物物证;蘸涂法容易直接接触指纹导致指纹纹线被破坏;雾化法因为雾化颗粒过小无法将PPV-brPEI NPs纳米粒子通过机器均匀附着到指纹上;喷洒法难以均匀喷洒导致显现有残缺;而点滴法可以非常清晰地显现指纹。

如图4所示,在油量对指纹显现效果影响的探

究中,通过蘸取一次油脂后连续按捺五枚指纹的方式,实现指纹油量的逐次递减(油脂作为潜指纹遗留的中介质,根据物质转移理论,随着按捺次数的增加,油脂随指纹被转移到承痕客体上,因此,连续按捺过程中每枚指纹的油脂含量逐量减少)。通过研究发现,油量多少对指纹显现清晰程度的影响不明显,显现效果均良好。

如图5所示,在力的作用大小对指纹荧光显现影响因素的探讨中,将不同重量的砝码放置在指尖,通过换算为0.2、0.5、0.7 N的力(正常手指作用压力范围)逐次将油脂潜指纹按捺至承痕客体。以

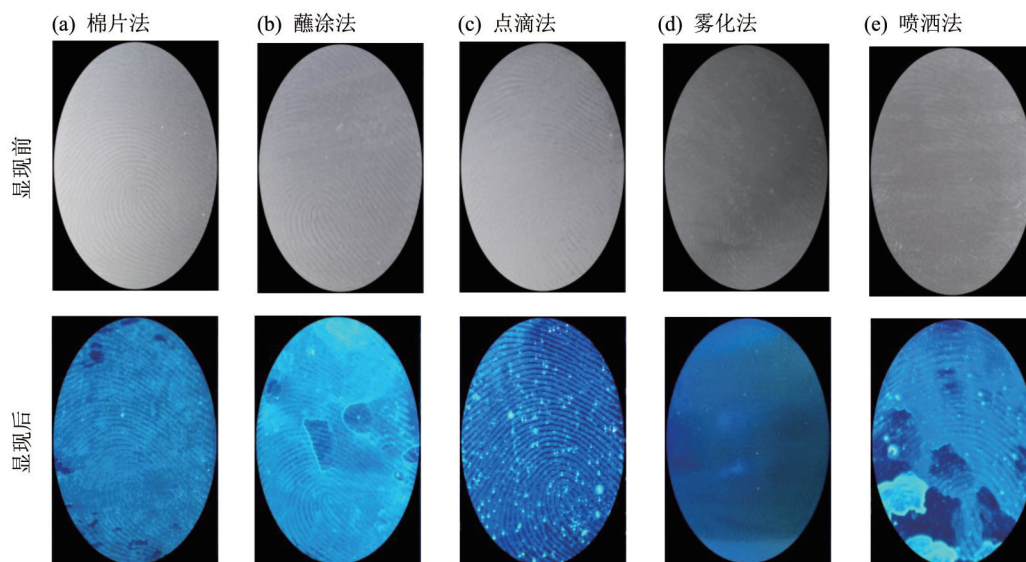


图3 不同显现方法的指纹显现效果

Fig. 3 Comparison of fingerprint development effects under different development methods

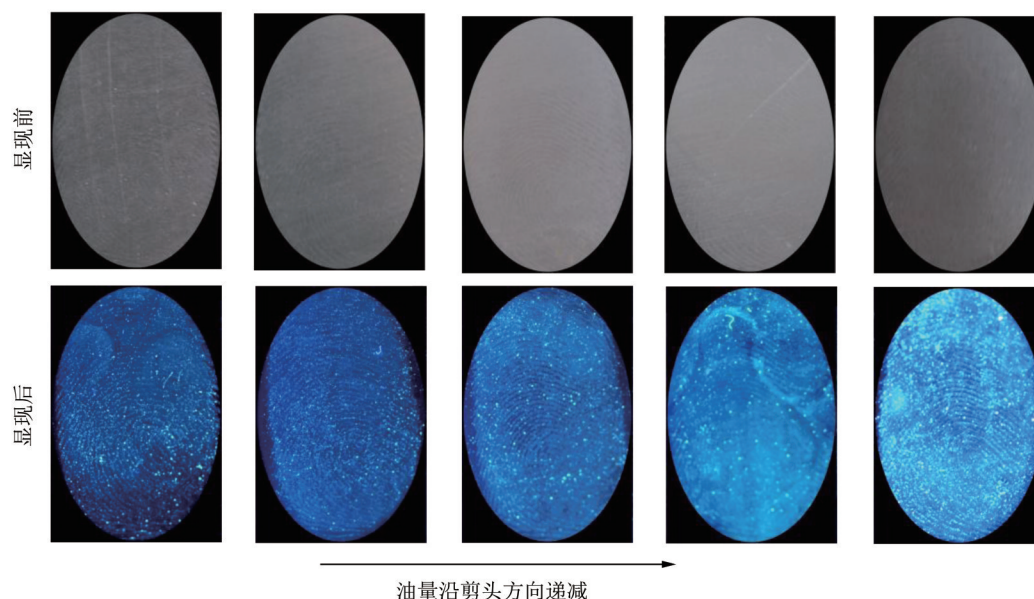


图4 不同油量的指纹显现效果

Fig. 4 Comparison of the effect of different oil amounts on fingerprint development

施加不同砝码重量的方式,实现按捺指纹的不同作用力。经研究发现,作用力大小对指纹荧光显现的影响较小,3种作用力下指纹的显现效果均较好。

如图6所示,指纹遗留时间对显现效果的探究过程中,实验设计分别遗留1~12 d的指纹显现效果对比,为了尽可能地模拟案件现场的环境,将指纹放置在常温室室内暴露的环境以观察显现变化,同时,为消除单人实验可能导致的个体差异影响,该部分设计多人次横向对比,取平均效果。实验结果表明,指纹在放置过程中,可能因灰尘等微量物质的加层而导致显现效果欠佳;但指纹自身的新旧程

度,对其显现清晰度的影响并不显著。

2.2 PPV-brPEI NPs在疑难客体的显现优势

以硬币、粗糙手机壳、胶带3类疑难客体分别使用传统方法中常用的粉末法、“502”熏显法与新型材料PPV显现法进行对比,如图7所示。

硬币上的潜指纹使用PPV显现法效果最优。使用粉末法显现法,指纹纹线会被多余的金粉所覆盖,可以看到指纹的形态特征等概貌特征,但是无法观察到指纹的细节特征;使用502熏显法,发现502胶水难以附着到硬币上导致无法观察到乳突纹线,显现效果模糊,且会受到客体表面凹凸不平的影响,纹

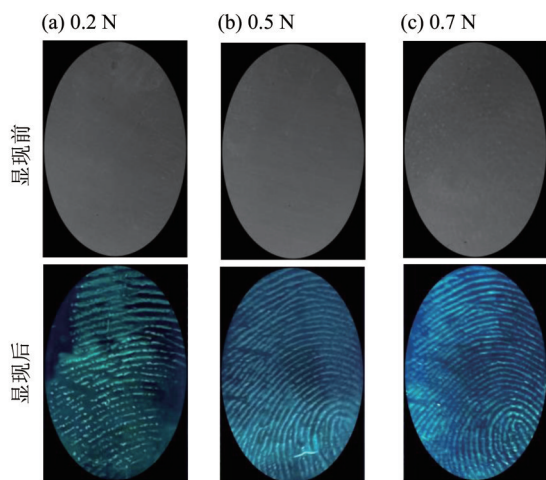


图5 不同作用力的指纹显现效果

Fig. 5 Comparison of the effect of force magnitude on fingerprint development

线断断续续,不仅细节特征无法观察且概貌特征也不清晰;使用PPV显现法,在365 nm紫外激发下不仅可观察到乳突纹线的形态特征,且起点、终点、小眼等细节特征也可清楚显现,排除了因硬币客体表面物理性质凹凸不平造成的影响,指纹的概貌与细节特征均明显。

粗糙材质手机壳上的油脂指纹,由于粉末颗粒较大,其会堆积在磨砂材质表面的凹槽中,无法清楚显现指纹的细节特征;使用502熏显法,502胶水无法紧密均匀地附着在磨砂质手机壳表面,显现指纹不完整,难以满足鉴定要求;在PPV显现法中,通过365 nm紫外激发,可以清楚显现指纹纹线及细节特征,尤其是对颜色、花纹复杂的客体也可有效显现,突显其排除复杂花纹背景干扰的优势。由此,针对粗糙材质手机壳上的油脂指纹,PPV显现法效

果最佳。

黏面胶带上的油脂指纹PPV显现法效果最好。使用粉末法,毛刷会被黏面的胶水所粘连,导致粉末用量无法控制,同时毛刷也会遭到破坏;使用502熏显法,发现502胶水无法附着于粘面胶带上,显现后既观察不到指纹的概貌特征更无法观察到细节特征;使用PPV显现法在365 nm紫外观察下则可清晰的识别乳突纹线,且指纹的细节特征也清晰可见。此外,PPV显现法不受胶带颜色干扰,研究中分别使用黄色、红色、黑色等颜色的胶带开展相同实验,结果一致。因此,在常见颜色、质地、种类的胶带中均可以清晰地观察到指纹的概貌特征与细节特征。

2.3 PPV-brPEI NPs 试剂应用中亟待探究的问题

稳健性评价:目前由于真实案件中指掌纹附着的成痕物质汗液与油脂附着量各不相同、难以量化,在法庭科学中的显现领域,尚未有较好的定量方法。因此以个体差异、环境影响等因素验证本方法在脂质组成高度异质条件下的稳健性评价,尚需开展进一步探究。

基于安全性的无害化改进:PPV-brPEI NPs 在指掌纹等痕迹显现后使用365 nm波长紫外线激发,该波长紫外线具有一定的生物伤害,对长时间、多频次的应用产生较大限制。因此将PPV-brPEI NPs 的光学性能向无害化改进,以实现更为安全、便携、高效的现场应用,也为试剂的进一步优化提供了研究方向。

对DNA检验的影响:经实验研究,加入PPV-brPEI NPs 试剂的实验组DNA检验过程受到了明显的抑制,导致未检出有效DNA数据,而对照组出峰正常(增强出版:附图1)。从DNA检测过程来看,

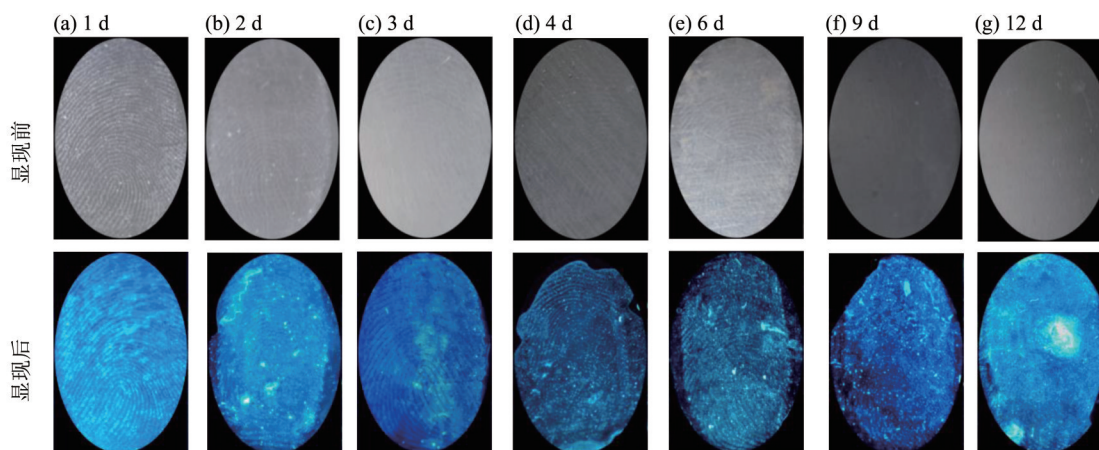


图6 不同时间的指纹显现效果

Fig. 6 Comparison of fingerprint development effects between old and new fingerprints

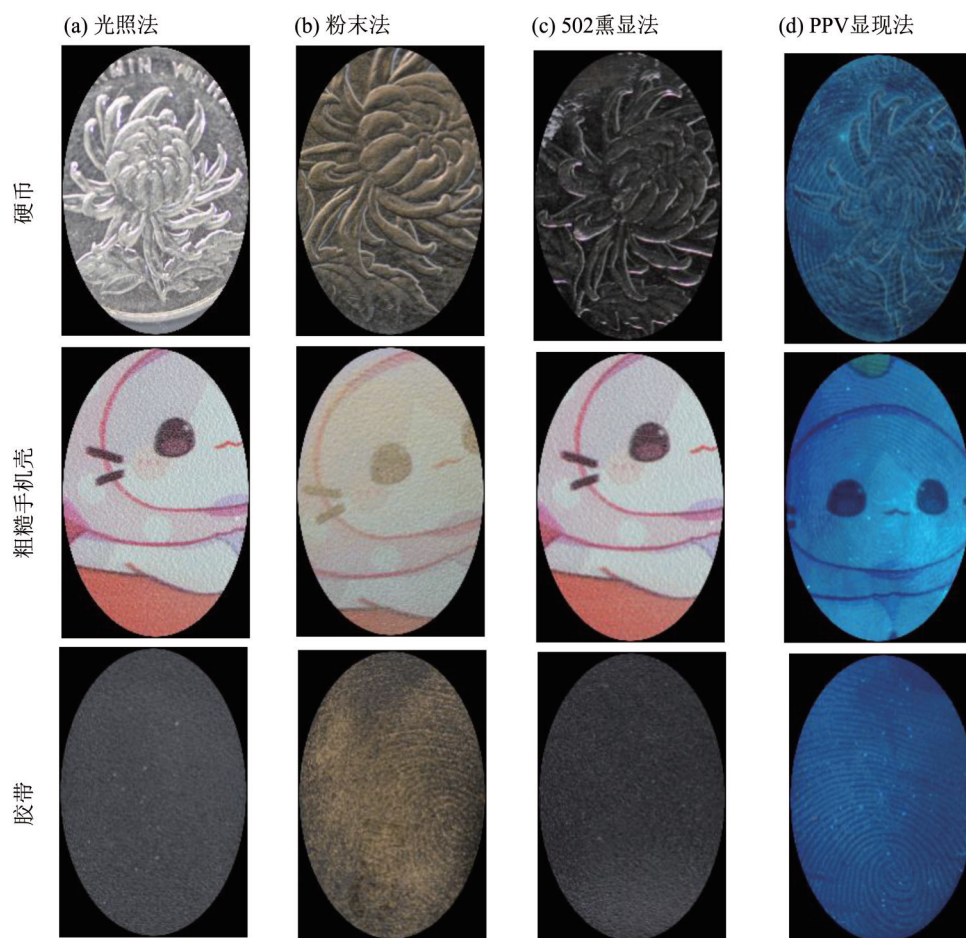


图7 疑难客体上指纹的显现效果

Fig. 7 Comparison of manifestation effects on difficult objects

PPV-brPEI NPs 疑似影响着包括生物物证自身及提取、PCR 扩增、聚合酶的活性、引物结合等多个因素。目前,尚无法确证 PPV-brPEI NPs 对目前常规的 DNA 检测方法产生影响的机理,但使用该试剂显现指纹后不利于 DNA 的检测,已经实验充分证实。因此案件中使用该方法显现指纹时,应在对指纹及生物物证进行综合考量后进行,且应重点进行“提取 DNA、PCR 扩增、电泳检测”的分步骤实验验证,探查其对 DNA 检测的详细抑制机理,进而使用通过修饰材料表面等手段对 PPV-brPEI NPs 进行针对性改良,以期满足指纹显现效果与 DNA 检验的双向要求。

3 结 论

氨基功能化聚对亚苯基亚乙烯纳米粒子(PPV-brPEI NPs)作为新型荧光纳米材料显现试剂,在显现效果上较传统显现方法具有显著优势。在适用客体方面更加广泛,为以指掌纹为代表的各类生

物性形象痕迹显现工作提供了新的技术支持,展现出科技兴警的革新潜力。本文使用控制变量法探究 PPV 显现法在不同情况下的最佳显现条件,得到 PPV-brPEI NPs 试剂对于潜在生物性形象痕迹具有良好的显现效果,且在显现过程中不受附着量多少、成痕作用力大小、成痕时间长短的影响。同时,PPV-brPEI NPs 试剂较粉末、熏显等传统显现方法,具有不受客体表面花纹影响、纹线连贯等优势;尤其对黏性客体上的显现具有极强的针对性,并在非平整成痕面、有复杂背景干扰等疑难的客体表面均能实现更为清晰、满足检验鉴定要求的纹线显现。

但需注意的是,PPV-brPEI NPs 显现法目前仍需对因成痕物质附着量的不同造成的高度异质条件下的稳健性、PPV-brPEI NPs 自身的光学性能无害化改进、针对削弱 DNA 检验抑制作用的定向改良等方面开展更进一步研究,以实现其更为可靠、安全、便携、广泛的现场应用。

参考文献:

- 陈红, 2017. 聚对亚苯基亚乙烯荧光纳米粒子在指纹显影中的应用研究[D]. 苏州: 苏州大学.
- 陈世韬, 张丽梅, 张冬冬, 等, 2022. 基于疏水性TiO₂纳米颗粒的悬浮液手印显现研究[J]. 应用化工, 51(9): 2543-2547.
- 樊智楠, 2023. 氨基功能化荧光材料的制备及其在潜血指印显现中的应用[D]. 苏州: 苏州大学.
- 刘俊, 张熙荣, 熊焕明, 2021. 荧光碳点在指纹检测中的应用[J]. 发光学报, 42(8): 1095-1113.
- 王晨, 刘帅, 陈艳, 2022. 新型荧光纳米显影剂的制备及其在指纹显影方面的应用[J]. 中山大学学报(自然科学版)(中英文), 61(5): 117-125.
- 吴凤, 姚慧芳, 李江春, 等, 2024. 荧光纳米材料在潜指纹成像及其残留物检测方面的研究进展[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 30(4): 39-47.
- 于捷年, 杨东升, 冯清枝, 2012. 胶带粘面指纹的光学显现方法研究[J]. 中国刑警学院学报, (4): 40-42.
- 翟佳丽, 2024. Y₂O₃: Yb³⁺, Er³⁺上转化荧光纳米粒子在潜指纹显现中的应用[J]. 化工管理, (19): 44-47.
- 赵慧民, 郭一缙, 丁晓艳, 2010. 一种数字图像和指纹水位平面合成的优化方法(英文)[J]. 中山大学学报(自然科学版), 49(6): 64-67+77.
- 郑方, 艾斯卡尔·肉孜, 等, 2016. 生物特征识别技术综述[J]. 信息安全研究, 2(1): 12-26.
- CHEN H, MA R L, CHEN Y, et al, 2017. Fluorescence development of latent fingerprint with conjugated polymer nanoparticles in aqueous colloidal solution[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 9(5): 4908-4915.
- CHEN H, MA R L, FAN Z, et al, 2018. Fluorescence development of fingerprints by combining conjugated polymer nanoparticles with cyanoacrylate fuming[J]. J Colloid Interface Sci, 528: 200-207.
- CHEN Y, QIU T, ZHAO W, et al, 2015. Realization of fluorescence color tuning for poly(*p*-phenylenevinylene) coated microspheres via a heterogeneous catalytic thermal elimination process[J]. Polym Chem, 6(9): 1576-1583.
- GREENE R S, DOWNING D T, POCHI P E, et al, 1970. Anatomical variation in the amount and composition of human skin surface lipid[J]. J Invest Dermatol, 54(3): 240-247.
- JASUJA O P, SINGH G D, SODHI G S, 2008. Small particle reagents: Development of fluorescent variants[J]. Sci Justice, 48(3): 141-145.
- KUMAR K N, DAGUPATI R, LIM J, et al, 2022. Bright red luminescence from Eu³⁺-activated nontoxic SnO₂ quantum dots for latent fingerprint detection[J]. Ceram Int, 48(12): 17738-17748.
- MEI J, LEUNG N L C, KWOK R T K, et al, 2015. Aggregation-induced emission: Together we shine, united we soar![J]. Chem Rev, 115(21): 11718-11940.
- NSIBANDE S A, FORBES P B C, 2016. Fluorescence detection of pesticides using quantum dot materials—A review[J]. Anal Chim Acta, 945: 9-22.
- SINGHA K K, CHOUHAN L, SRIVASTAVA S K, 2025. Recent developments in non-magnetic elements co-doped semiconducting oxides[J]. Solid State Commun, 404: 116040.
- STANISAVLJEVIC M, KRIZKOVA S, VACULOVICOVA M, et al, 2015. Quantum dots—fluorescence resonance energy transfer-based nanosensors and their application[J]. Biosens Bioelectron, 74: 562-574.
- SYRTI L, KUMAR E V, ARJUN A, et al, 2025. Unveiling the bifunctional potentiality of TiO₂/V₂O₅ nanocomposite for photodegradation of industrial dyes and latent fingerprint visualization in forensic investigation[J]. Surf Interfaces, 71: 106840.
- UPADHYAY P, RAGHAVAN A, AYYAPPAN SHANMUGANATHAN M A, et al, 2023. Gynura cusimba-derived nitrogen-doped carbon dots/ZnO nanocomposite: A biocompatible alternative for detecting latent fingerprints[J]. ChemNanoMat, 9(9): e202300169.
- WANG B, LIU F, WU Y, et al, 2018. Synthesis of catalytically active multielement-doped carbon dots and application for colorimetric detection of glucose[J]. Sens Actuators B Chem, 255: 2601-2607.
- WANG X, YUAN Y, SUN Y, et al, 2022. One-step facile preparation of carbon dots with high fluorescence quantum yield and application in rapid latent fingerprint detection[J]. RSC Adv, 12(42): 27199-27205.
- WANG Y F, ZHANG T, LIANG X J, 2016. Aggregation-induced emission: Lighting up cells, revealing life![J]. Small, 12(47): 6451-6477.
- WANG Y, WANG J, MA Q, et al, 2018. Recent progress in background-free latent fingerprint imaging[J]. Nano Res, 11(10): 5499-5518.
- WANG Y, ZHU Y, YU S, et al, 2017. Fluorescent carbon dots: Rational synthesis, tunable optical properties and analytical applications[J]. RSC Adv, 7(65): 40973-40989.
- WEGNER K D, HILDEBRANDT N, 2015. Quantum dots: Bright and versatile *in vitro* and *in vivo* fluorescence imaging biosensors[J]. Chem Soc Rev, 44(14): 4792-4834.
- WOLFBEIS O, 2009. Nanoparticle-enhanced fluorescence imaging of latent fingerprints reveals drug abuse[J]. Angew Chem Int Ed, 48(13): 2268-2269.