

透過顯現隱形指紋解開密碼鎖

—結合實驗導向與問題解決取向的教學實例

蔡家興¹、游文綺²、許榮成²、陳芷誼²、李忠家²、楊水平^{3,*}

¹ 國立彰化女子高級中學

² 國立彰化師範大學化學系 (時任教學助理)

³ 國立彰化師範大學化學系

*yangsp@cc.ncue.edu.tw

摘要：本教學設計結合實驗導向與問題解決取向，分為兩部分四階段的教學。第一部分採用「先做後講」(先做實驗後講解原理) 的實驗導向教學，先認識指紋類型和特徵和識別系統 (亨利分類及 IAFIS/NGI)，再操作四種顯現技術 (粉末法、寧海準法、硝酸銀法、氰丙烯酸酯法)，然後教師引導學生學習原理和概念。第二部分則強調問題解決取向，包括聚斂性結構良好問題 (指紋密碼開鎖競賽) 和擴散性創意問題 (局部修改或創意設計指紋顯現技術並進行試作與發表) 的任務。此教學設計已在大學和高中實施，重視理論與實際的教學；以及在國中小科學教育推廣實施，偏重技術操作的教學。

■ 簡介

人的汗液組成有水、有機成分 (脂肪酸、乳酸、尿素和尿酸等) 及無機離子 (氯化鈉等)，手指也會沾黏來自皮脂腺分泌的油脂 (脂質和類固醇等)。汗液含有機和無機化學成分及其顯現指紋的技術與原理可以融入在各課程中教學，如基礎無機、有機、分析、物理及生物化學。舉例說明：指紋顯現的粉末附著在汗液的水分或油性成分上，可以視為表面化學中吸附作用；顯現汗液中的氨基酸和氯化鈉成分涉及有機和無機化學反應，可以納入定性分析；再者，指紋粉末法還與極性和非極性分子的溶解度、沉澱反應及氧化還原反應等有關，並涉及分子之間的靜電吸引力。此外，指紋的類型與細節特徵、指紋的識別也是化學和指紋學強調知識學習的可應用價值。

本教學設計結合實驗導向 (Experiment-based) 和問題解決取向 (Problem-solving oriented) 的兩種教學法，分為為四階段教學，分述如下：(一)在實驗導向方面：採用「先做後講」(Do-then-explain / activity-before-concept) 的教學模式，【第一階段】的重點：(1)熟知指紋的類型與特徵，和(2)理解指紋的識別 (電腦化之前的亨利分類系統和電腦化之後的 IAFIS/NGI 電腦系統)；【第二階段】的重點：(1)熟練四種指紋顯現的操作技術 (粉末法、寧海準法、硝酸銀法及氰丙烯酸酯法)，和(2)教師引導學生理解指紋顯現的原理和概念。(二)在問題解決取向方面：【第三階段】的重點：(1)教師設計結構良好的問題，以「聚斂性問題解決：顯現隱形指紋密

碼開鎖獲得金幣」為主題，和(2)提供具體的材料和試劑、指紋競賽規則、四個拉鏈收納袋的內容物與其開鎖密碼提示單及指紋競賽紀錄表，能用既有方法解決且有固定解答，此作法仿照〈透過密室逃脫遊〉一文（顧展兆，2018）。【第四階段】的重點：(1)教師設計結構不良的問題，以「擴散性問題解決：修改和設計並試作指紋顯現技術」為主題，和(2)規劃兩項教學設計：設計一：「局部修改並試做指紋顯現技術」，包含學生搜尋現有指紋顯現技術的資料、提出修改構想、試作修改構想及發表成果；設計二：「創意設計並試作指紋顯現技術」，包含學生設計創意指紋顯現技術、試作創意構想及發表成果。本教學設計已在彰師大化學系「普通化學實驗」和彰化女中「高三多元選修」課程實施技術操作與原理理解並重的教學；並且部份教材選用於國中及國小的科學教育推廣班隊，實施偏重技術操作的教學。大一學生的學習心得展現出四面向：(1)高度的情緒參與與強烈的成功/挫折反應，(2)透過合作與反覆嘗試實際掌握技術細節，(3)由競賽遊戲化任務產生情境投入與自主動機，以及(4)最終反思科學實作態度、鑑識專業與自身學習習慣。

■ 指紋的類型與特徵

一、指紋—摩擦脊紋與指印

摩擦脊紋 (Friction ridge patterns) 是指人類手掌、指尖、腳掌與腳趾表皮上由脊線與溝線所形成的自然皮膚結構圖案，用以增加摩擦力、防止滑動。指印 (Fingerprint) 是指手指與物體接觸時，留下隱形的摩擦脊線痕跡。摩擦脊紋與指印互為鏡像，如圖 1 所示。摩擦脊紋與指印本質不同，但是常被「指紋」(Fingerprint) 一詞混用，可以指「指紋的結構」或「指紋的印痕」。

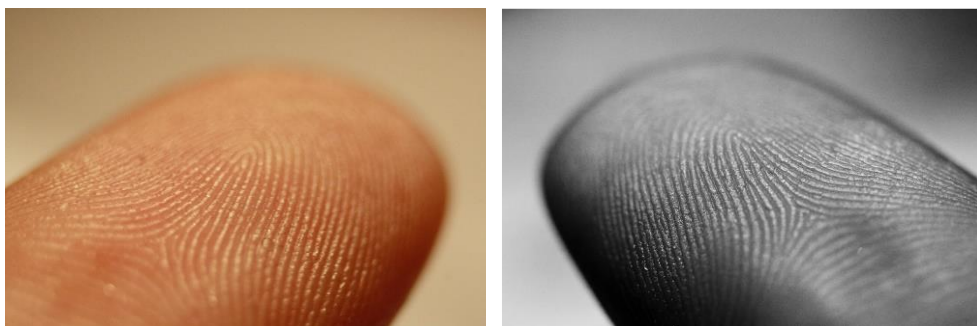


圖 1：摩擦脊紋（左）和指印（右），兩者互為鏡像。

（圖片來源：Fingerprint, <https://en.wikipedia.org/wiki/Fingerprint>）

指紋採集是法醫學中的關鍵程序。手指分泌的水分和油脂會在光滑表面留下隱形痕跡，經墨水或顯色劑處理後，能被轉印並觀察。指紋結構極細緻且高度多樣且相當穩定，不易改變，即使同卵雙胞胎也不相同，因此指紋可作為可靠的身份識別方式。

二、指紋的類型

美國聯邦調查局 (Federal Bureau of Investigation, FBI) 自 20 世紀初期建立指紋檔案系統以來，採用系統化指紋分類系統，便於快速查詢並比對大量指紋。在電腦化之前，這套系統主要依靠紙本卡片與人工歸檔。FBI 的分類系統源自於亨利分類系統 (Henry Classification System)，最早由英國愛德華·理查·亨利爵士 (Sir Edward Richard Henry) 於 1896 年在印度提出，美國後續修訂並擴展。在 1924 年美國司法部合併軍方與民間的指紋檔案後，FBI 建立世界最大規模的指紋檔案庫，並對亨利系統加以簡化與擴展，成為 FBI 指紋分類系統。FBI 系統是依照指紋圖形特徵 (Pattern types) 與數值分類公式 (Numerical Classification Formula) 進行歸類。主要圖形類型初步分為三種：(1)迴旋紋 (Loops)、(2)弓形紋 (Arches) 及(3)漩渦紋 (Whorls) (Behind the Crime, n.d.)，如圖 2 所示。



圖 2：FBI 初步分類指紋主要類型為三種：迴旋紋 (左，編號 1)、弓形紋 (中，編號 2) 及漩渦紋 (右，編號 3) (註：此處編號僅當作後續學習的開鎖碼)

美國聯邦調查局又細分指紋為八種紋型 (Palm Reading Perspectives, 2011)：平弓紋 (Plain Arch)、帳篷弓紋 (Tented arch)、尺側迴紋 (Ulnar loop)、橈側迴紋 (Radial loop)、平渦紋 (Plain whorl)、中央袋迴紋 (Central pocket loop whorl)、雙迴紋 (Double loop whorl) 及偶然紋 (Accidental whorl)，如圖 3 所示。

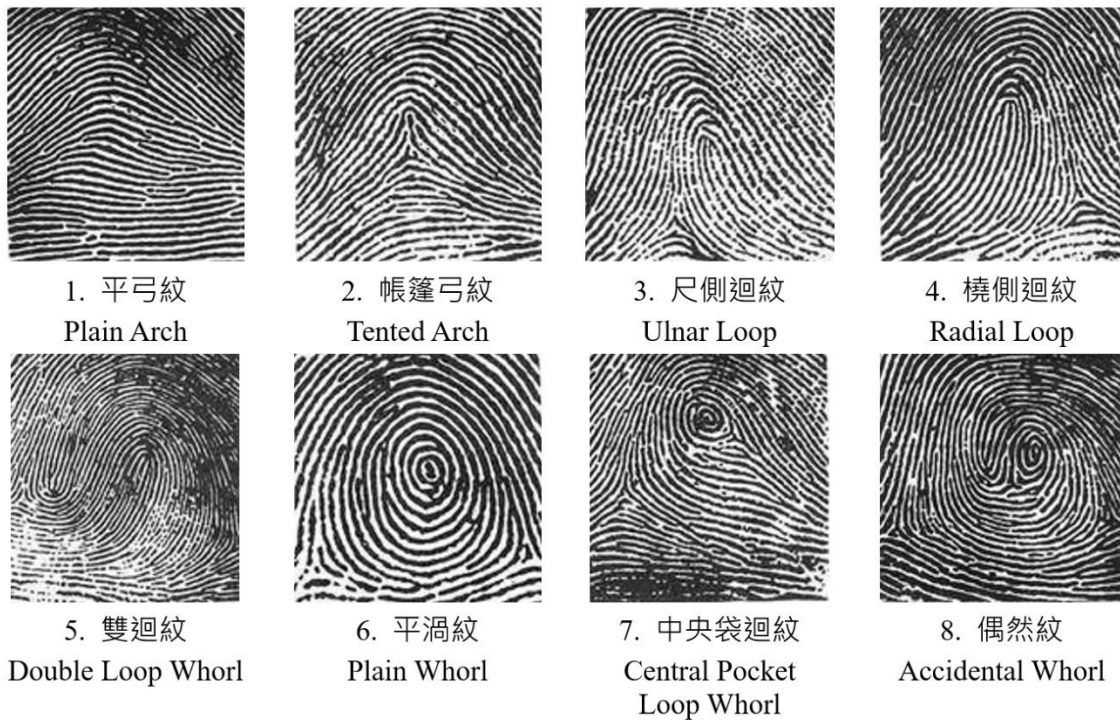


圖 3：FBI 細部分類指紋為八種紋型及其編號。(註：此處編號僅當作後續學習的開鎖碼)
(圖片來源：<https://ar.pinterest.com/pin/737112664007042690/>)

三、指紋的細節特徵

手指末端、手掌與足底的脊線構成明顯的圖案，這些圖案可依其整體結構進一步分類。單一脊線常呈現多樣的方向變化、不連續及分支等特徵，稱為細節特徵 (minutiae features)。這些微觀結構構成自動指紋識別系統 (Automated Fingerprint Identification System, AFIS) 比對與辨識的核心依據，廣泛用於指紋鑑識與身份辨認。

指紋的細節特徵主要是各種脊線變化，大致有十一種常見的特徵 (Champod et al., 2004; Wikipedia, n.d.): (1)脊線終端 (Ridge ending): 指紋脊線在某點突然中止; (2)短脊線 (Short ridge): 脊線僅延伸短距離即停止; (3)分叉 (Bifurcation): 一條脊線分岔為兩條; (4)點 / 島嶼 (Dot / Island): 短小、獨立的脊線，兩端為脊線終止，且不與其他脊線相連; (5)湖泊 / 眼睛 / 封閉 (Lake / Eye / Enclosure): 兩條脊線分開後再合併，形成封閉的環狀結構; (6)鉤子 / 馬刺 (Hook / Spur): 自脊線延伸出短小的分支，形狀似鉤或馬刺; (7)橋樑 / 交叉 (Bridge / Crossover): 兩條脊線間由短脊線連接，或彼此交叉; (8)三角形 (Delta): 脊線形成三角形區域，通常位於核心點的下方或側邊; (9)核心 (Core): 脊線中心區域的點，常為環狀或螺旋狀圖案的中心; (10)雙重分叉 (Double bifurcation): 脊線連續發生兩次分叉; 以及(11)三叉分叉 (Trifurcation): 單一脊線分為三條。以上特徵如圖 4 所示。

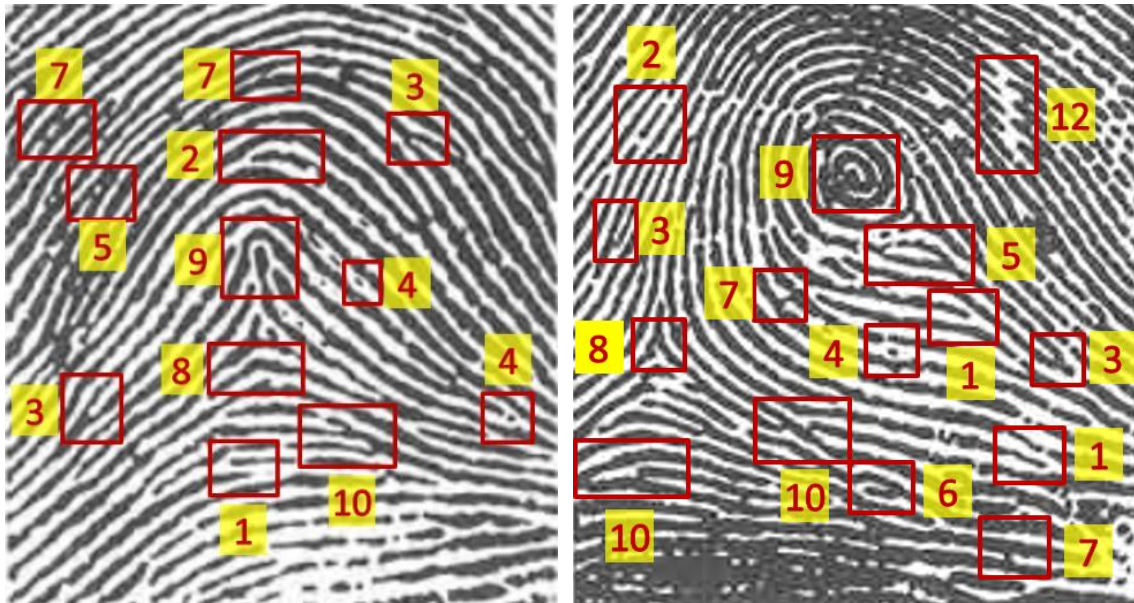


圖 4：常見的指紋細節特徵及其編碼。圖示說明，如前所述。編號(11)三叉分叉 (未呈現)；此外，(12)傷痕不列入脊線特徵。(此處編號僅當作後續學習的開鎖碼，編碼 10 視密碼為 0，編碼 11 視為 1)
(圖片修改自圖 3)

■ 指紋辨識原理與應用

每枚指紋大約有 50 個左右的細節特徵點，取得特徵點的位置和方向，就能用於指紋辨識。一般指紋辨識技術並非完整紀錄整枚指紋的圖案，而是僅僅儲存指紋的特徵點。分析時會比對指紋特徵點的方向和位置是否相同。根據亨利分類系統，指紋被歸類為二部八類，其中只要 13 個特徵點相同，即可確認是相同的指紋。

一、電腦化之前—亨利分類系統

在電腦自動化之前，美國聯邦調查局對於傳統的指紋分類系統是以亨利分類系統為基礎，此系統以索引方式把大量的十指指紋分類編碼，以便快速從大量的檔案中尋找對應的指紋紀錄。此系統把指紋的主要類型（迴旋紋、弓形紋及漩渦紋）數值化為分類碼（Henry, 1900），成為早期世界各地指紋比對系統的基礎。在 20 世紀初被英國蘇格蘭採納並廣泛使用，後來成為許多國家指紋資料庫與自動系統發展的歷史基礎（National Institute of Justice, 2011）。關於亨利分類系統的二部和八類、指紋數值分類公式及 13 特徵點標準，請詳見附錄〈第一階段：指紋類型與特徵、指紋辨識原理與應用_上課講義和學習單〉的說明。

二、電腦化之後—IAFIS/NGI 電腦系統

現代科學與標準（例如：NIJ 指紋手冊 / 各國實驗研究）傾向不再強調單一固定數字，而

是評估：指印的品質、特徵的分佈、比對的整體一致性與隨機吻合機率 (probability of random correspondence, PRC)。也就是說，有時少於 13 個高質量的吻合加上其它支撐證據，也可能被認為足夠；反之，13 個低質量、近距離聚集且易錯認的點也不足以確定 (National Institute of Justice, 2011)。關於隨機吻合機率，請詳見附錄〈第一階段：指紋類型與特徵、指紋辨識原理與應用_上課講義和學習單〉的說明。

(一) 整合式自動指紋辨識系統與下一代身分識別

在 1999 年後，FBI 建立整合式自動指紋辨識系統 (IAFIS)，於 2014 年升級為下一代身分識別 (Next Generation Identification, NGI)。在電腦自動化後，傳統的分數分類公式已經不再是必要的查詢方式，但仍具歷史與教育價值。現在主要依靠基於細節特徵的比對，透過紋線端點、分叉點等細節自動比對。這套方法是指紋學史上重要的里程碑 (Hutchins, 2010)。關於 IAFIS 和 NGI，詳細的說明請見附錄〈第一階段：指紋類型與特徵、指紋辨識原理與應用_上課講義和學習單〉的說明。

(二) 指紋感應的運作過程

在數位世界中，指紋是由傳感器板以電子方式讀取的。手指的摩擦脊紋是不連續的，並形成具有顯著細節特徵的圖案 (Nandakumar & Jain, 2010)。細節的圖案可以被繪製並連接起來形成一個模板，可以存儲並在未來與指紋進行比較 (Singh et al., 2023)。指紋感應的運作過程如下：(1)生物識別 (Biometric)：手指放在感測器上，取得原始指紋圖案的影像；(2)特徵點 (Minutia Points)：出現在指紋脊線的起點、終點、分支和匯合處，並在每個點上沿著脊線畫一條線；(3)特徵點地圖 (Minutia Map)：這些點被映射到特徵點地圖上，並在每個點之間畫一條線，顯示每個點與其他點之間的關係；(4)數據流 (Data Stream)：然後，該映射將作為稱為細部模板的數據流儲存在資料庫中，以便將來與其他指紋進行比較，做出認證 / 辨識決策，如圖 5 所示。

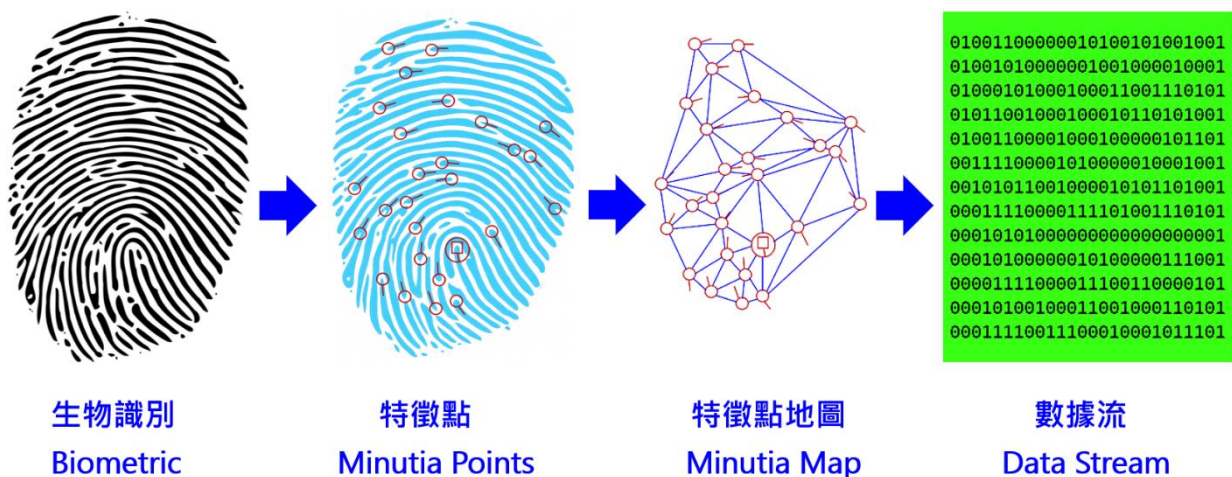


圖 5：指紋感應的運作過程：生物識別 (Biometric) → 特徵點 (Minutia Points) → 特徵點

地圖 (Minutia Map) → 數據流 (Data Stream)

(最左邊指紋圖案來源 : <https://www.pngegg.com/en/png-nvgzd>)

■ 指紋顯現的操作步驟

以下描述常見指紋顯現的試劑配方和操作步驟，涵蓋四種方法：粉末法、寧海準法、硝酸銀法及氰丙烯酸酯法。

一、粉末法

顯現指紋最簡單且最常用的方法是粉末法 (Powder-based method)，它依賴於指紋顯現的配方對皮膚沉積物的水分和油性成分的吸附作用。常見的指紋粉末是由著色劑和載體組成。載體被指紋中的水分或油性成分吸附，著色劑被吸附在載體上。常用的著色劑有活性碳粉、二氧化錳及氧化鐵常用的有機物載體有矽膠、玉米澱粉、滑石粉及松香，典型的不溶性無機鹽載體有碳酸鋅、碳酸鋇及碳酸鎂。

(一) 收集指紋

用手指輕捏紙張 (或塑膠等物體) 的邊緣或角落，避免手指碰觸到預留指紋處。選定一個手指，先用手指摩擦前額，再輕輕地放置指腹的左側在紙面上且右側朝上，慢慢地向右滾動到右側觸到紙面並立即抬起手指，即可在紙上留下隱形指紋。若有化妝或皮膚較為油膩，用手指摩擦手掌取代前額。若出汗困難，在原地快跑增強汗量，用手指摩擦前額而不是手掌。重複操作，直到指紋顯現後獲得清晰的指紋。

(二) 注意事項

在配製試劑和操作步驟時，必須配戴安全眼鏡和乳膠手套。指紋中的水分或油脂會在兩三天內乾涸，不宜用粉末法顯現指紋。

(三) 藥品和器材

配方一：白紙、黑色粉末 [如活性碳、石墨筆芯或二氧化錳 (MnO_2)]、紅色粉末 [如三氧化二鐵 (Fe_2O_3)]、有機聚合物 (如矽膠、玉米澱粉、滑石粉及松香)、不溶性無機鹽 [如碳酸鋅 (ZnCO_3)、碳酸鋇 (BaCO_3) 及碳酸鎂 (MgCO_3)]。配方二：螢光素 (Fluorescein, $\text{C}_{20}\text{H}_{12}\text{O}_5$, CAS: 2321-07-5)、氫氧化鈉 (NaOH)、蒸餾水、紫外光手電筒。共同：攜帶型電子秤、樣品瓶、鵝毛棒、透明膠帶、剪刀、口紅膠。

(四) 配製試劑。

配方一：稱取 3 公克以下著色劑粉末之一：(A1) 三氧化二鐵、二氧化錳；(A2) 活性碳

粉、石墨筆芯粉。稱取 9 公克以下載體粉末之一：(B1) 碳酸鎂、碳酸鋇、碳酸鋅；(B2) 澱粉、矽膠、松香。混合 A1 和 B1 或者 A2 和 B2 均勻。在混合物中加入 100 毫克滑石粉(Friesen, 2004)，如圖六左所示。配方二：直接使用螢光粉末 (如螢光素)，如圖六右上所示；抑或配製成溶液：溶解 0.1 公克氫氧化鈉於 20 毫升蒸餾水中，在該溶液中加入螢光素，直到溶液飽和並變成棕色 (MEL Science, n.d.)。儲存在密封的且貼有標籤的瓶子中，如圖 6 右所示。〔註：若粉末較粗，使用研鉢研磨混合物成為細粉狀。〕



圖 6：粉末法所需器材和試劑，配方一（左）和配方二（右）

(五) 操作步驟

配方一：使用鵝毛棒，在鵝毛處沾一些粉末，如圖七左上所示。旋轉鵝毛棒，輕觸在隱形指紋的紙面上，如圖七右上所示。然後去除多餘的粉末 (可用手指輕彈紙張的背面)。用一片透明膠帶貼住指紋以保護它，剪裁合適大小，用口紅膠黏貼在指定處。配方二：使用螢光劑顯現指紋，其操作與配方一相同，如圖 7 左下和右下所示。使用紫外光照射。

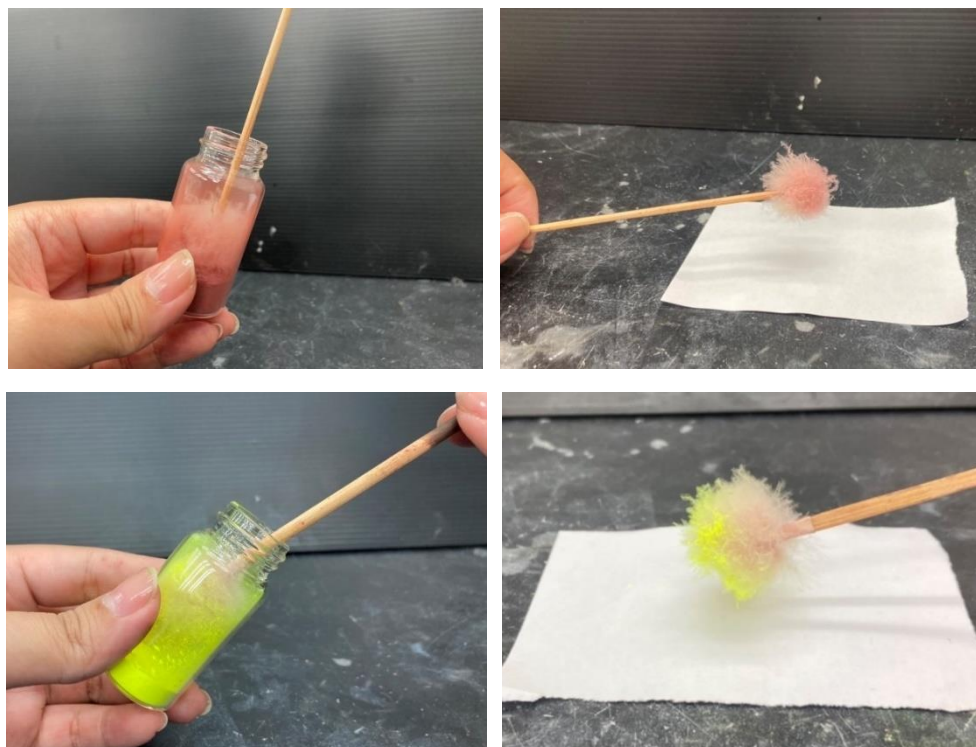


圖 7：粉末法所需的材料和試劑：配方一（上）和配方二（下）。先用鵝毛棒沾少許的粉末（左上和左下），再來回地輕觸隱形指紋（右上和右下）。

二、寧海準法

在 1954 年，寧海準法或稱茚三酮法（Ninhydrin method）開始使用檢測指紋。茚三酮是一種有機化學粉末，在室溫下可溶於乙醇、丙酮或非極性有機溶劑。當茚三酮溶液塗抹或噴霧在隱形的指紋時，茚三酮與指紋殘留物中的胺基酸發生反應，產生一種深紫色的複合物。在室溫下，茚三酮和潛在的氨基酸之間反應可能需要幾天時間，但是使用熱量和濕度可以加速反應（Powers Scientific, Inc., n.d.）。

（一）收集指紋

如前「粉末法」所述。

（二）注意事項

在配製試劑和操作步驟時，必須配戴安全眼鏡和乳膠手套。不慎碰觸到寧海準溶液，在長時間後弄髒衣服、桌面及皮膚。建議試劑現場新鮮配製，因為放置過久的溶液可能降低顯色效果。待顯現隱形指紋的紙張放在大紙箱內，避免噴霧後污染桌面或物體的表面。

（三）藥品和器材

配方一：茚三酮（Ninhydrin, $C_9H_6O_4$, CAS: 485-47-2）、乙醇（ CH_3CH_2OH ）。配方二：茚三酮、異丙醇（ C_3H_8O ）、冰醋酸（ CH_3COOH ）、正己烷（ $CH_3(CH_2)_4CH_3$ ）。共同：小燒杯、攪拌棒、噴霧瓶、大紙箱、加熱裝置（烘箱或電磁攪拌器）、膠帶、口紅膠、剪刀，如圖 8 所示。

（四）配製試劑

配方一：稱取 0.5 克的茚三酮，放在一個小燒杯中，加入 30 毫升的乙醇（或可再加少量的醋酸作為安定劑），攪拌使之混合均勻。轉移這溶液到貼有標籤的噴霧瓶中（Sodhi & Kaur, 1999），如圖八所示。配方二：放置 125 毫升的燒杯在電磁攪拌器上，加入 30 毫升的異丙醇和 10 毫升的冰醋酸。攪拌使之混合均勻。緩慢地加入 5 公克的茚三酮晶體，並持續攪拌，直到茚三酮完全溶解。此過程可能需要長達兩小時。加入正己烷直至 100 公毫升的刻度線，並攪拌均勻（Idaho State Police, 2025）〔註：此溶液可長久保存。若溶液靜置後底部出現黃色沉澱，應避免使用該部分溶液〕。

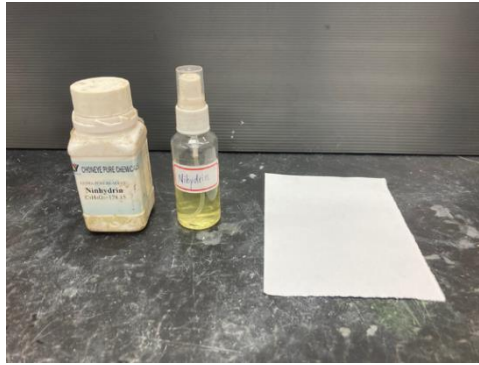


圖 8：寧海準法所需的材料和試劑（配方一）

(五) 操作步驟

配方一：準備一個大紙箱，放置隱形指紋的紙張在大紙箱內，如圖 9 左所示。從大約 15 公分的距離，噴灑茛三酮溶液到紙張上，如圖 9 中所示。噴灑溶液的液滴一定要非常的細小，否則指紋脊線易連在一起而難以觀察。稍等片刻，直到大部分溶劑蒸發，然後再次噴塗。讓它完全乾燥。只有在紙面完全乾燥後才會顯現指紋，這可能需要一個小時或更長時間 (Sodhi & Kaur, 1999)。[快速方式：紙張放入 50-70°C 的烘箱中或用加熱裝置加熱會加快發生反應，如圖九右所示。] 配方二：使用浸泡、噴灑或刷塗的方式，應用這溶液於待測物品上。處理後的物品放置於溫暖(約 80°C)或濕潤(約 65%相對濕度)的環境中，促進指紋的顯現 (Idaho State Police, 2025)。



圖 9：隱形指紋紙張放在紙箱中（左）；用茛三酮溶液噴灑在隱形指紋的紙面上（中）；放在溫熱的電熱板上加熱（右）

三、硝酸銀法

硝酸銀法 (Silver nitrate method) 的化學反應是指紋中的氯離子與試劑中的銀離子反應生成氯化銀 (AgCl)，在陽光 (紫外光) 照射下氯化銀的銀離子 (Ag^+) 還原為金屬銀 (Ag^0)，形成棕黑色的微小銀簇而使隱形的指紋顯現。

(一) 收集指紋

如前「粉末法」所述。

(二) 注意事項

在配製試劑和操作步驟時，必須配戴安全眼鏡和乳膠手套。不慎接觸到硝酸銀溶液，在長時間後弄髒衣服、桌面及皮膚。使用紫外燈必須非常小心，務必不可照射到自己或他人的眼睛。

(三) 藥品和器材

配方一：硝酸銀 (silver nitrate, AgNO_3)、蒸餾水。配方二：硝酸銀、蒸餾水、乙醇 ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$)、冰醋酸 (CH_3COOH)。共同：報紙或白紙、燒杯、噴霧瓶 (可遮光的不透明瓶)、大紙箱、紫外光 (太陽、紫外光燈或紫外光手電筒)、膠帶、口紅膠、剪刀。

(四) 配製藥品

配方一：在一個 125 毫升的燒杯中，放入 2.5 公克的硝酸銀，加入 45 毫升的蒸餾水，攪拌使之混合均勻。轉移溶液到貼有標籤的噴霧瓶中，如圖 10 所示，放置在避光處保存 (Sodhi & Kaur, 1999)。配方二：在一個 125 毫升的燒杯中，放入 3.0 公克的硝酸銀，加入 10 毫升的蒸餾水和 90 毫升的乙醇，並加入少量冰醋酸，攪拌使之混合均勻，此試劑適用於蠟紙 (Illinois State Police, 2024)。

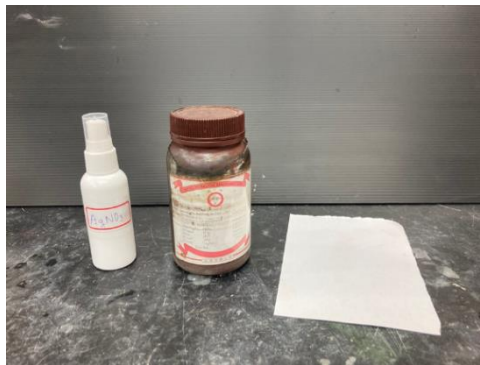


圖 10：硝酸銀法配方一所需的材料和試劑

(五) 操作步驟

配方一：準備一個大紙箱，放置隱形指紋的紙張在大紙箱內，如圖 11 左所示。從距離大約 15 公分處，噴灑硝酸銀溶液到紙張上，如圖 11 中所示。噴灑溶液的液滴一定要非常的細小，否則指紋脊線易連在一起而難以觀察。放置噴塗溶液的紙張在紫外光下 (用太陽光或紫外燈照射)，如圖 11 右所示，在 10-15 分鐘後指紋即可見到指紋 (Sodhi & Kaur, 1999)。配方二：滴加或噴灑硝酸銀溶液待測物體的表面上 (適用於多孔性表面，如紙張)。放置於陽光或紫外線光源下照射 (Friesen, 2014)。

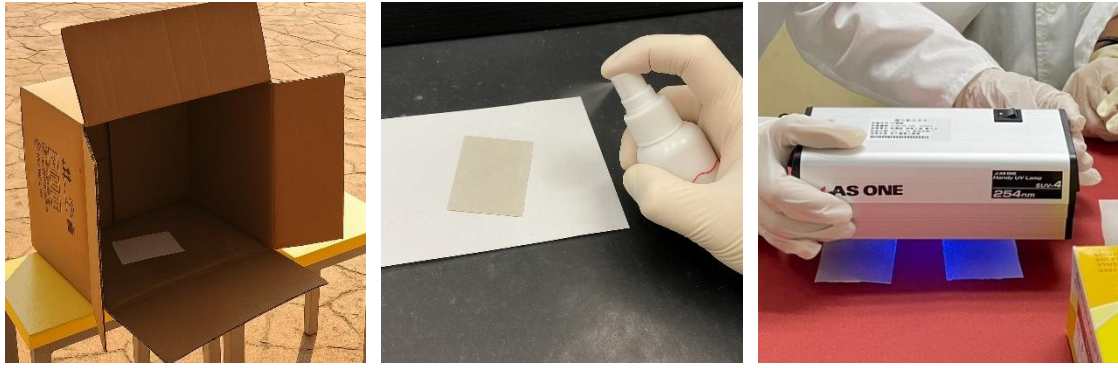


圖 11：放置隱形指紋的紙張在大紙箱內（左）；用硝酸銀溶液噴灑隱形指紋紙面上（中）；噴灑後照射紫外光（右）

四、氰丙烯酸酯法

氰丙烯酸酯法或稱強力膠燻煙法（Cyanoacrylate method / Super glue fuming method）是氰丙烯酸酯在加熱或潮濕環境下發生氣相聚合反應。指紋殘留物中的水分或胺基酸可作為反應觸媒，促使單體開始聚合形成聚氰丙烯酸酯，白色固體沿著指紋脊線沉積，使隱形指紋顯現。

（一）收集指紋

如前「粉末法」所述。

（二）安全注意

在操作步驟時，必須配戴安全眼鏡和乳膠手套。液態瞬間強力膠（如三秒膠）在使用時所釋放的氣體對呼吸系統有刺激性，務必戴防護口罩避免吸入。

（三）藥品和器材

配方一：透明塑膠片（或透明寶特瓶）、剪刀、液態瞬間強力膠〔俗稱三秒膠，含氰丙烯酸酯（如 Methyl Cyanoacrylate, $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CN})\text{COOCH}_3$ ）〕、熱水（70-80°C）、透明塑膠盒（小型）、試飲杯、膠帶、口紅膠、剪刀，如圖 12 所示。配方二：與配方一相同，增加加熱裝置（小型）。



圖 12：氰丙烯酸酯法所需的材料和試劑

(四) 操作步驟

配方一：剪裁透明塑膠片（或透明寶特瓶）成為合適大小（如 3 公分 × 5 公分）的塑膠片。輕輕地按壓指紋在此塑膠片上。準備一個可密封的透明塑膠盒，以斜躺方式放置塑膠片在盒內。在盒中放入兩個試飲杯，其中一杯放入適量的（約 1 毫升）液態強力膠，在另一杯中放入半滿的熱水，如圖 13 左所示。蓋上盒蓋。約 5-10 分鐘後，觀察指紋是否顯現〔拿取塑膠盒或塑膠片，對準燈光易於查看〕，如圖 13 中和右所示。若未顯現，延長時間繼續觀察。待顯現後，取出這塑膠片。配方二：放置物證（適用於非多孔性表面，如玻璃、塑膠、金屬）在密閉盒中。加熱氰丙烯酸酯至約 80–100°C，使其蒸發。蒸氣會與指紋殘留物中的水氣或胺基酸反應，生成白色聚合物沉積物，勾勒出指紋（Friesen, 2014）。



圖 13：氰丙烯酸酯一的指紋顯現裝置（左）；對準燈光易於查看是否顯現指紋（中和右）

■ 指紋顯現的原理

一、指紋與汗水

指紋是手指末端（指腹）由凹凸皮膚形成的脊線圖案，能增加手部摩擦力，使抓握物件更穩固，是人類進化自然形成的特徵。汗水是從指紋脊線的汗孔流出來的，汗水的主要成分其實非常單純，幾乎全部是水（約 98–99%）和鹽分〔約 1%，鈉離子（ Na^+ ）和氯離子（ Cl^- ）〕，其它成分有鉀離子（ K^+ ）、鈣離子（ Ca^{2+} ）、鎂離子（ Mg^{2+} ），代謝產物（ $<0.1\%$ ，有尿素、乳酸、氨、肌酸酐、胺基酸）（Baker & Wolfe, 2020）。皮膚表面感到黏膩或油膩，其實是因為手指接觸到皮脂腺分泌的油脂，這些油脂混合汗水，而不是汗水本身有油性成分。指紋脊線上有許多小汗腺開口，手指經常碰到臉部、頭髮和鼻翼等皮脂腺豐富的區域，讓油脂轉移到指尖。手指和手掌幾乎沒有皮脂腺（Merlo, 2023），因此指紋殘留物其實是一種混合分泌物。法醫化學家常分類指紋殘留物為三大類：(1)水溶性成分：含鹽類、胺基酸、乳酸等（適合用茚三酮法顯現）；(2)脂溶性成分：含三酸甘油酯、角鯊烯、蠟酯（適合用粉末法或溶劑萃取分析）；以及(3)固體與外來微粒：如灰塵、金屬、藥物等（可作為個體或行為特徵分析）（Baker & Wolfe, 2020）。

二、指紋顯現的原理

(一) 粉末法

指紋顯現的粉末法是藉由粉末吸附在隱形指紋的殘留物上，粉末對水分和油性成分之間有靜電吸引力，以提供良好的可見度和指紋細節的清晰度。影響吸附力的因素有：粉末的顆粒大小、形狀、相對表面積和電荷等。另外，透過混合螢光染料在有色粉末可以克服少量的粉末吸附在指紋上的問題。下面分別以巨觀的粉末層次和微觀的分子層次說明指紋顯現的吸附作用和靜電吸引力。

甲、巨觀層次—以有色粉末吸附水分

紙張（接觸物）、水分（指紋汗水）、無機鹽類粉末（載體）及有色粉末（著色劑）之間的巨觀表面吸附作用的示意圖，如圖 14 所示。

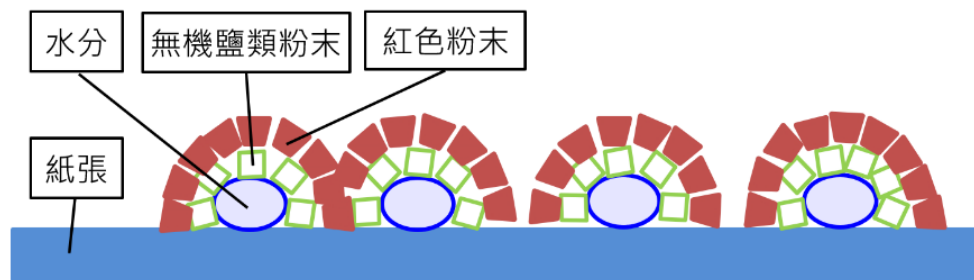


圖 14：巨觀層次—以有色粉末吸附水分的表面吸附作用

乙、巨觀層次—以有色粉末吸附油性成分

紙張（接觸物）、油性成分（手指觸摸臉部等部位）、無機鹽類粉末（載體）及有色粉末（呈色劑）之間的巨觀表面吸附作用的示意圖，如圖 15 所示。

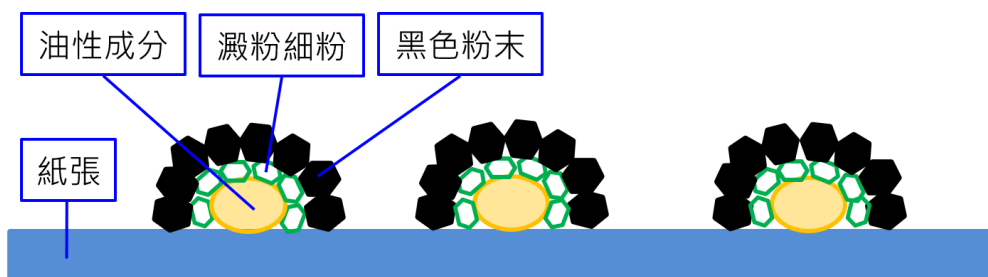


圖 15：巨觀層次—以有色粉末吸附油性成分的表面吸附作用

丙、微觀層次—以有色粉末靜電吸引水分

紙張（如纖維素分子）、水分（水分子）、無機鹽類粉末（如碳酸鎂）及紅色粉末（如三氧化二鐵）相互之間微觀的靜電吸引力，如圖 16 所示。

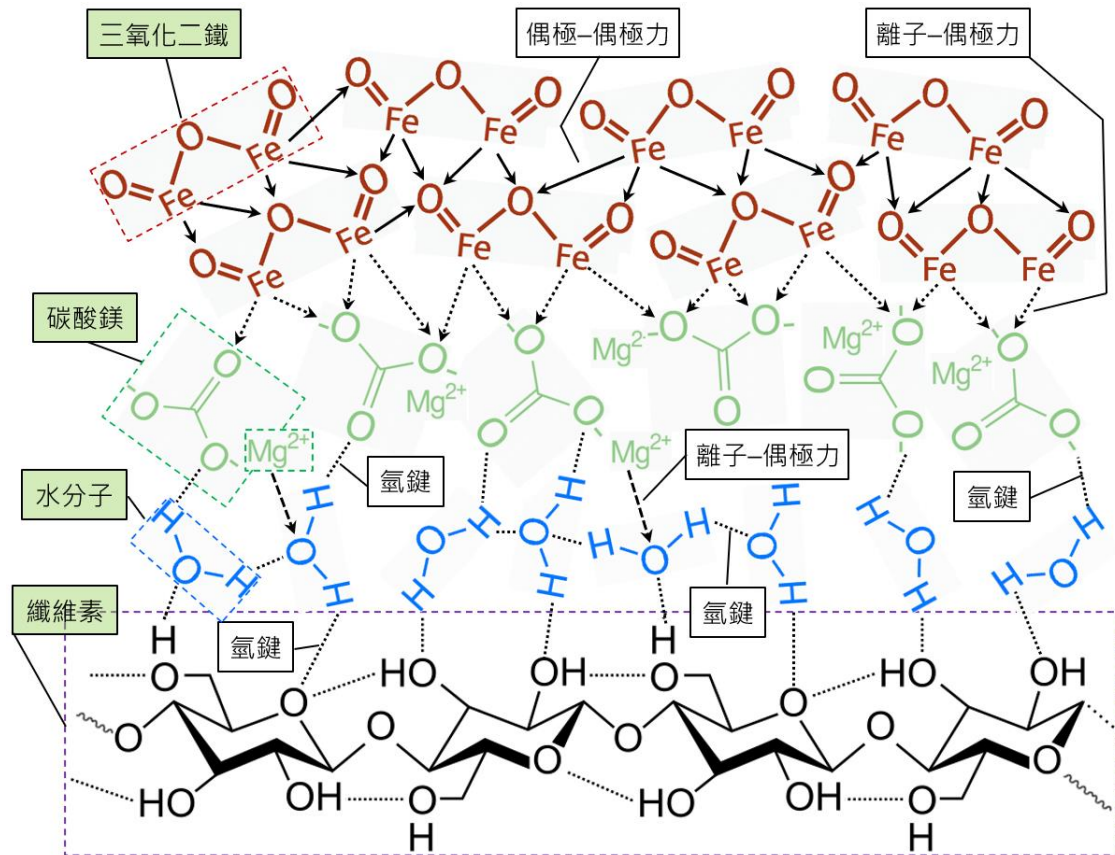


圖 16：微觀層次—以有色粉末靜電吸引水分的靜電吸引力
(纖維素圖片來源：<https://en.wikipedia.org/wiki/Cellulose>)

纖維素 (Cellulose) 是由 β -D-葡萄糖單元以 β -1,4-糖苷鍵連接而成的線性多醣。每個葡萄糖單元上含有三個羥基 ($-\text{OH}$)，這些官能基是形成靜電作用的關鍵，形成分子內氫鍵 (Hydrogen bonding)。

纖維素與水分子之間的靜電吸引力主要來自氫鍵，這些吸引力使纖維素具有良好的親水性與吸水能力。水分子的氫原子 (δ^+) 可與纖維素上的羥基氧原子 (δ^-) 形成氫鍵。此外，纖維素的羥基氫原子 (δ^+) 也可與水分子的氧原子 (δ^-) 形成氫鍵。這種雙向氫鍵網路使水分子能牢固地吸附在纖維素表面或滲入其微孔結構中。羥基與水分子皆具有永久偶極，彼此之間可產生偶極-偶極作用力 (Dipole-dipole interaction) 的取向力，進一步穩定吸附作用。

碳酸鎂 (MgCO_3) 與水分子之間的靜電作用力主要來自：(1) Mg^{2+} 與水分子之間：鎂離子帶正電 (+)，會吸引水分子中偏負電的氧原子 (δ^-)，形成強烈的離子-偶極作用力 (Ion-dipole interaction)。(2) CO_3^{2-} 與水分子之間：碳酸根離子帶負電 (-)，會吸引水分子中偏正電的氫原子 (δ^+) 形成離子-偶極作用力。(3) CO_3^{2-} 的氧原子與水分子之間：雖然碳酸根本身不含氫，但碳酸根上的氧原子帶負電荷 (δ^-) 可與水分子的羥基的氫原子帶正電荷 (δ^+) 形成氫鍵 ($\text{O}-\text{H}\cdots\text{O}=\text{C}$)，這種氫鍵有助於穩定水合結構。

Fe_2O_3 中的 Fe^{3+} 是高電荷密度的陽離子，具有強烈的靜電吸引力。 MgCO_3 中的碳酸根 (CO_3^{2-}) 有偏負電的氧原子 (O^{2-})，可與帶正電的鐵離子 (Fe^{3+}) 產生靜電吸引力。此外， Fe^{3+} 可視為路易斯酸 (電子接受者)，而碳酸根中的 O^{2-} 原子可視為路易斯鹼 (電子提供者)。在某些條件下 (如水合)，可能形成弱配位鍵或表面錯合物，這種作用本質上仍是靜電吸引力。

丁、微觀層次—以有色粉末靜電吸引指紋的油性成分

紙張 (如纖維素分子)、油性成分 (如棕櫚酸分子和油酸分子)、澱粉細粉 (如支鏈澱粉分子)、黑色粉末 (如活性碳) 相互之間微觀的靜電吸引力，如圖 17 所示。

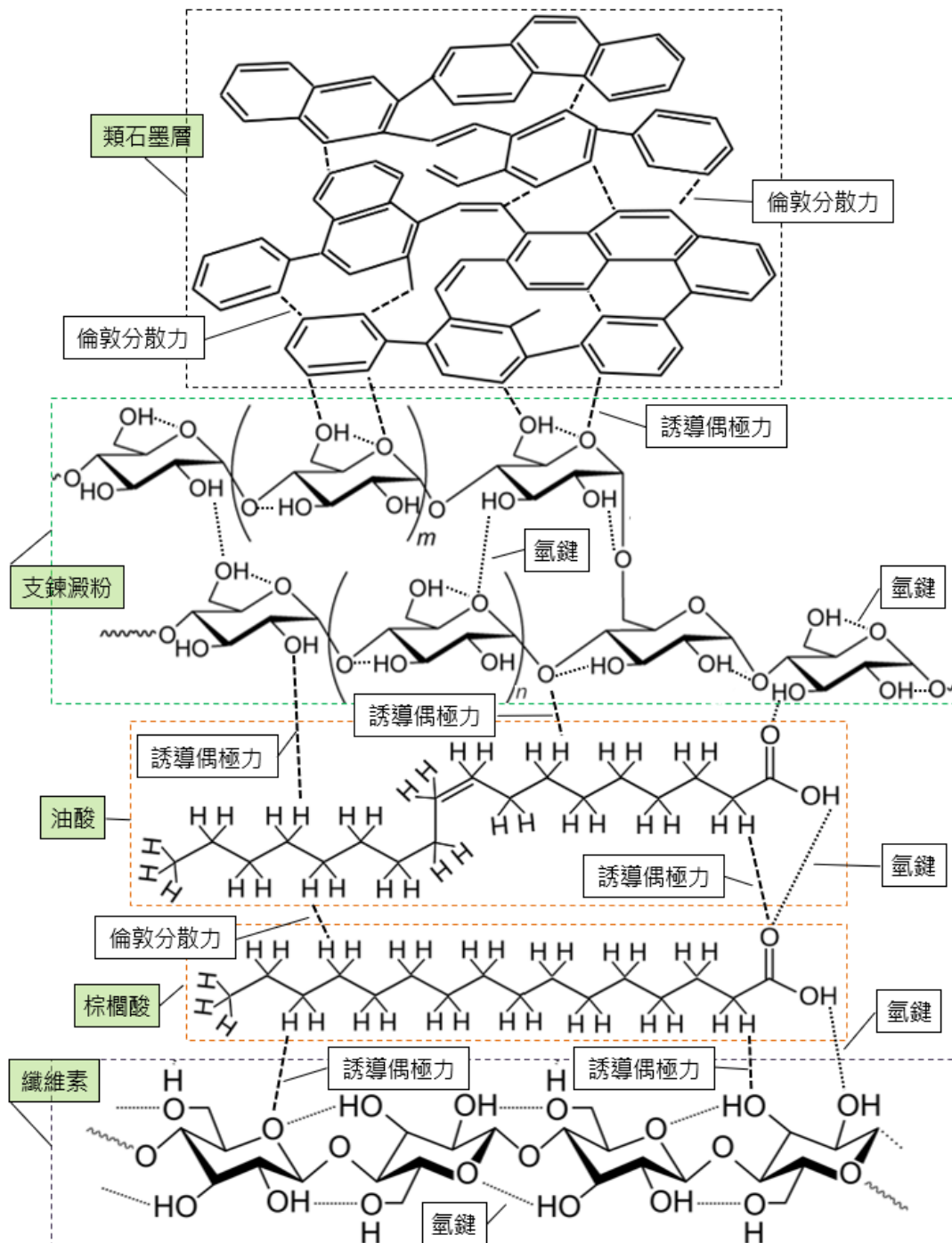


圖 17：微觀層次—以有色粉末靜電吸引油性成分的靜電吸引力
(纖維素和支鏈澱粉的圖片來源：<https://en.wikipedia.org/wiki/Cellulose> & <https://i.sstatic.net/G4ZrU.png>)

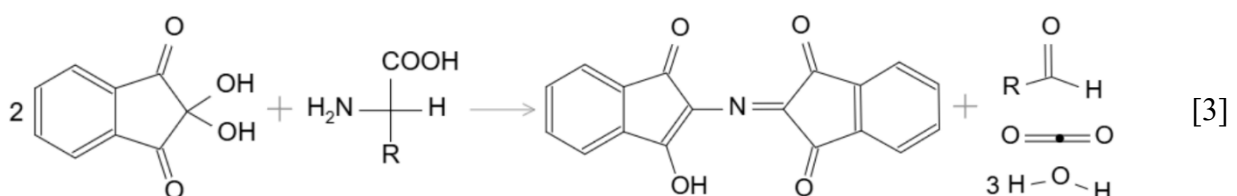
汗液中含有微量代謝產物(乳酸、尿素及棕櫚酸等)，汗腺本身不會分泌油酸(oleic acid)。若汗液中混入來自皮脂腺的油酸，這些油酸幾乎全部是順式-油酸(cis-9-octadecenoic acid)。棕櫚酸分子與油酸分子之間會形成三種靜電作用力：(1)兩種羧基(-COOH)之間可形成分子間氫鍵；(2)兩者都擁有長碳鏈，非極性部分之間形成倫敦分散力(London dispersion)，特別是油酸的雙鍵稍微改變分子形狀，使凡得瓦耳力略減；以及(3)碳氧鍵(C=O)有明顯的偶極(電子密度偏向氧)，使整個-COOH區域能產生穩定的永久偶極，而且長碳鏈幾乎不帶永久偶極，但在永久偶極或電場作用下，在長碳鏈中C-H被誘導出瞬時偶極，形成偶極-誘導偶極力(Dipole-induced dipole interaction)，簡稱誘導偶極力。

油酸分子(或棕櫚酸分子)與支鏈澱粉分子之間形成兩種靜電吸引力：(1)羧基(-COOH)的氧氫(O-H)或羰基(C=O)的氧原子(δ^-)可與澱粉的羥基(-OH)形成氫鍵(O \cdots O-H)；(2)棕櫚酸的極性端(-COOH)可誘導澱粉中非極性碳鏈(-C-H)形成偶極-誘導偶極力。

活性碳的主要成分是碳元素(C)，其含量通常高達90%以上，但它並不是純碳。活性碳並不是單一化合物，而是一種非晶質碳(amorphous carbon)，其結構可以視為：許多不規則排列的類石墨層(graphitic layers)堆疊而成，類石墨層之間形成倫敦分散力。類石墨層的 π 電子雲可瞬時偏移產生短暫偶極，支鏈澱粉中的-OH產生永久偶極，兩者之間形成偶極-誘導偶極力。

(二) 寧海準法

寧海準或茛三酮試劑可顯現老舊的隱形指紋。茛三酮與汗液中的胺基酸反應生成紅紫色產物，此反應為寧海準檢測胺基酸的化學基礎，產生特徵性的紫色化合物，同時伴隨二氧化碳、醛與水等副產物，如式[3]所示。

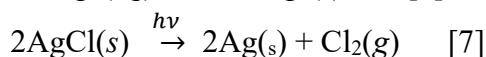
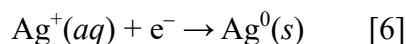
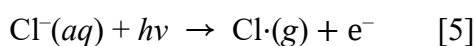
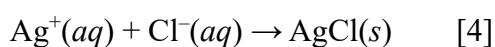


茛三酮與胺基酸的反應機制有三步驟：(1)形成希夫鹼(Schiff base)中間體：茛三酮與胺基酸在加熱條件下發生縮合反應，失去水分子，形成一個不穩定的中間體，其中茛三酮分子上羰基的碳原子與胺基酸的胺基氮原子形成碳氮雙鍵(C=N)，即為希夫鹼(Schiff base)。(2)

中間體分解：形成的中間體希夫鹼會進一步分解，產生二氧化碳、醛及一個還原的茛三酮分子。(3)兩分子結合反應：還原的茛三酮分子與第二個茛三酮分子反應，形成一個深紫色的化合物，稱為魯赫曼紫 (Ruhemann's purple)。這個紫色化合物是茛三酮試驗的特徵性產物。

(三) 硝酸銀法

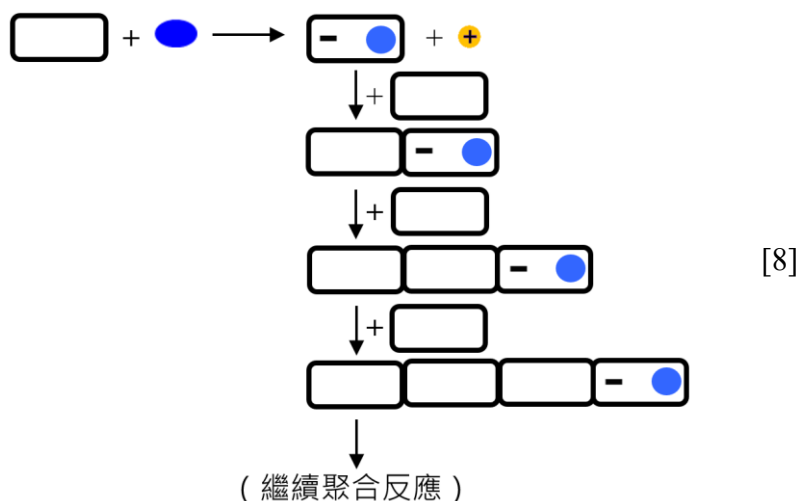
硝酸銀可用於顯現隱形指紋的顯色試劑。硝酸銀與汗液中的氯化鈉發生離子沉澱反應，生成固態的氯化銀 (AgCl)，如式[4]所示。暴露在陽光 (紫外光) 下，在固態的 AgCl 上的 Cl⁻ 產生氯自由基 (Cl·) 和電子，如式[5]所示，並且銀離子 (Ag⁺) 被還原成金屬銀 (Ag⁰)，如式[6]所示，這些銀原子會形成微小銀簇 (Ag₂、Ag₃...等短暫聚集體)，最終成為可見的暗色/黑色金屬銀沉積，使指紋顯現。合併成整體的反應式，如式[7]所示 (Singh et al., 2019)。



(四) 氰丙烯酸酯法

強力膠是一種由氰丙烯酸酯 (cyanoacrylate) 製成的液體化合物，幾乎可以立即形成牢固的粘合。氰丙烯酸酯分子在其他物質存在下會迅速反應，尤其是水。由於幾乎在任何物體上都可以發現一些水痕跡，因此強力膠幾乎可以立即牢固地粘合到任何物體上。甲基、乙基及丁基氰丙烯酸酯是最常見的市售強力膠產品。由於氰丙烯酸酯與水分接觸時幾乎立即發生反應，因此添加少量添加劑 (通常是酸) 以稍微減緩硬化過程。

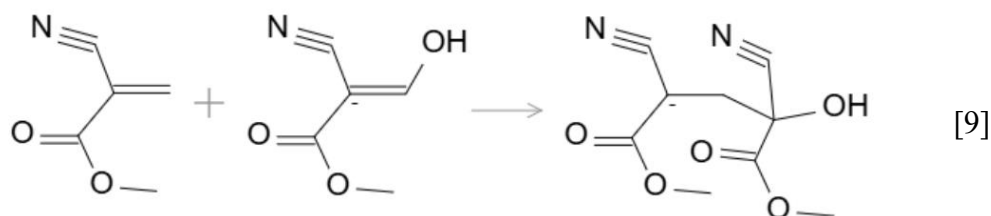
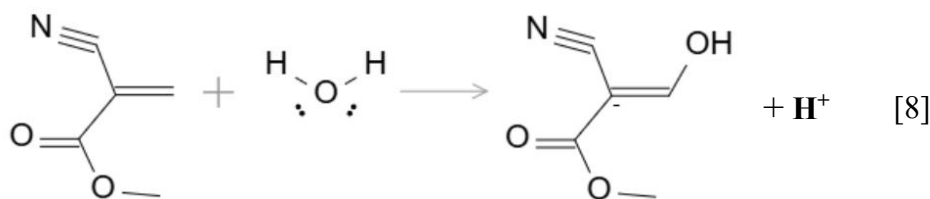
在指紋中胺基酸與水分的催化作用下，氰丙烯酸酯單體開始聚合反應，生成帶負電的氰丙烯酸酯陰離子 (cyanoacrylate anion) 和氫離子 (陽離子)，然後此陰離子與第二個氰丙烯酸酯分子反應，如此繼續發生聚合反應，形成長鏈的聚合物，聚合鏈交織成堅固的白色塑膠網，覆蓋於指紋殘留物的表面上，進而顯現出指紋細微的脊線與特徵。此聚合反應過程的巨觀層次示意圖，如圖 18 所示。



(: 氰丙烯酸酯分子 ; : 水 ; : 氰丙烯酸酯陰離子 ; : 氫離子)

圖 18：在指紋中水分子的催化作用下，氰丙烯酸酯發生聚合過程的示意圖。

氰丙烯酸酯發生聚合反應，以分子結構式表示，微觀層次的反應過程，如式[8]和[9]所示。



(五) 螢光發光的原理

光致發光 (Photoluminescence) 是指物質吸收光或其他電磁輻射後再度放出光的現象。許多物質在紫外光照射下會發出有色可見光，即所謂的螢光 (fluorescence)，它是光致發光的主要形式之一。發射光的顏色取決於物質的化學組成。當分子吸收入射光的能量後，會被激發至較高能階；當其回到低能狀態時，便會放出光。由於放射光的波長通常較長、能量較低，因此螢光物質常吸收紫外線並發出可見光，呈現明亮色彩 (Öztürk & Tezcan, 2022)。

在 1933 年波蘭物理學家亞歷山大·賈布隆斯基 (Aleksander Jabłoński) 提出賈布隆斯基圖 (Jablonski diagram)，說明分子在吸收光能後，電子從基態 (S_0) 躍遷到激發態 (S_1 、 S_2)，並且隨後如何透過各種過程 (如螢光、磷光、內轉化等) 回到基態，如圖 19 所示。圖式說明如下：吸收 (Absorption)：電子吸收光子能量，從基態 (S_0) 躍遷到激發態 (S_1 、 S_2)。在螢光

(Fluorescence) 方面：電子從激發單重態 (S_1) 直接回到基態 (S_0)，並發射光子，這個過程通常很快。在磷光 (Phosphorescence) 方面：電子從激發三重態 (T_1) 回到基態 (S_0)，並發射光子，這個過程比螢光慢。螢光和磷光放射光涉及的過程有三種形式：(1)內轉化 (Internal conversion)：電子在同一個自旋多重態內 (如 S_1 到 S_0 或 S_2 到 S_1) 的無輻射躍遷的過程；(2)系間穿越 (Intersystem crossing)：電子在不同的自旋多重態之間 (如 S_1 到 T_1) 的無輻射躍遷的過程；以及(3)振動弛豫 (Vibrational relaxation)：電子在激發態內，透過與周圍分子碰撞，以熱能形式釋放多餘的振動能量的過程 (Straughan & Walker, 1980)。

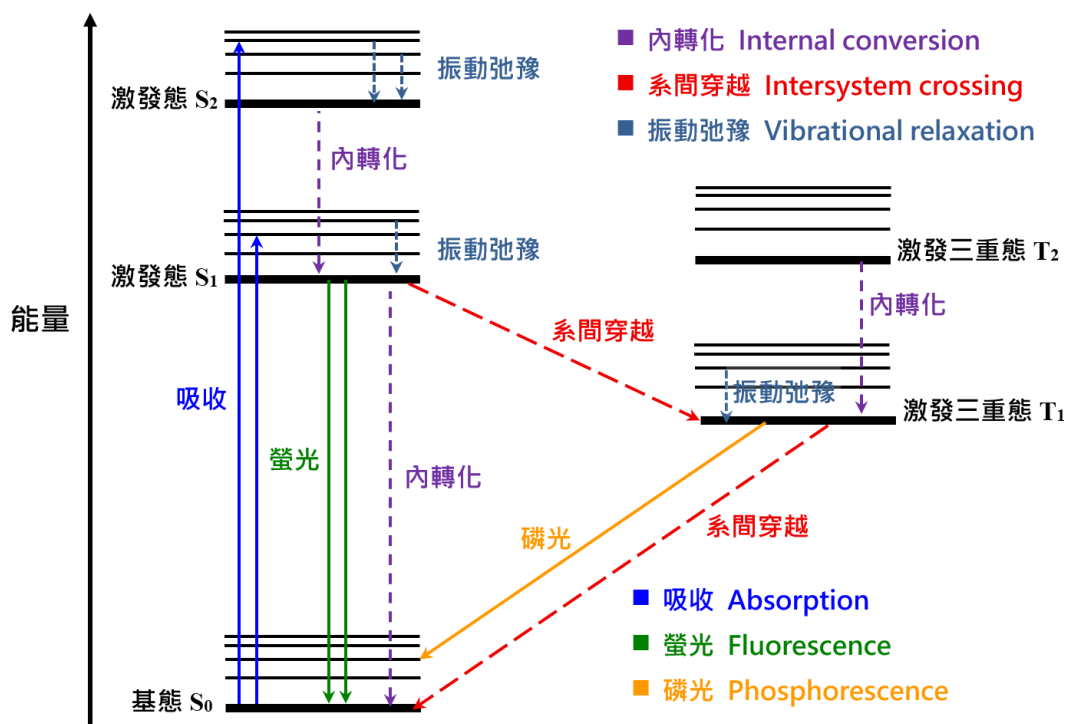


圖 19：賈布隆斯基圖

螢光放射的過程由三重要過程來控制 (Zeiss Campus, n.d.): (1)開始過程：入射光激發敏感分子的電子，發生時間在飛秒 (10^{-15} 秒) 內。(2)中間過程：激發態電子以振動弛豫的形式釋放能量到較低能階的過程，發生時間在皮秒 (10^{-12} 秒) 內。(3)最後過程 (螢光放射)：放射波長較長的光子，並釋放能量使分子返回基態，發生時間在相對較長的奈秒 (10^{-9} 秒) 內。

■ 聚斂性問題解決：顯現隱形指紋密碼開鎖獲得金幣

一、競賽前教師準備材料和物品

1. 指紋顯現所需的材料和試劑，有四類：粉末法、寧海準法、硝酸銀法及氰丙烯酸酯法，如「指紋顯現的操作步驟」一節所述。
2. 事先改善收納袋：拉鍊收納袋 (不同尺寸，可依大小依序放入袋內；若拉鍊拉片與掛環

扣之間的連接過於鬆散，可打結拉鏈頭的連接繩一至兩次來縮短長度）4 個、PP 瓦楞板（其面積應略小於收納袋並可剛好置入袋中，以防止未依規定打開收納袋，如圖十八左所示）4 片、密碼鎖（每個鎖皆有三個數字碼，教師須依提示單的提示預先設定並記錄密碼）4 個，如圖 20 右所示。



圖 20：四個大小不同的收納袋、四片 PP 瓦楞板及四個密碼鎖

3. 每組競賽所有物品：除上述改善收納袋的三件物品外，還有競賽規則和開密碼鎖過程說明 1 張、指紋開鎖提示單 4 張、指紋競賽紀錄表（用於記錄成功開鎖的時間及名次，詳見第三階段的學習單的內容）1 張、對折小紙張（教師預先準備好每張對折內頁的兩邊分別有隱形指紋）3 張、塑膠片（兩邊各有隱形指紋）1 片、巧克力金幣 4 個，直尺（10 公分，學生自備）1 支，每組開鎖的組合物件，如圖 21 所示。

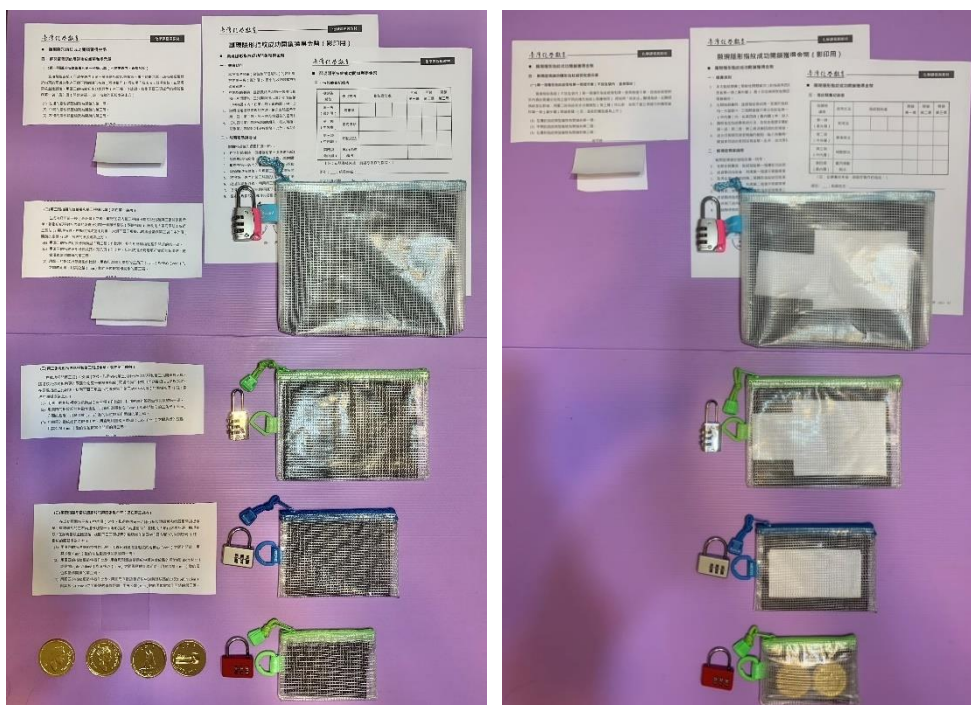


圖 21：每組開鎖的組合物件：放入 PP 瓦楞板在袋內，其餘放在袋外（左）；放入 3 張提示單、2 張指紋紙張和 1 片塑膠片以及 4 個巧克力在金幣袋內，其餘放在袋外（右）

4. 收納袋組合物件：依照收納袋大小，逐一地最小袋→次小袋→次大袋→最大袋，如圖 22 左所示。在開始競賽時，發給每組四種張紙和一套收納袋組合物件，如圖 22 右所示。

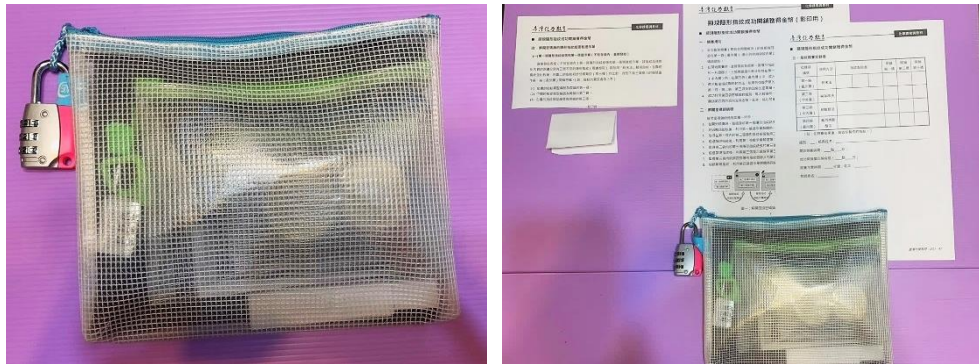


圖 22：一套收納袋組合物件（左）；在開始競賽時，發給每組四張紙和一套收納袋組合物件（右）

5. 每組獎品：四個巧克力金幣〔每人一個，放在最小袋（最內層）內，用 PE 夾練袋包住，避免污染〕、競賽獎品（依名次給予不同等級的獎品），教師事先準備，放在公共區域。

二、競賽規則

1. 本指紋競賽的各組有四個不同大小的拉鍊收納袋，第一袋（最大袋）放在最外層，第四袋（最小袋）放在最內層。每一個收納袋都被一個號碼鎖鎖住。
2. 在開始競賽時，直接發給各組第一張隱形指紋紙張和第一張開鎖提示單，不放在袋內；其餘有隱形指紋的二張紙張和一片塑膠片、三張開鎖提示單分別放在第一袋（最外層）、第二袋（中外層）及第三袋（中內層）內；四個巧克力金幣放在第四袋（最內層）內。
3. 依照指紋顯現的指定方式和提示單的提示，找到開鎖的密碼，依次地打開第一袋（最外層）、第二袋、第三袋及第四袋（最內層）的密碼鎖。
4. 成功打開第四袋密碼鎖的組別，每人有獲得一個巧克力金幣；在規定的時間內，未成功開鎖第四袋的組別不可獲得金幣。此外，成功開鎖的前三名給予不同等級的獎品。

三、解開密碼鎖過程

解開密碼鎖的過程如圖 23 所示：

1. 在開始競賽前，發給每組一張競賽規則和開密碼鎖過程及一張競賽紀錄表，並且教師解說競賽規則和開鎖過程；
2. 在開始競賽時，發給每組第一張隱形指紋紙張和第一張開鎖提示單；
3. 經過顯現指紋後，利用第一張開鎖提示單解開第一袋（最外層）的密碼鎖；
4. 取得在第一袋內的第二張隱形指紋紙張和第二張開鎖提示單；
5. 經過顯現指紋後，利用第二張開鎖提示單解開第二袋（中外層）的密碼鎖；

6. 取得第二袋內的第三張隱形指紋紙張和第三張開鎖提示單；
7. 經過顯現指紋後，利用第三張開鎖提示單解開第三袋（中內層）的密碼鎖；
8. 取得第三袋內的第四張隱形指紋塑膠片和第四張開鎖提示單；以及
9. 經過顯現指紋，利用第四張開鎖提示單解開第四袋（最內層）的密碼鎖，獲得巧克力金幣。

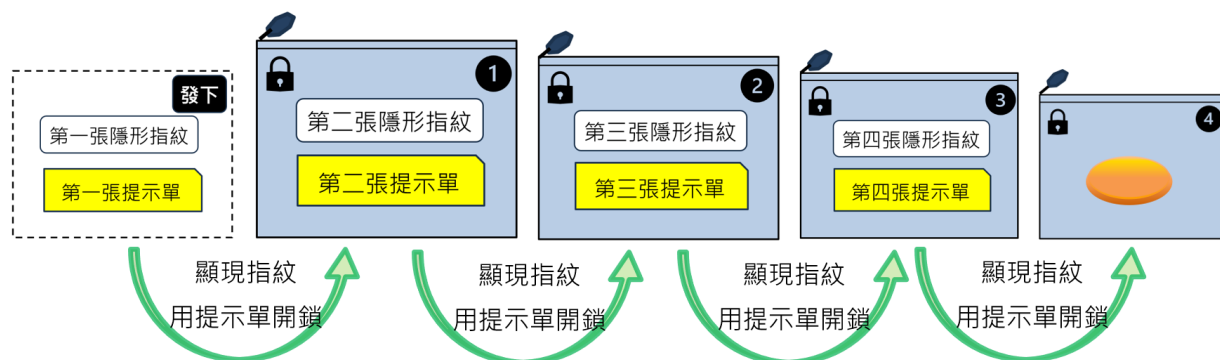


圖 23：解開四道密碼鎖取得金幣的過程

四、隱形指紋紙張和開鎖提示單

1. 第一張隱形指紋紙張和第一張開鎖提示單（不放在袋內，直接發給）

直接發給各組（不放在袋內）第一張隱形指紋紙張和第一張開鎖提示單。該指紋紙張對折內頁的兩邊分別有三個不同的隱形指紋（兩邊相同），限制用「粉末法」顯現指紋。在顯現指紋後，利用第一階段上課講義的圖二指紋初步分類類型（有三種）作比對，找到下面三項提示的編號當作第一袋（最外層）開鎖密碼。（註：指紋的圓弧處為上方）

- (1) 左邊的指紋類型編號為開鎖的第一碼。
- (2) 中間的指紋類型編號為開鎖的第二碼。
- (3) 右邊的指紋類型編號為開鎖的第三碼。

2. 第二張隱形指紋紙張和第二張開鎖提示單（裝在第一袋內）

在成功打開第一袋（最外層）之後，取得在袋內第二張隱形指紋紙張和第二張開鎖提示單。該指紋紙張對折內頁的兩邊分別有一個隱形指紋（兩邊相同），限制用「寧海準法（或茛三酮法）」顯現指紋。在顯現指紋並比對後，利用第一階段上課講義的圖 2、圖 3 及圖 4 作比對，找到下面三項提示的編號當作第二袋（中外層）開鎖的密碼。（註：指紋的圓弧處為上方）

- (1) 用圖 2 的指紋初步分類類型（有三種）作比對，找到對應的編號當作開鎖的第一碼。
- (2) 用圖 3 的指紋細部分類紋路（有八項）作比對，找出該指紋有幾項符合細節特徵點，符合項數當作開鎖的第二碼。
- (3) 用圖 4 的指紋細節特徵作比對，用直尺測量此指紋的三角形（Delta）與核心（Core）的

之間的距離，用其公釐 (mm) 數的個位數當作開鎖的第三碼。

3. 第三張隱形指紋紙張和第三張開鎖提示單 (裝在第二袋內)

在成功打開第二袋(中外層)之後，取得袋內第三張隱形指紋紙張和第三張開鎖提示單，該指紋紙張對折內頁的兩邊分別有一個隱形指紋(兩邊相同)，限制用「硝酸銀法」顯現指紋。在顯現指紋後，利用第一階段上課講義的圖 2 和圖 4 作比對，找到下面三項提示的編號當作第三袋(中內層)的開鎖密碼。(註：指紋的圓弧處為上方)

- (1) 用圖 2 的指紋初步分類類型(有三種)作比對，找到對應的編號當作開鎖的第一碼。
- (2) 用圖 4 的指紋細節特徵作比對，用直尺測量核心(Core)與最近核心的三角形(Delta)之間的距離，用其公釐(mm)數的個位數當作開鎖的第二碼。
- (3) 用圖 4 的指紋細節特徵作比對，用直尺測量兩個點/島(Dot/Island)之間最近的距離，用其公釐(mm)數的個位數當作開鎖的第三碼。

4. 第四張隱形指紋塑膠片和第四張開鎖提示單 (裝在第三袋內)

在成功打開第三袋(中內層)之後，取得袋內有一片隱形指紋塑膠片和第四張開鎖提示單，這塑膠片的左右兩邊分別有一個隱形指紋(兩邊相同)，限制用「氰丙烯酸酯法」顯現指紋。在顯現指紋後，利用第一階段上課講義的圖 4 作比對，找到下面三項提示的編號當作第四袋(最內層)的開鎖密碼。(註：指紋的圓弧處為上方)

- (1) 用圖 4 的指紋細節特徵作比對，用直尺測量這雙迴紋的兩核心(Core)之間的距離，用其公釐(mm)數的個位數當作開鎖的第一碼。
- (2) 用圖 4 的指紋細節特徵作比對，用直尺測量這雙迴紋中順時針紋路的短脊線(short ridge)或點/島(Dot/Island)與其核心(Core)之間最短的直線距離，用其公釐(mm)數的個位數當作開鎖的第二碼。
- (3) 用圖 4 的指紋細節特徵作比對，用直尺測量這雙迴紋中逆時針紋路的分叉(Bifurcation)與其核心(core)之間最短的直線距離，用其公釐(mm)數的個位數當作開鎖的第三碼。

■ 擴散性問題解決：設計並試作指紋顯現技術

一、設計一：局部修改並試做指紋顯現技術

在設計一：「局部修改並試做指紋顯現技術」的活動中，首先要求每位同學透過網路查詢並記錄一種現有的指紋顯現技術，包括方法名稱、概要、原理、來源、配方及步驟等，再由小組共同討論改良方案，考量藥品器材取得與安全後提出可行建議，列出原版與修改版所需材料與試劑配製方式。完成討論後，小組實際操作兩種技術、紀錄步驟並比較效果，然後發表成果(包括方法、試劑、步驟及品質)，最後撰寫心得反思學習過程和收穫，同時於發表後

銷毀已顯現出的指紋。具體詳細的內容，請見四階段：擴散性問題解決：設計並試作指紋顯現技術_學習單)。

二、設計二：創意設計並試作自己組的指紋顯現技術

在設計二：「創意設計並試指紋顯現技術」的活動中，運用學到的指紋顯現知識，創新設計一種不同於以往方法的新顯現技術，詳細說明你的試劑配方、操作流程及注意事項，並闡述相關科學原理。小組合作進行試作，記錄和比較自製技術與現有方法的效果，然後依序發表成果，包括顯現操作步驟、試劑調製及成果的品質，最後撰寫個人心得與感想，反思所學與提出建議，同時於發表後銷毀已顯現出的指紋。具體詳細的內容，請見〈第四階段：擴散性問題解決：設計並試作指紋顯現技術_學習單〉。

■ 課綱條目與教學目標

1. 在《十二年國民基本教育課程綱要》中，自然科學領域的學習表現主要聚焦於科學探究而非問題解決，而且兩者在本質上沒有嚴格的區分。雖然此課綱強調理解自然現象、建立科學理論的探究歷程，但是對設計應用或實際技術問題解決描述相對較少，因此涉及問題解決的課綱條目並不多(教育部，2018)。

- 在「觀察與定題」方面：〔必修〕po-Vc-2 能依據觀察、蒐集資料、閱讀、思考、討論等，確認並提出生活周遭中適合以科學方式尋求解決的問題。〔加深加廣〕Po-Va-2：與 po-Vc-2 大致相同。
- 在「計劃與執行」方面：〔必修〕pe-Vc-2 能正確安全操作適合學習階段的物品、器材儀器、科技設備及資源，能適度創新改善執行方式。〔加深加廣〕Pe-Va-1 有效率地規劃最佳化的實作問題解決活動。pe-Va-2：與 po-Vc-2 大致相同。
- 在「分析與發現」方面：〔必修〕pa-Vc-1 能合理運用思考智能、製作圖表、使用資訊及數學等方法，有效整理資訊或數據。〔加深加廣〕pa-Vc-1：與 pa-Vc-1 大致相同。
- 在「討論與傳達」方面：〔必修〕pc-Vc-2 能利用口語、影像(例如攝影、錄影)、文字與圖案、繪圖或實物、科學名詞等，呈現探究之過程、發現或成果(註：這方面呈現問題解決的過程與科學探究雷同)。〔加深加廣〕pc-Va-2：與 pa-Vc-1 大致相同，只是增加「選擇合適的發表方式和途徑」。
- 在「培養科學探究的興趣」方面：〔必修〕ai-Vc-1 透過成功的問題解決經驗，獲得成就感。〔加深加廣〕無。
- 在「物質的結構與功能」方面：CCb-Va-4 分子形狀、結構、極性及分子間作用力。學習內容說明：4-1 鍵極性、鍵偶極與極性分子，不涉及鍵偶極矩的計算。4-2 分子

形狀與分子極性。4-3 分子間作用力 (氫鍵與凡得瓦力)。

- 在「有機化合物的性質、製備及反應」方面：CJf-Va-4 常見聚合物的一般性質與分類。學習內容說明：4-1 聚合物單體 (同元與共聚物)。4-2 聚合反應的種類 (加成與縮合)。CJf-Va-5 常見聚合物的結構與製備。學習內容說明：5-2 天然橡膠、澱粉、纖維素、蛋白質及核酸的結構。

2. 預期達成四項學生學習目標：(1)從動手做實驗的過程中，學會顯現指紋的操作技術；(2)理解顯現指紋的原理和概念；(3)熟知指紋辨識原理與應用；以及(4)樂意地繼續進行聚斂性問題解決和擴散性問題解決。

3. 本教學分為四階段進行，教學時間分配如下：

第一階段：(第 1-2 節) 教師解說三種指紋初步類型、八種指紋細部分類、十一種指紋細節特徵及傳統和現今的指紋辨識系統，並撰寫問題的答案。師生共同準備所需藥品和器材並配製試劑。

第二階段：(第 3-4 節) 學生實際操作四種指紋顯現技術並熟知其原理，並撰寫問題的答案。

第三階段：(第 5-6 節) 進行「聚斂性問題解決：顯現隱形指紋密碼開鎖獲得金幣」，包括教師說明指紋遊戲的競賽規則和解開密碼鎖過程，學生實際操作步驟並撰寫問題的答案。

第四階段：(第 7-8 節) 進行「擴散性問題解決：設計並試作指紋顯現技術」，包括兩種不同開放程度的設計：(1)局部修改並試做指紋顯現技術，和(2)創意設計並試作指紋顯現技術；各組分享成果並撰寫問題的答案。

4. 關於「第三階段：聚斂性問題解決：顯現隱形指紋密碼開鎖獲得金幣」，強烈地建議教師自行設計四份提示單的提示描述當作開鎖密碼，不必完全依照作者的設計內容。

5. 事先評估學生動手做實驗的風險是教師的責任。

■ 結語與建議

一、學生學習心得歸納與彙整

作者逐一閱讀大一學生修習「普通化學實驗」的「指紋」學習心得，從他們的心得中歸納出多項反映經驗的概念。這些概念大致可系統化統整為六類：認知、情緒、行動策略、困難與挫折、合作互動，以及反思與態度。

(一)知識與認知建構：多數學生表示先前僅在影片中看過採集指紋，對於指紋類型、脊線特徵、比對方法均屬首次深入理解。有學生指出：「原來指紋不是只有迴旋紋與漩渦紋那麼簡單，各種細節會影響比對準確度。」(S14)，此類描述顯示學生透過實作活動「重新認識」指

紋，不僅擴增既有概念，也開始形成更精細的知識架構。

- (二) 技術操作與挑戰：幾乎所有學生在描述中皆提到實驗過程的難度。尤其是硝酸銀與粉末顯現指紋兩項操作，常因噴灑量、距離、手汗量及紙張材質等變因導致結果不如預期。例如某學生寫道：「以為噴一噴就會成功，沒想到太接近噴會糊掉、太遠則完全沒有指紋。」(S7)。許多學生也記錄自己多次嘗試後才逐漸掌握技巧，顯示出「反覆調整策略」是典型的學習行為。
- (三) 情緒波動（從挫折到成就）：情緒是本次實驗中最豐富的主題之一。學生頻繁提及挫折、焦慮、沮喪，如「我以為會很快，但一開始完全做不出來，有點崩潰。」(S32)；但另一方面，一旦成功顯影或順利比對，情緒轉折也非常明顯，又如：「當指紋顯出來那一刻真的超級興奮，像破案一樣。」(S20)。這些描述展現出實作型活動能帶來高強度的情緒參與。
- (四) 合作與互助：多數學生提到分工與互相觀察策略的重要性。尤其在困難階段，學生常「看別組怎麼做」、「討論有哪些細節需要修正」。有學生寫道：「本來都做不出來，是看到別組用不同角度噴，我才突然成功。」(S9) 合作不僅提升效率，也形成一種「共同解題」的課室文化。
- (五) 競賽遊戲化任務帶來的投入感：在進行指紋比對競賽時，學生普遍表示緊張與刺激：「時間壓力讓我突然變得超專心。」(S3)，遊戲化帶來的競爭與情境感，使學生在接近真實的任務中應用所學，而非僅停留在操作層次。
- (六) 反思與態度轉變：許多學生在回饋後段展現高度反思。例如：「做完才知道預報的重要，下次不敢再不看。」(S18) 或「原來鑑識工作比想像中精細，要非常有耐心。」(S26)，這顯示實作與遊戲化任務不僅提升技能，也促進學習態度的改變。

二、對各學習階段教學內容的建議

作者已完成四階段教學的教材與學習單之設計(詳見附錄)，主要提供大學與高中教師作為教學參考。由於「顯現指紋」的技術操作稍有難度常有不完美，相關內容實質上相當多樣，而且涉及多項深度原理和概念。若作為不同學習階段的教材，適度選用教材和調整教學內容極為必要。以下為作者針對各學習階段給教師的教學建議：

- (一) 大學階段：大一學生已學過「分子形狀、結構、極性及分子間作用力」與「常見聚合物的結構與製備」，因此相當適合在「普通化學實驗」課程中實施此主題，作為結合理論與實作的良好契機。然而，關於「類石墨分子結構」與「螢光發光原理」的部分，仍建議教師補充相關背景知識，或引導學生進行更深入的討論。

(二) 高中階段：高二通常教授「鍵極性、鍵偶極與極性分子、分子形狀與分子極性、分子間作用力(如氫鍵、凡得瓦爾力)」；高三則教授「聚合物單體、常見聚合物的結構與製備，以及天然橡膠、澱粉、纖維素、蛋白質與核酸等大分子的基本結構」。若學生在接觸「指紋」主題前尚未學過上述的知識，建議教師安排於有充裕時間的「專題研究」、「微課程」、「主題式課程」、「多元選修」或「探究與實作」課程中實施；至於「類石墨結構」與「螢光發光原理」相關內容，則建議教師預留更多的教學時間。

(三) 國中與國小階段：僅需著重於「指紋的認識」與「技術操作」兩部分；至於原理和概念方面，可配合本文提供的巨觀示意圖簡化講解；並建議省略第三與第四階段中「問題解決取向」的較高層次學習活動。若有充裕時間的彈性課程(如國中「跨領域統整主題/專題/議題探究」和「社團活動」)，建議增加第三階段「問題解決取向」的較高層次學習活動。

三、對教學策略的建議

強烈地建議本實驗的教學採用「先做後講」(activity-before-concept)，亦即「先動手做實驗再理解科學原理和概念」，讓學習者先動手做顯現隱形指紋的技術操作，激發學生從不可見到可見指紋的好奇心與求知慾，然後回頭理解其背後的原理，培養學生對概念的直覺理解，而不是被動接受原理。美國教育家 John Dewey 強調「從做中學」，認為學習應該建立在直接經驗的基礎上，透過反思將經驗轉化為知識，強調在實踐中學習和反思的重要性(Cloke, 2025)。一項研究對象為中學及大學階段的科學課學生，比較「先講後做」與「先做後講」兩種教學順序。該研究結果顯示：先動手操作的學生在後續的概念學習、遷移能力及批判思考上表現較佳。該研究指出，實作會創造「認知需求」(cognitive need)，讓學生更願意理解背後的科學原理(Alphonso et al., 2021)。

■ 附錄

第一階段：指紋類型與特徵與其辨識原理與應用_上課講義和學習單

第二階段：指紋顯現操作步驟和顯現的原理_上課講義和學習單

第三階段：聚斂性問題解決：顯現隱形指紋密碼開鎖獲得金幣_教師手冊及講義和學習單

第四階段：擴散性問題解決：局部修改和創意設計並試作指紋顯現技術_學習單

■ 致謝

通訊作者感謝曾經擔任國立彰化師範大學「普通化學實驗」的教學助理且積極付出者，包含方浩羽、鄭舜竹、何孟潔、曾育浩、徐佑武、王楨、張元宇、李錡峰、廖俞鈞、顧展兆、李佳蕙、曾佳緯、蔡欣展、紀佳宜、賴宇樺、許乃予及方舜雨。

■ 參考文獻

- 教育部 (2018)。十二年國民基本教育課程綱要：國民中小學暨普通型高級中等學校自然科學領域。臺北市：教育部。
- 顧展兆 (2018)。化學教室活動：透過密室逃脫遊戲精熟學習常見的化學元素。臺灣化學教育, 25。 <https://531.9e9.myftpupload.com/化學教室活動：-透過密室逃脫遊戲精熟學習常見的/>
- Alphonso, A. L., Karpinski, A. C., & Prokop, P. (2021). The timing of instruction: Inquiry-first vs. instruction-first approaches in science education. *International Journal of Science Education*, 43(14), 2265–2286. <https://doi.org/10.1080/09500693.2021.1953278>
- Baker, L. B., & Wolfe, A. S. (2020). Physiological mechanisms determining eccrine sweat composition. *European Journal of Applied Physiology*, 120(1), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s00421-020-04323-7>
- Behind the Crime. (n.d.). Fingerprints. <https://behindthecrime.wordpress.com/about/fingerprints/>
- Champod, C., Lennard, C., Margot, P., & Stoilovic, M. (2004). *Fingerprints and other ridge skin impressions*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Cloke, H. (2025). John Dewey's Learning theory: how we learn through experience. <https://reurl.cc/3603M0>
- Friesen, J. B. (2004). Activities designed for fingerprint dusting and the chemical revelation of latent fingerprints. *Journal of Chemical Education*, 81(3), 375. <https://doi.org/10.1021/ed081p375>
- Friesen, J. B. (2014). Forensic chemistry: The revelation of latent fingerprints. *Journal of Chemical Education*, 91(10), 1618–1624. <https://doi.org/10.1021/ed400597u>
- Henry, E. R. (1900). *Classification of Finger Prints*. George Routledge and Sons Ltd. Retrieved from <https://archive.org/details/dli.ernet.26302>
- Henry, E. R. (1913). *Classification and uses of finger prints (4th ed.) [PDF]*. Crime-Scene-Investigator.net. <https://www.crime-scene-investigator.net/PDF/classification-and-uses-of-finger-prints-1913-sir-henry.pdf>
- Hutchins, L. A. (2010). Chapter 5: Systems of Friction Ridge Classification. In *Fingerprint Sourcebook* (NIJ Publication NCJ 225325). U.S. Department of Justice, Office of Justice Programs. <https://www.ojp.gov/library/publications/fingerprint-sourcebook-chapter-5-systems-friction-ridge-classification>
- Idaho State Police. (2025). *Latent Prints Analytical Methods, Revision 16*. Retrieved from <https://isp.idaho.gov/wp-content/uploads/Forensics/currentAMs/Latent%20and%20Impression/Latent-Prints-Analytical-Methods-Rev-16.pdf>
- Illinois State Police. (2024). *Latent Prints Procedures Manual (Version 2024.01.16)*. Illinois State Police. Retrieved from Illinois State Police Forensic Services Manuals.
- Merlo, A. B. M. (2023). A comparison of the natural and groomed fingermark lipid composition.

- Forensic Science International*, 347, 110406. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2023.110406>
- MEL Science. (n.d.). “Fluorescence of fluorescein” experiment. <https://melscience.com/BD-en/articles/fluorescence-fluorescein-experiment/>
- Nandakumar, K., & Jain, A. K. (2010). *Fingerprint matching [PDF]*. Biometrics Research Group, Michigan State University. Retrieved from https://biometrics.cse.msu.edu/Publications/Fingerprint/JainFpMatching_IEEEComp10.pdf
- National Institute of Justice. (2011). *Fingerprint Sourcebook*. U.S. Department of Justice. Retrieved from <https://nij.ojp.gov/library/publications/fingerprint-sourcebook>
- Öztürk, S., & Tezcan, F. (2022). Fluorescence spectroscopy and its applications: A review. *Molecules*, 27(15), 4801. <https://doi.org/10.3390/molecules27154801>
- Palm Reading Perspectives. (2011). The F.B.I. fingerprint types vary significant among ethnic populations! <https://palmreadingperspectives.wordpress.com/2011/06/03/the-f-b-i-fingerprint-types-vary-significant-among-ethnic-populations/>
- Powers Scientific, Inc. (n.d.). *Fingerprint detection with ninhydrin*. Retrieved from <https://powersscientific.com/fingerprint-detection-with-ninhydrin/>
- Singh, A., Hou, W.-C., Lin, T.-F., & Zepp, R. G. (2019). Roles of silver–chloride complexations in sunlight-driven formation of silver nanoparticles. *Environmental Science & Technology*, 53(19), 11162–11169. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02115>
- Singh, A., Hou, W.-C., Lin, T.-F., & Zepp, R. G. (2023). Fingerprint recognition in forensic scenarios. *Forensic Science International: Digital Investigation*, 44, 301567. <https://doi.org/10.1016/j.fsidi.2023.301567>
- Sodhi, G. S., & Kaur, J. (1999). Chemical methods for developing latent fingerprints. *Journal of Chemical Education*, 76(4), 488. <https://doi.org/10.1021/ed076p488>
- Straughan, B. P., & Walker, S. (1980). Fluorescence and phosphorescence spectroscopy. In *Spectroscopy* (pp. 161–198). Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-5741-1_5
- Wikipedia. (n.d.). Fingerprint: Fingerprint verification. In *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Fingerprint>
- Zeiss Campus. (n.d.). Fluorescence: The basics. *Zeiss Campus*. <https://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/basics/fluorescence.html>