

當藝術遇見化學：鑲嵌玻璃與化學的激盪

張明娟^{1,2,*}、許文英^{3,4,*}

¹ 國立武陵高級中學

² 教育部高中化學學科中心

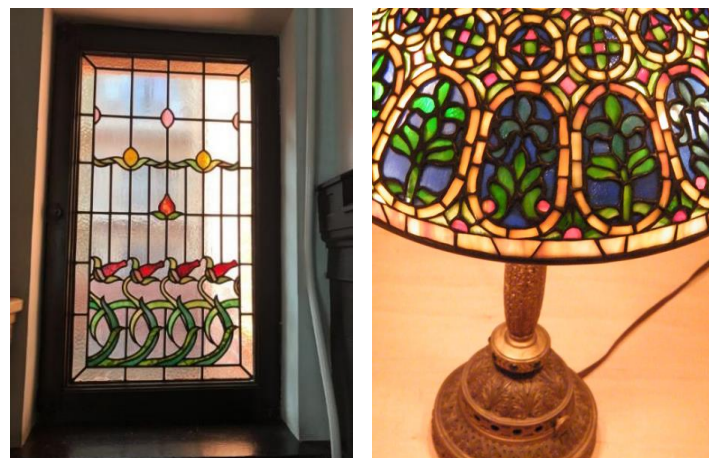
³ 新北市立明志國民中學

⁴ 臺灣工藝發展協會

¹bcat1764@gmail.com; ³wen07798@yahoo.com.tw

■ 鑲嵌玻璃

鑲嵌玻璃 (Stained glass) 是指以彩色玻璃作為材料或從事其創作的藝術¹，是從羅馬帝國時代就開始流傳的彩色鑲拼窗戶形式，特別是在早期歐洲的教堂容易看見。² 鑲嵌玻璃在製作的程序上，要先把各種顏色的玻璃依照設計圖樣切割好，再用鉛 (熱膨脹係數³ $\alpha: 29.3$ ，避免壓損玻璃) 為主要材料做成 H 型的長條，彎成所需形狀拼接圖案。傳統上，製成平板並用作窗戶的玻璃面積大，承受的重量大，因此會使用 H 型鉛條、U 型鉛條或 U 型鋅框固定 (鋅框較硬、價格高、大件作品較堅固) 再點焊接縫處，例如日本神戶風見雞館窗戶，如圖一左所示；檯燈罩則因為面積小，組合的片數多，因此使用銅箔包覆緊密後，並在燈模上組合焊接，用錫焊接，焊接外面後脫模，再焊接裡面，修整後，才能完工。因此，鑲嵌玻璃的特色就在於每一塊彩色玻璃的周圍都有條紋勾邊的特殊效果。現代鑲嵌玻璃藝術家的創作也包括三維結構和雕塑，最著名的例子就是由路易斯·康福特·蒂芙尼所創作的“威尼斯”檯燈⁴，如圖一右所示。



圖一：日本神戶風見雞館窗戶 (左)，蒂芙尼工作室“威尼斯”檯燈 (右)

■ 鑲嵌玻璃創作

鑲嵌玻璃製作的技術性難度很高，所使用的工具與材料也相對多，茲就製作“小夜燈”鑲嵌玻璃所需用到的工具與材料分述如下：

- 一、選擇欲使用各種彩色玻璃的材料，如圖二所示。



彩色玻璃材料

圖二：彩色玻璃的材料

二、玻璃切割工具：切割刀、速剪鉗、曲嘴剪鉗、馬賽克剪鉗、塑膠製速剪鉗、角尺壓尺、清潔刷、銅箔、銅箔壓磨棒、銅箔用紙樣剪刀、以及焊錫，如圖三、圖四所示。



玻璃切割工具

圖三：玻璃切割工具



銅箔
銅箔壓磨棒
銅箔用紙樣剪刀
焊錫

圖四：製作鑲嵌玻璃包覆玻璃的銅箔、銅箔壓磨棒、剪透明片用的銅箔用紙樣剪刀與焊接用的焊錫

三、鑲嵌玻璃製作輔助用品和清潔用品：助焊劑、染黑劑、防汙油、除汙去霉油、以及玻璃切割油，如圖五所示。



鑲嵌玻璃製作
輔助的用品

除汙去霉油 防汙油 染黑劑 助焊劑 玻璃切割油

圖五：鑲嵌玻璃製作輔助的用品

四、鑲嵌玻璃焊接工具和配備：烙鐵及烙鐵架、焊槍、鋼絲絨、電源控溫器、玻璃研磨機和清潔用品，如圖六所示。

圖六：鑲嵌玻璃焊接工具配備及清潔用品
(左)·玻璃研磨機(右)



的玻璃邊沿 (右)

4. 排列各小塊研磨好的彩色玻璃，確認組合起來是否完整，如圖十所示。



圖十：組合各小塊研磨好的彩色玻璃

5. 用銅箔，包住各小塊的玻璃邊沿，並用銅箔壓磨棒壓磨銅箔的表面，使銅箔與玻璃緊密黏合平整，以利焊接，如圖十一所示。



圖十一：包銅箔

6. 先用膠帶略為固定組合好的玻璃片，用筆刷塗助焊劑，在沒有膠帶的位置，再將烙鐵和焊錫，用點焊的方式先固定位置，然後撕去膠帶，再仔細焊接各小塊玻璃。正反兩面都需要焊接，組合完成“小夜燈”鑲嵌玻璃的圖案，如圖十二左所示。在鑲嵌玻璃作品的背面，找到適合的位置並做記號，焊接燈座的夾鐵，如圖十二右所示。



圖十二：焊接組合鑲嵌玻璃的圖案 (左)，在背面焊接燈座的夾鐵 (右)

7. 用牙刷、清潔劑和水，清洗作品後並擦拭乾淨，將燈座套上夾鐵，測試作品，如圖十三所示。



圖十三：清洗後的鑲嵌玻璃作品

- 先取下燈座，用筆刷塗染黑劑，使焊接處變黑，待乾後，再用牙刷和清水洗淨玻璃上的染黑劑，並擦拭晾乾。如圖十四所示。



圖十四：用筆刷塗染黑劑，使焊接處變黑

- 用棉花棒沾除污防霉油，擦拭染黑處及清潔玻璃上殘留的染黑劑，待乾後，用乾的海綿沾少許防污油擦拭染黑處及玻璃表面。即完成“小夜燈”鑲嵌玻璃的作品，如圖十五所示。



圖十五：塗抹除污去霉油和防污油後，即完成作品

■ 作者的鑲嵌玻璃其他作品

第二位作者的鑲嵌玻璃創作作品，如圖十六所示。



圖十六：花開富貴鏡子（左上）、角落燈（右上）、花車（右下）、寶貝相框（左下）

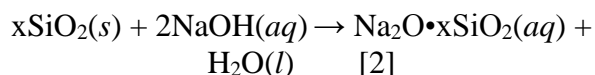
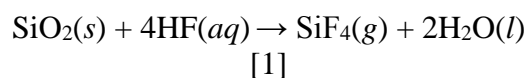
■ 鑲嵌玻璃涉及的化學原理

（一）玻璃的理化性質與用途

從外觀上看玻璃是固體，其實它的 X 射線繞射圖卻與液體相似，各分子因迅速冷卻（過冷）而沒有足夠時間形成晶體，使其凍結在液態的排列狀態。雖然在短距離內呈現有次序的排列，但長距離則不具有規則性的結構，因此玻璃是一種非晶形固體。

一般而言，玻璃是透明、脆性、不透氣、並具有一定硬度的材料。最常見的玻璃是鈉鈣玻璃，包括 75% 的二氧化矽（ SiO_2 ）、由碳酸鈉中製備的氧化鈉（ Na_2O ）和氧化鈣（ CaO ）、及其他添加物。在日常環境中玻

璃呈化學惰性，亦不會與大多數物質起作用。玻璃一般不溶於酸，但氫氟酸例外，其反應如式[1]所示。利用此反應可進行玻璃蝕刻，創作出屬於自己的作品⁵；玻璃會溶於強鹼，例如：氫氧化鈉，其反應如式[2]所示。



玻璃具透明的特性，因此有許多不同的應用，其中一個主要應用就是作建築中的透光材料，一般是在牆上窗戶的開口安裝小片的玻璃（即玻璃窗）。若玻璃中加入金屬鹽類，其顏色會改變，玻璃本身也可以上色，因此可以用玻璃製作藝術品，包括本文所介

紹的鑲嵌玻璃。

(二) 彩色玻璃^{6, 7, 8}

從各種顏色的玻璃器皿到鑲嵌玻璃，均使用彩色玻璃。彩色玻璃通常添加著色劑使玻璃呈現色彩。著色劑能對投射到玻璃上的白光進行選擇性的吸收，因而改變透過玻璃光線的光譜組成，使玻璃顯示出各種顏色。

玻璃顯色的強弱與著色劑的種類和添加量有關，根據著色劑在玻璃中的狀態，可把著色劑分為離子著色劑和表面著色劑兩類，離子著色劑主要包括一些有色金屬氧化物和鹽類。利用離子著色劑可以控制玻璃的顏色，一些著色劑與對應玻璃的顏色之關係如表一所示。

表一：玻璃的金屬氧化物呈色表

玻璃著色劑	玻璃的顏色	玻璃著色劑	玻璃的顏色
氧化鐵	綠、棕	氧化銻	白色
氧化錳	深琥珀	氧化鈾	黃綠
氧化鈷	色、紫水晶	銅化合物	深藍、紅
氧化金	深藍	錫化合物	白色
硒化合物	寶石紅	錫化合物	黃色
錳鈷鐵	紅	鉛銻化合物	琥珀色
混合物	黑	碳氧化物	

彩色玻璃呈色的化學原理：當過渡金屬離子鍵結到一個或多個中性或帶負電的非金屬分子或離子（稱為“配位基”）時形成金屬錯合物而呈現顏色。當未形成配位共價鍵

時，所有的金屬離子的 d 軌域在能量上是相等的。一旦有配位基出現，有一些 d 軌域就會轉移到比未形成配位共價鍵時有更高的能量上，也有一些 d 軌域轉移到更低的能量上，造成能隙。這是因為它們的形狀不同，一些 d 軌域比其他軌域更接近配位基。電子可以通過吸收光子從較低能量的 d 軌域移動到較高能量的 d 軌域；吸收光的波長取決於能隙的大小。任何未被吸收的光線導使玻璃呈現互補的顏色。

(三) 玻璃的硬度與切割^{9, 10, 11}

在鑲嵌玻璃的製作過程中，會使用到玻璃切割刀進行不同形狀玻璃的切割，為什麼玻璃刀可以切割玻璃呢？原來玻璃刀尖上鑲有非常堅硬的物質—金剛石。金剛石俗稱鑽石，是碳元素常見的同素異形體之一。碳原子以 sp^3 的共價鍵相互結合，每一個碳原子周圍都同樣有 4 個碳原子與它鍵結，形成一個正四面體的幾何關係。當玻璃與金剛石相互摩擦時，因為玻璃的硬度較小，表面會出現刮痕。以致金剛石一碰到玻璃，馬上就把它劃出一條小溝，順著這條小溝，就可以把玻璃輕輕掰開。在礦物中，礦物硬度的劃分標準由礦物學者摩氏（Friedrich Mohs, 1773-1839）首創的，因此相對硬度也稱為摩氏硬度。摩氏硬度從 1 到 10 代表的礦物，分別是「1：滑石、2：石膏、3：方解石、4：螢石、5：磷灰石、6：正長石、7：石英、8：黃玉、9：剛玉、10：鑽石」。

(四) 鐳錫、助焊劑與銅箔^{12, 13, 14, 15}

在鑲嵌玻璃的整個製作過程中，點焊是最高技術，焊點的勻稱與否以及其粗糙或

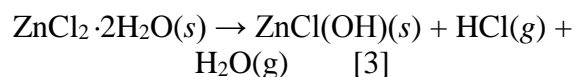
平滑影響整個作品的美觀，也影響整個作品的觀瞻與價值。在實用性方面，焊接工藝能幫助並促進焊接過程，同時具有保護作用、阻止再次氧化反應。

錫料通常為錫的合金，又稱錫錫 (solder)，在錫接的過程中被用來接合金屬零件，熔點需低於被焊物 (鉛條或銅箔) 的熔點。當錫料處在固相溫度與液相溫度之間時，會呈現固態粒子散布在液態金屬的膏狀。鑲嵌玻璃的焊料以前使用 60/40 錫/鉛的合金，由於鉛涉及健康問題，目前半導體行業已開發出“無鉛”的新型焊料，此成分包括：錫、銅、銀、鈹、銻、鋅、銻等等，而這些“無鉛”焊料也可應用於鑲嵌玻璃藝術。鉛的熔點為 327 C，錫的熔點是 232 C，而 60/40 焊料具有 160~170 C 更低的熔化溫度，錫鉛錫料從以往至今即被廣泛使用於軟焊接，尤其對手焊而言，是優良的材料。

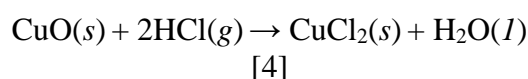
助焊劑 (Flux) (亦稱為助熔劑) 的主要作用是清除焊料和焊材表面的氧化物，使金屬表面達到必要的清潔度，它可以防止焊接時表面的再次氧化，降低焊料的表面張力，提高焊接性能。常用的助熔劑包括氯化銨、氯化鋅、松香及鹽酸。有鑑於日益嚴峻的空氣污染和有害廢棄物，因此電子產業逐漸揚棄松香，採用水溶性助焊劑，以降低鹼類溶劑用量。目前手錫操作通常是採用焊劑芯焊線。焊線至少內含一條與焊線等長的焊劑芯，當焊線融化時，助焊劑已成液態並釋放至焊接處。

助焊劑對銅箔有清潔和助焊的效果，其原理為：一般助焊劑裡的含水氯化鋅

($\text{ZnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 成分，在高溫下會形成氫氧氯化鋅 ($\text{ZnCl}(\text{OH})$) 和氯化氫，並釋放出水蒸氣，其反應如式[3]所示。



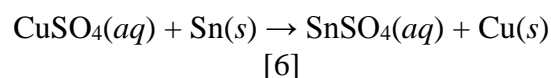
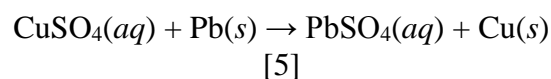
氯化氫和水蒸氣遇冷形成鹽酸，可除去銅箔表面的氧化物，其反應如[4]所示。



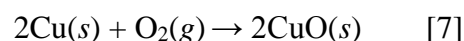
副產物氯化銅 (CuCl_2) 易溶於水，可輕易的清洗掉，使焊料可以黏合到銅金屬的表面上，達到焊接的目的。

(五) 染黑劑產生銅鏽^{16, 17}

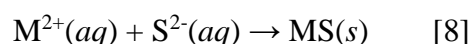
在焊接清洗後的銅箔，接下來要利用染黑劑 (black patina) 來染黑，使其邊框呈黑色，造成鑲嵌玻璃更為突出明顯。染色劑主要成分為硫酸銅 (CuSO_4)，與焊錫的成分進行氧化還原反應生成銅金屬，其反應如[5]和[6]所示。



薄薄的銅模會在高溫下，與氧化劑反應生成黑色的氧化銅，其反應如[7]所示。

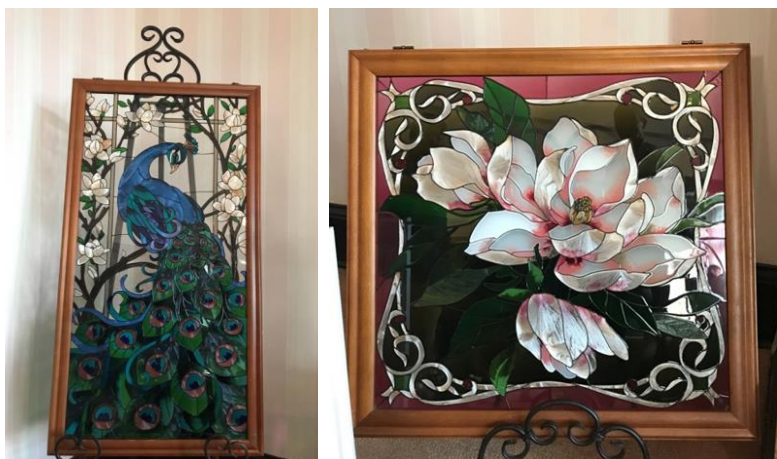


通常染黑劑含有硫化物，使其與鉛、錫、銅等金屬離子生成黑色的硫化金屬化合物，其反應如[8]所示。染黑後的金屬邊框可以使色調更為一致，並防止銅箔或焊料再氧化進而延長鑲嵌玻璃的色彩與美觀。



■ 結語

根據十二年國民基本教育課程綱要總綱¹⁸：「U-B3 具備藝術感知、欣賞、創作與鑑賞的能力，體會藝術創作與社會、歷史、文化之間的互動關係，透過生活美學的涵養，對美善的人事物，進行賞析、建構與分享」。藉由這次鑲嵌玻璃的創作與文獻探討，讓我們對化學與工藝的結合有更進一步的了解與認識，同時讓我們知道原本生活中遇到的美麗藝術品，它們生成的原理、方法與背後的歷史演變歷程，對自己所屬的生活世界有更新的體悟。圖三和圖四是在日本神戶風見雞館（別名舊湯瑪斯館，由德國貿易商人 G·托馬斯建於日本明治 42 年（1909 年），是神戶異人館的代表性建築。）所拍攝的鑲嵌玻璃照片，當初拍攝的時候只覺得很美很具異國風，透過這次化學教師與工藝教師的合作，原來化學除了理性之外更可加入藝術的鑑賞，對這鑲嵌玻璃的工藝創作，分享她的美與善。



圖十六：日本神戶風見雞館孔雀鑲嵌玻璃藝術品

■ 參考資料

1. Stained glass, https://en.wikipedia.org/wiki/Stained_glass .
2. 鑲嵌玻璃，<http://nrch.culture.tw/twpedia.aspx?id=7327> 。
3. 熱膨脹係數，<https://zh.wikipedia.org/wiki/熱膨脹係數> 。
4. Louis Comfort Tiffany, https://en.wikipedia.org/wiki/Louis_Comfort_Tiffany .
5. 彩色玻璃的製作，<http://glassmuseum.moc.gov.tw/web-tw/unit03/modepage/3-4-1-07.html> 。
6. 化學實驗室實驗：玻璃蝕刻與美感的結合 (Glass Etching with Beauty) [III]，<http://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=30615> 。
7. 玻璃，<http://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=2980> 。
8. The Chemistry of Coloured Glass, <http://www.compoundchem.com/2015/03/03/coloured-glass/> 。
9. 為什麼玻璃刀可以切割玻璃？
http://tc.wangchao.net.cn/xinxi/detail_1231447.html 。
10. 摩氏硬度，<https://zh.wikipedia.org/wiki/摩氏硬度> 。
11. 了不起的結晶—金剛石，<https://scitechvista.nat.gov.tw/c/vpah.htm> 。
12. 錫料，<https://zh.wikipedia.org/wiki/錫料> 。
13. Solder,

<https://en.wikipedia.org/wiki/Solder>.

14. Stained Glass Art,
https://engineering.purdue.edu/MSE/about_us/gotmaterials/Art/segvich.html.
15. Solder Information,
http://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/welding_equipment_supplies/solder.
16. Make your own Copper Patina for Lead and Solder,
<https://chatterglass.wordpress.com/2014/02/16/make-your-own-copper-patina-for-lead-and-solder/>.
17. Artistic Chemistry: A Beautiful Collaboration,
<https://www.acs.org/content/dam/acsorg/education/resources/highschool/chemmatters/archive/chemistry-on-a-country-road-cm-april-2012.pdf>.
18. 十二年國民基本教育課程綱要總綱發布版。
<https://www.naer.edu.tw/files/15-1000-7944,c639-1.php?Lang=zh-tw> °