

彰化縣 109 學年度國民中小學學生獨立研究作品徵選
作品說明書（封面）

作品編號：

組別：
 國小組 數學類
 國中組 自然與生活科技類
 人文社會類

作品名稱：彩虹現形記-利用偏光片檢測物品殘留應力



第一階段 研究訓練階段

一、近兩年學校獨立研究課程之規劃：

本校一直將獨立研究課程視為資優教育的核心主軸，並配合學習內容及教師的逐步引導引發學生自主學習、尋找主題、設計研究與結果探討。課程中更針對新興議題或新近時事加以解析，藉此引入社會性科學議題，促使資優生對於人文環境等生活議題有所涉略。為積極鼓勵學子參與獨立研究，本校訓練及規劃大致如下：

(一) 成立資優討論室：

為鼓勵資優學生積極投入獨立研究及科展，特設立專屬研究場域，內有電腦、印表機、單槍及各類相關書籍，使資優學生能有獨立的空間進行資料查詢、小組討論、發表演練及簡易實驗。

(二) 每學期辦理資優教育講座：

辦理不同內容（科學、生態、數學、語文、情意）的資優教育講座，透過講座與學子的對話論述，逐步激盪並孕育多元多樣的創意思維。

(三) 辦理資優教育外埠參觀：

輔導室每學期規劃一至二次的資優班校外教學參觀活動，參訪內容包含國立公共資訊圖書館、台中科博館、彰師大科教中心、科學縣賽展示場，並積極參與鄰近高中的資優班、科學班之成果發表會。期盼透過辦理資優參訪活動，強化資優學生資源運用能力並增廣見聞，以期貯備後續科研與創作的能量。

(四) 辦理教師增能研習：

輔導室每學年定期辦理資優教育增能研習，邀請於獨立研究指導領域的學者專家，或是具有豐碩實務經驗的教師蒞校分享引導方式與心路歷程。期盼藉由教師的持續增能，拓展師生研究嗅覺的廣泛觸角與細微的觀察能力，以不同的視野探究面臨的科研問題，方能在研究過程中涵蘊學子自發、互動、共好的能量。

二、學校如何提供該生獨立研究訓練

(一) 辦理獨立研究說明會：

每年辦理獨立研究說明會，讓學生能瞭解獨立研究的過程及方法，包含如何找研究題目、尋找指導老師、文獻閱讀與探討、各種科研方法的介紹、報告內容的撰寫與行文架構的安排等。此外，更建置獨立研究網站，提供指導老師與學生交流互動的契機。

(二) 辦理複審說明會、模擬複審訓練：

針對進入獨立研究複審的組別辦理複審說明會，指導學生如何製作簡報並提醒複審的相關事項；此外，更邀請校內各科具豐富經驗的老師們一同為學生做模擬複審，從報告台風、口條流暢乃至研究架構的邏輯性等，逐一進行問答訓練。

(三) 辦理資優班週會：

每學期辦理資優班週會，請資優班同學發表學習成果，藉此促使學生反覆演練口條能力與簡報技巧，更在開放問答的過程中逐步養成學生的獨立思考、分析能力與善意眼神。

(四) 辦理獨立研究成果發表會：

邀請去年獲獎的組別分享心路歷程與心得省思，藉由理性的分析與感性的表述，提升校內學生參與獨立研究的興趣與意願，讓有志一同的夥伴得以在歷程中相互扶持、良性批判與問題解決。

透過上述措施的持續推動與滾動修正，本校資優學生參與獨立研究交件數量逐年增加且年年獲獎，時至今日已有相當豐碩的成果。

第二階段 獨立研究階段

壹、研究動機

小時候，家人常帶著我到處探索，其中最讓我嘆為觀止的就是國立自然科學博物館中的立體電影，只要戴上一副薄薄的 3D 眼鏡，就能感受到身歷其境的視覺效果，在我心中，3D 眼鏡是具有魔法的寶物，我總是捨不得將它丟棄，小心翼翼的保存起來。在國小自然與生活科技課程中，我學習到「光的反射與折射」，在國中自然科學課堂上認識了「光波的特性」，好奇心的驅使，使我進一步拿出壓箱寶——「3D 眼鏡」來一探究竟，瞭解偏光片能偏振光線，為了做實驗及勞作，我還特地向國立自然科學博物館人員索取約 300 支即將被丟棄的 3D 眼鏡。



在網路搜尋相關資料時，發現偏光片還能用來觀察「透明塑膠的彩虹」，但只能透過 3D 眼鏡小小的偏光片進行觀察，實在滿足不了我的「實驗魂」。

塑膠良好的延展性與可塑性，使其可以鑄造或擠壓成各種形狀的產品，已成為現今生活不可或缺的一部分，因此塑膠製品的品質越來越受到關注與要求，塑膠製品的損壞，有時是使用方式不當導致，有時是因塑膠製品的某些部分容易斷裂。

以上種種正是引發我們思考能否透過偏光片得知塑膠製品的品質，避免過度使用脆弱之處，延長塑膠製品使用壽命，以達到環保的目的。

貳、擬定正式計畫、研究問題及工作進度表

一、擬定正式計畫

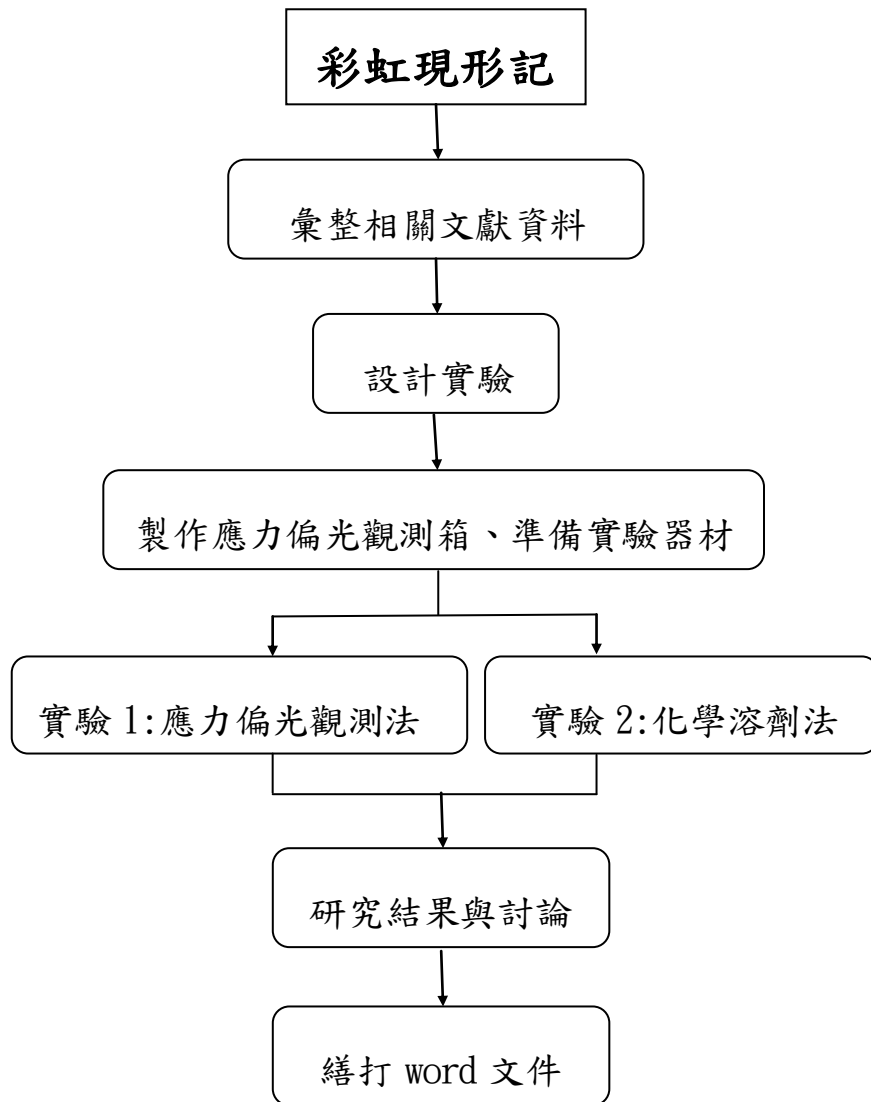


圖 1：研究計畫架構圖

二、研究問題

- (一)了解塑膠製品殘留應力分布
- (二)了解塑膠製品殘留應力分布與脆弱處的關聯性
- (三)分析塑膠製品之品質
- (四)選擇較耐用之塑膠製品

三、工作進度表

	6/06	6/13	6/20	6/27	7/04	7/11	7/18	7/25	8/01	8/08	8/15	8/22
	6/12	6/19	6/26	7/03	7/10	7/17	7/24	7/31	8/07	8/14	8/21	8/28
發掘問題												
確定研究主題												
初步構思												
彙整相關文獻												
設計實驗												
準備實驗器材												
進行實驗												
研究結果與討論												
評鑑與檢討												
撰寫研究報告												

參、彙整相關文獻

一、塑膠製品品質不良之因

造成塑膠製品品質不良的原因有很多，諸如：加熱塑膠時間過久、加熱後將溶化塑膠注入模具的「射出機」轉速太快、融化的塑膠注入

模具前乾燥不完全，以及成型後的塑膠物品「存在殘留應力」……等。因我們無法參與塑膠製品的製程，本研究主要探討的是成型後塑膠物品「存在殘留應力」對品質之影響。

二、殘留應力

在製造過程之壓製或熱處理時，因受力不均、溫度不均、冷卻過程不均、分子密度不一……等，讓分子之間產生殘留應力，會影響成品之尺寸安定性、機械強度、光學特性，以及耐化性、耐候性及耐環境應力性，造成成品翹曲嚴重……等，對後續加工(如表面電鍍、塗裝、接著……等)容易造成不良影響，光學玻璃中的殘留應力，會使儀器成像質量下降。

三、測量殘留應力的方法

測量塑膠物品殘留應力的方法有「應力偏光觀測法」、「化學溶劑法」、「鑽洞法」、「削層法」、「削層曲度量測法」、「壓電光譜法」……等，本研究採用「應力偏光觀測法」與「化學溶劑法」進行實驗。

大多塑膠與玻璃製品，具有「雙折射」性質，使得通過第一個偏光片的偏極光在通過塑膠時，分解為二道快慢差異的光線。而經過「雙折射」的偏極光，進而造成「環型偏光」，通過第二個偏光片時，偏振光的過濾作用，只讓某一特定的偏極光通過，因此我們只能看到特定顏色的光。由於「雙折射」的折射程度，和塑膠材質的密度、厚度、分子排列等等的微小差異有關，因此塑膠材質只要有彎曲或形狀變化，就很容易顯示出這種特性，進而形成彩虹的現象(如圖 2、圖 3)。

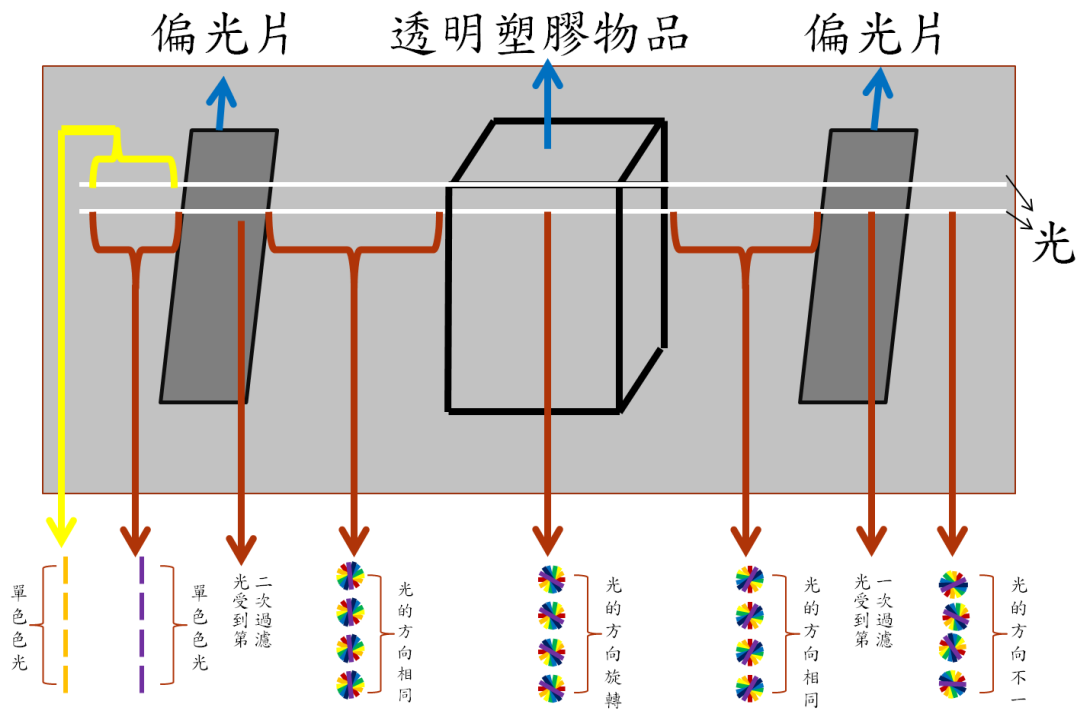


圖 2：應力偏光觀測原理示意圖

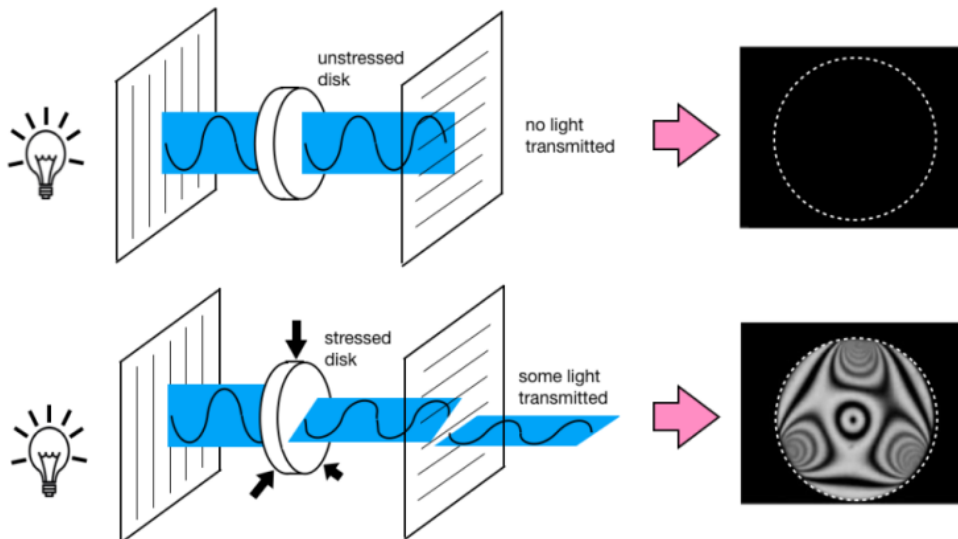


圖 3：有無殘留應力物品之比較圖

為何產生彩虹?當兩道偏極光交會成環型偏光時，旋轉的光會再被第二片偏光片過濾，顯現出被攔截光之互補色，產生顏色、明暗相間的彩虹。

$$n_1 - n_0 = C_1 \sigma_1 + C_2 (\sigma_2 + \sigma_3) \dots\dots (A1)$$

$$n_2 - n_0 = C_1 \sigma_2 + C_2 (\sigma_3 + \sigma_1) \dots\dots (A2)$$

$$n_3 - n_0 = C_1 \sigma_3 + C_2 (\sigma_1 + \sigma_2) \dots\dots (A3)$$

n_0 為材料於無應力狀態下的折射率

n_1 至 n_3 為光在三個軸向的折射率

C_1 與 C_2 為應力存在係數

σ 為角度

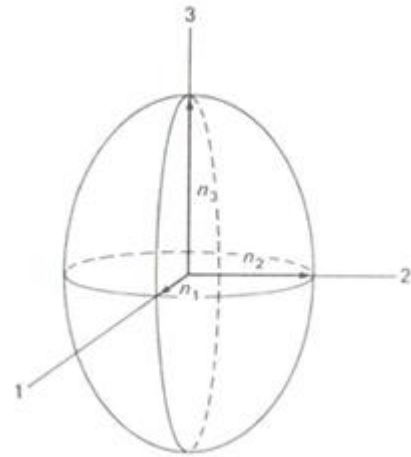


圖 4：空間座標方向與對折射率

因此，簡化為二維平面應力狀態可將 (A1)、(A2) 式寫為：

$$n_2 - n_1 = (C_2 - C_1) (\sigma_1 - \sigma_2) \dots\dots (B)$$

由 (B) 式可知當光波在兩光軸方向產生延遲 (相位差) 時，就會產生建設性干涉或破壞性干涉的現象。

當塑膠有較高的殘留應力時，溶劑會去攻擊較高應力部位而觸發應力破裂或應力泛白現象，所以某些塑膠可以浸泡適合的化學溶劑來分析成型應力或殘留應力的程度。

表 1 測試殘留應力之化學溶劑法

材料名稱	測試應力方法
PMMA	製品使用酒精:水=9:1 溶液中浸泡 15 分鐘後取出，放置 1 小時後觀察製品，若製品有開裂現象即表示有應力存在。
PC	將 PC 製品浸入四氯化碳(CCl4)溶液中，以製品發生開裂破壞所需的時間來判斷應力的大小，時間越長則應力越小；如果浸泡 5~15 秒就發生開裂，說明應力很大；如果浸泡 1~2 分鐘不出現裂紋，則應力較小。

POM	將 POM 製品經過熱處理後，放入 30%鹽酸(HCl)溶液中浸泡 30 分鐘，若沒有出現裂紋，則製品中殘存的內應力較小。
ABS	將 ABS 製品浸泡在 10%冰醋酸中，5~15 秒內出現裂紋，則製品內應力較大；若浸泡 2 分鐘後無裂紋出現，則製品內應力較小。
PA	PA 塑料製品消除應力方式，較小部件可在沸水中泡煮約 2 小時；尺寸較大部件應採用懸掛式，在蒸氣室內保持吸溼至水分平衡。
HDPE	在約 80°C 溫度下，使用 2%的洗滌劑水溶液處理。
PP	在約 80°C 溫度下，使用 63%(重量百分比)的三氧化鉻與水的混合物處理。
PS	在室溫下使用煤油處理。

本實驗使用化學溶劑法測試 PMMA 及 ABS 製品之殘留應力，PMMA (聚甲基丙烯酸甲酯($C_5O_2H_8$) $_n$ ，俗稱壓克力) 製品使用酒精浸泡後，若製品有開裂現象，即表示有應力存在。

ABS(丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物($C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N$) $_n$ ，俗稱樹脂) 因含有 Butadien(丁二烯)橡膠質成份，可利用冰醋酸溶液浸泡方式觀測具有高殘留應力區域會發生應力泛白現象。

四、名詞解釋

(一)雙折 射：「雙折射」是某些物品的特質，當光穿過這些物體時，會分成兩條快慢、方向不一的光線，稱為「雙折射」(如圖 5)。

(二)環型偏光：在光線進入物體產生雙折射後，兩條快慢、方向不一的光線，以光波的頻率進行旋轉動作進而產生「環型偏光」(如圖 6)。

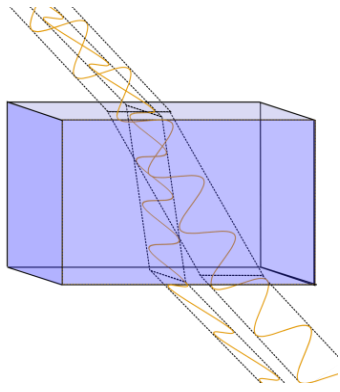


圖 5：雙折射示意圖

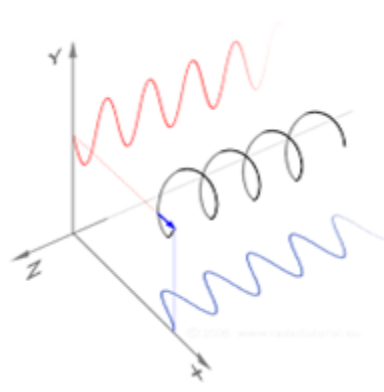

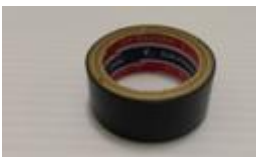
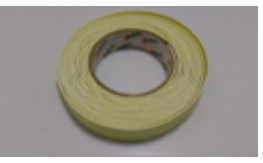
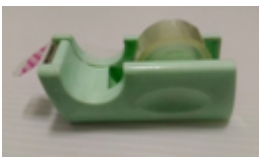




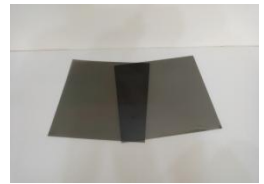





圖 6：環型偏光示意圖

肆、資料分析

一、研究器材

			
圖 7：剪刀	圖 8：電線膠帶	圖 9：海綿膠帶	圖 10： 透明膠帶
			
圖 11： 玻璃容器	圖 12：量杯	圖 13：紙箱	圖 14： LED 白光燈管
			
圖 15： 25×25 cm 45 度偏光片	圖 16：冰醋酸	圖 17：95%酒精	圖 18： 100%檸檬原汁

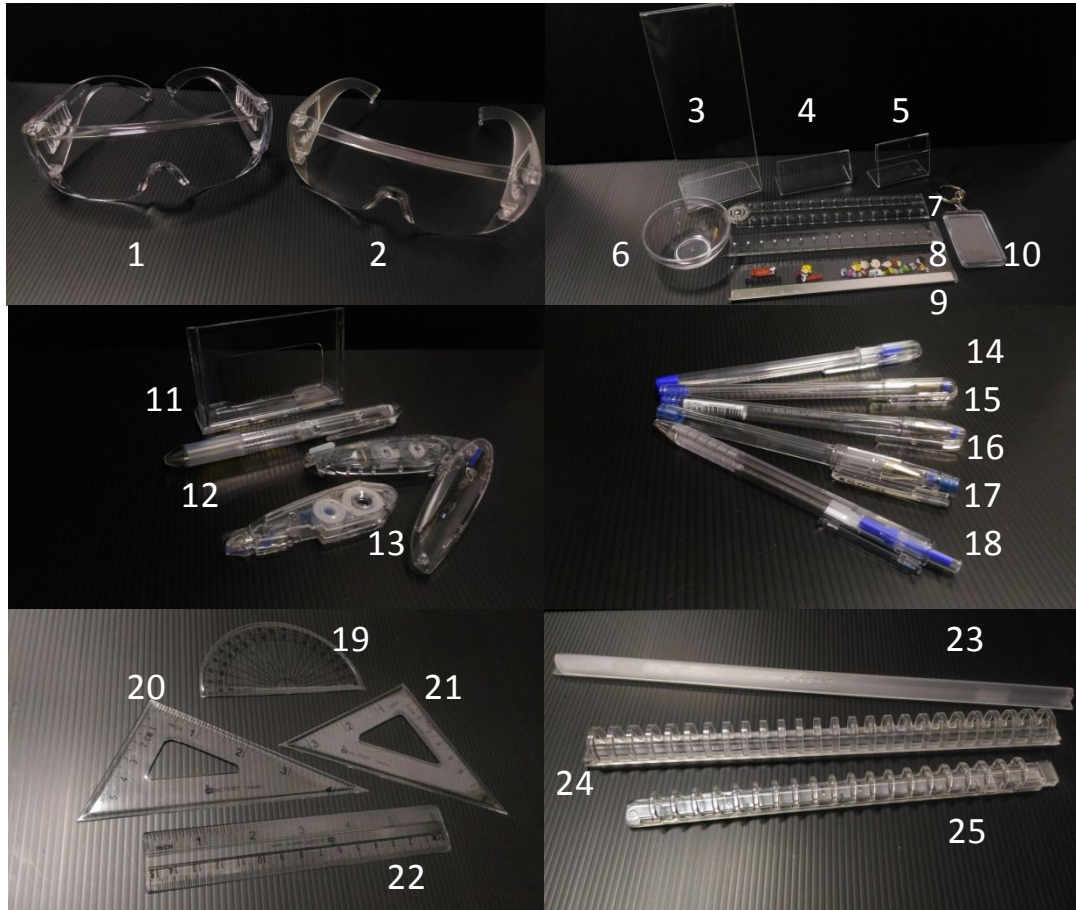


圖 19：待測塑膠物品

表 2：待測塑膠物品材質分類表

塑膠材質	待測塑膠物品編號
PC(聚碳酸酯)	1、2
PS(聚苯乙烯)	11、19、20、21、22
ABS(樹脂)	12、14、15、17、23、24、25
PMMA(壓克力)	3、4、5、6、7、8、9、10
未分類塑膠	13、16、18

二、自製應力偏光觀測箱(材料:紙箱、LED 白光燈管、45 度偏光片)

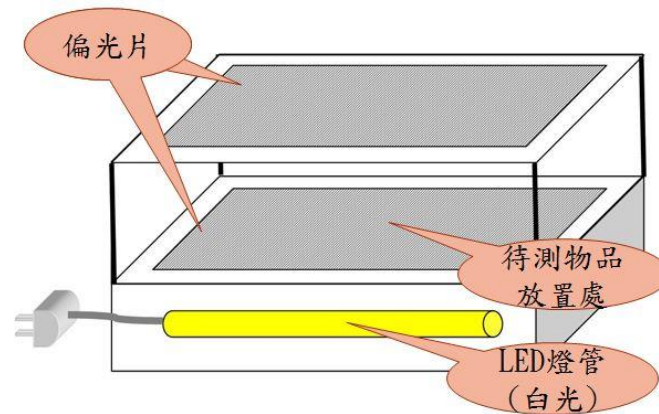


圖 20：自製應力偏光觀測箱裝置示意圖

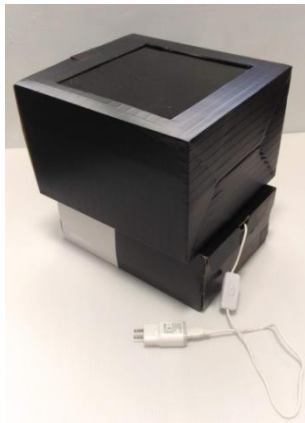


圖 21：觀測箱外觀



圖 22：觀測箱上層



圖 23：觀測箱下層

三、研究方法

實驗(一) 應力偏光觀測法：

將物品平放在底部偏光片上，鏡頭平貼在頂部偏光片上攝影。

觀測結果：

【PC(聚碳酸酯)】



圖 24：A 牌護目鏡



圖 25：B 牌護目鏡

【PS(聚苯乙烯)】

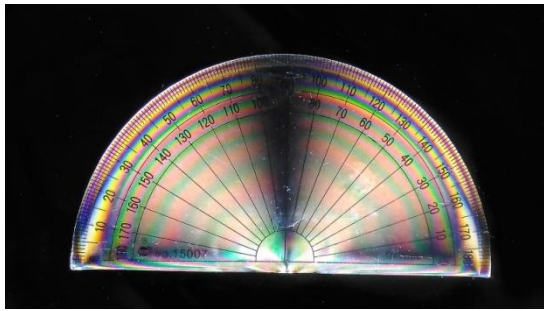


圖 256 量角器

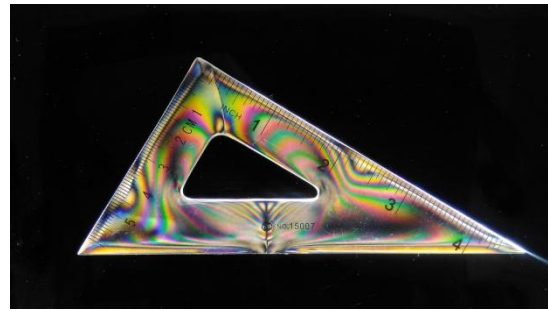


圖 27：三角板-1

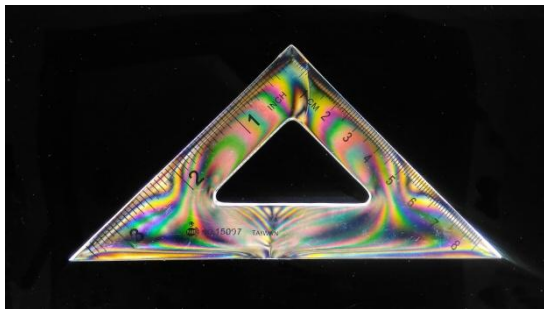


圖 28：三角板-2

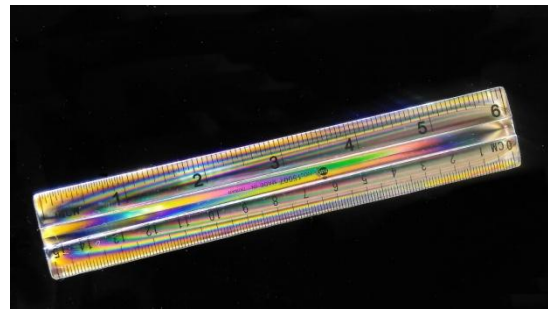


圖 29：直尺

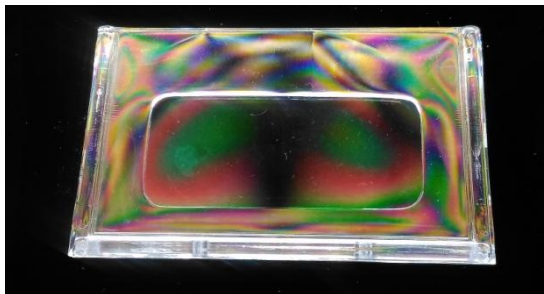


圖 30：PS 標示牌

【ABS (樹脂)】

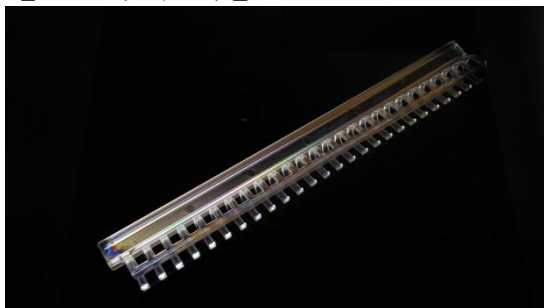


圖 31：拉拉夾



圖 32：文件桿



圖 33：A5 透明夾



圖 34：四色筆筆身



圖 35：ABS 筆-1



圖 36：ABS 筆-2



圖 37：ABS 筆-3

【PMMA(壓克力)】



圖 38：敷臉碗



圖 39：鑰匙圈



圖 40：PMMA 標示牌-1

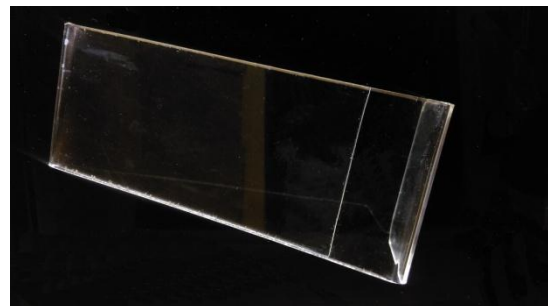


圖 41：PMMA 標示牌-2

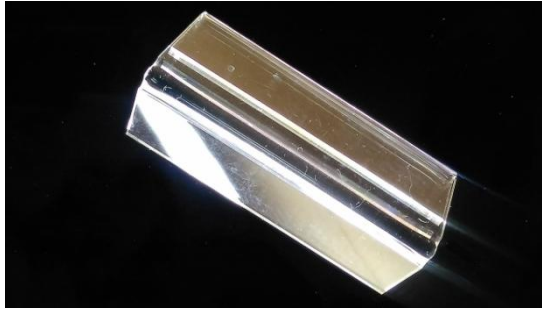


圖 42：PMMA 標示牌 3



圖 43：PMMA 直尺-1



圖 44：PMMA 直尺-2

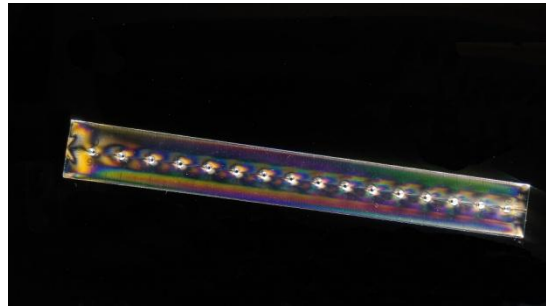


圖 45：PMMA 直尺-3

【未分類塑膠】



圖 46：原子筆-1



圖 47：原子筆-2



圖 48：立可帶外殼

分析：

PC(聚碳酸酯)、PS(聚苯乙烯)及未分類塑膠的彩虹條紋較為明顯，ABS(樹脂)的彩虹條紋較不明顯，最特別的是 PMMA(壓克力)彩虹條紋個別差異大，有的很明顯，有的幾乎沒有。

凡是轉角處、打洞處、邊緣處(方型>圓弧型)、厚度差異較大處、刮痕及澆口處，比較容易出現密集的彩虹；有些彩虹的形狀會依塑膠製品的形狀而有規則的變化。觀測圖 42、圖 44 之直尺，發現一整排的孔洞周圍的彩虹排列非常相似，表示其殘留應力相同。

實驗(二) 化學溶劑法：

1. PMMA(壓克力)製品使用酒精：水=9：1 溶液中浸泡 15 分鐘後取出，放置 1 小時後觀察製品，若製品有開裂現象，即表示有應力存在。
2. ABS(樹脂)製品利用 10%冰醋酸浸泡 5~15 秒內出現泛白或裂紋現象，則製品內應力較大；若浸泡 2 分鐘後無泛白或裂紋現象出現，則製品內應力較小。

觀測結果：

【PMMA (壓克力)】



圖 49：PMMA 以酒精浸泡

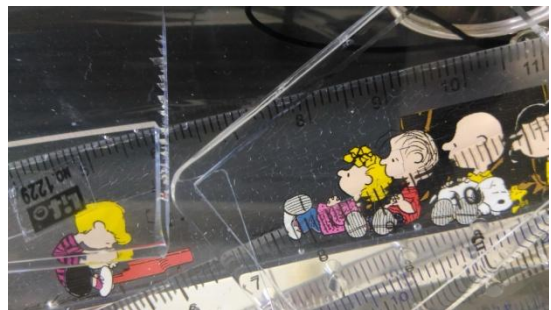


圖 50：PMMA 直尺出現網狀裂痕



圖 51：PMMA 直尺表面霧化



圖 52：PMMA 標示牌邊緣出現直條裂痕

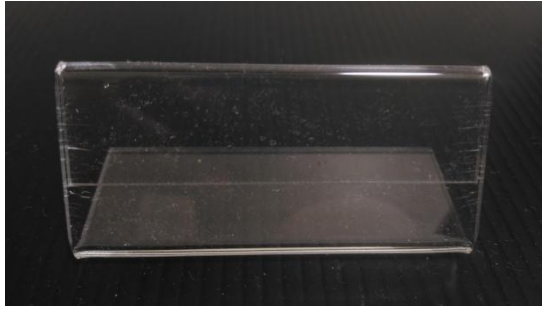


圖 53：PMMA 標示牌邊緣
出現直條裂痕

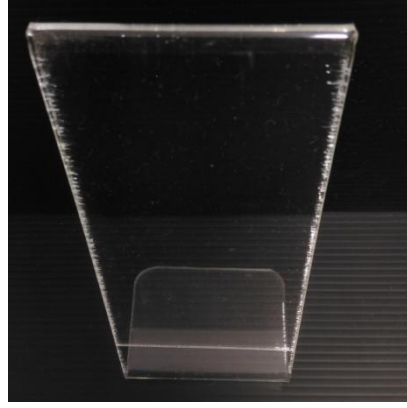


圖 54：PMMA 標示牌邊緣
出現直條裂痕

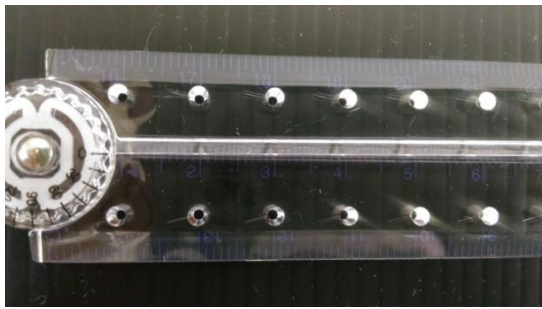


圖 55：PMMA 直尺孔洞
出現直條裂痕



圖 56：PMMA 直尺未出現裂痕



圖 57：PMMA 敷臉碗未出現裂痕



圖 58：PMMA 鑰匙圈未出現裂痕

【ABS (樹脂)】



圖 59：ABS 以冰醋酸浸泡



圖 60：ABS 以冰醋酸浸泡



圖 61：ABS 透明夾未出現泛白



圖 62：ABS 文件桿未出現泛白

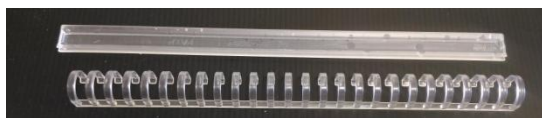


圖 63：ABS 拉拉夾小部分泛白

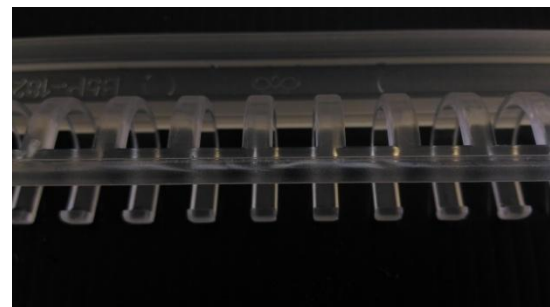


圖 64：ABS 拉拉夾泛白放大圖

我們突然想到曾經聽過「檸檬汁不能存放在塑膠瓶中」的說法，於是做了一個實驗，將 PMMA 及 ABS 材質以外的物品浸泡 100% 檸檬汁七天，觀測其變化。



圖 65：浸泡檸檬汁

分析：

PMMA(壓克力)製品浸泡酒精實驗結果								
製品名稱	敷臉碗	鑰匙圈	標示牌-1	標示牌-2	標示牌-3	PMMA直尺-1	PMMA直尺-2	PMMA直尺-3
有無開裂現象	×	×	○	○	○	○	○	×

在浸泡酒精的實驗中，8項塑膠製品中有5項出現開裂現象，3項則無，而且出現開裂現象之處與使用應力偏光觀測法的彩虹互相對應。圖51之PMMA直尺-2，外表看似泛白、霧化，在去除表面之圖案包膜後，發現製品本身也有開裂現象。觀測圖55之PMMA直尺-1，發現一整排孔洞周圍的裂痕形狀、方向一致，表示其殘留應力相同。實驗結果顯示三個標示牌開裂部位都集中於左右兩側裁切處，雖然利用應力偏光觀測法時的彩紅條紋不明顯，但經由化學溶劑法將PMMA板殘留應力蓄積較大處加以釋放，發現多條平行狀裂痕。

ABS(樹脂)製品浸泡冰醋酸實驗結果							
製品名稱	拉拉夾	文件桿	A5透明夾	四色筆筆身	ABS筆-1	ABS筆-2	ABS筆-3
有無泛白現象	○	×	×	×	×	×	×

在浸泡冰醋酸的實驗中，7項塑膠製品中有1項出現泛白現象，6項則無，而且出現泛白現象之處與使用應力偏光觀測法的彩虹互相對應。

塑膠製品浸泡檸檬汁實驗結果										
製品名稱	PC		PS					未分類塑膠		
	A牌 護目鏡	B牌 護目鏡	量角器	三角板-1	三角板-2	直尺	標示牌	原子筆-1	原子筆-2	立可帶外殼
有無開裂 泛白現象	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

在浸泡檸檬汁的實驗中，10項塑膠製品外觀皆無出現開裂、泛白或其他異狀，經搜尋相關資料，得知PS製品碰到柳橙原汁、檸檬汁、可樂等酸鹼值2到3的酸性液體，會溶解出苯乙烯，PC製品碰到檸檬汁等酸性液體則會釋出雙酚A，誤食皆會對人體產生不良影響。

伍、研究結果與討論

一、塑膠製品殘留應力分布

射出成型件內部的殘留應力一般會集中於澆口周邊，並散佈於成品的表面，澆口附近由於流速快、壓力高，容易出現較大的殘留應力，故設計澆口位置能夠有效控制殘留應力出現的區域與分布。此外，在成品的表面，由於溫度較低，材料於該處會呈現半凝固半融熔的狀態，分子間拉扯的現象較為頻繁，因此容易造成殘留應力的出現。

在應力偏光觀測法實驗中，證實轉角處、打洞處、邊緣處、厚度差異較大處、刮痕及澆口處，較易出現密集彩虹條紋，亦發現一整排的孔洞周圍的彩虹排列非常相似，表示一整排的孔洞，其製造過程中產生的殘留應力相同。

二、塑膠製品殘留應力分布與脆弱處的關聯性

在浸泡酒精與冰醋酸的實驗中，有6項出現開裂或泛白現象，將

出現開裂或泛白處與使用應力偏光觀測的彩虹條紋相互比對，發現位置關連性吻合。觀測圖 55 之 PMMA 直尺-1，發現一整排孔洞周圍的裂痕形狀、方向一致，表示其殘留應力相同。實驗結果顯示三個標示牌利用應力偏光觀測的彩虹條紋不明顯，但經由化學溶劑法卻產生多條平行狀裂痕，且開裂部位都集中於左右兩側裁切處，為了找出答案，我們特地去請教 PMMA 工廠的老闆，得知因 PMMA 製品的裁切處不透明，為了美觀，會以某些方法加工使之透明，包括烈焰處理(2000°C)、鑽石刀拋光……等，因此在過程中裁切處容易因溫度、壓力而產生殘留應力，驗證了實驗結果。

三、塑膠製品之品質

在對照「應力偏光觀測法」及「化學溶劑法」之結果後，發現兩種現象：

1. 應力偏光觀測法之彩虹較密集處與化學溶劑法之開裂或泛白處相互吻合，因此證明偏光觀測法之彩虹位置與殘留應力的位置有直接關係。
2. 發現兩件厚度相同、材質相同、彩虹分布相似的兩件物品，經化學溶劑法測試後，開裂及泛白現象差異很大，因此推測出同樣材質類型之塑膠也有優劣之分(例如：同為 PMMA 材質，品質也有所差異)。

四、選擇較耐用之塑膠製品

我們發現可以利用偏光片來觀測肉眼難以辨識的裂痕，也可以測量塑膠製品內的殘留應力來分析塑膠之品質，如果沒有偏光片也可以依以下原則來挑選較耐用的塑膠製品。

1. 無打洞的塑膠製品較不容易有殘留應力。
2. 塑膠製品之轉彎處角度越小，越不容易有殘留應力。
3. 塑膠製品的外型越圓弧，越不容易有殘留應力。

不過殘留應力並不是影響塑膠製品品質的唯一原因，其他原因包含塑料本身的品質……等。

我們利用科學博物館回收的 3D 眼鏡，製作方便攜帶及操作的觀測器(如圖 67)，只要是光線充足的地方就能觀測，能幫助消費者挑選較耐用的塑膠製品，以延長製品使用壽命，達到環保的目的。



圖 66：改造前後對照



圖 67：觀測器使用方式

陸、評鑑與檢討(上述每一階段的省思與收穫)

一、彙整相關文獻階段：

從文獻中得知測量塑膠物品殘留應力的方法有「應力偏光觀測法」、「化學溶劑法」、「鑽洞法」、「削層法」、「削層曲度量測法」、「壓電光譜法」……等，本研究在沒有精密儀器支援下，以自製的「應力偏光觀測箱」取代造價不菲的「應力偏光儀」，再選擇可利用「化學溶劑法」之待測物品進行實驗，例：檢測 PC 製品殘留應力之化學溶劑為四氯化碳(CCl_4)，而四氯化碳有劇毒性，因此 PC 之檢測不在此研究範圍。

二、準備研究器材階段：

市面上的透明塑膠物品較少，而且大部分物品材質標示不清，例如只標示「塑料」，另外，待測物品受限於「自製應力偏光觀測箱」的尺寸大小，以上原因造成蒐集待測物品的困難，但是，多跑幾家店面，總是會有意想不到的收穫。

在本研究中的兩項實驗:應力偏光觀測法與化學溶劑法，因兩項實驗中，待測物品之條件不一，可同時適用兩項實驗的項目因此大幅減少，例：應力偏光觀測法之條件為待測物品需為透明材質，化學溶劑法之條件為待測物品材質需為 PMMA 或 ABS，要符合兩種條件之物品數量不多。

三、實驗階段：

透明塑膠物品會反光，造成拍攝不易，在應力偏光觀測過程中，經過了好幾次的調整與測試，我們總算抓到訣竅，拍攝觀測箱中的物品，不僅要避開 LED 燈管的直接照射，還要將鏡頭貼緊偏光片，才能拍出清晰的照片。

在第一次進行化學溶劑法時，因找不到 90%的酒精，而拿 75%的酒精代替，因此塑膠開裂及泛白效果不佳；在使用冰醋酸時未稀釋至 10%，造成塑膠製品全處泛白，無法比較品質優劣。因此我們決定進行第二次的實驗。

冰醋酸的味道真的很刺鼻，在調配 10%冰醋酸時，我們必須在通風良好的地方，且必須帶手套、戴口罩、佩戴護目鏡才能確保實驗安全。

四、資料分析階段：

在對照「應力偏光觀測法」與「化學溶劑法」的結果時，發現有些塑膠的彩虹條紋雖然非常密集，但是經過化學溶劑法後卻沒有開裂或泛白的現象，所以我們推論塑膠本身的塑料，除了分類不同以外，也有等級上的差別。

分析 PMMA 標示牌時，我們遇到了困難，發現裂痕都集中在邊緣裁切處，而且裁切處的觸感與其他處不同，雖然我們做出了推論兩處的製造過程有差異，但最後還是認為「術業有專攻」，決定前往壓克力工廠請教專家。非常感謝老闆的熱心講解，在請教過程中，除了得

到我們想知道的答案，也獲得許多相關的知識，例如：壓克力是由許文龍(奇美集團創辦人)從日本首先引進台灣，壓克力板是用壓克力膠灌進兩片玻璃之間所製成，以及壓克力拋光法……等。

柒、參考資料

- 國立台中教育大學 NTCU 科學教育與應用學系科學遊戲實驗室
<http://scigame.ntcu.edu.tw/light/light-029.html>
- 消除焊接殘餘應力的方法
<https://kknews.cc/zh-tw/home/lk63bx9.html>
- 塑膠材料加工特性與殘留應力對品質影響探討
http://www.caemolding.org/acmt/cmsa2018/file/C/C3/C3_3/C3-3.pdf
- 偏光鏡原理完整解析
<https://www.youtube.com/watch?v=Smrppyvgfx8>
- 殘留應力 <https://www.youtube.com/watch?v=ctwMMnNS8f0&t>
- 科技大觀園 <https://scitechvista.nat.gov.tw/c/sTH1.htm>
蔡穎玫、葉羽馨、王茂齡(2019年)。射出成型。科學發展，559，42-51。
- 劉文斌(2017年)。透明塑膠光學產品的殘留應力定性分析。CAE 模具成型技術志，007，140-145。
- 陳永祥、黃柏涵、許家偉、廖泰杉、黃吉宏(2010年)。應用數位光彈法於光學鏡頭應力分析。2010 全國 AOI 論壇與展覽大會手冊，1-9。
- 黃育熙(2019年)。被「看到」的力量。國立台灣大學機械系電子報，12(4)。
- 蘇軒丞(2010年)。光彈模擬技術在射出成型參數最佳化之應用研究。國立交通大學機械工程學系碩士論文。