

中華民國 第 50 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

國小組 物理科

最佳創意獎

080116

穿梭中的線條—揭開魯伯特淚滴的奧秘

學校名稱：臺南縣關廟鄉五甲國民小學

作者：  小六 吳佩昀  小六 林亭淇  小六 林岑芳  小六 王慈誼  小六 陳家寬  小六 郭子瑋	指導老師：  謝文山  何滄文
---	-----------------------------

關鍵詞：魯伯特王子的水滴、溫度、光彈性效應

## 摘 要

這是一個令人驚豔的科學探索之旅！

連名字－「魯伯特王子的水滴」、「荷蘭的淚滴」－都含帶著詩意。

無意間從書上得到的靈感，激起我們對**燒玻璃**的熱情，絕對不是"玩火"，事實上非常安全！

紅熱的玻璃突然接觸冷水，九成九一定碎裂！但"水滴玻璃"是在高溫熔融下滴入水中形成，敲擊"頭部"堅硬異常，可是只要"輕輕"折斷"尾部"，瞬間會爆裂開變成粉末。

嘗試以家用噴燈取代昂貴的熔爐，即使初開始有著極高的失敗率，但現在大家可以複製我們的驚奇！

深入探討在偏光下呈現的光彈性效應、連拍落入水中的一刻所進行"甩尾"、"拉絲"、"爆裂過程"以及形成"氣泡"之謎，提出說明為何在水中生成的條件較為嚴苛。

最後，請您立刻 DIY！Trust me, You can make it.



## 壹、研究動機

### 如詩般~魯伯特王子水滴~

在 2009 年出版的《不懂科學會倒大楣－理化課本沒教的事[1]》書中提到一件蠻有意思的事：把熔融的玻璃漿滴進水裡，由於溫度突然的降低，玻璃會立即凝固成水滴形狀的固體，頭部像球莖而尾部細長。

這水滴形玻璃的頭部非常堅固，甚至可以抵抗鐵錘敲擊。但用手指把細長尾巴的最細小部分折斷時，整個玻璃結構會瞬間瓦解，爆裂成碎片，連堅固的頭部也不例外。

1661 年巴伐利亞的魯伯特王子表演這種水滴玻璃的神秘爆裂現象時，曾讓國王查理斯二世為之著迷不已。後來把這種水滴形玻璃稱為「魯伯特王子水滴 (Prince Rupert's Drop 或 Rupert's Drop)」

這麼有趣的現象立刻引起科展團隊的高度關注，這是真的嗎？

立即發動搜尋，在 YouTube 找到兩部主要的影片：

[http://www.youtube.com/watch?v=Pdy2\\_vi0FfM](http://www.youtube.com/watch?v=Pdy2_vi0FfM)(圖 1-5)

<http://www.youtube.com/watch?v=plKnSwfid0g>(圖 6)

影片中成功的範例，激發我們團隊探索研究的動機。在此同時，也發現到歷屆科展沒有人進行相關的研究工作，顯然這非常值得我們為它深究一番。



圖 1：熔爐燒玻璃



圖 2：滴入水中



圖 3：王子的水滴



圖 4：王子的水滴



圖 5：爆裂一瞬間



圖 6：噴燈燒玻璃

## 貳、研究目的

- 一、對「魯伯特王子水滴」進行文獻搜尋並判斷實驗的可行性。
- 二、對不同噴槍間它們火燄溫度的認知。
- 三、對玻璃熔融溫度的了解。
- 四、研究在油、水中對形成王子水滴的影響，噴槍火燄溫度對實驗成功率的关系。
- 五、以偏光研究王子水滴內部顏色變化與其受力的關係(光彈性效應)。
- 六、探討粗細玻纖為何易於形成小水滴或圓珠形之因。
- 七、探討玻璃水滴"甩尾"與"拉絲"的現象。
- 八、研究"氣泡"與"爆裂"之謎。

## 參、研究設備及器材

玻璃：鈉玻璃、強化玻璃

燒玻璃工具：各式噴燈、燃料(液化丁烷)、支架、燒杯、水桶、紗網(或捕蟲網)、沙拉油、棉布手套、安全眼鏡

分析工具：電子秤、電子式游標卡尺、數位溫度計、偏光片、燈箱、手持數位顯微鏡、篩網、數位相機、高速攝影機

其他：鐵錘、夾子、壓克力板、相關軟體

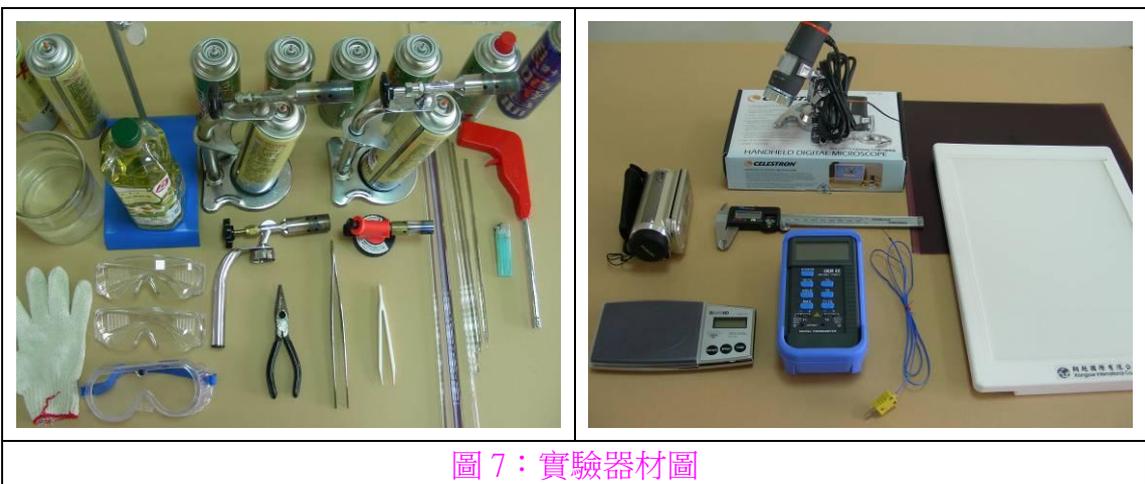


圖 7：實驗器材圖

## 肆、研究過程與方法

### 研究一、文獻探討與初步測試

#### 研究 1-1：玻璃簡述

哇！很難想像真的那麼巧，冥冥中似有天助！最新一期(2010)三月的牛頓雜誌(量子科學雜誌)，竟然有我們研究主題的相關細節，擴充我們對實驗的認知。真是太棒了！(圖 1.1，[10]及【研究五】)

由高溫熔融狀態的液體迅速冷卻形成的固體就是玻璃。如果熔化後慢慢讓它自然冷卻，會形成六角形晶體，這種形狀大家都不陌生就是石英或水晶(圖 1.2)上看到。走在沙灘上仔細瞧瞧沙粒的形狀，大部分的沙粒都是小的石英結晶。

玻璃它透明、易碎，沒有良好的結晶，有意思的是在大自然裡也有以這種方式形成的礦物黑曜石(玻璃隕石)，是一種沒有結晶形態的固體[1、2]。

玻璃的主成分是二氧化矽，純的二氧化矽熔點高得嚇人，可達 1723°C。

因此現代的玻璃都混雜其他的成份，如碳酸鈉(蘇打)、氧化鈣(灰石)來降低玻璃的熔點；水晶玻璃(又稱鉛玻璃、奧地利水晶)就是添加了會增加透明度的氧化鉛。

絕大部分的固體在加熱的過程中，從固態轉變成液態都有固定的熔點，如食鹽(800-801°C)，由於玻璃添加其他的東西就不再是純物質，變得非常複雜[8]：

450°C →開始軟化	850°C →鉛玻璃融化溫度
600°C →可以彎曲	1000°C →拉絲
700°C →玻璃互相粘在一起	1300°C →接近水一樣柔軟
800°C →成為熔融狀玻璃	1450°C →沸騰起泡

哇！看到這些數據資料，讓我們不禁開心起來，我們有支"號稱"溫度可以達到 1300°C 的瓦斯噴燈(圖 1.3)，「王子的水滴」這麼有趣的事讓我們迫不及待的想開始進行實驗！



## 研究 1-2：玻璃初燒 vs 火燄溫度

開始燒玻璃才深深感受："想的"和"做的"完全是不同的兩件事！

不論是中空或實心、強化或普通的玻璃(圖 1.4)，一放進火裡燒軟後自然地滴入水中，遭遇全都一樣，「爆裂」聲此起彼落，失敗率直直竄升嚴重打擊信心。連燒半個月找不到成功的方法。【注意：燒玻璃時，必須戴上安全眼鏡防護】

這"水滴"實在太迷人！激發我們團隊的毅力！無論如何要找出簡單、安全又便宜的方法，請你跟我這樣做！大家一起驚豔王子水滴的美！

一般而言，燒紅的玻璃放入水中急冷，玻璃一定碎裂、粉碎(圖 1.5)，這才是毫無疑問的！那影片中的"水滴"為什麼不會碎裂呢？

顯然火燄溫度是實驗成敗的關鍵，YouTube 中使用高溫熔爐、添加氧氣的噴燈或登山用特製的瓦斯罐(圖 1~6，p3)，才輕易的作出王子的水滴，問題是這些都不便宜，我們希望能用隨手可得、價格便宜的物品，人人都可以複製我們成功的經驗，製作出"水滴"。

首先了解噴燈火燄燃燒情形，大致上分成兩類：

圖 1.6 噴燈 A：燄心有明顯藍燄，外圍環繞著無色的火燄。

圖 1.7~1.8 噴燈：沒有明顯的燄心，是一團藍燄加無色的火光混合著燒。

燃料都使用液化丁烷，燃燒時新鮮空氣會由火炬管上的小孔自動補入，伴隨燃料噴出而有呼呼聲響。



註：圖 1.4\*中 1、3 為強化玻璃的截面是白色或透明；2、4 為普通鈉玻璃是藍綠色；1、2 為實心；3、4 為中空玻璃管。

以高溫溫度計測量火燄溫度，方法如下：

將金屬火炬管出口當做起始點，距離出口每 2cm 處用溫度探針測量火燄溫度 10 次(圖 1.9)，讀取最高溫度值後取平均值，測量至 10cm 處(該處火燄強度已弱)再進行比較(表 1.1、圖 1.10)。

表 1.1：四種噴燈出口距離與溫度(°C)的關係

噴燈種類	火燄出口距離				
	2cm	4cm	6cm	8cm	10cm
A	1053.8°C	1175.4°C	1144.0°C	1118.0°C	1071.0°C
B	1024.6°C	1112.7°C	1077.5°C	1010.2°C	944.5°C
C	973.3°C	1031.2°C	1062.1°C	1050.8°C	949.5°C
D*	1118.7°C	1195.7°C	1107.4°C	1067.4°C	977.4°C

註\*：噴燈 D 燃料罐新開封。

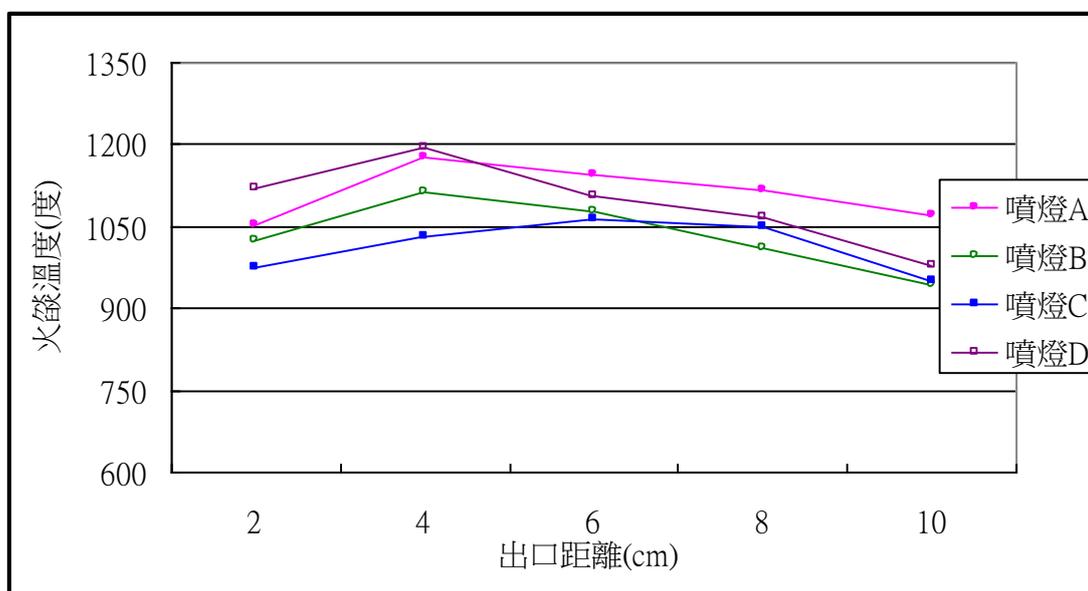


圖 1.10：四種噴燈火燄出口距離 vs 溫度

由表 1.1 與圖 1.10 說明:

1. 不論哪種噴燈溫度至少有 900°C，但都沒有達到 1300°C 的高溫；在噴燈出口距離 4~6cm 附近有較高的溫度，因此這距離是燒融玻璃最適當的點。

2. 新開封的瓦斯罐火燄溫度較高(e.g. 噴燈 D)，使用一陣後則類似噴燈 C 的曲線圖；噴燈 A 有明顯的燄心，讓熱度集中在一區，使用時比較不受燃料多寡的影響，比其他沒有明顯燄心的噴燈有較高的溫度。

3. 在燒玻璃時觀察到，當玻璃棒靠近火燄時，初時保持原來的燄色(無、藍綠色)，但馬上玻璃棒後方的火燄會變紅色(圖 2.3, p8)，測量發現紅燄溫度比原火燄溫度低(e.g. 噴燈 D：出口 5cm 處，原平均溫度：1165°C > 紅燄溫度 1080°C)。

## 研究二、尋找成功的契機

### 研究 2-1：入門款－試試滴在油裡

面對一連串無止盡的失敗，只好討救兵去請教教授專家，給一個建議「為何不試試滴在油中看看！」這真是一個美好的開始！

準備沙拉油、燒杯、支架(圖 2.1，固定玻璃棒，減少手持與增加安全性)，單單用噴燈 A 一燒，沒想到就成功了！專家不愧是專家。

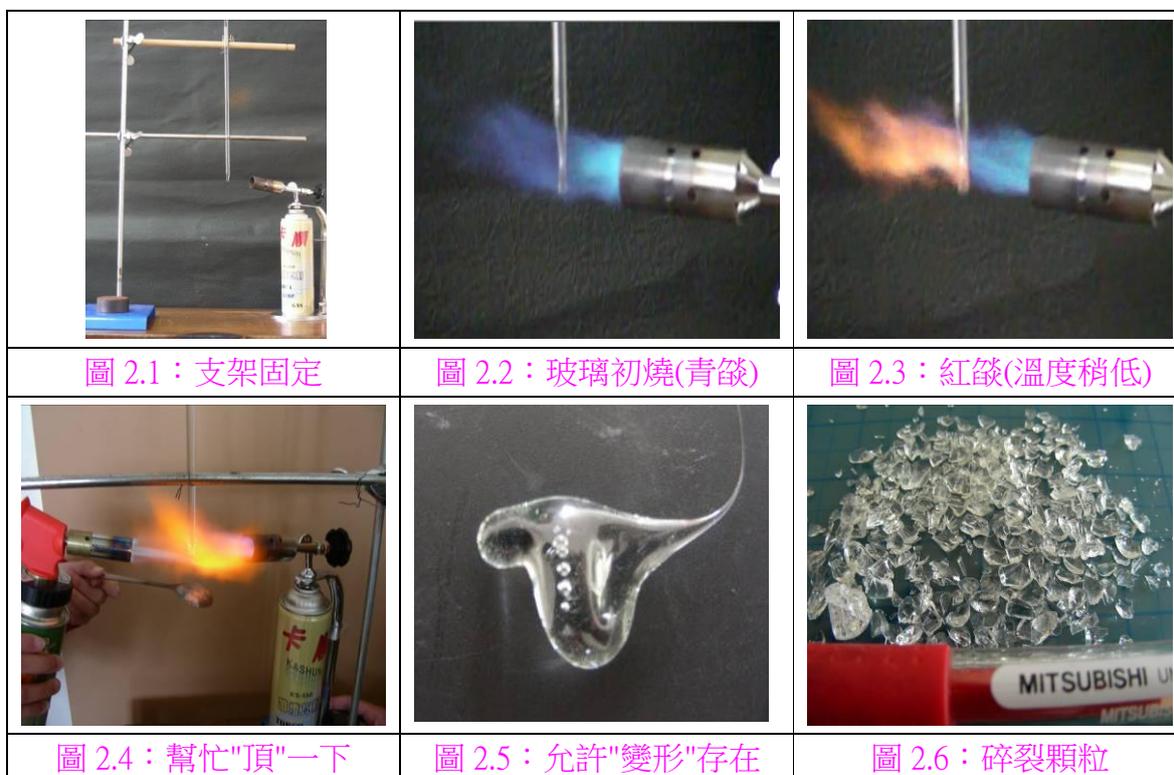
實驗觀察到：

1.在不同的噴燈組，有噴燈 A 時比較容易成功；使用 3 支噴燈，在玻璃燒熔愈軟時，用湯匙"頂"一下，燒出的"水滴"會更大顆(圖 2.4)；頂太多時，落入油中也會失敗！

2.允許"變形"偶然的存在(圖 2.5)。重點是，紅熱的玻璃初入油中，沒完全冷卻就撈起，可能發生"空中爆裂"，這有點危險！我們一律等它冷卻再取出。

3.折斷尾巴才發現，這油中成功的"水滴"不是每個都會爆裂；有爆開的顆粒都偏大(圖 2.6)【注意：戴手套進行剪尾時須在透明玻璃杯中】。

4.當底端的玻璃沒完全熔融前，不可故意去加熱較上方的玻璃，讓玻璃早點滴下；當玻璃沒達到一定的熱度就滴下，一定失敗！【不可偃苗助長】



**研究 2-2：尤利卡【Eureka!我發現了！—阿基米德名言】**

從油中的成功經驗，促使我們有信心回到水中進行實驗。

實驗發現在水中想成功單憑一支噴燈是不夠的，一定要有噴燈 A 存在(圖 2.7 紅框)，它隨燒融的玻璃底部移動，確保玻璃底部維持高溫狀態(圖 2.7~2.9)。

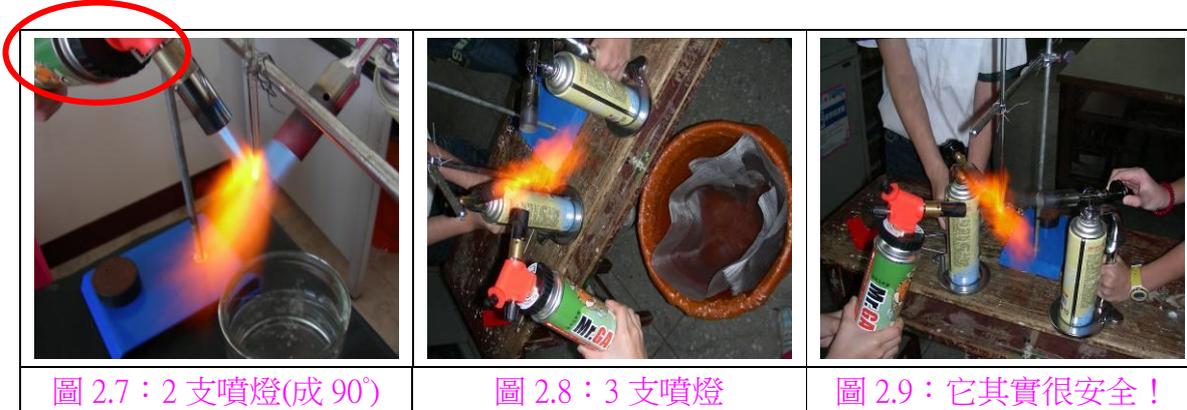


圖 2.7：2 支噴燈(成 90°)

圖 2.8：3 支噴燈

圖 2.9：它其實很安全！

由表 2.1 與實驗裡觀察到：

1.經由初步實驗，體會到"水滴"的成功率與噴燈火燄溫度習習相關。

讓噴燈立放最安全，但火燄接觸玻璃棒底部的範圍小，實驗初期大家都不熟悉方法下失敗率非常高。

手握噴燈讓火燄向下燒熔玻璃，這情形如何？意外的是，因空氣對流將維持大範圍的高溫，水滴玻璃容易成功。我們希望最少噴燈卻有不錯的成功率。

2.也許大家會注意到一個問題？為什麼噴燈組的溫度都比單支的低(表 1.1，p7)？我們認為當火燄一遇玻璃棒燄色由青轉紅，這是火燄高溫為玻璃所吸收，造成玻璃紅熱，但同時降低火燄的溫度(圖 2.2~2.3，p8)。

表 2.1：噴燈組擺放方式與火燄溫度、成功率之關係

	2 支噴燈(擺放方式)*				3 支噴燈
	a.90°	b.90°	c.180°	d.180°	e.
溫度(°C)*	1015	1100	1080	1070	1160
成功率*	2.5→7.5*	7.5	—*	—*	8.5

註：1.溫度\*：均為 10 次平均取近似值且近紅熱玻璃底部測量。

2. 2 支噴燈組中 b、d 均手持噴燈火燄朝下；而 a、c 中一支噴燈立放。

3.成功率\*：一次燒 10 個玻璃滴入水中，觀察成功數量，均進行 4 次。

4.c、d 的方式太過危險，不進行成功率測量。

5.2.5→7.5\*：經由不斷練習學習、改進技巧方法，可以提高成功率。

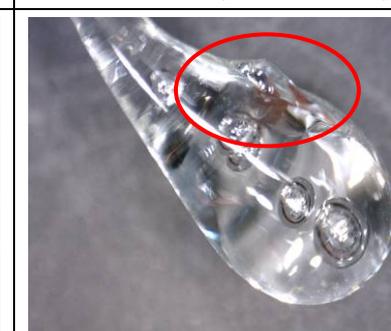
3.得到大顆粒的"水滴",在僅僅使用噴燈的情形下是非常不容易的事,實驗發現成功的水滴會有它自然的重量,使用多支的噴燈下,可以得到的重量較重較大顆(4支噴燈可重達1克)。

那可不可以幫忙"加工",用湯匙"頂"一下讓它變大呢?到目前為止全軍覆沒,水中沒有成功的例子,這意味著:溫度才是決定成敗的關鍵,溫度愈高才有生成大顆粒"水滴"的機會,溫度不夠"幫忙"也沒用;在我們僅能使用噴燈組的環境下,"水滴"只能靠自身重量,在高溫下擺脫熔融玻璃的束縛(黏力),自然的滴入水中才有機會成功。

4."水滴"在水中、油中型態顯然是有差異;前者體積小但晶瑩剔透,後者感覺有點暗沉(圖 2.11);前者"斷尾"幾乎百分之百爆裂,生成的粉末極細,後者的顆粒粗大許多(圖 2.12、2.13)。

水中型的水滴形成條件較為嚴苛,外型上有曲線、平滑的美感,不太允許變形的存在,但在3支噴燈下(高溫度下)可以允許輕微的不是那麼平滑(圖 2.14)。

為什麼在水中生成會比在油中還嚴苛呢?這是一個好問題,將在陸、討論中闡述我們的觀點!

		
<p>圖 2.10: 水滴玻璃(水中型)</p>	<p>圖 2.11: 水滴(左油、右水)</p>	<p>圖 2.12: 碎裂顆粒(油中型)</p>
		
<p>圖 2.13: 碎裂顆粒(水中型)</p>	<p>圖 2.14: 水滴玻璃(變形)</p>	<p>圖 2.15: 撈網撈水滴玻璃</p>

## 研究三、王子水滴－滴滴滴！

### 研究 3-1：甩尾現象

幾乎每個"水滴"都有 90° 以上的"甩尾"現象(圖 3.1)。

過程中觀察到水滴在容器底部由紅熱迅速轉成透明，伴隨"爆鳴"聲發出。

**我們猜想：**玻璃掉入水中，碰觸容器底部使水滴"躺平"，較輕的尾部來不及躺平而形成尾部 90° 朝上。

但水滴脫離後到落水的剎那並不容易觀察，也有**同學質疑是**"剛"掉入水中，突然遇到"冰冷"的水，在那瞬間就凝固成"甩尾"！

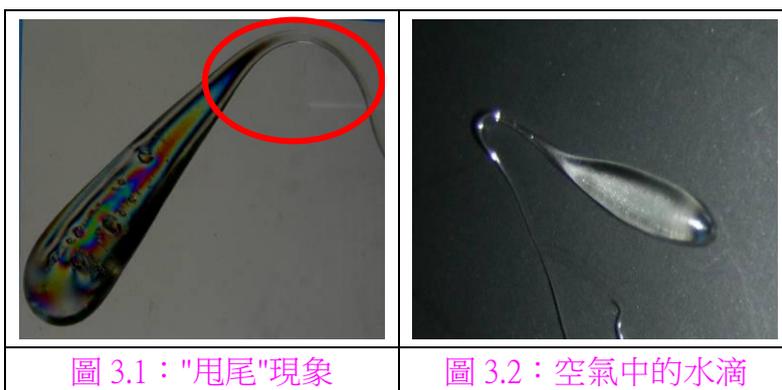


圖 3.1："甩尾"現象

圖 3.2：空氣中的水滴

### 用"想"的不準，究竟那種說法才真實！

使用一般相機的連拍或攝影功能不足以應付如此快速滴落的過程。

幸好 SANYO 有款攝影機(FH1 或 HD2000)可以進行高速錄影，使用播放軟體 Quick Time Player 對拍攝畫面進行格放，如慢動作般，清晰的看到整個下墜的歷程，以鍵盤上的 PrtScrSysRq 鍵擷取畫面就成圖 3.3。

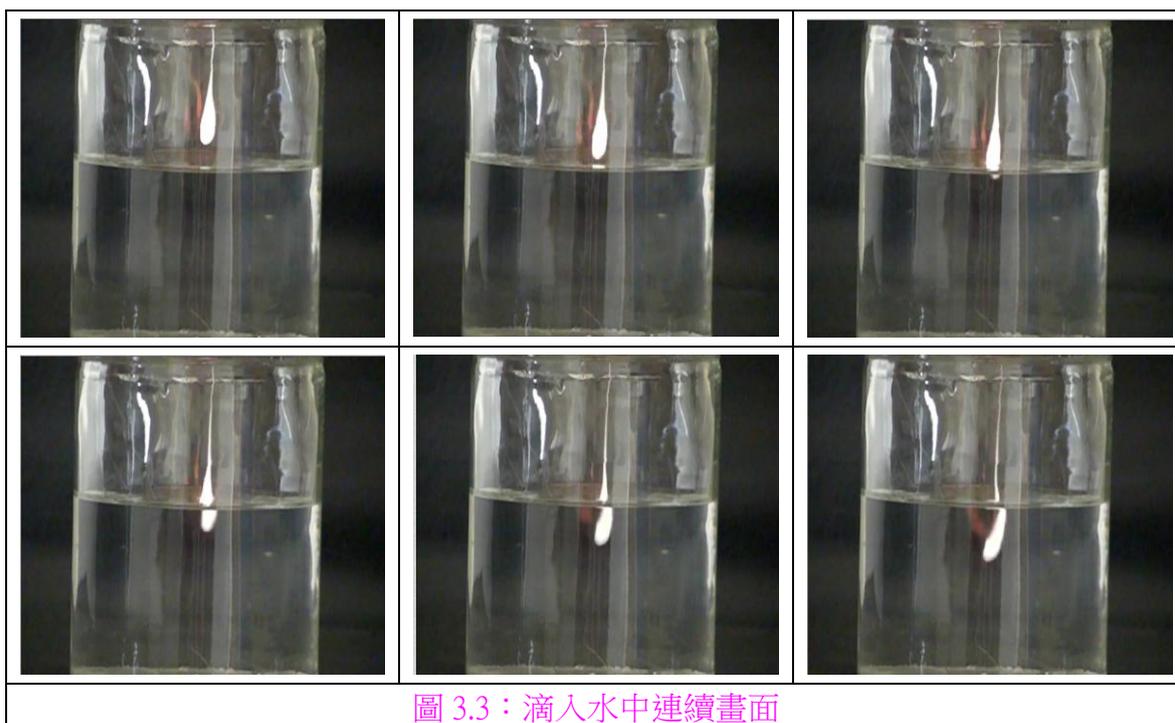
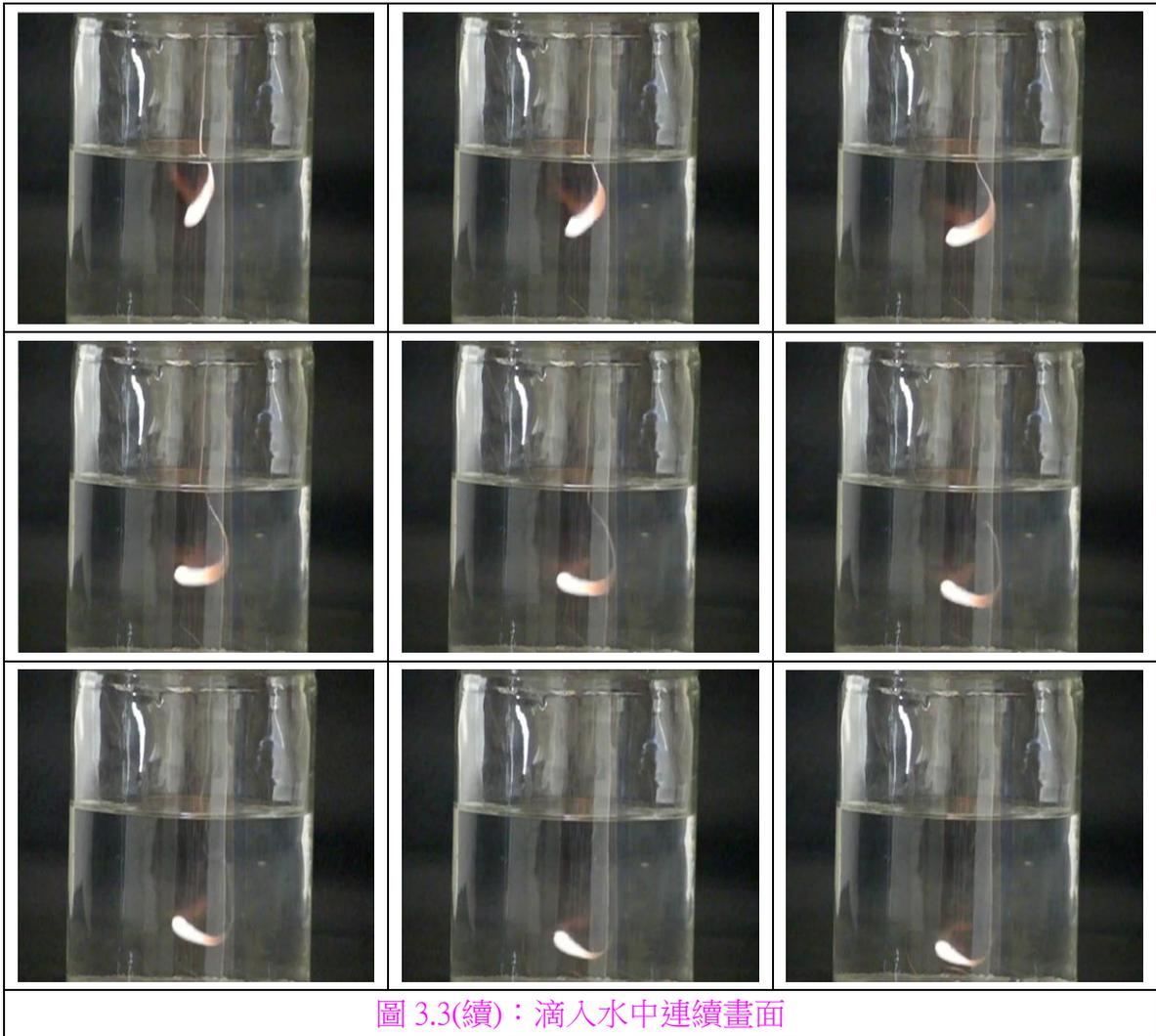


圖 3.3：滴入水中連續畫面



連續畫面才解開我們的困惑。

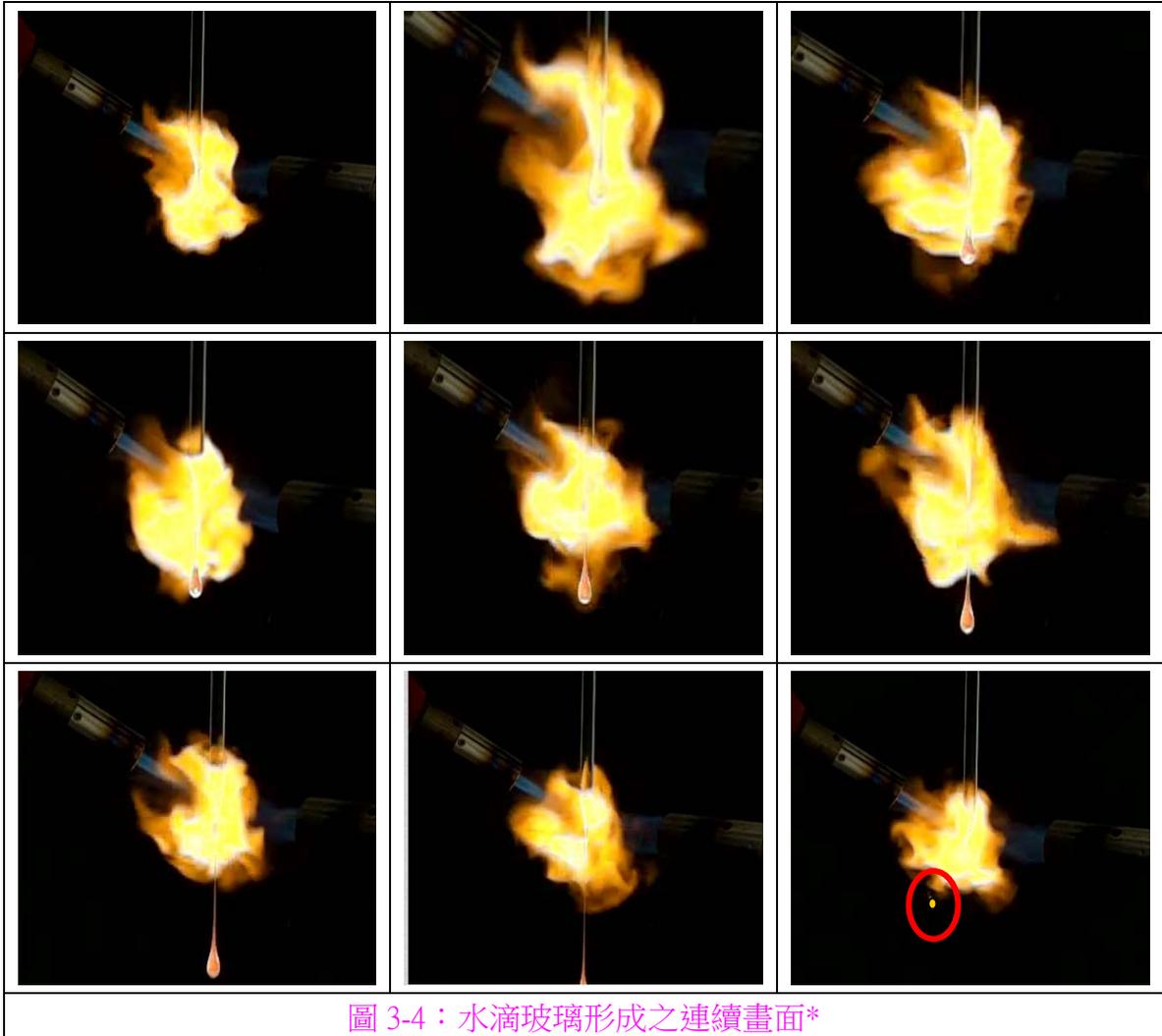
一入水面就偏折。原來水滴圓弧形的頭部與水面有較大的接觸面，受到水的阻力減緩下墜的速度，進而改變水滴原來的路線，當尾部一碰水就凝固"甩尾"，紅熱的水滴繼續以"躺平"之姿落到容器底部；在某些觀察中看到水滴入水會有些微旋轉的方式沉底，使尾部拉出的玻璃纖維是螺旋狀。

那如何說明空氣中的"甩尾"現象呢？再拍一次，這是一個艱鉅的任務。

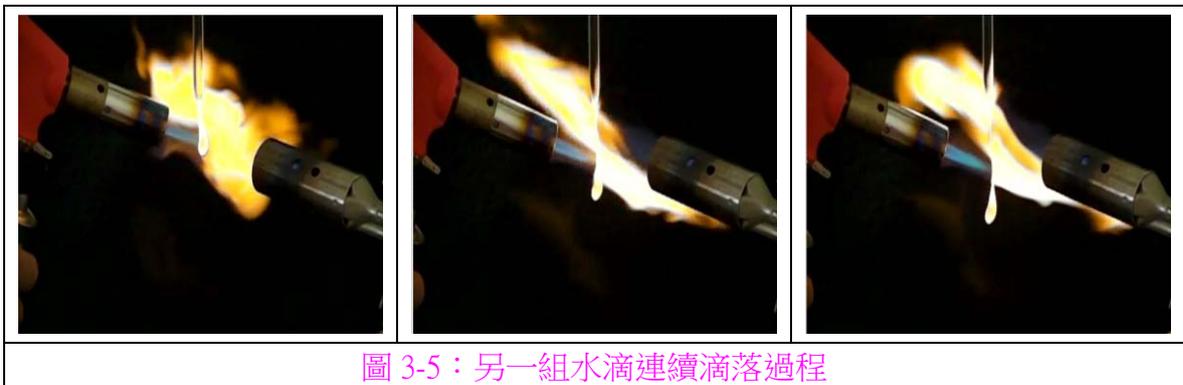
在沒有水的阻力來降低下墜的速度下，只得到模糊的影像，仍可看出：在短距離(20-30cm)內落底，水滴是觸碰底部才甩尾；較大距離落下時，受空氣阻力影響在空中就翻轉甩尾，不過我們比較關注在"王子水滴"上，空氣中形成的"水滴"不是深究的重點。(圖 3.2)。

### 研究 3-2：玻纖拉絲現象

為什麼水滴玻璃總是拉出長長的玻璃纖維(拉絲)? 快速攝影可以持續滿足我們的好奇心!



在圖 3-4、3-5 裡，為了確保水滴的成功率，噴燈 A 會持續對著水滴的"頭部"燒灼直到落下，注意：這是一個極快速而連續的歷程只是被慢動作攝影。



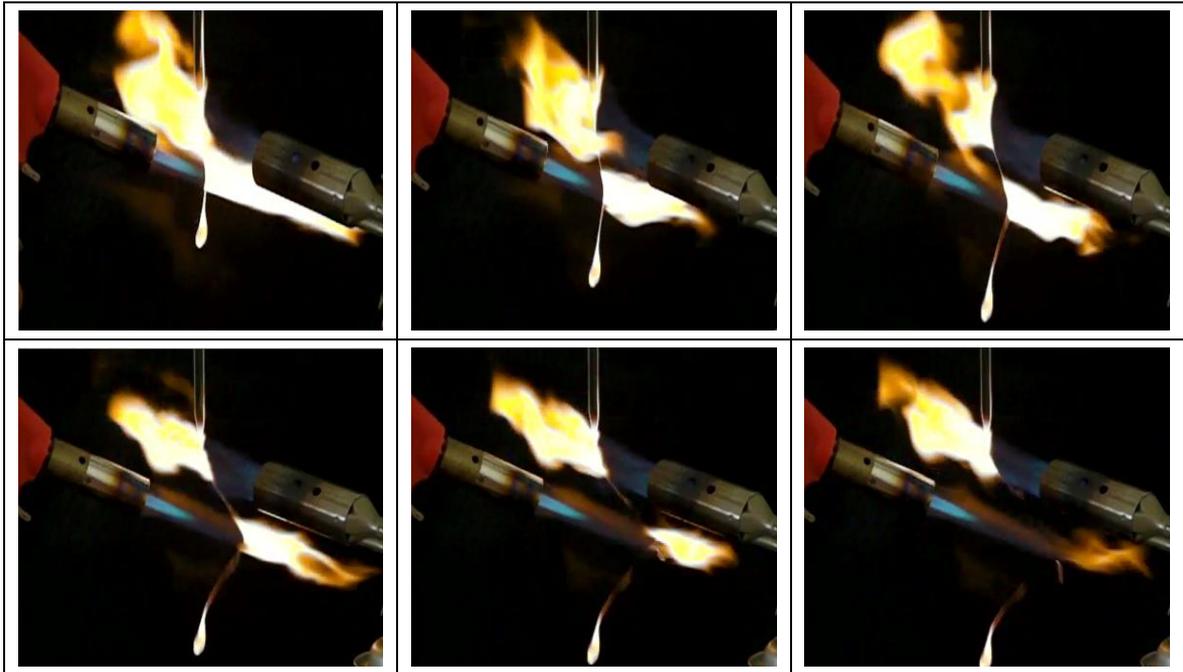
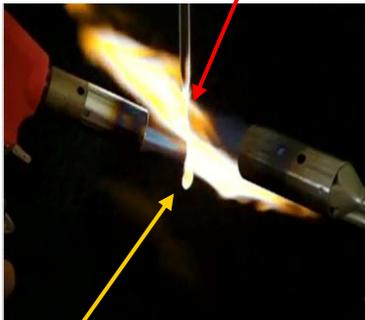


圖 3.5(續)：另一組水滴連續滴落過程

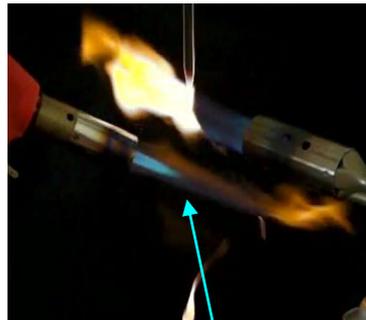
這長長的玻璃纖維是被高溫強燄所燒融(燒斷)。

**由實驗觀察推測：**下墜的水滴玻璃提供向下"拉絲"的力量，將上方熔融的玻璃拉出長長的纖維，當瞬間拉到太細時由強燄將它燒斷！由連續畫面看來，玻璃纖維不太像是由水滴尾部的玻璃所產生(圖 3.6)。

熔融的玻璃棒，作為拉絲的原料



水滴玻璃下墜的重力，當作拉絲的動力



高溫強燄燒斷太細的玻纖

圖 3.6：玻璃纖維的產生說明

## 研究四、穿梭中的線條

### 研究 4-1：偏光與光彈性效應簡介

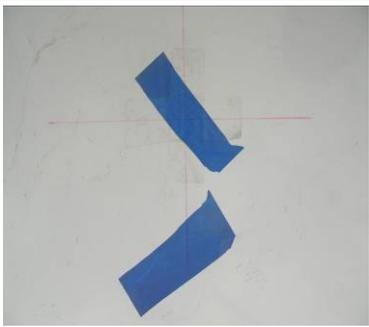
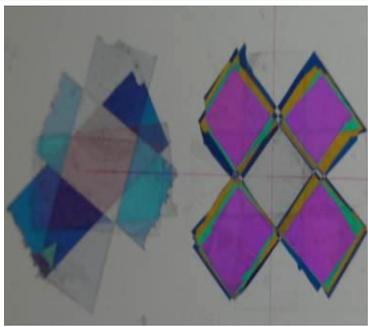
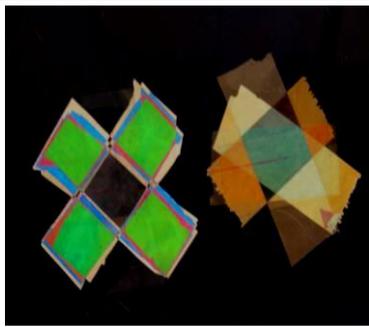
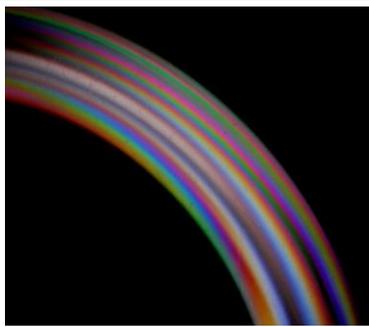
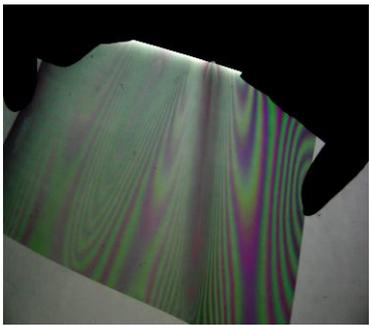
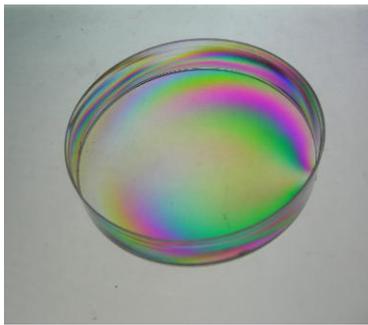
拜立體電影、液晶螢幕、太陽眼鏡之賜，大家對偏光片並不陌生。

任意旋轉重疊的偏光片將出現明場(兩偏光片同向完全透光, 圖 4.1)與暗場(兩偏光片互成 90 度, 最不容易透光呈黑色)。在兩偏光片中粘貼透明膠帶會出現美麗的顏色變化, 圖 4.2、4.3 裡多層粘貼的膠帶在明、暗場中顯現出不同的色彩圖案[5]。

對了！膠帶要怎麼黏貼, 色彩才會最豐富？實驗結果是黏在偏光片對角線方向最佳(與偏光片成 45°), 和偏光片平行(或垂直)效果都不好。

把透明塑膠水管放在兩偏光片之間, 沒彎折前是不會有顏色變化, 但隨著彎曲程度愈大, 線條顏色變化愈明顯(圖 4.4~4.6)。

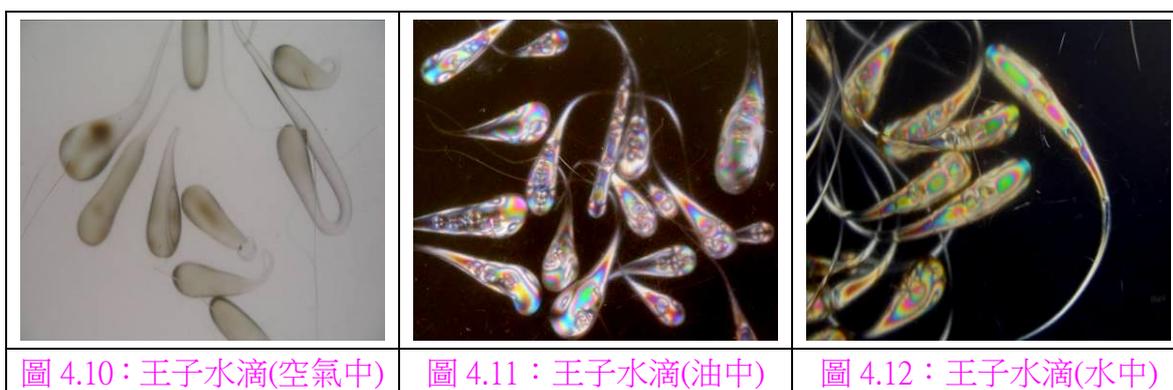
愈用力彎曲水管, 這力量在偏光片下無所遁形, 並以色彩呈現, 力量愈大彎曲程度愈大, 線條色澤就愈加豐富。在暗場中色彩由粉紅→橙黃(或綠)→青藍

		
圖 4.1：明場圖像	圖 4.2：明場下的膠帶	圖 4.3：暗場下的膠帶
		
圖 4.4：伸直的水管(無色)	圖 4.5：彎曲的水管	圖 4.6：清晰色彩變化
		
圖 4.7：偏光下彎曲投影片	圖 4.8：偏光下的培養皿(塑膠)	圖 4.9：偏光片下的雲母

→紫反覆變化，但部分顏色可能不明顯；顏色隨著偏光片的轉動而有穿梭流動的效果。上述觀察反映出：當色彩反復出現愈多時表示所受到的力愈大，而當這力存在於物體的內部時可以稱為應力[12]，這是光彈性效應，在玻璃加工時，常藉由觀察顏色變化了解透明物體內部受力(應力)的情形(圖 4.7~4.9)。

### 研究 4-2：驚異的色彩

玻璃是透明的，可以把王子水滴放在偏光片下觀察(圖 4.10~4.12)：

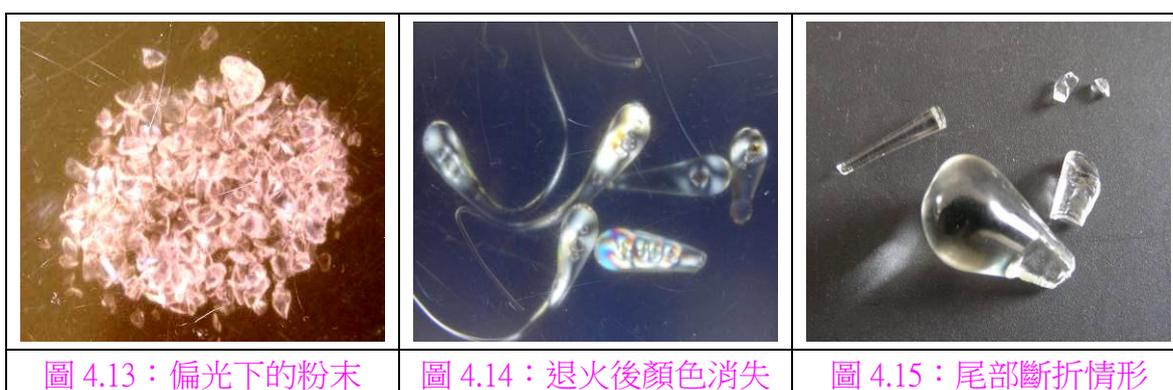


哇！多麼令人驚豔的色彩啊！

但在空氣中自然冷卻的水滴玻璃是不會有顏色變化(圖 4.10)；這究竟改變了什麼？熔融玻璃受到水(或油)的急速冷卻，這急速冷卻對水滴玻璃產生一股力量(應力)[10]，這力量如同對透明水管(或投影片)所施的力一樣，只不過那瞬間它被凝結在玻璃的內部，必須藉由偏光片才觀察得到。

應力的存在使經過水滴玻璃內部的光線偏折，造成顏色變化【它改變光的行徑路線(折射)，發生雙折射現象】。當水滴玻璃的尾巴被折斷時，瞬間釋放出這力量造成玻璃粉碎，這些粉末擺在偏光下觀察是透明的(圖 4.13)。這瞬間釋放的力量猶如放開彎曲的水管(或投影片)般，水管可藉由彈力迅速恢復原狀的情形是相同的道理。

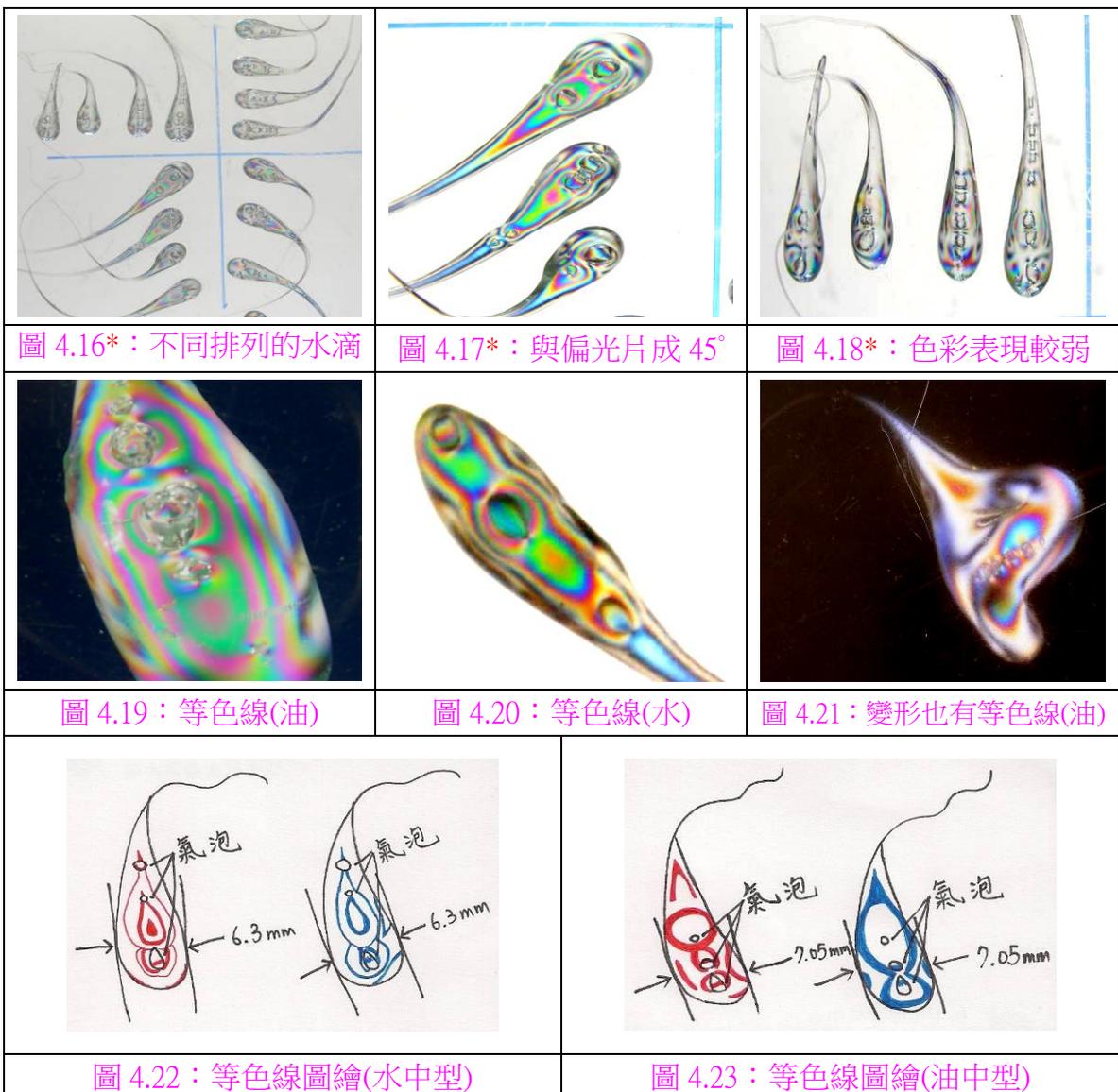
還有一種去除應力(內部力量)的方法，就是以火再燒一下(退火)，偏光片觀察到顏色消失(圖 4.14)，此時尾部斷折不會粉碎，而是出現一般的玻璃裂痕(與空氣中生成的水滴斷折情形雷同，圖 4.15)。



將水滴玻璃在偏光片中擺放成 45°，得到最大的色彩分佈，讓觀察更加清晰(圖 4.16~4.18)，與之前分析透明膠帶的情形一致。

觀察水滴內部的色彩，發現同一顏色的線條會環繞著"氣泡"而產生，這條線是"等色線"(如地圖的等高線，說明每條線之間不同高度的變化)，標示著每一圈之間的變化有著不同的力量差異【或折射光線的差異】(圖 4.19~4.20)。

等色線在"油中型"水滴的表現在寬度、面積都較大(圖 4.19)；"水中型"水滴面積小且密集(圖 4.20)；等色線密集的地方說明該處的應力(內部力量)是比較大的(圖 4.7、p15)。【油、水中之粒徑寬：7.05、6.3mm，但等色線分別重復 3、1 次；可知以水中型水滴較為密集。圖 4.22~4.23】



註：1.\*照片中藍線與偏光片平行(或垂直)，方便判斷。圖 4.18：當水滴與偏光片平行(或垂直)，色彩表現較弱。

## 研究五、插曲-從小圓珠到水滴玻璃

將殘餘玻璃纖維在火燭裡燒一下，掉落的居然是圓滾滾的小圓珠(圖 5.1)不是預期中的小水滴。令人好奇的是：它為什麼是小圓珠？這和玻璃纖維的粗細(以棒徑表示)有沒有關係？和在燒灼時，圓珠能不能夠承受自己本身的重量有沒有關係？

首先得拉出各種粗細的玻纖，在一段距離內先測量玻璃的棒徑(mm)；而燒出的小圓珠(或小水滴)，因為重量太輕電子秤無法測量，改量粒徑大小(mm)代替並和玻纖(棒徑)作比較(圖 5.2~5.6)！

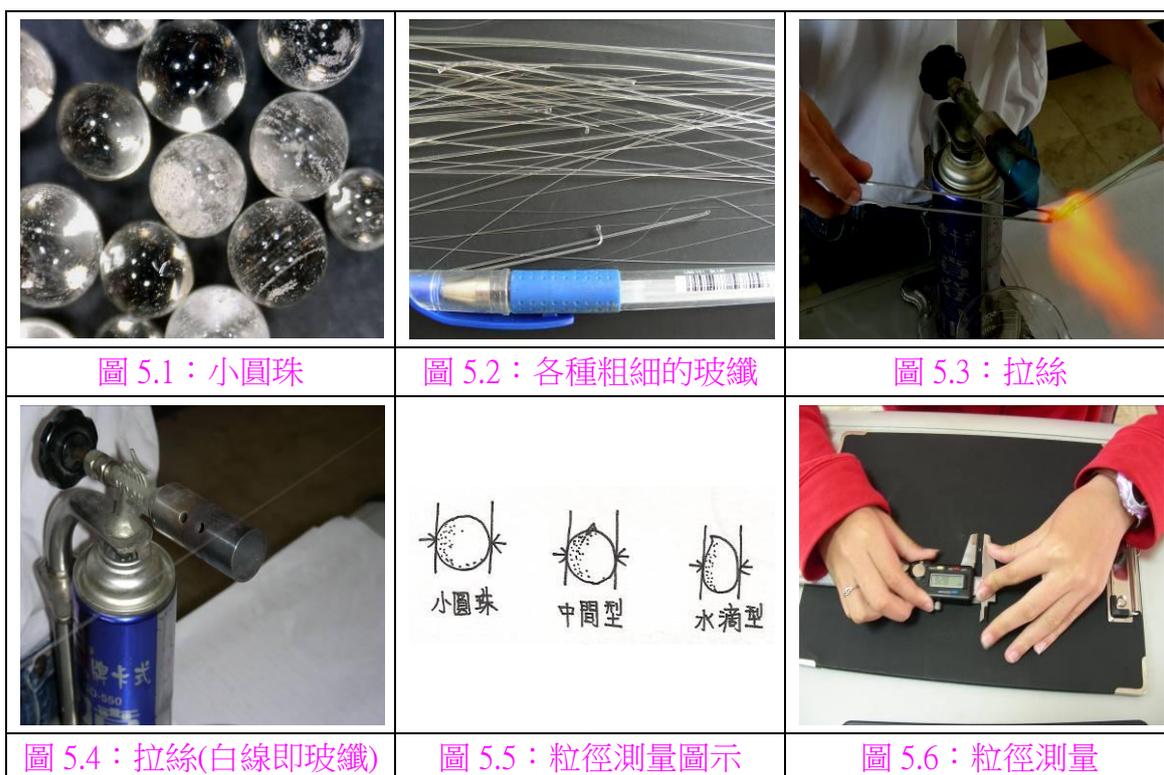


表 5.1：玻纖棒徑 vs 圓珠(或水滴)粒徑(mm)\*

編號	棒徑	粒徑									
1	0.602	2.856	2	0.599	2.959	3	0.679	2.968	4	0.778	2.929
5	0.740	2.993	6	0.340	2.269	7	0.363	2.301	8	0.379	2.552
9	0.417	2.648	10	0.420	2.501	11	0.253	2.010	12	0.327	2.529
13	0.469	2.805	14	0.735	2.866	15	0.639	2.771	16	0.549	2.727
17	0.515	2.714	18	0.681	2.899	19	0.788	3.003	20	1.038	3.013
21	1.016	3.138	22	0.859	2.960	23	0.789	3.068	24	1.338	2.924
25	0.966	3.141	26	0.927	3.027	27	0.559	2.947	28	0.656	2.927
29	0.693	2.944	30	0.393	2.534	31	0.358	2.546	32	0.371	2.717

註：1.粒徑數據：紅字者表圓珠型(圖 5.1)，黑字者表中間過渡型(圖 5.9)，藍字者表水滴型(圖 5.10)。2.以上數據資料為至少測量 10 次的平均值。3.\*：其餘數據見附錄。

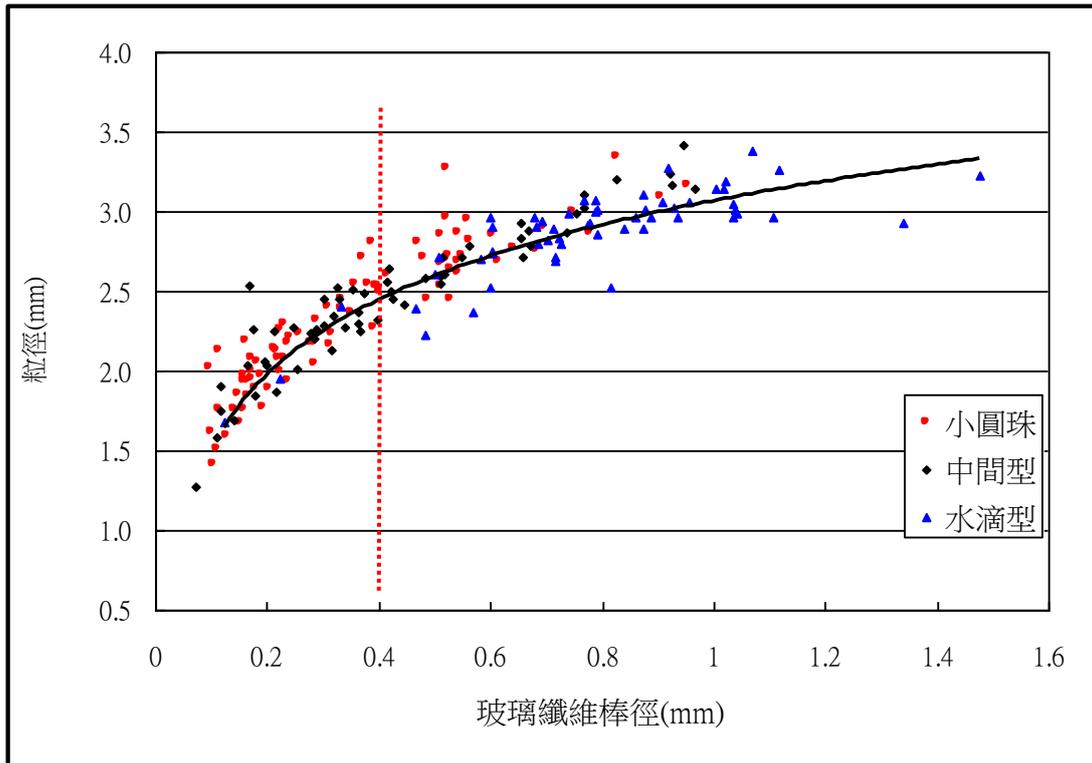


圖 5.7：玻璃纖維棒徑 vs 圓珠(或水滴)粒徑

沒想到這是一項浩瀚的工程，得到表 5.1 與圖 5.7，結果讓我們驚奇：

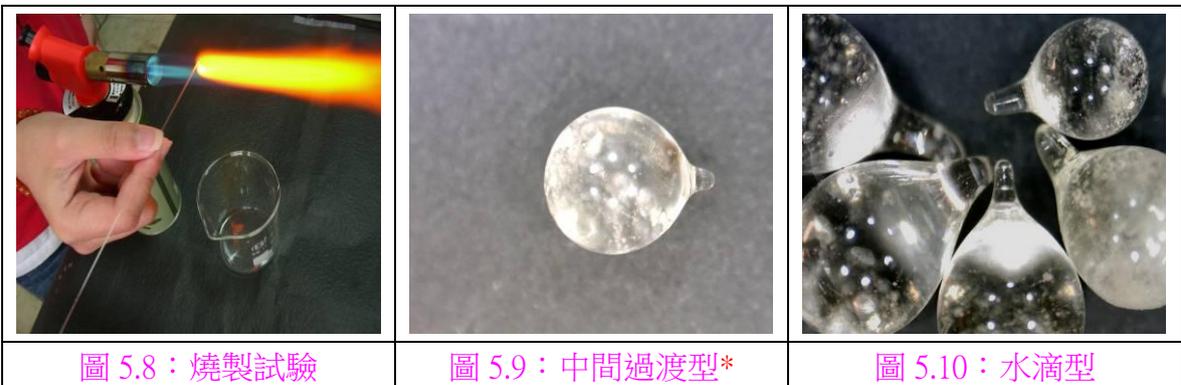
1.玻璃纖維愈細愈傾向燒成圓珠形，愈粗則傾向形成水滴狀；也出現既不圓也不像水滴的中間過渡型。

燒製的過程中愈細的玻纖愈容易燒斷，可能原因有二：

第一是進入火燄的玻纖迅速形成圓珠，更受到燃料氣流的噴出，而快速地旋轉。當衝出氣流愈大，旋轉愈快加速圓珠的脫離。

第二是纖維愈細與圓珠的接觸點愈小，因此火燄溫度愈高時，相對的降低玻璃的黏性，更加抓不住滾動的圓珠而滴落，使圓珠形成(圖5.11)。

而愈粗的玻纖不易燒斷，反倒容易累積熔融玻璃而形成水滴狀，這水滴重量較重，火燄氣流不容易使它在火燄中旋轉(圖5.12)。



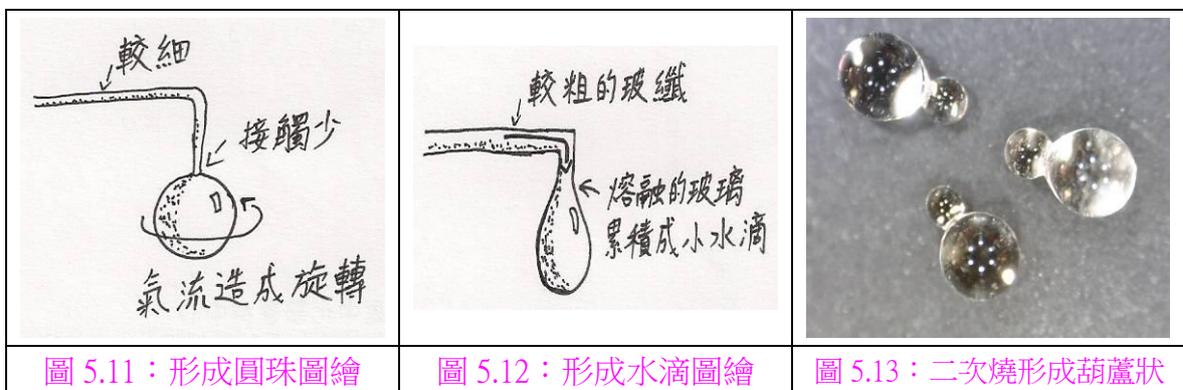
註\*：圖5.9與5.10似乎相似，實則有所不同。

2.這不是直線或是陡峭上昇的圖形，而是呈現微微向下彎曲的曲線，為什麼？實驗觀察到："水滴"要能自然落下本身必須具有一定的重量，太輕受熔融玻璃黏度抓住而無法滴落，也就是說它必須達到最小的重量才有機會滴下；但太重，玻璃黏度不夠也抓不住。

以圖5.7中玻纖棒徑0.4mm說明(紅虛線)，圓珠須達到一定的粒徑大小(約2.5mm)才落下，它也不會累積很大的重量(體積)才滴下，也不會太小粒就掉落，換言之它說明：一定粗細的玻纖，在一定的粒徑範圍內才會自然地滴下。

3.這是一個漸變的過程，隨著玻纖粗細的不同，它會出現中間過渡型。

4.將玻纖推入火燄，過程上是一個連續的動作，當動作不連續時，如玻纖先離開火燄再馬上送入火燄中(如拿取的玻纖太短時)，會產生葫蘆狀的水滴，我們稱這情況為"二次燒"，不納入實驗考量(圖 5.13)。



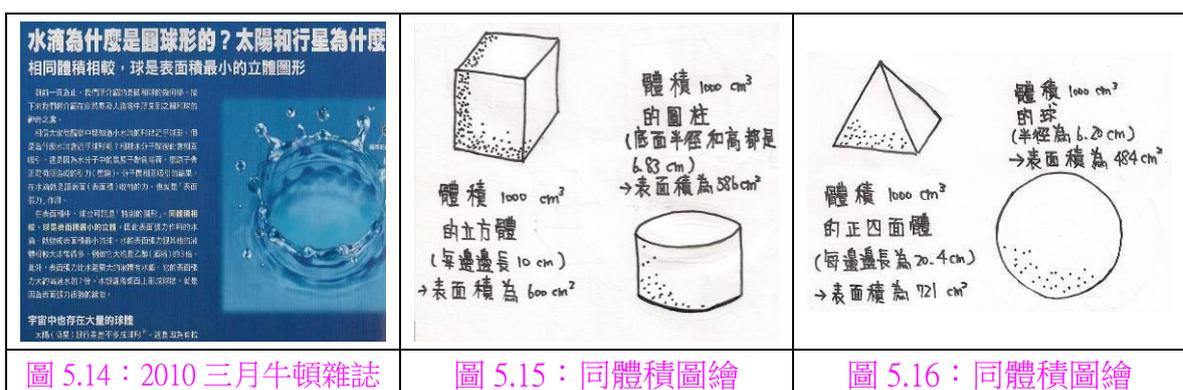
5.在此，我們問自己一個問題？為什麼"水滴玻璃"是呈現近乎"圓球"狀、"水滴"形，而不是像礦物會形成立方體(黃鐵礦)、菱形(冰洲石)呢！

正巧 2010 最新一期三月的牛頓雜誌(量子科學雜誌)為我們解惑[11]。

我們發覺這問題小到水滴成球形、大到跟太陽和行星都是圓球狀有異曲同工之趣。大自然為何在不經意中都使用圓球呢？

對水滴而言就是一種讓表面(表面積)收縮的力—正是表面張力的作用。

在表面積中，球也可以說是「特別的圖形」。在體積相同的形狀中，球是表面積最小的立體。因此在表面張力作用下的水滴，就是表面積最小的球[11]。



## 伍、研究結果

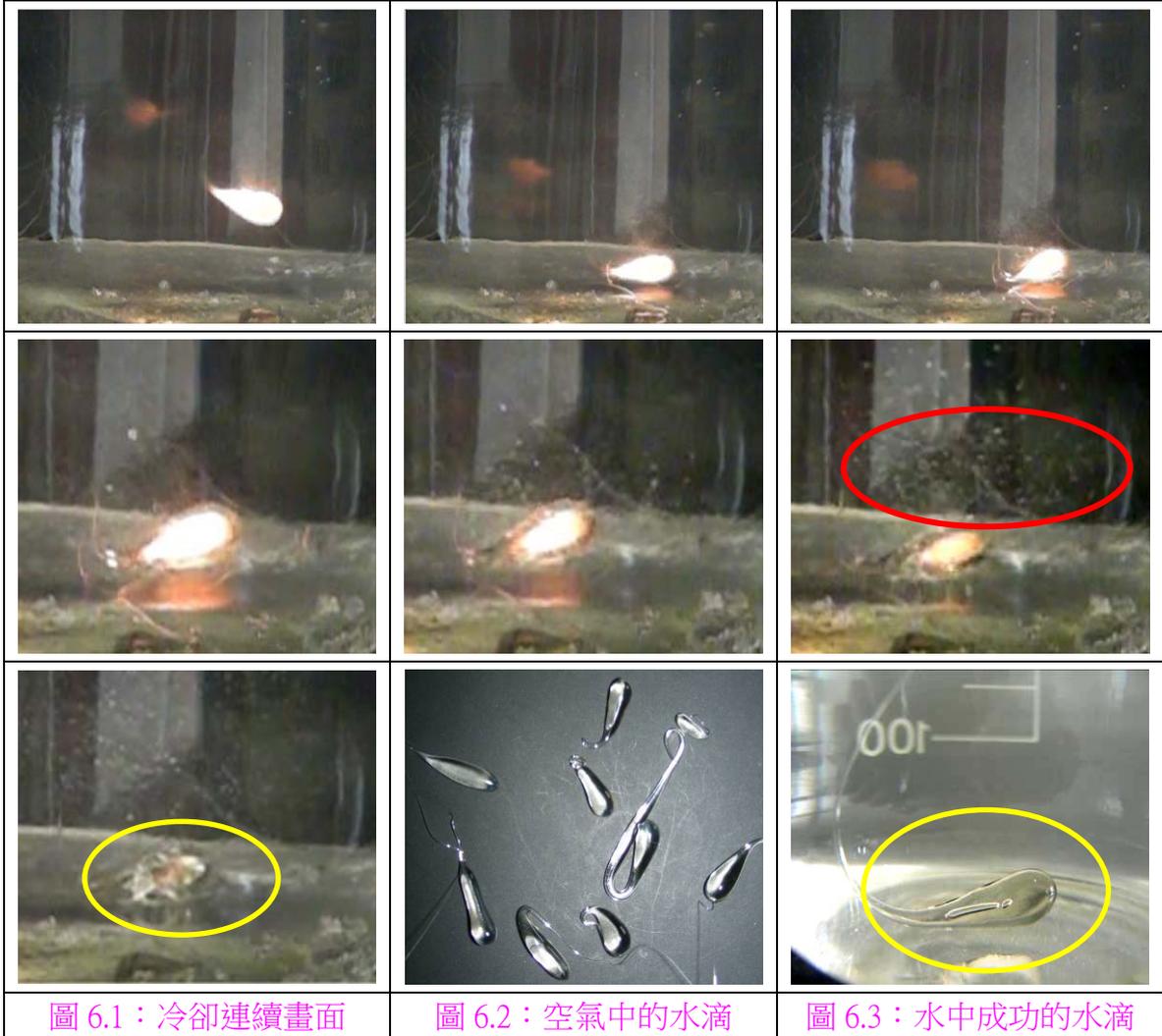
- 一、**研究一**：一般"水滴玻璃"的製造都使用昂貴的器具設備才成功，原因是要達到玻璃的熔化溫度非常不容易。  
我們研究市售噴燈火燄溫度發現，雖不能達到 1300°C，但適當的噴燈組確實能讓玻璃熔化，既然如此我們希望利用簡單、便宜、易取得的物品製作"水滴玻璃"。
- 二、**研究二**：玻璃棒的種類頗多，能以噴燈組成功製成"水滴玻璃"以實心鈉玻璃最佳(棒徑為7、6mm)，其他中空、強化、琉璃、平版等玻璃都容易失敗。  
油裡比水中容易成功，有助於初試者增強信心，加增技巧的掌握。  
另外，油中生成的水滴顆粒大可以允許變形的存在；水中生成的水滴顆粒小具流線形，剪尾必爆且碎裂後粉末細小。
- 三、**研究三**：高速攝影機觀察到：水滴的"甩尾現象"是玻璃初入水中受水的阻力影響而偏離原來路線，產生 90°"甩尾"。  
而尾部拉出長長的玻璃纖維(拉絲)是由玻璃棒上熔融玻璃所提供，滴落的"水滴"作為"拉絲"的動力來源。
- 四、**研究四**：當熔融玻璃受水急速冷卻時，水滴玻璃內部將產生一股力量(應力)，以偏光片可以觀察到內部受力情形，並以等色線表現出來。  
當剪尾破壞水滴的完整性，這力將急速釋放出來—以"爆裂"型式。  
爆裂以後的粉末不會具有光彈性效應，失去應力(內部力量)。
- 五、**研究五**：這是研究的插曲，實驗觀察到較細的玻纖滴落偏向小圓珠型；愈粗愈偏小水滴型，這是為何水滴玻璃呈現此型的原因。  
愈細的玻纖在強燄中因接觸點太小，無法抓住形成小圓珠，而燃料噴出氣流太強造成圓珠滾動，加速墜落。  
較粗的玻纖有較大的接觸面，熔融玻璃不斷向下累積在"小圓珠"上方，增加重量且使脫離圓球逐漸形成的"水滴狀"。  
在相同的體積下，以球的表面積最小。所以水滴玻璃因表面作用收縮成球形是最穩定的形狀，如洩地成球的水銀一般。

## 陸、討 論

### 一、凝結的氣泡

這"水滴玻璃"在日本有個相當詩意雅緻的稱呼－荷蘭的淚滴(オランダの涙)，大概是初遇它的人覺得它美的像滴落的淚珠。這滴落的淚滴有些蠻有趣的地方，幾乎所有的水滴都看到氣泡，為什麼有氣泡的產生？是融熔的過程中空氣滲入水滴玻璃內？還是滴入水中時，水的滲透呢？這有可能嗎？

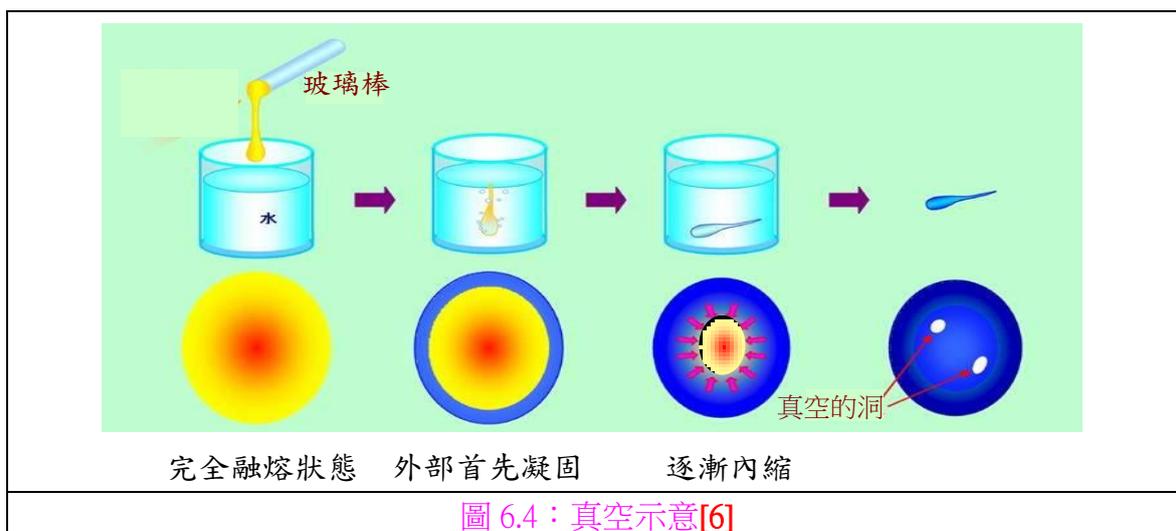
由高速攝影觀察冷卻連續畫面(圖 6.1)。



觀察圖 6.1：一個清晰白熱的水滴玻璃落底。紅熱的玻璃受水冷卻由表面向內凝固，夾雜著水蒸氣(紅框處)與爆鳴聲。最外層的玻璃首先受到水的冷卻而形成堅固的表面，水不可能有機會再進到玻璃的內部形成氣泡。

那有沒有可能發生在融化玻璃的過程？首先玻璃棒本身沒有氣泡，那我們觀察空氣中形成的"水滴"，它沒有任何的氣泡產生(圖6.2)，這說明：燒熔過程不可能讓空氣跑進玻璃中。

我們排除上述兩種可能！



那要如何解釋這"氣泡"呢？這氣泡肯定源自"水滴"本身。

從熱脹冷縮現象知道，熱融液態的"水滴"有較大的體積，而固態的體積較小，這大小之間決定氣泡的產生；想想當熱融的"水滴"受水急速冷卻的瞬間，由表面最先凝固，讓水滴保持在較大的空間，並由外往內一層一層迅速冷卻。

我們推測，當玻璃愈往內冷卻時，沒有足夠的玻璃供一層層凝固用，不夠的地方只好"空"著，以"氣泡"的方式表現出來。這"空下來的空間"—氣泡—沒有任何東西，這是一個真空的洞[6] (圖6.4)。

補充的是：在圖6.1中紅框是紅熱玻璃與水進行熱的交換，形成水蒸氣氣泡使拍攝畫面模糊；而黃框是拍到"水中爆裂"的最初畫面，在凝固時就出現裂縫隨即爆裂這和成功的水滴圖像不同(圖6.3)。

## 二、爆裂之謎

為什麼水、油中形成的水滴，情形會不同(表6.1)！

表6.1：王子水滴在水、油中及空氣中比較

	空氣中	油中型	水中型
水滴生成成功率	100%	易	難
碎裂顆粒	無(原型)	大	小
等色線	無	寬	細、密集
剪尾爆裂成功率	無	不一定	一定

表6.1是前述實驗的歸納。空氣本身的隔熱效果較好，不容易傳熱(導熱效果最差)\*，使在空氣中生成的水滴，獲得較多的時間冷卻，只能生成一般的玻璃沒有光彈性效應。

在油中生成的條件較為寬鬆，這因為油的導熱性比水差。

三者中導熱效果最好的是水[7]，它能快速轉移水滴玻璃的高溫，讓玻璃表面硬化快速。這快速的硬化冷卻所形成的一股力量，可由光彈性效應的等色線分佈密集、重復而觀察到【研究四】。

剪尾動作是在破壞水滴的完整性，瞬間即引起全體的反應－"爆裂"，釋放內部的力量；這爆裂的速度飛快，以攝影機連拍仍無法取得更細緻的畫面，在圖6.5中第一張格放後就接第二張，可見速度之快！與強化玻璃的形成原因相近，一旦破壞一小點立刻引起全體的碎裂[10]。

一旦內部力量釋放後，殘餘的粉末就觀察不到等色線【研究4-2】。

這內部存在的力量(應力)，並不隨著歲月的流逝而消失，放三個月的水滴玻璃，剪尾時爆裂的速度飛快！但若以噴燈火燄再接觸(退火過程)，該內部力量(應力)旋即消失。

註\*：傳熱效果的好壞以熱傳導率表示，愈大傳熱效果愈佳；換句話說，傳熱愈好，隔熱效果就愈差。傳熱效果：水>油>空氣[7]。



## 柒、結 論

一、這次的科展活動，我們體驗到玻璃的另一個面向，玻璃不在是銳利、傷人、危險的印象，而是有其美麗、堅硬、特別的一面。

那原本只存在書裡的一段文字、YouTube 一小段影片，給我們無限的想像空間。它與眾不同、有趣，值得我們熱情地投入。

有著一段不畏失敗的追尋，連燒半個月找不到成功的契機。然而一旦開始成功，彷彿有如天助得到“金手指”般，一個個成功的“王子水滴”不斷地湧現，那此起彼落的“爆裂”聲終於逐漸遠颺。

這不正是科學研究迷人的所在！探索的歷程不總是苦痛與歡欣交織而成的辛酸歲月；但在水滴“剪尾”爆裂那瞬間，內心之雀躍不言而喻。

二、國小學生用瓦斯噴燈，會不會有危險！其實「危險」源自於對所使用事物的無知與陌生，況且每次“開火”指導老師一定在現場關注。

以《十月的天空》[9]書中的場景來說明—

「評審員：『這件研究計畫我看來真是挺危險的！』」

參與比賽的孩子則喃喃自語地學著那評審員說的話。『在科學領域中，有哪一樣研究不危險？』」

一語雙關，道出科學研究的旨趣！其實有心敢嘗試、了解就不難，透過實作驗證書中的道理才是科學。

三、這是一個非常有意思的研究！DIY一下吧！跟我們一起領略“魯伯特王子水滴”的美！

## 捌、參考文獻

- 1.班特利(民 98)。不懂科學會倒大楣(231-237 頁)。台北：天下文化。
- 2.陳偉民(民 97)。教堂的窗玻璃。發現月刊，138。民 98 年 11 月 29 日，取自：  
<http://www.ytlee.org.tw/publish/find/vshow.asp?qry=138#1>
- 3.自然與生活科技(六下)—物質的變化。康軒。
- 4.自然與生活科技(五上)—空氣與燃燒。康軒。
- 5.楊羽靜等(民 98)。轉吧！七彩萬花筒。中華民國第 49 屆中小學科學展覽會。
- 6.ガラスの話。 Retrieved March 6, 2010, from  
<http://hr-inoue.net/zscience/topics/glass/glass.html>
- 7.Thermal Conductivity of some common Materials. Retrieved March 6, 2010, from  
[http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d\\_429.html](http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html)
- 8.自然與生活科技(五下)—熱的傳播與保溫。康軒。
- 9.陳可崗譯(民 97)。十月的天空(332 頁)。台北：天下文化。
- 10.井上悟(民 99)。玻璃的原料是什麼。量子科學雜誌，29，118-119。
- 11.上野健爾等(民 99)。水滴為什麼是圓球形的。量子科學雜誌，29，36-37。
- 12.賴庭筠譯(民 98)。漫畫結構力學入門(121-134 頁)。台北：積木文化。

玖、附錄 表 4.1(續)：玻璃纖維棒徑 vs 圓珠(或水滴)粒徑(mm)

編號	棒徑	粒徑									
33	0.386	2.812	34	0.245	2.274	35	0.300	2.448	36	0.375	2.494
37	0.329	2.457	38	0.362	2.367	39	0.353	2.511	40	0.239	2.217
41	0.219	2.080	42	0.230	2.087	43	0.117	1.905	44	0.195	2.063
45	0.509	2.681	46	0.519	2.608	47	0.402	2.504	48	0.181	2.061
49	0.164	1.944	50	0.302	2.280	51	0.309	2.407	52	0.123	1.676
53	0.283	2.180	54	0.351	2.371	55	0.231	2.301	56	0.424	2.447
57	0.416	2.603	58	0.481	2.710	59	0.523	2.726	60	0.681	2.763
61	0.768	3.106	62	1.069	3.381	63	0.561	2.819	64	0.875	3.109
65	0.103	1.414	66	0.110	1.508	67	0.110	1.588	68	0.179	1.895
69	0.179	1.844	70	0.171	2.088	71	0.173	2.004	72	0.160	2.195
73	0.158	1.765	74	0.257	2.234	75	0.202	1.898	76	0.223	1.999
77	0.222	1.949	78	0.188	1.977	79	0.164	2.037	80	0.173	1.958
81	0.159	1.980	82	0.212	2.252	83	0.096	2.020	84	0.158	1.938
85	0.214	2.139	86	0.139	1.686	87	0.163	1.846	88	0.113	1.758
89	0.113	2.136	90	0.333	2.399	91	0.398	2.534	92	0.127	1.592
93	0.115	1.748	94	0.146	1.860	95	0.098	1.623	96	0.139	1.758
97	0.151	1.683	98	0.224	2.259	99	0.071	1.276	100	0.174	2.257
101	0.217	1.874	102	0.217	2.174	103	0.543	2.874	104	0.543	2.693
105	0.951	3.169	106	0.527	2.450	107	0.543	2.616	108	0.825	3.201
109	0.276	2.242	110	0.825	3.344	111	0.482	2.581	112	0.169	2.530
113	0.357	2.713	114	0.500	2.609	115	0.774	2.916	116	0.684	2.794
117	0.673	2.786	118	0.509	2.547	119	0.446	2.422	120	0.365	2.246
121	0.415	2.558	122	0.332	2.454	123	0.288	2.325	124	0.276	2.173
125	0.283	2.045	126	0.604	2.903	127	0.903	3.093	128	0.694	2.901
129	0.511	2.537	130	0.511	2.595	131	0.778	2.865	132	0.511	2.852
133	0.521	3.274	134	0.521	2.963	135	1.254	3.448	136	0.786	3.026
137	0.768	3.071	138	0.319	2.349	139	0.283	2.199	140	0.288	2.262
141	0.397	2.320	142	0.392	2.269	143	0.314	2.234	144	0.236	2.174
145	0.236	1.941	146	0.529	2.637	147	0.485	2.454	148	0.313	2.169
149	0.314	2.134	150	0.332	2.398	151	1.475	3.223	152	1.035	3.049
153	1.035	2.967	154	0.711	2.893	155	0.724	2.831	156	0.717	2.693
157	0.192	1.779	158	0.198	2.030	159	0.748	2.995	160	0.548	2.713
161	0.656	2.831	162	1.043	2.994	163	1.003	3.142	164	1.021	3.191
165	0.909	3.062	166	0.922	3.236	167	0.925	3.170	168	0.726	2.802
169	0.872	2.895	170	0.877	3.010	171	1.106	2.967	172	0.888	2.964
173	0.702	2.823	174	0.602	2.751	175	0.562	2.791	176	0.600	2.524
177	0.716	2.717	178	0.522	2.703	179	0.507	2.718	180	0.584	2.708
181	0.840	2.898	182	0.667	2.882	183	0.792	3.012	184	0.602	2.738
185	1.117	3.264	186	0.936	2.963	187	0.612	2.691	188	0.465	2.398
189	0.482	2.222	190	0.568	2.371	191	0.817	2.527	192	0.793	2.852
193	0.755	2.989	194	0.917	3.271	195	0.955	3.058	196	0.946	3.422

## **【評語】 080116**

1. 研究中可加入一些基本物理原理的探討。
2. 題材的討論宜再深入。
3. 建議增加些文獻的閱讀與比較分析。