

# 2010年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

編號：100013-08

## 作品名稱

極速火龍－利用軟片顯影法觀測氫爆的火焰傳遞

## 得獎獎項

工程學科大會獎二等獎

莫斯科正選代表:2010年莫斯科國際科學博覽會

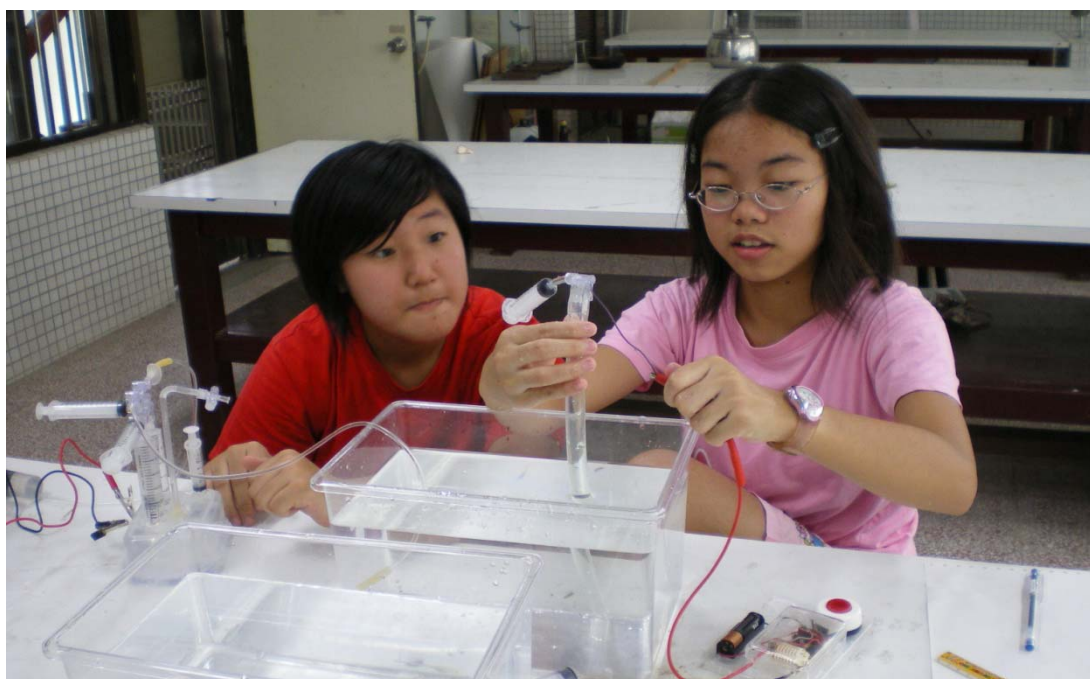
學校名稱：臺北市立東湖國民中學

作者姓名：謝宜臻、徐芳菲

指導老師：謝輝龍

關鍵詞：觀測火焰傳遞、火焰模型、氫爆火焰速率

## 作者簡介



圖：宜臻(右)與芳菲(左)，國一時成功研製「氫爆安全反應器」，提供實驗教具的參考。

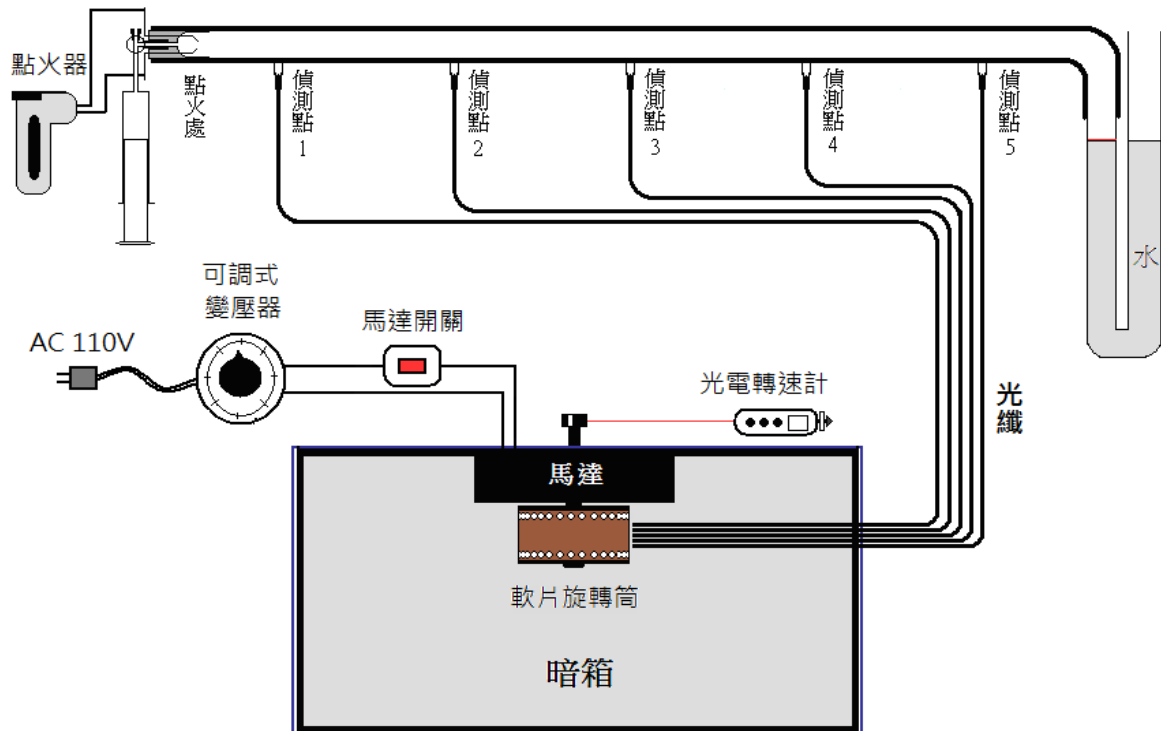
我是宜臻，平常的休閒活動有看課外書、電視、聽音樂等等。活潑好動的我，喜歡到處探索；充滿好奇心的我，喜歡觀察與實驗，在實驗過程中，歷經了一次次的失敗，都是考驗解決問題的能力，我不但學到很多新知識，也從中獲得很大的信心與成就感。一起做科展的夥伴更成為很要好的朋友，真的很高興能擁有這樣美好的經驗。

我是芳菲，平常的休閒活動是看課外書、電視、彈鋼琴等等。最喜歡的科目是生物和化學。在美妙的因緣下，有幸參加學校的自然科學活動。我喜歡思考問題，遇到難題時，我會一步步找到解答，或請教老師和同學。在實驗的過程中，雖然經歷一次次的失敗，但是老師總是鼓勵我和同伴克服困難，設法解決問題。經過不斷的努力和改進，我不但學到很多新知識，也從中獲得很大的成就感。真高興能在求學生涯中，擁有這樣美好的經驗。

## 摘要

用塑膠軟管作為氫爆安全反應器，從封閉端點燃氫氧預混氣，管中火焰傳遞快速，肉眼難以觀察，因此研製「氣爆顯影記錄器」來觀測，如下圖，光纖導引偵測點的火光至暗箱，記錄於高速旋轉的軟片，從光電轉速計讀取轉速，軟片沖洗後量測各顯影間距，可得火焰位置與時間的關係圖，量測時間最小刻度可達 2.2 微秒。

解讀軟片的顯影，得知氫爆初期，火焰加速傳遞，大部分在 25cm 位置左右，火焰的速率出現急速飆升(爆燃轉變為爆震)，而且火光亮度也急速升高，有時火焰速率出現飆升過高，再回降趨於穩定值的現象，在 50 cm 位置左右，火焰進入等速傳遞階段，此階段有穩定的火焰模型，火焰頂端的亮度最高，往後亮度遞減。

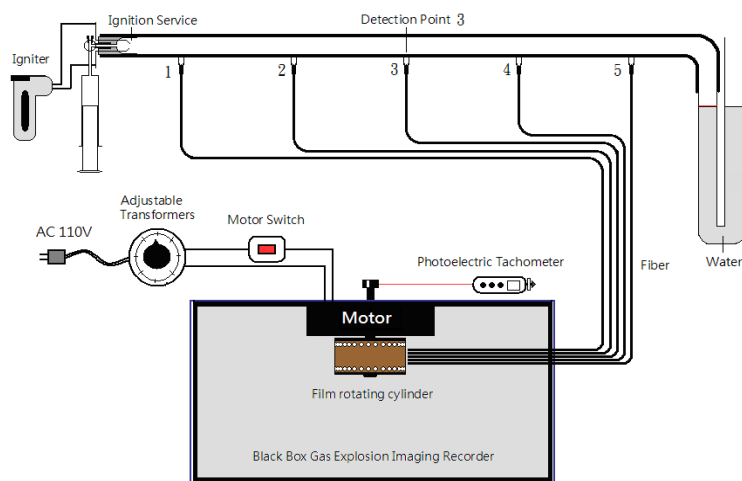


「氣爆顯影記錄器」的結構示意圖

## Abstract

Plastic tube was originally used as a safe reactor of hydrogen explosion .Without any facility, when the gas of premixed hydrogen and oxygen was lighted from a closed end, it was difficult for us to observe how the flame passed. Therefore, we invented "Gas Explosion Imaging Recorder". The picture is as follows.The flame through the fiber is guided to the film in the black box and is recorded in high-speed rotation of the film. When we read the speed from the photoelectric tachometer and measure the distance of each imaging space, we can find the diagram between the flame location and time, while the time measurement of the smallest scale of up to 2.2 microseconds.

From the imaging film of hydrogen explosion, the initial flame will move with acceleration. When the flame is located on 25cm, not only the rate of flame speeds up rapidly( the time of deflagration into detonation ), but the brightness of fire will increase intensely and rapidly. Furthermore, sometimes the flame soaring rate seemstoo high, but it comes back quickly to stabilization. About 50 cm in position, the flame proceeds into the isokinetic phase. At this stage appears a stable flame model,the maximum brightness of the flame front and the subsequent decrease brightness.



The Schematic of Gas Explosion Imaging Recorder

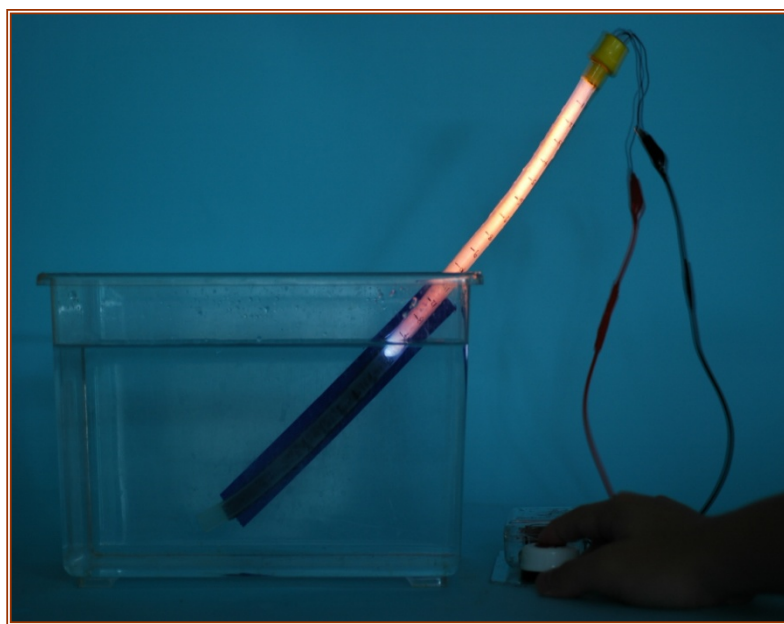
## 壹、前言

### 一、研究動機

國三下康軒課本的電解水實驗，步驟(7)為點燃收集在試管中的氫氣，觀察氫爆火焰及其爆鳴聲；國二下康軒課本的化學計量，有介紹氫氣的反應計量，這些是我們對氫爆及其化學反應的基本認識。

曾經以透明塑膠軟管為材質，自製一個能操作定量實驗的氫爆安全教具，如下圖(1)，軟管上端的管口封閉，下端管口浸入水中，將氫與氧導入管中混合，從上端點火引起氫爆，出現瞬間火光與低沉爆鳴聲，由於火焰傳遞非常快，肉眼無法直接觀測，心中存在一個想法與問題，觀測火焰傳遞，有助於了解管中瞬間氫爆的過程，要用甚麼方法觀測火焰的傳遞呢？

有一天在地球科學，老師展示一張北極星為中心的星軌照片，證明地球的轉動，意外喜獲火焰觀測法的靈感，在好奇心的驅使下，我們嘗試應用國中所學知識與技能，研製氫爆的火焰觀測器，以考驗自己的能力及滿足自己的好奇心。



圖(1)：昏暗中 0.5 秒快門拍攝氫爆的畫面，氫爆響度約 75 分貝。

## 二、研究目的

- (一) 研製「氣爆顯影記錄器」，並以自製儀器希望達成以下三項目的。
- (二) 測定管中氫爆火焰的傳遞速率。
- (三) 建立管中氫爆火焰的傳遞模式。
- (四) 建立管中氫爆火焰的模型。

## 三、文獻探討 (參考資料三第 64 頁)

- (一) 爆燃：是一種帶有壓力波的燃燒，當火焰陣面後邊界有約束或障礙，燃燒產物建立起一定的壓力，波陣面兩側就建立起一個壓力差，這就是壓力波。由於這個壓力波傳播速率比火焰陣面快，行進在火焰陣面前，稱為前驅壓力波。爆燃是由前驅壓力波和隨後的火焰陣面構成。
- (二) 爆震：如果爆燃的後邊界約束增強，壓力波強度增強，火焰加速，直到火焰陣面追趕上前驅壓力波陣面，火焰陣面和壓力陣面合二為一，成為一個帶化學反應區的壓力波，這就是爆震波。
- (三) 過驅爆震波：當爆燃波經由火焰加速至爆震波形成的時候通常會產生區域爆炸，此一區域爆炸除了產生較亮的火焰以外，還會產生一個超越C-J速度的一爆震波稱為過驅爆震波(over-driven detonation)，此一爆震波會持續減速直到 C-J 為止，但是減速的相當快。(在 C-J 點可說是一個最為穩定的狀態)

## 貳、研究設備及器材

雷射光電式/接觸式轉速計（型號：DT-2230，精確度  $\pm 0.1\%$ ）、高速馬達（RPM25000）、可調式變壓器（0~140V）、壓克力管（ $\Phi 80\text{mm}$ ，厚度 3mm，透光率 97%）、黑白軟片(柯達 ISO 400 & 3200)、代工車製旋轉盤、光纖、木板、黑色海綿條、黑色膠帶、軟質透明塑膠管（3分，7m）、三通管、注射筒、導線、單發點火器、黑色噴漆罐、熱熔膠槍、熱熔膠、大水盆（ $\Phi 63\text{cm}$ ）、螺絲起子、螺絲、沖洗罐、寶特瓶、厚質塑膠袋、塑膠管、量液瓶（1000mL）、玻璃棒、燒杯、滴管、量筒、電鑽、砂布、鋸子、氫氣、氧氣、二氧化碳、氮氣、氫氣、顯影液、急制液、定影液、海波清除液。

## 參、研究過程與方法

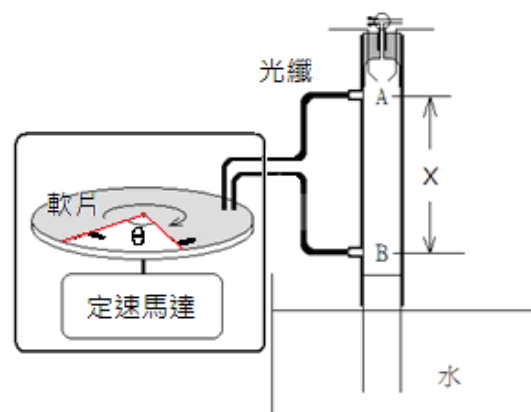
### 一、研製「氣爆顯影記錄器」

#### （一）靈感來源和儀器構思

有一天地科老師以北極星為中心的星軌照片，證明地球的轉動，如下圖(2)。從星軌的圓心角  $\theta$  與地球的轉動週期，可獲知照片在拍攝時，軟片的「曝光時間」為  $(\theta/360^\circ) \times 24$  小時，經老師講解後，喜獲研製「氣爆顯影記錄器」的靈感。



圖(2)：顯影記錄器的靈感源自圖中星軌。  
取自 <http://polaris.why3s.net/>



圖(3)：第一代記錄器的概念圖。

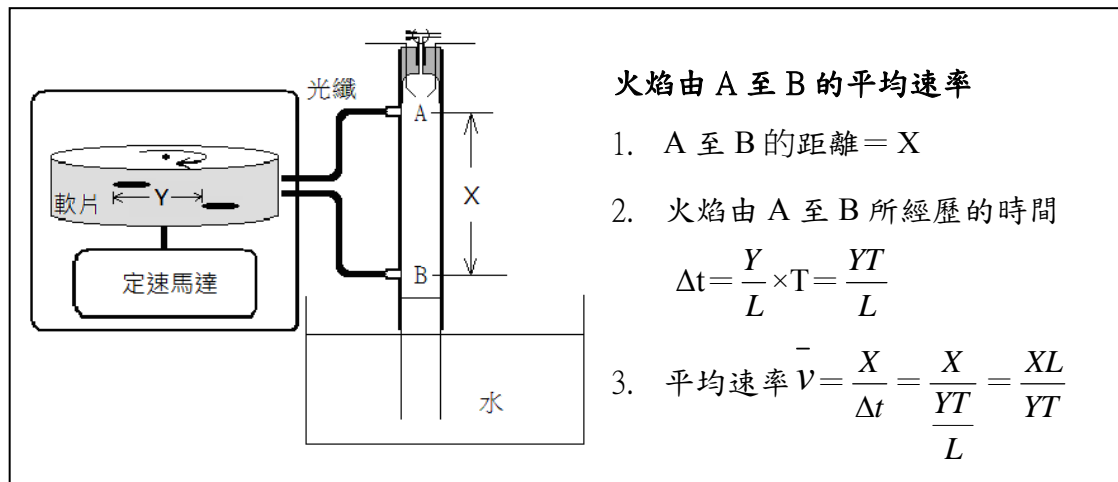


## 1. 第一代記錄器

如上圖(3)，氫爆火焰經過 A 和 B 時，利用光纖的導光性，將光導入暗箱，先後投射在已知轉動週期的圓形感光板上，軟片顯影後，量測兩顯影軌跡的前沿與圓心的夾角  $\theta$ ，即可獲知火焰由 A 至 B 所經歷的時間。

## 2. 第二代記錄器

因應一般市售軟片是長條形，測定法改良成第二代，軟片環繞旋轉盤側邊，如下圖(4)。氫爆火焰先後達 A、B 偵測點，光纖導引火光至高速旋轉軟片上，軟片沖洗顯影，從兩顯影軌跡前沿的間距  $Y$ 、軟片周長  $L$  及馬達轉動週期  $T$ ，可獲知火焰由 A 至 B 所經歷的時間。

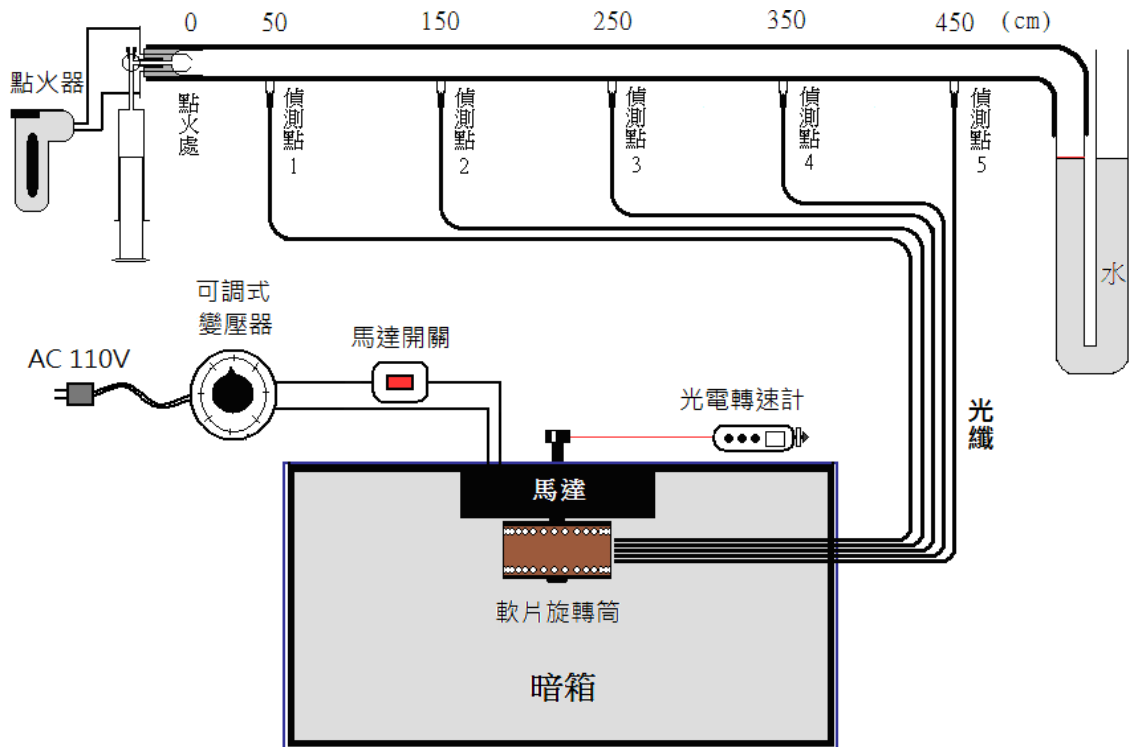


圖(4)：第二代記錄器的概念圖與平均速率的推導。



## (二) 動手組合「氣爆顯影記錄器」

從構思、設計、評估、蒐集、組合、測試與改良等作業，終於完成自製儀器，如下圖(5)。



圖(5)：「氣爆顯影記錄器」的組合示意圖。

### 1. 氫爆安全反應器（軟質塑膠管）

- (1) 3 分軟質透明管 7 公尺長，如上圖(5)，左端封閉，右端彎成 U 形管，調整左右管內水面等高，控制預混氣初始壓力等於大氣壓，管內盛裝預混氣約 380mL。
- (2) 封閉端附三通管與點火器，導入混合氣與點火，如下圖(6)。
- (3) 管道上設置 1~5 號偵測點，依序距離點火處 50、150、250、350、450 cm。

- (4) 為增加光纖的入光量，改良於偵測點管道上貼一層反光紙，如下圖(7)。
- (5) 管外噴黑漆，以黑膠帶包覆，隔絕外界光進入管內。



圖(6)：封閉端的結構。



圖(7)：偵測點貼反光紙增加入光量。

## 2. 光纖

- (1) 光纖( $\Phi 1\text{mm}$ ) 5 條，長度皆 2 m。
- (2) 利用訊號接頭與中間接頭，分別安裝於光纖和偵測點上，如下圖(8)。
- (3) 光纖與偵測點可活動式拆卸或結合，如下圖(9)。



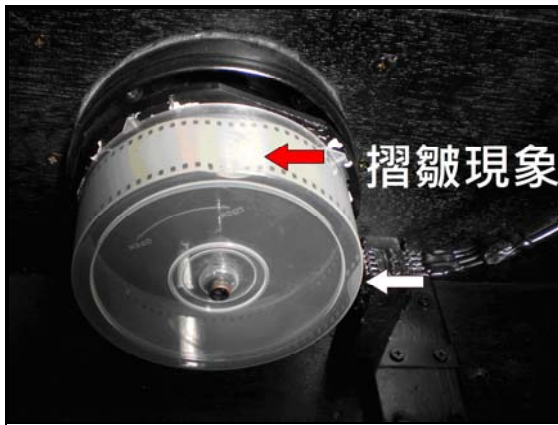
圖(8)：光纖皆附訊號接頭。



圖(9)：光纖與偵測點的拆卸或結合。

### 3. 旋轉筒

- (1) 第一代使用布丁筒，但布丁筒底部的直徑較上緣直徑小一些，軟片旋轉時易產生摺皺；而且布丁筒的材質軟，旋轉時穩定性差，容易被光纖刮傷，如下圖(10)。
- (2) 第二代則請人代工車製旋轉筒，以壓克力管、鋁製轉盤與盒蓋組合，如下圖(11)。
- (3) 軟片捲圓置入筒內，軟片接合處曝光留影，拉直軟片量測接合處的顯影界線，取得軟片周長=23.58cm。



圖(10)：第一代布丁筒製的旋轉筒。



圖(11)：第二代旋轉筒。

### 4. 馬達與轉速計

- (1) 詢購一顆中古高轉速馬達 (110V, RPM23000)，作為軟片旋轉筒的動力源。
- (2) 設置馬達開關與可調式變壓器 (0~140V)，以低電壓啟動馬達，再逐漸升高電壓，防止瞬間扭力過大，損壞旋轉筒，如下圖(12)。
- (3) 馬達軸心上貼反光紙，利用光電轉速計偵測轉速，如下圖(13)。



圖(12)：可調式變壓器。



圖(13)：光電轉速計偵測馬達轉速。

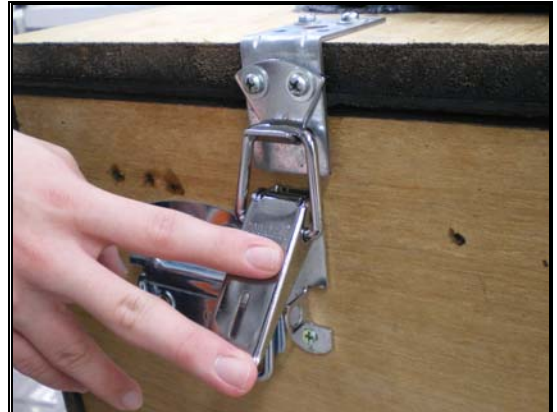
### 5. 製作暗箱以取代暗房

(1)木板製做木箱與箱蓋，箱內噴上黑漆，箱蓋上圓形孔連結黑色布質袖管，  
如圖(14)。

(2)利用扣環扣緊箱蓋，防止外界光線進入箱內，，如下圖(15)。



圖(14)：暗箱與箱蓋。

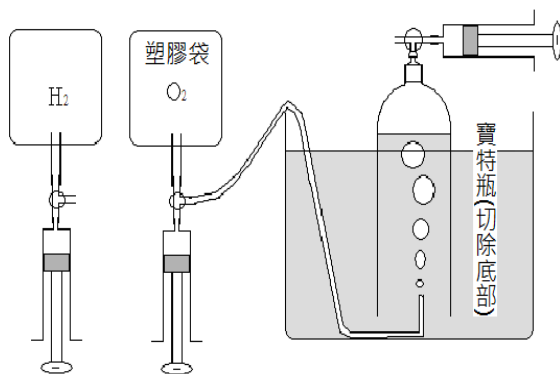


圖(15)：扣環扣緊箱蓋，防止漏光。

### (三) 預混氣配製器的製作與預混氣的調配

#### (一) 實驗步驟：

1. 切除寶特瓶底部，將寶特瓶固定在水槽中，將 25mL 注射筒前端 2 公分切下，塞入寶特瓶口，三通管套緊注射口，如下圖(16)。
2. 取高厚度塑膠袋數個，以封口機加工製作為氣體容器，如圖(17)，將小鋼瓶中實驗氣體導入塑膠袋中。
3. 依實驗所需預混氣的組成比例，計算各氣體含量，以注射筒抽取塑膠袋中氣體（定溫、定壓取量），再經導管依序注入寶特瓶中，配製所需預混氣。



圖(16)：預混氣配製器示意圖。



圖(17)：預混氣配製器。

### (四) 測試儀器與解決問題

#### 1. 檢視暗箱是否漏光？

光纖連接偵測點，安裝軟片，不啟動馬達也不點火，5 分鐘後取出軟片沖洗，檢視軟片是否因漏光而顯影。

(1) 檢視結果：軟片有許多顯影，如下圖(18)，干擾判讀。

(2) 判斷原因：偵測點處熱熔膠呈半透明狀，外界光從此處進入光纖，如下圖(19)。

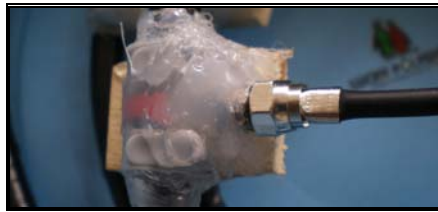


(3) 解決問題：偵測點處噴上黑漆，再包覆一層黑色膠帶。

(4) 重新測試：軟片沒有顯影點，解決了漏光問題。



圖(18)：操作安裝與拆卸軟片時的轉動，外界光從光纖進來的混亂顯影。



圖(19)：熱熔膠呈半透明狀，導致漏光。

## 2. 檢視光纖導光是否良好？

管中注入氫氧預混氣，光纖連接偵測點，安裝軟片，不啟動馬達，點火氣爆，取出軟片沖洗，檢視軟片是否有 5 個並排顯影點。

(1) 檢視結果：4 個顯影點，如下圖(20)，缺少 1 個顯影點。

(2) 判斷原因：偵測點 1 有異物遮蔽。

(3) 解決問題：拆卸偵測點 1，清除遮蔽物，再以熱熔膠固定，噴上多層黑色漆。

(4) 重新測試：軟片呈現 5 個並排黑點，解決了遮蔽問題。



圖(20)：缺少 1 個顯影點。

## (五)光線強弱對顯影區大小的影響

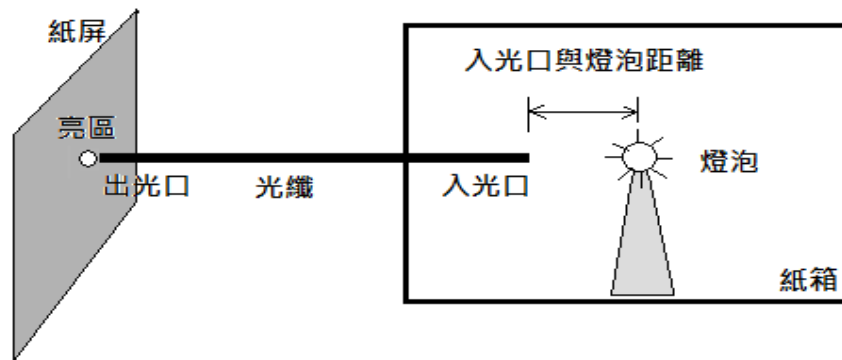
### 1. 實驗步驟：

(1) 固定光纖與紙屏相距 5mm，入光口在紙箱內，箱內附燈泡一盞，如圖 (21)。

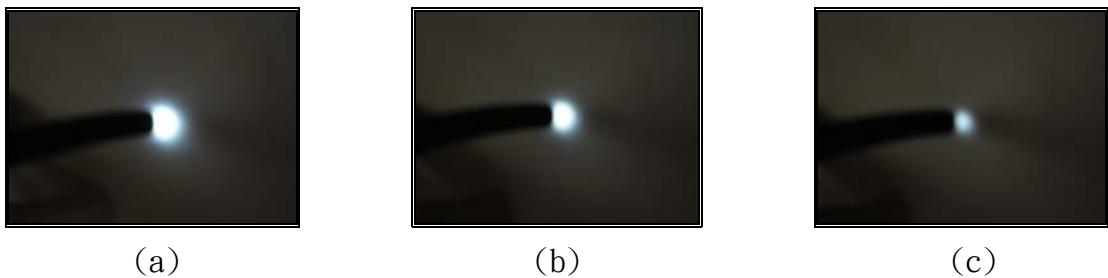
(2) 調整光纖與燈泡距離 5 cm、20cm、80cm，觀察紙屏上亮區變化，如圖(22)。

2. 實驗結果：入光口與燈泡距離越近，光線越強，結果明亮區範圍越大且越亮。

3. 實驗推論：火焰的光線越強，軟片長條狀的顯影區越粗、顯影區顏色越深。



圖(21)：實驗裝置示意圖。



圖(22)：入光口與燈泡距離 (a) 5cm，(b) 20cm，(c) 80cm，紙屏亮區大小不同。



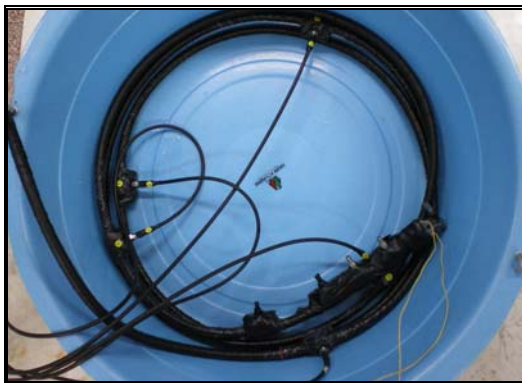
## 二、實驗操作流程

### (一) 配製預混氣

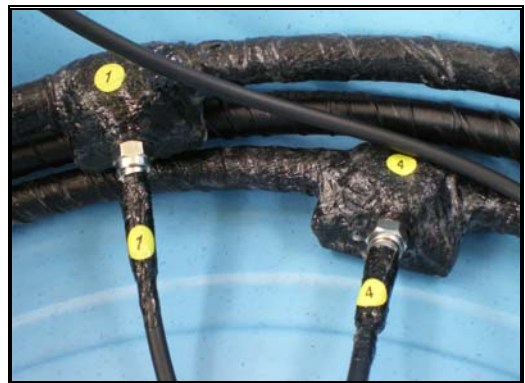
1. 將實驗氣體從鋼瓶中導入塑膠袋，一個塑膠袋盛裝一種氣體。
2. 以注射筒將塑膠袋中的實驗氣體，經導管依序注入預混氣配製器中，配製所需預混氣。

### (二) 預混氣注入管內、光纖連結偵測點

1. 塑膠管末端連接水龍頭，注入自來水排除管內空氣。
2. 注射筒抽取寶特瓶中預混氣，經導管注入塑膠管內，利用樓梯高低差，提高點火端，放低塑膠管末端，使管內的水全部流到末端 U 形管內液面。
3. 軟管環繞於水盆內，利用電湯匙或冰塊控制水溫在  $20^{\circ}\text{C}$ ，如下圖(23)。
4. 調整 U 形管內左右水面等高，再將 U 形管置入黑布袋中，防止光線進入管內。
5. 按編號將光纖分別連結各偵測點，如下圖(24)。



圖(23)：塑膠管環繞於水盆內。



圖(24)：按編號連結光纖與偵測點。

### (三) 暗箱中摸黑操作—裁剪軟片並安裝於旋轉筒內

1. 暗箱中放置沖洗罐、剪刀、軟片盒、軟片量尺、塑膠套環，如下圖(25)。
2. 闔上箱蓋扣緊環扣，雙手依序伸入暗箱，如下圖(26)。
3. 摸黑抽出軟片，藉助軟片量尺剪取軟片長，剩餘軟片再放回軟片盒中。
4. 軟片捲曲內側面朝外，捲繞成圓置入旋轉筒，套環再置入筒內，使底片緊貼筒壁。
5. 闔上旋轉筒鋁蓋並鎖緊，雙手移出暗箱。



圖(25)：暗箱中放置沖洗罐、剪刀、軟片盒、軟片量尺、塑膠套環。



圖(26)：雙手伸入暗箱摸黑操作。

### (四) 啟動馬達、測轉速、點火、拆卸軟片

1. 連接點火裝置，啟動馬達與光電轉速計，逐步增加電壓，當轉速穩定時點火，同時鬆開轉速計按鈕，關閉電源，讀取轉速值，並記錄之。
2. 雙手伸入暗箱中摸黑操作，鬆開鋁蓋，將軟片捲入捲片器中，如圖(27)，放入沖洗罐，鎖緊蓋子，如圖(28)，雙手移出暗箱，打開箱蓋，取出沖洗罐，依照軟片沖洗法操作。（沖洗罐可累積4條軟片，再一次沖洗。）



圖(27)：軟片與捲片器。



圖(28)：暗箱中鎖緊蓋子，防止曝光。

### (五) 軟片沖洗步驟

1. 顯影：顯影液 (1+19) 600mL 倒入沖洗罐，搖晃 15 分鐘後倒出藥水並回收。
2. 急制：急制液 (1+19) 600mL 倒入沖洗罐，搖晃 30 秒後倒出藥水並回收。
3. 定影：定影液 (1+4) 600mL 倒入沖洗罐，搖晃 8 分鐘後倒出藥水並回收。
4. 水洗：水管插入沖洗罐內，注入活水沖洗殘留藥劑，15 分鐘後倒出清水。
5. 晾乾：水洗後取出軟片並編號貼上標籤，用洗衣夾吊掛陰涼處自然晾乾。



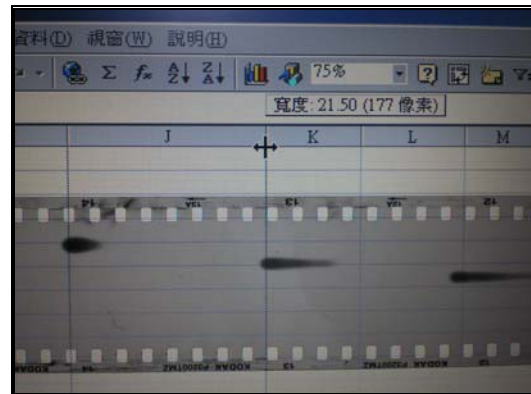
圖(29)：藥水倒入沖洗罐。



圖(30)：搖晃使藥水濃度均勻。

## (六) 標定軟片顯影的位置座標

1. 開啟電腦 Excel，以膠帶將軟片沿著水平線貼在螢幕上，如下圖(31)。
2. 拖曳顯影前端若呈圓頭狀，則其圓心點定為顯影點；但是拖曳顯影前端非圓頭狀，則最前端定為顯影點。
3. 滑鼠移動欄位線，將欄位線置於顯影點上，利用欄位寬度的顯示功能，讀取顯影點的間距(單位：像素)，標定第一顯影點的位置座標為 0，然後依序標定各顯影點的位置座標，如下圖(32)。

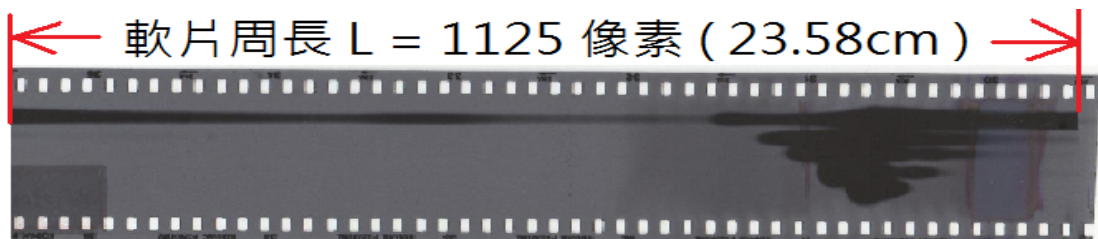


圖(31)：透明膠帶將軟片貼在螢幕上。 圖(32)：用欄位寬度量測顯影間距。

## (七) 顯影的位置座標轉換為時間座標

將各顯影的位置座標、軟片周長（1125 像素）、馬達轉速值，輸入 Excel 中轉換為時間座標，程式設定如下：時間座標（毫秒）=（位置座標 / 1125）×（60 / rpm）× 1000

【註解】：軟片置入旋轉筒內，經測量軟片周長=1125 像素，量測法如下圖(33)。



圖(33)：顯影恰好位於軟片的銜接處，量測顯影的分割處即為軟片周長。

## (八) 繪製火焰的 x-t 圖

以偵測點的位置座標 (公尺) 對應時間座標 (毫秒)，繪製火焰陣面的位置與時間的關係圖。

## 三、尋找適當轉速，確保軟片不重複曝光

馬達轉速越快，顯影間距越大，若轉速過快，軟片將出現重複曝光，造成顯影間距的量測困擾，故測定前須掌握轉速與顯影間距的變化，調節適當轉速，確保不重複曝光。

### (一) 實驗變因：

1. 控制變因：偵測點位置 (50、150、250、350、450 cm)、初始壓力(常壓)、  
初始溫度(20°C)、預混氣組成 ( $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ )
2. 操縱變因：馬達轉速

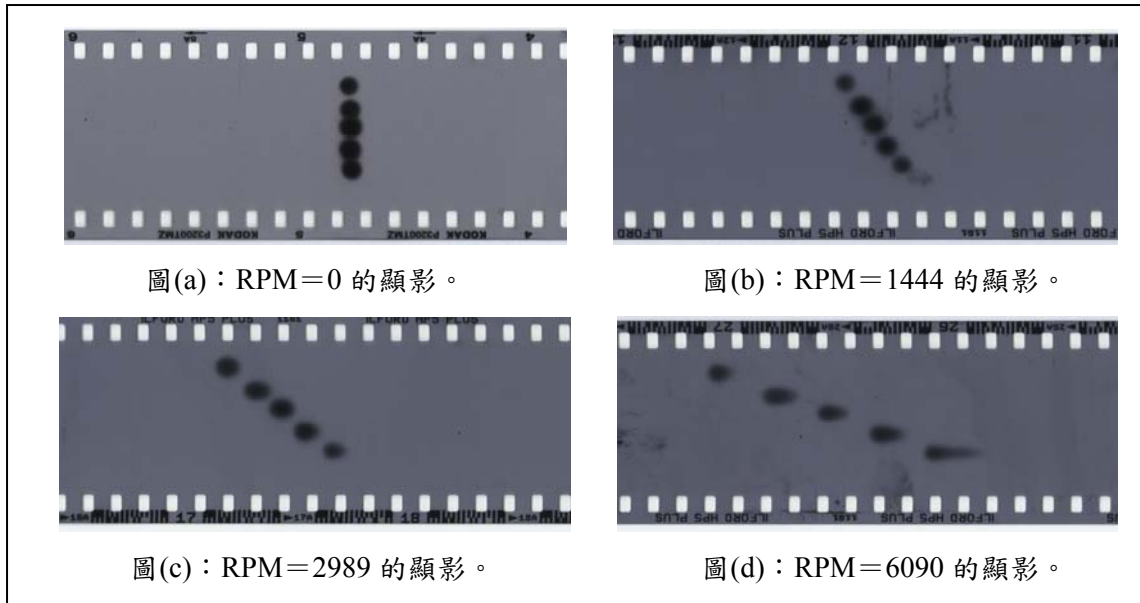
### (二) 實驗結果：

表(1)：馬達轉速與顯影間距的關係

實驗別	預混氣組成【註解】	馬達轉速(RPM)	顯影間距的總長(像素)
實驗一	( $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ )	0	0
實驗二	( $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ )	1444	44
實驗三	( $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ )	2989	85
實驗四	( $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ )	6090	173

【註解】： $(2\text{H}_2 + \text{O}_2)$  表示預混氣中氫、氧體積比 2：1。





圖(34)：馬達轉速與顯影間距的變化。

說明：顯影間距的長與馬達轉速成正比，由於軟片周長 1125 像素，軟片要出現重複曝光，馬達 RPM 要超過 39602。

#### 四、觀測管道 50 ~ 450 cm 位置的火焰傳遞速率

##### (一) 實驗變因

1. 控制變因：偵測點位置 ( 50、150、250、350、450 cm )、初始壓力 ( 常壓 )、初始溫度 ( 20°C )
2. 操縱變因：預混氣組成

##### (二) 實驗步驟：

1. 實驗規劃如下表(2)。
2. 依實驗一的預混氣組成，取氫 180mL、氧 270mL，依序導入預混氣配製瓶。
3. 依前述「二、實驗操作流程」進行測定。
4. 實驗二至實驗五，依預混氣組成取量，配製預混氣，後續操作重覆步驟 (3)。

表(2)：常壓下取量配製預混氣

實驗別	預混氣組成 【註解】	實驗取量 ( mL )	
		H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
實驗一	(2H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> ) + 2H <sub>2</sub>	360	90
實驗二	(2H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> ) + H <sub>2</sub>	330	110
實驗三	(2H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> )	300	150
實驗四	(2H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> ) + O <sub>2</sub>	220	220
實驗五	(2H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> ) + 2O <sub>2</sub>	180	270

【註解】：(2H<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>) + 2H<sub>2</sub> 表示預混氣中氫、氧體積比為 4：1；預混氣燃燒時，氫過量 2 單位體積。

## 五、觀測初期火焰的傳遞

### (一) 實驗變因：

1. 控制變因：偵測點位置(5、10、15、25、35、50 cm)、初始壓力(常壓)  
初始溫度(20°C)
2. 操縱變因：預混氣的組成

### (二) 實驗步驟：

1. 實驗規劃如下表(3)
2. 依實驗一內容，取氫 330mL、氧 110mL，依序導入預混氣配製瓶中。
3. 依前述「二、實驗操作流程」進行測定。
4. 實驗二，依預混氣組成取量，配製預混氣，後續操作重覆步驟 3。

表(3):預混氣的取量配製

實驗別	預混氣組成	取量 ( mL )	
		H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
實驗一	(2H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> ) + H <sub>2</sub>	330	110
實驗二	(2H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> ) + O <sub>2</sub>	220	220

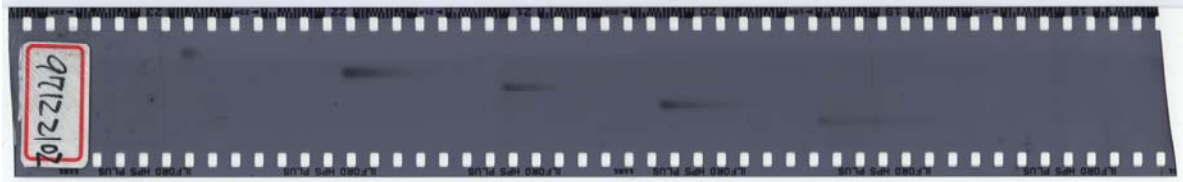


圖(35)：6 個偵測點距離點火處依序為 5、10、15、25、35、50 cm。



## 肆、實驗結果

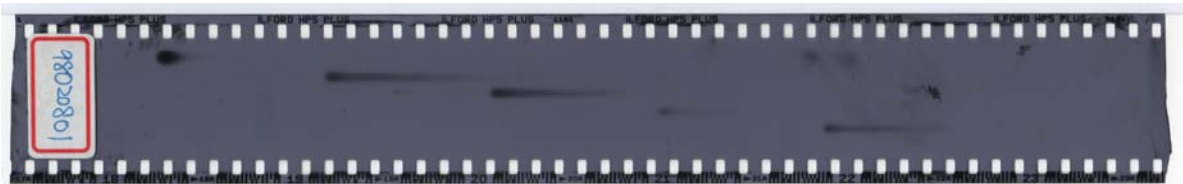
### 一、觀測 50 ~ 450 cm 區間位置的火焰傳遞



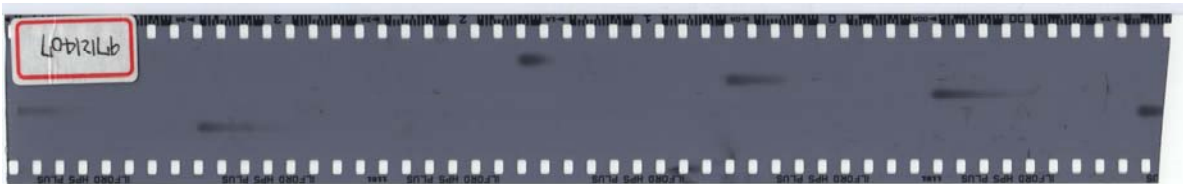
圖(a)：預混氣 ( $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ ) +  $2\text{H}_2$ ，RPM=25615，軟片 ISO 400。



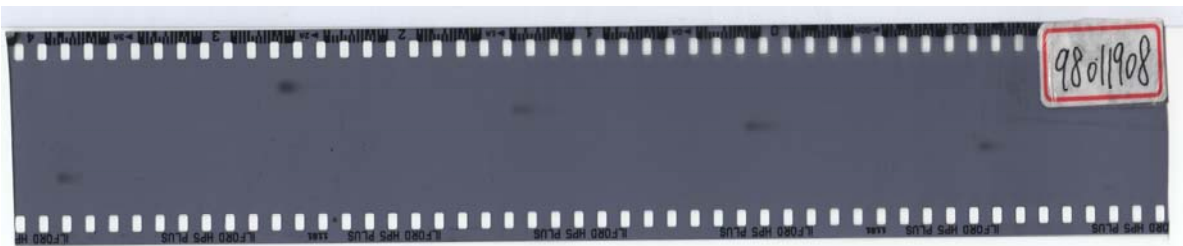
圖(b)：預混氣 ( $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ ) +  $\text{H}_2$ ，RPM=25055，軟片 ISO 400。



圖(c)：預混氣 ( $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ )，RPM=24010，軟片 ISO 400。



圖(d)：預混氣 ( $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ ) +  $\text{O}_2$ ，RPM=24306，軟片 ISO 400。

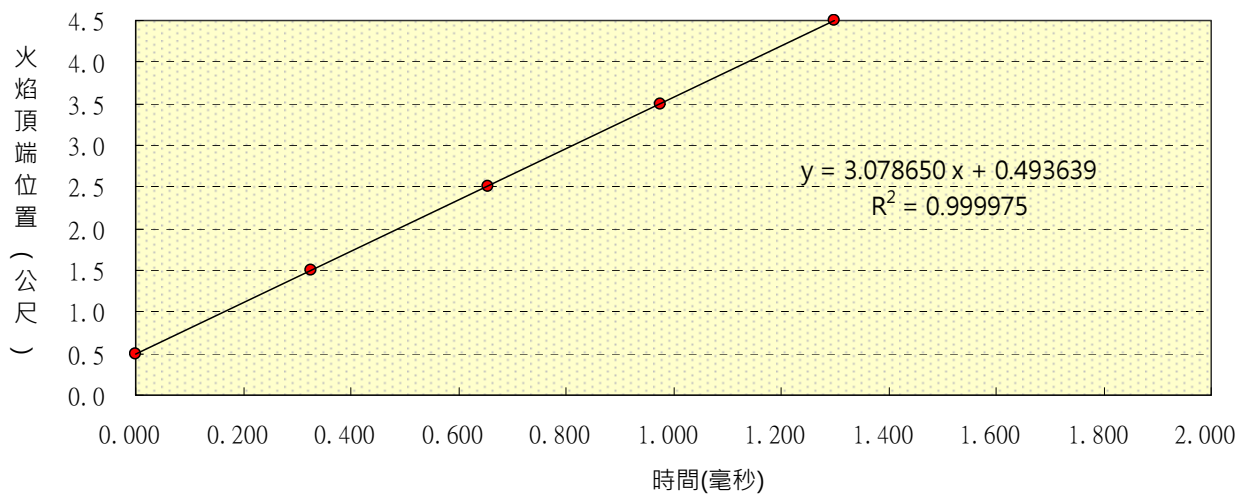


圖(e)：預混氣 ( $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ ) +  $2\text{O}_2$ ，RPM=24534，軟片 ISO 400。

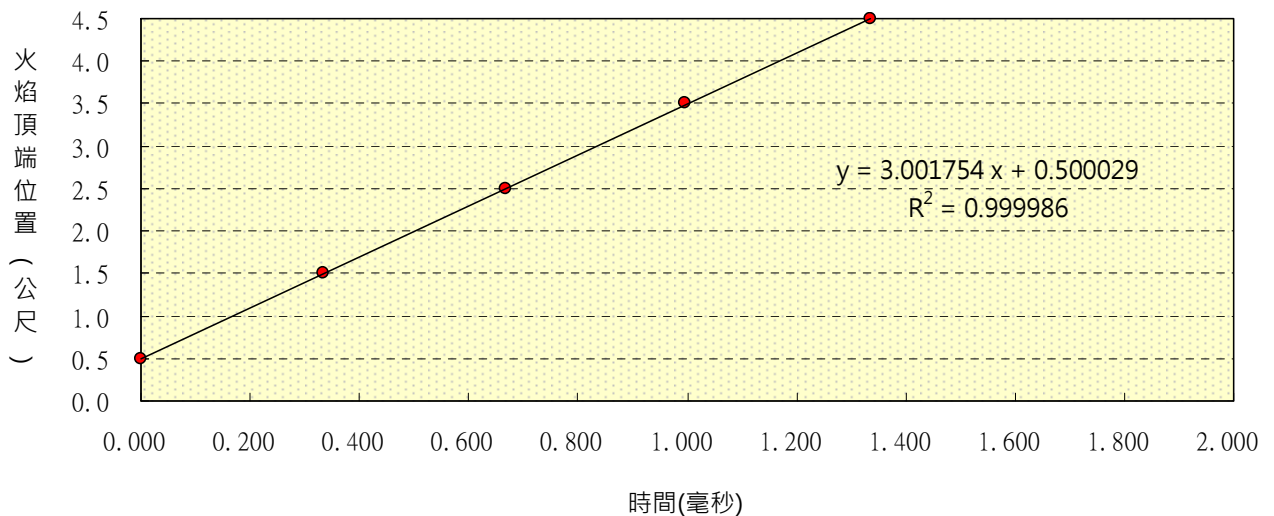
圖(36)：氫氧混合比例不同的顯影軟片。

表(4)：氫氧預混氣在不同的混合比例下，火焰頂端位置與時間的關係。

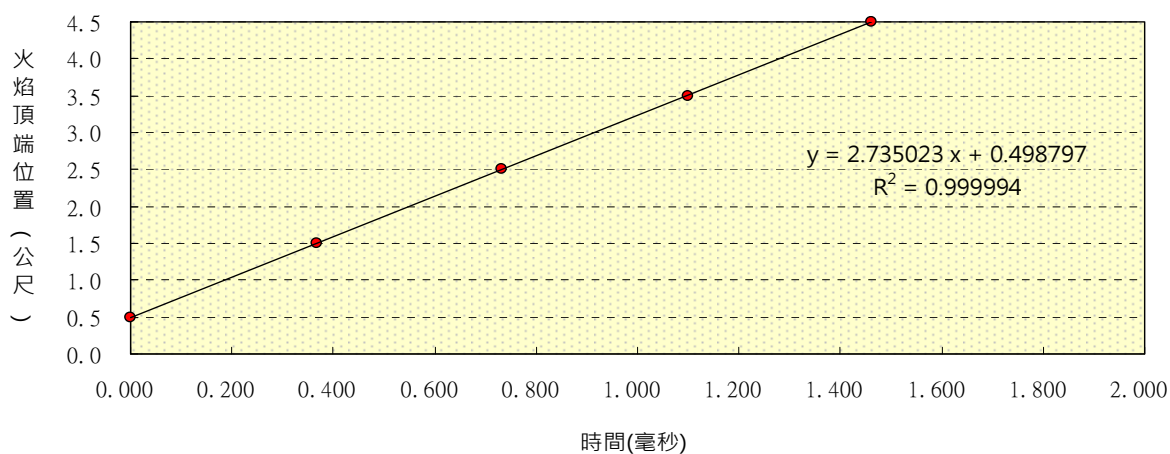
預混氣的組成	軟片號碼	火焰頂端的位置與時間(毫秒)				
		0.5m	1.5m	2.5m	3.5m	4.5m
$(2\text{H}_2 + \text{O}_2) + 2\text{H}_2$	97122102	0	0.327	0.656	0.977	1.299
$(2\text{H}_2 + \text{O}_2) + \text{H}_2$	98011902	0	0.334	0.666	0.996	1.335
$(2\text{H}_2 + \text{O}_2)$	98020801	0	0.367	0.731	1.100	1.462
$(2\text{H}_2 + \text{O}_2) + \text{O}_2$	97121407	0	0.445	0.893	1.336	1.775
$(2\text{H}_2 + \text{O}_2) + 2\text{O}_2$	98011908	0	0.502	0.989	1.489	1.985



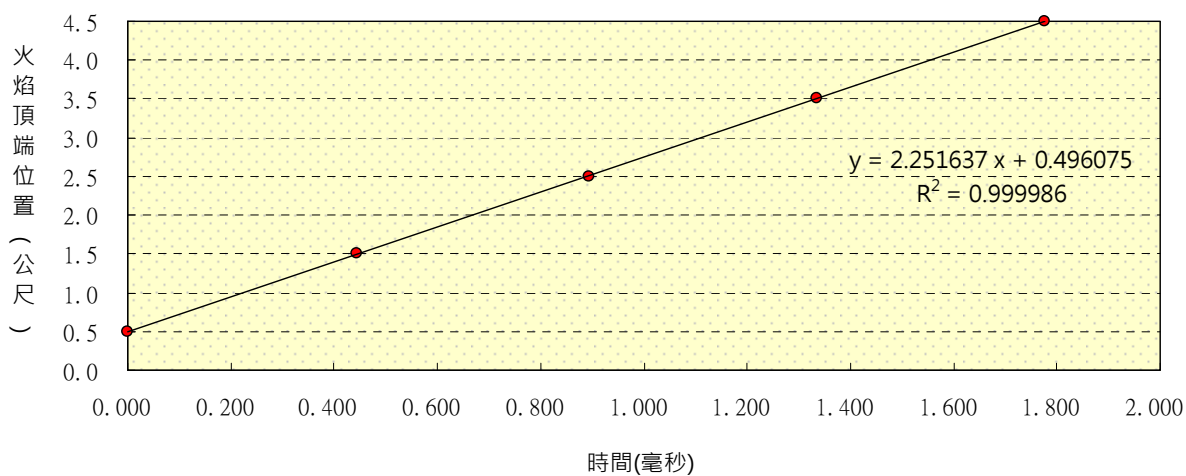
圖(37)：預混氣 $(2\text{H}_2 + \text{O}_2) + 2\text{H}_2$ ，火焰頂端位置與時間之關係圖。



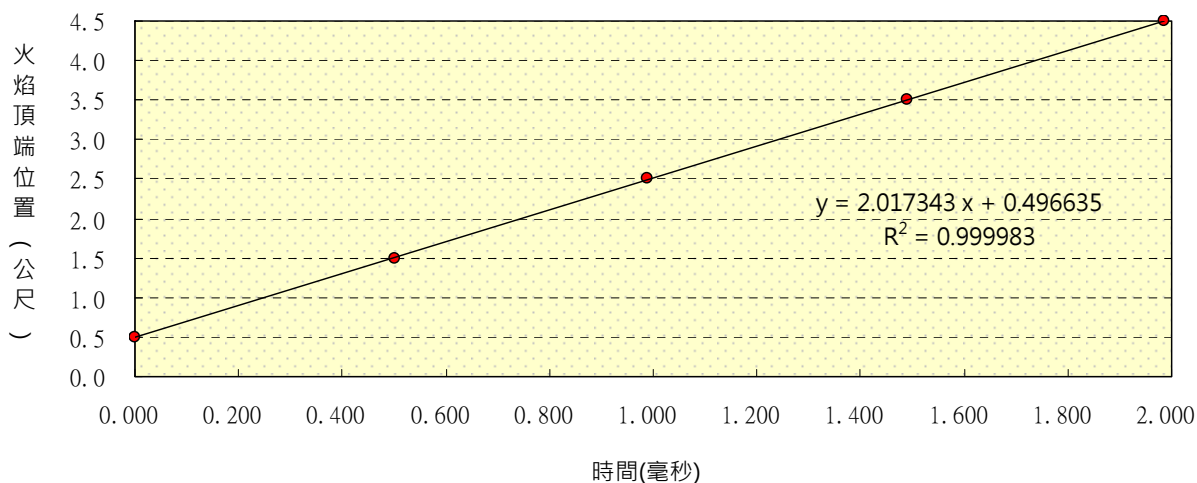
圖(38)：預混氣 $(2\text{H}_2 + \text{O}_2) + \text{H}_2$ ，火焰頂端位置與時間之關係圖。



圖(39)：預混氣( $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ )，火焰頂端位置與時間之關係圖。



圖(40)：預混氣( $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ ) +  $\text{O}_2$ ，火焰頂端位置與時間之關係圖。



圖(41)：預混氣( $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ ) +  $2\text{O}_2$ ，火焰頂端位置與時間之關係圖。

表(5)：以自製儀器實驗同一組成的預混氣三次，所得火焰速率的平均值與平均相對偏差。

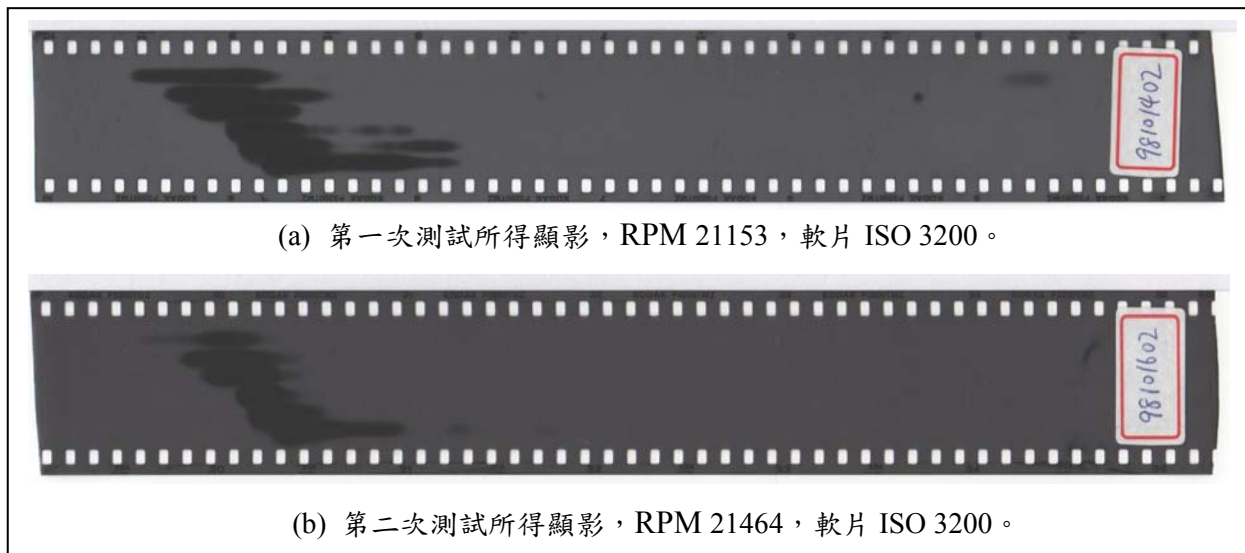
*預混氣組成	火焰速率 (公尺/秒)				
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均值	平均相對偏差(%)
$(2\text{H}_2 + \text{O}_2) + 2\text{H}_2$	3079	3141	3130	3117	$\pm 0.52$
$(2\text{H}_2 + \text{O}_2) + \text{H}_2$	3002	3044	3013	3020	$\pm 0.54$
$(2\text{H}_2 + \text{O}_2)$	2735	2713	2705	2718	$\pm 0.43$
$(2\text{H}_2 + \text{O}_2) + \text{O}_2$	2252	2250	2245	2249	$\pm 0.12$
$(2\text{H}_2 + \text{O}_2) + 2\text{O}_2$	2017	2015	2008	2014	$\pm 0.18$

說明：

- 1.圖(36)，1~5 號偵測點的火光依序在軟片上呈彗星狀顯影，研判火焰頂端的亮度大於其它區域，導致顯影前端呈圓頭狀。
- 2.圖(37)~圖(41)，圖中線性趨勢線的相關係數( $R^2$ )幾乎等於 1，由此推論：管道 50~450cm 區間，氫爆火焰的傳遞為等速率。但不同組成的預混氣，火焰速率也不同。
- 3.在表(5)中，發現配製氫氧恰好完全反應的預混氣，所得火焰速率(2718 m/s)並不是最高者，配製氫氣過量越多者，火焰傳遞速率越快；配製氧氣過量越多者，火焰傳遞速率越慢。
- 4.表(5)中，三次實驗值的平均相對偏差都很小，由此可知預混氣組成固定下，火焰等速傳遞的速率穩定，同時也佐證自製儀器的精確度高。

## 二、觀測 5 ~ 50 cm 區間位置的火焰傳遞

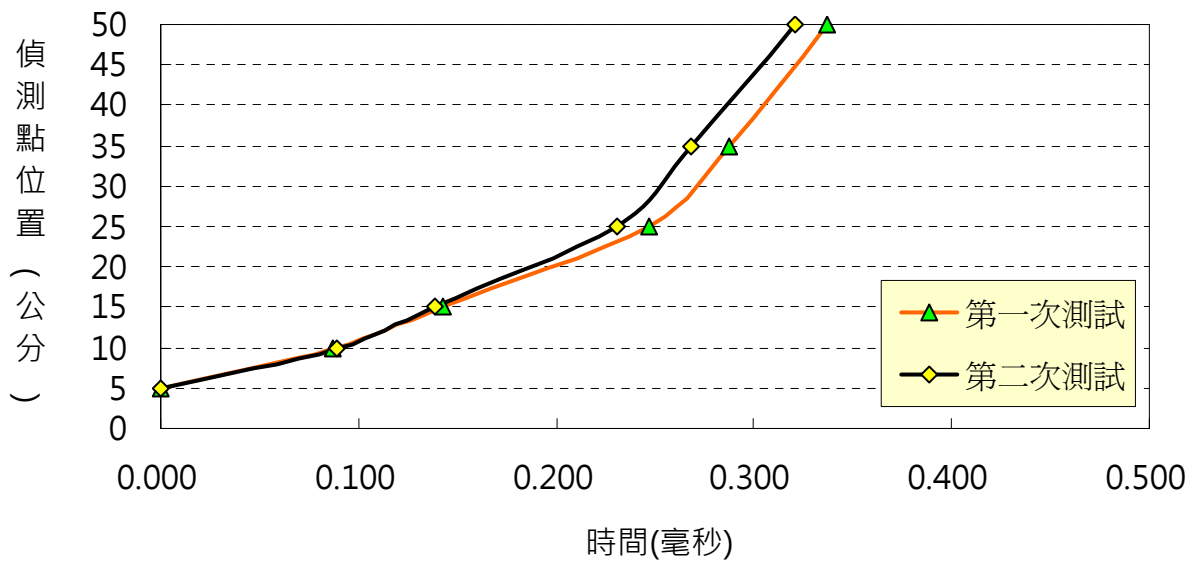
### (一) 預混氣 ( $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ ) + $\text{H}_2$



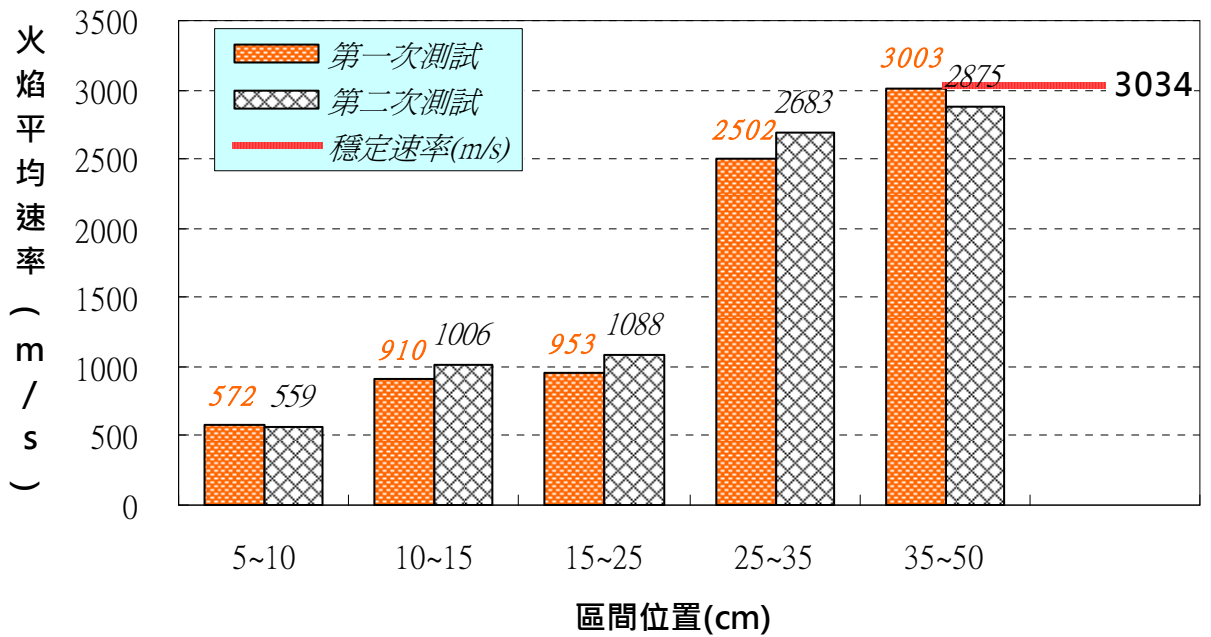
圖(42)：第 4、5、6 顯影前端呈圓頭狀，表示火焰前端出現強烈火光。

表(6)：預混氣組成 ( $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ ) +  $\text{H}_2$ ，初期火焰的頂端位置與時間的關係。

預混氣組成	軟片號碼	RPM	火焰前端的位置與時間(毫秒)					
			5cm	10cm	15cm	25cm	35cm	50cm
( $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ ) + $\text{H}_2$	98101402	21353	0	0.088	0.144	0.250	0.290	0.340
( $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ ) + $\text{H}_2$	98101602	21464	0	0.089	0.139	0.231	0.268	0.321



圖(43)：預混氣( $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ ) +  $\text{H}_2$ ，火焰頂端位置與時間之關係圖。



圖(44)：預混氣( $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ ) +  $\text{H}_2$ ，初期火焰的區間位置與火焰平均速率之關係圖。

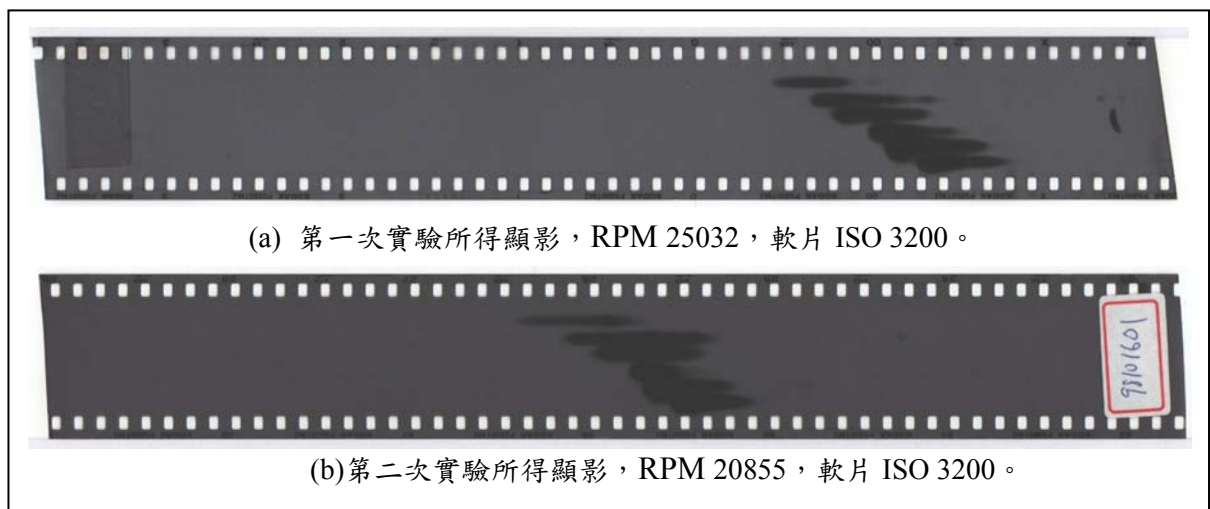
表(7)：各區間位置的火焰平均速率之誤差率(%)

區間位置 (公分)	5~10	10~15	15~25	25~35	35~50
第一次測試 (%)	±2.9	±4.5	±2.4	±6.3	±5.0
第二次測試 (%)	±2.8	±5.0	±2.7	±6.7	±4.8

說明：

1. 圖(44)中，第一次與第二次實驗有共同現象，初期火焰隨著時間速率越來越快，火焰在區間位置 25~35cm，速率出現巨幅飆升，35~50cm 已趨近穩定速率值(3034 m/s)。
2. 圖(42)中，第 4、5、6 顯影拖曳，前端呈圓頭狀，其偵測位置正是火焰速率飆升區。
3. 在表(7)中，由於初期火焰具加速度，各區間位置的火焰速率不同，以致軟片上的顯影間距不同，量測顯影間距誤差以 $\pm 1$  個像素計算，所以顯影間距越短，量測時間的誤差率則越高，例如 25~35cm 區間位置，由於火焰速率急速飆升，顯影間距最短，以致量測時間的誤差率最高。

## (二) 預混氣 ( $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ ) + $\text{O}_2$

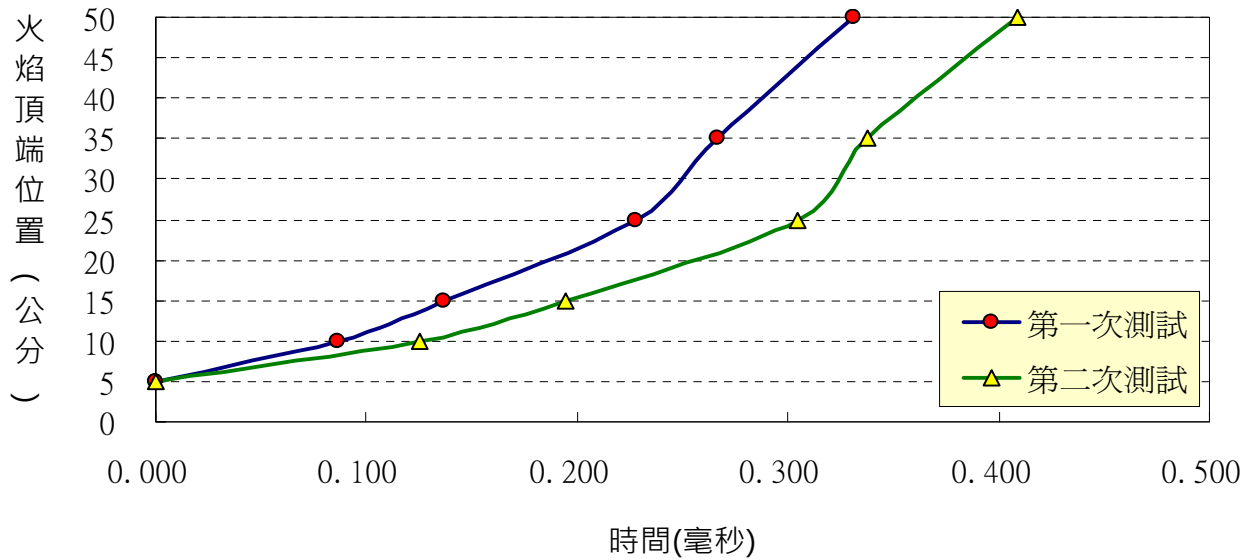


圖(45)：第 4、5、6 顯影前端呈圓頭狀，表示火焰前端出現強烈火光。

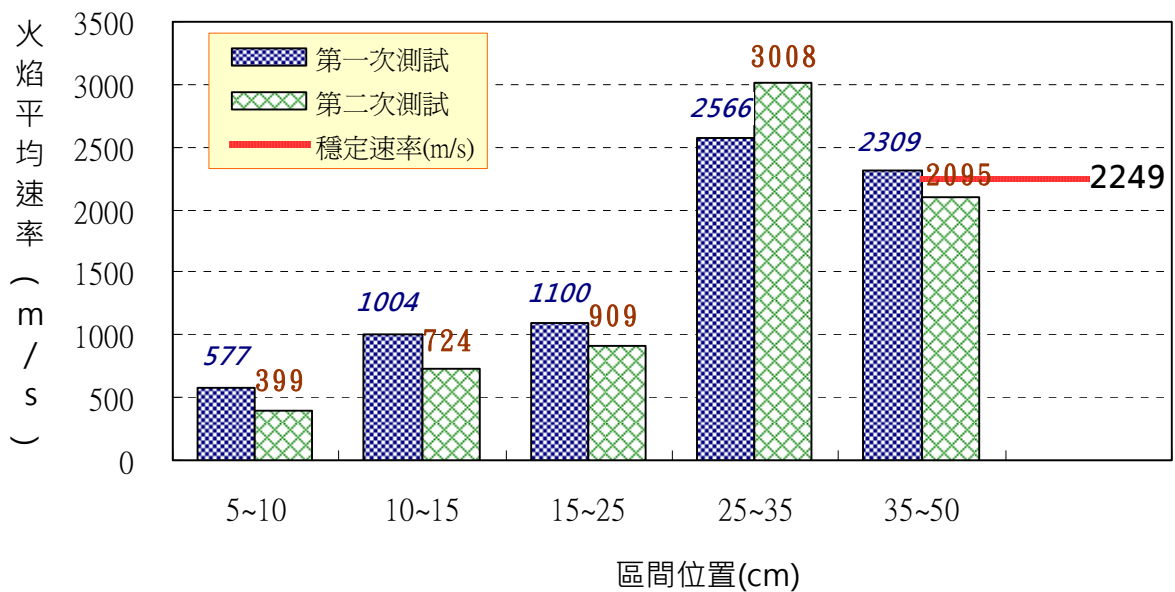


表(8)：預混氣組成 (2H<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>) + O<sub>2</sub>，初期火焰的位置與時間的關係。

預混氣組成	軟片號碼	RPM	火焰前端的位置與時間(毫秒)					
			5cm	10cm	15cm	25cm	35cm	50cm
(2H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> ) + O <sub>2</sub>	98101401	25032	0	0.085	0.134	0.224	0.264	0.326
(2H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> ) + O <sub>2</sub>	98101601	20855	0	0.125	0.194	0.304	0.338	0.409



圖(46)：預混氣(2H<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>)+O<sub>2</sub>，區間位置 5~50cm，火焰頂端位置與時間之關係圖。



圖(47)：預混氣(2H<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>)+O<sub>2</sub>，初期火焰的區間位置與火焰平均速率之關係圖。

表(9)：各區間位置的火焰平均速率之誤差率 (%)

區間位置 (公分)	5~10	10~15	15~25	25~35	35~50
第一次測試 (%)	±2.5	±4.3	±2.4	±5.6	±3.3
第二次測試 (%)	±2.0	±3.7	±2.3	±7.7	±3.6

說明：

- 1.在圖(47)中，第一次與第二次實驗有共同現象，初期火焰隨著時間速率越來越快，火焰在區間位置 25~35cm，速率出現巨幅飆升，而且速率出現過高再回降的現象，35~50cm 已趨近穩定速率值(2249 m/s)。
- 2.在圖(45)中，第 4、5、6 顯影拖曳，前端呈圓頭狀，其偵測位置正是火焰速率飆升區。
- 3.在表(9)中，由於初期火焰具加速度，各區間位置的火焰速率不同，以致軟片上的顯影間距不同，量測顯影間距誤差以±1 個像素計算，所以顯影間距越短，量測時間的誤差率則越高，例如 25~35cm 區間位置，火焰速率急速飆升，顯影間距最短，以致量測時間的誤差最高。

## 伍、實驗討論

### 一、「氣爆顯影記錄器」在時間的量測上，其最小刻度為何？

本研究利用 Excel 的欄位線測量軟片顯影的間距，欄位寬度以”像素”為單

位，則軟片周長  $L=1125$  像素，若馬達轉速(RPM)=24000 時

$$\text{時間量測的最小刻度} = 1 \text{ 個像素} = \frac{1}{1125} \times \frac{60}{24000} = 2.2 \times 10^{-6} \text{ 秒} = 2.2 \text{ 微秒}$$

二、「氣爆顯影記錄器」測定對象的範圍，受限於軟片的顯影效果，為提高軟片顯影效果，擴大儀器的測定對象，本研究中曾採取哪些措施？

提升軟片的顯影效果，我們從提高軟片的感光度或單位面積曝光量去思考，研究過程中曾採取下列措施。

1. 使用高感度軟片，從 ISO 400 換成 ISO 3200 軟片，顯影拉長且色澤較黑。
2. 增加沖洗的顯影時間，可將 ISO 400 軟片提升至相當 ISO 1600 感光度。
3. 選擇旋轉筒壓克力厚度規格，捨去 5mm 而採用 3mm 厚度，目的可縮短光纖出光口與軟片的距離，縮小軟片上的光點面積，以增加亮度。
4. 在偵測點處的軟管上貼反光紙，可提高光纖的導光量，顯影效果有顯著提升。

三、氫爆火焰的傳遞速率與爆震波速率的關係。

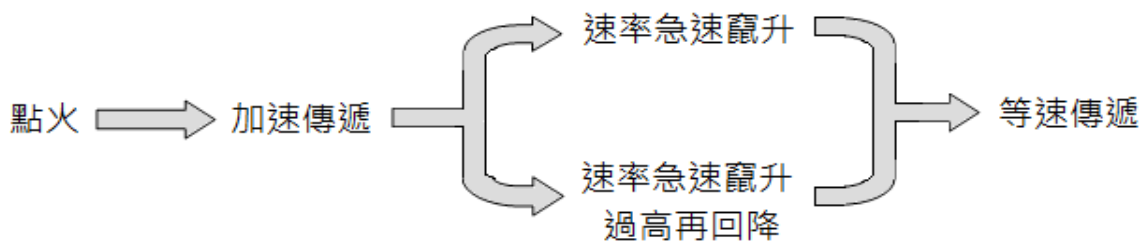
1. 文獻中敘述爆震波，是火焰陣面和壓力陣面合二為一，成為一個帶化學反應區的沖擊波，所以測定火焰的速率等於測定爆震波的速率。
2. 「氣爆顯影記錄器」觀測管中氫爆的火焰速率，所得數據與文獻的爆震波速率值相當接近，如下表(10)，本研究的管道材質為塑膠軟管，並盤繞於水盆中，不是直線的管道，這些因素或許影響相對誤差值，有待進一步研究確認。

表(10)：火焰等速傳遞的速率值與文獻的爆震波速率（數據來源：參考資料四，P.78）

預混氣組成	火焰速率測定值(m/s)(A)	爆震波速率(m/s)(B)	相對誤差(%) $\frac{(A)-(B)}{(A)} \times 100$
(2H <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> )	2718	2819	-3.7
(2H <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> )+O <sub>2</sub>	2249	2314	-2.9

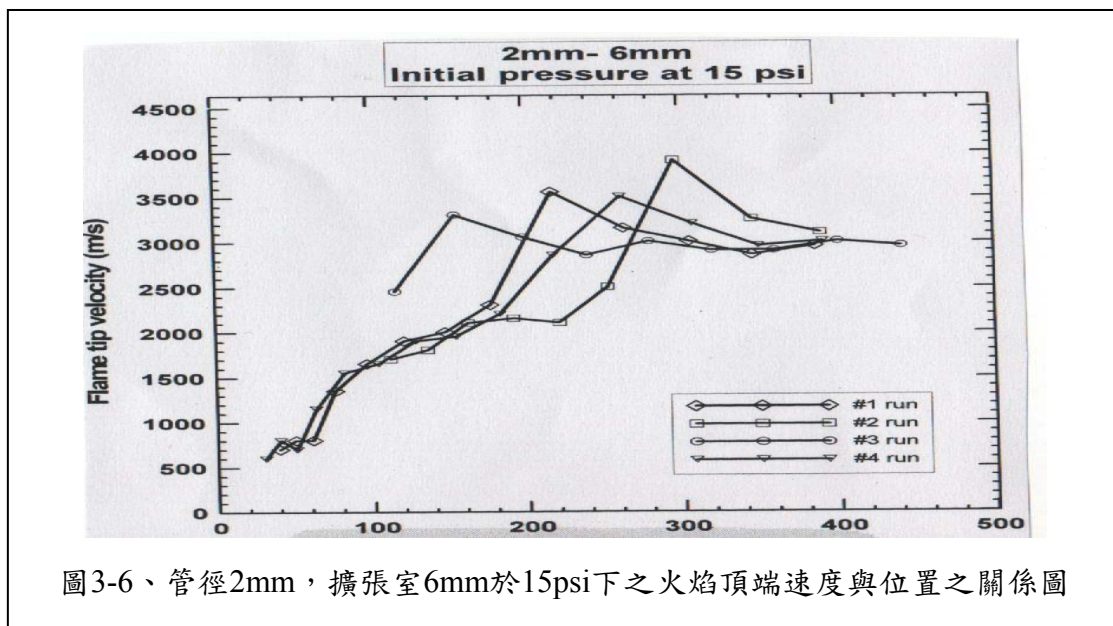
#### 四、管中氫爆火焰的傳遞模式。

圖(44)與圖(47)，顯示初期火焰的速率越來越快。由於點火端管口封閉，火焰的後邊界約束增強，壓力增強，火焰陣面加速前進。圖中初期火焰在離開點火處約25 cm時，火焰速率急速竄升，研判預混氣組成為 $(2\text{H}_2 + \text{O}_2) + \text{H}_2$ ，其火焰速率直接竄升至等速傳遞的速率值（約3034 m/s）；但預混氣組成為 $(2\text{H}_2 + \text{O}_2) + \text{O}_2$ 時，發現火焰速率竄升超越等速傳遞的速率值（約2249 m/s），然後再迅速回降至等速傳遞的速率值。根據實驗結果發現，管中氫爆的火焰傳遞模式有二，如下圖(48)。



圖(48)：管中氫爆火焰的傳遞有兩種模式

根據參考資料五的文獻，當爆燃波經由火焰加速至爆震波形成的時候通常會產生區域爆炸，此一區域爆炸除了產生較亮的火焰以外，還會產生一個超越 C-J 速度的一爆震波稱為過驅爆震波(over-driven detonation)，此一爆震波會持續減速直到 C-J 為止，但是減速的相當快，如下圖(49)，印證。(在 C-J 點可說是一個最為穩定的狀態)



圖(49)：預混氣為 ( $2H_2 + O_2$ )，其初期火焰加速至爆震波形成時，火焰速率急速竄升，出現過高再回降現象。 《資料取自：參考資料五》

### 五、分析軟片顯影，研判氫爆火焰的模型。

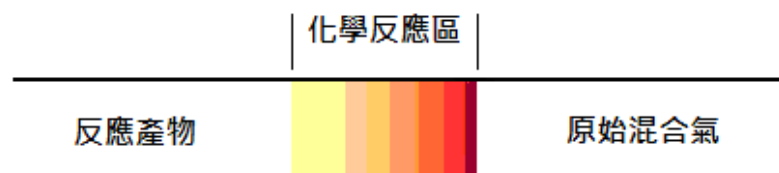
研判道理來自第 12 頁的【光線強弱對顯影區大小的影響】，火焰的光線越強，軟片的顯影區越寬、顏色越深黑。

初期火焰的亮度不穩定，變化大，難以固定的火焰模型描述之。偵測點越靠近點火處，軟片越不易顯影，離開點火處 5 cm 軟片才能顯影；研判初期火焰亮度低，放熱反應使壓力增加，火焰亮度隨之增強。

等速傳遞的火焰，在軟片上顯影如彗星狀，前端呈圓頭狀，線條分明，色澤深黑，研判火焰的頂端亮度最高，從頂端延伸至慧尾，色澤由深黑變淺黑，寬度由寬而窄，研判火焰的亮度遞減，因此建立等速傳遞階段的火焰模型，如下圖(50)。

根據參考資料四的文獻，當火焰從層流火焰(低速)加速至紊流火焰(高速)以致於到爆震波火焰(更高速)時，會經過一個區域爆炸(local explosion)轉變成爆震波。爆震波最前端就是一道震波(非常薄的一層)，經過震波的增加壓與加溫後，在後方進行燃燒反應，此時火焰所釋放出來的光線非常高，而使得底片有較大的曝光區，

而造成較大的圓頭狀。事實上，當爆震波發生的那一瞬間，也會有一道向後跑(相反於火焰傳遞的方向)的回爆震波 (retonation)，此波可能是拉長光訊號軌跡的一個原因。



圖(50)：等速傳遞的火焰模型，頂端亮度最高，往後亮度遞減。

## 陸、結論

- 一、自製「氣爆顯影記錄器」是利用光纖偵測不同位置的火焰，導光並記錄於高速旋轉的軟片上，在馬達 RPM=24000 時，時間量測最小刻度為 2.2 微秒，這種直接顯影的偵測方式，在測定氣爆火焰的速率，實驗值的準確度高。儀器的操作已盡量簡單化，例如製作暗箱以取代在暗房中實驗；偵測點上貼反光紙與使用高感度軟片或增加軟片的顯影時間等，都可提升軟片的顯影效果，擴大測定對象。爆震波的火焰陣面和壓力陣面合二為一，所以「氣爆顯影記錄器」也是爆震波的測速器，提供燃燒與爆炸的研究參考。
- 二、氫爆火焰的傳遞速率，根據實驗結果，在管道 50cm 後為等速傳遞。但不同組成比例的氫氧預混氣，其火焰速率明顯不同，預混氣中氫氣過量越多者，火焰傳遞速率越快；預混氣中氧氣過量越多者，火焰傳遞速率越慢。火焰等速傳遞的速率值，參閱第 22 頁，表(5)。
- 三、根據實驗結果，管中氫爆的火焰傳遞有二種模式，初期火焰具有加速度，離開點火處約 25 cm 時，火焰速率急速竄升，若預混氣組成為  $(2H_2 + O_2) + H_2$  時，速率竄升至等速傳遞的速率值 (約 3034 m/s)；但預混氣組成為  $(2H_2 + O_2) + O_2$  時，發現火焰速率竄升超越等速傳遞的速率值 (約 2249 m/s)，然後再迅

速回降至等速傳遞的速率值，火焰傳遞模式參閱第28頁，圖(48)。

四、從軟片顯影研判氫爆的火焰模型，初期火焰的速率與亮度都不穩定，越遠離點火處，火焰速率越大，亮度也增加，難以固定模型描述之。等速傳遞的火焰穩定，火焰模型的前端是一層亮度極高的區域，從前端延伸至後端，亮度遞減，火焰模型參閱第 29 頁，圖(50)。

## 柒、未來展望

自製「氣爆顯影記錄器」受限於軟片的顯影效果，以及耗費時間沖洗軟片，都是有待精進的地方，未來將進一步思考，將光訊號轉變為電流，連結電腦處理資料。

## 捌、參考資料

- 一、林英智等（民 93 年版）。國中自然與生活科技第五冊。台北縣：康軒。
- 二、蕭次融（民 80 年）。氫的簡易製法與可燃性氣體的安全點燃示範實驗。科學教育月刊，138，15-21。
- 三、黑白軟片、沖洗藥水—特性、用途與沖洗步驟：  
<http://www.eagnas.com/kodakh/filmspec.html>
- 四、張奇等編著（2007），北京理工大學 211 工程研究生規劃教材—燃燒與爆炸基礎。  
北京：北京理工大學。
- 五、許耀中（民 97 年）。微管中火焰加速與爆燃波轉變爆震波之研究。國立成功大學航空太空工程學系碩士論文。
- 六、M. Kuznetsov , V. Alekseev , I. Matsukov , S. Dorofeev , “DDT in a smooth tube filled with a hydrogen–oxygen mixture” Shock Waves (2005) 14(3): 205–215