

中華民國 第 50 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 物理科

040103

叛逆的水流—茶壺效應之探討

學校名稱：國立彰化高級中學

作者： 高二 謝佳銘 高二 石展豪 高二 陳柏仰	指導老師： 賴文哲
-----------------------------------	--------------

關鍵詞：茶壺效應、回流、流體力學

叛逆的水流

摘要

因為水流流出管口時在速度過慢或流量過小時，會產生水逆流的現象，也就是所謂的茶壺效應，因此本文將探討不同變因對茶壺效應的影響。首先製作自製鐵架，以方便實驗的進行，探討不同傾角、管徑、黏滯係數、切角、表面張力、曲率對茶壺效應的影響。結果發現：傾角越大則恰產生回流時的水流量也會越大，且大致成一個三次函數圖形；並驚訝的發現，口徑大小與水流量大小幾乎沒有關係；而黏滯係數越大的溶液越容易回流；增大切口角度則不易回流；表面張力幾乎不影響；而曲率半徑越大時，也越容易發生茶壺效應。由生活中發現，市面上的水壺傾角都約 60 度，與本研究結果相吻合。再對實驗數據進行函數關係之分析，導出傾角、管徑、黏滯係數、切角、表面張力、曲率和流量之間的關係。期望能結合日常生活用品，降低水逆流情況的發生。



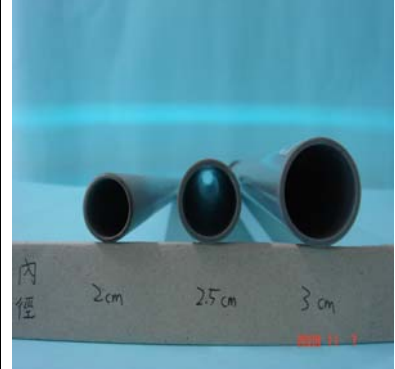
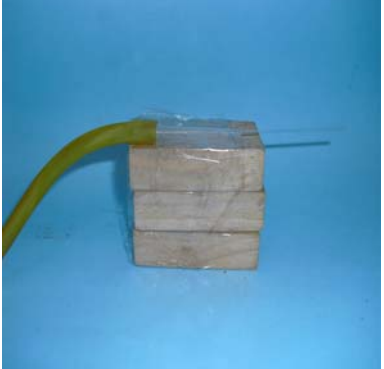
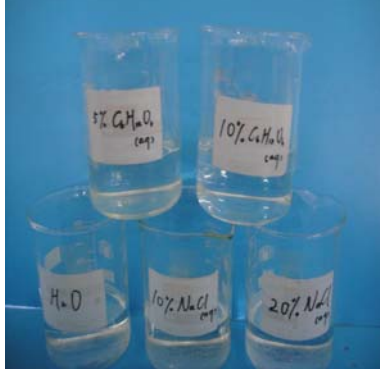


壹、研究動機

當使用茶壺倒水時，常會發現若水的流速不夠快，則水流會沿著壺嘴下緣回流一段距離，導致茶水會流到茶杯外，可能造成燙傷等意外。經過我們上網與查書尋找資料後，發現此現象稱為「茶壺效應」。而我們也發現「茶壺效應」相關的參考資料並不多，因此引起我們研究此效應的興趣。本研究希望能針對「茶壺效應」的變因進行探討，深入了解其原理，進而找到有效控制該現象的方法，設計出難以回流，意外性較低的杯具、茶壺；並建立正確的倒茶觀念，造福民眾。

貳、研究目的

- 一、探討 PVC 硬管在不同傾斜角度下對茶壺效應的影響
- 二、探討 PVC 硬管在不同管口直徑下對茶壺效應的影響
- 三、探討 PVC 硬管在不同黏滯係數下對茶壺效應的影響
- 四、探討 PVC 硬管在不同出水口切割角度下對茶壺效應的影響
- 五、探討 PVC 硬管在不同表面張力下對茶壺效應的影響
- 六、探討出水口下緣在不同曲率半徑下對茶壺效應的影響

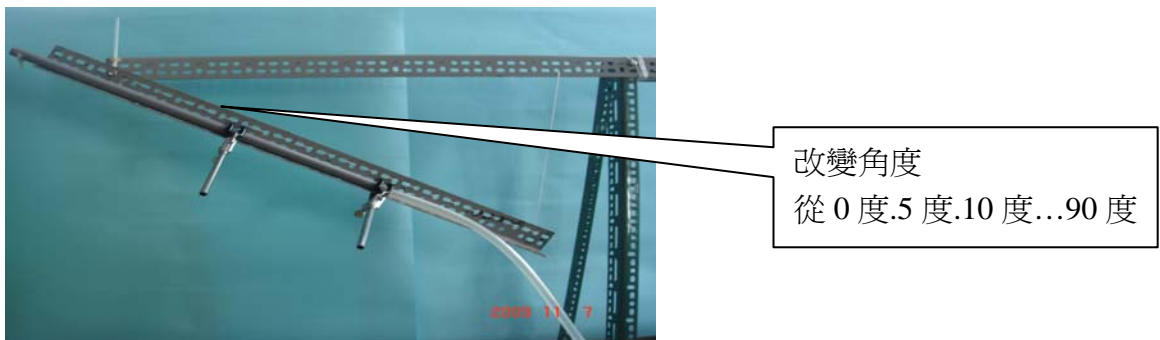
參、研究設備及器材

		
<p>海菜粉</p>	<p>表面張力儀</p>	<p>不同孔徑水管</p>
		
<p>毛細管</p>	<p>不同表面張力溶液</p>	<p>純水</p>
<p style="text-align: center;">自製鐵架</p> 		

肆、研究過程及方法

一、探討 PVC 硬管在不同傾斜角度下對茶壺效應的影響

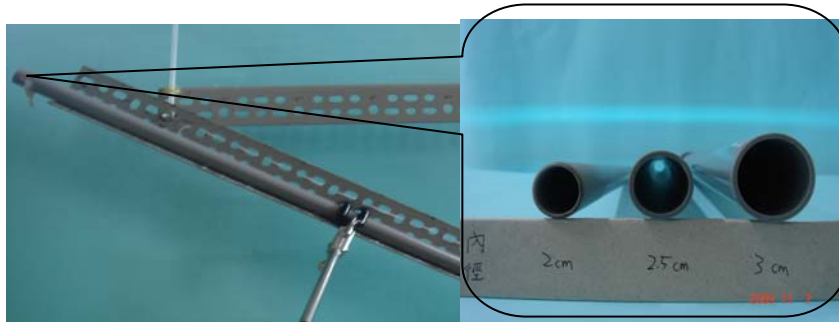
- (一)將 PVC 硬管放置於自製器材上
- (二)將旋轉臂調整到傾斜角度 0 度(即水平)
- (三)扭轉水龍頭到底使每秒流量達到最大
- (四)慢慢減少每秒出水量直到水流恰好沿著 PVC 硬管管底往回流
- (五)用燒杯蒐集逆流之水並測量一分鐘之水流量
- (六)重複步驟 3~5 共 20 次
- (七)以 5 度為間隔改變旋轉臂的角度(即 5,10 ,15...90 度)
- (八)重複步驟 3~6



圖一：探討 PVC 硬管在不同傾斜角度下對茶壺效應的影響

二、探討 PVC 硬管在不同管口直徑下對茶壺效應的影響

- (一)將管口直徑 2cm 之 PVC 硬管放置於自製器材上
- (二)將旋轉臂調整到傾斜角度 0 度
- (三)扭轉水龍頭到底使每秒流量達到最大
- (四)慢慢減少每秒出水量直到水流恰好沿著 PVC 硬管管底往回流
- (五)用燒杯蒐集逆流之水並測量一分鐘之水流量
- (六)重複步驟 3~5 共 20 次
- (七)以 10 度為間隔改變旋轉臂的角度
- (八)重複步驟 3~6
- (九)以管口直徑 2.5cm、3cm、3.5cm 及 4cm 之 PVC 硬管取代管口直徑 2cm 之 PVC 硬管
- (十)重複步驟 3~8



圖二：探討 PVC 硬管在不同管口口徑下對茶壺效應的影響

三、探討 PVC 硬管在不同黏滯係數下對茶壺效應的影響

- (一)將管口直徑 2cm 之 PVC 硬管放置於自製器材上
- (二)將旋轉臂調整到傾斜角度 0 度
- (三)扭轉水龍頭到底使每秒流量達到最大
- (四)慢慢減少每秒出水量直到水流恰好沿著 PVC 硬管管底往回流
- (五)用燒杯蒐集逆流之水並測量一分鐘之水流量
- (六)重複步驟 3~5 共 20 次
- (七)以 10 度為間隔改變旋轉臂的角度
- (八)重複步驟 3~6
- (九)以不同黏滯係數之海菜膠溶液取代純水
- (十)重複步驟 3~8



圖三：探討 PVC 硬管在不同黏滯係數下對茶壺效應的影響
(右為海菜膠溶液，左為純水)

四、探討 PVC 硬管在不同出水口切割角度下對茶壺效應的影響

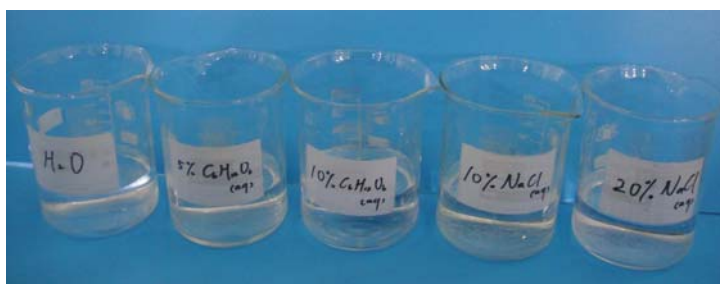
- (一)將管口直徑 2cm 之 PVC 硬管放置於自製器材上
- (二)將旋轉臂調整到傾斜角度 0 度
- (三)扭轉水龍頭到底使每秒流量達到最大
- (四)慢慢減少每秒出水量直到水流恰好沿著 PVC 硬管管底往回流
- (五)用燒杯蒐集逆流之水並測量一分鐘之水流量
- (六)重複步驟 3~5 共 20 次
- (七)以 10 度為間隔改變旋轉臂的角度
- (八)重複步驟 3~6
- (九)以 15 度間隔鋸子切割 PVC 硬管
- (十)以切割後之硬 PVC 硬管取代未切割之 PVC 硬管
- (十一)重複步驟 3~8



圖四：探討 PVC 硬管在不同出水口切割角度下對茶壺效應的影響

五、探討 PVC 硬管在不同表面張力下對茶壺效應的影響

- (一)將管口直徑 2cm 之 PVC 硬管放置於自製器材上
- (二)將旋轉臂調整到傾斜角度 0 度
- (三)扭轉水龍頭到底使每秒流量達到最大
- (四)慢慢減少每秒出水量直到水流恰好沿著 PVC 硬管管底往回流
- (五)用燒杯蒐集逆流之水並測量一分鐘之水流量
- (六)重複步驟 3~5 共 20 次
- (七)改變溶液種類
- (八)重複步驟 3~6



圖五：探討 PVC 硬管在不同表面張力下對茶壺效應的影響(圖為不同液體)

六、探討出水口下緣在不同曲率半徑下對茶壺效應的影響

- (一)將實驗器材架設於桌面邊緣並使其保持水平
- (二)將直徑 0.5 公分之半圓柱黏土黏貼於實驗器材出水口下緣
- (三)注入水流並慢慢縮小出水量直到水流達到發生茶壺效應的前一刻
- (四)使用照相機拍攝此時之水流影像
- (五)求出水流與半圓柱之夾角 θ
- (六)重複步驟 3~5 共 20 次
- (七)以直徑 1.0 公分之半圓柱黏土取代直徑 0.5 公分之半圓柱黏土
- (八)重複步驟 3~6



圖六：探討出水口下緣在不同曲率半徑下對茶壺效應的影響(圖為出水口)

伍、研究結果

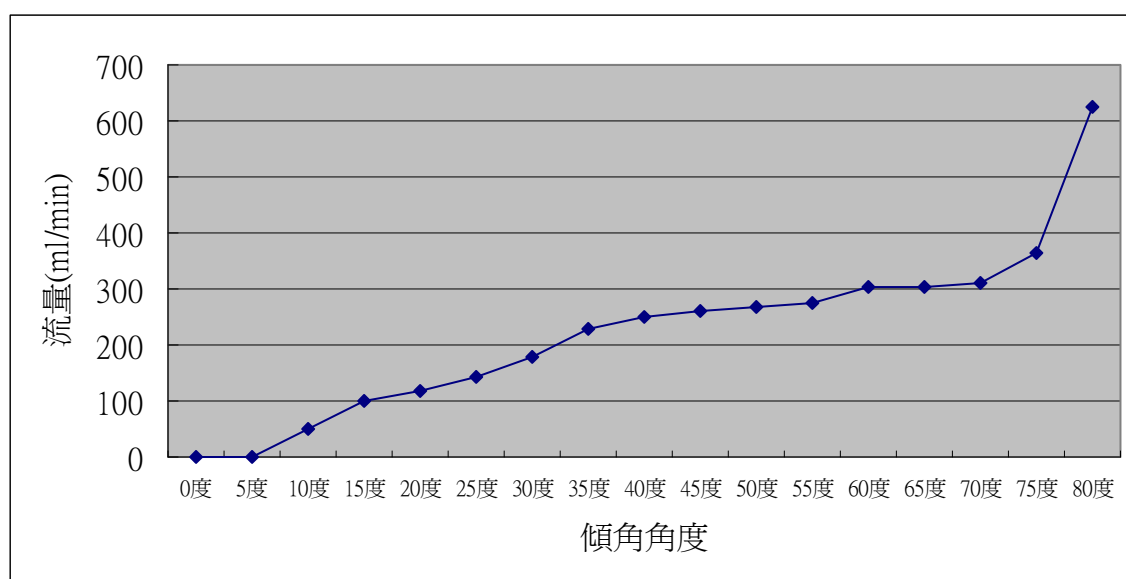
一、探討 PVC 硬管在不同傾斜角度下對茶壺效應的影響

{本實驗採用 2 公分口徑水管}

表一：實驗一數據

角度	0 度	5 度	10 度	15 度	20 度
流量 (ml/分)	0	0	51	99	119
角度	25 度	30 度	35 度	40 度	45 度
流量 (ml/分)	142	180	227	249	260
角度	50 度	55 度	60 度	65 度	70 度
流量 (ml/分)	268	274	303	304	311
角度	75 度	80 度	85 度	90 度	
流量 (ml/分)	365	624	無法 測量	無法 測量	

每個數據皆為做 20 次之平均值，各次數值請參考附錄。



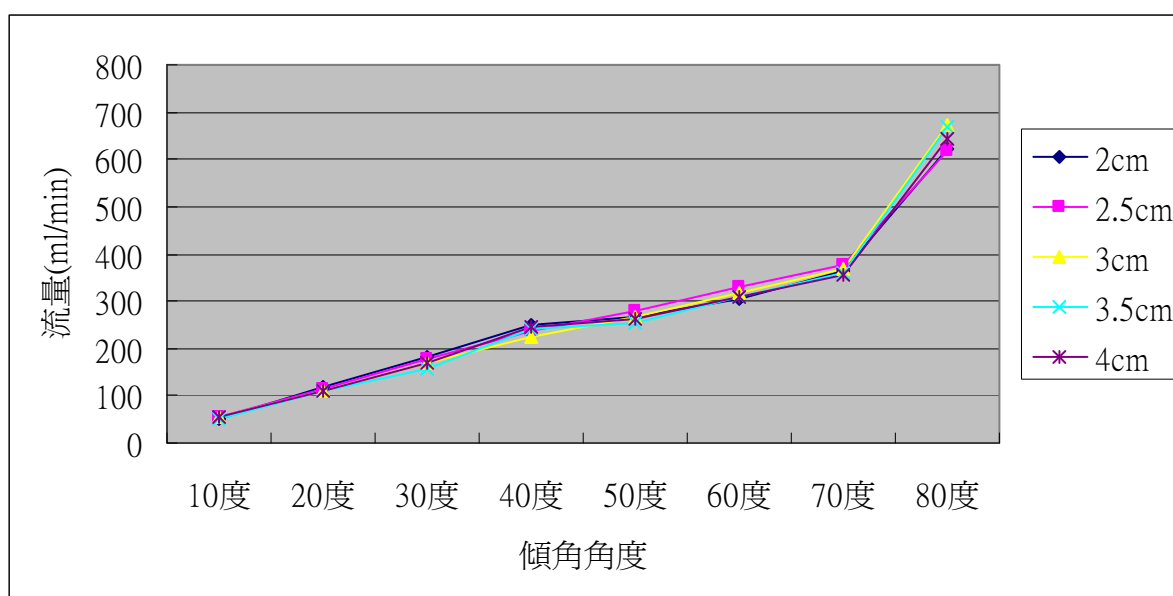
圖七：實驗一曲線表

二、探討 PVC 硬管在不同管口直徑下對茶壺效應的影響

表二：實驗二數據（流量單位：ml/min）

角度 流量 半徑	10 度	20 度	30 度	40 度	50 度	60 度	70 度	80 度
2cm	51	119	180	249	268	303	365	624
2.5cm	57	116	178	237	278	332	378	618
3cm	54	109	169	226	265	316	368	672
3.5cm	52	108	158	240	255	309	358	668
4cm	56	112	170	247	262	307	356	642

每個數據皆為做 20 次之平均值，各次數值請參考附錄。



圖八：實驗二曲線圖

三、探討 PVC 硬管在不同黏滯係數下對茶壺效應的影響

本實驗中溶液一黏滯係數：0.01459 Pa · s

溶液二黏滯係數：0.00852 Pa · s

溶液三黏滯係數：0.00327 Pa · s

(註---水的黏滯係數為：1.0×10⁻³Pa · s)

黏滯係數測量方法：本組採用自製器材測量黏滯係數

$$\eta = \frac{P\pi R^4 T}{8QL}$$

其中 P：毛細管兩端之壓力差

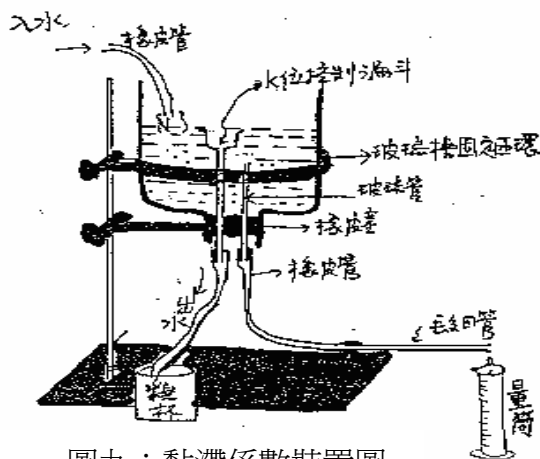
R：毛細管之內徑(半徑)

T：流經的時間

Q：流出液體的體積

L：毛細管長

實驗器材如下：



圖九：黏滯係數裝置圖



配製液體：本實驗使用海菜粉配製

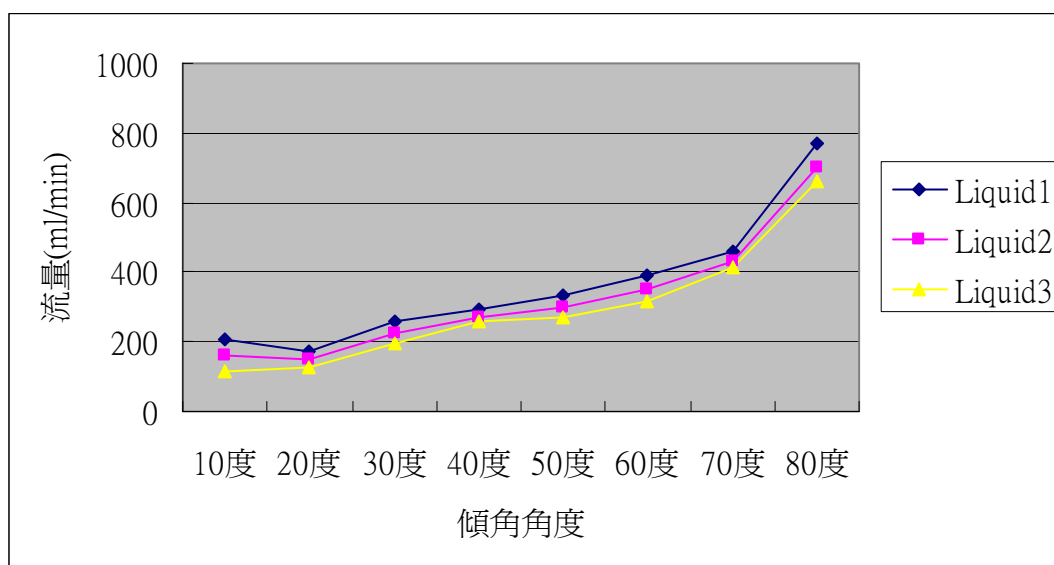


化學名爲甲基纖維素，海菜粉的原料是用具有木質的天然纖維素(如:木漿或棉花)經過鹼化後變成鹼性纖維素，鹼性纖維素在高壓、高溫下和甲基氯烷起化學作用，產生甲基纖維和其他化合物。海菜粉不是像壓克力、EVA 之類的樹脂，會在水泥砂漿內形成具有黏著拉力及防水的樹脂膜。海菜粉只是保水劑，只是一種工作助劑。貼磁磚不一定要用海菜粉，但是如有添加海菜粉，則可提升工作效率，所以海菜粉沒有防水的功能。

表三：實驗三數據

10 度	溶液一	溶液二	溶液三	20 度	溶液一	溶液二	溶液三
流量 (ml/分)	152	128	117	流量 (ml/分)	172	149	128
30 度	溶液一	溶液二	溶液三	40 度	溶液一	溶液二	溶液三
流量 (ml/分)	258	223	193	流量 (ml/分)	291	272	256
50 度	溶液一	溶液二	溶液三	60 度	溶液一	溶液二	溶液三
流量 (ml/分)	332	296	272	流量 (ml/分)	393	352	318
70 度	溶液一	溶液二	溶液三	80 度	溶液一	溶液二	溶液三
流量 (ml/分)	458	432	411	流量 (ml/分)	768	702	660

每個數據皆為做 20 次之平均值，各次數值請參考附錄。



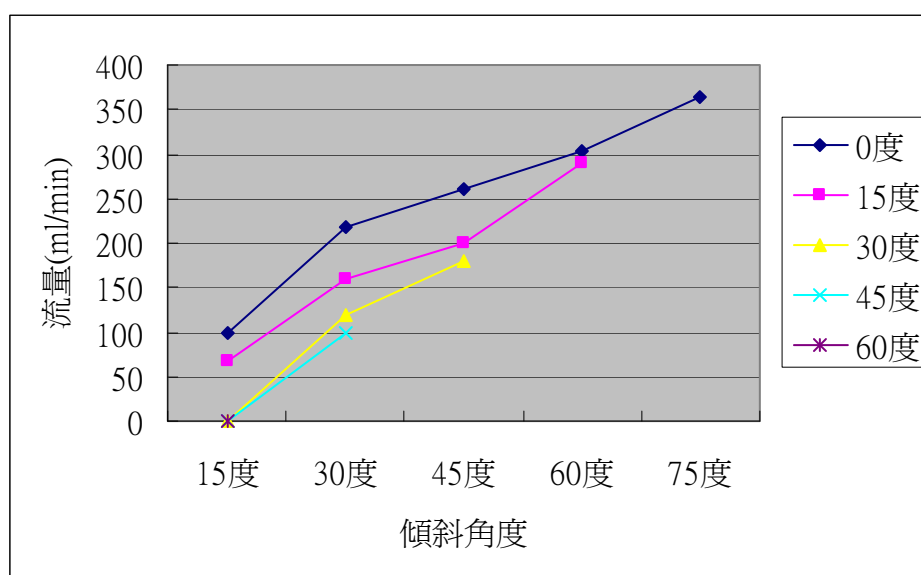
圖十：實驗三曲線圖

四、探討不同出水口切割角度下對茶壺效應的影響

表四：實驗四數據(流量單位：ml/min)

切口 流量 傾角	0 度	15 度	30 度	45 度	60 度
15 度	99	68	0	0	0
30 度	217	160	120	99	XXXXX
45 度	260	200	180	XXXXX	XXXXX
60 度	303	290	XXXXX	XXXXX	XXXXX
75 度	365	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX

每個數據皆為做 20 次之平均值，各次數值請參考附錄。



五、探討 PVC 硬管在不同表面張力下對茶壺效應的影響

{本實驗採用 2 公分口徑水管}

本實驗中溶液一表面張力：72.75 mN/m

溶液二表面張力：92.87 mN/m

溶液三表面張力：108.35 mN/m

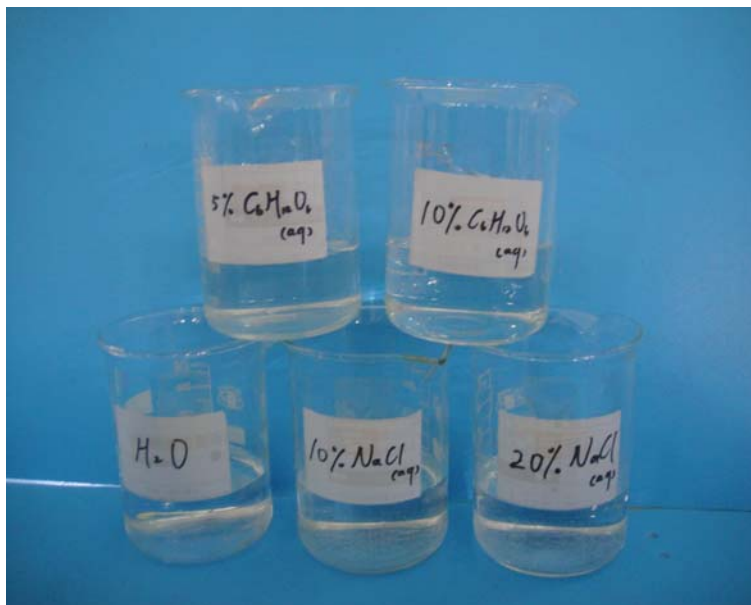
溶液四表面張力：85.13 mN/m

溶液五表面張力：97.52 mN/m

表面張力測量方法：本組採用表面張力儀測量表面張力



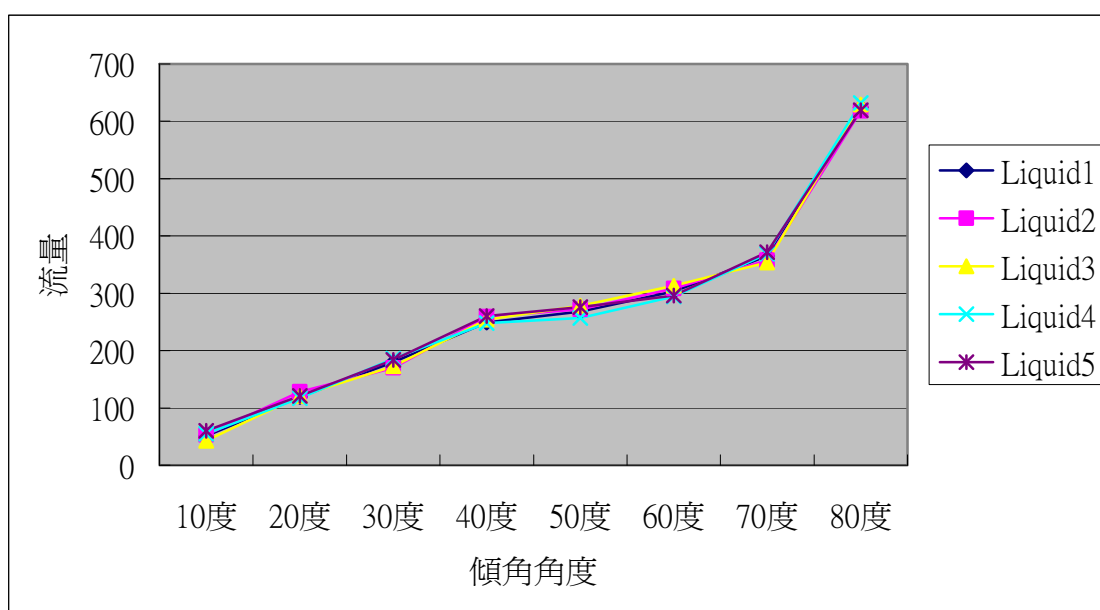
配製液體：本實驗使用 $C_6H_{12}O_6$ 、NaCl 配置



表五：實驗五數據(流量單位：ml/min)

流量 半徑 \ 角度	10 度	20 度	30 度	40 度	50 度	60 度	70 度	80 度
水	51	119	180	249	268	303	365	624
10% C ₆ H ₁₂ O ₆	53	128	170	259	272	308	358	618
20% C ₆ H ₁₂ O ₆	43	121	173	254	278	313	354	629
10% NaCl	55	117	186	248	257	294	369	632
20% NaCl	60	121	184	260	276	296	372	619

每個數據皆為做 20 次之平均值，各次數值請參考附錄。



圖十一：實驗五曲線圖

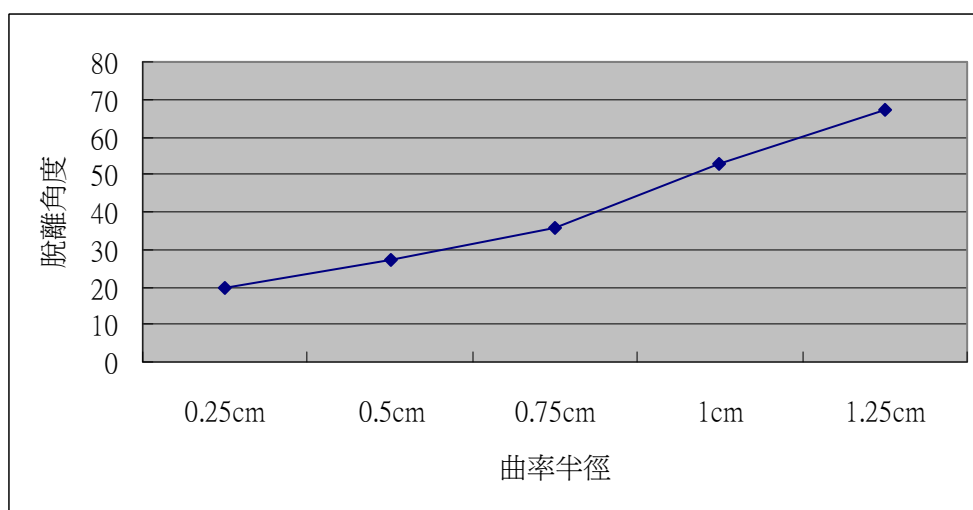
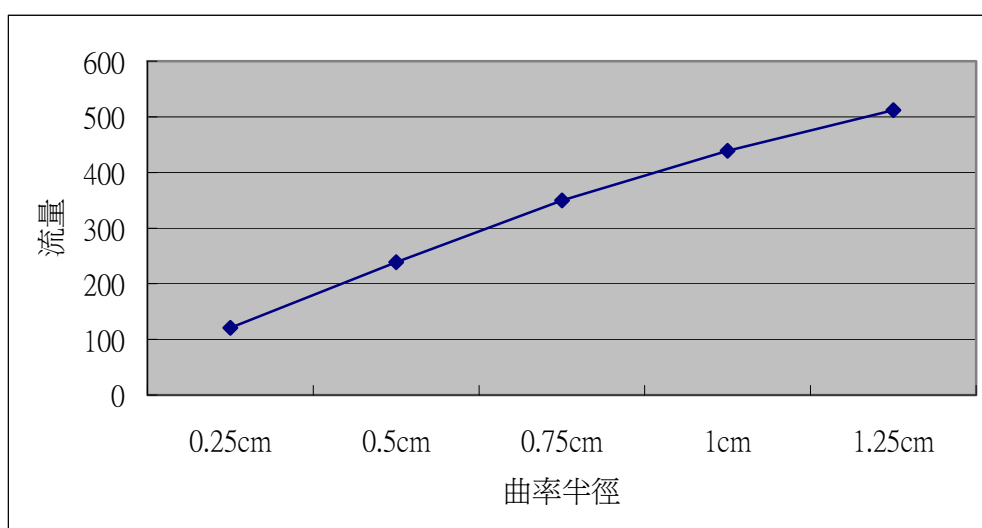
六、探討出水口下緣在不同曲率半徑下對茶壺效應的影響

脫離角度測量方法：本組採用高速攝影機攝影後，在放入電腦中計算

表六：實驗六數據

曲率半徑	0.25cm	0.5cm	0.75cm	1cm	1.25cm
脫離角度	20 度	27 度	36 度	53 度	67 度
流量 (ml/min)	121	239	350	439	512

每個數據皆為做 20 次之平均值，各次數值請參考附錄。



圖十二：實驗六曲線圖

陸、討論

一、器材改良

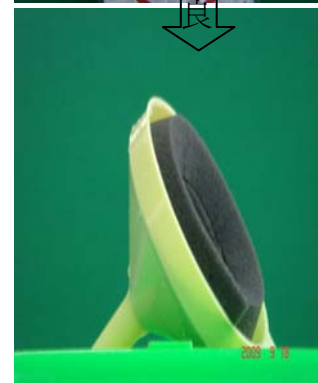
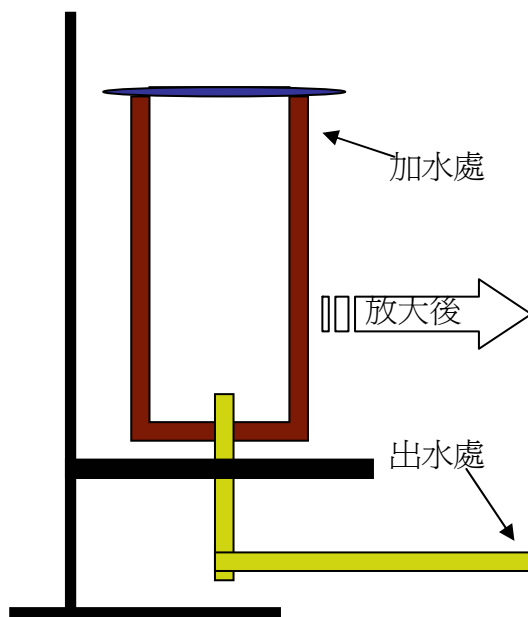
(一)測量水的流量

1.第一代器材：加藥機



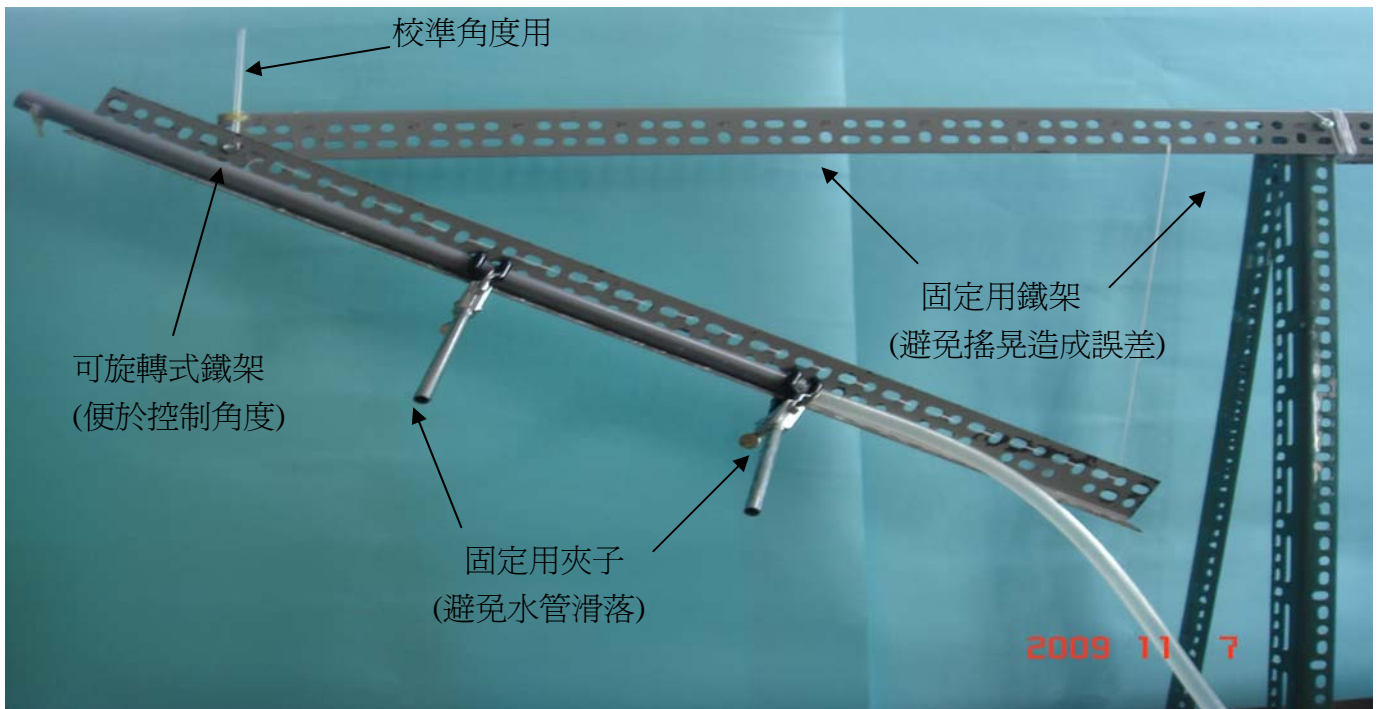
加藥機原本是用來加控制化學用品流量用的，於是我們將他拿來做實驗。但因為這台機器只限定於一些他所侷限的塑膠軟管，不能符合我們的需求(PVC 管)。且若使用此機器，流量將非常小，於是我們放棄了它。

2.第二代器材：利用夾子和鐵架製作器材



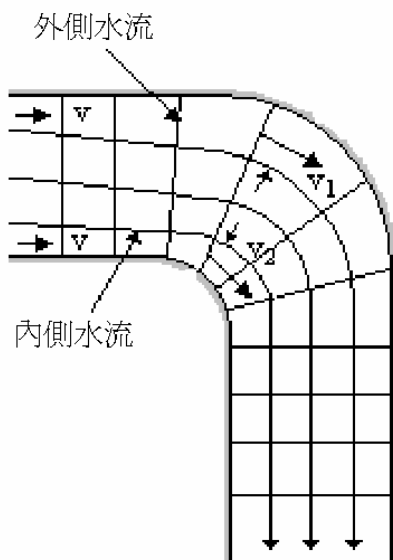
相對於第一代器材，此器材已經可以測得不同角度的流量。但控制角度和流量還是非常不方便，於是我們決定製作第三代器材。

3. 第三代器材：利用角鋼製作固定架



此實驗器材不但可以方便的控制出水口角度，還能在穩定的狀態下進行實驗，達到了理想的實驗器材條件。

二、力分析



定義：

$v_{外}$ 最外層水流速度

v_0 水管內水流速度

L 流量

$k_i (i = 1.2...6)$ 常數

R 最外層水流半徑

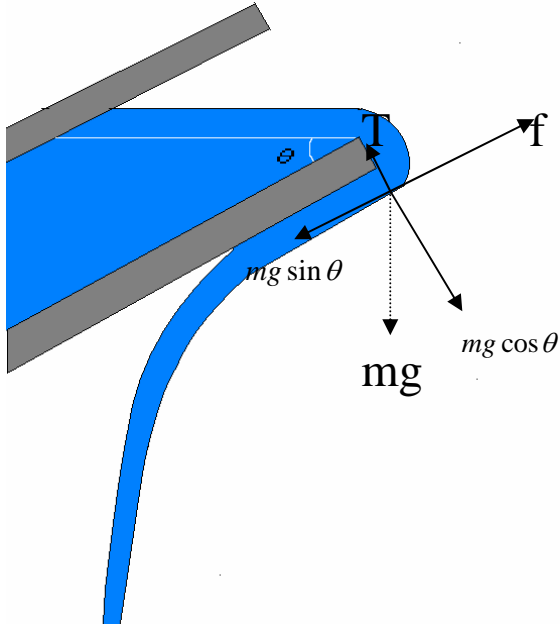
T 內聚力

由圖

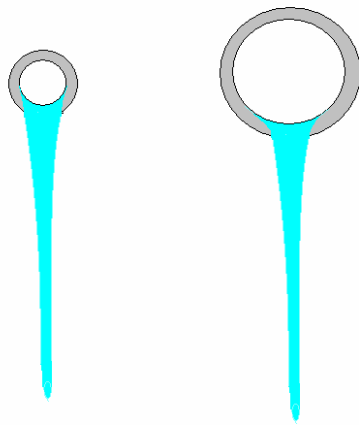
$$\frac{v_0}{r} = \frac{v_{外}}{R}; L = k_1 R v_0 \propto v_{外}$$

(一)實驗一力分析

$$\text{回流條件} - T - mg \cos \theta > F_c = \frac{mv_{\text{外}}^2}{R} \propto v_{\text{外}}, \text{又 } L \propto v_{\text{外}}$$
$$\rightarrow L < k_2(T - mg \cos \theta)$$



(二)實驗二力分析



不論使用何種管口直徑的 PVC 硬管，其水流在出水口處會匯流成同樣粗細的水柱，也就是如同實驗一。

(三)實驗三力分析

$$v_{\text{外}f}^2 = v_{\text{外}o}^2 - 2 \times k_2 \eta \times R k_3$$

$$F = \frac{mv^2}{R} = \frac{v_{\text{外}o}^2 - k_4 \eta R}{R}$$

$$R = \frac{v_{\text{外}o}^2}{F + k_4 \eta}$$

$$\text{又 } v \propto R$$

$$\therefore R \propto (F + k_4 \eta)$$

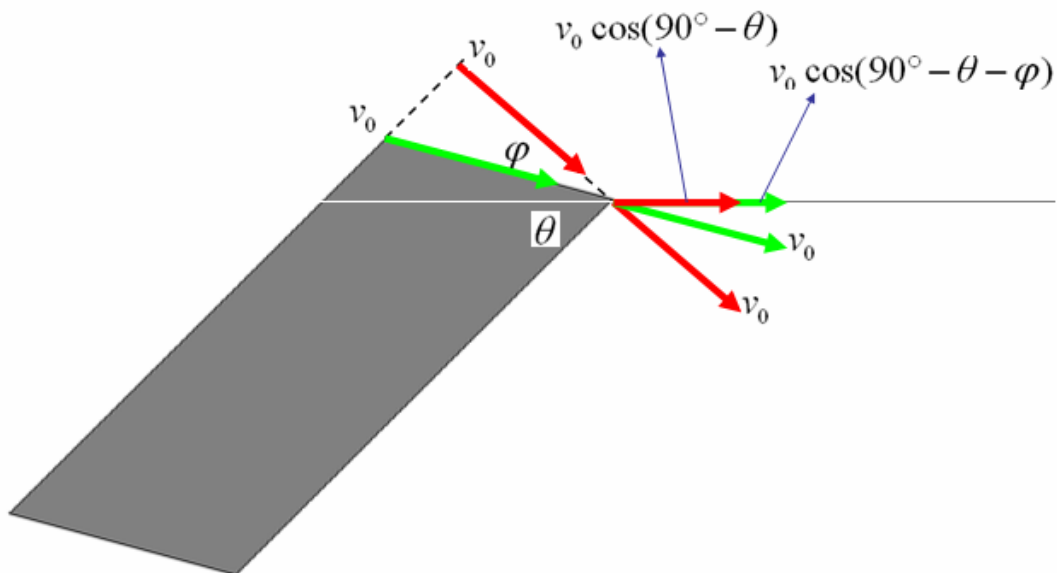
$$\therefore R \propto (\eta + k_5)$$

$$\text{又 } L \propto R$$

$$\therefore L \propto (\eta + k_6)$$

由此力分析可知，**流量差正比於黏滯係數差**。

(四)實驗四力分析



如圖

綠色箭頭代表未切割前之水流速度 v_0

紅色箭頭則是切割後之水流速度 v_0 。

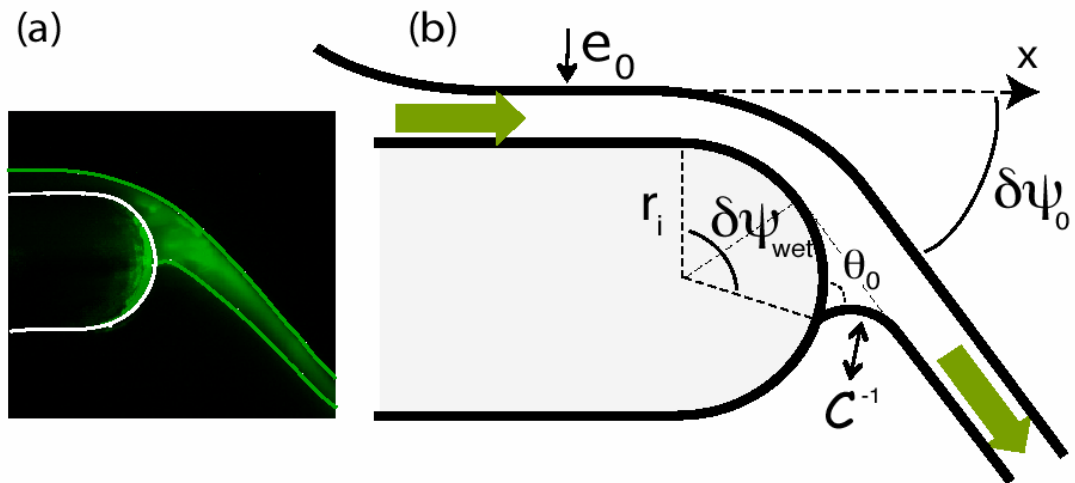
故未切割前之水流速度的水平分量為 $v_0 \cos(90^\circ - \theta)$ 小於 $v_0 \cos(90^\circ - \theta - \varphi)$

→ **因此切割後的水管較不易發生茶壺效應。**

(五)實驗五力分析

由前面的力分析可知，所有參數皆和表面張力無關，故可推出
 →表面張力並不會影響茶壺效應。

(六)實驗六力分析



$$1. W_e = \frac{\rho U^2 e_0}{r}$$

$$2. \delta_{\varphi_0} = \sqrt{F \left[\frac{r_i}{R} \right] \frac{(1 + \cos \theta_0)}{W_e}}$$

$$\rightarrow W_e \propto \frac{r_i^2}{e_0^2} (1 + \cos \theta_0)$$

其中

W_e 為韋伯常數

U 為流量

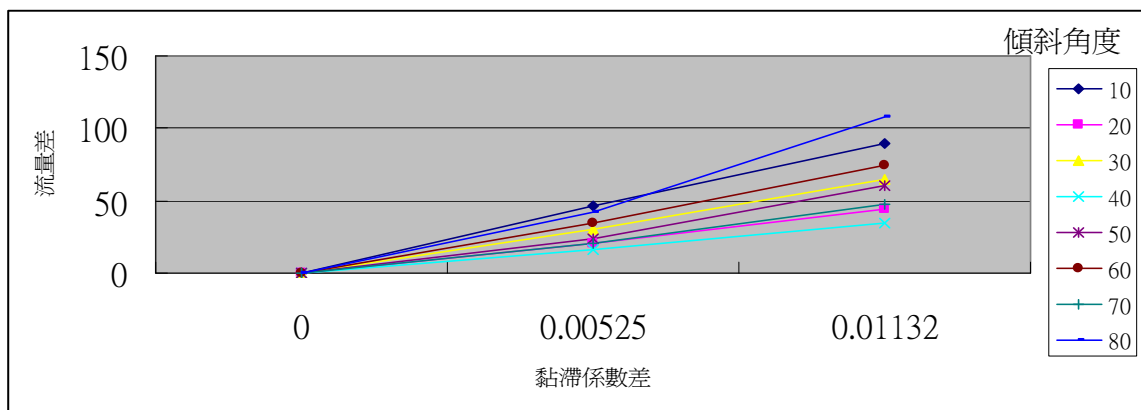
e_0 為常數

利用 1.2 並經過簡單推算後，便可以推出此關係。

由此力分析可知，流量的平方正比於曲率半徑平方乘以 $(1 + \cos \theta)$ 。

三、實驗討論

- (一)根據實驗一的實驗數據可以得知，當出水口的傾斜角度愈大時，愈容易發生逆流。在傾斜角度太小時，甚至不發生逆流現象；而在傾斜角度過大時，以我們目前可控制的流量，不足以使其大到足以避免逆流，故無法提出有效的數據進行說明，但很顯然的，就生活中的應用而言，這種情況幾乎是必定發生逆流。
- (二)附著力是發生逆流的主要作用力，而重力的分力是阻止水流逆流的作用力。當傾斜角度愈大，抵銷附著力的作用力也愈小，愈容易發生逆流。
- (三)由實驗二的實驗數據可以知道「管口直徑大小對茶壺效應的發生與否並沒有顯著的影響」。我們認為主要原因是因為水流離開出水口時會匯流成一圓柱狀水流，也就是說，不論使用的 PVC 硬管之管口直徑為何，匯流後的水流的直徑都差不多，以致於在發生逆流時的水柱形狀是相似的，因此發生茶壺效應的條件也非常相似。故在同一傾斜角度下，不同管口直徑恰發生茶壺效應的水流量也是一樣。
- (四)由實驗三曲線圖中，我們可以明顯發現，三種溶液的曲線圖走向大致相同。且當溶液的黏滯係數越高時，恰發生茶壺效應時之水流量越大。因為當黏滯係數越大，則液體和管壁之間的附著力也越大，故越容易發生逆流。
- (五)由實驗三的力分析中，我們發現 ΔL 正比於 $\Delta \eta$ 。於是我們將數據加以分析。發現都是通過原點的斜直線，和我們的推論相符合。



- (六)由實驗四的實驗數據可以得知「切口角度越大的 PVC 硬管越不容易發生茶壺效應」，而市面上有一些防止水逆流的產品就是利用這一特性來製作，也再一次證實了我們的研究結果。
- (七)但是當切割角不太大時反而不利於倒水，因為水流在接近出水口時會失去軌道而散亂，反而比發生茶壺效應還慘，同時，如果切的不平整也會增加茶壺效應的發生機率。所以切割時也要把握一定的角度及工整，而不是隨意亂切。
- (八)由實驗五所呈現的結果，「表面張力幾乎不影響茶壺效應」。但這也可能是因為我們採用的溶液的表面張力差距太小，以至於我們看不出明顯的差異。
- (九)由力分析關係式可知，「當出水口下緣的曲率半徑增大時，水流會比較容易發生茶壺效應」。越厚的碗曲率半徑越大，也就是說，越厚的碗越容易使水流逆流。

柒、結論

- 一、由實驗一可知，傾斜角度愈大，愈容易發生茶壺效應。
- 二、由實驗二可知「出水口的直徑大小對茶壺效應的發生與否幾乎沒有影響」，而現實中認為有影響則是因為傾斜角度所致。
- 三、由實驗三可發現，黏滯係數越高的溶液越容易逆流。且黏滯係數差正比於流量差。
- 四、由實驗四的實驗數據可以得知「切割過的 PVC 硬管比未切割過的 PVC 硬管更不容易使茶壺效應發生」。
- 五、由實驗五可推知，「表面張力幾乎不影響茶壺效應」，但也可能是表面張力差距太小的緣故。
- 六、由實驗六之數據可知，當出水口下緣的曲率半徑增大時，水流會比較容易發生茶壺效應。
- 七、故一個良好的茶壺應有以下特點：
 - 1.出水口處應縮小
 - 2.出水口應盡量薄
 - 3.出水口不該平切且下緣需向下彎曲
- 八、倒茶之正確觀念：把握想倒之水量，一次倒足，以縮小傾斜角度。

捌、未來展望

這次實驗的各項變因都是分開討論，因次希望之後可以推導出一個公式能夠統整以上各項變因，更方便我們全面的瞭解茶壺效應。

因為器材限制，所以本實驗的實驗誤差還是不盡理想，希望之後可以做出一簡易儀器能測出更精準的實驗數據。

期望能藉由這次實驗，讓一般大眾能更加了解何謂日常科學—茶壺效應，讓大家的生活更便利。

捌、參考資料及其他

- 一、Cyril Duez, Christophe Ybert, Christophe Clanet, Lyderic Bocquet
Laboratoire PMCN, Universite Lyon 1, UMR CNRS 5586, 69622 Villeurbanne, France
LadHyX, Ecole Polytechnique, UMR CNRS 7646, 91128 Palaiseau, France
- 二、D. Richard, C. Clanet, D. Quere, Nature 427 811 (2002).
- 三、C. Duez, C. Ybert, C. Clanet, L. Bocquet, Nature Physics 3 180 (2007).
- 四、J. Walker, Scientific American, October, 144 (1984).
- 五、M. Reiner, Physics Today, No. 9, 16 (1965).
- 六、J.B. Keller, J. Appl. Phys. 28, 859-864 (1957).
- 七、S.F. Kistler, L.E. Scriven, J. Fluid Mech. 263 19(1994).
- 八、H. Isshiki, B.S. Yoon, D.J. Yum, Phys. Fluids 21 082104 (2009).
- 九、See EPAPS Document No. E-PRLTAO-XXX for movies and electro-wetting details.
For more information on EPAPS, see <http://www.aip.org/pubservs/epaps.html>.
- 十、J.-M. Vanden-Broeck, J.B. Keller, Phys. Fluids 29 3985(1986).
- 十一、J.C. Bird, S. Mandre, H. A. Stone, Phys. Rev. Lett. 100 234501 (2008).
- 十二、I.A. Larmour, S.E.J. Bell and G.C. Saunders, Angew. Cham. Intern. Ed. 46 1710 (2007).
- 十三、C. Clanet, Ann. Rev. Fluid Mech., 39, 469, (2007).
- 十四、E. Guyon, J.-P. Hulin, L. Petit , Physical Hydrodynamics
(Oxford University Press, Oxford, 2001).
- 十五、J. Israelachvili, Intermolecular and Surface Forces
(Academic Press, London, Second Edition, 1992), Chap. 15.6.
- 十六、F.L. Orr, L.E. Scriven, A.P. Rivas, J. Fluid Mech. 67 723 (1975)
- 十七、L. Bocquet, E. Charlaix, S. Ciliberto and J. Crassous, Nature 396 735 (1998).
- 十八、F. Mugele and J.C. Baret, J. Phys.: Condens. Matter 17 R704 (2005).
- 十九、C. Duez, C. Ybert, C. Clanet, L. Bocquet, patents pending,
Pct/EP2009/064474 and FR0857782
- 二十、D.Quere, Rep. Prog. Phys., 68, 2495 (2005).

【評語】 040103

本作品改變出水口的傾斜角及出口斜角來探討水在出口迴流的現象。雖能討論多數傾倒角度的現象，但較欠缺創新的設計或討論的方式來回顧之一較陳舊的議題。