

中華民國第四十五屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 物理科

040112

杯子與茶壺的對話

國立新竹女子高級中學

作者姓名：

高二 陳尹芃 高二 楊睿緣

指導老師：

陳沛慈 陳文楠

壹、摘要

以自行裝設的簡易實驗器材來觀察液體流出圓口容器口時之狀態，並針對其壁流現象和液體流量、濃度及容器口之間的關係加以討論。

貳、研究動機

倒水也是一門大大的學問！比方說圓口的茶杯和尖嘴的茶壺倒起水來是截然不同的：茶杯常常讓人淋的滿手濕；茶壺卻能乾淨俐落的將水倒出，令人好奇的是，圓口和尖嘴的差別在哪呢？而厚度、大小不同的圓口茶杯也使倒水這件看似稀鬆平常的小事充滿挑戰性，還有不同濃度的液體使難度升級，更讓我們摩拳擦掌，躍躍欲試。

參、研究目的

- 一、探討壁流臨界角與液體流量之關係
- 二、探討壁流臨界角與管壁厚度之關係
- 三、探討壁流臨界角與管子內徑大小之關係
- 四、探討壁流臨界角與液體濃度之關係

肆、研究設備及器材

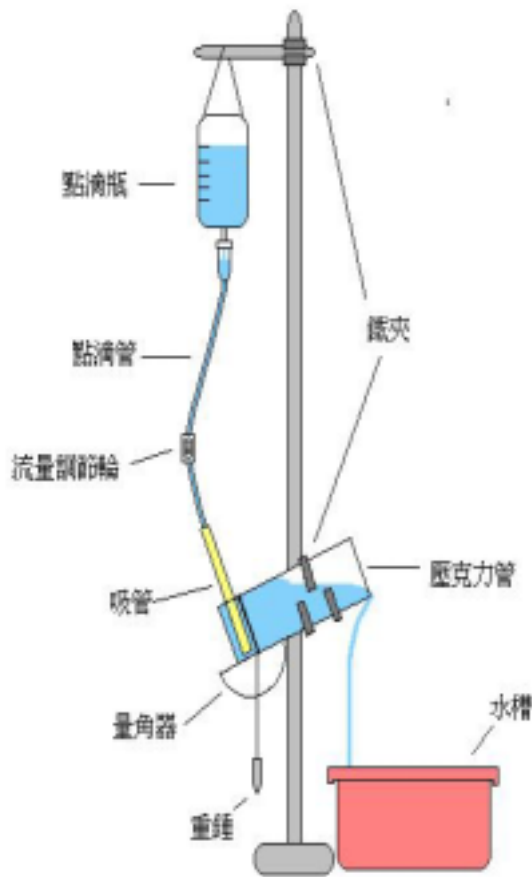
一、器材

- (一) 支架×1
- (二) 鐵夾×2
- (三) 點滴瓶(附管子及流量調節輪)×1
- (四) 水槽×1
- (五) 壓克力管(長 20cm，距底部 2cm 處打一直徑 0.5cm 之小孔)

| 編號 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 外徑(mm) | 20.0 | 22.0 | 30.0 | 36.0 | 40.0 | 50.0 | 50.0 | 60.0 | 60.0 |
| 壁厚(mm) | 2.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 5.0 | 3.0 | 5.0 | 3.0 | 5.0 |
| 內徑(mm) | 16.0 | 16.0 | 24.0 | 30.0 | 30.0 | 44.0 | 40.0 | 54.0 | 50.0 |

- (六) 量角器×1
- (七) 重錘×1
- (八) 10ml 量筒×1
- (九) 碼表×1
- (十) 氯化鈉

二、實驗裝置如圖一、二所示



< 圖一 >



< 圖二 >

伍 研究過程和方法

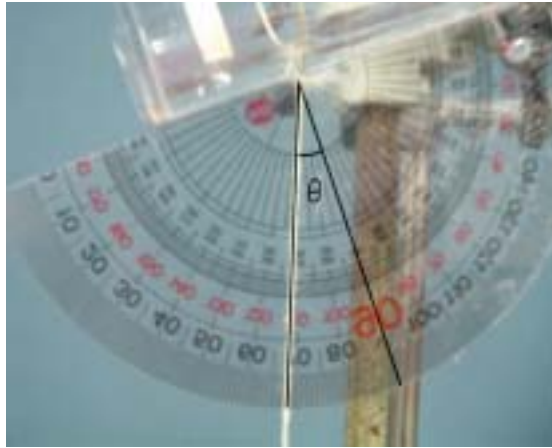
一、實驗過程

本實驗主要是在測量發生壁流現象的臨界角。因此我們在水流量穩定時，漸漸改變壓克力管之傾斜角度；並定義發生壁流現象的最小角度為壁流臨界角。每一次操作過程中，均有些共同步驟：

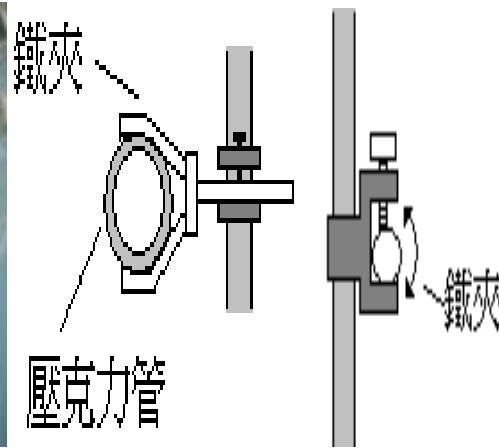
(一)測量及調整角度

在壓克力管末端繫上一重錘，再以膠帶將量角器垂直固定於管壁，即可確切量出管子和水平面的夾角（如圖三所示）。又我們訂管口向下傾斜之角度為負，向上為正。

鐵夾則讓我們能輕鬆準確的調整角度和固定壓克力管（如圖四所示）。



< 圖三 >



< 圖四 >

(二)維持穩定水流及測量流量

利用點滴所附之流量調節輪及點滴瓶中水位之高低調整流量。每次實驗前及改變角度時均測量多次以確保流量之準確，並隨時保持水位高度固定，以維持穩定水量。

(三)每一次改變角度時，均保持管口和管壁的乾燥，避免水流受到小水滴之吸力影響而導致實驗誤差。

二、實驗步驟

(一)壁流臨界角與液體流量之關係

1. 以膠帶將量角器垂直固定於 1 號壓克力管上。
2. 將 1 號管固定於鐵夾上。
3. 將滴管插入吸管中，再垂直插入壓克力管的小孔。
4. 依次調整流量為 0.8ml/s、1.0 ml/s、1.3 ml/s、1.7 ml/s、2.0 ml/s、2.5 ml/s、2.8 ml/s、3.3 ml/s，記錄壁流臨界角。
5. 更換 2 號、3 號管...，重複上述步驟。

(二)壁流臨界角與管壁厚度之關係

選擇相同內徑之管子，如以 1、2 號管為一組，4、5 號管為一組，依上述方式測量其壁流臨界角度，尋找壁流臨界角與管壁厚度之關係。

(三)壁流臨界角與管子內徑大小之關係

選擇相同管壁厚度之管子，如以 2、3、4、6、8 號管為一組，5、7、9 號管為一組，依上述方式測量其壁流臨界角度，尋找壁流臨界角與管子內徑大小之關係。

(四)壁流臨界角與液體濃度之關係

1. 配製 1M 的氯化鈉溶液，重複上述步驟。
2. 更換 2M、3M、4M 的氯化鈉溶液，重複上述步驟，尋找壁流臨界角與液體濃度之關係。

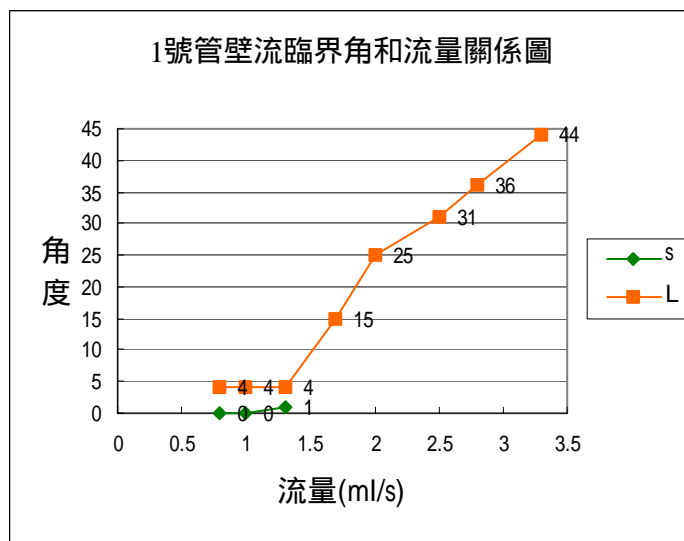
陸、研究結果

一、壁流臨界角與液體流量的關係圖

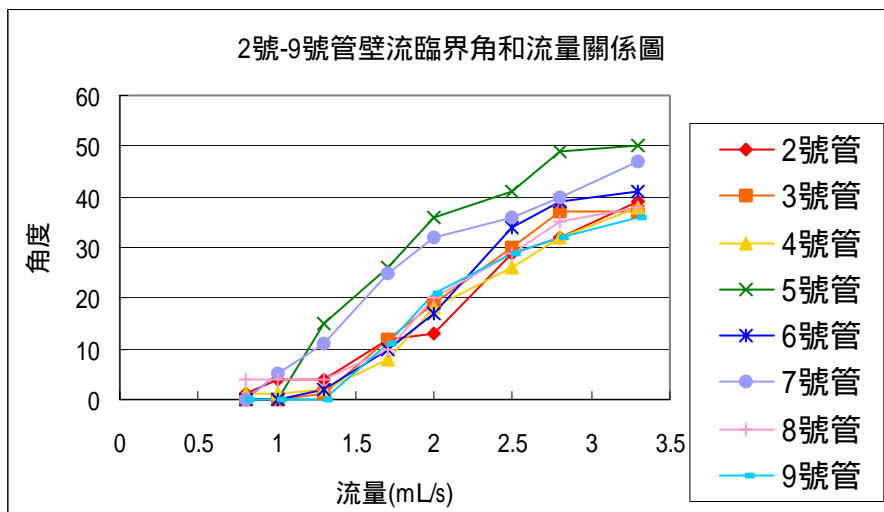
實驗中，我們觀察到一種令人困擾的「短壁流」現象，通常發生在較小的流量，連向下傾斜的管子都有可能出現短壁流。為了方便起見，而稱它為「S」。臨界角 S 到臨界角 L 都是它發生的範圍。

(一) 1 號管壁流臨界角與液體流量的關係

| 流量 (ml/s) | 臨界角 L |
|-----------|-------|
| 0.8 | 4.0 |
| 1.0 | 4.0 |
| 1.3 | 4.0 |
| 1.7 | 15.0 |
| 2.0 | 25.0 |
| 2.5 | 31.0 |
| 2.8 | 36.0 |
| 3.3 | 44.0 |

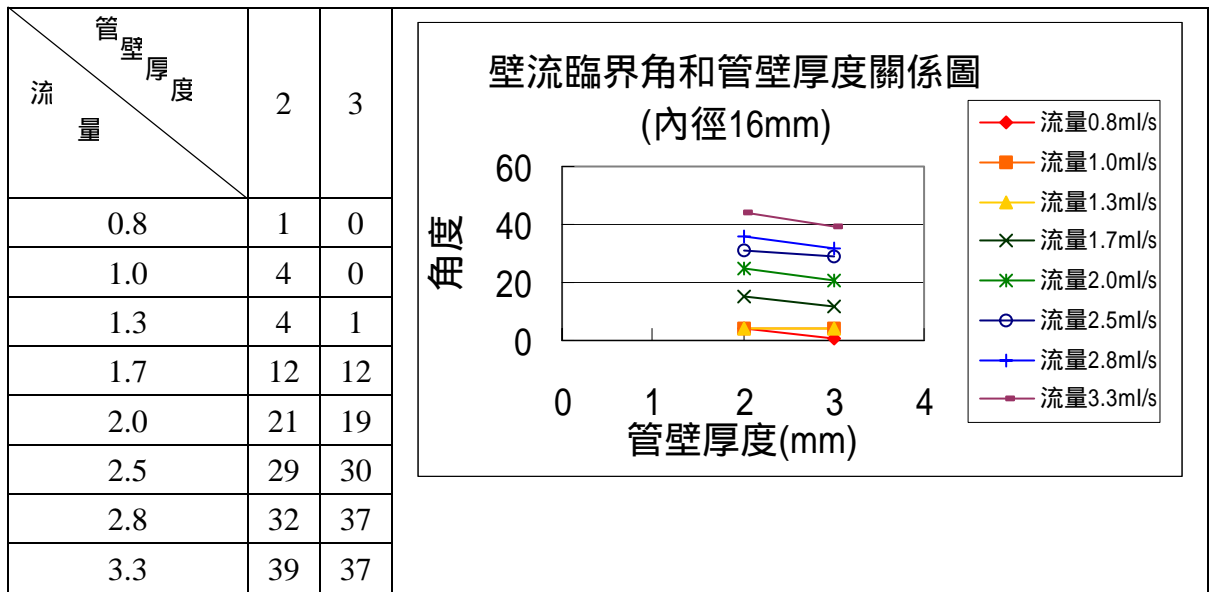


(二) 2-9 號管壁流臨界角和流量關係圖



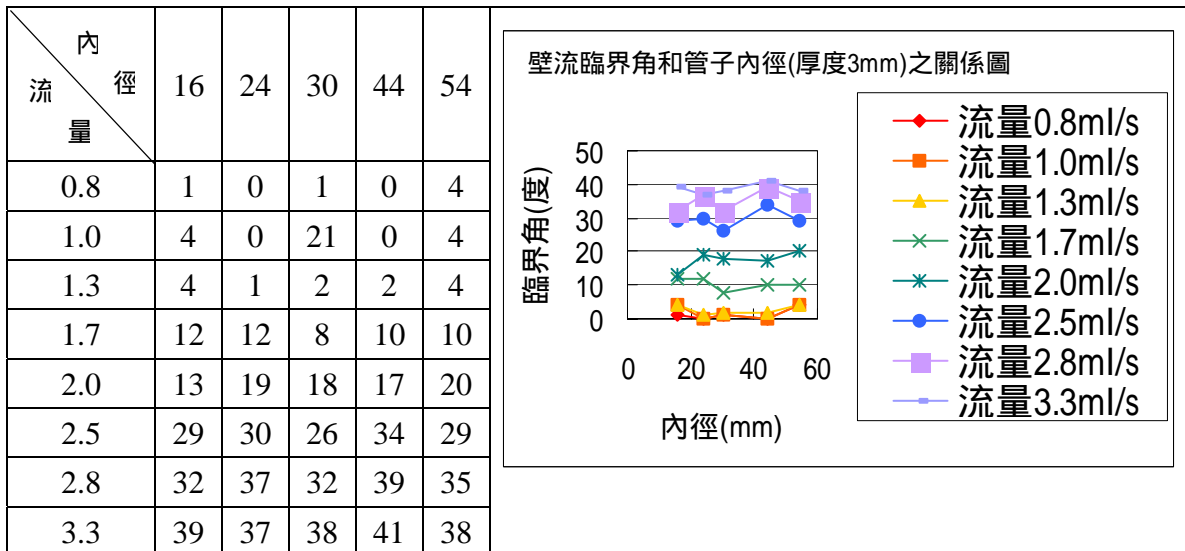
由數據圖可知：曲線多成正相關。亦即流量愈大、壁流臨界角愈大，愈不容易發生壁流現象。

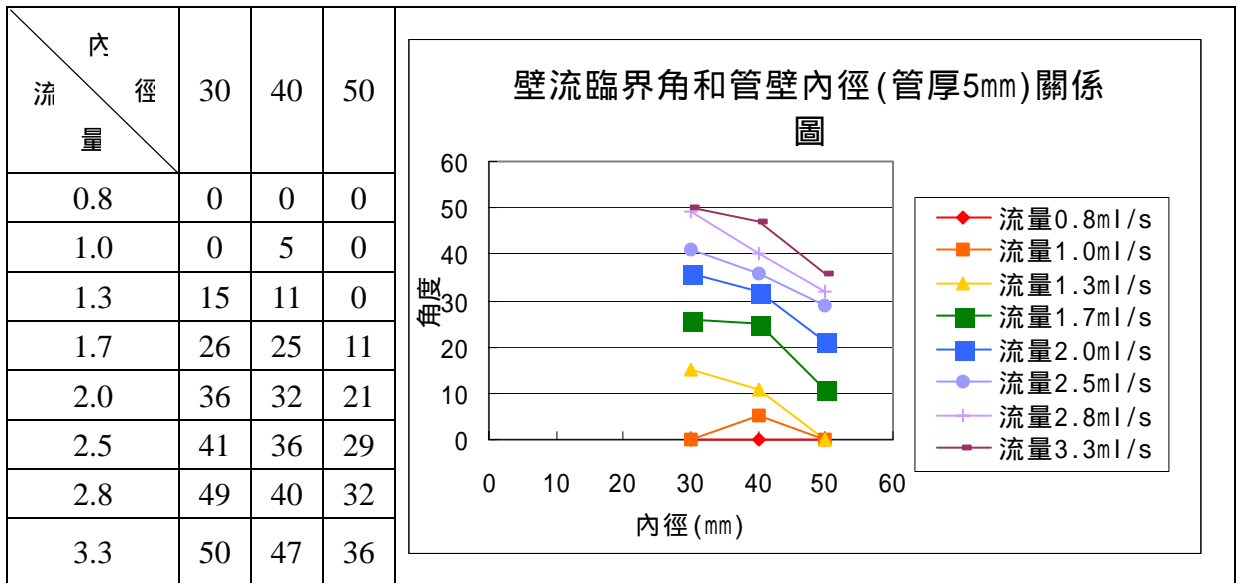
二、壁流臨界角與管壁厚度之關係圖



由於壓克力管的規格有限，所以取得相同內徑不同管壁厚度的管子有限，但仍可看出，管壁厚度愈厚，壁流臨界角愈小。

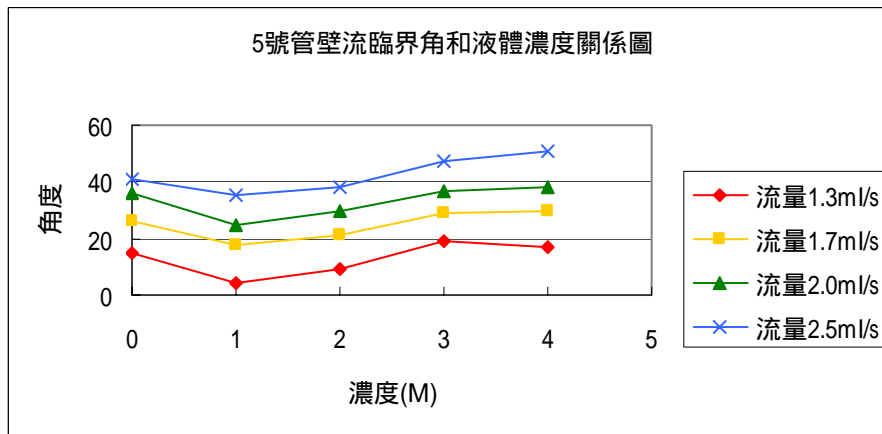
三、壁流臨界角與管子內徑之關係

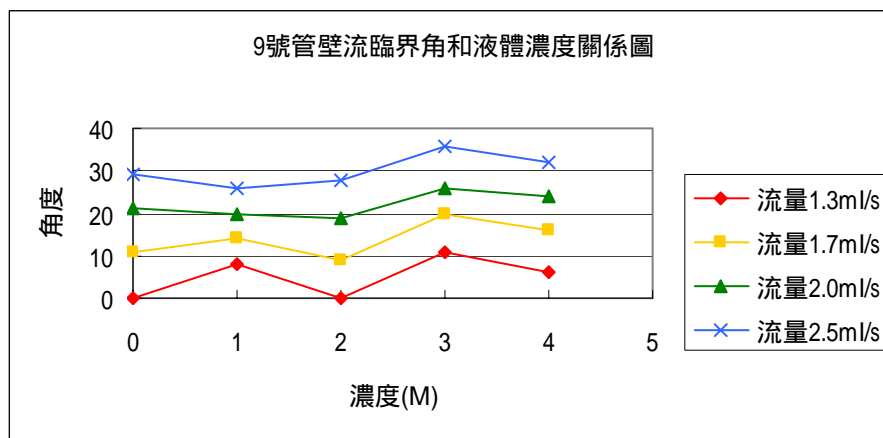
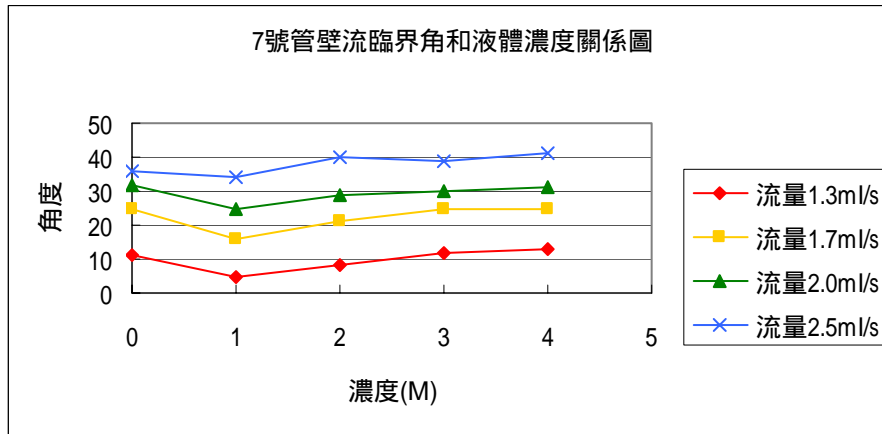




當管壁厚度 3.0mm 時，內徑大小對壁流臨界角影響不大，差值僅約 5°左右，遠不如流量的影響，而當管壁厚度增大為 5.0mm 時，內徑大的管明顯有壁流臨界角隨之減小之趨勢。

四、壁流臨界角和液體濃度之關係





分析 1 到 9 號管的壁流臨界角和液體濃度關係圖，我們得到以下結論：對同一根壓克力管來說，不同流量的臨界角分布曲線有高度的一致性。綜合 1 到 9 號管的關係圖來看，又可發現 1M 和 2M 氯化鈉溶液的壁流臨界角比純水的臨界角小；3M 和 4M 氯化鈉溶液的壁流臨界角則明顯大於純水的臨界角，且 3M 和 4M 的臨界角度相差不大。

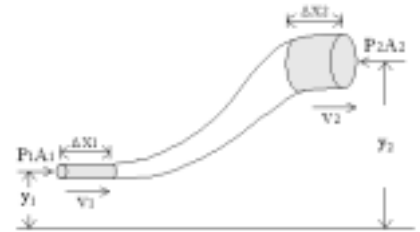
柒、討論

一、壁流在我們生活中是極為普遍的現象，但真正深入研究後，才發現影響壁流的因素是非常錯縱複雜的。液體從管口流出時，同時受到數種力作用。

- (一) 重力 = mg
- (二) 液體與管壁的附著力
- (三) 液體分子間的分子力
- (四) 液體流動時，依循白努力定律：

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g y_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g y_2 \text{ 造成的合力}$$

(如圖五所示)

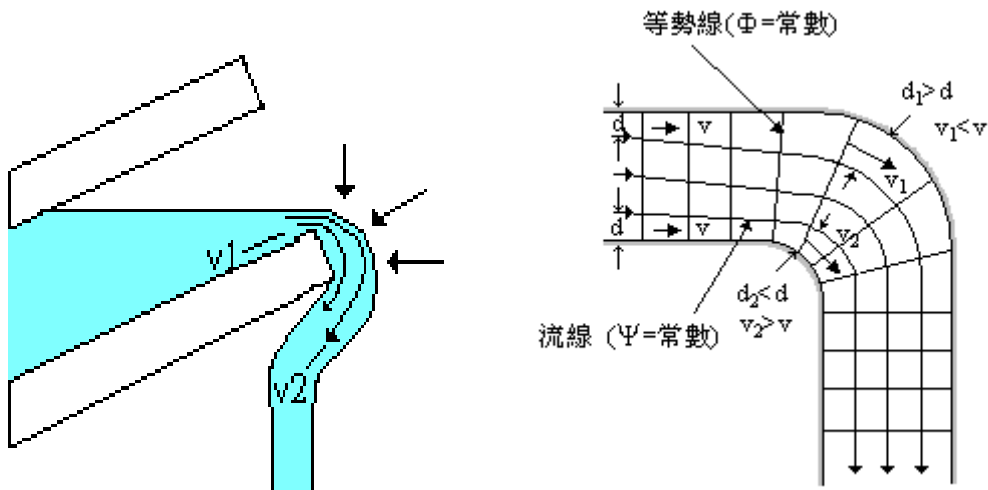


< 圖五 >

二、當產生壁流現象時，上述諸力構成液體轉彎時所需的向心力 $F_c = \frac{mv^2}{r}$ 。

我們從簡單的關係式可看出：流量愈大、流速愈大、轉彎半徑愈小，愈需較大的向心力，愈不易產生壁流。以上推論大致和實驗結果相符。

三、設水流為一理想不可壓縮液體，則在圓形路徑上流動時，其速度反比於半徑，亦即半徑越小，速度越快。又依據白努力原理：流速快的流體壓力較低。因此，當流體外的壓力大於管口的流體壓力時，水流便順著管壁流下，產生壁流現象。(如圖六所示)



< 圖六 >

四、管壁厚度愈大，轉彎半徑愈大，所需向心力愈小，據此推論較易產生壁流；但從另一角度來看，管壁厚度愈厚，轉彎內側水分子與管壁摩擦愈多，速度減小，造成與外部水流速度差減少，壓力差減少，又不利壁流生成。這可能是我們實驗中管壁厚度對壁流現象影響不明顯的原因。

五、在實驗過程中，我們發現彎曲的點滴管會造成水流在向下傾斜的管中蜿蜒而下，宛如大亨堡上的芥末醬（如圖七所示），「芥末醬」的蜿蜒程度隨著水流量的增加而更加劇烈，甚至可以超過一半的管壁！雖然「芥末醬現象」十分有趣，但卻造成測量水流量的不便及實驗數據讀取的困難，因此我們先將點滴管插入吸管中，再將吸管垂直插入壓克力管末端的小孔，以解決問題。



< 圖七 >

六、我們觀察到臨界角有時並不明顯：

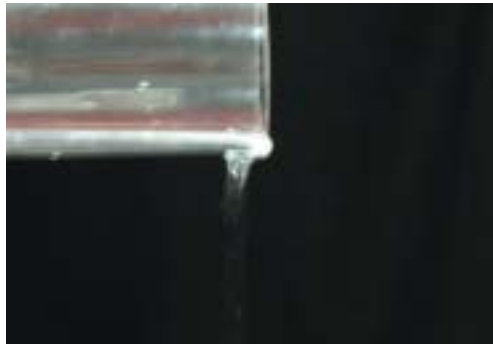
（一）在較小的流量下，水流會因為表面張力而堆積在管口，直到撐不住才以大於設定流量之水量流出，產生暫時性壁流，旋即「斷流」並再次堆積，因為其流出的流量並不是我們所設定之流量，所以我們不定義其為壁流。

暫時性壁流中有一種「撞球式壁流」現象，顧名思義，就是水斷流時在管壁上留下一顆或數顆小水珠，當下一次暫時性壁流發生時，水流便如同撞桿朝水珠撞去，斷流後，又在離管口更遠的管壁上重新形成小水珠，就和撞球是一樣的道理（如圖八所示）。



< 圖八 >

(二) 又或是在較大的流量下，會發生水流快要產生壁流現象，卻又心有餘而力不足，離開管壁落下，我們則在實驗中一一紀錄，稱之為「短壁流」(如圖九所示)。當短壁流和「芥末醬」同時發生時，水流會在管口盤旋，常常把我們噴得一身濕。



<圖九>

(三)而在某些更大的流量下，水流依然會堆積在管口，而後快速的直接流出管口，經過一段時間後，水流漸漸回復原本設定的水量，因此，水流會彎曲傾向管壁，進而產生壁流現象(如圖十所示)。



<圖十>

捌、結論

一、流量、管壁傾斜角 對壁流現象的影響：

根據所附之數據圖，可知曲線多呈正相關。亦即流量越大、傾斜角越大，越不容易發生壁流現象。

二、管壁厚度對壁流現象的影響：

由於時間上的限制，我們未能取到足夠的數據來證明管壁厚度對壁流現象的影響。

三、管子內徑對壁流現象的影響：

根據所附之數據圖，可推知在較大流量時，管子內徑和壁流現象是呈較為一致的曲線關係。亦可視為在較大流量時，壁流現象較為穩定；在較小流量所得到的曲線較不規則。

四、液體濃度對壁流現象的影響：

從 1 到 9 號管的數據圖中可推知，流量對壁流臨界角的影響遠大於濃度。而管子的內徑和厚度對壁流臨界角有一定的影響；但因為器材的限制，我們無法真正找出影響壁流臨界角的因素。

五、從實驗中，我們深刻體認到容器口對壁流現象的巨大影響。將茶壺口設計成尖嘴能使水流集中，流量變大，自然不易產生壁流現象。如果要讓杯子像茶壺般乾淨俐落的倒出水，那就得遵照三字訣：快、狠、準囉！

玖、參考資料及其他

一、參考資料

- (一) Jearl Walker 著 葉偉文譯 物理馬戲團 1 第一版 天下遠見 第二章 p.248-249 89 年出版
- (二) Young Munson Okishi 著 杜鳳棋譯 流體力學 - 精華本 (A Brief Introduction to Fluid Mechanics) 高立圖書有限公司 第六章 p.253 86 年出版
- (三) 林明瑞編 物質科學物理篇 (下冊) 南一書局
- (四) 褚德三編 物質科學物理篇 (下冊) 龍騰文化事業公司
- (五) 蔡豐欽編 流體力學概論 第四版 新文京開發出版有限公司

中華民國第四十五屆中小學科學展覽會
評 語

高中組 物理科

040112

杯子與茶壺的對話

國立新竹女子高級中學

評語：

1. 研究之現象有趣
2. 對壁流臨界角以設計之設備較不易精確量測，宜改進觀測設備。
3. 實驗數據若能加上差誤估計或數據離散度較佳。
4. 未攜帶任何設備至現場。