

# 中華民國第 62 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

高級中等學校組 物理與天文學科

佳作

051806

從吹不動螞蟻說起-層流之探討

學校名稱：臺中市私立弘文高級中學

|                                   |              |
|-----------------------------------|--------------|
| 作者：<br>高一 簡宥庭<br>高一 江明捷<br>高一 郭于綺 | 指導老師：<br>張益瑞 |
|-----------------------------------|--------------|

關鍵詞：邊界層、層流、紊流

## 摘要

為觀察氣流流經物體表面不易流動的現象，我們設計製造風洞實驗裝置。將筆芯墊在金屬片上，測量筆芯被吹動時的驅動速率，繼而變更筆芯的高度與水平位置，測量筆芯被吹動之驅動速率。由數據作圖可看出在風洞管下半部，筆芯驅動速率會隨著高度以乘冪減少，也就是從底層往上的流速是乘冪函數增加，與文獻之圖形類似。同時從數據作圖分析中也可看出筆芯越細，隨高度增加時，驅動速率較快變小。而筆芯超過風洞管一半鉛直高度後，數據曲線不如預期，故又繼續研究金屬塊破壞層流之效應。在底層放平行條狀物(簡稱肋條)，用筆芯來看出氣流的擾動，測出驅動速率有些區域大有些區域小，表示障礙物引起二次流的紊流並不是流速變快，是屬於擾動式的。

# 壹、前言

## 一、研究動機：

有一次跟爸爸去參觀曲棍球棒製造工廠，聽廠長解說提到流體底層有吹不動螞蟻的現象，我一直感到好奇想知道它的原理，剛好學校課程每週有安排兩節自主學習的彈性時間，可以讓同學自訂學習主題，於是和同學展開這次的研究。

## 二、研究目的：

(一)探討風洞管中氣流流速與高度及水平位置的關係。

(二)探討底層的物體不容易受氣流吹動的原因。

(三)探討墊高金屬塊之放置方式對氣體流動的影響。

(四)探討破壞層流引發的二次流及其應用。

## 三、文獻回顧：

流體流經物體表面時，在靠近表面邊界的區域，因流體自身黏性和與物體表面間的摩擦力影響，會形成一邊界層 (boundary layer)，在最靠近物體表面的流體會緊貼物體表面而流速趨近於零，越離開物體表面則流速越快，直到與主流同一速度，如圖 1 所示。[1、2]

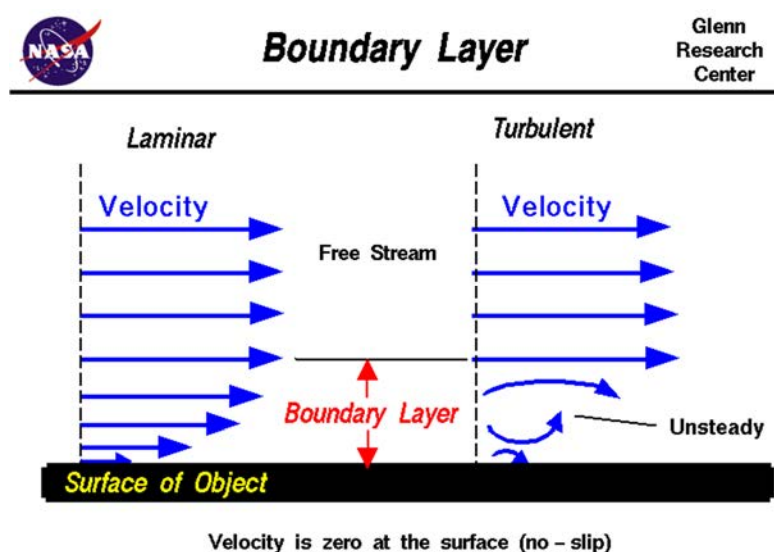


圖 1：流體在物體表面形成流速很小的邊界層。[3]

當流體速度小時，流體分層流動是為層流 (laminar flow)；當流速增加到很大時，流線不再清楚可辨，此時流體中出現有許多小漩渦，稱為紊流 (turbulent flow)；而在層流和紊流之間的流體狀況不穩定，層流和擾流混雜出現，存在一過渡流 (transitional flow)，如圖 2 所示。[4]

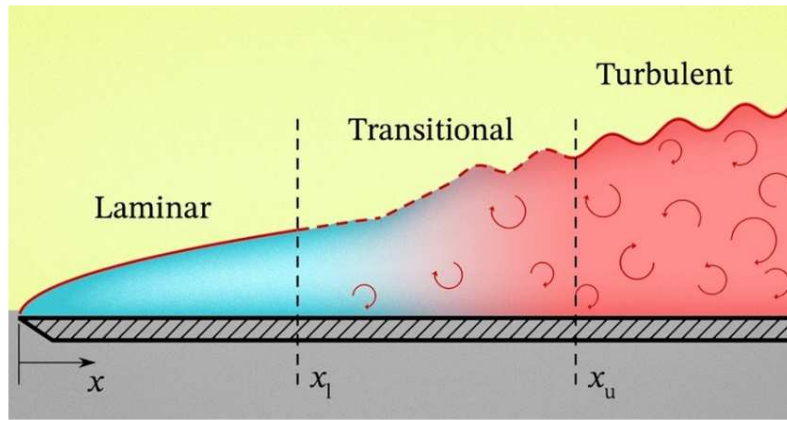


圖 2：流經物體表面之層流、紊流和過渡帶。[5]

在圓形管道中，可藉由雷諾數（Reynolds number）大小來推測流體的形式，雷諾數是一個沒有單位的物理量，是由流體的慣性力和黏性力之比值求得，公式如下：

$$\text{雷諾數 } R_e = \frac{\text{慣性力(inertial force)}}{\text{黏滯力(viscous force)}} = \frac{\rho v D}{\mu}$$

$\rho$ ：流體密度 ( $\frac{kg}{m^3}$ )

$v$ ：平均流速 ( $\frac{m}{s}$ )

$D$ ：圓管內直徑 ( $m$ )、方形管邊長 ( $m$ )

$\mu$ ：黏滯係數 ( $\frac{kg}{m \cdot s}$ )

當雷諾數小於 2100 時，代表黏滯力對流場的影響大於慣性力，流體的流速會因黏滯力的影響而減小，細微的擾動會被黏滯力抵銷，使得流體流動速度較為穩定一致，以層流為主；而當雷諾數逐漸變大超過 4000 時，代表慣性力對流場的影響大於黏滯力，流體流速較快時容易因微小變化而產生擾動，分子間互相激烈碰撞產生漩渦，造成流動方向不一致，發展形成不規則的紊流。[6、7]

## 貳、研究設備及器材

一流速固定之氣流流經一長且寬之平板，在接近平板表面區域形成邊界層，氣流在接觸到平板後的一定距離內形成層流。將一筆芯放置於平板上層流的區域中，筆芯的高度小於邊界層之高度，觀察筆芯是否會被吹走。移動筆芯至層流中不同的高度，以及平板上不同的

位置與高度，再觀察筆芯是否會被吹走。於平板上層流區域加一突出物，將筆芯放置突出物後，觀察筆芯是否會被氣流吹走。

實驗器材如圖 3 所示，自製方形壓克力風洞管兩組(規格分別是小風洞管長 35 cm、寬 3 cm、高 3 cm 和大風洞管長 35 cm、寬 5 cm、高 5 cm)、六種不同規格之自動鉛筆筆芯各一盒、不同高度之金屬塊共九組、壓克力條(長 2.7 cm、寬 0.2 cm、高 0.2 cm)、空氣壓縮機一臺、風速計一臺和 iPad 一臺。



圖 3：實驗器材

實驗裝置如圖 4 所示，自製方形壓克力風洞管兩端透過異徑管縮小管徑，分別連接至空氣壓縮機(出口最大壓力為 150 psi)和風速計(SP-8001 多功能環境測量儀表)。實驗時截取適當長度之筆芯，將筆芯放置於風洞管中墊高，墊高高度代號為  $h$ 。由空氣壓縮機產生之壓縮空氣，透過調壓閥逐漸增加氣流流速大小，將空氣打入壓克力管中，再由風速計測量流出壓克力管之空氣流速，搭配 iPad 同步錄影以便紀錄筆芯被吹動時之出風口之氣流流速，此氣流流速簡稱驅動速率代號為  $V$ 。

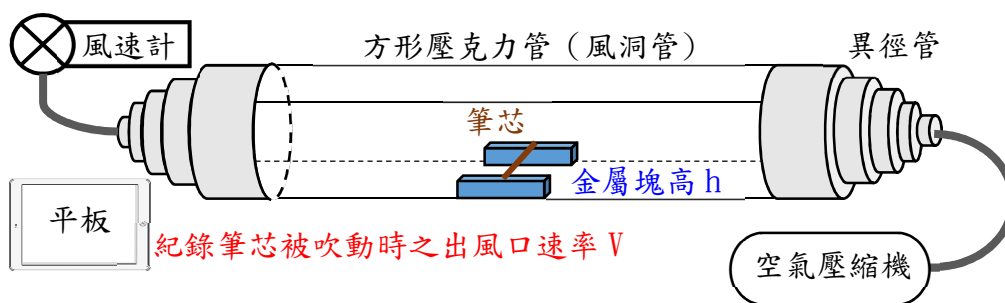


圖 4：實驗裝置

氣流在壓克力管中流動時，因空氣摩擦會產生靜電而影響實驗觀察，故壓克力管中放置之突出物以金屬塊製作，以便接地消除靜電之干擾。實驗使用之金屬塊尺寸和筆芯規格如表 1 所示。

| 金屬塊尺寸 |       |      |         | 筆芯規格    |        |
|-------|-------|------|---------|---------|--------|
| 序號    | 長     | 寬    | 高       | 2B / HB | 直徑     |
| 1     | 20 mm | 6 mm | 0.3 mm  | 2B      | 2.0 mm |
| 2     | 20 mm | 6 mm | 1.5 mm  | 2B      | 0.9 mm |
| 3     | 20 mm | 6 mm | 3.0 mm  | 2B      | 0.5 mm |
| 4     | 20 mm | 6 mm | 4.5 mm  | HB      | 0.3 mm |
| 5     | 20 mm | 6 mm | 6.0 mm  | HB      | 0.5 mm |
| 6     | 20 mm | 6 mm | 10.0 mm | HB      | 0.7 mm |
| 7     | 20 mm | 6 mm | 15.0 mm |         |        |
| 8     | 20 mm | 6 mm | 20.0 mm |         |        |
| 9     | 20 mm | 6 mm | 25.0 mm |         |        |

表 1：九種金屬塊尺寸（每組兩個）和六種筆芯規格

## 參、研究過程

### 一、氣流對不同規格筆芯之影響

- (一)將不同規格之自動鉛筆筆芯截取 2.5 公分長度進行實驗。
- (二)固定筆芯在小壓克力管中之水平位置，將筆芯透過金屬塊墊高，墊高的高度分別是 0.3 mm、1.5 mm、3.0 mm、6.0 mm、10.0 mm 和 15.0 mm 來進行實驗。
- (三)緩慢轉動空壓機的調壓閥旋鈕，讓流進壓克力管中的氣流穩定增加，觀察記錄壓克力管中的筆芯是否受氣流影響而被吹動，並記錄筆芯被吹動當下的風速計讀數。此速率讀數是風洞管中筆芯被驅動時管口之風速，我們簡稱它為驅動速率  $V$ 。
- (四)針對上述步驟，測量六種圓形自動鉛筆筆芯 2B-2.0 mm、2B-0.9 mm、2B-0.5 mm、HB-0.7 mm、HB-0.5 mm 和 HB-0.3 mm 之驅動速率。

### 二、氣流對不同鉛直高度和水平位置的筆芯之影響

- (一)將直徑 0.3 mm 之 HB 自動鉛筆筆芯截取 2.5 公分長度在小風洞管（截面邊長 3 cm）中進行實驗。
- (二)固定筆芯在小壓克力管之前端水平位置，將筆芯透過高度為 0.3 mm 的金屬塊墊高，測其驅動速率。
- (三)在同一位置處，依序增加金屬塊高度，分別是 1.5 mm、4.5 mm、6.0 mm、10.0 mm、11.5 mm、13.0 mm、15.0 mm、16.5 mm 和 18.0 mm 後，測其驅動速率。

(四)改變筆芯在壓克力管中之水平位置，分別在中間和後端位置，測其驅動速率。

### 三、筆芯在小風洞管底部至頂部之驅動速率

(一)取 HB-0.3 mm 之筆芯 2.5 公分長度，在截面邊長 3 cm 之小風洞管中進行實驗。

(二)固定筆芯在小風洞管之前端水平位置，將筆芯以金屬塊墊高，測其驅動速率。

(三)針對上述步驟，依序測量筆芯高 0.3 mm、1.5 mm、3.0 mm、6.0 mm、10.0 mm、15.0 mm、20.0 mm、23.0 mm、25.0 mm、26.5 mm、28.0 mm 和 29.5 mm 之驅動速率。

### 四、大風洞管中之 HB 0.3 mm 筆芯之驅動速率

(一)將 HB 0.3 mm 筆芯截取 4.7 公分長度，在大風洞管（截面邊長 5 cm）中進行實驗。

(二)固定筆芯在大壓克力管中之中間水平位置，將筆芯以金屬塊墊高，測其驅動速率。

(三)針對上述步驟，依序測量筆芯高度為 1.5 mm、3.0 mm、4.5 mm、6.0 mm、10.0 mm、15.0 mm、20.0 mm 和 25.0 mm 之驅動速率。

### 五、同一位置之金屬塊往中間擺放對筆芯之影響

(一)將一組高度為高 15.0 mm 之金屬塊緊靠小風洞管兩側管壁，固定筆芯在管中之同一水平和鉛直位置，測其驅動速率。

(二)在筆芯同一位置和高度處，改變金屬塊之放置位置，分別是只將流道左側金屬塊移離管壁 2.0 mm、只將流道右側金屬塊移離管壁 2.0 mm 和同時將流道左右兩側金屬塊移離管壁 2.0 mm，測其驅動速率。

### 六、在筆芯前後放置肋條對驅動速率之影響

(一)取 HB-0.3 mm 之筆芯 2.5 公分長度，在截面邊長 3 cm 之小風洞管中墊高 3.0 mm，測其驅動速率。

(二)接著在筆芯前後各放置一條高 0.2 mm 的平行壓克力條（簡稱肋條）。順著氣流方向，前肋條和後肋條與筆芯的距離比分別是 5：1、5：2、6：1 和 7：1 時，分別測其驅動速率。

## 肆、研究結果

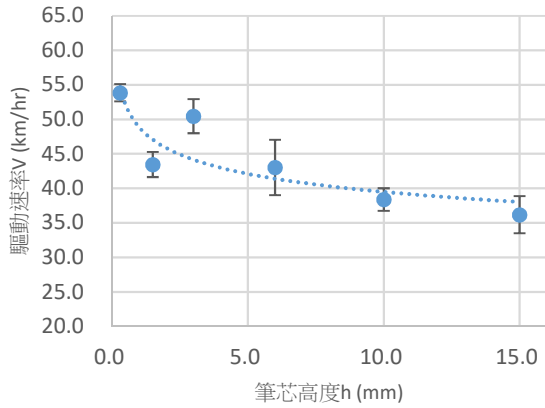
一、固定筆芯在小風洞管中水平位置，測量不同規格筆芯之驅動速率和高度的關係，測量結果如表 2 所示。

| 筆芯規格   | 高度(mm) | 驅動速率 (km/hr) |      |      |      | 平均驅動速率 (km/hr) | 標準差 (km/hr) |
|--------|--------|--------------|------|------|------|----------------|-------------|
| 2B 2.0 | 0.3    | 52.5         | 53.4 | 54.0 | 55.5 | 53.9           | 1.3         |
|        | 1.5    | 41.7         | 42.3 | 44.1 | 45.7 | 43.5           | 1.8         |
|        | 3.0    | 47.9         | 48.8 | 52.3 | 52.8 | 50.5           | 2.5         |
|        | 6.0    | 38.6         | 41.3 | 44.3 | 47.9 | 43.0           | 4.0         |
|        | 10.0   | 36.0         | 38.8 | 39.0 | 39.7 | 38.4           | 1.6         |
|        | 15.0   | 32.3         | 36.4 | 37.9 | 38.1 | 36.2           | 2.7         |
| 2B 0.9 | 0.3    | 55.0         | 57.5 | 57.5 | 66.3 | 59.1           | 5.0         |
|        | 1.5    | 46.8         | 47.9 | 50.4 | 51.0 | 49.0           | 2.0         |
|        | 3.0    | 43.4         | 43.9 | 43.9 | 44.3 | 43.9           | 0.4         |
|        | 6.0    | 39.3         | 40.3 | 42.8 | 44.1 | 41.6           | 2.2         |
|        | 10.0   | 36.4         | 37.7 | 37.9 | 40.8 | 38.2           | 1.9         |
|        | 15.0   | 34.4         | 36.8 | 39.2 | 41.0 | 37.9           | 2.9         |
| 2B 0.5 | 0.3    | 47.9         | 55.0 | 55.5 | 56.8 | 53.8           | 4.0         |
|        | 1.5    | 39.3         | 39.5 | 41.0 | 43.2 | 40.8           | 1.8         |
|        | 3.0    | 29.7         | 30.7 | 35.1 | 35.5 | 32.8           | 3.0         |
|        | 6.0    | 27.2         | 28.6 | 29.4 | 29.4 | 28.7           | 1.0         |
|        | 10.0   | 27.7         | 27.7 | 28.6 | 29.9 | 28.5           | 1.0         |
|        | 15.0   | 23.8         | 26.0 | 27.5 | 28.4 | 26.4           | 2.0         |
| HB 0.7 | 0.3    | 43.4         | 44.6 | 46.4 | 47.4 | 45.5           | 1.8         |
|        | 1.5    | 32.7         | 34.2 | 34.4 | 38.1 | 34.9           | 2.3         |
|        | 3.0    | 34.9         | 35.5 | 35.5 | 35.7 | 35.4           | 0.3         |
|        | 6.0    | 25.1         | 25.1 | 27.0 | 27.7 | 26.2           | 1.3         |
|        | 10.0   | 26.6         | 27.9 | 28.1 | 29.4 | 28.0           | 1.1         |
|        | 15.0   | 26.1         | 27.5 | 28.1 | 29.2 | 27.7           | 1.3         |
| HB 0.5 | 0.3    | 51.9         | 53.0 | 55.9 | 56.1 | 54.2           | 2.1         |
|        | 1.5    | 34.6         | 35.7 | 37.0 | 39.0 | 36.6           | 1.9         |
|        | 3.0    | 25.5         | 27.2 | 27.7 | 31.4 | 28.0           | 2.5         |
|        | 6.0    | 24.3         | 26.0 | 29.9 | 29.0 | 27.3           | 2.6         |
|        | 10.0   | 28.6         | 29.0 | 29.4 | 31.4 | 29.6           | 1.2         |
|        | 15.0   | 25.3         | 25.5 | 27.2 | 27.9 | 26.5           | 1.3         |
| HB 0.3 | 0.3    | 44.8         | 48.3 | 48.8 | 51.4 | 48.3           | 2.7         |
|        | 1.5    | 35.7         | 36.4 | 39.5 | 41.3 | 38.2           | 2.6         |
|        | 3.0    | 32.5         | 32.5 | 34.6 | 36.6 | 34.1           | 2.0         |
|        | 6.0    | 27.9         | 28.8 | 29.4 | 30.5 | 29.2           | 1.1         |
|        | 10.0   | 23.8         | 24.6 | 25.1 | 27.2 | 25.2           | 1.5         |
|        | 15.0   | 21.8         | 22.3 | 24.0 | 24.0 | 23.0           | 1.1         |

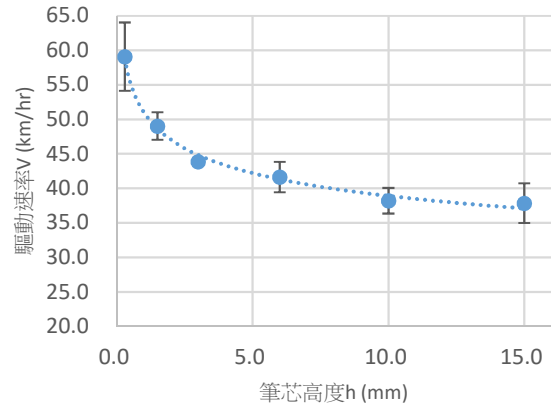
表 2：六種不同規格的筆芯在風洞管中之驅動速率



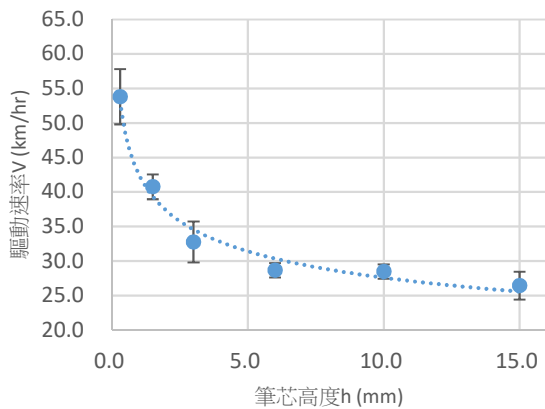
二、不同規格的筆芯在小風洞管內之不同高度處，其驅動速率關係如圖 5 所示，驅動速率與筆芯高度之趨勢線關係式為乘幕關係。由圖中可看出：不同尺寸的筆芯，在底層驅動速率都是最大。



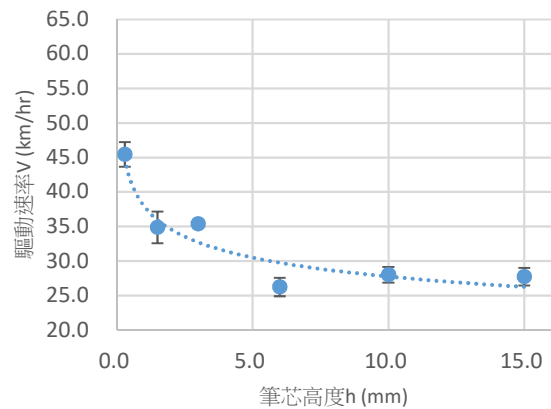
(a)直徑 2.0 mm 的 2B 筆芯  
趨勢線關係式  $V = 48.859h^{-0.093}$



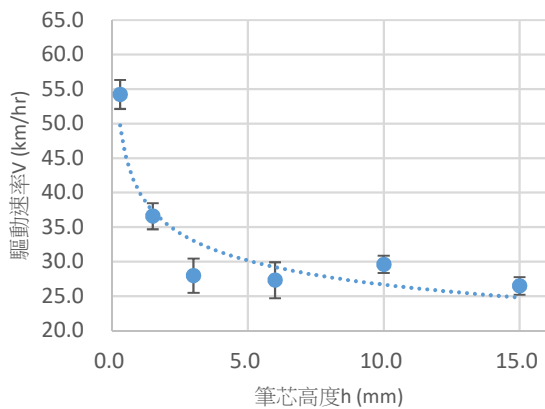
(b)直徑 0.9 mm 的 2B 筆芯  
趨勢線關係式  $V = 51.03h^{-0.118}$



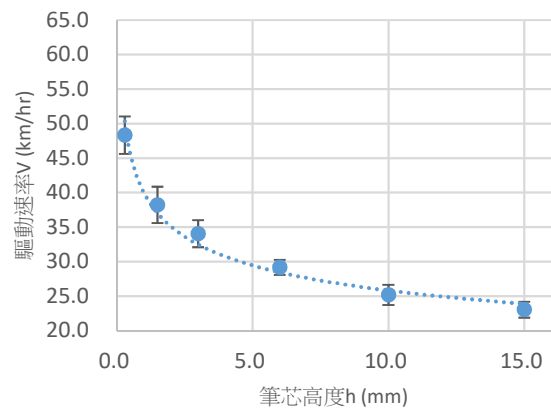
(c)直徑 0.5 mm 的 2B 筆芯  
趨勢線關係式  $V = 42.447h^{-0.187}$



(d)直徑 0.7 mm 的 HB 筆芯  
趨勢線關係式  $V = 38.004h^{-0.137}$



(e)直徑 0.5 mm 的 HB 筆芯  
趨勢線關係式  $V = 40.158h^{-0.178}$



(f)直徑 0.3 mm 的 HB 筆芯  
趨勢線關係式  $V = 40.028h^{-0.191}$

圖 5：六種不同規格筆芯在風洞管中的高度和驅動速率之關係

三、將不同規格筆芯之各組數據作圖，求筆芯驅動速率  $V$  和筆芯高度  $h$  之趨勢線，此趨勢線之關係式為  $V=Ah^{-\alpha}$ ，式子中的  $A$  和  $\alpha$  為常數，彙整各組趨勢線之  $\alpha$  值如表 3。

| 筆芯規格   | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ | 平均值   | 標準差   |
|--------|------------|------------|------------|------------|-------|-------|
| 2B-2.0 | 0.113      | 0.089      | 0.084      | 0.086      | 0.093 | 0.013 |
| 2B-0.9 | 0.120      | 0.117      | 0.108      | 0.125      | 0.118 | 0.007 |
| 2B-0.5 | 0.178      | 0.195      | 0.188      | 0.187      | 0.187 | 0.007 |
| HB-0.7 | 0.138      | 0.135      | 0.136      | 0.137      | 0.137 | 0.001 |
| HB-0.5 | 0.180      | 0.181      | 0.177      | 0.174      | 0.178 | 0.003 |
| HB-0.3 | 0.184      | 0.194      | 0.189      | 0.194      | 0.190 | 0.005 |

表 3：各組實驗數據之趨勢線關係式  $V=Ah^{-\alpha}$  中的  $\alpha$  值

四、從表 2 筆芯高度與驅動速率之實驗數據中，將筆芯與底部之距離( $h$ )和驅動速率( $V$ )分別取對數，畫出  $\log(V)$ 與  $\log(h)$ 之關係圖，如圖 6 所示。圖中可看出  $\log(V)$ 和  $\log(h)$ 呈負相關，其斜率為趨勢線之關係式  $V=Ah^{-\alpha}$  中之  $-\alpha$ 。

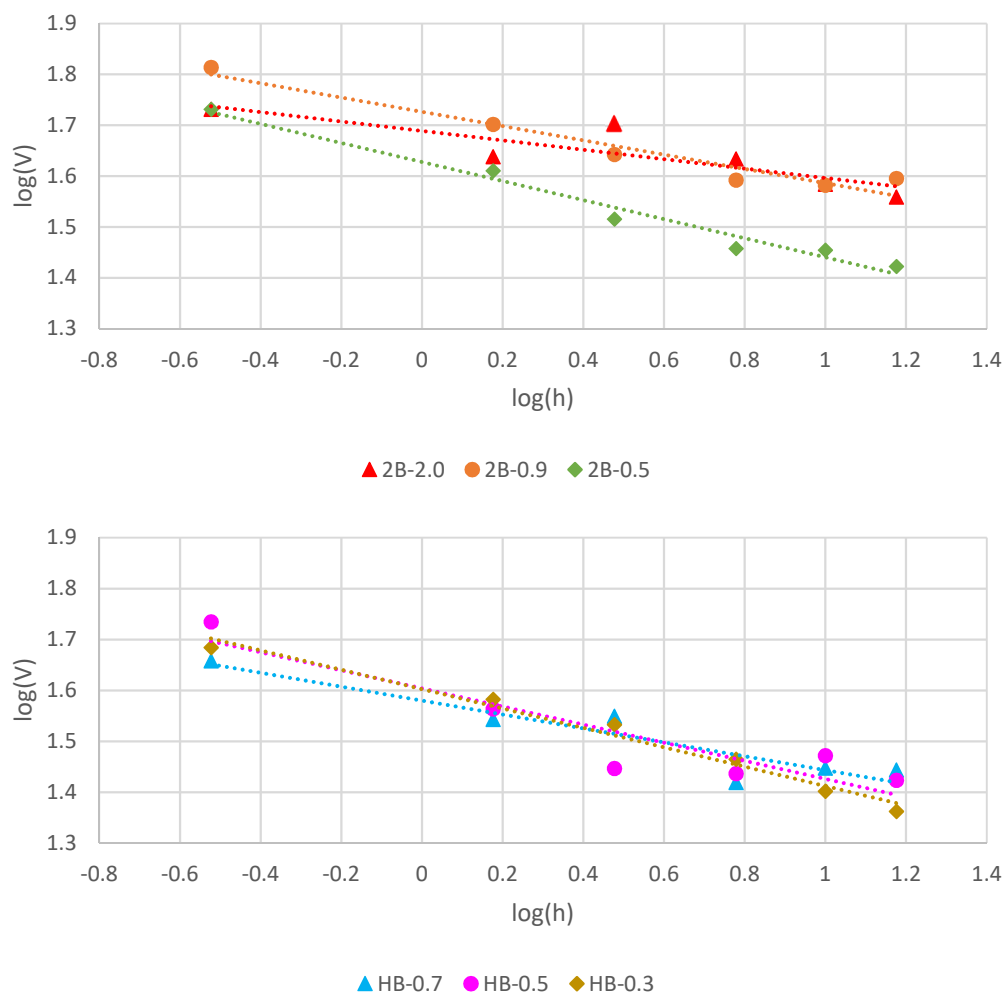


圖 6：2B 和 HB 筆芯之  $\log(V)$ - $\log(h)$  呈負相關

五、針對 2B 和 HB 不同規格之筆芯，畫出筆芯粗細與  $\alpha$  值之關係，如圖 7 所示。由圖可看出筆芯直徑和  $\alpha$  值大小為負相關，當筆芯直徑越小則  $\alpha$  值越大，表示當筆芯高度增加時，則越細的筆芯其驅動速率較快變小。

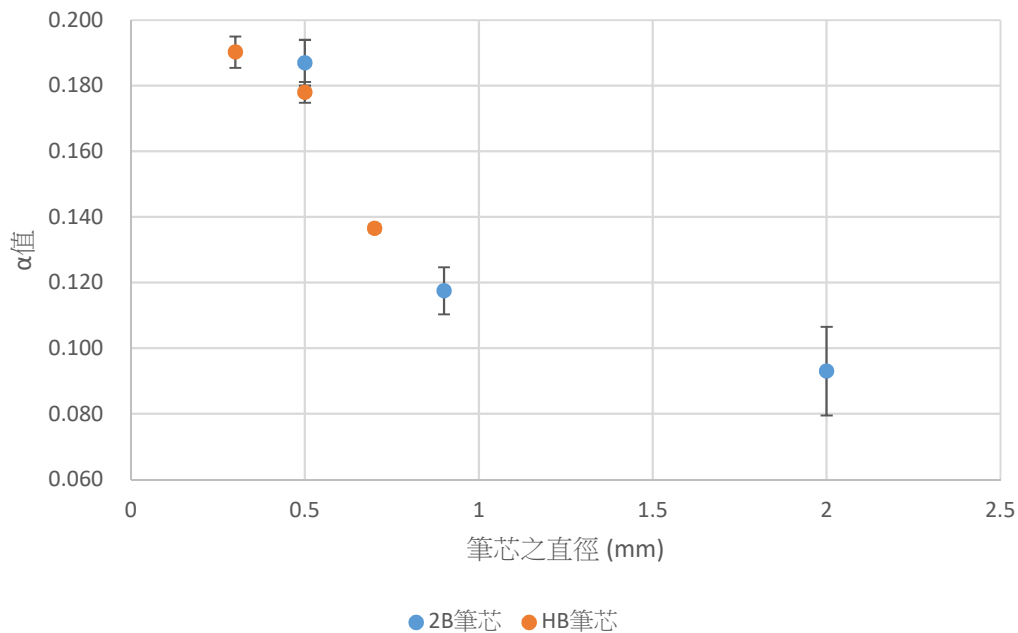


圖 7：2B 和 HB 筆芯之粗細與  $\alpha$  值之關係

六、分別在小風洞管前端、中間和後端的位置，將筆芯墊高不同的高度位置，測量筆芯在不同高度下被風吹動時之驅動速率，測量結果如表 4 所示。

| 高度(mm) | 驅動速率 (km/hr) |      |      |      | 平均驅動速率 (km/hr) | 標準差 (km/hr) |
|--------|--------------|------|------|------|----------------|-------------|
| 0.3    | 65.8         | 71.7 | 74.1 | 74.3 | 71.5           | 4.0         |
| 1.5    | 43.0         | 45.5 | 50.7 | 51.2 | 47.6           | 4.0         |
| 4.5    | 27.5         | 27.5 | 28.8 | 31.2 | 28.8           | 1.7         |
| 6.0    | 26.6         | 27.5 | 28.4 | 28.8 | 27.8           | 1.0         |
| 10.0   | 23.1         | 24.3 | 26.8 | 27.5 | 25.4           | 2.1         |
| 11.5   | 25.5         | 26.8 | 26.8 | 27.2 | 26.6           | 0.7         |
| 13.0   | 23.1         | 26.2 | 26.4 | 26.8 | 25.6           | 1.7         |
| 15.0   | 23.8         | 25.1 | 26.0 | 26.4 | 25.3           | 1.2         |

(a) 小風洞管前端位置（距壓克力管前端 8 公分處）

| 高度(mm) | 驅動速率 (km/hr) |      |      |      | 平均驅動速率 (km/hr) | 標準差 (km/hr) |
|--------|--------------|------|------|------|----------------|-------------|
| 0.3    | 83.2         | 83.2 | 83.9 | 84.9 | 83.8           | 0.8         |
| 1.5    | 45.7         | 45.7 | 46.6 | 47.7 | 46.4           | 1.0         |
| 4.5    | 36.6         | 37.7 | 39.3 | 40.8 | 38.6           | 1.8         |
| 6.0    | 26.8         | 27.9 | 28.8 | 29.0 | 28.1           | 1.0         |
| 10.0   | 24.9         | 25.5 | 25.7 | 26.8 | 25.7           | 0.8         |
| 11.5   | 19.0         | 19.2 | 19.5 | 19.9 | 19.4           | 0.4         |
| 13.0   | 20.9         | 20.9 | 21.2 | 21.7 | 21.2           | 0.4         |
| 15.0   | 20.7         | 21.4 | 21.4 | 21.6 | 21.3           | 0.4         |

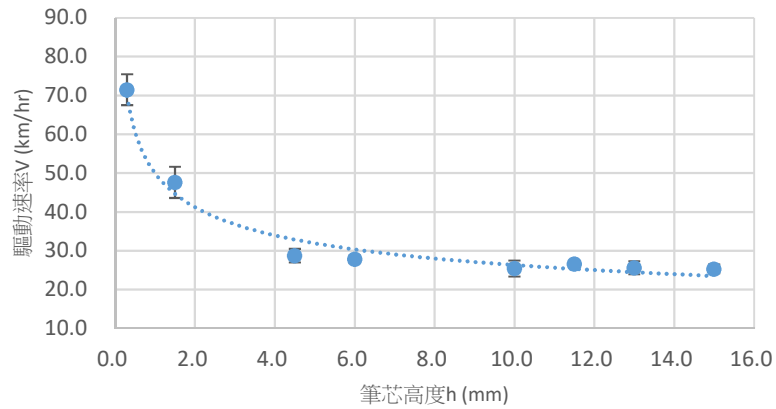
(b) 小風洞管中間位置（壓克力管中央位置）

| 高度(mm) | 驅動速率 (km/hr) |      |      |      | 平均驅動速率 (km/hr) | 標準差 (km/hr) |
|--------|--------------|------|------|------|----------------|-------------|
| 0.3    | 54.8         | 56.6 | 57.7 | 58.4 | 56.9           | 1.6         |
| 1.5    | 33.5         | 33.8 | 34.2 | 35.1 | 34.2           | 0.7         |
| 4.5    | 24.6         | 24.9 | 25.3 | 25.3 | 25.0           | 0.3         |
| 6.0    | 24.0         | 24.3 | 24.8 | 25.1 | 24.6           | 0.5         |
| 10.0   | 23.4         | 24.4 | 24.4 | 24.6 | 24.2           | 0.5         |
| 11.5   | 21.2         | 21.6 | 22.7 | 23.6 | 22.3           | 1.1         |
| 13.0   | 20.3         | 20.5 | 21.8 | 22.5 | 21.3           | 1.1         |
| 15.0   | 17.5         | 17.7 | 18.1 | 18.3 | 17.9           | 0.4         |

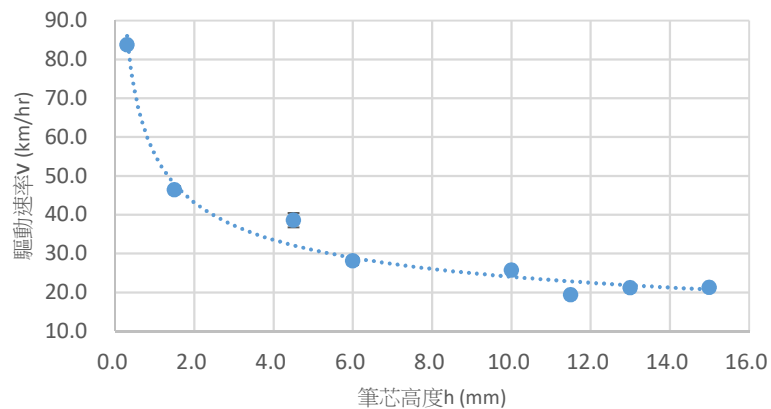
(c) 小風洞管後端位置（距壓克力管尾端 10 公分處）

表 4：測量 HB 0.3 mm 筆芯在不同鉛直高度和水平位置時之驅動速率

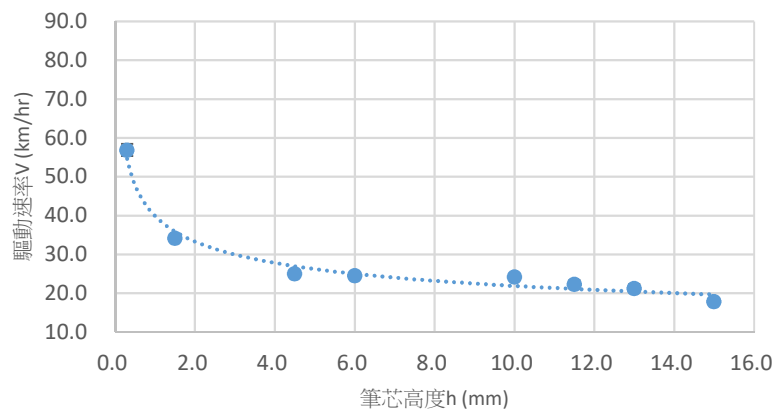
七、小風洞管內部的高為 3 公分，分別在風洞管之前端、中央和後端的位置，筆芯在高度為 0.3 mm 至 15.0 mm 時的驅動速率關係如圖 8 所示。由圖中的 a、b、c 三圖可看出無論是在風洞管的前端、中央或後端，都是底層有較大的驅動速率，曲線也類似，看不出有過渡區和紊流。



(a) 風洞管前端位置（距壓克力管前端 8 公分處）- 趨勢線關係式  $V = 49.980h^{-0.278}$



(b) 風洞管中央位置（壓克力管中央位置）- 趨勢線關係式  $V = 55.522h^{-0.364}$



(c) 風洞管後端位置（距壓克力管尾端 10 公分處）- 趨勢線關係式  $V = 39.893h^{-0.261}$

圖 8：HB 0.3 mm 筆芯在小風洞管不同水平位置時的筆芯高度和驅動速率的關係

八、將 0.3 mm 筆芯在小風洞管前端、中央和後端位置之各組數據作圖，求筆芯驅動速率  $V$  和筆芯高度  $h$  之趨勢線，彙整各位置趨勢線之  $\alpha$  值如表 5 和圖 9 所示。在風洞管中央趨勢線關係式  $V=Ah^{-\alpha}$  之  $\alpha$  值相對較大，而前後位置的  $\alpha$  值較小。

| 筆芯位置 | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ | 平均值   | 標準差   |
|------|------------|------------|------------|------------|-------|-------|
| 前端   | 0.274      | 0.276      | 0.283      | 0.280      | 0.278 | 0.004 |
| 中央   | 0.368      | 0.363      | 0.363      | 0.362      | 0.364 | 0.003 |
| 後端   | 0.262      | 0.265      | 0.259      | 0.257      | 0.261 | 0.004 |

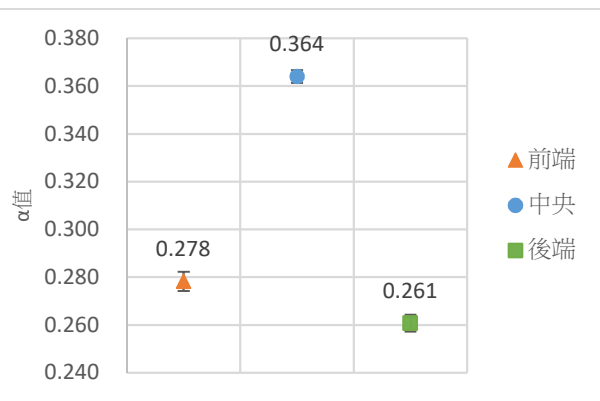


表 5：在風洞管前端、中央和後端位置，各組趨勢線關係式  $V=Ah^{-\alpha}$  之  $\alpha$  值

圖 9：筆芯在風洞管前端、中央和後端位置的  $\alpha$  值

九、將 HB-0.3 mm 筆芯固定在小風洞管前端位水平置處（距壓克力管前端 8 公分），測量筆芯在風洞管底部至頂部被風吹動時之驅動速率，測量結果如表 6。

| 筆芯高度 (mm) | 驅動速率 (km/hr) |      |      |      | 平均驅動速率 (km/hr) | 標準差 (km/hr) |
|-----------|--------------|------|------|------|----------------|-------------|
|           |              |      |      |      |                |             |
| 0.3       | 46.6         | 47.7 | 49.9 | 54.6 | 49.7           | 3.5         |
| 1.5       | 28.4         | 32.0 | 34.6 | 35.7 | 32.7           | 3.2         |
| 3.0       | 27.0         | 27.9 | 32.0 | 33.1 | 30.0           | 3.0         |
| 6.0       | 23.6         | 24.0 | 25.3 | 25.7 | 24.7           | 1.0         |
| 10.0      | 23.6         | 24.0 | 24.4 | 24.6 | 24.2           | 0.4         |
| 15.0      | 21.6         | 21.6 | 22.5 | 22.7 | 22.1           | 0.6         |
| 20.0      | 20.1         | 21.8 | 22.1 | 22.5 | 21.6           | 1.1         |
| 23.0      | 15.5         | 16.0 | 16.8 | 17.1 | 16.4           | 0.7         |
| 25.0      | 12.6         | 15.5 | 17.1 | 17.2 | 15.6           | 2.1         |
| 26.5      | 16.0         | 16.8 | 18.1 | 18.3 | 17.3           | 1.1         |
| 28.0      | 19.9         | 20.1 | 20.1 | 20.7 | 20.2           | 0.3         |
| 29.5      | 31.2         | 32.9 | 33.5 | 34.0 | 32.9           | 1.2         |

表 6：HB-0.3 mm 筆芯在小風洞管中由底部至頂部之驅動速率

十、將高度為 3 公分的風洞管分成上下兩部分，筆芯在下半部距風洞管底面距離之驅動速率，以藍色圓點表示；筆芯在上半部距風洞管頂面距離之驅動速率，以橘色圓點表示，如圖 10 所示。

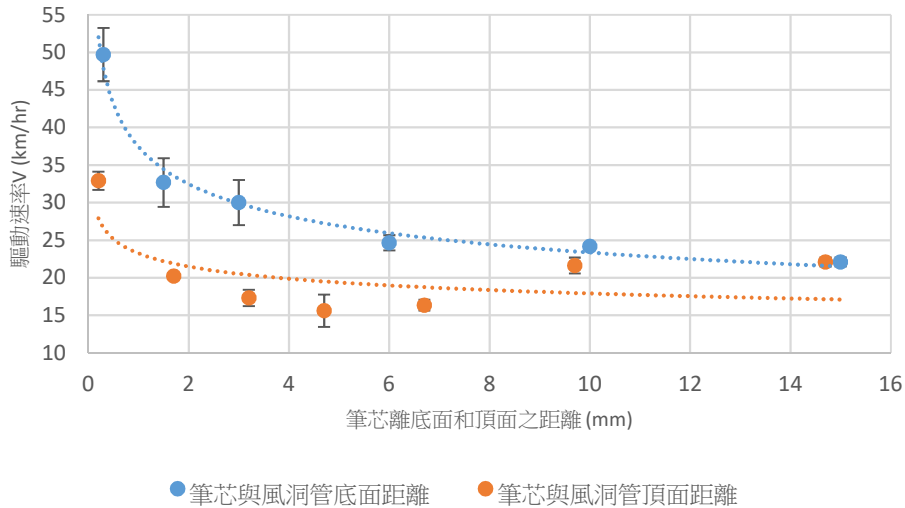


圖 10：筆芯在風洞管下半部距底面不同距離之驅動速率，以藍色圓點表示；筆芯在風洞管上半部距頂面不同距離之驅動速率，以橘色圓點表示

十一、在大風洞管（截面邊長 5 cm）中央水平位置處放置 HB-0.3 mm 筆芯，在不同筆芯高度下緩慢增加風洞管中之氣流流量，測量筆芯驅動速率。原規劃測量筆芯在高度為 0.3 mm 時之驅動速率，實際測量時因需較大氣流壓力，基於安全考量而未測量此筆芯高度數據，其餘高度測量結果如表 7 所示。

| 高度 (mm) | 驅動速率 (km/hr) |       |       |       | 平均驅動速率 (km/hr) | 標準差 (km/hr) |
|---------|--------------|-------|-------|-------|----------------|-------------|
| 1.5     | 112.5        | 115.3 | 115.6 | 120.2 | 115.9          | 3.2         |
| 3.0     | 92.4         | 94.2  | 99.7  | 104.9 | 97.8           | 5.7         |
| 4.5     | 90.3         | 91.7  | 95.3  | 96.6  | 93.5           | 3.0         |
| 6.0     | 77.0         | 78.9  | 83.7  | 92.8  | 83.1           | 7.1         |
| 10.0    | 76.2         | 77.9  | 84.4  | 85.4  | 81.0           | 4.6         |
| 15.0    | 64.5         | 66.5  | 68.8  | 73.4  | 68.3           | 3.8         |
| 20.0    | 61.5         | 63.8  | 64.0  | 72.9  | 65.6           | 5.0         |
| 25.0    | 59.7         | 61.5  | 65.4  | 68.0  | 63.7           | 3.8         |

表 7：測量 HB 0.3 mm 筆芯在大風洞管中不同鉛直高度時之驅動速率

十二、筆芯在大風洞管中央位置，高度為 1.5 mm 至 25.0 mm 時的驅動速率關係如圖 11 所示，曲線與小風洞管的實驗結果類似。

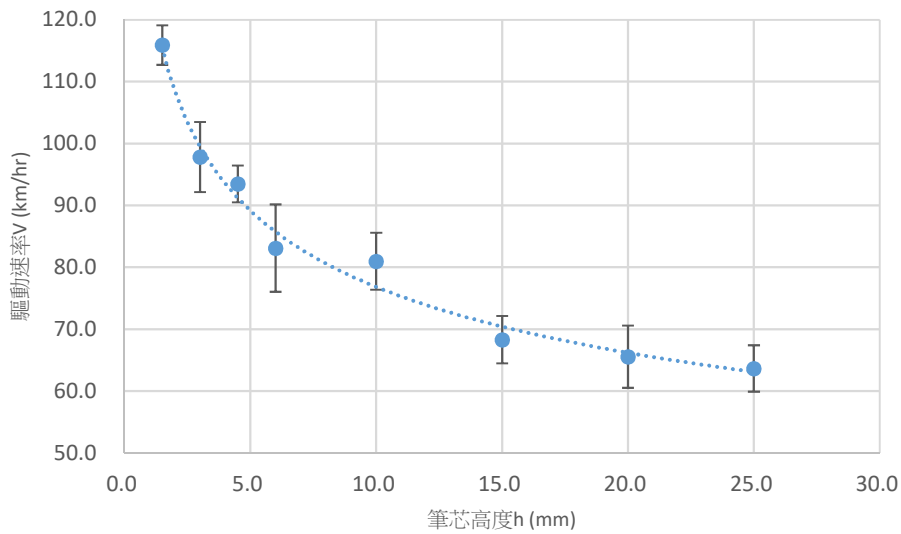


圖 11：HB 0.3 mm 筆芯在大風洞管中央水平位置的高度和驅動速率之關係，其趨勢線關係式  $V = 126.03.893h^{-0.215}$

十三、直徑 0.3 mm 之 HB 筆芯固定同一水平和鉛直位置，測量不同金屬塊放置方式的筆芯驅動速率，測量結果如表 8 所示。

| 序號 | 金屬塊與兩側管壁距離        | 驅動速率 (km/hr) |      |      |      |      | 平均驅動速率 (km/hr) | 標準差 (km/hr) |
|----|-------------------|--------------|------|------|------|------|----------------|-------------|
|    |                   | 23.8         | 24.3 | 24.4 | 24.9 | 25.1 |                |             |
| A  | 左 0.0 mm、右 0.0 mm | 23.8         | 24.3 | 24.4 | 24.9 | 25.1 | 24.5           | 0.5         |
| B  | 左 2.0 mm、右 0.0 mm | 19.5         | 19.9 | 20.1 | 20.1 | 20.3 | 20.0           | 0.3         |
| C  | 左 0.0 mm、右 2.0 mm | 18.1         | 18.3 | 19.7 | 21.2 | 22.3 | 19.9           | 1.8         |
| D  | 左 2.0 mm、右 2.0 mm | 19.1         | 19.7 | 19.7 | 19.9 | 20.5 | 19.8           | 0.5         |
| E  | 左 8.0 mm、右 0.0 mm | 19.0         | 19.2 | 21.8 | 22.3 | 22.9 | 21.0           | 1.8         |

表 8：測量不同金屬塊放置位置時之驅動速率



十四、不同金屬塊放置方式和筆芯驅動速率的關係如圖 12 所示，放置點漸離管壁往中央靠近會使流速變大。

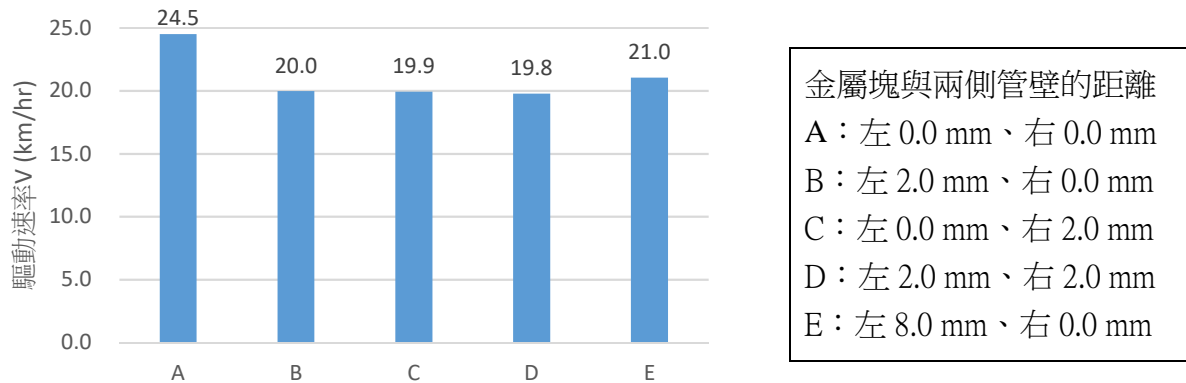


圖 12：墊高用的金屬塊與管壁的距離對筆芯驅動速率的影響

十五、在小風洞管中央水平位置處將 HB 0.3 mm 之筆芯固定墊高 3.0 mm，和在筆芯前後加上高為 2.0 mm 肋條，測其驅動速率數據如表 9。

| 序號 | 前後肋條與筆芯距離       | 驅動速率 (km/hr) |      |      |      |      | 平均驅動速率 (km/hr) | 標準差 (km/hr) |
|----|-----------------|--------------|------|------|------|------|----------------|-------------|
|    |                 |              |      |      |      |      |                |             |
| 甲  | 前：無、後：無         | 26.0         | 26.0 | 27.0 | 27.4 | 27.5 | 26.8           | 0.7         |
| 乙  | 前：25 mm、後：5 mm  | 23.8         | 31.4 | 32.3 | 34.4 | 34.9 | 31.4           | 4.5         |
| 丙  | 前：25 mm、後：10 mm | 35.3         | 36.1 | 36.6 | 36.8 | 37.0 | 36.4           | 0.7         |
| 丁  | 前：30 mm、後：5 mm  | 16.4         | 21.4 | 23.4 | 26.8 | 28.1 | 24.9           | 4.6         |
| 戊  | 前：35 mm、後：5 mm  | 27.6         | 28.1 | 28.8 | 29.0 | 29.4 | 28.8           | 0.7         |

表 9：筆芯前後擺放肋條時之驅動速率

十六、在筆芯前後放置不同的橫向肋條，肋條擺放方式和筆芯驅動速率的關係如圖 13 所示。當前肋條距筆芯 30 mm，後肋條與筆芯距 5 mm 時，驅動速率有變小的情形。

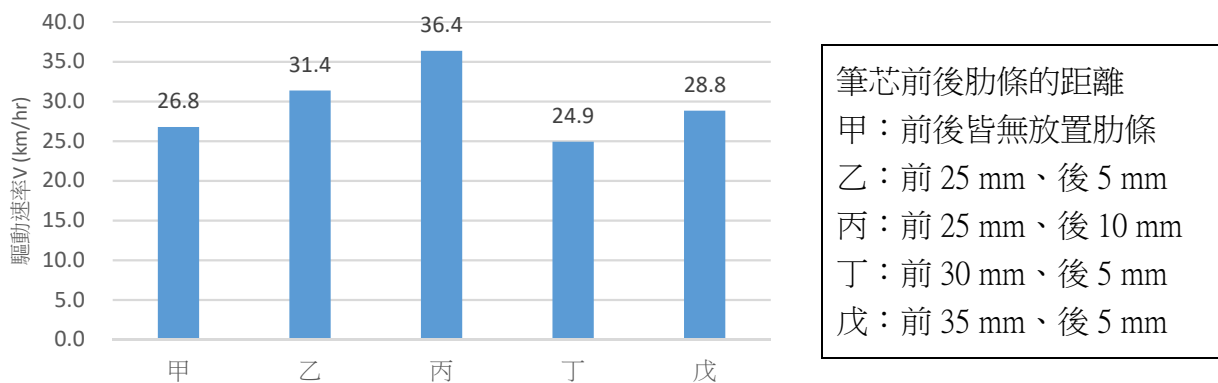


圖 13：筆芯前後加上肋條對驅動速率的影響

## 伍、討論

- 一、風洞管中不同高度位置處之風速測定，原規劃使用皮託管風速計測量，但因實際測量時無法測出管中某一高度的風速，所以改由觀察壓克力管中的筆芯被吹動當下時刻，測量風洞管出口的風速。
- 二、風洞管中的氣流在流動時，越靠近底層管壁的氣流越小，所以筆芯較不容易被吹動，需要調大空壓機的調節閥旋鈕，以便在底層管壁處產生較大風速來吹動筆芯。
- 三、氣流剛流進風洞管時，管壁的邊界層的厚度會沿著流體的流動方向逐漸增加，因黏性力的影響，風洞管中的管徑中央相對來說風速較大，如圖 14 所示。就我們所測量到筆芯被吹動的當下風洞管中氣流流速，筆芯並非在小風動管中心高度處驅動速率較小，而是超過一半以上的高度，推測應是筆芯兩邊的墊高金屬塊，阻擋一部分管道截面流通，造成驅動速率最小值隨高度延後出現。

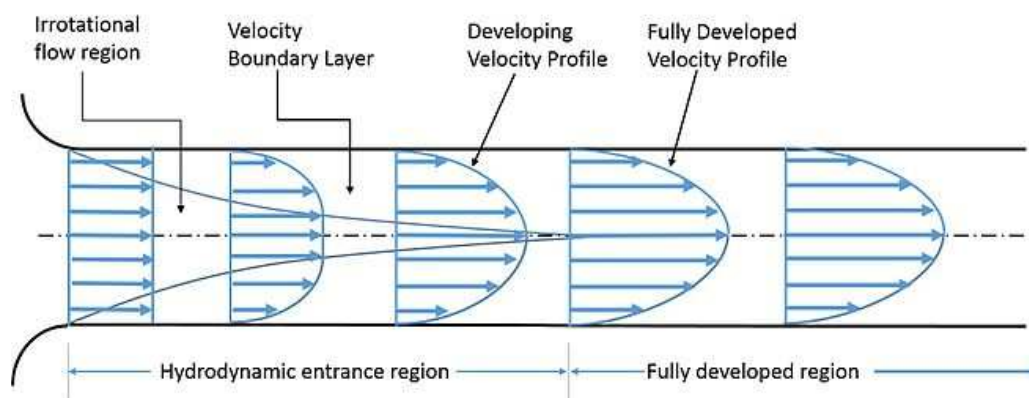


圖 14：流進管道中的流體之速度分布圖。[8]

- 四、筆芯在氣流吹動吹動過程中，分析共受四個力的作用，分別為筆芯所受**重力**、氣流對筆芯造成的**推力**、筆芯與墊高金屬間的**摩擦力**和因流速差異而造成的**升力**，如圖 15 所示。其中，筆芯升力來源為筆芯上下氣流流速不同所造成，筆芯在氣流流過時，筆芯上面表層的氣流流速相對較快而形成一低壓  $P_1$ ，此壓力小於筆芯下面表層的壓力  $P_2$ ，因上下壓力差作用在筆芯上而形成升力，此升力又連帶會使得筆芯所受摩擦力會變小。故當氣流流速逐漸增加時，筆芯所受推力增加、升力也增加，但摩擦力變小，於是讓筆芯被吹動。

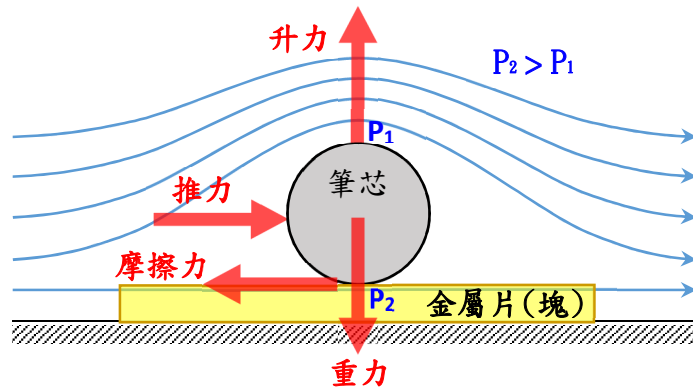


圖 15：風洞管中的筆芯在氣流吹動下分別受重力、推力、摩擦力和升力

五、針對墊高筆芯用的金屬塊未貼緊壓克力管壁時，筆芯之驅動速率會變小之情形，推測應為產生紊流所導致，讓風洞管中不需較大流速，筆芯就會被吹動。

## 陸、結論

- 一、本實驗把已知現象變相量化，我們推論當風洞管中氣流在流動時，若筆芯所在之處的氣流流速相對較大，則筆芯越容易被吹動，而風洞管出風口當下流出測得的風速較小（驅動速率較小）。由我們所畫的驅動速率  $V$  和筆芯高度  $h$  關係圖顯示，風洞管越底層驅動速率越大，顯示該處流速較小，往上則驅動速率變小（流速變大），與參考文獻中的流速與高度之關係吻合。
- 二、由畫出之圖形中，可看出層流與邊界層。而且在實驗中看到最底層雖風速大也吹不動的現象，如我們標題所表達。
- 三、因我們在風洞管中使用金屬塊支撐筆芯，不知是否對流速有所影響，但將墊高金屬塊移離管壁進行測量，確定會產生紊流。這可應用到散熱管之散熱設計，當氣流移動緩慢時，可在管中加上肋條，增加熱的對流和傳導進行散熱。
- 四、參考李信憲[9]之「暫態液晶顯像技術應用於肋條與溝槽表面」碩士論文，該論文研究是訂製 Hallcrest 生產的液晶顯像儀看加肋條管道中溫度變化。我們是用筆芯來看出氣流的擾動，測出驅動速率時大時小表示二次流的紊流並不是流速變快，是擾動式的，也許有流道散熱效果，並不是我們可下的結論。但可以由筆芯的被驅動來推斷氣流變化，這是可以肯定的。

## 柒、參考資料

- [1] 林祐輔 (2002 年 12 月)。邊界層。國家教育研究院：力學名詞辭典。2022 年 2 月 7 日取自：<https://terms.naer.edu.tw/detail/1325907/>
- [2] Er. Himanshu Vasishta (2018 年 1 月 23 日)。Boundary Layer Theory – Introduction。2022 年 2 月 7 日取自：<https://www.youtube.com/watch?v=54zf68IoPWU>
- [3] Boundary Layer (無日期)。美國：NASA。2022 年 2 月 21 日取自：<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/boundlay.html>
- [4] 層流 (2021 年 11 月 19 日)。維基百科。2022 年 2 月 7 日取自：<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%B1%82%E6%B5%81>
- [5] David L. Chandler (2020 年 4 月 28 日)。Understanding how fluids heat or cool surfaces。美國：MIT。2022 年 2 月 7 日取自：<https://news.mit.edu/2020/how-fluids-heat-cool-surfaces-0428>
- [6] 雷諾數 (無日期)。Wikipedia。2022 年 2 月 7 日取自：<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%B7%E8%AF%BA%E6%95%B0>
- [7] 水力直徑 (無日期)。Wikipedia。2022 年 2 月 7 日取自：<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%B4%E5%8A%9B%E7%9B%B4%E5%BE%84>
- [8] Entrance length (fluid dynamics) (無日期)。Wikipedia。2022 年 2 月 7 日取自：[https://en.m.wikipedia.org/wiki/Entrance\\_length\\_\(fluid\\_dynamics\)](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Entrance_length_(fluid_dynamics))
- [9] 李信憲 (2011 年 7 月)。暫態液晶顯像技術應用於肋條與溝槽表面。交通大學碩士論文

## 【評語】 051806

本作品探討動態摩擦係數，以空氣流吹動橫躺在風洞管內的筆心，調控筆心與管壁距離及兩端支撐的對稱性，以觀察紊流對推動筆心移動的行為。實驗設計簡單可行，能讀取實驗數據，但實驗參數的控制，尚有提升精準度的空間，一些在相同條件進行獲得的實驗數據，甚至可以相差達 20%，減弱實驗結果的可信度。實驗數據分析，能用數學通識擬合，做定量分析，建議可再就擬合所得參數作物理蘊含的探討，發掘運作的物理機制。

## 作品簡報

# 從吹不動螞蟻說起 -層流之探討

組別：高級中等學校組

科別：物理與天文學科



# 壹、前言

## 研究動機

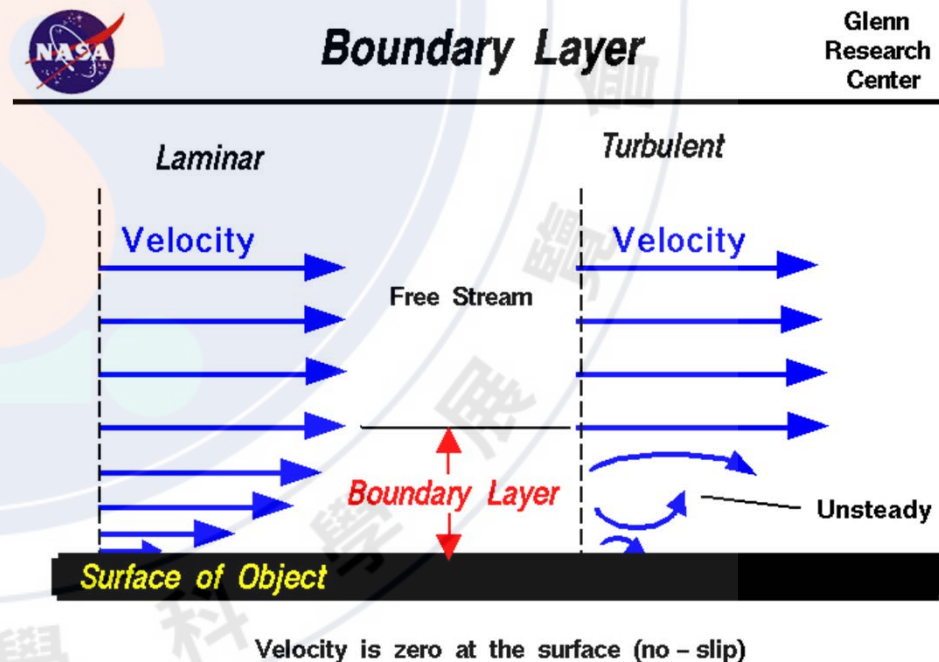
在一偶然機會聽到流體底層氣流會有吹不動螞蟻的現象，對此一直感到好奇想知道它的原理，於是和同學展開這次的研究。

## 研究目的

- 探討底層的物體不容易受氣流吹動的原因。
- 探討風洞管中氣流流速與高度及水平位置的關係。
- 探討墊高金屬塊之放置方式對氣體流動的影響。
- 探討破壞層流引發的二次流及其應用。

## 文獻回顧

流體流經物體表面時，在靠近表面邊界的區域，因流體自身黏性和與物體表面間的摩擦力影響，會形成一邊界層（boundary layer），在最靠近物體表面的流體會緊貼物體表面而流速趨近於零，越離開物體表面則流速越快，直到與主流同一速度，如圖1所示。

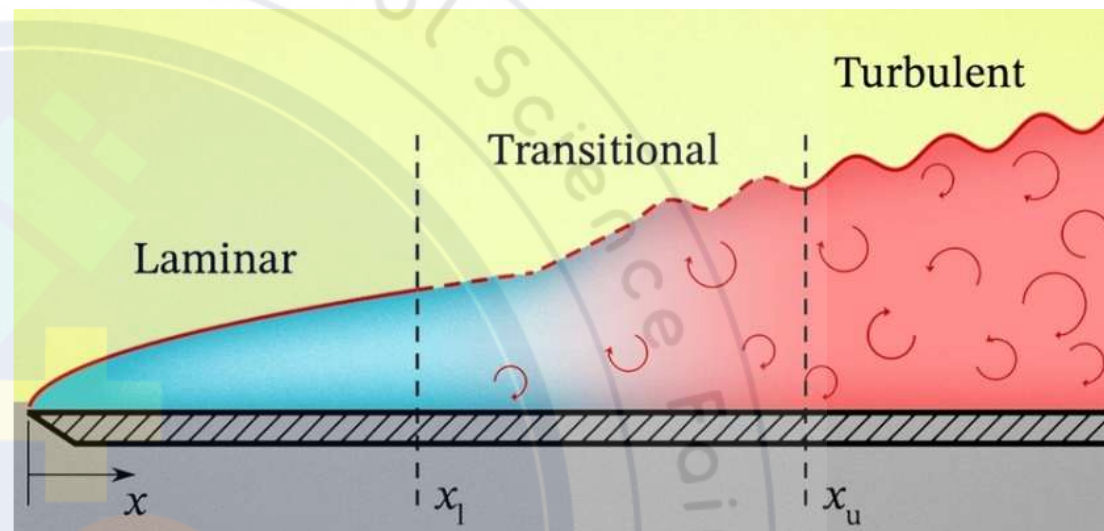


▲ 圖1：流體在物體表面形成流速很小的邊界層  
(來源：<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/boundlay.html>)



# 壹、前言

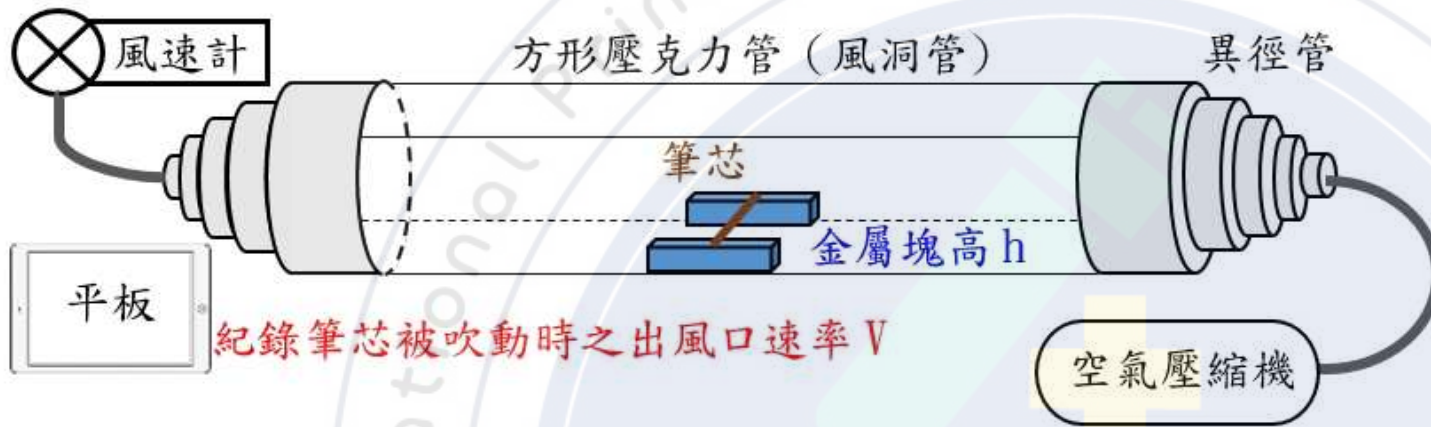
當流體速度小時，流體分層流動是為層流（laminar flow）；當流速增加到很大時，流線不再清楚可辨，此時流體中出現有許多小漩渦，稱為紊流（turbulent flow）；而在層流和紊流之間的流體狀況不穩定，層流和擾流混雜出現，存在一過渡流（transitional flow），如圖2所示。



▲ 圖2：流經物體表面之層流、紊流和過渡帶。  
(來源：<https://news.mit.edu/2020/how-fluids-heat-cool-surfaces-0428>)

在圓形管道中，可藉由雷諾數（Reynolds number）大小來推測流體的形式，雷諾數是一個沒有單位的物理量，是由流體的慣性力和黏性力之比值求得。當雷諾數小於2100時，代表黏滯力對流場的影響大於慣性力，流體的流速會因黏滯力的影響而減小，細微的擾動會被黏滯力抵銷，使得流體流動速度較為穩定一致，以層流為主；而當雷諾逐漸變大超過4000時，代表慣性力對流場的影響大於黏滯力，流體流速較快時容易因微小變化而產生擾動，分子間互相激烈碰撞產生漩渦，造成流動方向不一致，發展形成不規則的紊流。

# 貳、研究設備及器材



▲ 圖3：實驗裝置架設

# 參、研究過程

## 變因種類

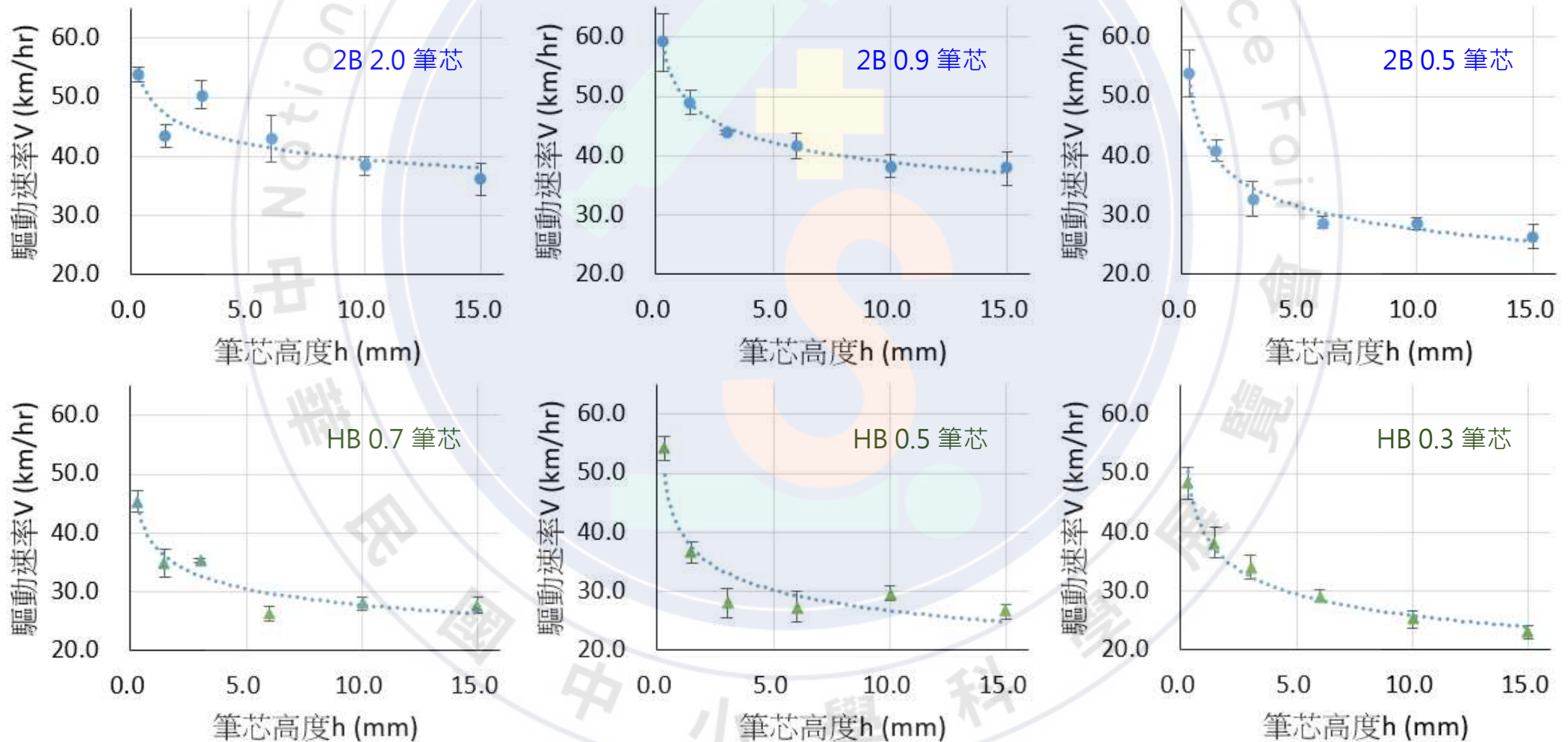
1. 筆芯規格
2. 筆芯鉛直高度
3. 筆芯水平位置
4. 風洞管孔徑大小
5. 墊高金屬塊放置方式
6. 筆芯前後肋條(平行條狀物)放置方式

- 將筆芯放置於風洞管中墊高，墊高高度代號為 $h$ 。
- 透過調壓閥逐漸增加風洞管中之氣流流速大小。
- 由風速計測量流出風洞管之空氣流速。
- 筆芯被吹動時之出風口氣流流速簡稱驅動速率代號為 $V$ 。
- 實驗過程中需隨時注意產生靜電吸附而造成的干擾。

# 肆、研究結果

## 1. 驅動速率V與筆芯高度h之趨勢線關係式為乘冪關係

- 六種規格筆芯在不同高度處之驅動速率關係如圖4所示，在底層驅動速率都是最大。
- 以HB 0.3 mm筆芯為例，趨勢線關係式 $V = 40.028h^{-0.191}$ 。



▲ 圖4：六種不同規格筆芯在風洞管中的高度和驅動速率之關係



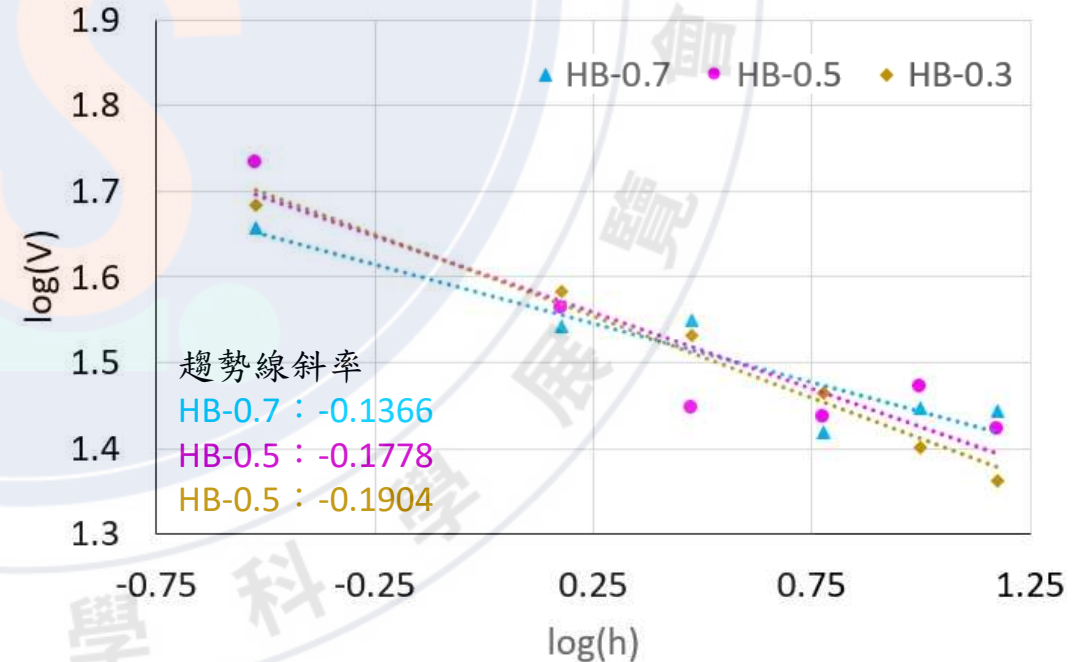
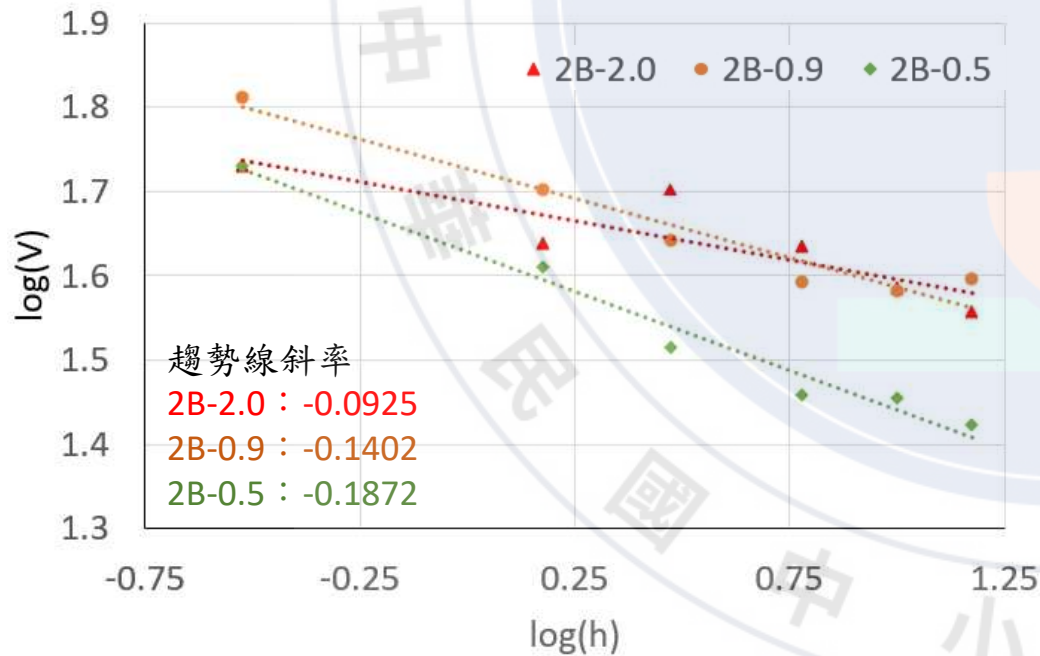
# 肆、研究結果

## 2. $\log(V)$ 和 $\log(h)$ 關係圖之斜率為 $-\alpha$

- 各組驅動速率 $V$ 和筆芯高度 $h$ 之趨勢線，此趨勢線之關係式為 $V=Ah^{-\alpha}$ ，式子中的 $A$ 和 $\alpha$ 為常數，彙整各組趨勢線之 $\alpha$ 值如表1。
- 針對驅動速率和筆芯高度取對數，畫出 $\log(V)$ 與 $\log(h)$ 之關係並求斜率，如圖5所示。

| 筆芯規格   | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ | 平均值   |
|--------|------------|------------|------------|------------|-------|
| 2B-2.0 | 0.113      | 0.089      | 0.084      | 0.086      | 0.093 |
| 2B-0.9 | 0.120      | 0.117      | 0.108      | 0.125      | 0.118 |
| 2B-0.5 | 0.178      | 0.195      | 0.188      | 0.187      | 0.187 |
| HB-0.7 | 0.138      | 0.135      | 0.136      | 0.137      | 0.137 |
| HB-0.5 | 0.180      | 0.181      | 0.177      | 0.174      | 0.178 |
| HB-0.3 | 0.184      | 0.194      | 0.189      | 0.194      | 0.190 |

▲ 表1：各組數據之趨勢線關係式 $V=Ah^{-\alpha}$ 中的 $\alpha$ 值

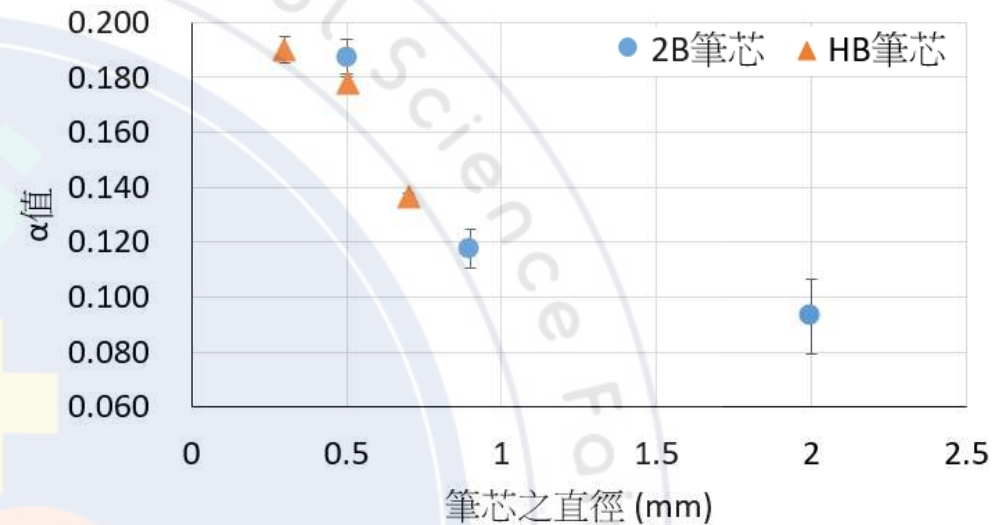


▲ 圖5：2B和HB筆芯之 $\log(V)$ - $\log(h)$ 呈負相關

# 肆、研究結果

## 3. 筆芯直徑和 $\alpha$ 值大小為負相關

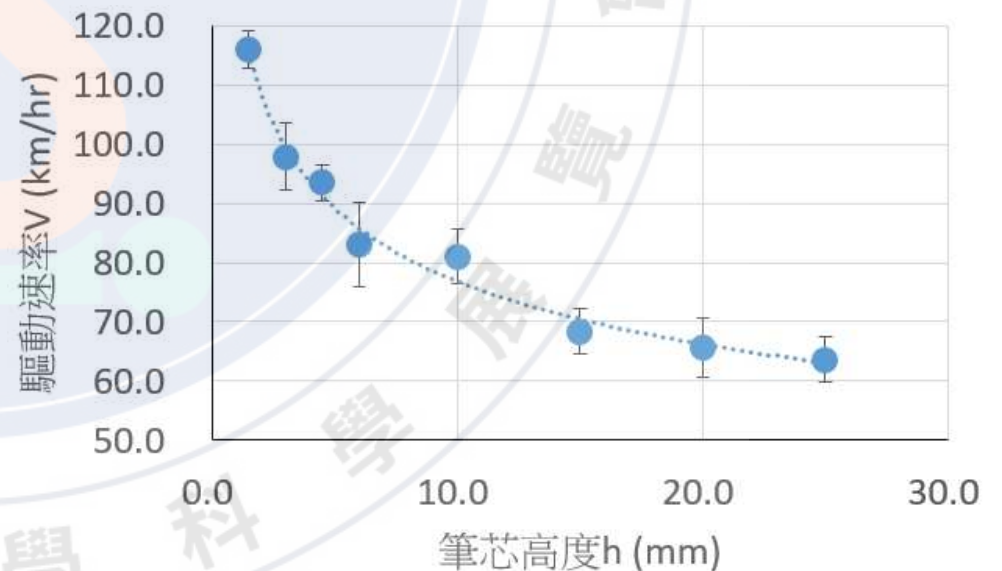
- 測量2B和HB筆芯兩組數據。
- 筆芯直徑越小則 $\alpha$ 值越大。
- 越細的筆芯在高度增加時，驅動速率較快變小。



▲ 圖6：筆芯直徑與 $\alpha$ 值之關係

## 4. 大風洞管中之趨勢線關係式亦為乘冪關係

- 筆芯高度 $h$ 和驅動速率 $V$ 為之關係圖。
- 邊長5公分之正方形截面風洞管。
- 以HB 0.3筆芯進行實驗。
- 風洞管中央水平位置處。
- 趨勢線關係式 $V = 126.03.893h^{-0.215}$



▲ 圖7：筆芯在大風洞管中的高度和驅動速率之關係

# 肆、研究結果

## 5. 筆芯在不同水平位置處的研究

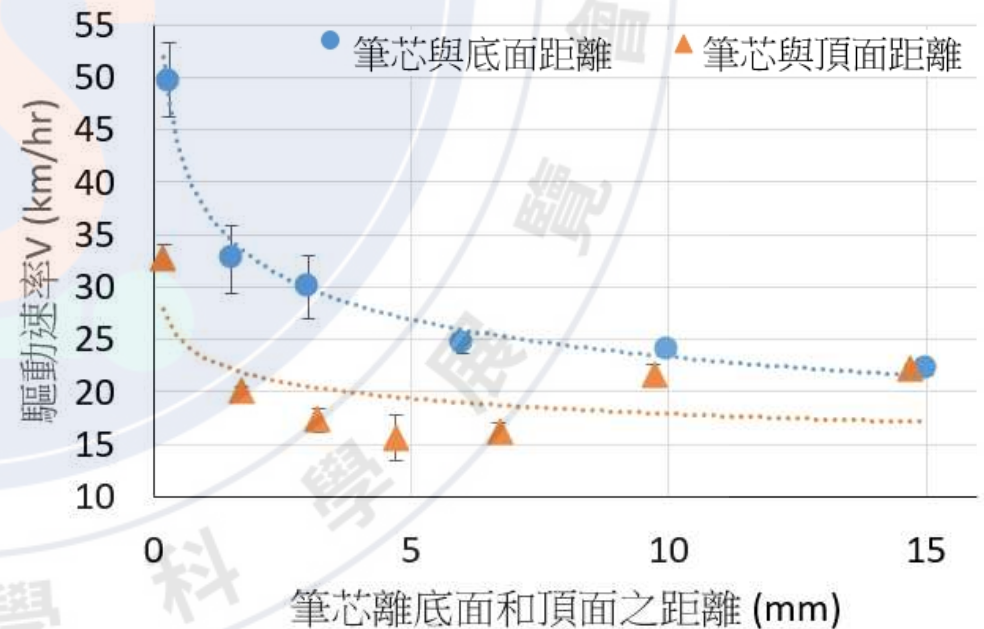
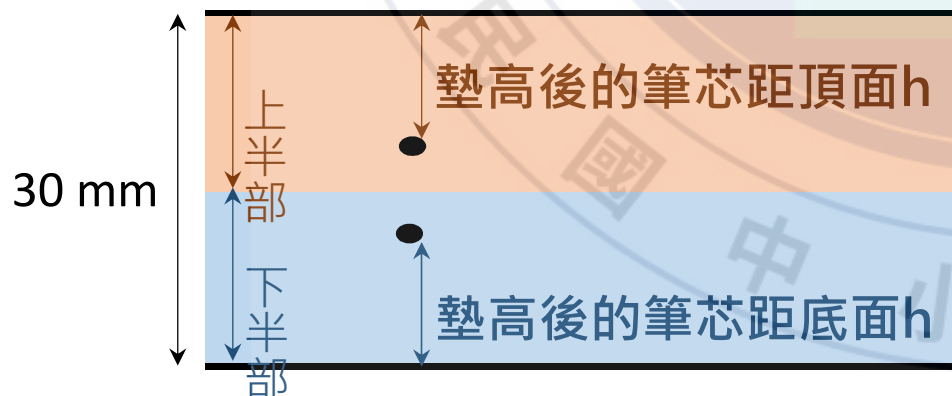
- 不同水平位置的底部皆測得較大驅動速率。
- 筆芯高度和驅動速率曲線也類似，沒出現如圖2所示之過渡帶與紊流。
- 風洞管中央趨勢線關係式 $V=Ah^{-\alpha}$ 之 $\alpha$ 值相對較大，而前後位置的 $\alpha$ 值較小。



▲ 圖8：筆芯在不同水平位置的 $\alpha$ 值

## 6. 風洞管上下半部之驅動速率研究

- 筆芯在上下半部之驅動速率並未完全對稱，在上半部的驅動速率偏小。



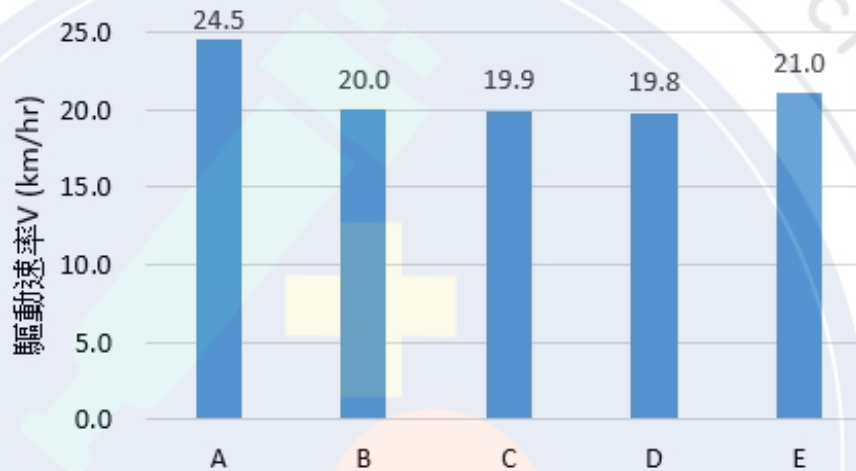
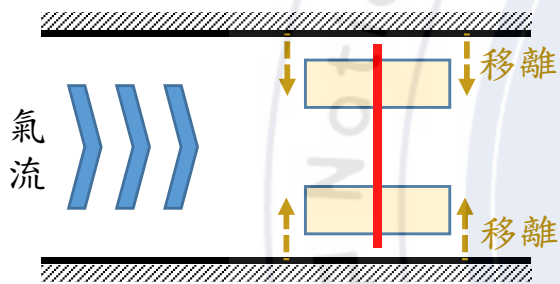
▲ 圖9：筆芯到底面或頂面的距離與驅動速率之關係



# 肆、研究結果

## 7. 不同金屬塊放置方式對驅動速率之影響

- 墊高筆芯之金屬塊移離管壁時讓管內產生紊流，讓驅動速率變小。

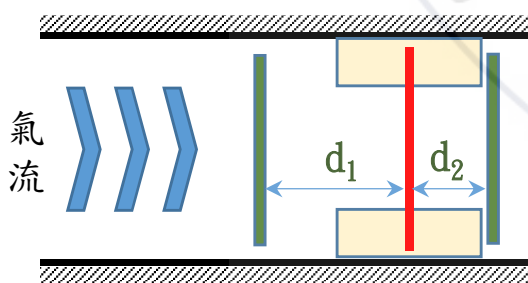


金屬塊與兩側管壁的距離  
A：左 0.0 mm、右 0.0 mm  
B：左 2.0 mm、右 0.0 mm  
C：左 0.0 mm、右 2.0 mm  
D：左 2.0 mm、右 2.0 mm  
E：左 8.0 mm、右 0.0 mm

▲ 圖10：墊高用的金屬塊與管壁的距離對筆芯驅動速率的影響

## 8. 筆芯前後不同的肋條放置方式對驅動速率之影響

- 筆芯前後放置不同距離之肋條，測得不同驅動速率，應是產生擾動式的紊流。

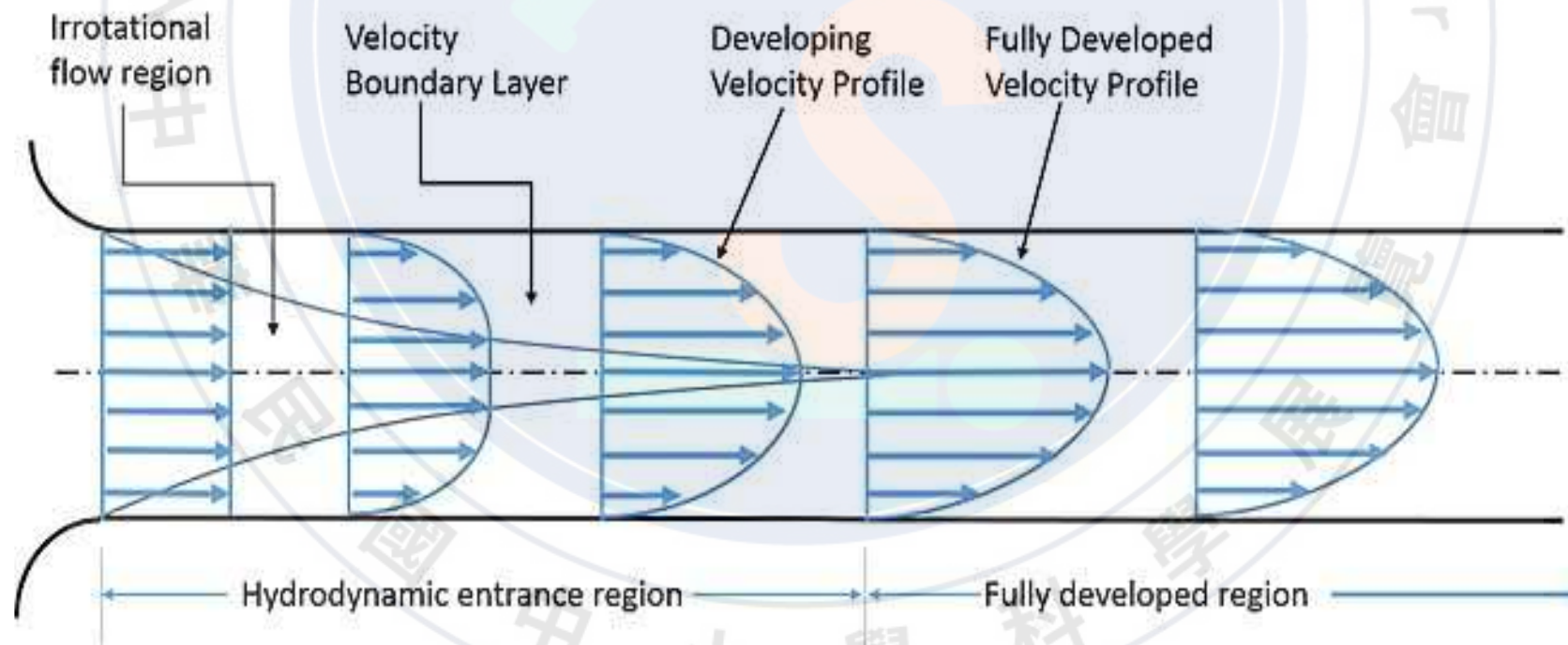


筆芯前後肋條的距離  
甲：前後皆無放置肋條  
乙：前 25 mm、後 5 mm  
丙：前 25 mm、後 10 mm  
丁：前 30 mm、後 5 mm  
戊：前 35 mm、後 5 mm

▲ 圖11：筆芯前後加上肋條對驅動速率的影響

# 伍、討論

1. 原規劃使用皮託管風速計測量，但因實際測量時無法測出管中某一高度的風速，所以改由觀察壓克力管中的筆芯被吹動當下時刻，測量風洞管出口的風速。
2. 氣流剛流進風洞管時，管壁的邊界層的厚度會沿著流體的流動方向逐漸增加，因黏性力的影響，風洞管中的管徑中央相對來說風速較大，如圖12所示。
3. 就我們所測量到筆芯被吹動的當下風洞管中氣流流速，筆芯並非在小風洞管中心高度處驅動速率較小，而是超過一半以上的高度，如圖9所示。推測應是筆芯兩邊的墊高金屬塊，阻擋一部分管道截面流通，造成驅動速率最小值隨高度延後出現。



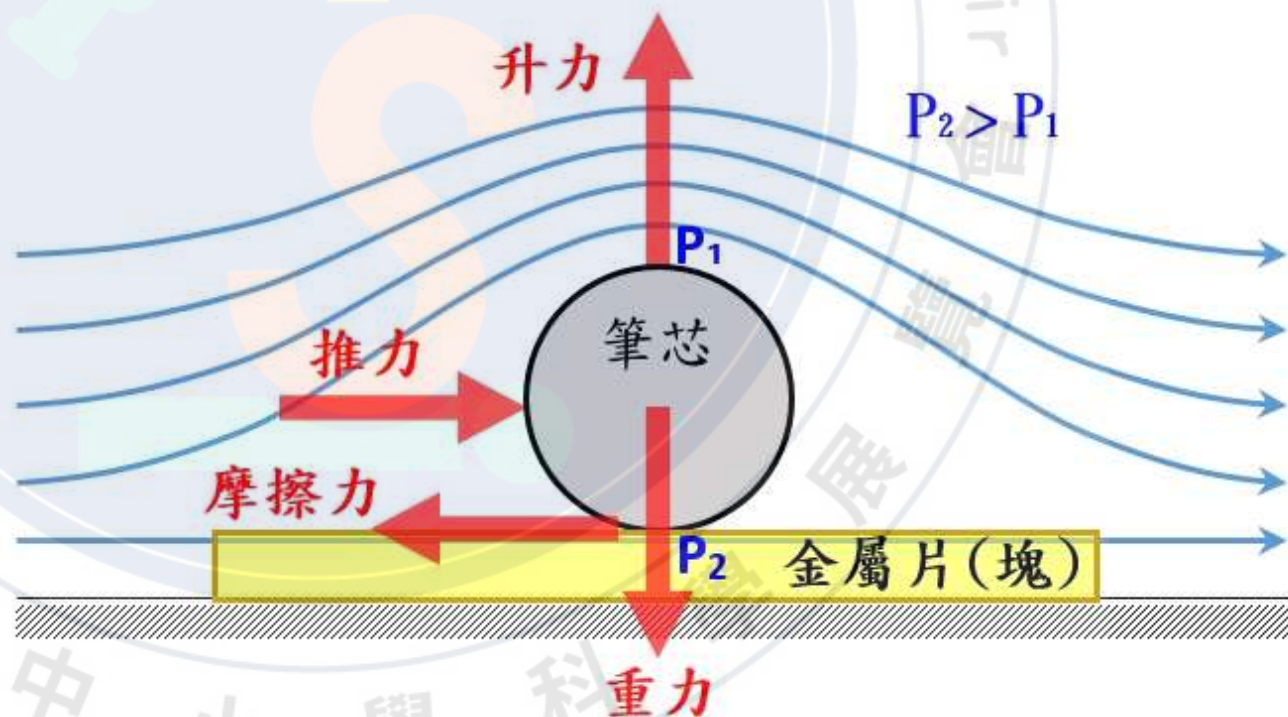
▲ 圖12：流進管道中的流體之速度分布圖

來源：[https://en.m.wikipedia.org/wiki/Entrance\\_length\\_\(fluid\\_dynamics\)](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Entrance_length_(fluid_dynamics))



# 伍、討論

- 筆芯在氣流吹動過程中，分析共受四個力的作用，分別為筆芯所受重力、氣流對筆芯造成的推力、筆芯與墊高金屬間的摩擦力和因流速差異而造成的升力，如圖13。
- 筆芯升力來源為筆芯上下氣流流速不同所造成，筆芯在氣流流過時，筆芯上面表層的氣流流速相對較快而形成一低壓 $P_1$ ，此壓力小於筆芯下面表層的壓力 $P_2$ ，因上下壓力差作用在筆芯上而形成升力，此升力又連帶會使得筆芯所受摩擦力變小。故當氣流流速逐漸增加時，筆芯所受推力增加、升力也增加，但摩擦力變小，於是讓筆芯被吹動。
- 針對墊高筆芯用的金屬塊未貼緊壓克力管壁時，筆芯之驅動速率會變小之情形，如研究結果7所示。推測應為產生紊流所導致，讓風洞管中不需較大流速，筆芯就會被吹動。



▲圖13：風洞管中的筆芯受力圖

# 陸、結論

1. 本實驗把已知現象變相量化，由驅動速率 $V$ 和筆芯高度 $h$ 關係圖顯示，風洞管越底層驅動速率越大，顯示該處流速較小，往上則驅動速率變小（流速變大），與參考文獻中的流速與高度之關係吻合。
2. 實驗中看到最底層的筆芯在風速增加時有吹不動的現象，如我們標題所表達。
3. 筆芯的驅動速率隨高度增加以乘冪關係減少，也就是從底層往上的流速是乘冪函數增加。
4. 越細的筆芯在高度增加時，驅動速率較快變小。
5. 墊高金屬塊移離管壁進行測量時會產生紊流，這可應用到散熱管之散熱設計。
6. 加肋條於管道中，透過筆芯來判斷氣流的型態，測出驅動速率時大時小，表示二次流的紊流是擾動式的，推論有助於流道的散熱效果。

# 柒、參考資料

1. Boundary Layer（無日期）。美國：NASA。2022年2月21日取自：  
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/boundlay.html>
2. 層流（2021年11月19日）。維基百科。2022年2月7日取自：  
<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%B1%82%E6%B5%81>
3. David L. Chandler（2020年4月28日）。Understanding how fluids heat or cool surfaces。美國：MIT。2022年2月7日取自：<https://news.mit.edu/2020/how-fluids-heat-cool-surfaces-0428>
4. Entrance length (fluid dynamics)（無日期）。Wikipedia。2022年2月7日取自：  
[https://en.m.wikipedia.org/wiki/Entrance\\_length\\_\(fluid\\_dynamics\)](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Entrance_length_(fluid_dynamics))
5. 李信憲（2011年7月）。暫態液晶顯像技術應用於肋條與溝槽表面。交通大學碩士論文