

# 2023 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 160018

參展科別 物理與天文學

作品名稱 從吹不動螞蟻到吹出層流特質

得獎獎項

就讀學校 臺中市私立弘文高級中學

指導教師 張益瑞、盧錦玲

作者姓名 簡宥庭、江明捷

關鍵詞 邊界層、層流、紊流

## 作者簡介



我們是來自臺中市弘文高級中學的簡宥庭和江明健。在一個機緣下，我們進入了物理的世界，於是從層流展開了一連串的探討和研究，我們研究這個主題大概有一年多，雖然在實驗當中我們有遇到一些瓶頸，但我們也很開心能藉此從解決問題的過程中得到令我們意想不到的成果，並發現一些奧秘中的樂趣，最後很高興能夠參加這次的展覽。

## 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。

## Abstract

An experiment in a wind tunnel was designed and performed to evaluate the effects of boundary layer on the speed of the flow. A lead refill of a mechanical pencil was placed on top of a metal sheet inside the wind tunnel with the main flow flew over the lead refill. The measurement was on the value of the main flow velocity at the moment when the lead refill was blown away from the stationary status (hence the driving velocity). The driving velocity was measured with different horizontal locations as well as heights of the lead refill in the wind tunnel. The results showed that at the end portion of the wind tunnel, the driving velocity decreased exponentially to the height of the lead refill. Thus, it was concluded that the velocity of the flow within the boundary layer increased exponentially to the height. The figure of the resultant velocity gradient was consistent with the literature. The result of this study also indicated that the decrease on the driving velocity while increasing the height would be larger when the diameter of the lead refill was smaller. The measurement was not as expected when the height of the lead refill was higher than the middle point of the wind tunnel height. The expected reason was that the metal sheets or blocks used as the support of the lead refill had an impact on the flow velocity in the boundary layer. The said impact of the metal blocks on the flow velocity was investigated with placing parallel metal bars (ie. ribs) at the bottom surface of the channel. The effects of the ribs could be observed with the movement of the lead refill which was induced by the impacted flow. The result showed that the driving velocity was quite different at different locations. This indicated that instead of increasing in velocity, the secondary flow induced by the ribs was turbulent.

# 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]

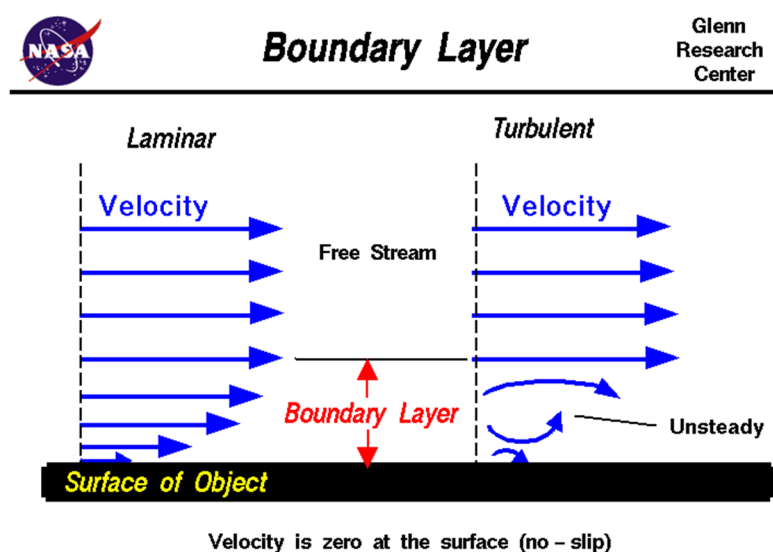


圖 1：流體在物體表面形成流速很小的邊界層。[3]

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]

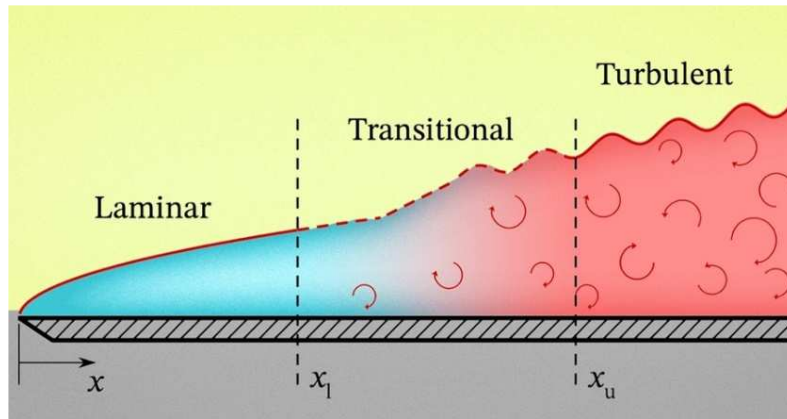


圖 2：流經物體表面之層流、紊流和過渡帶。[5]

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、氣體流量計(3-35 L/Min)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  $V$ 。

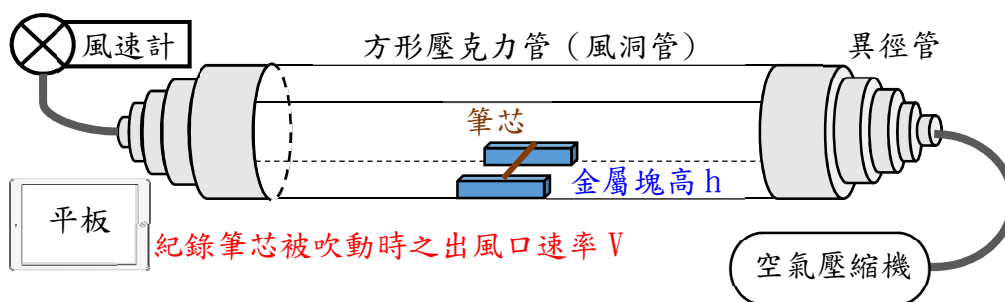


圖 4：實驗裝置

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)固定筆芯在小風洞管（截面邊長 3 cm）中之水平位置，將筆芯透過金屬塊墊高，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 HB-0.3 mm 之筆芯截取 2.5 公分長度在小風洞管（截面邊長 3 cm）中進行實驗。
- (二)固定筆芯在小風洞管之前端水平位置，並透過高度為 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 之筆芯截取 2.5 公分長度，在小風洞管中進行實驗。
- (二)固定筆芯在小風洞管中之前端水平位置，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)固定筆芯在大風洞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

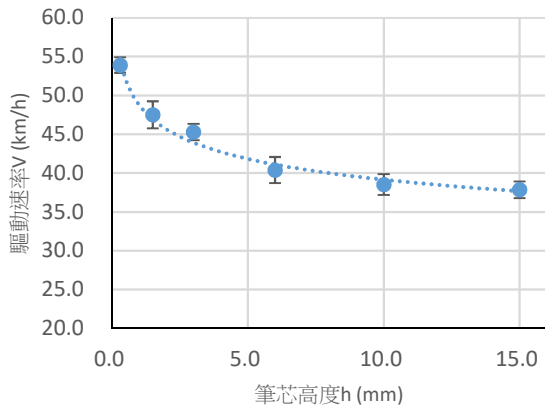
- 一、固定筆芯在小風洞管中水平位置，測量不同規格筆芯之驅動速率和高度的關係，測量結果如表 2 所示。



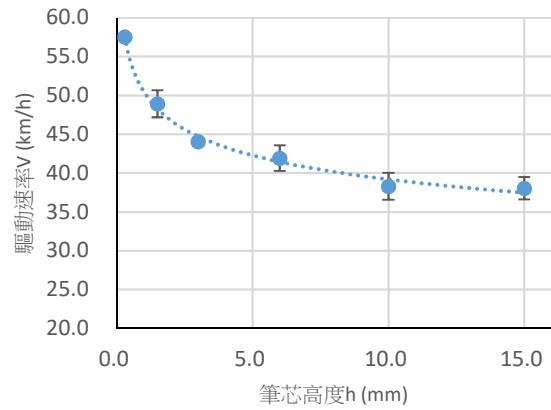
筆芯規格	高度(mm)	驅動速率 (km/hr)				平均驅動速率 (km/hr)	標準差 (km/hr)
2B 2.0	0.3	53.0	53.4	54.0	55.3	53.9	1.0
	1.5	45.8	46.2	48.8	49.2	47.5	1.7
	3.0	43.8	45.3	45.8	46.2	45.3	1.1
	6.0	38.8	39.2	41.3	42.3	40.4	1.7
	10.0	36.6	38.8	39.0	39.7	38.5	1.3
	15.0	36.4	37.9	38.1	39.0	37.9	1.1
2B 0.9	0.3	57.1	57.5	57.5	58.0	57.5	0.4
	1.5	47.0	47.9	50.4	50.4	48.9	1.7
	3.0	43.6	43.9	44.1	44.6	44.1	0.4
	6.0	40.3	40.8	42.8	43.8	41.9	1.7
	10.0	36.8	37.7	37.9	40.8	38.3	1.7
	15.0	36.8	36.8	39.2	39.4	38.1	1.4
2B 0.5	0.3	53.1	54.8	55.2	55.4	54.6	1.0
	1.5	39.3	39.5	41.0	42.6	40.6	1.5
	3.0	33.4	34.2	35.1	35.5	34.6	0.9
	6.0	28.6	29.0	29.4	31.2	29.6	1.1
	10.0	27.7	27.7	28.6	29.9	28.5	1.0
	15.0	24.2	26.0	27.5	27.8	26.4	1.7
HB 0.7	0.3	45.5	46.4	47.4	49.2	46.4	1.0
	1.5	35.5	36.2	38.1	38.6	37.1	1.5
	3.0	32.6	33.8	34.9	35.0	34.1	1.1
	6.0	30.1	30.4	31.6	32.9	31.3	1.3
	10.0	26.6	28.0	28.3	29.5	28.1	1.2
	15.0	26.1	27.5	28.1	28.5	27.6	1.1
HB 0.5	0.3	51.9	53.0	54.2	55.3	53.6	1.5
	1.5	36.1	36.8	38.3	38.3	37.4	1.1
	3.0	32.4	32.7	33.0	34.2	32.7	0.8
	6.0	28.3	28.7	29.4	30.5	29.2	1.0
	10.0	26.4	28.7	28.7	30.2	28.5	1.6
	15.0	25.3	25.5	27.2	27.5	26.4	1.1
HB 0.3	0.3	47.2	48.3	48.8	51.4	48.9	1.8
	1.5	36.7	37.6	39.5	40.8	38.7	1.8
	3.0	32.5	32.5	33.7	35.4	33.5	1.4
	6.0	27.7	28.7	29.2	30.4	29.0	1.1
	10.0	24.2	24.6	25.1	27.2	25.3	1.3
	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

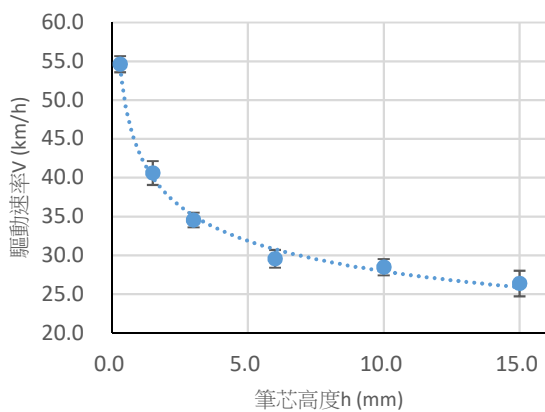
二、不同規格的筆芯在小風洞管內之不同高度處，其驅動速率關係如圖 5 所示，驅動速率與筆芯高度之趨勢線關係式為乘幕關係。由圖中可看出：不同尺寸的筆芯，在底層驅動速率都是最大。



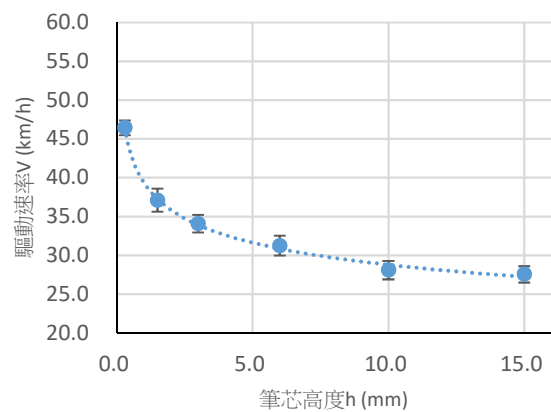
(a)直徑 2.0 mm 的 2B 筆芯  
趨勢線關係式  $V = 48.762h^{-0.095}$



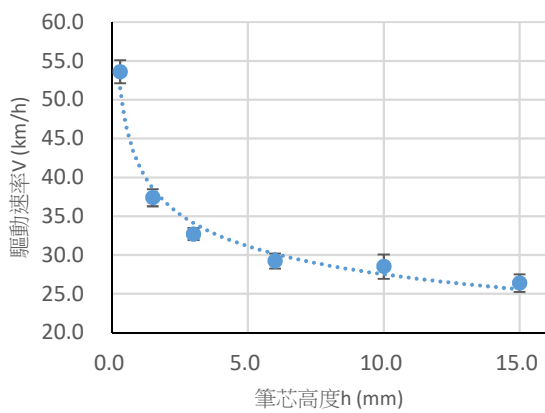
(b)直徑 0.9 mm 的 2B 筆芯  
趨勢線關係式  $V = 50.48h^{-0.110}$



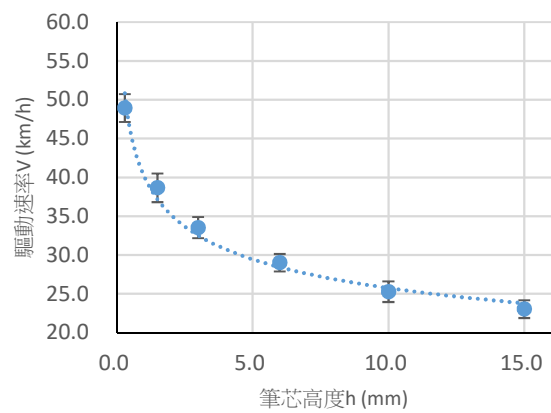
(c)直徑 0.5 mm 的 2B 筆芯  
趨勢線關係式  $V = 43.228h^{-0.189}$



(d)直徑 0.7 mm 的 HB 筆芯  
趨勢線關係式  $V = 39.392h^{-0.136}$



(e)直徑 0.5 mm 的 HB 筆芯  
趨勢線關係式  $V = 41.518h^{-0.179}$



(f)直徑 0.3 mm 的 HB 筆芯  
趨勢線關係式  $V = 40.236h^{-0.194}$

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	0.102	0.092	0.094	0.094	0.096	0.004
2B-0.9	0.117	0.117	0.108	0.100	0.111	0.008
2B-0.5	0.198	0.194	0.186	0.180	0.190	0.008
HB-0.7	0.144	0.136	0.139	0.140	0.140	0.003
HB-0.5	0.185	0.180	0.178	0.173	0.179	0.005
HB-0.3	0.197	0.197	0.189	0.193	0.194	0.004

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  $-\alpha$ 。

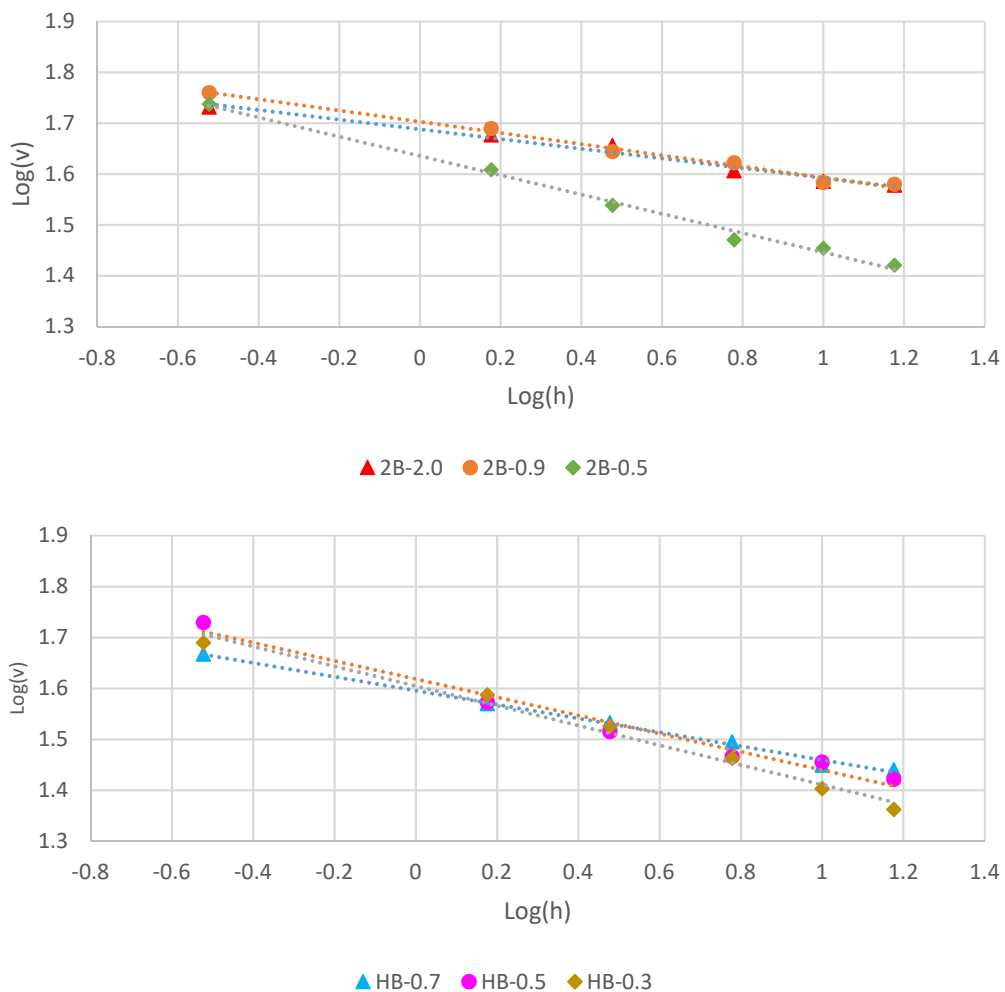


圖 6：2B 和 HB 筆芯之  $\log(V)$ - $\log(h)$ 呈負相關

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。

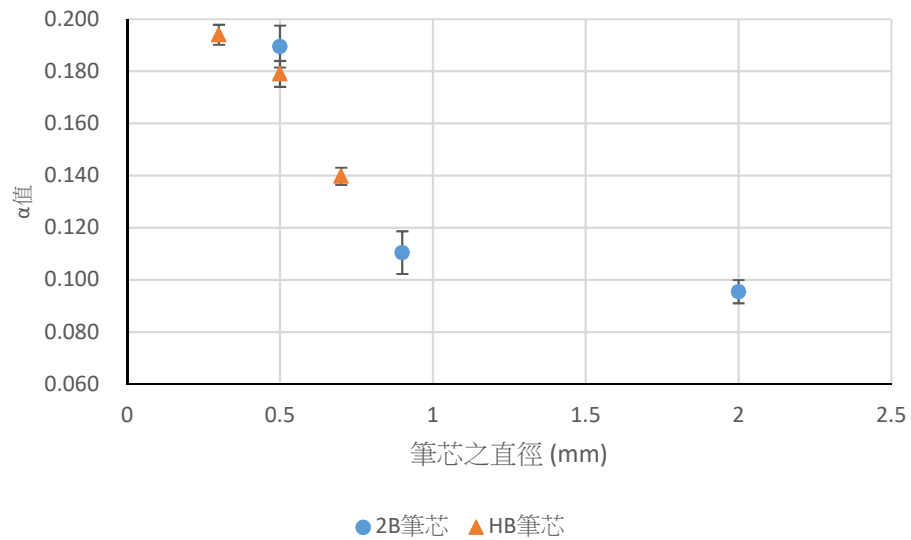


圖 7：2B 和 HB 筆芯之粗細與  $\alpha$  值之關係

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
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
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

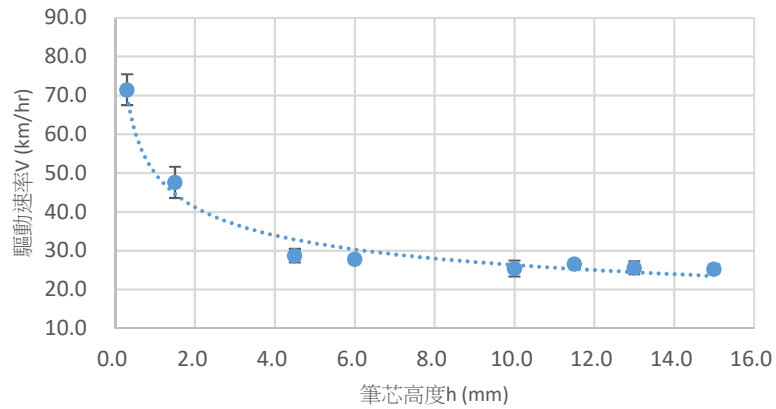
(b) 小風洞管中間位置（壓克力管中央位置）

高度(mm)	驅動速率 (km/hr)				平均驅動速率 (km/hr)	標準差
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

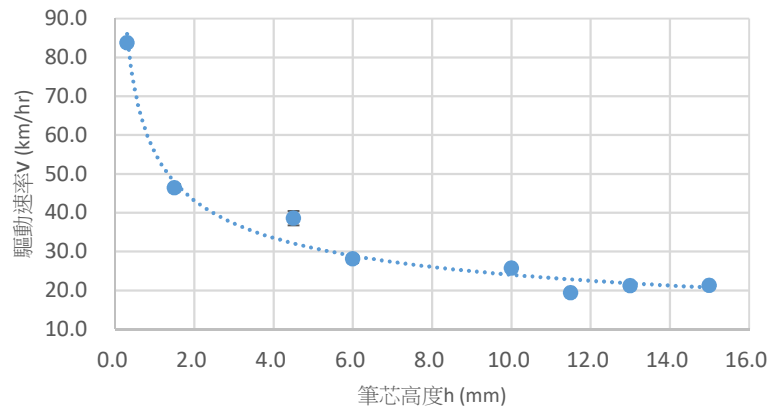
(c) 小風洞管後端位置（距壓克力管尾端 10 公分處）

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

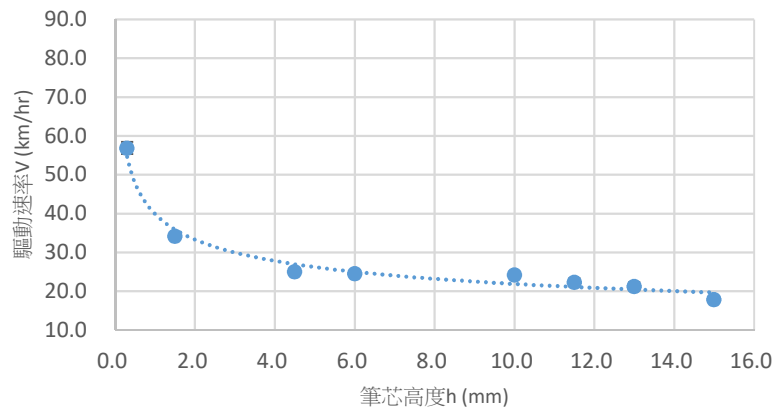
七、小風洞管內部的高為 3 公分，分別在風洞管之前端、中央和後端的位置，筆芯在高度為 0.3 mm 至 15.0 mm 時的驅動速率關係如圖 8 所示。由圖中的 a、b、c 三圖可看出無論是在風洞管的前端、中央或後端，都是底層有較大的驅動速率，曲線也類似，看不出有過渡區和紊流。



(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

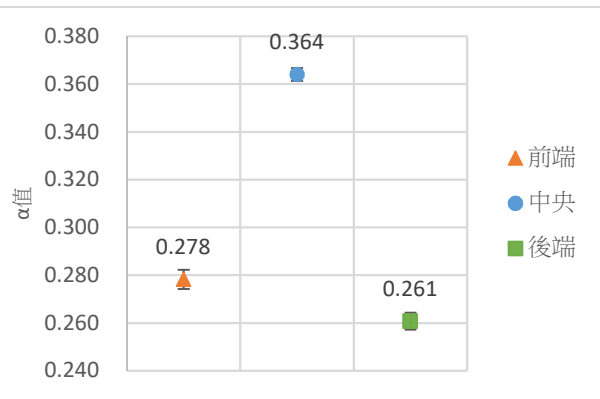


表 5：在風洞管前端、中央和後端位置，各組趨勢線關係式  $V=Ah^{-\alpha}$  之  $\alpha$  值

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
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。

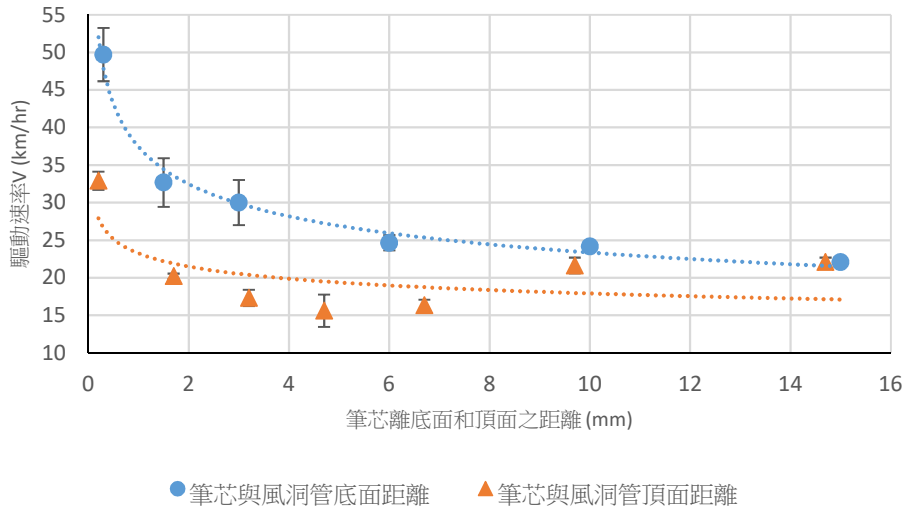


圖 10：筆芯在風洞管下半部距底面不同距離之驅動速率，以藍色圓點表示；筆芯在風洞管上半部距頂面不同距離之驅動速率，以橘色圓點表示

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
1.5	112.5	114.8	115.6	117.3	115.1	2.0
3.0	95.2	96.8	99.5	100.9	98.1	2.6
4.5	90.3	91.7	94.3	94.7	92.8	2.1
6.0	81.6	83.2	83.7	86.8	83.8	2.2
10.0	75.3	76.9	78.4	81.4	78.0	2.6
15.0	65.5	66.5	68.3	72.4	68.2	3.0
20.0	63.8	64.2	64.0	69.2	65.3	2.6
25.0	60.7	62.5	64.8	67.9	64.0	3.1

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。

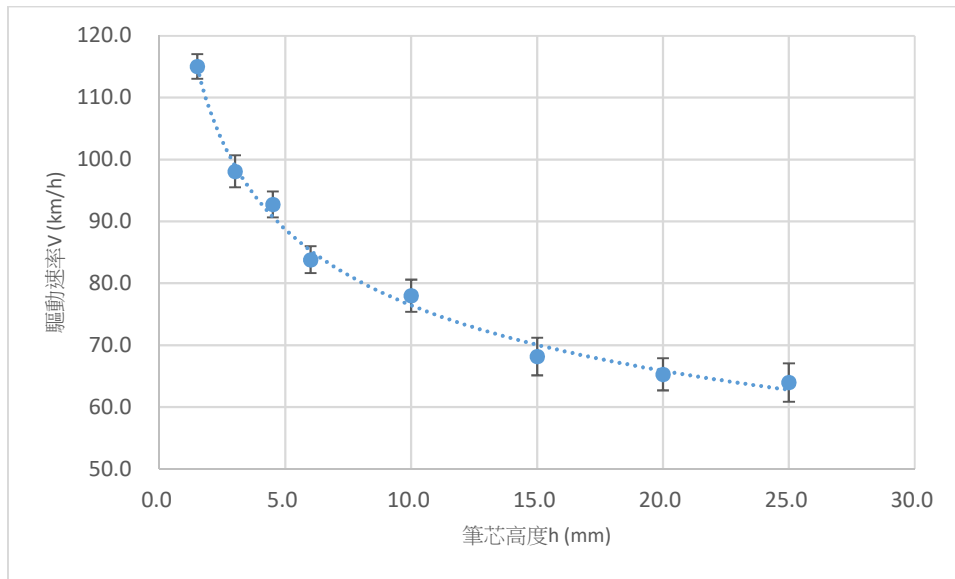


圖 11：HB 0.3 mm 筆芯在大風洞管中央水平位置的高度和驅動速率之關係，其趨勢線關係式  $V = 125.35h^{-0.215}$

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
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。

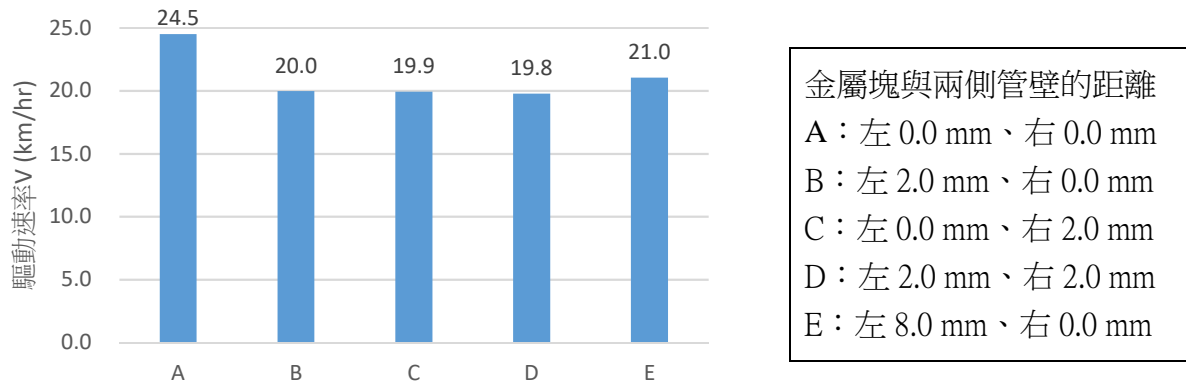


圖 12：墊高用的金屬塊與管壁的距離對筆芯驅動速率的影響

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
		1	2	3	4	5		
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。

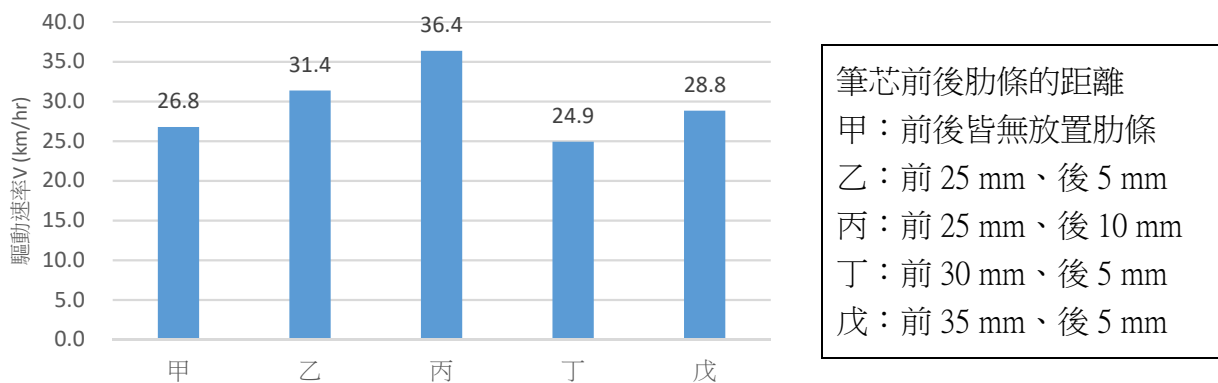


圖 13：筆芯前後加上肋條對驅動速率的影響

## 伍、討論

- 一、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，筆芯並非在小風洞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。

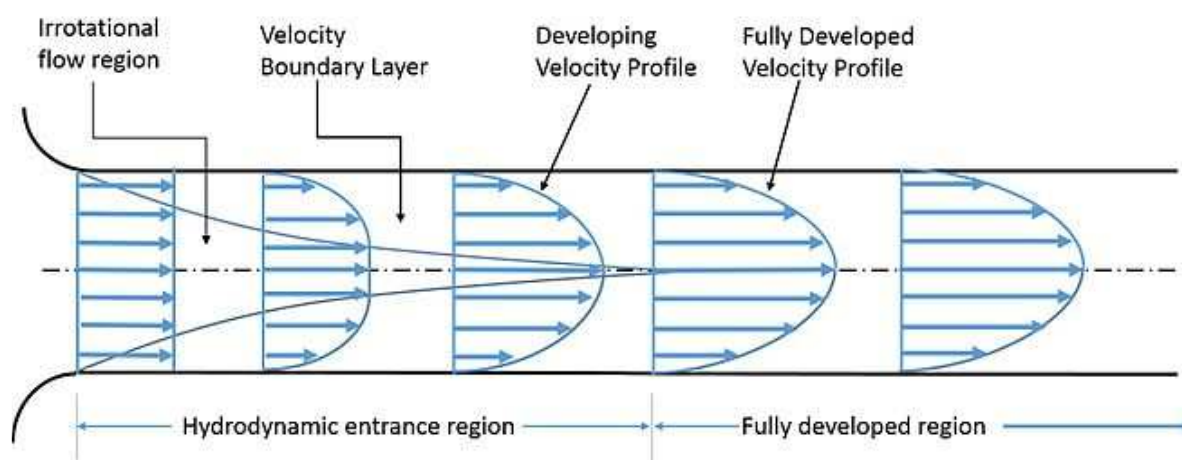
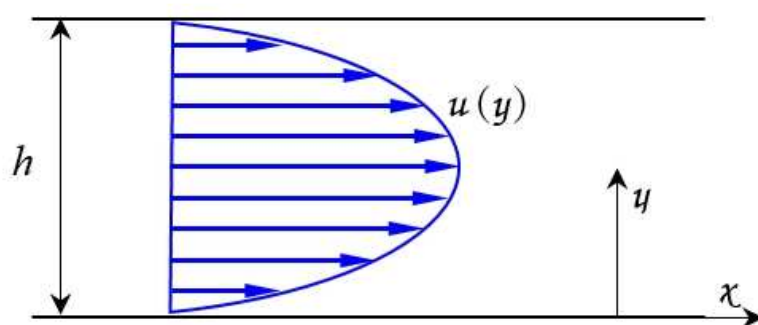


圖 14：流進管道中的流體之速度分布圖。[8]

- 二、風洞管底層往上的流速如圖 15 是乘冪關係，而我們所畫在風洞管下半部的驅動速率  $V$  和筆芯高度  $h$  的勢線關係式  $V=Ah^{-\alpha}$ ，筆芯驅動速率會隨著高度以乘冪減少。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），也可推論從底層往上的流速是乘冪函數增加，應類似圖 15 之公式。



$$\text{The x-component of velocity is } u(y) = \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} (y^2 - hy)$$

圖 15：兩平板間距的流速與高度之關係。[9]

三、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 16 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。

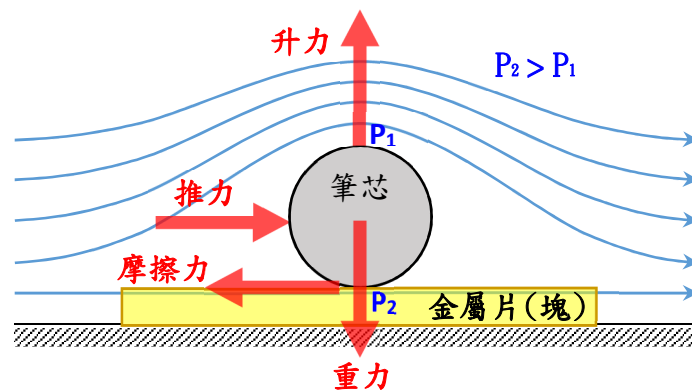


圖 16：風洞管中的筆芯在氣流吹動下分別受重力、推力、摩擦力和升力

四、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、由我們所畫在風洞管下半部的驅動速率  $V$  和筆芯高度  $h$  的趨勢線關係式  $V=Ah^{-\alpha}$ ，筆芯驅動速率會隨著高度以乘幂減少，也就是從底層往上的流速是乘幂函數增加，與參考文獻中的流速與高度之關係吻合。
- 二、由趨勢線關係式  $V=Ah^{-\alpha}$  中，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。
- 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[10]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 Hallerest 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] Fundamental Mechanics of Fluids - Third Edition by I. C. Currie P. 255 Chapter 7.1 Couette Flow
- [10] 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】 160018

自製小型風洞實驗架設，以風吹動橫躺筆心，探討摩擦係數，能較佳達實驗功效，有邏輯歸納，分析深入，能做定量分析，作者做了完整的實驗，驗證了輸送現象教科書中的內容。建議增長管長，在風場均勻處量測，但較少新穎思維，或應在風出口處，風場擴張處量測，探究新穎現象。