

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： 高一 簡宥庭 高一 江明捷 高一 郭于綺	指導老師： 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]

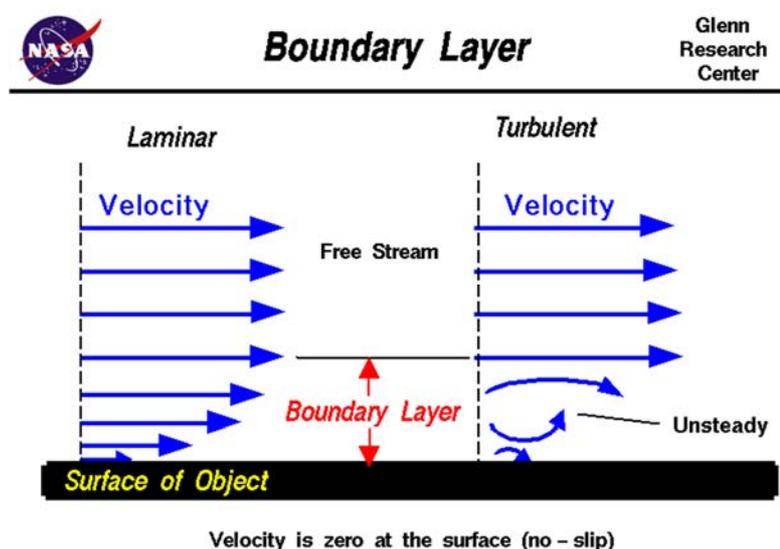


圖 1：流體在物體表面形成流速很小的邊界層。[3]

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]

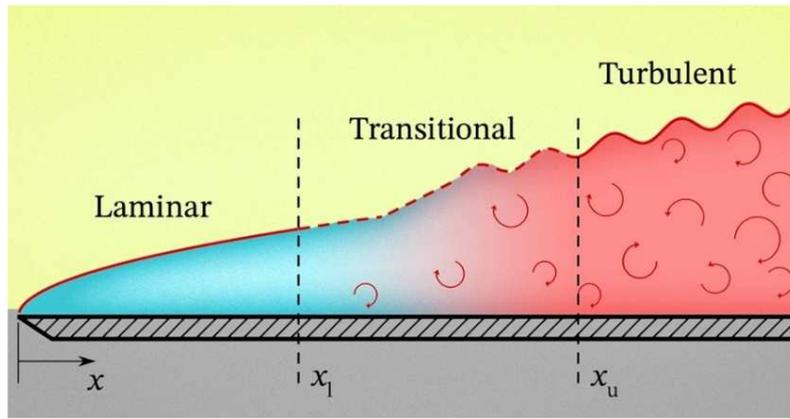


圖 2：流經物體表面之層流、紊流和過渡帶。[5]

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：

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

ρ ：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)

μ ：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 。

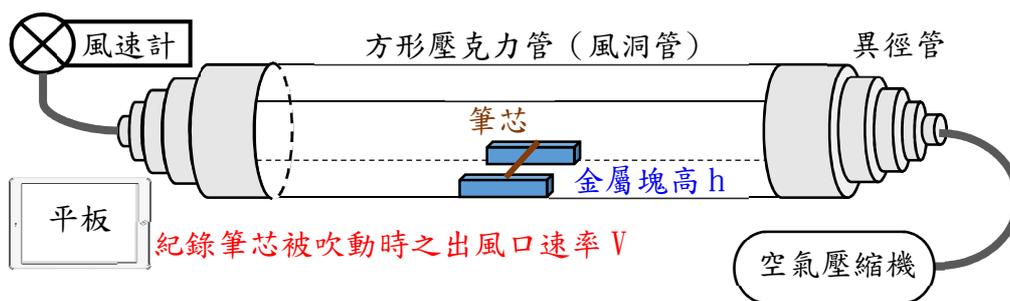


圖 4：實驗裝置

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。

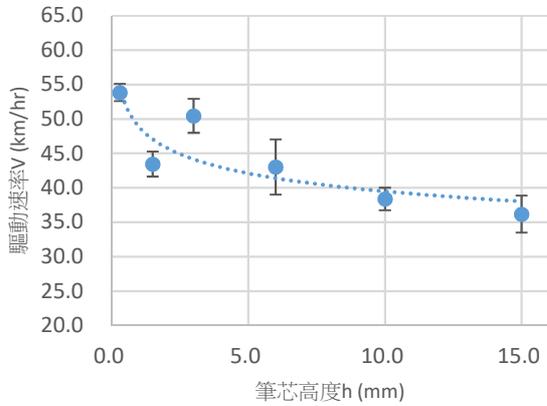
肆、研究結果

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。

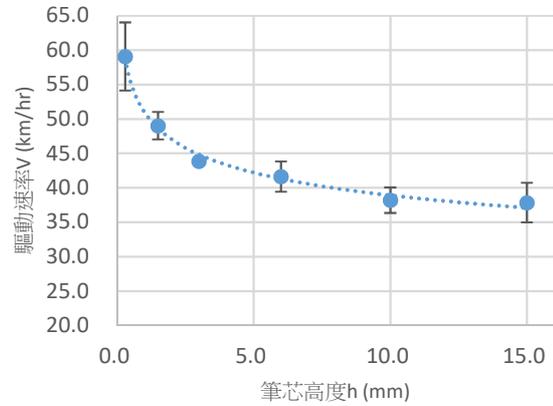
筆芯規格	高度(mm)	驅動速率 (km/hr)				平均驅動速率 (km/hr)	標準差 (km/hr)
2B 2.0	0.3	52.5	53.4	54.0	55.5	53.9	1.3
	1.5	41.7	42.3	44.1	45.7	43.5	1.8
	3.0	47.9	48.8	52.3	52.8	50.5	2.5
	6.0	38.6	41.3	44.3	47.9	43.0	4.0
	10.0	36.0	38.8	39.0	39.7	38.4	1.6
	15.0	32.3	36.4	37.9	38.1	36.2	2.7
2B 0.9	0.3	55.0	57.5	57.5	66.3	59.1	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

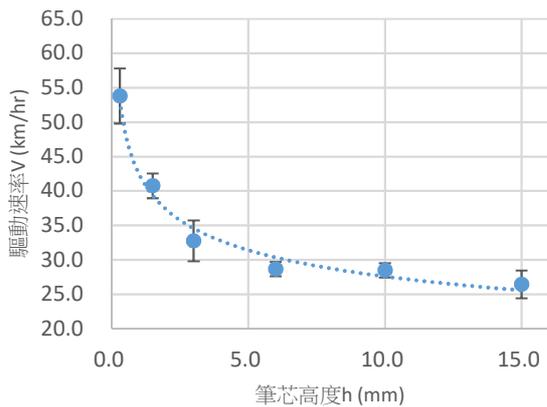
二、不同規格的筆芯在小風洞管內之不同高度處，其驅動速率關係如圖 5 所示，驅動速率與筆芯高度之趨勢線關係式為乘幕關係。由圖中可看出：不同尺寸的筆芯，在底層驅動速率都是最大。



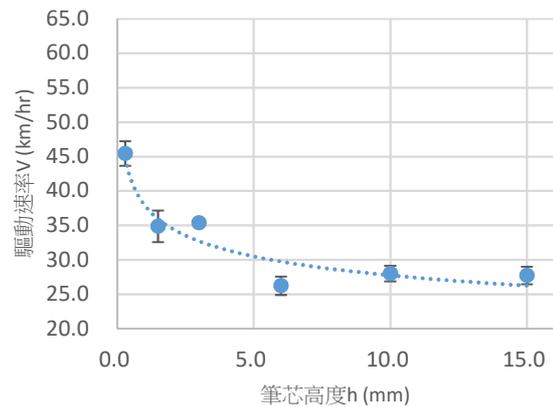
(a)直徑 2.0 mm 的 2B 筆芯
趨勢線關係式 $V = 48.859h^{-0.093}$



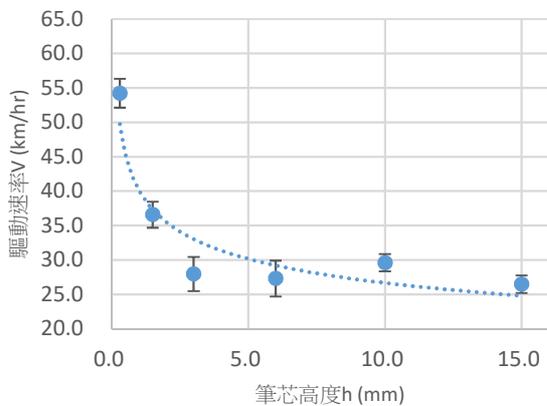
(b)直徑 0.9 mm 的 2B 筆芯
趨勢線關係式 $V = 51.03h^{-0.118}$



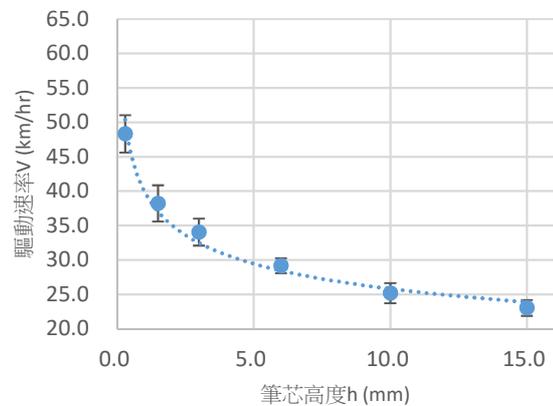
(c)直徑 0.5 mm 的 2B 筆芯
趨勢線關係式 $V = 42.447h^{-0.187}$



(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 α 為常數，彙整各組趨勢線之 α 值如表 3。

筆芯規格	α_1	α_2	α_3	α_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 α 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 $-\alpha$ 。

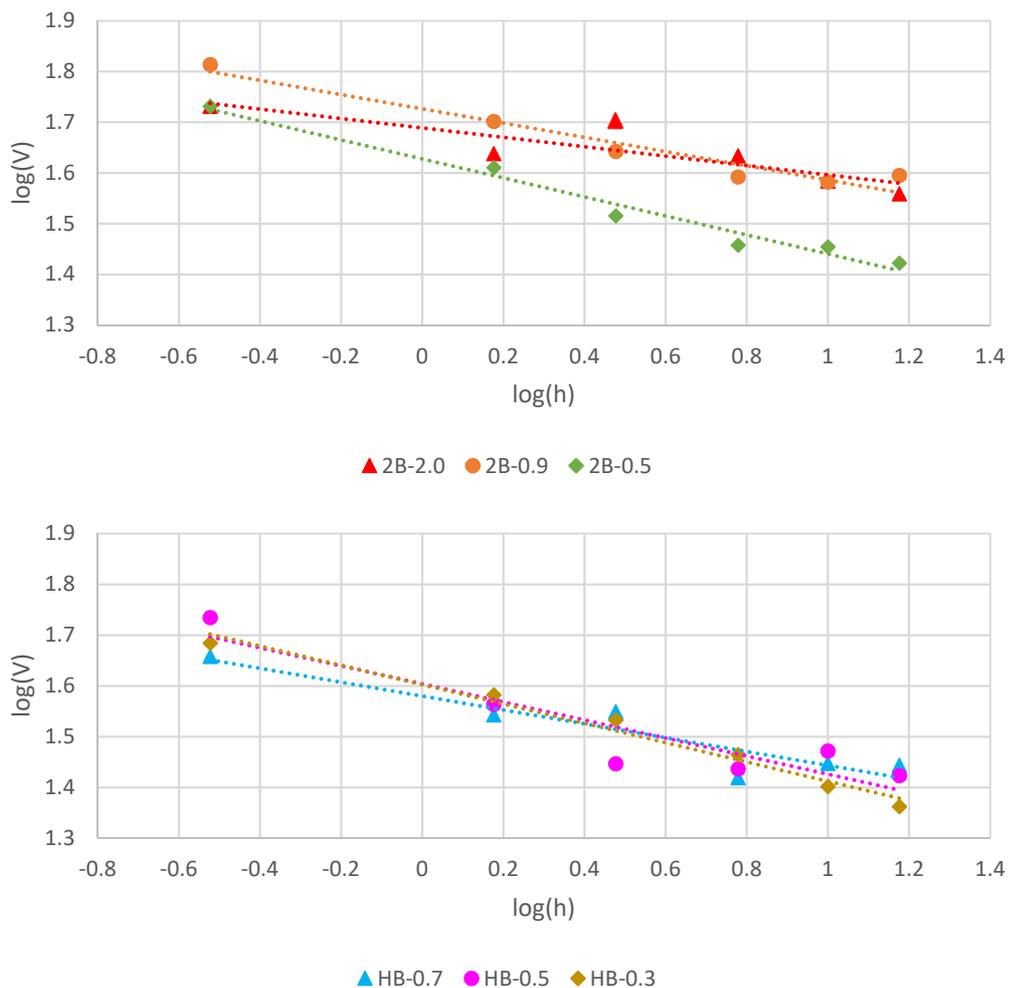


圖 6：2B 和 HB 筆芯之 $\log(V)$ - $\log(h)$ 呈負相關

五、針對 2B 和 HB 不同規格之筆芯，畫出筆芯粗細與 α 值之關係，如圖 7 所示。由圖可看出筆芯直徑和 α 值大小為負相關，當筆芯直徑越小則 α 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。

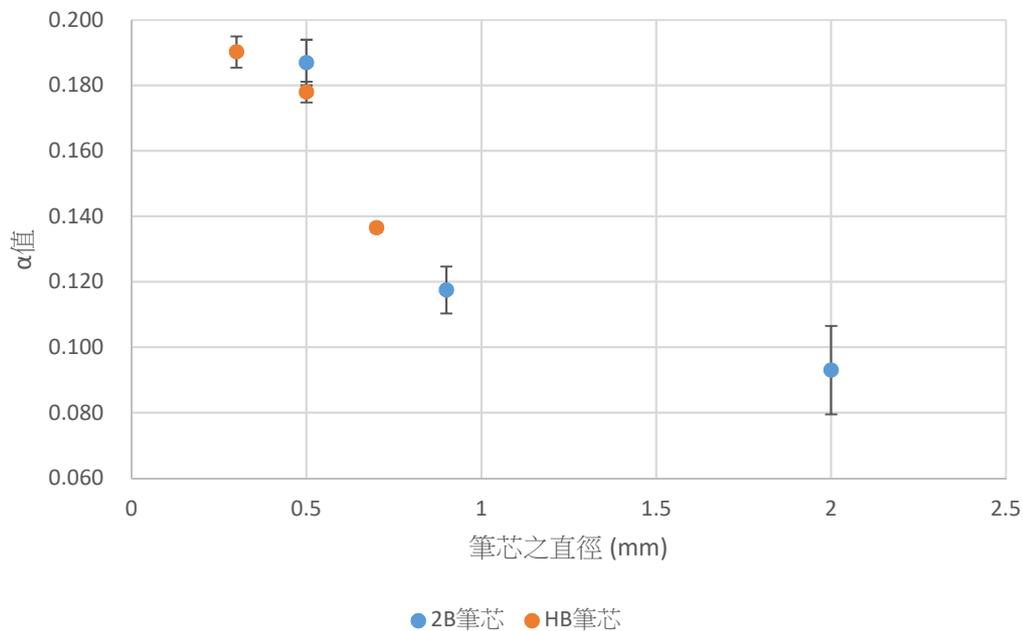


圖 7：2B 和 HB 筆芯之粗細與 α 值之關係

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

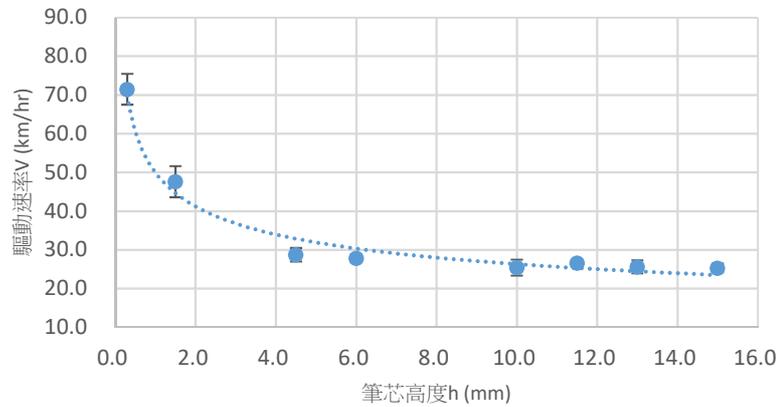
(b) 小風洞管中間位置（壓克力管中央位置）

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

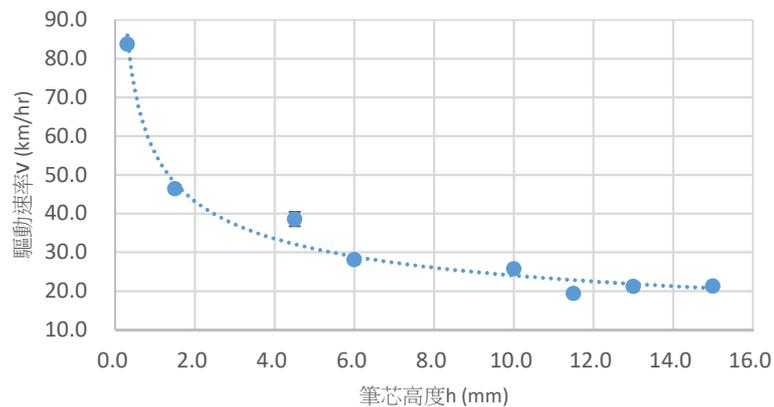
(c) 小風洞管後端位置（距壓克力管尾端 10 公分處）

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

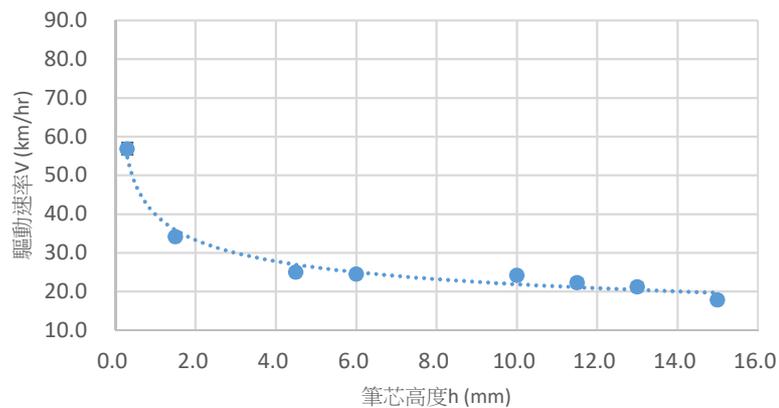
七、小風洞管內部的高為 3 公分，分別在風洞管之前端、中央和後端的位置，筆芯在高度為 0.3 mm 至 15.0 mm 時的驅動速率關係如圖 8 所示。由圖中的 a、b、c 三圖可看出無論是在風洞管的前端、中央或後端，都是底層有較大的驅動速率，曲線也類似，看不出有過渡區和紊流。



(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 α 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 α 值相對較大，而前後位置的 α 值較小。

筆芯位置	α_1	α_2	α_3	α_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

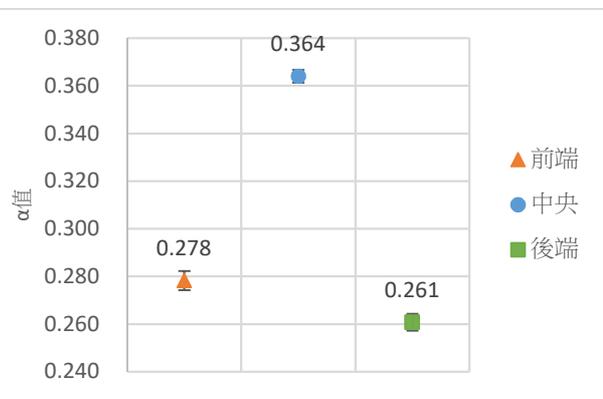


表 5：在風洞管前端、中央和後端位置，各組趨勢線關係式 $V=Ah^{-\alpha}$ 之 α 值

圖 9：筆芯在風洞管前端、中央和後端位置的 α 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。

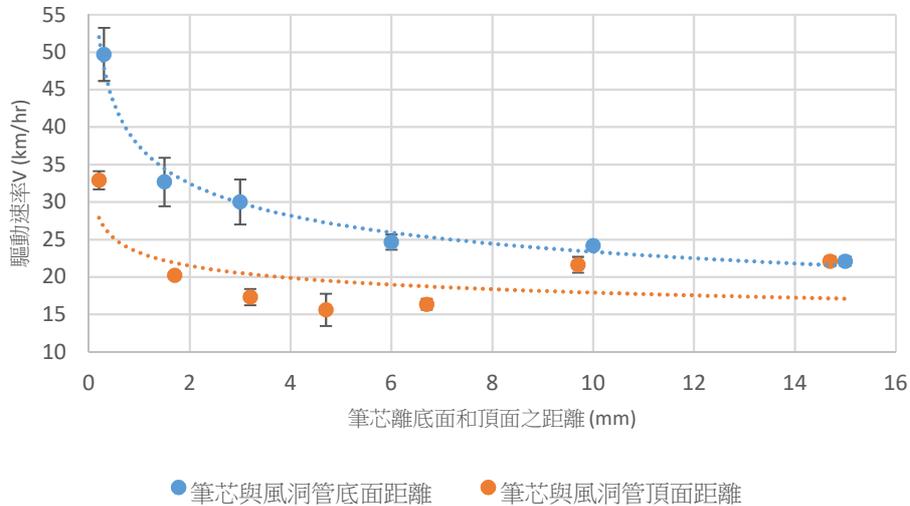


圖 10：筆芯在風洞管下半部距底面不同距離之驅動速率，以藍色圓點表示；筆芯在風洞管上半部距頂面不同距離之驅動速率，以橘色圓點表示

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。

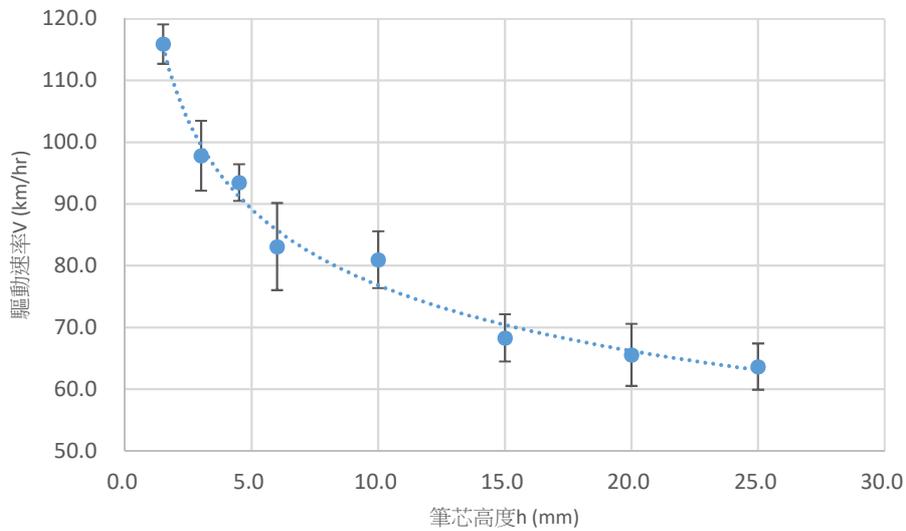


圖 11：HB 0.3 mm 筆芯在大風洞管中央水平位置的高度和驅動速率之關係，其趨勢線關係式 $V = 126.03.893h^{-0.215}$

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。

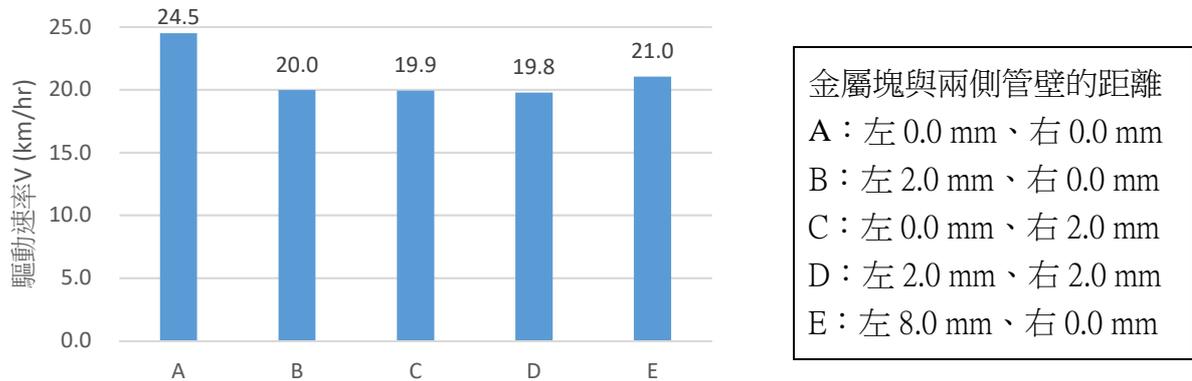


圖 12：墊高用的金屬塊與管壁的距離對筆芯驅動速率的影響

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)
		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。

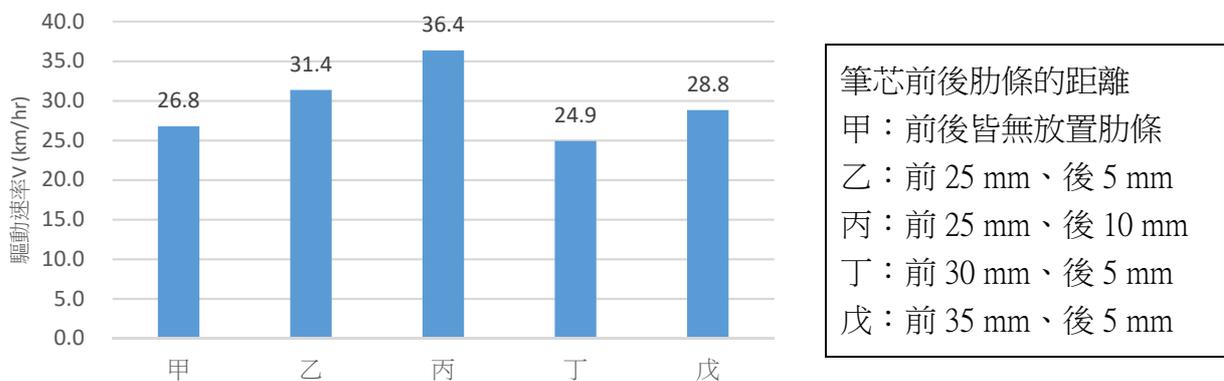


圖 13：筆芯前後加上肋條對驅動速率的影響

伍、討論

- 一、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。

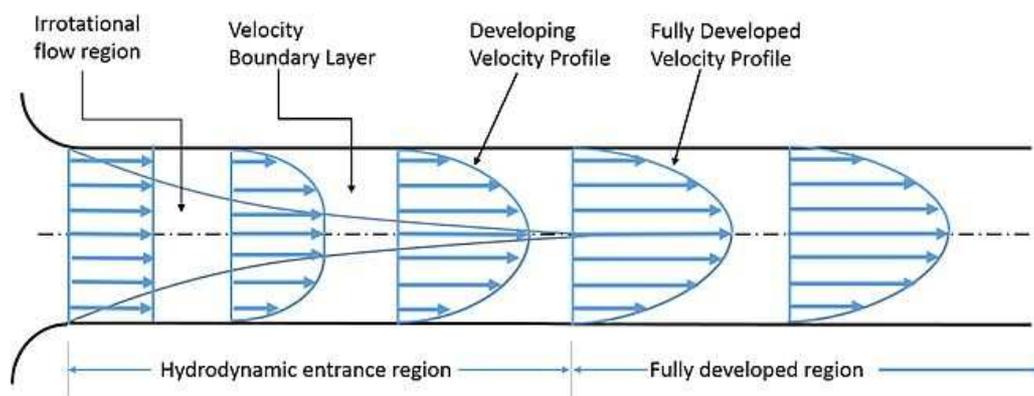


圖 14：流進管道中的流體之速度分布圖。[8]

- 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。

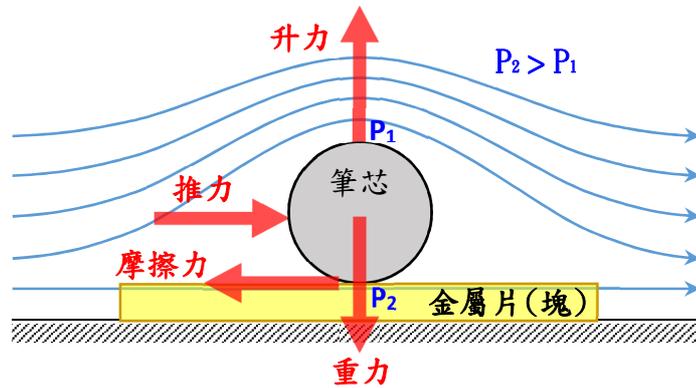


圖 15：風洞管中的筆芯在氣流吹動下分別受重力、推力、摩擦力和升力

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

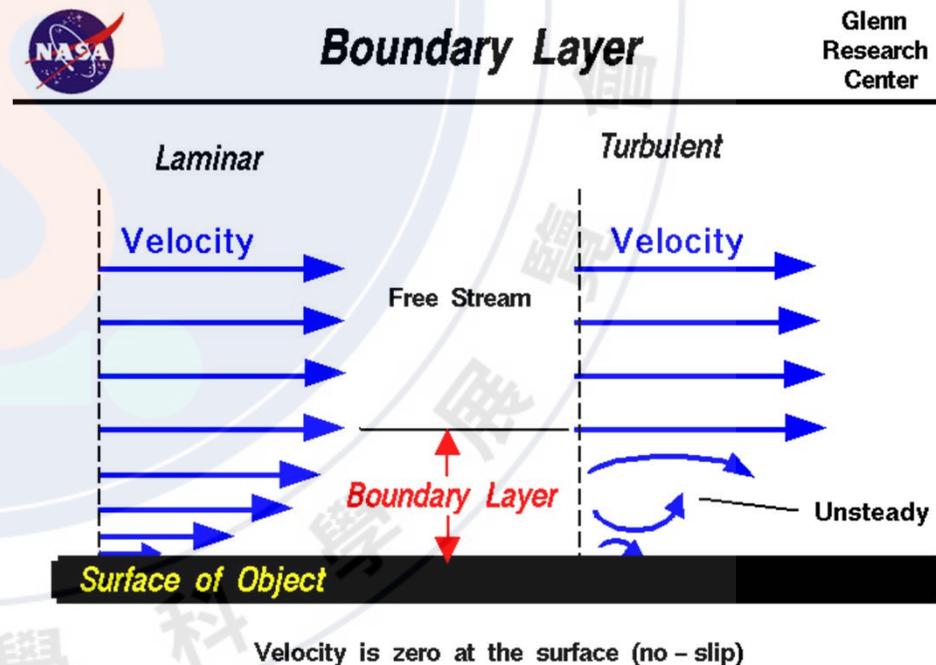
在一偶然機會聽到流體底層氣流會有吹不動螞蟻的現象，對此一直感到好奇想知道它的原理，於是和同學展開這次的研究。

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

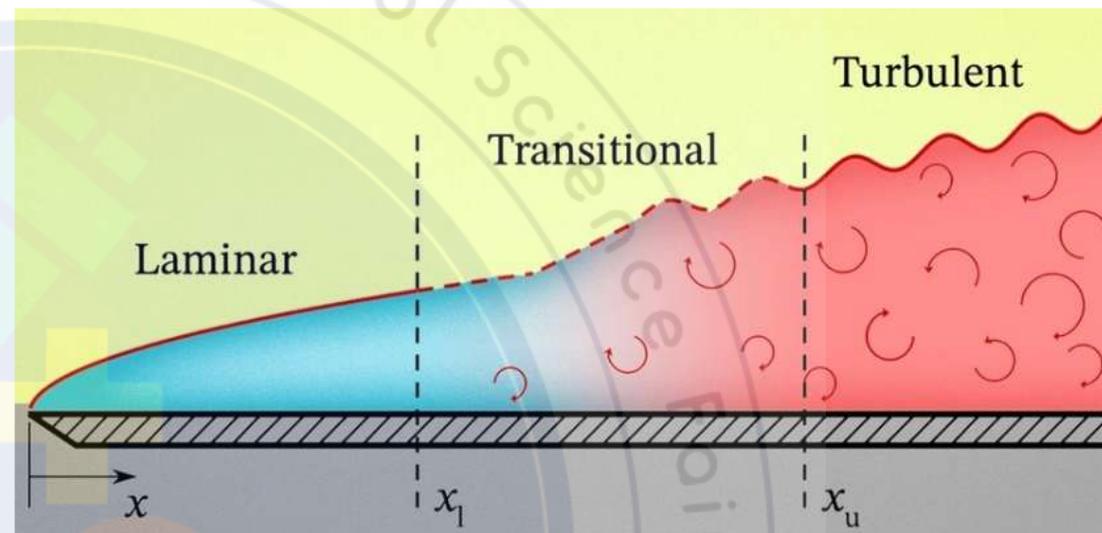
流體流經物體表面時，在靠近表面邊界的區域，因流體自身黏性和與物體表面間的摩擦力影響，會形成一邊界層（boundary layer），在最靠近物體表面的流體會緊貼物體表面而流速趨近於零，越離開物體表面則流速越快，直到與主流同一速度，如圖1所示。



▲ 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

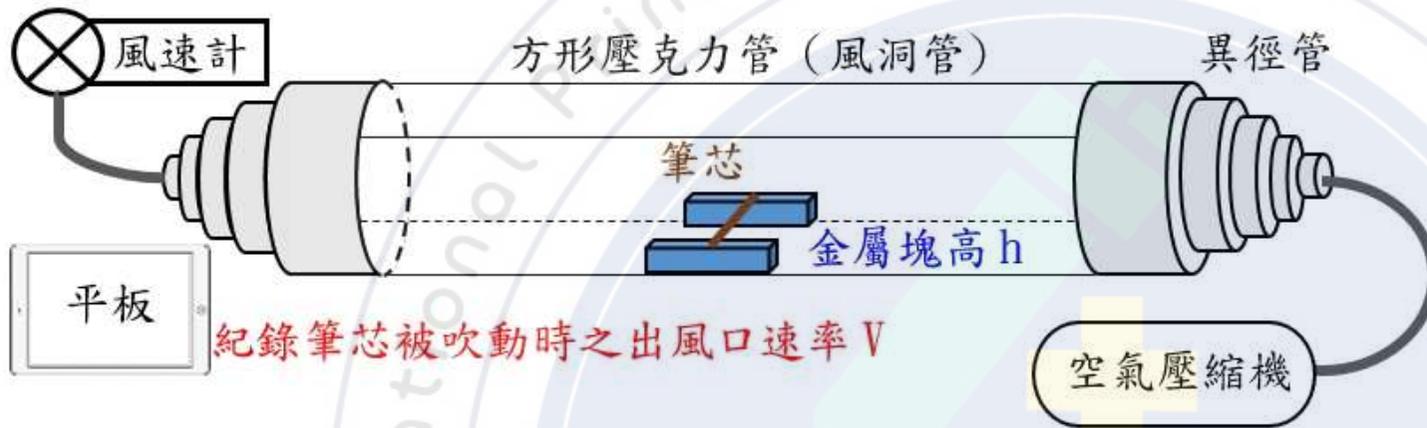
當流體速度小時，流體分層流動是為層流（laminar flow）；當流速增加到很大時，流線不再清楚可辨，此時流體中出現有許多小漩渦，稱為紊流（turbulent flow）；而在層流和紊流之間的流體狀況不穩定，層流和擾流混雜出現，存在一過渡流（transitional flow），如圖2所示。



▲ 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

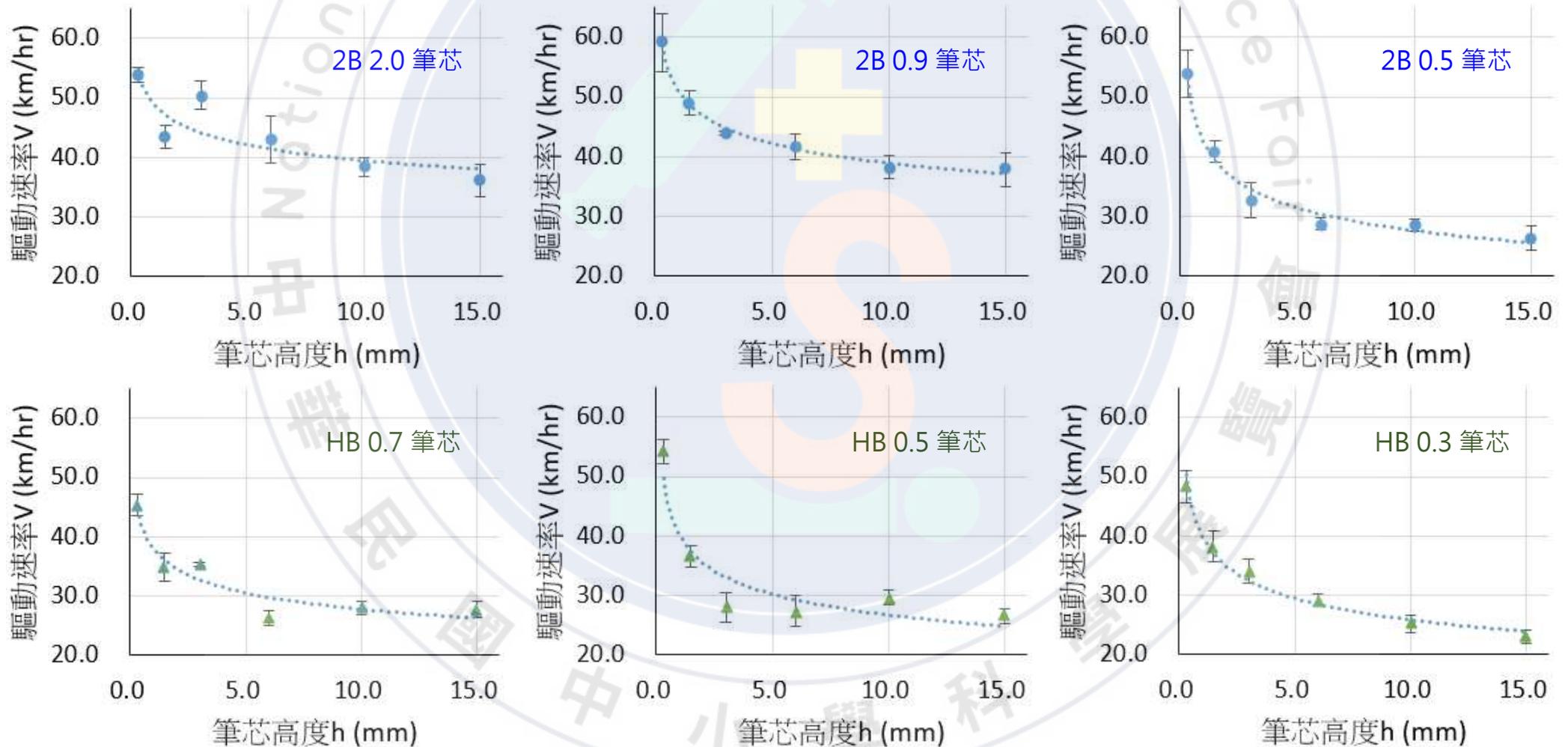
1. 筆芯規格
2. 筆芯鉛直高度
3. 筆芯水平位置
4. 風洞管孔徑大小
5. 墊高金屬塊放置方式
6. 筆芯前後肋條(平行條狀物)放置方式

- 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

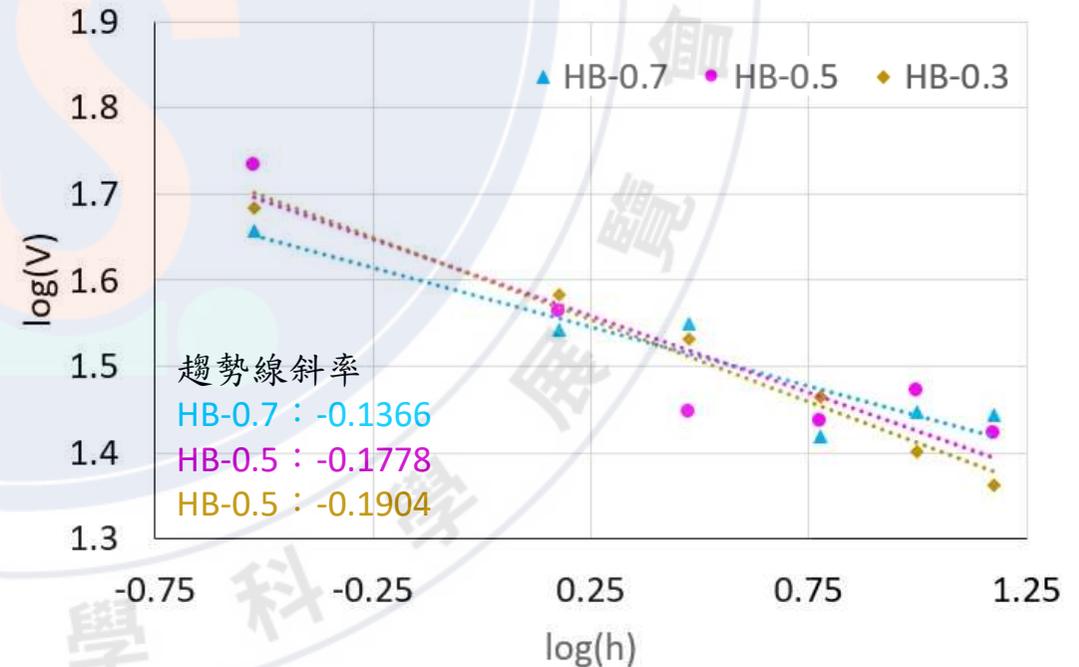
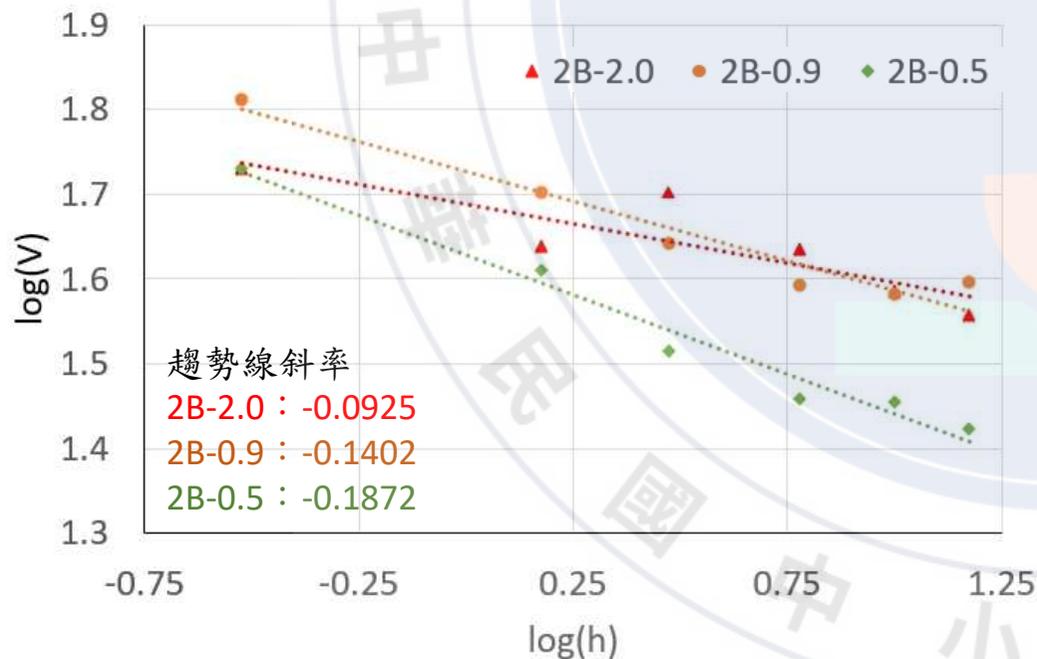
肆、研究結果

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 α 為常數，彙整各組趨勢線之 α 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	α_1	α_2	α_3	α_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 α 值

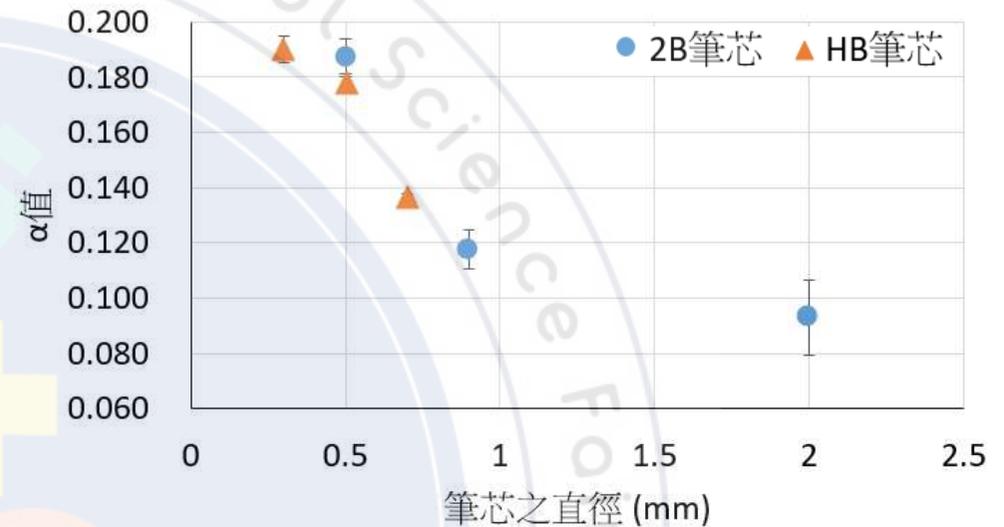


▲ 圖5：2B和HB筆芯之 $\log(V)$ - $\log(h)$ 呈負相關

肆、研究結果

3. 筆芯直徑和 α 值大小為負相關

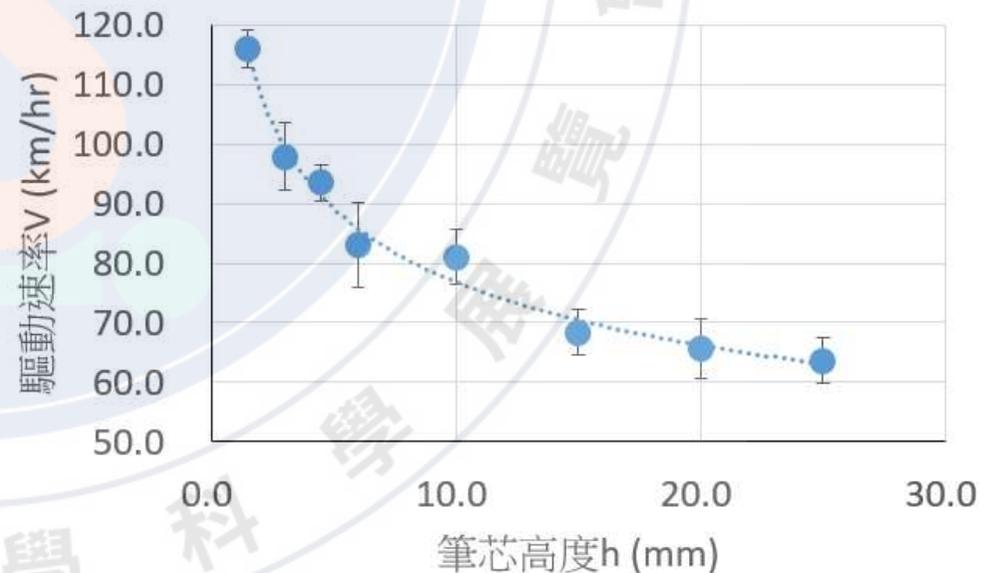
- 測量2B和HB筆芯兩組數據。
- 筆芯直徑越小則 α 值越大。
- 越細的筆芯在高度增加時，驅動速率較快變小。



▲ 圖6：筆芯直徑與 α 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

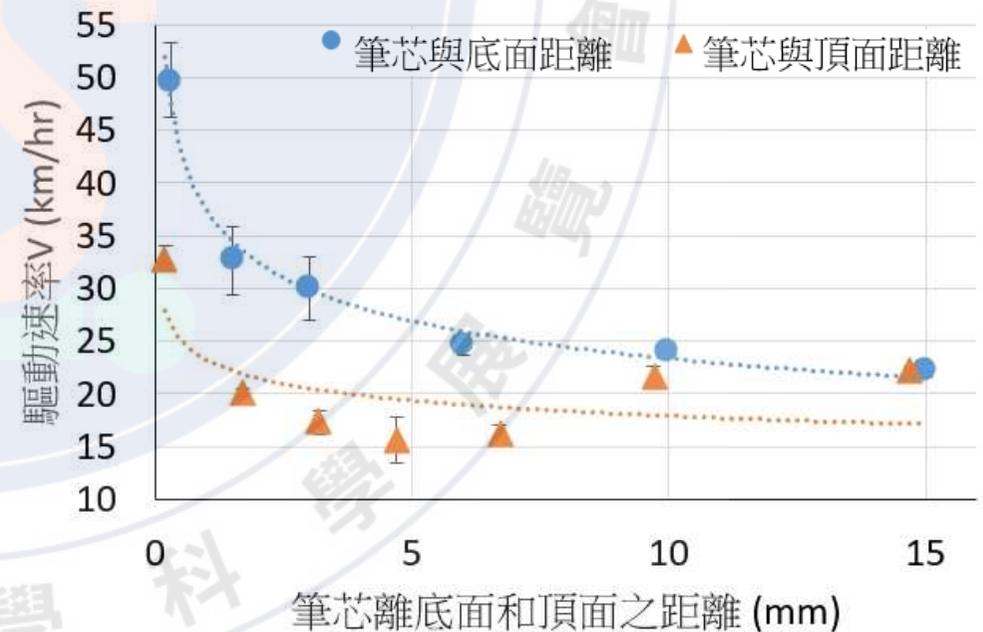
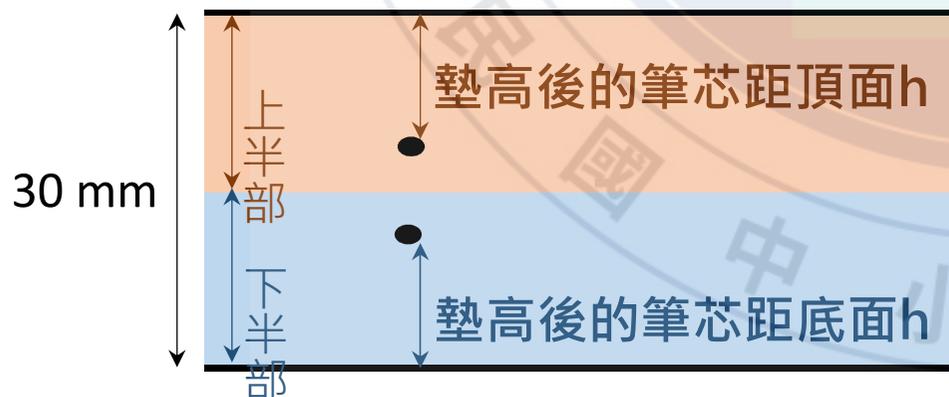
- 不同水平位置的底部皆測得較大驅動速率。
- 筆芯高度和驅動速率曲線也類似，沒出現如圖2所示之過渡帶與紊流。
- 風洞管中央趨勢線關係式 $V=Ah^{-\alpha}$ 之 α 值相對較大，而前後位置的 α 值較小。



▲ 圖8：筆芯在不同水平位置的 α 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。

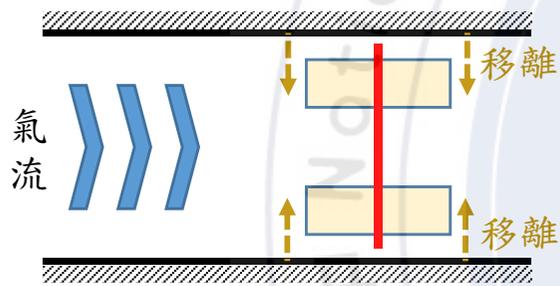


▲ 圖9：筆芯到底面或頂面的距離與驅動速率之關係

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。

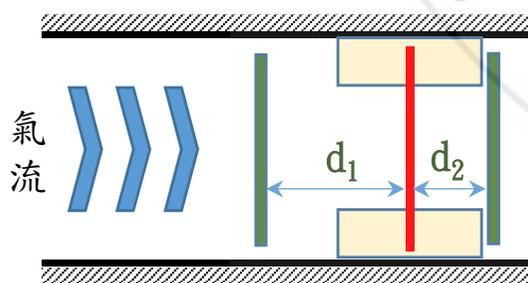


金屬塊與兩側管壁的距離
A：左 0.0 mm、右 0.0 mm
B：左 2.0 mm、右 0.0 mm
C：左 0.0 mm、右 2.0 mm
D：左 2.0 mm、右 2.0 mm
E：左 8.0 mm、右 0.0 mm

▲ 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。

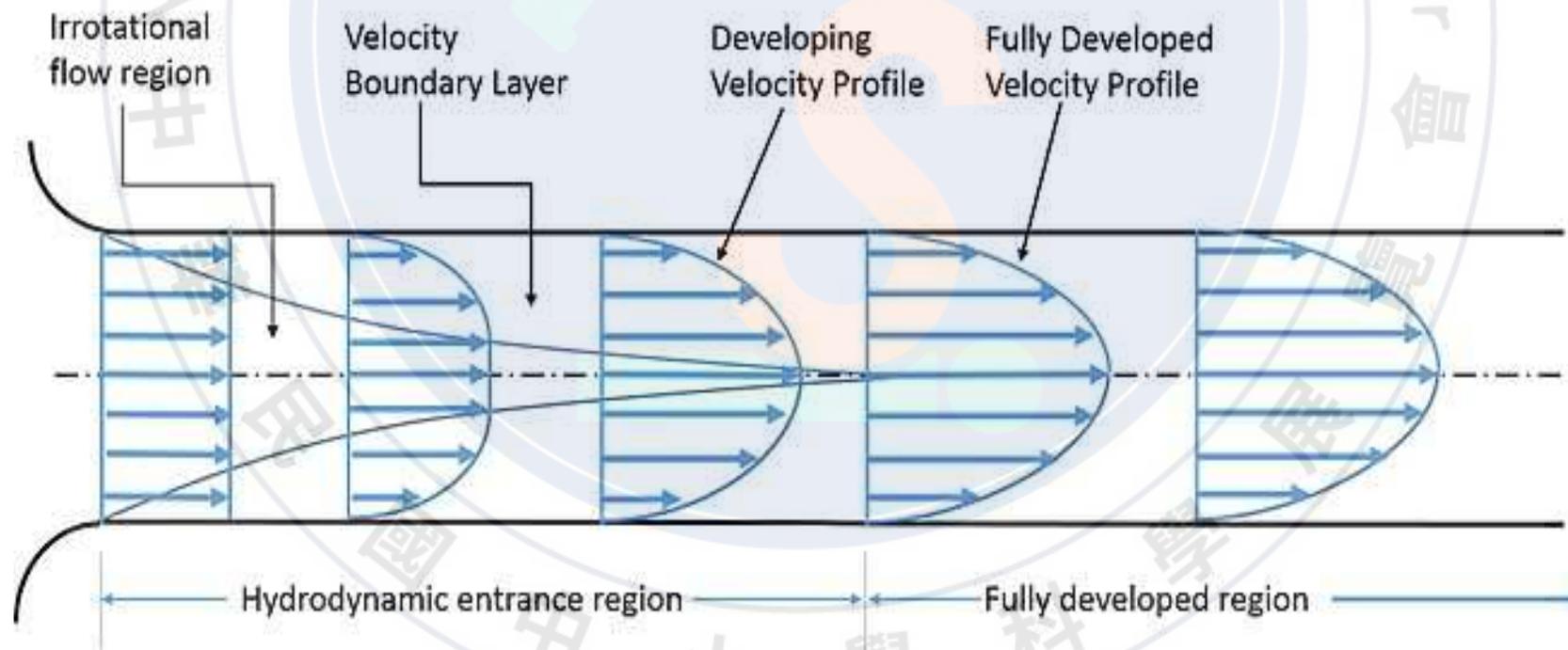


筆芯前後肋條的距離
甲：前後皆無放置肋條
乙：前 25 mm、後 5 mm
丙：前 25 mm、後 10 mm
丁：前 30 mm、後 5 mm
戊：前 35 mm、後 5 mm

▲ 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。

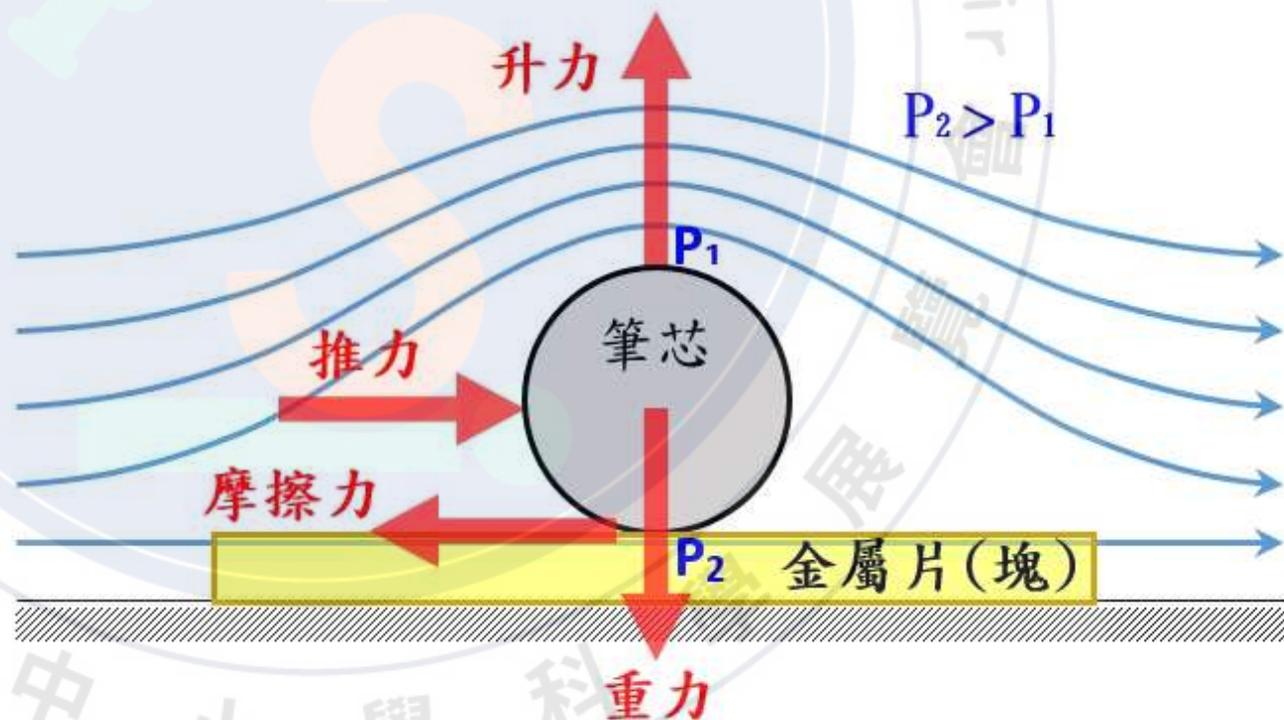


▲ 圖12：流進管道中的流體之速度分布圖

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