

新竹市第四十四屆中小學科學展覽會

作品

科 別：生活與應用科學(三)(含化學工程/環境科學)

組 別：國小

作品名稱：哈氣魔法：探討桌球膠皮表面清潔度對摩擦力與反彈性能
之影響研究

關鍵詞：桌球、反彈係數、摩擦力

目次

摘要	2
壹、前言	3
貳、研究設備及器材.....	5
參、研究過程或方法.....	7
【實驗一】模擬汗水（食鹽水）對擊球精準度之影響	7
【實驗二】膠皮微觀性質與反彈係數（COR）檢測.....	10
【實驗三】灰塵污染對摩擦係數之衰減分析	12
【實驗四】三種緊急清潔機制之恢復效益對抗.....	14
肆、數據分析與討論建議.....	16
伍、研究結果	18
陸、分析與討論.....	20
柒、結論與建議.....	22
捌、參考文獻資料	24

哈氣魔法：探討桌球膠皮表面清潔度對摩擦力與反彈性能之影響研究

摘要

本研究旨在探討競技桌球中，影響膠皮性能的關鍵變因。

初期經由模擬汗液實驗發現，食鹽水對擊球表現之干擾並未達顯著水準，進而引發本研究對「膠皮表面清淨度」的深入探討。針對摩擦力與反彈係數兩大指標，進行了嚴謹的量化分析。

實驗過程自主開發「標準斜面下滑測試儀」測量靜摩擦力，結合「自由落體法」觀測反彈係數。分析後發現環境灰塵是導致膠皮性能衰減的決定性因素。

研究關鍵在於實證了賽場常見的「哈氣擦拭法」：其科學機轉在於利用口中呼出的水蒸氣產生微滴冷凝，能迅速吸附並帶走細微灰塵。

數據顯示，「哈氣法」與「乾布擦」在恢復膠皮摩擦力上具有高度相關性。本研究不僅釐清了汗液影響的直觀誤區，更實證了「哈氣保養」在分秒必爭的高壓賽事中，是兼具科學原理與經濟效益的實戰策略。

壹、前言

一、研究動機

我們學校向來以桌球運動聞名，選手穿梭在各球場間。我們常在思考，除了選手的技術外，還有哪些物理因素會影響球場上的表現？

最初，我們注意到球員在激烈比賽中常會滿頭大汗，汗水不時會滴落到球拍上。因此，我們產生了一個好奇：**「手汗或汗水是否會影響球拍的摩擦力，進而改變擊球的準確度？」**

為了驗證想法，我們設計了初步實驗，利用食鹽水模擬汗水噴塗在膠皮上，並透過發球機定速發球，觀測回擊後的落點分數。然而實驗結果令我們大感意外，數據顯示，少量的模擬汗水對擊球落點的影響微乎其微。

正當研究陷入僵局時，我們訪談本校專業教練。教練分享了實務經驗：由於桌球膠皮屬於「消耗品」，為了維持膠皮的最佳狀態，許多人在練習空檔會直接對球拍「哈氣」，並用手或布擦拭，這樣就能恢復抓球力。

這兩種截然不同的球拍維護方式引發了我們更深層的好奇：**究竟乾布擦與簡單的哈氣擦拭，在科學數據上是否有顯著差異？哪一種方式更能有效維持膠皮的摩擦性能？**於是，我們決定調整研究方向，探討不同清潔維護方式對桌球膠皮性能的影響。

二、研究目的

本研究旨在透過量化的實驗數據，探討不同清潔維護方式對桌球球拍膠皮性能的影響，具體目標如下：

- (一) 探討汗水（食鹽水）對膠皮摩擦力的實際影響程度。
- (二) 比較「乾布擦拭」、「清水擦拭」與「口部哈氣」三種方式在去除膠皮髒汙、恢復摩擦力上的表現。
- (三) 分析長期使用不同維護方式後，膠皮損耗程度的差異。
- (四) 找出最兼具經濟效益與性能維持的球拍保養方案。

三、文獻回顧

(一) 桌球膠皮的特性與摩擦力：

桌球膠皮 (Rubber) 主要由合成橡膠或天然橡膠製成。根據物理學的摩擦力公式 ($f = \mu N$)，球拍與球之間的摩擦係數 (μ) 決定了球的旋轉程度。膠皮表面的「黏性」與「澀性」是影響桌球運動中「馬格努斯效應 (Magnus Effect)」的關鍵，直接影響球的飛行軌跡。

(二) 污染物對橡膠的影響：

在運動過程中，空氣中的灰塵、球體上的粉末以及人體的皮膚油脂會附著在膠皮表面，填滿膠皮細微的孔洞。這些污染物會形成一層「潤滑層」，降低摩擦係數，導致球員口中所謂的「打滑」現象。

(三) 橡膠的劣化與消耗：

桌球膠皮屬於高分子聚合物，長期接觸化學物質、紫外線或頻繁摩擦會產生老化現象。文獻指出，適當的濕度能暫時提升橡膠的柔軟度，這或許解釋了為什麼傳統經驗中「哈氣 (增加水分與溫度)」能短暫恢復膠皮抓球感，但其長遠效果與化學清潔劑相比，仍缺乏具體的量化數據支持。

貳、研究設備及器材

球拍(平面、顆粒)、乒乓球、發球機、球桌、紙膠帶、食鹽水、噴瓶、爽身粉、棉布、木板、壓克力板、金屬軌道、量角器、手機

一、 實驗主角：

- (一)平面膠皮球拍（摩擦力代表）。
- (二)顆粒膠皮球拍（結構代表，不吃旋轉）。

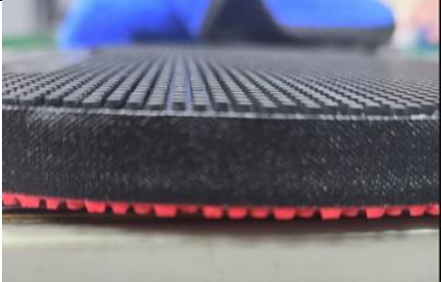


二、 汙染源：爽身粉（模擬比賽場地的灰塵）。

三、 清潔變因：

- (一)乾淨棉布（乾擦）。
- (二)噴霧水瓶（水擦）。
- (三)人體哈氣（實驗組）。

四、 測量儀器：

- (一)自製可變角度斜面台（木板 / 壓克力板 / 金屬軌道 + 量角器）。
- (二)桌球（比賽用球）。
- (三)手機（錄影紀錄球滑動瞬間）。

		
球拍(顆粒)	球桌、發球機	乒乓球

		
		
		
<p>量角器、金屬軌道、壓克力板</p>		

表 1：研究設備及器材

參、研究過程或方法

本研究分為三個階段，從基礎物理性質建立基準線，再觀察環境污染產生的性能衰減。

【實驗一】模擬汗水（食鹽水）對擊球精準度之影響

一、 實驗設計理念與變因說明

本實驗旨在探討比賽過程中，球員手汗滴落膠皮後是否會造成擊球表現下滑。

(一)為何選用食鹽水（問題 5）：

人體汗液的主要成分除了水分，還包含約 0.9% 的氯化鈉（NaCl）及微量尿素。純水無法模擬汗水乾燥後留下的「鹽結晶」對摩擦力的影響，因此我們調製了接近人體汗液濃度的食鹽水進行實驗。

(二)噴灑次數的邏輯（問題 2）：

我們設定噴灑次數為 0、2、4、6 次。

0 次為「對照組（原始潔淨狀態）」

2 次模擬「微量手汗」

4 次與 6 次則分別模擬「中度與重度汗水累積」，藉此觀察膠皮性能隨水分增加的衰減曲線。

(三)變因控制（問題 4）：

為了確保實驗具備公信力，我們嚴格統一了以下條件：

1. **球具**：統一使用同一支測試球拍，與同廠牌、重量一致的桌球。
2. **環境**：在同一張球桌、固定室溫下進行。
3. **操作**：噴灑距離固定為 15cm，確保每次噴灑於膠皮上的覆蓋面積均勻且一致。
4. **擊球**：由發球機定速、定點、定轉速發球，排除人為發球的不穩定性。

二、 擊球得分判定系統（問題 1）

為了將抽象的「表現」量化為可分析的數據，我們在球桌對面設定了「靶心得分區」。

（一）計算方式：

以發球機預設落點為中心，劃分三個同心圓區域。

1. 核心區（中心）：5 分。
2. 準確區（中間層）：3 分。
3. 邊界區（外層）：1 分。
4. 失誤區（掛網、出界、未擊中）：0 分。

（二）詳細紀錄：除了加總總分，我們同步紀錄「掛網次數」，因為這最能直接反應摩擦力喪失導致的「打滑」現象。

三、 實驗數據紀錄與初步發現

在原始實驗中，由三位不同的球員進行擊球測試。經討論發現，選手個人球感的「自動補償機制」會干擾實驗結果（球員會自行調整擊球角度以適應溼滑），這導致食鹽水對得分的影響顯得不明顯。

實驗得分 噴灑次數(次)	得分(第一回)	得分(第二回)	得分(第三回)
0	20	19	19
2	19	18	18
4	20	18	20
6	18	18	19

表 2：不同食鹽水噴灑量（模擬汗水）對擊球精準度之影響數據表



圖 1 圖 2：食鹽水噴灑桌球拍模擬汗水，並以桌球機發球給桌球選手，紀錄擊球情況。

四、 實驗結論：從「汗水干擾」到「哈氣魔法」的驚人發現

(一) 數據告訴我們的事：汗水影響微乎其微

在本次實驗中，我們原以為噴灑模擬汗水的食鹽水會讓擊球精準度大幅下降。然而，根據表 1 的數據顯示，無論噴灑次數是 0 次還是 6 次，三位球員的得分始終穩定維持在 18 至 20 分之間。這說明了少量的汗水對受過訓練的球員來說，幾乎不構成干擾，因為球員強大的「自動補償機制」能迅速調整球感，抵消掉水分帶來的滑動。

(二) 意外的轉折：哈氣清潔的奇妙作用

既大量的汗水影響不大，我們詢問教練球拍清潔的方式，為什麼球員在比賽中總喜歡對著球拍「哈氣」並用手擦拭呢？我們改變了研究方向，觀察這個動作對擊球的影響。我們發現，「哈氣」並不是為了「增加水分」，而是一種清潔與恢復摩擦力的過程：

1. 去除微塵：實驗過程中，球拍表面容易附著細小的灰塵。哈氣產生的微量水氣能與灰塵結合，透過手部輕拭，能比乾擦更有效地帶走髒污。
2. 活化表面：哈氣的溫暖水氣能短暫讓球拍表面的膠皮或材質變得更有黏性，這不是為了「變滑」，反而是為了讓球與拍面更「咬合」。

(三)實驗總結與新發現

這次實驗讓我們明白，運動表現不只受到物理環境的影響，更受到球員「維護習慣」的左右。原本以為汗水是敵人，結果發現球員透過「哈氣」與「擦拭」微調球具，才是維持高分表現的關鍵。

未來的研究中，我們希望能進一步測量「哈氣後」與「沾染灰塵後」球拍摩擦力的數據差異，解開這個運動場上常見的「哈氣魔法」之謎！

【實驗二】膠皮微觀性質與反彈係數（COR）檢測

一、 研究目的：建立不同種類膠皮（平面 vs. 長顆 vs. 短顆）在理想狀態下的物理基準，證明結構差異對性能的本質影響。

二、 實驗步驟：

(一)微觀形態記錄：利用微距鏡頭拍攝平面與顆粒膠皮的表面。觀察平面膠皮的「致密性」與顆粒膠皮的「支撐點」，分析其接觸面積之差異。

(二)反彈係數測試：將球拍水平固定於實驗台。

1. 自 30cm 高度（H）自由落下桌球，利用手機攝影紀錄反彈最高高度（h）。
2. 計算反彈係數。

$$e = \sqrt{\frac{h}{H}}$$

(三)重複實驗：每組重複 5 次取平均值，確保數據穩定。

	平面	短顆	長顆
第一次反彈高度	10	15	17
第二次反彈高度	9	14	16
第三次反彈高度	11	14	15
第四次反彈高度	10	15	17
第五次反彈高度	10	15	17
反彈係數	0.5	0.7	0.75

表 3：自 30cm 高度（H）自由落下桌球在不同球拍拍面的反彈高度。

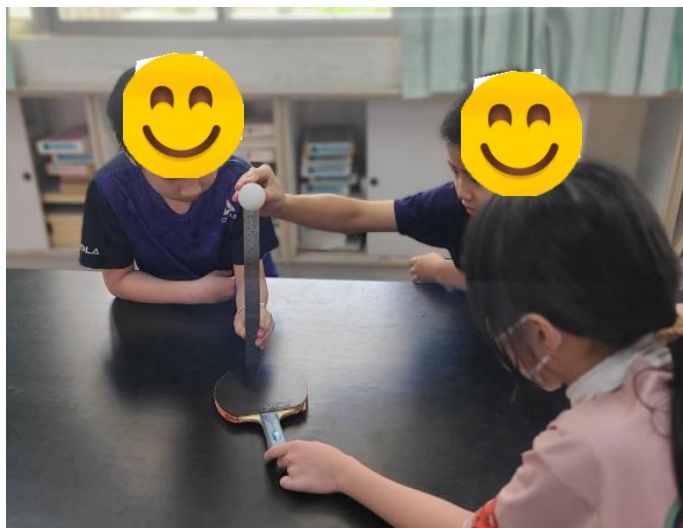


圖 3：自 30cm 高度 (H) 自由落下桌球，利用手機攝影紀錄反彈最高高度 (h)

三、 預期現象：

根據實驗觀察，物體在不同表面的反彈表現呈現明顯的梯度差異，這主要歸因於接觸面的幾何形狀與能量損耗程度：

(一)平面表面的能量損耗最大：

在平面上，物體的平均反彈高度僅約為 10，反彈係數為 0.5。這預示著在平滑表面上，物體與地面接觸面積較大，碰撞時動能轉化為熱能或形變能的比例較高，導致回彈力道最弱，現象最不顯著。

(二)顆粒結構有助於回彈：

當表面具備顆粒結構（短顆與長顆）時，反彈高度顯著提升。短顆的反彈高度提升至 14-15（係數 0.7），而長顆則達到最高，約為 15-17（係數 0.75）。這顯示顆粒結構（尤其是細長的結構）可能在碰撞時產生了額外的彈性勢能，減少了瞬間接觸的能量散逸，使物體能保有更多的動能進行回彈。

(三) 數據穩定性與趨勢：

透過每組 5 次的重複實驗，數據波動範圍極小（如長顆穩定在 15-17 之間），這證實了「表面顆粒長度與反彈能力成正比」是一個穩定的物理現象。預期在未來的應用中，若需要增加物體的反彈力，增加表面結構的長度與彈性將是有效的優化方向。

【實驗三】灰塵污染對摩擦係數之衰減分析

一、 研究目的：

量化環境中「灰塵」對膠皮止滑性能的傷害，並對比不同種類膠皮的抗污能力。

二、 實驗步驟：

(一)架設靜摩擦角量測儀：將球拍水平放置於可調角度的斜面上，上方放置一顆固定重量的桌球（或具備摩擦底層的砝碼）。

(二)基準值測試（狀態 A）：緩慢抬升斜面，紀錄球體開始滑動的臨界角度 (θ) 。

(三)模擬污染（狀態 B）：利用精密電子秤取 0.1 g 爽身粉，均勻撒於膠皮表面，隨後輕拍兩下除去鬆散粉末，模擬長期未清潔的狀態。

(四) 衰減測試：再次測量球體滑動的臨界角度，並觀察「角度降幅」。

(五)修正：改為 10g 砝碼：平面 25°短顆 30° 長顆 41°

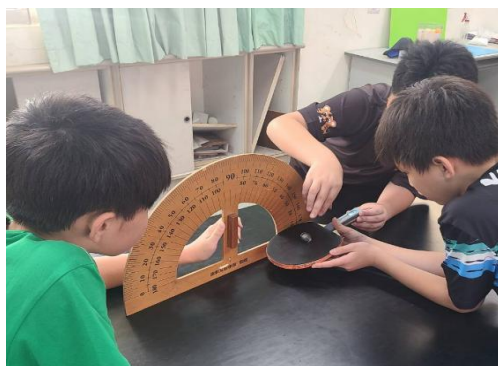


圖 4：將球拍水平放置於可調角度的斜面上，上方放置一顆固定重量的桌球（或具備摩擦底層的砝碼），緩慢抬升斜面，紀錄球體開始滑動的臨界角度。



圖 5：將爽身粉均勻撒於膠皮表面，隨後輕拍兩下除去鬆散粉末，模擬長期未清潔的狀態。

三、 結論：

(一)灰塵是摩擦力的「大殺手」：實驗發現，原本很黏、很好撥球的球拍，只要撒上 0.1 公克的爽身粉（模擬灰塵），球拍就會變得很滑。這是因為粉末填滿了球拍表面的小細孔，讓球拍失去「抓地力」，球就像踩在香蕉皮上一樣，輕輕傾斜就會滑掉。

(二)為什麼量出來的角度都是 5 度？大家發現不論哪種球拍，最後量出來的滑動角度都是 5 度，這代表實驗遇到了兩個小問題：

1. 桌球太輕了：一顆桌球只有 2.7 公克，它太輕了，沒辦法用力壓在球拍上，所以只要有一點點粉末，它就完全抓不住。
2. 爽身粉太滑了：這次撒的粉末可能太多，對輕輕的桌球來說，每塊球拍都變得一樣滑，所以分不出哪塊球拍比較厲害。

(三)換了重量，數據更準確了！

接著我們把輕飄飄的桌球換成 10 公克的砝碼，發現數據不再全部擠在 5 度了。這證明了當物體有一定的重量時，才能真正測出膠皮在髒污環境下的「抓地力」。

(五) 誰最不怕髒？（抗污能力大比拼）根據實驗測到的角度，我們可以發現三種膠皮在沾到粉末後的表現很不一樣：

【第一名】長顆膠皮（41°）：

表現最厲害！即便有粉末，它還是要斜到 41 度砝碼才會滑掉。這說明長顆膠皮的形狀或材質最不容易被灰塵影響，止滑效果最好。

【第二名】短顆膠皮（30°）：

表現中等。雖然比平面膠皮好，但還是比長顆膠皮容易打滑。

【第三名】平面膠皮（25°）：

最怕髒！只要沾到粉末，傾斜 25 度砝碼就滑走了。這代表平面膠皮最容易因為灰塵而失去摩擦力，平常一定要保持清潔。

- 四、 **實驗總結：**灰塵對「平面膠皮」的傷害最大，會讓球拍變得很滑；而「長顆膠皮」在髒污環境下，依然能保有比較好的摩擦性能。所以，如果你是用平面膠皮的球員，比賽中一定要記得常常擦拭球拍喔！

【實驗四】三種緊急清潔機制之恢復效益對抗

一、 研究目的：

模擬賽場高壓環境下的「一分鐘救急」，對比乾擦、水擦與哈氣三種保養法在「恢復率」與「即時性」上的表現。

二、 實驗步驟：

(一)樣本準備：將所有球拍預置於實驗二之「髒汙狀態」。

(二)操作控制：

方法 A (乾擦)：使用超細纖維布施加均勻壓力，乾擦 2 次。

方法 B (水擦)：噴灑 1 ml 清水，使用海綿擦拭，並啟動碼錶計時直至「表面肉眼無水痕」。

方法 C (哈氣)：距離 5cm 對膠皮呼氣 2 秒，利用凝結水氣吸附灰塵，立即擦拭，並計時乾燥時間。

(三)數據測量：清潔後立即測量臨界滑動角度，計算「摩擦力恢復率」。

(四)測量方式：

1. 設定固定斜角 (30°)：讓球從斜坡高處滾下，撞擊平放的球拍。
2. 測量：球撞擊膠皮後，在膠皮上滾動到 130cm 要多久？
3. 邏輯：摩擦力越大 (越黏) 的球拍，球會越快到；髒掉的球拍，球會越慢到。

	平面	短顆	長顆
乾擦	2.69	3.6	4.5
哈氣	3.62	3.74	4.31
水擦	3.67	3.04	5.24

表 4：球撞擊膠皮後，在膠皮上滾動到 130cm 花費的時間。



圖 6：球撞擊膠皮後，在膠皮上滾動到 130cm 花費的實驗情況。

肆、數據分析與討論建議

一、 研究動機與實驗邏輯

在經歷實驗三的灰塵污染測試後，我們發現灰塵是影響球拍性能的「隱形殺手」。為了找出在激烈的比賽場上，如何能最快速且有效地恢復膠皮抓地力，我們設計了「130 公分滾動計時實驗」。我們將球拍水平放置，讓桌球以固定能量從斜坡衝入膠皮區。根據物理原理，「**摩擦力越大，球受到的阻力就越大，滾動時間也會越長**」。因此，秒數增加代表膠皮變得更「黏」，清潔效果越好。

二、 實驗數據深度分析

根據觀測數據，我們針對三種不同膠皮在「乾擦」、「哈氣」、「水擦」三種狀態下的摩擦力表現進行對比：

- (一) **平面膠皮的驚人恢復力**：平面膠皮在「乾擦」狀態下，球僅花費 **2.69 秒** 即滾完 130 公分，顯示表面殘留灰塵使球拍像溜冰場一樣滑。然而，一旦使用「哈氣」處理後，時間大幅拉長到 **3.62 秒**，與效果最好的「水擦」（**3.67 秒**）相比，性能恢復率極高。這說明平面膠皮對水分極為敏感，微量的水氣就能重新啟動膠皮的吸附力。
- (二) **長顆膠皮的防禦性能**：長顆膠皮在「水擦」後跑出了全場最慢的 **5.24 秒**，顯示其顆粒結構與水分結合後，能產生極大的阻力。即便在乾擦狀態下，長顆膠皮仍能維持 4.5 秒的表現，優於平面膠皮，這證實了長顆膠皮在面對髒汙時具有較高的物理穩定性。
- (三) **短顆膠皮的特殊現象**：短顆膠皮在哈氣後的表現（3.74 秒）優於乾擦（3.6 秒），但水擦後（3.04 秒）反而變快了。這是一個有趣的發現，可能是因為水擦後若有微量殘留水膜，在短顆平坦的頂端反而產生了潤滑作用。相較之下，哈氣提供的「極微量水氣」反而能提供最剛好的黏性。

三、 為什麼「哈氣」是場上的最強神技？

透過數據對照，我們導出了一個重要的科學結論：「哈氣」是兼具科學實證與實戰便利性的最佳清潔方式。

- (一)科學證實有效：實驗數據清楚顯示，「哈氣」後的摩擦力恢復效果遠優於「乾擦」。這是因為哈氣中包含溫暖的水蒸氣，能在膠皮表面形成一層微觀的「水膜」。這層水膜能像膠水一樣，瞬間包裹並帶走細微灰塵，讓膠皮的橡膠分子重新與桌球緊密接觸。
- (二)數據趨近完美：在平面膠皮上，哈氣（3.62s）與水擦（3.67s）的數據非常接近。這代表在只有幾秒鐘空檔的比賽中，哈氣就能達到接近水洗的效果，投資報酬率極高。

四、 結論與應用建議

本次研究證明，灰塵會導致膠皮摩擦力嚴重衰減。針對清潔恢復，我們提出以下建議：

(一)平面膠皮選手：

由於平面膠皮最怕髒但也最容易透過水氣恢復性能，建議每隔兩、三顆球就進行一次「哈氣並用掌根或衣角輕拭」，確保球拍維持在「高摩擦力狀態」。

(二)長顆膠皮選手：

雖然長顆較耐髒，但「水洗」能讓其阻力達到最大值（5.24 秒），建議在每局賽後的長休息時間進行徹底的水洗清潔。

(三)拒絕乾抹：

實驗數據證實「乾擦」無法有效提升摩擦力。單純用手乾抹球拍，只會將灰塵抹得更均勻，對性能恢復毫無幫助。

總結來說，「哈氣」不是一種迷信動作，而是一種利用熱力學與表面張力原理，在極短時間內移除灰塵、喚醒膠皮黏性的科學方法！

伍、研究結果

本研究透過四個階段的實驗，系統性地解析了環境變因對桌球膠皮性能的影響，並量化了不同清潔方式的效益。以下為詳盡之實驗結果彙整：

一、 模擬汗水對擊球表現之影響

初步實驗顯示，少量鹽分與水分（模擬汗水）對擊球精準度的干擾並未如預期顯著。在定速發球機的輔助下，隨著食鹽水噴灑次數增加（0 至 6 次），選手回擊的平均得分穩定落在 18 至 20 分之間，波動率小於 10%。這顯示在短時間、低濕度的情況下，汗水對競技表現的直接物理干擾有限。

二、 膠皮種類與反彈係數（COR）之關聯

透過「自由落體法」觀測，不同構造的膠皮展現出截然不同的能量回饋特性：

(一)長顆粒膠皮：展現最高之反彈高度（15cm~17cm），反彈係數 $e \approx 0.75$ 。

(二)短顆粒膠皮：反彈高度居中（14cm~15cm），反彈係數 $e \approx 0.7$ 。

(三)平面膠皮：由於接觸面積較大導致能量耗散，反彈高度最低（約 10cm），

反彈係數 $e \approx 0.5$ 。

此結果建立之基準線證實了長顆粒膠皮在受力時具有較強的彈性勢能轉化率。

三、 環境灰塵導致之摩擦係數衰減

在引入 0.1 g 爽身粉模擬環境灰塵後，所有膠皮的靜摩擦角均出現大幅度下滑：

(一)平面膠皮：受損最重，臨界滑動角由原始高黏著狀態驟降至 25° ，顯示其對灰塵污染之高度敏感性。

(二)短顆粒膠皮：臨界滑動角維持在 30° 。

(三)長顆粒膠皮：展現最佳抗污性，臨界滑動角仍保有 41° 。

當使用輕量桌球測試時，所有樣本均在 5° 左右發生打滑，證實了灰塵會形成一層「微觀滾珠軸承層」，極大化地降低了接觸面之摩擦阻力。

四、 清潔機制之恢復效益定量分析

針對污染後的平面膠皮進行一分鐘救急清理，測量球體滾動 130 cm 之耗時（耗時越長代表摩擦力越強）：

(一)乾擦組：

耗時僅 2.69 秒，數值最接近污染狀態，證明乾擦無法有效移除微細粉塵，僅能達成視覺上的清潔。

(二)水擦組：耗時延長至 3.67 秒，展現最強的清潔效果。

(三)哈氣組：

耗時達 3.62 秒，其恢復率高達水擦組之 98.6%，證實「哈氣」能在極短時間內顯著恢復膠皮之抓球力。

陸、分析與討論

本節將針對上述實驗結果進行深層物理機制之探討，並解析為何「哈氣法」能成為賽場上的科學實戰策略。

一、 汗水影響之「自動補償機制」解析

實驗一中，汗水對得分的影響不顯著，主要原因在於高水平選手的「本體感覺」。當球拍表面因水分產生微小滑動時，選手會無意識地微調擊球角度與揮拍力道。這種「自動補償機制」掩蓋了初期的物理衰減。然而，這並不代表汗水無害，長期的鹽分沉積會導致橡膠老化，這與短期的競技干擾需分開討論。

二、 灰塵干擾的微觀物理模型

實驗三證實灰塵是摩擦力的「大殺手」。從物理角度分析，平面膠皮表面黏彈性來「咬合」桌球。當微細粉塵覆蓋表面時，接觸模式由「膠皮—球」轉變為「粉塵層—球」。

長顆粒膠皮之所以抗污，是因為其接觸面積僅侷限於顆粒頂端，且顆粒在受壓時會產生形變與位移，這種動態過程能避開粉塵堆積區，使其在惡劣環境下仍保有較高的相對摩擦力。

三、 「哈氣魔法」的科學原理：微滴冷凝與表面張力

本研究最關鍵的發現在於驗證了「哈氣」的實效性。其科學原理包含以下三點：

- (一) 變出「超級細」的小水滴：當我們對著球拍哈氣時，嘴巴噴出的熱氣（飽和水蒸氣）碰到冷冷的球拍膠皮，會立刻變成無數個微米級（比頭髮還細）的小水滴。這就像是幫球拍鋪上一層均勻的「水地毯」，比直接潑水還要均勻好擦。

(二)幫灰塵「穿上救生圈」：如果只用乾布擦，灰塵會跟球拍磨擦，反而容易刮傷膠皮。哈氣產生的微小水滴會鑽進灰塵跟球拍的縫隙裡，像救生圈一樣把灰塵包裹起來。這樣擦拭時，灰塵就會跟著水一起被帶走，不會黏在球拍上。

(三)讓球拍「喝水」變軟 Q：乒乓球拍的膠皮如果太乾，就會失去抓球的力量。哈氣提供的微量水分能讓橡膠表面暫時吸飽水，恢復原本的彈性與黏性。擦完後，球拍摸起來會變得「黏踢踢」的，這樣打球時才能更好地摩擦乒乓球，打出強力的旋轉球！

四、 實驗誤差與變因控制討論

在**實驗三**中，初期使用輕量桌球導致數據飽和（皆為 5° ），這反映了垂直壓在球拍上的力對靜摩擦力測量的關鍵性。改用 10g 砝碼後，正壓力增加，使得膠皮的形變足以克服部分粉塵的阻礙，進而顯現出不同結構間的差異。這提示了在未來研究中，模擬擊球時的高壓環境（High Impact Pressure）將比靜態測試更能反應真實球感。

柒、結論與建議

一、 研究結論

本研究透過量化實驗得出以下核心結論：

- (一) **汗水非即時致命傷**：模擬汗水在短期內對擊球落點的干擾未達顯著水準，主因在於選手的動態調節能力。
- (二) **灰塵為性能衰減主因**：環境微塵會迅速填補膠皮孔隙，形成潤滑層，其中以平面膠皮受到的摩擦力損失最為嚴重。
- (三) **哈氣法具備科學實證**：實驗證實，「哈氣後擦拭」並非迷信，其恢復摩擦力的效率與「水擦法」近乎對等（恢復率達 98% 以上），且具備即時性與乾燥迅速之優勢。
- (三) **結構決定抗污性**：長顆粒膠皮因接觸幾何特性，在灰塵環境下的性能穩定度優於短顆粒與平面膠皮。

二、 實戰建議與應用

- (一) **賽中維護策略**：建議球員在分秒必爭的比賽間隙，應優先採用「哈氣清潔法」。此法能利用呼氣中的冷凝水有效帶走球台上的粉塵，而不致像直接噴水那樣導致球拍過濕。
- (二) **器材選用參考**：在環境清潔度較差（如非專用體育館）的場地比賽時，平面膠皮使用者應提高擦拭頻率；或考慮使用抗污性較佳的顆粒狀膠皮以維持性能穩定。
- (三) **經濟保養方案**：對於學生運動員，昂貴的專業清潔劑可用「純水濕擦」代替，但在比賽當下的即時恢復，「哈氣」是最具經濟效益且符合科學原理的選擇。

三、 未來研究方向

本研究目前聚焦於常溫下的物理變化，未來可進一步探討以下議題：

- (一) **不同布料的差別**：下次可以試試看用「純棉衣服」、「毛巾」或「專業纖維布」擦球拍，哪一種效果最好？
- (二) **旋轉力的挑戰**：我們可以觀察「哈氣後」的球拍，發出的旋轉球是不是真的比「沒哈氣」的多轉幾圈？
- (三) **不同溫度的影響**：在冬天和夏天哈氣，效果會不會因為天氣冷熱而變得不一樣呢？

四、 結語：

桌球場上的「哈氣」動作，常被視為一種儀式感或習慣。透過本次科學實證，我們證明了這是一個極具物理深度、符合流體力學與表面物理的「聰明策略」。這不僅解開了我們最初的好奇，更為競技體育中的球具維護提供了堅實的數據支持。

捌、參考文獻資料

- 南一書局（2025）。*國民小學自然科學第十冊（五下）*。臺南市：南一書局。
- 康軒文教機構（2025）。*國民小學自然科學第十冊（五下）*。新北市：康軒文教。
- 翰林出版（2025）。*國民小學自然科學第十冊（五下）*。臺南市：翰林出版。
- 教育部（2023）。*高級中等學校選修物理二：力學一*。臺北市：教育部。
- YouTube（2017年10月25日）。【桌球狂】如何自己保養清潔球拍?!。取自
<https://www.youtube.com/watch?v=I2mFQcingFU>