

網球拍拍柄材質之振動阻尼比研究

陳帝佑、洪得明 國立體育學院
劉 宇 中國文化大學
陳重佑、黃長福 國立臺灣師範大學

摘 要

本研究的主要目的在探討不同網球拍拍柄結構之振動特性。實驗中使用五種不同材質的網球拍，分別為 100% 碳纖維、100% 玻璃纖維及碳纖維和玻璃纖維比為 7 : 3、5 : 5、3 : 7 之網球拍為主要測試的對象，五支網球拍的重量、網壓、勁度、平衡點和拍喉位置前的條件都在相同控制下，進行網球撞擊的振動測試和控球能力測試。振動測試主要是以 BioPAC 的訊號處理系統和一個 Kistler (20g)、一個 BioPAC (50g) 的加速規進行數據的採集，採樣頻率為 2000Hz，網球的撞擊速度均固定為 4.09m/s。

實驗結果發現 100% 碳纖維網球拍在中心撞擊與偏心撞擊時，其振動之第一模態皆有較高的阻尼比 ($p < .05$)。阻尼比隨著網球拍握柄的玻璃纖維含量的增多而有明顯降低的情形。所以，當相同之撞擊力傳遞經過 100% 碳纖維球拍時，會因其阻尼比較大的緣故，而對傳遞來的振動力有較佳的阻振效果，並減少了振動的趨穩時間，因此，給予握拍手有較少的負荷。

關鍵詞：網球拍、阻尼比、振動、複合材料

壹、緒 論

一、問題背景

伴隨著科技的進步與運動科學的快速發展，網球拍本體使用的材質從早期的木製、鋁合金製等材料，一直發展到今日人工合成之複合材料的蓬勃應用，也形成了目前網球

拍琳琅滿目的光景；人工合成之複合材料會如此的受到青睞，其理由不外乎是材料本身具有質地輕、高彈性、高強度等優點，這皆是天然複合素材所達不到的物性。網球拍對網球之需要，不外乎是使人能藉此來獲得最佳的擊球狀態；所以，運動員爲了通過球拍與來球產生心靈和技術的契合，網球拍的材質與結構設計問題就變得越來越重要。

因此，隨網球拍材料的多樣化，球拍的設計發展就明顯的往質輕精緻以及低振動響應……等方向著手改良。由於球拍框是網球拍最基本的架構，亦是網球拍功能的基礎，而 Baker 和 Wilson (1978) 認爲網球拍有三種性質會影響擊球的結果，這三種性質分別爲網線材質的種類、網線的張力及網球拍框的彈性。所以，Elliott (1982) 研究指出球拍框的大小、形狀及質料會影響擊球後之球速和球的旋轉度；而 Groppe、Shin、Thomas 和 Welk 等人 (1987) 採用不同張力、織型及材質的球線，指出其對擊球與球拍框間有相當大的影響。

對於球拍的勁度而言，林寶城 (1997) 從網球拍振動模態的觀點，發現勁度越大的球拍框，越有利於擊球的反彈球速，而網線與拍框間阻振設備的使用，可以阻隔部份因碰撞引起的振動力量，使得傳遞至拍柄之振動減少，進而相對地降低持拍手臂的負荷。由 Brody (1979) 的研究顯示，勁度高的網球拍比勁度低的網球拍產生的球速要高的主要機制爲勁度高的球拍在變形之際，球之能量損失較少，故自勁度高的球拍反彈回來的速度便會較高；而勁度低的球拍，會失去很多的能量，而這些能量不會再傳回到球上。日來，蘇榮立 (1996) 從網球拍的勁度、網線的張力與控球、擊球後的球速進一步研究，發現勁度高和磅數高的球拍在控球上及球速上，會比勁度低和磅數低的球拍有助於控球及球速的表現。

依據上述的研究，網球拍材質的使用，確切地影響其控球、回擊球速與人體負荷的種種問題。種類繁多的人工合成複合材料中，如：玻璃纖維、碳纖維、硼纖維和醃胺纖維…等，由於玻璃纖維的價格最爲便宜，而碳纖維兼具重量輕、强度高及剛度強的優越特性 (Smith, 1994)，因此，玻璃纖維和碳纖維二者是目前業界最常混合使用來製造網球拍的人工合成複材。可是，此二種人工複材的最佳合成比例，往往是製造業者莫衷一是的問題所在。

從許多研究文獻的回顧中，我們得以瞭解，以往大部分的研究多偏向於球拍勁度與反彈球速的研究。而對於球拍振動與材質的物理特性和比例之研究，則相當少見。事實上，網球拍的材質種類和比例對球拍的勁度與振動有很大的關係 (Elliott, 1982)；因複合材料中纖維的種類和比例有所不同，其纖維的強度、密度及彈性模數也不盡相同，其構成網球拍結構體的變化也就不同，故其引起振動的大小也就有所差異。由振動力學原理中可知，影響系統振動之主要因素之一乃系統之振動阻尼比 (damping ratio)，因爲振動波之大小程度，取決於振動波之趨穩時間、振幅等，因此當一振動波傳遞經過有阻尼之系統時，此振動波會受系統之阻滯效應的影響，而削弱了振動波之振動程度。所以，以不同材質的網球拍之振動阻尼比，探討其造成振動的變化，實具有重要的意義。

二、研究目的

本研究的主要目的是以人工合成複合材料的物理特性為基礎，經由振動的實驗分析，探討不同材質網球拍間的振動特徵與差異。

三、名詞解釋與操作性定義

- (一)不同材質 (Different material)：指構成結構體強化材之不同纖維材質。
- (二)快速傅立葉轉換 (Fast Fourier Transform, FFT)：任一個正弦波或餘弦波皆是一個單一的信號，而其他任何類型的波都是由若干個正弦波或餘弦波組合而成的。而頻譜圖所代表的函數，乃是由頻率成份所組成的，圖的縱座標是各頻率成份的振幅或能量、橫座標是為頻率，如此將信號由時間域轉為頻率域的方式就叫做「快速傅立葉轉換」。(Enoka, 1994; Winter & Patla, 1997；封根泉，1990)
- (三)阻尼比 (Damping ratio)：對於一個有阻尼的振動系統而言，系統實際的阻尼係數與臨界阻尼係數 (critical damping coefficient) 的比值，稱之為「阻尼比」(Marion & Thornton, 1995)。阻尼比反映了結構體之真正阻尼。

貳、研究方法與步驟

一、研究對象

本研究採用 GAMMA 牌 TRADITION 系列之中拍面網球拍的框形，各附以五種不同的材質，即 100% 碳纖維、100% 玻璃纖維、碳纖與玻纖比 7：3、5：5、3：7 等共五種。且每支球拍皆穿上 DUNLOP 牌之專用拍線，並控制其網線張力皆為 60lb，球拍總重 305g、平衡點距拍柄端 339mm，球拍勁度值 60（以 BABOLAT 網球拍測試機測得）。

二、實驗儀器與工具

1. Kistler 加速規 (Accelerometers) 1 個 ($\pm 20g$)。
2. BIOPAC 加速規 (Accelerometers) 1 個 ($\pm 50g$)。
3. BIOPAC System 公司的 Acqknowledge Version 3.2.6 分析軟體。
4. 586 電腦一部。
5. 固定鉗鉗器。
6. 全新 DUNLOP 牌網球一箱。
7. BABOLAT 網球拍測試機一台。
8. 水平儀一個。

三、實驗時間與地點

- (一)本研究的實驗時間於民國八十六年十二月至八十七年五月，球拍材質的測試包含二次預備測試和一次正式測試。
- (二)實驗地點於國立台灣師範大學分部體育研究所之運動生物力學實驗室。

四、實驗步驟

將測試的網球拍之拍柄端以鉗夾固定，並以水平儀調整球拍，使球拍面 (face) 與地面呈水平，再將網球固定器置於球拍上方 85.2cm 處，使其靜止而自由落下，分別正面撞擊至球拍面的中心標明處 (中心撞擊，center impact) 及中心之外的標明處 (偏心撞擊，off-center impact)。網球撞擊到球拍的速度，根據自由落體公式的計算，約為 4.09m/s。

加速規一個固定於球拍拍喉 (throat) 的最下端 (A 點)，另一個則固定在加速規 A 下方 8.5cm 之握柄 (grip) 處 (B 點)，且此二點皆非節點。每支球拍均收集網球正確擊中網球拍之標明處的資料 5 次，BioPAC 的採樣頻率 (Sample Rate) 定為 2000Hz。實驗儀器的架設與場地的佈置，如圖 1。

五、振動力學之自然對數衰減方程

系統在運動中或多或少總是承受了外界阻滯力量的作用，例如摩擦力、空氣阻力……等，本研究所要探討網球拍之振動，即屬於有阻尼的自由振動，因此本研究以有阻尼的自由振動系統之自然對數衰減方程，求出網球拍振動之第一模態的阻尼比。

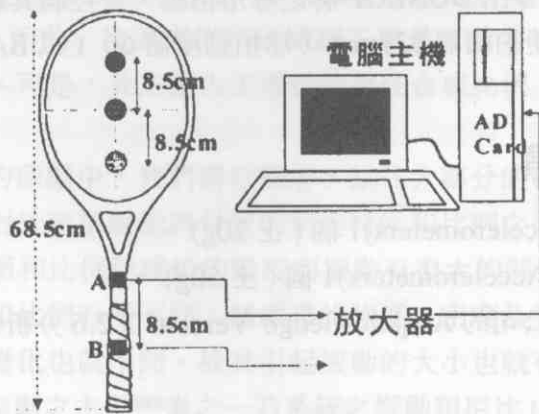


圖 1 實驗儀器連線圖。加速規的固定位置為 A 點、B 點，球拍面的圓圈為網球正面撞擊的位置。

此式即為自然對數衰減方程：

$$\ln \left(\frac{X_m}{X_{m+k}} \right) = k \cdot \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}$$

ζ ：阻尼比

X_m 、 X_{m+k} ：兩個時刻之振幅

k ：兩個振幅相差之週期數

因此，在低阻尼的自由振動系統，藉由 k 個週期的連續振幅比值，便可以求出系統之阻尼比，以進一步瞭解系統運動的情形。所以透過加速規收集到網球拍之振動曲線，再利用曲線之參數，便可求出網球拍振動之第一模態的阻尼比，進而瞭解其運動情形與物理特性。

六、資料處理

每一次撞擊的實驗資料，都需經過 BioPAC 3.6.2 版的軟體分析處理。其處理的過程在修勻 (filtering) 方面，我們先將原始資料 (raw data) 進行快速傅立葉轉換成頻率域之資料，而得知此五種球拍之第一自然頻率介於 140 至 150Hz，此與其他學者 (Brody, 1995) 所提出網球拍振動之第一自然頻率介於 100 至 200Hz 間相吻合，因此推論實驗採集的原點數據雜訊包含了 100Hz 的低頻範圍和 250Hz 的高頻範圍 (Winter & Patla, 1997)。

所以，收集到的原始資料都需先經過高通濾波 (high pass filtering) 的修勻處理，截止頻率 (cutoff frequency) 設定為 100Hz；再經過低通濾波 (low pass filtering) 的修勻處理，截止頻率 (cutoff frequency) 設定為 250Hz；轉換使用的窗 (window) 均採用 Hamming 法。

本研究以單因子變異數分析 (one-way ANOVA)，考驗不同材質網球拍在網球拍拍喉與拍柄位置的振動特性有否差異存在。當變異數分析達 哈 .05 的顯著水準時，即以薛費氏法 (Scheffe's Method) 進行事後比較 (Kirk, 1995)。統計的軟體以 SAS 6.11 版計算之。

參、結果與討論

五種不同材質的網球拍，經球速 4.09m/s 的網球中心和偏心正向撞擊處理後，所得的資料以低阻尼自由振動系統的對數衰減 (logarithmic decrement) 方程式計算網球拍振動之第一模態的阻尼比，其結果分為二個部份說明：一、不同材質網球拍拍喉位置的振動特性；二、不同材質網球拍的阻尼比。

一、不同材質網球拍拍喉位置的振動特性

由於本研究的測試球拍主要是改變拍柄的複合材料比例，觀察拍柄的振動特性。因此，網球拍的製造除了控制拍柄部位的複合材料比例外，每一支測試拍的長度、重量、勁度、平衡點位置、拍型……等的變異也都調整成一致。當然，對於不同網球拍間的整體材質結構而言，只有拍柄的材質結構不一樣，其餘的部份（拍柄至拍面間），都是由100%的碳纖維所構成。是故，本研究假設在拍喉位置之振動特徵，在不同材質網球拍間應沒有顯著的差異。本研究的第二次預備測試中，拍喉位置乃使用50g的加速規收集其中心和偏心撞擊時的振動情形，其結果如下說明。

表1 五種球拍在中心、球拍上端和下端之偏心撞擊時，拍喉位置的阻尼比
平均值和標準差

球拍種類 撞擊位置	100%碳	70%碳	50%碳	30%碳	0%碳
中心撞擊 n=5	0.055 (0.007)	0.061 (0.004)	0.057 (0.005)	0.063 (0.008)	0.059 (0.005)
上端撞擊 n=5	0.062 (0.006)	0.060 (0.004)	0.058 (0.007)	0.059 (0.007)	0.060 (0.009)
下端撞擊 n=5	0.045 (0.004)	0.045 (0.008)	0.043 (0.006)	0.042 (0.005)	0.041 (0.008)

()：標準差

表1為實驗測試的五支球拍之中心撞擊和拍面上端與下端偏心撞擊的阻尼比，表中的結果顯示中心撞擊、拍面上端與下端之偏心撞擊，對於五種不同材質的網球拍之間，並未達到顯著的差異($p>.05$)，而下端偏心撞擊的阻尼比在不同材質網球拍間有著小於中心撞擊和上端偏心撞擊的趨勢。

由上述阻尼比的分析，顯示實驗研究的每一支網球拍在拍柄之前的結構差異很小，也就是一致性很高。因此，對於網球拍拍喉位置的振動現象以計算其阻尼比，也證實了本研究立足於整個球拍，除了拍柄的材質組成比例不同外，球拍其餘部份的組成頗為接近之假設，亦說明了研究之測試球拍不變的變因控制處理有其相當高之可靠性。

二、不同材質網球拍的阻尼比

五種不同材質的網球拍以網球正向撞擊測試後，透過拍柄位置之加速規所擷取到的資料，經計算其阻尼比，在中心、球拍上端和下端之偏心撞擊時，拍柄位置的阻尼比結果如表2。由於表中顯示不同的撞擊位置對五種球拍的阻尼比來說都有顯著差異($p<.05$)，因此，再以Scheffe法進行事後比較，其結果如表3、表4、表5。

表2 五種球拍在中心、球拍上端和下端之偏心撞擊時，拍柄位置的阻尼比平均值和標準差

球拍種類 撞擊位置	100%碳	70%碳	50%碳	30%碳	0%碳
中心撞擊 n=5	0.070 (0.001)	0.057 (0.001)	0.065 (0.002)	0.063 (0.003)	0.047 (0.002)
上端撞擊 n=5	0.098 (0.004)	0.070 (0.003)	0.053 (0.001)	0.047 (0.001)	0.053 (0.002)
下端撞擊 n=5	0.102 (0.003)	0.065 (0.004)	0.051 (0.001)	0.052 (0.002)	0.044 (0.003)

() : 標準差

表3 中心撞擊的阻尼比事後比較分析摘要表

球拍種類	100%碳	70%碳	50%碳	30%碳	0%碳
100%碳	—	*	*	*	*
70%碳		—	*	*	*
50%碳			—		*
30%碳				—	*
0%碳					—

*p<.05

表4 球拍上端撞擊的阻尼比事後比較分析摘要表

球拍種類	100%碳	70%碳	50%碳	30%碳	0%碳
100%碳	—	*	*	*	*
70%碳		—	*	*	*
50%碳			—		
30%碳				—	
0%碳					—

*p<.05

表5 球拍下端撞擊的阻尼比事後比較分析摘要表

球拍種類	100%碳	70%碳	50%碳	30%碳	0%碳
100%碳	—	*	*	*	*
70%碳		—	*	*	*
50%碳			—		*
30%碳				—	*
0%碳					—

*p<.05

由表 2、表 3、表 4、表 5 的結果顯示，100% 碳纖維球拍在中心撞擊和二個位置的偏心撞擊之阻尼比，都顯著的高於另外四種不同材質結構的網球拍。而未含碳纖維之純玻璃纖維球拍，在中心撞擊和球拍下端的偏心撞擊之阻尼比顯著的小於另外四種不同材質結構的網球拍；在球拍上端偏心撞擊的處理時，純玻璃纖維網球拍的阻尼比只有較純碳纖維和含 70% 的碳纖維網球拍小。整體而言，網球撞擊網球拍的中心、上端和下端時，其阻尼比都有隨著碳纖維含量的百分比降低而下降的趨勢（圖 3）。此外，總合統計分析的結果和圖 3 的趨向，我們發現玻璃纖維的含量超過 50% 以後，其阻尼比下降的趨勢較碳纖維含量多時的趨勢緩和，也就是說，網球拍的拍柄玻璃纖維含量在 50% 以上後，碳纖維的含量多寡似乎影響不了其振動型態大幅偏向於玻璃纖維的形式，其原因需從纖維材料組成比例的撓屈度 (flexure) 觀點，進一步深入探討。

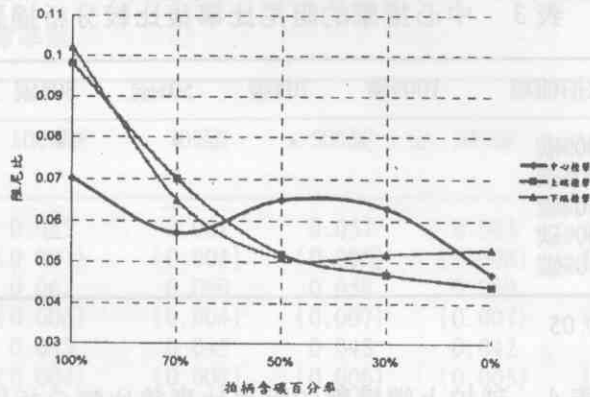


圖 3 五種材質的網球拍，在中心撞擊、拍面上端與下端之偏心撞擊時的阻尼比曲線圖

由上述阻尼比的分析可知，100% 碳纖維球拍在中心與偏心撞擊上，因有較高之阻尼比，所以當相同之振動力傳遞經過拍柄時，100% 碳纖維球拍相較於其他材質比例的球拍來說，對該振動力具有最佳之阻振效果，也因此推論其給予握拍的手有較小之負荷。

肆、結 論

從實驗的結果顯示 100% 碳纖維網球拍，無論中心或偏心撞擊時，拍柄位置皆有最大之阻尼比，而阻尼比有隨著網球拍含碳比例的減少而逐漸降低的現象（圖 3）。所以，當相同之撞擊力傳遞經過 100% 碳纖維球拍時，會因其阻尼比較大的緣故，而對傳遞來的振動力有較佳的阻振效果，並減少了振動的趨穩時間，因此，給予握拍手有較小的負荷。相反地，由於玻璃纖維的成份逐漸增加的影響，使得阻尼比漸趨減小，而大幅削減了阻振的能力。

此外，在阻尼比的研究中，我們也發現玻璃纖維的含量超過 50% 以後，其阻尼比下降的趨勢較碳纖維含量多時的趨勢緩和。也就是說，網球拍的拍柄玻璃纖維含量在 50%

以上後，碳纖維的含量多寡似乎影響不了其振動型態大幅偏向於玻璃纖維的形式。

所以，在一場漫長的網球比賽中，運動員每一次的揮拍，皆需面對強大之撞擊力作用，尤其在現代強力網球盛行之風格的運動形式下，網球拍振動給予手臂之負荷就可想而知了。因此，了解球拍之阻振能力，進而能減少手臂之負荷，對於增加運動表現、降低運動傷害可能造成的因素，確實成為了今日運動科學的工作重點。

引用文獻

- 林寶城 (1997)：網球拍振動特性分析。國立台灣師範大學博士論文。
- 封根泉 (1990)：心腦電圖電子計算機分析的原理和應用。北京：科學出版社。pp.89-175。
- 麥吉誠 (1992)：網球演進史。網球報導雜誌，81，59-61。
- 蘇榮立 (1996)：球拍勁度與網線張力對網球拍恢復係數及發球表現之影響。國立體育學院碩士論文。
- Baker, J., & Wilson, B. (1978). The effect of tennis racket stiffness and string tension on ball velocity after impact. Research Quarterly for Exercise and Sport, 49 (3), 255-259.
- Baker, J., & Putnam, C.A. (1979). Tennis racket and ball responses during impact under clamped and freestanding conditions. Research Quarterly for Exercise and Sport, 50 (2), 164-170.
- Brody, H. (1979). Physics of the tennis racket. American Journal of Physics, 47 (6), 482-487.
- Brody, H. (1987). Models of tennis racket impact. International Journal of Sports Biomechanics, 3, 293-296.
- Brody, H. (1995). How would a physicist design a tennis racket. Physics Today, March, 1995, 26-31.
- Elliott, B. (1982a). The influence of tennis racket flexibility and string tension on rebound velocity following a dynamic impact. Research Quarterly for Exercise and Sport, 53 (4), 277-281.
- Elliott, B. (1982b). Tennis: the influence of grip tightness on reaction impulse and rebound velocity. Medicine and Science in Sports and Exercise, 14, 348-352.
- Enoka, R.M. (1994). Neuromechanical Basis of Kinesiology (2nd ed.). IL: Human Kinetics. pp. 372-376.
- Groppel, J.L., Shin, I.S., Thomas, J.A. & Welk, G.J. (1987). The effects of string type and tension on impact in midsize and oversize tennis racket. International Journal of Sport Biomechanics, 3, 40-46.
- Kirk, R.E. (1995). Experimental Design: Procedures for the Behavioral Sciences (3rd ed.). NY: Brooks/Cole. pp.154-159.
- Marion, J.B. & Thornton, S.T. (1995). Classical Dynamics of Particles and Systems (4th ed.). NY: Saunders College. pp.107-148.
- Smith, W.F. (1994). Foundations of Materials Science and Engineering (2nd ed.). N.Y.: McGraw-Hill Inc.
- Winter, D.A. & Patla, A.E. (1997). Signal Processing and Linear Systems for the Movement Sciences. Canada: Waterloo Biomechanics. pp.24-66.

投稿日期：87年6月

審稿日期：87年6月

接受日期：87年9月

The Study of Vibrational Damping Ratio of Differential Tennis Racket Grip Materials

¹Ti-Yu Chen, ¹Der-Ming Hong, ²Yu Liu,

³Chung-Yu Chen, & ³Chenfu Huang

¹Nation College of Physical Education and Sports

²Chinese Culture University

³Nation Taiwan Normal University

ABSTRACT

The purpose of the study was to analyze the vibration of differential tennis racket grip materials. Five different kinds of tennis racket grip, their materials were composed by mixing carbon fiber and glass fiber in the ratio of 10 to 0, 7 to 3, 5 to 5, 3 to 7, and 0 to 10, were used in this study. All of them had the same weight, string tension, stiffness and balance. The experiments of the study were to test their vibration and to find damping ratio.

Two accelerometers (2000 Hz) and BioPAC system were used to acquire the vibrational signals. The impact of tennis ball was set in the velocity of 4.09 m/s. The selected variables in the experiments were tested by one-way ANOVA at = .05 significant level.

The results of this study indicated that the pure carbon racket made racket had a higher damping ratio on the center and off-center impact. The damping ratio was significant decreased as the content of glass fiber in the racket was getting increased. Therefore, base on the vibrational analysis among the differential material composition of tennis rackets, it concluded that by increasing the content of glass fiber in the racket, it would be increasing the load in the tennis player's arm. Then, indirectly, this phenomenon might affect the athlete's performance.

Key words: racket, damping ratio, vibration, composite material