

網球拍之擊球特性探討

陳帝佑 國立彰化師範大學
林振益 國立彰化師範大學
張家昌 國立彰化師範大學
江勤彥 國立彰化師範大學

壹、緒論

近半個世紀以來，人類在運動領域的成就是大家有目共睹的，這些成就歸功於運動與科技的緊密結合，其中包括訓練方法的改進、運動科技研究以及運動器材功能的提昇與創新等等，造就了如此非凡的成果。在使用運動器材之運動項目中，運動器材的功能性即成為影響運動表現優劣的一大關鍵，而網球運動即是必須藉助運動器材的運動；在眾多網球相關的器材因素中，由於網球拍為聯繫運動選手與球之間的首要工具，因此網球拍乃是所有網球裝備中最重要的一環。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，所以運動員為了藉由球拍與來球產生心靈和技術的契合，是故網球拍之擊球特性問題就變得越來越重要。

貳、網球拍結構體之物性對擊球反應的影響

網球拍材質的演進，由早期的天然木製網球拍到現今的人工合成複合材質網球拍，其間重大之轉變在於球拍勁度 (stiffness) 和重量的變化。Brody (1995) 指出，球拍框的設計是網球拍最基本的架構，它所代表的是網球拍功能的基礎，因此呈現出不同的擊球效果；諸如網球拍面和拍框橫斷面的幾何形狀、球拍的勁度及球拍的質心和重量等，皆會影響網球拍的擊球特性。而 Groppe (1992) 認為網球拍勁度的增加，對網球比賽的型態和打法起了革命性的轉變；由於球拍勁度的提高，使得球與球拍接觸過程中，減少了總機械能的損耗，所以球能獲得更多的能量以轉換成動能，因此增加了反彈球速，進而加快比賽之來回球的節奏，間接使運動員改變了打法與戰術。

早期 Baker 和 Wilson (1978) 探討網球拍勁度和網線張力對反彈球速的影響，經由實驗發現，網球拍勁度和網線張力間有顯著的交互作用，在當時以中勁度和低勁度的球拍，穿以 50 磅之網線張力時，網球具有較高之反彈係數，但高勁度的球拍受網線張力的影響並不明顯；換言之，網球拍結構體受網球撞擊力的作用後，球拍結構體形變量較小者比形變量較大者具有較高之反彈球速。次年，Brody (1979) 亦在其研究中指出，高勁

度的球拍在與球碰撞之際，球拍框因變形較小，所以能量損失較少，因而球有較大之回復係數，反之，低勁度的網球拍其回復係數較小。由 Brody 與 Baker 等人的研究結果發現，他們對網球拍勁度與反彈球速間的觀點，有許多異曲同工之妙。

網球拍的發展到了 80 年代以後，進入了嶄新的紀元。此時，研究網球拍之文獻相繼出爐；Elliott (1982a) 採用六種木質球拍，以探討球拍勁度與反彈球速的關係，在其研究中，將這六支球拍分成低勁度、中勁度與高勁度等三種不同勁度等級的球拍，結果發現高勁度的網球拍，在網線張力由 55 磅增至 75 磅時，網球之回復係數並沒有顯著差異，而中和低勁度的球拍在網線張力 55 磅時，球具有較高之回復係數。接著 Missavage 和 Baker (1984) 以高速攝影方式，從實驗中有了量化的發現，即增加球拍之勁度，使得球碰撞前後之球速比值從 0.36 增加至 0.42，顯著地增加了 17%。隨後，Groppe (1987) 開始選用人工合成之玻璃纖維、碳纖維和硼纖維等高剛性的複合材質網球拍作為實驗對象，發現網球拍之勁度因受這些補強材的影響，進而增加了球拍結構體之勁度；然而，他對於鋁質球拍的見解就不盡相同了，其認為鋁質球拍的勁度，取決於拍型結構的設計，與材料並沒有關係；不過，對於鋁質球拍框橫斷面的因素並未考量，因此關於這個論點的真實性，仍有相當大的爭議。

近幾年來，Hatze (1993)、Goodwill 和 Haake (2000) 與 Cross (2000) 更進一步從能量的觀點，以解釋網球拍之勁度和能量損耗的關係，藉由導出球拍和球作用系統的能量平衡數學模式得知，網線方面所消耗的能量只佔總能量損耗的極少部分，而主要能量損耗是因球與球拍接觸過程中，球拍框結構體的變形所造成的。由 Hatze、Cross 與 Goodwill 等人的觀點，其結論可與先前幾位學者之研究相呼應，他們共同的論點皆認為勁度較高的網球拍在與球碰撞的過程中，球拍框之形變量比勁度低的球拍少，再透過他們推導出的能量平衡數學模式看來，由於勁度高的球拍形變量較少，所以有較少的機械能損失，因而提供給反彈球較多的能量以轉換成動能，故反彈球有較高之回復係數；相反的，勁度低的網球拍，在與球碰撞的過程中，球拍框結構體內部損耗了較多的機械能。

長期從事網球相關研究的學者 Brody (1995) 指出，球與球拍在接觸時期，網線扮演類似彈簧的角色，網線所消耗的能量極少，僅佔總能量損耗的 5%~7% 左右，因此高勁度的球拍在附以高磅數之網線張力時，整個網線表面之形變量減少了，因而網線儲存了較少之彈性能，故施予球的

總機械能減少，也就降低了反彈球之球速；然而從控球觀點來說，高磅數的網線則有利於控球表現；至於網線斷面的粗細，則因較細的網線有較低之彈性模數，可使網線面有較大之形變量，因而能儲存較多之彈性位能，而給予反彈球較高之球速。國內學者蘇榮立（1996）探討不同勁度網球拍與不同網線張力的組合對網球之回復係數、控球及球速的影響，實驗中採用勁度為 50、55、60、70 單位之四種網球拍，並搭配 40、50、60 和 70 磅之網線張力，結果呈現出球拍勁度和網線張力間的關係，即勁度高和磅數高的網球拍在球速及控球上，會比勁度低和磅數低的網球拍，有助於控球及球速的表現。

從 Brody 的說法對照蘇榮立的研究結果，可彙整出球拍勁度與網線張力間的關係，亦即問題的癥結主要還是回歸在球拍框結構體上，相較之下，網線部分所能影響擊球效果儘是極少部分。

參、緊握球拍的程度對擊球之影響

由於人體輸出的能量是藉由前臂傳輸至球拍，再經由碰撞將能量轉換成球之動能；有基於此，手掌是唯一聯繫人體動作與網球拍之間的首要橋樑，所以手掌緊握球拍柄的程度，左右著網球拍之擊球表現。早期 Baker 和 Putnam（1979）藉由球拍和球之碰撞情形，進而瞭解緊握球拍程度對碰撞後反彈球速的影響；在其實驗中，使用兩種方式來固定網球拍，即固定鉗夾方式和球拍握把端自由站立方式來進行網球撞擊測試，實驗結果發現，以固定鉗夾和球拍握把端自由站立兩種方式，球拍面中心與球碰撞的過程中，球拍給予球之衝量皆相同，所以撞擊後的反彈球速並無顯著差異。在同一時期，Brody（1979）的研究結果也指出，水平緊握和自由站立二種方式的網球拍在與球碰撞後，球之回復係數並無顯著的差異。至此，可以看出，緊握球拍的程度並沒有影響反彈球速。

爾後，Elliott（1982b）以六種傳統木質的網球拍，研究緊握球拍的結果是否會對反彈球速造成影響。經實驗發現，當網球撞擊在球拍面甜區（sweet spot）時，緊握球拍的結果並沒有增加反彈球速，但是當網球撞擊在球拍面甜區以外時，增加緊握球拍的程度，可加快反彈球之速度。此結果與先前 Baker 等人的結論不盡相同，究其主要的原由乃是在早期的研究中，僅針對網球拍拍面的甜區做撞擊，對於非甜區的部份，並沒有多加考量，所以才下了如此片面的結論，然而在一般網球運動過程中，打到非甜區的狀況是經常發生的，而是否緊握球拍的結果，不僅影響該次擊球的

效果，更將連帶影響到接連幾次擊球的結果，以決勝負之關鍵。

由此可見，過度地緊握球拍對打擊力量沒有絕對性的幫助，過度握緊球拍的目的，僅是藉以固定住球拍，以便將身體能量有效率地傳輸至球拍（GroppeI, 1992），要增加擊球之球速，仍需透過身體各肢段之動作來配合，以達成完整之動力鏈，不僅僅是增加緊握球拍的程度而已。

肆、網球拍振動反應對運動表現之影響

網球拍的振動現象是最直接影響手握球拍的感受與舒適度的評比；網球撞擊球拍面所引起球拍結構體之振動能量多由持拍的手臂來吸收，因此網球拍的振動程度也就關係到手臂的負荷，進而影響到擊球的表現。研究網球拍之振動反應的文獻中，Elliott、Blanksby 和 Ellis（1980）針對傳統小拍面球拍與大拍面球拍的振動特性與反彈球速做比較，研究結果顯示，大拍面球拍對振動的反應比傳統小拍面的球拍小，其主要原因是大拍面球拍之有效打擊區顯著大於傳統小拍面球拍，因此平均反彈球速也較快。

爾後 Elliott（1982）進一步研究發現，緊握球拍會增加球與球拍碰撞所造成持拍手臂之振動反應，且網球拍的振動反應會因球之撞擊點位置的不同而有所改變，當球撞擊在拍面的甜區（sweet spot）時，球拍的振動反應最小，而當球碰撞在甜區之外的位置時，便會使球拍的振動反應大幅增加，且球的回復係數也減小了。此結論與張世聰和相子元（1998）研究網球正、反拍擊球振動對手臂之影響有相同的看法。從 Elliott 等人的研究可歸納出大拍面的網球拍，因拍面的有效打擊區比小拍面的球拍大，因而與球碰撞時，造成球拍之振動反應較小，然而過度緊握球拍的結果，只會增加持拍手臂之振動程度，並因此增加手臂的負荷，進而使運動員疲勞提早產生甚或傷害的發生。

接著 Brody（1987）分析網球拍之振動模式，在實驗中他採用固定鉗夾以及任其平衡站立的方式來固定球拍，以量測球拍受撞擊後之振動反應，結果用鉗夾固定的網球拍之振動頻率較低，分佈在 25~40Hz，所以有較大之振幅，而平衡站立的球拍之振動頻率高達 100~175Hz，雖然反應出不同之振動頻率，然而兩者有類似之振動模式。由 Hatze（1993）的研究可發現其結論與 Elliott 等人先前的研究相呼應，即網球拍振動反應的程度，間接地影響了回擊球之反彈速度；換言之，球拍框內部的振動反應吸收了部分球給球拍之動量與人體揮拍動作所輸出的能量，因此振動較小的球拍僅流失少部分的力學能，所以會給予球較快的反彈速度。

近來，林寶城（1997）研究網球拍之振動特性，並從網球拍結構振動的觀點，探討網球拍本身之固有振動模態，其研究結果指出，網球拍穿線以後，整體的固有頻率相對地降低；以網球拍的整體設計，如果僅針對擊球的反彈球速而言，球拍的勁度越大，越有利於擊球之反彈球速，因此網球拍振動模態之固有頻率愈高，應該愈有利於擊球反應；另一方面，在球拍面底端加裝阻振器，並無法產生有效之阻振作用，因為這種避振器所能隔絕的振動頻率是屬於高頻區的範圍，但持拍者所能感受明顯振動力之頻率屬低頻區，因此其對人體的作用效果是有限的。

Chen、Lin 和 Huang（2000）藉由改變網球拍之組成材質，分析網球拍之振動特徵與振動對控球能力的影響；在研究結果中指出，碳纖維網球拍在振動程度的表現上，不論是球拍中心或偏心撞擊，皆比玻璃纖維製成之網球拍有較佳之阻振效果，且阻尼比隨著球拍碳纖維含量的減少，有逐漸減小的趨勢，而振動波所產生的能量則會因球拍碳纖維含量的減少，有逐漸增高的趨勢；其研究中並透過控球能力之測試，以評定振動程度對控球能力的影響，結果也指出優秀選手的控球能力亦會受振動程度所影響，因此推論球拍的振動將增加持拍手臂的負荷，以致影響擊球表現，所以有必要在網球拍設計或選擇使用的網球拍中，設法減少球拍撞擊所引起持拍手臂之振動行為，來改善擊球表現，以進一步提昇運動成績。

伍、結語

總合以上的研究，網球拍結構體的特性直接影響擊球的效果，更與運動成績的提昇有很大的關係，這個結果可以從現今網球比賽型態的變化與打法、戰術的重大改變看出端倪，皆與網球拍的演化息息相關；而每位網球運動員在打法與身體素質上皆有其特殊性，因此對網球拍的選用應考量自身特點的需求，正如 Brody（1995）所說，沒有最好的網球拍，只有適合自己的網球拍。

參考文獻

一、中文部份

- 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。
- 張世聰、相子元（1998）。網球正反拍擊球振動對手臂之影響。中華民國體育學會體育學報，26，257-264。
- 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。

二、外文部份

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, 26-31.

Chen, T.Y., Chen, C.Y., Lin, D.C., & Huang, C.F. (2000). Vibration analysis of tennis racquet composite grips with ratios of carbon and glass fibres. In Y. Hong & D. P. Johns (Eds.), Proceedings of XVIII International Symposium on Biomechanics in Sports (pp.630-632). Hong Kong : The Chinese University of Hong Kong.

Cross, R. (2000). Dynamics of the collision between a tennis ball and a tennis racket. In S.J. Haake & A. Coe (Eds.), Proceedings of 1st International Congress of Tennis Science & Technology (pp.67-74). London: University of Surrey.

Elliot, B., Blanksby, B., & Ellis, R. (1980). Vibration and rebound velocity characteristics of conventional and oversized tennis rackets. Research Quarterly for Exercise and Sport, 51 (4), 608-615.

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.

Goodwill, S.R., Haake, S.J. (2000). Modelling the impact between a tennis ball and racket using rigid body dynamic. In S.J. Haake & A. Coe (Eds.), Proceedings of 1st International Congress of Tennis Science & Technology (pp.49-56). London: University of Surrey.

Groppe, 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.

Groppe, J.L. (1992). High Tech Tennis (2nd ed.): Champaign, IL: Leisure Press Inc. pp.15-27.

Hatze, H. (1993). The relationship between the coefficient of restitution and energy losses in tennis rackets. Journal of Applied Biomechanics, 9, 124-142.

Missavage, R., Baker, J., & Putnam, C. (1984). Theoretical modeling of grip firmness during ball-racket impact. Research Quarterly for Exercise and Sport, 55(3), 254-260.