

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

EVA 發泡鞋墊能量回傳性能測試分析

A Study of Energy Return Effects of EVA Foamed Shoesoles

計畫編號：NSC 89-2212-E-034-007

執行期間：89 年 8 月 1 日至 90 年 7 月 31 日

主持人：陳為仁 私立中國文化大學機械工程學系

一、中文摘要

本計畫主要探討不同材質、硬度及厚度之醋酸乙烯鞋墊發泡材對其能量回傳之影響效應，針對具橡膠與不具橡膠鞋墊材質、三種硬度與三種厚度的 EVA 發泡鞋墊，使用衝擊測試法進行衝擊測試。結果顯示，具橡膠與不具橡膠之醋酸乙烯發泡鞋墊的能量回傳受材料硬度及厚度影響並不顯著，厚度及硬度之改變對能量回傳影響很小。整體而言，具橡膠之醋酸乙烯發泡鞋墊之能量回傳較不具橡膠之醋酸乙烯發泡鞋墊者為佳。由掃描式電子顯微鏡微觀結構分析，具橡膠之醋酸乙烯發泡鞋墊的氣泡大小及形狀分布亦較醋酸乙烯發泡鞋墊者來的均勻且接近球狀。此一不同材質、厚度及硬度之醋酸乙烯鞋墊材對能量回傳的影響結果，對選擇或設計運動鞋緩衝系統之衝擊性能是相當值得注意的重要因素。

關鍵詞：鞋墊發泡材、衝擊測試、能量回傳、微觀結構

Abstract

The objective of the project is focused on the assessment of the energy return effects of various EVA foamed shoesoles. An impact testing method is used to study the energy return properties of two types of sole materials with or without rubber component, three kinds of hardness and three different thickness of EVA foamed soles. The result shows that the effect of the foam thickness and hardness on the energy return is insignificant for both EVA and EVA/Rb foams. Generally, EVA/Rb foams possess better energy return properties than that of EVA foams. Scanning electron micrograph indicated that the air cell size distribution of EVA/Rb foam is more uniform than that of EVA foam, and the cells of EVA/Rb foam is approximately spherical in

cross-section. It is believed that the effect of material, hardness and thickness of EVA foam on its energy return is an important factor for selecting or designing the shoe cushioning system.

Keywords: foam, impact testing, energy return, micrograph

二、緣由與目的

運動鞋的設計，除了保護足部外尚須考慮其機能的發揮。如提昇運動員的運動表現與減少運動傷害的發生等，這些機能包括吸震性(shock absorption)、能量回傳(energy return)、穩定性(stability)與防滑性能(slip resistance)。這些功能與鞋子的鞋墊(sole) 材質及結構設計息息相關。因此鞋墊材質的選擇及結構設計與下肢運動生物力學的關係的探討，一直為近三十年來主要研究範疇[1-3]。而為瞭解鞋墊對鞋子機能的影響，設計者大都採用了實驗量測法以研究鞋墊的吸震性[4-14]、能量回傳[15,16]與防滑性能[17-20]等機械性質，並探討其對運動負載與傷害[21-24]及運動表現[25-27]的影響。尤其是運動鞋緩衝系統可否提昇運動表現的能量效率，更是常被運動研究者、運動員及鞋業者提及，而運動鞋緩衝系統的能量回傳性能更是被認為是提昇運動表現的的必要性質。

運動鞋之能量回傳係指其能量儲存及能量回復的特性，而運動鞋的彈性能量儲存及回復之主要構成在鞋墊的緩衝系統。現今運動鞋鞋墊緩衝系統使用的材料主要為具有黏彈特性的高分子聚合物，EVA(ethylene vinyl acetate copolymer)發泡聚合物自 1974 年問世後即為鞋墊常用的材料之一，尤其跑步鞋的中插(midsole)材料使用最多。EVA 鞋墊材為醋酸乙烯與乙炔聚合的發泡聚合物，藉由發泡過程[28-29]在 EVA 材內部形成許多封閉型的小氣泡。而形成一具有由氣泡壁構成之彈性元件及由氣泡內的氣壓構成之阻尼元件的黏彈性材料，由於此一具有彈性及阻尼性的黏彈特性，使得 EVA 鞋墊材

在承受衝擊負載時，具有可減少作用在足部的負荷外，以及外力移去後可快速地恢復其初始形狀的能力。因為 EVA 發泡材具有重量輕及緩衝性能佳的特性，所以被廣泛地應用各類運動鞋的鞋墊緩衝系統。因為鞋墊緩衝系統之能量回傳性能與減少運動耗氧量、延遲疲勞及提昇跑跳運動表現有關，因而研究人員及製鞋廠商皆意識到提昇運動鞋能量回傳的重要性。因此研究運動鞋良好能量回傳性能的構成要素，以及量化運動鞋能量回傳是運動鞋設計極重要的課題。歐洲與北美等學術研究機構在此一課題上已研究了數十年，反觀國內則仍處於啟蒙階段，因此本計畫即針對 EVA 發泡鞋墊對運動鞋能量回傳性能的影響進行探討。

EVA 發泡材料之黏彈性與其材質、硬度、厚度有關，而如何探討這些參數對能量回傳性能的影響，材料衝擊測試法是最常用的方法，利用一置于固定高度的金屬落錘自由落下衝擊測試的鞋子或鞋墊材，經由量測作用在落錘上的最大加速度或衝擊力、落錘的最大反彈高度及測試件的最大變形，以評估鞋材之能量回傳性能。因此本計畫針對影響運動鞋衝擊緩衝性能的 EVA 發泡鞋墊材，使用衝擊測試法進行其衝擊性能測試與分析，利用求出的衝擊性能重要參數之最大反彈高度及最大變形，來評估不同材質、厚度與硬度之 EVA 發泡材對其能量回傳的影響效應。為了有系統地測試不同鞋墊材質、硬度及厚度對其能量回傳性能的影響，計畫針對鞋墊材料為醋酸乙炔架橋發泡材 EVA，以及添加了橡膠成分(DCP 及 ENGAGE)的醋酸乙炔發泡材 EVA/Rb 兩種鞋墊發泡材進行衝擊測試，分別有三種硬度：軟質—Shore C 50、中質—Shore C 60、硬質—Shore C 70，及三種厚度：15、25 及 35 公釐；不同材質之兩種 EVA 發泡材分別計有 18 種鞋墊，同一硬度及厚度發泡材有二件，以重覆實驗方法對發泡材進行測試分析。同時，計畫中將使用掃描式電子顯微鏡(SEM)對不同材質及硬度之發泡材進行微觀結構分析，求得發泡材的氣泡大小及形狀之微觀結構，配合能量回傳測試結果，以瞭解氣泡微觀結構與能量回傳間的關係。

本計畫從衝擊測試作用在鞋墊能量變化及材料微觀結構觀點，以評估發泡材材料、厚度與硬度對其能量回傳性能的影響，可為鞋墊緩衝系統能量回傳性能設計的參考依據。咸信此一研究將有助於設計者與製鞋業者經由對材料能量回傳特性的瞭解，有效地評析且正確地選擇合適的材質，應用於運動鞋緩衝系統的設計，以得具最適化能量回傳性能的運動鞋。

三、結果與討論

本研究分別對 EVA(醋酸乙炔/乙炔發泡材)及 EVA/Rb(醋酸乙炔/乙炔/橡膠發泡材)兩類發泡材共準備了三種硬度與三種厚度，每一硬度與厚度之試片有二片，每一種試片皆為壓模製造及架橋發泡而成之發泡體，大小為 10 × 10cm，三種硬度為 Shore C 50 (軟質)、60(中質) 及 70(硬

質)；三種厚度為 15、25 及 35mm。總計每一類發泡材共十八種試片被進行衝擊測試，試片製作時首先將所需的原料如 EVA、發泡劑、架橋劑與其他成分放入混料機中，以作原料之均勻混合加工過程。接下來將混料放入製片機中進行羅拉製片，使原料平整成片狀，以利發泡時材料平整，好排氣，避免氣泡產生。然後依據硫變測試所得的條件，把試片放入模壓機在 150 kg/cm 模壓下 165 溫度加熱約 30 分鐘進行一次發泡成型，以得實驗所需的發泡材試片。各試片之成分如表一所示。

表一：EVA 發泡試片成分分配表(單位：g)

	EVA 50	EVA 60	EVA 70	EVA/ RB 50	EVA/ RB 60	EVA/ RB 70
EVA	100	100	100	75	75	70
EPDM	0	0	0	15	15	15
ENGAGE	0	0	0	10	10	15
滑石粉	10	10	10	10	10	10
鋅氧粉	1.3	1.2	1.0	1.5	1.5	1.5
硬酯酸鋅	0.8	0.75	0.6	0	0	0
硬酯酸	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
架橋劑	0.75	0.7	0.5	0.7	0.7	0.7
發泡劑	2.25	1.4	1.1	2.2	1.8	1.5

本計畫使用之衝擊測試係依據英國 SATRA 鞋業技術中心的測試方法 PM 142 來進行測試。利用重力驅動一總重 8.5 公斤、軸端為 45mm 直徑、37.5mm 弧度半圓狀撞擊頭之衝擊錘，自離測試試片表面 5 公分高處自由落下以衝擊置於測試平台的試片之中心點，經由位移變化轉換器及加速度轉換器擷取數據，求得落錘位移及落錘加速度變化兩條曲線，由測試所得之最大變形及反彈高度分析試片的能量回傳特性。

表二：不同硬度及厚度 EVA 及 EVA/Rb 發泡材能量回傳值(%)

平均±誤差	15mm	25mm	35mm
EVA50	41.19±2.31	40.45±1.77	41.05±1.83
EVA60	37.36±2.27	40.56±0.47	39.47±1.38
EVA70	35.90±1.97	38.58±1.47	39.22±1.48
EVA/Rb50	40.29±2.10	41.20±1.88	41.56±1.86
EVA/Rb60	39.07±2.03	41.65±1.57	42.35±1.58
EVA/Rb70	38.70±2.08	40.73±1.47	43.13±0.99

表二為本研究針對 EVA 及 EVA/Rb 發泡材在三種不同硬度及三種不同厚度下經衝擊測試而得之能量回傳(ER)百分比值，其是由下列公式定義：

$$ER = \frac{B + C}{H + B} \quad (1)$$

效

其中，H 代表了落錘落下高度(50mm)；B 為落錘衝擊試片使試片向下凹陷的最大位移；C 為落錘反彈起來的最大高度。由於落錘衝擊試片，試片在受到撞擊後表面向下凹陷吸收落錘部份能量，在衝擊試片後，因試片具有彈性，材料表面向上彈起，使落錘有一個反彈高度(最大反彈高度 第一次 反彈，接著落錘再度落下衝擊 試片，如此 周期性，平緩狀況。由上述可知落錘的最大總位移會是(H+B)--落錘落下高度(50mm)加落錘衝擊試片使試片向下凹陷的最大位移(B)，而因 試片能量而造成的落錘總位移的改變，考慮以第一次改變的位移(B+C)--(落錘反彈起來的第一次/最大高度--C；試片凹陷的第一次/最大位移----B)，來跟落錘最大總位移作比較，以定義發泡材之能量回傳性能。從能量觀點看，將位能基準面定在發泡材最大位移(B)處，分母 H+B 即表示落錘作用在發泡材的能量，分子 B+C 即表示發泡材作用在落錘的能量。

值則降低了約 1.1%。再者，因厚度及硬度改變造成能量回傳之變化率，由表二知，EVA 發泡材之能量回傳最大改變率僅約 13%，而 EVA/RB 發泡材之能量回傳最大改變率亦僅約 10%。代表了改變硬度、厚度對能量回傳的影響不大，以及對能量回傳的影響是提升或下降沒有明顯趨勢，因此無法單純藉由改變硬度或厚度的設計參數來

度

生控制能量回傳變化。

比較 EVA 及 EVA/Rb 兩類材料對能量回傳的影響，由三種硬度及厚度試片的測試結果知，EVA 發泡材的能量回傳在 35.9%~41.2%，EVA/RB 發泡材的能量回傳在 38.7%~43.1%。因此，整體而言 EVA/RB 發泡材較 EVA 者有較佳的能量回傳性能。此歸因於 EVA/RB 發泡材添加了乙炔丙烯橡膠(EPDM) 及 ENGAGE 橡膠彈性體，而提升了其彈性。

表三：EVA 發泡材能量回傳值變異數分析表

變源	平方和	自由度	均方	F	臨界值
硬度	27.24	2	13.62	2.24	4.26
厚度	12.05	2	6.023	0.99	4.26
交互作用	11.52	4	2.88	0.47	3.63
誤差	54.74	9	6.08		
總和	105.54	17			

表四：EVA/Rb 發泡材能量回傳值變異數分析表

變源	平方和	自由度	均方	F	臨界值
硬度	0.11	2	0.050	0.01	4.26
厚度	27.34	2	13.670	2.2	4.26
交互作用	6.0	4	1.50	0.24	3.63
誤差	55.99	9	6.22		
總和	89.44	17			

參考表三及四由試片硬度及厚度對能量回傳的雙因子數變異數分析可知變異數分析顯示變動因的 F 值皆小於臨界值，可知硬度、厚度及交互作用不對能量回傳的影響。EVA50 這組厚度從 15mm 增加到 25mm 時，能量回傳值降低了約 1.8%，而從 25mm 增加到 35mm 時，能量回傳值則提升了約 1.5%；EVA/Rb50 這組厚度從 15mm 增加到 25mm 時，能量回傳值提升了約 2.3%，而從 25mm 增加到 35mm 時，能量回傳值則降低了約 0.9%。以厚度 25mm 來看，EVA 發泡材硬度從 70C 降到 60C 時，能量回傳值提升了約 5.1%，而從 60C 降到 50C 時，能量回傳值則降低了約 0.3%；而 EVA/Rb 發泡材硬度從 70C 降到 60C 時，能量回傳值提升了約 2.2%，而從 60C 降到 50C 時，能量回傳

圖一硬度 Shore C 60 之 EVA 發泡材放大倍率 80 X 的掃描式電子顯微鏡微觀結構圖

圖二硬度 Shore C 60 之 EVA/Rb 發泡材放大倍率 80 X 的掃描式電子顯微鏡微觀結構圖

影響皆

另外，為瞭解不同材質及硬度之鞋墊發泡材的微觀結構與其能量回傳性能間的關係，計畫中利用 Cambridge S360 掃描式電子顯微鏡(SEM)來探討不同材質及硬度之 EVA 及 EVA/Rb 發泡材的微觀結構。首先將表面積約 15 mm x 15 mm 的試件由發泡材上切割而得，然後在每一試件表面鍍上一層金薄膜，再利用電子顯微鏡進行發泡材微觀結構之重要特徵的觀察及照相，SEM 微觀相片其放大倍率為原始大小的 30X, 80X, 150X, 300X 四種。圖一及圖二分別為硬度 Shore C 60 之 EVA 發泡材及 EVA/RB 發泡材之放大倍

率為 80 X 的掃描式電子顯微鏡微觀結構圖。經分別觀察 EVA 及 EVA/Rb 發泡材具不同硬度時之氣泡大小及分布之微觀結構，得知發泡材微觀結構與其能量回傳性能間的關係亦是不顯著。然由掃描式電子顯微鏡微觀結構分析，具橡膠之醋酸乙稀發泡鞋墊的氣泡大小及形狀分布較醋酸乙稀發泡鞋墊者來的均勻且接近球狀，這可能與 EVA/RB 發泡材有較佳的能量回傳性能有關。

四、計畫成果自評

本計畫針對影響運動鞋衝擊性能的 EVA 發泡鞋墊材，使用衝擊測試法進行鞋墊發泡材料之能量迴傳性能測試與分析，探討不同材質、硬度及厚度之醋酸乙稀鞋墊發泡材對其能量回傳之影響效應；同時，使用掃描式電子顯微鏡 (SEM) 對不同材質及硬度之發泡材進行氣泡微觀結構分析，以瞭解氣泡微觀結構與能量回傳間的關係，此研究內容與原計畫相符。基於衝擊測試作用在鞋墊能量變化及材料微觀結構觀點，完成 EVA 發泡鞋墊對運動鞋能量回傳性能的測試與分析，建立鞋墊材能量回傳性能分析技術，達成預期目標。

此一研究結果將有助於設計者與製鞋業者經由對材料能量回傳特性的瞭解，有效地評析且正確地選擇合適的材質，應用於運動鞋緩衝系統的設計，以得具最適化能量回傳性能的運動鞋。同時此一測試分析技術亦可用以探討其它塑膠發泡元件或橡膠元件的反撥彈性，除有實務應用價值外，亦具有相當學術研究價值。

本計畫主要發現為由試片硬度及厚度對能量回傳的雙因子數變異數分析可知，不論 EVA 或 EVA/Rb 發泡材，其硬度、厚度及交互作用對能量回傳的影響，~~齒~~改變硬度、厚度對能量回傳的影響不大，以及對能量回傳的影響是提升或下降沒有明顯趨勢，所以無法單純藉由改變硬度或厚度的設計參數來控制能量回傳變化。比較 EVA 及 EVA/Rb 兩類材料對能量回傳的影響，整體而言 EVA/RB 發泡材因添加了提升了其彈性之橡膠較 EVA 者有較佳的能量回傳性能。再者，EVA/RB 發泡材之吸震性能並不比 EVA 者差，但 EVA/Rb 發泡材在能量回傳方面，優於 EVA 發泡材，所以在選擇或設計鞋墊緩衝系統，除了具有優良的能量回傳性能下而不失去其緩衝吸震性能，具橡膠之 EVA 發泡材是不錯的選擇。咸信本計畫研究成果適合於學術期刊上發表。

五、參考文獻

1. Frederick, E. C., 1984, Sport Shoes and Playing Surfaces, Human Kinetic Publishers, Inc., Champaign, IL..
2. Nigg, B. M., 1986, Biomechanics of Running Shoes, Human Kinetic Publishers, Inc., Champaign, IL..
3. Cavanagh, P. R., 1990, Biomechanics of Distance Running, Human Kinetic Publishers,

- Inc., Champaign, IL..
4. Clarke, T. E., Frederick, E. C., and Cooper, L. B., 1983, 'Biomechanical Measurement of Running Shoe Cushioning Properties,' *ibid*, pp. 25-34.
5. Clarke, T. E., Frederick, E. C., and Cooper, L. B., 1983, 'The Effects of Shoe Cushioning upon Ground Reaction Forces in Running,' *Int. J. Sports Med.* 4(4), pp. 247-251.
6. Kaelin, X., Denoth, J., Stacoff, A., and Stussi, E., 1985, "Cushioning during Running - Material Tests Contra Subject Tests," *Biomechanics: Current Interdisciplinary Research*, Martinus Nighuff Publishers, pp. 651-656.
7. Graham, I. D., and McCullagh, P. J. J., 1986, "Study of the Shock Absorbency and Microstructure of New and Worn Running Shoe Midsoles," *Proceedings of the VIII Commonwealth and International Conference on sport, Physical Education, Dance, Recreation and Health*, pp. 155-161.
8. Swigart, J. H., Erdman, A. G., and Cain, P. J., 1993, "An Energy-Based Method for Testing Cushioning Durability of Running Shoes," *Journal of Applied Biomechanics*, Vol. 9, pp. 27-46.
9. Lawless, D. L., and Lafortune, M. A., 1995, "Cushioning of Footwear under Controlled Lower Extremity Kinematics," *Second Symposium on Footwear Biomechanics*, Cologne, Germany.
10. Hennig, E., and Milani, T., 1995, "The Perception of Cushioning during Impact Loads of the Human Body," *Second Symposium on Footwear Biomechanics*, Cologne, Germany.
11. Valiant, G., 1995, "Perception of Running Shoe Cushioning," *Second Symposium on Footwear Biomechanics*, Cologne, Germany.
12. Alp, A. A., and Knicker, A. J., 1995, "Effects of Shoe Mass on Shock Attenuation Properties of Children's Shoes," *Second Symposium on Footwear Biomechanics*, Cologne, Germany.
13. Ujihashi, S., 1997, 'The Measurement and Evaluation of the Cushioning Abilities of Running Shoes,' *Third Symposium on Footwear Biomechanics*, Tokyo, Japan.
14. 陳為仁, 1999, 運動鞋衝擊緩衝性能測試分析, 國科會專題計畫成果報告, 計畫編號: NSC 88-2212-E-034-003。
15. Shorten, M. R., 1993, "The Energetics of Running and Running Shoes," *Journal of Biomechanics*, Vol. 26, Suppl. 1, pp. 41-51.
16. Hennig, E. M., Lafortune, M. A., and Lake, M. J., 1995, "The Influence of Midsole Material and Knee Flexion on Energy Return in Simulate Running Impacts," *Second*

- Symposium on Footwear Biomechanics, Cologne, Germany.
17. Strandberg, L., Hildeshog, L., and Ottoson, A., 1987, "Slip Resistance of Footwear Assessed by Walking Experiments," International Series Biochanics-BIOMECHANICS X-B, Human Kinetic Publishers, Inc., Champaign, IL., pp. 919-925.
 18. Gheluwe, B. V., and Deporte, E., 1992, "Friction Measurement in Tennis on the Field and in the Laboratory," International Journal of Sport Biomechanics, Vol. 8, pp. 48-61.
 19. Lange, A. d., and Winkelmolan, W., 1995, "Rotational Friction Characteristics of Footwear: Bridging the Gap between Mechanical and Biomechanical Experiments," Second Symposium on Footwear Biomechanics, Cologne, Germany.
 20. Wojcieszak, C., Jiang, P., and Frederick, E. C., 1997, 'A Comparison of Two Friction Measuring Methods,' Third Symposium on Footwear Biomechanics, Tokyo, Japan.
 21. Radin, E. L., Orr, R. B., Kelman, J. L., Paul, I. L., and Rose, R. M., 1982, 'Effects of Prolonged Walking on Concrete on the Knees of Sheep,' Journal of Biomechanics, Vol. 15, pp. 487-492.
 22. Voloshin, A., and Wosk, J., 1982, 'An in Vivo Study of Low Back Pains and Shock Absorption in the Human Locomotive System,' Journal of Biomechanics, Vol. 15, pp. 21-27.
 23. Bates, B. J., James, S. L., Osternig, L. P., Sawhill, J. A., and Hamill, J., 1982, 'Effects of Running Shoes on Ground Reaction Forces,' In: A. Morecki and K. Fidelus (eds.), Biomechanics VII, University Park Press, Baltimore.
 24. Nigg, B. M., Denoth, J., Luethi, S., and Stacoff, A., 1983, 'Methodological Aspects of Sport Shoe and Sport Floor Analysis,' In: H. Matsui and K. Kobayashi (eds.), Biomechanics VIII-B, pp. 1041-1052, Human Kinetics, Champaign, IL.
 25. Frederick, E. C., Clarke, J. L. and Cooper L. B., 'The Effects of Shoe Cushioning on the Oxygen Demands of Running,' In: Nigg, B. M. and Kerr, B. A. (Eds.), Biomechanical Aspects of Sport Shoes and Playing Surfaces. The University of Calgary, Calgary, Alberta, pp. 107-114, 1983.
 26. Frederick, E. C., 'The Energy Cost of Load Carriage on the Feet During Running,' In: Winter, D. A., Norman, R. W., Wells, R. P., Hayes, K. C., and Patla, A. E. (Eds.), Biomechanics IX-B Human Kinetics Publ., Champaign, IL, pp. 295-300, 1985.
 27. Frederick, E. C., Howley, E. T., and Powers, S. K., 'Lower Oxygen Cost While Running in Soft Soled shoes,' Research Quarterly, 57, pp. 174-177, 1986.
 28. 謝立生, 1999, 'EVA 的發泡成型(上), ' 頁數 40-48。
 29. 謝立生, 1999, 'EVA 的發泡成型(下), ' 頁數 41-47。