



汽車雨刷膠條磨潤測試機台之研製與實驗分析

方治國¹ 陳鴻瑋²

1. 國立宜蘭大學機械與機電工程學系(所)教授
2. 國立宜蘭大學機械與機電工程學系(所)研究生

摘要

汽車雨刷膠條與擋風玻璃間之摩擦及磨耗可能造成刷拭效果不佳並產生振動及噪音問題，因而影響駕駛及乘客之視野及舒適性，甚至危及駕駛安全。因此，雨刷膠條在玻璃上之磨潤行為是一重要研究課題。本研究設計並製作 Pin-on-disc 式測試機台，並且探討雨刷膠條與玻璃表面間之磨擦現象。實驗參數包括材質、負荷、轉速、及乾濕條件等。研究結果顯示：摩擦係數隨膠條負載之增加而降低，而在高速下之摩擦係數較低速時為高。此外，並發現於天然橡膠中添加合成氯丁橡膠具有減低摩擦係數之效果，這在文獻上鮮被探討。本研究結果在雨刷結構動態設計上可提供參數設計及材料選別之參考。

關鍵詞：雨刷、膠條、磨潤、摩擦係數、負載、速度

*通訊作者 E-mail : ckfang@niu.edu.tw



Manufacture of Car Wiper Tribological Tester and Corresponding Experimental Analysis

Chih-Kuo Fang¹, Hung-Wei Chen²

1. Professor, Department of Mechanical and Electro-Mechanical Engineering,
National Ilan University.

2. Graduate Student, Department of Mechanical and Electro-Mechanical
Engineering, National Ilan University.

ABSTRACT

The friction and wear between automobile wiper blade and windshield glass may result in poor wiping, and have potential to generate unwanted noise and vibration level. This leads to poor visibility, comfortability, and it may even creates a driving safety hazard. As a result, the study of tribological behaviors of wiper blade on glass is significant. In the present study, a pin-on disk testing device was designed and manufactured, and the friction of wiper blades on glass surface were investigated. The experimental parameters included material, loading, wiping speed, and dry/wet wiping conditions. The results show that the friction coefficient decreases with the increase of normal force per unit length. And higher wiping speed results in higher friction coefficient. Besides, it was observed that adding poly chloroprene rubber to natural rubber can significantly reduce the friction coefficient of wiper blades, which is barely studied in the literature. The results are expected to provide a reference for the parameter design and materials selection in the dynamic design of wiper structures.

Keywords: Wiper, Blade, Tribology, Friction coefficient, Load, Velocity

***Corresponding author E-mail:** ckfang@niu.edu.tw

一、前言

雨刷系統乃汽車基本配備，主要是用來清除汽車擋風玻璃上的水滴、雪花、泥、沙、灰塵、小昆蟲及其他污染物等阻礙，以淨空駕駛人視野。因此雨刷性能關係到駕駛之安全性，特別是台灣屬於多雨型氣候，雨刷性能更顯得重要。

雨刷機構包含一個電動馬達、一個蝸齒輪減速機、一組連桿和雨刷片。雨刷的動力來源為電動馬達，而馬達轉速高，利用蝸齒輪大的減速比將雨刷扭力增大，推動連桿，將雨刷馬達的旋轉動作轉換成雨刷臂左右搖擺運動，雨刷片或膠條則承受雨刷臂之壓力，中間有支架固定，並直接與擋風玻璃接觸。

在刷雨功能上，雨刷膠條之功能並非將雨水完全刷除，而是將雨水均勻的在擋風玻璃前形成一層水膜，使汽車行駛時，前方物體能將光線順利反射至駕駛人眼中。因此膠條必須保持均勻之壓力與合適之角度，使形成均勻的水膜，以發揮雨刷在各環境下的正常功能並延長使用壽命。不良之膠條常導致擋風玻璃產生刮痕、或使水膜在玻璃表面產生不正常折射而造成駕駛人視線困擾。

在雨刷膠條與擋風玻璃的相對運動中，磨潤行為之掌控常是雨刷設計成敗的關鍵。由於雨刷膠條摩擦力是系統的外在干擾產生之非線性行為，不當之摩擦現象常導致刷拭上之振動和噪音，連帶影響刷拭效果。因此對於雨刷膠條之摩擦現象須有深入之瞭解，方能在設計與製程上調配各種參數達最佳組合，以解決上述問題，改善雨刷性能。

在影響雨刷性能諸參數中，膠條所受負載(或正向力)之大小直接影響雨刷的掃刷效果：若負載太大，雨刷與擋風玻璃間的摩擦力太高，需消耗較大馬力，並且可能造成雨刷抖動和跳動，除造成掃刷效果不佳外，並會產生較大之噪音；反之，雨刷負載太小則殘留水膜太厚，達不到掃刷效果。其中，關於負載與摩擦力之相關性，一般以摩擦係數為基準，但由於一般雨刷膠條係以橡膠為主要原料，其摩擦係數受負載影響甚大，並不遵守庫倫摩擦第一定律或阿蒙頓摩擦第一定律(Amontons' first Law)。因此，針對不同負載下，雨刷膠條摩擦係數之研究有其必要性。

此外，由於雨刷在汽車擋風玻璃上刷拭時係以雨刷桿軸心作旋轉運動，靠近旋轉中心處之膠條刷速較小；而遠端則較大。因此整支雨刷膠條運動速度並不一致。假若膠條摩擦係數會因刷速而改變(不遵守庫倫摩擦第二定律或阿蒙頓摩擦第三定律)，則膠條各處所受摩擦力必不同，若再考慮膠條各處負荷之不均勻性，其摩擦力分佈將頗為複雜，而摩擦力分佈將直接影響雨刷膠條刷拭時之動態行為。所以在進行雨刷動態分析時，必

須先取得膠條摩擦係數與刷速之相關性資訊。因此，針對刷速對雨刷膠條摩擦係數之影響性分析有其實用性。

此外，雨刷片一般使用橡膠為材料。橡膠屬超彈性(Hyperelastic)材料，具有非常高的變形能力(Deformability)，以及變形後近乎完全之回復能力(Recoverability)。其中天然橡膠(Natural rubber, NR)為最常使用之膠條材料，其單體為異戊二烯。由於NR為近100%之不飽和彈性體，因此缺乏抗氧化及抗臭氧能力，故須添加抗氧化劑。此外，NR通常須加硫方具較佳之彈性、抗張性、及耐磨性。為改善天然橡膠之性質常於其中添加合成橡膠，其中氯丁橡膠(Chloroprene rubber, CR)又稱氯丁二烯橡膠或新平橡膠，係由杜邦公司(DuPont)發明，是第一個實行工業化生產的合成橡膠品種。CR主要原料為氯丁二烯(2-氯-1,3-丁二烯)，單體經 α -聚合後生成彈性體。CR優點為耐油、耐燃、耐化學試劑、及耐候(如耐熱、耐日光、耐臭氧、耐酸鹼)，其在耐候上之特性適合作為雨刷膠條材料，特別是在高溫、陽光強烈的地區。NR中添加CR可改善雨刷膠條之耐候性為習知之事實，但有關其對摩擦特性之影響性則甚少被討論，因此本研究同時將探討添加CR之減磨效果。

為分析雨刷膠條與玻璃表面間之磨潤行為，包括是膠條材質、負荷、及刷速對摩擦係數之影響性，本研究自行研製汽車雨刷膠條磨潤測試機台，採用Pin-on-disc方式，可監測不同負載、刷速下之摩擦係數。利用此機台進行一系列磨潤實驗，控制參數包括負荷、轉速、及乾/濕條件等，探討主題包括乾/濕掃刷條件下摩擦係數與負載之關係、掃刷速度對摩擦係數之影響、及於天然橡膠中添加CR合成橡膠之減磨效果。本研究所得關於雨刷膠條與玻璃表面間之磨潤行為可提供雨刷結構動態設計上之重要參考。

二、雨刷膠條磨潤測試機台之研製

汽車雨刷之測試一般根據美國汽車工程學會規範SAE J903，該規範針對客車、輕型卡車等制訂雨刷之測試程序，包括掃刷頻率(Frequency)、耐久性(Durability)、強度(Strength)、及耐溫性(Temperature operational capability)等測試，但並無本研究所需要之負荷及刷速影響性之測試。

在雨刷膠條之負荷及刷速影響性測試方面，較典型的是使用往復式磨擦測試機台，如圖1所示 [Koenen and Sanon, 2007]。但由於往復運動之雨刷速度並非常數，因此摩擦力之量測與計算須考慮慣性力。Fujii曾利用雷射督卜勒效應量測速度，從而求得及

慣性力[Fujii and Yamaguchi, 2007]。本研究則設計 Pin-on-disk 旋轉式機台，利用變頻器控制馬達轉速，其切線速度可保持恆定，故可免除慣性力問題。

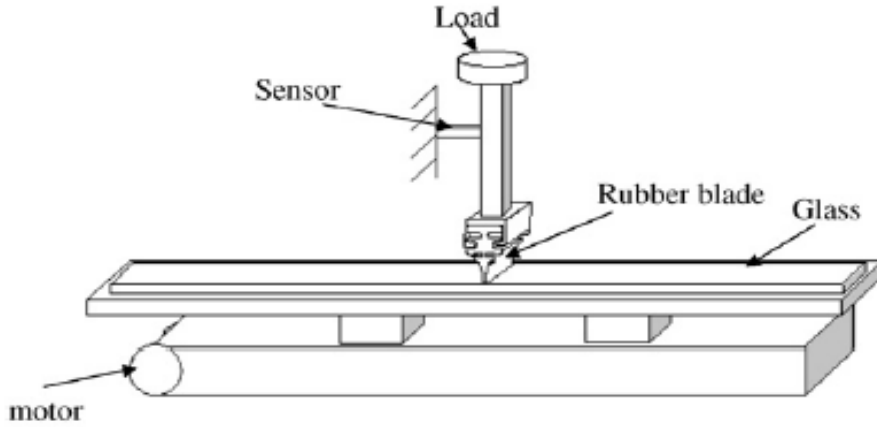


圖 1 往復式摩擦測試機台 [Koenen and Sanon, 2007]

2-1 機台設計與製作

本研究所研製之「兩刷膠條磨潤測試機台」係根據 Pin-on-disk 形式加以修改，以符合兩刷膠條之測試需求，架構如圖 2 所示。利用變頻器設定馬達轉速帶動圓盤，圓盤上裝置汽車擋風玻璃使用的膠合玻璃，其平均表粗糙度 $R_a = 1.2\mu\text{m}$ 。Pin-on-disk 部分於 Pin 下方設計一夾具安裝長度 10 mm 之兩刷膠條試片，上方裝置砝碼以提供正向力負載。膠條與玻璃間之摩擦力(側向力) F_f 透過槓桿傳達並施大小為 kF_f 之力於懸臂樑上端(k 取決於槓桿力臂長度比)。懸臂樑使用 6061 鋁合金材質，固溶處理後進行人工時效熱處理(T6)，其彈性模數 $E = 270\text{ MPa}$ ，懸臂樑橫斷面尺寸為 $b \times h$ 。於懸臂樑下方張力側黏貼一單軸應變計，其中心與受力點距離為 d 。懸臂樑受力彎曲時，應變計中心之抵抗力矩(Resisting moment) $M_r = kF_f d$ 。根據彈性撓曲公式(Elastic flexural formula)，應變計中心產生之應力為 $\sigma = M_r (h/2) / I$ ，其中 $I = bh^3/12$ 為面積慣性矩(Area moment of inertia)或相對於中性軸之橫斷面二次面積矩(Second moment of area of the transverse section with respect of the neutral axis)。因此應變計中心產生之應變為：

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{6kF_f d}{Ebh^2} \quad (1)$$

假設應變計內之金屬導線原電阻為 R_g (一般為 120 或 350 Ω ，本實驗使用 120 Ω)；受拉力後金屬導線長度增加且截面縮小造成電阻增加，假設電阻增加量為 ΔR ，則

$$\Delta R/R_g = K\varepsilon + \alpha\Delta T \quad (2)$$

其中 ΔT 為溫度變化， α 為溫度係數。 K 為應變計常數(Gage factor)，其值與應變計金屬導線之普松比(Poisson's ratio) ν 有關： $K = 1+2\nu$ ，對於金屬箔應變計(Metal foil strain gauge) $K= 2\sim 5$ 。若在恆溫下($\Delta T= 0$)， $\Delta R = \epsilon KR_g$ ，此電阻變化經由惠斯敦電橋(Wheatstone bridge)轉換為電壓訊號。電橋輸入電壓或激勵電壓(Excitation voltage) V_i 使用 2V (若用 350 Ω 應變計則改用 5V)，由於本裝置採 1/4 橋接(Quarter-bridge) (如圖 3)，其輸出電壓 $V_o = (1/4)K\epsilon V_i$ 。電橋輸出電壓經由放大器及類比/數位轉換器(A/D Converter)轉換為數位訊號記錄於電腦。

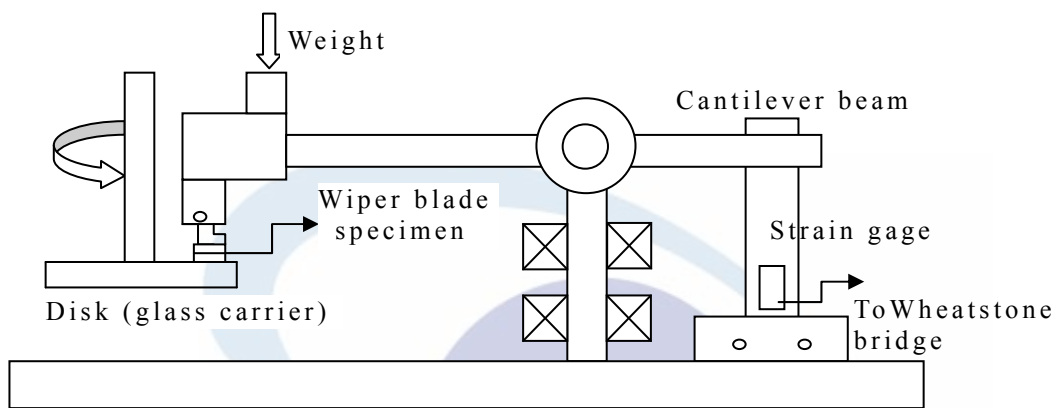


圖 2 兩刷膠條磨潤測試機台架構

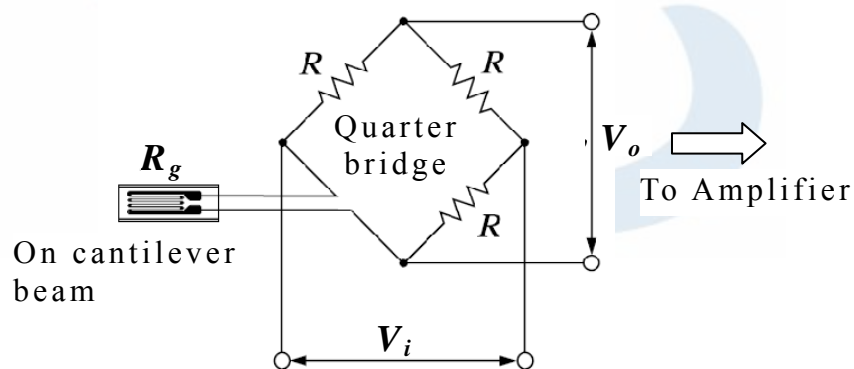


圖 3 惠斯敦電橋接線圖

2-2 摩擦力校準

為避免誤差之累積，須對本測試機台進行校準，建立摩擦力(側向力)與輸出電壓之關係。藉由砝碼與滑輪系統施予 0~10 N 之側向力，經槓桿作用於懸臂梁受力端，經由應變計、電橋及訊號處理裝置，量測各側向力對應之輸出電壓訊號 V_o ，建立側向力-電壓校準圖(圖 4)。根據該圖之線性迴歸公式可將實驗量測之電壓訊號轉換為摩擦力，以計算摩擦係數。

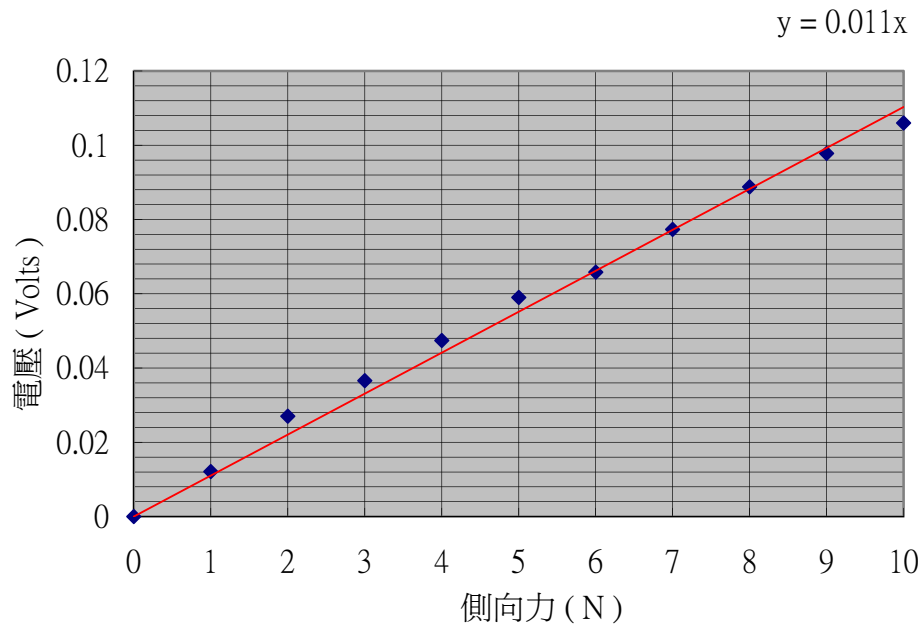


圖 4 側向力-電壓校準圖

三、實驗方法

本實驗使用台製(M 廠牌)之雨刷膠條切成長度 10 mm 之試片，材質為純天然橡膠 (NR)以及天然橡膠中添加 CR 合成橡膠(NR+CR)兩種，分別標示為膠條 1 及膠條 2。對磨材料使用安全玻璃(膠合玻璃)，以模擬實車擋風玻璃，其表面粗糙度 $Ra = 1.2 \mu\text{m}$ 。乾刷與濕刷實驗於環境溫度 25°C 下進行。使用砝碼質量為 20、30、40、60、80、及 90 g，考慮槓桿作用，膠條試片承受之負載分別為 17.6、26.5、35.3、52.9、70.6、及 79.4 N/m。

由雨刷膠條切取 10 mm 長之試片，經超音波震洗後裝置於 Pin-on-disc 機台進行乾/濕刷實驗。機台圓盤各分別以 75 rpm (切線速度 0.471 m/s)及 450 rpm (切線速度 2.826 m/s) 持續運轉。每一試片施以階梯式逐步增加負載(17.6、26.5、35.3、52.9、70.6 N/m)。每一負載施加時間 30 秒，其間以 10 kHz 之取樣頻率(Sampling rate)擷取摩擦力數據，存檔紀錄摩擦力隨時間之變化。每一負載條件下，取第 30 秒之最後 100 個數據(共 10 ms)之平均值作為該負載下之摩擦力。每一參數組合重複三次實驗後繪製摩擦係數/負載關係圖。

四、結果與討論

圖 5 顯示膠條 1(NR)及膠條 2(NR+CR)於乾刷條件下摩擦係數與負荷之關係，其切線速度固定於 0.471 m/s。在各種負荷下，摩擦係數約落在 0.4–1.2 之範圍，並呈現隨負載之增加，摩擦係數有明顯降低之趨勢。值得注意的是：天然橡膠中添加 CR 合成橡膠後(NR+CR)在不同負荷下，摩擦係數皆比純天然橡膠(NR)減小約 0.2。關於在 NR 中添加 CR 可增強膠條之耐臭氧及耐候性為習知之事實，但本實驗發現其並具減低摩擦係數之效果。

在摩擦係數與負荷之關係上，根據庫倫摩擦第一定律，乾摩擦狀態下，摩擦力與正向力成正比，亦即摩擦係數與負荷無關。然而圖 5 顯示摩擦係數隨負荷之增加而降低，似乎與據庫倫摩擦第一定律相牴觸。實際上，摩擦力並非基本力(Fundamental force)，摩擦並非純由兩表面間之不平滑造成，而主要來自兩接觸面帶電荷粒子間之電磁吸引力(屬基本力)。雖然宏觀上兩摩擦面是接觸的，但只有微觀上實際接觸或非常接近之原子方能彼此產生靜電吸引力(Electrostatic attraction)而互相吸引。實接觸面積(Real contact area)愈大，則兩摩擦面間產生靜電吸引的原子個數愈多，其摩擦阻力愈大。因此摩擦力大小與實際接觸面積成正比，而與虛接觸面積(Apparent contact area)無關。一般而言，兩摩擦面間之實接觸面積隨正向力之增加而增大，因此摩擦力與正向力有正比之關係。但此正比關係僅限於正向力在某特定範圍之內[Popov, 2010]，若將正向力由零逐漸增加，初期實際接觸面積雖與正向力成正比，但隨正向力之增加，實接觸面積逐漸趨近一極限值 – 虛接觸面積，此時實際接觸面積增加之程度趨緩(漸趨飽和)，亦即摩擦力與正向力之關係漸呈非線性。對於高硬度材料(如鋼、陶瓷等)，不易達到該極限值，因此其摩擦力與正向力之正比關係存在之範圍甚大(可達數個數量級之正向力)[Bowden and Tabor, 2001]；但對於軟金屬(如銅、鉛等)材料，上述極限值相對容易達到。至於聚合物(Polymers)之極限值則更容易達到，特別是如橡膠之彈性體(Elastomer)，由於其彈性模數(Elastic modulus)低，極小之正向力即可達到甚至超過該極限點，而使摩擦力與正向力不再成正比關係，亦即摩擦係數不再是定值，而是因正向力大小而異。因此，本實驗所得關於摩擦係數隨負載之增加而減小之結果並未與庫倫摩擦定律相牴觸。然而摩擦係數隨負載之增加而降低並不意味兩刷負載愈大愈好，因為較高之負載雖有較低之摩擦係數，但其乘積(摩擦力)卻較大，因此刷拭阻力也較大。

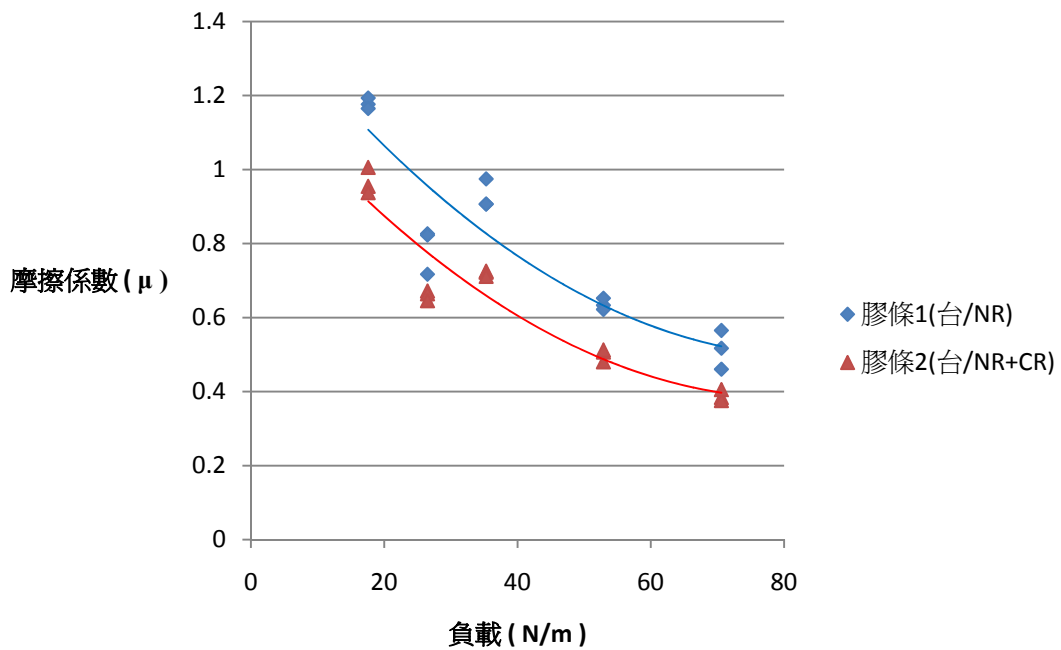


圖 5 乾刷條件下摩擦係數與負載之關係(切線速度：0.471 m/s)。

由於實車兩刷係進行往復運動，因此刷速為時變參數；而兩刷上各點係以兩刷臂樞軸為中心作圓周運動，故刷速因位置而異。雖然庫侖摩擦第二定律認為滑動摩擦力和滑動速度大小無關，但實際上二者關係頗為複雜。為探討刷速對兩刷摩擦行為之影響，本研究針對不同轉速重覆圖 5 之實驗，結果顯示：高速時摩擦係數與負載之關係(圖 6)與低速(圖 5)時類似：摩擦係數隨負載之增加而降低，但此趨勢隨負載之增加漸不明顯，尤其當負載超過 50 N/m 後，摩擦係數甚至有輕微上揚之現象。比較圖 5 及圖 6，高速下負載對摩擦係數之影響比低速下明顯；並且在各種負載下，高速掃刷之摩擦係數皆比低速掃刷為高，其差異甚可達到 0.4，NR 試片高速掃刷之摩擦係數最高可達 1.6。此外，天然橡膠中添加 CR 後亦使高速下之摩擦係數明顯降低，此與低速掃刷之結果一致。

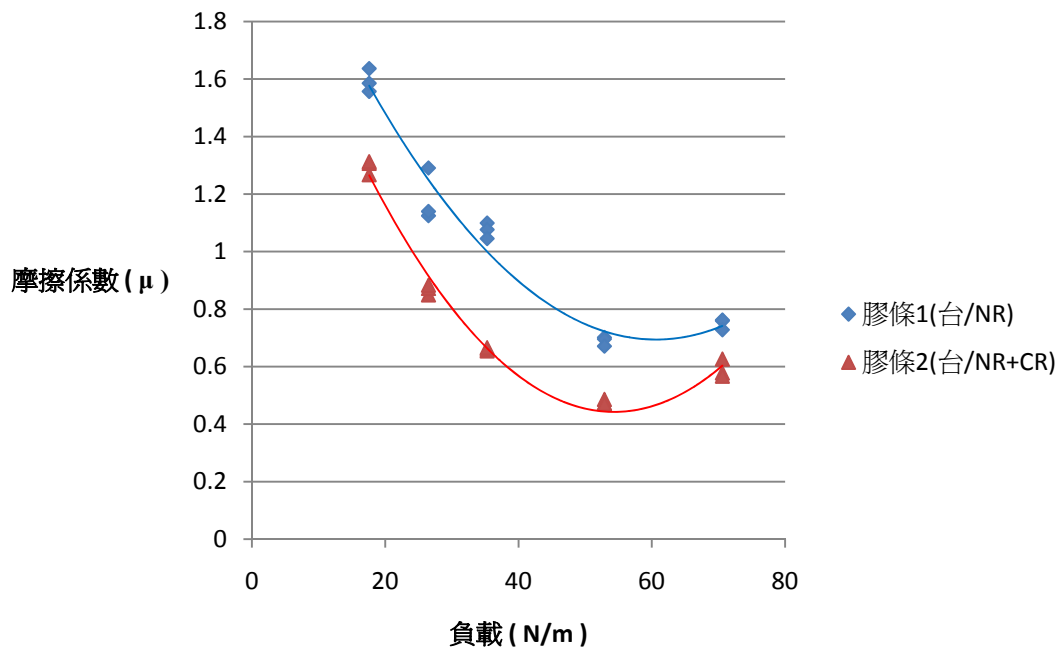


圖 6 乾刷條件下摩擦係數與負載之關係(切線速度：2.826 m/s)。

為探討乾/濕刷條件之影響性，本研究重複實驗 5，但在膠條與玻璃間保持有水之濕刷狀態。圖 7 為濕刷條件下摩擦係數與負載之關係圖。對照圖 5(乾刷)，乾/濕條件所呈現之曲線趨勢大致相同：摩擦係數隨負載之增加而降低，但在高負載下此趨勢漸不明顯。此外，濕刷摩擦係數明顯低於乾刷，特別是低負載下之天然膠條，摩擦係數最多可減少 0.6 左右。至於添加 CR 的減摩效果，濕刷比乾刷不明顯。將圖 7 之結果對照 Koenen 之文獻[Koenen and Sanon, 2007]，其濕刷實驗結果顯示摩擦係數亦隨著負載之增加而減少，但由於其負載最高只做到 36 N/m，對於更高之負載結果如何不得而知，本實驗則進一步探討更高負載(最高達 70.6 N/m)下之趨勢，結果發現當負載超過 50 N/m 後，摩擦係數與負載之關係變得不明顯。此外，Koenen 之研究只探討濕刷條件，而本研究更進一步發現在乾刷條件下亦有此趨勢(圖 5 及圖 6)。

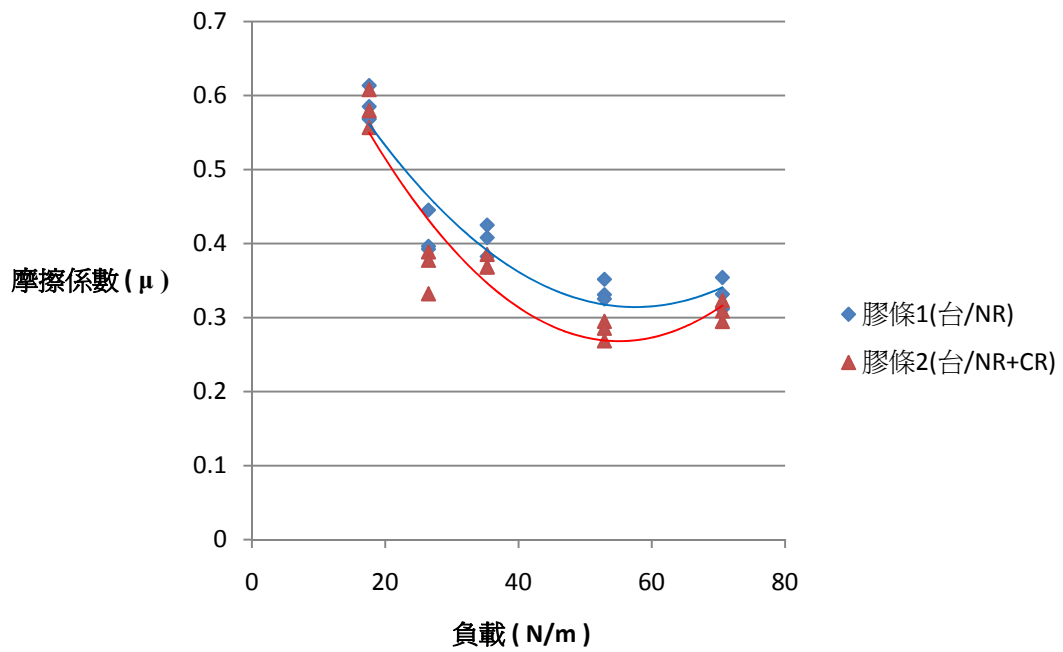


圖 7 濕刷條件下摩擦係數與負載之關係(切線速度：0.471 m/s)。

圖 8 顯示高速濕刷下摩擦係數與負載之關係，其趨勢與圖 5~圖 7 相似，亦即摩擦係數隨負載之增加而降低。與圖 6 相較，濕刷之摩擦係數仍較乾刷低；與圖 7 相較，高速下之摩擦係數確實比低速下為高。

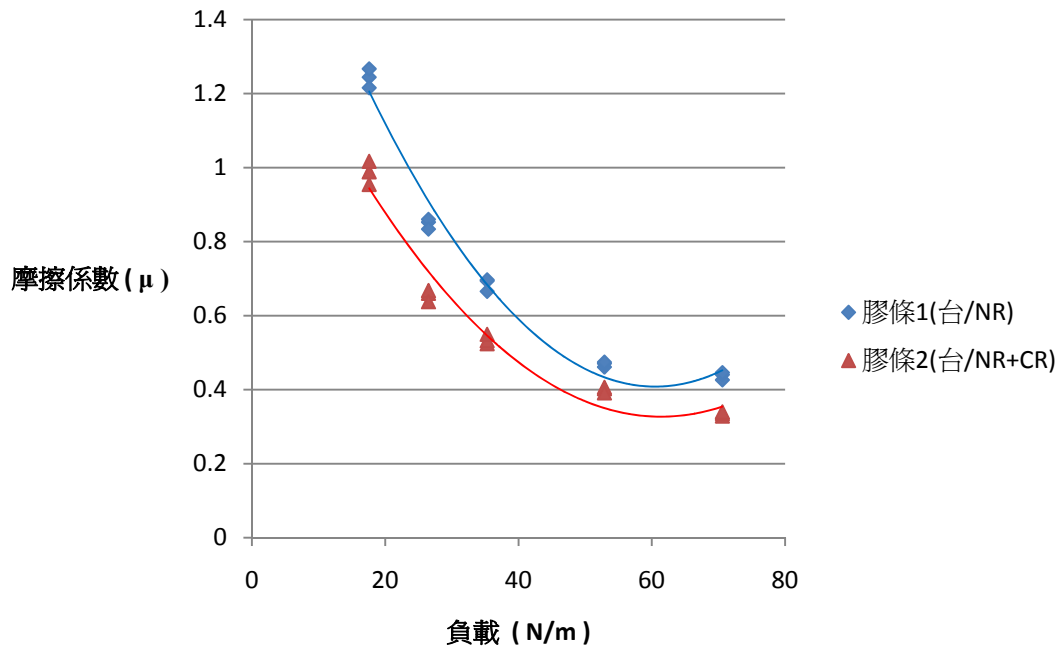


圖 8 濕刷條件下摩擦係數與負載之關係(切線速度：2.826 m/s)。

圖 5~圖 8 關於刷速及乾/濕刷條件對摩擦係數之影響主要是由於不同之摩擦機制所

造成。對於乾燥、清潔之橡膠表面，其摩擦機制包括「黏著」(Adhesion)與「滯變」(Hysteresis) [Grosch1963; Klüppel and Heinrich, 2000; Persson, 2001; Persson et al., 2004]。其產生原因及在不同刷速及乾/濕刷條件下對摩擦行為之影響分析如下：

「黏著摩擦」係由於橡膠與對磨基材表面間之結合力(Binding forces)造成，通常此結合力最主要的是微弱的凡得瓦作用力(Van der Waals interactions) [Pálfi et al., 2012]。對於非常光滑的對磨材(如玻璃)表面，由於橡膠類材料之彈性模數甚低，即便橡膠所承受之下壓力很小，其表面吸引力仍可能造成界面間近乎完全接觸(即實接觸面積接近虛接觸面積)，因而產生甚大之滑動摩擦力。若兩界面間有水膜的阻隔，將使其表面分子間作用力大為減弱，因而降低黏著摩擦，此乃濕刷之摩擦係數低於乾刷的原因之一。然而，在乾刷條件下，特別是在低速下，此黏著摩擦具有相當之重要性；當滑動速度增加時，黏著摩擦效應會隨之降低。但比較圖 5 及圖 6，高速下摩擦係數反而較高，似乎與前述推論相牴觸。其原因推斷是另一摩擦機制 – 「滯變摩擦」所造成。

「滯變摩擦」是由於硬質對磨基材表面的宏觀或微觀粗糙突點(Asperities)作用於橡膠表面之反覆振盪力(Oscillating force)造成橡膠之反覆形變(Cyclic deformation)而產生「內摩擦」(Internal friction)，因而導致能量耗損(Energy dissipation)[Klüppel and Heinrich, 2000; Persson, 2001; Pálfi et al., 2012]。滯變摩擦可解釋圖 6 及圖 8 高速下摩擦係數較高之現象：在較高之摩擦速度下，黏著摩擦效應雖降低，但因玻璃上的突點作用於橡膠表面造成之反覆形變頻率較高，因此橡膠內摩擦的能量耗損較大。若高速造成之滯變摩擦增大量超過黏著摩擦減少量時，整體摩擦係數會比低速時高(如圖 6 及圖 8)；然而若滯變摩擦增大量低於黏著摩擦減少量時，則高速下摩擦係數反而較低，如 Koenen 之實驗結果[Koenen and Sanon, 2007]。此外，濕刷較乾刷之摩擦係數低的原因除前段所述由於水膜的阻隔使黏著摩擦降低外，濕刷之滯變摩擦亦較乾刷為低，其原因是水膜填充玻璃表面奈米級之凹點(Nanovalleys) [Pálfi et al., 2012]，使得玻璃表面突點刺入橡膠之程度降低，亦即奈米粗度(Nanoroughness)引起滯變摩擦程度減小。簡言之，濕刷條件下之黏著摩擦及滯變摩擦皆比乾刷條件下為低，故摩擦係數較低。附帶一提的是，由於汽車雨刷是以水為潤滑劑，僅需考慮黏著摩擦及滯變摩擦；對於其他機件使用黏滯性流體(黏滯係數比水大)為潤滑劑時，則尚須考慮黏滯阻力，而黏滯阻力是隨速度之增加而增加。

五、 結論

根據本研究針對雨刷膠條在不同材質、負載、轉速、及乾/濕條件所造成摩擦係數之變化，獲得以下結論：

1.在負載影響性方面：各種材質膠條在各種掃刷條件下，摩擦係數皆隨負載之增加而降低，當負載超過 50 N/m 後，此趨勢漸趨平緩，摩擦力因而隨負載急遽上升。因此雨刷單位長度之負載以不超過 50 N/m 為宜。

2.在掃刷速度影響性方面：高速造成之滯變摩擦增大量若超過黏著摩擦減小量，則整體摩擦係數會比低速時高，反之則較低。由於雨刷往復運動中各處切線速度不同，其所受摩擦力分佈不均且為時變，因此掃刷速度對摩擦係數之影響性在雨刷結構動態設計上，提供一重要參考。

3.關於在天然橡膠中添加 CR 合成橡膠可增強膠條之耐臭氧及耐候性為習知之事實，然本研究發現添加 CR 並具有減低摩擦係數之效果。

參考文獻

- Bowden, F.P. and Tabor, D., 2001, *The Friction and Lubrication of Solids*, Clarendon Press, Oxford.
- Fujii, Y. and Yamaguchi, T., 2005, "Dynamic Characteristics Measurements of a Car Wiper Blade," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 49, pp. 799-802.
- Grosch, K.A., 1963, "The relation between the friction and viscoelastic properties of rubber," *Proceedings of the Royal Society A*, Vol. 274, No. 1356, pp. 21-23.
- Koenen, A. and Sanon, A., 2007, "Tribological and vibroacoustic behavior of a contact between rubber and glass," *Tribology International*, Vol. 40, pp. 1487-1490.
- Klüppel M. and Heinrich, G., 2000, "Rubber friction on self-affine road tracks," *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 73, No. 4, pp. 578-606.
- Pálfi, L., Goda, T., Váradi, K., Garbayo, E., Bielsa, J.M., and Jiménez, M. A., 2012, "FE Prediction of Hysteretic Component of Rubber Friction," *Advances in Tribology*, Vol. 2012, Article ID 807493, 12 pages.
- Persson, B.N.J., 2001, "Theory of rubber friction and contact mechanics," *Journal of Chemical Physics*, vol. 115, No. 8, pp. 3840-386.

Persson, B. N. J., Albohr, O., Creton, C., and Peveri, V., 2004, “Contact area between a viscoelastic solid and a hard, randomly rough, substrate,” *Journal of Chemical Physics*, Vol. 120, No. 18, pp. 8779–8793.

Popov, V.L., 2010, *Contact Mechanics and Friction*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 137-138.

