

A359 鋁合金/碳化矽+石墨顆粒型複合材料之磨潤行為研究

Study on Tribological Properties of
A359Al/Gr. (p) +SiC (p) Composites

計畫編號：NSC 90-2212-E-032 -004

執行期限：90/08/01~91/07/31

計畫主持人：林清彬 教授

淡江大學機械與機電整合工程學系

台北縣淡水鎮英專路 151 號

一、中文摘要

本研究係利用曳引熔鑄設備及石墨顆粒表面鍍銅之製程，製得 A359 鋁合金/碳化矽+石墨顆粒型複合材料；以 Vane-on-disk 乾磨耗實驗，探討石墨顆粒含量、荷重及滑動速度對複合材料之磨潤性質影響。摩擦係數於石墨顆粒含量 4 wt% 和 6wt% 最小，且隨荷重及滑動速度增加而減少；磨耗率於碳化矽含量 5wt% 且不含石墨顆粒最小，石墨顆粒含量 8wt% 最大。接觸電阻隨滑動速度增加但與荷重無關。

關鍵詞：鋁基複合材料；磨潤；石墨顆粒；摩擦係數；磨耗率

Abstract

This research makes A359 aluminum/silicon carbide with graphite particulate composites by drag-forced technique, and using cementation process to coat a copper layer on the surface of graphite particulate. Using Vane-on-disk dry wearing system to probe into the quantity of graphite particulate, load, and slip speed on tribological properties. The friction coefficient would be the smallest when the graphite particulate quantity was 4 and 6wt%. The friction coefficient decreased when slip speed and load increased. The wearing rate would be the smallest when SiC particulate quantity 5wt% and without graphite particulate, and the largest when the graphite particulate quantity was 8wt%. The contact resistance increased when slip speed increased. Load has less influence on contact resistance.

Keywords : aluminum matrix composite; tribology; graphite; friction coefficient; wear rate

二、導論

目前採用鋁合金當引擎材料主要考量是質輕、較佳耐蝕性、高熱傳導及高比強度[1]，但其磨耗較差是其缺點。根據 Funatani [2] 引擎系統中大約有 40% 的動力損失來自引擎

中鋁合金零件磨耗所引起，因此需提高耐磨耗以增加其效率。鋁合金加入陶瓷強化相之複合材料，根據 Alpas 和 Zhang[3] 在高負荷下會產生激烈磨耗。但根據鋁基/石墨顆粒型複合材料之研究[4,5]，添加石墨顆粒於鋁合金，可改良潤滑、降低摩擦係數及彌補上死點之潤滑不足。

鋁基/石墨顆粒型複合材料性質已被廣泛研究；根據 Lim 等人[6] 石墨顆粒在磨耗面產生塑性流時會產生分層及變形，當接觸面持續滑動時，石墨顆粒會不斷被擠出至表面，以阻礙滑動面之接觸，而形成固體潤滑層。據 Liu 等人[7] 經滑動摩擦後形成一固態潤滑膜，會降低鋁合金的摩擦係數、磨耗率及接觸溫度。

根據 Rana 和 Stefanescu[8] 石墨添加量增加時，摩擦係數會相對的減少。但根據 Wang 和 Rack[9] 石墨顆粒含量增加至一定量時，石墨顆粒可能產生聚集，而使磨耗性質變差。這是因為石墨顆粒聚集處易形成微裂縫，而在滑動摩擦時，微裂縫會隨著基地的塑性變形成長造成脆性增加[9]。據 Kim 等人[10]，磨耗面的溫度會隨著負荷增加而增加，而隨石墨顆粒含量增加而減少，這是因為當石墨含量愈多時，則對磨面之潤滑膜會愈早佈滿，進而減少滑動面的接觸，使溫度不會急遽上升[11]。

本研究之主要目的係熔鑄 A359 鋁合金/碳化矽+石墨顆粒型複合材料及探討石墨顆粒含量、滑動速度及負荷對磨潤性質之影響。

三、實驗設計

採用 A359 鋁合金為母材，不規則之碳化矽與石墨顆粒當第二相，其平均粒度分別為 15 μ m 與 80 μ m，其中碳化矽是用來強化鋁基材，石墨顆粒當潤滑相。

根據 Krishnan[12]，鋁熔湯於 1080 $^{\circ}$ C 以下與石墨顆粒之間的接觸角 (contact angle) 高達 160 度，因此要將石墨顆粒直接加入鋁熔湯是不易達成。本實驗設計一套可量產之水合過程 (cementation process) [13]，在石墨顆粒表面給於均勻鍍銅以降低其潤濕性。將完成之鍍銅石墨顆粒以 JEOL-JSM-5400 掃描式電子顯微鏡 (scanning electric microscope) 觀察其表

面鍍銅情形，並用 EDS 分析石墨顆粒表面之銅元素線性含量圖 (line-profile) 及分佈狀態圖 (mapping)。

鋁基/碳化矽/石墨顆粒型複合材料熔製如下：將 A359 鋁合金於 650°C 完全熔融後給予除渣及除氣，依一定比例加入 359 鋁合金/20wt% 碳化矽複合材料，以稀釋方法製得 359Al/5wt% 碳化矽複合材料熔湯。此時，將爐溫降至熔湯之兩相區 (液相比例約 33%)，坩鍋在惰性氣體氬氣的保護下，將鍍銅石墨顆粒加入。加完石墨顆粒後，移出攪拌系統及加料系統，最後將泥漿狀 (slurry state) 的鋁基/碳化矽/石墨顆粒型複合材料熔湯，倒入預熱 550°C 的模具中進行重力鍛造 (加熱溫度 270°C 300°C，鍛造壓力 200ton) 製得鋁基/5wt% 碳化矽/0、2、4、6、8wt% 石墨顆粒型複合材料。

複合材料及鋁合金拋光後，以 OPTIPHOT-100 Nikon 光學顯微鏡觀察石墨顆粒在基地的分佈。

熱處理及硬度測試

採用 T6 處理之 A359 鋁合金及複合材料和 A332.2 鋁合金當磨耗測試之上試片及下試片，T6 處理後之試片用洛式硬度試驗機 B-scale, 測其洛式硬度值，負荷時間 30sec，硬度數據取六點求其平均值。

磨潤測試

磨潤測試是以鍵與環 (vane-on-disk) 之 Falex 6 磨耗試驗機於乾磨耗下進行測試，且模擬引擎的往復式運動；其磨耗測試參數分別為 1. 滑動速度為 0.55m/s、0.73m/s、0.92m/s；2. 正向負荷為 0.37 MPa、0.49 MPa、0.62MPa；測試後獲得磨擦係數、磨擦溫度、磨耗率及磨擦電阻值。

四、結果與討論

未鍍銅前之石墨顆粒表面較平整，經水合過程後石墨顆粒表面則晶出一層反應生成物，經 EDS 及 Mapping 分析，發現此反應生成物為銅元素且均勻分佈在石墨顆粒表面見圖 1。銅分佈在石墨顆粒表面之均勻性較先前製程[14]佳，其原因係先前之製程係利用鋅粉來參與置換反應，且石墨顆粒係以持續攪拌方式以促其置換反應，然而此種攪拌過程易使石墨顆粒發生層狀剝離，在剝離動態過程中，使石墨顆粒表面不易均勻鍍上銅。

鋁合金及複合材料之顯微組織見圖 2，由圖知使用本研究之曳引熔煉設備及製程，可將鍍銅石墨顆粒直接加入鋁熔湯中，且碳化矽與石墨顆粒相當程度均勻分散於鋁合金基地中。

對磨擦係數而言，因鋁合金的質地較軟 (HRB54) 會因黏著效應使磨擦係數提高，5wt% 碳化矽顆粒型複合材料雖然硬度較高

(HRB76)，但碳化矽顆粒會犁割下試片而使磨擦係數變大。石墨顆粒含量 4wt% 及 6wt% 之磨擦係數最小，但是石墨顆粒含量 2wt% 及 8wt% 之磨擦係數較鋁合金大。這是因為石墨顆粒含量 2wt% 時，石墨顆粒在未完全轉換成潤滑薄膜時，即被磨耗面間產生之硬質磨屑，以研磨 (abrasive) 方式帶離磨耗面，使磨耗面無法形成較完整之潤滑膜。石墨顆粒含量 4wt% 及 6wt% 時，因適時形成連續潤滑膜而降低犁割現象。8wt% 石墨顆粒之磨擦係數陡增，是因為石墨顆粒聚集機會增加，聚集之石墨顆粒易形成微裂縫，使磨耗面產生部分脆性破壞，且因連鎖反應使其破壞先期釋放及附著其上之潤滑膜。另外，加上其硬度較軟 (HRB43) 易被犁割，因而使磨擦係數上升。

上試件磨耗面 SEM 照片見圖 3，鋁合金磨耗面產生嚴重的塑性變形及膠質 (seizing) 變形，因此俱縱向山脊狀 (longitudinal ridges) 及黏附扯斷 (adhesion parting) 的破壞型態見圖 3(a)，這是因為兩磨耗面於滑動時，硬質磨屑顆粒 (abrasive debris particulate) 與黏附磨耗兩種磨耗機構，同時產生所造成的。而基地加入 5wt% 碳化矽顆粒後，硬度提升使塑性變形的部分降低，且硬質磨屑顆粒產生犁割現象見圖 3 (b)。石墨顆粒含量 2wt% 時，磨耗面無形成較為完整之潤滑膜。4wt% 及 6wt% 石墨顆粒之磨耗面有較多的潤滑膜產生，且成以片狀堆疊，見圖 3(c)。石墨顆粒含量 8wt% 時，石墨顆粒聚集處之微裂縫在磨耗時會受到正向應力和剪應力的雙重作用，這種剪應力則會使微裂縫尖端的滑動位移與微裂縫平行，若表面延伸之裂縫尖端係完全塑性區時，則裂縫擴展方向與最大剪切應力方向平行見圖 3(d)。

當滑動速度較快時，潤滑膜較快形成且硬質磨屑較易排出磨耗面，使犁割現象較輕微，進而使磨擦係數下降。但是滑滯現象 (stick-slip) 與石墨潤滑層有脆性破壞的影響時，磨擦係數則隨滑動速度上升而變大。磨擦係數隨荷重增加而下降，這是在相同的轉速下往復式運動，荷重大可降低結構共振及減輕滑滯現象，因此磨擦係數也隨之下降，另外，當正向應力愈大時，分配至磨耗面之剪應力愈大，讓兩磨耗面之塑性變形量增加，使潤滑膜較易釋出且形成於磨耗面。另外，當正向力愈大時，潤滑膜較易被附著於磨耗面上而不易被旋出，因此使石墨潤滑層得以扮演其潤滑功用。對鋁合金而言，磨擦係數隨荷重增加而減少，這是因為荷重愈大，則分配至磨耗面之剪應力愈大，使其要克服爬上磨耗表面微凸體之驅動力較大，因而較易克服其活化能，而讓磨擦係數下降。

不同石墨顆粒含量之磨耗率見圖 4，加入碳化矽後明顯的降低磨耗率，這是因為基地硬度提升及含硬質碳化矽顆粒較能抵抗對手材

的磨耗。石墨顆粒含量 4 及 6wt% 時，磨耗率較小。這是因為潤滑膜於磨耗面上充分潤滑後才被旋出。而從細小條狀磨屑的存在證明碳化矽的犁割作用磨耗量並不大，主要之磨耗量來源為黏附磨耗與脆性剝離。8wt% 石墨顆粒含量，因脆性剝離使其磨耗率增加。A359 鋁合金因為材質較軟，產生塑性變形與黏附磨耗，所以磨耗量大。磨耗率隨滑動速度增加而遞減，這是因為滑動速度愈快石墨潤滑膜愈快形成，而充分的潤滑使黏附磨耗，而讓磨耗率降低。另外，荷重對於磨耗率沒有太大的影響。

複合材料其接觸電阻變化較鋁合金小見圖 5。這是兩磨耗面塑性變形時產生石墨潤滑膜，使實際接觸面積變大，但接觸電阻不因石墨含量變化而產生規則變化，這因為複合材料質地較軟或脆 (8wt%)，在磨耗面上會產生犁割現象，另外，鋁合金產生的磨屑易成為電之絕緣體。

A359 鋁合金硬度較小，所以較容易產生塑性變形，使磨耗面之溫度上升較快，進而產生局部之黏著磨耗，所以接觸電阻會較大。含 5wt% 碳化矽無石墨顆粒之複合材料，因犁割作用使接觸面積減少讓接觸阻抗值增加，且硬質磨屑無法導電，撐開上下試片使接觸阻抗值增加，但是磨屑排出之後接觸阻抗值便會下降。當石墨含量愈高時較易產生潤滑薄膜，讓接觸電阻值降低。4 wt% 和 6 wt% 的接觸阻抗變化較為平緩。石墨顆粒含量 8wt% 之接觸電阻變化及值最小，這是因為磨耗面有潤滑膜產生外，且質地脆產生之磨屑較小，所以磨屑會嵌入塑性變形時產生之犁割溝槽內且不易被旋出磨耗面，進而讓接觸面積增加。接觸電阻隨滑動速度增加而增加，這是因為當滑動速度愈快，兩滑動面之塑性變形量愈大，使滑動面之接觸面積減少，讓接觸電阻值增加。當荷重最大時，可以降低機台因往復運動而產生之震動效果與滑滯現象，讓上下試片緊密接觸的面積增加，而磨出之磨屑因為壓力大，填塞進犁割或黏著磨耗所產生的坑洞中增加接觸面積，使接觸電阻值下降，且因為壓力大所以塑性變形較大，也可增加接觸面積。當荷重最小時，因無足夠之正向力讓潤滑膜留置滑動面上，使潤滑膜易被旋拋出滑動面，且塑性變形產生之新潤滑膜來不及填補被旋出之潤滑膜區域，而減少磨耗面之接觸面積，所以接觸電阻值之變化及大小皆較大。

五、結論

本研究利用自行設計之曳引熔煉系統及石墨顆粒鍍銅技術，製得 A359/5wt% 碳化矽/0、2、4、6、8wt% 石墨顆粒型複合材料。並探討石墨顆粒含量、滑動速度及荷重對磨潤性

質之影響，其結論如下：

1. 石墨顆粒含量於 4 和 6wt% 中摩擦係數最小。摩擦係數會隨荷重及滑動速度增加而減少；
2. 碳化矽含量 5wt% 不含石墨顆粒磨耗率最小，鋁合金石墨顆粒含量 8wt% 之磨耗率最大。
3. 接觸電阻變化不隨石墨顆粒含量而產生規則變化，鋁合金之接觸電阻變化較複合材料大；接觸電阻隨滑動速度增加而增加；接觸電阻於不同荷重下相當。

五、誌謝

本研究蒙行政院國家科學委員會經費支援 (計畫編號：NSC 90-2212-E-032-400)，謹誌謝忱。另外，感謝成功大學機械系林仁輝教授在磨潤方面的指導及磨耗設備的支援。

六、參考文獻

- 1.D. Huda, M. A. El Bradie and M. S. J. Hashmi, Journal of Materials Processing Technology, Vol.37 (1993) pp.529-541.
- 2.K. Funatani and K. Kurosawa, Advanced Materials and Processes, Vol.146, No.6 (1994) pp.27-29.
- 3.A. T. Alpas and J. Zhang, Metall. Mater. Trans. A, Vol.25, No.5 (1994) pp.969-983.
- 4.A. K. Jha, S. V. Prasad and G. S. Upadhyaya, Wear, Vol.133(1989) pp.163-172.
- 5.P. R. Gibson, A. J. Clegg and A. A. Das, Wear, Vol.95, NO.2 (1984) pp.193-198.
- 6.Y. B. Liu, S. C. Lim, S. Ray and P. K. Rohatgi, Wear, Vol.159, No.2 (1992) pp.201-205.
- 7.Liu, P. K. Rohatgi and S. Ray, Metallurgical Transactions A, Vol.24, No.1 (1993) pp.151-159.
- 8.Rana and D. M. Stefanescu, Metallurgical Transactions A, Vol.20 (1989) pp.1564-1566.
- 9.Wang and H. J. Rack, Acta Metal., Vol.40 (1992) pp.2301-2305.
10. K. Kim, M. Kestursatya and P. K. Rohatgi, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol.31 (2000) pp.1283-1292.
- 11.S. Cowan and W. O. Winer, Friction, Lubrication and Wear Technology, ASM Handbook, Vol.18 (1992) pp.39-44.
- 12.B. P. Krishnan, M. K. Surappa and P. K. Rohatgi, Journal of Materials Science, Vol.16, (1981) pp.1209-1216.
- 13.P. H. Strickland and F. Lawson, Proc. Australasian Inst. Mining Met., Vol.242 (1972) pp.37.
- 14.Sato and D. Mathur, Metallurgical

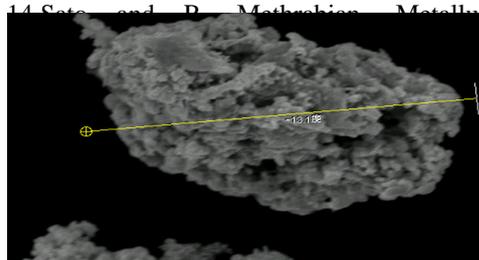


圖 1 石墨顆粒表面鍍銅之(a) SEM 照片;
(b) EDS 分析及(c) Mapping 圖

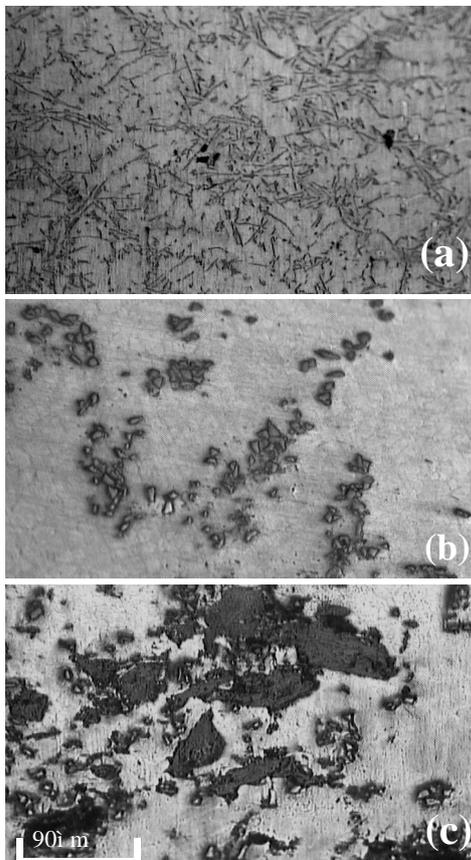


圖 2 (a)Al359; (b)Al359/5wt% SiC/0wt% Gr;
(c) Al359/5wt% SiC/8wt% Gr 之 OM

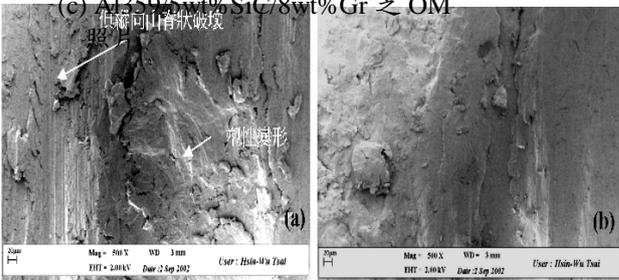


圖 3 A359 鋁合金/碳化矽/石墨顆粒型複合
材料，於荷重 0.37MPa 及滑動速度
0.92m/s 磨耗面之 SEM 照片(a)A359 ;(b)
0wt% ;(c) 4wt% ;(d) 8wt%

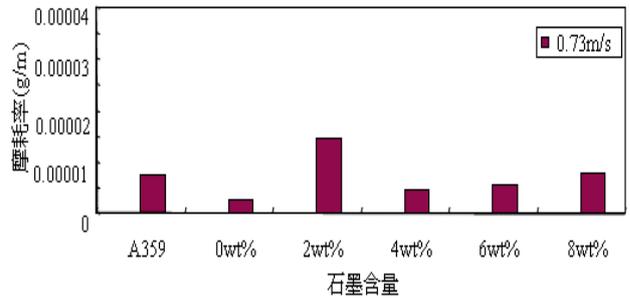


圖 4 不同石墨顆粒含量荷重 0.37MPa 及滑
動速度 0.73m/s 之上試件與磨耗率之
關係

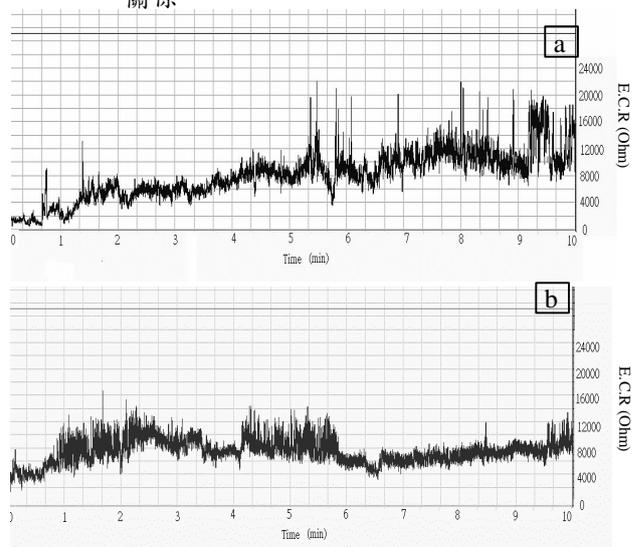


圖 5 (a)A359 鋁合金 (b) 8wt% 石墨顆粒含
量於磨耗參數: 荷重 0.49MPa 及滑動
速度 0.73m/s 之摩擦電阻關係圖