

鈷的添加對碳化鎢粒子強化銅基複合材料之耐磨耗腐蝕性的影響研究

李正國

Effect of Co Additive on the Wear Corrosion Resistance of WC Particulate-Reinforced Copper Matrix Composites

C.K.Lee

摘 要

本研究係利用粉末熱壓燒結法，製作Cu、Cu-WC及Cu-WC-Co之銅金屬基複合材料，探討不同粒徑（1、3、6、9 μm ）、不同含量（10、15、20 wt.%）之碳化鎢顆粒以及鈷的添加（1.5 μm ，5 wt.%），對銅金屬基複合材料之耐磨耗性與在3.5% 氯化鈉（NaCl）水溶液中（pH 6.7）之耐腐蝕性及耐磨耗腐蝕性的影響。

實驗結果顯示，於銅基材中添加碳化鎢可明顯提升其硬度，而且硬度隨碳化鎢之粒徑減小而增大，亦隨碳化鎢含量的增加而增大。於乾磨耗實驗中，碳化鎢的添加顯著地增加材料之耐磨耗性，而碳化鎢的粒徑較小，則具有較佳之耐磨耗性，並隨碳化鎢含量的增加，耐磨耗性也有明顯的提升，鈷的添加則可明顯增進抗磨耗性。銅基複合材料之耐腐蝕性及耐磨耗腐蝕性隨碳化鎢添加量的增加而變差，然而碳化鎢粒子較大時，銅-碳化鎢複合材料卻顯示較佳的耐蝕性及耐磨耗腐蝕性。鈷的添加使材料產生明顯的鈍化膜，因而增加了耐腐蝕性，並且可明顯地改善銅基複合材料之耐磨耗腐蝕性質。

關鍵詞：粉末熱壓燒結、銅金屬基複合材料、耐磨耗性、耐腐蝕性、耐磨耗腐蝕性。

Abstract

Wear-corrosion behaviors of Cu-WC and Cu-WC-Co copper based matrix composites, formed by hot pressing, were tested on a block-on-ring test machine in 3.5wt% NaCl aqueous solution (pH 6.7). The effects of both particle size and WC and Co contents on dry wear, corrosion, and corrosion-wear behaviors of the composites were investigated. The results indicated that both hardness and dry wear resistance of the composites increased with increasing WC content, and

* 清雲技術學院機械工程系

Department of Mechanical Engineering, Ching Yun Institute of Technology.

also increased with decreasing particle sizes. Co addition had a beneficial effect on the dry wear resistance. The corrosion and wear-corrosion resistance of Cu-WC composites decreased with increasing WC content. However, Co additive improved significantly both corrosion and wear-corrosion resistance of Cu-WC composites, which was strongly related to the increase of passivity.

Keywords: Cu-WC, Cu-WC-Co copper matrix composite, block-on-ring, dry wear resistance, corrosion resistance, wear-corrosion resistance.

一、前言

金屬基複合材料 (MMCs) 係於金屬基地中加入強化材，通常強化材為較硬的顆粒或纖維，使複合材料具較佳的強度、剛性或抗磨耗性，其中顆粒強化型金屬基複合材料 (PMMCs) 因具有較好的等向性 (isotropic properties)，故常被應用。金屬基複合材料結合了金屬基材與強化材的優點，具有比金屬材料優異的強度或抗磨耗等特性，但其抗腐蝕性卻不佳，銅基複合材料由於基材具高導熱、高導電以及在含氯環境下具較佳耐蝕性等優點^[1]，使銅基複合材料大量被應用於商業產品上，如軸承 (套)、煞車盤、滑輪、齒輪、電子封裝材、電刷等產品^[2]。

碳化鎢在工業上應用非常廣泛，主要是利用其高硬度、耐磨耗與韌性等特點，而鈷常作為碳化鎢之黏結金屬，添加鈷可提高材料之耐蝕及耐高溫特性，且有助於增加材料之抗震性 (shock resistance)^[3,4]。

本研究基於探討銅基複合材料之磨耗、腐蝕及磨耗腐蝕性質，選用抗磨耗性極佳之碳化鎢為強化材，與抗腐蝕性良好之銅為基材，以粉末熱壓燒結方式製成 Cu、Cu-WC 及 Cu-WC-Co 複合材料，探討在固定荷重、轉速下，碳化鎢及鈷的添加對銅基複合材料乾磨耗性質之影響，以及在 3.5% (pH 6.7) 之 NaCl 水溶液下，碳化鎢及鈷的添加對銅基複合材料腐蝕及磨耗腐蝕性質之影響。

二、實驗方法與步驟

所欲配製之銅基複合材料，其成分比例如表 1 所示，依據 WC 粒徑、WC 含量、Co 的添加等探討主題，將試片分組。

秤取所需之各種粉末，利用水平式球磨機，進行 12 小時的濕式混合，將混合後之粉末置入塗有氮化硼之 SKD61 熱壓模具中，進行 50MPa 持壓 3 分鐘之預壓，爾後於 600°C，施以 400MPa 持壓 30 分鐘之熱壓燒結，完成試片之製作。採用滲油法進行緻度量測，並以洛氏硬度 F 尺度 (Rockwell F Scale) 進行硬度值量測。

以 block - on - ring 方式進行乾磨耗與磨耗腐蝕試驗^[5,6,16]，其裝置如圖 1 所示。量測材料在磨耗轉動速率 0.24 m/s (200rpm)、荷重 20.6 N 下，磨耗量與磨耗距離的關係。於 4 公升 3.5% NaCl (pH 6.7) 水溶液中進行磨耗腐蝕實驗，將環型燒結陶瓷對磨塊 Al₂O₃ (外徑 22.5mm，內徑 13.0mm，寬 13.5mm)，固定於轉動軸上，而將試片固定於機台上，利用恆電位儀 [EG&G, Model:6310] 施加不同電壓，量測不同外加電位下，材料於磨耗轉動速率 0.24 m/s (200rpm)、荷重 20.6 N 磨耗 140 m 後，其磨耗率及電流與外加電位的關係。使用掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀察磨耗及磨耗腐蝕後材料破壞表面之形態。

使用恆電位儀 [EG&G, Model:6310]，進行電化學極化測試，參考電極與輔助電極分別為飽和甘

汞電極與白金 (Pt) 線，將試片置於 3.5% NaCl (pH 6.7) 水溶液中，以 1mV/s 之掃描速率進行極化掃描。

三、 結果與討論

本研究分三部份探討 Cu、Cu-WC 及 Cu-WC-Co 複合材料之磨耗、腐蝕及磨耗腐蝕性質：

- (1) 以 A0、A1、A3、A6、A9 試片進行試驗，探討 WC 粒徑對 Cu-10WC 複合材料之磨耗、腐蝕及磨耗腐蝕性質的影響。
- (2) 以 B0、B10、B15、B20 試片進行試驗，探討 WC 的含量對 Cu-WC (6 μm) 複合材料之磨耗、腐蝕及磨耗腐蝕性質的影響。
- (3) 以 C0、C1、C2 試片進行試驗，探討 Co 的添加對 Cu-10WC (6 μm) 複合材料之磨耗、腐蝕及磨耗腐蝕性質的影響。

3.1 WC 顆粒大小對 Cu-10WC 複合材料性質之影響

經熱壓燒結後之 Cu (A0) 及 Cu-10WC (A6) 複合材料，其微結構如圖 2 (a-b) 所示，由圖中可看出材料具良好之緻密性，不易由微結構中觀察出孔隙的存在，其緻密度達 98% 以上，如表 2 (A) 所示。含 WC 之 A1、A3、A6、A9 複合材料之硬度遠大於 A0 純銅材料之硬度，如表 2 (A) 所示。可知銅基材中添加 WC 顆粒可明顯提升其硬度，且硬度隨 WC 顆粒的粒徑減小而增大 (A1 > A3 > A6 > A9)。J.P.Tu^[7] 之研究中指出，銅基材中添加強化顆粒，具減少基材塑性變形的作用，因而硬度增加。因此銅基材中添加 WC 顆粒亦同樣有減少銅基材塑性變形的作用，使材料的硬度相對提升，而在相同含量 WC 的材料中，WC 顆粒的粒徑愈小其單位面積之顆粒愈多，因此其硬度愈高。

A0、A1、A3、A6、A9 複合材料在磨耗轉動速率 0.24 m/s (200rpm)、荷重 20.6 N 下，其磨耗損失與

磨耗距離的關係如圖 3 所示。當磨耗距離增加時，材料的磨耗損失也隨之增加，而添加 WC 之複合材料明顯比純銅材料的磨耗損失低。純銅 (A0) 質地較軟，與極硬之陶瓷對磨時，其磨耗損失較為嚴重，而材料表面受摩擦力作用，產生塑性變形及黏著磨耗 (adhesive wear) 現象，如圖 4 (a) 所示。而含有 WC 的複合材料 (A1、A3、A6、A9) 於磨耗時，由於 WC 能阻止基材的塑性變形，且其質地較為堅硬，能承受較高應力與磨耗，故其抗磨耗性較佳。WC 顆粒愈小之複合材料，其單位面積含有之 WC 顆粒愈多，所以阻止塑性變形及抗磨耗能力愈佳，抗磨耗能力相對提高。如圖 4 (b) 所示，含較小 WC 顆粒 (3 μm) 之複合材料，其磨耗表面有較多刮痕存在，其破壞形態以研磨磨耗 (abrasive wear) 為主。而在圖 4 (c) 中，WC 顆粒較大 (9 μm) 的複合材料，其磨耗面有裂痕的發生，而這些裂痕多發生於顆粒與基材界面處，這是由於磨耗時，複合材料不僅承受正向應力，亦同時受到剪應力作用^[7]，這些應力多半由 WC 顆粒所承受，WC 顆粒愈大之複合材料，其單位面積含有之 WC 顆粒愈少，因此單獨顆粒承受較大應力，使其較易與基材剝離。

將試片於 3.5% NaCl (pH 6.7) 之水溶液中，利用恆電位儀進行極化曲線量測，如圖 5 所示。由圖中可發現添加 WC 明顯使複合材料的腐蝕電位 (E_{corr}) 提升，這是由於添加了較貴性的 WC 所致，而 WC 的粒徑對 Cu-10WC 複合材料的腐蝕電位並無絕對的趨勢。但由於 Cu-WC 複合材料中，WC 與基材的結合界面，因為異相結合且有應力殘留，提供了較佳腐蝕起點，所以 WC 的添加使複合材料的腐蝕電流 (i_{corr}) 增大，而 WC 的粒徑較小之 Cu-10WC 複合材料，因為 WC 相對較多，使 Cu-WC 界面增加，故其腐蝕電流較高。腐蝕電位 (E_{corr}) 與腐蝕電流 (i_{corr}) 值列於表 3 (A) 中。

於 4 公升 3.5% NaCl (pH 6.7) 水溶液中進行磨耗腐蝕實驗，由圖 6 (a) 中可知，複合材料之磨耗

率隨外加電位往陽極方向提高而增加，位於陰極電位時（相對 OCP 電位），磨耗率非常小，這是由於陰極電位時，幾乎無腐蝕的效應，主要為機械性的磨耗破壞，而處於陽極電位（相對 OCP 電位）磨耗時，材料受到腐蝕作用，加上磨耗造成嚴重材料損失^[8-11]，腐蝕與磨耗相互加成的結果，造成複合材料於陽極電位時，磨耗率隨電位急劇上升。由圖中可看出，Cu-WC 複合材料的磨耗率比純 Cu 材料大，這是由於 WC 顆粒的添加，造成許多 Cu-WC 界面的產生，這些地方成為腐蝕的起點，不僅造成材料損失，更加劇了磨耗作用，使其磨耗率較大。由圖中亦發現 WC 的粒徑對磨耗腐蝕率並無一定的影響，這是由於磨耗腐蝕性質與磨耗、腐蝕性質皆相關，由磨耗與腐蝕試驗中可知，WC 粒徑較小之複合材料其抗磨耗性較佳，但抗腐蝕性卻不佳，而 WC 粒徑較大之複合材料恰相反，因此在磨耗與腐蝕相互作用的狀態下，WC 粒徑大小與磨耗率並無一定相關。圖 6 (b) 之相對電流與電位的關係圖中，電流同樣隨電位升高而增加，Cu-WC 材料電流較純 Cu 大，電流的趨勢與磨耗率相同，證明了電位的愈高其腐蝕情形愈嚴重，也加速了磨耗作用，使材料的磨耗率遽增^[12-14]。圖 7 為 A0 及 A6 材料磨耗腐蝕後的表面微結構，與乾滑動磨耗之磨耗面相較，其表面較為光滑平坦，這是由於溼式磨耗時，表面受到溶液潤滑及清洗之故。由圖 7 (a) 中看出，純銅材料仍以塑性變形磨耗為主，但其表面較乾磨耗平整，較無層狀黏著磨耗現象。而 Cu-10WC 複合材料磨耗面有明顯腐蝕孔洞，顯示材料受到孔蝕作用，並發現顆粒剝落現象，證明腐蝕的確造成 WC 與基地接合性變差，而加劇了磨耗作用，如圖 7 (b) 所示。

3.2 WC含量對Cu-WC複合材料性質的影響

熱壓燒結後之 Cu-15WC (B15) 及 Cu-20WC (B20) 複合材料，其微結構如圖 8 (a-b) 所示，可看出 Cu-WC 材料中 WC 顆粒的分佈大致均勻，緻密

度高達 97.7% 以上。如表 2 (B) 所示。如表 2 (B) 所示，Cu-WC 複合材料硬度隨 WC 含量的增加而增大。由於 WC 的含量愈多，阻止銅基地塑性變形之 WC 顆粒愈多，因此其硬度也相對愈高。

B0、B10、B15、B20 之複合材料在磨耗轉動速率 0.24 m/s (200rpm)、荷重 20.6 N 下，其磨耗損失與磨耗距離的關係如圖 9 所示。由圖中可知，複合材料的磨耗損失隨磨耗距離增加而增大，而當 WC 含量的增加時，磨耗損失呈遞減趨勢^[15]。由於 WC 含量增加，其硬度及耐磨耗之 WC 顆粒相對較多，其抗磨耗能力亦愈佳。由圖 10 (b) 與圖 10 (a) 比較，可看出 B20 複合材料，其磨耗面與 B10 明顯不同，並無顆粒剝離基地現象，其表面裂痕亦較少，可看出其抗磨耗能力較佳之原因。

將試片於 3.5% NaCl (pH 6.7) 之水溶液中，利用恆電位儀進行極化曲線量測，由圖 11 及表 3 (B) 中可看出，Cu-WC 材料中，WC 含量的多寡 (10%、15%、20%) 對腐蝕電位 (E_{corr}) 並無明顯的影響，但其腐蝕電流 (i_{corr}) 卻有明顯差異。WC 含量的增加造成腐蝕電流 (i_{corr}) 上升，這是由於 Cu 與 WC 顆粒的接合界面增加了，這些界面為較易腐蝕的地方，因此隨 WC 顆粒愈多受到的腐蝕作用愈大，造成腐蝕電流 (i_{corr}) 增大。

Cu-WC 複合材料的磨耗腐蝕率，隨 WC 的含量提高有增加的現象，如圖 12 (a) 所示。WC 含量較高之材料，其抗磨耗性雖較佳，但磨耗腐蝕損失仍較大，由此可知於 B10、B15、B20 材料中，腐蝕性質主導磨耗腐蝕狀態下材料的損失量，而 WC 含量愈多，其 Cu-WC 界面愈多，如前所言，其受腐蝕效應愈大，加劇了磨耗作用，造成磨耗時材料損失量愈大。由圖 12 (b) 可看出，隨電位的增加而電流增大，證明了電位愈高，腐蝕作用愈大，對磨耗腐蝕率亦有相對的影響。且 WC 含量愈高電流亦愈大，證明 WC 含量較高之材料於磨耗腐蝕時，腐蝕作用的確較大，造成較大磨耗腐蝕率。圖 13 為 B15 複合材料磨耗腐蝕後的表面微結構，圖 13 (a) 中發

現Cu、WC 界面及WC 顆粒附近會有腐蝕孔洞出現，這些孔洞於磨耗腐蝕過程中除造成材料損失外，亦可能造成WC 顆粒剝落或顆粒研磨 (abrasion) 基地現象，如圖 13 (b) 所示，使磨耗損失增加，也降低了材料抗磨耗腐蝕性質。隨著 WC 含量的增加，B20 複合材料磨耗面產生更多腐蝕孔洞，於磨耗腐蝕過程中更容易造成材料損失，如圖 14 所示，亦使材料損失量增加。

3.3 Co的添加對Cu-10WC材料性質的影響

經熱壓燒結後之Cu-WC-Co 複合材料，微結構如圖 15 所示，由於WC與Co的粒徑不同，散佈於銅基材上顯現出顆粒大小不均的分佈情形，微結構明顯與Cu-WC不同。如表2 (C) 所示，由C1及C2材料硬度值的比較，發現Co的添加可提升Cu-WC複合材料的硬度。

C0、C1、C2 複合材料之磨耗損失與磨耗距離的關係如圖 16 所示，複合材料的磨耗損失隨磨耗距離增加而增大，且當Cu-WC 複合材料中添加Co時，其磨耗損失明顯降低。A.R.Truceman^[22]之研究中指出，添加Co有助於改善金屬基複合材料表面之抗震性質 (shock resistance)。於磨耗時材料表面承受些許的震動衝擊，而Co的添加或許有助於抗震而降低其磨耗損失，而Cu-WC-Co 複合材料硬度亦較高，更使抗磨耗性增加。圖 17 為Cu-WC-Co 複合材料之磨耗表面微結構，與Cu-WC 複合材料相較下，並無顆粒剝離基地現象，亦無表面裂痕存在。

圖 18 為C0、C1、C2 複合材料的極化曲線，圖中可發現添加了較貴性的WC 明顯使Cu-WC 複合材料的腐蝕電位 (E_{corr}) 提升，而添加了較活性的Co後，使Cu-WC-Co 複合材料的腐蝕電位 (E_{corr}) 下降，如表 3 (C) 所示。而由Cu-WC-Co 複合材料的極化曲線，可明顯看出鈍化現象的發生。於3.5% NaCl (pH 6.7) 水溶液中進行靜置腐蝕實驗，由圖 19 可看出，Co 的添加明顯提升了Cu-WC 複合材料

的抗腐蝕性。這是因為Cu-WC-Co 複合材料具有鈍化性質，使材料較不易受到腐蝕，其腐蝕損失相對降低。

添加Co於Cu-WC 複合材料中，如圖 20 (a) 所示，明顯使其陽極電位之磨耗率降低，尤其在其鈍化電位區內，磨耗率遠比其他複合材料低^[6]，證明鈍化膜保護下，可降低材料的磨耗腐蝕率，當電位超過鈍化電位區後，磨耗率快速增加，整體而言，Co的添加明顯增加了Cu-WC-Co 複合材料之抗磨耗腐蝕性質。圖 20 (b) 為其相對電流-電位圖，由圖中可看出，電流的趨勢與磨耗率有相當的一致性。圖 21 為C2 複合材料磨耗腐蝕後的表面微結構，由圖中發現，表面蝕孔明顯減少，表面亦無裂縫、刮痕或顆粒剝落等現象。

四、 結論

綜合Cu、Cu-WC 及Cu-WC-Co 複合材料，進行磨耗、腐蝕及磨耗腐蝕之研究，可歸納出下列結論：

1. 於銅基材中添加WC 顆粒可明顯提升其硬度及抗磨耗性，WC 粒徑愈小其硬度及抗磨耗性愈高，而WC 含量愈高則硬度及抗磨耗性亦愈佳。
2. 在3.5% NaCl (pH 6.7) 水溶液中，Cu-WC 複合材料之極化行為明顯與純Cu 材料不同，WC 的添加使Cu-WC 複合材料腐蝕電位提高，而使腐蝕電流增大。腐蝕電位值與WC 粒徑及含量無絕對關係。但腐蝕電流隨WC 含量愈高而愈大，且WC 粒徑較小亦使腐蝕電流增大。
3. 在磨耗與腐蝕相互作用之狀態下，Cu-WC 複材之磨耗率較純Cu 材料大。WC 之粒徑與磨耗腐蝕率並無相關趨勢，但WC 含量愈高，其磨耗腐蝕率愈大。
4. 於3.5% NaCl (pH 6.7) 水溶液中，Cu-WC-Co 複合材料的腐蝕電位明顯比Cu-WC 複合材料低，但極化曲線有明顯鈍化現象。

5. Cu-WC-Co 複合材料在3.5% NaCl (pH 6.7) 水溶液中，其靜態浸漬腐蝕重量損失抵抗性比Cu及Cu-WC材料優良。
6. 添加Co於Cu-WC複材中，可明顯提升其抗磨耗性質。Cu-WC-Co具極佳之耐磨耗腐蝕性質，於鈍化電位區進行磨耗時，具有極低之磨耗腐蝕率。

五、參考文獻

1. F.E.Kennedy, A.C.Balbahadur, D.S.Lashmore, Wear, 203-204(1997)715-721.
2. B.K.Prasad, Metallurgical and Materials Transactions A, 28A(1997) 809-815.
3. 桂業煒, 胡國平, “碳化鎢硬面材料”, 粉末冶金會刊, 24(4)(1999) 257-262.
4. A.R.Trueeman, D.P.Schweinsberg, G.A.Hope, Corrosion Science 41(1999)1377-1389.
5. "Wear testing", Metals Handbook 9th, Amerian Society for Metals, Vol.8 (1985)601-608.
6. ASTM G77-91, ASTM Standards, Vol.03.02, 1991.
7. J.P.Tu, L.Meng, M.S.Liu, Wear, 220(1998)72-79.
8. A.W.Batchelor, G.W.Stachowiak, Wear, 123(1998)281-291.
9. D.Kotlyar, C.H.Pitt, M.E.Wadsworth, Corrosion, 44(4)(1988)221-228.
10. R.E.J.Noel, A.Ball, Wear, 87(1983)351-361.
11. C.K.Fang, C.C.Huang, T.H.Chuang, Metallurgical and Materials Transactions A, 30A(1999)643-651.
12. H.Y.Bi, X.X.Jiang, S.Z.Li, Wear, 225-229(1999) 1043-1049
13. X.X.Jiang, S.Z.Li, D.D.Tao, J.X.Yang, Corrosion, 49(10)(1993)836-841.
14. B.W.Madsen, Wear, 123(1988)127-142.
15. W.Simm, S.Freti, Wear, 129(1989)105-121.
16. C.K.Lee, H.C.Shih, Corrosion, 50(11)(1994)848-856.

表 1 試片種類及成份

(A)

試片編號	試片 成份	Cu(wt.%)	WC(wt.%)
A0	Cu	100	-
A1	Cu-1 μ mWC	90	10
A3	Cu-3 μ mWC	90	10
A6	Cu-6 μ mWC	90	10
A9	Cu-9 μ mWC	90	10

(B)

試片編號	試片 成份	Cu(wt.%)	WC(wt.%)
B0	Cu	100	-
B10	Cu-10WC	90	10
B15	Cu-15WC	85	15
B20	Cu-20WC	80	20

註：B10、B15、B20試片，WC粒徑為6 μ m。

(C)

試片編號	試片 成份	Cu(wt.%)	WC(wt.%)	WC(wt.%)
C0	Cu	100	-	-
C1	Cu-10WC	90	10	-
C2	Cu-20WC-5Co	85	10	5

註：C0、C1、C2試片，WC粒徑為6 μ m，Co粒徑為1.5 μ m。

表2 材料緻密度與硬度

(A)

試片	硬度 (HRF)	理論密度 (g/cm ³)	緻密度 (%)	
A0	Cu	62.6(1.9)	8.93	98.5
A1	Cu-1 μ mWC	78.5(0.7)	9.33	98.5
A3	Cu-3 μ mWC	75.7(1.5)	9.33	98.7
A6	Cu-6 μ mWC	71.6(0.4)	9.33	98.3
A9	Cu-9 μ mWC	70.9(0.5)	9.33	98.1

(B)

	試片	硬度 (HRF)	理論密度 (g/cm ³)	緻密度 (%)
B0	Cu	62.6(1.9)	8.93	98.5
B10	Cu-10WC	71.6(0.4)	9.33	98.3
B15	Cu-15WC	76.0(0.5)	9.33	97.7
B20	Cu-20WC	77.1(0.5)	9.77	98.4

(C)

	試片	硬度 (HRF)	理論密度 (g/cm ³)	緻密度 (%)
C0	Cu	62.6(1.9)	8.93	98.5
C1	Cu-10WC	71.6(0.4)	9.33	98.3
C2	Cu-15WC-5Co	75.5(2.3)	9.33	96.3

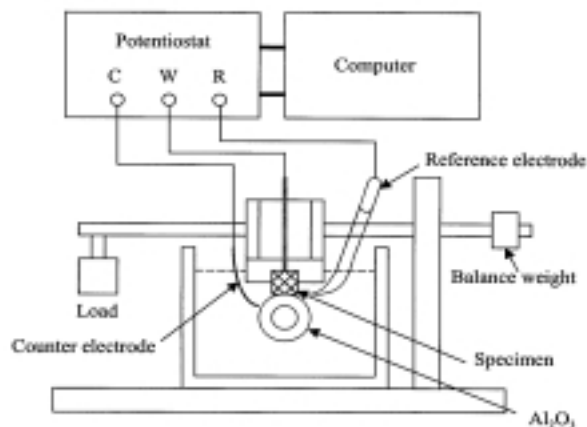


圖 1 磨耗腐蝕試驗示意圖

表 3 腐蝕電位、腐蝕電流

(A)

	試片	E_{corr} (mV _{SCE})	i_{corr} (μ A/cm ²)
A0	Cu	-254.2	5.8
A1	Cu-1 μ mWC	-222.3	6.9
A3	Cu-3 μ mWC	-228.6	7.4
A6	Cu-6 μ mWC	-212.0	6.2
A9	Cu-9 μ mWC	-226.1	6.5

(B)

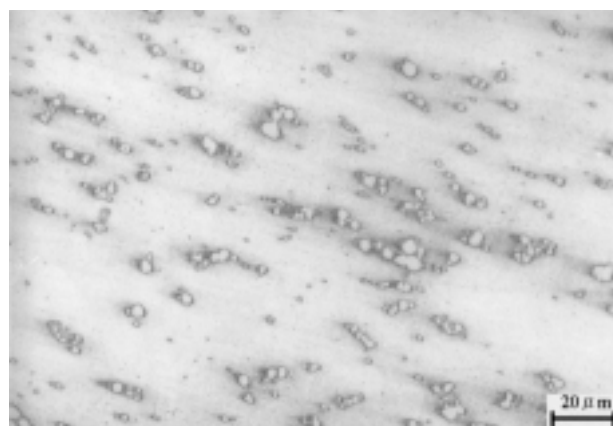
	試片	E_{corr} (mV _{SCE})	i_{corr} (μ A/cm ²)
B0	Cu	-254.2	5.8
B10	Cu-10WC	-212.0	6.2
B15	Cu-15WC	-197.4	8.1
B20	Cu-20WC	-204.6	9.5

(C)

	試片	E_{corr} (mV _{SCE})	i_{corr} (μ A/cm ²)
C0	Cu	-254.2	5.8
C1	Cu-10WC	-212.0	6.2
C2	Cu-10WC-5Co	-300.5	11.6



(a)



(b)

圖 2 熱壓燒結後，將材料研磨拋光之微結構
(a) A0 (b) A6

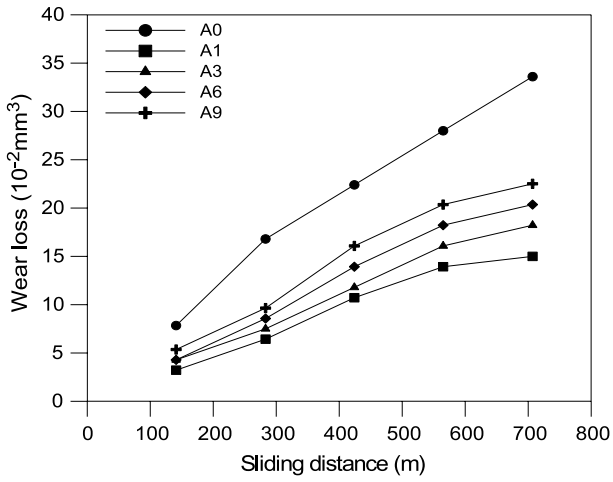
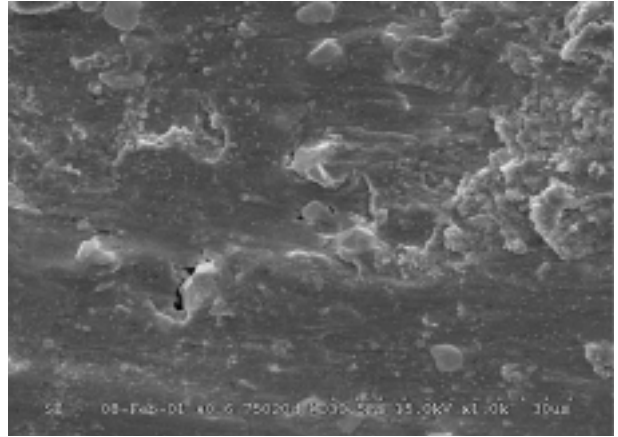
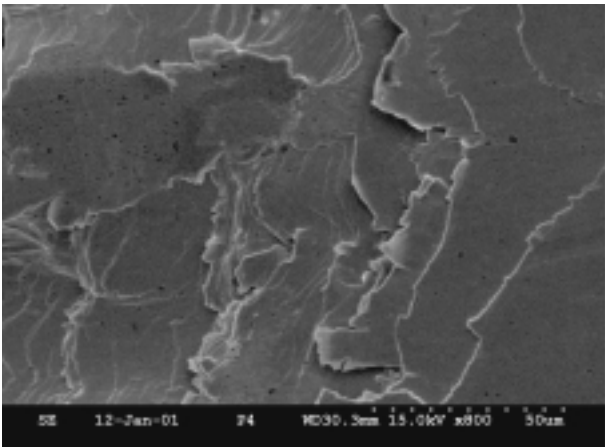


圖 3 A組材料在磨耗轉動速率 0.24 m/s(200rpm) 及荷重 20.6 N 下，磨耗損失與磨耗距離的關係

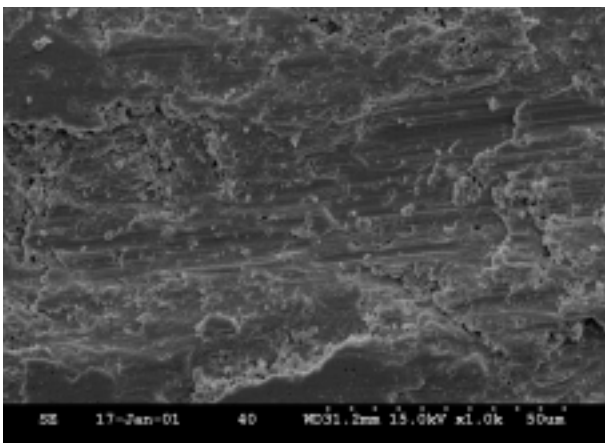


(c)

圖 4 磨耗轉動速率0.24 m/s(200rpm) 及荷重 20.6 N 下，磨耗700 m 後之破壞表面形態，材料 (a) A0 (b) A3 (c) A9



(a)



(b)

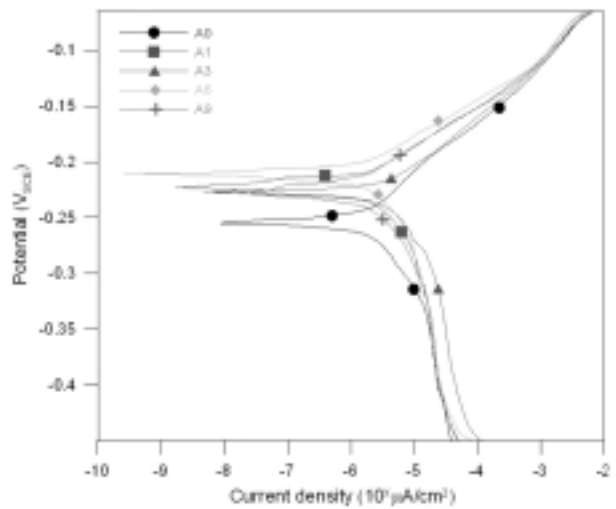
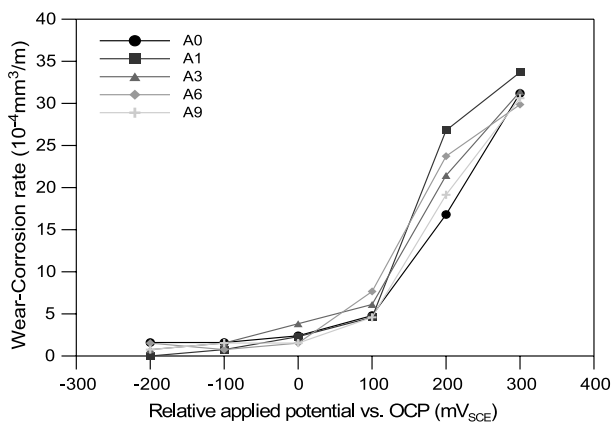
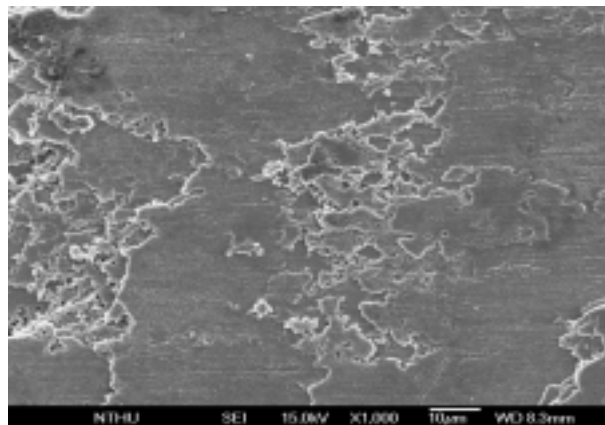


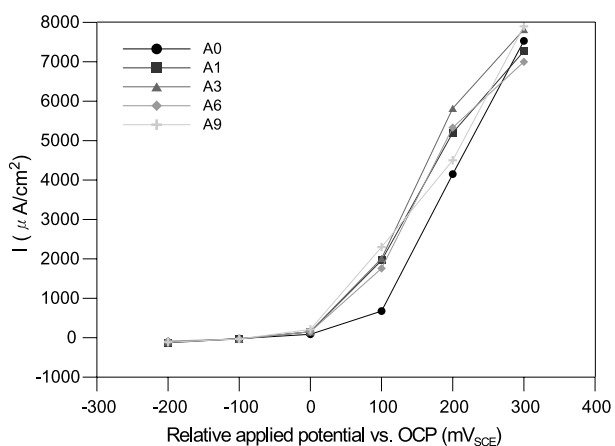
圖 5 材料A0、A1、A3、A6、A9 於 3.5% NaCl (pH 6.7) 之水溶液中之動態極化曲線



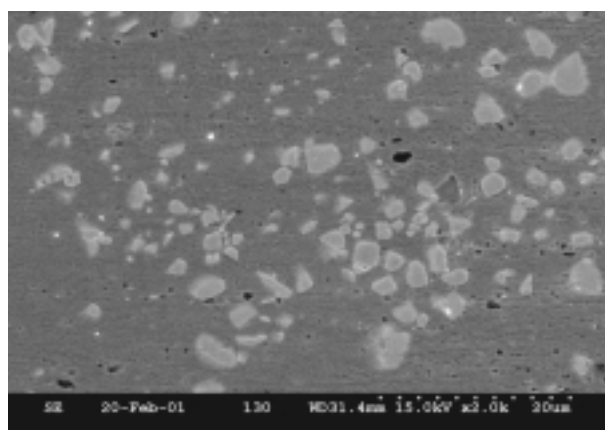
(a)



(a)



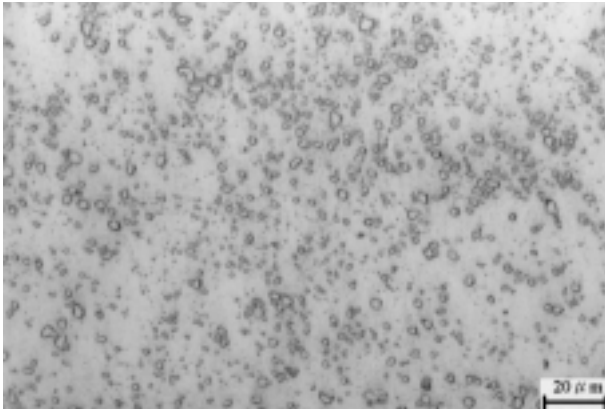
(b)



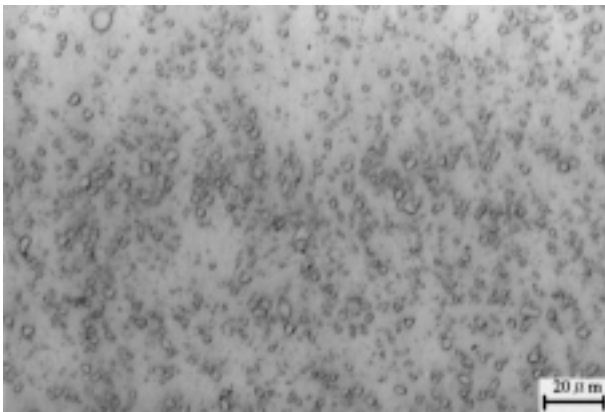
(b)

圖 6 材料A0、A1、A3、A6、A9於3.5% NaCl (pH 6.7) 水溶液中，磨耗轉動速率0.24 m/s(200rpm) 及荷重20.6N 磨耗下，於不同外加電位磨耗140 m後，其 (a) 相對電位 (相對OCP電位) 與磨耗率 (b) 相對電位 (相對OCP電位) 與電流之關係

圖 7 於外加OCP+300 mV電位，磨耗腐蝕140 m 後，材料 (a) A0 (b) A6之破壞表面形態

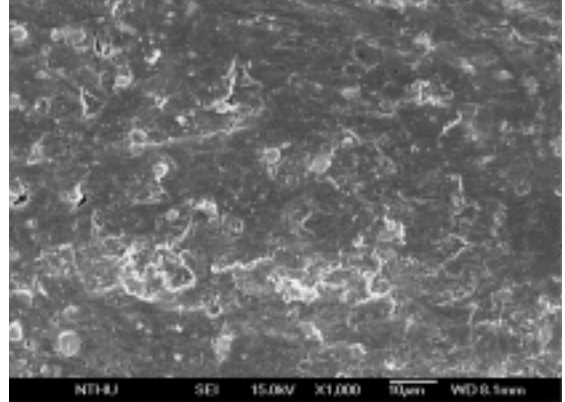


(a)

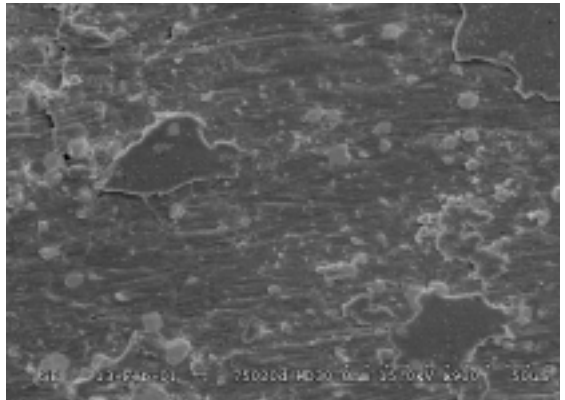


(b)

圖 8 熱壓燒結後，將材料研磨拋光之微結構
(a) B15 (b) B20



(a)



(b)

圖10 磨耗轉動速率0.24 m/s(200rpm)及荷重20.6 N下，磨耗700 m後之破壞表面形態，材料 (a) B10 (b) B20

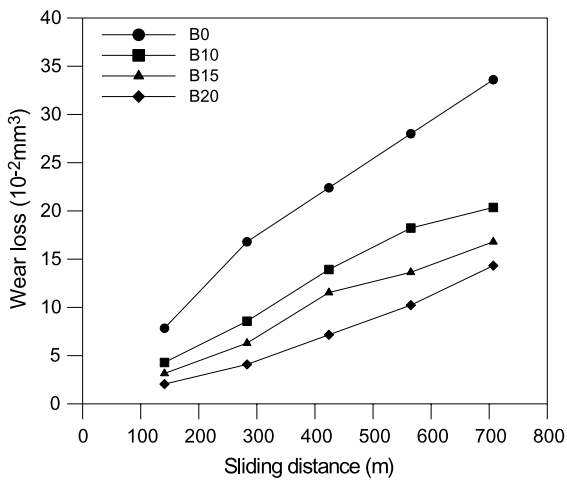


圖 9 B組材料在磨耗轉動速率0.24 m/s(200rpm)及荷重20.6 N下，磨耗損失與磨耗距離的關係

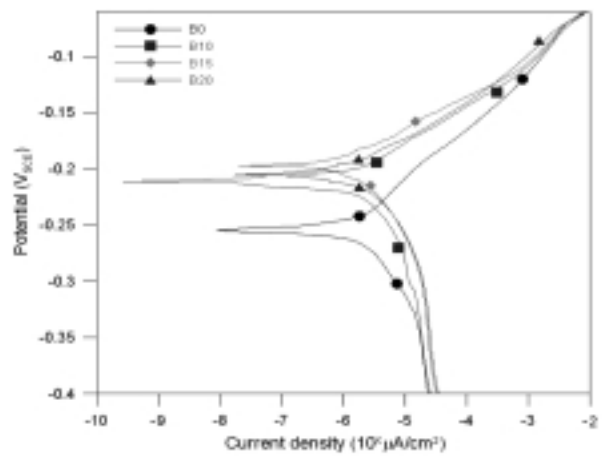
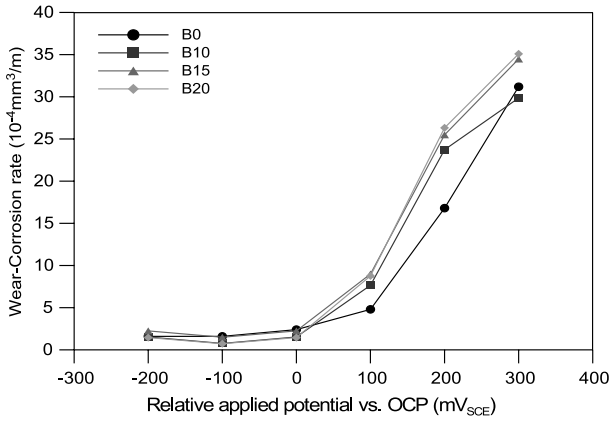
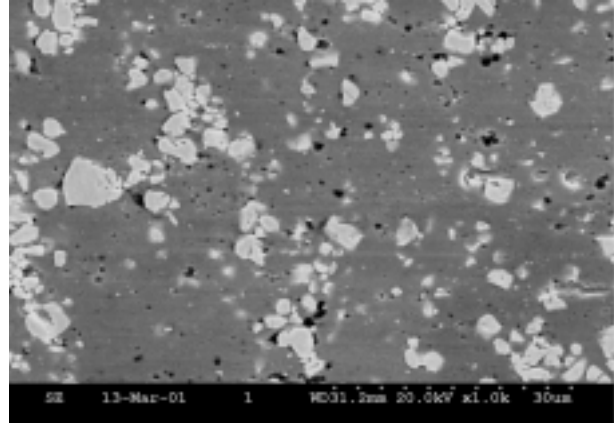


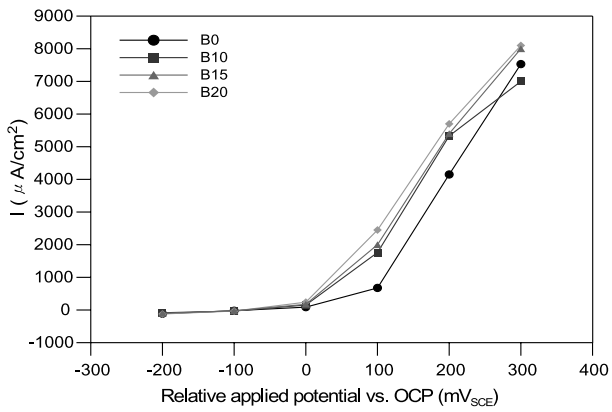
圖 11 材料B0、B10、B15、B20於3.5% NaCl(pH 6.7)水溶液中之動態極化曲線



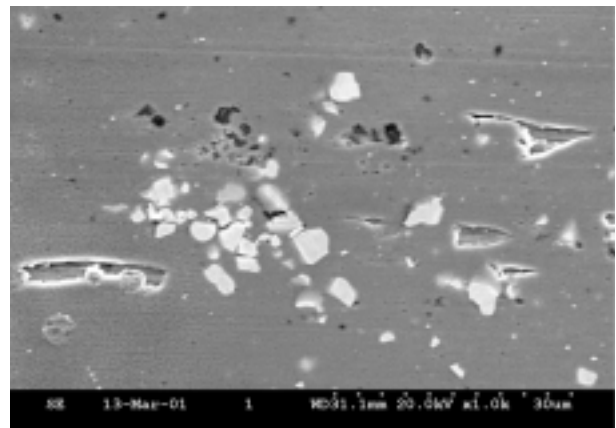
(a)



(a)



(b)



(b)

圖12 材料B0、B10、B15、B20於3.5% NaCl (pH 6.7) 水溶液中，磨耗轉動速率0.24 m/s (200rpm)及荷重20.6 N磨耗下，於不同外加電位磨耗140 m 後，其 (a) 相對電位 (相對 OCP電位) 與磨耗率 (b) 相對電位 (相對 OCP電位) 與電流之關係

圖13 材料B15於 OCP+300mV 電位，磨耗腐蝕140m 後之破壞表面形態

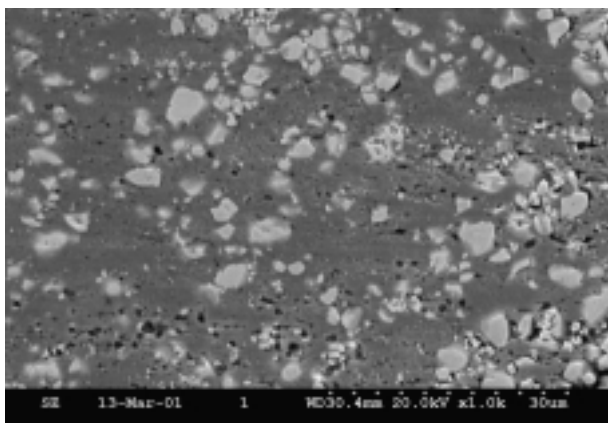


圖14 材料B20 於 OCP+300mV 電位，磨耗腐蝕 140m 後之破壞表面形態

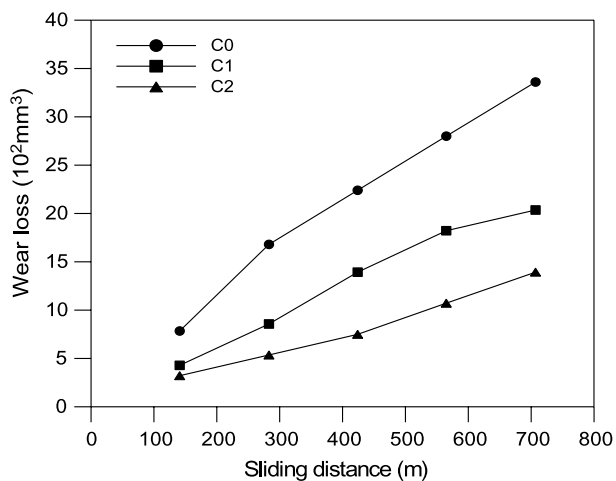


圖16 C 組材料在磨耗轉動速率0.24 m/s (200rpm) 及荷重20.6 N 下，磨耗損失與磨耗距離的關係

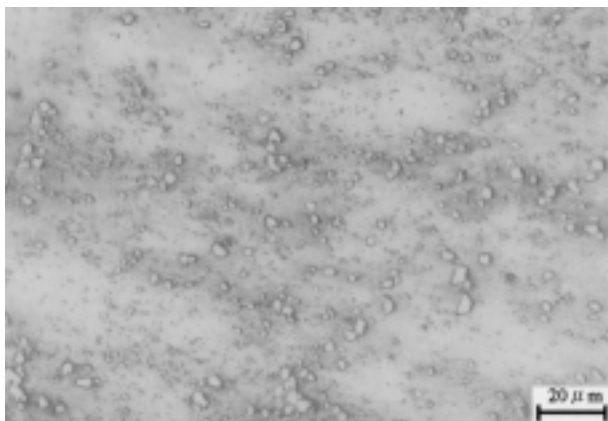


圖15 熱壓燒結後，材料C2 研磨拋光之表面微結構

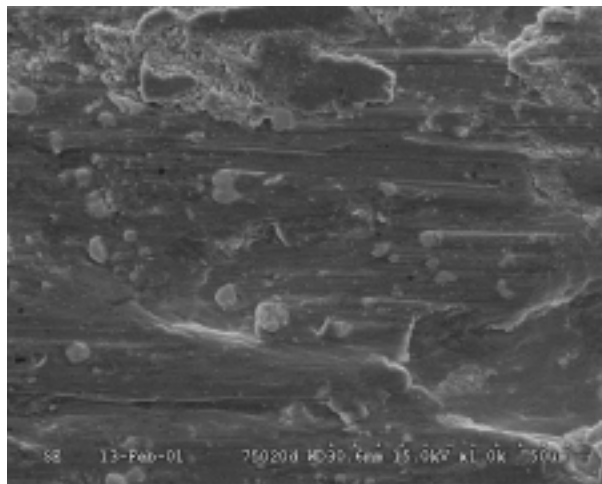


圖17 C2 材料在磨耗轉動速率0.24 m/s (200rpm)及荷重20.6 N 下，磨耗700 m 後之破壞表面形態

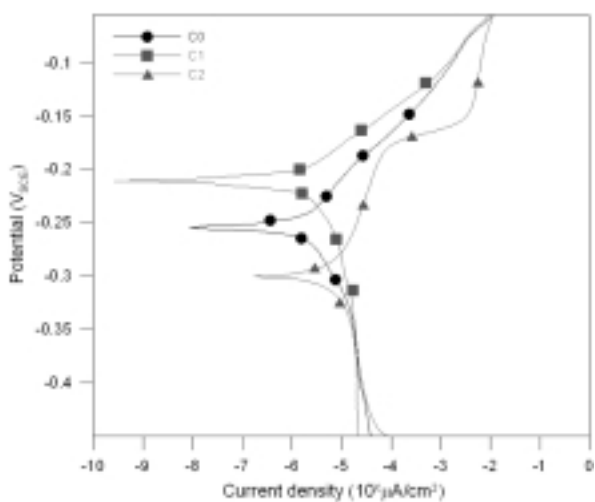
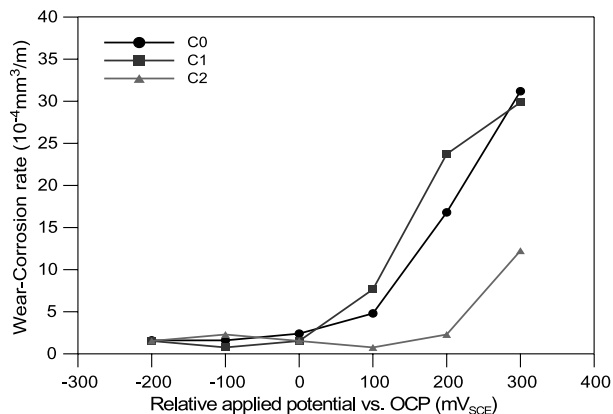


圖18 材料C0、C1、C2於3.5% NaCl(pH 6.7)水溶液中之動態極化曲線



(a)

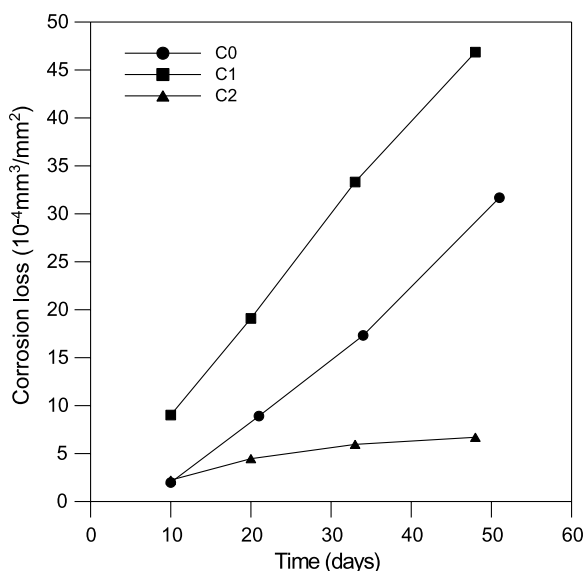
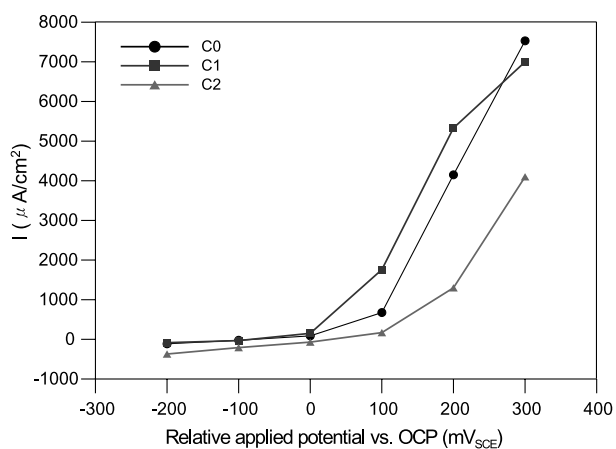


圖19 材料C0、C1、C2於3.5% NaCl(pH 6.7)水溶液中，其腐蝕損失與靜置時間之關係



(b)

圖20 C0、C1、C2材料於3.5% NaCl(pH 6.7)水溶液中，磨耗轉動速率0.24 m/s(200rpm)、荷重20.6 N磨耗下，於不同電位磨耗140 m之 (a) 相對電位(相對OCP電位)與磨耗率之關係 (b) 相對電位(相對OCP電位)與電流之關係

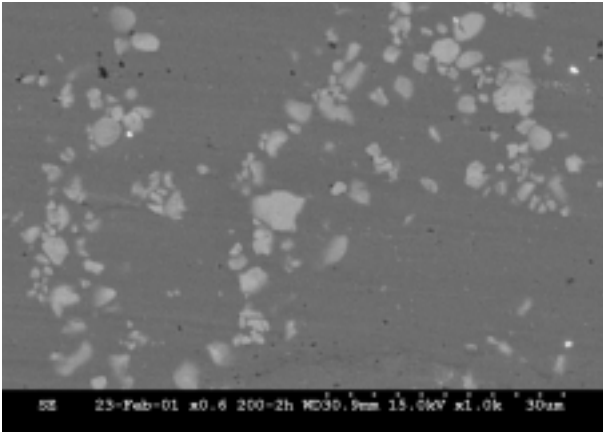


圖21 C2 材料於OCP+300mV 電位，磨耗腐蝕140m 後之破壞表面形態