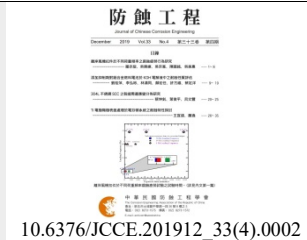




防蝕工程

期刊網址：<http://www.anticorr.org.tw>



添加抑制劑對鋁合金燃料電池於 KOH 電解液中之耐蝕性質評估 The corrosion property of anode in aluminum alloy fuel cell with the addition of inhibitor in KOH electrolyte

劉桂萍¹、李弘彬^{*2}、林清同³、顏宏任⁴、許方維⁴、蔡定洋⁴

Liu Keui-Ping¹, Lee Hung-Bin^{*2}, Lin Ching-Torng³, Yan Hong-Ren⁴, Hsu Fang-Wei⁴,
Tsai Ting-Yang⁴

中文摘要

本研究主要針對鋁合金燃料電池中的陽極採用 1050 系列及 6061 系列，探討電池性能；電解溶液以氫氧化鉀(KOH)為主，在添加不同分子量的聚乙二醇 600 (PEG600)、聚乙二醇 1000 (PEG1000)抑制劑，進行不同電化學測試，探討 1050 系列及 6061 系列的鋁材在電解液中的腐蝕效能，發現在純 KOH 電解液進行定電流測試，1050 鋁合金電導率優於 6061 鋁合金。而抑制劑則可以由極化曲線得知濃度在 3.0 wt%時，PEG1000 比 PEG600 有較高的腐蝕電位與較小的腐蝕電流密度，顯示 PEG1000 有最細密分子，具有良好抑制效果。

關鍵詞：鋁合金燃料電池、氫氧化鉀、聚乙二醇。

Abstract

The performances of aluminum alloy fuel cells incorporating 1050 and 6061 aluminum alloy anodes were mainly investigated in this study. The electrolyte adopted in the fuel cell consisted of potassium hydroxide (KOH) and two different polyethylene glycol (PEG) inhibitors- PEG600 and PEG1000, respectively. With different

收到日期：108 年 02 月 22 日

修訂日期：108 年 09 月 09 日

接受日期：108 年 07 月 31 日

¹ 大葉大學醫療器材設計與材料碩士學位學程

¹ Bachelor Program for Design and Materials for Medical Equipment and Devices, Da-Yeh University

² 國立台灣海洋大學光電與材料科技學系

² Department of Optoelectronics and Materials Technology, National Taiwan Ocean University

³ 大葉大學資訊管理學系

³ Department of Information Management, Da-Yeh University

⁴ 大葉大學材料科學與工程學系

⁴ Department of Materials Science and Engineering, Da-Yeh University

*聯絡作者：lhb6018@mail.ntou.edu.tw

electrochemical measurements, the electrical output performance of Al1050 was better than its Al6061 counterpart in pure KOH electrolyte without inhibitor. With the addition of 3 wt% of inhibitor, the aluminum alloy in electrolyte with PEG1000 showed higher corrosion potential and lower corrosion current than with PEG600. The result confirmed the PEG1000 inhibitor having denser molecule compaction exhibits better corrosion suppression.

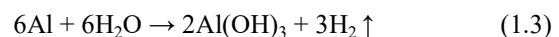
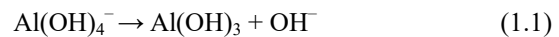
Keywords: Aluminum alloy fuel cell; potassium hydroxide; polyethylene glycol (PEG).

1. 前言

鋁金屬具高活性可在酸鹼中性的環境中皆會發生反應，當加入適當濃度的鹼性電解液時，鋁陽極可在低的電位下產生高電流密度之特性，並獲得較高的能量密度，然而，這種活性也使得鋁在鹼性溶液中發生強烈的自腐蝕反應而損失重量。同時放出的大量氫氣以及自放熱等現象，帶來安全等問題^[1, 2]。由於金屬鋁在鹼性溶液中的電化學氧化和腐蝕過程及其複雜，因此對其反應機制的研究尚存在著不同的看法。許多研究者發現一些有效的溶液緩蝕劑(PEG600、PEG1000)和合金元素，可顯著抑制鋁在強鹼性溶液中的腐蝕並改善電化學性能，可能是由於它們的作用機制比較複雜之緣故，尚缺乏對緩蝕劑和合金元素的作用機制的系統研究^[3]。

鋁電位之理論值電位(Theoretical Potential)於中性電解液為-1.66 V (vs SHE)；鹼性電解液為-2.35 V (vs SHE)。但鋁電極的實際電壓卻遠低於理論值，其中原因(1)鋁陽極極化非常嚴重，乃因表面上會形成一層鈍化膜，表面阻抗較大，使放電電位低，同時造成電位滯後的現象；(2)鋁電極在強鹼的環境中會產生劇烈的析氫腐蝕(Hydrogen Evolution Corrosion)的現象，同時會釋放出大量的氫氣，造成陽極利用率降低、庫倫效率降低、特別是在大電流密度下，鋁電極腐蝕更加嚴重，使得法拉第效率降低^[4]；(3)由於放電過程中 Al(OH)⁻ 離子在電解液中會逐漸聚集，使得鋁酸鹽濃度到達飽和之狀態，則氫氧化鋁就會以晶體結構沉澱，同時也會生成氫氧根離子，可用

式(1.1)表示；當鋁在鹼性電解液中將氫氧化鋁表面氧化膜溶解時，溶解過程同時也伴隨氫氣的產生，而溶解速率與生成的氫氣成正比，這也說明鋁空氣電池進行放電，同時氫氣反應就會產生競爭腐蝕使得法拉第效率降低的主要因素之一，可用式(1.2)表示；(4)鋁電極為兩性物質，皆會在酸、中、鹼性電解液環境中進行腐蝕產氫反應，此副反應現象為自放電，因此降低鋁電極的利用率以及庫倫效率可用式(1.3)表示，由於為了解決上述之問題，過去的文獻中也提出許多如何降低鋁自腐蝕現象、改善鋁空氣電池之放電效率、增加鋁電極利用率等^[5-7]。



Roald and Streicher 等人^[8]發現影響鋁陽極嚴重腐蝕的主要因素為雜質，低純度的鋁雜質含量較高，其中鐵含量與自腐蝕成倍數成長，因此難以應用於電化學電池。而高純度的鋁需要複雜的電解程序得以獲得，當然價格比普通精鋁昂貴很多，如此一來提高了成本。鋁為高活性的金屬元素，因此鋁空氣電池皆可在酸、鹼、中性的電解液環境中表現出不同程度的充放電特性。常用鹼性電解液為 NaOH 或 KOH，鹼性電解液可除去鋁電極上的鈍化膜，產生大電流並溶解一定的鋁酸鹽且電導率高，反應產物為可溶解的鋁酸鹽離子，當鋁酸鹽在電解液中達到飽和時會析出白色

結晶的氫氧化鋁，進而產生嚴重析氫腐蝕現象，但會使電解液的電導率下降，因此影響電池整體性能。鹼性電解液可應用於高功率之產品。因電池電壓高，應用情境彈性佳，可因應小功率如行動電源，亦可適用於中高功率應用如作電動汽車電源等^[9-13]。鋁沒有毒性和危險性鋁對人體不會造成傷害，可以回收循環使用，不汙染環境。鋁的原材料豐富，生產成本較低，回收再生成本也較低。

抑制劑有可稱為緩蝕劑、表面活性劑，是一種在介質中添加少量能阻止金屬腐蝕或減緩金屬腐蝕速度的物質以保護金屬的方法，無論是有機緩蝕劑或無機緩蝕劑都已有廣泛的研究，緩蝕劑可分為吸附型、擴散型、表面變化型；吸附型緩蝕劑：分子主要通過物理吸附及共價鍵的化學吸附，在分子表面形成牢固的吸附膜，將介質與金屬隔離開來，從而抑制金屬的腐蝕，其中含氮的有機物(胺、亞胺、腈、偶氮化合物)，含硫化合物(硫脲、硫醇、噻吩及衍生物)，含氧有機化合物(醛、丁醇、癸二酸鹽、酯、酮及衍生物)均屬於吸附型。擴散型緩蝕劑主要適用於酸性溶液，緩蝕劑分子作用於金屬的全表面，使局部微電池內的電阻增大，腐蝕電流降低，有動物膠、阿拉伯膠、海藻酸鈉、琼脂等，高分子有機物都屬於這一類鹼性溶液。表面變化型：具有螯合物，覆蓋於金屬的表面上，適用於中性溶液影響抑制劑的因素有很多，例如：溫度、油脂等^[14]。聚乙二醇(Polyethylene glycol, PEG)屬於非離子表面活性劑及有機緩蝕劑，有分散作用，使活性物質在電極表面均勻分佈，提高了電子導電性和電化學性能。當聚乙二醇分子量增加，產物的導電率明顯增大，且濃度越大，不同分子量表面活性劑電導率間的差別越明顯，具有更好的穩定性^[15]。首先在 1994 年 Kordesh 等人^[16]提出聚乙二醇(PEG)等有些抑制劑在鹼性燃料電池運行狀態中具良好效

果。隨後，Ein-Eli 及 Dobryzzycki 團隊，對於 PEG400 與 PEG600^[17-19]在 KOH 溶液中比其他的抑制劑具有減緩鋅金屬腐蝕效果。王志華表明 PEG 抑制劑不但不會影響金屬空氣電池之空氣電極的正常功能，甚至還可提供空氣電極些許的防蝕效益^[3]。

2. 研究方法

2.1 鋁金屬燃料電池製作方法

實驗整體流程，選用鋁合金 1050 系列、6061 系列為陽極電極，陰極電極製備是由催化層和空氣層結合而成，本實驗用奈米碳球、石墨、聚四氟乙烯(PTFE)製成空氣層。催化層則是奈米碳球、石墨、PTFE 和 MnO_2 所配製而成。使用不鏽鋼網當作陰極集電網。使用滾壓機把空氣層與催化層分別夾壓在鐵網上，再使用烤箱進行烘烤，並利用電化學的測試，測試空氣陰極的電性變化及透過 SEM 做微結構分析。空氣陰極和不同系列陽極組裝成鋁空氣燃料電池。隨後，以 KOH 電解液為基底並添加不同分子量的抑制劑分別是 PEG600、PEG1000，各別調配濃度分別為 0.3 wt%、0.5 wt%、1.0 wt%、3.0 wt%，進行極化曲線掃描測試及全放電測試探討。

2.2 鋁空氣燃料電池微結構表面觀察

催化層對於空氣陰極而言，是扮演著重要的角色，以二氧化錳催化劑作為氧還原電催化劑，具有價格低廉的優勢。本研究利用水煮法制備奈米級錳氧化物 MnO_2 。眾多的錳氧化物結構中，因 MnO_2 所組成氧化錳結構的特殊性，而廣泛地應用於電極活性材料和氧化還原反應觸媒。此層必須考慮到界面接觸面積，故選用具有高表面積材料，達到與電解液好的界面接觸，由圖 1(a)低倍率 SEM 可以明顯發現有許多的細小孔洞，因 PTFE 除了有良好的黏合性外還具有良好的排水

性，進而產生多絲狀排列形成孔洞，這些孔洞可以提供反應氣體進出，因此可以在電池陰極的部分，使空氣層具有良好的通氣能力，提供電子及離子能快速進出，而有較好的電性反應，圖 1(b) 高倍率 SEM 發現催化劑錳氧化物呈現顆粒狀團聚，微奈米顆粒大小不一，經 EDS 成分分析 C、O、Mn、F 所組成。

2.3 鋁空氣燃料電池電性測試

利用三電極系統(白金電極為相對電極，甘汞電極為參考電極，空氣陰極為工作電極)，電解液以 1 M KOH 添加 PEG600 和 PEG1000 分別

以 0.3 wt%、0.5 wt%、1.0 wt%、3.0 wt% 不同濃度進行試片耐腐蝕量測，掃描電位範圍：0 ~ -0.3 V，掃描速率：1 mV/s，掃描面積：1 cm²。將所製成的空氣陰極與不同系列的鋁合金 1050 系列和 6061 系列當做陽極進行組裝為全電池，在定電流密度 10、20、30 mA/cm² 下進行全電池放電測試。以定電流密度進行放電測試之參數設定如下：陰極：空氣電極，陽極：1050 系列和 6061 系列的鋁合金，電解液：以 1 M KOH 添加 PEG600 和 PEG1000 分別以 0.3 wt%、0.5 wt%、1.0 wt%、3.0 wt% 不同濃度進行掃描面積：1 cm²，掃描時間為 10 分鐘。

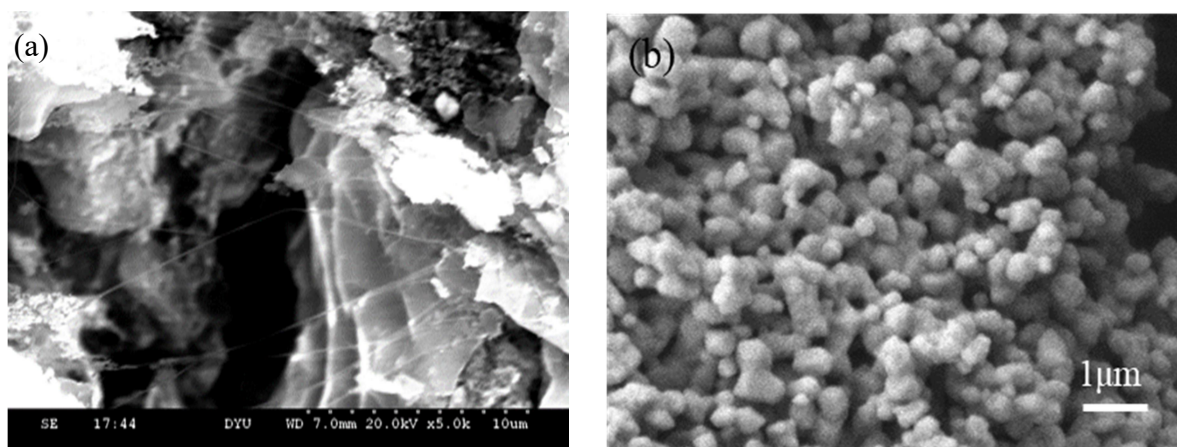


圖 1 SEM 觀察催化層表面形貌(a)低倍率，(b)高倍率。

Figure 1 SEM micrographs of the catalyst layer (a) low magnification, (b) high magnification.

3. 實驗結果

3.1 不同抑制劑腐蝕極化掃描

純 KOH 電解液下腐蝕電位為 -0.219 V，腐蝕電流為 $4.631 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ ，再以純 KOH 為基底加入 PEG600 以不同濃度(0.3 wt%、0.5 wt%、1.0 wt%、3.0 wt%)，進行腐蝕極化曲線量測，並觀察其變化。其腐蝕電位分別為 -0.218 V、-0.180 V、-0.177 V 與 -0.170 V，腐蝕電流分別為 $4.777 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ 、 $4.895 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ 、 $4.639 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ 與 $4.863 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ 。PEG1000 以不同濃度(0.3 wt%、0.5 wt%、1.0 wt%、3.0 wt%)，

進行腐蝕極化曲線量測，並觀察其變化。其腐蝕電位分別為 -0.165 V、-0.155 V、-0.147 V 與 -0.137 V，腐蝕電流分別為 $4.650 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ 、 $4.991 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ 、 $4.221 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ 與 $4.120 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ 。經由這些結果顯示，可以得知 PEG600 和 PEG1000 添加的量越多腐蝕電位會逐漸較高，腐蝕電流相對較低，因此不論何種分子量的 PEG 在 3.0 wt% 時，有較高的腐蝕電位與較低的腐蝕電流，顯示有較優良的耐腐蝕能力，如表 1 與圖 2 所示；因此本實驗接下來進行不同系列的鋁材做放電測試。

表 1 不同抑制劑腐蝕電位與腐蝕電流密度(1) KOH, (2) PEG600, (3) PEG1000。
 Table 1 The corrosion potential and corrosion current density using different corrosion inhibitors: (1) KOH, (2) PEG600, (3) PEG1000.

1. KOH		
濃度	腐蝕電位(V)	腐蝕電流密度(mA/cm ²)
1 M	-0.219	4.631×10^{-3}
2. PEG600		
濃度	腐蝕電位(V)	腐蝕電流密度(mA/cm ²)
0.3 wt%	-0.218	4.777×10^{-3}
0.5 wt%	-0.180	4.895×10^{-3}
1.0 wt%	-0.177	4.639×10^{-3}
3.0 wt%	-0.170	4.863×10^{-3}
3. PEG1000		
濃度	腐蝕電位(V)	腐蝕電流密度(mA/cm ²)
0.3 wt%	-0.165	4.650×10^{-3}
0.5 wt%	-0.155	4.991×10^{-3}
1.0 wt%	-0.147	4.221×10^{-3}
3.0 wt%	-0.137	4.120×10^{-3}

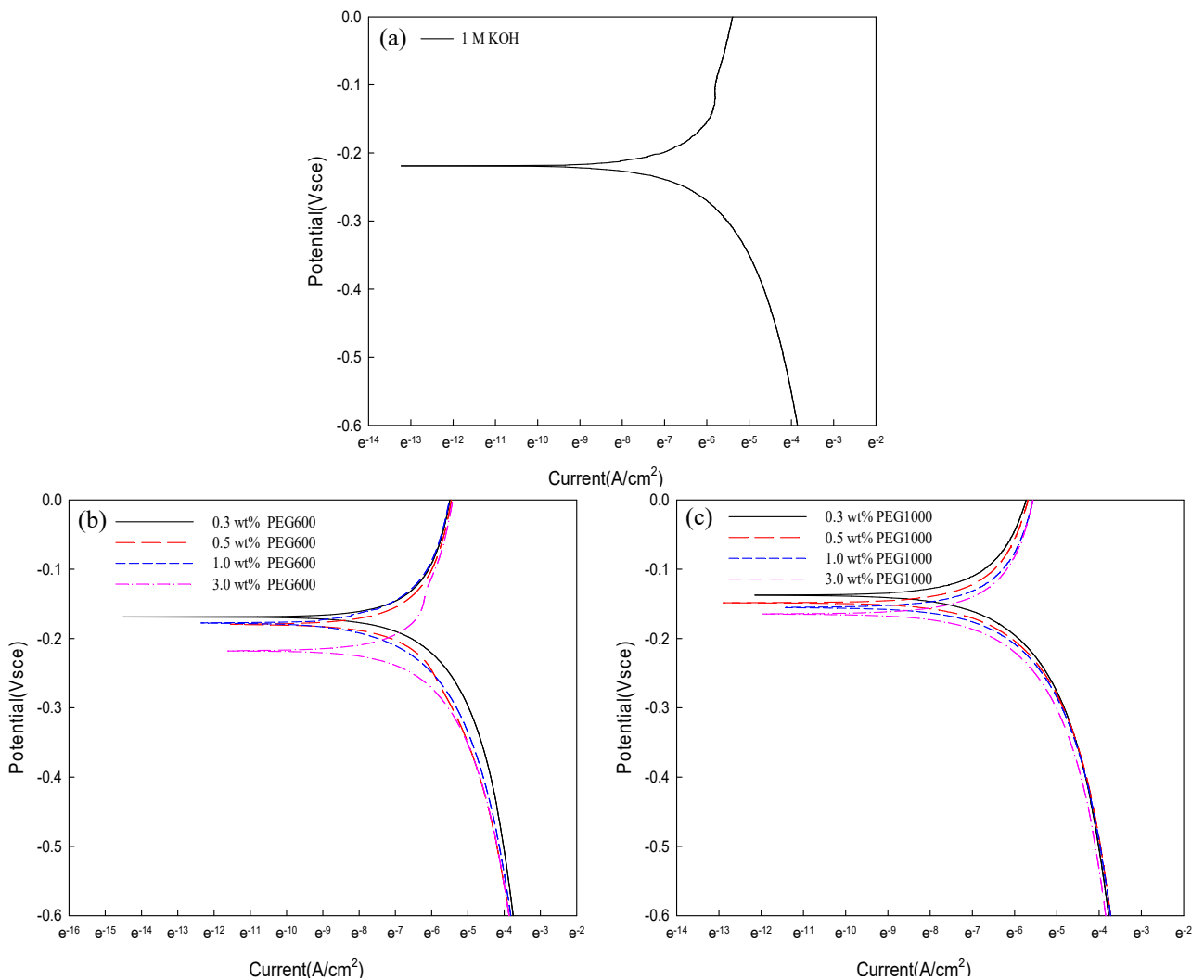


圖 2 不同抑制劑之極化掃描(a) KOH, (b) PEG600, (c) PEG1000。
 Figure 2 The polarization curves of aluminum anode in different corrosion inhibitors: (a) KOH, (b) PEG600, (c) PEG1000.

3.2 鋁空氣燃料電池放電測試

固定 PEG600 和 PEG1000 的濃度，使用 1050 系列和 6061 系列的鋁材進行 10、20、30 mA/cm² 放電測試，比較鋁材在何種抑制劑下的放電效果較佳；在圖 3(a)中為 10 mA/cm² 下 PEG600 在各濃度和 1050 系列及 6061 系列的抑制效果。在 1050 系列和 6061 系列可以看出 3.0 wt% 的抑制劑效果最佳。但在 1050 中的抑制劑又比 6061 來得好。在圖 3(b)中為 PEG600 各濃度在 20 mA/cm² 下和 1050 系列、6061 系列的抑

制效果，同樣由 3.0 wt% 的抑制劑效果最佳，而在 1050 系列的鋁又比 6061 系列的鋁同樣來得好。因此圖 3(c)中為 PEG600 各濃度在 30 mA/cm² 下的抑制效果同樣由 3.0 wt% 較佳。而在 1050 系列的鋁和 6061 系列的鋁抑制效果中，1050 系列優於 6061 系列。當在 PEG1000 進行 10、20、30 mA/cm² 時，發現到與 PEG600 在 1050 系列與 6061 系列的情形下，是相同的狀況，如圖 4。

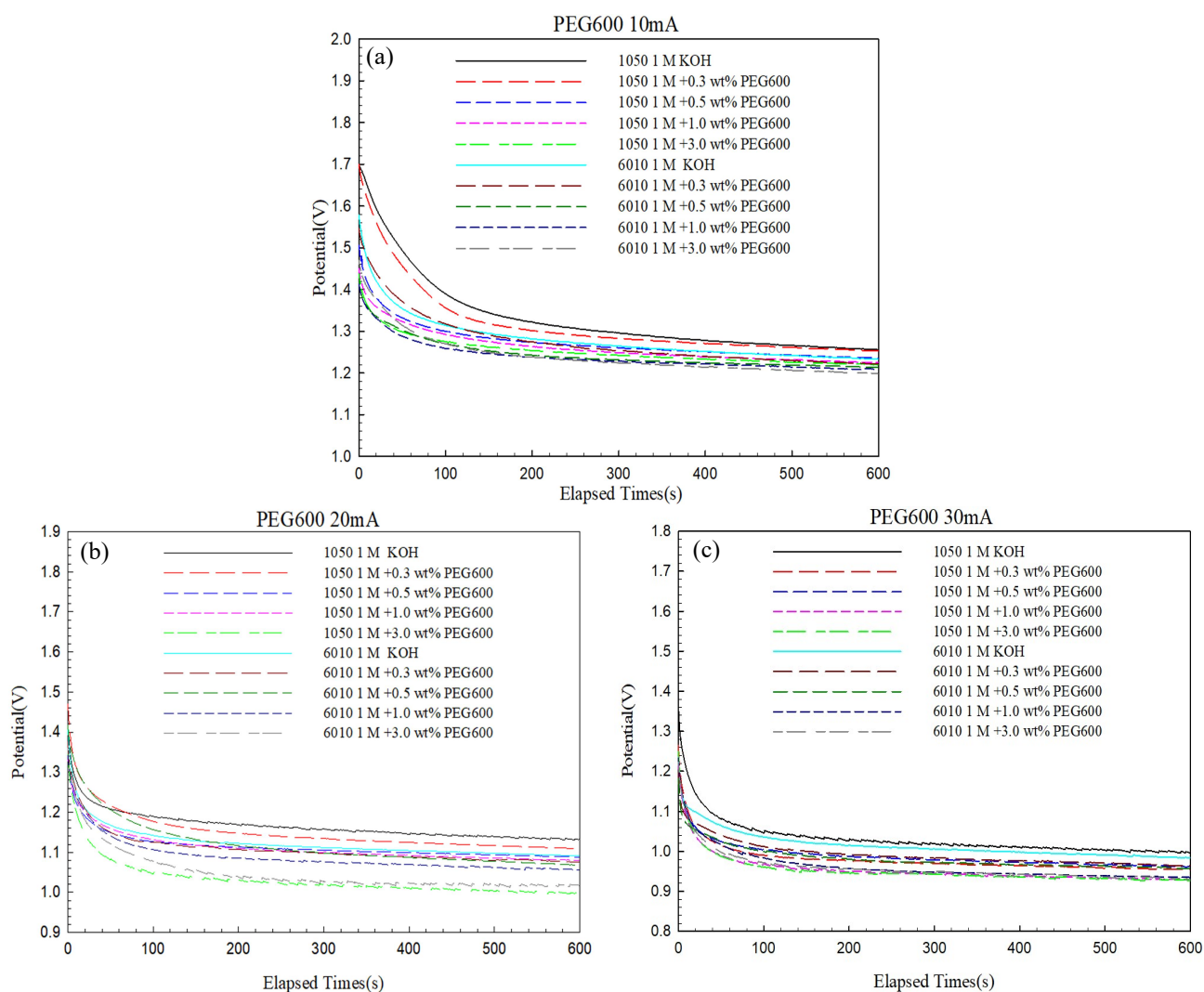


圖 3 1050 及 6061 鋁材在 PEG600 之全放電測試值(a) 10 mA, (b) 20 mA, (c) 30 mA。

Figure 3 The discharging performances of the fuel cells with 1050 and 6061 aluminum alloy anodes in electrolyte containing PEG600 corrosion inhibitor: (a) 10 mA, (b) 20 mA, (c) 30 mA.

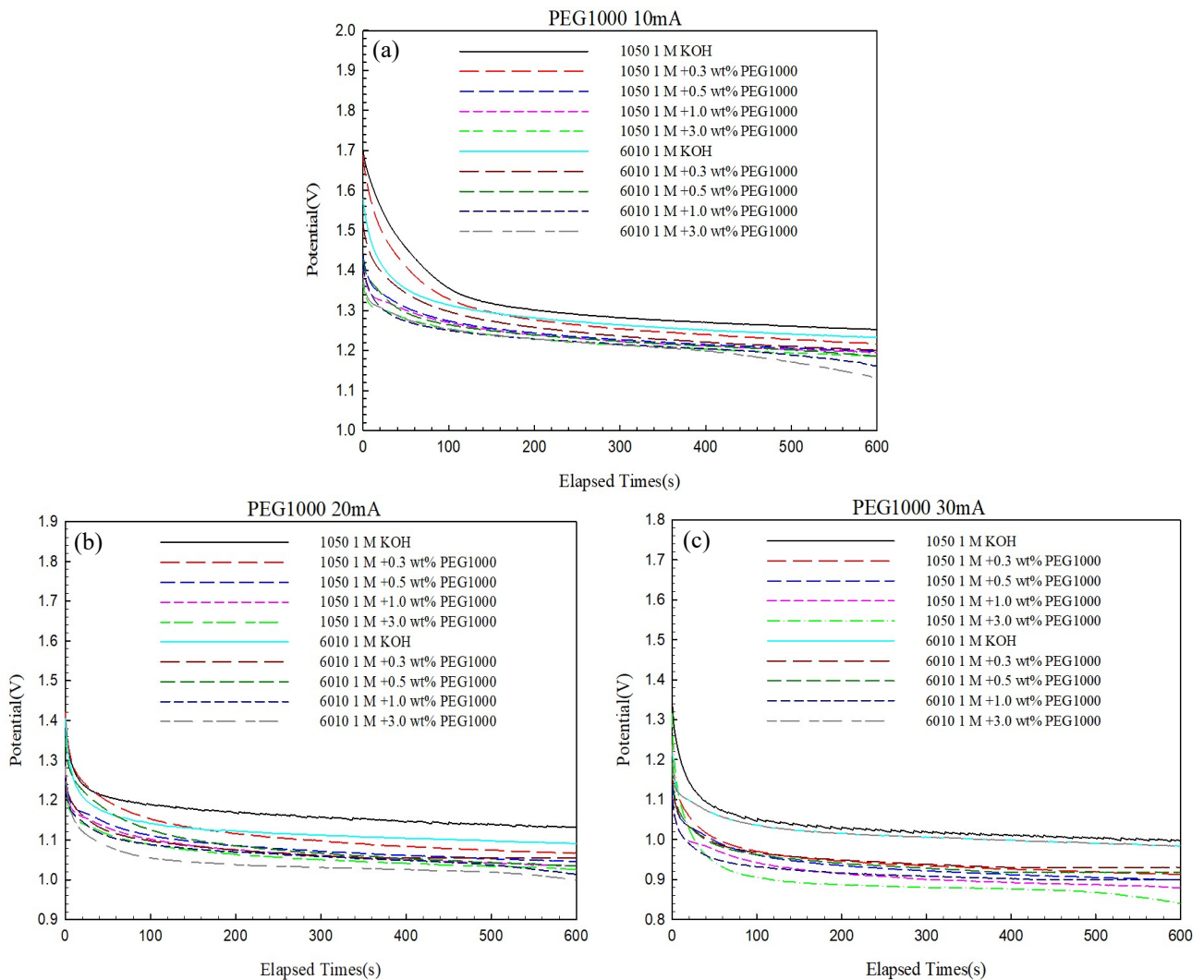


圖 4 1050 及 6061 鋁材在 PEG1000 之全放電測試值(a) 10 mA, (b) 20 mA, (c) 30 mA。
 Figure 4 The discharging performances of the fuel cells with 1050 and 6061 aluminum alloy anodes in electrolyte containing PEG1000 corrosion inhibitor: (a) 10 mA, (b) 20 mA, (c) 30 mA.

在 1050 系列的鋁和 6061 系列在不同抑制劑進行全放電性質測試，表 2 所示。1050 系列 PEG600 及 PEG1000 隨抑制劑濃度增加，其電壓值隨之下降，且 PEG1000 抑制效果較為顯著。當 PEG1000，當電流越高時，抑制劑濃度增加，其電壓值有明顯下降趨勢。而 6061 系列比 1050 系列電壓值略低，透過不同抑制劑濃度進行比對，其結果與 1050 系列差異不大。

3.3 陽極鋁合金材料對電池的影響

在 KOH 電解液的情況下，陽極使用不同系列的鋁材而有所差異，發現在定電流密度時，1050 系列電壓值大於 6061 系列，推測可能因為鋁合金材質不同可能所造成差異。陽極鋁合金性能 1050 系列比 6061 系列電導率較高，助於腐蝕速度^[20-25]，如表 3。選用市場 1050 系列與 6061 鋁合金添加細微金屬元素，主要提升結構強度與抗腐蝕能力，經分光儀分析兩種鋁合金成份，如表 4 所示。

表2 不同抑制劑濃度之電性值(1) KOH, (2) PEG600, (3) 6061 PEG1000。

Table 2 The electrical performance of the fuel cell using corrosion inhibitors in different concentrations.

1. KOH					
濃度	電流		10 mA	20 mA	30 mA
	鋁合金				
1 M	1050		1.33 V	1.17 V	1.03 V
	6061		1.28 V	1.13 V	1.01 V
2. PEG600					
濃度	電流		10 mA	20 mA	30 mA
	鋁合金				
0.3wt%	1050		1.28 V	1.13 V	1.01 V
	6061		1.27 V	1.10 V	0.99 V
0.5wt%	1050		1.27 V	1.10 V	1.03 V
	6061		1.24 V	1.10 V	0.98 V
1.0wt%	1050		1.26 V	1.11 V	0.98 V
	6061		1.23 V	1.08 V	0.96 V
3.0wt%	1050		1.25 V	1.03 V	0.95 V
	6061		1.22 V	1.04 V	0.95 V
3. PEG1000					
濃度	電流		10 mA	20 mA	30 mA
	鋁合金				
0.3wt%	1050		1.28 V	1.11 V	0.94 V
	6061		1.25 V	1.07 V	0.95 V
0.5wt%	1050		1.24 V	1.08 V	0.93 V
	6061		1.23 V	1.06 V	0.94 V
1.0wt%	1050		1.23 V	1.07 V	0.91 V
	6061		1.22 V	1.06 V	0.91 V
3.0wt%	1050		1.22 V	1.06 V	0.89 V
	6061		1.21 V	1.04 V	0.89 V

表3 屬燃料電池之陽極鋁合金性能。

Table 3 The material properties of the aluminum alloys used as the anode of the fuel cell.

性質	鋁合金	
	1050	6061
電導率	61%	43%
自然電位	-0.84 V	-0.96 V

表4 金屬燃料電池之陽極鋁合金成分。

Table 4 The compositions of the aluminum alloys used as the anode of the fuel cell.

元素(wt%)	鋁合金	
	1050	6061
矽	0.25	0.80
鐵	0.30	0.70
銅	0.04	0.40
錳	0.04	0.15
鎂	0.04	1.20
鉻	0.90	0.35
鋅	0.04	0.25
鈦	0.02	0.15

4. 討論

- 本研究針對抑制劑在不同濃度的抑制效果做了一系列的比較。首先分別配出 PEG600 (0.3 wt%、0.5 wt%、1.0 wt%、3.0 wt%)和 PEG1000 (0.3 wt%、0.5 wt%、1.0 wt%、3.0 wt%)，並在 1050 系列和 6061 系列中找出抑制效果最佳的抑制劑濃度，PEG1000 0.5 wt%在 6061 系列中抑制效果最佳。而很明顯的在極化曲線中，可以到 PEG1000 3.0 wt%擁有最佳的腐蝕電位。
- 在研究中，從表 2 和圖 3、4 的電性測試中明顯地看到，1050 系列其電壓值略高於 6061 系列，隨抑制劑濃度增加，其電壓值隨之下降，透過不同抑制劑比較，希望尋求適當抑制劑濃度能對鋁合金可延緩腐蝕速度及均勻

腐蝕試片，有助於延長持續供電效應，不易產生不穩定電流與電壓。

3. PEG600 與 PEG1000 在數據上可以看出，只要濃度越高，效果越好，但在兩種抑制劑中，PEG600 比 PEG1000 抑制效果來得差，原因是分子大小的差別，讓抑制效果有所差別。PEG600 抑制效果較差，可以短時的讓電池放出較大的電壓。

5. 結論

空氣陰極的空氣層採用奈米碳球與聚四氟乙烯(PTFE)為提供良好的透氣性及導電度。觸媒層採用過錳酸鉀與奈米碳球混合，用直接迴流法合成奈米二氧化錳(MnO_2)當催化劑，製備 2 M 的二氧化錳(MnO_2)催化劑。在 KOH 電解液中進行定電流測試，1050 系列的鋁合金在 10 mA/cm^2 約 1.33 V， 20 mA/cm^2 約 1.17 V， 30 mA/cm^2 約 1.03V；6061 系列的鋁合金在 10 mA/cm^2 約 1.28 V， 20 mA/cm^2 約 1.23 V， 30 mA/cm^2 約 1.01 V，因此可以由上述得之 1050 系列鋁合金有最好的放電效果。抑制劑則可以由極化曲線的腐蝕電位(V)和腐蝕電流密度(mA/cm^2)可以得知濃度在 3.0 wt%時，PEG1000 和 PEG600 有較高的腐蝕電位與較小的腐蝕電流密度，然而 PEG1000 腐蝕電位 -0.137 V 和腐蝕電流密度 $4.120 \times 10^{-3}\text{ mA/cm}^2$ ，PEG600 腐蝕電位 -0.170 V 和腐蝕電流密度 $3.863 \times 10^{-3}\text{ mA/cm}^2$ ，所以 PEG1000 有最好的抑制效果。推論 PEG1000 分子最細密，導致了最良好的抑制效果。

參考文獻

- [1] “Preparation of hydroxide ion conductive KOH-layered double hydroxide electrolytes for an all-solid-state iron-air secondary battery”, T. Tsuneishi, H. Sakamoto, K. Hayashi, G. Kawamura, H. Muto, and A. Matsuda, *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2 (2014) pp. 165-168.
- [2] “The effect of binder and electrolyte on the performance of thin zinc-air battery”, M. Hilder, B. Winther-Jensen, and N. B. Clark, *Electrochimica Acta*, 69 (2012) pp. 308-314.
- [3] 王志華、洪耀宗、徐希白、林益全、林榮賜，“有機抑制劑對金屬空氣電池之陽極材料的腐蝕影響研究”，*防蝕工程*，第20卷第4期，2006，第313-322頁。
- [4] “Contribution of the acoustic emission technique to study aluminum behavior in aqueous alkaline solution”, J. Bernard, M. Boinet, M. Chatenet, and F. Dalard, *Electrochemical and Solid-State Letters*, 8 (2005) pp. 53-55.
- [5] “Cathodic reactions involved in metallic corrosion in chlorinated saline environments”, Ives, M. B. Ives, Y. C. Lu, and J. L. Luo, *Corrosion Science*, 32 (1991) pp. 91-102.
- [6] “Aspects of the anodic oxidation of methanol”, G. T. Burstein, C. J. Barnett, A. R. Kucernak, and K. R. Williams, *Catalysis Today*, 38 (1997) pp. 425-437.
- [7] “Use of low-cost aluminum in electric energy production”, A. Z. Zhuk, A. E. Sheindlin, B. V. Kleymenov, E. I. Shkolnikov, and M. Y. Lopatin, *Journal of Power Sources*, 157 (2006) pp. 921-926.
- [8] “Corrosion rate and ETCH structures of aluminum; effect of heat treatment and impurities”, B. Roald and M. A. Streicher, *Journal of the Electrochemical Society*, 97 (1950) pp. 283-289.

- [9] "Hydrogen generation by aluminum corrosion in seawater promoted by suspensions of aluminum hydroxide", L. Soler, A. M. Candela, J. Macanás, M. Muñoz, and J. Casado, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34 (2009) pp. 8511-8518.
- [10] "Evaluation of AA5052 alloy anode in alkaline electrolyte with organic rare-earth complex additives for aluminum-air batteries", D. Wang, H. Li, J. Liu, D. Zhang, L. Gao, and L. Tong, *Journal of Power Sources*, 293 (2015) pp. 484-491.
- [11] "Corrosion inhibition of aluminum in acidic and alkaline media by *Sansevieria trifasciata* extract", E. E. Oguzie, *Corrosion Science*, 49 (2007) pp. 1527-1539.
- [12] "Cycle life limit of carbon-based electrodes for rechargeable metal-air battery application", S. Velraj and J. H. Zhu, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 736 (2015) pp. 76-82.
- [13] "Developments in electrode materials and electrolytes for aluminum-air batteries", D. R. Egan, C. Ponce de León, R. J. K. Wood, R. L. Jones, K. R. Stokes, and F. C. Walsh, *Journal of Power Sources*, 236 (2013) pp. 293-310.
- [14] "Modeling of an electrically rechargeable alkaline Zn-air battery", Deiss, Erich, F. Holzer, and O. Haas., *Electrochimica acta*, 47 (2002) pp. 3995-4010.
- [15] "Solubilization Behavior of the Surfactant-Polyethylene Glycol Complex in Relation to the Degree of Polymerization", T. Fumikatsu and K. Tsujii, *Bulletin of the chemical society of Japan*, 46 (1973) pp. 2684-2686.
- [16] "Identification of organic corrosion inhibitors suitable for use in rechargeable alkaline zinc batteries", V. K. Nartey, L. Binder, and K. Kordesch., *Journal of power sources*, 52 (1994) pp. 217-222.
- [17] "Electrochemical and surface studies of zinc in alkaline solutions containing organic corrosion inhibitors", Y. Ein-Eli, M. Auinat, and D. Starosvetsky, *Journal of power sources*, 114 (2003) pp. 330-337.
- [18] "The Behavior of Zinc Metal in Alkaline Solution Containing Organic Inhibitors: II. Identification of Surface Films Formed on Zinc", Y. Ein-Eli and M. Auinat, *The Electrochemical Society*, 150 (2003) A1614-A1622.
- [19] "On some organic inhibitors of zinc corrosion in alkaline media", J. Dobryszycycki and S. Biallozor, *Corrosion Science*, 43 (2001) 1309-1319.
- [20] A. R. Despic, D. M. Drazic, and P. M. Milovan, "Electrochemically active aluminium alloy, the method of its preparation and use", U.S. Patent No. 4,098,606. 4 Jul. 1978.
- [21] P. W. Jeffrey, W. Halliop, and F. N. Smith, "Aluminum anode alloy", U.S. Patent No. 4,751,086. 14 Jun. 1988.
- [22] J. A. Hunter, G. M. Scamans, and W. B. O'Callaghan, "Aluminium batteries Alcan International Limited", Montreal, CA, US5004654A . 2 Apr. 1991.
- [23] B. B. Jovanovic, A. R. Despic, and D. M. Drazic, "Electrochemically active aluminum alloy and composite", U.S. Patent No. 4,288,500. 8 Sep. 1981.

[24] “Aluminum-Consuming Fluidized-Bed Anodes”, S. Zaromb, C. Norman Cochran, and R. M. Mazgaj, *Journal of the Electrochemical Society*, 137 (1990) pp. 1851-1856.

[25] “The effect of zinc on the aluminum anode of the aluminum–air battery”, Y. Tang, L. Lu, H. W. Roesky, L. Wang, and B. Huang, *Journal of Power Sources*, 138 (2004) pp. 313-318.