

耐腐蝕與抗磨耗之新式輕質鋁合金建材設計研究

洪飛碩

南臺科技大學休閒事業管理系

fshung@stust.edu.tw

摘 要

截至目前為止，鮮少研究團隊探討鋁合金產品與應用在建築構面，我國鋁合金材料和產品生產技術在諸多方面已處於世界前列，很多相關技術可以導入建築用鋁合金的應用，因此，開發設計鋁合金在建築或休憩硬體領域的應用，特別是耐磨耗性與海島國家的腐蝕特性的探討對建築產業的升級和推廣應用都有極其重要的意義。考量台灣許多建築材料仍以鋼筋與鑄鐵材料為主，不僅笨重又不耐鏽蝕，更有磨耗嚴重問題，基於此，本計畫擬開發鋁材：4389, 5089, 6169 新式鋁合金綠建材，並且將商用 4032, 5052, 6061 材料同步分析與比對。實驗結果顯示，新式 4389, 5089, 6169 材料特性、組織、拉伸機械性質、鹽霧試驗均較商用型 4032, 5052, 6061 材料性質優異，尤其是耐腐蝕特性，值得注意的是，新式 6169 具備高強度的擠型材料，可供應用於海濱工業、遊憩園區或建築結構支撐建材應用參考。

關鍵詞：鋁合金、建材、拉伸、磨耗、耐腐蝕

A Study on Corrosion and Erosion Wear Properties of Novel Aluminum Alloy Structure Materials

Fei-Shuo, Hung

Department of Leisure, Recreation and Tourism Management, Southern Taiwan University of Science and Technology

Abstract

Limited research teams have examined aluminum alloy products and the applications in building facets in recent decades. Taiwan's Aluminum alloy materials and product technology are maintaining the leading position in many aspects. Many related technologies can be implemented into the application of aluminum alloy for construction. The application of designing aluminum alloys in the construction field, especially the exploration of wear resistance and corrosion characteristics of island countries, is of great significance to the upgrading and promotion of the construction industry. However, the use of construction materials in Taiwan are still mainly concerned with steel and cast-iron materials, which are bulky and not rust-resistant, along with wear problems. Based on the discussion above, the plan is to develop and design new aluminum alloys for construction. Green building materials, 4389, 5089, 6169, were analyzed and compared with commercial materials 4032, 5052, 6061. The results show that new type 4389, 5089, 6169 is superior in material properties, microstructure, tensile mechanical properties, and salt spray test than the commercial materials 4032, 5052, 6061, especially the corrosion resistance. It is worth noting that the new type 6169 has high strength extrusion, which can be used as a reference for the future application of seashore industry, recreation parks, or building materials.

Keywords: Aluminum Alloy, Building Materials, Tensile, Wear, Corrosion Resistance

壹、研究背景與目的

鋁合金是目前世界上最理想的綠色建築結構材料，產業化與廣泛應用，對於推廣綠色建築業的發展具有重大意義 [1-3]。建築結構中以鋁代木，不僅可節約土地、能源、無粉塵和建築成本外，還可以成為典型的綠色材料，換句話說，鋁合金成為一種真正的“綠色建築”資材。值得一提是，鋁結構與木結構相比，強度、剛度高、水密性、氣密性好、耐腐蝕性好、成本低、美觀耐用、可回收率高[4-5]且可以減少結構斷面，增加建築物使用面積，節約土地和能源，運輸、施工、維護和裝卸方便[6-9]。鋁合金結構材是一種真正的低碳、綠色、可循環使用的建築材料[4, 10-13]，在建築結構中，特別是現代高層民用建築及大跨度和薄殼結構的大型公用建築中鋁合金結構與鋼結構相比更具有明顯優勢，尤其是在台灣位處地震頻繁且潮濕地區，積極發展鋁合金結構建築應用可以減輕餘震加速度對建築物的作用，使地震對建築物的破壞力減小[14-17]。

本研究考量上述論點，認為鋁合金作為最有潛力的綠色輕量化材料之一，在建築工業中有非常重要的應用前景。合理設計鋁合金建築結構，可充分使用鋁合金功能性、環境友好等優異特性，有效克服鋁合金耐蝕性差、耐磨耗性低等缺點，對鋁合金在建築產業科技上的推廣應用具備非常重要關鍵性[18-21]。

貳、實驗步驟與方法

鋁合金化學組成設計後 (表 1-表 3)，經冶煉爐形成鋁合金錠，再經壓鑄機或擠型機製造成鋁合金板。試片中 4389, 5089, 6169 為新式鋁合金綠建材，而商用 4032, 5052, 6061 鋁合金材料為對比材料。鋁合金經熱處理後可獲得高強度與高硬度試片，各試片熱處理製備條件如表 4 所示。

表 1 4389 鋁合金化學成份 (wt.%)

Al	Mg	Si	Mn	Cr	Cu	Fe
Bal.	0.36	8.71	0.22	0.15	2.82	0.17

表 2 5089 鋁合金化學成份 (wt.%)

Al	Mg	Si	Mn	Cr	Cu	Fe
Bal.	4.22	0.48	0.72	0.08	1.28	0.45

表 3 6169 鋁合金化學成份 (wt.%)

Al	Mg	Si	Mn	Cr	Cu
Bal.	0.92	1.28	0.90	0.22	0.08

表 4 各試片代稱與熱處理條件

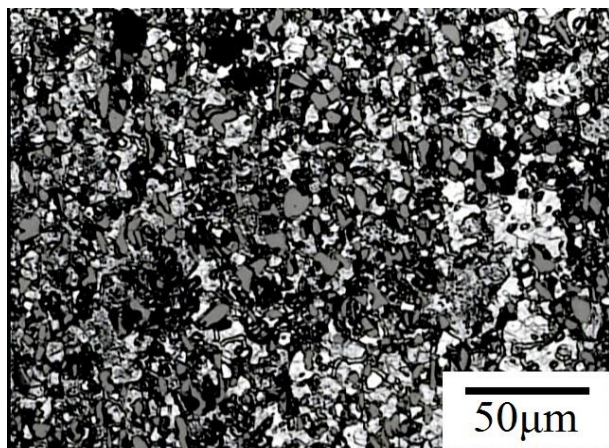
試料	熱處理條件
4032	530C-1hr 水冷 + 175C-4hr 水冷
4389	
5052	420C-1hr 水冷
5089	
6061	530C-1hr 水冷 + 175C-4hr 水冷
6169	

各試片除了調查組織之外，使用 X-ray 繞射光譜分析相結構差異。熱處理後試片經過加工形成拉伸試片與顆粒沖蝕試片，拉伸試驗是使用萬能試驗機，拉伸速率為 1mm/min，初始拉伸應變速率為 $8.33 \times 10^{-4} \text{S}^{-1}$ 。

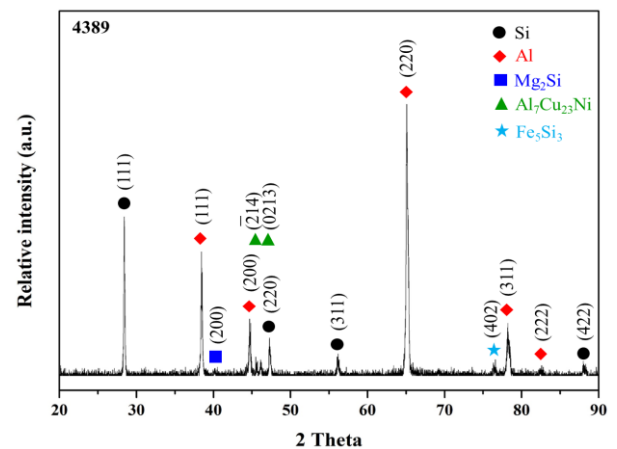
顆粒沖蝕磨耗試驗所選用的沖蝕顆粒為不規則形狀 295um 的二氧化矽砂粒。沖蝕顆粒為 500g，進氣壓力值 3 kg/cm²(0.29 MPa)，沖蝕角度分別為 15°，30°，45°，60°，75° 及 90°，沖蝕過後的材料重量損失 (δW)與單次沖蝕顆粒總重量比值 (W)為沖蝕磨耗率 ($ER\% = \delta W / W$)。鹽霧試驗 4 天與 7 天之試片將進行拉伸試驗，進而比較氮化的效應並提出耐腐蝕的數據。相關實驗結果都是 3-5 數據的平均值。

參、結果與討論

4389 鋁合金壓鑄試件經由微觀組織分析得知，平均初晶矽粒徑約為 12 μm ，且均勻分佈於基地中。這些矽顆粒可為硬質第二相，基地硬度 HRB 62，對於基地強化與硬化有顯著效應 (圖 1(a))。另外，XRD 數據(圖 1 (b))得知，基地中有多量初晶矽存在，且因為組織中矽含量偏高，所以也有 Mg_2Si 與 Fe_5Si_3 等金屬間化合物生成來以強化基地。此外，也因本合金為多元相組合，基地中亦有 $\text{Al}_7\text{Cu}_{23}\text{Ni}$ 化合物生成。鋁合金 4389 拉伸試驗，實驗依據 CNS 2111 規範進行拉伸測試，結果顯示，UTS 280 MPa，EL > 8 %，對比 4032 商用鋁材，4389 拉伸機械性質表現更優異 (圖 2，表 5)。沖蝕磨耗試驗，採用乾式顆粒沖蝕磨耗試驗方法，沖蝕顆粒選擇粒徑約 295 μm 的二氧化矽砂粒，沖蝕壓力是 3 kg/mm²，沖蝕砂量為 500 克。實驗結果得知，4089 在各沖蝕角度之耐磨性均優於 4032。隨沖蝕角度增加：兩者耐磨性具顯著差異 (圖 3)。

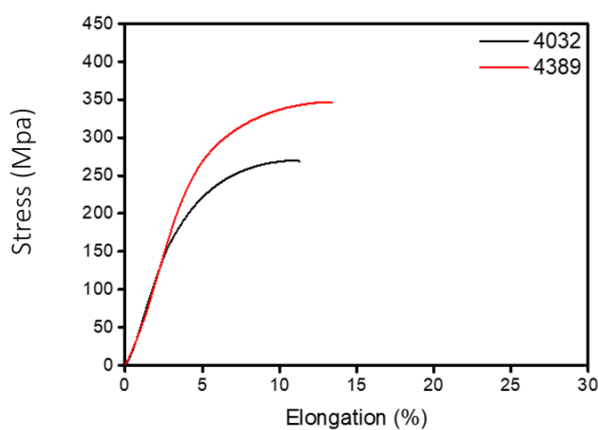


(a)鋁合金 4389 顯微特徵

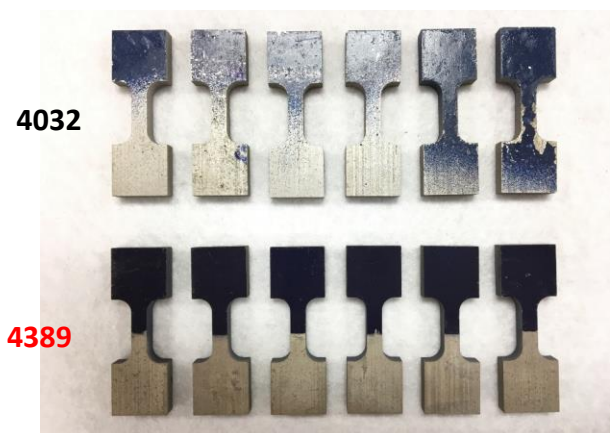


(b)X-ray 結晶繞射圖

圖 1 鋁合金 4389 壓鑄試件微觀組織分析



(a)拉伸應力應變曲線



(b)拉伸實體試片

圖 2 拉伸試驗

表 5 降伏強度(YS)、抗拉強度(UTS)及延伸率彙整表

	YS(MPa)	UTS(MPa)	UE(%)	TE(%)
4032	163	270	6.3	6.6
4389	228	347	7.5	8.2

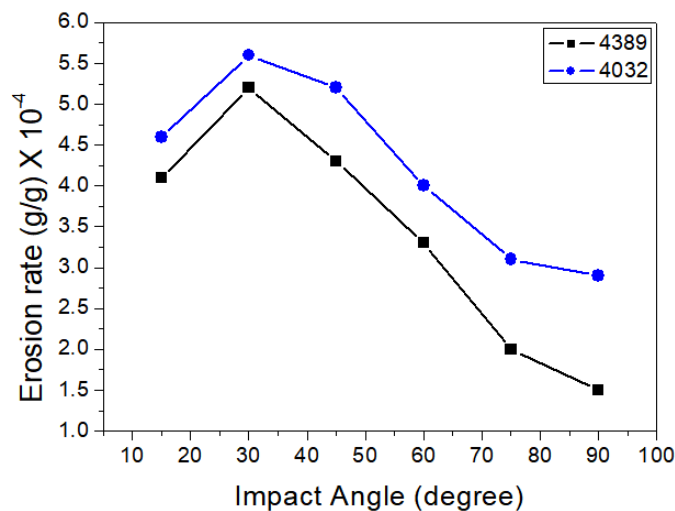
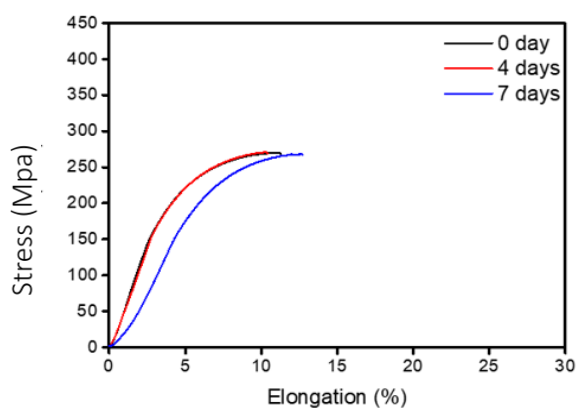


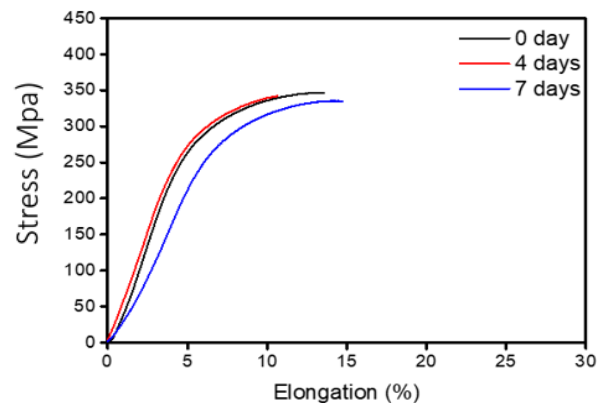
圖 3 顆粒沖蝕角度與耐磨耗性

在耐腐蝕性質研究試驗中，鹽霧試驗法程序依據 CNS 8886 規範進行(實驗天數為 4 天和 7 天)。實驗結果得知，4389 具有較佳耐腐蝕特性，鹽霧試驗後試片表面無處理，均有鹽漬殘留。4389 經 168 小時鹽霧試驗後仍保有約 8% 延性，而在商用材 4032 鹽霧後有顯著脆化效應(圖 4-5)，換言之，4389 特性表現更優異於 4032 商用鋁材。



days	YS (MPa)	UTS (MPa)	UE (%)	TE (%)
0	163	270	6.3	6.6
4	162	270	5.2	5.4
7	156	265	4.5	5.3

圖 4 4032 合金經 4 天及 7 天浸蝕實驗後的拉伸性質量測結果



days	YS (MPa)	UTS (MPa)	UE (%)	TE (%)
0	228	347	7.5	8.2
4	224	342	7.0	7.4
7	241	335	6.7	8.1

圖 5 4389 合金經 4 天及 7 天浸蝕實驗後的拉伸性質量測結果

5089 鋁合金擠型試件透過顯微觀組織分析得知，合金基地呈現簡單等軸晶組織，其中細小深色顆粒為矽顆粒，基地平均晶粒徑約為 32μm，基地硬度 HRB 42，多量鎂已經固溶在鋁基地中，且組織具有均質性(圖 6)。XRD 分析得知，本合金為鋁鎂系統，整體基地幾乎是鋁基地，且有少量 Al₆Mn 相存在，屬於固溶強化系統(圖 7)。值得注意的是，5089 鋁合金試件拉伸性質，實驗程序依據 CNS 2111 規範進行拉伸測試。比對 5089 鋁合金 5052 商用鋁材，5089 鋁材具較佳彈性模數且變形抵抗略高，拉伸機械性質表現相近，兩鋁材拉伸應力-應變曲線：均出現抖動現象(UTS > 300 MPa, EL > 12 %; 圖 8, 圖 9, 表 6)。此外，沖蝕磨耗試驗，5089 各沖蝕角度之耐磨性均優於 5052，兩者低角度耐磨性相近，兩者低角度具有最大磨耗率(圖 10)。

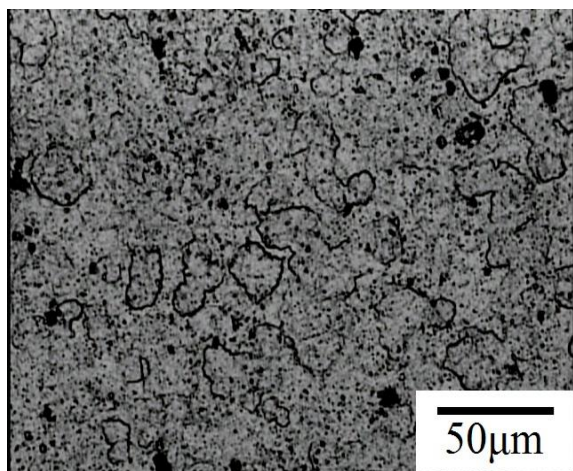


圖 6 5089 顯微組織

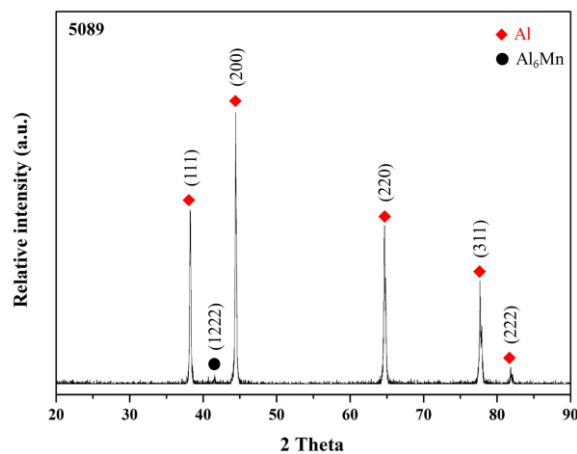


圖 7 XRD 繞射分析

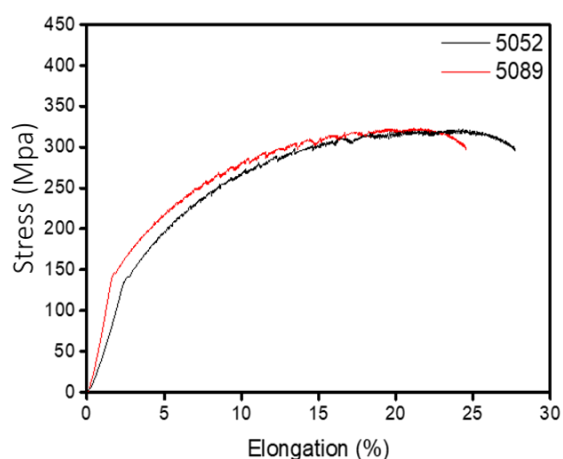


圖 8 拉伸應力應變曲線

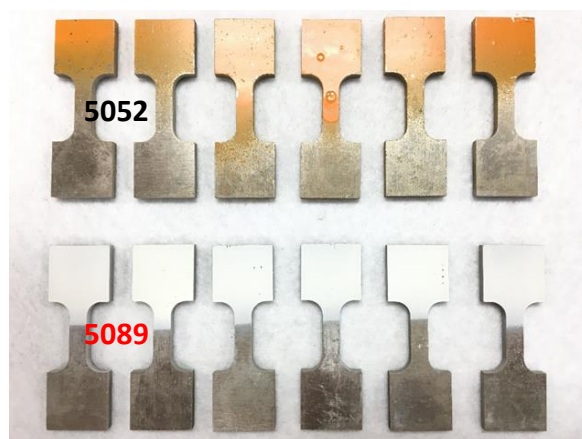


圖 9 拉伸實體試片

表 6 降伏強度(YS)、抗拉強度(UTS)及延伸率彙整表

	YS(MPa)	UTS(MPa)	UE(%)	TE(%)
5052	140	322	18.9	22.7
5089	145	333	17.6	21.2

在耐腐蝕性質研究試驗中，5089 鋁合金擠型試件按照耐蝕性質研究樣品製作。鹽霧試驗法程序依據 CNS 8886 規範進行實驗天數 4 天與 7 天。實驗結果得知 (圖 11-12)，兩系統拉伸曲線均出現抖動，加工硬化行為顯著。鹽霧四日後有皮膜強化機制發生。鹽霧七日後：表面無顯著鏽蝕現象，表面均有殘留鹽漬。注意的是，Al-Mg 系：具有較佳耐蝕性 (UTS > 300MPa, EL > 12%)。值得注意的是，5089 鋁合金各種特性均優異於 5052 商用鋁材。

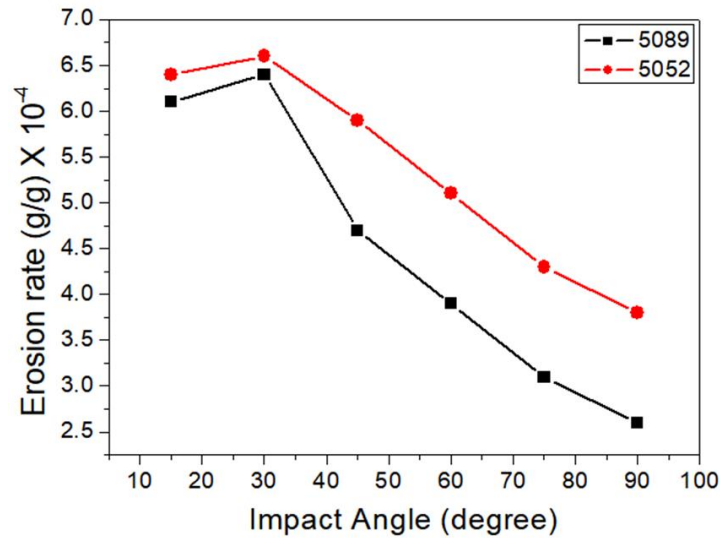
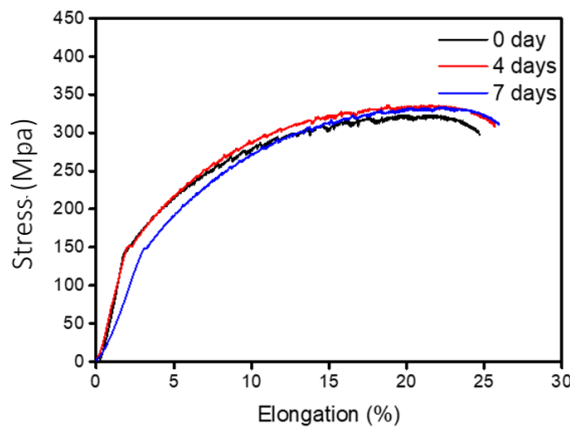
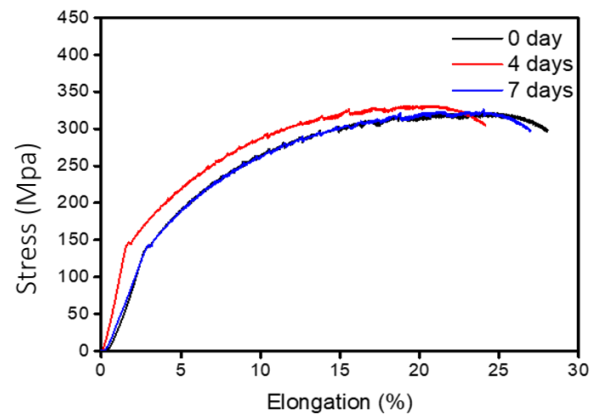


圖 10 顆粒沖蝕角度與耐磨性



days	YS (MPa)	UTS (MPa)	UE (%)	TE (%)
0	145	333	17.6	21.2
4	150	336	16.7	20.5
7	147	332	16.2	19.8

圖 11 5089 合金經 4 天及 7 天浸蝕實驗後的拉伸性質量測結果



days	YS (MPa)	UTS (MPa)	UE (%)	TE (%)
0	140	322	17.9	22.7
4	144	330	17.3	21.8
7	138	316	16.7	20.1

圖 12 5052 合金經 4 天及 7 天浸蝕實驗後的拉伸性質量測結果

6169 鋁合金擠型試件顯微觀組織分析得知，本系統為高合金，因為變形阻抗高所以基地呈現方向性金屬流紋特徵，基地平均晶粒徑約為 5 μ m，基地硬度 HRB 70。再者，因為添加 Cr 元素使得基地耐腐蝕能力提升，所以組織特徵不容易被蝕刻判定(圖 13)。XRD 分析得知(圖 14)，基地為均一 α -Al，主要因為 Al7Cr 與 Mg2Si 等析出強化相多是奈米相，且含量低於 3 wt.%，使得基地相結構以鋁母相為主。6169 鋁合金試件拉伸性質，實驗程序依據 CNS 2111 規範進行拉伸測試。對比 6169 與商用 6061 得知(圖 15，圖 16，表 7)，6169 拉伸機械性質表現極佳，均勻變形阻抗較高，拉伸應力、應變曲線 6169 具有較佳拉伸破壞韌性 (UTS > 340 MPa, EL > 12 %)。沖蝕磨耗試驗，6169 各沖蝕角度之耐磨性均優於 6061。兩者均呈現：延性磨耗破壞模式 (圖 17)。

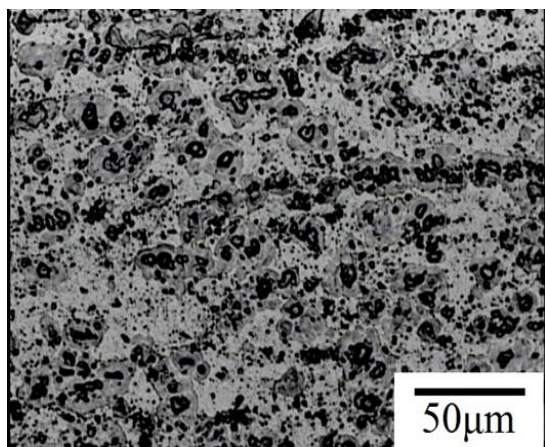


圖 13 6169 顯微組織

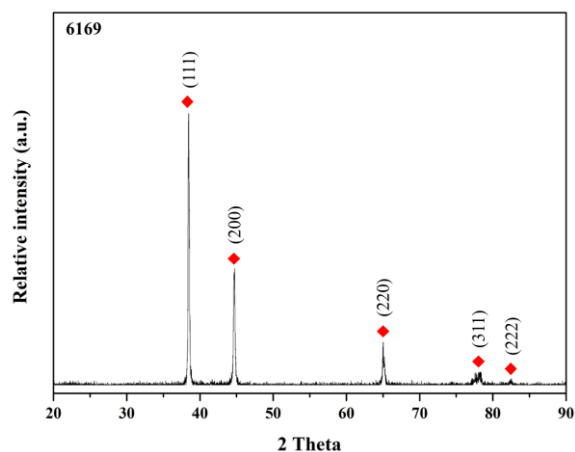


圖 14 XRD 繞射分析

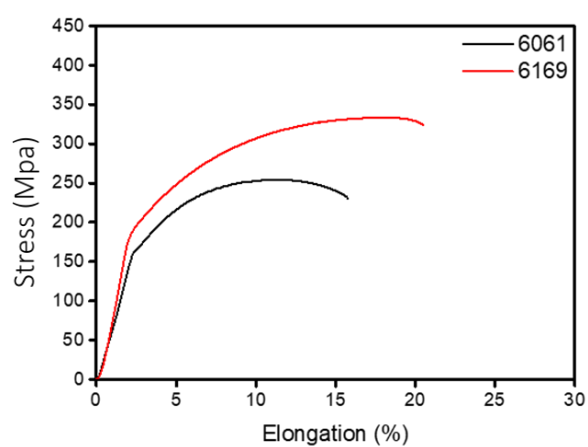


圖 15 拉伸應力應變曲線

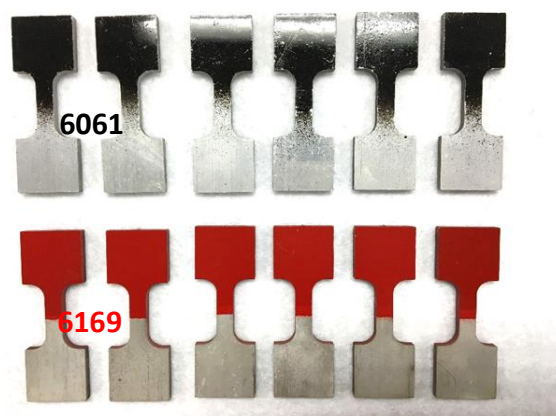


圖 16 拉伸實體試片

表 7 降伏強度(YS)、抗拉強度(UTS)及延伸率彙整表

	YS(MPa)	UTS(MPa)	UE(%)	TE(%)
6061	165	255	7.5	11.4
6169	190	342	14.5	16.9

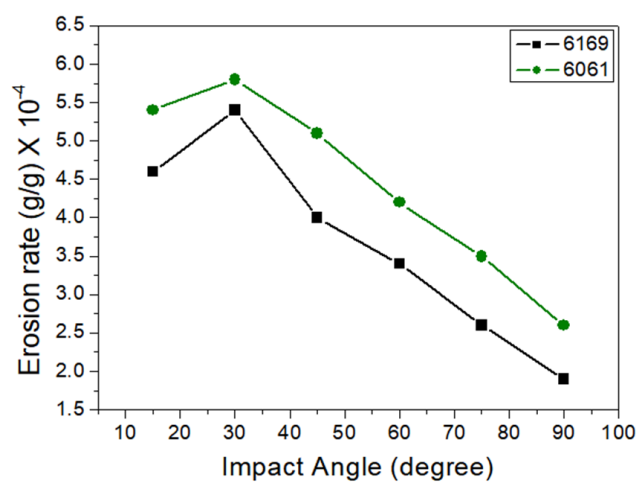
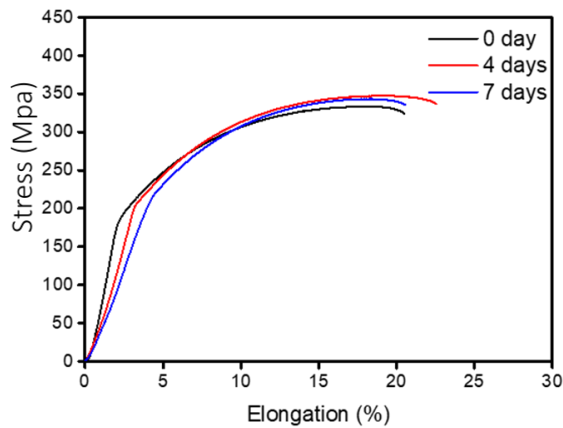


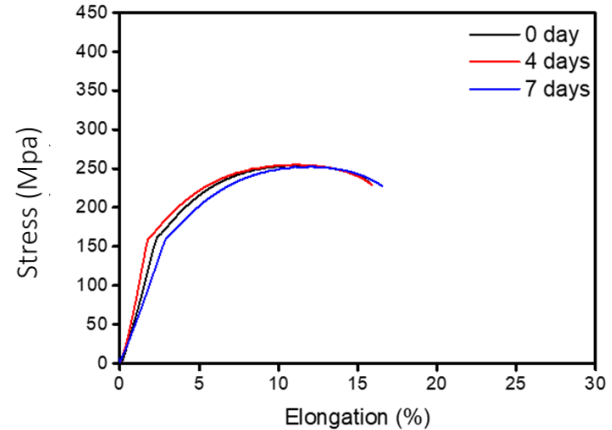
圖 17 沖蝕角度與耐磨性

在耐腐蝕性質研究試驗中，6169 鋁合金試件耐腐蝕性質研究試驗樣品製作。鹽霧試驗法程序依據 CNS 8886 規範進行，本實驗天數分別為 4 天與 7 天。實驗結果得知 (圖 18–19)，6169 機械性質優於商用 6061。鹽霧試驗：尚未呈現顯著劣化差異。6169 強度與延伸率均顯著優異且具較大拉伸破壞韌性。6169-Mg2Si & Al7Cr：強化基地(UTS > 340 MPa，EL > 12 %)。重要的是，鹽霧試驗過程中氯離子會沿著晶界腐蝕鋁基地，試片厚度若薄化拉伸性質劣化能更顯著，4032 鹽霧後延性顯著劣化。因此，6169 鋁合金無論是在耐腐蝕性、鹽霧或拉伸應力等特性表現均表現較優於商用 6061。



days	YS (MPa)	UTS (MPa)	UE (%)	TE (%)
0	190	342	14.5	16.9
4	204	347	14.1	17.7
7	211	343	13.2	14.3

圖 18 6169 合金經 4 天及 7 天浸蝕實驗後的拉伸性質量測結果



days	YS (MPa)	UTS (MPa)	UE (%)	TE (%)
0	165	255	7.5	11.4
4	160	254	8.3	13.3
7	161	251	7.2	12.5

圖 19 6061 合金經 4 天及 7 天浸蝕實驗後的拉伸性質量測結果

肆、結論

實驗結果得知，新式 4389, 5089, 6169 材料性質、組織、拉伸機械性質、鹽霧試驗均較商用 4032, 5052, 6061 材料性質優異，特別是耐腐蝕特性，可提供建築建材應用參考。

鋁合金是綠色輕量化建築材料，值得注意的是，鋁合金特性具有：低密度（節能），不易腐蝕（長壽命），而且可回收利用，因此，是一種環保金屬材料。本實驗可確認 4389 壓鑄材可提供優異耐磨耗應用，5089 擠型材也顯現優異耐腐蝕特性，特別是高強度的 6169 擠型材更可以導入高比強度的結構支撐，重要的是，本研究中新合金的性能比市售鋁合金好 15-20%，具有應用價值，相關建築應用均可對應適合的新式輕質鋁合金材料，未來更可以延伸應用到海濱工業或遊憩園區，以提升材料耐用性與高回收性訴求，加持循環經濟亮點。

參考文獻

- [1] J. M. Montero-Moreno, M. Sarret, & C. Müller. (2010). Self-ordered porous alumina by two-step anodizing at constant current: Behaviour and evolution of the structure. *Micropor. Mesopor. Mat.*, 136, 68–74
- [2] S. Z. Chu, K. Wada, S. Inoue, M. Isogai, & A. Yasumori. (2005) Fabrication of ideally ordered nanoporous alumina films and integrated alumina nanotubule arrays by high-field anodization. *Adv. Mater.*, 17(17), 2115–2119.

- [3] Y. Shang, L. S. Wang, D. Niu, Z. Y. Liu, Y. H. Wang, & C. S. Liu. (2016) Effects of additive for anodizing electrolyte on anodic film of high silicon aluminum alloy. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 11, 1549–1557.
- [4] Y. Goueffona, L. Aruraultb, S. Fontorbesb, C. Mabruc, C. Tonond, & P. Guiguea. (2010) Chemical characteristics, mechanical and thermo-optical properties of black anodic films prepared on 7175 aluminium alloy for space applications. *Mater. Chem. Phys.*, 120, 636–642
- [5] M. R. Garsivaz jazi, M. A. Golozar, K. Raeissi, & M. Fazel. (2014). Surface characteristics and electrochemical impedance investigation of sparkanodized Ti6Al4V alloy. *J. of Materi. Eng. and Perform*, 23, 1270–1278.
- [6] M. V. Diamanti & M. P. Pedferri. (2007). Effect of anodic oxidation parameters on the titanium oxides formation. *Corros. Sci.*, 49(2), 939–948.
- [7] L. Xu, C. Wu, X. C. Lei, K. Zhang, C. C. Liu, J. Ding, & X. L. Shi. (2018). Effect of oxidation time on cytocompatibility of ultrafine-grained pure Ti in micro-arc oxidation treatment. *Surf. Coat Tech.*, 342, 12–22.
- [8] K. C. Kung, T. M. Lee, & T. S. Lui. (2010). Bioactivity and corrosion properties of novel coatings containing strontium by micro-arc oxidation. *J Alloy Compd.*, 508(2), 384–390.
- [9] M. P. Brady, G. Rother, L. M. Anovitz, K. C. Littrell, K. A. Unocic, H. H. Elsentriecy, ...B. Davis, (2015) Film breakdown and nano-porous Mg(OH)₂ formation from corrosion of magnesium alloys in salt solutions. *J Electrochem. Soc.*, 162(4), C140–C149.
- [10] A. Atrens, G. L. Song, M. Liu, Z. M. Shi, F. Y. Cao, & M. S. Dargusch. (2015). Review of recent developments in the field of magnesium corrosion. *Adv. Eng. Mater.*, 17(4), 400–453.
- [11]Guillon, X. Roizard, P. Belliard. (2001). Experimental methodology to study tribological aspects of deep drawing—application to aluminum alloy sheets and tool coatings. *Tribol. Int.*, 34(11),757–766,.
- [12] W. Xu, X. Gao, B. Zhang, & L. Yang. (2018). Study on frictional behavior of AA 6XXX with three lube conditions in sheet metal forming. SAE Technical Paper 2018-01-0810. <https://doi.org/10.4271/2018-01-0810>
- [13] F. Ozturk , E. Esener, S. Toros, & C. R. Picu. (2010). Effects of aging parameters on formability of 6061-O alloy. *Mater. Design*, 31(10), 4847–4852.
- [14] V. K. Barnwal, R. Raghavan, A. Tewari, K. Narasimhan, & S. K. Mishra. (2017). Effect of microstructure and texture on forming behaviour of AA-6061 aluminium alloy sheet. *Mater. Sci. Eng. A*, 679, 56–65.
- [15] T. Maeda, K. Kaneko, T. Namba, Y. Koshino, Y. Sato, R. Teranishi, & Y. Aruga (2018). Structural and compositional study of precipitates in under-aged Cu added Al-Mg-Si alloy. *Sci Rep* 8, 16629. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35134-8>.
- [16] S. L. Liu, K. Li, J. B. Lu, G. Sha, J. C. Wang, M. J. Yang, ...Y. Du. (2018). On the atomic model of Guinier-Preston zones in Al-Mg-Si-Cu alloys. *J Alloy Compd.*, 745, 644–650. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.304>
- [17] L. P. Ding, Z. H. Jia, J. F. Nie, Y. Y. Weng, L. F. Cao, H. W. Chen, ...Q. Liu. (2018). The structural and compositional evolution of precipitates in Al-Mg-Si-Cu alloy. *Acta Mater.*, 145, 437–450. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.12.036>
- [18] F. S. Hung. (2019). Material application of a transformer box: A study on the electromagnetic shielding characteristics of Al-Ta coating film with plasma-spray process. *Coatings*, 9(8), 495. <https://doi.org/10.3390/coatings9080495>

- [19] M. Balordi, G. Santucci de Magistris, & C. Chemelli. (2020). A novel simple anti-ice aluminum coating: Synthesis and in-lab comparison with a superhydrophobic hierarchical surface. *Coatings*, 10(2), 111.
- [20] M. Cerbaro, S. Morse, R. Murphy, J. Lynch, & G. Griffiths. (2020). Information from earth observation for the management of sustainable land use and land cover in Brazil: An analysis of user needs. *Sustainability*, 12(2), 489.
- [21] H. R. Lou, D. S. Tsai, & C. C. Chou. (2020). Correlation between defect density and corrosion parameter of electrochemically oxidized aluminum. *Coatings*, 10(1), 20.