

主辦機構 Organiser

資助機構 Funding Agent

技術提供 Technology Provider



氫燃料電池 雙極板製備技術 總結報告



編輯 Editors:

黎偉華先生 Mr Waiwah LAI
楊浩坤博士 Dr Haokun YANG
王陳劼先生 Mr Chenjie WANG
盧匡行先生 Mr Honghang LO
方潔怡晨博士 Dr Jieyichen FANG
黃征日先生 Mr Zhengri HUANG

Published by
香港生產力促進局
The Hong Kong Productivity Council
HKPC Building, 78 Tat Chee Avenue, Kowloon, Hong Kong

Copyright © 2024
香港生產力促進局
The Hong Kong Productivity Council

版權所有 翻印必究 All Rights reserved.
No part of this publication may be reproduced in any form, whether
in electronic retrieval system or otherwise, without the prior written
permission of the publisher.





致謝 Acknowledgement

感謝香港汽車零部件工業協會與香港金屬製造業協會，佳士美精密工程有限公司，初出日（香港）有限公司，惠州愛思鉬電子材料有限公司，廣東豪美新材股份有限公司，海卓動力能源科技有限公司與廣東腐蝕科學與技術創新研究院的支持。

Thank you for the support from the Hong Kong Auto Parts Industry Association, The Hong Kong Metals Manufacturers Association, Kenzymi Precision Ltd, Huizhou Aisitan Electronic Materials Co., Ltd, Guangdong Haomei New Material Co., Ltd, Hai-driver Energy Technology Co., Ltd, as well as Institution of Corrosion Science and Technology.

氫燃料電池雙極板製備技術總結報告乃創新科技署撥款資助的創新科技基金項目中的其中一項成果。在此總結報告上的資料，或項目成員表達的任何意見、結論建議及展現的成果，並不代表香港特別行政區政府或創新科技署的觀點。

This technology summary is a publication under the ITF project which is funded by the Innovation and Technology Commission. Any opinions, findings, conclusions or recommendations expressed in this handbook (or by members of this project team) do not reflect the views of the Government of Hong Kong Special Administrative Region or the Innovation and Technology Commission.

目錄

1) 前言	
序言	3
1 雙極板的介紹	4
2 鋁合金的介紹	12
2) 材料製備與成型	
2.1 材料製備	20
2.2 雙極板衝壓成型	24
3) 材料性能	
3.1 Al-Mn-Cu 材料性能	28
3.2 材料性能	40
3.3 材料性能	48
4) 雙極板性能	
4.1 雙極板性能	62
4.2 雙極板功率性能	66
4.3 雙極板吸熱性能測試	68
5) 總結	
5.1 總結	72
5.2 未來展望	73

序言

氫燃料電池是一種高效、清潔的新能源技術，它將氫氣和氧氣置於化學反應中，進而產生電能和水蒸氣。與傳統燃油車相比，氫燃料電池車不會產生任何有害氣體。同時，氫燃料電池車的續航里程更長，加注氫氣也更方便。隨著能源短缺、環境污染等問題的加劇，氫燃料電池以其零污染、高轉化率等優勢逐步成為電動汽車的主要動力來源。氫燃料電池技術在衛星、船舶、飛機等領域也得到了廣泛應用，未來將成為清潔能源領域的重要發展方向。

在燃料電池汽車的研發中，雙極板是燃料電池發電過程中必不可少的零部件，因此雙極板新材料的研發是不可或缺的一環。目前開發的雙極板材料包括高溫陶瓷材料、高分子材料、金屬基複合材料（如不鏽鋼、鈦合金等）。對於金屬基的複合材料，現在多數採用石墨基複合材料作為加工原料，通過熱壓工藝成型，但該方法普遍存在原料成本高、生產成品良率低的問題。通過衝壓進行製造的成型工藝，也普遍存在工藝繁瑣、精度低、無法一次成型的問題。並且隨著強度更高的金屬基新材料出現，亟需一種新型的衝壓方式以解決上述問題。

這本技術總結報告將會介紹氫燃料電池中雙極板部件的原材料設計、成型工藝及性能。根據我們對氫燃料電池雙極板的研發成果，將所有有關這技術的要點，清楚地剖析。

雙極板的介紹

1.1 氫燃料電池的基本原理

氫燃料電池是以氫氣及空氣為反應原料，通過電化學反應將燃料中的化學能直接轉變為電能的發電系統。由於沒有燃燒過程，因此氫燃料電池能量轉換效率高；轉換過程無污染物排放、無噪音，因此對環境友好；使用過程中僅需要添加氫氣作為燃料，因此可以長期穩定的輸出電能。若將氫燃料電池串聯，更甚至可以成為百萬千瓦級發電站，滿足一個城市的用電需求。在氫燃料電池的發電過程中，氫氣為還原劑，氧氣或二氧化碳為氧化劑，在工作時，還原劑和氧化劑分別在陰極和陽極發生催化反應，該反應產生離子和電子，離子穿過電解質，而電子流經外部電路驅動負載，二者結合後形成水，該過程將釋放電能，總反應方程式為： $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ 。

氫燃料電池根據電解質的不同，可以分為以下五類：

- 磷酸燃料電池（PAFC），使用濃度為 100% 的磷酸作為電解質，工作溫度為 150°C - 200°C ，工作效率為 55%。反應方程式為：陰極 $\text{H}_2 = 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ ，陽極 $\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2\text{O}$ 。
- 鹼性燃料電池（AFC），使用 KOH 氫氧化鉀溶液作為電解質，工作效率為 50%-60%。工作溫度因氫氧化鉀濃度不同改變，當濃度為 85% 時，工作溫度為 200°C ；當濃度為 35%-50% 時，工作溫度為 50°C 。反應方程式為：陰極 $2\text{H}_2 + 4\text{OH}^- = 4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$ ，陽極 $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- = 4\text{OH}^-$ 。
- 熔融碳酸鹽燃料電池（MCFC），使用熔融碳酸鹽作為電解質，工作溫度為 600°C - 700°C ，工作效率為 55%-65%。反應方程式為：陰極 $\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} = \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$ ，陽極 $\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- = \text{CO}_3^{2-}$ 。
- 固態氧化物燃料電池（SOFC），使用固態金屬氧化物作為電解質，工作溫度為 700°C - 1000°C ，工作效率為 55%-65%。反應方程式為：陰極 $\text{H}_2 + \text{O}^{2-} = \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$ ，陽極 $\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^- = \text{O}^{2-}$ 。
- 聚合物電解質膜燃料電池（PEMFC），使用聚合物膜作為電解質，工作溫度為 50°C - 100°C ，工作效率為 40%-60%。反應方程式為：陰極 $\text{H}_2 = 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ ，陽極 $\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2\text{O}$ 。

由於質子交換膜氫燃料電池（PEMFC）啟動和停止運作的所需時間較短，工作溫度較低，效率較高，因此最具有大規模應用的潛力。

1.2 質子交換膜氫燃料電池（PEMFC）的基本結構

質子交換膜氫燃料電池（PEMFC）的結構由電堆和系統部件（空壓機、增濕器、氫氣循環泵、氫氣瓶等）構成。電堆是燃料電池系統的核心，由雙極板、膜電極、集流板、密封圈等部件構成，而電堆的主要成本和技术投入集中於雙極板和膜電極兩個部分。

1.2.1 膜電極

電堆中實現氫氧催化反應釋放電能的部分是膜電極，由質子交換膜、催化劑、氣體擴散層構成。氫氣通過氣體擴散層到達陰極並在催化劑作用下分解成氫離子 H^+ 和電子 e^- ，氫離子 H^+ 通過質子交換膜向陽極移動，電子則通過外部電路驅動負載；氧氣經過氣體擴散層達陽極後，在催化劑的作用下，吸收氫離子 H^+ 和電子 e^- 並形成水。在高溫下，反應後轉化成的水會以水蒸氣的形式釋出，並排放到大氣中。

（1）質子交換膜

PEMFC 中質子交換膜的功能是為質子遷移提供通道，並阻隔氣體、電子及其他離子，其性能對 PEMFC 使用壽命、功率、效率等影響重大。質子交換膜需要具備較高的質子電導率、熱穩定性、化學穩定性、以及機械強度。

全氟磺酸（PFSA）質子交換膜最早由杜邦公司於 20 世紀 70 年代開發並實現商業化生產（Nafion 系列），其結構包括一條類聚四氟乙烯主鏈以及含有磺酸基團的短側鏈，這一結構使得 PFSA 質子交換膜具有較高的穩定性和質子電導率。但是 PFSA 質子交換膜成本昂貴，在高溫下容易分解，低溫下質子電導率降低，因此需要對 PFSA 質子交換膜進行改性，主要包括減少含氟材料的用量和摻雜功能性材料兩個方面。

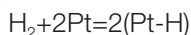
在減少含氟材料的用量上已有成功的案例，例如使用膨脹聚四氟乙烯微孔膜（ePTFE）作為 PFSA 質子交換膜的複合增強材料，在不影響機械性能的前提下，可以減少 PFSA 質子交換膜的厚度，有助於降低生產成本並縮短質子遷移的距離。在非全氟聚合物或無氟化聚合物的基礎上進行改性，是更具潛力的技術路線。例如使用聚三氟苯乙烯主鏈搭配無氟的功能性基團，再經過磺化後製備成的非全氟聚合物質子交換膜具有較好的穩定性和較低的成本；在聚偏氟乙烯上接枝磺化聚苯乙烯後通過溶液結合熔融方法形成的非全氟聚合物質子交換膜具有微孔結構，有利於質子的傳輸；使用主鏈含有苯環的芳香族聚合物改性後獲得了無氟聚合物質子交換膜，例如磺化的聚芳醚酮、聚醚醚酮、聚醯胺、聚苯並咪唑等，無氟聚合物質子交換膜的生產過程污染小，產品機械性能好。

在引入功能性材料或官能團後，質子交換膜的性能有顯著提升。使用帶有特定基團的有機分子（如 1,3- 丙烷磺）接枝磺酸基團製備共價有機框架（Z-COF）後，與 PFSA 質子交換膜混合形成的質子交換膜具有更好的保水能力和質子傳輸能力；還可以通過引入無機材料改善 PFSA 質子交換膜的性能，例如將吸濕性能較好的二氧化矽、二氧化鈦引入到 PFSA 質子交換膜後，PFSA 質子交換膜吸濕性得到了提高，進而促進了質子電導率的提升。碳納米管、石墨烯具有出色的熱穩定性、機械性能和親水性，經過微量摻雜後，PFSA 質子交換膜的機械性能以及低溫下的質子電導率得到了提高。

目前已有眾多機構能夠量產質子交換膜，如加拿大巴拉德動力系統公司、美國科慕化學有限公司、戈爾公司、陶氏集團、3M 公司、日本旭化成株式會社、中國武漢理工新能源有限公司、新源動力有限公司、上海神力科技有限公司、東嶽集團等。商業化產品通常採用的製備方法是溶液成膜法，包括溶液澆築法、溶液流延法、溶膠-凝膠法等，所生產的質子交換膜厚度逐漸降低，2019 年日本豐田汽車公司採用的質子交換膜的厚度僅有 5 微米，用於 Mirai 汽車的氫燃料電池系統中。

(2) 催化電極

催化電極是氫燃料電池的重要構件，陰極催化材料的改性是氫燃料電池的重點研究領域。陰極的催化反應比較複雜、速率較慢，且催化過程中電極需要承受高溫 and 腐蝕。陰極催化電極材料是影響氫燃料電池工作效率的主要因素。目前使用最多的催化電極是 Pt 鉑基材料，其反應方程式為：



常用的方法是將鉑納米顆粒均勻分散在碳載體上，形成 Pt/C 類催化電極。該催化電極成分簡單，製備工藝技術成熟，最主要的製備方法包括膠體法、乙二醇法以及浸漬還原法。催化活性是 Pt/C 電極的重要指標，通過減小 Pt 顆粒粒徑可以提高催化活性，因為減小粒徑可以增加表面積，從而提高單位質量 Pt 所暴露的催化活性位點。但是由於 Pt 顆粒與 C 載體之間的結合力會隨著 Pt 顆粒粒徑的減小而減小，Pt 顆粒越小越容易脫離 C 載體並與其他 Pt 顆粒結合，因此隨著使用時間的延長，Pt 納米顆粒可能溶解、遷移、團聚，造成催化活性的降低。

鉑基合金也是常見的催化電極材料，Pt 通過與 Ni、Mn、Cu、Co 等金屬形成二元或三元合金可以獲得活性較好的催化電極材料，且穩定性更高，例如 PtCoMn/C 的性能要優於 Pt/C，但是仍然存在鉑納米顆粒流失的現象。通過設計納米化框架結構催化劑可以提高 Pt 的利用率，例如，具備 Pt-skin 結構的 Pt-Ni 合金穩定性較強，而 Ni 又能夠調節 Pt 的電子結構，使更多的 Pt 置於催化電極表面。

商業化的催化電極以 Pt 基材料為主，例如英國 Johnsonat they 的 PtRu/C、日本 Tanaka 的 Pt₃Co/C、氫電中科、擎動科技的 Pt 合金催化劑；以及美國 3M 公司、比利時 Umicore 公司、中國中科科創的 Pt/C 產品等。

開發新材料取代 Pt 是降低催化電極成本的根本途徑。過渡金屬原子與 Pt 具備類似的物理化學性質，過渡金屬的氧化物、過渡金屬-氮-碳化合物均可以起到良好的催化作用；再通過設計特殊結構可進一步優化催化性能，如有序介孔結構、核殼結構、空心結構等。例如以二氧化矽為硬範本的 Co-N-C 催化劑，其介孔結構增大了表面積；通過聚合法在氯化鋅 / 氯化鉀進行了氧化反應並在氮氣環境下鍛燒形成的 Fe-N-C 化合物具有較大的空隙，二者均具有較好的催化效果。

除了鉑基和過渡金屬基材料外，氮、硼、硫、磷摻雜的碳納米管也具有催化功能，該類型材料不含金屬材料，製備過程環保，有望成為新一代催化電極材料。

(3) 氣體擴散層

氣體擴散層在質子交換膜燃料電池中起到支撐催化層、傳輸反應氣體和排除反應過程中產生的水、導出電子的作用，設計和優化氣體擴散層的結構對提升燃料電池性能有重要作用。氣體擴散層需要具備較好的電子導電性；在質子交換膜氫燃料電池的工作過程中，形成的水蒸氣容易凝結成液態水，因此氣體擴散層還需要具備較好的排水能力，否則會導致催化電極發生水淹的情況，降低電池性能；此外，在質子交換膜氫燃料電池工作時，需要氣體及時到達催化電極，因此氣體擴散層需要具備較強的透氣性能，否則會產生極化現象。

氣體擴散層的氣液管理能力與其孔結構具有很大的相關性，具備特殊的孔隙結構的氣體擴散層對提高燃料電池的性能有重要作用；此外通過設計氣體擴散層微孔層表面結構分離氣液傳輸通道，也能夠提高氣體擴散層的氣液傳輸能力。

氣體擴散層通常包括基底層和微孔層兩部分，其中基底層多採用碳纖維製備的多孔碳紙和碳布，微孔層主要由疏水劑和導電炭黑構成。選擇不同形態的碳基材料和特殊的結構設計是目前研究工作的主要方向。

就材料選擇而言，包括 AB 炭黑，Vulcan XC-72R 等傳統的炭黑材料；以及碳納米管，石墨烯等新型碳納米材料。搭配不同的材料，可以獲得特殊的孔結構，比較成功的研究成果包括孔徑呈梯度分佈的結構，該結構具備更好的氣體輸送和液態水排出效果；使用不同材料如 Vulcan XC-72 與乙炔黑複合，可以創造不同孔徑的氣體擴散層，增強了水管理能力，從而提高了燃料電池的功率密度；碳納米管材料中摻雜炭黑能夠形成具備更大孔徑和孔隙率的氣體擴散層材料，有效提高了大電流密度下燃料電池內的反應氣體傳輸。

調整氣體擴散層的親水和疏水結構對燃料電池傳質效率和極限電流密度有重要影響，親水區用於排出更多的產物水，而疏水區可以在較高的電流密度下為反應氣體提供傳輸通道。常用的親水劑包括矽酸鋁纖維、親水碳納米管，常用的疏水劑有聚全氟乙丙烯（FEP）、聚偏二氟乙烯（PVDF）、聚四氟乙烯（PEFE）等；通過親疏水劑將氣體擴散層設計成親水區與疏水區交替分佈的條紋狀結構、矩陣結構，可以顯著改善氣液傳輸性能。

目前氣體擴散層的供應商主要包括美國的 Avcarb 公司，德國的 SGL 公司和 Freudenberg 公司，日本的三菱集團和東麗公司等，這五家公司的氣體擴散層產品佔據了 78% 的市場份額。優化製備工藝和探索改性材料是提升氣體擴散層應用範圍的主要途徑。

1.2.2 雙極板

單個膜電極的輸出電壓較小（低於 1V），為了獲得較高的輸出電壓，電堆通常由多個膜電極通過雙極板串聯構成。雙極板形成了膜電極的支撐框架，構建了氫氣、反應物水、熱量及電子的傳輸通道，佔據電堆總質量的 60%-80%，佔總成本的 20%-30%。在實際應用中，可能根據電堆的規模額外增加排熱板或集流板，以便提高工作效率。

雙極板在燃料電池中具有重要作用，需要具備多種特性：雙極板是燃料電池的框架，必須具有足夠的強度以支撐膜電極組件；其表面需要加工出流場，以便導通氣體和水，因此必須具有較好的加工性能；還需要具有較好的電導率，以便收集和傳導電流；雙極板需要使氧化劑和還原劑充分隔離，因此需要具備較低的氣體滲透率；雙極板需要在腐蝕條件下工作，因此需要具有良好的電化學穩定性以提高使用壽命；同時還需要具有較高的熱導率和較低的熱膨脹系數，確保工作過程的穩定性；雙極板還需要具備較低的成本和生產週期，以滿足大規模商業應用的需求。目前雙極板所使用的材料主要是石墨基和金屬基。

（1）石墨雙極板

石墨雙極板研發最早，技術發展成熟，因其較好的化學穩定性、較高的電導率和較強的耐腐蝕性而獲得了廣泛應用，基本實現了商業化大規模生產，例如上海弘楓、華熔科技、國鴻氫能，美國 POCO，日本 Fujikura Rubber 等公司均推出了石墨雙極板產品。石墨雙極板使用的石墨種類包括普通石墨、膨脹石墨、柔性石墨等，該類材料在耐腐蝕性、電導率、熱導率方面具有優勢，但是機械強度偏低、具有脆性，因此基於石墨的雙極板通常較厚，限制了電堆體積功率密度的提升；此外，石墨的空隙多、熔點高，導致其加工難度大，加工過程通常需要長時間的浸漬過程（機械加工方式）或需要長時間的凝結劑去除過程（注塑加工方式），或需要複雜的加工設備和較長的生產週期（壓膜加工方式）。

（2）金屬雙極板

金屬雙極板的材料種類包括不鏽鋼、鋁合金、鈦合金、鎳合金、銅合金等，上述材料具有良好的電導率、熱導率、機械性能和阻氣能力，因此可以通過傳統的衝壓技術製備出厚度低於 0.1mm 的雙極板，在大規模生產和體積功率密度方面具有優勢。大連新源動力，北京新研創能，舍費勒等公司均推出了採用金屬雙極板的電堆系統。但是在燃料電池的工作環境下，金屬材料容易受到腐蝕，導致其使用壽命低於石墨雙極板，而提高其抗腐蝕性成為了金屬雙極板重要的研究工作。目前表面改性是提高金屬雙極板抗腐蝕性的主要技術路線，分為三類：後鍍塗層工藝、預鍍塗層工藝、及免鍍金屬。

後鍍塗層工藝是指在衝壓成形的極板表面上製備抗腐蝕材料。常見的方法包括電鍍、化學鍍、溶膠凝膠、電沉積、物理氣相沉積（PVD）、化學氣相沉積（CVD）、表面氮化和高速火焰噴塗等，其中使用 PVD 技術進行表面改性的金屬雙極板具有較高的衝擊強度，較好的耐高溫 and 耐磨性能，而且 PVD 技術無污染，沉積速度快，可以適用多種材料。後鍍塗層工藝所使用的表面改性材料包括碳基塗層材料（非晶碳、氧化石墨烯），金屬塗層材料（Ta、Au、Pt、Ag），陶瓷塗層材料（氮化物、碳化物），聚合物材料（聚吡咯、聚苯胺、聚噻吩）等。

預鍍塗層工藝主要用於不鏽鋼基雙極板的加工，在不鏽鋼帶上採用 roll to roll 方法沉積耐腐蝕導電塗層，再進行微衝壓成型。該方法的生產效率要高於後塗層工藝，但是對塗層厚度的控制要求較高，厚度數值偏低或偏高分別會產生橫向裂紋或斜向裂紋；而且在微衝壓過程中，塗層會因延展性不足而產生開裂、也會因與基體金屬的應變存在差異而產生分層，導致雙極板失效。

免鍍金屬雙極板是基於不鏽鋼自身所產生的鈍化層來實現抗腐蝕效果，通常需要控制不鏽鋼表面的成份配比，並經過酸浸處理、熱處理、電化學處理等方式來調節厚度和表面粗糙度，從而提高鈍化層的導電性和耐腐蝕性，該方法成本較低，但是用該方法進行表面改性的雙極板導電性能較差，相關研究尚不成熟。

(3) 雙極板流場及流道設計 1.2.3 應用現狀及未來展望

雙極板的流場結構決定了有效反應面積的比例、反應氣體分佈均勻性等，對燃料電池的工作效率有較大的影響，典型的雙極板流場包括點狀流場、平行直流道流場、交指形流道流場、單通道蛇形流場等。基於典型的流場設計，眾多研究人員提出了新型的流場佈局方案，例如流道逐漸變小的結構，點狀與交指組合的結構，平行波浪的結構以及仿葉脈、肺氣管、樹冠等仿生結構等。除雙極板流場分佈外，流道的形狀、尺寸對反應物的分佈及利用率、導電性、水管理等均會產生影響。

目前，氫燃料電池主要應用於交通領域，在客車、巴士、鐵路運輸等領域已有應用的案例，例如日本豐田汽車、本田汽車，韓國現代汽車，美國通用汽車；美國弗吉尼亞州的氫燃料巴士項目；中國佛山市氫能源有軌電車。但是氫燃料電池的應用規模仍然比較小，氫能源汽車作為主要的氫燃料電池使用者，截止 2022 年的全球保有量僅為 6.7 萬，氫燃料電池的推廣不僅因為其系統的技術難度比較大，還受到上下游配套產業的影響，涉及製氫、氫氣儲運和加氫站等環節。

未來，氫燃料電池的應用將隨著產業鏈的完善而不斷擴大，多家證券機構、大數據公司預測，新材料及新工藝會降低氫燃料電池的使用成本，氫能源汽車將會進一步被市場重視和成為經濟增長點，帶動氫能源產業鏈。

除氫能源汽車外，氫能源城市也有望得到進一步發展，2020 年東京奧運會期間，日本佈局了氫能源村，公共設施以及 5600 戶以上的家庭使用氫能源供電、供熱，日本政府計劃繼續推廣氫能源，在 2030 年覆蓋 530 萬戶家庭。美國政府也提出了 2030 年氫能源產業鏈的目標：電解水製氫成本、氫儲運成本、車載儲氫成本、燃料電池系統成本分別降低至每公斤 1 美元，每公斤 2 美元，每公斤 2 美元，每千瓦 80 美元；中國重點關注氫能源下游領域，在氫能汽車、氫能船舶、氫能飛行器等應用領域推出了政策，並相繼展出了原型機作技術驗證。氫能源產業的範圍將隨著關鍵材料技術突破而不斷擴寬。

鋁合金 的介紹

2.1 背景

鋁合金是工業中應用得最為廣泛的一類有色金屬結構材料，尤其在航空、航天、汽車、機械製造、船舶製造及化學工業中得到了大量的應用。鋁合金是一種以鋁（Al）為主要金屬的合金。純鋁的密度小，熔點低，抗腐蝕性能良好，具有很高的塑性，易於加工，可製成各種擠材及板材。但是純鋁的強度很低，不能作為結構材料來使用。通過長期的生產實踐和科學實驗，人們發現可以通過加入合金元素及運用熱處理等方法來強化鋁。其中，加入到鋁合金的典型元素包括銅、鎂、錳、矽、錫、鎳和鋅。而鋁合金主要分成兩類：鑄造鋁合金和變形鋁合金。變形鋁合金是將合金配料熔鑄成坯錠，再進行塑性變形加工，通過軋製、擠壓、拉伸、鍛造等方法製成各種塑性加工製品。鑄造鋁合金則是將原料熔煉後，直接使用砂模、鐵模、熔模或壓鑄等方法，將其鑄造成各種零部件的毛坯。根據鋁合金的成分，國際上又分七個合金系列，即 1xxx 系列 - 純鋁、2xxx 系列 - 鋁銅、3xxx 系列 - 鋁錳、4xxx 系列 - 鋁矽、5xxx 系列 - 鋁鎂、6xxx 系列 - 鋁鎂矽、7xxx 系列 - 鋁鋅鎂，如表 1-1 所示。

表 1-1 鋁合金的牌號和主要合金元素

鋁合金牌號	主要合金元素
1xxx	99% 純度
2xxx	Cu
3xxx	Mn
4xxx	Si
5xxx	Mg
6xxx	Mg 和 Si
7xxx	Zn

2.2 鋁合金的分類和用途

2.2.1 一系鋁合金

1xxx 系列鋁合金由純鋁中添加少量的銅元素形成，該系列具有極佳的成型加工特性、高耐腐蝕性、良好的焊接性和導電性。在所有鋁合金系列中，1xxx 系列鋁合金的鋁含量最高，純度可達 99.00% 以上。由於不含其他合金元素，因此生產過程相對簡單，價格相對較低，並在常規工業中廣泛應用。1xxx 系列鋁合金主要適用於強度要求不高的產品，如化工儀器、薄板加工件、深拉或旋壓凹形器皿、焊接零件、熱交換器、鐘錶表面和盤面、銘牌、廚具、裝飾品、反光器等。常見的 1xxx 系列鋁合金牌號有 1050、1060、1070、1100。1xxx 系列純鋁及鋁合金的化學成分詳見表 1-2。

表 1-2 1xxx 純鋁及鋁合金的化學成分（質量分數 wt%）

矽 Si	鐵 Fe	銅 Cu	錳 Mn	鎂 Mg	鉻 Cr	鋅 Zn	鈦 Ti	其他		鋁 Al
								每個	總計	
		5.0-			0.18-					99.6
0.25	0.35	6.0	0.03	0.03	0.28	0.05	0.03	0.05	0.15	以上

2.2.2 二系鋁合金

2xxx 系列為鋁銅系中典型的硬鋁合金，其綜合性能較好。許多國家都生產這種合金，是硬鋁中使用量最大的一種合金。該合金的特點在於強度高且具有一定的耐熱性，可用於 150℃ 以下的工作溫度。憑藉其高強度和良好的抗疲勞性能，2xxx 鋁合金廣泛應用於航空機器結構，尤其是飛機機翼和機身等受張力影響的部位。2xxx 鋁合金常見的牌號有 2024、LY12、2A11、2A14、2017、2A17。表 1-3 詳細展示了 2xxx 鋁合金的化學成分。

表 1-3 2xxx 鋁合金的化學成分（質量分數 wt%）

矽 Si	鐵 Fe	銅 Cu	錳 Mn	鎂 Mg	鉻 Cr	鋅 Zn	鈦 Ti	其他		鋁 Al
								每個	總計	
		3.8-	0.3-	1.2-						92.6
0.5	0.5	4.9	0.9	1.8	0.01	0.25	0.15	0.05	0.15	以上

2.2.3 三系鋁合金

3xxx 系列是鋁錳系防鏽鋁合金，有相當廣泛的應用。儘管其強度不高（略高於工業純鋁），且無法通過熱處理進行強化，但通過冷加工方法可提升機械性能。該合金具有優良的塑性，耐腐蝕性和適合焊接，但其切削性能較差。該合金適用於要求有良好可塑性和焊接性的低載荷零件，例如油箱、液體容器、小型深拉零件。同時適合製造例如廚具、食品和化工處理儲存設備、液體產品運輸槽罐、薄板壓力容器和管道、散熱片、化妝板、影印機滾筒等的零件和部件。3xxx 鋁合金的化學成分詳見表 1-4。

表 1-4 3xxx 鋁合金的化學成分（質量分數 wt%）

矽 Si	鐵 Fe	銅 Cu	錳 Mn	鎂 Mg	鉻 Cr	鋅 Zn	鈦 Ti	其他		鋁 Al
								每個	總計	
0.6	0.7	0.05-0.2	1.1-1.5	-	-	0.1	-	0.05	0.15	97 以上

2.2.4 四系鋁合金

4xxx 系列的鋁合金屬於矽含量較高的系列，通常矽含量在 4.5-6.0% 之間。該系列主要應用於建築材料、機械零件、鍛造材料和焊接材料等領域。該合金具有低熔點、優異的耐蝕性，耐高溫 and 耐磨的特性。4xxx 鋁合金的化學成分詳見表 1-5。

表 1-5 4xxx 鋁合金的化學成分（質量分數 wt%）

矽 Si	鐵 Fe	銅 Cu	錳 Mn	鎂 Mg	鉻 Cr	鋅 Zn	鈦 Ti	其他		鋁 Al
								每個	總計	
4.5-6	0.1-0.5	0.1-2.5	0.2-0.4	0.2-2.9	0.1-0.3	0.1-0.5	0.02-0.15	0.05	0.15	餘量

2.2.5 五系鋁合金

5xxx 系列鋁合金主要添加元素是鎂，含鎂量在 3-5% 之間，因此也被稱為鋁鎂合金。這一系列鋁合金具有密度低、抗拉強度高和延展性能良好的特點。在相同面積下，鋁鎂合金的重量較其他系列的鋁合金輕，因此在航空領域（例如飛機油箱）得到廣泛應用，同時在常規工業中也有廣泛的應用。該系列鋁合金通過連續鑄造和連續軋製的加工工藝製造，屬於熱軋鋁板系列，因此可以進行氧化深加工。5xxx 鋁合金的化學成分詳見表 1-6。

表 1-6 5xxx 鋁合金的化學成分（質量分數 wt%）

矽 Si	鐵 Fe	銅 Cu	錳 Mn	鎂 Mg	鉻 Cr	鋅 Zn	鈦 Ti	每個		總計	鋁 Al
			0.4-	4.0-	0.05-						
0.4	0.35	0.1	1.0	4.9	0.25	0.25	0.15	0.05	0.15		餘量

2.2.6 六系鋁合金

6xxx 系列鋁合金是一種含有鎂和矽兩種元素的鋁合金系列，它結合了 4xxx 系列和 5xxx 系列鋁合金的優點，特別適用於對抗腐蝕性和氧化性要求高的領域。典型的應用領域包括飛機零件、相機零件、船舶配件、電子配件、裝飾材料、鏈條頭、剎車器活塞和電器配件等。6xxx 鋁合金的化學成分詳見表 1-7。

表 1-7 3xxx 鋁合金的化學成分（質量分數 wt%）

矽 Si	鐵 Fe	銅 Cu	錳 Mn	鎂 Mg	鉻 Cr	鋅 Zn	鈦 Ti	其他		每個	總計	鋁 Al
0.4-		0.15-		0.8-	0.04-							
0.8	0.7	0.4	0.15	1.2	0.35	0.25	0.15	0.05	0.15			餘量

2.2.7 七系鋁合金

7xxx 系列鋁合金主要以鋅為主要合金元素，另外添加了少量鎂和銅。相比 6xxx 系鋁合金，7xxx 系鋁合金的擠壓速度較慢，但具有良好的焊接性能。在 7xxx 系鋁合金中，7005 和 7075 是最高級別的材料，可通過熱處理進行強化。7xxx 系鋁合金在航空領域廣泛應用，包括飛機的承力構件、起落架、還有火箭、螺旋槳以及航天器等。7xxx 鋁合金的化學成分如表 1-8 所示。

表 1-8 7xxx 鋁合金的化學成分（質量分數 wt%）

矽 Si	鐵 Fe	銅 Cu	錳 Mn	鎂 Mg	鉻 Cr	鋅 Zn	鈦 Ti	其他		鋁 Al
								每個	總計	
0.4	0.5	1.2- 2.0	0.3	2.1- 2.9	0.18- 0.28	5.1- 6.1	0.2	0.05	0.15	餘量

2.3. 鋁錳合金

2.3.1 成分和牌號

3xxx 系鋁合金以錳（Mn）作為主要合金元素，因此被稱為鋁錳系鋁合金。作為一種經過熱處理後不可強化的變形合金，鋁錳系鋁合金具有多種優點。除了良好的抗氧化性、耐腐蝕性、導熱導電性、低密度和良好的延展性外，它的強度也高於工業純鋁。此外，它還具有出色的焊接性能和非磁性等特點。因此，Al-Mn 系鋁合金在電子通訊、民用五金、化學設備和建築裝飾材料等行業中廣泛應用。表 1-9 列出了幾種常用的 3xxx 系鋁合金的合金元素含量和應用領域。

表 1-9 常用牌號的 3xxx 系鋁合金的合金元素含量及應用領域合金

合金	Mn	Mg	Fe	Cu	Si	Zn	Ti	Al	應用
3003	0.9-1.4	-	≤ 0.6	0.06-0.19	≤ 0.57	≤ 0.12	-	餘量	熱交換器、壓力容器
3004	0.9-1.4	0.9-1.2	≤ 0.6	≤ 0.28	≤ 0.27	≤ 0.24	-	餘量	電纜、鋁罐
3104	0.9-1.5	0.9-1.4	≤ 0.9	0.08-0.27	≤ 0.7	≤ 0.28	≤ 0.12	餘量	電子產品、電視機背板
3102	0.06-0.5	-	0.8	0.15	0.42	0.33	0.12	餘量	活動房板、擋板
3A21	12-1.8	0.06	≤ 0.8	0.24	0.62	0.13	-	餘量	清潔設備、洗衣機缸體

2.3.2 鋁錳合金中各元素的特點及作用

鋁錳系合金的成分非常多樣化，包括錳（Mn）、鐵（Fe）、矽（Si）、銅（Cu）、鎂（Mg）、鋅（Zn），以及微量元素鈦（Ti）和鈮（V）。這些元素對合金的性能有著不同的影響。

其中，錳（Mn）是鋁錳合金的主要組成元素，以金屬間化合物 Al_6Mn 的形式存在於合金中，並隨著 Mn 含量的增加，合金的強度也會增加。在再結晶過程中， Al_6Mn 相會阻礙晶粒的長大，使晶粒細化，進而提高合金的強度。錳元素的含量應該控制在 1.0%-1.6% 的範圍內，這個範圍內的合金具有適當的強度和良好的塑性。如果錳含量超過控制範圍，合金內部會析出粗大且具脆性的 Al_6Mn 相，這會導致合金在塑性變形時容易發生開裂，從而降低合金的塑性。

鐵（Fe）的存在能夠降低錳的溶解度，並形成化合物 $Al_6(Fe, Mn)$ ，從而有助於晶粒的細化。然而，在生產過程中，鐵的含量通常被控制在 0.4% 至 0.7% 之間。過高的鐵含量會導致合金內部析出粗大的片狀偏析物（FeMn） Al_6 ，進而降低合金的加工成形性能。

適量添加矽（Si）可以改善合金的焊接性能和鑄造性能，同時細化晶粒並提高合金的強度。然而，過高的矽含量會導致晶界偏析，進而降低合金的塑性。矽顆粒在晶界偏析的情況下會增加晶間腐蝕的敏感性，進而降低合金的成形能力，同時也會對拉伸和彎曲性能產生不良影響。

鎂（Mg）具有固溶強化的作用。適量添加鎂可以使合金在退火後的晶粒結構細化，進而提高抗拉強度。然而，過高的鎂含量會增加合金的加工硬化率，因此降低了合金的加工性能。

適量添加銅（Cu）可提高合金的抗拉強度，然而過量的銅會增加合金的晶間腐蝕敏感性。一般情況下，銅的含量應控制在 0.2% 以下。如果銅含量超過 4%，則會降低合金的成形性能。

在進行 Al-Mn 合金的均勻化過程中，添加 Cr 和 Zr 等元素會形成分散相，如 $Al(Mn, Fe, Cr)Si$ 或 $Al(Fe, Mn, Cr)Si$ 以及 Al_3Zr 等。這些分散相的增加會提高再結晶溫度，對合金的均勻化過程有顯著影響。分散相的釘扎作用可以阻礙晶粒的生長，從而實現晶粒細化的效果。同時，分散相能夠促進晶粒的均勻滑移，提高合金的強度、塑性和彎曲能力。

針對晶粒成核過程，鈦（Ti）具有一定的促進作用，可作為一種有效的晶粒細化劑。此外，鈦能夠均勻分佈於晶界間，有效阻礙晶粒的生長，使合金的結構得到細化，進而提高合金的成形效率。

添加適量的鋅（Zn）元素對合金的抗腐蝕性能具有顯著的好處。然而，在鋁錳合金中同時添加鎂（Mg）和鋅（Zn）可能導致 Mg_2Zn 相的形成，從而產生時效強化效應。這種時效強化效應可以明顯提高合金的強度，但最終可能導致合金的抗腐蝕性能和力學性能降低。

2.3.3 3xxx 系鋁合金的應用現狀

鋁錳系鋁合金具有出色的綜合性能，如輕量化、良好的塑性、適中的強度和較低的表面粗糙度等。因此，它在交通運輸工具、裝飾材料、電子通訊和機械設備等各種工具的生產中得到越來越廣泛的應用。

該合金由於其優異的塑性、適中的強度和出色的深衝性能，被廣泛應用於動力電池外殼的生產。由於在深衝加工過程中，電池外殼會產生較大的變形量，且動力電池外殼的生產過程複雜，需要進行多次的衝製。因此，對於用於電池殼生產的材料，良好的深衝性能是必不可少的要求。

同時，該合金以其卓越的耐腐蝕性、連接性能和成形性能等特性而著稱。它常被應用於製造具有高抗腐蝕性、優異焊接性和良好成形性要求的產品，例如廚房用具、食品儲存容器、化工設備，各種槽形和瓶罐狀器皿、壓力容器、散熱器、熱交換器、化妝工具，以及交通工具的材料。此外，鋁錳系鋁合金還具有優異的防銹性能，因此被廣泛應用於製造長期存放於潮濕環境中的產品的包裝材料和冷氣通風管道。

該合金還具有良好的光學反射性、非磁性和加工性等優良特性，廣泛應用於打印機的關鍵部件感光鼓當中。此外，鋁錳合金在防輻射性能方面和純鋁相當，但比純鋁強度更高。因此，它被廣泛的應用於製造電子遮罩箔和電視機的防輻射材料。同時，也被應用於矩形波導管，提高雷達和無線電通訊系統的波導效果。由於這些部件的加工精度要求很高，所以對鋁原材料的內部組織和表面質量有非常嚴格的要求。因此，在生產過程中，提高合金的性能和內部組織，並進一步進行深加工和表面鍍錫處理至關重要。因此，鋁錳系合金作為潛在材料，有希望成為氫燃料電池的雙極板潛在材料之一。

2.1 材料製備

2.1.1 技術背景與市場需求

燃料電池是一種高效、清潔的新能源技術，它將氫氣和氧氣反應產生電能和水蒸氣。與傳統汽油車相比，氫燃料電池車不會產生任何有害氣體。同時，氫燃料電池車的續航里程更長，加注氫氣也更方便。隨著能源短缺、環境污染等問題的加劇，氫燃料電池以其零污染、高轉化率等優勢逐步成為電動汽車的主要動力來源。氫燃料電池技術在衛星、船舶、飛機等領域也得到了廣泛應用，未來將成為清潔能源領域的重要發展方向。

然而，傳統氫燃料電池運作過程中產生的高密度能量不可避免地削弱系統能量傳遞（例如熱傳遞）的安全性。利用氫、電和熱之間的協同作用來提高能源效率則需要對各種材料、介面和系統進行集成處理，導致電池框架的製備較複雜，成本亦較高。此外，在極端環境下，機械性能（例如耐腐蝕性、耐久性等）受限，燃料電池整體穩定性降低。

雙極板是燃料電池中用於分隔和連接燃料電池堆中的關鍵元件，其重量和製造成本分別佔比電池的 80% 和 55%。雙極板具有多方面的功能，包括 1. 在電池內分配燃料和氧化劑；2. 收集產生的電流；3. 排放電池運作過程產生的廢水；4. 防止氣體和水在活動區域洩漏；5. 為電池堆提供反應物（燃料和氧化劑）的通道。因此，雙極板應具有高電導率、耐化學腐蝕性和優良的熱傳導性，以實現高效熱傳遞。

隨著燃料電池技術的發展和應用的廣泛推廣，燃料電池雙極板的市場需求也在不斷增長。燃料電池雙極板的市場需求主要來自：1. 汽車行業，燃料電池汽車是未來汽車行業的發展方向之一，燃料電池雙極板是燃料電池汽車的核心部件之一；2. 能源行業：燃料電池可以作為一種新型的清潔能源，廣泛應用於電力、熱力等領域；3. 工業應用：燃料電池雙極板可以用於工業應用，如備用電源、電動工具等領域。

目前燃料電池雙極板生產行業所使用的金屬材料不能滿足新興市場對材料性能和規格的高度要求。主要表現在 1. 耐腐蝕性不足：燃料電池雙極板需要具備良好的耐腐蝕性能，以應對燃料電池堆中產生的酸鹼性物質和高溫高壓環境。但目前常用的材料如碳纖維複合材料、金屬材料等耐腐蝕性能存在不足，需要進一步提高其耐腐蝕能力； 2. 熱穩定性不足：燃料電池雙極板需要具備良好的熱穩定性能，以保證在高溫高壓環境下不會發生變形和損壞； 3. 導電性不足：燃料電池雙極板需要具備良好的導電性能，以保證電流能有效傳輸和分配。

目前開發的雙極板材料包括高溫陶瓷材料、高分子材料、金屬基複合材料（如不鏽鋼、鈦合金等）。但是，現有的雙極板材料在實際條件下運行時，其耐腐蝕性、熱力學性能較差，導熱性和導電性能在電池工作過程中不夠穩定，不能滿足燃料電池雙極板在高溫高壓環境下的需求，使得燃料電池存在嚴重安全隱患。

2.1.2 材料介紹

本項目所使用的雙極板鋁基合金材料，主要成分是鋁，還包括錳、銅、鐵，其中各組分的重量百分比分別為：錳：0.45%-1.4%，銅：0.1%-0.13%，鐵：0.1%-0.2%，餘量為鋁。

該材料具有輕質、高強度、高導熱、低成本、環保等理想功能特性。將其與相變材料相結合，當相變溫度處於氫燃料電池的最佳運行溫度範圍，可實現有效的燃料電池熱管理，提升安全性的同時亦可延長氫燃料電池的壽命。該材料的技術為燃料電池雙極板的性能和效率提升提供了新思路，有望在燃料電池汽車的研發中發揮重要作用。

本項目研究的雙極板鋁基合金材料具有的優點如下：

- 輕量化：鋁 - 錳 - 銅雙極板採用輕量化的鋁材料作為基板，相比傳統的銅基板更輕，有助於減輕整體電子設備的重量，適用於輕薄可攜式裝置和電動車等領域。
- 良好的導電性：鋁 - 錳 - 銅雙極板透過添加錳和銅等合金元素，提高了材料的導電性能。比起純鋁材料，鋁 - 錳 - 銅雙極板具有更低的電阻和更好的電導率，有利於電子設備中電流的傳輸和分配。
- 良好的耐腐蝕性：鋁 - 錳 - 銅雙極板經過軋製處理後，表面形成了均勻緻密的氧化膜，具有較好的耐腐蝕性能。這使得雙極板在潮濕、酸鹼環境下保持良好的穩定性，並延長了電池的使用壽命。
- 良好的熱傳導性：鋁 - 錳 - 銅雙極板具有較高的熱傳導性能，可有效地將電池產生的熱量快速傳導出去，提高電池的散熱效果，避免過熱引發安全問題，並有助於提高電池的充放電效率。
- 製造成本低：相較於傳統的銅基板，鋁 - 錳 - 銅雙極板採用了軋製處理的工藝，製造成本相對較低；另外，鋁材料本身價格相對較低，使得鋁 - 錳 - 銅雙極板在大規模生產上具有一定的經濟優勢。

2.1.2 製備工序

本項目所使用的雙極板鋁基合金材料的製備工藝方法具體內容包括如下步驟：

- a) 配料：準備工業用純鋁、Al-Mn 合金和 Al-Cu 合金；
- b) 預熱：將電阻爐預熱，將步驟 A 中的原料按前述配比將原料加熱至 500-600℃，並保持 1 小時以上，確保原料充分融化，接著將溫度升至 800-900℃，保溫 30 分鐘以上，確保原料完全融化；
- c) 添加精煉劑：將電阻爐降溫至 700-750℃，加入 10 克精煉劑，使用鈦合金工具攪拌 2 分鐘，並扒除漂浮在金屬熔液上方的雜質，確保合金中的雜質有效去除，保溫 30 分鐘後，清除合金表面的浮渣；
- d) 澆鑄：對鐵製模具進行預熱至 220-270℃，將前述合金鑄注至所述模具中，等待合金冷卻，形成鑄錠，鑄錠透過空冷進行自然冷卻；
- e) 軋製預處理：將鑄錠切割成板材，然後對板材進行表面處理；
- f) 軋製：將步驟 E 中的合金板材置於室溫的軋製機中，透過每秒 0.15-0.25 米的速度軋製板材，獲得所需的雙極板厚度，軋製下壓量在 40% 到 70% 之間。

以上步驟中使用的精煉劑為無機鹽混合物。步驟 E 中表面處理包括：打磨去除氧化層、並用酒精擦拭清潔。步驟 A 中的 Al-Mn 合金為 Al-10Mn 合金，Al-Cu 合金為 Al-50Cu 合金。

2.1.4 總結

本項目所使用的 Al-Mn-Cu 合金，具有優良抗腐蝕性（抗酸性、抗氧化性等），其合金導熱率在室溫下為 108.2 W/mk，與之相比，高強度的 7 系鋁合金為 100.4 w/m.k，常見 410 不鏽鋼導熱率僅為 20.2 w/m.k，Ti-6Al 合金導熱率僅為 6.6 w/m.k，相比傳統材料，有著大大提升的導熱率。此外，隨著溫度升高，Al-Mn-Cu 鋁合金的導熱率從 108.2 w/m.k（25° C 室溫）增加到 118.1 w/m.k（100° C），導熱性能可以進一步提升。對該 Al-Mn-Cu 合金延伸率進行測試，鑄態下延伸率可高達 50% 以上，抗拉強度不低於 70MPa。通過軋製強化後，合金延伸率高於 15%，抗拉強度更是能提升到 120 MPa 以上。與其相比，Ti-6Al 合金的延伸率僅為 8%，無法採用衝壓工藝進行複雜形狀的成形。與鈦合金和不鏽鋼（10-30W/mK）相比，Al-Mn-Cu 合金在室溫下具有更好的塑性和更高的熱導率（最高可接近 180 W/mK）。通過研究以上 Al-Mn-Cu 合金的衝壓工藝和參數，驗證了所開發鋁基合金可通過簡單易行的衝壓技術實現大規模生產。同時，相變材料可與 Al-Mn-Cu 合金材料結合，提升燃料電池內部熱管理效率。此類新型雙極板的製造成本將在原材料及製造方面大幅降低，並且可通過傳統衝壓操作進行大規模生產。

本項目所研發的金屬複合雙極板材料，因其較高的機械強度、耐腐蝕性、較好的熱穩定性及低成本，能有效收集和傳導電流並排出反應的熱量及產物水，可廣泛應用於質子交換膜燃料電池的組裝。此外，該材料及其製造工藝亦適用於電力、熱力器件等領域極板的開發與製造。

2.1.5 圖例介紹

下圖所示為該材料的部分實施例：

圖 2-1 為本項目實施例的鑄態合金材料圖片；

圖 2-2 為本項目實施例的軋製後的合金材料圖片；

圖 2-3 為本項目雙極板衝壓後的圖片。

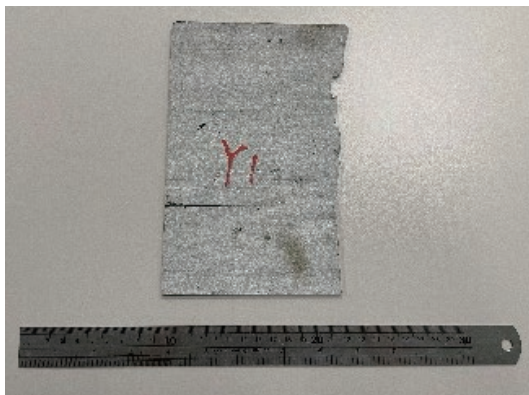


圖 2-1

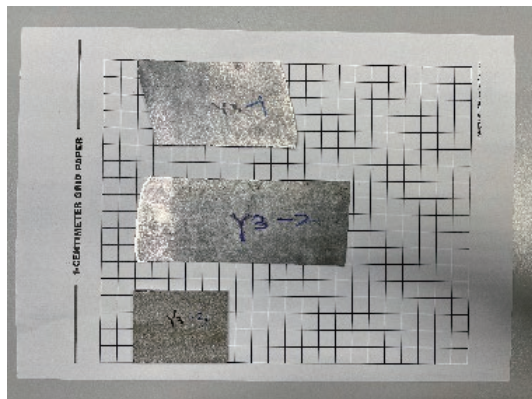


圖 2-2

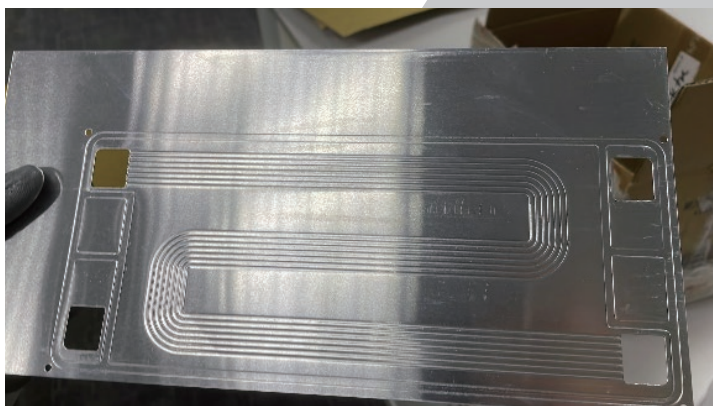


圖 2-3

2.2

雙極板衝壓成型

本專案所使用的金屬基雙極板由一種專用模具通過衝壓成型技術加工而成。該模具用於較高強度的新型衝壓雙極板材料，可以實現一次成型，生產精度高。

2.2.1 衝壓模具

該金屬基雙極板所使用的衝壓成型的專用模具，其造型如下圖 2-5 至 2-8 所示。包括上模元件 10 和下模元件 20。上模元件 10 的組成部件包括上模座 11、上夾板 12、壓料板 13，壓料板上設置有 S 形流道凸版 18，上夾板 12 上圍繞 S 形流道凸版 18 分佈設置有四個柱形的導軌 14、四個定位孔衝頭 17、四個通氣孔衝頭 16 並穿過壓料板 13；下模組件 20 依次包括下模座 21、下夾板 22，下夾板 22 上分佈設置有四個導軌容置孔 23、四個定位孔衝頭容置孔 26、四個通氣孔衝頭容置孔 25 以及凹範本 24，凹範本 24 設置有 S 形流道凹版 27。

該金屬基雙極板專用衝壓模具的上模組件中，壓料板 13 和上夾板 12 以彈性體連接，上模座 11 和上夾板 12 以螺栓固定連接。下模元件各部件以螺栓方式連接。在每一導軌 14 上，設置有限位塊 141。S 形流道凸版 18 和 S 形流道凹版 27 的起點和終點分別連通對角的兩個通氣孔衝頭和通氣孔衝頭容置孔。S 形流道凸版 18 和 S 形流道凹版 27 的截面為半圓形。

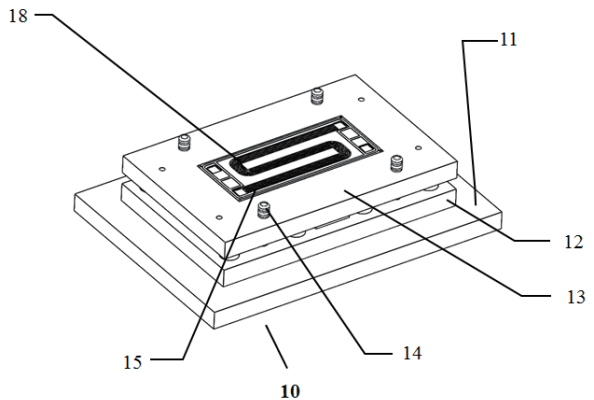


圖 2-4 衝壓模具示意圖

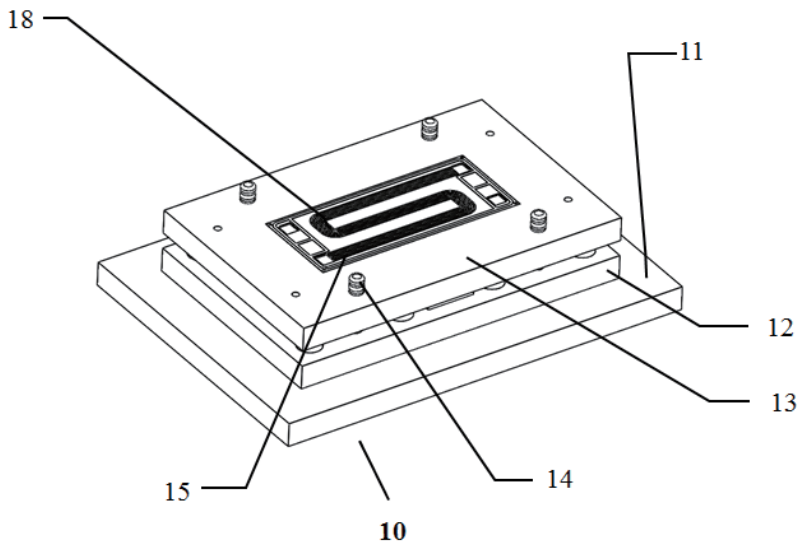


圖 2-5 本專案實施例的上模元件組合示意圖。

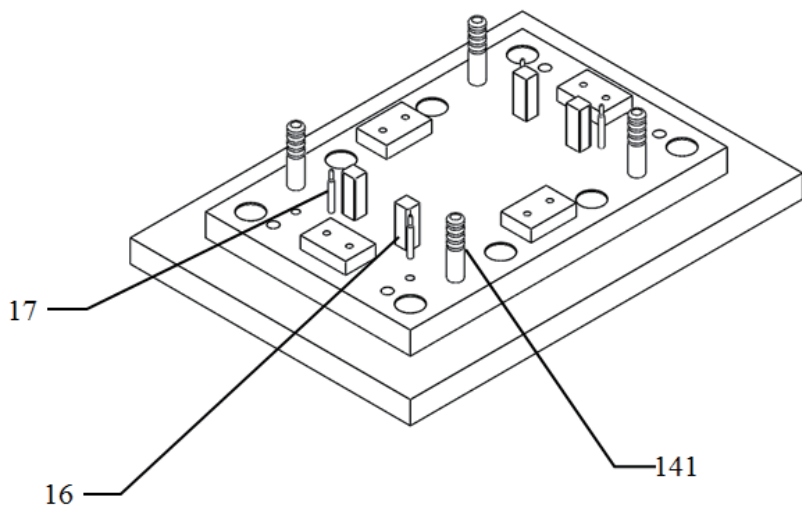


圖 2-6 本專案實施例的上夾板示意圖

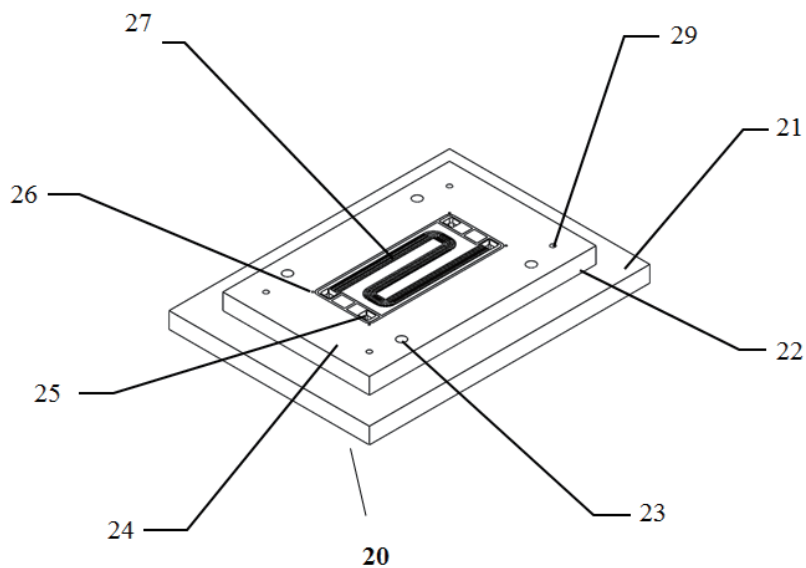


圖 2-7 本專案實施例的下模組件示意圖

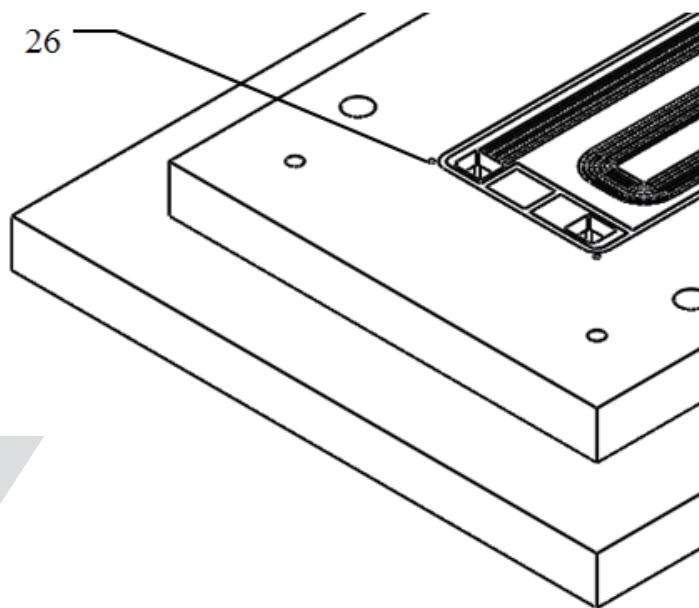


圖 2-8 本專案實施例的下模元件局部放大示意圖。

2.2.2 加工方式

具體實施方式

如上一節內圖片所示為本實施例中使用的用於生產燃料電池的雙極板材料的專用模具，可以用於抗拉強度更好的 Al-Mn-Cu 合金加工。本專用模具包括上模元件 10 和下模元件 20，上模元件和下模元件中的各部件對位元配合後實現衝壓操作生產雙極板。

上模組件 10 依次包括上模座 11、上夾板 12、壓料板 13，壓料板上設置有 S 形流道凸版 18，上夾板 12 上圍繞 S 形流道凸版 18 分佈設置有四個柱形的導軌 14、四個定位孔衝頭 17、四個通氣孔衝頭 16 並穿過壓料板 13；上模元件中，上夾板 12 和壓料板 13 以彈性體例如彈簧連接，以使壓料板 13 可以移動衝壓。每一導軌 14 上設置有限位塊 141。限位塊 141 可以是圓形凸台，防止上模元件和下模元件過度下壓損壞雙極板。

下模組件 20 依次包括下模座 21、下夾板 22，下夾板 22 上分佈設置有四個導軌容置孔 23、四個定位孔衝頭容置孔 26、四個通氣孔衝頭容置孔 25 以及凹範本 24，凹範本 24 設置有 S 形流道凹板 27。下模元件各部件以螺栓方式連接。通氣孔衝頭容置孔與通氣孔衝頭對應設置。S 形流道凸版 18 和 S 形流道凹板 27 的起點和終點分別連通對角的兩個通氣孔衝頭和通氣孔衝頭容置孔。S 形流道凸版 18 和 S 形流道凹板 27 的截面為半圓形。

本實施例的專用模具的衝壓操作流程如下：

- 1) 將雙極板原材料板材放置於下模元件的下夾板 22 上；
- 2) 將上模元件的四個導柱 14 對準導柱容置孔 23 後，通過導軌 14 實現下壓上模元件與下模元件精準對位元，並進行後續的衝壓加工；
- 3) 根據上述流程（1）（2）記載的模具元件及連接方式實施衝壓加工，
- 4) 衝壓完成後，衝壓餘料會順著容置孔 23 落下，方便餘料回收。
- 5) 放置全新待衝壓板材於流程（2）記載的位置，重複上述衝壓流程。

3.1

Al-Mn-Cu
材料性能

小節摘要：選用了 Al-Mn-Cu、5052、7075 鋁合金及 410 不鏽鋼材料並評估驗證其耐腐蝕性能。主要驗證開發的 Al-Mn-Cu 合金耐腐蝕和導熱性能。

主要內容包括：

1. 導熱性能（單位 W/mK），測試溫度從室溫到 100℃；
2. 鹽霧測試（酸性環境下的加速實驗，24 小時測試）；
3. Tafel 曲線，Nyquist 圖，Bode 圖，以及 EIS 資料擬合；
4. 相關測試資料的分析報告。

3.1.1 項目所選材料及成分

本項目所選材料為 Al-Mn-Cu、5052、7075 鋁合金及 410 不鏽鋼薄板，其成分由 X 射線螢光光譜儀進行測試，結果如下所示，合金成分符合 GB/T 3190-2020 和 JIS G 4305-2005 標準。

表 3-1 專案研究四種合金材料的成分 wt. %

合金	Mn	Si	V	Cu	Mg	Zn	Ti	Cr	Al	Fe
Al-Mn-Cu	1.02	0.077	0.02	0.11	0.021	0.019	0.012	0.002	餘量	0.393
5052	0.015	0.247	0.014	0.021	2.38	0.02	0.024	0.271	餘量	0.191
7075	0.078	0.204	0.031	1.667	2.71	6.05	0.059	0.203	餘量	0.255
410	0.438	0.66	0.03	0.004	/	/	0.025	13.4	/	餘量

3.1.2 四種材料的導熱性能對比

高散熱性能是本項目研究的主要目標之一，可由熱導率、熱擴散係數等表示。按照傅立葉定律，熱導率定義為單位溫度梯度在單位時間內經單位導熱面所傳遞的熱量，只表示材料的熱傳導能力。而熱擴散係數是熱導率與比熱容和密度乘積的比，表示材料中熱量擴散的能力，是非穩態導熱中至關重要的參數。

圖 3-1 與 3-2~3-5 為研究四種合金材料的密度、熱導率、比熱容及熱擴散係數的測試結果。對比可見，在室溫 25℃ 條件下，熱擴散係數為 Al-Mn-Cu > 5052 > 7075 > 410，而在 50℃ 與 110℃ 時，熱擴散係數為 5052 > Al-Mn-Cu > 7075 > 410，Al-Mn-Cu 鋁合金的熱擴散係數先降後增。通過分析可知，導熱量基本不變，而比熱容大幅增加，即熱量傳導能力不變但儲存熱量的能力增加，材料所傳導的熱量大多以熱能形式積蓄在材料內部，是導致 Al-Mn-Cu 鋁合金 25℃ ~50℃ 的溫度區間內熱擴散係數降低的主要原因。

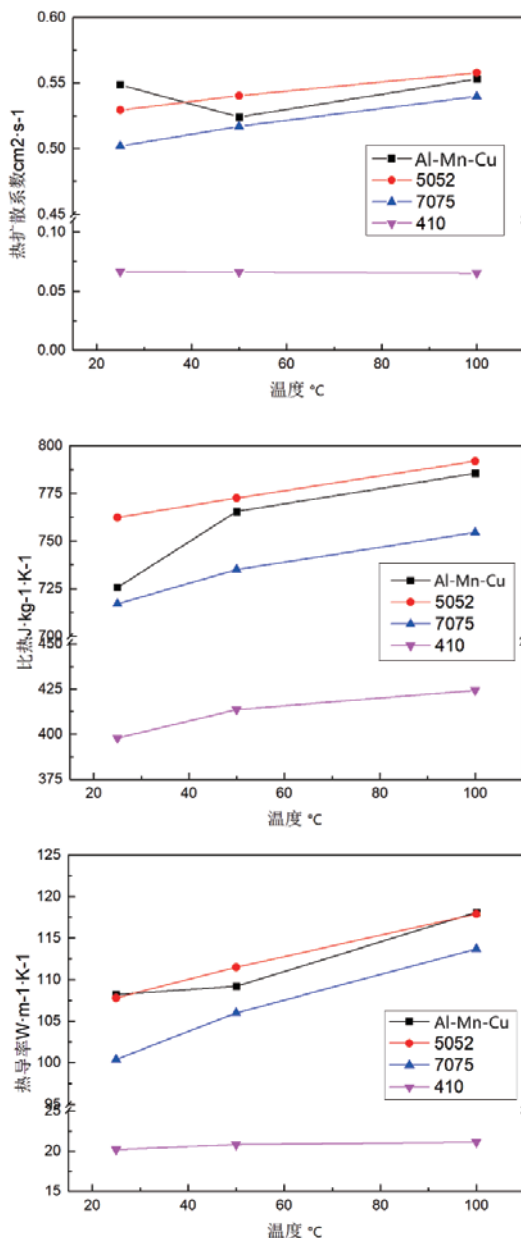


圖 3-1 四種合金的熱擴散性能對比

表 3-2 四種合金材料的密度對比

合金	Al-Mn-Cu	5052	7075	410
密度 (g·cm ⁻³)	2.72	2.67	2.79	7.62

表 3-3 四種合金的熱擴散系數對比

溫度 /°C	熱擴散系數 cm ² ·s ⁻¹			
	Al-Mn-Cu	5052	7075	410
25	0.5486	0.5294	0.5019	0.0665
50	0.524	0.5402	0.5169	0.0659
100	0.553	0.5577	0.5398	0.0651

表 3-4 四種合金的比熱對比

溫度 /°C	比熱 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹			
	Al-Mn-Cu	5052	7075	410
25	725.6	762.4	717	397.9
50	765.5	772.5	735	413.6
100	785.5	791.9	754.5	424.3

表 3-5 四種合金的熱導率對比

溫度 /°C	熱導率 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹			
	Al-Mn-Cu	5052	7075	410
25	108.2	107.8	100.4	20.2
50	109.2	111.5	106	20.8
100	118.1	117.9	113.7	21.1

3.1.3 四種材料的鹽霧腐蝕性能對比

為了確認四種合金的耐腐蝕性能差異，按照相關標準對四種材料進行了 240 小時的酸性鹽霧實驗，並按照相關標準處理腐蝕後樣品。具體實驗條件如下表所示。

表 3-6 試驗條件（實驗週期 240h）

測試條件	標準要求	實驗值
試驗箱溫度（℃）	49 ± 1	49
飽和塔溫度（℃）	57 ± 1	57
鹽霧沉降率（ml/（80cm ² ×h））	1.0 ~ 2.0	1.67
沉降鹽液 PH 值（35℃）	2.8~3.0	2.82
相對濕度（%）	≥98	98
NaCl 純度	使用高純度試劑	
蒸餾水電導率（μS/cm）	≤20	6.1
鹽液密度（25℃）	1.0255 ~ 1.0400	1.0310

酸性鹽霧性能的評價可通過觀察腐蝕表面情況與重量損失計算兩種方法進行。觀察腐蝕表面的方式較為直觀，可對比不同材料腐蝕跡象出現的時間、相同時間不同材料表面的腐蝕程度。結果如表 3-7 和圖 3-2 所示。可見 5052 與 7075 比 Al-Mn-Cu 與 410 更早出現腐蝕；在 240h 測試後，表面腐蝕嚴重程度由大到小的順序為：7075、Al-Mn-Cu、5052、410。

表 3-7 不同合金表面出現腐蝕的時間

合金	Al-Mn-Cu	5052	7075	410
腐蝕出現時間	4h	2h	2h	4h

酸性鹽霧
腐蝕測試

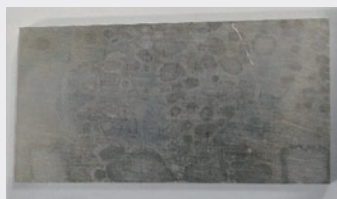
Al-Mn-Cu

5052

0h



2h



4h



6h



8h



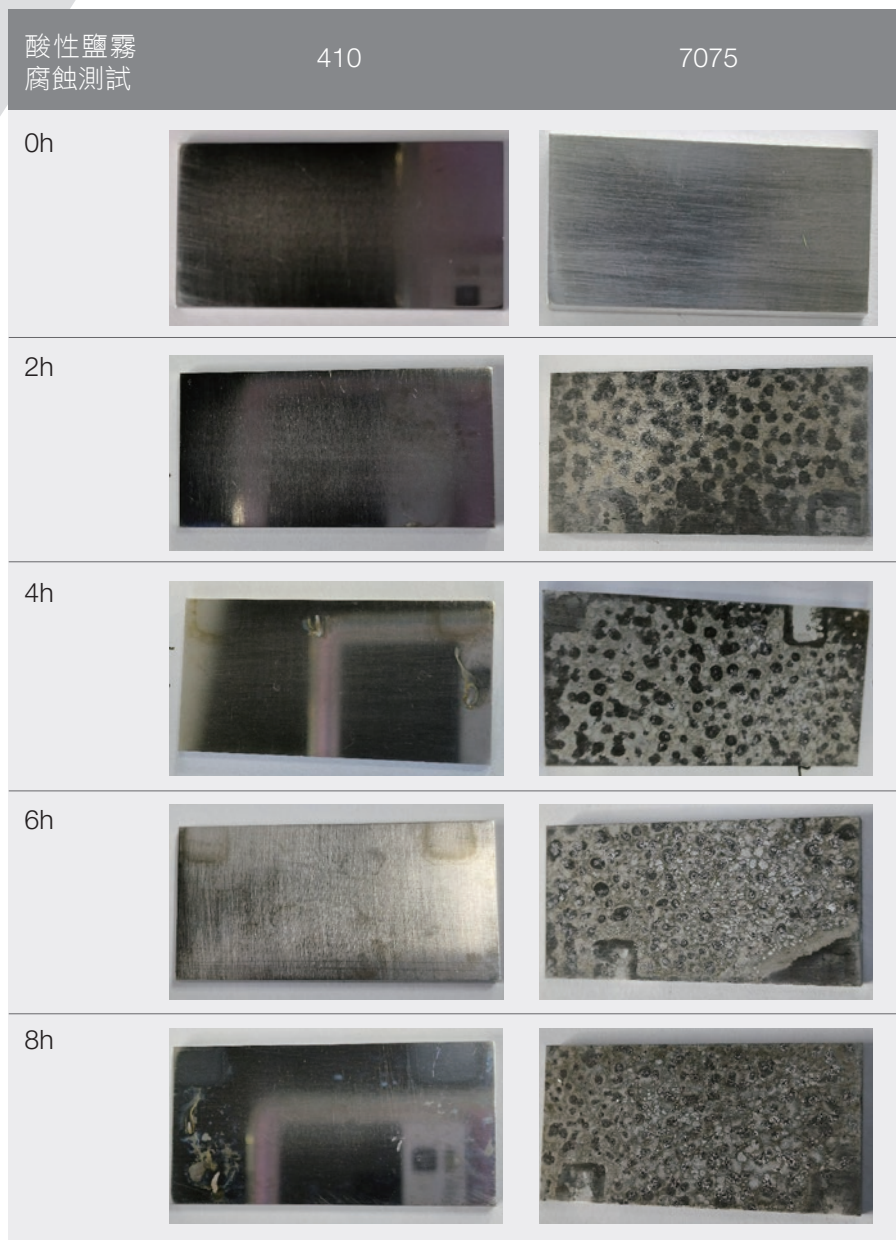


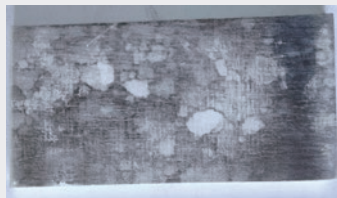
圖 3-2 四種材料經歷不同腐蝕時間後的表面形貌照片

酸性鹽霧
腐蝕測試

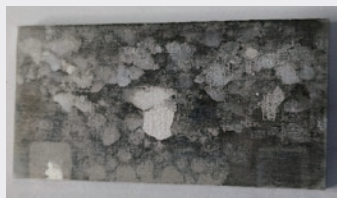
Al-Mn-Cu

5052

24h



48h



96h



168h



240h

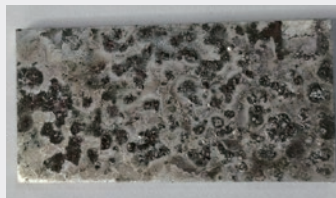


酸性鹽霧
腐蝕測試

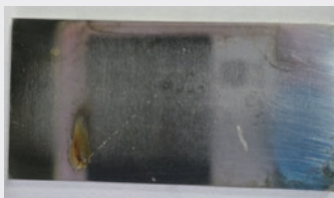
410

7075

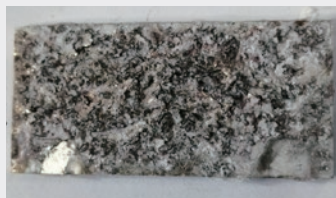
24h



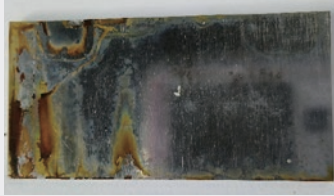
48h



96h



168h



240h



圖 3-2 四種材料經歷不同腐蝕時間後的表面形貌照片

重量損失計算是鹽霧腐蝕評價的重要方法之一，本項目通過十萬分之一天平對腐蝕前後樣品進行了稱重，並分析計算了四種材料在不同腐蝕時間的腐蝕失重率與腐蝕失重速率，計算方法與結果如下：

腐蝕失重率 W 計算方法：

$$W = \frac{m_1 - m_2 - m_1 \times W_{\text{空白}} \div 100}{m_1} \times 100\%$$

m_1 —測試前樣品質量，單位：g；

m_2 —測試後並且酸洗後樣品質量，單位：g；

$W_{\text{空白}}$ —空白失重率，單位：%； $W_{\text{空白}} = (\text{測試前重量} - \text{酸洗後重量}) / \text{測試前重量} \times 100\%$ （腐蝕時間為 0）。

四種合金的腐蝕失重率隨鹽霧時間的變化如圖 3-3 所示，隨著腐蝕時長增加失重率也增加，腐蝕失重率由高到低依次為：7075、Al-Mn-Cu、5052、410，這與表面形貌觀察結果一致。

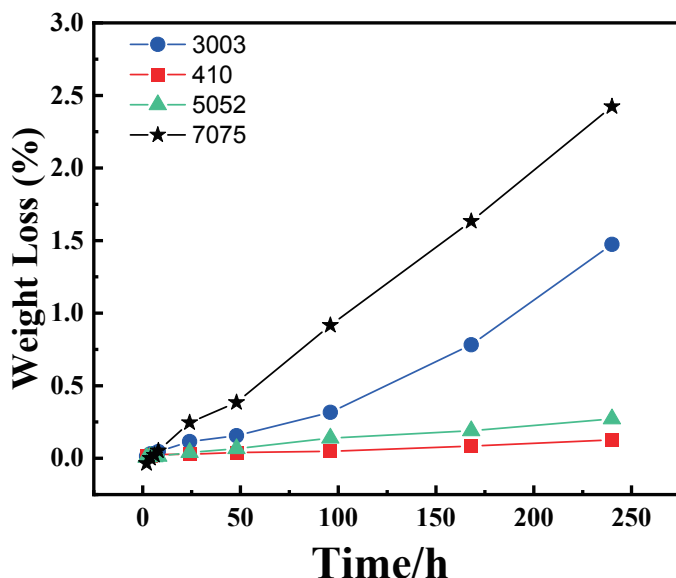


圖 3-3 四種合金的腐蝕失重率隨鹽霧試驗時間變化曲線

腐蝕失重速率 v 計算方法：

$$v = \frac{\Delta m}{S \times t}$$

Δm —測試後樣品失重量，單位：g，

$\Delta m = \text{測試前重量} - \text{酸洗後重量} - W_{\text{空白}} \times \text{測試前重量} \div 100$ ；

S —試片表面積，單位： m^2 ；

t —鹽霧試驗時間，單位：h；

根據計算，四種合金的腐蝕失重速率隨鹽霧時間的變化如圖 3-4 所示，腐蝕初期 410 不鏽鋼的腐蝕速率最大，隨著時間延長，腐蝕速率逐漸降低並達到動態穩定的狀態；7075 鋁合金則與 410 不鏽鋼相反，初期腐蝕速率較小，隨著腐蝕時間延長，腐蝕速率增加並逐漸達到動態穩定的狀態；而 Al-Mn-Cu 與 5052 腐蝕速率基本動態穩定。酸性鹽霧腐蝕試驗時間為 240h 時，計算得到四種合金的腐蝕速率由高到低依次為：7075、Al-Mn-Cu、410、5052。

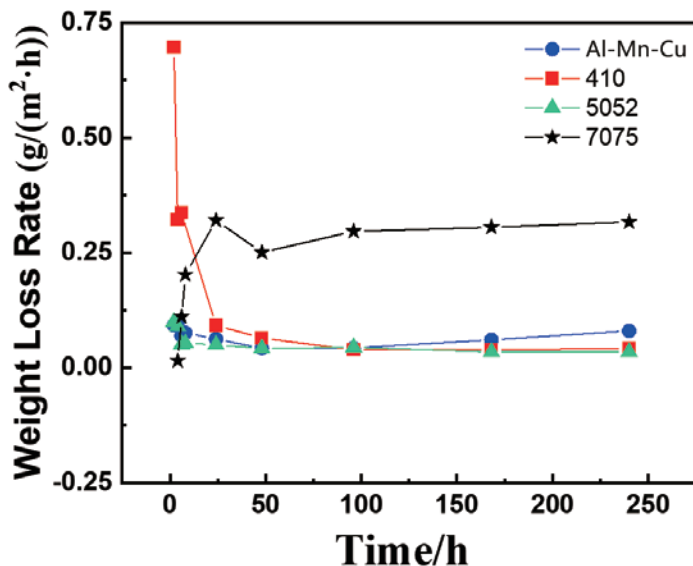


圖 3-4 四種合金的腐蝕失重速率隨鹽霧試驗時間變化曲線

3.1.4 電化學測試

電化學腐蝕性能由 GAMRY Reference 620 電化學工作站進行測試，腐蝕溶液 3.5%NaCl，對四種合金的極化曲線與電化學阻抗譜進行了測試。

圖 3-5 為四種合金的極化曲線，其 Tafel 擬合數據如表 3-8 所示。如以下可見，腐蝕電位 E_{corr} 由正到負依次為：410、5052、7075、Al-Mn-Cu，表示其腐蝕傾向依次增加，但對比四種合金的腐蝕電流密度 I_{corr} 與腐蝕速率 V_{corr} 可知，其腐蝕速率由小到大的順序依次為：410、5052、Al-Mn-Cu、7075，即 7075 鋁合金的腐蝕速度最快，這與前述四種合金的酸性鹽霧腐蝕失重率結果一致。雖然 Al-Mn-Cu 鋁合金發生電化學腐蝕的傾向比較高，但腐蝕速率較低，與 5052 相近。此外，Al-Mn-Cu 鋁合金的腐蝕氧化物保護膜的擊破電流在 10-5 A 級別，遠高於其他三種對照材料。由此可見 Al-Mn-Cu 鋁合金的耐腐蝕破壞的能力更強。

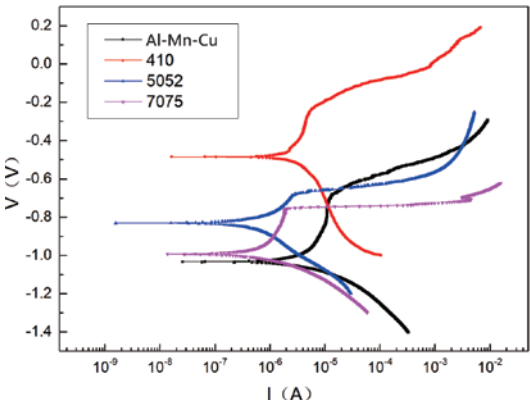


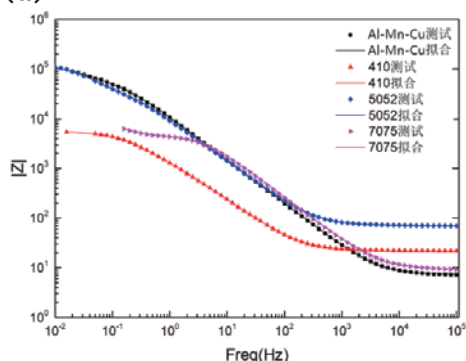
圖 3-5 四種合金的極化曲線

表 3-8 四種合金的極化曲線腐蝕參數

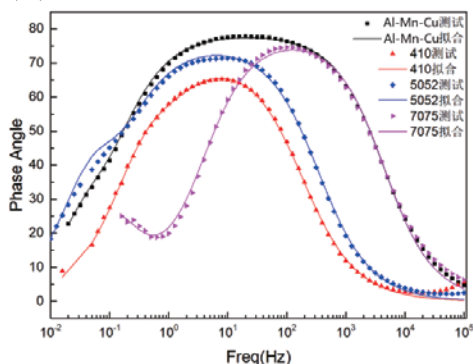
合金	腐蝕電位 $E_{\text{corr}}/\text{V}_{\text{SCE}}$	腐蝕電流密度 $I_{\text{corr}}/\text{A}\cdot\text{cm}^2$	腐蝕速率 $V_{\text{corr}}/\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$
Al-Mn-Cu	-1.03	1.11×10^{-5}	1.37×10^{-4}
410	-0.486	7.58×10^{-6}	1.04×10^{-4}
5052	-0.831	1.03×10^{-5}	1.30×10^{-4}
7075	-0.944	2.29×10^{-5}	2.76×10^{-4}

電化學阻抗譜是研究電極過程動力學和電極表面現象的重要工具，能測量在小幅度微干擾條件下體系的電化學回應。圖 3-6(a)-(c) 為本研究四種合金的 Bode 圖、nyquist 圖。從下圖可直觀地看出，Al-Mn-Cu 鋁合金的容抗弧半徑最大，容抗弧主要是由於金屬表面與腐蝕介質之間的雙電層電荷轉移反應造成，即本研究的四種合金中 Al-Mn-Cu 合金在此腐蝕介質中的電荷轉移難度最高，其次為 5052 合金。但由於電化學測試中存在電極極化、濃差極化等化學反應，故電化學腐蝕的阻抗值無法直接從圖中獲取，需結合等效電路圖擬合才能獲得。

(a)



(b)



(c)

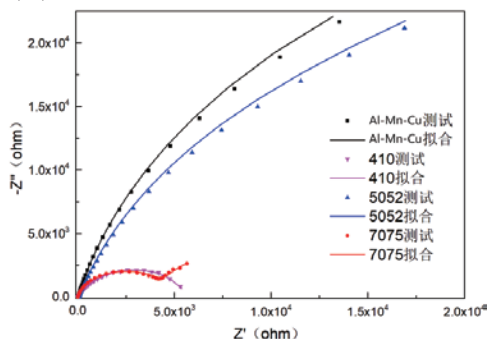


圖 3-6 四種合金的電化學阻抗譜 (a)-(b) Bode 圖, (c) Nyquist 圖,

圖 3-6(d) 為本研究使用的電路圖，其擬合得到的資料如表 3-9 所示。根據計算結果，腐蝕溶液電阻 R_s 對四種合金的腐蝕影響很輕微，主要是鈍化物與腐蝕產物的電阻 R_h 及電荷轉移電阻 R_t 影響腐蝕。四種合金的 R_h 由大到小依次為：Al-Mn-Cu、5052、7075、410， R_t 由大到小依次為：5052、Al-Mn-Cu、7075、410。不鏽鋼材料 410 的主要成分為鐵，在發生電化學腐蝕時，鈍化物和腐蝕產物的電阻較小，電荷轉移更加容易，故其電化學腐蝕抗性相較於另外三種鋁合金材料更差。而三種鋁合金材料中 7075 的電化學腐蝕抗性最差，這與前述極化曲線測試結果相一致；5052 合金與 Al-Mn-Cu 合金的電化學腐蝕阻抗均較大，5052 合金電荷轉移難度更大，而 Al-Mn-Cu 合金的鈍化物及腐蝕產物的電阻更大。

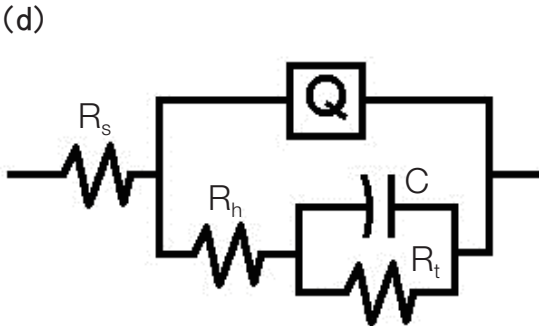


圖 3-6(d) 擬合電路圖

表 3-9 四種合金的電化學阻抗譜

合金	$R_s/\Omega \cdot \text{cm}^2$	$Q\text{-}Y_0$	$Q\text{-}n$
Al-Mn-Cu	7.293	1.834×10^{-5}	0.8718
410	2.18	1.453×10^{-5}	0.8192
5052	6.982	2.177×10^{-5}	0.8443
7075	9.447	1.365×10^{-5}	0.8745

合金	$R_h/\Omega \cdot \text{cm}^2$	$C/\mu\text{Fs}^{a-1} \cdot \text{cm}^2$	$R_t/\Omega \cdot \text{cm}^2$
Al-Mn-Cu	7.47×10^4	1.348×10^{-3}	3.27×10^4
410	3.697×10^3	1.456×10^{-3}	1.953×10^3
5052	5.831×10^4	6.530×10^{-5}	5.913×10^4
7075	4.905×10^3	3.488×10^{-4}	5.911×10^3

3.1.5 結論

- 1) 四種材料的傳熱性能比較分別為：熱導率 $5052 > \text{Al-Mn-Cu} > 7075 > 410$ 、熱擴散系數 $\text{Al-Mn-Cu} > 5052 > 7075 > 410$ ；
- 2) 鹽霧腐蝕失重率 (240h) 由低至高為：410、5052、Al-Mn-Cu、7075；
- 3) 電化學腐蝕腐蝕速率由小到大為：410、5052、Al-Mn-Cu、7075，阻抗值 R_h 由大到小依次為：Al-Mn-Cu、5052、7075、410，阻抗值 R_t 由大到小依次為：5052、Al-Mn-Cu、7075、410
- 4) 經過對比，自研製的 Al-Mn-Cu 合金具有更佳的導熱與耐腐蝕綜合性能。

3.2

材料性能

3.2.1 雙極板樣品導電性測試

測試所用樣品為自研製的 Al-Mn-Cu 合金，其尺寸為： $70 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$ ，選用四點法測試樣品的電阻，測試所選用的設備為 Fluke 6 位元半電子萬用表與北京億良恒流源。樣品形狀如下圖所示：



圖 3-7 電阻測試樣品

測試結果如下表所示，同時表中放置了參照樣品鋁合金 5052 做對比。

表 3-10 樣品導電性測試結果

序號	電導率 ($\Omega \cdot \text{m}$)
1	3.2×10^{-8}
2	3.4×10^{-8}
3	3.0×10^{-8}
4	3.3×10^{-8}
5	3.1×10^{-8}
6	3.3×10^{-8}
7	3.2×10^{-8}
8	3.4×10^{-8}
9	3.0×10^{-8}
10	3.3×10^{-8}
11	3.4×10^{-8}
12	3.2×10^{-8}
13	3.1×10^{-8}
14	3.3×10^{-8}
15	3.4×10^{-8}
平均值	3.2×10^{-8}
鋁合金 5052	4.8×10^{-8}

測試結果表面，自研製的 Al-Mn-Cu 鋁合金製備的雙極板，其良好的導電性能減少燃料電池內部電阻，有利於高功率密度的輸出。

3.2.2 雙極板樣品潤濕性測試

測試所用樣品為自研製的 Al-Mn-Cu 合金，樣品尺寸為：30*30*1 mm³，測試所選用的設備為承德鼎盛 JY-82C 視頻接觸角測定儀。樣品形狀如下圖所示：



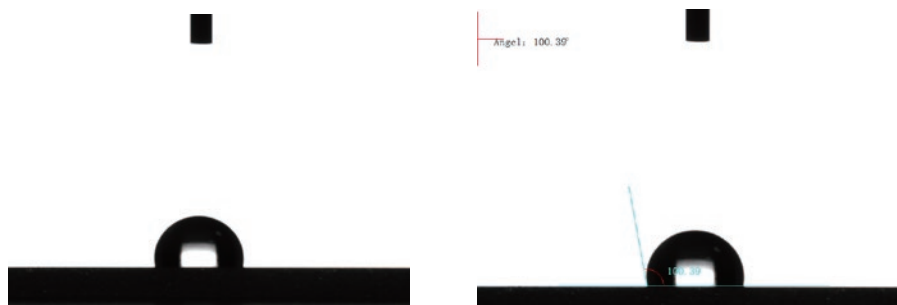
圖 3-8 潤濕性測試用樣品

測試結果如下表所示，同時表中放置了參照樣品鋁合金 5052 做對比。

表 3-12 樣品潤濕性測試結果

序號	潤濕角 (°)
1	100.39
2	101.8
3	99.13
4	99.37
5	100.28
6	101.47
7	99.7
8	101.29
9	100.6
10	99.53
11	99.87
12	100.96
13	101.83
14	99.77
15	100.79
平均值	100.45
鋁合金 5052	28.45

測試結果部分圖片如下所示：



潤濕角 :100.39°



潤濕角 :101.8°

圖 3-9 ~ 3-14 本實驗所用鋁合金拋光表面水滴靜態接觸角

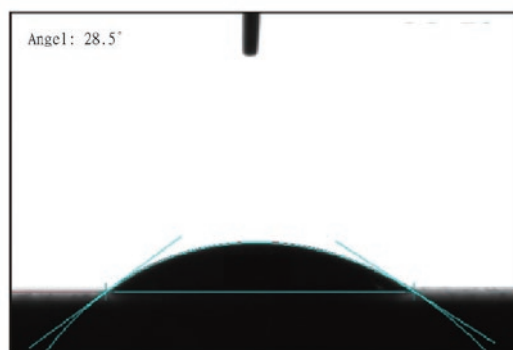
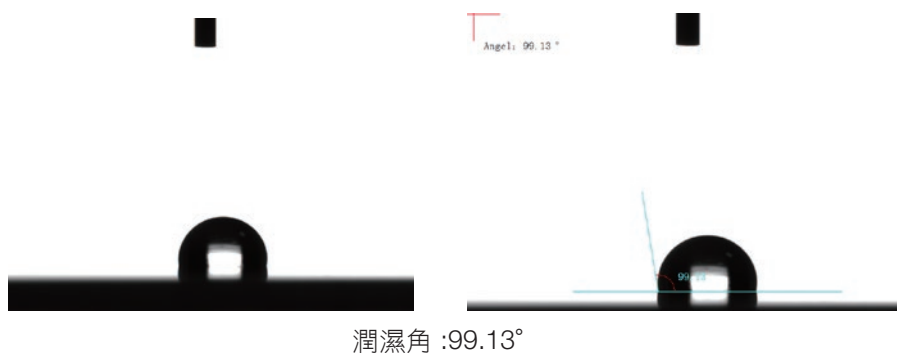


圖 3-15 鋁合金 5052 拋光試樣表面水滴靜態接觸角

測試結果表明，自研製的 Al-Mn-Cu 合金材質雙極板表面有良好的疏水性，有利於燃料電池在發電後輸出生成水，從而能減少腐蝕，提高雙極板的耐腐蝕性能。

3.2.3 雙極板樣品腐蝕性測試

測試所用樣品為自研製的 Al-Mn-Cu 合金，尺寸為：15*15*1mm³，測試所選用的設備為德國的 Zahner 電化學工作站。樣品形狀如下圖所示：

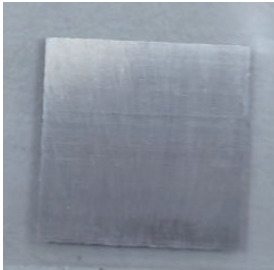


圖 3-16 腐蝕性測試用樣品

測試結果如下表所示，同時表中放置了參照樣品鋁合金 5052 做對比。

表 3-13 樣品腐蝕性測試結果

	OCP (mV)	自腐蝕 電位 (mV)	腐蝕電流密度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) (動電位)		腐蝕電流 密度 (mA/cm^2) (0.6V)	腐蝕電流 密度 (mA/cm^2) (0.84V)	腐蝕電 流密 度 (mA/cm^2) (1.6V)
			初始階段	第二階段			
1	-553	-536	6.45	75.72	1.18	1.27	1.35
2	-550	-532	7.89	78.94	1.16	1.28	1.33
3	-565	-533	6.89	77.89	1.19	1.26	1.36
4	-559	-535	9.37	74.36	1.18	1.27	1.35
5	-549	-534	7.45	76.55	1.17	1.25	1.34
6	-550	-532	6.42	79.63	1.15	1.26	1.33
7	-557	-537	7.89	74.69	1.16	1.27	1.36
8	-552	-531	9.22	75.29	1.18	1.26	1.35
9	-559	-536	8.73	76.77	1.17	1.27	1.37
10	-553	-534	9.26	75.46	1.15	1.28	1.32
11	-557	-536	7.27	74.20	1.16	1.26	1.35
12	-552	-531	9.57	76.77	1.18	1.25	1.36
13	-550	-532	6.45	75.69	1.15	1.28	1.33
14	-558	-535	7.89	78.46	1.17	1.27	1.37
15	-559	-536	7.96	77.89	1.18	1.26	1.34
平均值	-555	-534	7.91	76.55	1.17	1.27	1.35
鋁合金 5052	-640	-692	113.4	0.8	/	/	

腐蝕後樣品的形貌如下圖所示：

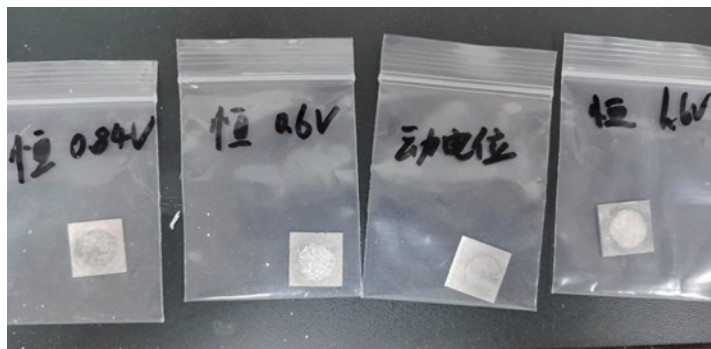


圖 3-17 腐蝕後的樣品

根據實際工作情況要求，雙極板材料的自腐蝕電位越高越好，腐蝕電流密度越低越好，這樣能減少雙極板的腐蝕速率，延長電堆的使用壽命，同時能減少腐蝕所釋放的離子對電堆的破壞，能保證電堆長時間運行性能正常。目前的測試結果表明，自研製的 Al-Mn-Cu 合金具有更加優良的抗腐蝕性能。

3.2.4 雙極板樣品抗彎強度測試

測試所用樣品為自研製的 Al-Mn-Cu 合金，尺寸為： $160*10*1\text{mm}^3$ ，測試所選用的設備為三思縱橫力學試驗機，選用的延伸計為 1KN。樣品形狀如下圖所示：



圖 3-18 測試樣品形狀

下圖為樣品的典型力 - 位移曲線。

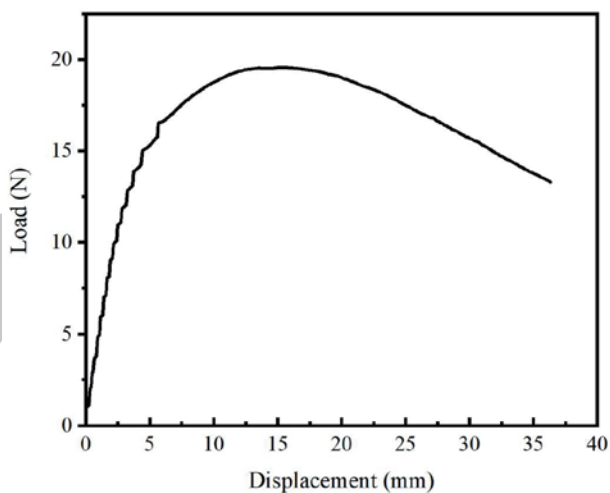


圖 3-19 樣品的典型力 - 位移曲線

測試的樣品的彎曲強度結果如下表所示，同時表中放置了參照樣品鋁合金 5052 做對比。

表 3-14 樣品抗彎強度測試結果

序號	彎曲強度（MPa）
1	230.16
2	237.91
3	231.12
4	231.84
5	234.31
6	235.57
7	236.18
8	233.27
9	235.36
10	234.97
11	235.46
12	235.56
13	234.10
14	232.58
15	234.27
平均值	234.18
鋁合金 5052	269.97

雙極板材料更高的彎曲強度能為部件在電堆中提供支撐作用，有利於電堆長期穩定運行。目前測試結果表明，自研製的 Al-Mn-Cu 合金具有和工程用鋁合金 5052 相當的抗彎曲變形能力，能夠保證雙極板具有良好的結構穩定性。

3.3

材料性能

3.3.1 衝孔成品觀察

為驗證 Al-Mn-Cu 合金的可衝壓性能，採用了如圖 3-20 所示的衝壓方法進行衝孔（包括圓孔和方孔）。根據圖 3-21 和 3-22 的觀察結果表明，自研製的 Al-Mn-Cu 合金具有良好的可衝孔性能，即衝孔後沒有發生開裂現象。

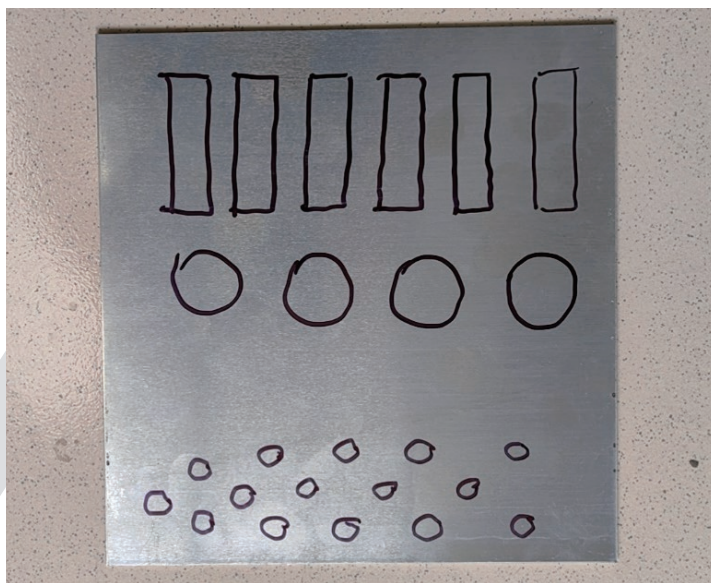
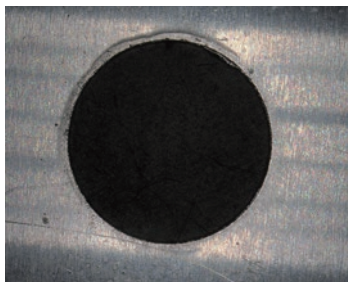


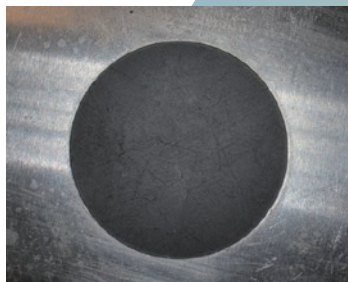
圖 3-20 衝孔測試規劃



a. 長方形



b. 圓形 1

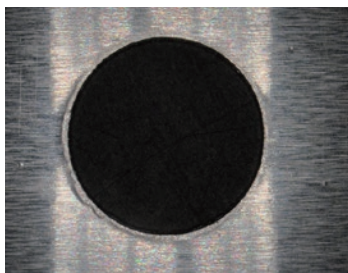


c. 圓形 2

圖 3-21a ~ 3-21c 1060 衝孔



a. 長方形



b. 圓形 1



c. 圓形 2

圖 3-22a ~ 3-22c 自研製 Al-Mn-Cu 合金衝孔

3.3.2 折彎成品觀察

為驗證自研製的 Al-Mn-Cu 合金的折彎性能，採用了折彎實驗。實驗所使用樣品如下圖 3-23 所示。樣品參數如下：樣品尺寸：長 50mm，寬 20mm，厚度 1.5 mm。圖 3-25 ~ 3-28 為折彎後外弧的光學顯微鏡觀察，結果表示自研製的 Al-Mn-Cu 材料具有良好的可折彎性能，即 90° 折彎後，在外弧沒有出現裂紋或褶皺。

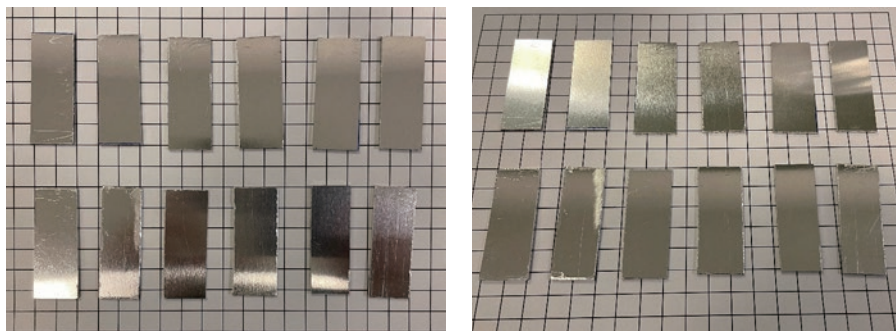


圖 3-23 測試前樣品

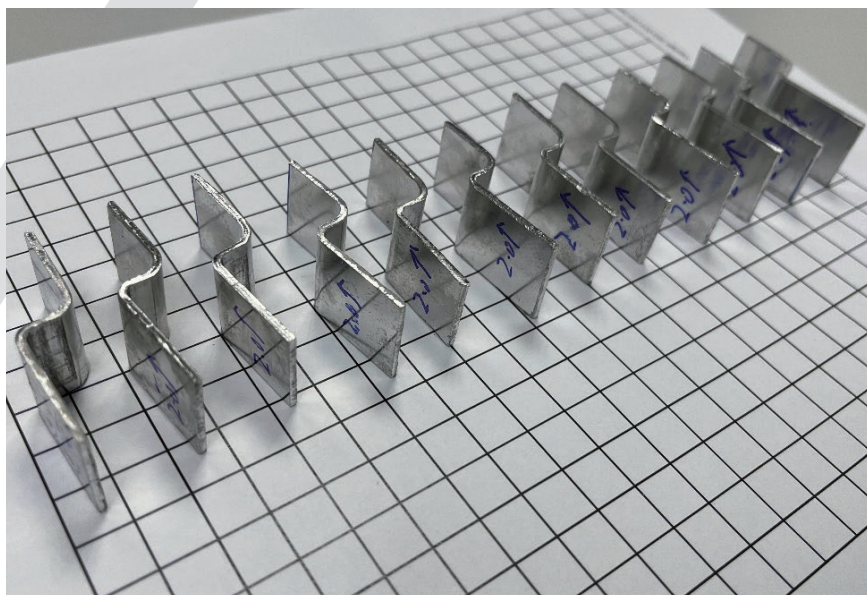


圖 3-24 折彎後樣品宏觀照片



a. 左 R20- 右 R32-100%- 保壓 0 秒



b. 左 R29- 右 R20-10%- 保壓 0 秒



c. 左 R29- 右 R20-10%- 保壓 9 秒



d. 左 R29- 右 R20-60%- 保壓 0 秒



e. 左 R29- 右 R20-60%- 保壓 9 秒



f. 左 R29- 右 R20-100%- 保壓 0 秒



g. 左 R29- 右 R20-100%- 保壓 9 秒



h. 左 R32- 右 R20-10%- 保壓 0 秒



i. 左 R32- 右 R20-10%- 保壓 9 秒



j. 左 R32- 右 R20-60%- 保壓 0 秒



k. 左 R32- 右 R20-60%- 保壓 9 秒



l. 左 R32- 右 R20-100%- 保壓 9 秒

圖 3-25a ~ 3-25l 不同弧度折彎實驗後樣品

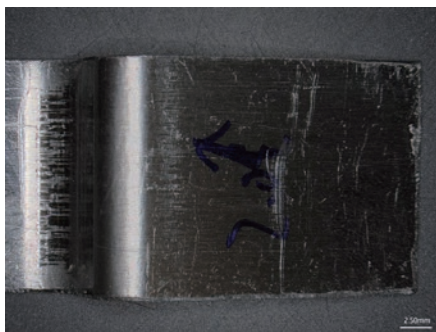
折彎實驗後的樣品裂痕測試圖片如下圖 3-26 ~ 圖 3-28 所示。



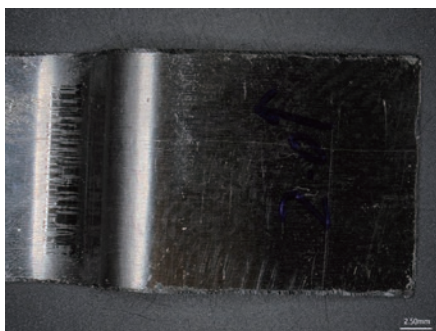
a. R20-10%- 保壓 0 秒

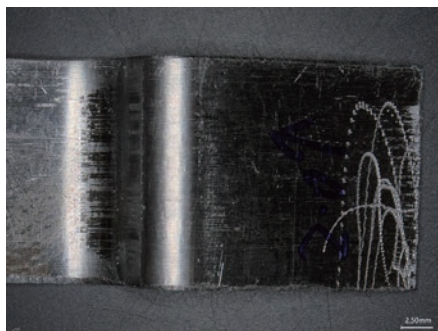


b. R20-10%- 保壓 9 秒

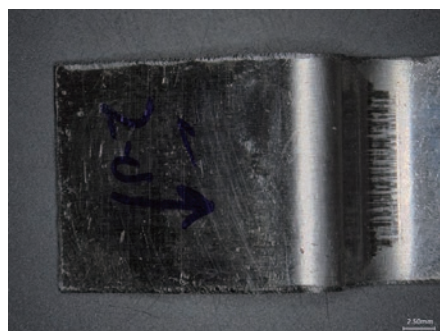
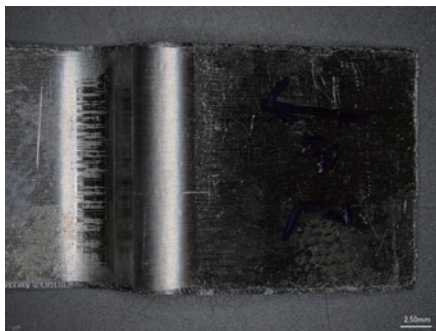


c. R20-60%- 保壓 0 秒

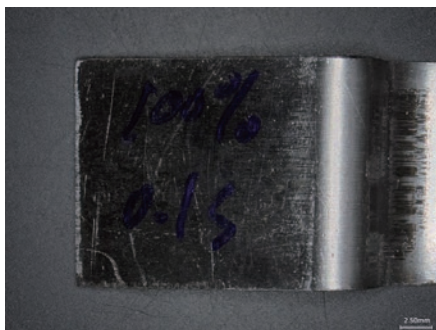




d. R20-60%- 保壓 9 秒



e. R20-100%- 保壓 0 秒



f. R20-100%- 保壓 9 秒

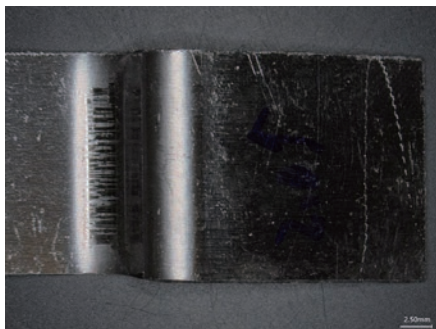
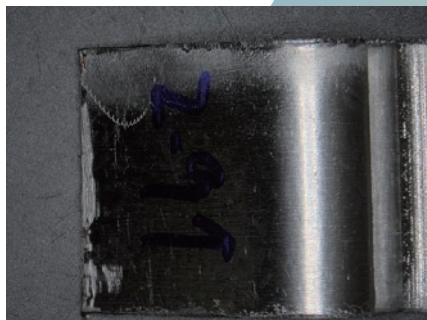


圖 3-26a ~ 3-26f 折彎弧度 R2.0 實驗後樣品



a. R29-10%- 保壓 0 秒



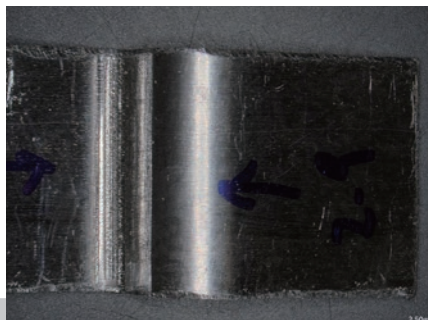
b. R29-10%- 保壓 9 秒



c. R29-60%- 保壓 0 秒



d. R29-60%- 保壓 9 秒

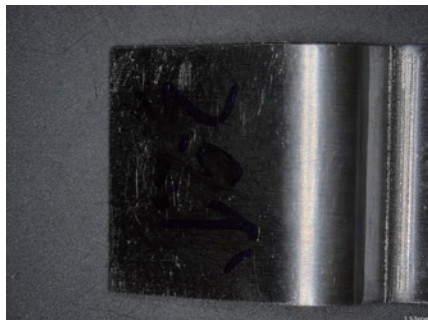


e. R29-100%- 保壓 0 秒

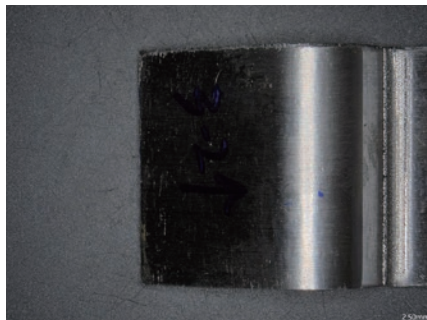


f. R29-100%- 保壓 9 秒

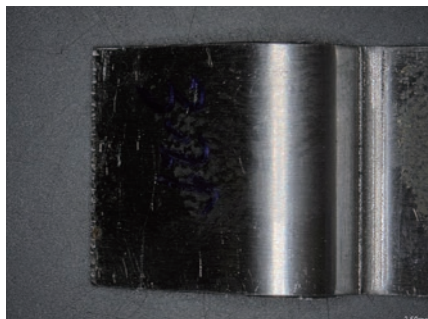
圖 3-27a ~ 3-27f 折彎弧度 R2.9 實驗後樣品



a. R32-10%- 保壓 0 秒



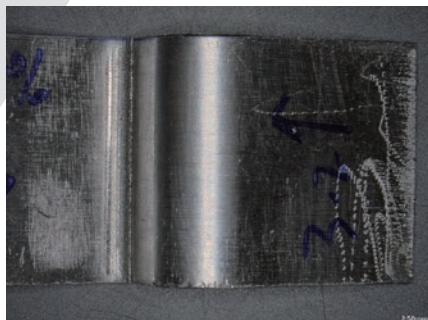
b. R32-10%- 保壓 9 秒



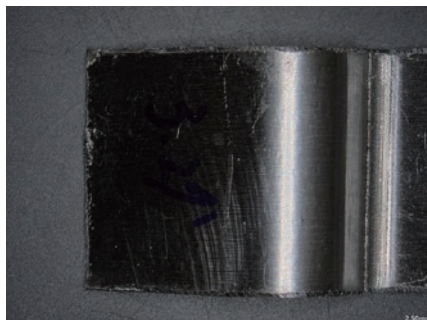
c. R32-60%- 保壓 0 秒



d. R32-60%- 保壓 9 秒



e. R32-100%- 保壓 0 秒



f. R32-100%- 保壓 9 秒

圖 3-28a ~ 3-28f 折彎弧度 R3.2 實驗後樣品

為驗證 Al-Mn-Cu 材料於衝壓後的回彈表現，以下實驗記錄了樣品在經過 90° 折彎後的實際樣品角度，並將數據記錄如下表 3-15 與圖 3-29 ~ 圖 3-31 所示。

表 3-15 衝壓折彎實驗數據

折彎弧度	衝壓速率	保壓時間	實際折彎角度	目標角度	誤差
R2.0	100%	0 秒	91.706°	90°	1.706°
R3.2	100%	0 秒	92.093°	90°	2.093°
R2.0	100%	9 秒	91.204°	90°	1.204°
R3.2	100%	9 秒	92.261°	90°	2.261°
R2.0	100%	0 秒	91.346°	90°	1.346°
R2.9	100%	0 秒	91.954°	90°	1.954°
R2.0	100%	9 秒	90.769°	90°	0.769°
R2.9	100%	9 秒	91.072°	90°	1.072°
R2.0	60%	0 秒	89.656°	90°	-0.344°
R3.2	60%	0 秒	92.92°	90°	2.92°
R2.0	60%	9 秒	92.488°	90°	2.488°
R3.2	60%	9 秒	92.925°	90°	2.925°
R2.0	60%	0 秒	90.893°	90°	0.893°
R2.9	60%	0 秒	93.944°	90°	3.944°
R2.0	60%	9 秒	90.173°	90°	0.173°
R2.9	60%	9 秒	92.205°	90°	2.205°
R2.0	10%	0 秒	91.458°	90°	1.458°
R3.2	10%	0 秒	93.101°	90°	3.101°
R2.0	10%	9 秒	90.867°	90°	0.867°
R3.2	10%	9 秒	94.085°	90°	4.085°
R2.0	10%	0 秒	92.021°	90°	2.021°
R2.9	10%	0 秒	93.765°	90°	3.765°
R2.0	10%	9 秒	91.133°	90°	1.133°
R2.9	10%	9 秒	92.926°	90°	2.926°

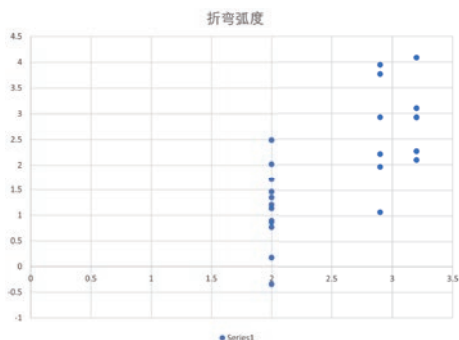


圖 3-29 折彎弧度 - 回彈角度

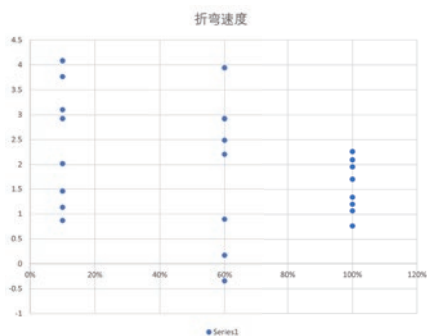


圖 3-30 折彎速度 - 回彈角度

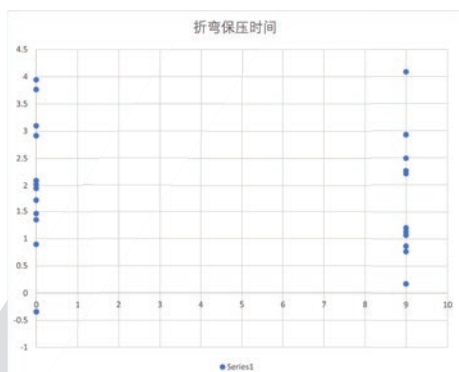


圖 3-31 保壓時間 - 回彈角度

通過實驗結果來看，折彎弧度越大，回彈角度越大。衝壓速度達到 100% 時，可顯著降低回彈角度。保壓時間對回彈角度沒有影響。因此，為抑制自研製的 Al-Mn-Cu 材料折彎後的回彈線性，建議提升衝壓速度。

3.3.3 杯突測試觀察

為驗證自研製的 Al-Mn-Cu 材料的深衝性能，即杯突性能，該實驗採用了杯突試驗機，將樣品進行杯突測試直到材料出現裂紋位置。測試後的樣品表面觀察見下圖 3-32 ~ 圖 3-34 所示進行重複測試。

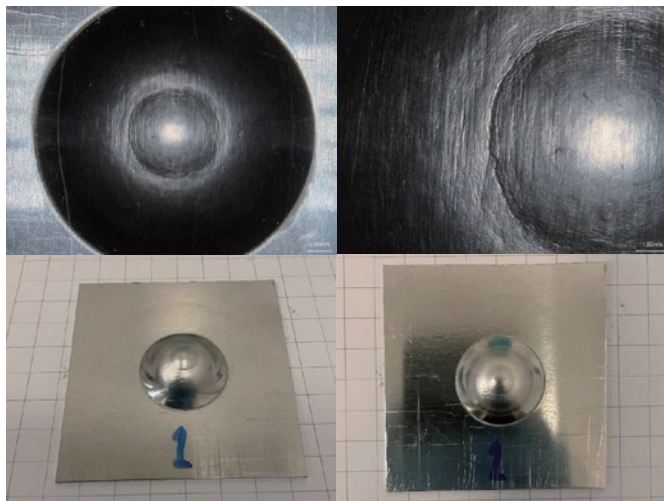


圖 3-32 1# 樣品

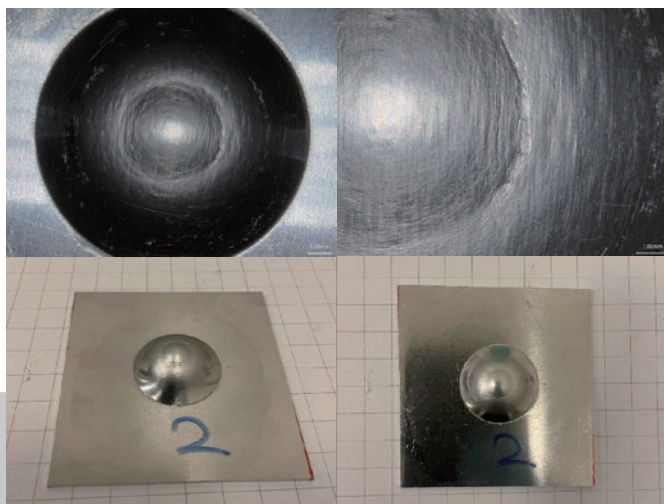


圖 3-33 2# 樣品

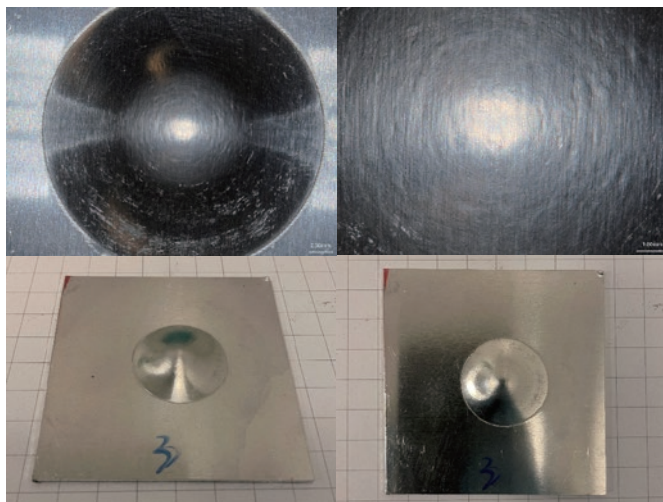


圖 3-34 3# 樣品

實驗數據記錄如下圖 3-35 ~ 圖 3-37 所示。

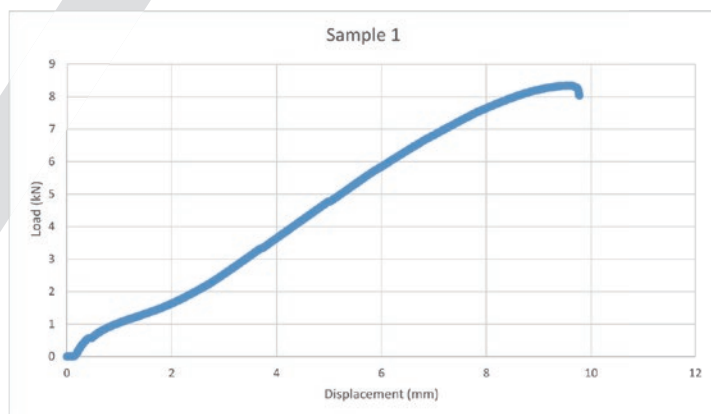


圖 3-35 1# 樣品杯突試驗數據

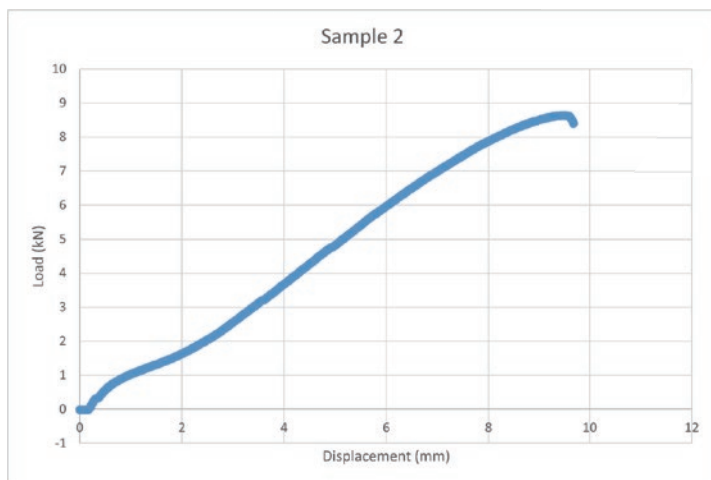


圖 3-36 2# 樣品杯突試驗數據

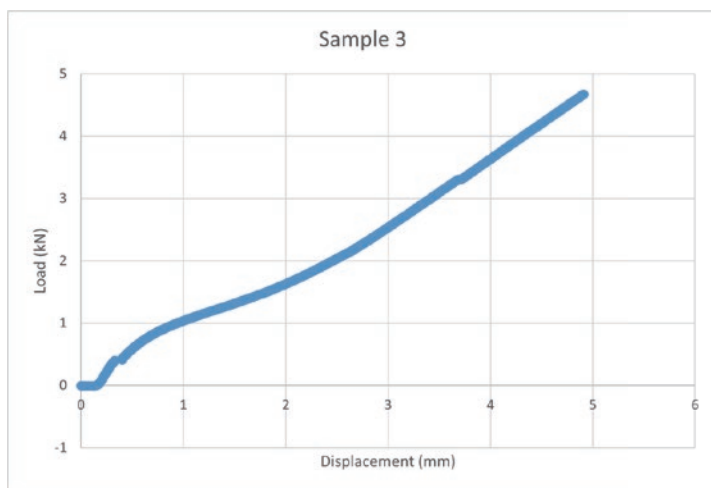


圖 3-37 3# 樣品杯突試驗數據

1# 和 2# 樣品，杯突直到頂破位置，3# 樣品，衝頭只頂到一半距離就停止。結果表明，自研製的 Al-Mn-Cu 材料具有優良的深衝性能。且在杯突破壞前，Al-Mn-Cu 材料表面保持光亮。

4.1

雙極板

整體性能

為驗證自研製的 Al-Mn-Cu 合金作為雙極板的實際運作性能，採用了以下方法進行檢測。

4.1.1 雙極板氣密性測試

測試燃料電池堆的陽極腔和陰極腔的氣密性，測試設備為賽思特公司的氣密性試驗機。陰、陽極腔的氣密性測試結果如下表 4-1 所示。

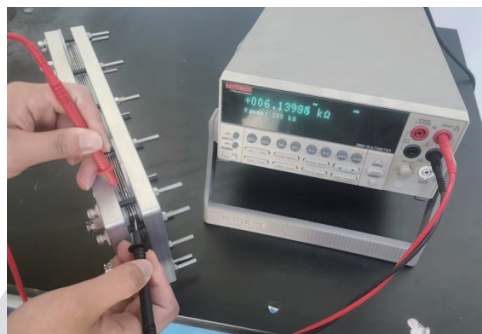
表 4-1 氣密性測試

	保壓壓力 /kPa	保壓時間 /min	壓降 /Pa
陰極腔 / 空氣腔	50	5	986
	50	6	989
	50	7	993
	50	8	997
	50	10	1005
陽極腔 / 氫氣腔	50	5	516
	50	6	524
	50	7	531
	50	8	537
	50	10	542

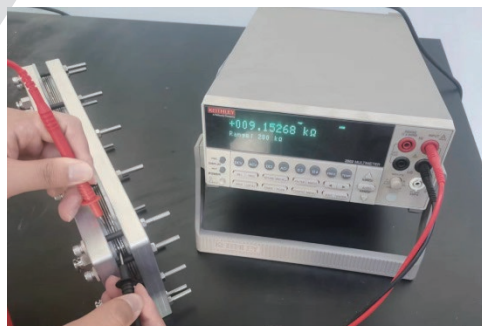
保壓所用氣體為氮氣，單腔測試內部氣體串漏及單腔外漏，經過測試可以看出燃料電池電堆的氣密性合格。

4.1.2 乾態絕緣電阻測試

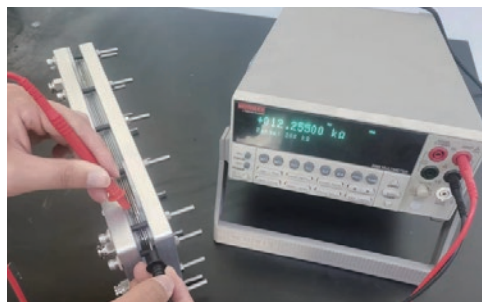
a. 測試燃料電池堆的陽極腔與陰極腔的的電氣性，測試過程如下圖 4-1 所示。



第一片雙極板與第二片雙極板電阻



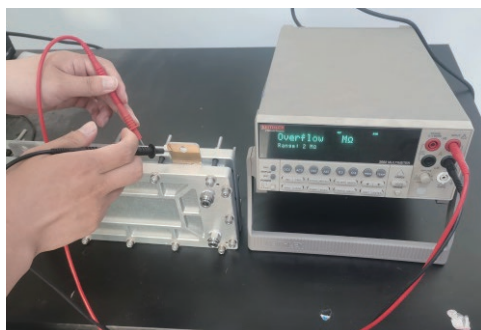
第二片雙極板與第三片雙極板電阻



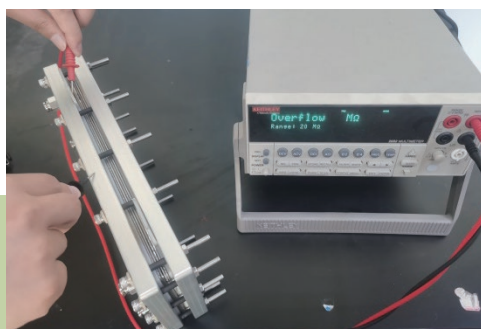
第三片雙極板與第四片雙極板電阻

圖 4-1 陽極腔與陰極腔電氣性測試

b. 測試燃料電池堆集流體與燃料電池端板的電阻，測試過程如下圖 4-2 所示。



陽極腔與端板電阻



陰極腔與端板電阻



陰、陽極集流體之間的電阻

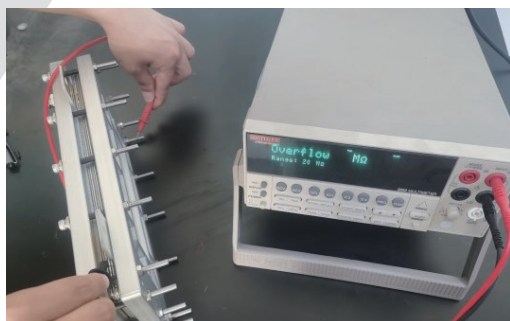
圖 4-2 集流體與燃料電池端板電阻測試

從測試結果可見，測試燃料電池堆陰、陽極的集流體與燃料電池兩側端板為絕緣狀態。

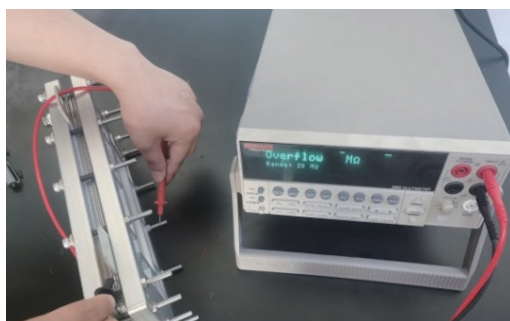
c. 測試燃料電池堆集流體與燃料電池電堆固定點的電阻，測試過程如下圖 4-3 所示。



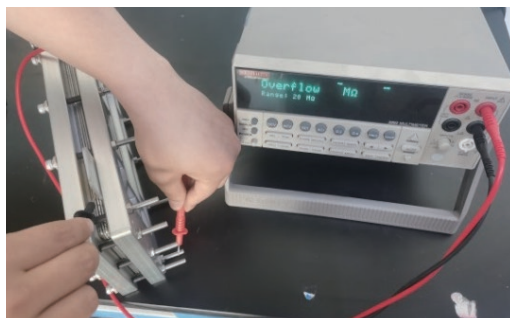
陽極集流體與左上角固定螺栓電阻



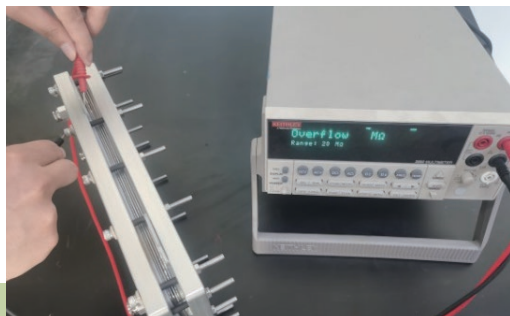
陽極集流體與左下角固定螺栓電阻



陽極集流體與中下固定螺栓電阻



陽極集流體與右下角固定螺栓電阻



陰極集流體與左下角固定螺栓電阻

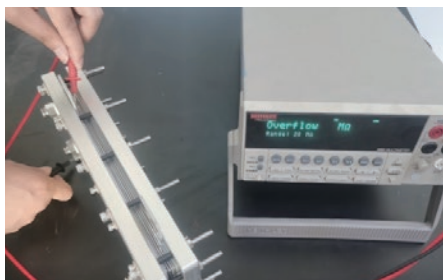


陰極集流體與左上角固定螺栓電阻

圖 4-3 燃料電池堆集流體與燃料電池電堆固定點電阻測試



陰極集流體與右上角固定螺栓電阻



陰極集流體與右下角固定螺栓電阻

通過對上述各極片之間的電阻值的測試結果進行資料整理和分析，結果見表 4-2 所示。從測試結果可見，測試燃料電池堆陰、陽極的集流體與燃料電池兩端固定點為絕緣狀態。

表 4-2 各極板間電阻

陰極腔 / 空氣腔	電阻值 (KW)
第一與第二片間電阻	6.13986
第一與第二片間電阻	6.13957
第一與第二片間電阻	6.13995
第一與第二片間電阻	6.13978
第一與第二片間電阻	6.13988
第二與第三片間電阻	9.15268
第二與第三片間電阻	9.15254
第二與第三片間電阻	9.15273
第二與第三片間電阻	9.15277
第二與第三片間電阻	9.15257
第三與第四片間電阻	12.25500
第三與第四片間電阻	12.25527
第三與第四片間電阻	12.25516
第三與第四片間電阻	12.25555
第三與第四片間電阻	12.25567

4.2

雙極板

功率性能

4.2.1 額定功率測試

a. 記錄額定功率試驗過程中燃料電池堆的參數結果（取電流穩定運行階段中最後的參數結果）

測試設備為群翌能源股份有限公司生產的 2 kW 測試台架。該測試系統主要包括燃料供給系統、電子負載、水熱管理系統及控制軟體等。可控制氣體流量、氣體壓力、電堆溫度、氣體濕度等電堆必要運行參數。集成到測試台架中的進氣加濕系統是採用鼓泡加濕法，通過控制露點溫度進行目標進氣濕度的設定。下圖為電堆在不同濕度下的功率密度測試曲線。

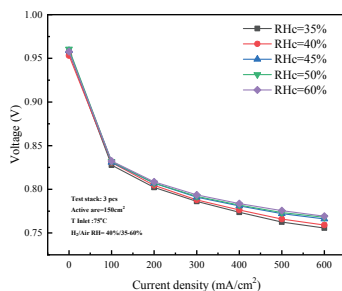


圖 4-4 功率密度測試曲線

下表 4-3 為各測試濕度條件下，不同電流密度下電堆的輸出電壓值。通過測試資料可見，通過衝壓工藝製備的自研製的 Al-Mn-Cu 雙極板可以作為現有商業化雙極板的替代產品。

表 4-3 極化曲線資料

電流密度 (mA/cm ²)	RHc=35% (V)	RHc=40% (V)	RHc=45% (V)	RHc=50% (V)	RHc=60% (V)
0	0.95697	0.95321	0.95878	0.96064	0.95773
100	0.82775	0.83072	0.831	0.8319	0.83231
200	0.80219	0.80447	0.807	0.80712	0.80865
300	0.78614	0.78792	0.791	0.79194	0.79366
400	0.77376	0.77642	0.781	0.7819	0.78365
500	0.76252	0.76597	0.7721	0.77344	0.77561
600	0.75568	0.75905	0.76615	0.768	0.76918

4.2.2 內阻測試

雙極板組裝後，在開路下以內阻值 $400\text{mA}/\text{cm}^2$ 進行 EIS 測試，測試設備為電化學工作站，內嵌在群羿電池測試系統內部。測試結果如下圖所示。電堆歐姆內阻不受運行狀態影響，阻值為 $1.0382\text{ m}\Omega$ 。由於第一組資料的誤差較大，在排除第一組實驗資料後，其歐姆阻值為 $1.0076\text{m}\Omega$ 。

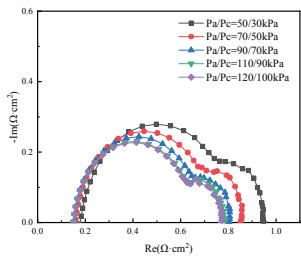


圖 4-5 $400\text{ mA}/\text{cm}^2$ 電流密度下 EIS 曲線

表 4-4 為在 $400\text{mA}/\text{cm}^2$ 運行條件下測試獲得的電堆歐姆內阻值。

表 4-4 歐姆電阻數值

工作條件	歐姆阻值 ($\text{m}\Omega$)
Pa/Pc=50/30kPa	1.1606
Pa/Pc=50/30kPa	1.0169
Pa/Pc=50/30kPa	1.0101
Pa/Pc=50/30kPa	1.0031
Pa/Pc=50/30kPa	1.0003
平均值	1.0382

4.3

雙極板 吸熱性能測試

為驗證填充的相變熱管理材料，即二十烷和月桂酸的吸熱能力，本測試將熔化狀態的相變材料注入組裝好的雙極板間隙中。等待冷卻後，將熱電偶焊接在雙極板的左側、中央和右側進行溫度變化測試。測試前的樣品照片如下圖 4-6 所示：

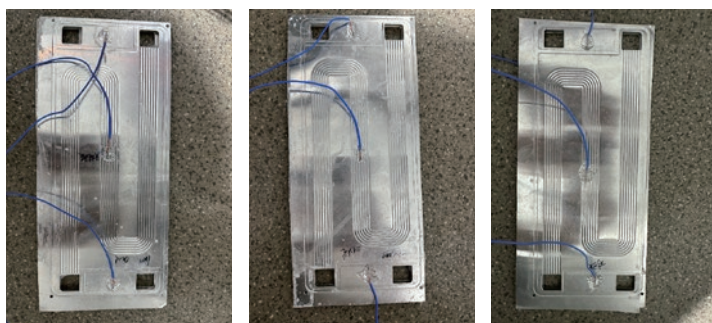


圖 4-6 雙極板吸熱性能測試樣品

測試設備照片如下圖所示：

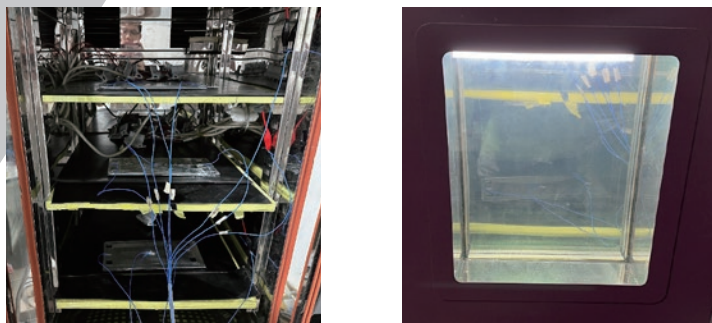


圖 4-7 雙極板吸熱能力測試設備

測試樣品截面觀察如下圖 4-8 所示。

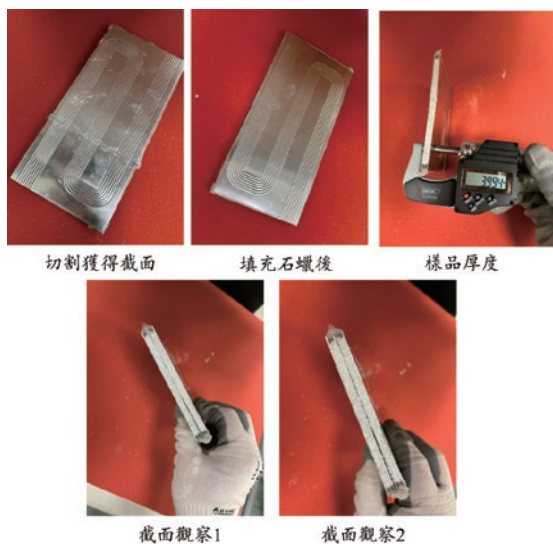


圖 4-8 雙極板測試樣品截面觀察

樣品組裝過程如下圖所示。

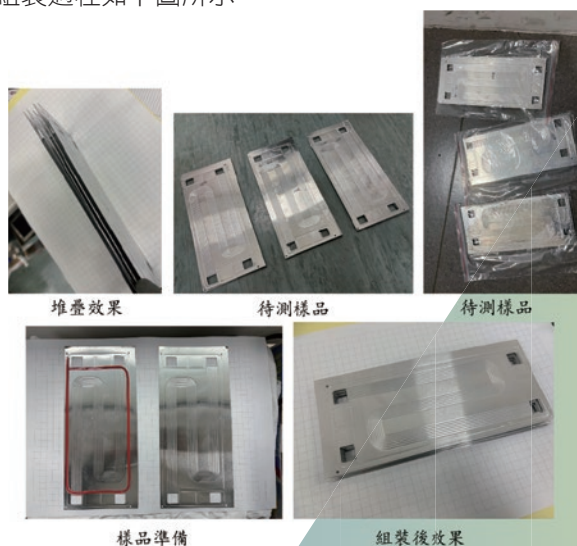
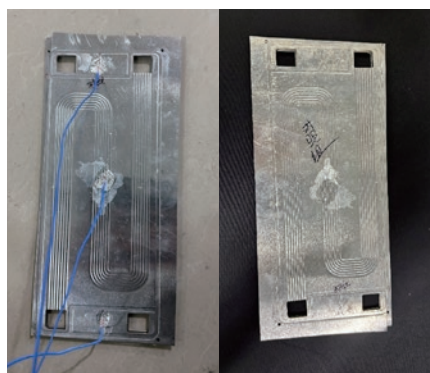
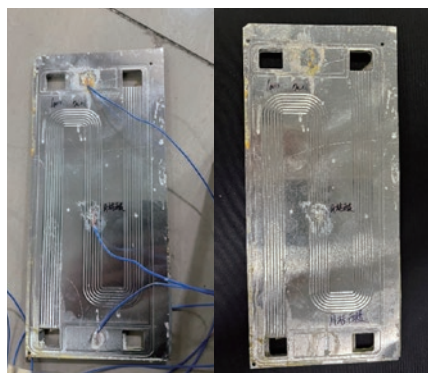


圖 4-9 雙極板測試樣品組裝過程

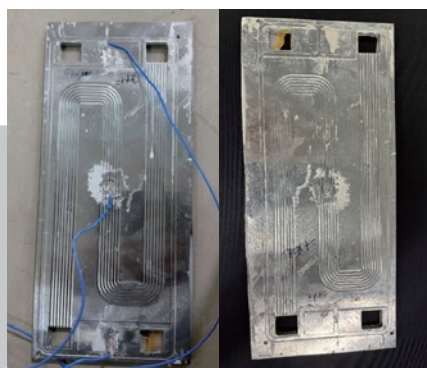
為了模擬雙極板在實際運作中環境溫度對雙極板本身溫度的影響，將樣品所處的環境溫度從 10°C 設定到 80°C ，按照每分鐘 1°C 的速度升溫，並記錄升溫階段中雙極板本身的溫度。測試後樣品如下圖所示。



a. 對照組

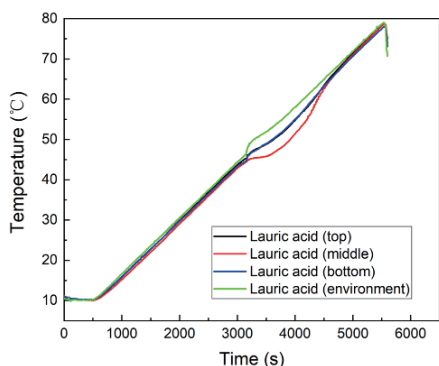


b. 月桂酸

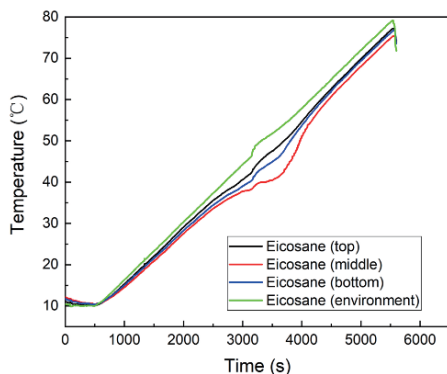


c. 二十烷

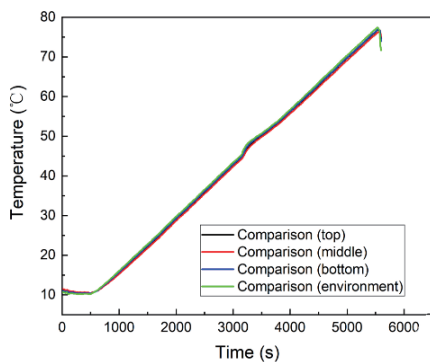
圖 4-10 測試後樣品



月桂酸



二十烷



對照組

圖 4-11 展示了對照組、注入二十烷和月桂酸的雙極板元件溫度的變化記錄，通過對比發現：二十烷相變材料具有更佳的熱管理性能，並且溫度降幅可達 10°C 以上，有利於讓雙極板在安全溫度範圍內運作。

圖 4-11 雙極板吸熱性能測試結果

隨著氫能源的不斷發展，市場對氫燃料電池中的重要元件—雙極板的需求也不斷增加。然而，現有燃料電池雙極板所使用的金屬材料並不能滿足新興技術發展過程中對材料性能和規格不斷提升的高度要求。目前燃料電池雙極板生產行業所使用的金屬材料存在以下問題：1. 耐腐蝕性不足，無法應對燃料電池電堆中的腐蝕性和高溫高壓環境；2. 熱穩定性不足，無法在高溫高壓環境下保持形狀完整；3. 導電性不足，影響電流傳輸和分配。

針對氫燃料電池技術發展中對雙極板材料的要求，本項目的研究表明：採用自研製的 Al-Mn-Cu 合金所製造的雙極板，其耐腐蝕性能，導熱性能，導電性以及抗彎抗壓性能均優異於傳統雙極板材料。

同時，傳統燃料電池雙極板的加工製造過程中，複合材料雙極板常使用石墨為基體材料，在搭配其他材料後，採用熱壓成型的方法製造。但這種方法存在加工周期長，製造工藝繁瑣複雜等問題。金屬雙極板常採用衝壓工藝製造，但存在工藝複雜、精度低和無法一次成型的問題。本項目研究表明，自研製的 Al-Mn-Cu 材料的衝壓加工性能良好，可在選用本材料的基礎上使用衝壓工藝製造燃料電池雙極板，能夠解決傳統材料加工成本高，工藝複雜等問題。

5.2

未來展望

由於氫燃料電池具有多種優勢，包括能量轉換效率高，產生污染物為零，運行噪音小，對環境友善等，氫燃料電池技術具有看好的運用前景。在未來的研究中，更可從以下研究領域入手，進一步促進氫燃料電池雙極板材料技術的發展：

- 1) 金屬雙極板塗層：金屬基材料雙極板在成本和加工成形方面具有優勢，但其容易腐蝕的特點影響了燃料電池的導電能力和耐久性。通過開發新型的高性能塗層，有助於進一步提高金屬雙極板的導電能力和耐久性，提升產品運作壽命。
- 2) 環境適應性：通過研究燃料電池雙極板在不同環境和不同工作狀況下，例如在不同溫度、濕度、酸鹼度、壓力下運行時的性能，可研究如何改善雙極板在不同環境和工作狀況下運行的表現。
- 3) 成本降低：研究新的加工工藝和技術，降低金屬基雙極板的製造和加工成本，促進其更廣泛的商業應用。
- 4) 測試方式：發展更準確、更可靠的測試方法，以便於更快更準確地評估雙極板及其相關材料及組件的性能。

目前，材料性能與基礎設施建設不足為限制了氫燃料電池技術發展與應用的主要瓶頸。隨著各國推出氫能產業的相關支持政策，以及隨之而來的各項材料技術的研究突破，氫燃料電池的開發工作將會取得更好的發展。

