

無中生有， 黃炳照重寫電池規則

文字／鸞九辰 圖片提供／葉琳喬

從智慧型手機、筆記型電腦到電動車，現代人生活幾乎離不開電池，卻鮮少有人真正了解電池。比方說，俗

稱的「鋰」電池，實際指的是鋰離子而非鋰金屬；電池每次充放電，至少須有九九·九%電量成功回收；還有過去三、四十年，鋰電池的能量密度提升不到兩倍，與半導體晶片每兩年翻倍的進展相比，堪稱龜速。

為突破瓶頸，全球科研人員無不絞盡腦汁。第八屆國家產學大師獎、臺灣科技大學化學工程系講座教授黃炳照，率先提出「無陽（負）極電池」之嶄新概念而震驚學術界，吸引全世界研究團隊競相投入。至今，黃炳照實驗室仍居領先地位，並為國內能源與科技產業解決諸多難題，包括用工業廢棄物碘廢液取代水來產氫，既降低耗能，副產物還能從氧氣轉化為更有價值的化學品。

鋰電池撞上天花板，物理極限逼出電池新解方

「鋰電池進展緩慢的背後，是材料科學的物理極限。」黃炳照表示，傳統電池的能量儲存依賴正、負極材料，且在設

計上要求正、負極容量必須對等，致使電池中真正發揮作用的能量，實際上只剩一半。

就像出門旅遊時，行李箱左半邊裝滿換洗衣物（正極），右半邊則放置一個同等大小的空收納袋（負極），準備放進回程換下的髒衣服。行李箱看似被塞滿，真正能穿的衣服卻只占一半空間，這正是傳統鋰電池有效能量密度受限的核心原因。

「電池能量密度愈高，電動車的續航愈遠，手機的待機時間愈長。」黃炳照解釋，能量密度指的是單位重量或體積內可儲存的能量，概念如同汽車油箱裡的燃料，「在同等體積下，汽油的能量高於天然氣，因此多數汽車選擇汽油而非天然氣作為主燃料，電池亦然。」

循此邏輯，黃炳照開始思考，能否從電池內部騰出更多的空間，最終催生出「無陽極電池」的全新構想。

鋰負極「無中生有」，能量翻倍卻面臨壽命考驗

所謂的「無陽極電池」是在製造時完全不製作負極，僅保留一片銅箔集流體。黃炳照說：「當電池首次充電時，來自

黃炳照

工程領域

第八屆國家產學大師獎

臺灣科技大學化學工程系講座教授

正極的鋰離子會移動至集流體上，於銅箔表面沉積，形成一層金屬鋰負極。」

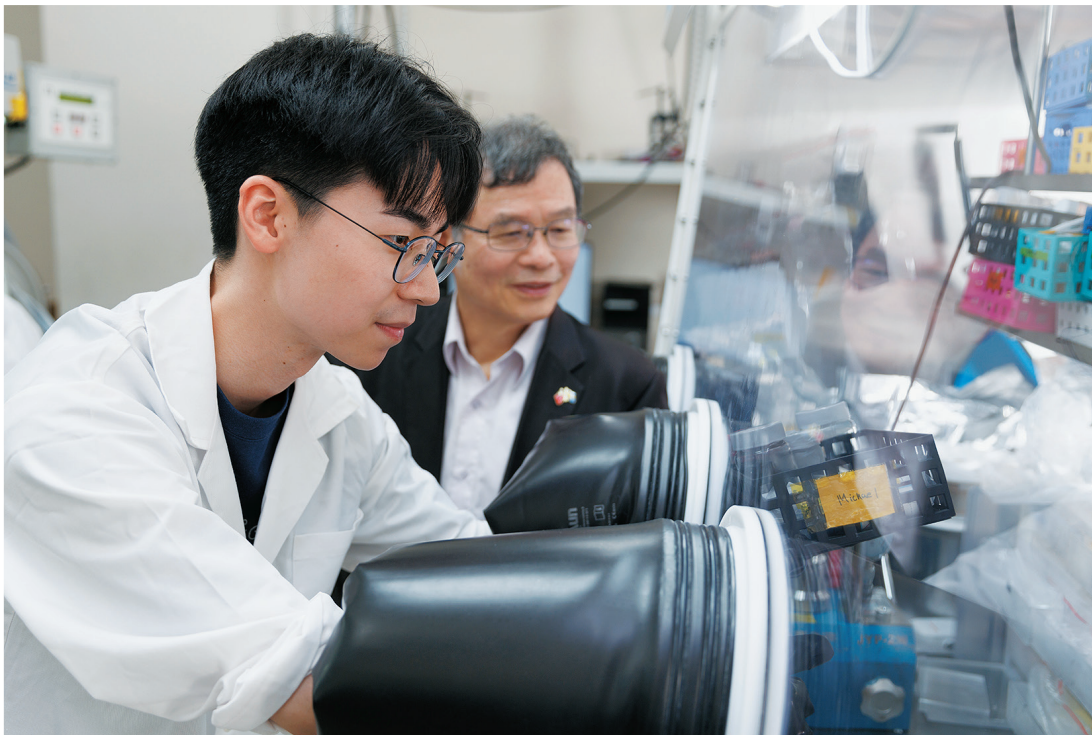
這項「無中生有」的過程帶來三大優勢：

- 一、更高的能量密度：省去預製負極空間，可填充更多的正極活性材料，理論上能讓電池的能量密度翻倍。
- 二、更安全的製造：鋰金屬的能量密度極高，是理想的負極材料，卻因非常活潑，遇水易爆、遇空氣易燃，導致製程風險極高，而無負極設計巧妙地避開高風險製程。
- 三、更低的成本：因製造流程簡化，有助於降低生產成本。

「無陽極電池的能量密度，是傳統鋰離子電池的兩倍；但它也有一個關鍵問題：壽命遠不如現有的鋰離子電池。」黃炳照坦言。

想理解這個問題，必須先認識「庫倫效率」（Coulombic Efficiency），它是衡量電池充放電過程中，電量損失的關鍵指標。庫倫效率若非一〇〇%，代表每次循環都會有一部分活性鋰永久損失，變成無法再利用的「死鋰」。

他進一步說明：「若要支撐智慧型手機約一千次的充放電循環，庫倫效率須達九九·九%；若要滿足電動車長達十年、約四至五千次的循環使用需要，庫倫效率必須再高於九九·九%。」相比之下，半導體良率從九〇%提升到九一%已是顯著進步，但電池產業的標準卻遠超過此。



善用國輻中心，為業者診斷並提供解決方案

為追求電池九九·九%以上的極致完美，必須找出消失的○·一%究竟去了哪裡！長期以來，科學家只能透過間接數據推測電池內部的變化，直到「同步輻射」(synchrotron radiation) 出現，才終於窺見其貌。

臺灣的國家同步輻射研究中心 (National Synchrotron Radiation Research Center, NSRRC) 座落於新竹科學園區，內有兩座巨大的環狀電子加速器。黃炳照將其比喻為一艘裝載多架不同功能戰鬥機的航空母艦，「每架戰鬥機代表不同作用的光束線，透過吸收光譜、繞射或影像技術來分析內部材料的結構與化學狀態變化，甚至還能迅速解析蛋白質結構。」

黃炳照團隊歷經三年努力，二〇一七年才成功捕捉到第一張清晰鋰沈積與溶解的臨場影像。他回憶第一次透過影像直視電池內部運作時的震撼：「電池在充放電時，就像我們的心臟會收縮膨脹，過程十分劇烈。」

同步輻射的工作原理，類似機場安檢使用的X光掃描，可穿透電池外殼，讓科學家臨場觀測鋰離子的動態變化；特別是電池首次充放電時，在電極表面會自然生成一層奈米級的「固態電解質膜」(Solid Electrolyte Interphase, SEI)，避免電解液直接與電極接觸，從而抑制不必要的副反應。

這正是黃炳照擅長的界面工程領域。他透露：「這層薄膜

的品質至關重要，其形成取決於電解液的配方。每家電池廠商都有自己的獨特配方，致使膜的質量差異懸殊。」

以日前與之進行產學合作的泓辰企業為例，該公司開發新型的磷酸錳鐵鋰（Lithium Manganese Iron Phosphate, LMFP）正極材料，電位略高於傳統磷酸鐵鋰，能量密度也更高，但新材料亦帶來新問題：電池衰減速度比預期更快，尤其在初期和高溫環境下。

「我們利用同步輻射吸收光譜技術，發現正極內的金屬離子會逐漸溶解並遷移至負極，破壞負極表面的保護膜（SEI），導致電池效率下降和壽命縮短。」黃炳照表示，找到問題後，團隊經兩年研究、成功開發新型添加劑，能捕捉並留住這些溶解的金屬離子，防止它們遷移到負極，大幅延長電池壽命。

更重要的是，在產學合作過程中，從定義問題、設計實驗、蒐集資料、分析結果到提出改善方案，並進一步與廠商互動，學生均參與其中，因而培養出獨立思考與解決實際問題的能力；同時，黃炳照不忘提醒：「在AI時代，精準提問與判斷能力十分重要，這必須透過跨領域的整合學習才做得到。」

若晶片是大腦，電池就是心臟

在臺灣，台塑、鴻海、中鋼、友達、明基、光寶等知名廠

商皆是黃炳照的產學合作夥伴。他因此觀察到，過去在代工模式下累積的成功經驗，雖造就臺灣產業具有靈活、勤奮且能高效解決「單點問題」之優勢，卻也在無形中限制電池產業的整體布局思維。

「電池是一項高度整合的系統技術，涵蓋複雜的材料與製造技術，任何一環失衡都會牽動整體效能，嚴重時甚至導致安全隱患。」黃炳照以蜈蚣競走為例，隊員們若身高差距過大、步伐難以同步，反而寸步難行；若身高相近，則能確保行進間步伐一致且重心穩定，進而提升速度，「因此，企業應建立核心專利組合，並將關鍵配方作為商業機密，方能形成真正的技術護城河。」

此外，黃炳照認為，電池是攸關通訊、國防、能源安全的「戰略物資」，臺灣必須建立自主技術能力，避免在關鍵時刻受制於國際供應鏈波動，如出口管制的影響，「電池的重要性已不亞於半導體晶片，若說晶片是大腦，電池就是心臟。」

他由衷建議，臺灣的電池產業規模雖然相對較小，但仍可發展具差異化的「材料體系」，例如無陽極電池或磷酸錳鐵鋰，同時強化「界面工程」技術，降低對特定進口資源的依賴，並在伺服器備用電源、國防無人載具與電網儲能等優勢領域建立自主供應鏈，為國家的戰略安全奠定基礎。