



# 鋰空氣電池

國立臺灣大學化學系碩士班研究生 / 蟻嘉輝

國立臺灣大學化學系博士班研究生 / 莫誠康

國立臺灣大學化學系特聘教授 / 劉如熹

關鍵字：鋰空氣電池、高能量密度、反應機制、電化學儲能

## 摘要

近年來電動車市場日益蓬勃發展，故電池已逐漸成為新能源關鍵核心之一，然而尋求高能量密度之電池已成為科學家主要之研究課題。可充電鋰空氣電池已成為取代傳統鋰離子電池最有希望之候選者，因其極高之能量密度約為傳統鋰離子電池之5-10倍，其中鋰二氧化碳電池受到廣泛之研究，利用溫室氣體CO<sub>2</sub>作為陰極氣體，建立儲能與轉換系統減輕CO<sub>2</sub>對環境之不利影響，且具高能量密度。本文探討鋰空氣電池以鋰氧氣電池與鋰二氧化碳電池為主，探討其反應原理與機制，介紹如何組裝鋰空氣電池提升其應用範圍與未來市場之發展，以新穎之技術與想法建立鋰空氣電池之標竿。

## 一、前言

能源為人類生存發展不可或缺之重要資源，自十八世紀工業革命以來，人類生產與製造方式逐漸轉為機械化，使得人類對於能源使用之需求量逐漸增加，其中煤、汽柴油等化石燃料為工業革命以來最主要之能源，以蒸汽機改良與廣泛應用為基本，蒸汽機主要以煤炭作為燃料，故隨著工業革命推進，地下蘊藏豐富之煤炭資源便有了空前之價值。然而，燃燒化石燃料雖可取得足夠之能源與動力，卻使得化石燃料快速消耗導致環境污染與溫室氣體增加，造成溫室效應、全球暖化與海平面上升等連鎖問題，故利用可持續之能源替代傳統化石燃料對於解決未來能源與環境問題至關重要。然而，大多數可



持續能源，如風能、太陽能與地熱能，為間歇性之能源，間歇性能源產生之電力存儲與輸送須高效之電能存儲系統，其中可充電電池具成為最有前途之一。綜合以上因素，石化燃料之能源應用無法永續發展，故藉綠色能源替代傳統石化燃料為現今之解決之道，此再生能源之研究與應用亦為現今科技發展之重要課題。故近年來科學家主要研究方向趨向於綠色能源，然而，綠色能源雖可促進環境永續發展，但其能源轉換效率較差不如傳統之石化燃料，故尋找低汙染與高能源轉換效率之儲能裝置為主要之解決途徑。電池為現今科技重要之儲能裝置，其應用範圍涵蓋於日常生活中，鋰離子電池為目前最普遍之儲能裝置，其優點為低成本、攜帶便利且能量轉換效率高，缺點為熱穩定性差且具漏液、爆炸與燃燒等安全問題。可充電鋰空氣電池因其極高之能量密度已成為最有希望候選者之一，有望成為未來電子產品之候選電源，因應溫室效應產生之二氧化碳氣體，故鋰二氧化碳電池之研發尤為重要，綜合以上之發展背景與優勢，鋰二氧化碳電池成為目前最具開發潛力之電池。此電池儲能裝置為綠色能源與發展建立良好基礎，促進環境永續發展。

## 二、鋰空氣電池原理與機制

### (一) 鋰空氣電池

鋰空氣電池 (Li-Air) 可分為鋰氧氣電

池與鋰二氧化碳電池，其運作原理為空氣中氧氣或二氧化碳與高活性之鋰金屬進行反應。如圖1所示[1]，鋰空氣電池相較於傳統鋰離子電池與鋰硫電池皆具較高之能量密度，促進電池永續發展與綠色能源，其未來有望應用於電動車與大型運輸工具等儲能裝置。

### (二) 鋰氧氣電池

空氣中主要由氮氣、氧氣、與氫氣與其餘雜質所組成之混合物，其中氧氣含量佔空氣總體積21%，利用氧氣與鋰離子電池結合而成之電池為鋰氧氣電池 (Li-O<sub>2</sub> Battery)，其結構為金屬鋰作為陽極、多孔性碳材料作為陰極、氧氣作為反應氣體，經由含鋰離子之液態電解質導通陰陽極鋰離子傳輸，如圖2所示。其最早發展於1996年Abraham等人[2]首度發表鋰金屬陽極與多孔性碳材料陰極，由有機高分子聚合物之膠態電解質組成鋰氧氣電池，並藉X光繞射 (X-Ray Diffraction) 與拉曼光譜 (Raman Spectroscopy) 證實放電產物為過氧化鋰 (Lithium Peroxide; Li<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)，即為最早之鋰氧氣電池。鋰氧氣電池之陰極為導電性多孔性碳材料，由液態電解質實現氧氣與鋰離子間之電化學反應。電池於充放電反應時，陽極溶解與沉積鋰金屬，陰極產生氧還原反應 (Oxygen Reduction Reaction; ORR) 與析氧反應 (Oxygen Evolution Reaction; OER)。[3]

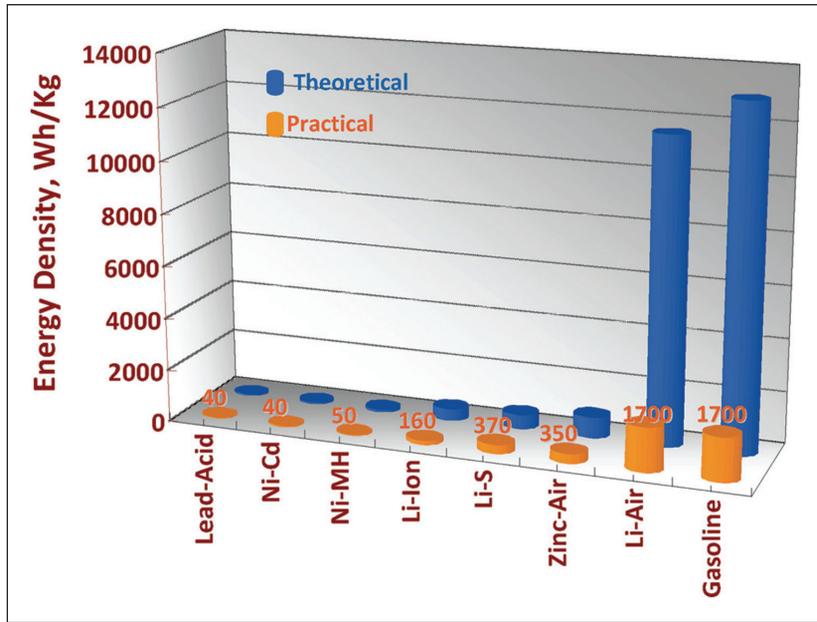


圖 1 各式電池能量密度比較圖 [1]

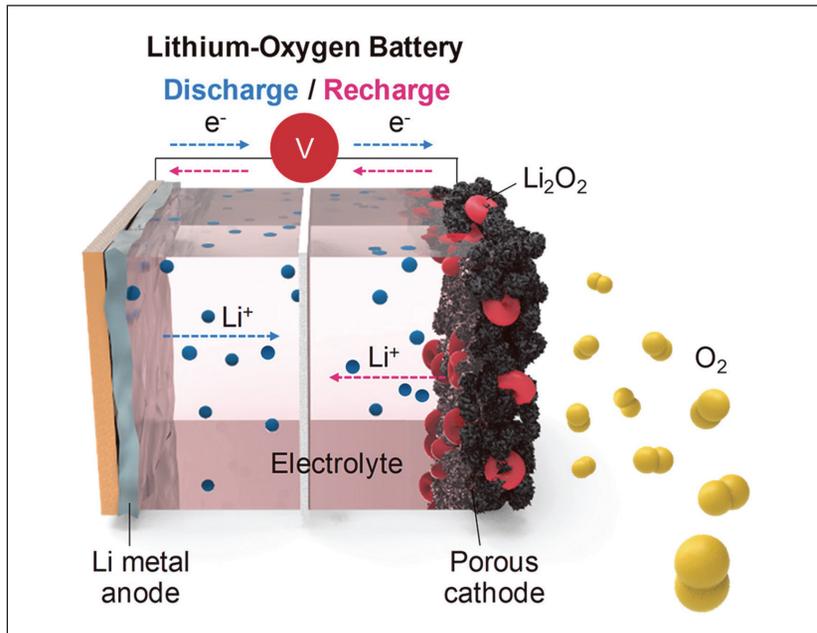
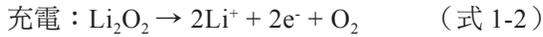
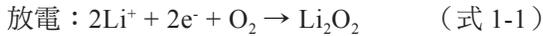


圖 2 鋰氧電池之示意圖 [3]



### (三) 鋰氧氣電池反應機制

2006年Ogasawara等人[4]組裝鋰氧氣電池由液態電解質探討過氧化鋰放電產物沉積之機制，開啟鋰氧氣電池反應機制之先驅。圖3為鋰氧氣電池於充放電時之循環機制示意圖，其充放電反應式如下：



電池放電時，鋰離子由液態電解質由陽極遷移至陰極，電子經由外電路由陽極傳遞至陰極，與外部滲入之氧氣與多孔陰極反應，生成過氧化鋰並沉積於陰極表面，充電時則逆向進行反應。

放電時，陽極之反應機制為鋰金屬解離成鋰離子與電子，其反應式如下：



解離後之電子經由外電路由陽極傳遞至陰極，與陰極側之氧氣反應形成超氧自由基  $\text{O}_2^-$ ，此反應即為氧還原反應，再與電解質中陽極遷移至陰極之鋰離子反應，形成超氧化鋰 (Lithium Superoxide;  $\text{LiO}_2$ )，其反應式如下：



超氧化鋰為非穩定之熱力學產物，故須考量電解液、陰極材料與電流密度之變因。若鋰氧氣電池於較低電流密度下，因陰極材料吸附能力差，其反應物為溶劑化之超氧化鋰，經歧化反應 (Disproportionation) 生成過氧化鋰與氧氣；若於較高電流密度下，則電解液中之鋰離子與外電路之電子將於陰極

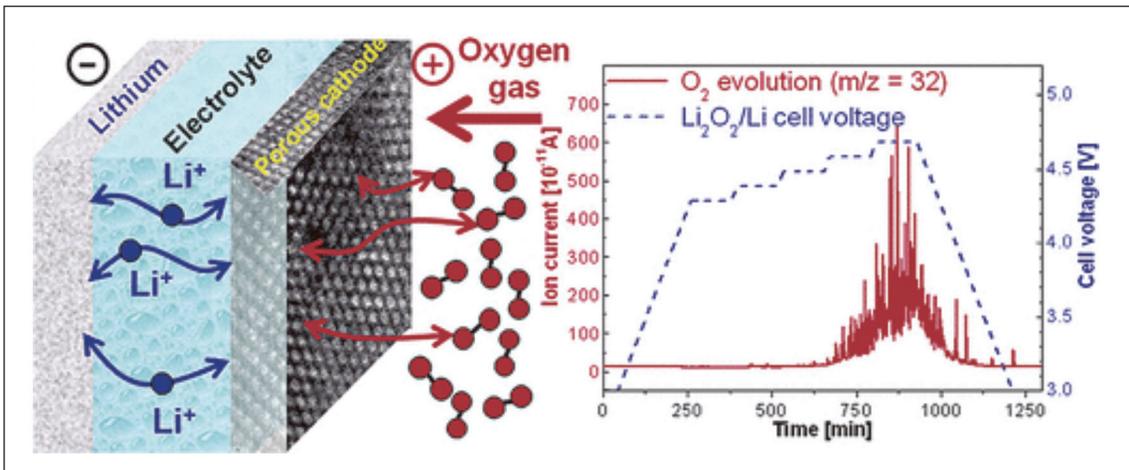
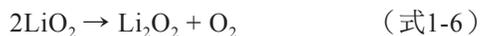
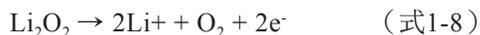


圖 3 鋰氧氣電池機制示意圖 [4]

與超氧化鋰反應生成過氧化鋰，其反應式如下：



充電時，過氧化鋰分解為鋰離子、氧氣與電子，並依循放電時之路徑遷移回至陽極，氧氣則由陰極孔洞析出至電池外部，即為析氧反應，其反應式如下：



#### (四) 鋰二氧化碳電池

因應近年來全球暖化加劇與溫室效應之

問題，故延伸鋰氧氣電池之新型鋰二氧化碳電池（Li-CO<sub>2</sub> Battery）誕生，因工業排放大量溫室氣體，其中二氧化碳氣體所占比例逐年上升。故藉二氧化碳氣體經電池之電化學反應轉化為碳酸鋰形成一新型儲能裝置。其最早發展於2011年Takechi等人[5]將鋰氧氣電池中摻入不同比例之二氧化碳，發現摻入適當比例之二氧化碳氣體可提升電池之放電容量並降低其過電位。鋰二氧化碳電池之示意圖如圖4所示。[6]

#### (五) 鋰二氧化碳電池反應機制

鋰二氧化碳電池利用多孔性碳材料結合二氧化碳氣體、鋰金屬陽極與液態電解質組成電池，圖5為鋰二氧化碳電池之機制示意圖

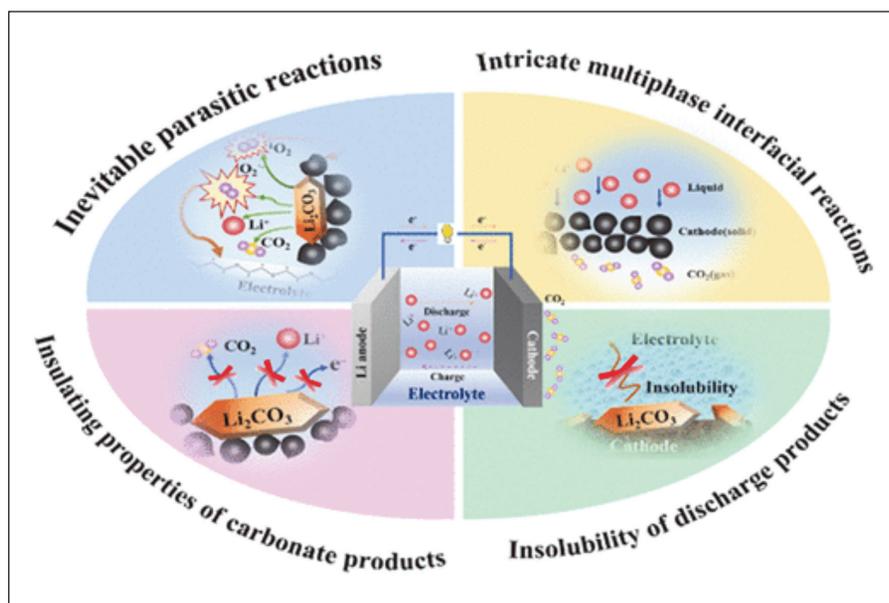


圖 4 鋰二氧化碳電池示意圖 [6]

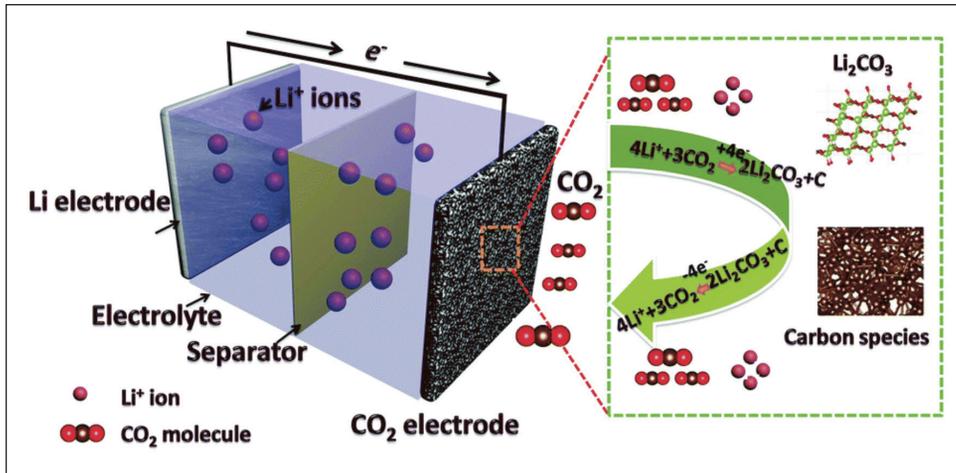
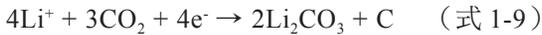


圖 5 鋰二氧化碳電池之循環機制示意圖 [7]

[7]，其充放電反應式如下

放電：



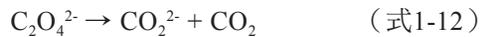
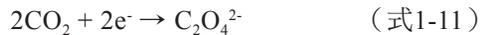
充電：



電池放電時，鋰離子由液態電解質由陽極遷移至陰極，電子經由外電路由陽極傳遞至陰極，與外部滲入之二氧化碳與多孔陰極反應，生成碳酸鋰與碳元素並沉積於陰極表面，充電時則逆向進行反應。

放電時，陽極之反應機制為鋰金屬解離成鋰離子與電子，如式1-3所示，解離後之電子經由外電路由陽極傳遞至陰極與多孔性碳材料陰極滲入之二氧化碳形成草酸根

(Oxalate;  $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ ) 離子[8]，緊接著草酸根離子再分解為 $\text{CO}_2$ 與 $\text{CO}_2^{2-}$ ，將 $\text{CO}_2^{2-}$ 與草酸根離子反應形成碳酸根 (Carbonate;  $\text{CO}_3^{2-}$ ) 與碳元素，最後再與電解質中之鋰離子結合形成最終放電產物碳酸鋰 (Lithium Carbonate;  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ )，其反應式如下：[9]



充電時，沉積於陰極之碳酸鋰受外電壓影響分解為鋰離子、二氧化碳與電子，電子依循放電時之路徑遷移回至陽極，與鋰離子結合還原成鋰金屬，其總反應式如式1-14所示。[10]



## (六) 鋰空氣電池之電解質

鋰二氧化碳電池中，電解質扮演導通陰極與陽極之重要角色，將直接影響鋰離子傳輸速率與界面之穩定性，亦於充放電時直接影響電池之性能與其反應機制。以下介紹有機溶劑之電解質與其優缺點。

### 1. 有機溶劑之電解質

因鋰空氣電池反應電位與析氫反應電位重合，故無法直接使用水作為其反應溶劑，故改藉有機溶劑取代之。有機溶劑配製方式為使用含雙（三氟甲磺酰）亞胺鋰（LiTFSI）之鋰鹽溶於四甘醇二甲醚（TEGDME）之有機溶劑。[11] LiTFSI鋰鹽具高電化學與熱穩定性，而TEGDME為極性非質子溶劑，此液態電解質有效提升鋰離子導電性，為現今廣泛使用於鋰空氣電池之研究中，可展現其穩定之電化學性能。以下探討液態電解質須具備之條件：

#### (A) 低電子導電度

電池於充放電時，因電子經由外電路由陽極傳遞至陰極，須避免電子與電解質產生反應而影響電池之運作，故電解質應為低電子導電度。

#### (B) 高鋰離子導電度

液態電解質於電池充放電時，鋰離子由液態電解質由陽極遷移至陰極，若鋰離子電導率較低，則鋰離子遷移須較高之過電位驅動，使過電位增加進而降低電池之性能。

#### (C) 高沸點

因常見之有機溶劑於空氣中具揮發性，若電池於高溫環境下運作，將具劇烈揮發之風險，進而影響其性能。

#### (D) 電化學穩定性佳

鋰金屬陽極為高活性材料且電解液於陰陽極之間界面接觸極佳。為避免電解液於兩極間因高過電位而被分解並產生烷基鋰鹽之副反應，進而影響電池性能，故電解液須具備電化學穩定性。

#### (E) 低污染無毒性

電解液之使用應當考慮其毒性對人體與環境之危害，因近年環保意識抬頭，故具毒性與污染之電解液將面臨被淘汰之命運。

## (七) 鋰空氣電池陰極觸媒

鋰空氣電池於充放電循環中存在碳酸鋰不易分解，大量碳酸鋰沉積於陰極表面擋住陰極活性位點，導致循環壽命與穩定度降低等反應不可逆之現象，故尋找合適之陰極觸媒材料改善其電化學性能為當前解決之道。圖6所示目前應用於鋰空氣電池之陰極觸媒，以下著重介紹於碳材料、金屬氧化物與貴金屬催化劑之陰極觸媒材料。[12]

### 1. 碳材料

鋰空氣電池之陰極材料中，多孔性碳材料利於氣體擴散且具高比表面積與高電子導電性，故常被應用於鋰空氣電池之陰極材料。[13] 2013年Wang等人[14]首次利用多壁



奈米碳管（MWCNT）製成陰極觸媒材料，並應用於鋰空氣電池中。如圖7所示[14]，具多壁奈米碳管陰極之鋰空氣電池限制其最大放電容量於3000 mA h g<sup>-1</sup>避免過度放電，平均充電電壓降低至約3.5 V，放電與充電之截止電壓於循環過程中無顯著變化，循環後無觀察到未分解之排放產物與副產物，電池表現出良好之循環性能。其歸因於多壁奈米碳管為多孔性碳材料，其結構有助於氣體擴散，陰極材料具高表面積，於放電時可沉積大量之碳酸鋰。

## 2. 金屬氧化物

常見之金屬氧化物催化劑具二氧化碳還原反應（Carbon Dioxide Reduction Reaction; CDRR）與二氧化碳析出反應（Carbon Dioxide Evolution Reaction; CDER）之雙重催化活性，可減少電池充放電之過電位，其成本較貴金屬低且穩定性較高。然而此催化劑之缺點為導電性差且電子轉移之阻抗大，普遍之電池充電電壓高於4.5伏特，故金屬氧化物常與碳材料形成複合式陰極材料，大幅度提高氧化物催化劑本身之性能，2014年Liu

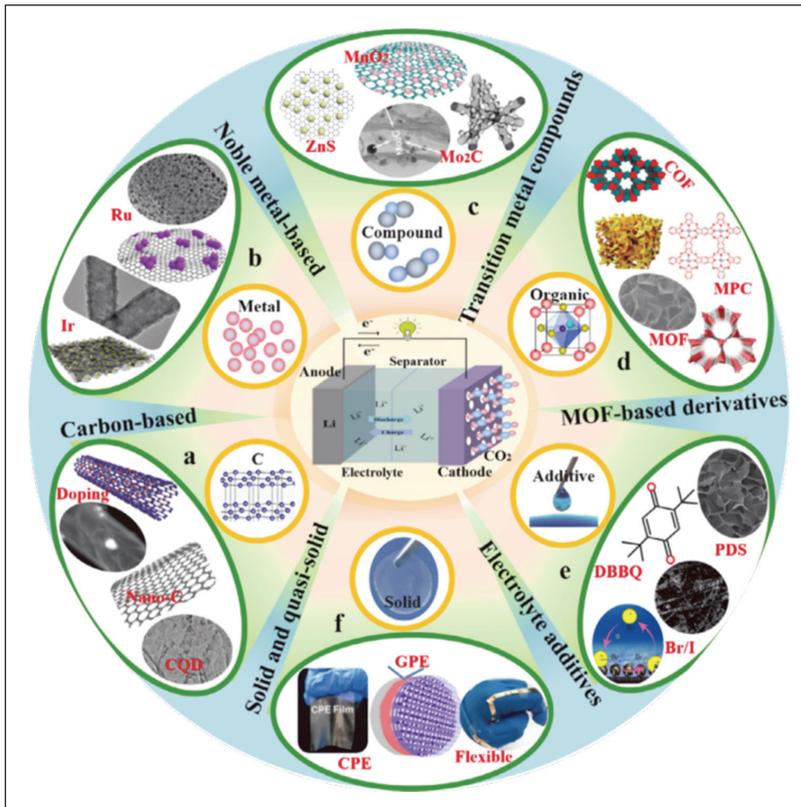


圖 6 應用於鋰空氣電池之陰極觸媒 [12]

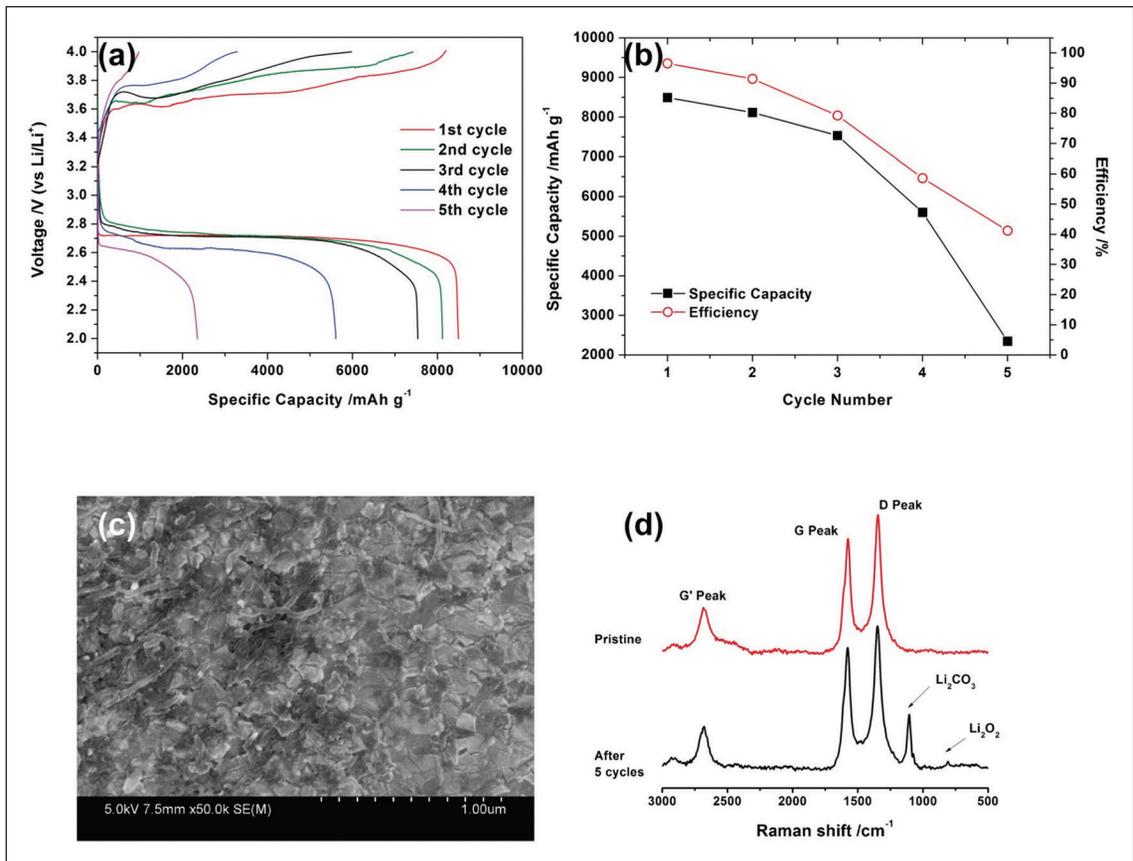


圖 7 (a, b) MWCNT 陰極之鋰空氣電池循環性能圖 (c) MWCNT 陰極之 SEM 影像圖 (d) MWCNT 陰極放電產物拉曼光譜圖 [14]

等人[15]利用無碳  $\text{MnO}_2$  之金屬氧化物，沉積於3D石墨烯表面上，形成 $3\delta\text{-MnO}_2$ 之高催化雙功能活性陰極。應用於鋰氧氣電池時，其放電容量高達 $3660 \text{ mAh g}^{-1}$ ，並且能量密度於110個循環期間顯示出非常高之平均值 $1350 \text{ Wh Kg}^{-1}$ 。化學性能歸因於花狀 $3\delta\text{-MnO}_2$ 高ORR與OER催化劑活性與3D-G- $\text{MnO}_2$ 獨特3D結構以利氣體擴散。此外，3D電子導電網路亦有助於增強ORR與OER動力學。3D-G-

$\text{MnO}_2$ 與 $\text{Co}_3\text{O}_4$ 與其他碳材料之複合材料中皆可發現類似之效果。碳載體上之電催化劑負載對電池性能有重大影響。

### 3. 貴金屬

貴金屬具絕佳之導電性與穩定之物化性，其催化劑具CDRR與CDER之雙催化活性，然其價格昂貴，故其應用範圍受到較大之限制，常少量摻雜於碳材料中形成複合式

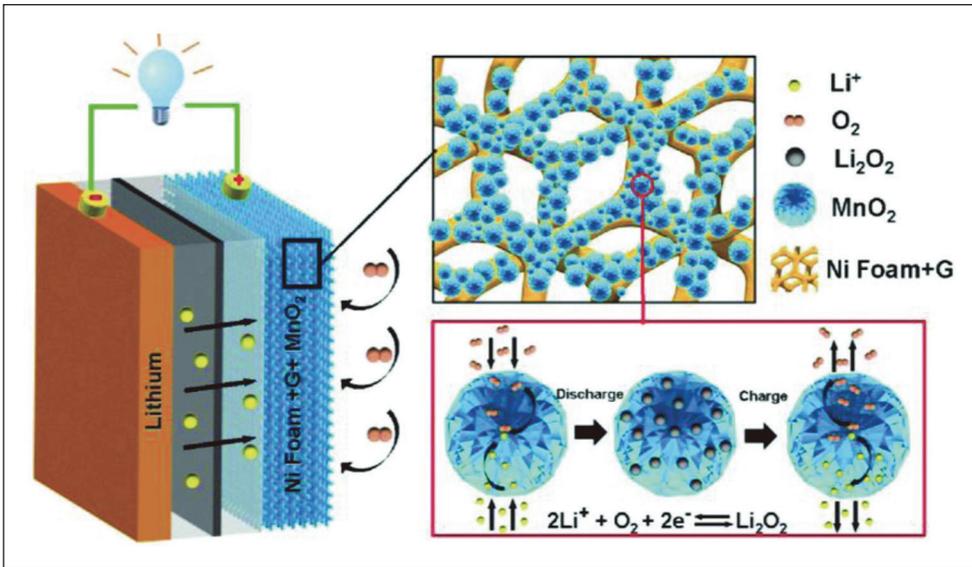


圖 8 金屬氧化物與碳材料之複合式陰極材料空氣陰極結構圖 [15]

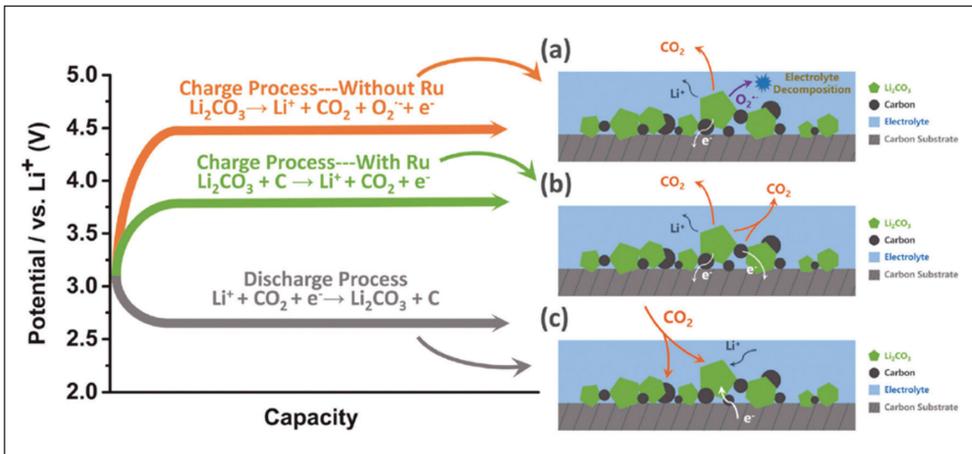


圖 9 鋰二氧化碳電池之充放電反應機制示意圖 [16]

陰極材料應用於鋰二氧化碳電池，常見之貴金屬如金、鈷、鈦等。2017年Yang等人 [16]藉貴金屬鈦作為陰極觸媒，與導電碳黑（Super P）合成複合式陰極材料，此即為 Ru@Super P陰極。將此陰極應用於鋰二氧化

碳電池，含鈦奈米粒子之陰極觸媒有效降低其過電位，並對其分解碳酸鋰表現良好之電催化活性。如圖9所示，具鈦奈米粒子之陰極觸媒鋰二氧化碳電池充電反應路徑由圖（a）轉變為圖（b），此區電位減少為超氧根離子

與電解液分解之副產物，形成一充放電之可逆反應。

### 三、鋰空氣電池之組裝

鋰空氣電池由三個主要部件組成，即鋰陽極、電解質與空氣陰極。於此介紹如何組裝鋰空氣電池，以常見之貴金屬參雜於碳材料之複合式陰極材料為例，於充滿氫氣環境下之手套箱 (<1 ppm之 $O_2$ 與 $H_2O$ )，使用陰極側開孔4 mm大小之鈕扣電池 (CR2032型) 組裝電池，其陰極側開孔主要以供氣體與陰極材料相互作用，採用鋰箔作為陽極，1 M LiTFSI溶解於TEGDME中作為電解質，玻璃纖維作為隔離膜組裝而成。如圖10所示，置放電池下蓋於底部，接著依序置放陰極、玻璃纖維隔離膜，此時滴入電解液、鋰金屬陽極片與含彈簧之電池上蓋，最後將電池放入

於特製玻璃血清瓶內之電池座並灌入氣體，即完成鋰空氣電池之組裝。

### 四、應用

近年來電動車市場日益普及與商業化，造成人們對於電池需求量增加，金屬空氣電池，具安全、環保、方便、經濟、可靠、高能量、高效率與壽命長等優勢，故未來有望應用於電動車市場挑戰成為市場新主流，2014年Gallagher等人[17]揭示非水鋰氧氣電池之研究促進電化學與材料科學基礎方面之價值。成功開發應用於電動車之鋰氧氣電池系統，包含整個電池之含氧壓力容器，使用鋰金屬負極與先進金屬氧化物正極之封閉電池系統，以實現接近高風險替代方案之能量密度與成本價值。鋰空氣電池重量較輕，具相當大之儲能潛力，相較於其他電池金屬空

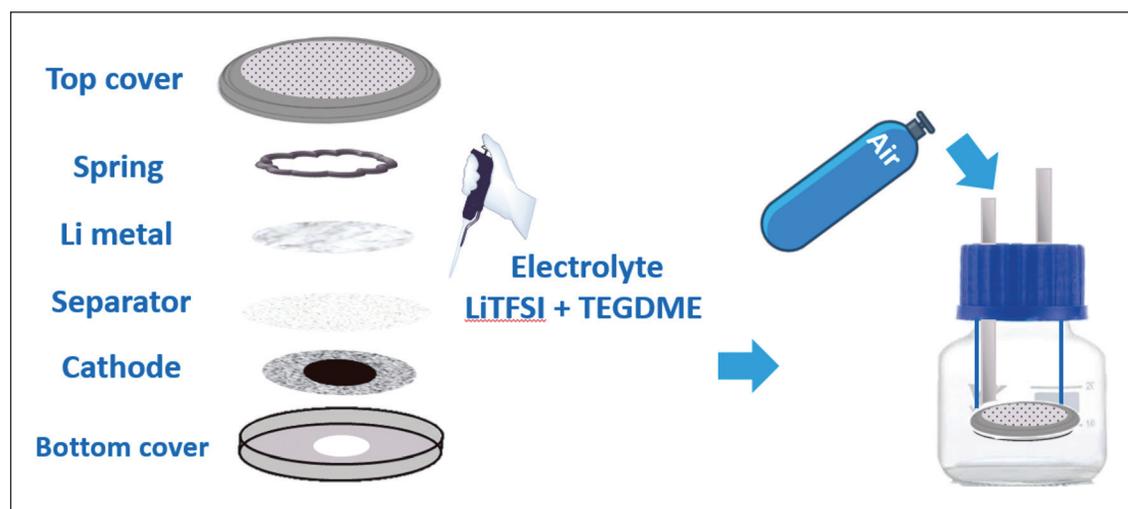


圖 10 鋰空氣電池組裝示意圖



氣電池因其極高之能量密度，可與汽油相媲美，使其成為未來電動交通有前途之儲能裝置，若應用於電動車，續航里程可高達800公里。2022年Hayat等人[18]揭示鋰離子電池與鋰空氣電池電動汽車之行駛里程示意圖，開發新型空氣陰極為實現高實用存儲容量之必然趨勢。如圖11所示鋰空氣電池具較高之行駛里程與高能量密度，鋰空氣電未來有望取代傳統鋰離子電池應用於電動車市場。

### 五、未來發展

儘管目前鋰空氣電池技術仍處於起步階段，要應用於日常生活中仍須投入大量之研究工作，克服一些可能產生之問題，然而，鋰空氣電池具極高之能量密度故科學家與工業界一致看好其發展潛力。因傳統鋰空氣電池使用液態電解質，其缺點為液態電解質容易發生燃燒等問題，造成火燒

車事件層出不窮，故未來將以固態鋰空氣電池為最主要之發展，凝膠與固體聚合物電解質已被引入鋰空氣電池中以解決此問題，然而，枝晶問題為機械性能較差之凝膠與聚合物電解質所面臨之挑戰。此外，鋰金屬陽極與聚合物或凝膠電解質之間界面寄生反應將縮短使用壽命。故須一種具更好機械與電化學穩定性之無機固態電解質。具鈉超離子導體（Sodium Superionic Conductor; NASICON）結構之氣體穩定鋰鉛鎢磷酸鹽  $\text{Li}_{1.5}\text{Al}_{0.5}\text{Ge}_{1.5}(\text{PO}_4)_3$  (LAGP) 無機固態電解質為最有前途之鋰空氣電池電解質之一，與液體與聚合物電解質相比，LAGP 對金屬鋰表現出更好之化學與電化學穩定性。藉正四價鎢離子 ( $\text{Ge}^{4+}$ ) 取代鈦離子 ( $\text{Ti}^{4+}$ )，優點為提高其鋰離子電導率且  $\text{Ge}^{4+}$  較  $\text{Ti}^{4+}$  穩定，使得其電化學穩定性提升，LAGP固態電解質結構如圖12所示。[19]

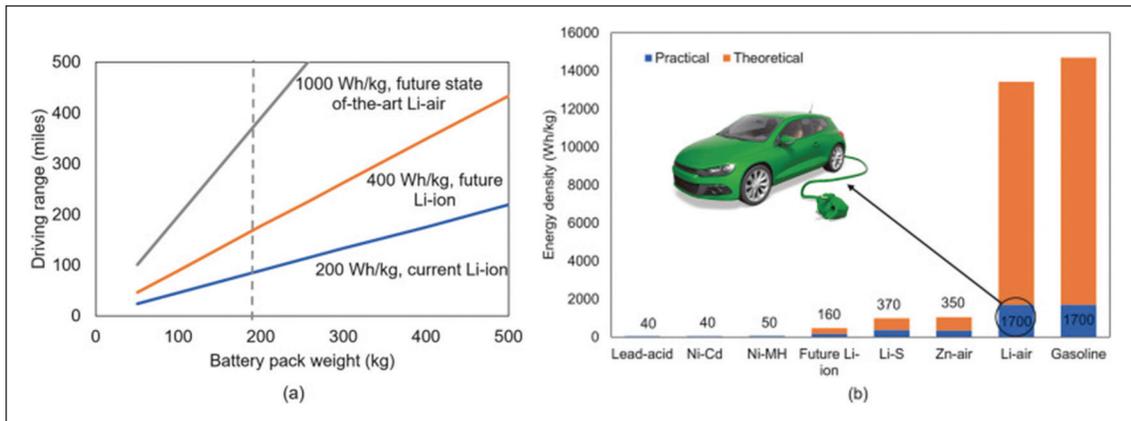


圖 11 不同電池電動汽車之行駛里程示意圖 [18]

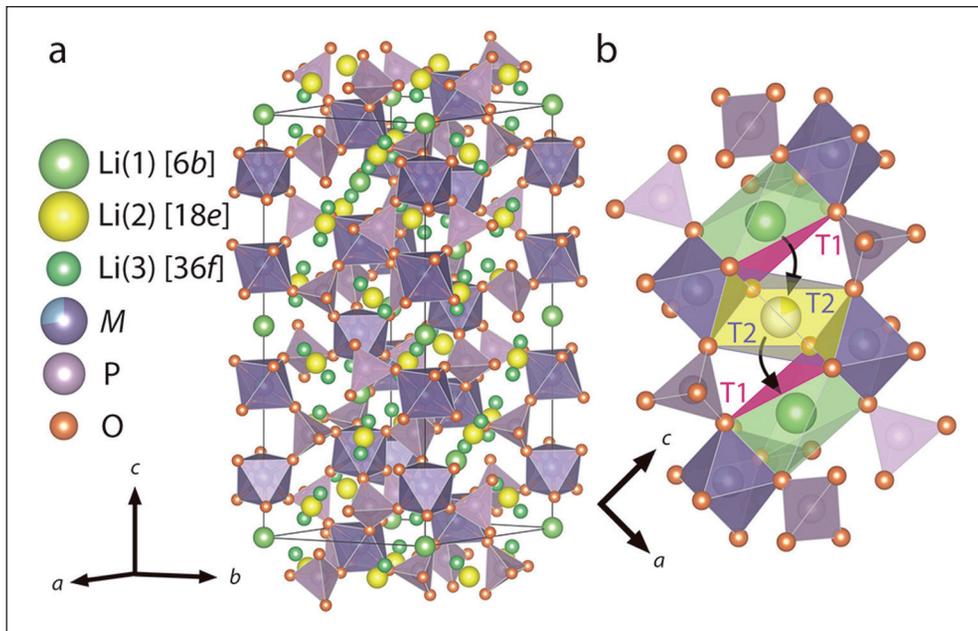


圖 12 LAGP 固態電解質結構示意圖 [19]

## 六、結論

鋰空氣電池基於其高能量密度為一種極具吸引力之電能存儲技術，於過去幾十年中，電化學儲能裝置已被揭示作為一種可能之解決方案，以滿足可再生能源存儲、便攜式設備與電動車等多種應用日益增長之能源需求，利用溫室氣體CO<sub>2</sub>作為陰極氣體與貴金屬參雜於碳材料之複合式陰極材料應用於鋰二氧化碳電池，有效提升ORR與OER之電催化活性，建立儲能與轉換系統減輕CO<sub>2</sub>對環境之不利影響，揭示新穎之綠色能源促進環境永續發展，使其成為未來電動車有前途之儲能裝置。

## 參考文獻

1. Girishkumar, G.; McCloskey, B.; Luntz, A. C.; Swanson, S.; Wilcke, W. Lithium-Air Battery: Promise and Challenges. *J. Phys. Chem. Lett.* Vol. 1 No. 14, pp. 2193-2203, 2010.
2. Abraham, K.; Jiang, Z. A Polymer Electrolyte-Based Rechargeable Lithium/Oxygen Battery. *J. Electrochem. Soc.* Vol. 143 No. 1, pp. 1-5, 1996.
3. Kwak, W. J.; Rosy, Sharon, D.; Xia, C.; Kim, H.; Johnson, L. R.; Bruce, P. G.; Nazar, L. F.; Sun, Y. K.; Frimer, A. A.; et al. Lithium-Oxygen Batteries and Related Systems: Potential, Status, and Future. *Chem. Rev.* Vol. 120 No. 14, pp. 6626-6683, 2020.
4. Ogasawara, T.; Débart, A.; Holzapfel, M.; Novák, P.; Bruce, P. G. Rechargeable Li<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Electrode for Lithium Batteries. *J. Am. Chem. Soc.* Vol. 128 No. 4, pp. 1390-1393, 2006.
5. Takechi, K.; Shiga, T.; Asaoka, T. A Li-O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> Battery. *Chem. Commun.* Vol. 47 No. 12, pp. 3463-3465, 2011.
6. Sun, X.; Hou, Z.; He, P.; Zhou, H. Recent Advances in Rechargeable Li-CO<sub>2</sub> Batteries. *Energy Fuels*, Vol. 35 No. 11, pp. 19165-9186, 2021.
7. Liu, B.; Sun, Y.; Liu, L.; Chen, J.; Yang, B.; Xu, S.; Yan, X. Recent Advances in Understanding Li-CO<sub>2</sub>



- Electrochemistry. *Energy Environ. Sci.* Vol. 12 No. 3, pp. 887-922, 2019.
- Németh, K.; Srajer, G. CO<sub>2</sub>/Oxalate Cathodes as Safe and Efficient Alternatives in High Energy Density Metal-Air Type Rechargeable Batteries. *RSC Adv.* Vol. 4 No. 4, pp. 1879-1885, 2014.
  - Hou, Y.; Wang, J.; Liu, L.; Liu, Y.; Chou, S.; Shi, D.; Liu, H.; Wu, Y.; Zhang, W.; Chen, J. Mo<sub>2</sub>C/CNT: An Efficient Catalyst for Rechargeable Li-CO<sub>2</sub> Batteries. *Adv. Funct. Mater.* Vol. 27 No. 27, pp. 1700564-1700571, 2017.
  - Yang, S.; Qiao, Y.; He, P.; Liu, Y.; Cheng, Z.; Zhu, J. j.; Zhou, H. A Reversible Lithium-CO<sub>2</sub> Battery with Ru Nanoparticles as A Cathode Catalyst. *Energy Environ. Sci.* Vol. 10 No. 4, pp. 972-978, 2017.
  - Sun, X.; Hou, Z.; He, P.; Zhou, H. Recent Advances in Rechargeable Li-CO<sub>2</sub> Batteries. *Energy Fuels*, Vol. 35 No. 11, pp. 9165-9186, 2021.
  - Jiao, Y.; Qin, J.; Sari, H. M. K.; Li, D.; Li, X.; Sun, X. Recent Progress and Prospects of Li-CO<sub>2</sub> Batteries: Mechanisms, Catalysts and Electrolytes. *Energy Storage Mater.* Vol. 34 No. 1, pp. 148-170, 2021.
  - Li, X.; Zhang, J.; Qi, G.; Cheng, J.; Wang, B. Vertically Aligned N-Doped Carbon Nanotubes Arrays as Efficient Binder-Free Catalysts for Flexible Li-CO<sub>2</sub> Batteries. *Energy Storage Mater.* Vol. 35 No. 1, pp. 148-156, 2021.
  - Wang, H.; Xie, K.; Wang, L.; Han, Y. All Carbon Nanotubes and Freestanding Air Electrodes for Rechargeable Li-Air Batteries. *Rsc Adv.* Vol. 3 No. 22, pp. 8236-8241, 2013.
  - Liu, S.; Zhu, Y.; Xie, J.; Huo, Y.; Yang, H. Y.; Zhu, T.; Zhang, S. Direct Growth of Flower-Like δ-MnO<sub>2</sub> on Three-Dimensional Graphene for High-Performance Rechargeable Li-O<sub>2</sub> Batteries. *Adv. Energy Mater.* Vol. 4 No. 9, pp. 1301960-1301968, 2014.
  - Yang, S.; Qiao, Y.; He, P.; Liu, Y.; Cheng, Z.; Zhu, J. j.; Zhou, H. A Reversible Lithium-CO<sub>2</sub> Battery with Ru Nanoparticles as A Cathode Catalyst. *Energy Environ. Sci.* Vol. 10 No. 4, pp. 972-978, 2017.
  - Gallagher, K. G.; Goebel, S.; Greszler, T.; Mathias, M.; Oelerich, W.; Eroglu, D.; Srinivasan, V. Quantifying the Promise of Lithium-Air Batteries for Electric Vehicles. *Energy Environ. Sci.* Vol. 7 No. 5, pp. 1555-1563, 2014.
  - Hayat, K.; Vega, L. F.; AlHajaj, A. What Have We Learned by Multiscale Models on Improving the Cathode Storage Capacity of Li-Air Batteries? Recent Advances and Remaining Challenges. *Renew. Sust. Energ. Rev.* Vol. 154 No. 1, pp. 111849-111865, 2022.
  - Weiss, M.; Weber, D. A.; Senyshyn, A.; Janek, J.; Zeier, W. G. Correlating Transport and Structural Properties in Li<sub>1+x</sub>Al<sub>x</sub>Ge<sub>2-x</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> (LAGP) Prepared from Aqueous Solution. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 10 No. 13, pp. 10935-10944, 2018.