

電動大客車關鍵零組件發展趨勢探討

Investigate the development trend of key components of electric buses

運輸資訊組 陳國岳、吳東凌

研究期間：民國 108 年 4 月至 109 年 4 月

摘要

近幾年來，電動大客車之技術發展不斷進步，然尚未完全成熟，電動大客車關鍵零組件如電池、電機與電控系統，對於電動大客車之售價、穩定性、使用方式、營運規劃等影響甚鉅，爰進行此研究，藉以提供國內電動大客車政策規劃參考，並可做為政策推動與補助制度滾動檢討之依據，以及提供未來合作研究擬定議題與研究方向參考。

關鍵詞：

電動大客車、電池

電動大客車關鍵零組件發展趨勢探討

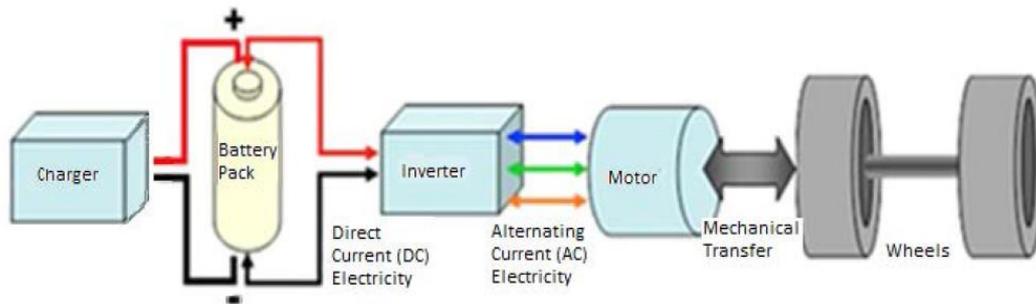
一、前言

行政院於 103 年 10 月 1 日修訂第 2 階段「智慧電動車輛發展策略與行動方案」，並結合經濟部、交通部及環保署推動電動公車，以落實低碳島政策。行政院為改善空氣汙染，已於 106 年 12 月 21 日宣布於 2030 年前將 1 萬輛市區公車全面電動化。為落實此政策目標，交通部於 107 年研擬我國電動公車推動策略與作法，提出各策略執行工作及部會分工，並接續於 108 年規劃推動電動公車推廣示範計畫，逐步落實市區公車電動化。

近幾年來，電動大客車之技術發展不斷進步，然尚未完全成熟，其中電動大客車關鍵零組件如電池、電機與電控系統，對於電動大客車之售價、穩定性、使用方式、營運規劃等影響甚鉅，故進行此研究，藉以提供國內電動大客車政策規劃參考，並可做為政策推動與補助制度滾動檢討之依據。

二、電動大客車關鍵零組件

電動大客車是一個兼具高資本投入、高技術密集的整合性產業，從最上游的電池系統原料(Raw Materials)、中游的電池芯(Cell)、電池模組(Pack)、電池管理系統(Battery Management System, BMS)、電動馬達(Electric Motors)、控制器(Motor Controllers)、到下游整車組裝與製造(OEM/Vehicle Manufacturers)、汽車電子(Automotive electronics)，以及電力與基礎建設(Power and Infrastructure)，需要大量具備電機、資工、化學、以及商業管理等整合性知識的技術與人才，如圖 1 所示。和傳統車輛不同的是，電池是電動大客車投入成本比例最高的部分，占整車成本約 20-50%；其次是動力系統(含馬達/控制器/變頻裝置)，占整車成本約 10-15%。由前述可知，電池是電動大客車價格最重要因素，不同電池系統影響營運型態甚鉅，對客運業者來說，電池除先期購車成本之外，且影響其營運型態，且電池係客運業者最大維運成本，因此本研究將針對電池系統進行初步分析。



資料來源：[6]

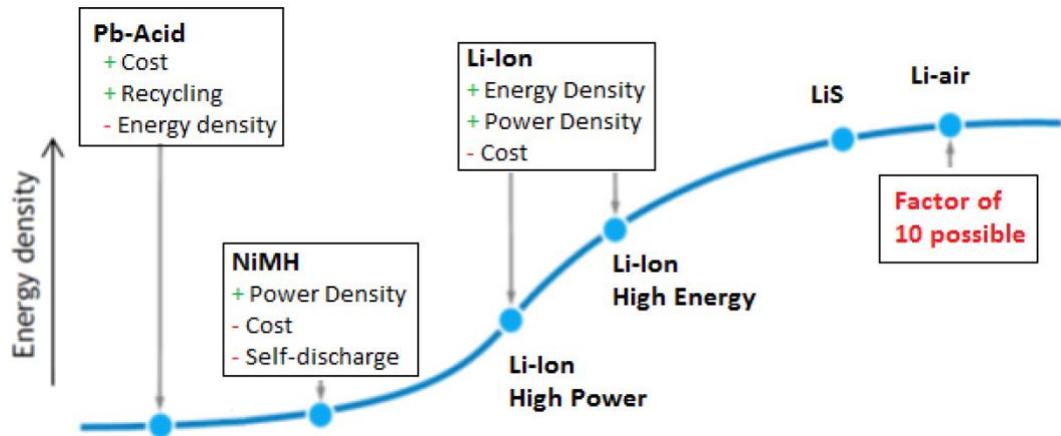
圖 1 電動大客車關鍵零組件

三、電池系統發展簡介

二次電池(secondary battery)又稱作可充式電池(rechargeable battery)，當電池所儲存的能量用盡時，再充電後電池即可再重複使用，達到一次電池提供的電壓、電容量、放電特性、溫度特性及保存性。

二次電池則強調循環壽命、安全性、高效率充放電特性、電容量及保存性等。不同種類的電池由於具不同的材料特性，因此工作電壓亦不相同；但同時也受電解液系統而異，水系統電解液受到水分解特性的限制，可承受的最大電壓約 2.0V，有機電解液系統目前最大電壓朝向 5.0V 研發。最早被商業化的二次電池是鉛酸電池(Lead-acid Battery)依序發展為鎳鎘電池(Nickel-cadmium battery)、鎳氫電池(Nickel-Metal Hydride battery)及鋰離子電池(Lithium ion battery)，發展過程如圖 2 所示。雖然二次電池的起步很晚，但其發展迅速，各種材料組成的二次電池快速推出，並且各具其特性及優點。近年來由於環境保護及綠色能源觀念的意識提升，鉛與鎘相關高污染之重金屬產品，其需求量逐年下降。而鋰離子電池能量密度與工作電壓比其他二次電池高因此用鋰作陽極的電池具有很高的能量密度。鋰也能夠製造低於室溫或高溫下使用的電池。二次鋰電池中正極材料也為含鋰化合物，如鋰鈷氧化物、鋰鎳氧化物、鋰錳氧化物、鋰鐵氧化物等等，以及其化合物。二次鋰電池中負極材料，也與鋰的作用明顯。現階段全球動力電池產品中雖以鋰離子電池最大。然而，鋰離子電池的大電流放電特性及安全性比鎳氫電池、鉛酸電池及鎳鎘電池遜色，如目前許多油電混合車輛仍以鎳氫電池為主，因此目前在市場區隔下，各類二次電池仍

有其各自發展空間。



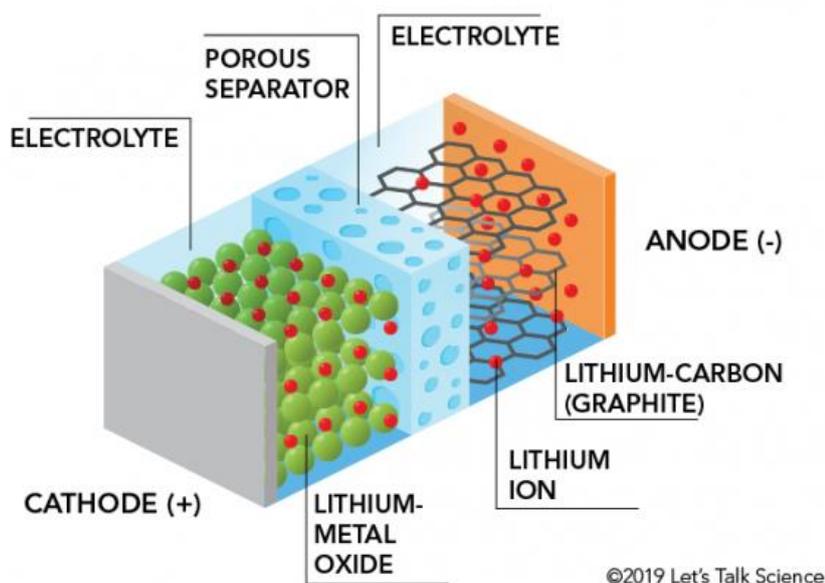
資料來源：[9]

圖 2 電池系統發展趨勢

四、鋰離子電池工作原理

鋰離子電池的基本結構是由正極(positive electrode)、負極(negative electrode)、電解液(electrolyte)、隔離膜 (separator)組成，隔離膜主要功用為將正負極隔開避免短路。鋰離子電池內部結構如圖 3 所示。鋰離子主要特性取決於正電極材料，故鋰離子電池都以正電極材料命名。

PARTS OF A LITHIUM-ION BATTERY



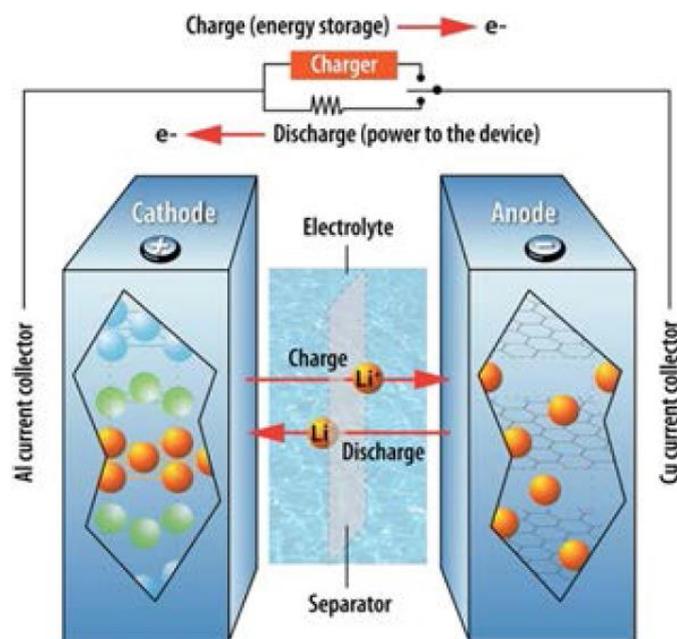
資料來源：[6]

圖 3 鋰離子電池結構圖

當鋰離子電池進行充電過程時，在陰極中的鋰離子經由電池內部的電解液與陽極產生反應，而電子藉由電池外部導線傳至陰極形成迴圈，相反的，當對鋰離子電池進行放電時，嵌入陽極活性材料結構中的鋰離子嵌出，經由電解液再移動回到陰極，同時，電子再度經由外部導線進入電池的陽極材料中。因此在鋰離子電池的充放電過程中，鋰離子藉由電解液媒介而反復在陰極與陽極間進行嵌入及嵌出的過程(如圖 4 所示)。

由圖 4 可以看出，鋰電池整個電化學反應可分為陸路及海路，陸路為電子行走的路徑；海路為鋰離子行走的路徑。充電時，電子由正電極材料經正電極及外面導線至負電極，最後由負電極進入負電極材料。離子則由正電極材料經固液相介面(Solid Electrolyte Interphase, SEI)進入電解液，再穿過隔離膜經過電解液及 SEI 膜進入負電極材料。

放電時則路徑相反。檢視整個路徑，影響電子行走路徑的阻力有正電極材料的導電性、正電極與正電極材料介面的阻力、正電極導電率、外面負載的阻抗、負電極的導電率、負電極與負電極材料介面的阻力及負電極材料的導電率。影響離子行走路徑的阻力有正電極材料內離子進出的阻力、正電極材料與電解液間 SEI 膜的阻力、電解液及隔離膜的阻力、電解液與負電極材料間 SEI 膜的阻力及負電極材料內離子進出的阻力。



資料來源：[10]

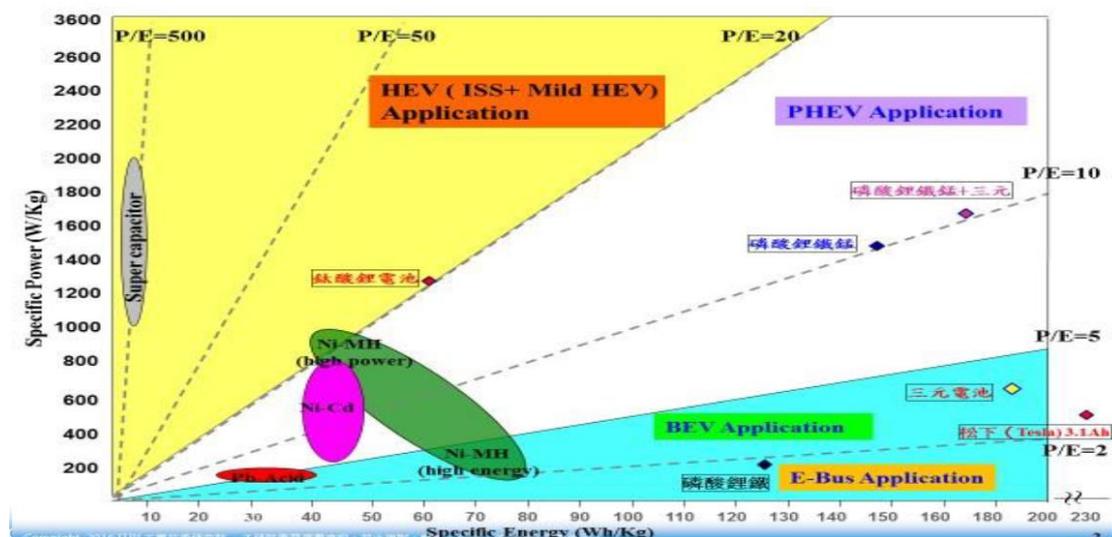
圖 4 鋰電池充放電原理

五、電池性質

在決定電動大客車所須搭配的電池系統時，是必須先藉由幾個參數和營運環境進行比對，包括能量比(Specific energy)、功率比(Specific power)；而在評比電池材料的適用性。以中國大陸和美國進行電動大客車補貼時，也會依其路線性質之不同，而比較其能量密度(Energy density)與功率密度(Power density)之數據，進行差異化補貼。

以圖 5 進行分析，能量比是指每電池單位重量所能儲存的電能量，故其單位為 Wh/kg，功率比則是指每電池單位重量所能釋出的功率，其單位為 W/kg。

鋰電池因其應用方式不同，又可分為能量型(Energy Cell)、功率型(Power Cell) 與中功率電池(Medium Power Cell)，其中能量型電池(P/E=2)為目前磷酸鐵鋰、三元鋰材質為最普遍使用及標準化的鋰離子電池，其電容量高、儲存特性佳，廣泛應用於長里程型態電動大客車。功率電池(P/E=20)，放電性能佳，適用於短程需求的電動大客車。



資料來源：[6]

圖 5 能量電池與功率電池

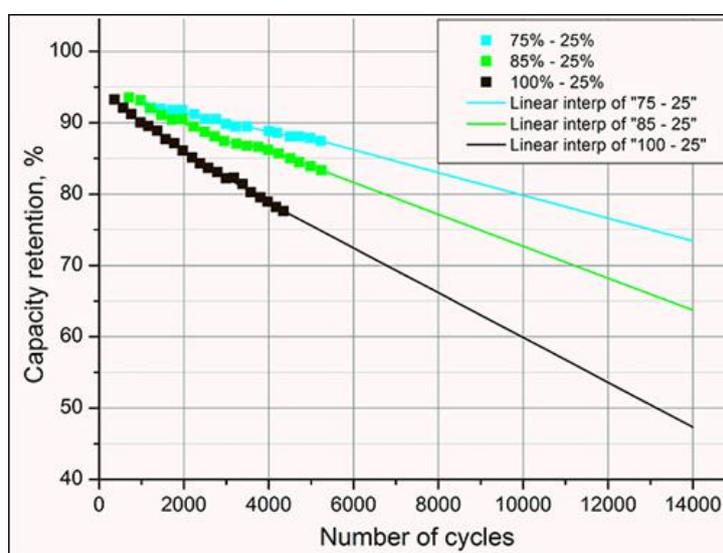
而實際電池分類，若使用於電動大客車，長路線行駛的高能量電動公車(High energy E Bus)，在電池的選擇應該以三元鋰+磷酸鐵鋰電池，而短程需求以及快速充電可應用鈦酸鋰電池搭配軟碳負極。

我國現有大客車所使用電池種類主要有磷酸鐵鋰、三元鋰電以及鈦酸鋰電池三種。

六、磷酸鐵鋰電池

磷酸鐵鋰電池(分子式： LiFePO_4 ，英文：Lithium iron phosphate)，我國電動大客車廠採用為凱勝比亞迪、唐榮等，以前最有名之製造廠商是美國的 A123 公司，磷酸鐵鋰電池現在主要的製造國是中國大陸及臺灣。由於磷酸鐵鋰電池特色為正極不含貴重金屬元素，而採用價格較低的磷與鐵，磷與鐵在地球上資源豐富不會有供料之問題。磷酸鐵鋰電池高速率放電性能佳、高輸出功率、由於橄欖球結晶 (Olivin Crystal Structure) 結構穩定。

磷酸鐵鋰電池中的 P-O 分子鍵穩固，難以分解，即便在高溫或過充時也不會像三元鋰一樣結構崩塌發熱或是形成強氧化性物質，因此擁有良好的安全性。由於而磷酸鐵鋰動力在不同充放電條件(如圖 6 所示)，循環壽命達到 2000 次以上，其過充安全性較之普通液態電解液鈷酸鋰電池，已大有改善。故有最佳的熱穩定性，可適應不同的工作環境。



資料來源：[11]

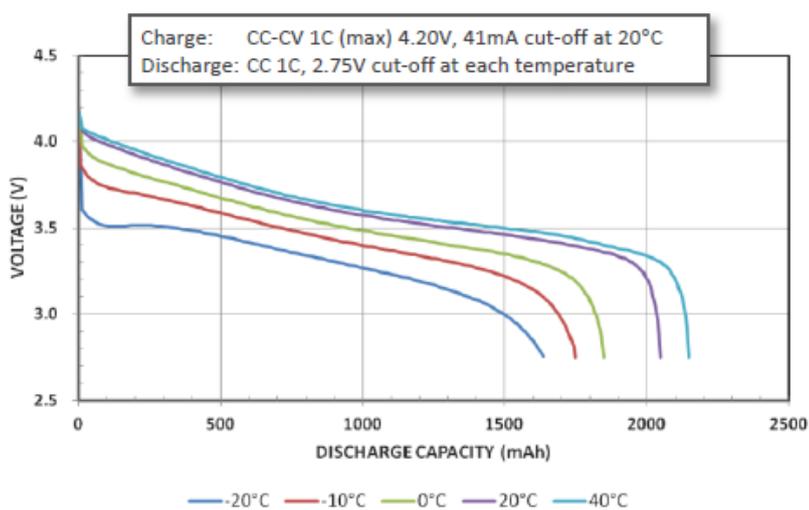
圖 6 磷酸鐵鋰電池循環壽命

磷酸鐵鋰電池的缺點係製造成本較高，電池製程良率低。因為磷酸鐵鋰的正極碳包覆儘管提高了材料的電化學性能，但是也帶來了其它問題，如能量密度的降低、合成成本的提高、電極加工性能不良等問題。儘管磷酸鐵鋰中的化學元素 Li、Fe 與 P 很豐富，成本也較低，但是製備出的磷酸鐵鋰產品設備成本偏高，使得最終單位儲能電量的成本較高。另一個缺點

係產品一致性差。從製程角度來說，磷酸鐵鋰的合成反應是一個複雜的多相反應，有固相磷酸鹽、鐵的氧化物，外加碳的前驅體以及還原性氣相，在這一複雜的反應過程中，很難保證反應的一致性。

七、三元鋰電池

鎳鈷錳電池(LiNiCoMnO₂, NMC)稱為三元鋰電池(我國電動大客車廠採用為華德、總盈等)，三元鋰電池正極材料由鎳鹽、鈷鹽、錳鹽組成，其負極材料為 Silicon Nanowire/Super-P/Polyaniline 和 Silicon Nanoparticles/Carbon Nanotubes/Polypyrrole 組成，由於鈷含量降低而具有更低成本。LiNi_{0.33}Co_{0.33}Mn_{0.33}O₂ 是 NMC 電池最常見形式，廣泛用電池市場。NMC 電池擁有高能量比和高電壓輸出等優點，目前 Panasonic 生產的 UR18650E 在電池市場上受到肯定，相對於磷酸鐵鋰電池，由於三元鋰電池單元電壓約 4.2V 大於磷酸鐵鋰電池的 3.6V，因此三元鋰具有更高的能量密度與高電壓輸出。

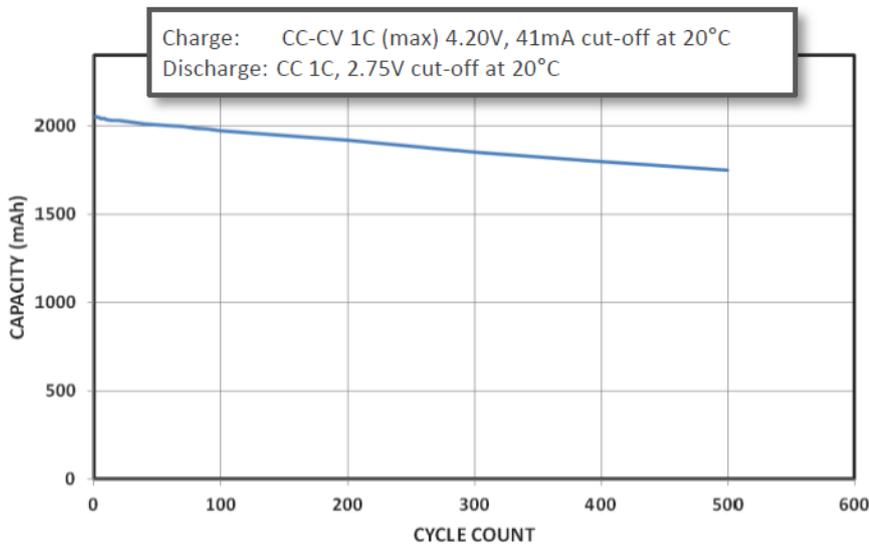


資料來源：[3]

圖 7 Panasonic UR18650E 在相同 C-rate 下不同溫度之曲線

依照 Panasonic 所提供的規格書顯示，在相同放電電流下(1C)不同溫度之比較如圖 7 所示，可看出溫度越高電池其釋放的電容量愈高。

Cycle Life Characteristics



資料來源：[3]

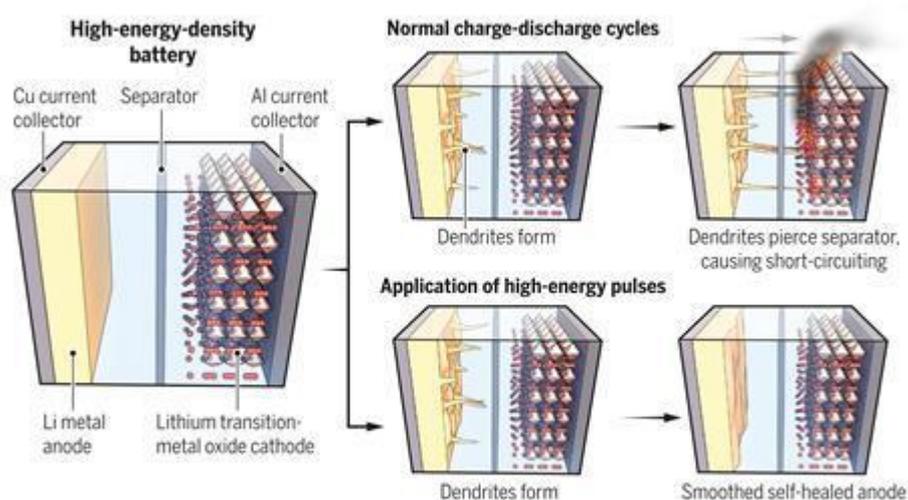
圖 8 Panasonic UR18650E 在 20°C 以及 1C 放電速度壽命週期曲線

壽命週期為健康的電池重要指標之一，亦為電動大客車為運重點項目，圖 8 為 Panasonic UR18650E 規格書顯示的容量壽命週期曲線，發現在環境溫度 20°C 以及 1C 放電速度的條件下，經過 500 個充放電週期時，電池放電容量與原先額定放電容量相比減少了 20%。此特性與磷酸鐵鋰電池 2000 次的循環壽命相比相差甚遠。

另一種三元鋰電池為鋰鎳鈷鋁電池(LiCoAlO₂, NCA)，而 NCA 中鎳鈷鋁常見的配比為 8:1.5:0.5，由於以非常少鋁的代替錳，可以加強材料穩定性與提升材料循環性能，但由於鋁為兩性 (amphoteric) 金屬(可跟酸反應，又能跟鹼反應的金屬)不容易沉澱，因此在正極材料製造上有一定存在的門檻。目前以 Panasonic 為主，NCA 電池最有名係應用於特斯拉 (Tesla) 所生產的 Model S 採用 Panasonic NCR18650A。NCR18650A 電池其正極材料為 NCA，負極為石墨，與傳統的 NMC 電池相比，NCA 具有高放電能力與壽命週期長之優點。但是在高溫度(40~70°C)下容量衰減非常嚴重，在應用時溫控系統變得非常重要。

三元鋰電池需要注意是安全性，三元鋰電池存在的主要缺點是與電解質發生反應形成表面鈍化膜的鈍化膜 (Solid electrolyte interface, SEI)，導致電解液消耗和首次庫倫效率較低，比磷酸鐵鋰電池更易析出鋰的樹狀突出物 (Dendrite)，除了降低電池電位差，造成容量下降，更會刺穿隔離層使電池短路起火(如圖 9 所示)，帶來嚴重的安全隱憂，根據中國大陸

統計 2018 年電動車輛發生事故的電池種類則以三元電池比例超過 70% 最高，磷酸鐵鋰的比例則佔 10% 左右，其工信部認為可能的原因為包含隨著中國大陸補助政策對能量密度的要求，鋰電池大多已從磷酸鐵鋰轉用三元鋰正極材料，三元鋰本身除了 Dendrite 現象之外，同時也會在高溫時會釋放氧氣，增加高溫時有自燃的疑慮，而磷酸鐵鋰材料在高溫則不會釋放氧氣，因此普遍認為磷酸鐵鋰安全性較高，但磷酸鐵鋰電池並非就是 100% 安全，根據事故數據顯示磷酸鐵鋰電池仍可能發生意外。



資料來源：[4]

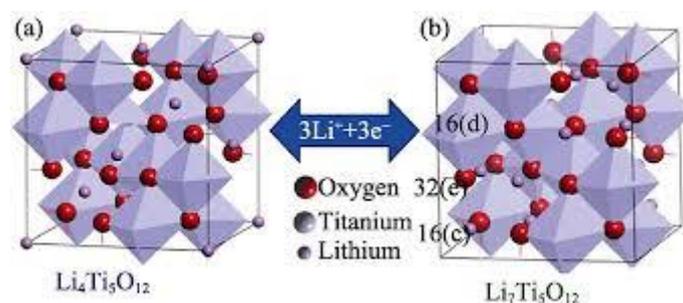
圖 9 Dendrite 現象

八 鈦酸鋰電池

前述鋰的樹狀突出物（Dendrite）是所有以碳基為負極電池系統所無法避免，為改善此現象，近來另一種鈦酸鋰為負極材料的鈦酸鋰電池被提出(我國採用電動大客車廠為成運汽車)。

鈦酸鋰(Lithium Titanate；LTO)為尖晶石結構（Spinel structure），其中單位晶胞內含有 32 個 O_2 -離子構成面心立方（Face-centered cubic，FCC）。在鈦酸鋰之晶體結構如圖 10 所示，鋰與鈦皆與各自氧離子產生鍵結，兩金屬互不產生鍵結，此對於鋰離子在進行遷入遷出時有很大幫助。當鋰離子晶擴散進入結構空隙時，會與氧產生微弱鍵結，當鋰離子嵌出結構外時，只預克服與氧之鍵結，所以鈦酸鋰具有高離子擴散係數，非常適

合運用於快速充放電。鋰離子的嵌入嵌出只限於結構空隙間，且鋰離子的體積相當小，對於整個結構體積並無影響，因此材料在進行充放電時，鈦酸鋰材料體積變化趨近於零，具有相當優異的循環性及可逆性，可完全避免產生 Dendrite。



資料來源：[12]

圖 10 鈦酸鋰晶格結構

以美國能源部研究指出，電動大客車電池最重要的問題主要集中於安全穩定性、循環壽命、溫度適應、充電速度和電池系統能量密度這五大關鍵指標。在當前的技術條件下，只有各項性能指標均衡的電池，才能適應更廣泛的運行環境，在確保電動大客車使用安全的同時，降低電動大客車使用成本。

和碳基負極三元鋰電池、磷酸鐵鋰電池相比，鈦酸鋰電池在以下這些方面有著明顯的優勢。

1、安全性。

傳統的碳電極在鋰離子進出過程，電極的表面容易析出金屬鋰，其與電解液接觸發生反應會產生可燃性氣體，帶來安全隱患。鈦酸鋰的電位比純金屬鋰的電勢高，不易產生 Dendrite，同時鈦酸鋰電池放電之電壓平穩，而且，因此提高了鋰電池的安全性能。Toshiba 對其鈦酸鋰電池進行測試後宣稱，在針刺、擠壓、高溫等嚴苛測試下，該電池安全性遠高於其他碳基負極鋰電池。

2、快充性能優異。

與碳基負極材料相比，鈦酸鋰具有較高的鋰離子擴散係數，可高倍率充放電。在大大縮短充電時間的同時，對循環壽命的影響較小，穩定性也較強。充電時間太長一直是電動大客車發展過程中難以跨越的障礙。一般採用慢充的電動大客車，充電時間約 4~8 個小時。電動大客車的快速充電是未來的趨勢，充電這個環節對客運業者經營型態影響甚廣。

3、循環壽命長。

電池循環壽命決定整個電池系統性價比，其他的傳統鋰離子電池，比如磷酸鐵鋰電池或三元鋰電池，在使用過程中因電極晶格結構變形會造成電池有效容量大幅衰減、壽命縮短的問題，不僅影響了客運業者正常排班使用，還增加了電池更換之維運成本。

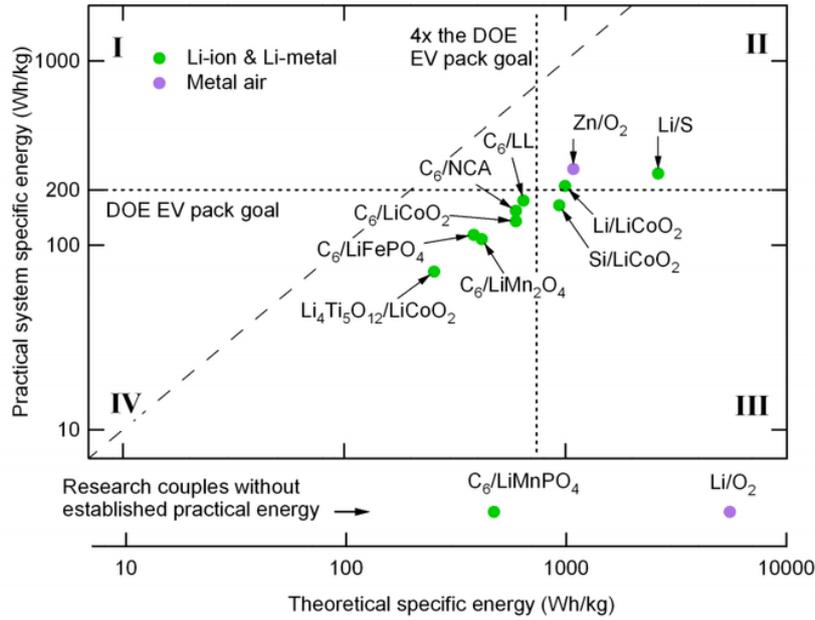
雖然鈦酸鋰有較高的離子擴散係數，但是材料本身為絕緣體，電子導電度極低，當鋰離子在電極表面反應時，因電子導電度低，極片電阻大，電子傳輸不易，使放電之電容量無法提升。鋰電池的充放電靠鋰離子來回遷移完成，不同電池體系的鋰電池每安時消耗的鋰元素是一樣的，所以電池體系能量密度越高，鋰元素的利用率越高，而鈦酸鋰電池的能量密度不到磷酸鐵鋰電池的一半，其鋰元素的利用率也不到磷酸鐵鋰電池的一半，這不僅造成了鋰資源的嚴重浪費，也導致鈦酸鋰電池物料成本居高不下。

九、結論

若以目前動力電池發展趨勢，對電動大客車的發展可能帶來之影響分析如後：

1.電池容量提升：目前鋰電池朝向輕薄、短小的方向發展，期望提升電池的能量密度與功率密度(如圖 11 所示)，這代表相同體積/重量條件之下，電動大客車可攜帶更多的電池，將可適應更多路線型態甚至加入公路客運之可能。

Li-based couples are best suited for vehicles



LL=layered-layered (0.3LiMn₂O₃·0.7LiMn_{0.5}Ni_{0.5}O₂), NCA=LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂

12

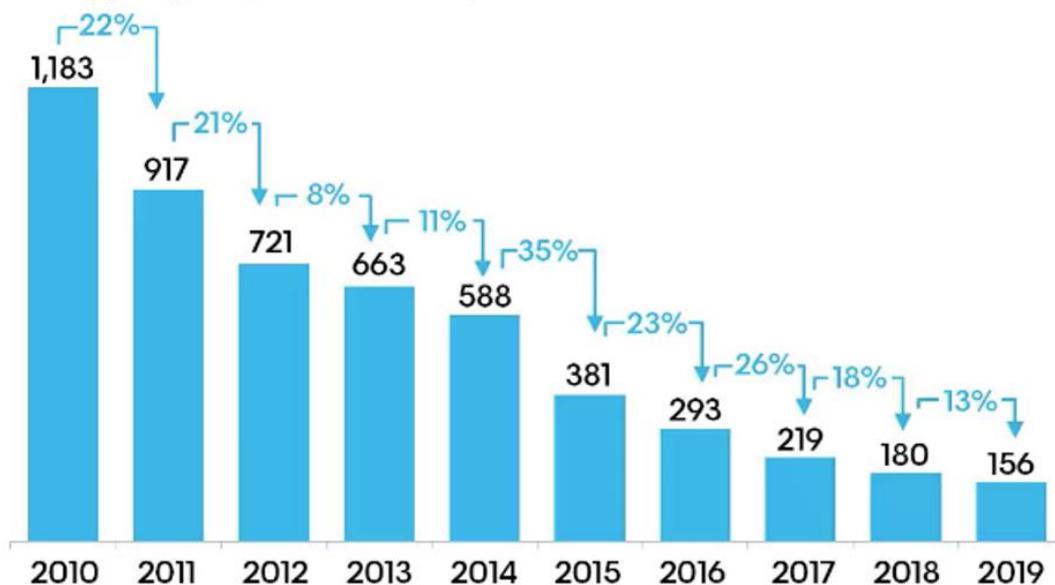
資料來源：[12]

圖 11 鋰電池能量密度發展趨勢

2. 電池售價降低：由於電池成本高低將影響電動大客車的普及程度與使用意願，故如何輔導產業有效地降低電池研發、加工、原料等生產成本是決定電池價格的關鍵。國際上電池市場因日韓與歐美大廠合作，成本快速下降(如圖 12 所示)，但我國電池價格並未受國際影響，成本約為國際市場 5 倍以上。

Lithium-ion battery price survey results: Volume-weighted average

Battery pack price (real 2019 \$/kWh)



Source: BloombergNEF

資料來源：[5]

圖 12 國際電池每 KWH 價格

3. 提升電池壽命：提升電池壽命除了目前正負極材料改善，電池的壽命長短與使用者的使用環境以及終端系統有關，以充放電系統為例，當電池效能只充電至 80%時，其壽命較充電至 100%可以增加兩倍以上(如圖 8 所示)。另外，若是增加電池容量，且在淺充淺放的情況下，電池壽命會有不錯的表現。

參考文獻

1. Leksono, Edi et al., “State of charge (SoC) estimation on LiFePO 4 battery module using Coulomb counting methods with modified Peukert,” IEEE Rural Inform. & Communication Technology and Electric-Vehicle Technology (rICT & ICeV-T), Joint int. Conf., pp. 1-4, Nov. 2017.
2. Yu-Hao Huang, Hung-Lung Chou, Fu-Ming Wang, Bing-Joe Hwang, Shih-Chieh Liao, Tzu-Nung Huang, Chia-Hung Su and Hai-Hua Liu, “Synergy Between Experiment and Simulation in Describing the Electrochemical Performance of Mg-doped

LiNixCoyMnzO2 CathodeMaterial of Lithium Ion Battery ” ,
International Journal of Electrochemical Science, Vol. 8, pp.
8005-8013

3. PANASONIC-RIC-LI-ION-UR-18650E
4. <http://physicsandsocietybc.wordpress.com/2013/04/03/the-rocking-chair-battery-lithium-ion-battery/>.
5. <https://www.forbes.com/sites/robday/2019/12/03/low-cost-batteries-are-about-to-transform-multiple-industries/#7655de861054>
6. 鋰電池在電動車輛與儲能系統應用 陳金銘 TAIPE 2018
7. Vehicle Battery Safety Roadmap Guidance Daniel H. Doughty, Ph.D. Battery Safety Consulting, Inc. Albuquerque, New Mexico Technical Monitor: Ahmad A. Pesaran, Ph.D. National Renewable Energy Laboratory
8. C. Jehoulet, P. Biensan, J. M. Bodet, M. Broussely, C. Moteau, and C. Tessier-Lescourret. “Batteries for Portable Applications and Electric Vehicles,” A. R. Landgrebe and C. F. Holmes, eds, pp. 97–18, p. 974, The Electrochemical Society Proceedings Series, Pennington
9. https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/12848-lithiumionsafetyhybrids_101217-v3-tag.pdf
10. Transit Bus Applications of Lithium Ion Batteries: Progress and Prospects
11. <http://www.a123systems.com/automotive/products/systems/48v-battery/>.
12. <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2019-01-1003/>
13. Progress and future prospects of high-voltage and high-safety electrolytes in advanced lithium batteries: from liquid to solid electrolytes† Shimou Chen