

磷酸亞鐵鋰電池近況與產業展望

Recent Status of LiFePO_4 Batteries and Their Industry Prospects

費定國

國立中央大學 (National Central University) 化材系教授

自1990年以來， LiCoO_2 鋰離子電池在低功率傳統電子消費性產品市場，逐漸取代鎳鎘與鎳氫電池，但在高功率工業儲電動力性產品市場，無法與鉛酸電池競爭，尤其在動力工具、儲能裝置及電動車輛。此劣勢直至發現磷酸亞鐵鋰(LiFePO_4)陰極材料才得以扭轉，因 LiFePO_4 鋰離子電池具有低能源成本，優良安全性能、循環壽命長及大電流充放電等優點。本文介紹磷酸亞鐵鋰陰極材料與電池系統之特性、挑戰、應用及國內外廠商發展近況與動態，另外說明國際大企業合作發展油電混合車之概況，並提供業界一些未來發展方向及注意事項。

Since 1990, the lithium-ion batteries based on C/LiCoO_2 have gradually replaced Cd/Ni and MH/Ni batteries in low power applications of the conventional consumer product market. However they could not compete with lead acid batteries in the high power industrial storage market, especially in products such as power tools, storage equipment and electric vehicles. The recent development of LiFePO_4 with its advantages of low material cost, long cycle life, high rate application, and excellent cell safety has changed the landscape. This paper introduces the LiFePO_4 cathode materials and their cell performance, including properties, challenges, applications, and current status in the global battery industry, especially that related to hybrid electric vehicles. Hopefully, this information can be used as a reference in guiding future development by battery industrialists.

關鍵字/Key words

磷酸亞鐵鋰(lithium iron phosphate)、鋰離子電池(lithium-ion batteries)、陰極材料(cathode materials)、高功率電池(high power batteries)

一、前言

全球環境汙染與地球暖化問題日益嚴重，加以能源匱乏與油價波動之憂慮，各國政府及企業紛紛尋找新的替代能源，例如太陽能電池、風力發電等，以達到減少使用化石燃料，降低二氧化碳排放，減緩全球暖化的速度。另一方面，以鋰離子電池為儲能裝置取代鉛酸與鎳氫電池，提高二次電池的轉換效率，因具有節能題材，日漸受到市場矚目。長期而言，二次電池已發生重大系統轉變，鋰離子電池將逐漸取代鉛酸與鎳氫電池，其中以能源成本低、安全性能佳、具有大電流充放電、循環壽命長的磷酸亞鐵鋰電池最具發展潛力。

二次電池市場可分為兩部分：(1)小電流放電之小型傳統電子消費性產品市場；(2)大電流放電之大型工業儲電動力性產品市場。前者已商用化的小型二次電池基本上分為鎳鎘電池、鎳金屬氫化物電池(簡稱鎳氫電池)、鋰離子電池(Lithium-ion battery簡稱LIB或鋰電池)三種。這三類電池各有其優缺點，其中鎳鎘電池最早被商用化，曾經獨霸市場數十年，因鎘汙染問題嚴重，近年來已幾乎退出可攜式電子消費性產品市場，但因其具有內阻小、循環使用壽命長、適用溫度範圍廣等優點，在電動手工具市場，仍有相當高的市場占有率。

鎳氫電池價格較鎳鎘電池貴，且有高溫特性差、自放電率高、少許記憶效應等缺點，但優點為能量密度比鎳鎘電池高，循環壽命長，放電電流大(10C~20C)等，與鎳鎘電池具互換性。可惜其能量密度遠比鋰電池低，原先行動電話與筆記型電腦等可攜式電

子產品市場，皆被鋰電池取而代之。鋰電池較鎳氫電池昂貴、且有機電解質液具毒性、易揮發、有漏液的可能性等缺點，但鋰電池具有高工作電壓，高能量密度、長循環使用壽命及無記憶效應等優勢，目前幾乎主導筆記型電腦、行動電話、數位相機等可攜式電子產品市場，小型二次電池之重要特性數據，列舉比較於表一。以2007年為例，鋰離子電池出貨量達28億顆，其中13.7億顆供給手機市場，7.3億顆供給筆記型電腦市場，相對於2002年的8.5億顆，市場成長將近2.5倍，整體鋰電池產業仍快速成長。

鋰二次電池應用於小型傳統電子消費性產品市場，一直由鈷酸鋰(LiCoO_2)為陰極材料之鋰鈷電池主導掌控；因鈷酸鋰屬層狀結構，在過充或大電流放電時有安全上的顧慮，因此無法在大型工業儲電動力性產品市場與鉛酸電池競爭，尤其在動力工具、儲能裝置及電動車輛方面。此劣勢直至發現磷酸亞鐵鋰(LiFePO_4)陰極材料才得以扭轉，展現出曙光。

二、磷酸亞鐵鋰性能介紹

磷酸亞鐵鋰(亦稱磷酸鐵鋰、磷酸鋰鐵或鋰鐵磷，但皆非正式名詞，英文簡稱為LFP)，是一種鋰離子電池的陰極材料，其組成的電

▼表一 二次電池特性表現

	能量密度		電壓	壽命	環境
	Wh/l	Wh/Kg			
NiCd	80~150	30~60	1.2V	△	△
NiMH	150~300	40~90	1.2V	○	△
LIB	280~400	90~140	3.7V	◎	○

註：◎極佳；○佳；△可

池稱為磷酸亞鐵鋰電池，或簡稱為鋰鐵電池，特色是不含鈷等貴重元素，原料價格低，且磷、鋰、鐵存在於地球的資源含量豐富，不會有供料問題。其工作電壓適中(3.3V)、電容量大(理論值為170mA h/g)、高放電功率、可快速充電及循環壽命長，在高熱環境下的穩定性高。磷酸亞鐵鋰陰極材料屬橄欖石(olivine)結構，鋰離子可完全嵌入與釋出，沒有過充或大電流放電之安全性顧慮，因此預估能大幅擴張應用至電動車輛領域，包括電動自行車、電動機車、油電混合車與電動汽車等，並將電動車推動至一新境界。最近政府為落實節能減碳政策，四年內將推動可抽換電池之電動機車10萬輛，其產值達45億元，動力鋰電池產值達12億元，未來取代60%的50c.c.汽油機車(約500萬輛)，總產值將達1,350億元，並能帶動國內動力鋰電池產值達360億元需求；如再將油電混合車或電動汽車考慮在內，則市場需求更大。根據日本研究機構預估，全球電動汽車規模2015年將達515萬台，其中約三分之二將採鋰電池作為動力來源，陰極材料需求將達11.5萬噸，商機高達2,100億元。面對全球車輛市場技術逐漸成熟及各國政府振興經濟，必須推動之內需產業，未來汽機車輛全面換用充電式鋰電池將是銳不可擋之趨勢。

不過，事實上磷酸亞鐵鋰亦非無缺點，主要因樹大招風，導致跨國大戰的專利糾紛，讓許多業者採取觀望立場，不敢冒然介入，還好當初專利申請適用國家僅有美、加、日、法、德五國，台灣與中國大陸並未包括在內，因此內需產業所發展之電動車用電池產品，如供應台灣與中國大陸，尚有可為的空間；但此相關電池專業人才甚為欠

缺，批次合成再現性難，大量生產不易，且影響電池體積重量和電力的「實際堆積密度和電容量」偏低，是陰極材料過去幾年一直不能進入實際應用階段的主因，但低導電度與低鋰離子擴散速率問題早已克服，故可適用於高功率大電流之電動車輛應用。磷酸亞鐵鋰電池之性能及優缺點，與其它二次電池之比較列於表二。

此外，磷酸亞鐵鋰電池在備用電源(energy storage)方面，可搭配太陽能產業，由於磷酸亞鐵鋰電池能在短時間內轉變儲存足夠的太陽能，且自放電小、具有耐高溫、安全與持久的特色，故可作為手機業者或路燈業者之備用電池。值得注意的是，磷酸亞鐵鋰電池現並不適於3C市場之競爭，而適用於動力與儲能市場之發展。

三、鋰源佈局

由二次電池之性能比較(表二)，可看出磷酸亞鐵鋰電池之潛力主要在電動車輛之各項應用，可知其身價將不止於1兆產值的明日之星。根據比亞迪公司估算，每生產1噸磷酸亞鐵鋰，需要約0.3噸碳酸鋰，各國在電動車輛發展之鋰源佈局，早已積極地展開，日本財力雄厚的大商社Mitsubishi與Sumitomo正竭盡所能地向波利維亞，世界鋰儲藏量最多之國家(約540萬噸)爭取開採權，以保障未來電動車輛巨大鋰需求量之來源。其它主要鋰儲藏地區尚有智利(約300萬噸)、中國青藏高原(約110萬噸)與阿根廷等地。中國西藏礦業公司擁有中國鋰儲藏量占第一位，占世界第三位的紮布耶鹽湖20年開採權，該鹽湖為世界上唯一以天然形式存在的碳酸鋰鹽湖，除湖

▼表二 鋰離子電池陰極材料性質比較

陰極材料	LiFePO ₄	LiCoO ₂	LiNiO ₂	LiMn ₂ O ₄	LiNi _{0.8} Co _{0.2} O ₂
結構	橄欖石	層狀	層狀	尖晶石	層狀
合成困難度	較難	容易	較難	容易	容易
平均工作電壓(V)	3.4	3.6	3.5	3.8	2.8
重量能量密度(mAh g ⁻¹)	140~170	130~150	170~200	100~120	150~190
密度(g cm ⁻³)	3.6	5.1	4.8	4.3	4.9
振實密度(g cm ⁻³)	1.0	2.0~2.4	2.2~2.3	2.0	2.4~2.8
導電度(S cm ⁻²)	~10 ⁻¹⁰	~10 ⁻³	~10 ⁻²	~10 ⁻⁵	4×10 ⁻⁴ ~0.25
鋰離子擴散速率(cm ² s ⁻¹)	~10 ⁻¹⁴	10 ⁻⁶	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁹ ~10 ⁻⁸
放電功率(W kg ⁻¹)	2000	320	--	400	--
熱穩定性	佳	佳	差	差	尚可
電池安全性	優	差	佳	尚可	尚可
電池成本	高，量產後可降低	高	較 LiNi _{0.8} Co _{0.2} O ₂ 低	低	較 LiCoO ₂ 低
材料成本(USD kg ⁻¹)	15~18	26~50	20~26	15~18	22~40
蘊藏量	豐富	稀少	豐富	豐富	尚可
材料成熟度	少量生產	大量生產	研究開發	少量生產	少量生產
電池性能	電容量高、安全性佳、循環壽命佳	電容量高、安全性可、循環壽命佳	電容量高、安全性差、循環壽命可	電容量低、安全性佳、高溫循環壽命差	電容量高、循環壽命可、安全性可
主要應用	動力電池與大型電池	小型電池	小型電池	動力電池與大型電池	小型電池

岸及湖底自然沉積的碳酸鋰外，湖水中尚有碳酸鋰含量估計高達200萬噸，這些豐富天然鋰資源將使中國發展電動車輛取得先天有利的地位。

四、各國電動車鋰電池發展概況

全球對於電動車輛發展與市場推動，正如火如荼地進行，目前計畫或已跨入生產電動車鋰離子電池之汽車商包括日本前四大汽車公司：Toyota、Honda、Nissan、Mitsubishi；美國前三大汽車公司：General Motors (GM)、Ford、Chrysler，以及歐洲的BMW與VW等。日本四大汽車公司皆與日本國內之鋰電池公司結盟，形成供應鏈，以確保優良電池芯技術不流於外。其中Toyota之Prius在全球油電混合車之銷售量，已突破百

萬輛，穩居世界第一，但皆使用技術純熟的鎳氫電池，有重量過重、記憶效應與使用壽命過低等問題，現已把發展焦點轉向鋰離子電池，將逐年取代鎳氫電池。GM將投入4,300萬美元於密西根州建造鋰電池工廠，供應旗下之Chevrolet Volt電動車，每加侖汽油可跑230英里，其電池芯技術由韓國LG Chem.供應，預估年產7萬輛。2009年8月初，美國歐巴馬政府宣布將補助12億美元給合格之電動汽車電池製造商，具體目標為至2015年底，全國能有100萬輛電動車上路，美國磷酸亞鐵鋰電池領導業者A-123系統公司將脫穎而出，成為獲得補助之首選。此外，尚有股神巴菲特破例投資科技事業的中國比亞迪(BYD)電池公司，該公司業已開始生產磷酸亞鐵鋰電池應用於F6雙模電動汽車，已在2008年正式上市，省油充電快，續駛里程可達430公

里，巴菲特在此項生產磷酸亞鐵鋰電池之投資，於金融海嘯後，已獲利數十億美元，其它跨國合作發展油電混合車之狀況，簡要整理於表三。

五、台灣電動車鋰電池發展概況

電動車較傳統車構造簡單，所需主要組件為電動馬達、IC電控與動力電池，台灣在這三方面皆具有相當優勢，如能趁全球電動車發展仍屬萌芽階段之際掌握商機，將可大有作為。目前國內生產磷酸亞鐵鋰電池能力的製造商主要有必翔實業、金山電能、能元科技、蘭陽能源、動能科技、達振能源與威力能源等幾家公司。台塑集團也透過投資入股長園科技，取得生產磷酸亞鐵鋰粉體的關鍵技術，成立台塑長園公司，預估年產4,800公噸，並開發新世代電動車與油電混合

車，資本額約3.5億元，台塑生醫持股佔51%、長園佔49%，有關電池技術正積極尋求與日商合作，包括Sanyo、Sony及Sharp等三家大廠。裕隆集團已開始生產自創品牌之「納智捷」(Luxgen)純電動車，2010年將全力衝刺大陸市場。此外，尚有新普、順達、達振、能元、有量、威力、富田、鴻海、台達電等業者，著手計畫進入電動車各項零組件市場之供應鏈。其中，新普除了參與裕隆旗下華創車電之科專計畫外，近來積極與韓國電池芯廠合作，以進軍中國電動汽車市場。

電動車輛成敗關鍵在於電池，而電動車電池三大要求為低成本、高安全性及優良的性能，關鍵就取決於陰極材料，台灣產業未來在電動車輛領域若想要佔有一席之地，必須及早準備，掌握鋰電池上游關鍵性陰極材料—磷酸亞鐵鋰。此項材料已有量產規模的台灣廠商有：長園科技實業、立凱電能科技

▼表三 各大企業合作發展油電混合車概況

德國博世(Robert Bosch)	德國博世與南韓三星SDI宣佈成立從事汽車鋰離子電池的開發、生產、銷售合資公司“SB LiMotive”。
南韓三星 SDI	
三洋電機	三洋電機宣佈該公司正與德國福斯集團合作開發鋰離子電池，並將從 2009 年開始向奧迪(Audi)供貨。兩公司合作車用鋰電池，目標於 2015 年市占率達 40%。Volkswagen AG (VOW-DE，福斯汽車)和 Sanyo Electric Co(6764-JP，三洋電機)宣佈，將合作生產混合動力車所需鋰電池，使該市場全球競爭更趨白熱化。
德國福斯(Volkswagen)集團	
NEC 集團 (NEC 和 NEC 東金)	NEC 集團與日產汽車計劃通過合資公司 Automotive Energy Supply，在 2009 年之前使鋰離子電池的年產量滿足 1.3 萬輛混合動力車和電動汽車的需求(160 萬個電池單元)，2011 年將產量擴大至能滿足 6.5 萬輛汽車需求程度
日產汽車	
GS 湯淺	GS 湯淺也計劃與三菱汽車、三菱商事合資成立的 Lithium Energy Japan，在 2009 年生產相當於 20 萬個電池單元的電動汽車用鋰離子電池
三菱汽車三菱商事	
A123 Systems	美國電池製造風險公司 A123 Systems 和 EnerDel 也將分別為挪威 Think Nordic 預定於 2009 年上市的小型電動汽車“Th!nk”供應鋰離子電池 (A123 Systems 也正與 GM 進行合作開發)
EnerDel	

與尚志精密化學等。此外，尚有還未量產之鐵研、鋰科、康普、興能、宏瀨以及剛於2009年2月創立之倍特利能源科技公司(Bettery Energytech)。倍特利成員是由中央大學化材系之鋰電池研究團隊組成，此團隊前身早在民國74年由費定國教授於中央大學成立，是國內最早且為一長期持續進行鋰電池科技工作的研究團隊，二十餘年來持續地在綠色能源領域研究中成長與茁壯，並孕育出國內不少鋰離子電池傑出人才，例如現任威力能源公司李桐進董事長、有量科技公司程敬義執行長、能元科技公司鄭宗田副總經理，以及前任湯淺科技公司彭渭濱總經理等，皆出身於該校。倍特利能源現由中大育成中心輔導協助，致力於 LiFePO_4 陰極材料粉體之量產製程開發與應用，成為中央大學高科技應用特色之一。

六、磷酸亞鐵鋰電池系統專利狀況

國外主要磷酸亞鐵鋰研發及生產廠商有A-123、Valence以及獲美國德州大學(UT)與加拿大Hydro Quebec(HQ)授權的Phostech Lithium公司。由於磷酸亞鐵鋰有巨大的商業利益，擁有磷酸亞鐵鋰電池系統專利的UT與HQ，先後控告日本的NTT DoCoMo，以及美國的Valence與A-123侵犯其專利，官司纏訟將近十年，轟動國際，最近已有數項判決，日本NTT賠償3,000萬元美金，但可獲得日本地區之製造及銷售權；Valence獲勝可應用其產品於電動車輛；A-123亦獲得其原始專利地位。

七、結論

目前各國面臨經濟危機、百業蕭條，苦思振興經濟對策，能源產業皆為各國首選之發展重點，它不僅是內需產業，可帶動國內經濟發展，亦可節能減碳，畢環保與能源於一役。現今中國是世界最大汽車生產及消費市場，其中新能源動力車確定成為中國未來三大產業之一，北京政府投入數百億人民幣，分別在上海、北京、天津、重慶、深圳、武漢及濟南等地，建立新能源動力車研發基地與園區，從事研發、檢測、製造新能源汽車與核心零組件磷酸亞鐵鋰電池，並優先在城市公交、出租、公務、環衛、郵政、機場等領域，推廣新能源汽車。這種橄欖石結構的磷酸亞鐵鋰陰極材料，台灣近年已有多家上游專業材料廠商展開試產，但絕大部分業者現僅停留在小規模試產階段，至今仍未大量生產。再加上政府尚未能針對此產業規劃出輔導或獎勵計畫，任何看好磷酸亞鐵鋰產業發展之機構，皆需步步為營，且戰且走，故想在台灣發展電動車，仍有許多待克服門檻。面對中國大陸巨大的電動車發展機會與需求，台灣應結合兩岸優勢，切入全球電動車與磷酸亞鐵鋰關鍵零組件之供應鏈體系。尤其此材料量產技術遠較鈷酸鋰困難且門檻較高，現階段發展重點應以內需為主，避免專利爭議，待材料供應與專利爭議因素逐漸明朗化後，各項磷酸亞鐵鋰電池的應用實績，將會日益增加及普遍，以目前全球經濟狀況預估，磷酸亞鐵鋰的大量應用時機可能還需等1~2年，相關產業應及早準備，以免未來錯失巨大商機！