

溫度對車輛推進用鋰電池在串/並聯之充/放電試驗性能之研究 A study the effect of temperature on the performance of charge/discharge of parallel/serial lithium-ion battery module

錢玉樹、林恒湧、張漢昌

Yu-Shu Chien, Heng-Yung Lin, Jhang -Han Chang

¹ 國立勤益科技大學化工與材料工程學系

¹Department of Chemical and Materials Energy Engineering,
National Chin-Yi University of Technology

E-mail : yschien@ncut.edu.tw, Jack-Yung@hotmail.com; hcc@ncut.edu.tw

摘要

本文研究探討在不同溫度下對於市面上售電動車鋰鐵電池模組在串/並聯之充/放電影響，試驗結果分別記錄電池電壓、充電容量、放電能量、放電時間、電池溫度，並作比較分析。結果發現：(1) 電池模組溫度由 40°C 降到 -20°C 之不同實驗環境下，A 電池模組充放電試驗放電能量由 877.22Wh 一直降到 591.36Wh，B 電池模組放電能量由 863.18Wh 一直降到 653.17Wh，A/B 電池模組串聯在定電流下放電能量由 2348.15Wh 一直降到 1713.76Wh，A/B 電池模組並聯在定電壓下放電能量 2378.30Wh 一直降到 1883.96Wh，放電能量越來越低，說明放電能量對溫度有影響。(2) 不論是電池單一顆模組充放電、兩顆電池模組串聯或並聯都是溫度高時充放電電壓最高，低溫時充放電電壓最低。(3) 由電池充放試驗後參數分析比較，電池在高溫下充放電試驗時，磷酸鋰鐵電池之充放電電量較室溫 (20°C) 為高，表示電池之充放電效率在高溫環境優於常溫環境。原因是磷酸鋰鐵電池在高溫條件下之充放電時間間距增加且內部阻抗較低，表示溫度越高對於電池內部化學反應更完全，使得電池具有更好的效率。另一方面，磷酸鋰鐵電池在低溫條件下之充放電效率明顯比室溫 (20°C) 時差，顯示溫度越低對於磷酸鋰鐵電池的不良影響越大。就作者所知，在用於電動車上大功率電池於不同溫度下充放電試驗到目前很少人探討，因此本論文之試驗結果可提供工業界在車用電池設計參考。

關鍵字詞：電動車、充放電試驗、放電容量、電池模組

Abstract

This article studies the performance evaluation of lithium-ion battery module under different temperature, test experiments included records of voltage, charge/discharge capacity, charge/discharge energy and battery temperature during entire testing. Our results show that (1) the discharge energy of battery module A decrease from 877.2Wh to 591.36Wh while test temperature be adjusted from 40°C to -20°C. Under the same testing procedures like battery module A, another battery module B, which discharge energy also decrease from 863.18Wh to 653.17Wh. Moreover, we connect battery module A and B in serial, then the discharge energy decrease from 2348.15Wh to 1713.76Wh. And connecting the two battery module A and B in parallel will lead to the discharge energy decreased from 2378.30Wh to 1883.96Wh. It is the fact that temperature effects on discharge energy of battery module. (2) Either single battery module or two battery modules in serial/parallel, the test temperature is higher, the discharge voltage will be higher. And the highest discharge voltage is corresponding to the high test temperature. (3) It is shown that the charge/discharge test on battery: the capacity of LiFePO₄ battery under high temperature is higher than it under the room temperature (20°C) and the performance of charge/discharge of battery under high temperature is better than the one under room temperature, is caused by the charge/discharge time increase and internal resistance decrease occur, and internal chemical reaction is completed while LiFePO₄ battery under a high temperature condition. In other word, the performance of LiFePO₄ battery under low temperature was worse than it under room temperature. And we find the bad performance of LiFePO₄ battery while low temperature. To the author knowledge, the researcher studied that the effect of temperature on the charge/discharge test is few, so our results can undoubtedly provide EV manufacturers and propulsion battery supplier as a reference for design of automotive battery.

Keywords: EV Car, Discharge Charge Test, Discharge-Capacity, Battery pack

1. 前言

全球面臨高油價、能源短缺與溫室氣體排放等課題日益嚴重，國際節能議題、環保意識抬頭，世界各國積極尋求解決之道，強調高能源效率、零污染排放的電動車，隨著相關技術的進展，已成為全世界運輸部門節能減碳之重要工具。交通工具的能量消耗量占世界總能源消耗的40%，汽車的能源消耗量約占期中的1/4。目前中國汽車年增長速度達到了25%以上。據預測，到2010年和2020年，中國汽車的燃油需求分別為全國石油總需求的43%和57%，汽車將要吃掉一半左右的自產、進口石油。長期以來，人們從多方面做了不懈努力試圖減緩由能源與環境問題帶來的壓力[1]。

電動車輛在未來汽車工業中將扮演十分重要的角色，在電動車中，電池又會是極重要的關鍵零組件。傳統鉛酸電池，不但污染嚴重，且效率低落，此磷酸鋰鐵電池擁有高安全性、平穩的電壓輸出、快速充電能力、可瞬間大電流放電、使用壽命長、高能量密度、符合綠色能源要求對環境不污染的特色，可以成為電動車動力來源的首選。

電動車驅動電力之來源是儲能系統-電池組(Battery pack)，此電池組設計要點有三項：(1)高能量(Energy)，以提供續航力；(2)高動力(Power)，以提供加速性與爬坡力；及(3)高充放電次數，以提供耐久性，則有賴電池組具有優良充放電(Charging and discharging)特性，必須利用測試設備依循測試(Test)程序加以驗證[2]。

在電動車應用上，使用者必須精準得知電池殘量電量，才能避免在行駛中電池電力耗盡而無法再行駛，電池殘電量(SOC, State of Charge)一直都是很重要議題，一般影響電動車電池壽命有兩個最主要因素分別為不同溫度下電池充/放電殘電量、電池充/放電循環次數。在影響電池效能與壽命的因子莫過於溫度與放電電流量，在蔡宗榮[6]針對磷酸鋰鐵電池在相同的溫度，不同電流作放電量測量和探討之間的關係，由蔡宗榮[6]論文顯示磷酸鋰鐵電池在固定溫度25°C下，當放電電流越小，放出的電量越多；相反地，放電電流越大，所放出的電量越小。一般電池在實際使用時，電流會隨著負載的變動而有所改變，隨著放電電流變大，放出電量也跟著減少。降低鋰離子電池的效率，且磷酸鋰鐵電池內部結構也會加速破壞，加劇磷酸鋰鐵電池的老化效應。然而電池在進行充放電時本身溫度就會上升，如在加上外面環境溫度，就會使原本電池溫度更高，如何

降低電池溫度是面前很多廠商面臨問題。

本論文研究動機是由於電動車上動力電池模組(Pack)等級上都是先串聯後並聯或是先並聯後串聯組成電池模組，然而各個電池模組都是由相同規格電池芯組合而成，了解各電池芯組成為電池模組之性能將有助於掌握電池組之特性，且溫度因素對車輛電子裝置是最常見的環境影響因子。本文考慮實際動力電池會在不同環境下使用，如雪地至沙漠，電池在不同使用環境下溫度差距很大，因此有必要了解溫度對車輛用動力電池充放電之影響。本研究選用目前市面上使用於電動車電池組於不同溫度下，參照目前國際規範ISO 12405-1(電動推進道路車輛的鋰離子電池組和系統) [4]，進行電池充放電實驗，以探討電池之充放電特性對於後續想投入動力電池領域廠商有參考價值。

2. 研究方法

本研究中挑選市面上市售鋰鐵電池，其電池模組規格參照表一。分別在不同溫度下，依據ISO 12405-1標準充放電條件[4]，以0.5C進行A電池模組、B電池模組充/放電試驗、A/B電池模組串聯充/放電試驗、A/B電池模組並聯充/放電，分別記錄充/放電電流、充/放電電壓、充/放電時間、充/放電容量等參數，並作比較分析。

表 1 電池模組規格

No. of Cells	36	
Weight KGS	17.7	
Dimension L*W*H(mm)	389*157*230	
Voltage(V)	108	
Capacity(AH)	10	
Discharge(Amp)	Max.	100
Discharge(Amp)	Peak	120
Max. Charging(A)	30	

2.1 測試設備

電池充放電測試主要有可程式恆溫恆濕試驗機、溫度截取資料紀錄器、放電測試機及棱柱形電池模組，如圖1至4所示，其主要規格如表2所示。



圖 1 充放電試驗機



圖 2 溫度控制箱

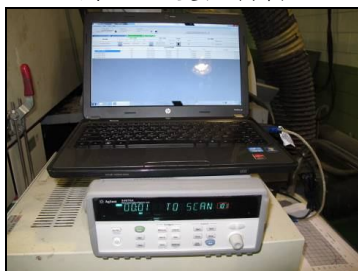


圖 3 溫度截取資料紀錄器



圖 4 電池模組

表 2 電池測試主要設備規格

設備	廠牌、型號	規格
充放電試驗機	Arbin BT-2000	1. 充電電壓： DC 12V~500V 2. 放電電壓： DC 500V~15V 3. 充/放電電流：DC 5A~500A
溫度截取資料紀錄器	Aglient 34970A	8 種切換與控制嵌入式模組可供挑選內建信號條件量測電壓與電流在電源關閉時依然可以保存資料
可程式恆溫恆濕試驗機	MHK-408AK	1. 測試空間： 112 cm(W)×175 cm(H)×150 cm(D) 2. 溫度範圍： -40°C~150°C 3. 濕度範圍： 20 %RH ~98%RH

2.2 測試方法

試驗總共分為 A 電池模組、B 電池模組充/放電試驗、A/B 電池模組串聯充/放電試驗、A/B

電池模組並聯充/放電試驗四種組合進行實驗，實驗溫度分別由 40°C ~ -20°C 進行充/放電試驗。

(1). A 電池模組、B 電池模組充/放電試驗試驗流程

分別以 0.5C(電流= 5A)對電池進行充放電測試。截止電壓條件：(a)電池放電電壓 $V \geq 100V$ 。(b)電池充電電壓 $V \leq 130V$ 。測試步驟如圖 5 所示。

(2). A/B 電池模組串聯充/放電試驗流程

串聯時電壓變大，電流不變分別以 0.5C(電流= 5A)對電池進行充放電測試。截止電壓條件：(a)電池放電電壓 $V \geq 200V$ 。(b)電池充電電壓 $V \leq 250V$ 。

(3). A/B 電池模組並聯充/放電試驗流程

並聯時電壓不變，電流變大分別以 0.5C(電流= 10A)對電池進行充放電測試。截止電壓條件：(a)電池放電電壓 $V \geq 100V$ 。(b)電池充電電壓 $V \leq 130V$ 。

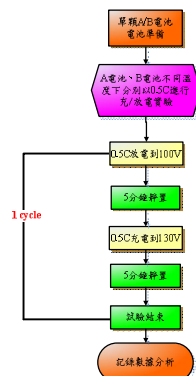


圖 5 實驗流程圖

3. 試驗結果與討論

經過不同溫度下，對電池進行充/放電測試，在不同溫度下以 0.5C 充放電探討電池本身狀況如表 3、4、5、6 所示。

3.1 不同環境下充放電特性

從表 3、表 4、表 5 和表 6 可以看出電池在不同溫度下充/放電一些數據特性。由表 3 中 40°C、~-20°C 七個溫度比較中可以看出在 30°C 時放電能量(Wh)為最高 877.22Wh，分別 30°C 與 10°C 比較降幅相差 10.09% [=100%×(1-788.67/877.22)]，而 30°C 與 -20°C 比較降幅相差 32.58% [=100%×(1-591.36/877.22)]，可評估出 30°C 時電池放電能量最高。

表 4 中同樣 40°C、~-20°C 七個溫度比較中可以看出在 40°C 時放電能量為最高 863.18Wh 與 30°C、20°C、10°C、0°C、-10°C、-20°C 每個溫度相比較降幅相差分別為：1.02%、1.21%、4.76%、19.89%、16.60%、32.02%。說明溫度越高時放電能量越高，而溫度在越低溫下放電能量數

值越低，不僅如此其差距越大。綜合上面敘述溫度越接近室溫下時放電能量比較接近原本電池能量，說明溫度對電池放電能量是有影響。

由表 5 中電池串聯時可以看出在 30°C 時放電能量(Wh)為最高 2348.15Wh，30°C 與 10°C 比較降幅相差 4.38% [=100%×

(1-2245.14/2348.15)]，而 30°C 與 -20°C 比較降幅相差 27.01% [=100%× (1-1713.76/2348.15)]，反而是在 30°C 時放電能量最高，同樣是在 -20°C 時放電能量最低。

由表 6 中電池並聯時可以看出在 30°C 時放電能量(Wh)為最高 2378.30Wh，30°C 與 10°C 比較降幅相差 4.42% [=100%×

(1-2272.97/2378.30)]，而 30°C 與 -20°C 比較降幅相差 20.78% [=100%× (1-1883.96/2378.30)]，反而是在 30°C 時放電能量最高，同樣是在 -20°C 時放電能量最低。

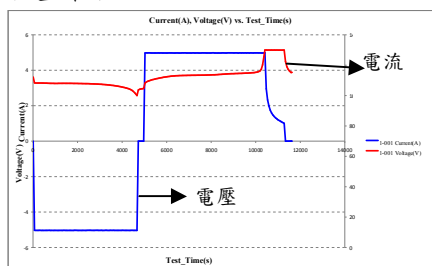


圖 6 0.5C 標準充/放電圖

表 3 A 電池模組 0.5C 試驗之充/放電特性

溫度 (°C)	測試時間 (s)	電壓 (V)	充電容量 (Ah)	放電容量 (Ah)	充電能量 (Wh)	放電能量 (Wh)	充電時間 (s)	放電時間 (s)
40	11579.1	115.27	7.91	6.52	905.83	698.85	6310.80	4663.32
30	12348.0	115.19	8.11	8.06	921.97	877.22	5975.64	5767.35
20	11917.9	114.61	7.77	7.75	885.83	840.50	5769.46	5543.50
10	11344.7	114.24	7.34	7.30	842.28	788.67	5511.10	5228.60
0	10898.5	114.17	7.00	7.00	807.91	753.20	5282.80	5010.77
-10	9956.9	114.10	6.33	6.37	736.79	681.36	4787.33	4564.57
-20	8826.6	114.25	5.56	5.57	654.39	591.36	4234.38	3987.24

表 4 B 電池模組 0.5C 試驗之充/放電特性

溫度 (°C)	測試時間 (s)	電壓 (V)	充電容量 (Ah)	放電容量 (Ah)	充電能量 (Wh)	放電能量 (Wh)	充電時間 (s)	放電時間 (s)
40	11938.5	117.60	7.79	7.72	909.10	863.18	5811.25	5522.23
30	11815.1	117.67	7.74	7.66	905.18	854.30	5729.44	5480.67

20	11751.5	117.40	7.64	7.63	895.14	852.67	5688.23	5458.31
10	11439.3	117.18	7.38	7.39	869.46	822.01	5547.27	5287.05
0	10124.2	117.01	6.42	6.41	765.69	694.61	4929.03	4590.15
-10	10283.6	117.14	6.53	6.55	780.51	719.87	4989.79	4688.86
-20	8645.2	117.21	5.39	5.43	653.17	586.77	4154.89	3885.29

表 5 A 電池模組與 B 電池模組 0.5C 串聯試驗之充/放電特性

溫度 (°C)	測試時間 (s)	電壓 (V)	充電容量 (Ah)	放電容量 (Ah)	充電能量 (Wh)	放電能量 (Wh)	充電時間 (s)	放電時間 (s)
40	16502.9	240.18	11.06	9.89	2663.29	2262.59	8168.07	7129.88
30	17053.3	240.13	11.35	10.18	2733.77	2348.15	8498.27	7350.02
20	17048.0	240.27	11.14	10.11	2692.35	2325.30	8549.13	7293.87
10	16697.4	240.11	10.74	9.80	2607.03	2245.14	8419.76	7072.64
0	15882.2	240.13	10.04	9.14	2449.81	2078.45	8082.32	6594.86
-10	14577.8	240.16	8.98	8.26	2206.34	1867.56	7410.93	5961.87
-20	13730.0	240.16	8.35	7.63	2058.22	1713.76	7019.36	5505.60

表 6 A 電池模組與 B 電池模組 0.5C 並聯試驗之充/放電特性

溫度 (°C)	測試時間 (s)	電壓 (V)	充電容量 (Ah)	放電容量 (Ah)	充電能量 (Wh)	放電能量 (Wh)	充電時間 (s)	放電時間 (s)
40	16367.0	121.09	20.41	18.88	2471.48	2131.95	8362.45	6799.51
30	16880.8	121.14	21.40	20.74	2584.66	2378.30	8202.29	7473.56
20	17078.6	120.65	21.30	20.69	2585.69	2356.72	8419.45	7454.22
10	17023.1	120.55	20.74	20.13	2532.36	2272.97	8564.35	7253.76
0	16891.1	120.51	20.35	19.84	2492.33	2257.76	8534.65	7151.51
-10	16159.7	120.49	19.11	18.61	2357.43	2100.25	8248.15	6706.54
-20	14857.8	120.56	17.22	16.83	2142.52	1883.96	7586.11	6066.68

3.2 充/放電電壓-充/放電時間

由表 3~表 6 之實驗數據繪出圖 7~10 之測試曲線依據不同溫度下，整理出「放電電壓對放電時間」可以看出下列幾個現象：

(1)A 電池模組試驗由圖 7 可以看出 40°C 時充/放電電壓最高 115.27(V)，且在 -10°C 時電池壓最低 114.10(V)而與 -20°C 時 114.25(V)，兩個低溫下電壓只相差 0.15(V)，說明電池在低溫時電池電解液凝固，造成電子無法通過隔離膜使得充放電時間變短、電壓變低，可得知電池在低溫狀態下時充/放電電壓無法充飽，反觀電池在高溫時電池充/放電比較接近電池原本標稱電壓 120(V)，說明電

池在高溫下時充/放電時電池狀況比較好。

(2) B 電池模組試驗後在中同樣可以發現電池充/放電壓在 30°C 下電池電壓最高 117.67(V)，而在 -20°C 下電壓最低 117.21(V)，且最高與最低相差 0.39(V)，且 40°C 與 30°C 只有相差 0.07(V)；與 A 電池模組結果說明一樣，溫度高時電池充放電效能好，而電池在低溫狀況下充放電效能是最低，說明不管電池溫度高及溫度低時對電池本身性能壽命會有影響。

(3) 由圖 9 之 A/B 電池模組串聯試驗中，同樣可以發現電池充/放電壓雖然電流不變電壓變大，可以看出 40°C 時充/放電電壓最高 240.18 (V)，且在 -20°C 和 -10°C 時電壓最低 240.16(V)，最高電壓與最低電壓相差 0.02(V)，說明電池在高溫下時充/放電時電池狀況比較好，低溫狀態下電池充/放電效能最差。

(4) 由圖 10 之 A/B 電池模組並聯試驗中，同樣可以發現電池充/放電壓雖然電流變大電壓不變，同樣可得知溫度高時電池模組充/放電電壓最大，低溫時充/放電電壓最差。

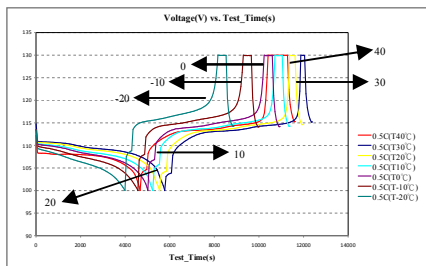


圖 7 試驗後 A 電池模組之放電壓-放電時間分佈曲線

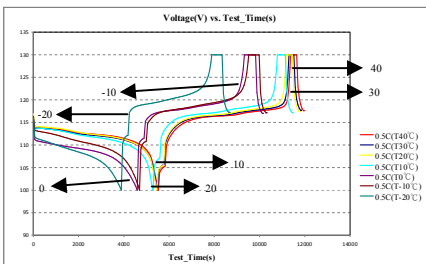


圖 8 試驗後 B 電池模組之放電壓-放電時間分佈曲線

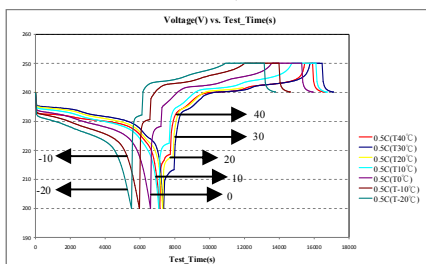


圖 9 試驗後 A/B 電池模組串聯之放電壓-放電時間分佈曲線

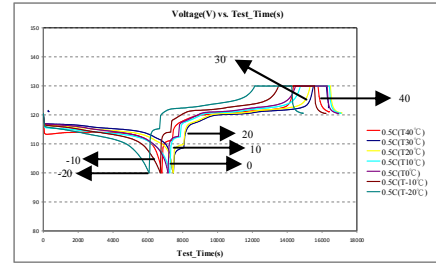


圖 10 試驗後 A/B 電池模組並聯之放電壓-放電時間分佈曲線

3.3 放電容量-放電時間曲線

由表 3~表 6 之實驗數據分別繪出圖 11~圖 14 之在不同溫度下測試曲線圖，分別整理「放電電壓對放電容量」分佈，其中放電容量 Ah 為每一測試時間之「放電電流」及「放電時間，以小時 (h) 計算」之乘積。可以看出一些現象：

(1) 從圖 11，A 電池模組放電容量可以看出在 30°C 時放電容量(Ah)為最高 8.11Ah 與 40°C、20°C、10°C、0°C、-10°C、-20°C 分別相差 1.54Ah、0.41Ah、0.76Ah、1.06Ah、1.69Ah、2.49Ah，可評估出 30°C 時電池放電容量最高。

(2) 從圖 12 B，電池放電容量可以看出在 40°C 時放電容量(Ah)為最高 7.72Ah 與 30°C、20°C、10°C、0°C、-10°C、-20°C 分別相差 0.06Ah、0.09Ah、0.33Ah、1.31Ah、1.17Ah、2.29Ah，可評估出 40°C 時電池放電容量最高。

(3) 從圖 13，A/B 電池模組串聯電池放電容量可以看出在 30°C 時放電容量(Ah)為最高 10.18Ah 與 40°C、20°C、10°C、0°C、-10°C、-20°C 分別相差 0.29Ah、0.07Ah、0.38Ah、1.04Ah、1.92Ah、2.55Ah，可評估出 30°C 時電池放電容量最高。

(4) 從圖 14，A/B 電池模組並聯電池放電容量可以看出在 30°C 時放電容量(Ah)為最高 20.74Ah 與 40°C、20°C、10°C、0°C、-10°C、-20°C 分別相差 1.86Ah、0.05Ah、0.61Ah、0.9Ah、2.13Ah、3.91Ah，可評估出 30°C 時電池放電容量最高。代表溫度越接近高溫下放電電容量越高，而溫度在越低溫下放電容量數值越低，說明溫度對電池放電容量是有影響。

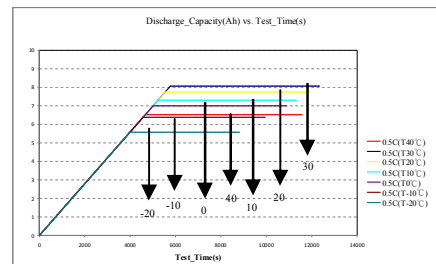


圖 11 試驗後 A 電池模組之放電容量-放電時間分佈曲線

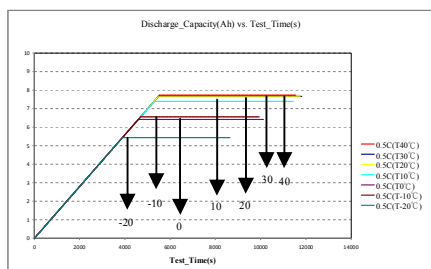


圖 12 試驗後 B 電池模組之放容量-放電時間分佈曲線

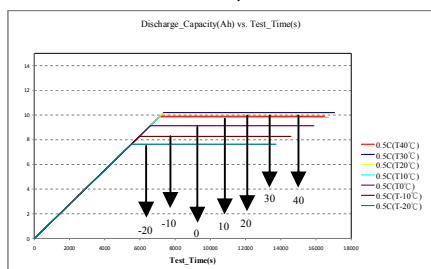


圖 13 試驗後 A/B 電池模組串聯之放容量-放電時間分佈曲線

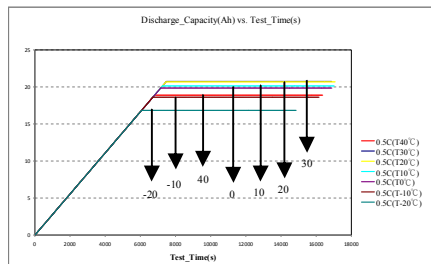


圖 14 試驗後 A/B 電池模組並聯之放容量-放電時間分佈曲線

4. 結論

本研究利用市售上於電動車鋰鐵電池探討電池在不同溫度下充/放電特性研究，經實驗數據中比較結果得到下列幾項結果：

(1)由電池在不同環境下可以看出放電能量差異 A 電池模組充放電試驗放電能量由 877.22Wh 一直降到 591.36Wh，B 電池模組放電能量由 863.18Wh 一直降到 653.17Wh，A/B 電池模組串聯放電能量由 2348.15Wh 一直降到 1713.76Wh，A/B 電池模組並聯放電能量 2378.30Wh 一直降到 1883.96Wh，放電能量越來越低，說明放電能量對溫度有影響。

(2)不管電池單一顆充/放電、串聯或並聯都是溫度高時充/放電電壓最高分別為：A 電池模組充放電試驗在 40°C 時放電電壓為 115.27V 為最高，-10°C 時電壓為 114.10V 為最低，B 電池模組 30°C 時放電電壓為 117.67V 為最高，-20°C 時電壓為 117.21V 為最低，A/B 電池模組串聯 40°C 時放電電壓為 240.18V 為最高，-10°C 和 -20°C 時電壓為 240.16V 為最低，A/B 電池模組並聯 30°C 時放電電壓為 121.14V 為最高，-10°C 時電壓為 120.49V

為最低，說明溫度越高時放電電壓越高，溫度越低時放電電壓越低。

(3)由電池在不同環境下也可以看出溫度對放電電容量差異 A 電池模組充/放電試驗放電電容量在 30°C 時放電容量最高，B 電池模組放電容量在 40°C 時放電容量為最高，A/B 電池模組串聯放電容量在 30°C 時放電容量為最高，A/B 電池模組並聯放電容量在 30°C 時放電容量為最高，而全部電池都在低溫狀態下放電容量最低，說明放電能量對溫度有影響。

(4)綜合以上電池充/放試驗後參數分析比較，電池在高溫下充放電試驗時，磷酸鋰鐵電池之充放電電量較室溫 (20°C) 為高，表示電池之充放電效率在高溫環境優於常溫環境。原因是磷酸鋰鐵電池在高溫條件下之充/放電時間間距增加且內部阻抗較低，表示溫度越高對於電池內部化學反應更完全，使得電池具有更好的效率。另一方面，磷酸鋰鐵電池在低溫條件下之充放電效率明顯比室溫 (20°C) 時差，顯示溫度越低對於磷酸鋰鐵電池的不良影響越大。

(5)在不同溫度下以 0.5C 對電池充/放電試驗時，由試驗結果中，放電電壓對時間分佈圖、放電電容對放電時間分佈圖可以看出溫度對電池影響因素很大，以上數據可作為廠商在開發 EV 電池時參考方向。

5. 誌謝

感謝車輛研究測試中心提供完整設備及在這段時間裡感謝車輛研究測試中心同事幫忙，特此致上感謝之意。

6. 參考文獻

- 1.黃可龍、王兆翔、劉素琴，『鋰離子電池原理與技術』，五南出版社，2010。
- 2.Noshin Omar, Mohamed Daowd, Bavo Verbrugge, Grietus Mulder, Peter Van den Bossche, Joeri Van Mierlo, Miguel Dhaens, Stijn Pauwels, Filip Leemans 「Assessment of Performance Characteristics of Lithium-Ion Batteries for PHEV Vehicles Applications Based on a Newly Test Methodology」, The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition, Sep. 2010.
- 3.ISO 12405-1 “Electrically propelled road vehicles — Test specification for lithium-Ion traction battery systems —Part 1:High power applications ”, Dec. 2010.
- 4.張模年(2011)『鋰鐵電池充放電測試系統之研究』，明志科技大學電機工程研究所。
- 5.蔡宗榮，『磷酸鋰鐵電池高頻放電特性之研究』，碩士論文，國立中山大學電機工程學系，2010。