



基於高熱容量相變物料的 鋰電池熱管理系統

Li-Battery Thermal Management
System Based on High Heat Capacity
Phase Change Materials

總結報告 Summary

 Printed on recycled paper

資助機構
Funding Organisation

 創新科技署
Innovation and Technology Commission

申請機構
Applicant



執行機構
Implementation Agent



編輯 Editors:

黎偉華先生 Mr Wai-wah LAI
楊浩坤博士 Dr Hao-kun YANG
陳璇博士 Dr Xuan CHEN
盧匡行先生 Mr Hong-hang LO

出版 香港生產力促進局

香港九龍達之路 78 號生產力大樓

Published by The Hong Kong Productivity Council
HKPC Building, 78 Tat Chee Avenue, Kowloon, Hong Kong

版權所有 © 2022 香港生產力促進局

Copyright © 2022 The Hong Kong Productivity Council. All Rights Reserved.

未經出版商事先書面許可，本出版物的任何部分不得以複製，存儲在檢索系統中或以任何形式或通過任何方式傳播、傳輸。

No part of this publication may be reproduced in any form, whether in electronic retrieval system or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

免責聲明 Disclaimer

基於相變材料的電池熱管理技術總結報告乃創新科技署撥款資助的創新及科技基金項目中的其中一項成果。在此總結報告上的資料，或項目成員表達的任何意見、結論建議及展現的成果，並不代表香港特別行政區政府或創新科技署的觀點。

This technology summary is a publication under the Innovation and Technology Fund project which is funded by the Innovation and Technology Commission. Any opinions, findings, conclusions or recommendations expressed in this handbook (or by members of this project team) do not reflect the views of the Government of Hong Kong Special Administrative Region or the assessment committees of the Innovation and Technology Fund.

致謝 Acknowledgement

創新科技署

Innovation and Technology Commission

香港汽車零部件工業協會

Hong Kong Auto Parts Industry Association

新能源汽車(香港)有限公司

New Energy Automobile (HK) Ltd.

中港車身製造廠有限公司

China Kong Auto Body Builders Co.,Ltd.

智擇科技有限公司

NTK Technologies Ltd.

序言

近年，在綠色運輸的大趨勢之下，電動車的使用愈趨普及。然而，電池放電期間出現的熱效應問題會影響到汽車電池本身的電化學系統，縮短和削弱汽車電池的壽命和效能，進而影響電動汽車的安全性、可靠性和產品壽命及成本。壽命縮短而產生的大量電池廢料亦危害環境。目前業界中部份生產商使用定制電池減輕極端溫度對電池的影響，但電池運作時內部升溫帶來的問題依舊未得到解決。除此之外，業界也會利用氣流冷卻或液態製冷劑來降低電池溫度，但相對而言不僅效率低，而且消耗額外能源。

電池熱管理系統是電動汽車溫度調控的主體核心部件，用於調節汽車運行過程中電池組的最高溫度以免熱失控，同時幫助降低電池組內的溫差來節省能耗。電池熱效應問題也會影響到電動汽車的性能和運作壽命，因此，做好熱管理對電池的性能、壽命至整車行駛里程都十分重要。為實現高效熱調控，研究人員已經開發出多種用於電動汽車的熱管理技術，包括熱管冷卻、製冷劑、低溫散熱冷卻、冷卻水冷卻、相變材料散熱等。其中基於相變材料的電池熱管理系統因不需要消耗額外能量、結構簡單、傳熱效率高等性能具有巨大發展潛力，逐漸成為電池領域的研究熱點。

這本技術總結報告將會介紹關於相變材料熱性能的基礎理論及相變儲放熱技術機制，進而重點闡述相變材料于電動汽車電池熱管理系統中的重要應用。此外，亦會根據本項目中相變材料及鋰電池熱管理的研發成果，詳細剖析相關技術要點。

目錄

1 電動汽車電池 熱管理簡介	10
1.1 電動汽車電池發展趨勢	11
1.2 電動汽車鋰電池熱管理	12
1.2.1 電池安全性	13
1.2.2 電池熱管理系統通用性	13
1.3 電池包高效管理途徑	14
1.4 熱管理系統應用及發展前景	15
2 相變材料 熱管理系統	16
2.1 簡介	17
2.2 相變材料熱管理系統結構設計	18
2.3 相變材料熱管理系統之應用及發展	21
2.3.1 社會價值	21
2.3.2 市場價值	22
2.3.3 科學意義	22
3 複合相變材料 熱物性研究	23
3.1 簡介	24
3.2 相變材料—石蠟	24
3.3 石蠟及石蠟基泡沫鋁複合材料理化性能測試分析	25
3.3.1 樣品製備	25
3.3.1.1 石蠟材料製備	25
3.3.1.2 石蠟基金屬泡沫複合材料材料製備	25
3.3.2 石蠟及複合材料相轉變溫度和相變潛熱測試	28
3.3.3 石蠟及複合材料導熱率測試	32
3.3.3.1 測試基本信息	32
3.3.3.2 測試原始數據	33
3.3.3.3 測試結果	35
3.3.4 石蠟及複合材料導電率測試	36
3.3.5 石蠟及複合材料抗腐蝕性能測試	37
3.3.5.1 樣品信息	37
3.3.5.2 試驗條件	37
3.3.5.3 試驗環境條件	38
3.3.5.4 試驗過程和步驟	38
3.3.5.5 試驗結果	38
4 相變材料電池系統製備及測試	40
4.1 簡介	41

4.2 電池系統之鋰離子電池	41	4.4.2.1.1 0.5C 充放電倍率	57
4.3 石蠟基泡沫鋁相變材料電池組	43	4.4.2.1.2 1C 充放電倍率	58
4.3.1 石蠟基泡沫鋁相變材料電池組的製備過程	43	4.4.2.1.3 2C 充放電倍率	59
4.3.2 無相變材料的電池組製備過程	46	4.4.2.1.4 充放電倍率下電池組溫度特性的測試結果整合	60
4.4 基於相變材料的鋰電池組熱電性能測試	48	4.4.2.2 9 組電池組成的電池組試驗結果	60
4.4.1 月桂酸基泡沫鋁複合材料電池組	48	4.4.2.2.1 0.5C 充放電倍率	61
4.4.1.1 4 組電池組成的電池組試驗	48	4.4.2.2.2 1C 充放電倍率	62
4.4.1.1.1 0.5C 充放電倍率	49	4.4.2.2.3 2C 充放電倍率	63
4.4.1.1.2 1C 充放電倍率	50	4.4.2.2.4 充放電倍率下電池組溫度特性的測試結果整合	64
4.4.1.1.3 2C 充放電倍率	51	4.4.3 正十八烷基泡沫鋁複合材料電池組	65
4.4.1.1.4 充放電倍率下電池組溫度特性的測試結果整合	52	4.4.3.1 4 組電池組成的電池組試驗	65
4.4.1.2 9 組電池組成的電池組試驗結果	52	4.4.3.1.1 0.5C 充放電倍率	66
4.4.1.2.1 0.5C 充放電倍率	53	4.4.3.1.2 1C 充放電倍率	67
4.4.1.2.2 1C 充放電倍率	54	4.4.3.1.3 2C 充放電倍率	68
4.4.1.2.3 2C 充放電倍率	55	4.4.3.1.4 充放電倍率下電池組溫度特性的測試結果整合	69
4.4.1.2.4 充放電倍率下電池組溫度特性的測試結果整合	56	4.4.3.2 9 組電池組成的電池組試驗結果	69
4.4.2 正二十烷基泡沫鋁複合材料電池組	56	4.4.3.2.1 0.5C 充放電倍率	70
4.4.2.1 4 組電池組成的電池組試驗結果	56	4.4.3.2.2 1C 充放電倍率	71

4.4.3.2.3 2C 充放電倍率	72
4.4.3.2.4 充放電倍率下電池組溫度特性的測試結果整合	73
5 相變材料電池系統之熱管理傳熱強化	74
5.1 簡介	75
5.2 電池測試系統及方法	76
5.3 相變材料電池組 (26 組電池) 製備	77
5.3.1 電池測試系統結構設計	77
5.3.2 無相變材料電池組裝置製備	78
5.3.3 相變材料電池組裝置製備	79
5.4 相變材料電池熱管理系統傳熱強化分析	81
5.4.1 相變材料電池熱管理系統傳熱原理	81
5.4.2 無相變材料電池組裝置傳熱分析	81
5.4.3 相變材料電池組裝置傳熱分析	83
5.4.3.1 月桂酸基電池組裝置傳熱分析	83
5.4.3.2 正二十烷基電池組裝置傳熱分析	85
5.4.3.3 正十八烷基電池組裝置傳熱分析	87
5.4.4 測試分析總結	89
6 相變材料電池系統之材料成本分析	90

6.1 原材料成本分析	91
6.2 相變材料電池系統成本分析	91
7 結論與展望	93
7.1 結論	94
7.2 展望	95

1

電動汽車電池 熱管理簡介

1.1 電動汽車電池發展趨勢

最近十年，電動汽車行業迅速發展，車輛銷量不斷持續增長。在電動汽車技術快速發展的帶動下，其市場滲透率有望進一步提升。與傳統燃料汽車複雜的產業鏈不同，電動汽車產業鏈中最重要的零部件即為動力電池。因此電池的儲能與安全問題也是行業關注的焦點。鋰電池是電動汽車常用的動力電池，然而安全問題一直是鋰電池大規模應用的主要障礙，隨著鋰電池能量密度的不斷提升，其安全性能的提升對電動汽車發展日益迫切。

熱失控是鋰電池安全研究中的一個重要問題，動力電池系統內部熱反應或受外部撞擊會導致電池組溫度急劇上升，所誘發的熱失控會在整個汽車系統中蔓延，最後形成自燃、爆炸等悲劇事故。因此，利用相變材料優良的傳熱及儲能特性來構築鋰電池安全體系，是電動汽車行業的趨勢。另一方面，能源和環境是當下人類社會面臨的最具有挑戰性的兩大問題。在全球氣候變暖、資源枯竭和環境惡化的背景下，節能是永恆的社會命題。通過汽車產生的能耗在所有能耗中占重大比例，節能減排是全世界汽車行業的共識也是當下產學研三界的共同追求。

1.2 電動汽車鋰電池熱管理

鋰電池組是電動汽車的主要儲能部件，直接影響車輛的表現性能。由於車上裝載電池的空間有限，正常運行所需的電池數目也較多，電池會以不同倍率放電，並以不同生熱速率產生大量熱量，再加上時間累積以及空間影響將會聚集大量熱量，從而導致電池組運行環境溫度情況複雜多變。

電池包內溫度上升嚴重影響電池組的電化學系統的運行、使用壽命、電池包功率和能量、安全性和可靠性等。如果電動汽車電池組不能及時散熱，將會使電池組系統的溫度過高或分佈不均勻，降低電池充放電循環效率，影響電池的功率和能量，嚴重時還將導致熱失控，造成安全事故；另外，由於電池體的密集結構，發熱會導致電池組中間區域熱量聚集較多，邊緣區域較少，增加了電池包中各單元之間的溫度不均衡，從而造成電池模組、單體性能的不均衡，最終影響電動汽車的系統控制。

鋰離子電池的溫度直接影響其能量密度與功率性能。溫度較低時，電池的可用容量將迅速衰減，電池熱相關問題會嚴重影響電池的安全性，電池的內部熱量不容易散出，可能會出現電池內部溫度不均勻或者局部溫度過高等問題，繼而進一步加速電池衰減，縮短電池壽命，增加成本損失。因此，為提高整車性能，使電池組發揮最佳的性能和壽命，就需要優化電池包的結構，設計開發先進可靠的電池熱管理系統。此外，顧及

動力電池的拆解會帶來大量的環境污染，在設計時應考慮到電池的拆解簡易性及環境適應性，實現綠色無附加污染。

1.2.1 電池安全性

溫度決定了電池的性能，若溫度過高會縮減電池壽命甚至引發火災、爆炸等安全事故，若溫度過低則會讓電池放電能力變弱，減少電池工作時間，也影響動力電池的輸出能力、充電能力和安全性。因此，需要對電池進行熱管理。電池熱管理系統是對電池的溫度進行監控並根據需要主動調控電池溫度以保持電池的安全穩定工作。首先確定電池的最佳工作溫度範圍，然後對工作期間溫度即時監測及調控，讓電池工作期間的溫度保持在最佳範圍內。

1.2.2 電池熱管理系統通用性

電子產品對電池熱管理系統有著剛性需求，配合 5G 及儲能電子設備等領域的高速發展，電子產品熱管理需求會不斷增長，市場前景廣闊。基於同一熱管理系統架構，通過對其進行結構優化及參數調控，確保電芯溫度保持在適宜和安全的範圍，即可適應不同的產品類型。

1.3 電池包高效管理途徑

新能源汽車中動力電池包是單體電芯(cell)通過串並聯組合之後，外加一些熱管理及冷卻系統，形成驅動汽車行駛的能源儲存單元。在當前主流的電池包結構中，新能源汽車動力電池包主要由電池包、電池模組及電芯三個層級構成，而現時的電池包管理方案則圍繞三個大方向發展：

(1) 研發及優化電池散熱材料；(2) 電池模組結構優化設計；以及 (3) 優化熱管理系統參數。

(1) 研發及優化電池模組散熱材料即研發新型熱管理材料及優化封裝工藝的設計，從整體考慮散熱問題的解決方案和新型材料的設計應用。電池組的局部熱點溫度迅速上升，從而對電池組散熱提出了更高的要求。因此，開發高散熱性能的材料成為新一代電動汽車電池組器件的重要支撐。

(2) 電池模組結構優化設計即是指在動力電池包設計過程中，需要考慮結構電池系統安全可維護，電池熱管理系統耐久有效，電池包結構防塵/防水設計、電池安全失效後應急處理等，以確保在動力電池能量密度及使用性能不斷提升的同時，也能降低成本。

(3) 優化熱管理系統參數的應用旨在透過應用及研發不同的新材料及結構設計工藝，使動力系統的零部件在合理的溫度範圍工作，同時盡可能

降低熱管理系統的能耗。電動汽車動力系統及電池系統在不同操作情況下安全可靠的運行是整車熱管理的重要工作內容。

1.4 熱管理系統應用及發展前景

在新能源汽車高速發展的浪潮下，汽車的安全問題尤為突出，因此汽車熱管理愈趨重要，對熱管理行業的性能需求確定性也愈高。高效的熱管理能夠降低能源損失，減少廢氣排放，保護環境，從而促進汽車行業全面升級轉型，也能推動國家綠色經濟發展。對汽車企業而言，新技術的開發有助於提升其市場競爭力，隨著政策對油耗排放的要求日益嚴格，高效的熱管理系統能滿足整車的排放要求，有利於企業的生產經營。此外，高效安全的熱管理既能顯著改善能源的利用效率，又可以降低整車使用成本，從而更能受到消費者的青睞。

2

相變材料 熱管理系統

2.1 簡介

相變材料(Phase Change Material, PCM)熱管理系統是以相變材料作為傳熱介質，利用相變材料在發生相變時可以儲能與放能的特性，達到對動力電池低溫加熱與高溫散熱的效果。以相變溫度和電池工作溫度接近的相變材料作為冷源，相變過程中吸熱原理上可以保證電池在較長時間內維持恆溫。然而，相變材料的導熱率比較低，為了改變材料的固有缺陷，向相變材料中填充一些金屬材料，例如以泡沫鋁作為骨架，填充相變材料，從而達到提高導熱率的目的。

基於上述研究目的，本項目旨在開發一組嶄新的溫度管理系統供汽車電池使用，務求令汽車電池的運作溫度以輕微的偏差維持在最理想水平。相變物料的高潛熱和高熱容量的特質使其能夠在相變的過程中吸引或釋放大量熱能，鄰近溫度因此能夠穩定地維持在相若水平。針對汽車電池的溫度管理，電池的最佳運作溫度約為攝氏 40 度，石蠟因其穩定可靠的特點並適用於相應的溫度範圍，可作為項目合適的相變物料。

裝置構造方面，發泡鋁會用作支撐物料，並灌入石蠟以便實現鋰電池的熱管理效用。溫度管理裝置將會直接接觸電池表面以促進傳熱效能，由此可在電池運作時將溫度維持在最佳水平。透過此項目，香港電池、電動車及汽車製造商可以透過這套新裝置和技術，能有效提升電池續航力和壽命，同時保持電池運作時的穩定表現。

2.2 相變材料熱管理系統結構設計

本項目開發以複合相變材料為基礎的電池熱管理裝置包括電池、複合相變材料、支撐材料和外殼，其中，電池被支撐材料包裹，複合相變材料注入支撐材料中，電池裝置使用外殼進行封裝，裝置中使用的複合相變材料是不同熔點的單一或者多層石蠟(圖 2.1)，支撐材料是泡沫鋁(圖 2.1)。

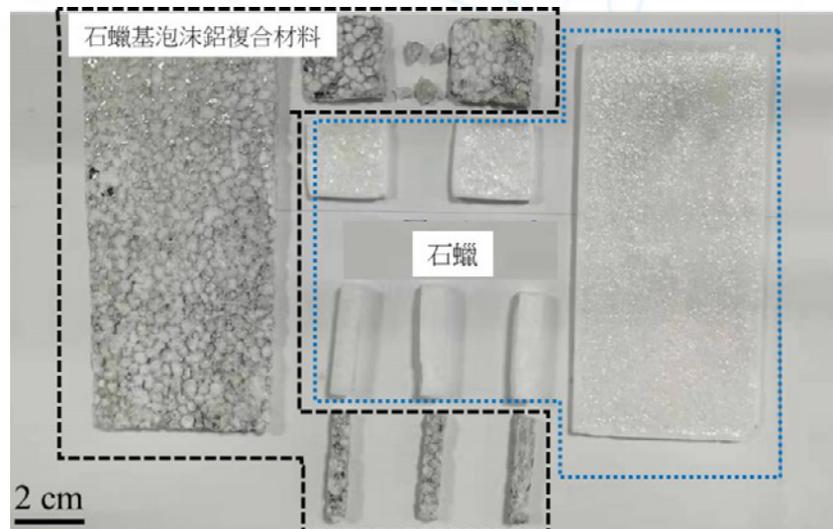


圖 2.1 相變材料熱管理系統之相變石蠟/複合材料材料

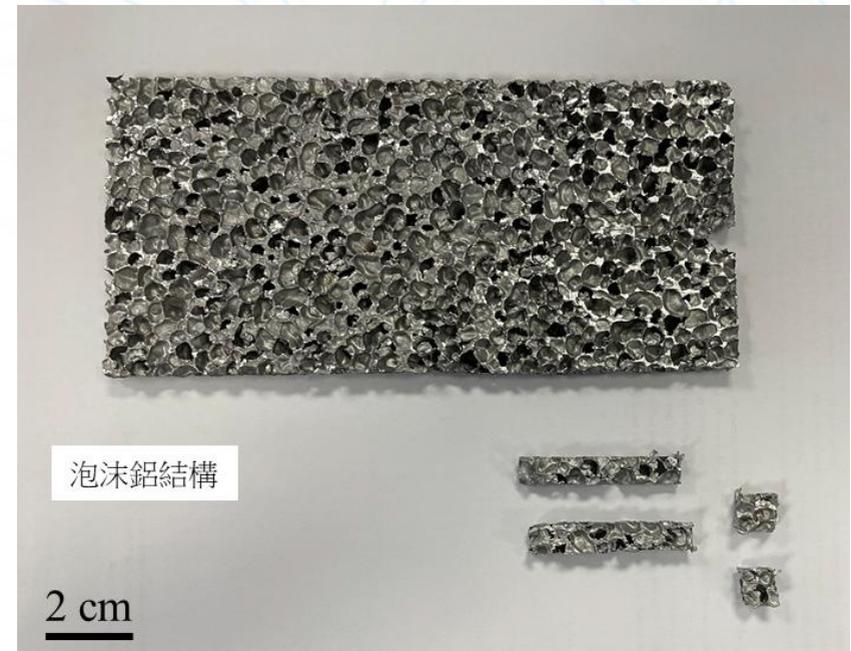


圖 2.2 相變材料熱管理系統之泡沫鋁結構

該電池熱管理裝置中的相變材料採用不同熔點的多層石蠟，以增加熱管理系統的溫度範圍耐受性。泡沫鋁作為支撐材料來促進被動散熱，其具有高導熱性，並且泡沫空間允許相變材料-石蠟滲入。如圖 2.3 所示，該電池熱管理系統選取了 26 個歐姆內阻相近的鋰電池進行組裝，採用並聯組合方式連結，電極之間通過鍍片電焊連結，電池組與充放電儀之間採用導線連接，隨後用泡沫鋁對電池組進行組裝。該熱管理系統採用石蠟作為相變材料，將其與具有高化學穩定性、高強度及高導電性的泡沫鋁結合，與電池表面接觸以促進有效的熱傳遞，從而使運行過程中的

系統保持在最佳溫度範圍，以實現整個系統傳熱效率的提升。最後用亞克力材質外殼封裝該電池系統，確保所有石蠟完全封裝在設備內部，以防止熔化的石蠟洩漏和漏電。

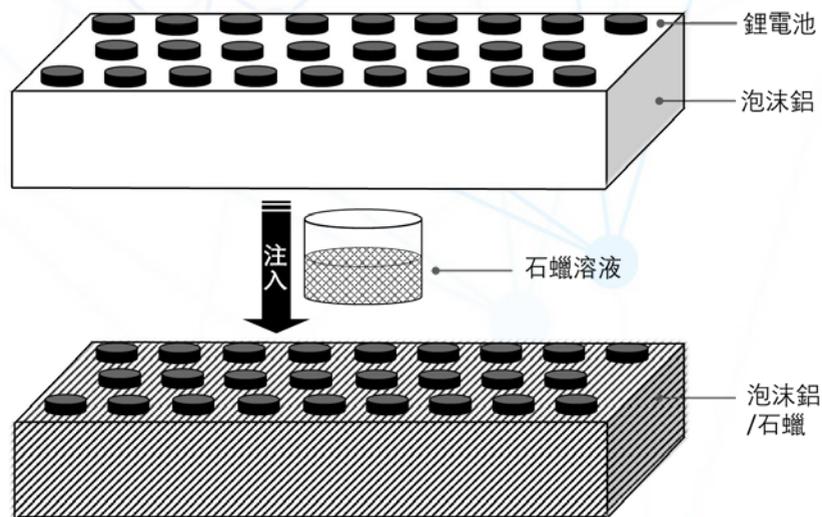


圖 2.3 相變材料散熱系統結構設計概念圖

2.3 相變材料熱管理系統之應用及發展

通過將相變材料應用於汽車電池熱管理系統，可實現相變材料與系統的集成，有效提升電池內部的散熱性能，從而全面優化電池組的傳熱效率。與傳統方法相比，利用複合相變材料的高儲熱性可更高效儲存電池工作產生的多餘熱量，使其保持正常工作溫度，避免熱失控。該電池熱管理系統易於整裝至現有的電動車電池包組裝生產線中，具有巨大的市場價值。

2.3.1 社會價值

鋰電池是電動汽車常用的動力電池，然而安全問題一直是鋰電池大規模應用的主要障礙，隨著鋰電池能量密度的不斷提升，其安全性能的提升對電動汽車發展日益迫切。熱失控是鋰電池安全研究中的一個重要問題，動力電池系統由於內部熱反應或外部撞擊會導致電池組溫度急劇上升，因其誘發的熱失控會在整個汽車系統中蔓延，最後形成自燃、爆炸等悲劇事故。因而利用相變材料優良的傳熱及儲能特性來構築鋰電池安全體系，是電動汽車行業的趨勢。另一方面，能源和環境是當下人類社會面臨的最具有挑戰性的兩大問題。在全球氣候變暖、資源枯竭和環境惡化的背景下，節能是永恆的社會命題。通過汽車產生的能耗在所有能耗中占重大比例，其中節能減排是全世界的共識也是當下產學研三界的共同追求。因而本設計通過改良電動汽車熱管理系統可進一步延長純電動汽車使用壽命，促進汽車行業的節能減排，該成果的推廣必將服務於我國的綠色經濟和環境改善。

3

複合相變材料
熱物性研究

2.3.2 市場價值

鋰電池產業具有廣泛的市場空間，本設計針對產業亟需的高傳熱效率鋰電池用相變複合材料，通過設計開發新型複合鋰電池結構材料及關鍵技術，大幅提高鋰電池組的儲熱性，繼而使所在系統的安全性能也相應提升。該專利成果具有重要的應用價值和推廣空間，可望大大促進電動車產業及 5G 電子產品產業的發展。

2.3.3 科學意義

本設計針對相變材料的結構構築及傳熱特性調控等關鍵科學問題，開展系統深入的研究，可望揭示一系列重要的科學原理，為石蠟等相變材料行業提供關鍵技術的同時，為動力電池的熱管理研究提供理論指導，包括：石蠟相變材料與鋰電池包結構的構築方法，實現對相變材料厚度的調控；相變材料種類、材料密度、電池充放電倍率、電池工作環境條件等結構參數對電池熱管理系統儲能、傳熱的影響規律，建立結構參數與相變材料控溫性能之間的關聯，解釋相關物理機制；相變材料與電池組的結構參數對抗腐蝕性能的影響規律，建立結構參數與耐候性之間的關聯。

3.1 簡介

相變材料(Phase Change Material, PCM)是指溫度不變的情況下而改變物質狀態並能提供潛熱的物質。轉變物理性質的過程稱為相變過程，這時相變材料將吸收或釋放大量的潛熱，是節能環保的最佳綠色環保載體。通常情況下，相變材料是蠟狀熱化合物，在專門配製的溫度下（例如貼近鋰電池最佳工作溫度範圍內）進行鋰電池熱管理工作。

3.2 相變材料—石蠟

石蠟類相變材料組成成分複雜，具有價格低廉、化學性能穩定、相變潛熱高、無毒無腐蝕性等優點。與結晶水合鹽相比具有更高的溶解熱，並且不會出現相分離和過冷現象。然而，石蠟材料同時也存在一些缺陷，比如相變過程中蓄熱能力不佳、熱力學性差等。近日香港生產力促進局專家發現，通過製備石蠟複合材料可顯著改善其蓄熱能力，比如金屬泡沫與石蠟混合的複合材料在熱力學性能和穩定性都會得到提升。本項目基於石蠟作為相變材料用於鋰電池熱管理的研究方向，選用三種不同石蠟材料，即月桂酸、正二十烷、正十八烷，並對其進行了測試與分析。根據測試結果確定所用材料的種類、實際用量及比例；並用定制泡沫鋁作為其支撐結構製備高孔金屬泡沫鋁/石蠟複合相變蓄熱材料，以解決傳統相變材料用於電池熱管理普遍存在的遇熱熔化後洩露和導熱性不佳的問題。

3.3 石蠟及石蠟基泡沫鋁複合材料理化性能測試分析

石蠟及石蠟基泡沫鋁複合材料理化性能測試分析主要包括以下 5 方面：材料相轉變溫度點的測試，材料相變潛熱的測試，材料導熱率的測試，材料導電性能的測試和材料抗腐蝕性能的測試。

3.3.1 樣品製備

測試材料各理化性能前，首先製備了各測試所需要的樣品。

3.3.1.1 石蠟材料製備

三種石蠟材料均採用物理法進行製備。具體製備流程如下：

- 1) 分別取三種適量純石蠟置於燒杯中，在 70°C 水浴條件下加熱至完全熔化；
- 2) 將熔化後的液態混合物置於真空環境下磁力攪拌 1 小時（轉速為 800 rpm, 溫度為 60°C）；
- 3) 對液態混合物進行冷卻凝固處理後，即為石蠟相變材料樣品。製備的月桂酸、正二十烷、正十八烷樣品如下圖 3.1-3.3 所示。

3.3.1.2 石蠟基金屬泡沫複合材料材料製備

三種石蠟基金屬泡沫複合材料均採用物理法進行製備。具體製備流程如下：

- 1) 分別取三種適量純石蠟置於燒杯中，在 60°C 水浴條件下加熱至完全熔化；
- 2) 將熔化後的液態石蠟置於真空環境下進行磁力攪拌 1 小時，轉速為 1000 rpm, 溫度為 60°C；
- 3) 將攪拌後的液態石蠟均勻注入適度大小的金屬泡沫鋁塊中，使其分散均勻；
- 4) 對液態混合物進行冷卻凝固處理後，即為石蠟/金屬泡沫鋁複合材料樣品。製備的月桂酸/金屬泡沫鋁複合材料、正二十烷/金屬泡沫鋁複合材料、正十八烷/金屬泡沫鋁複合材料樣品如下圖 3.1-3.3 所示。

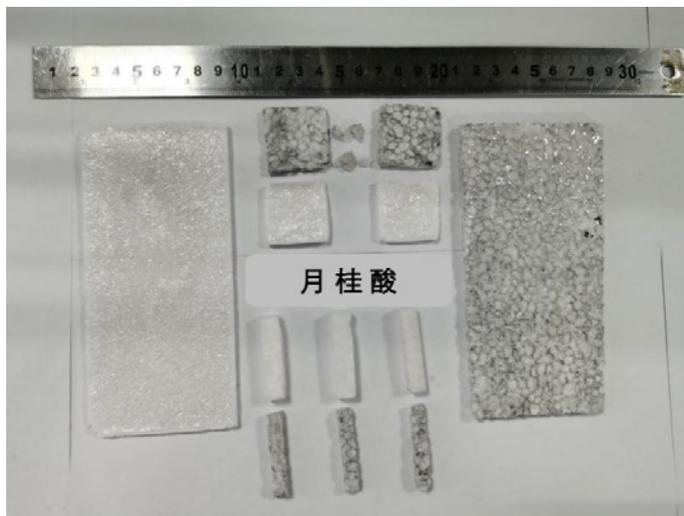


圖 3.1 月桂酸 (左) 及其複合材料 (右) 樣品製備

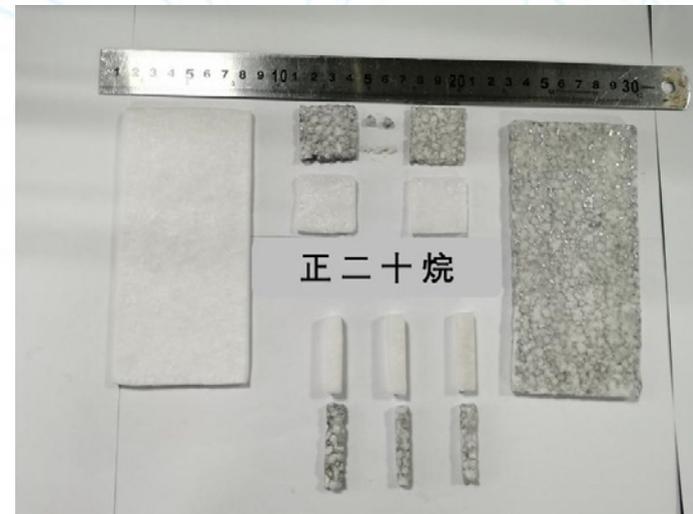


圖 3.2 正二十烷 (左) 及其複合材料 (右) 樣品製備

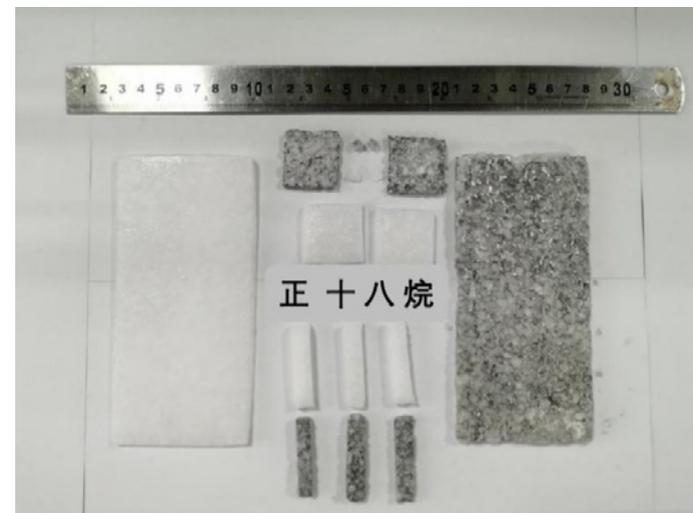


圖 3.3 正十八烷 (左) 及其複合材料 (右) 樣品製備

3.3.2 石蠟及複合材料相轉變溫度和相變潛熱測試

該測試主要利用熱重分析/示差掃描量熱法 (TG/DSC) 測試各材料的相轉變溫度和相變潛熱。熱重分析 (TG) 是指在程序控制溫度下測量待測樣品的質量與溫度變化關係的一種熱分析技術，用來研究材料的熱穩定性和組分。差示掃描量熱法 (DSC) 則用於測試石蠟和相變材料的相轉變溫度及相變潛熱，在研發和質量控制方面都是比較常用的檢測手段。測試溫度範圍為 20°C~70°C，升溫速率為 5°C/min，氣體流量為 20ml/min。測試獲得的結果如下圖 3.4~ 3.9 所示。

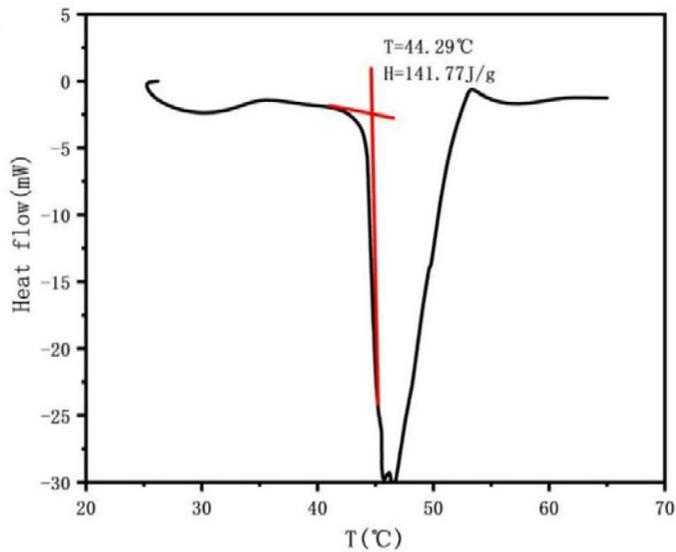


圖 3.4 月桂酸純相石蠟材料的相轉變溫度和相變潛熱分析圖

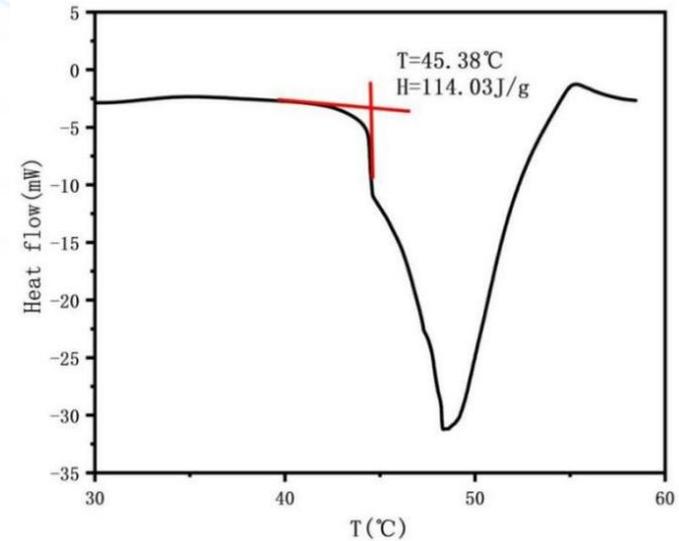


圖 3.5 月桂酸基泡沫鋁複合材料的相轉變溫度和相變潛熱分析圖

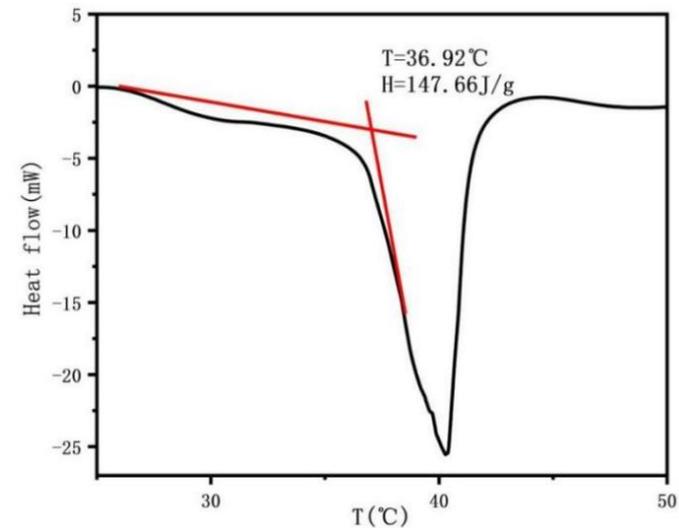


圖 3.6 正二十烷純相材料的相轉變溫度和相變潛熱分析圖

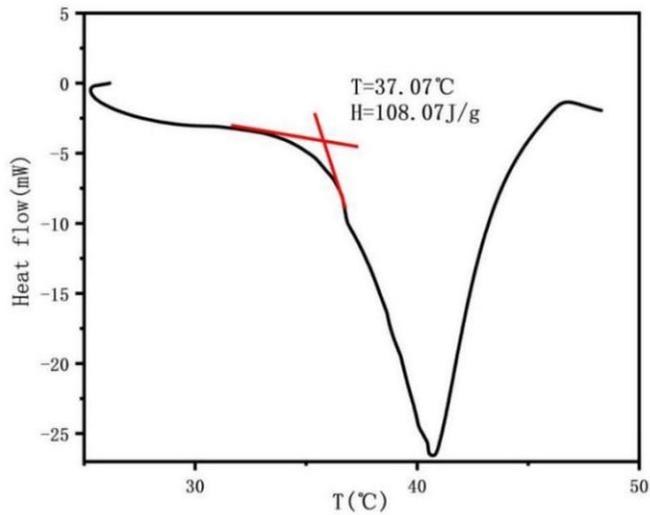


圖 3.7 正二十烷基泡沫鋁複合材料相轉變溫度和相變潛熱分析圖

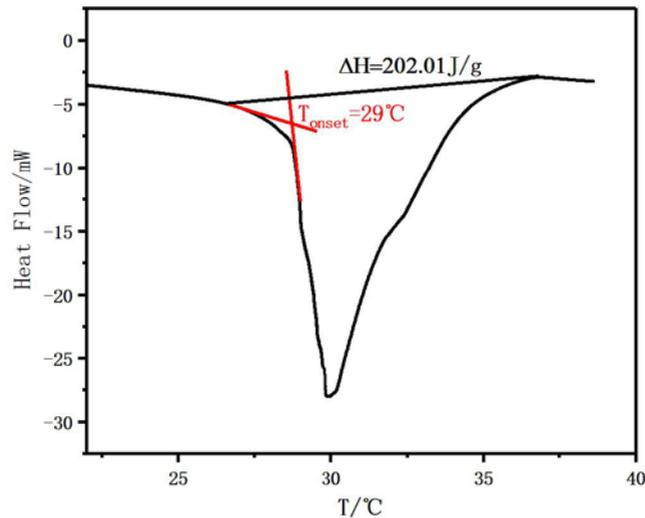


圖 3.8 正十八烷純相的相轉變溫度和相變潛熱分析圖

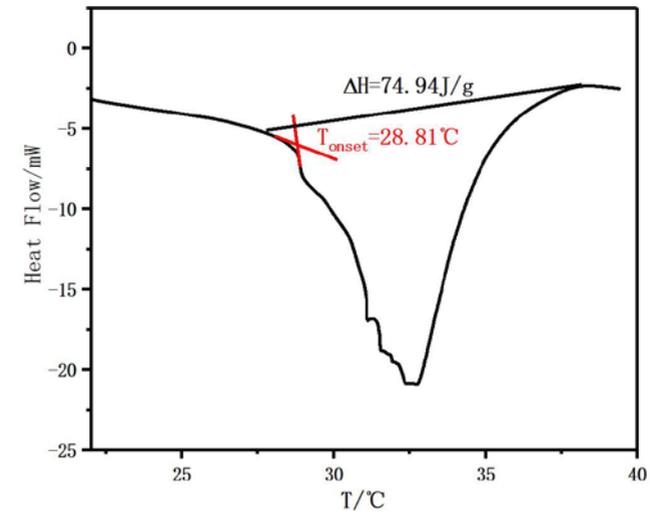


圖 3.9 正十八烷基泡沫鋁複合材料相轉變溫度和相變潛熱分析圖

從圖 3.4~圖 3.9 所見，所有複合相變材料的相變區間與純石蠟基本一致。通過比較分析三種石蠟及其複合材料的 DSC 曲線圖可以得出三類石蠟材料及其複合材料的相變溫度和相變潛熱參數，如下表 3.1 所示。月桂酸、正二十烷、正十八烷純相的相變峰值溫度為 44.3 °C、36.9 °C、28.8 °C，分別注入金屬泡沫鋁所得到的複合相變材料的相變峰值溫度分別為 45.4 °C、37.1 °C、29.0 °C。該結果表明，金屬泡沫鋁的注入對於三種純相石蠟熔點的影響較小。此外，由於金屬泡沫鋁無相變潛熱，石蠟/金屬泡沫鋁複合材料的相變潛熱全部來自石蠟，因此複合材料的相變潛熱值較於石蠟純相有下降。其中正十八烷由於熔點較低導致其純相與複合材料的相變潛熱參數偏差較大。

表 3.1 三種石蠟及其複合材料的相轉變溫度和相變潛熱參數彙總

序號	材料名稱	相變溫度 (°C)	相變潛熱(J/g)
1	月桂酸純相	44.3	141.77
2	月桂酸基泡沫鋁複合材料	45.4	114.03
3	正二十烷純相	36.9	147.66
4	正二十烷基泡沫鋁複合材料	37.1	108.07
5	正十八烷純相	28.8	102.01
6	正十八烷基泡沫鋁複合材料	29.0	74.94

3.3.3 石蠟及複合材料導熱率測試

3.3.3.1 測試基本信息

導熱率作為電池材料的重要熱物理性能參數之一，嚴重影響著鋰離子電池的各種特性。石蠟及其複合材料導熱率的測試採用瞬態平板熱源法，這種方法採用一個瞬間熱平面探頭，通過在大多數應用中被稱之為 Hot Disk 熱常數分析儀進行材料的熱物性測試，測試信息如表 3.2 所示。測試溫度為環境溫度（~22°C），利用壓片機在 20MPa 壓力下製備直徑為 30mm、厚度為 4mm 的測試樣品，測試過程中，被測樣品被傳感器的熱綫覆蓋以保證測試的準確性。

表 3.2 Hot Disk 熱常數分析測試信息

測試項目	導熱係數
儀器信息	TPS2500S, Sweden
測試方法	Hot Disk 法/瞬態平板熱源法
參考標準	ISO22007-2

3.3.3.2 測試原始數據

三類石蠟材料純相與泡沫鋁複合材料測試獲得的導熱率原始資料如下圖 3.10~3.15 所示。

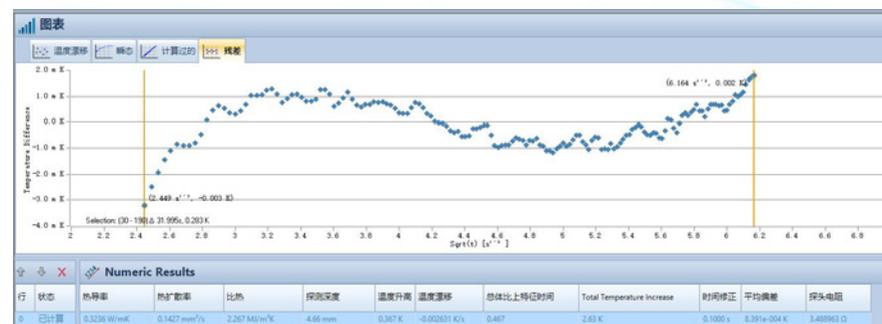


圖 3.10 正二十烷純相的導熱率

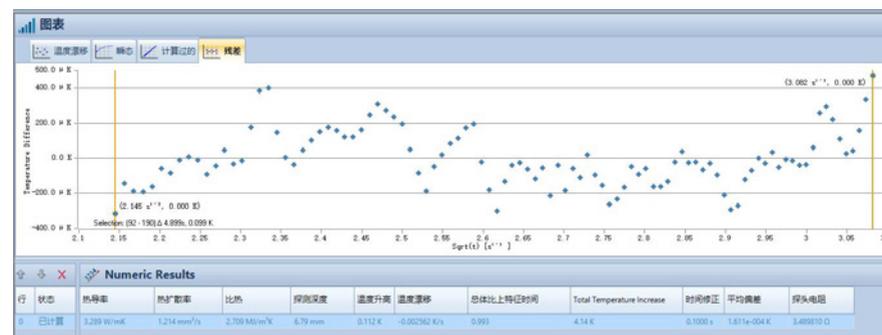


圖 3.11 正二十烷基泡沫鋁複合材料的導熱率

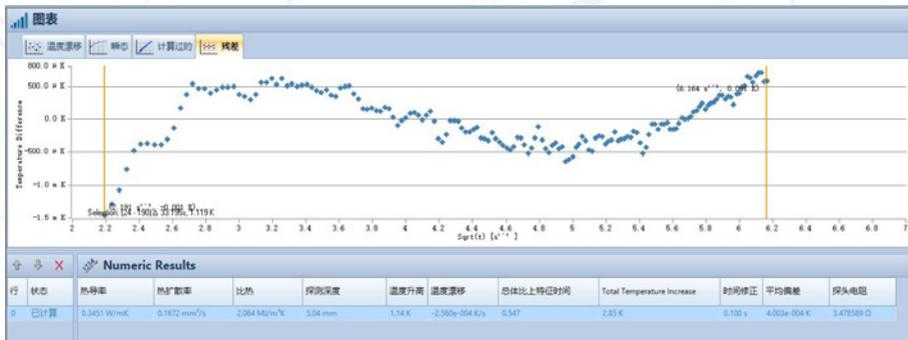


圖 3.12 正十八烷純相的導熱率



圖 3.13 正十八烷基泡沫鋁複合材料的導熱率

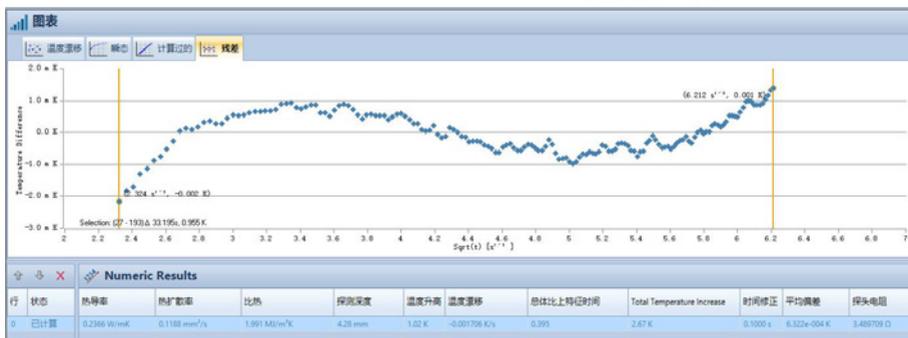


圖 3.14 月桂酸純相的導熱率



圖 3.15 月桂酸基泡沫鋁複合材料的導熱率

3.3.3.3 測試結果

通過對上述原始測試資料的分析得出三類石蠟純相材料及石蠟/泡沫鋁的導熱係數，如下表 3.3 所示。相比純石蠟的導熱係數（二十烷 0.3236 W/m·k，十八烷 0.3451 W/m·k，月桂酸 0.2366 W/m·k），複合相變材料的導熱係數均有約 10 倍的提升，複合二十烷、複合十八烷及複合月桂酸的導熱係數分別提升至 3.289 W/m·k、4.174 W/m·k、3.157 W/m·k，可見泡沫鋁對石蠟導熱係數有顯著提升。通過強化石蠟材料的導熱性，可有效增強其熱管理效果。

表 3.3 石蠟純相材料及石蠟/泡沫鋁的導熱係數匯總

試樣 名稱/編號	測試溫度 °C	導熱係數 (W/m·k)
二十烷	25	0.3236
複合二十烷	25	3.289
十八烷	25	0.3451
複合十八烷	25	4.174
月桂酸	25	0.2366
複合月桂酸	25	3.157

3.3.4 石蠟及複合材料導電率測試

本測試利用四點探針法測試材料的導電率，四點探針法是測量半導體電阻率最常用的一種方法，通過 4 根等間距配置的探針紮在半導體表面上，由恆流源給外側的兩根探針提供一個適當小的電流 I ，然後測量出中間兩根探針之間的電壓 V ，就可以求出半導體的電阻率。測試結果如下表 3.4 所示。

表 3.4 石蠟及複合材料導電率測試結果分析

序號	材料名稱	導電率 ($\Omega \cdot m$)
1	月桂酸純相	$>10^{13}$
2	月桂酸基泡沫鋁複合材料	8.4×10^{-7}
3	正二十烷純相	$>10^{13}$
4	正二十烷基泡沫鋁複合材料	8.3×10^{-7}
5	正十八烷純相	$>10^{13}$
6	正十八烷基泡沫鋁複合材料	8.2×10^{-7}

3.3.5 石蠟及複合材料抗腐蝕性能測試

3.3.5.1 樣品信息

純石蠟基材料及石蠟泡沫鋁複合材料的測試樣品的尺寸參數均為 150*70mm (長*寬)，詳情如表 3.5 所示。

表 3.5 樣品信息

名稱	編號	尺寸/MM (長*寬)	重量 /kg	數量
石蠟基材料	圖 3.16、3.17、3.18	150*70	/	3
石蠟泡沫鋁複合材料	圖 3.19、3.20、3.21	150*70	/	3

3.3.5.2 試驗條件

參照 GB/T 10125-2012 標準及技術要求對樣品進行 24 小時中性鹽霧試驗。樣品受溫度影響大，試驗箱內溫度偏離不作要求。該材料抗腐蝕性能通過鹽霧試驗測試，依 GB/T10125-2012 <人造氣氛腐蝕試驗 鹽霧試驗> 實驗條件如下表 3.6 所示。

表 3.6 鹽霧試驗條件參數

檢測項目	條件參數	
中性鹽霧	氯化鈉溶液濃度	50g/L±5g/L
	80cm ² 平均沉降量	1.5mL/h±0.5mL/h
	試驗溶液 pH 值	6.5~7.2
	試驗時間	連續噴霧 24 小時

3.3.5.3 試驗環境條件

溫度：23°C ~25°C

濕度：49% RH~51%RH

3.3.5.4 試驗過程和步驟

- 1) 試驗前室溫下對樣品外觀進行目視檢查；
- 2) 按照上述試驗條件的要求對樣品進行中性鹽霧試驗；
- 3) 試驗後室溫下對樣品外觀進行目視檢查。

3.3.5.5 試驗結果

24 小時中性鹽霧試驗後，在室溫下對樣品外觀進行目視檢查顯示樣品表面無明顯變化。測試結果說明石蠟/泡沫鋁具有強耐腐蝕性能，將其用作電池管理系統之材料，可有效避免電池充放電過程中出現的氧化腐蝕，從而延長電池使用壽命。圖 3.16 為鹽霧試驗前後樣品表面對照。

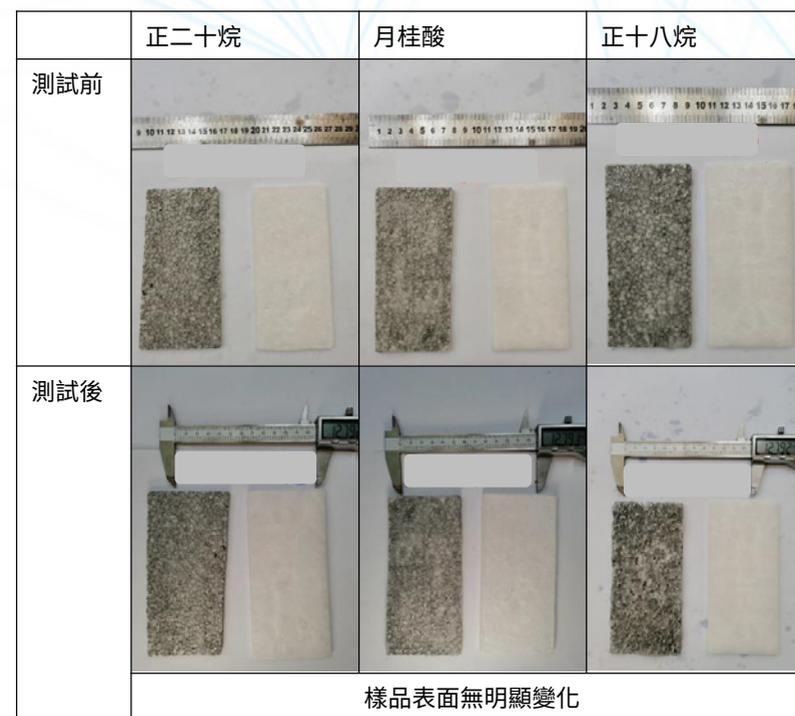


圖 3.16 鹽霧試驗前後樣品表面對照。

4

相變材料電池系統 製備及測試

4.1 簡介

動力電池是電動汽車的主要動力來源，電池的熱特性對整車性能、安全性、壽命及使用成本有關鍵影響。鋰離子電池因其高能量密度、環保等特性目前已廣泛應用於電動汽車組成。其中，18650 型卷繞型圓柱電池較方形電池能量密度高、佈置靈活、成本低，現今已成為工業應用最廣的電池類型。因此，本項目選用 18650 型鋰電池作為該電池系統的組成。

4.2 電池系統之鋰離子電池

目前工業常用的鋰離子電池種類主要有磷酸鐵鋰（LFP），鎳酸鋰（LNO），錳酸鋰（LMO），鈷酸鋰（LCO），以及三元材料。其中三元鋰電池因耐低溫效能好，容量高，熱失控 200 度以上，壽命（500-2000）次，一致性高，因此已廣泛應用於電動汽車行業。本相變材料電池系統中選取型號為 INR18650E-1610-2600mAh 的 18650 鋰電池用作電池組的組裝。表 4.1 為鋰電池規格信息。

表 4.1 電池系統之 18650 型鋰電池規格

序號	項目	常規參數		備注
		1	額定容量	
		最小容量	2550mAh	
2	正常電壓	3.7V		即工作電壓
3	放電終止電壓	2.75V		放電截止電壓
4	充電電壓	4.2V		

5	內阻	$\leq 35\text{m}\Omega$	-半電態下用交流發測量內阻 -使用出貨後不到一周及循環次數少於 5 次的新電池測量
6	標準充電	持續電流：0.5C 持續電壓：4.2V 截止電流：0.02C	
7	標準放電	持續電流：0.2C 截止電壓：2.75V	
8	最大持續充電電流	0~10°C：0.2C	
		10~20°C：0.5C CC 充至 3.9V 轉 0.2C CC-CV 充至 4.2V 截止 0.02C	
		20~45°C:0.5C	
9	最大持續放電電流	3C	
10	工作溫度範圍	充電：0~45°C	60±25% RH (單體電池儲存濕度範圍)
		放電：-20~60°C	
11	儲存溫度範圍	<一年：-20~25°C	60±25% RH (出貨狀態時的濕度範圍)
		<三個月：-20~40°C	
		<7 天：-20~60°C	
12	電芯尺寸	高度：65.1± 0.2 mm	含熱塑套管
		直徑：18.4± 0.2 mm	
13	電芯重量	約 45g	

4.3 石蠟基泡沫鋁相變材料電池組

為驗證相變材料電池系統結構設計的可行性，本項目中首先對基於分別由四組及九組鋰電池進行組裝的相變材料電池組進行測試。測試所需三種不同的石蠟基泡沫鋁相變控溫電池組，分別為月桂酸基，正二十烷基和正十八烷基。為了減少變數，三種不同石蠟基泡沫鋁相變控溫電池組將使用相同的製作過程。以下將以月桂酸基泡沫鋁相變控溫電池組的製作過程為例，介紹電池組製作過程。

4.3.1 石蠟基泡沫鋁相變材料電池組的製備過程

該相變材料電池組中，由於泡沫鋁模分為上下 2 層，首先澆築下半層複合材料。如圖 4.1 所示，可見內部澆注非常充分，未發現可見空隙。

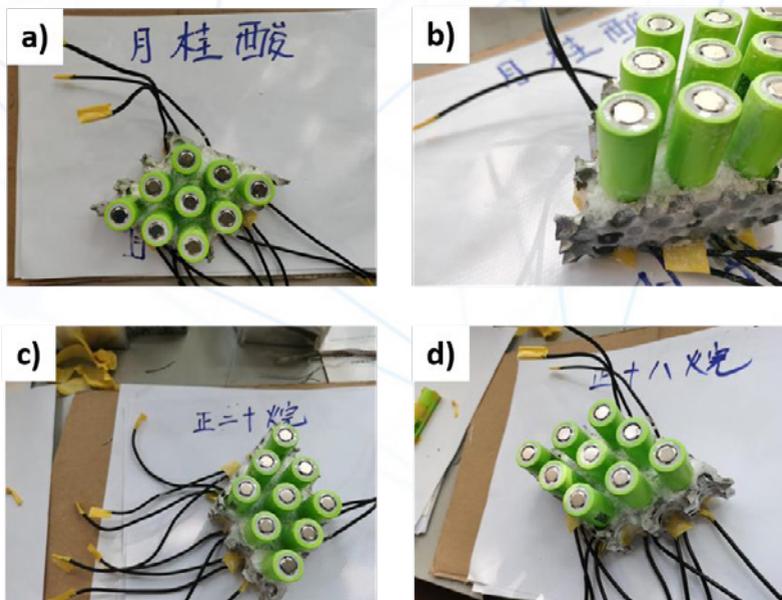


圖 4.1 相變材料電池組之合材料澆築

下半層複合材料澆築完成後進行上半層泡沫鋁模澆築，接著焊接此處電極，澆築流程如圖 4.2-4.3 所示。

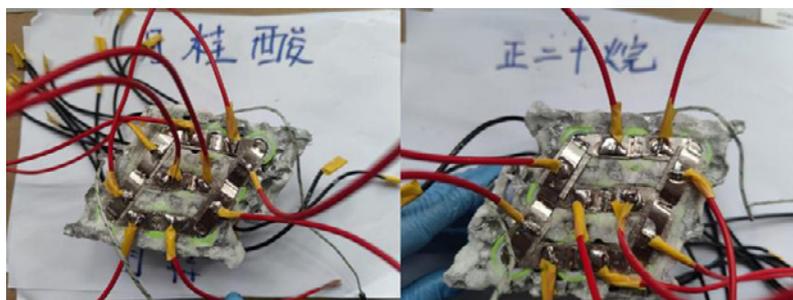


圖 4.2 九組電池組成的基於月桂酸/正二十烷相變材料的電池組

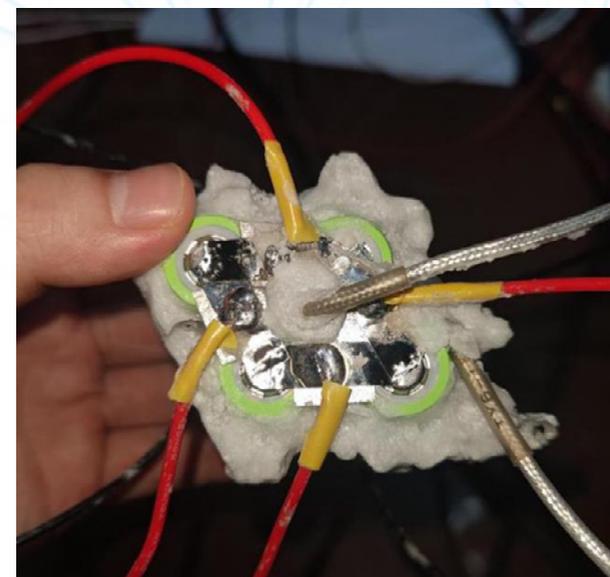


圖 4.3 四組電池組成的基於月桂酸相變材料的電池組

上下 2 層相變複合材料澆築完成後，用石蠟完全封裝電池組。封裝後的電池組如圖 4.4~4.5 所示。

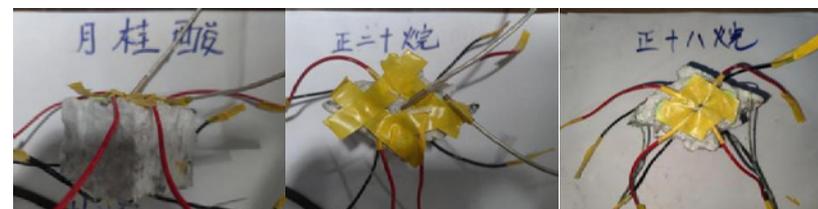


圖 4.4 九組電池組成的基於月桂酸/正二十烷/正十八烷的電池組

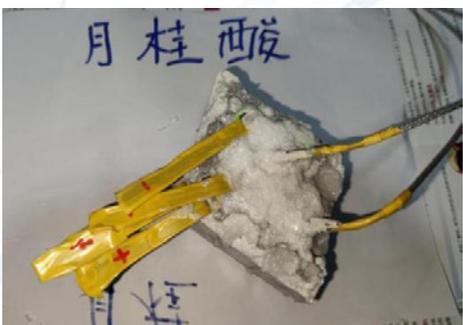


圖 4.5 四組電池組成的基於月桂酸的電池組

4.3.2 無相變材料的電池組製備過程

對照組即沒有相變材料控溫的電池組，是把 4 組和 9 組電池組直接成組，製作的電池組如圖 4.6~4.7 所示。

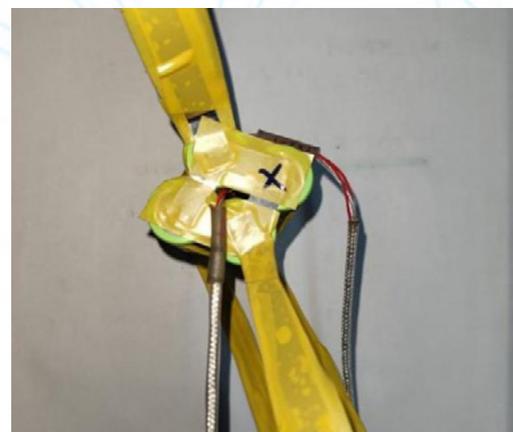


圖 4.7 四組電池組成的對照電池組

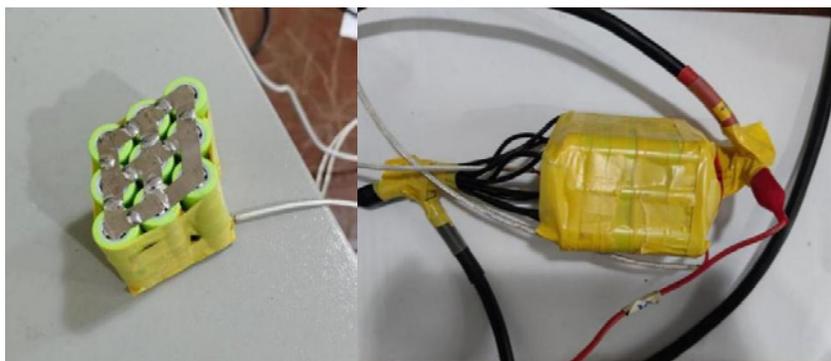


圖 4.6 九組電池組成的對照電池組

4.4 基於相變材料的鋰電池組熱電性能測試

鋰電池的充放電測試一般採用恆流-恆壓充電、恆流放電模式，記錄該過程中的測試時間、電壓和電流等數據，通過分析該過程中數據的變化來表徵電池或材料的容量及電池內部參數變化等電化學性能參數。為測試電池組的高倍率、高溫性能，在實驗室鋰電池的測試過程中，需用防爆箱和恆溫箱進行特殊性能測試。倍率充放電測試一般分為 3 種形式，相同倍率充電不同倍率放電、不同倍率充電相同倍率放電和不同的倍率充放電測試。

4.4.1 月桂酸基泡沫鋁複合材料電池組

4.4.1.1 4 組電池組成的電池組試驗

對由 4 組電池構成的基於月桂酸相變材料的電池組進行充電-靜置-放電的循環，充放電倍率分別為 0.5C、1C 和 2C，其中靜置時間 1 小時。

4.4.1.1.1 0.5C 充放電倍率

0.5C 充放電倍率下四組電池組溫度特性的測試結果如圖 4.8 所示。充電時，對照組中心最高溫度為 29.7°C，周邊最高溫度為 29.5°C，最大溫差為 1.7°C；加入月桂酸的電池組中心最高溫度為 27.7°C，周邊最高溫度為 26.7°C，最大溫差為 1.7°C。

放電時，對照組中心最高溫度為 30.5°C，周邊最高溫度為 30.2°C，最大溫差為 1.9°C；加入月桂酸的電池組中心最高溫度為 27.7°C，周邊最高溫度為 26.7°C，最大溫差為 1.9°C。

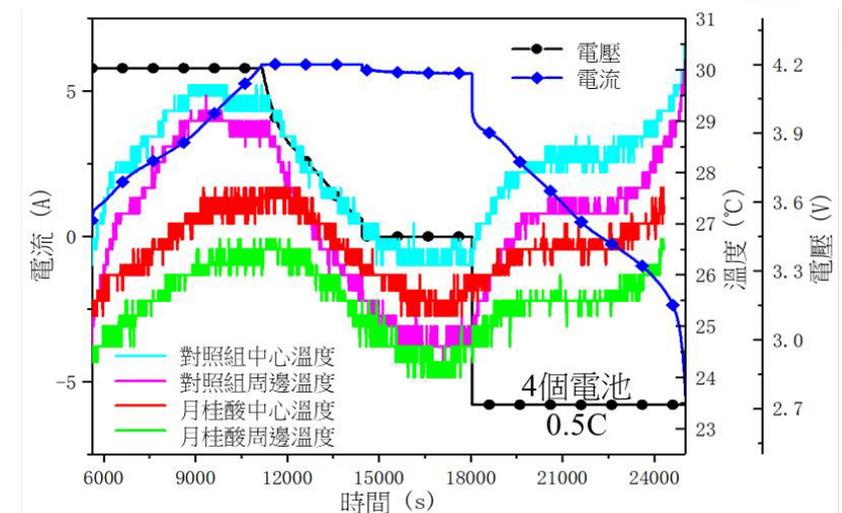


圖 4.8 0.5C 倍率下充放電時四組電池組內的溫度特性曲線

4.4.1.1.2 1C 充放電倍率

1C 充放電倍率下四組電池組溫度特性的測試結果如圖 4.9 所示。充電時，對照組中心最高溫度為 36.5°C，周邊最高溫度為 35°C，最大溫差為 1.8°C；加入月桂酸的電池組中心最高溫度為 31°C，周邊最高溫度為 29.7°C，最大溫差為 1.8°C。

放電時，對照組中心最高溫度為 37.7°C，周邊最高溫度為 35.7°C，最大溫差為 2°C；加入月桂酸的電池組中心最高溫度為 31.5°C，周邊最高溫度為 30.2°C，最大溫差為 1.9°C。

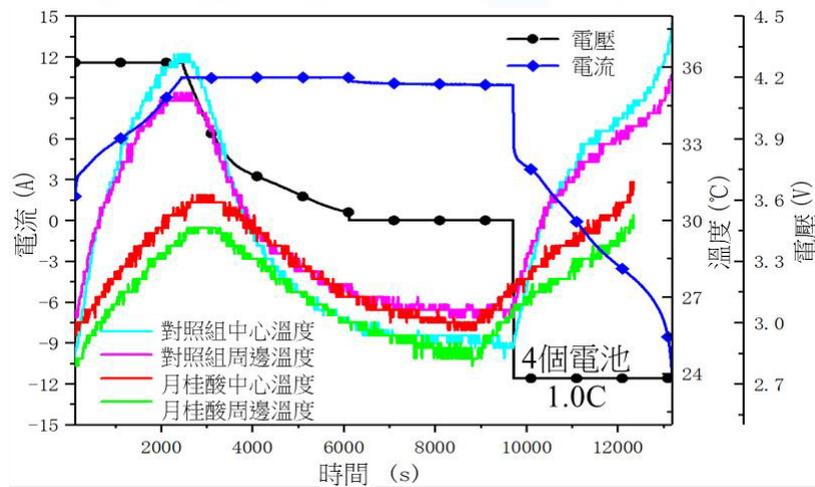


圖 4.9 1C 倍率下充放電時四組電池組內的溫度特性曲線

4.4.1.1.3 2C 充放電倍率

2C 充放電倍率下四組電池組溫度特性的測試結果如圖 4.10 所示。充電時，對照組中心最高溫度為 44.5°C，周邊最高溫度為 39.6°C，最大溫差為 5.5°C；加入月桂酸的電池組中心最高溫度為 37.2°C，周邊最高溫度為 36.7°C，最大溫差為 2°C。

放電時，對照組中心最高溫度為 51.2°C，周邊最高溫度為 44.2°C，最大溫差為 7.3°C；加入月桂酸的電池組中心最高溫度為 39°C，周邊最高溫度為 37.5°C，最大溫差為 1.7°C。

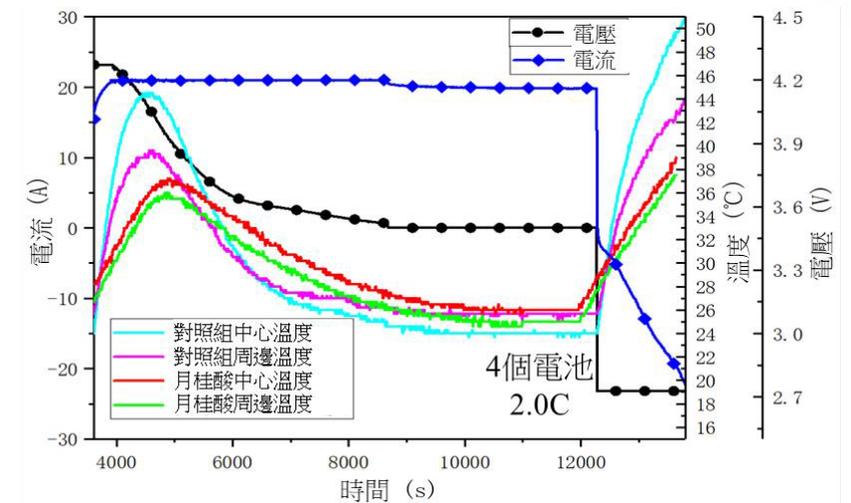


圖 4.10 2C 倍率下充放電時四組電池組內的溫度特性曲

4.4.1.1.4 充放電倍率下電池組溫度特性的測試結果整合

將上述結果整理成圖表 4.2 及 4.3 如下：

表 4.2 充電時四組電池組溫度和溫差

充電倍率	對照組中心溫度/°C	對照組周邊溫度/°C	對照組最大溫差/°C	月桂酸中心溫度/°C	月桂酸周邊溫度/°C	月桂酸最大溫差/°C
0.3C	28	27.2	1.9	27.2	26	1.9
0.5C	29.7	29.5	1.7	27.7	26.7	1.7
1C	36.5	35	1.8	31.5	30.2	1.9
2C	44.5	39.6	5.5	37.2	36.7	2

表 4.3 放電時四組電池組溫度和溫差

放電倍率	對照組中心溫度/°C	對照組周邊溫度/°C	對照組最大溫差/°C	月桂酸中心溫度/°C	月桂酸周邊溫度/°C	月桂酸最大溫差/°C
0.3C	28.7	27.7	2.1	27	26	2
0.5C	30.5	30.2	1.9	27.7	26.7	1.9
1C	37.7	35.7	2	31.7	31.2	1
2C	51.2	44.2	7.3	39	37.5	1.7

4.4.1.2 9 組電池組成的電池組試驗結果

本實驗中，對 9 個電池組成的電池組進行充電-靜置-放電的循環，充放電倍率分別為 0.5C、1C 和 2C，靜置時間 1 小時。

4.4.1.2.1 0.5C 充放電倍率

0.5C 充放電倍率下九組電池組溫度特性的測試結果如圖 4.11 所示。充電時，對照組中心最高溫度為 30.5°C，周邊最高溫度為 29.5°C，最大溫差為 1.5°C；加入月桂酸的電池組中心最高溫度為 27.5°C，周邊最高溫度為 27.2°C，最大溫差為 1.1°C。

放電時，對照組中心最高溫度為 30.7°C，周邊最高溫度為 29.5°C，最大溫差為 1.5°C；

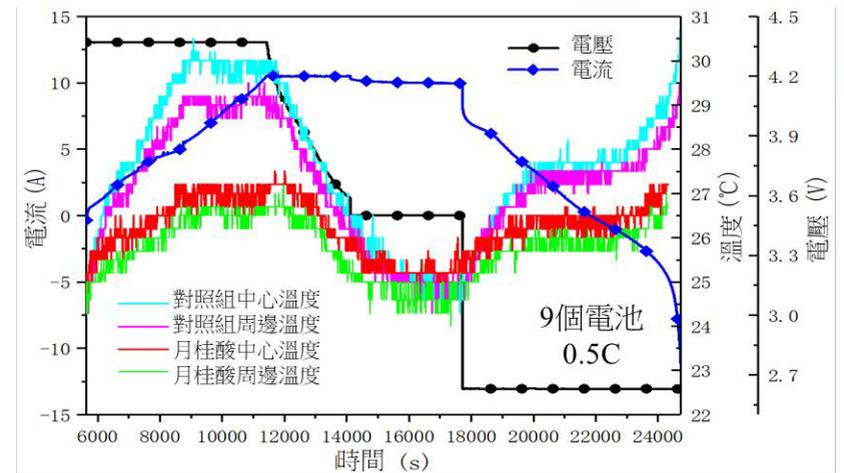


圖 4.11 0.5C 倍率下充放電九組電池組內的溫度特性曲線

4.4.1.2.2 1C 充放電倍率

1C 充放電倍率下九組電池組溫度特性的測試結果如圖 4.12 所示。充電時，對照組中心最高溫度為 40.7°C，周邊最高溫度為 37°C，最大溫差為 4.3°C；加入月桂酸的電池組中心最高溫度為 31.7°C，周邊最高溫度為 31.7°C，最大溫差為 1°C。

放電時，對照組中心最高溫度為 41.7°C，周邊最高溫度為 37.2°C，最大溫差為 4.5°C；加入月桂酸的電池組中心最高溫度為 31.7°C，周邊最高溫度為 31.2°C，最大溫差為 1°C。

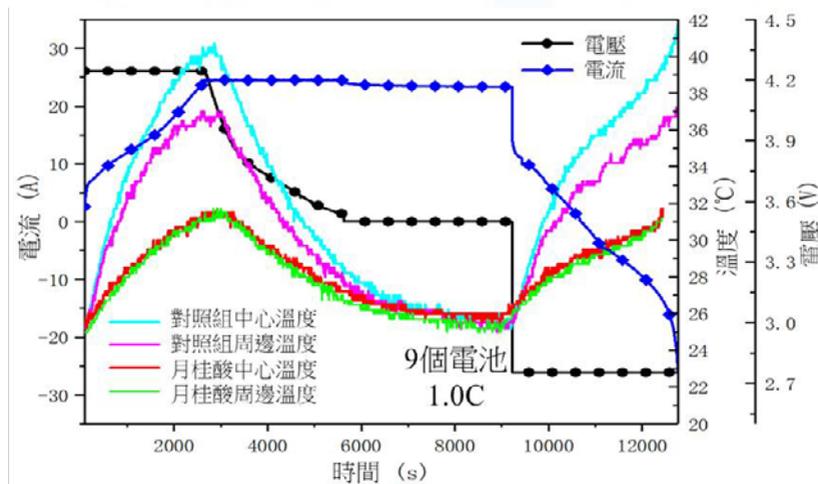


圖 4.12 1C 倍率下充放電時九組電池組內的溫度特性曲線

4.4.1.2.3 2C 充放電倍率

1C 充放電倍率下九組電池組溫度特性的測試結果如圖 4.13 所示。充電時，對照組中心最高溫度為 54.7°C，周邊最高溫度為 47.7°C，最大溫差為 7.6°C；加入月桂酸的電池組中心最高溫度為 37°C，周邊最高溫度為 36.5°C，最大溫差為 0.6°C。

放電時，對照組中心最高溫度為 62°C，周邊最高溫度為 52.7°C，最大溫差為 9.3°C；加入月桂酸的電池組中心最高溫度為 39°C，周邊最高溫度為 38.7°C，最大溫差為 0.6°C。

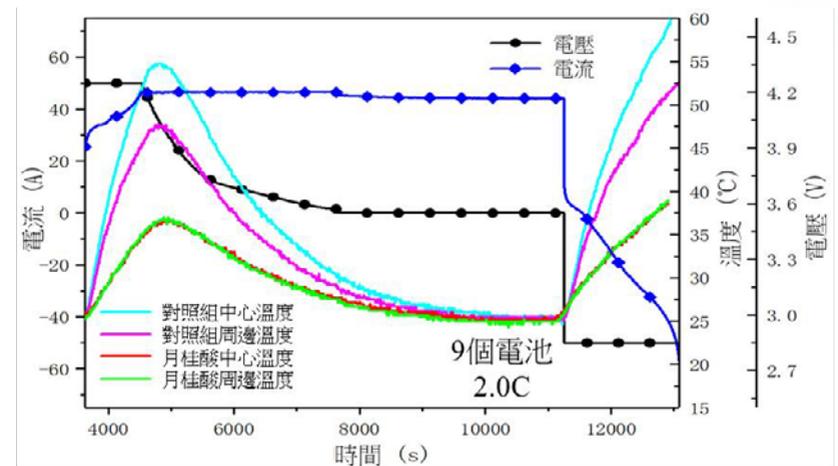


圖 4.13 2C 倍率下充放電時九組電池組內的溫度特性曲線

4.4.1.2.4 充放電倍率下電池組溫度特性的測試結果整合

將上述結果整理成圖表如下：

表 4.4 充電時 9 組電池組溫度和溫差

充電倍率	對照組中心溫度/°C	對照組周邊溫度/°C	對照組最大溫差/°C	月桂酸中心溫度/°C	月桂酸周邊溫度/°C	月桂酸最大溫差/°C
0.5C	30.5	29.5	1.5	27.5	27.2	1.1
1C	40.7	37	4.3	31.7	31.7	1
2C	54.7	47.7	7.6	37	36.5	0.6

表 4.5 放電時 9 組電池組溫度和溫差

放電倍率	對照組中心溫度/°C	對照組周邊溫度/°C	對照組最大溫差/°C	月桂酸中心溫度/°C	月桂酸周邊溫度/°C	月桂酸最大溫差/°C
0.5C	30.7	29.5	1.5	27.2	27	1.1
1C	41.7	37.2	4.5	31.7	31.2	1
2C	62	52.7	9.3	39	38.7	0.6

4.4.2 正二十烷基泡沫鋁複合材料電池組

4.4.2.1 4 組電池組成的電池組試驗結果

本實驗中對 4 個電池模組進行充電-靜置-放電的循環，充放電倍率分別為 0.5C、1C 和 2C，靜置時間 1 小時。

4.4.2.1.1 0.5C 充放電倍率

0.5C 充放電倍率下九組電池組溫度特性的測試結果如圖 4.14 所示。充電時，對照組中心最高溫度為 29.7°C，周邊最高溫度為 29.5°C，最大溫差為 1.7°C；加入二十烷的電池組中心最高溫度為 27.7°C，周邊最高溫度為 27.2°C，最大溫差為 0.8°C。

放電時，對照組中心最高溫度為 30.5°C，周邊最高溫度為 30.2°C，最大溫差為 1.9°C；加入二十烷的電池組中心最高溫度為 27.5°C，周邊最高溫度為 27.2°C，最大溫差為 0.8°C。

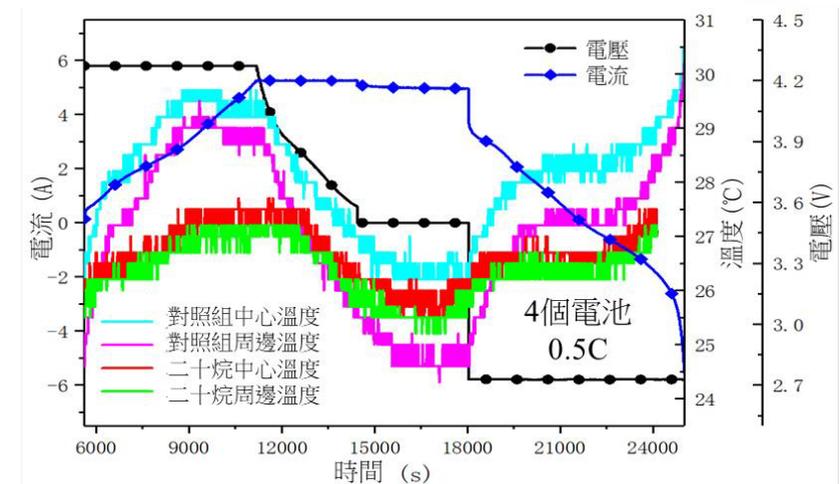


圖 4.14 0.5C 倍率下充放電時 4 組電池組內的溫度特性曲線

4.4.2.1.2 1C 充放電倍率

1C 充放電倍率下九組電池組溫度特性的測試結果如圖 4.15 所示。充電時，對照組中心最高溫度為 36.5°C，周邊最高溫度為 35°C，最大溫差為 1.8°C；加入二十烷的電池組中心最高溫度為 29.7°C，周邊最高溫度為 29.7°C，最大溫差為 0.7°C。

放電時，對照組中心最高溫度為 37.7°C，周邊最高溫度為 35.7°C，最大溫差為 2°C；加入二十烷的電池組中心最高溫度為 29.7°C，周邊最高溫度為 29.7°C，最大溫差為 0.8°C。

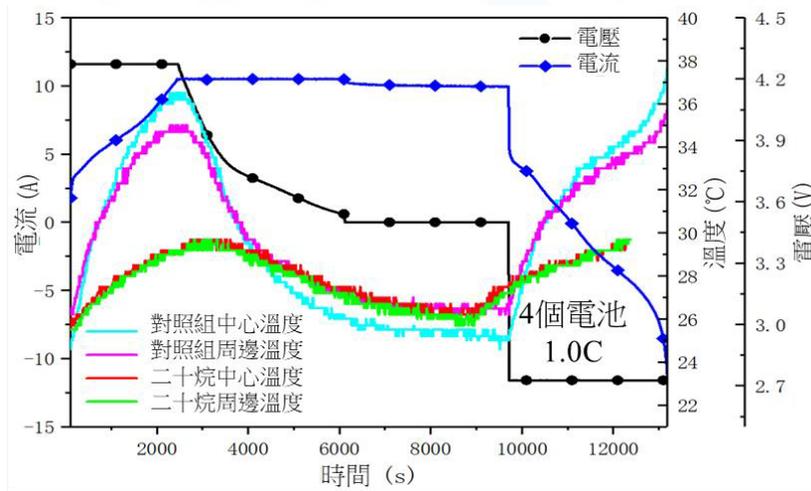


圖 4.15 1C 倍率下充放電時 4 組電池組內的溫度特性曲線

4.4.2.1.3 2C 充放電倍率

2C 充放電倍率下九組電池組溫度特性的測試結果如圖 4.16 所示。充電時，對照組中心最高溫度為 44.5°C，周邊最高溫度為 39.6°C，最大溫差為 5.5°C；加入二十烷的電池組中心最高溫度為 31.7°C，周邊最高溫度為 31.7°C，最大溫差為 0.5°C。

放電時，對照組中心最高溫度為 51.2°C，周邊最高溫度為 44.2°C，最大溫差為 7.3°C；加入二十烷的電池組中心最高溫度為 33°C，周邊最高溫度為 33°C，最大溫差為 0.7°C。

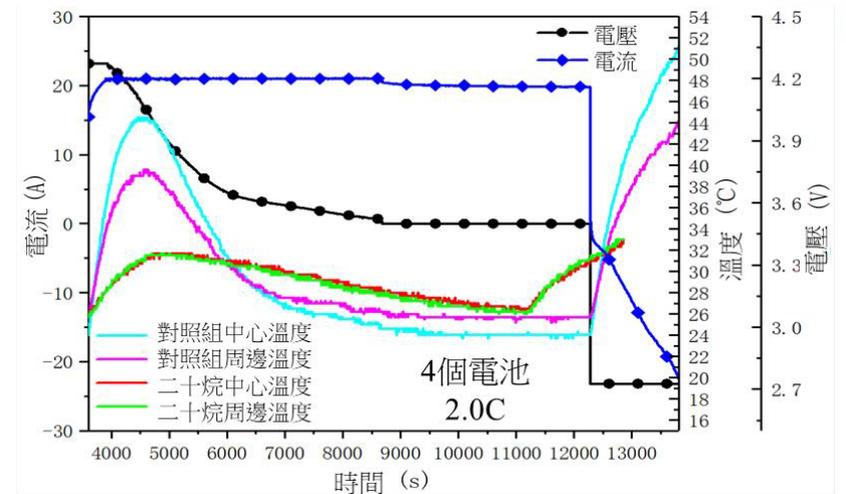


圖 4.16 2C 倍率下充放電時 4 組電池組內的溫度特性曲線

4.4.2.1.4 充放電倍率下電池組溫度特性的測試結果整合

將上述結果整理成圖表如下：

表 4.6 充電時 4 組電池組溫度和溫差

充電倍率	對照組中心溫度/°C	對照組周邊溫度/°C	對照組最大溫差/°C	二十烷中心溫度/°C	二十烷周邊溫度/°C	二十烷最大溫差/°C
0.5C	29.7	29.5	1.7	27.7	27.2	0.8
1C	36.5	35	1.8	29.7	29.7	0.7
2C	44.5	39.6	5.5	31.7	31.7	0.5

表 4.7 放電時 4 組電池組溫度和溫差

放電倍率	對照組中心溫度/°C	對照組周邊溫度/°C	對照組最大溫差/°C	二十烷中心溫度/°C	二十烷周邊溫度/°C	二十烷最大溫差/°C
0.5C	30.5	30.2	1.9	27.5	27.2	0.8
1C	37.7	35.7	2	29.7	29.7	0.8
2C	51.2	44.2	7.3	33	33	0.7

4.4.2.2 9 組電池組成的電池組試驗結果

本實驗中對 9 個電池模組進行充電-靜置-放電的循環，充放電倍率分別為 0.5C、1C 和 2C，靜置時間 1 小時。

4.4.2.2.1 0.5C 充放電倍率

0.5C 充放電倍率下九組電池組溫度特性的測試結果如圖 4.17 所示。充電時，對照組中心最高溫度為 30.5°C，周邊最高溫度為 29.5°C，最大溫差為 1.5°C；加入二十烷的電池組中心最高溫度為 28.7°C，周邊最高溫度為 28.5°C，最大溫差為 0.5°C。

放電時，對照組中心最高溫度為 30.7°C，周邊最高溫度為 29.5°C，最大溫差為 1.5°C；加入二十烷的電池組中心最高溫度為 28°C，周邊最高溫度為 28°C，最大溫差為 0.8°C。

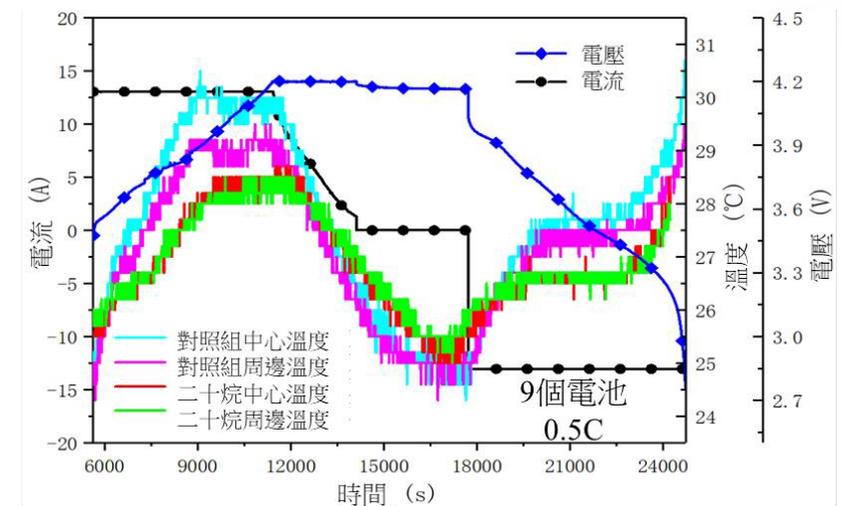


圖 4.17 0.5C 倍率下充放電時 9 組電池組內的溫度特性曲線

4.4.2.2.2 1C 充放電倍率

1C 充放電倍率下九組電池組溫度特性的測試結果如圖 4.18 所示。充電時，對照組中心最高溫度為 40.7°C，周邊最高溫度為 37°C，最大溫差為 4.3°C；加入二十烷的電池組中心最高溫度為 32.3°C，周邊最高溫度為 31.5°C，最大溫差為 1.3°C。

放電時，對照組中心最高溫度為 41.7°C，周邊最高溫度為 37.2°C，最大溫差為 4.5°C；加入二十烷的電池組中心最高溫度為 32.6°C，周邊最高溫度為 31.5°C，最大溫差為 1.4°C。

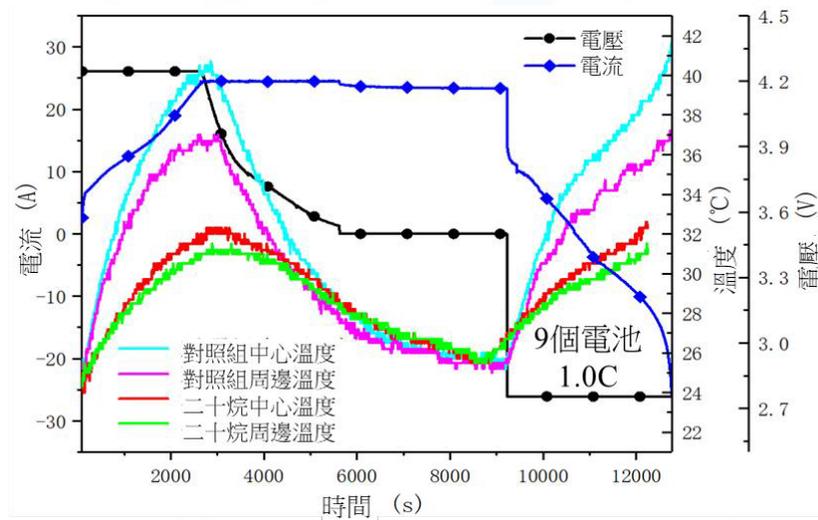


圖 4.18 1C 倍率下充放電時 9 組電池組內的溫度特性曲線

4.4.2.2.3 2C 充放電倍率

2C 充放電倍率下九組電池組溫度特性的測試結果如圖 4.19 所示。充電時，對照組中心最高溫度為 54.7°C，周邊最高溫度為 47.7°C，最大溫差為 7.6°C；加入二十烷的電池組中心最高溫度為 35°C，周邊最高溫度為 33.7°C，最大溫差為 2°C。

放電時，對照組中心最高溫度為 62°C，周邊最高溫度為 52.7°C，最大溫差為 9.3°C；加入二十烷的電池組中心最高溫度為 36.5°C，周邊最高溫度為 34.7°C，最大溫差為 2°C。

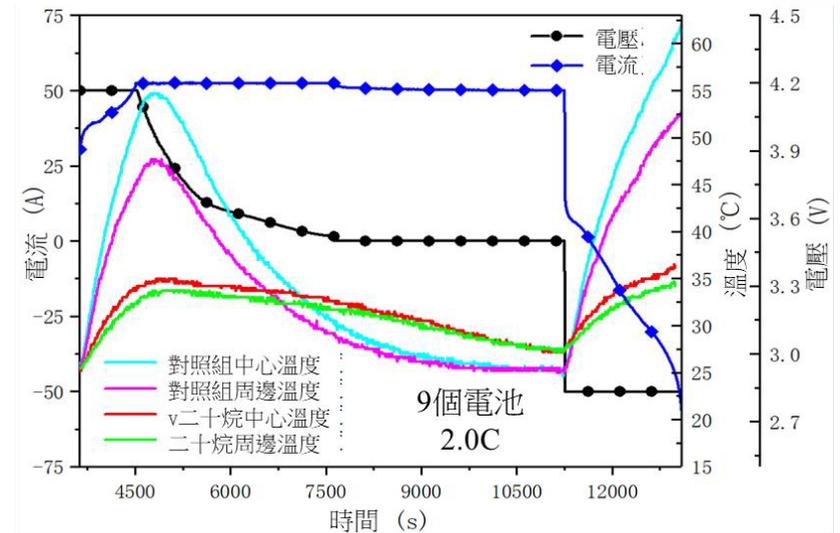


圖 4.19 2C 倍率下充放電時 9 組電池組內的溫度特性曲線

4.4.2.2.4 充放電倍率下電池組溫度特性的測試結果整合

將上述結果整理成圖表如下：

表 4.8 充電時 9 組電池組溫度和溫差

充電倍率	對照組中心溫度/°C	對照組周邊溫度/°C	對照組最大溫差/°C	二十烷中心溫度/°C	二十烷周邊溫度/°C	二十烷最大溫差/°C
0.5C	30.5	29.5	1.5	28.7	28.5	0.5
1C	40.7	37	4.3	32.3	31.5	1.3
2C	54.7	47.7	7.6	35	33.7	2

表 4.9 放電時 9 組電池組溫度和溫差

放電倍率	對照組中心溫度/°C	對照組周邊溫度/°C	對照組最大溫差/°C	二十烷中心溫度/°C	二十烷周邊溫度/°C	二十烷最大溫差/°C
0.5C	30.7	29.5	1.5	28	28	0.8
1C	41.7	37.2	4.5	32.6	31.5	1.4
2C	62	52.7	9.3	36.5	34.7	2

備注：正二十烷基泡沫鋁複合材料電池堆在 2C 充放電過程中,電堆內部正二十烷發生了融化，說明電池溫度已經超過了正二十烷的融化溫度，如圖 4.20 所示。

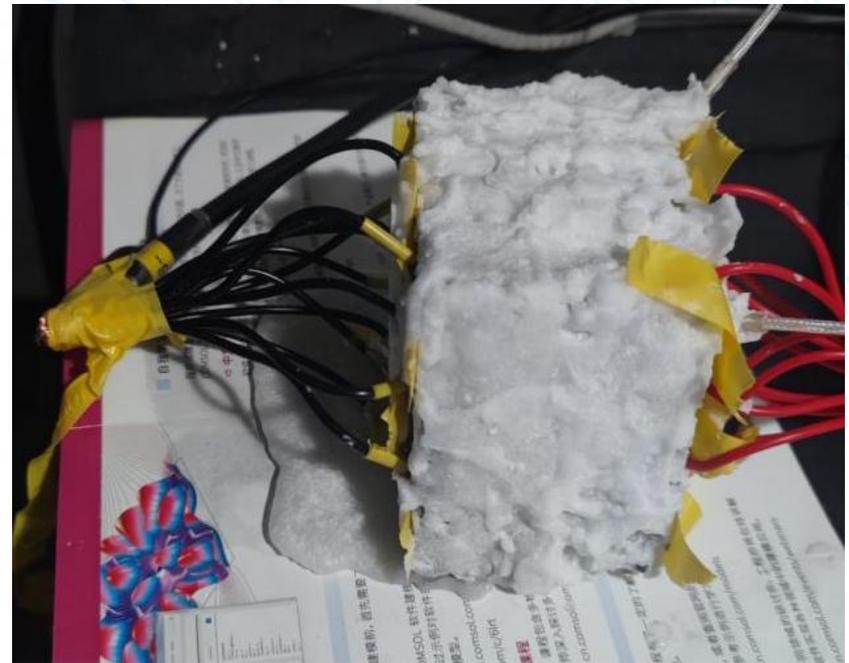


圖 4.10 融化的正二十烷

4.4.3 正十八烷基泡沫鋁複合材料電池組

4.4.3.1 4 組電池組成的電池組試驗

對由 4 組電池構成的基於正十八烷相變材料的電池組進行充電-靜置-放電的循環，充放電倍率分別為 0.5C、1C 和 2C，其中靜置時間 1 小時。

4.4.3.1.1 0.5C 充放電倍率

0.5C 充放電倍率下四組電池組溫度特性的測試結果如圖 4.21 所示。充電時，對照組中心最高溫度為 29.7°C，周邊最高溫度為 29.5°C，最大溫差為 1.7°C；加入十八烷的電池組中心最高溫度為 27.7°C，周邊最高溫度為 27.7°C，最大溫差為 0.5°C。

放電時，對照組中心最高溫度為 30.5°C，周邊最高溫度為 30.2°C，最大溫差為 1.9°C；加入十八烷的電池組中心最高溫度為 27.7°C，周邊最高溫度為 27.7°C，最大溫差為 0.3°C。

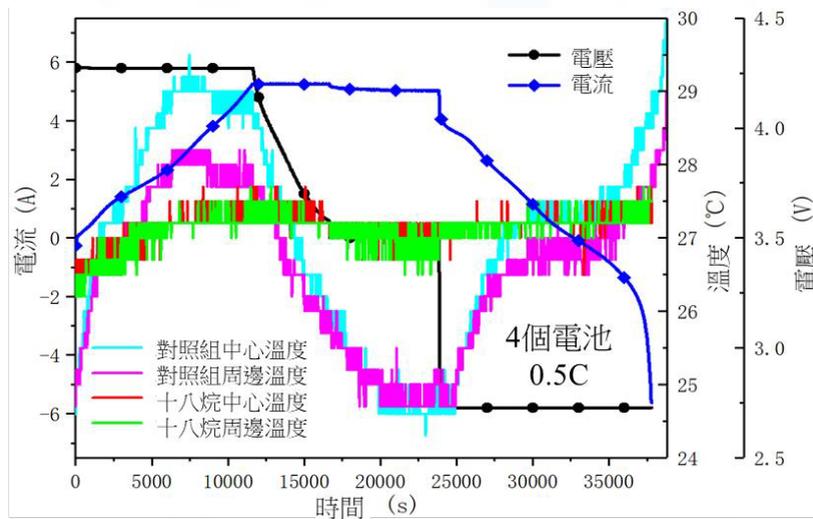


圖 4.21 0.5C 倍率下充放電時四組電池組的溫度特性曲線

4.4.3.1.2 1C 充放電倍率

1C 充放電倍率下四組電池組溫度特性的測試結果如圖 4.22 所示。充電時，對照組中心最高溫度為 36.5°C，周邊最高溫度為 35°C，最大溫差為 1.8°C；加入十八烷的電池組中心最高溫度為 28.5°C，周邊最高溫度為 28.2°C，最大溫差為 0.8°C。

放電時，對照組中心最高溫度為 37.7°C，周邊最高溫度為 35.7°C，最大溫差為 2°C；加入十八烷的電池組中心最高溫度為 28.7°C，周邊最高溫度為 28.5°C，最大溫差為 0.5°C。

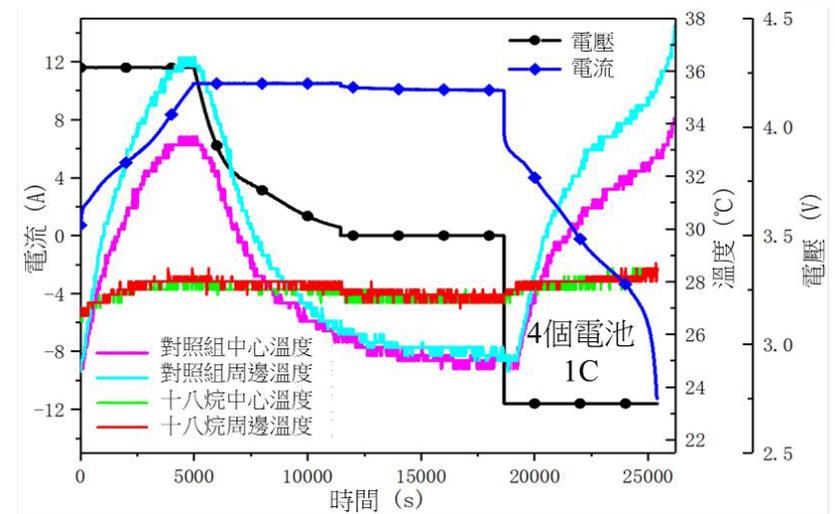


圖 4.22 1C 倍率下充放電時四組電池組內的溫度特性曲線

4.4.3.1.3 2C 充放電倍率

2C 充放電倍率下四組電池組溫度特性的測試結果如圖 4.23 所示。充電時，對照組中心最高溫度為 44.5°C，周邊最高溫度為 39.6°C，最大溫差為 5.5°C；加入十八烷的電池組中心最高溫度為 29.2°C，周邊最高溫度為 29.2°C，最大溫差為 0.5°C。

放電時，對照組中心最高溫度為 51.2°C，周邊最高溫度為 44.2°C，最大溫差為 7.3°C；加入十八烷的電池組中心最高溫度為 32°C，周邊最高溫度為 31.5°C，最大溫差為 0.5°C。

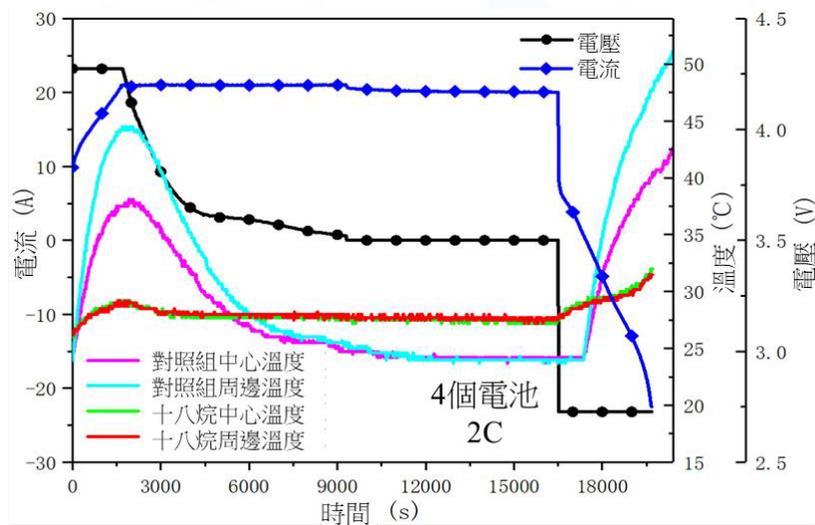


圖 4.23 2C 倍率下充放電時四組電池組內的溫度特性曲

4.4.3.1.4 充放電倍率下電池組溫度特性的測試結果整合

將上述結果整理成圖表如下：

表 4.10 充電時四組電池組溫度和溫差

充電倍率	對照組中心溫度/°C	對照組周邊溫度/°C	對照組最大溫差/°C	十八烷中心溫度/°C	十八烷周邊溫度/°C	十八烷最大溫差/°C
0.5C	29.7	29.5	1.7	27.7	27.7	0.5
1C	36.5	35	1.8	28.5	28.2	0.8
2C	44.5	39.6	5.5	29.2	29.2	0.5

表 4.11 放電時四組電池組溫度和溫差

放電倍率	對照組中心溫度/°C	對照組周邊溫度/°C	對照組最大溫差/°C	十八烷中心溫度/°C	十八烷周邊溫度/°C	十八烷最大溫差/°C
0.5C	30.5	30.2	1.9	27.7	27.7	0.3
1C	37.7	35.7	2	29.2	29.2	0.5
2C	51.2	44.2	7.3	32	31.5	0.5

4.4.3.2 9 組電池組成的電池組試驗結果

本實驗中，對 9 個電池組成的電池組進行充電-靜置-放電的循環，充放電倍率分別為 0.5C、1C 和 2C，靜置時間 1 小時。

4.4.3.2.1 0.5C 充放電倍率

0.5C 充放電倍率下九組電池組溫度特性的測試結果如圖 4.24 所示。充電時，對照組中心最高溫度為 30.5°C，周邊最高溫度為 29.5°C，最大溫差為 1.5°C；加入十八烷的電池組中心最高溫度為 28°C，周邊最高溫度為 27.7°C，最大溫差為 0.8°C。

放電時，對照組中心最高溫度為 30.7°C，周邊最高溫度為 29.5°C，最大溫差為 1.5°C；加入十八烷的電池組中心最高溫度為 28°C，周邊最高溫度為 27.7°C，最大溫差為 0.8°C。

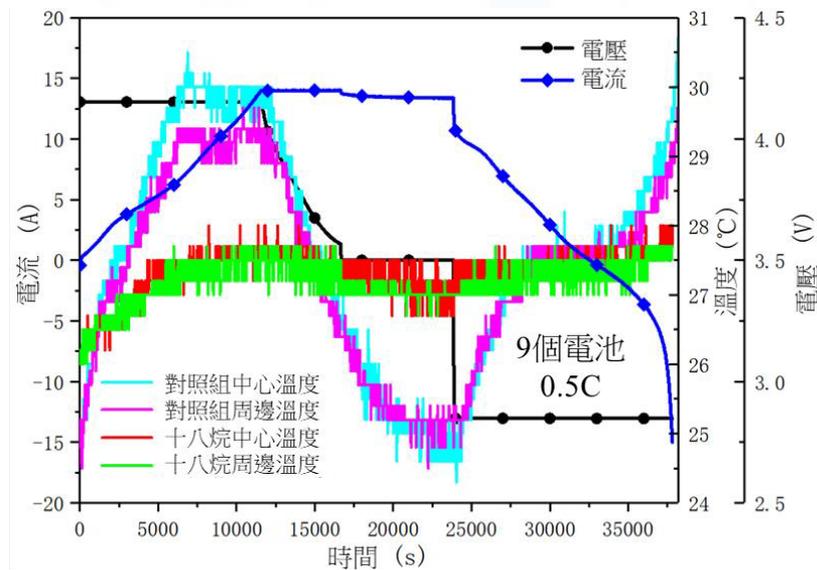


圖 4.24 0.5C 倍率下充放電九組電池組內的溫度特性曲線

4.4.3.2.2 1C 充放電倍率

1C 充放電倍率下九組電池組溫度特性的測試結果如圖 4.25 所示。充電時，對照組中心最高溫度為 40.7°C，周邊最高溫度為 37°C，最大溫差為 4.3°C；加入十八烷的電池組中心最高溫度為 28.7°C，周邊最高溫度為 28.2°C，最大溫差為 1°C。

1C 放電時，對照組中心最高溫度為 41.7°C，周邊最高溫度為 37.2°C，最大溫差為 4.5°C；加入十八烷的電池組中心最高溫度為 29.7°C，周邊最高溫度為 29.5°C，最大溫差為 0.8°C。

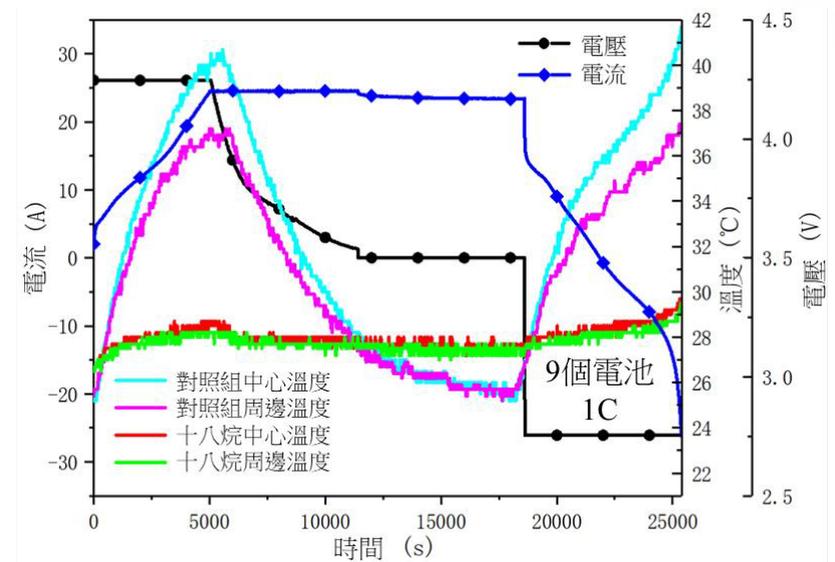


圖 4.25 1C 倍率下充放電時九組電池組內的溫度特性曲線

4.4.3.2.3 2C 充放電倍率

1C 充放電倍率下九組電池組溫度特性的測試結果如圖 4.26 所示。充電時，對照組中心最高溫度為 54.7°C，周邊最高溫度為 47.7°C，最大溫差為 7.6°C；加入十八烷的電池組中心最高溫度為 30.5°C，周邊最高溫度為 29.7°C，最大溫差為 1°C。

放電時，對照組中心最高溫度為 62°C，周邊最高溫度為 52.7°C，最大溫差為 9.3°C；加入十八烷的電池組中心最高溫度為 38°C，周邊最高溫度為 36.7°C，最大溫差為 1.5°C。

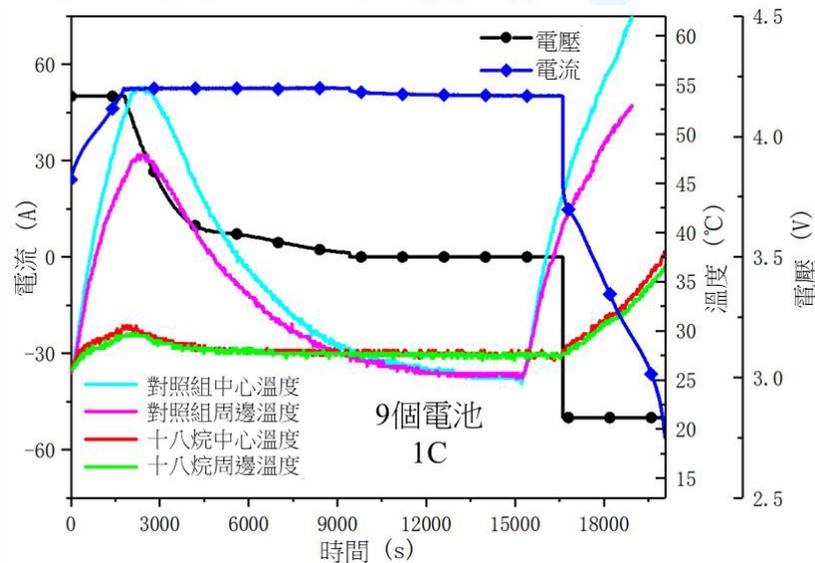


圖 4.26 2C 倍率下充放電時九組電池組內的溫度特性曲線

4.4.3.2.4 充放電倍率下電池組溫度特性的測試結果整合

將上述結果整理成圖表如下：

表 4.12 充電時 9 組電池組溫度和溫差

充電倍率	對照組中心溫度 /°C	對照組周邊溫度 /°C	對照組最大溫差 /°C	十八烷中心溫度 /°C	十八烷周邊溫度 /°C	十八烷最大溫差 /°C
0.5C	30.5	29.5	1.5	28	27.7	0.8
1C	40.7	37	4.3	28.7	28.2	1
2C	54.7	47.7	7.6	30.5	29.7	1

表 4.13 放電時 9 組電池組溫度和溫差

放電倍率	對照組中心溫度 /°C	對照組周邊溫度 /°C	對照組最大溫差 /°C	十八烷中心溫度 /°C	十八烷周邊溫度 /°C	十八烷最大溫差 /°C
0.5C	30.7	29.5	1.5	28	27.7	0.8
1C	41.7	37.2	4.5	29.7	29.5	0.8
2C	62	52.7	9.3	38	36.7	1.5

5

相變材料電池系統 之熱管理傳熱強化

5.1 簡介

本項目利用相變物料開發一組嶄新的溫度管理系統供汽車電池使用，務求令汽車電池的運作溫度以輕微的偏差維持在最理想水平。相變物料的高潛熱和高熱容量的特質使其能夠在相變的過程中吸引或釋放大量熱能，鄰近溫度因此能夠穩定地維持在相若水平。

針對汽車電池的溫度管理，電池的最佳運作溫度約為攝氏 40 度，石蠟因其穩定可靠的特點並適用於相應的溫度範圍，可作為項目合適的相變物料。對於裝置的構造，我們會利用發泡鋁作支撐物料，並加上多層式的石蠟以便散熱。溫度管理裝置將會直接接觸電池表面以促進傳熱效能，由此可在電池運作時將溫度維持在最佳水平。

透過此項目，香港電池及汽車製造商與電動車能受惠於這套新裝置和技術，並能有效提升電池續航力和壽命，同時保持電池運作時的穩定表現。本章中，曾分別在不同放電倍率下對該電池熱管理裝置的溫控效果進行了深化研究。通過對比有無相變模塊的不同電池熱管理裝置的溫度特性，深入研究了不同石蠟相變材料對鋰電池熱管理的影響。

5.2 電池測試系統及方法

本項目中測試系統主要包括電池測試系統、防爆試驗箱、數據採集系統、熱電偶等裝置。圖 5.1 為實驗測試系統實物圖。測試過程中，將所測電池組置於環境溫度下進行不同倍率持續放電，具體實驗步驟為：

- 1) 將電池組置於試驗箱內，調節至環境溫度，通過恆流恆壓充電發將電池組充電之 SOC100%，恆定電壓為~42V。
- 2) 將充電後的電池組靜置 30 分鐘後在不同放電倍率下進行恆流放電測試，同時利用熱電偶裝置持續採集電池組內各部分在放電過程中的溫度值。熱電偶需插入電池組的控溫模塊中並完全接觸相變材料以保證溫度測量的有效性。熱電偶的佈置放置為：電池組中部、電池組上層及下層，熱電偶之間的水平排列需均勻分佈。
- 3) 放電結束後，將電池組冷卻至環境溫度並靜置 3 小時後取出。重讀上述步驟以完成所有測試。



圖 5.1 電池測試系統

5.3 相變材料電池組（26 組電池）製備

5.3.1 電池測試系統結構設計

本測試中共有兩個測試組，分別為相變材料電池組及無相變材料電池組。每個電池組均選取 26（9+8+9 順序排列）個相同型號的 18650 鋰離子電池，採用串並連組合的連接方式進行組裝。電池的電機之間採用鍍片電焊鏈接。為定量分析兩組裝置，電池組製備過程需保證尺寸、單體電池的間距及連接方式均一致。

5.3.2 無相變材料電池組裝置製備

將 26 個單體電池按照上述連接方式與電池座組裝，按一正一負的規律排列。圖 5.2 為電池包組裝工序流程，包括（1）電池座及熱電偶安裝；（2）電池安裝；（3）電池與電池座組裝；（4）電池包焊接。組裝過程中，需保證電池排列整齊，焊點均接觸良好，焊接好之後各組電池的線路清晰並測量各路電壓是否良好。

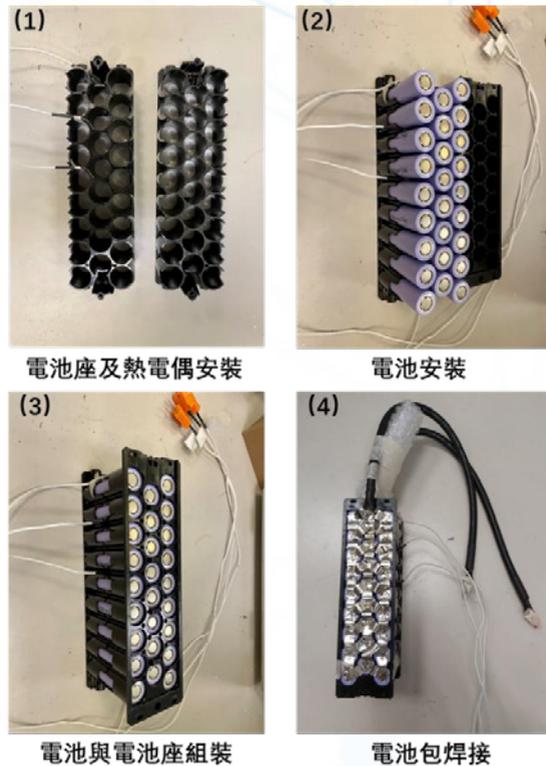


圖 5.2 為電池包組裝工序流程

5.3.3 相變材料電池組裝置製備

相變材料電池組裝置製備過程中，將 26 個單體電池按照上述連接方式與泡沫鋁骨架組裝，按並聯方式排列。相較於無相變材料電池組，相變材料電池組裝置將石蠟作為相變材料填充電池和殼體之間以改進電池組的傳熱效率。為了減小電池系統的整體質量，本項目採用密度小、易加工、多孔結構的泡沫鋁結構作為電池組金屬外殼。泡沫鋁的添加也可固定單體電池及提升電池組熱管理系統傳熱效率。電池在工作時產生的熱量以相變潛熱的形式儲存於石蠟相變材料中進行熱量緩衝，之後儲存在相變材料中的熱量即可通過金屬骨架外殼空隙散發到電池裝置外部環境。

此外，本設計中泡沫鋁骨架採用與對照組（5.2.1 無相變材料電池組裝置）中電池座類似的套管結構，從而有效提升相變材料的換熱面積及電池組裝置體積。圖 5.3 為相變材料電池包組裝工序流程，包括（1）泡沫鋁製備及熱電偶安裝；（2）電池與泡沫鋁組裝；（3）石蠟澆注；（4）電池組表面清潔；（5）電池組焊接。組裝過程中，需保證電池排列整齊，焊點均接觸良好，焊接好之後各組電池的線路清晰並測量各路電壓。

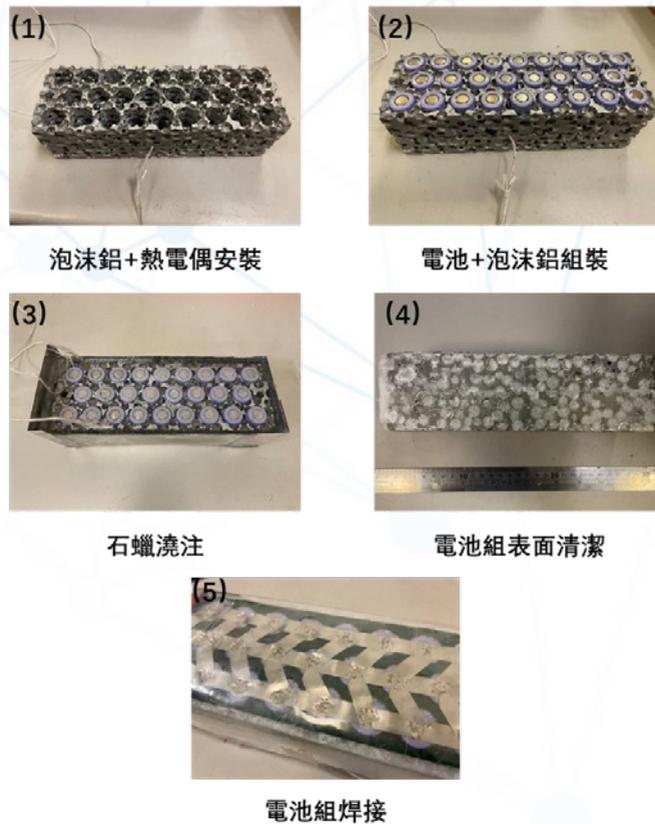


圖 5.3 為相變材料電池包組裝工序流程

5.4 相變材料電池熱管理系統傳熱強化分析

5.4.1 相變材料電池熱管理系統傳熱原理

本項目通過開發一套基於相變材料的鋰電池熱管理系統，以實現電池組傳熱強化，從而提升電動汽車電池系統的安全係數，延長電池使用壽命。該熱管理系統中，隨著放電過程中電池組內部溫度不斷上升，相變材料從固態轉變為液態的過程中會吸收大量熱量，因此可以對電池組進行有效散熱。相變材料熱管理系統是將電池組與相變材料結合，再將其安裝在電池模組裡，從而利用材料的相變潛熱實現電池熱能的傳遞。

本相變材料電池熱管理系統中金屬多孔骨架對石蠟有吸附作用，然而無法徹底解決相變材料高溫融化後產生的材料泄露問題。因此，為使實驗條件能涵蓋相變材料這一問題，該電池測試選取環境溫度 20°C、放電倍率為 0.5C 的產熱性能作為分析基準。

5.4.2 無相變材料電池組裝置傳熱分析

0.5C 充放電倍率下 26 組電池組溫度特性的測試結果如圖 5.4-5.5 所示。充電時，無相變材料電池組中心最高溫度為 43°C，周邊最高溫度約為 50°C，最大溫差為 7°C。放電時，無相變材料電池組中心最高溫度為 49°C，周邊最高溫度為 55°C，最大溫差為 6°C。

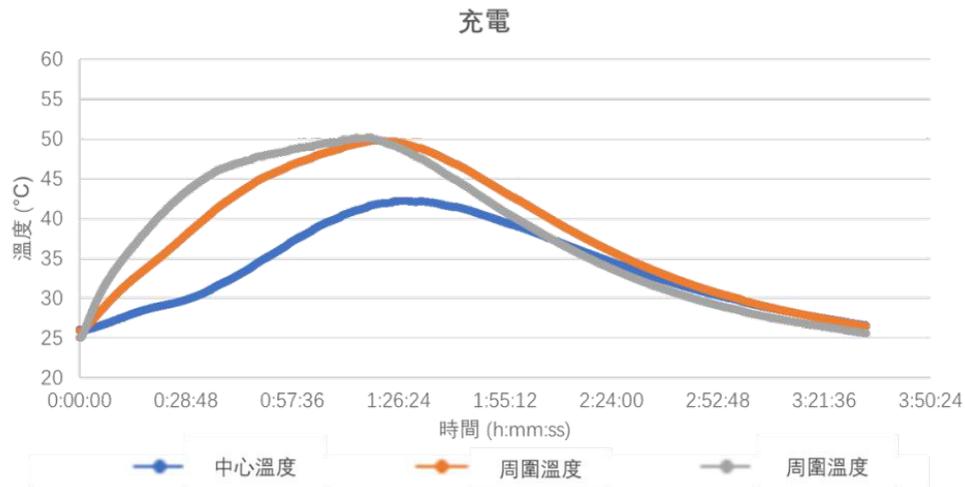


圖 5.4 0.5C 倍率下充電時電池組內的溫度變化曲線

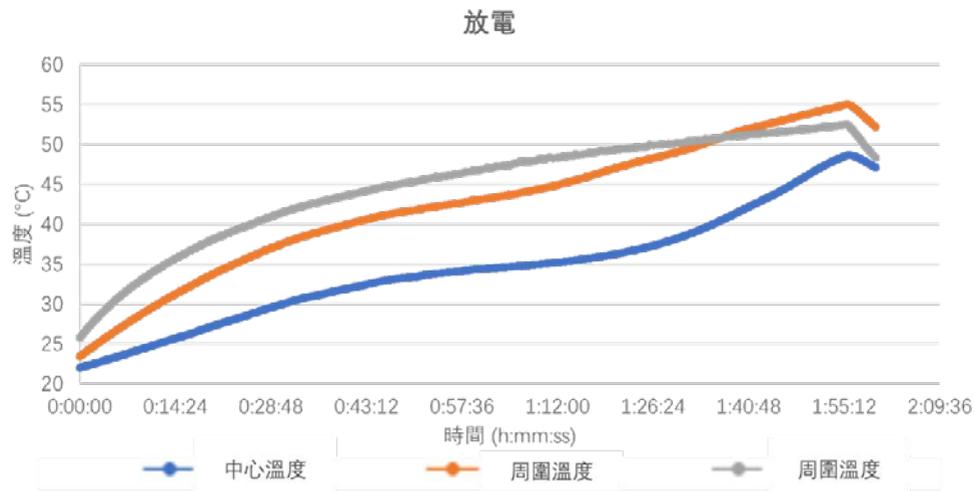


圖 5.5 0.5C 倍率下放電時電池組內的溫度變化曲線

5.4.3 相變材料電池組裝置傳熱分析

5.4.3.1 月桂酸基電池組裝置傳熱分析

0.5C 充放電倍率下 26 組電池組溫度特性的測試結果如圖 5.6-5.7 所示。充電時，加入月桂酸的電池組中心最高溫度為 33°C，周邊最高溫度為 32°C，最大溫差為 1°C。放電時，加入月桂酸的電池組中心最高溫度為 37°C，周邊最高溫度為 35°C，最大溫差為 2°C。

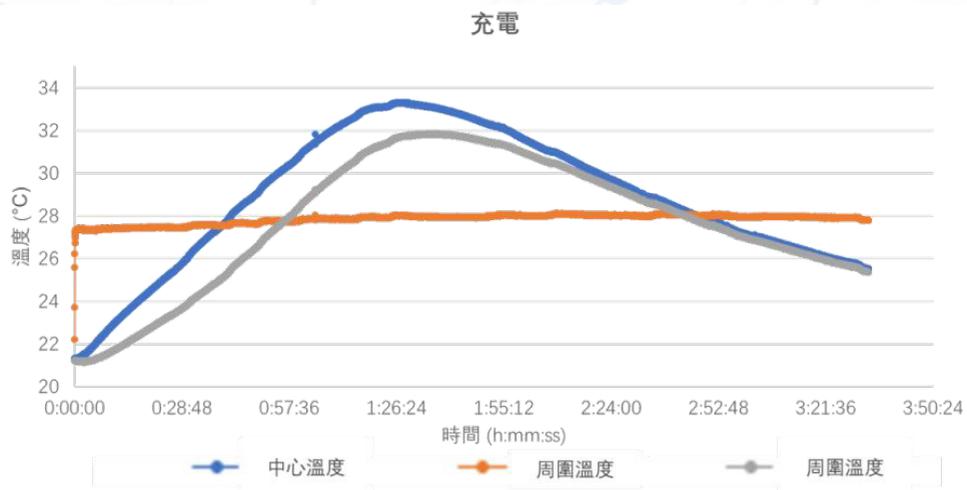


圖 5.6 0.5C 倍率下充電時電池組內的溫度變化曲線

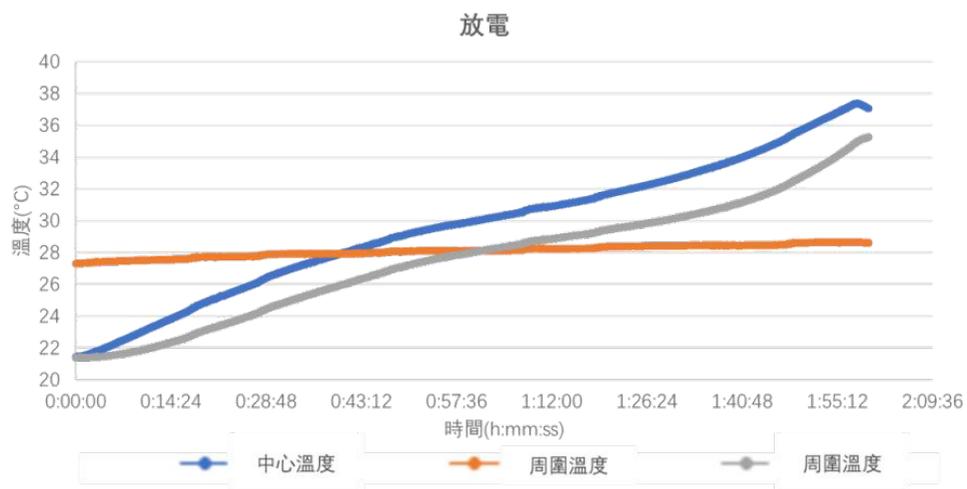


圖 5.7 0.5C 倍率下放電時電池組內的溫度變化曲線

5.4.3.2 正二十烷基電池組裝置傳熱分析

0.5C 充放電倍率下 26 組電池組溫度特性的測試結果如圖 5.8-5.9 所示。充電時，加入正二十烷的電池組中心最高溫度為 27°C，周邊最高溫度為 28°C，最大溫差為 1°C。放電時，加入正二十烷的電池組中心最高溫度為 27.7°C，周邊最高溫度為 27.5°C，最大溫差為 0.5°C。

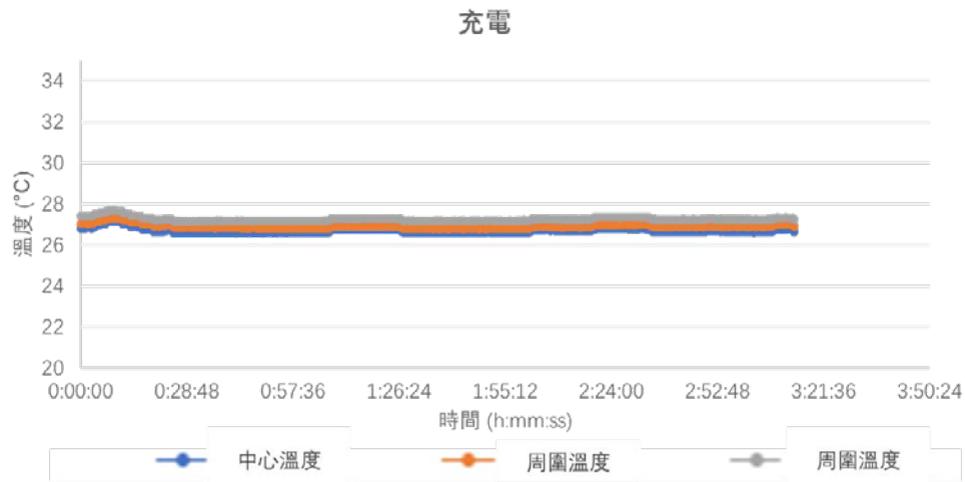


圖 5.8 0.5C 倍率下充電時電池組內的溫度變化曲線

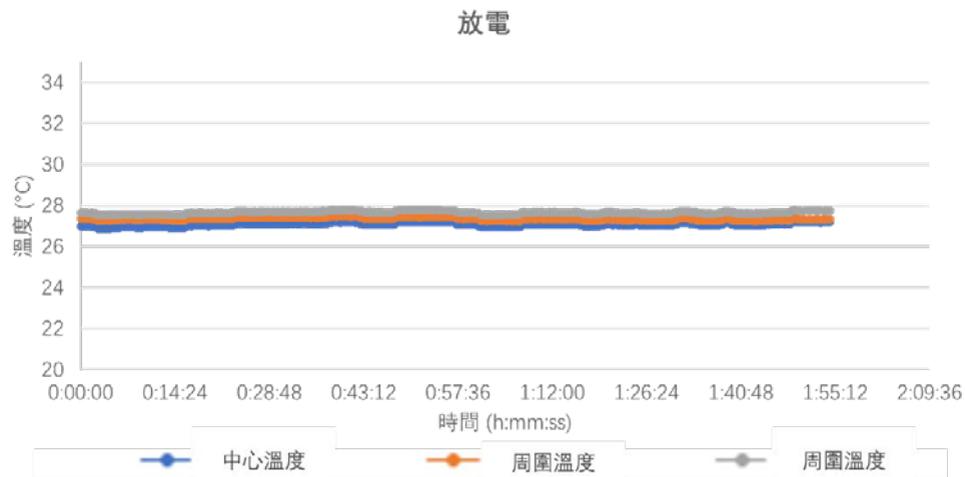


圖 5.9 0.5C 倍率下放電時電池組內的溫度變化曲線

5.4.3.3 正十八烷基電池組裝置傳熱分析

0.5C 充放電倍率下 26 組電池組溫度特性的測試結果如圖 5.10-5.11 所示。充電時加入十八烷的電池組中心最高溫度為 35°C，周邊最高溫度為 34°C，最大溫差為 1°C。放電時，加入十八烷的電池組中心最高溫度為 35°C，周邊最高溫度為 33°C，最大溫差為 2°C。

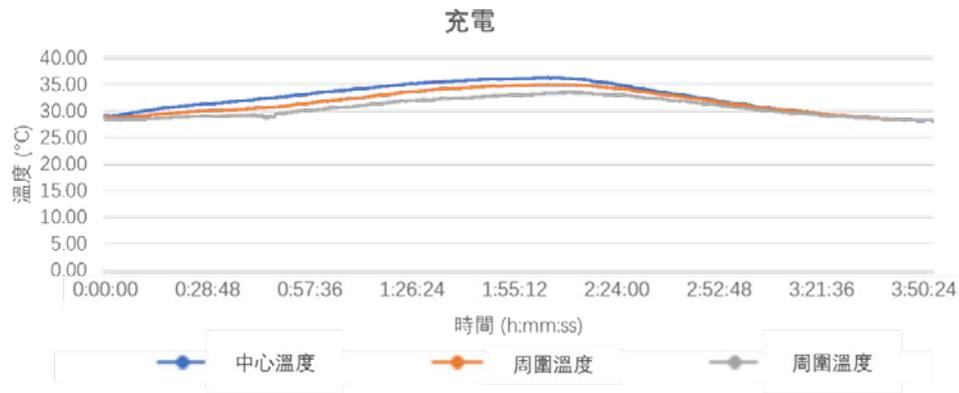


圖 5.10 0.5C 倍率下充電時電池組內的溫度變化曲線

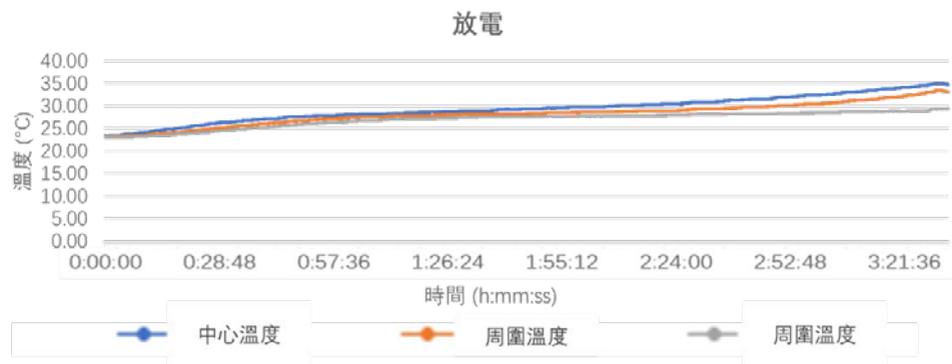


圖 5.11 0.5C 倍率下放電時電池組內的溫度變化曲線

5.4.4 測試分析總結

基於上述測試及分析，該電池溫度管理系統具有如下五點優勢：

- 1) 相變材料的添加可有效控制電池組的平均溫度，在 0.5C 的放電速率下，電池組的平均溫度在環境溫度 20 °C 時降低了 40%；
- 2) 相變材料可以提高電池組的溫度均勻性，在環境溫度 20 °C、放電速率 0.5C 條件下，電池組內溫差維持在 2-3°C，說明複合相變材料控溫模塊可有效保證電池組內部的溫度均勻性；
- 3) 隨著環境溫度上升，電池組的平均溫度也相應提高，但因為電池內阻隨著溫度的升高而降低，電池組的溫升值也會相應地降低，極大優化了電池所在熱管理系統的運行效率；
- 4) 此類石蠟相變材料環保無污染，對環境友好，響應國家現有的節能環保政策；
- 5) 相較於現今市場上常用的氣體式冷卻和液體式冷卻，採用相變材料的電池熱管理系統部件較少且結構簡單，無需動力電池輸出額外能量，因此結構設計成本更低。

6

相變材料電池系統 之材料成本分析

6.1 原材料成本分析

根據 2021 年原材料採購價格，正十八烷、正二十烷和月桂酸的價格分別為港幣 2,400 元/公斤，2,500 元/公斤和 1,700 元/公斤。26 顆鋰電池泡沫鋁骨架價格為港幣 3,000 元/個，每個電池包焊點鍍片和絕緣墊片價格為港幣 1 元/米和 10 元/片。另外，絕緣密封盒價格為港幣 150 元/個。

6.2 相變材料電池系統成本分析

基於上述材料單價，每組相變泡沫鋁複合材料熱鋰電池包（26 組鋰電池）需要耗費 300 克石蠟材料，因此上述三種石蠟類材料以及按照總量 1:1:1 配比的混合石蠟複合材料的成本分別為港幣 720 元/個，750 元/個，510 元/個和 660 元/個。此外，每組鋰電池包要 10 米鍍片和 2 片絕緣墊片。綜上計算，對於採用石蠟+泡沫鋁骨架複合材料進行鋰電池包熱管理的成本為表 6.1 所示。

7

結論與展望

表 6.1 相變材料電池系統之成本資訊匯總

相變材料	成本 (港幣/元)
正十八烷	2250
正二十烷	2280
月桂酸	2040
三類石蠟混合	2190

然而，現在市場泛使用的通過水冷板實現熱管理的鋰電池包的成本投入是港幣 3,000 元以上。由此可見引入相變材料對鋰電池熱管理系統有更低成本和更高效能的綜合優勢。

7.1 結論

為解決能源系統中功耗失衡、能量利用不合理，能量利用率低等問題，相關研究者提出利用複合相變材料從多種角度兼取傳統汽車電池能量管理材料之優勢，克服傳統熱管理材料之劣勢，助力於汽車電池熱管理等工業應用場合能量管理之優化配置，實現碳中和背景下汽車電池工業的發展，助力於工業生產、製造、使用環節的環境保護需求。利用複合相變材料的優良熱管理性能，經特殊設計之複合相變材料已應用於汽車電池工業高端產品的前沿應用。

針對汽車電池工業中複合相變材料之應用發展，本項目研究表明複合相變材料兼具有機及無機類相變材料之綜合優勢：既充分利用有機相變材料穩定性高、相變溫度點範圍大、相容性好、熱值高之優點，亦兼取無機類相變材料之導熱率高、熱值高、使用期間/體積變化小、經濟性高之優點。相對於傳統有機相變材料，避免了使用單一材料導熱率低、體積變化率大、使用過程有危險性的缺點；相對於傳統無機相變材料，克服了其過冷度較大、對系統有一定腐蝕性的弊端。

7.2 展望

由於採用複合相變材料可實現結構簡單、溫控穩定、無需額外能耗之優勢，相變材料已廣泛應用於電池熱管理產品研發方面，目前已有相關企業推出集絕緣、阻燃、抗衝擊、冷卻和均溫五大功能為一體的高性能相變材料，為新能源汽車動力電池提供安全經濟的熱管理方案。未來在實際產品應用過程中，需充分挖掘相變材料相變過程中溫度變化範圍小、可吸收/釋放大量熱能的優勢，在汽車電池等工業領域深入探索相變材料的應用潛能：

- 1) 研製適合不同環境下使用、相變潛熱高、無毒、無腐蝕、無降解、無異味等物性良好且造價低廉、滿足商業化生產的相變材料。其應用場景可覆蓋汽車工業中電池熱管理等前沿領域，提升現有汽車電池系統之熱管理水平，並助力於節能環保之現實需求；
- 2) 通過軟件分析進一步推動相變蓄熱領域的研究，開發相變分析軟件進而建立相變材料大數據庫等，以便於日後虛擬仿真實驗研究及各領域的材料智能選擇。利用材料科學最新研究成果，並結合軟件工程領域之先進經驗，得到相關複合相變材料性能數據，為利用大數據技術優化複合相變材料之優化設計提供依據；
- 3) 優化封裝技術、製備過程及工藝，使所設計之符合相變材料可快速應用於汽車電池等工業產品；

- 4) 深入研究強化傳熱輔助技術、工具對於材料體系整體的影響，如加入肋片強化傳熱等。

針對用於汽車工業的複合型相變材料，當利用複合相變材料改善汽車電池的熱管理性能時，若相變材料的用量固定不變，在高溫環境下需要將相變材料吸收的熱量快速導出系統，然而在低溫環境下需要利用相變材料對電池進行保溫處理，這兩種極端環境對於汽車電池的熱管理系統所提出的要求是互相矛盾，因此，如何優化複合相變材料設計，調整汽車電池的熱管理方案，實現達到上述兩個要求，則需要利用相變材料與其他熱管理手段相結合並進行系統性、結構性的優化設計。

在本刊物／活動內(或由項目小組成員)表達的任何意見、研究成果、結論或建議，並不代表香港特別行政區政府、創新科技署或創新及科技基金一般支援計劃評審委員會的觀點。

Any opinions, findings, conclusions or recommendations expressed in this material/event (or by members of the project team) do not reflect the views of the Government of the Hong Kong Special Administrative Region, the Innovation and Technology Commission or the Vetting Committee of the General Support Programme of the Innovation and Technology Fund.