

鋰離子電池的熱管理與單相浸液冷卻

摘要—有效的熱管理技術的發展對於實現進一步的技術進步和鋰離子電池儲能器的廣泛公眾認可至關重要。固定電池組和電動汽車（“EV”）電池都以壓制的方式來取得更快的 C 速率進行充電和放電，增加了安培小時容量，延長了使用壽命，並提高了安全性。所有這些都取決於更有效，更安全的散熱管理解決方案。傳統的空氣冷卻和間接液體冷卻（水冷板）方法在有效性和重量上都有局限性。

Engineered Fluids 最近完成了一系列實驗，證明了單相浸液冷卻（SLIC）技術對鋰離子電池的熱管理具有很高的效率。本文回顧了這些實驗的結果，並討論了電池熱管理的一些問題和解決方案，並概述了電池熱管理系統的正确設計。我們將討論以下主題：直接式冷卻與間接式冷卻，液體冷卻與空氣冷卻，冷卻與加熱與僅冷卻系統，以及 VRLA(閥門調節鉛-酸蓄電池)，NiMH(鎳氫電池)和鋰離子電池的熱管理相對需求。

介紹

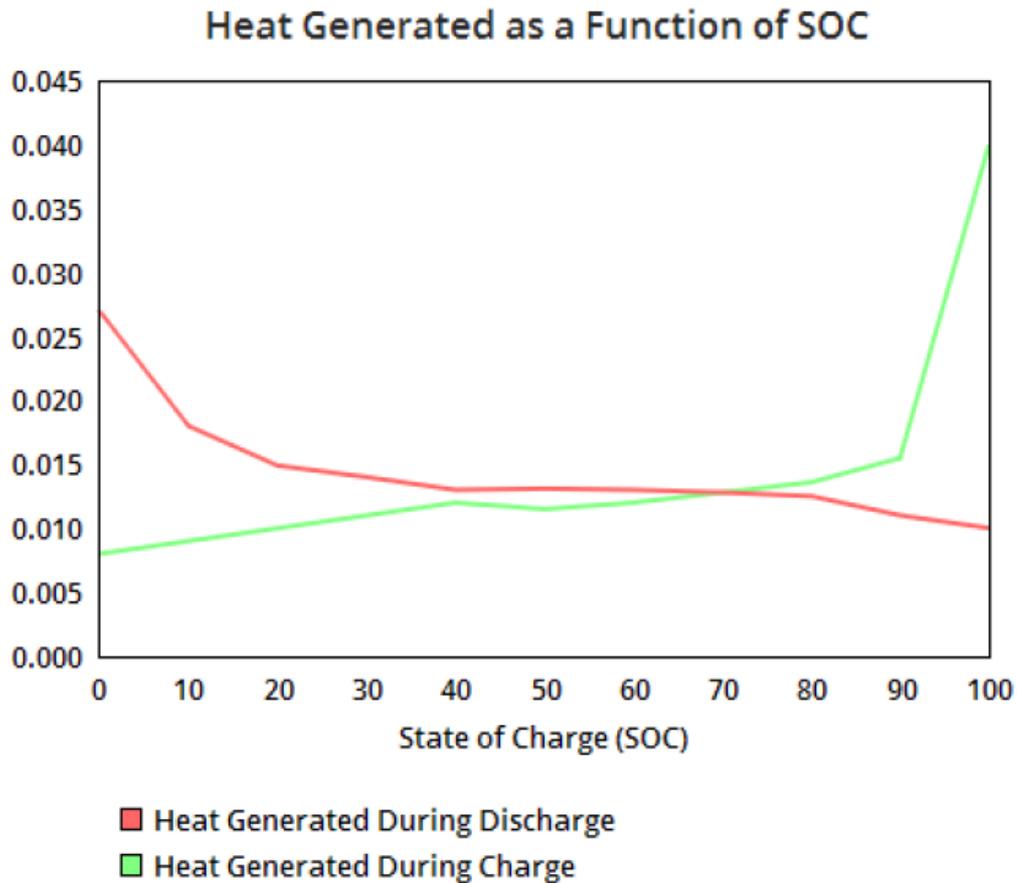
一、電池發熱

在充電和放電週期中，鋰離子（Li-Ion）電池內部會產生大量熱量。這種熱量主要是由放熱化學反應產生的，以及活化能，離子遷移阻力和化學傳輸的耗損。[4] [5] [6]絕大部分熱量都是在充放電極限時產生的。在充電狀態下通常很少產生熱量（SOC）在 20%至 80%之間[1,2]，如圖 1 所示。

鋰離子電池在運行過程中因某些因素的組合進一步增加了熱能的產生。以下因素會增加鋰離子電池產生熱能：更快（更短的持續時間）的充電或放電週期，更短的充電/放電週期之間的“休息”時間，由於離子遷移途徑退化而導致的電池老化。電池製造商稱，比額定額定值高出 35%至 70%的情況並不罕見。

[3]在整個電池壽命，溫度較低時，熱量也會增加。

圖 1.以 1 C 速率循環產生的熱量，顯示了產生的熱量與荷電狀態的關係



二、電池和模組中的熱傳遞

電池儲能系統最常見的是由多個電壓相同，額定安培小時數和化學性質的多個獨立電池組成，這些電池串聯並並聯連接在連結片上，以創建具有所需電壓和額定安培小時數的單個電池模組。這樣的電池模組包括框架或外殼，在其中容納電池以保持其定向並且在許多情況下促進單個電池的冷卻。如今，大多數固定電池陣列系統都使用空氣作為冷卻電池模組的介質。在電動汽車電池系統中，使用空氣冷卻或間接的“水冷板”冷卻，或者在某些情況下，將空氣板和冷卻板混合用於電池模組冷卻。

描述電池的穩態傳熱方程電池冷卻為： $Q_{BAT} = U' A(T_{BAT} - T_{Avg2,3})$

其中 U' [單位： $W / ^\circ C$]是組合的傳熱係數，它既使用從單元內部到單元表面和單元接線片的傳導性熱傳遞，又使用從單元表面和單元之間到空氣的對流傳熱。冷卻表面通常是電池模組的外殼和/或金屬接線片。

該方程式可以簡化為僅使用熱量的方程式傳輸介質（空氣，水或電介質冷卻劑）的特性：

$$QBAT = (F r Cp(T3 - T2))$$

F = 流量 (cm³ /秒)

Cp = 電池材料的傳熱係數

T3 = 高溫

T2 = 低溫

為了充分冷卻電池，必須滿足兩個條件。首先，所有排出的熱量必須大於產生的所有熱量，或以等式形式：

$$U' > \frac{QBAT}{TBAT - TAMB}$$

（決定傳熱係數之和必須為大於電池產生的熱量除以電池溫度和環境空氣之間允許的溫差溫度）

其次，與電池單元接觸的傳熱介質（空氣，水或電介質冷卻劑）的質量必須足以吸收電池單元產生的熱量[5]：

$$F > \frac{QBAT}{r \cdot CP \cdot \Delta T}$$

三、電池熱管理要求

熱管理以多種方式影響電池的壽命：

1. 維持電池溫度在最佳的操作區域
2. 溫度變化和循環波動越小。可保持電池內部溫度並發揮電池最大效能。並已被確定為電池化學特性的關鍵失效原因。溫度循環的波動越小是電池獲得最大效率和使用壽命的關鍵。[6]
3. 最小化每個電池的熱分層。在充電/放電循環中，電池內部的離子遷移會導致加熱不均勻，從而降低電池的充電/放電速率，並最終降低其使用壽命。
4. 通過保持均勻的溫度分佈從一個單元到另一個單元。電池之間的溫度變化電池模組中的電荷會導致不同的充電/放電。

5. 反過來，這會使模組中的電池單元電氣不平衡，從而降低了整體模組性能 [6]。電池模組的設計決定了其溫度分佈。由於以下幾個因素，模組中每個單元產生的熱量在空間上可能不均勻：物理形狀因數、長寬比、單元數量以及單元和模組的幾何形狀、模組框架和殼體的熱導率、正電極和負電極的放置，電池上接片的尺寸以及電池在模組中的電氣互連的尺寸和位置。熱量產生不均勻會導致模組中溫度分佈不均勻。

四、氣冷與水冷

傳統上，電池是通過強制通風冷卻的，鋰離子電池也不例外。空氣冷卻使用對流原理將熱量從電池或模組轉移到周圍的空氣中。引導周圍的或冷卻的空氣流過電池單元或模組的表面，該表面可能具有散熱片或增加模組表面積的另一種方式，以便於將內部產生的熱量傳遞到周圍或流動的空氣中。儘管通常被認為是一種廉價的冷卻方法，但是通過空氣進行熱管理需要將大量空氣引導或壓迫在電池模組的表面上方，通常這可以通過風扇和管道或純對流的方式實現，以將空氣團移入或吹入在模組周圍。

由於空氣承載的熱容量非常低（在標準溫度下 $C_p = 1.006 \text{ kJ / kg K}$ ），特別是當電池模組外殼與周圍空氣溫度之間的溫度差較低時，必須使用大量的空氣來傳送熱源。空氣冷卻的另一個挑戰是電池的傳熱表面必須暴露在空氣中，因此其物理位置僅限於有空氣流通或可以引導空氣的位置。這可能導致需要向系統中添加其他基礎結構和體積，以確保有足夠的空氣來冷卻系統，更不用說進行任何過濾或調節了，可能需要防止電池模組材料的腐蝕或降解。

由於對電池的新應用需求以及不斷變化的電池化學性質，這種方法正受到挑戰。需要更有效的熱管理的應用需求包括：

- 更快的充電/放電週期（更高的安培數）
- 減少週期之間的休息時間（加快週期）
- 使用壽命更長（更長的充電/放電週期）
- 更高的電池電壓
- 需要在放電過程中以及電池的整個使用壽命期間保持更穩定，恆定的電壓輸出。

傳統空氣冷卻的一種替代方法是間接液體冷卻，其中水/乙二醇溶液或介電液體

冷卻劑流經電池框架或電池模組結構內的散熱器或“水冷板”，通過傳導通路冷卻電池單元。它們與模組盒內的散熱器直接熱結合。乙二醇水冷卻液的成分具有很高的導電性，這意味著水性冷卻液不能直接與電池接線片和接線接觸。水性冷卻液的導電性將其使用範圍限制為間接冷卻方法，例如水套置於電池模組周圍或冷卻板置於電池模組中。

水/乙二醇冷卻液具有很高的比熱量（在 26.7°C 下 $C_p = 3.777 \text{ kJ/kg K}$ ），並且能有效地從散熱器中散熱。但是，由於必須通過護套/容器或散熱片的壁傳導熱量，因此降低了這種效率。另外，由於許多電池模組是由袋形或圓柱形電池組成，因此重要的是將散熱器熱結合到電池單元壁和凸耳的整個表面，以確保熱量正確地傳導至冷卻板或外罩。電池單元之間留下的任何空氣間隙都會充當隔熱材料，從而迅速降低系統的冷卻效率。通常使用高精度製造的鋁製框架和冷卻板以及電介質導熱油脂或環氧樹脂黏合劑來確保電池單元表面和框架之間沒有間隙。由於系統的整體複雜性，這種系統的製造成本可能昂貴，產率低並且故障率高。特別是製造商和用戶已經注意到，由於鋰離子電池的水性間接冷卻系統的可靠性至關重要，為確保含水溶液不會洩漏到與電池，佈線和/或其他電氣組件的接觸中，從而避免彼此短路，冷卻板和/或電池模組外殼，由於涉及的高安培數和電壓，可能會導致電池中的熱失控或對用戶造成傷害。

電池本身的傳熱速率是，通過電池模組壁，通過電絕緣水套或散熱器框架和冷卻板，是溫度梯度和不同材料的導熱係數的函數。

使用單相介電液體的直接浸泡式冷卻系統是冷卻電池單元和模組的另一種方法。通常稱為單相液體浸沒冷卻（SLIC）直接將液體浸沒冷卻，電池單元完全浸入電介質傳熱流體（電介質冷卻液）中。介電冷卻劑通常與泵一起循環，以確保介電冷卻液在系統設計中保持恆定流動，並確保與電池模組內的所有電池壁，接線片和電線連續接觸。定向冷卻液流通過直接傳導吸收單元產生的熱量，然後循環到熱傳遞裝置（例如散熱器或熱交換器），將熱能傳遞到環境中；或者，如果熱負荷足夠低，可以通過對流空氣通過電池模組或電池單元壁進行被動冷卻。

電池單元壁與電介質冷卻液之間的熱傳遞速率取決於幾個因素，包括其導熱係數，黏度，密度和電介質冷卻液的速度。對於相同的體積流量，介電冷卻液的傳熱比空氣有效得多，這是因為邊界層更薄且液體的導熱係數更高（大約 1.3 -

1.4kJ / kg K) 。這種高的熱容量使介電冷卻液的使用流量遠低於使用空氣的流量。

液體冷卻液比空氣具有更高的導熱率和熱密度，因此可以非常有效地用作冷卻介質。在這些選項中，理論上直接浸入液體單相電介質冷卻液 (SLIC) 將提供最佳性能，以最小的溫度變化，最低的成本和系統的簡化將電池單元和模組保持在正確的溫度範圍內。降低的複雜性來自於不需要任何中間散熱器框架或複雜的製造精密框架來固定電池的需求，以及由於介電液體冷卻液與系統的所有部分直接接觸而產生的熱結合。

電介質 SLIC 冷卻液比乙二醇和其他導電性冷卻液具有的主要安全優勢，它們可以與系統的所有組件直接接觸，而不會引起電池單元的熱失控，電子設備的短路故障或對用戶的電擊危險。另外，使用可生物降解的，無毒的食品級額定介電液體冷卻液，可以避免與洩漏和處置危險的乙二醇水溶液冷卻液有關的安全和環境問題。

五、浸液測試

使用單相浸液冷卻 (SLIC) 技術測試電池熱管理的目標是：

- 確定電池單元和模組與液體介電冷卻液的兼容性
- 評估溶液的傳熱性能以及對電池模組的影響
- 將傳熱特性與空氣冷卻進行比較
- 對安全性，資本支出，運營和維護成本以及系統級改進的假設影響
- 完成用於浸入式冷卻的系統級設計

六、實驗程序

在工程流體應用開發實驗室進行的一系列實驗中，證明了 SLIC 技術對電池進行熱管理的效率。在這些實驗中，將菱形 68AH 電池 (三星 286S 型) 進行了四個充電/放電循環，同時用強制空氣冷卻，隨後使用相同的循環模式，同時完全浸入在 Engineered Fluids 的 AmpCool™AC-100 電介質中 通過使用泵，散熱器和風扇將冷卻液冷卻環境空氣溫度。¹

第 1 階段和第 2 階段的測試週期參數分別如圖 2 和 3 所示。

圖 2：階段 1 充電/放電測試參數

運作	期間 (分)	結束充電狀態
休息 – 初始	1	30%
充電 – 週期 1	110	100%
休息	20	99%
放電 – 週期 1	60	0%
休息	60	1%
充電 – 週期 2	110	100%
休息	20	99%
放電 – 週期 2	60	0%
休息	60	1%
充電 – 週期 3	110	100%
休息	20	99%
放電 – 週期 3	60	0%
休息	60	1%
充電 – 週期 4	110	100%
休息	20	99%
放電 – 週期 4	60	0%
休息	60	1%

注意：充電週期時間為 110m / .55C 達到 100% 充電狀態的限制是 (SOC)

設備的最大輸出必須為 40 安培。

該測試使用了“恆定電流充電和放電”。實驗的第一階段 (階段 I) 按照電池製造商的規定，在 40A 等於 0.55 / C 的條件下使用 110 分鐘的充電週期，在 68°C 的負載下以 1 / C 的負載進行放電。由於該電池是專為空氣冷卻而設計的，因此我們遵循製造商的建議在充放電循環之間保持靜止和穩定。允許電池在充電和放電之間休息 20 分鐘，以使電池電壓穩定。再次按照製造商的建議，每次完全放電後，電池應休息 60 分鐘以使電池溫度穩定。

在實驗的第二階段 (階段 II) 中，所有休息時間的間隔設置為 20 分鐘，放電週期加速到 30 分鐘，將階段 I 的 60 分鐘週期減少一半，結果是 2 / C 放電週期。該測試的目的是確定單相液體浸泡式的冷卻能力，以管理電池單元上更快，更高的溫度變化和更高的比熱容。

圖 3：第二階段充放電測試參數

運作	期間 (分)	結束 SOC
休息 – 初始	1	30%
充電 – 週期 1	110	100%
休息	20	99%
放電 – 週期 1	30	0%
休息	20	1%
充電 – 週期 2	110	100%
休息	20	99%
放電 – 週期 2	30	0%
休息	20	1%
充電 – 週期 3	110	100%
休息	20	99%
放電 – 週期 3	30	0%
休息	20	1%
充電 – 週期 4	110	100%
休息	20	99%
放電 – 週期 4	30	0%
休息	20	1%

在每個完整的測試週期中，使用與電池芯熱結合的 K 型熱探針在每個電池芯的選項卡（正負極以及電池的兩側和頂部）上監視電池的溫度。以 10 秒的間隔記錄溫度。

這些測試的參數為：

環境溫度：21C +/- 3C

空氣冷卻測試（控制）

進氣溫度：23.0 +/- 5.0C

空氣體積流量：28.4 升/分鐘

液浸冷卻測試：

液體冷卻液輸入溫度：23.0 +/- 0.5C

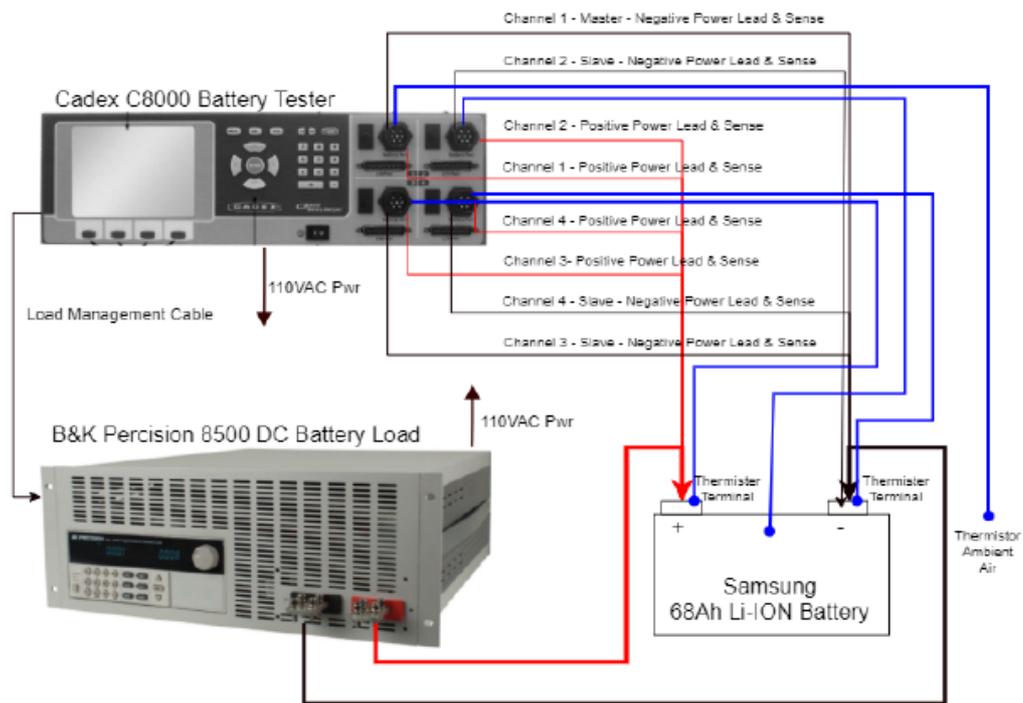
液體冷卻液流量：每分鐘 0.5 升

根據製造商的建議指定的溫度和風量冷卻。液體冷卻液流量為循環泵的最低轉速。

使用 Cadex 8000 電池充電器/測試儀執行電池的充放電循環，該設備將所有四個 10A 輸出互連並從屬於通道一，以在 12VDC 下的總充電容量為 40A，並使用 B &K Precision 8518 DC 電池負載(具有 12VDC 時最大負載為 100A)。圖 4 顯示了測試電池，電池充電器/測試儀和電池負載的電氣連接。圖 4 描述了充電和放電設備的設置。

圖 4：電池測試的電氣連接

Figure 4: Electrical Connections for Battery Test

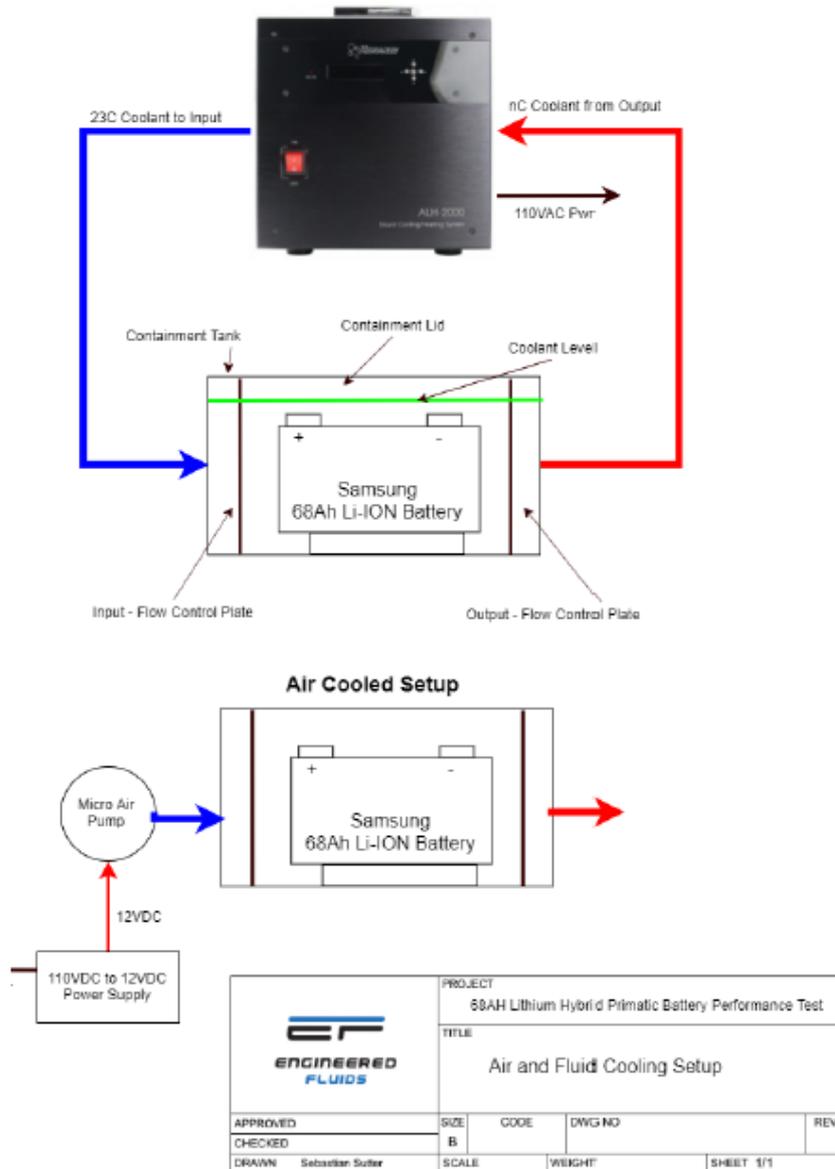


	PROJECT 68AH Lithium Hybrid Prismatic Battery Performance Test			
	TITLE Battery Charger and Load Setup			
APPROVED	SIZE	CODE	DWG NO	REV
CHECKED	B			
DRAWN Sebastian Suter	SCALE	WEIGHT	SHEET 1/1	

所使用的液體冷卻裝置是 Koolance ERM-3K3UA 液體冷卻系統，修訂版 1.1，已進行修改，以使其與 AmpCool AC-100 冷卻液兼容。修改的範圍為用 FMK 更換所有橡膠密封件和 O 環，並用 Tygon 管更換所有乙炔基軟管。使用 AmpCool™AC-100 冷卻劑，在 20°C 的環境溫度下，製冷單元的最大製冷量為 2kW。圖 5 描述了液體和空氣冷卻設備的設置。

圖 5 電池冷卻測試設置

Figure 5: Battery Cooling Test Setup



本研究中使用的冷卻液是 AmpCool™AC-100，這是由 Engineered Fluids 生產的液態合成電介質（不導電）冷卻液，專門用於電動車和電池的熱管理。AmpCool™AC-100 冷卻液清澈，無異味，可生物降解，無毒，並已獲得美國食品級認證。（1）。AmpCool™AC-100 冷卻液不會沸騰，在-66 C 至 280C 的所有應用溫度下都保留在液態中，它具有低黏性，從而提高了傳熱效率。圖 6 描述了工程流體公司的 AmpCool™AC-100 介電冷卻劑的特性。

圖 6：AmpCool AC-100 冷卻劑的特性

產品編號	AC-100
應用	固定式和車載電池冷卻
ISO 4460 Particle Count (Avg.)	10/10/2012
外觀	清澈
折射率 nD20	1.462
介電常數	2.3
介電強度 · kV	>60kV
電阻率 (ohm-cm)	>1x10 ¹⁴
傾點 (oC)	-55
閃點 (oC)	180
密度 · g / cc @ 16 oC	0.8113
熱係數 擴展體積/ oC	0.00068
粘度 (cSt) @ 40 oC	9.58
粘度 (cSt) @ 100 oC	2.68
導熱係數 (W / m * K) @ 40 oC	0.1373
比熱 (kJ / kg * C) @ 40C	2.2032
生物降解性 (28 天)	>96%
全球變暖潛力	0

圖 7 顯示了熱電偶在鋰離子電池上的放置。圖 8 是帶電池的鋼製測試箱照片。儲罐內部每個窄端上可見的鋼板是可移動的擋板，用於液體測試，以使液體冷卻液在電池的所有表面上均勻流動。為了避免這些擋板在空氣測試期間降低了空氣冷卻性能，因此擋板被移開。在空氣和液體測試期間，用泡沫蓋住密封測試箱的頂部，以便在測試期間隔離內、外部環境。在液體測試過程中，將電池單元完全浸入 AmpCool™AC-100 介電冷卻液中，使電池完全浸沒在 25mm 的冷卻液。測試期間儲罐中存在的液體冷卻液的淨體積是 2.786 升。

Figure 8: Steel Test Tank with Battery Cell



Figure 9: Liquid Immersion Test setup with Battery in AmpCool™ AC-100

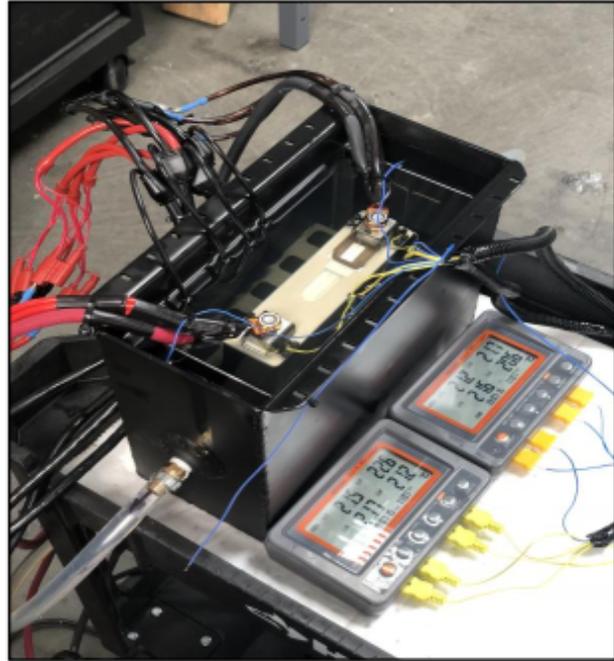


圖 10 提供了用於在測試過程中容納電池的鋼製測試箱內部容積的尺寸。該儲罐由 12 冷軋鋼製成，作為測試期間電池過熱的安全措施。即使在液體冷卻時由於非常激進的放電而產生額外的壓力，也不曾將電池溫度推升至 27C 以上，該溫度接近 120C 時會產生熱失控溫度。

圖 10：電池芯和試驗箱中的液體量

電池及冷卻液的容量	68AH 電池單元	測試儲罐深度
長度, mm	174	224
寬度, mm	46	96
高度, mm	126	176
總容量, mm ³	999,988	3,784,705
總容量, 公升	0.999	3.785
淨重冷卻液	2.786 公升	

圖 11 提供了在整個測試過程中使用的 Samsung 286S 型混合化學電池的特性。

同一電池單元用於空氣和液體測試，以保持測試結果的一致性。首先按照製造商的建議進行空氣測試。

圖 11：三星 286S 型電池的特性

電池單元	參數	規格
	型狀	棱型
	電池化學	NCM/LMO 混合
	尺寸(長 x 寬 x 高), mm	173.9x45.6x125.6
	重量, kg	1.91
	標稱容量, Ah	68
	標稱電壓, V	3.65
	標稱功率, Wh	248.2
	運轉電壓, V	3.1~4.1
	充電方式	CC-CV

圖 12、13 和 14 的 68AH 電池在通過冷卻方法充電和放電期間的瞬間溫度上升
 空氣冷卻的電池溫度與使用 AmpCool™介電冷卻液的單相液體浸沒冷卻
 (SLIC) 的比較

圖 12：氣冷電池測試-第一階段充電/放電週期

工程流體-測試 ID：152
 電池溫度 (C) -流體冷卻-1 小時放電

圖表圖例：
 藍線：“正極”選項卡上的溫度
 紅線：“負”選項卡上的溫度
 黃線：短側壁處的溫度
 綠線：長側壁處的溫度

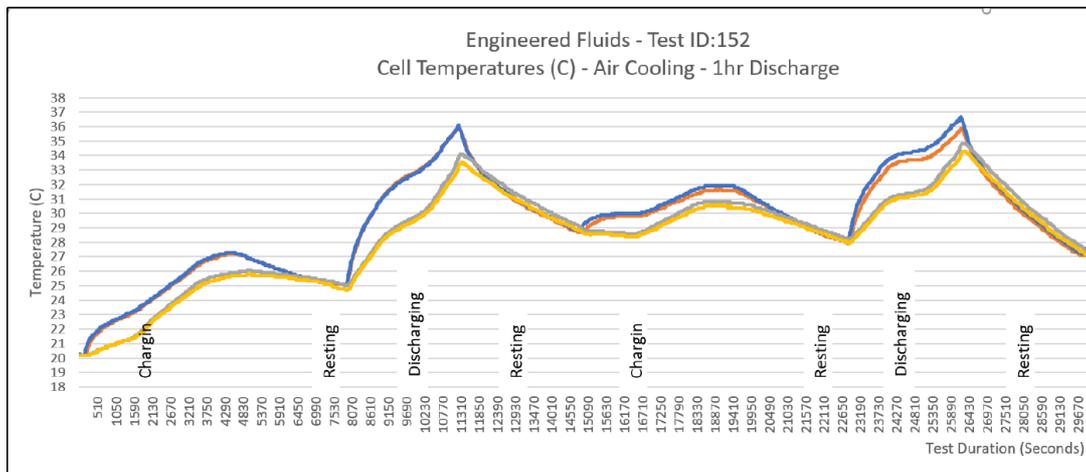


圖 13：液冷電池測試-第一階段充電/放電週期

工程流體-測試 ID : 148
電池溫度 (C) -流體冷卻-1 小時放電

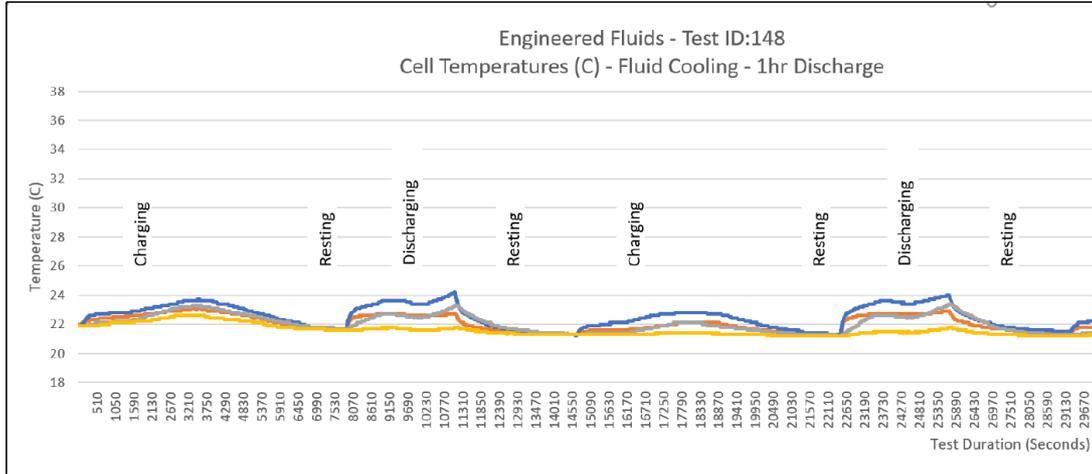


圖 14 : 液冷電池測試-第二階段充電/放電週期

工程流體-測試 ID : 195
電池溫度 (C) -流體冷卻-30 分鐘放電

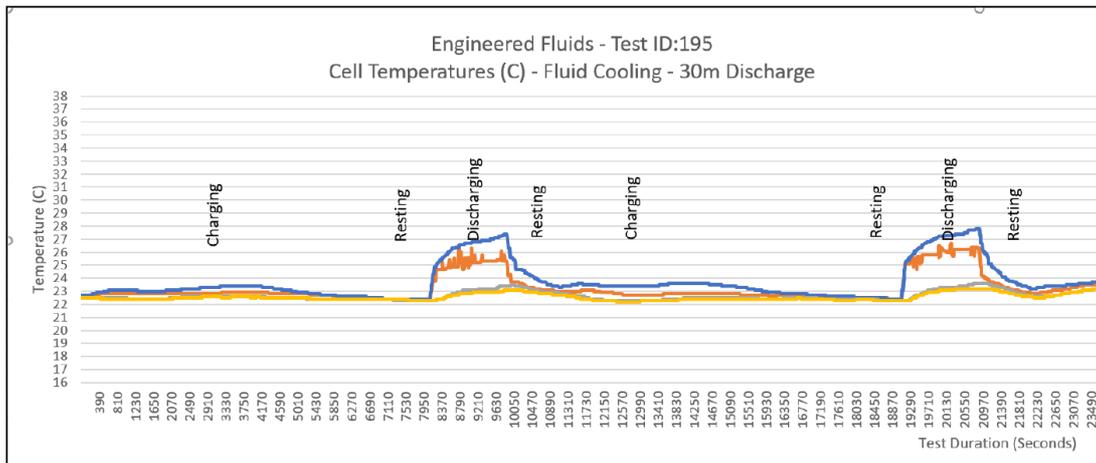


圖 15：通過位置和冷卻方法總結的最高和最低電池溫度

Cycle	Status	Test ID 152 - Air Cooled - 1hr Discharge				TEST 148 - Liquid Cooled - 1hr Discharge				Test ID 152 - Liquid Cooled - 30m Discharge			
		Terminal + Max °C	Terminal- Max °C	Long Wall Max °C	Short Wall Max °C	Terminal + Max °C	Terminal- Max °C	Long Wall Max °C	Short Wall Max °C	Terminal + Max °C	Terminal- Max °C	Long Wall Max °C	Short Wall Max °C
0	STARTUP	20.2	20.3	20.2	20.2	22.0	21.9	21.9	21.9	22.6	22.7	22.5	22.5
1.1	RESTING	20.2	20.3	20.2	20.2	22.0	21.9	21.9	21.9	22.6	22.7	22.5	22.5
1.2	CHARGE	27.2	27.3	26.1	25.8	23.1	23.7	23.3	22.6	22.9	23.4	22.6	22.6
1.3	RESTING	25.6	25.6	25.6	25.4	21.8	22.0	21.9	21.7	22.5	22.5	22.4	22.4
1.4	DISCHARGE	35.6	35.7	33.2	32.6	22.7	24.1	23.1	21.8	26.3	27.3	23.4	23.0
2.1	RESTING	36.0	36.1	34.1	33.5	22.7	24.2	23.3	21.8	25.8	27.4	23.5	23.1
2.2	CHARGE	31.7	31.9	30.8	30.6	22.1	22.8	22.1	21.4	23.1	23.6	22.9	22.7
2.3	RESTING	29.1	29.2	29.3	29.1	21.4	21.6	21.3	21.2	22.6	22.6	22.4	22.4
2.4	DISCHARGE	35.6	36.3	34.2	33.6	22.9	23.9	23.2	21.7	26.7	27.7	23.6	23.2
3.1	RESTING	35.9	36.7	34.8	34.3	22.9	24.0	23.4	21.8	26.4	27.8	23.6	23.2
3.2	CHARGE	28.5	29.1	27.9	27.6	22.1	22.7	22.3	21.6	24.1	24.7	23.7	23.7
3.3	RESTING	25.7	25.8	26.0	25.7	21.6	21.6	21.6	21.3	22.4	22.4	22.3	22.3
3.4	DISCHARGE	32.3	33.3	31.1	30.6	22.9	23.8	23.2	21.9	26.3	27.2	23.2	23.1
4.1	RESTING	32.7	33.7	31.8	31.3	22.9	23.9	23.4	21.9	26.8	27.3	23.4	23.2
4.2	CHARGE	27.1	27.6	26.6	26.2	22.1	22.7	22.3	21.7	23.1	23.6	22.7	22.6
4.3	RESTING	24.3	24.4	24.6	24.3	21.6	21.6	21.6	21.4	22.4	22.4	22.4	22.4
4.4	DISCHARGE	31.1	32.1	29.8	29.3	22.9	23.8	23.2	21.8	25.9	27.1	23.1	23.0
5	RESTING	31.1	32.1	29.9	29.4	22.9	23.8	23.2	21.8	25.8	27.2	23.2	23.0
6	FINISHED	31.4	32.4	30.5	29.9	22.9	23.9	23.4	21.9	25.8	27.2	23.2	23.0

圖 16：冷卻性能比較-電池正極端子/最高溫度 C

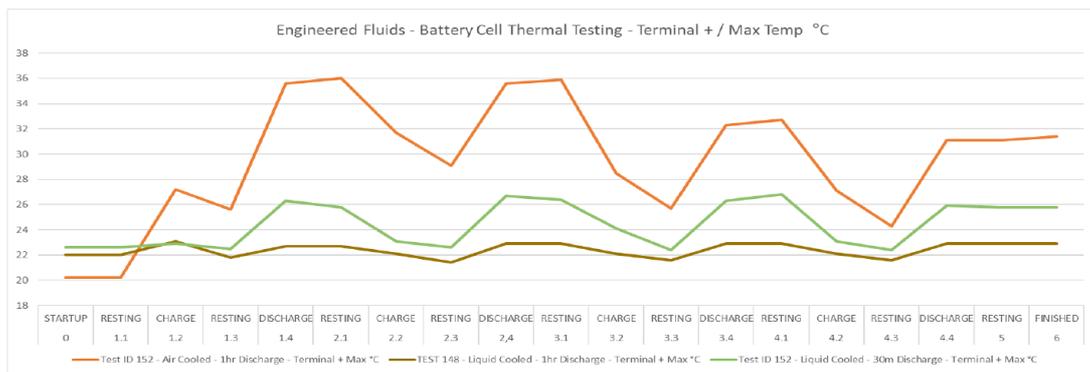


圖 17：冷卻性能比較-電池負極端子/最高溫度 C

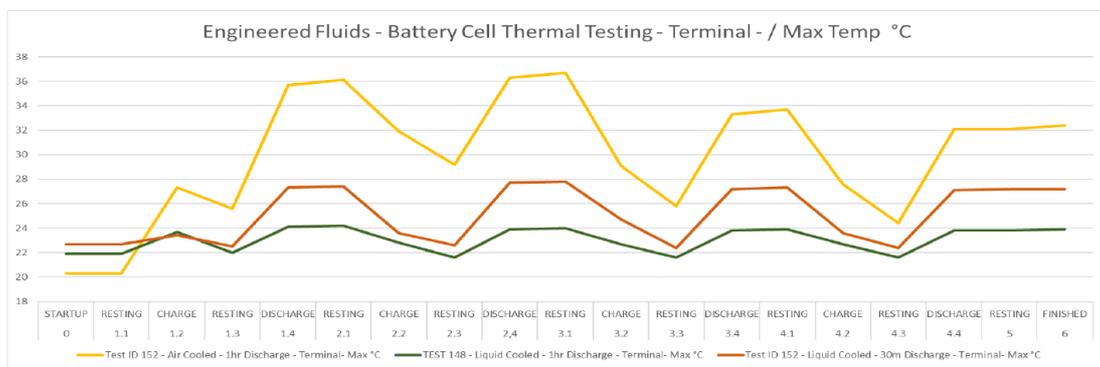


圖 18：冷卻性能比較-電池單元長壁/最高溫度 C

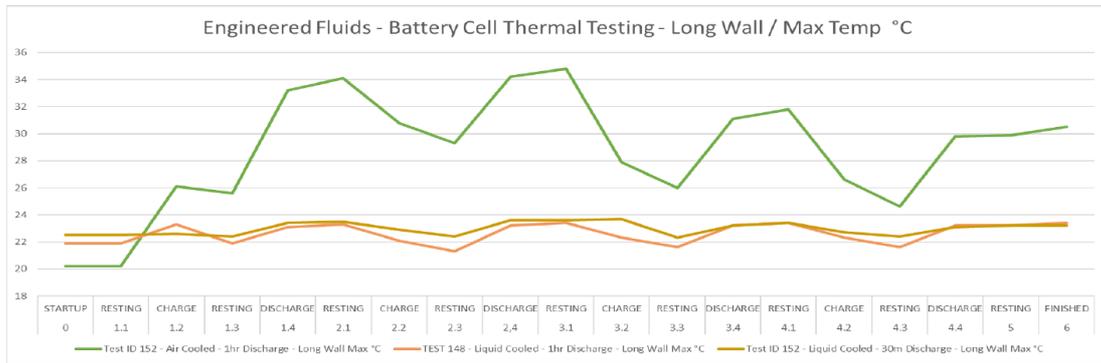
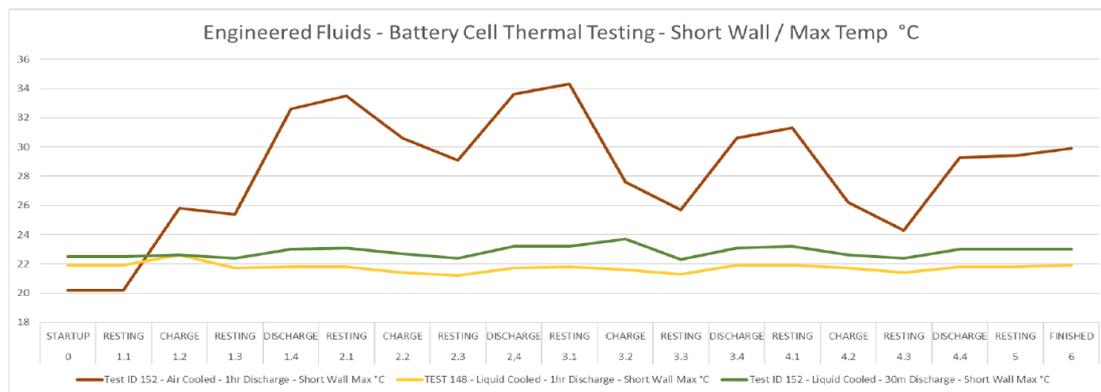


圖 19：冷卻性能比較-電池單元短壁/最高溫度 C



七、結果和討論

測試數據分析顯示，與空氣冷卻相比，電池單元的單相液體浸沒冷卻具有以下效果：

最佳溫度維護：在階段 1 測試 (0.55 / C 充電，1 / C 放電) 中，將電池浸入 AmpCool™AC-100 時，平均電池溫度低 5 攝氏度。使用化學反應動力學的阿倫尼烏斯速率方程，平均電池溫度的 5 C 差異可將電池壽命大約延長 1.4 倍。

消除溫度波動：在空氣冷卻的第一階段測試中，每個循環的電池溫度變化超過 16 度。在液浸冷卻試驗中，該溫度變化僅為 1.8°C。在階段 2 浸入冷卻測試的測試中 (0.55 / C 充量，2 / C，最大溫度變化為 5.1 攝氏度)，即使保持與階段 1 測試相同的冷卻劑流量。通過增加冷卻劑的流量來提供進一步測試的機會，以查看在更激進的放電循環期間是否可以實現類似的 1.8 攝氏度增量。

浸入 AmpCool™冷卻液中，電池在製造商建議的四周期測試期間始終保持在 23 +/- 3C 的最佳工作溫度範圍內。用平均水平的五倍標準偏差，並且遠高於製造商建議的工作溫度範圍，用強制空氣冷卻的電池單元的溫度波動範圍從 20 到 37°C。

圖 15 當它沿著電池長邊測量追蹤一個充電/放電週期的表面溫度時更詳細地顯示了冷卻性能。

消除電池溫度分層：浸入式冷卻使測試電池內部保持均勻的溫度，空氣冷卻使電池內部溫度分層，從而降低了電池的效率和使用寿命。從上方的曲線圖中可以看出，電池側壁的溫度偏離接線片或端子溫度。對於浸沒冷卻的電池，看不到這種差異。

該實驗的第 2 階段測試了 AmpCool™冷卻液通過以兩倍設計速率放電的電池來管理更高的熱應力的能力。在此部分中，放電是在 2 / C 下進行的，僅在 30 分鐘內將電池單元從 100%SOC 變為 30%，而循環之間只有 10 分鐘。

加速的放電速率會給電池單元帶來更高的熱應力，從而提高其內部溫度。將電池溫度維持在製造商建議的期望範圍內對於最大化電池的使用寿命至關重要。圖 13 和 14 顯示了 Ampcool™AC-100 電介質冷卻液浸冷卻如何在快速放電和減少休息時間帶來了額外的熱負荷保持電池的溫度。

八·結論：電池技術的進步促進了它們在各種固定和移動應用中的使用。這些電池系統的有效熱管理將是其成功改造和應用的關鍵因素。將電池溫度維持在一個狹窄的範圍內可以最大化電池容量，最大化電池的充電和放電速率，並延長電池的使用壽命。 [7,8] 所有這些因素都對這些電池系統的應用經濟可行性產生重大影響。

已經評估了在充電和放電週期中控制電池溫度的幾種方法。傳統的空氣冷卻在經濟上無法在充電和放電週期內將溫度維持在所需範圍內達到最有效的解決方案。在電池盒中增加表面積和/或散熱片有助於更快地散熱，但是對於大多數應用而言，這會導致體積和重量的過載而不列入考慮。

液體冷卻是將電池溫度保持在所需範圍內的最有效，最經濟的解決方案。液體冷卻可以使用冷卻板或管道間接進行，通過該管道利用泵送水性溶液。這比空氣冷卻更有效，但是不靈活且昂貴（必須專門製造冷卻板以適合每種不同的電池形狀和要冷卻的組件），並且無法達到電池與傳熱流體之間緊密接觸的效率。

電池最有效的冷卻方法是直接浸泡於單相非導電冷卻液中。直到最近，還沒有與材料相容性，環境影響和防火安全性完美結合的介電液。AmpCool™電介質冷卻液於 2017 年開發，是一種安全可靠的方法，可以優化和擴展當今電池系統的價值。

本文所述的實驗使用的是三星 286S 型電池，該電池經過多次快速充放電循環，同時用強制空氣冷卻和浸泡於電介質冷卻液 AmpCool™AC-100。

浸泡於 AmpCool™AC-100 介電冷卻液中的測試電池保持平均電池溫度為 22.5 攝氏度，與平均值的偏差非常低。相反，當電池用強制空氣冷卻時，平均電池溫度為 28.7 度，在充電/放電過程中溫度變化更大。

該實驗的第二階段表明，即使在加速放電帶來的高熱應力下，浸沒式冷卻也可以將電池溫度保持在所需範圍內。這一發現對於移動和固定電池系統的資產管理具有重要的意義。

實驗表明，放電-充電週期之間所需的緩和時間可以顯著減少，並且電池壽命可以延長。隨著電池效率的提高，電池資產投資的回報也隨之提高。

隨著電動汽車和固定電池陣列的廣泛使用，對更長的電池壽命和更高的功率輸出有很高的要求。為此，電池熱管理系統將需要能夠以較高的速率對電池模組進行充電和放電時將熱量從電池模組中轉移出去。使用電池時產生的熱量可能對乘客和旁觀者構成安全威脅。由於電池產生的高應力和高溫，擁有合適的冷卻系統可大大提高電池效率，使用壽命和盈利能力至關重要。該實驗表明，通過單相浸沒冷卻（SLIC）技術進行的熱量管理可以安全有效地維持電池和模組中的目標溫度。

參考文獻

- [1] 克里斯·博耶（Chris Boyer），博士，體育，“固定式鋰離子儲能箱的熱管理的重要性”，《太陽能世界》，2019年4月24日
- [2] C. Qingsong Wang，“熱失控引起鋰離子電池著火和爆炸”，《電源學報》，第1卷。208，第210-224頁，2012年。
- [3] Todd M. Bandhauer，“鋰離子電池中的熱問題的重要評論”，J。電化學學會，第1卷。158號3，第R1-R25頁，2011年。
- [4] Todd M. Bandhauer，“商用鋰離子電池中與溫度有關的電化學生熱”，《電源學報》，第1卷。247，第618-628頁，2014年。
- [5] S. F. Ashkan Nazari，“具有不同標稱容量和化學性質的鋰離子電池中的熱量產生”，《應用熱工程》，第一卷。125，第1501-1517頁，2017年。
- [6] Gi-Heon Kim 博士，Ahmad Pesaran 博士，“電池熱管理系統設計建模”，國家可再生能源實驗室，美國科羅拉多州戈爾德演示文稿可在以下網址獲得：
<https://www.nrel.gov/transportation/assets/pdfs/40848.pdf>
- [7] 劉光明，歐明高，“考慮不同影響因素的充放電期間鋰離子電池的發熱分析”，《熱分析與量熱雜誌》，第31卷，第110頁，2014年
- [8] H. G. Liu，“考慮不同影響因素的鋰離子電池在充電和放電過程中的熱量分析”，《Therm Anal Calorim》，第一卷。116，第1001-1010頁，2014年。

作者資訊

David W. Sundin (1975 年獲得文學學士學位，1988 年獲得工商管理碩士學位，1992 年獲得博士學位) 從 Hendrix 學院獲得了文科 (化學) 學士學位，從凱勒管理學院獲得了 MBA 學位，並獲得了博士學位。來自 Clayton Scholl of Engineering 的工程學博士學位。他獲得了 Fundação Getulio Vargas 的環境工程和項目管理研究生證書。

Sundin 博士目前是 Engineered Fluids 的首席科學家。他在電氣和電子工程師協會 (IEEE) 和美國測試與材料學會 (ASTM) 從事活動已有 30 多年了。他的主要研究領域是傳熱和電絕緣材料。Sundin 博士居住在德克薩斯州的泰勒。

Sebastian Sponholtz 目前是 SLIC 冷卻系統工程流體產品經理。他是一位自學成才的機械師和製造商，在為服務器，電池和區塊鏈應用構建和製造液體冷卻系統方面擁有豐富的經驗。Sponholtz 先生居住在加利福尼亞州索薩利托。