

鋰電池防爆預警檢測之研究

Research on Lithium Battery Explosion-proof Early Warning Detection

宜千鈺、王聖璋、蕭育仁

Qian-Yu Yi, Sheng-Chang Wang, Yu-Jen Hsiao

隨著鋰電池在全球市場的需求增長，其安全性問題成為關注焦點，特別是在電動車及儲能系統中的應用。為了應對鋰電池因過充、短路等引起的熱失控，本文探討了溫度及氣體感測器等多種安全監控技術，監測電池內部及周圍環境變化，降低鋰電池運行過程中的風險，延長其使用壽命與提升效能。研究表明，多元感測技術具有較高靈敏度與可靠性，適用於電動車與儲能系統等領域，為鋰電池市場的可持續發展提供了強有力的技術支持與安全保障。

As the demand for lithium batteries in the global market grows, safety concerns have become a focal point, especially in applications such as electric vehicles and energy storage systems. To address the issue of thermal runaway caused by overcharging, short circuits, and other factors, this paper explores various safety monitoring technologies, including temperature and gas sensors, to monitor changes inside and around the battery, thereby reducing operational risks, extending battery lifespan, and enhancing performance. The study indicates that multi-sensor technology offers high sensitivity and reliability, making it suitable for applications in electric vehicles and energy storage systems, thus providing strong technical support and safety assurance for the sustainable development of the lithium battery market.

一、全球市場規模

根據 Market Data Forecast 以及 Intellect Markets 的數據分析，在 2023 年鋰電池市場規模已達到約 684 億美元。隨著電動汽車 (electric vehicle, EV) 需求和可再生能源儲能系統 (energy storage system, ESS) 的發展，市場預估在 2024 將達到 779.8 億美元，並於 2029 年突破至 1501.4 億美元，期間的複合年增長率 (compound annual growth rate, CAGR) 大約為 14%⁽¹⁾。這一增長與各國政策的推動密不可分，例如歐盟計劃在 2030 年至 2035 年實現電動車全面取代傳統燃油車，市場轉向電動汽車和燃料電池車 (FCV)，而這一目標的達成將大幅拉動鋰電池市場需求⁽²⁾。

二、鋰電池的基本結構與技術特性

鋰電池是一種利用鋰金屬或鋰合金作為陽極材料的電池，並使用非水性電解質溶液進行電化學反應。和一次性使用的鋰原電池不同的是，鋰離子電池具備可反覆充電的優勢。

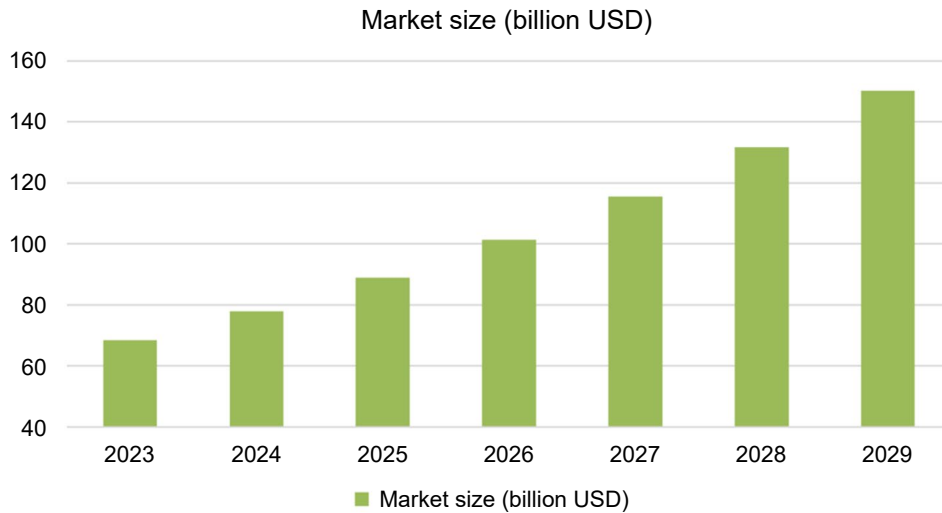


圖 1. CAGR 為 14% 預測之數據圖。

鋰電池的最大優勢在於其高能量密度，即在單位重量下能存儲更多的能量。與傳統鎳鎘電池或鉛酸電池相比，鋰電池不僅能量密度更高，而且具有更小的體積與更輕的重量。因此，它能夠在較小的空間中提供長時間續航，這使其成為便攜設備首選。此外，鋰電池具備較低的自放電率與無記憶效應，意味著即使不頻繁使用，電池仍能保留大部分電量；並且可以隨時充電，不需要等到完全放電後再充電，這大大提高了電池的使用壽命和便利性。

這項特性使其在現代科技中扮演了至關重要的角色，尤其在可重複充電的設備上，如手機、電動車及各種消費電子產品中應用廣泛。

三、現況與挑戰

電池爆炸是一個高度危險的事件，可能帶來嚴重後果，包括火災、人身傷害和財產損失，如圖 2⁽³⁻⁴⁾ 所示。造成爆炸的原因十分複雜，涉及過充電、過放電、短路、高溫 and 材料缺陷等多方面因素，這些因素相互作用，使得防止電池爆炸變得更加困難。



圖 2. 鋰電池爆炸 (圖／取自網路)⁽³⁻⁴⁾。

隨著科技的發展，鋰硫電池和固態電池等新型電池技術不斷涌現，為現有電池技術的改進帶來了新的機會。然而，這些技術同時也面臨一些挑戰，例如鋰硫電池可能因硫化物的堆積導致內阻增加⁽⁵⁾，而固態電池的結構變化可能會引發內部應力，從而增加爆炸的風險⁽⁶⁾。

表 1. 有關於鋰電池爆炸事件及原因。

事件名稱	發生時間	爆炸原因
Boeing 787 Dreamliner 電池起火事件	2013	輔助動力裝置 (APU) 電池過度充電致使電池過熱電解液漏出，導致電池短路 ^(7, 8)
Samsung Galaxy Note 7 爆炸事件	2016	電池內部設計缺陷，使正負極容易接觸，造成內部短路，從而引發過熱、爆炸 ⁽⁷⁾
Tesla Model S 電池起火事件	2019	電池內部短路、過度充電引發熱失控
韓國電動車自燃事件	2024	電池過度充電以及設計不良，導致電池自燃

四、電池爆炸原因及影響

隨著電池在現代科技中的廣泛應用，其潛在的安全問題越發受到重視，尤其是電池爆炸風險。鋰電池的熱失控 (thermal runaway) 是一個複雜且危險的現象，其常見的誘因包括過充、物理損壞以及暴露於高溫環境中。當電池過充時，電極材料可能發生副反應，導致內部電壓異常升高，並促使電解液分解，產生氧氣 (O_2) 和氫氣 (H_2)。這些氣體會增加電池內部壓力，最終導致膨脹、漏液甚至爆炸。此外，物理損壞 (如碰撞或穿刺) 會破壞隔膜結構，導致正負極之間發生直接接觸，引發短路，進一步導致過熱，並增加燃燒或爆炸的風險。若鋰電池暴露於高溫環境中，內部反應速度會加快，熱量無法及時散逸，最終導致內部材料分解、燃燒，甚至引發熱失控的連鎖反應。

當鋰電池處於不正常使用或極端條件下，這些因素往往會相互影響，加劇內部反應失控，產生急劇升溫。這種情況下，若無法及時進行檢測和干預，電池可能進入不可逆的熱失控，迅速產生大量能量，嚴重威脅設備和周圍環境的安全。

為防範此類風險，採用各種感測技術 (如溫度、氣體感測器等) 來進行實時監控，成為提升電池安全性的重要策略。這些感測器可以即時偵測到異常情況並發出預警，有效降低爆炸風險，進而提升鋰電池使用安全性與可靠性。

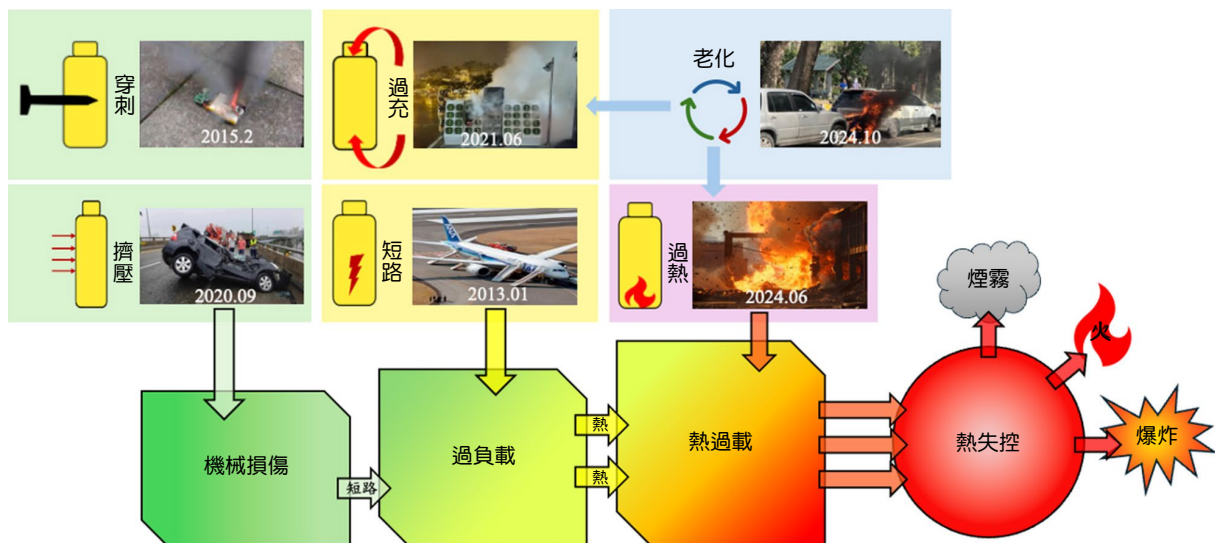


圖 3. 電池爆炸原因。

4.1. 溫度對電池的影響

高溫對鋰電池有很大的影響，尤其是當溫度超過攝氏 60 至 70 度時。此時，鋰電池內部的化學反應加速，導致內部壓力升高，這不僅會加速電池老化和容量下降，電池內部化學反應的變化，還可能增加過熱、起火或爆炸的風險，如圖 4 所示。長期處於高溫環境下，鋰電池的壽命會縮短，甚至可能造成無法修復的損壞。

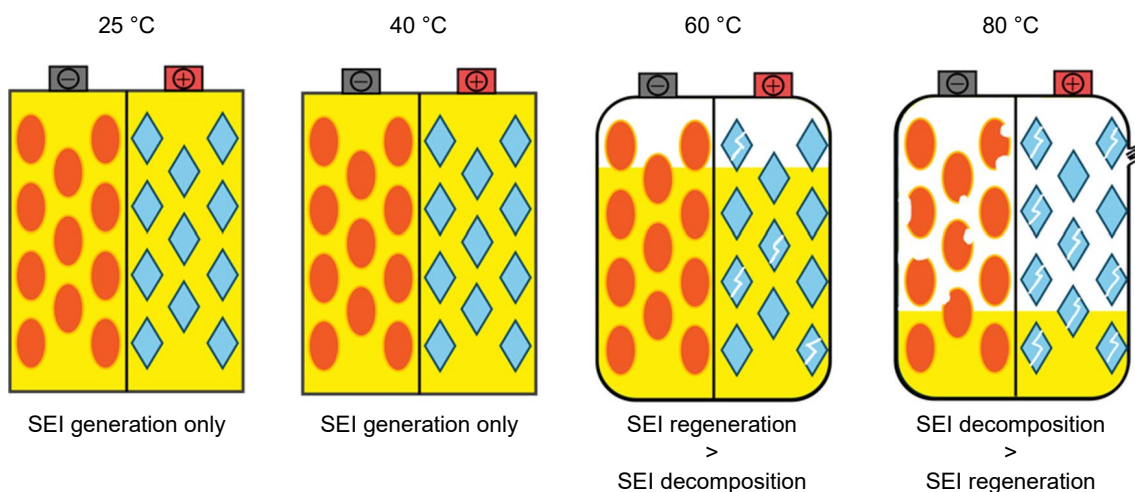


圖 4. 溫度對電池的影響示意圖。

4.2. 電池爆炸釋放之氣體

鋰離子電池的故障可能由多種因素引起，例如製造缺陷、過熱、電力使用不當或物理損壞。在某些情況下，這些故障會引發電池內部的放熱反應，導致溫度上升並產生氣體。當這些氣體積聚在電池內部時，最終可能導致電池破裂，並釋放氣體⁽¹⁰⁾。在電池爆炸發生前，電池系統通常會釋放出多種氣體，這些氣體的種類和濃度可能預示著爆炸的風險。圖 5 為電池在不同狀態下釋放的各種氣體成分。

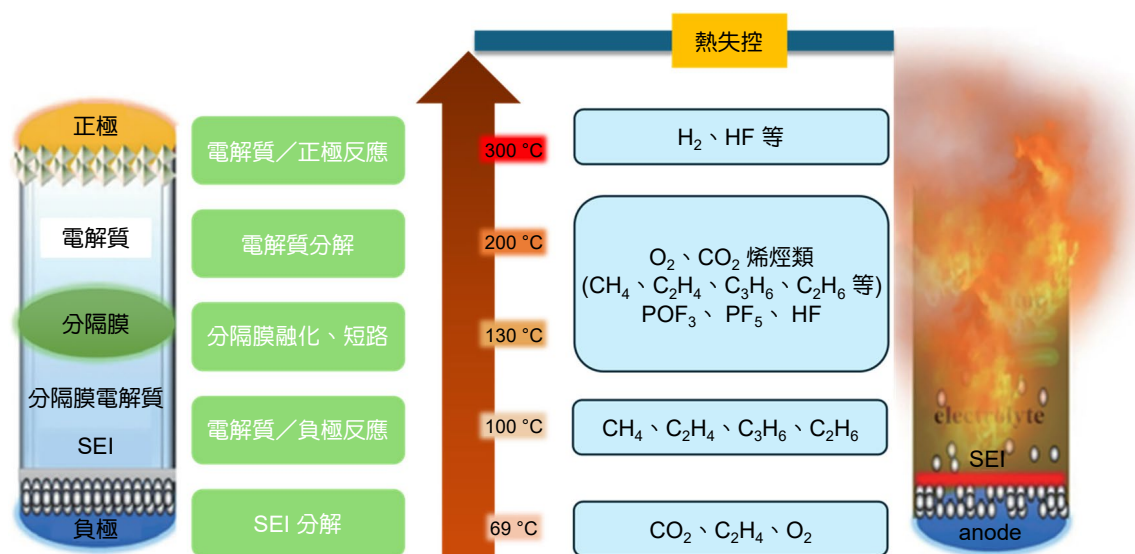
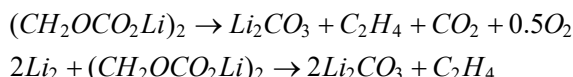


圖 5. 電池升溫產生氣體對應圖。

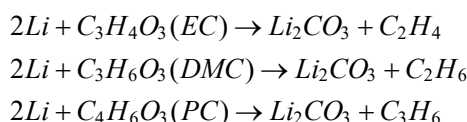
鋰電池過度充電時，負極可能出現鋰飽和，導致多餘的鋰離子在負極表面析出⁽¹¹⁾，形成鋰枝晶。這些鋰枝晶與 PVDF (鋰電池中的黏著劑) 反應，釋放出氫氣 (H₂)⁽¹²⁾。鋰枝晶的成長會刺穿隔膜，造成微短路，進而釋放能量產生一氧化碳 (CO)，



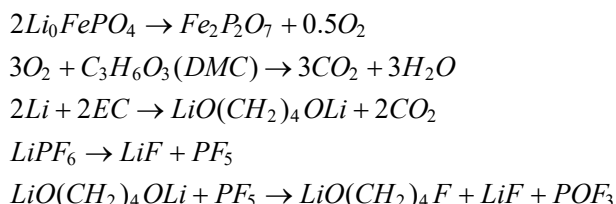
隨著電池內部溫度升高，鋰電池的固態電解質界面膜 (SEI 膜) 開始分解，生成乙烯 (C₂H₄) 和其他氣體⁽¹³⁾，



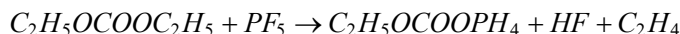
SEI 膜分解釋放出大量的熱，這進一步導致電解液與負極反應，生成丙烯 (C₃H₆)，



當電池溫度超過 130 °C，正負極之間的隔膜融化，導致短路範圍擴大，溫度迅速升高。這進一步觸發電解液與鋰發生反應，生成五氟化磷 (PF₅) 和三氟氧磷 (POF₃)，這些都是具腐蝕性的氣體，



當電池內部溫度超過 200 °C，電解液發生自分解反應，生成氟化氫 (HF) 等有害物質，這意味著電池進入熱失控的階段，可能隨時發生爆炸。



在電池爆炸的早期階段，主要釋放的氣體成分是一氧化碳 (CO)、氫氣 (H₂) 和乙烯 (C₂H₄)

五、探討與比較偵測方法

我們需要不斷深入研究電池的材料、結構及運作機制，而偵測方式主要集中於監測電池內部狀態及其周圍環境條件，以提前預警潛在的危險。

以下是幾種常見的鋰電池爆炸偵測方式：

5.1 溫度監測

熱電偶溫度計是由兩種不同材質的金屬 A 和 B 組成，如圖 6 所示，當它們焊接在一起形成一個閉合迴路，並在兩端產生溫差時，會產生電流，導致電壓改變，這就是所謂的熱電勢。溫差越大，電流和電壓變化也越大，根據這個電壓變化，我們可以計算出溫度。熱電偶實際上是一種能量轉換裝置，能將熱能轉換成電能。溫度高的一端叫做工作端，溫度低的一端稱為參比端。這種感測器基於熱電效應，當兩端有溫差時，會產生電壓，反過來，施加電壓也會產生溫差。這個效應可以用來發電、測溫、冷卻或加熱，並且能根據施加的電壓來控制溫度。

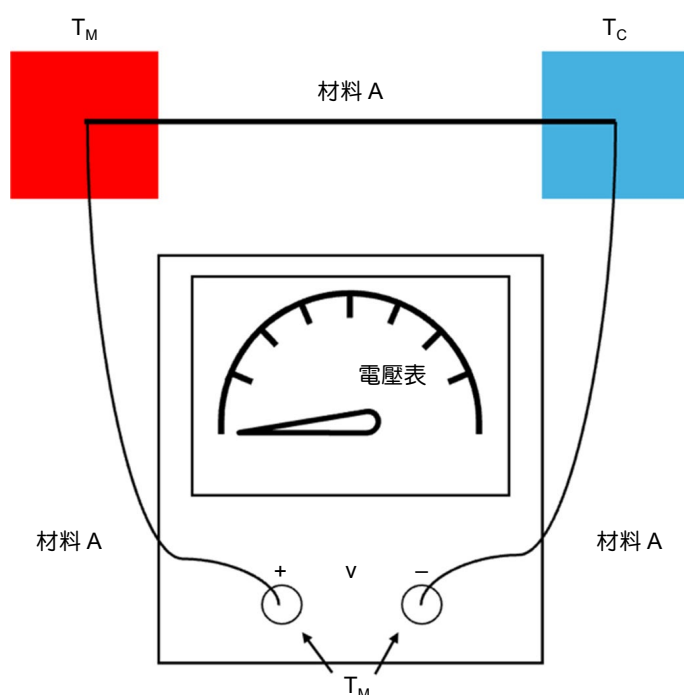


圖 6. 熱電偶測溫原理圖。

根據 Shuang 等人的研究結果⁽¹⁴⁾，感測器的正常運行溫度範圍為 23.4°C 至 32.9°C 。在這個範圍內，感測器能即時記錄溫度上升速率，並將數據與氣體濃度的資訊一同上傳至雲端。通過對比氣體濃度與溫度數據，可以判斷電池是否存在異常情況。

當溫度超過 32.9°C 時，鋰離子會析出並形成鋰枝晶，導致電池電壓迅速上升。而若溫度突破 50°C ，則表示電解質已與鋰離子反應，標誌著電池正式進入熱失控狀態。

5.2 氣體感測器

目前，在鋰電池熱失控監測技術中常用的氣體感測器包括電阻式氣體感測器、催化燃燒式感測器、紅外吸收感測器、石英晶體微量天平 (quartz crystal microbalance, QCM) 感測器等。根據 Cai 等人⁽¹⁵⁾ 提出一種基於氣體感測技術的鋰電池熱失控早期偵測方法，透過監測熱失控早期釋放的 CO_2 濃度進行預警。研究表明，氣體感測器的反應速度比傳統的表面溫度感測器更快，在熱失控擴散之前能有效偵測到信號。其中，電阻式氣體感測器因為其高靈敏度、穩定性以及易於整合的特性，展現出良好的應用前景，成為電池安全監控的重要工具⁽¹⁵⁻¹⁷⁾。

我們利用鋰電池異常早期釋放的有機揮發性氣體 (volatile organic compounds, VOC) 作為氣體感測器的主要偵測對象，如圖 7，隨著不同濃度的氣體施加，感測器的電阻值會發生變化，根據這一原理，可以有效偵測鋰電池的異常狀況。

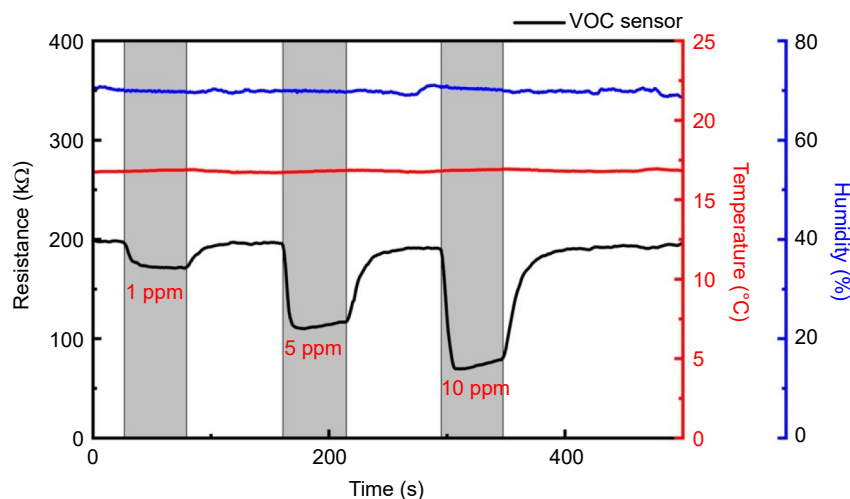


圖 7. 氣體感測器所量測之室內濕度、溫度以及電阻值與氣體濃度。

5.3 電化學監測

鋰電池的電化學監測主要透過測量電壓、電流、溫度、內阻和氣體排放等參數，來分析電池在充放電過程中的狀態變化，並評估電池的健康狀態 (state of health, SOH) 和電量狀態 (state of charge, SOC)。這些數據能提供關於電池性能的關鍵信息，有助於預測潛在的故障風險。此外，結合電化學阻抗光譜 (electrochemical impedance spectroscopy, EIS) 和循環伏安法 (cyclic voltammetry, CV) 等技術，能深入解析鋰電池內部的電荷傳輸和反應動力學，這對於評估性能及分析老化機制非常重要。這些監測技術對提升鋰電池安全性和延長使用壽命具有重要作用。

在 Schmidt 等人的研究⁽¹⁸⁾ 中，他們利用 EIS 技術測量鋰電池內部溫度，並測試了不同溫度分布情況。在實驗結果的數據可見，抗阻測量能準確反映電池的平均內部溫度，說明選擇適當的頻率可實現精確的溫度測量。此外，數據表明在高頻下，抗阻與溫度的關係更加穩定，且 SOC 的影響也較小，這代表在未知 SOC 的情況下，高頻測量具有明顯的優勢。

5.4 電池外殼形變感測與機械損傷檢測

電池安全性是鋰電池應用中關鍵的考量，監測技術的應用有助於提早發現潛在風險。電池外殼形變感測技術利用感測器監控鋰電池外殼的變形，藉此推測內部狀態變化，如氣體洩漏或熱失控。當內部壓力增加時，會引起外殼形變。常見的感測裝置包括應變計、壓力感測器或光纖布拉格光柵 (fiber Bragg grating, FBG) 感測器，這些裝置能精確監測外殼形變並預測潛在風險，進而提高電池安全性。Huang 的研究⁽¹⁹⁾ 將改良的 FBG 感測器嵌入鋰電池石墨電極層中，用以長期監測應變與溫度，並結合微型壓力計評估電池的電量狀態與健康狀態。

除了外殼形變監測，機械損傷檢測技術則是透過偵測外部機械應力對電池結構的影響來防止事故發生。機械損傷檢測針對電池在跌落、穿刺、碰撞等情況下的結構損傷，旨在評估外力對電池完整性的影響，防止因物理損傷引發內部短路或其他危險。這項技術能及早偵測

異常並立即發出警報，從而預防潛在災害。湯元會等人的研究⁽²⁰⁾中，評估了鋰離子電池在遭遇尖銳物體擠壓（如汽車碰撞）時的安全性，尤其是在針刺條件下的表現。通過實驗，他們探討了荷電狀態、針刺速度、針刺深度和針刺位置對電池熱失控的影響。結果顯示，鋰離子電池在針刺失效後有一段反應時間，不會立即發生熱失控，且當荷電狀態越高、針刺深度越深時，電池越容易發生熱失控，其劇烈程度與這些參數成正相關。

5.5 電池壽命預測和建模

電池管理系統 (battery management system, BMS) 可做為一種電池壽命預測與建模的一種形式，BMS 在電動車中扮演著關鍵角色，能有效管理電池的能量及健康狀態。它可持續監控電壓、電流和溫度等電池參數，準確的 SOC 和 SOH 估算能有效減少熱失控風險並延長電池壽命⁽²¹⁾。模型基礎的演算法，如擴展卡爾曼濾波器 (extended Kalman filter, EKF)⁽²²⁾，被廣泛應用於 SOC 的估算中，且隨著模型複雜度的增加，估算準確度也有所提升。另一方面，SOH 的估算著重於電池內阻和容量衰減情況的分析，確保電池在使用過程中的安全性和穩定性。

而在 Plett 等人的研究⁽²²⁾，他們開發基於 EKF 的算法估算電池的 SOC，並隨著電池的老化自動適應電池特性變化。實驗過程中比較了真實電池電壓變化與擴展卡爾曼濾波器 (EKF) 的電壓變化，顯示出雖然初始估計存在偏差，但 EKF 在幾次運算後迅速收斂，精確估計了電池狀態。也有透過繪製協方差值發現隨著時間推移，EKF 逐漸減少不確定性，顯示算法能持續修正誤差。而在他們的電壓感測器誤差和電壓估計誤差圖中，說明了 EKF 在面對電流和電壓感測器誤差時的表現，即使誤差較大，EKF 仍能準確估算電池狀態，根據這個研究，清楚展現了 EKF 算法在電池 SOC 及其他參數估算上的準確性與穩健性。

5.6 多元感測模組

在光學檢測與氣體感測的結合實驗中，我們選用了 4200 nm 波長的固定紅外線發光二極體 (IR LED) 作為檢測光源，因為 CO₂ 作為惰性氣體，對此波長具有穩定的吸收效應。在 CO₂ 氣體檢測中，我們使用此固定波長的 IR LED，搭配黑氧化鋅熱電堆感測器元件，並結合密閉式鋁合金氣體流道，提供光源照射及待檢氣體的穩定流動環境 (如圖 8(a) 所示)。透過固定波長的 IR LED 發射穩定光源，黑氧化鋅熱電堆感測器將吸收的光能轉化為熱電訊號。當氣體通過流道的進氣端和出氣口時，CO₂ 氣體會對固定光源進行吸收，導致熱電堆感測器的熱電訊號隨檢測氣體濃度的變化而減少。訊號放大器進一步處理感測器輸出的微弱電壓訊號，放大並降低輸出電壓的干擾，以提升量測的精度和穩定性。控制和資料處理模組則由基於 CC265 核心的系統與 PC 組成，用於訊號的解析和處理。

在實驗過程中，我們將測試室的溫度保持在 25 °C ± 0.2 °C，並注入不同濃度的空氣與 CO₂ 混合物，如圖 8(b) 所示。CO₂ 濃度從 500 ppm 開始，每次增加 500 ppm，直到達到 2500 ppm。在圖 8(c) 中，我們展示了感測器電壓訊號的變化，可以觀察到感測器在氣體注入後約 40 秒達到穩定狀態，這樣的實驗可以幫助我們建立一個即時、精準的監測系統，用來偵測鋰電池在運行過程中的安全狀態，並預防潛在的風險。

我們在對含有十六種不同成分的陣列式氣體感測器安置在透明壓克力氣室中，用於收集氣體感測數據以及建立氣感資料庫，如圖 9(a-c)。進行主成分分析 (PCA) 後，繪製了 PCA 圖，如圖 9(d) 所示。這些測試涵蓋了四種目標氣體 (H₂、CO、C₂H₄、HF)，在 PCA 分析中，我們能夠確定每個感測器在判別目標氣體方面的適用性。透過 PCA 圖中的數據分佈，

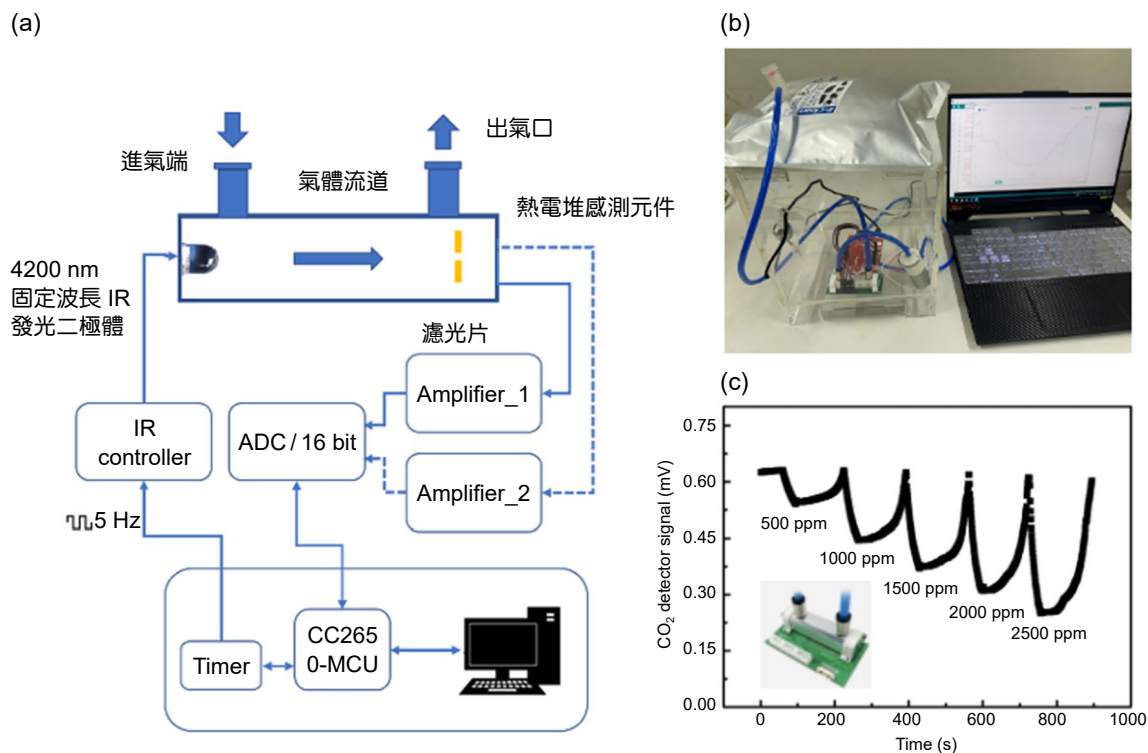


圖 8. (a) CO_2 熱電堆氣體感測器系統結構圖、(b) 於壓克力腔體實驗、(c) 感測器在不同濃度的電壓變化。

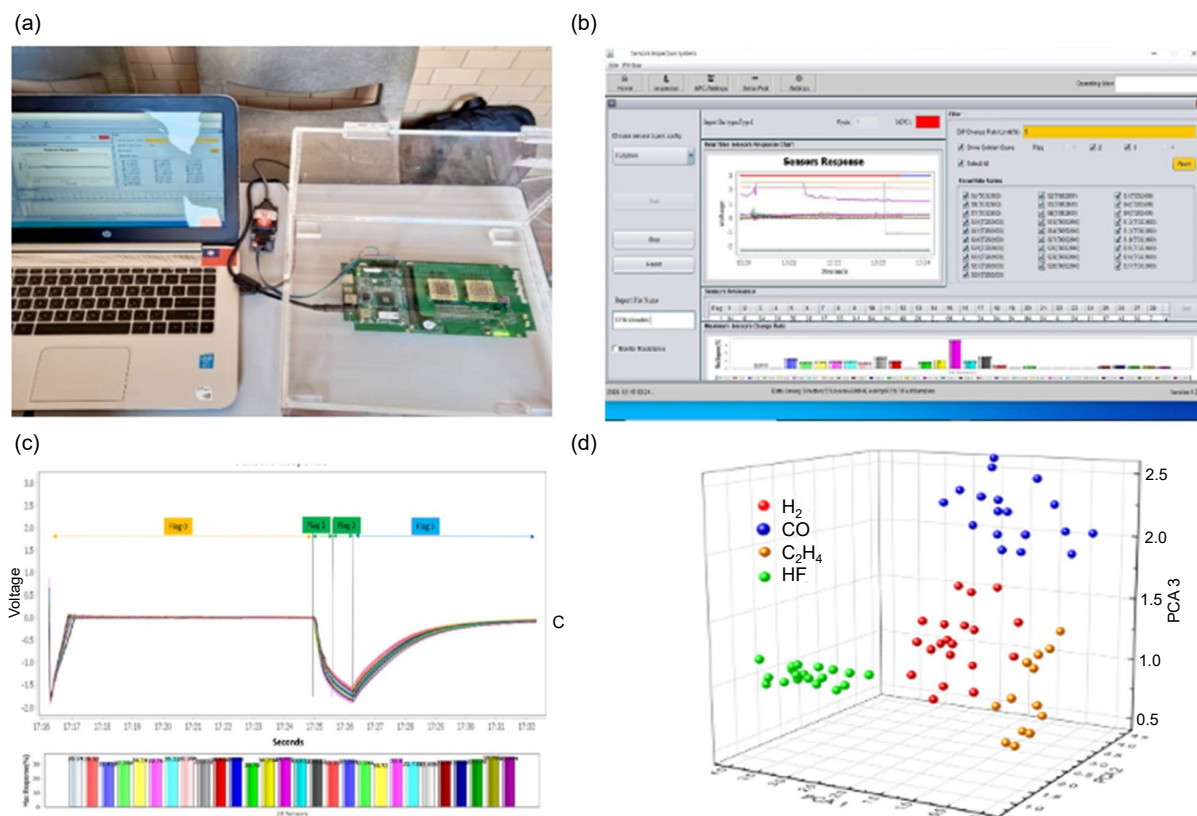


圖 9. (a) 實際測試配置、(b) 氣體感測數據收集和分析、(c) 氣體感測反應電壓圖、(d) PCA 分佈示意圖。

可以識別出哪些感測器最適合用於識別特定的目標氣體，從而為後續的氣體檢測和應用提供依據。多種氣體感測器加上 PCA 的數據處理，可以進一步結合機器學習模型，進行模型辨識和異常檢測。

而 Wenger 等人⁽²³⁾ 還設計了一種基於微機電系統 (microelectromechanical system, MEMS) 金屬氧化半導體 (MOS) 的氣體感測器，在實驗結果顯示了氣體感測器讀數急速下降，電池終端電壓開始上升，預示著電池已經釋放大量氣體，到熱失控開始的時間差只差距了 40 秒。這代表該感測器能夠在熱失控前發出警告，為緊急關閉電池系統提供了一定的時間，從而防止更嚴重的後果，如電池起火或爆炸。

根據 Koch 等人的研究⁽¹⁷⁾，他們在電池模組上結合了電壓、氣體、煙霧、蠕變距離、溫度、壓力、力感測器，進行三次的熱失控測試，如圖 10⁽¹⁷⁾，實驗結果表明每個感測器都有其挑戰與缺點，如表 2⁽¹⁷⁾，所以沒有明確的單一首選應用於熱失控當中，而兩個或多個感測器的組合，可以組成一個檢測系統，互相抵銷彼此的缺點，而電池的壽命穩定性、診斷能力、成本等則取決於電池設計和系統配置。

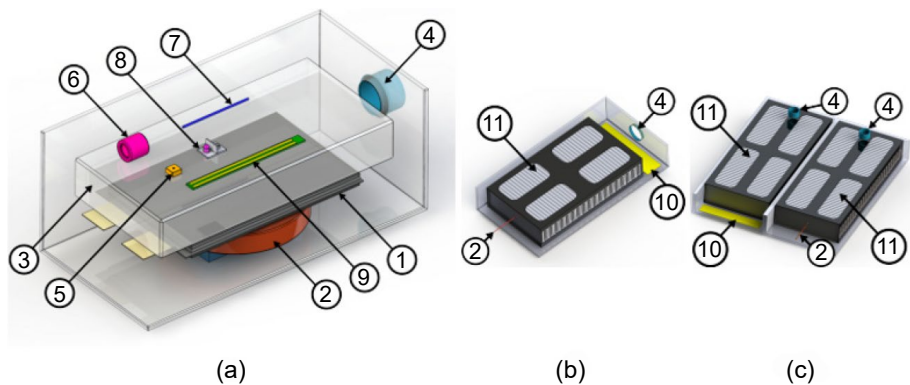


圖 10. 測試中三種不同配置⁽¹⁷⁾，(a) 第一次測試 (b) 第二次測試 (c) 第三次測試，外殼僅露出部分 (1) 電池 (11) 電池模組。(2) 加熱板／釘子、(3) 填充塊、(4) 通風口、(5) 壓力感測器、(6) 氣體感測器、(7) 溫度感測器、(8) 煙霧感測器、(9) 蠕變距離感測器、(10) 有感測器的區域⁽¹⁷⁾。

表 2. 不同感測器在三種類型的評估⁽¹⁷⁾。其中可行性為感測器佈署的難易度。(－) 為差、(0) 為中立、(+) 為良好。

感測器種類	檢測速度	信號清晰度	可行性
電壓	－	＋	＋
氣體	＋	＋	－
煙霧	－	0	0
蠕變距離	－	－	＋
溫度	0	0	0
壓力	＋	－	＋
力	＋	－	0

上述研究皆是透過多個感測器整合成一個模組，鋰電池的熱失控是一個迅速且難以控制的過程，一旦出現熱失控，電池內部溫度會迅速上升，並可能導致內部壓力增加、氣體釋放、結構變形等多種現象產生，因此整合感測系統能同步偵測多個參數，並將數據即時傳送至中央處理器進行分析。而且在實際環境中會有多中因素影響感測器的精度，像是汽車移動時的氣流導致氣體感測器無法偵測、環境溫度導致溫度感測器失真等因素，而透過結合多種感測器 (如氣體、壓力感測器) 的交叉驗證，能夠有效減少環境因素對於單一感測器的干擾，降低誤報的可能性，並且提升整體監控的可靠性。

表 3 比較了多種鋰電池預警偵測方法，包括溫度監測、氣體感測器、電化學監測以及外殼形變監測。各方法適用於不同需求，選擇時可根據具體應用場景來決定最佳的偵測手段。

表 3. 比較各種鋰電池預警偵測方法的研究做法、優缺點以及其限制。

偵測方法	研究做法	優點	缺點與限制	參考文獻
溫度檢測	使用熱電偶監測溫度	反應速度快，技術成熟	只能偵測溫度，易受環境影響	(14)
單一氣體感測器	監測 CO ₂ 或乙烯等 一氣體	靈敏度高，適合早期異常	只能檢測單一氣體資訊有限	(15)
外殼形變監測	使用壓力感測器監測外殼變形	可偵測內部壓力變化，適合結構損壞預測	無法直接偵測熱失控產生之氣體與溫度變化	(19)
壽命預測與建模	使用 BMS 與 EKF 演算法估算電池壽命	能長期準確估測電池健康和壽命	反應慢，僅適用於長期監測	(22)
複合式感測模組	結合多種感測器進行綜合監測	能監測多參數，快速偵測多元異常	配置複雜，成本較高	(23)
熱電堆與陣列式氣體感測器	使用紅外 LED+ 熱電堆和陣列式氣體感測器	高靈敏度，能即時偵測多種氣體和溫度變化	易受環境因素影響可透過交叉驗證減少干擾	(25)

六、結論

鋰電池在現代能源系統中的應用越來越廣泛，但性能穩定性和安全性依然是亟待解決的挑戰。本文分析了多種感測技術，包括溫度、氣體和煙霧感測器，以實時監控電池狀態並預警潛在風險。同時，電化學監測與光學監測技術 (如拉曼光譜和 X 光技術) 被應用於追蹤電池內部的化學結構變化，進一步提升鋰電池的安全性和性能。

通過結合多種感測技術，鋰電池的安全性有望得到顯著提升，從而有效防止熱失控等風險。這些技術將推動鋰電池在電動車和儲能市場中實現可持續發展。

展望未來，隨著新能源市場快速成長，鋰電池偵測技術的應用前景將更加廣闊。技術創新與多學科合作將推動更智能、更安全的鋰電池監控系統，為電動車、儲能系統等應用提供可靠保障，助力全球能源轉型和碳中和目標的實現。隨著新材料的引入和智能監測手段的持續優化，鋰電池的性能、安全性和壽命將達到新的高度。

參考文獻

1. Market Data Forecast, Lithium Ion Battery Market, Market Data Forecast Report, 150 (2024).
2. Intellect Markets, *Lithium Ion Battery Market*, (2024).
3. Please refer to the website: <https://is.gd/DfcURm>

4. Please refer to the website: <https://is.gd/6eYxj9>
5. Y Son, JS Lee, Y Son, JH Jang, J Cho, *Advanced Energy Materials*, **5** (16), 1500110 (2015).
6. J Liu, H Yuan, H Liu, CZ Zhao, Y Lu, XB Cheng, JQ Huang, Q Zhang, *Advanced Energy Materials*, **12** (4), 2100748 (2022).
7. MJ Loveridge, G Remy, N Kourra, R Genieser, A Barai, MJ Lain, Y Guo, Mark Amor-Segan, Mark A. Williams, Tazdin Amietszajew, Mark Ellis, Rohit Bhagat, David Greenwood, *Batteries*, **4** (1), (2018).
8. Board, N. T. S., Auxiliary Power Unit Battery Fire Japan Airlines Boeing 787-8, JA829J. Incident Report NTSB/AIR-14/01, National Transportation Safety Board, (2013).
9. Please refer to the website: <https://read01.com/zh-hk/DGj85dL.html>
10. Baird, Austin R., Erik J. Archibald, Kevin C. Marr, Ofodike A. Ezekoye, *Journal of Power Sources*, **446**, 227257 (2020).
11. Peng Bai, Ju Li, Fikile R. Brushett, Martin Z. Bazant, *Energy & Environmental Science*, **9** (10), 3221 (2016).
12. Jialiang Lang, Yuanzheng Long, Jiale Qu, Xinyi Luo, Hehe Wei, Kai Huang, Haitian Zhang, Longhao Qi, Qianfan Zhang, Zhengcao Li, Hui Wu, *Energy Storage Materials*, **16**, 85 (2019).
13. Liwei Zhao, Izumi Watanabe, Takayuki Doi, Shigeto Okada, Jun-ichi Yamaki, *Journal of Power Sources*, **161** (2), 1275 (2006).
14. Shuang, S. H. I., Nawei, L. Y. U., Jingxuan, M. A., Kangyong, Y. I. N., Lei, S. U. N., Ning ZHANG, Y. J., *Energy Storage Science and Technology*, **11** (8), 2452 (2022).
15. Ting Cai, Puneet Valecha, Vivian Tran, Brian Engle, Anna Stefanopoulou, Jason Siegel, *ETransportation*, **7**, 100100 (2021).
16. Ze Wang, Lei Zhu, Jianwei Liu, Jianan Wang, Wei Yan, *Energy & Fuels*, **36** (12), 6038 (2022).
17. Koch, Sascha, Kai Peter Birke, and Robert Kuhn, *Batteries*, **4** (2), 16 (2018).
18. Jan Philipp Schmidt, Stefan Arnold, Andre Loges, Daniel Werner, Thomas Wetzel, Ellen Ivers-Tiffée, *Journal of Power Sources*, **243**, 110 (2013).
19. 黃康哲, “聚偏二氟乙烯薄膜與布拉格光纖光柵感測器之動態量測技術研發與應用”, 國立臺灣大學機械工程學系學位論文, (2015).
20. 湯元會, 袁博興, 李傑, 張雲龍, 儲能科學與技術, **13** (4), 1326 (2024).
21. Chen, Siyan, Zhenhai Gao and Tianjun Sun, *Energy Science & Engineering*, **9** (9), 1647 (2021).
22. Plett, Gregory L., *Journal of Power sources*, **134** (2), 252 (2004).
23. Wenger, M., Waller, R., Lorentz, V. R., März, M., & Herold, M., “Investigation of gas sensing in large lithium-ion battery systems for early fault detection and safety improvement”, *IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE, 5654 (2014).
24. Zhen Wang, Yanhao Li, Xiangnan He, Rui Yan, Zhemin Li, Yadong Jiang, Xian Li, *Sensors and Actuators B: Chemical*, **401**, 134996 (2024).
25. Shaoda Zhang, Wu Bin, Binbin Xu, Xingyu Zheng, Binbin Chen, Xueqin Lv, Haisheng San, Werner Hofmann. *Nanoscale Research Letters*, **14** (1), 348 (2019).

作者簡介

宜千鈺小姐現為南臺科技大學機械工程系學士生。

Qian-Yu Yi is currently a B.S. student in the Department of Mechanical Engineering at Southern Taiwan University of Science and Technology.

王聖璋先生為國立台灣大學材料科學與工程所博士，現為南臺科技大學機械系教授。

Sheng-Chang Wang received his Ph.D. in Material Engineering from National Taiwan University. He is currently a Professor in the Department of Mechanical Engineering at Southern Taiwan University of Science and Technology.

蕭育仁先生為國立成功大學材料科學與工程所博士，現為高雄科技大學車輛工程系教授。

Yu-Jen Hsiao received his Ph.D. in Material Engineering from National Cheng Kung University. He is currently a Professor in the Department of Vehicle Engineering at National Kaohsiung University of Science and Technology.