



白皮書

# 鋰離子電池的安全議題

可攜式電器及電子產品廣泛使用鋰離子電池作為電力來源。雖然鋰離子電池 (Lithium-ion Battery) 公開的使用故障率相對較低，但幾項關於其使用時意外的公開報導 (包括起火和爆炸)，則引發民眾對鋰離子電池的整體安全疑慮。現行的測試標準雖已針對鋰離子電池使用的某些特定安全風險進行評估，並要求必須進行幾項個別測試；然而 UL 以及其他標準發展機構仍不斷地修正與更新現行的鋰電池標準，以反映鋰離子電池在實際發生故障等層面的相關新知。這些機構致力於電池安全研究，著重鋰離子電池的內部短路等故障問題。當前的研究方向正朝著強化鋰離子電池安全標準前進。

## 概況

綜觀過去 20 年，可充電 (亦稱二次) 鋰離子電池透過技術的不斷演繹，已能逐步提供更高的能量密度、更大的能源量、更長的壽命以及更佳的可靠度。商用鋰離子電池目前廣泛為電器及電子裝置提供電力，其中包括以下各類裝置：

- **消費性電器與電子裝置** — 鋰離子電池為多種消費性電器及電子裝置提供電力，從手機、數位相機到筆記型電腦均有。
- **醫療裝置** — 鋰離子電池也用在醫療診斷設備中，包括病患監控器、手持手術工具以及攜帶型診斷設備。
- **工業設備** — 工業設備為鋰離子電池提供大量的應用機會，包括充電式電動工具、電信通訊系統、無線保全系統以及戶外可攜式電子設備。
- **汽車應用** — 新一代的電動車由大型的鋰離子電池包提供電力，包括電動車、油電複合車、插電式油電複合車以及輕型電動車。

UL 積極參與全球的標準發展，並有技術人員以領導及專家的角色參與多項與電池及燃料電池技術相關的國際性委員會及修訂團隊。

**Laurie Florence 女士**為 SC21A — Working Group 5 的召集人 (主席)。她同時為 SC21A US TAG 與 SC21A WGs 2、3、4 及 5 的成員。

Florence 女士亦是 TC 35 US TAG 與 TC 35 MT 15 的成員，並是 ANSI NEMA C18 委員會的成員。她參與 IEEE 1625 以及 IEEE 1725 的修訂工作；也加入修訂 UN T6 的任務團隊，並參與 CTIA 電池特別委員會。

**Harry P. Jones 先生**為 IEC TC105 — Working Group 8 的召集人 (主席)。

Florence 女士和 Jones 先生皆參與 SAE J2464 和 SAE J2929 標準的發展。

Florence 女士與 **Alex Liang 先生** (UL 台灣) 皆參與 ETF 13 電池專案小組。

**UL 台灣**成為全球第一個獲認可 IEC 62133 CB 測試實驗室 (CBTL) 的隨後，**UL 蘇州**也取得資格。

**UL 日本**獲准可在日本針對鋰離子電池提供 PSE 認證，是 DENAN 方案的一部份。

**UL** 為美國無線通訊協會 (CTIA) 授權的電池認證方案檢測實驗室 (CATL)。



### 供手機使用之鋰離子電池範例

目前研究機構已預估全球鋰電池 (Lithium Battery) 的市場年銷量在 2014 年將可達到近百億美元，其中鋰離子電池即佔了 86% (86 億美元)<sup>1</sup>。然而，隨著全球鋰離子電池的使用量驟增，再加上大量的電池為因應產品在各種環境下使用而提供電力，近年幾項使用意外卻引發人們對其安全的疑慮。相較於全球使用的電池量，雖然使用鋰離子電池所引發的整體故障率極低，但幾件與消費電子產品，如筆記型電腦和電子玩具的公開報導，則導致製造商、美國消費產品安全委員會 (U.S. Consumer Product Safety Commission) 以及其他機構多次因為安全因素而召回數量龐大的產品。其中有些案例即和鋰離子電池過熱有關，此將可能導致起火或爆炸。

儘管諸如 IEC 及 UL 等全球獨立標準機構已針對電力及安全性測試研發並制定多項標準，以因應眾多潛在的鋰離子電池誤用，隨著複雜的電池技術為滿足市場需求而不斷地演變，對產品潛在故障模式的認知理解也持續地上升。了解這些知識並轉換成有效的安全標準，是 UL 針對電池研究活動的主要重點，以期持續回應鋰離子電池的公共安全使用與處理。

<sup>1</sup> 「鋰電池：市場與材料」報告 FCB028E，2009 年 10 月，網址：  
[www.bccresearch.com](http://www.bccresearch.com)

<sup>2</sup> 「FTA/FMEA 鋰離子電池的安全性分析模型」— UL 在 2009 年美國國家航空暨太空總署 (NASA) 的航太電池研討會上所做的報告。

## 鋰離子電池設計與選擇考量

鋰離子電池是一種能源儲存裝置，電池放電時，電池中的鋰離子透過電解質從負極 (「陽極」) 移動到正極 (「陰極」)，充電時則從正極移動到負極。鋰離子電池中的電化學活性物質，通常是鋰、金屬氧化物用於陰極，鋰化碳用於陽極。電解質可以是液體、膠質、聚合物或陶瓷。就液態電解質而言，微透氣薄膜 (厚度接近微米) 可以在陰極與陽極之間提供電氣絕緣，同時仍能提供離子傳導性。基礎鋰化學上的不同型態亦可展現各種不同的性能與安全性的問題。

鋰離子電池廣泛用於商業用途始於 1990 年代，自此之後，便開發出各式各樣的鋰電池設計，以滿足各種不同的產品需求。應用於產品中的電池選擇，通常會受到多種考量影響，包括電力與能源的適用要求、由電池提供電力之產品的預設使用環境以及電池成本。在選擇適用的電池所會有的其他考量可能含：

- 產品的預期運作週期 (持續或間斷)
- 欲應用之產品所需的電池壽命
- 電池的實體特性 (如尺寸、形狀、重量等)
- 維修及電池壽命終了時的相關考量

鋰離子電池通常比其他替代性的化學電池昂貴，但其卻相對具有多項優點，如高能量、高能量密度、低重量容積比。

## 導致鋰離子電池安全出現危險的原因

電池製造商及以生產運用電池供電之產品的業者，皆應針對預期的使用情況來採以安全的方式進行產品設計，從而提供特定的性能特色。因此，不當的設計、未符合預期的使用方式或濫用產品可能皆會造成故障 (包括性能或安全性)。

目前對於單芯電池與多芯電池 (如用在電動車上)，分別均設有相關的被動性和主動性保護措施，以減緩或預防故障。但儘管如此，產品仍會面臨多種性能及安全的艱鉅挑戰，包括電池內的活性物質在高溫下的熱穩定性，以及可能因為內部短路所導致的熱失控。

在產品研發的過程中，製造商應採用某些工具來進行風險評估，如故障模式、及效果分析和故障樹技術圖分析。目前 UL 已經開

使應用上述工具來進行危險來源分析，並從中制訂產品安全標準的安全測試<sup>2</sup>。

## 適用的產品安全標準與標準測試程序

為了因應鋰離子電池使用上所可能產生的相關安全風險，目前已有幾項標準及測試程序，用以指導製造商如何用更安全的方式來建構及使用鋰離子電池。

產品安全性標準通常會通過討論來進行審定，此有賴於規範制定單位、製造商、產業團體、消費者保護組織、保險公司以及其他重要的安全機構參與。技術委員會針對產品制定標準，較不依賴制定規定，且更著重性能測試，來模擬可能導致產品故障的合理情況。

以下是現行用於評估一次及二次鋰電池某些安全方面的標準及測試程序：

### UL (Underwriters Laboratories) —

- UL 1642：鋰電池
- UL 1973：(提案) 應用於輕型電軌車及充電站的電池
- UL 2054：家用及商用電池
- UL Subject 2271：應用於輕型電動車的電池
- UL 2575：用於電動機具及馬達運作、燈具及加熱裝置的鋰離子電池系統
- UL Subject 2580：用於電動車的電池

### 電機電子工程師學會 (Institute of Electrical and Electronics Engineers) —

- IEEE 1625：用於多電池行動運算裝置的可充電式電池
- IEEE 1725：用於手機的可充電式電池

### 美國國家電器製造商協會 (National Electrical Manufacturers Association) —

- C18.2M：第 2 部份，可攜式可充電電池芯及電池組 – 安全性標準

### 美國自動車工程師協會 (Society of Automotive Engineers) —

- J2464：電動與 Hybrid 油電混合電動車可充電能源儲存系統、安全性與誤用測試
- J2929：電動和 Hybrid 油電混合電動車電池系統安全性標準 – 可充電鋰電池

### 國際電工委員會 —

- IEC 62133：可充電的電池 (含鹼性電池) – 可攜式二次電池、電池組以及在應用於可攜式產品中的安全規定
- IEC 62281：運輸中的一次與二次鋰電池安全

### 聯合國 —

- 針對第 38.3 節第三部份對危險物品之運輸、測試方法與條件的建議

### 日本技術標準規格協會 (Japanese Standards Association) —

- JIS C8714：應用用於可攜式電子產品的可攜式二次式鋰離子電池芯與電池組之安全測試

### 電池安全組織 (Battery Safety Organisation) —

- BATSO 01：(提案) 評估輕型電動車能源系統方法 – 二次式鋰電池

## 常見的鋰離子電池產品安全測試

以上的標準和測試程序均納入了多項產品安全測試，用以評估電池抵禦某些誤用情形的能力。表 1 (下頁) 提供各類誤用測試的總覽，並說明適用的鋰離子電池安全標準與測試程序一致化的程度。

很重要的一點是，須注意不同文件中的相同名稱之程序所進行的執行方式並不盡相同。比如，針對特定的測試，不同文件要求的樣品數可能會有所不同，或測試前的樣品充電狀態不同。最常見的鋰離子電池產品安全測試，通常目的都在於評估因電氣、機械或環境狀況而導致的特定風險。除少數例外情況外，上述提及之標準與標準測試程序均納入了這些常見的誤用測試。接下來的章節會詳細說明各項常見的測試。

## 鋰離子電池的安全標準與測試程序

表 1：國際鋰離子電池安全標準與標準測試程序中的誤用測試摘要<sup>3</sup>

測試準則/標準	UL					IEC		NEMA	SAE	UN	IEEE		JIS	BATSO
	UL 1642	UL 2054	UL Subject 2271	UL Subject 2580	UL 2575	IEC 62133	IEC 62281	C18.2M, Pt2	J2464	Pt.III,S 38.3	IEEE 1625	IEEE 1725	JIS C8714	BATSO 01
1. 外部短路 External Short Circuit	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
2. 異常充電 Abnormal Charge	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
3. 強迫放電 Forced Discharge	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
4. 壓碎 Crush	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
5. 衝擊 Impact	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
6. 衝震 Shock	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
7. 振動 Vibration	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
8. 高溫 Heating	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
9. 溫度循環 Temperature Cycling	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
10. 低壓 (高度) Low Pressure (Altitude)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
11. 燒射 Projectile	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
12. 墜落 Drop	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
13. 持續低電流充電 Continuous Low Rate Charging	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
14. 外殼加熱測試 Molded Casing Heating Test	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
15. 開路電壓 Open Circuit Voltage	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
16. 絕緣阻抗 Insulation Resistance	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
17. 反向充電 Reverse Charge	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
18. 穿刺 Penetration	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
19. 內部短路測試 Internal Short Circuit Test	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

<sup>3</sup> Jones, H., et al., 「商用二次鋰離子電池安全標準評論」, UL 在 2010 年 5 月第四屆 IAASS 安全事項大會上所做的報告

### 電力測試 (Electrical Tests)

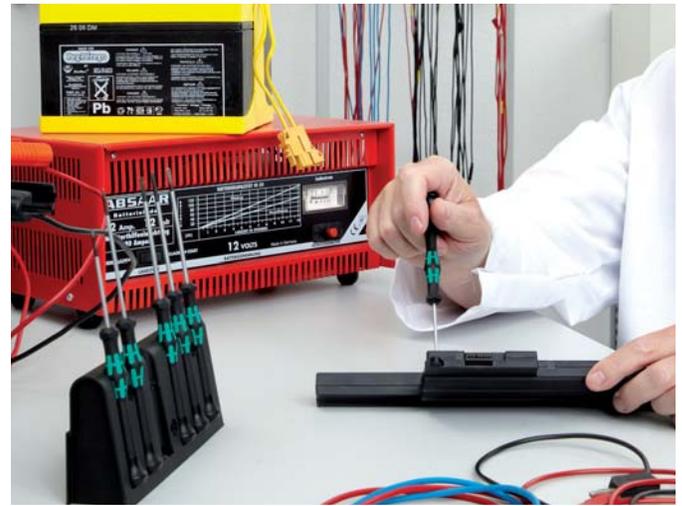
- **外部短路測試 (External Short Circuit Test)** — 外部短路測試直接連接電池的陽極和陰極，以檢測電池在無引起爆炸或起火的前提下，抵抗極大電流情況的能力。
- **異常充電測試 (Abnormal Charging Test)** — 異常充電測試是用大於充電電流以及充電時間的條件，檢測電池是否能在不引起爆炸或火災的前提下抵抗這類情況。
- **強迫放電測試 (Forced Discharge Test)** — 強迫充電測試檢測當電池以特定數目、同樣類型已充電的電池串接時會出現的行為模式，其主要在於製造失衡的串接電池組，然後將其短路。電池在不會產生爆炸或起火，方可通過本項測試 (BATSO 01 並未要求進行本項測試)。

### 機械測試 (Mechanical Tests)

- **壓碎測試 (Crush Test)** — 壓碎測試檢測電池在受到兩個平板 (通常透過擠壓方法，如 SAE J2464，包括電池芯以鋼棒擠壓，電池組以條狀平壓) 擠壓下 (通常為 13 kN) 的耐受力。電池在不會產生爆炸或起火，方可通過本項測試 (IEC 62281 或 UN 38.3 並未要求進行本項測試)。
- **衝擊測試 (Impact Test)** — 本衝擊測試由圓柱型鋼棒橫跨在測試電池上，由此檢測電池承受本項特定衝擊的能力。電池在不會產生爆炸或起火，方可通過本項測試 (SAE J2464、JIS C8714 或 BATSO 01 並未要求進行本項測試)。
- **衝震測試 (Shock Test)** — 衝震測試是把測試電池固定在經過校準的機器，並在一定的測試時間中以特定的平均加速及最大加速進行測試。電池在不會產生爆炸、起火、滲漏或裂縫，方可通過本項測試。
- **振動測試 (Vibration Test)** — 振動測試是以特定的振幅讓電池承受簡單運動；在不同的頻率和時間下。電池在不會產生爆炸、起火、滲漏或有裂縫，方可通過本項測試。

### 環境測試 (Environment Tests)

- **高溫測試 (Heating Test)** — 高溫測試評估電池在一段期間內承受遞增至高溫的能力。電池在不會產生爆炸或起火，方可通過本項測試 (IEC 62281、UN 38.3 或 BATSO 01 並未要求進行本項測試)。
- **溫度循環測試 (Temperature Cycling Test)** — 溫度循環測試是將每個電池樣本經過若干次溫度循環，以測試電池在高於及低於室溫等特定溫度時的耐受力。電池在不會產生爆炸、起火、裂縫或滲漏，方可通過本項測試。
- **低壓 (高度) 測試 (Low Pressure (Altitude) Test)** — 低壓測試在於評估電池暴露在低於標準大氣壓力環境中 (如機艙中忽然失壓) 的耐受力。電池在不會產生爆炸、起火、裂縫或滲漏，方可通過本項測試 (UL 2054 並未要求進行本項測試)。



接受測試的鋰離子電池

## 其他特定測試

除了以上討論的常見誤用測試，某些鋰離子電池的產品安全標準與測試程序會要求進行其他特定測試。這些測試主要在於驗證電池的特定使用狀況及操作環境。

- **燒射測試 (Projectile (Fire) Test)** — 依照 UL 1642、UL 2054、UL Subject 2271、IEEE 1625 及 IEEE 1725 規定必須進行本燒射測試。本項測試是將電池樣品置於一個絲網構成的特殊屏內，並在測試爐的火焰中進行測試。若火焰燃燒導致電池爆炸或起火，則電池樣品的任何部份均不可穿透或凸出網屏。
- **墜落測試 (Drop Test)** — 依照 UL Subject 2271、UL Subject 2580、IEC 62133、IEC 62281、NEMA C18.2M Part 2、JIS C8714 及 BATS0 01 規定須進行本墜落測試。本測試是將每個電池樣品以自由落體掉落至硬表面數次，並於每次掉落後經過一段時間檢查電池樣品。電池不可爆炸或起火，方可通過本項測試。
- **持續低電流充電測試 (Continuous Low Rate Charging Test)** — 依照 IEC 62133 規定必須進行本持續低電流充電測試。本項測試將已完全充電的電池樣品，以製造商指定的充電速率，採用長時間且不中斷的方式進行充電。電池在不會產生爆炸、著火、或漏液，方可通過本項測試。
- **外殼加熱測試 (Mold Stress Test)** — 依照 NEMA C18.2M Part 2、UL 2054、IEC 62133 及 UL Subject 2271 規定必須進行本外殼加熱測試。本項測試將塑膠外殼的電池組置於持續加熱到一定溫度的環境中，並維持一段固定時間。一旦電池組冷卻到室溫後，即檢查電池組，其外殼的變形不能導致內部元件外漏阻抗，方可通過本項測試。
- **絕緣阻抗測試 (Insulation Resistance Test)** — 依照 UL Subject 2580、IEC 62133 及 NEMA C18.2M Part 2 規定必須進行本絕緣阻抗測試。本項測試主要針對電池樣品量測每個電池正負極與電池組可接觸金屬之間的電阻。測得的電阻必須超過指定的最低值，方可通過本項測試。
- **反向充電測試 (Reverse Charge Test)** — 依照 IEC 62133、UL Subject 2271 及 UL Subject 2580 規定必須進行本反向充電測試。本項測試將已放電的電池樣品置於反向充電情況下一段時間，並以指定電流充電，以檢測電池的反應。電池在不會產生爆炸或起火，方可通過本項測試。

- **穿刺測試 (Penetration Test)** — 依照 UL Subject 2271、UL Subject 2580 及 SAE J2464 規定必須進行本穿透測試。本項測試以尖銳的金屬棒刺穿電池，同時檢測金屬棒加速度、電池變形程度、電池溫度、電池的終端電壓及電阻。

## 內部短路：可能的原因及測試需考慮問題

看過諸多鋰離子電池安全研究之後，您可以發現內部短路是相當重要的議題。有些實際故障會引發起火或爆炸，導致產品受損或人員受傷，而這些問題都與鋰離子電池內部短路有關。然而，如表 1 所示，多數鋰離子電池安全標準及測試標準程序並未特別納入內部短路測試。近年來，UL 與許多重要電池研究機構結盟，如阿爾貢國家實驗室 (Argonne National Laboratories) 及美國太空總署 (National Aeronautic and Space Administration)，以更深入了解內部短路的根源。我們的研究重點主要在於界定及發展安全測試，以評估電池在某些誤用情況下出現內部短路的傾向。

## 內部短路的可能原因

儘管造成內部短路的原因可能很多，但基本上都是陰極與陽極之間的通道容許有效但非預期中的電流通過。這種高度局部性的電流會因為內部電阻而導致局部加熱，之後造成鋰離子電池內部的活性物質被加熱。升高的溫度可能會破壞活性物質，而引發連鎖的放熱反應。電池中累積熱量及壓力可能會導致電池外殼發生嚴重的結構性損壞，並因為接觸到外部空氣而造成更多的燃燒危險。

內含安全裝置的鋰離子電池，設計上考量了當發生電流過大情況或釋放電池內累積的過度壓力時，便會截斷電流或讓釋壓閥啟動，但是這些安全裝置仍無法適當舒緩所有內部的故障情況，比如內部短路。像電動車這類產品動輒要用到數百個電池，因此需要更周密的保護措施，如電池管理系統。顯然在這方面最理想的情況是，需有能夠評估電池可能出現內部短路的測試組合 (模擬眾多誤用情況)。

然而，在針對特定故障設計測試時，還是必須先了解其根源及故障原因。這些原因可能包含重大的內部缺失，或是足以使電池內部變形、足以損害隔離膜的嚴重外力；不過在許多故障情況下，

往往只能找到部分的根源及故障原因。鋰離子電池的設計人員與研究人員正努力研製出可緩和這些原因的新電池設計方法。

## 內部短路測試

造成內部短路的根源性原因很多，因此，很難設計出可以評估鋰離子電池內部短路的單一安全測試。到目前為止，僅有 JIS C8714 明訂內部短路測試，稱為強迫內部短路 (FISC) 測試 (註：IEEE 1625 附錄 D 參考資料有關 JIS C8714 的強迫內部短路測試)。

本項測試拆解已充電的電池外殼，並在電池內部繞組放入小鎳片 (這對測試操作人員是一項相當危險的作業程序)。拆掉外殼的電池樣品，之後要在升高的溫度下承受特定的擠壓。然而，安全性設計的最佳作法是避免拆解產品這道程序。所有測試應在盡量降低實驗室人員風險下執行<sup>4</sup>。

為達此目的，UL 研究人員研發出一套測試<sup>5</sup>，讓鋰離子電池在溫度升高的情況外殼承受鈍針之局部壓力以引發內部短路。在本項測試中，會即時測量開路電壓、電池表面溫度、力量以及鈍針施壓的位置。本項測試目前正在發展當中，將來可能納入 UL 1642 及 UL Subject 2580。

## 從電池安全邁向系統安全

鋰離子電池通常是直接銷售給最終產品製造商 (OEM)，以做為終端產品中的元件。由於 OEM 的最終產品實際上掌控前述的種種功能，因此，與電池充電率、放電率及反向充電相關的安全議題，可能無法僅由測試電池而獲得妥善解決。

有鑒於此，國際標準組織正努力強化 OEM 產品與整合鋰離子電池的相容性，將適用的標準納入適當的性能測試當中。這類性能測試的範例，可參見 IEC 60950-1 (UL 60950-1) 資訊科技設備安全第一節 (Information Technology Equipment – Safety – Part 1)。

## 展望未來

隨著鋰離子電池的發展成為基礎研究與產品發展的活躍領域，對於這些產品的使用、誤用以及可能發生的故障模式方面的認知仍必須不斷地加強。這些能源儲存裝置將會為越來越多的產品提供電力，因此，安全標準必須不斷精進，以確保其商業使用的安全性，這一點相當重要。

UL 將繼續投入大量資源，將電池安全研究轉化為安全標準。此一重點涵蓋廣泛的化學及電池設計，工作則包括多層面的連續性，從材質與元件特性，到電池系統以及其他更廣泛的領域。

欲了解本白皮書的其他詳細內容，請聯絡電池、電容、燃料電池及氫氣生產器首要工程師 Laurie Florence 女士，電郵：[Laurie.B.Florence@us.ul.com](mailto:Laurie.B.Florence@us.ul.com)。

<sup>4</sup> Yen, K.H., et al., 「鋰離子電池誤用下所引發之爆炸性壓力評估」，UL 在 2010 年 7 月第四十四屆能源會議上所做的報告。

<sup>5</sup> Wu, Alvin, et al., 「鋰離子電池內部短路鈍針擠壓測試 (BNC)」，UL 在 2009 年美國國家航空暨太空總署 (NASA) 的航太電池研討會上所做的報告。