

Giuseppe Antonio Elia, Maria Assunta Navarra
Dipartimento di Chimica
Università di Roma "La Sapienza"
giuseppeantonio.elia@uniroma1.it,
mariassunta.navarra@uniroma1.it

ACCUMULATORI LITIO-IONE, ELEMENTI CHIAVE PER UNA POLITICA ENERGETICA SOSTENIBILE

Gli accumulatori litio-ione sono un sistema di accumulo dell'energia ad elevata densità d'energia. Inizialmente chiave per lo sviluppo dell'elettronica portatile, sono oggi di fondamentale importanza nell'evoluzione energetica sostenibile. L'utilizzo di questo sistema presenta tuttavia una serie di problemi da risolvere. In questo articolo sono descritti i sistemi d'accumulo litio-ione e le possibili strade da percorrere per migliorarne le prestazioni.

L'attuale sistema energetico, basato sulla combustione dei combustibili fossili, pone il serio problema del rilascio di gas serra nell'atmosfera collegato con il fenomeno del riscaldamento globale. L'utilizzo di sistemi di trasporto a trazione elettrica o ibrida e sistemi di produzione dell'energia da fonti rinnovabili rappresenta una possibile soluzione a questo problema. In questo scenario sono d'interesse strategico i sistemi di accumulo dell'energia, sia per quanto riguarda la trazione elettrica che per l'accumulo stazionario necessario per il *load-levelling* nei sistemi di produzione dell'energia da fonti alternative di tipo discontinuo, come il solare e l'eolico. Fra i vari sistemi di accumulo dell'energia quello elettrochimico presenta delle ottime caratteristiche di efficienza, in particolare per la trazione

elettrica. Fra gli accumulatori elettrochimici gli accumulatori litio-ione sono quelli che presentano la più elevata densità d'energia, dell'ordine di 150 Wh/kg o 350 Wh/l in sistemi convenzionali, più di due volte superiore agli altri sistemi di accumulo elettrochimico, come piombo acido e nichel metallo idruro. L'interesse per il litio come materiale anodico per accumulatori nasce dal suo basso potenziale redox (-3,04 V vs l'elettrodo standard a idrogeno), che permette di ottenere accumulatori con elevata tensione e dal basso peso molecolare, che conferisce alla reazione elettrochimica di ossidazione del litio metallico $\text{Li} \rightarrow \text{Li}^+ + e^-$ una capacità specifica teorica di 3.861 mAh/g. I vantaggi legati all'uso del litio metallico in un accumulatore vennero per la prima volta dimostrati negli anni Settanta con una cella a litio primaria [1]. In

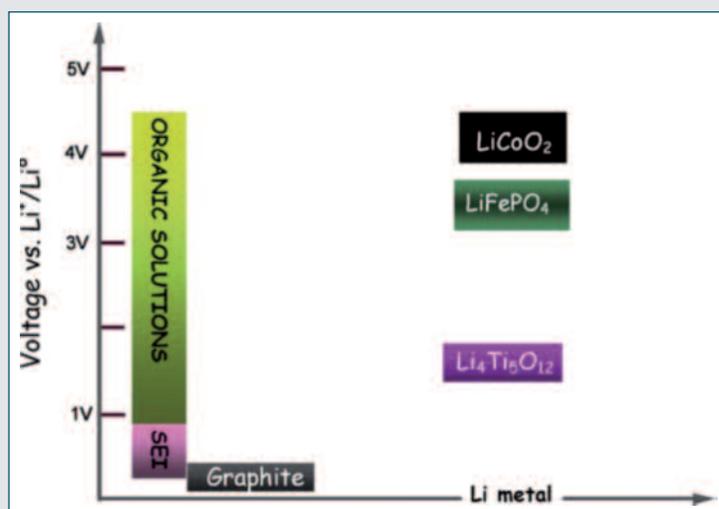


Fig. 2 - Scala potenziale vs. Li⁺/Li⁰ di vari materiali elettrodi in confronto alla finestra di stabilità dei convenzionali elettroliti a base di carbonati. Immagine ottenuta dal riferimento [7] con licenza Elsevier n. 2984820340356

seguito la scoperta di numerosi composti a intercalazione capaci di reagire reversibilmente con il litio fu cruciale per lo sviluppo di accumulatori a litio ricaricabili. Ben presto fu evidente come l'uso del litio metallico quale materiale anodico per accumulatori presentasse notevoli problemi di sicurezza e stabilità legati alla presenza di un metallo altamente reattivo come il litio che, in caso di potenziale rottura del contenitore dell'accumulatore, verrebbe esposto all'ossigeno dell'aria con conseguente reazione violenta; inoltre il processo elettrochimico di dissoluzione-deposizione del litio porta alla formazione di dendriti che cortocircuitano l'accumulatore limitandone così la vita di ciclo.

La sostituzione del litio metallico con un materiale ad inserzione, dimostrato per la prima volta dal gruppo di ricerca di Murphy [2] e dal gruppo di ricerca di Scrosati [3] agli inizi degli anni Ottanta, permette di ottenere un accumulatore intrinsecamente più sicuro e risolve il problema della formazione dei dendriti.

Il sistema prese il nome di *Li-ion* o *rocking-chair batteries*. In Fig. 1 è riportato lo schema tipo di questi accumulatori che in genere utilizzano grafite come materiale anodico ed un ossido di metallo di transizione al catodo. La prima applicazione commerciale di questo tipo di accumulatori avvenne nel 1991, con la commercializzazione da parte della Sony di un accumulatore litio-ione che utilizza come anodo grafite, come catodo litio cobalto ossido (LiCoO₂) e come elettrolita una soluzione di sale di litio a base di alchilcarbonati. Questo tipo di accumulatore ha una tensione di cella superiore a 3,6 V ed una densità d'energia di 120-150 Wh/kg [4].

Ormai, a più di vent'anni dalla commercializzazione, questo sistema è ancora il più utilizzato per gli accumulatori dei dispositivi portatili. Questo tipo di accumulatore non presenta parametri di sicurezza, efficienza e prestazioni tali da permetterne l'applicazione in veicoli elettrici o accumulatori stazionari. Ciò implica una necessaria ricerca al miglioramento, con lo sviluppo di materiali innovativi sia per il comparto anodico che per il comparto catodico e lo studio di nuovi elettroliti atti ad incrementare la sicurezza e le prestazioni di questi dispositivi.

Ottimizzazione della sicurezza negli accumulatori litio-ione

La sostituzione dei materiali elettrodi attualmente usati con materiali caratterizzati da parametri di sicurezza più elevati rappresenta una possibile evoluzione dei sistemi convenzionali. Il LiCoO₂ in condizioni di sovraccarica può rilasciare ossigeno che può reagire con l'elettrolita, che essendo infiammabile può dare luogo all'esplosione dell'accumulatore. Sulla superficie della grafite durante il primo ciclo di scarica si ha la formazione di un film di passivazione con concomitante decomposizione dell'elettrolita. L'uso di materiali chimicamente più stabili permette di ovviare al problema. Al catodo, il litio ferro fosfato LiFePO₄ (LFP) [5], per via del più forte legame dei gruppi PO₄ rispetto al CoO₂, presenta una maggiore stabilità chimica, che si riflette in una maggiore vita di ciclo ed una minore tendenza a dare reazioni parassitarie. Inoltre questo materiale, utilizzando il ferro al posto del cobalto come metallo di transizione è meno tossico e costoso, mantenendo comunque delle ottime prestazioni; infatti, nonostante la più bassa tensione di lavoro (3,4 V vs Li⁺/Li rispetto a 3,6 V vs Li⁺/Li di LiCoO₂) possiede una capacità specifica più elevata (170 mAhg⁻¹ rispetto ai 140 mAhg⁻¹ di LiCoO₂). All'anodo, i materiali con i parametri di sicurezza più elevati sono quelli a base di titanio, in particolare il litio titanio ossido Li₄Ti₅O₁₂ (LTO) [6]. Questo materiale ha un potenziale di lavoro di 1,5 V vs Li⁺/Li, il che rende intrinsecamente più sicuro il materiale, infatti, l'accumulatore non raggiunge il potenziale che porta alla decomposizione dell'elettrolita, tipicamente minore di 0,8 V vs Li⁺/Li. La rappresentazione grafica dei potenziali elettrochimici dei materiali più utilizzati in confronto alla stabilità elettrochimica delle soluzioni elettrolitiche a base di carbonati comunemente usate è riportata in Fig. 2 [7]. Naturalmente l'incremento in sicurezza ha come prezzo la riduzione in densità d'energia dell'accumulatore. Infatti, una cella litio-ione LTO/LFP avrebbe una tensione di 2 V, inoltre la capacità specifica del Li₄Ti₅O₁₂ è più bassa della grafite (175 mAhg⁻¹ rispetto ai 372 mAhg⁻¹ della grafite); questo viene controbilanciato dal miglioramento in termini di sicurezza del sistema, oltre che dai minori costi, e della minore tossicità dei componenti.

Oltre allo sviluppo di nuovi materiali elettrodi, è di fondamentale importanza lo sviluppo di nuovi sistemi elettrolitici, che sostituiscano quelli attualmente utilizzati a base di solventi organici volatili ed infiammabili. Di notevole interesse per questo tipo di applicazioni sono i liquidi ionici, sali allo stato liquido a temperature inferiori a 100 °C [8]. Tipicamente i liquidi ionici sono costituiti da un catione di grandi dimensioni (fra i più utilizzati il pirrolidinio e l'imidazolio) ed un anione con elevata delocalizzazione di carica (fra i più utilizzati la bis(trifluorometan)sulfonimide (CF₃SO₂)₂N⁻); tali caratteristiche rendono difficile la cristallizzazione di questa classe di composti. I liquidi ionici sono caratterizzati dall'aver un'elevata conducibilità, una buona compatibilità ambientale, e soprattutto sono caratterizzati da un'elevata stabilità termica. Infatti, al contrario dei carbonati alchilici, volatili ed infiammabili, tipicamente usati come solventi nell'elettrolita, i liquidi ionici sono stabili fino a temperature dell'ordine di 300-400 °C e non sono infiammabili.

Inoltre la varietà di liquidi ionici ottenibili è enorme, garantendo una fonte

inesauribile di materiale per soddisfare le richieste che derivano dallo sviluppo di nuovi dispositivi. Alcune classi di liquidi ionici sono chimicamente stabili in un'ampia finestra di potenziale, cosa che permette di utilizzare in sicurezza materiali catodici ad elevato potenziale come i $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ (4,7 V vs Li+/Li) o il LiCoPO_4 (5 V vs Li+/Li) [9], con i quali si possono ottenere accumulatori ad elevato potenziale e con elevata densità d'energia. L'uso dei liquidi ionici negli accumulatori necessita comunque di un ulteriore sviluppo; infatti, non è del tutto chiarita la questione della stabilità dei liquidi ionici a bassi potenziali (potenziali minori di 0,8 V vs Li/Li+) [10]. L'instabilità a bassi potenziali si riscontra tipicamente nei liquidi ionici che utilizzano cationi a base di imidazolio, mentre quelli a base di pirrolidinio presentano una migliore stabilità catodica. L'uso dei liquidi ionici è però ancora limitato dall'elevato costo, per questo in molti lavori i liquidi ionici vengono utilizzati come additivi ai convenzionali elettroliti a base di carbonati, in concentrazioni tali da garantire un miglioramento della stabilità termica [11]. Naturalmente la sicurezza è solo uno dei parametri per lo sviluppo degli accumulatori litio-ione, altrettanto fondamentale è lo sviluppo di sistemi con maggiore densità d'energia.

Incremento delle prestazioni dei sistemi litio-ione

Per un'applicazione in auto elettrica è impensabile utilizzare i sistemi litio-ione attuali, che hanno una densità d'energia di 140 Wh/kg, per cui è possibile ottenere un'autonomia di 150 km utilizzando un accumulatore di 160 kg. È necessario quindi lo sviluppo di accumulatori con maggiore densità d'energia e per questo è necessario sviluppare materiali elettrodi con elevata capacità specifica. Lo stagno ed il silicio presentano ottime caratteristiche in quest'ottica; infatti, questi materiali formano reversibilmente lega con il litio fino a formare $\text{Li}_{4.4}\text{Sn}$ e $\text{Li}_{4.4}\text{Si}$, potendo fornire una capacità specifica rispettivamente di 990 mAhg^{-1} e 4200 mAhg^{-1} , molto più elevata rispetto ai 372 mAhg^{-1} della grafite usata nei dispositivi convenzionali. L'applicazione di questi materiali è però limitata dalla bassa vita di ciclo; questo problema è legato alla grande variazione di volume che subisce il materiale, in seguito al processo di alligazione, che provoca un forte stress meccanico al materiale con conseguente formazione di fratture che, al procedere dei cicli di carica e scarica, provoca la polverizzazione del materiale

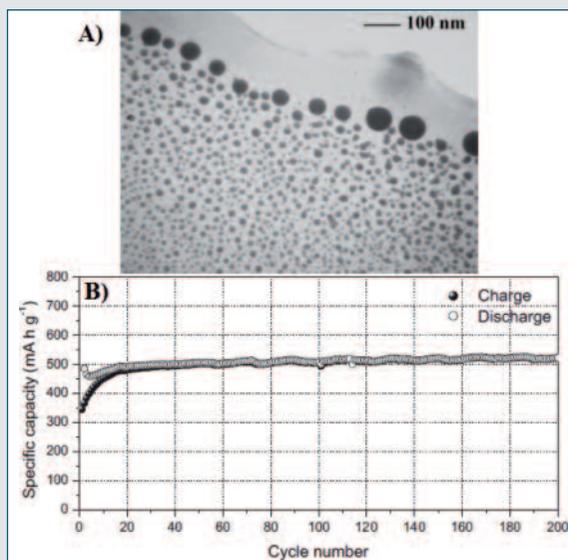


Fig. 3 - A) Immagine TEM del nanocomposito Sn-C, B) prestazioni elettrochimiche in cella a litio del nanocomposito Sn-C [12]. Immagini ottenute dal riferimento [12] con licenza Wiley n. 2983651429407

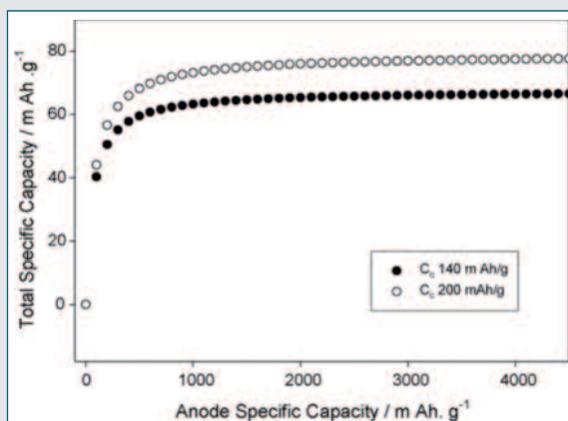


Fig. 4 - Capacità totale di un accumulatore litio-ione 18650, in funzione della capacità del materiale anodico, per un catodo con capacità di 140 mAhg^{-1} (pallini neri), ed un catodo con capacità di 200 mAhg^{-1} (pallini bianchi) [13]. Immagine ottenuta dal riferimento [13] con licenza Elsevier n. 2982590762387

con conseguente perdita della capacità dell'accumulatore. Lo sviluppo di materiali nanostrutturati ha permesso di migliorare enormemente le prestazioni di questi materiali; la riduzione della dimensione delle particelle fa in modo che il materiale subisca meno lo stress meccanico, limitando così il fenomeno della polverizzazione del materiale attivo e della perdita della capacità al procedere dei cicli. Inoltre, la diminuzione della dimensione delle particelle diminuisce il cammino diffusionale del litio migliorando notevolmente la risposta del materiale ad alte correnti. Il problema legato ai materiali nanostrutturati è la minore densità volumetrica che si riflette in una bassa densità d'energia volumetrica; inoltre, l'elevata area superficiale che caratterizza questi materiali provoca una maggiore presenza di fenomeni di decomposizione dell'elettrolita con conseguente aumento dei problemi di sicurezza legati al dispositivo. Una possibile soluzione al problema è l'uso di materiali compositi metallo-carbone nanostrutturati, in cui le particelle nanometriche sono disperse in una matrice carboniosa. La matrice carboniosa migliora la stabilità del materiale tamponando la variazione di volume del metallo, inoltre l'ottimizzazione della morfologia permette di ottenere un materiale con maggior densità volumetrica. Un esempio è il composito stagno-carbone, proposto dal gruppo di ricerca di Scrosati, ottenuto per decomposizione in ambiente riducente di un gel resorcinolo-formaldeide

impregnato con un composto organo-metallico dello stagno [12].

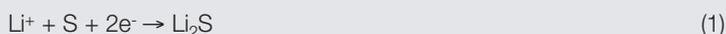
Le immagini TEM riportate in Fig. 3A mostrano la morfologia del composto in cui le nanoparticelle di stagno sono intrappolate nella matrice carboniosa. Questa morfologia permette di ottenere una notevole stabilità, come si può vedere dal grafico di capacità specifica in funzione del numero dei cicli riportato in Fig. 3B.

Infatti, grazie alla presenza della matrice carboniosa che tampona la variazione di volume dello stagno, viene migliorata notevolmente la stabilità del materiale e si incrementa la densità volumetrica del materiale aumentandone la densità d'energia volumetrica.

Nonostante lo sviluppo di materiali anodici con elevata capacità specifica, la capacità dell'accumulatore litio-ione è comunque limitata dalla capacità specifica dei materiali catodici, come si può vedere dalla Fig. 4, dove viene riportata la capacità gravimetrica totale (che comprende, oltre al peso dei materiali catodici ed anodici, il peso degli altri compo-

menti della cella: portacorrente, separatore ecc.) di un accumulatore litio-ione in funzione della capacità del materiale anodico [13].

I materiali catodici a base di ossidi di metalli di transizione (LiCoO_2 , LiFePO_4 , $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$, $\text{LiCo}_{1/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}$) hanno capacità specifiche che non superano i 200 mAhg^{-1} ; per questo è necessario lo sviluppo di nuovi materiali catodici che permettano di raggiungere densità d'energia superiori a 400 Wh/kg che permetterebbero di far raggiungere ad un'auto elettrica un'autonomia superiore ai 450 km . La reazione di conversione dello zolfo a solfuro di litio (1), presenta una tensione di lavoro di $2,23\text{V}$ vs Li^+/Li ed ha una capacità specifica teorica di 1.675 mAhg^{-1} , un ordine di grandezza superiore rispetto ai convenzionali catodi ad intercalazione:



Queste caratteristiche permetterebbero di sviluppare accumulatori a elevata densità d'energia, fino a raggiungere i 600 Wh/kg , garantendo un'autonomia maggiore di 400 km ad un'auto elettrica. Questa tecnologia è ancora in fase di sviluppo a causa dei problemi che presenta. La reazione di riduzione dello zolfo a solfuro di litio procede per fasi successive con la formazione di una serie di polisolfuri, nell'ordine: S_8 , Li_2S_8 , Li_2S_6 , Li_2S_4 , Li_2S_2 , Li_2S ; la solubilità dei polisolfuri all'interno dell'elettrolita rappresenta il principale problema di questo tipo di sistema; infatti la solubilizzazione dello zolfo all'interno della soluzione elettrolitica provoca una perdita del materiale attivo con la conseguente perdita della capacità dell'accumulatore al procedere dei cicli di carica e scarica. La bassa conducibilità elettronica dello zolfo si riflette nel cattivo comportamento del materiale quando si utilizzano elevate correnti. Inoltre, il sistema prevede l'uso del litio metallico come anodo, con tutti i problemi di sicurezza che questo implica, oltre al problema della formazione di dendriti che possono andare a cortocircuitare la cella. L'ottimizzazione della morfologia del materiale catodico permette di migliorare le prestazioni del sistema. L'inclusione del materiale attivo all'interno di una matrice carboniosa limita la solubilizzazione dei polisolfuri, non essendo lo zolfo a diretto contatto con la soluzione elettrolitica, inoltre, la resistenza elettronica complessiva del materiale composito è notevolmente inferiore grazie alla presenza della matrice carboniosa, migliorando così le prestazioni ad elevate correnti. Un esempio di questo tipo di morfologia è riportato in Fig. 5 in cui lo zolfo viene disperso all'interno di nano-sfere di carbone [14].

I problemi di sicurezza legati all'uso del litio metallico nelle batterie litio-zolfo possono essere aggirati dall'uso di materiali anodici alternativi ad elevata capacità specifica. Questo tipo di approccio è stato per la prima volta dimostrato dal gruppo di Scrosati, utilizzando un catodo a base di solfuro di litio ed un anodo ad elevata capacità specifica a base di stagno-carbone ed utilizzando un elettrolita polimerico di polietilenoossido (PEO), uno schema di questo tipo di accumulatore viene riportato in Fig. 6A. Come si può vedere dai profili di potenziale della cella, riportati in Fig. 6B, il sistema mostra una capacità specifica riferita al materiale catodico di 600 mAhg^{-1} , da cui deriva una densità d'energia di 1.100 Wh/kg [15]. Questo tipo di tecnologia è ancora lontana da un'applicazione pratica

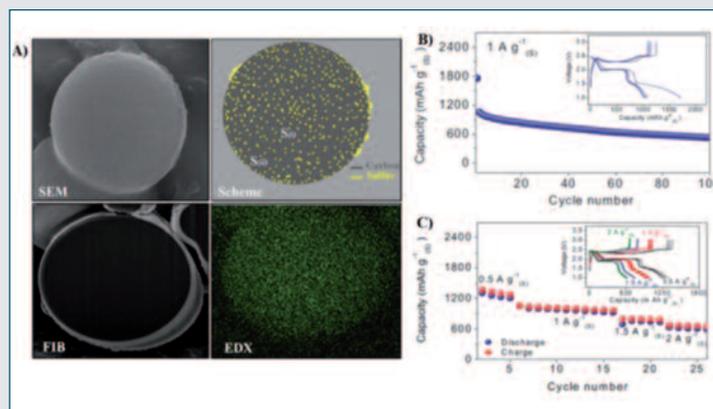


Fig. 5 - A) Immagine SEM, rappresentazione schematica, ed analisi EDX (in verde è evidenziato lo zolfo) del nanocomposito zolfo carbone; B) e C) prestazioni elettrochimiche in cella a litio del nanocomposito zolfo carbone [14]. Immagini ottenute con licenza Elsevier n. 2984330036119 dal riferimento [14]

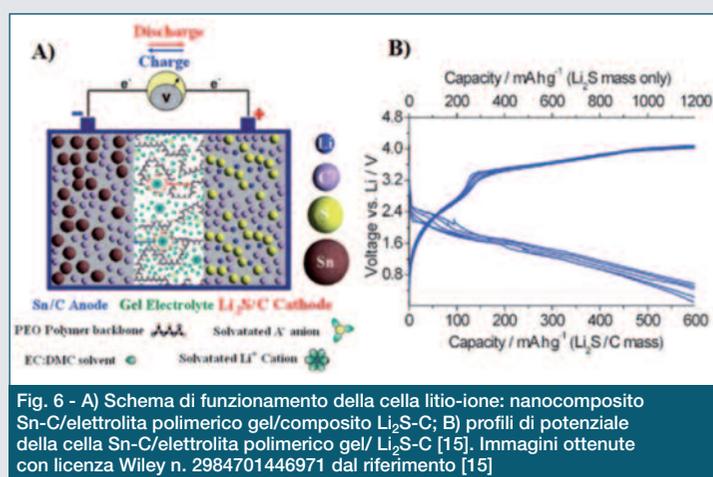
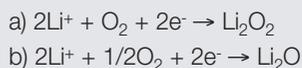


Fig. 6 - A) Schema di funzionamento della cella litio-ione: nanocomposito Sn-C/elettrolita polimerico gel/composito $\text{Li}_2\text{S-C}$; B) profili di potenziale della cella Sn-C/elettrolita polimerico gel/ $\text{Li}_2\text{S-C}$ [15]. Immagini ottenute con licenza Wiley n. 2984701446971 dal riferimento [15]

ma la ricerca in questo campo procede velocemente, facendo prevedere la possibile applicazione di questo sistema in un prossimo futuro. Un secondo tipo di accumulatori ad elevata densità d'energia sono quelli che sfruttano la reazione di formazione del perossido e dell'ossido di litio:



Uno schema di questo tipo di accumulatori è riportato in Fig. 7 [16]. Questo tipo di accumulatori presenta una tensione di 3 V ed una possibile densità d'energia pratica di 1.700 Wh/kg , valore paragonabile ai combustibili fossili [17]. Tali caratteristiche hanno posto in primo piano questo tipo di sistema, che ancora richiede un notevole sviluppo per poter essere applicabile. Le prospettive di sviluppo di questo sistema non prevedono un possibile uso in dispositivi pratici nell'immediato futuro. I sistemi litio aria, o più correttamente litio ossigeno, aprono infatti questioni completamente nuove rispetto ai sistemi litio-ione. La tecnologia litio-ione convenzionale prevede che l'accumulatore sia assemblato ed utilizzato in atmosfera inerte, tipicamente argon, in modo da eliminare gli effetti deleteri dell'ossigeno. La presenza dell'ossigeno nel sistema pone quindi una serie di problemi nuovi in particolare legati all'instabilità



Fig. 7 - Rappresentazione schematica di un accumulatore litio aria [16]. Immagine ottenuta con licenza Wiley n. 2984781121971 dal riferimento [16]

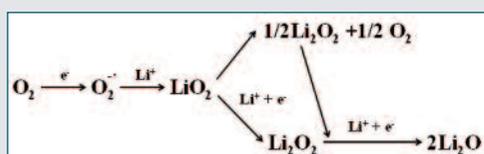


Fig. 8 - Meccanismo proposto per la riduzione dell'ossigeno nei sistemi litio aria [18]. Immagine ottenuta con licenza Wiley n. 2984721154568 dal riferimento [18]

cella litio aria che utilizza un elettrolita a base di tetraetilenglicole dimetil etero [20-21]. Lo sviluppo di questo sistema è comunque ancora lontano da un'applicazione pratica, comunque le prospettive di sviluppo sono estremamente promettenti. La necessità di sistemi d'accumulo sicuri e con elevata densità d'energia è sempre più impellente, lo sviluppo dei sistemi litio-ione può essere una risposta a questo bisogno.

degli elettroliti in condizioni ossidanti, e alla presenza della specie O_2^- fortemente basica che si forma come intermedio di reazione, come proposto dal meccanismo di reazione in Fig. 8 [18]; questo rende inutilizzabili gli elettroliti a base di carbonati convenzionalmente usati, per via della presenza dell'idrogeno in alfa al carbonile con proprietà acide [19].

Lo sviluppo di nuovi elettroliti che siano stabili in queste condizioni è quindi necessario per una possibile applicazione del sistema. Inoltre, il sistema soffre di un'elevata sovratensione della reazione catodica, questo rende necessario lo sviluppo di catalizzatori che ne migliorino la cinetica ma che allo stesso tempo non provochino reazioni di decomposizione dell'elettrolita [16]. La possibilità di un utilizzo pratico del sistema è inoltre subordinata allo sviluppo di membrane che permettano il passaggio dell'ossigeno al lato catodico ma che blocchino il passaggio dell'acqua e dell'anidride carbonica, deleteri al sistema.

Infine, il sistema prevede l'utilizzo del litio come materiale anodico, con i problemi di sicurezza già descritti che questo comporta. L'impiego di elettroliti con legame etero, quindi più stabili in presenza di specie basiche, permette di ottenere ottime prestazioni come dimostrato nella più recente letteratura; in particolare in Fig. 9 vengono mostrati i profili di potenziale di una

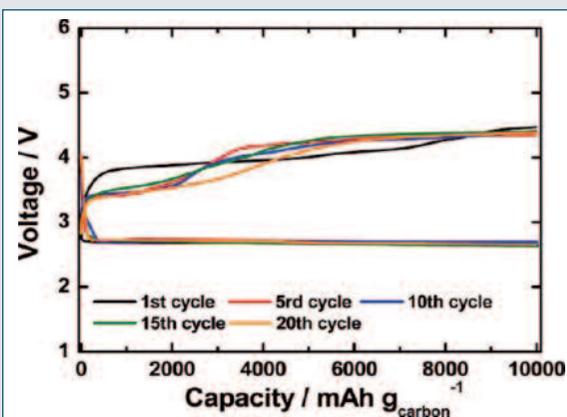


Fig. 9 - Profili di potenziale dell'accumulatore litio aria che utilizza l'elettrolita a base di tetraetilenglicole dimetil etero [21]. Immagine ottenuta dal riferimento [21] dietro permesso dell'American Chemical Society, Copyright © 2012, American Chemical Society

Bibliografia

- [1] H. Ikeda *et al.*, Proc. Manganese Dioxide Symp., Vol. 1, A. Kozawa, R.H. Brodd (Eds.) Cleveland, OH, 1975.
- [2] D.W. Murphy *et al.*, *Mat. Res. Bull.*, 1978, **13**, 1395.
- [3] M. Lazzari, B. Scrosati, *J. Electrochem. Soc.*, 1980, **127**, 773.
- [4] T. Nagaura, K. Tozawa, *Prog. Batteries Solar Cells*, 1990, **209**, 9.
- [5] J. Jiang, J.R. Dahn, *Electrochemistry Communications*, 2004, **6**, 39.
- [6] K. Zaghib *et al.*, *J. Electrochem. Soc.*, 1998, **145**, 3135.
- [7] B. Scrosati, J. Garche, *J. Power Sources*, 2010, **195**, 2419.
- [8] M. Armand *et al.*, *Nature Materials*, 2009, **8**, 621.
- [9] E. Markevich *et al.*, *Electrochemistry Communications*, 2006, **8**, 1331.
- [10] M. Ishikawa *et al.*, *J. Power Sources*, 2006, **162**, 658.
- [11] A. Guerfi *et al.*, *J. Power Sources*, 2010, **195**, 845.
- [12] G. Derrien *et al.*, *Adv. Mater.*, 2007, **19**, 2336.
- [13] U. Kasavajula *et al.*, *J. Power Sources*, 2007, **163**, 1003.
- [14] J. Hassoun *et al.*, *J. Power Sources*, 2012, **202**, 308.
- [15] J. Hassoun, B. Scrosati, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2010, **49**, 2371.
- [16] A. Débart *et al.*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2008, **47**, 4521.
- [17] G. Girishkumar *et al.*, *J. Phys. Chem. Lett.*, 2010, **1**, 2193.
- [18] J. Hassoun *et al.*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2011, **50**, 2999.
- [19] S.A. Freunberger *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, 2011, **133**, 8040.
- [20] H.-G. Jung *et al.*, *Nature Chemistry*, 2012, **4**, 579.
- [21] H.-G. Jung, *et al.*, *Nano Lett.*, 2012, **12**, 4333.

ABSTRACT

Lithium-Ion Batteries, Key Elements for a Sustainable Energy Policy

The lithium ion batteries are an energy storage system with a high energy density. Initially key to developing portable electronics, are now of fundamental importance in the more complex framework of sustainable energy. The use of lithium-ion systems, however, presents a number of problems to be solved. This article describes how these systems work and the possible way to obtain storage devices with higher performance.